

ASAN REPORT

시뮬레이션 기법을 통한 미사일 방어체계 효과 분석

김종우, 김진우, 안성규, 함건희

2017년 7월



Asan Report

시뮬레이션 기법을 통한 미사일 방어체계 효과 분석

김종우, 김진우, 안성규, 함건희

2017년 7월

아산정책연구원

우리 연구원은 한반도와 동아시아 그리고 지구촌 현안에 대한 깊이 있는 정책 대안을 제시하고 올바른 사회담론을 주도하는 싱크탱크를 지향합니다. 특히 통일-외교-안보, 거버넌스, 공공 정책-철학 등의 분야에 역량을 집중하여 우리가 직면한 대내외 도전에 대한 해법을 모색함으로써 한반도의 평화와 통일 및 번영을 위한 여건 조성에 노력하고 있습니다. 또한 공공외교와 유관분야 전문가를 육성해 우리의 미래를 보다 능동적으로 개척할 수 있는 역량을 키우는 데 이바지하고자 합니다.

계량분석프로그램

복잡한 정책 이슈들을 해결하기 위한 여러 가지 방법 중, 계량적인 접근방법이 때로는 가장 합리적인 해결방법이 될 수 있습니다. 아산정책연구원 계량분석센터의 주 업무는, 정책수립을 위한 모델링과 시뮬레이션을 통하여 정책의 판단근거를 제시하고, 이를 통해 정책결정에 도움을 주는 것입니다. 계량분석센터는 수리적 방법인 계량분석, 통계적 도구 등을 활용하여 여러 정책들을 분석하고 평가하며, 이 결과를 바탕으로 미래에 필요한 정책대안을 개발합니다. 또한 아산정책연구원 내의 타 센터의 연구를 지원하고, 국내외 주요 연구기관들과 협력적 파트너십을 구축하여 공동연구도 수행하고 있습니다.

* 본 보고서의 내용은 연구원의 공식 입장이 아닌 저자들의 견해입니다.

저자

김 종 우

김종우 박사는 아산정책연구원의 계량분석프로그램 선임연구위원이다. 런던대학교에서 이학 학사와 임페리얼 컬리지에서 상대성이론 연구로 이학박사 학위를 취득하였으며 캠브리지대학교 컴퓨터학과에서 Diploma 학위도 취득하였다. 유럽 랜드연구소의 Choice Modelling과 Valuation팀에서 연구원으로 재직하였으며 삼성 메모리 반도체 연구소에서 책임연구원으로 활동하였다. 또한 영국의 PCMS-Datafit에서 Java 소프트웨어 개발업무를 담당하였다. 주요 연구분야는 이산선택모델, 그리고 교통, 보건, 통신 및 유틸리티 분야의 Stated Preference 모델 개발, 공공 서비스가치 측정, WTP (Willingness-To-Pay) 등이다. 주요 연구물로는 “Security at What Cost? Quantifying Individuals’ Trade-offs between Privacy, Liberty and Security,” RAND Report (2010)와 “Modelling Demand for Long-Distance Travellers in Great Britain: Stated preference surveys to support the modelling of demand for high speed rail”, RAND Report (2011)외 다수가 있다.

김 진 우

김진우 박사는 아산정책연구원의 경영지원본부장이자 수석연구위원이다. 미 로렌스 리버모어 국립연구소에서 선임분석관으로 정책, 군사, 정보 관련 업무를 담당하였다. 또한 미 전략사령부(STRATCOM)와 NATO의 핵 억지력 및 타격작전에 대해 자문역할을 수행하였고, 미 국무부 검증·준수·이행국 총괄 선임고문으로 재직했다. 미 국무부에 합류하기 이전, 미 국방부 산하 총괄평가국 국장이었던 Andrew Marshall의 특별 보좌관을 역임했다. 김진우 박사는 미 조지타운대학교에서 학사, 하버드대학교에서 석사, 예일대학교에서 박사학위를 취득하였다.

안 성 규

안성규 전 전문위원은 아산정책연구원 편집실의 주관을 지냈다. 현재 성균관대학교 박사과정에 있다. 중앙일보에서 30년 가까이 정치부·국제부 등에서 취재를 했으며 통일·외교팀 팀장,

중앙일보 일요판 신문인 중앙SUNDAY의 외교·안보에디터 등을 역임했다. 모스크바 특파원을 지냈고 이후 독립국가연합(CIS)의 순회 특파원도 했다. 기자 초기에 북한의 국가 형성 과정을 집중 취재한 기획 시리즈에 동참했다. 그 시리즈는 학계의 북한 연구에도 크게 기여했으며 그 취재 내용을 담아 『비록 조선민주주의 인민공화국』(1992, 중앙일보)을 공저로 출판했다. 최근 사망한 故 김정일 국방위원장의 아들 김정남을 인터뷰한 유일한 한국 기자다. 아산정책연구원에서는 중국의 미사일 전력, 중국의 미사일방어체계, 사드 문제 등을 연구했다. 주요 연구물로 ‘중국 탄도 미사일이 한반도에 던지는 함의(공저)’, ‘한반도 사드 배치와 중국’, ‘중국 미사일 방어망의 역사와 한반도에 대한 함의’ 등이 있다.

함 건 희

함건희는 아산정책연구원의 연구원이다. 고려대학교 정보수학과를 졸업하고, 성균관대학교에서 통계학 석사학위를 취득했다. 성균관대학교 응용통계연구소 연구원, 한국국방연구원에서 위촉연구원으로 재직한 바 있으며, 연구 관심분야는 혼합모형, 결측자료 분석, 방법론 등이다.

감사의 글

편집에 도움을 준 권은율 전문원, 자료 수집에 수고해준 Ben Forney 연구원, 그리고 인포그래픽 및 디자인을 제작해준 최성한 전 선임전문원에게 감사의 말씀을 드립니다. 마지막으로 보고서 완성까지 귀중한 조언을 해주신 최강 부원장님, 전성훈 박사님께 깊은 감사의 말씀 드립니다.

“Perfect is the enemy of good” Voltaire,
La Béguéule, Conte Moral, 1772

“Striving to better, oft we mar what’s well.” Duke of Albany,
King Lear, Act I, Scene 4

“너무 완벽함을 추구하다 보면 선(善)을 놓칠 수도 있다.”

목차

1. 들어가며	13
2. 대한민국 안보 현황과 비교	14
3. 북한의 미사일 위협과 방어체계에 관한 시뮬레이션	17
4. 결론	23
부록 1 - 방법론	27
부록 2 - 시뮬레이션 세부 내용	44
부록 3 - 2중 방어망 운용 시 leakage rate 개선 효과	73
부록 4 - Leakage rate 그래프와 Pr(no leakage)	75

그림

[그림 1]	2020년 북한이 확보할 핵 미사일 규모에 대한 예측	15
[그림 2]	사드와 PAC-3 2중 방어 개념도	17
[그림 3]	단층 방어망과 2중 방어망 비교	18
[그림 4]	미사일 발사 후 구간별 고도와 속도 변화 개념도	19
[그림 5]	적 미사일 3발에 대한 사드 4발과 PAC-3 3발 방어	28
[그림 6]	요격미사일 분배 방식	28
[그림 7]	Tier-1의 요격 성공과 실패 경우의 수와 확률	29
[그림 8]	Tier-2의 요격 성공과 실패 경우의 수와 확률	31
[그림 9]	Tier-2의 요격 성공과 실패 경우의 수와 Pr(no leakage)	32
[그림 10]	단층 방어망에서 적 미사일 1발 당 대응하는 요격미사일 수에 대한 leakage rate	35
[그림 11]	Tier-1에서 다양한 SSPk에 대한 leakage rate 그래프	36
[그림 12]	Tier-2의 leakage rate 그래프 (W=50)	37
[그림 13]	Tier-1과 Tier-2의 leakage rate 그래프 (W=50)	38
[그림 14]	사드의 SSPk가 다를 경우 leakage rate 그래프 (W=50)	39
[그림 15]	Tier-1 이후 상황에 따른 Tier-2에서의 두 가지 대응	40
[그림 16]	Tier-1에서 격추된 적 미사일 수에 따른 확률분포	41
[그림 17]	적 미사일 수가 다를 경우 leakage rate 그래프 모양 변화 (W=10, 50)	43
[그림 18]	Tier-1에서 격추된 적 미사일 수에 대한 확률분포 (W=10, 50)	43
[그림 19]	PAC-3 단층 방어망에서 SSPk와 요격미사일 수에 따른 leakage rate 그래프	44
[그림 20]	사드: 2발, PAC-3: 2발 (SSPk: 0.6, 0.6, W=100)	47
[그림 21]	사드: 3발, PAC-3: 2발 (SSPk: 0.9, 0.6, W=100)	48
[그림 22]	사드: 2발, PAC-3: 2발 (SSPk: 0.6~0.7, W=100)	54
[그림 23]	사드: 3발, PAC-3: 2발 (SSPk: 0.6~0.7, W=100)	55

[그림 24]	사드: 3발, PAC-3: 3발 (SSPk: 0.6~0.7, W=100)	56
[그림 25]	Tier-1에서 SSPk와 최대 3발의 요격미사일 수에 따른 leakage rate 그래프	59
[그림 26]	Tier-1에서 SSPk와 최대 5발의 요격미사일 수에 따른 leakage rate 그래프	60
[그림 27]	사드: 3발, PAC-3: 2발 (SSPk: 0.7, 0.8, W=100)	71

표

[표 1]	Tier-1 직후 나타날 수 있는 경우의 확률	30
[표 2]	Tier-2 직후 나타날 수 있는 경우의 확률	33
[표 3]	2중 방어망 구축 시 개선 효과가 6.25배 향상되는 조합	47
[표 4]	2중 방어망 구축 시 개선 효과가 1,000배 향상되는 조합	49
[표 5]	상층 방어망 설치 시 Terminal leakage rate (TLR) 개선 효과	49
[표 6]	PAC-3의 SSPk: 0.6~0.7, 2발 요격 기준	50
[표 7]	PAC-3의 SSPk: 0.8~0.9, 3발 요격 기준	51
[표 8]	가장 낮고 높은 요격 수준의 방어망 체계에 따른 적 미사일의 평균 관통 수	52
[표 9]	SSPk가 0.6~0.7에서 사드와 PAC-3를 2발과 3발 요격 시 가능한 조합들	53
[표 10]	적 미사일 100발 공격 시 요격에 드는 비용 (사드와 PAC-3의 SSPk: 0.8)	57
[표 11]	적 미사일 1발 당 사드 미사일 2발, 3발로 요격 시 Tier-1을 관통하는 적 미사일 수를 1발로 제한하기 위해 필요한 사드의 최소 SSPk 값 및 총 미사일 수와 포대 수	60

[표 12]	사드 2발:PAC-3 2발 요격 시 Tier-1과 Tier-2에서의 Pr(no leakage)과 관통하는 평균 미사일 수	62
[표 13]	사드 3발:PAC-3 2발 요격 시 Tier-1과 Tier-2에서의 Pr(no leakage)과 관통하는 평균 미사일 수	63
[표 14]	사드 2발:PAC-3 3발 요격 시 Tier-1과 Tier-2에서의 Pr(no leakage)과 관통하는 평균 미사일 수	64
[표 15]	사드 3발:PAC-3 3발 요격 시 Tier-1과 Tier-2에서의 Pr(no leakage)과 관통하는 평균 미사일 수	65
[표 16]	단층 방어망과 2중 방어망에서의 Pr(no leakage) - PAC-3는 2발 기준	66
[표 17]	단층 방어망과 2중 방어망에서의 Pr(no leakage) - PAC-3는 3발 기준	67
[표 18]	적 미사일 100발 공격 시 요격에 드는 비용 (사드와 PAC-3의 SSPk: 0.785)	70
[표 19]	적 미사일 100발 공격 시 요격에 드는 비용 (사드와 PAC 3의 SSPk: 0.82)	70
[표 20]	SSPk와 요격미사일 수의 조합 (W 고정 시 64개 조합)	72

* 별도로 표기한 자료 외에는 모두 저자가 제작하였음을 밝힙니다.

1. 들어가며

북한의 핵 미사일 위협이 지속적으로 증가하는 상황에서 한국 사회는 고고도미사일방어체계(Terminal High Altitude Area Defense, 사드) 배치 문제를 둘러싸고 홍역을 치르고 있다. 한·미·일 미사일 방어체계 구축에 극도의 거부감을 보이는 중국은 사드가 본격적으로 배치되기 시작되자 노골적인 경제보복 조치를 가하고 있다. 사드 배치를 둘러싸고 정치, 사회적 갈등이 높아지는 상황에서 국론을 모을 수 있는 방법은 미사일 방어체계에 대한 과학적인 연구와 평가이다. 현재 사드에 대해 ① 효율성 ② 환경영향평가 ③ 중국과의 관계 ④ 절차 ⑤ 비용 같은 문제들이 제기된다. 그러나 군사적 효율성이 가장 중요한 항목이므로 다른 요인들은 배제한 후 사드 방어 효과의 관점에서 연구를 진행하였다.¹ 본 연구가 제시하는 객관적이고 논리적인 평가에 따르면, 시뮬레이션 전제 조건하에 예상되는 북한의 핵 전력에 대한 ‘충분한 방어’²를 위해서는 사드 한 개 포대로는 부족하며, 최소 5~7개의 사드 포대가 있어야 주요 지역방어가 가능하다.³

북한의 미사일을 현재의 요격 체계만으로 방어하는 것은 한계가 있다. 현재 한국의 미사일방어체계는 Patriot 시스템에 대부분 의존하고 있으며 북한의 핵 미사일 위협에 대응하기에는 부적절하다. 현실적으로 한국에 당장 구축 가능한 다층 미사일 방어체계는 사드와 PAC-3로 구성된 2중 방어망이다. 본 연구 시뮬레이션 결과 60% 이상의 요격 정확도를 갖춘 사드 체계 도입 시 PAC-3 단층 방어망에 비해 방어 능력이 최소 6배에서 최대 1,000배 개선된다. 또한 사드가 78.5% 이상의 요격 정확도를 갖추야 ‘충분한 방어’가 이뤄질 수 있으며, 이 경우 ‘적의 미사일을 완전히 격추 시킬 확률’이 단일 방어망의 37%에서 95.5%로 향상되었다. 본 연구는 방어체계의 구성에 따라 ‘충분한 방어’를 만족하는 사드의 조건을 제시하였다.⁴ 더욱 실효성 있는 방어를 위해 Kill-Chain의 선제타격 능력을 강화해 이

1. 다만 공개된 미사일 방어체계의 정보가 적어 실제 일어날 수 있는 다양한 운용, 기술적인 요인들을 시뮬레이션에 충분히 반영하지 못한 한계점이 있다.

2. 본 연구에서는 ‘적의 미사일을 완전히 격추 시킬 확률’이 90% 이상이 되는 것을 ‘충분한 방어’의 기준으로 제시하였다.

3. 이는 시뮬레이션 조건하에 나온 결과로서, 5~7개의 사드 포대가 추가됨으로 남한 전 지역에 대한 방어가 가능하다는 것이 아님을 주의해야 한다. 자세한 시뮬레이션의 전제 조건은 3장 참고.

4. 시뮬레이션 결과와 ‘충분한 방어’에 대한 자세한 내용은 3장 참고.

동식 발사대와 같은 발사 수단을 최대한 제거해야 하며, 여기서 살아남은 제한된 적 미사일에 한해 2중 방어망으로 대응한다면 미사일 방어 효과를 극대화할 수 있다. 이때 사드가 요격의 주축이 되고 PAC-3는 사드를 지원하는 역할을 해야 한다. 더불어 한국이 독자 개발 중인 M-SAM(중거리 지대공 미사일)과 L-SAM(장거리 지대공 유도무기)까지 기존 체계에 더해진다면 미사일 방어에 드는 비용을 큰 폭으로 줄일 수 있게 된다.

물론 사드가 100% 검증되지 않은 무기체계이기 때문에 북한의 미사일을 완전히 방어할 수 있는가라는 의문은 여전히 남는다. 적의 모든 미사일을 100% 완벽하게 요격할 수 있는 완전한 방어는 기술적으로 불가능하다. 그러나 불완전한 방어체계가 유용성이 없는 것은 아니다. 미사일 방어망의 요격 정확도가 높을수록 안보가 증진된다는 점을 고려하면 사드가 필요 없다는 주장은 수리적 시뮬레이션의 결과에 비춰볼 때 근거가 취약하다. 본 연구에서 사용한 시뮬레이션 기법의 세부적인 가정, 설계 등 전문적인 내용은 부록에 포함 시켰다.

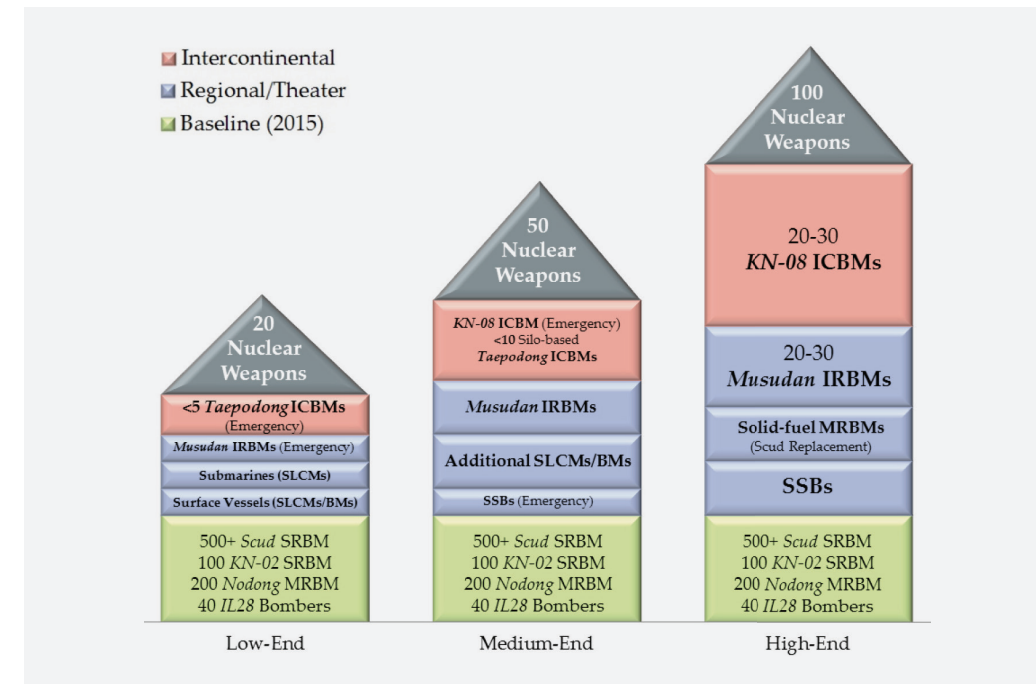
2. 대한민국 안보 현황과 비교

북한의 계속된 핵 미사일 개발로 대한민국의 안보 환경은 그 어느 때보다 좋지 않은 상황이다. 북한은 2006년 첫 번째 핵실험을 실시한 이래 2016년 9월에 5차 핵실험을 단행하였다. 5차 핵실험의 폭발력이 10~30kt 정도로 추정되는 만큼 북한의 핵개발 기술은 어느 정도 완성단계에 진입한 것으로 보인다. 2020년까지는 최대 100개의 핵 무기를 확보할 것으로 예상되며,⁵ 현재 이동식 미사일 발사대도 다량 보유한 것으로 보인다. 북한은 2017년 들어서도 다수의 미사일을 발사했는데, 2월 12일 고체연료를 장착한 북극성 2호 미사일을 기습 발사하였고, 3월 6일에는 탄도미사일 4기를 발사해 다량의 탄도미사일을 동시 다발적으로 발사할 수 있는 능력이 있음을 보여주었다. 새 정부 출범 이후에도 북한은 미사일 도발을 지속해오고 있다.

현재 한국이 보유한 미사일 방어체계는 북한의 미사일 공격을 제대로 방어할 수 있는 능력

5. Joel S. Wit, Sun Young Ahn, 'North Korea's Nuclear Futures: Technology and Strategy' US-KOREA INSTITUTE AT SAIS, 2015.

[그림 1] 2020년 북한이 확보할 핵 미사일 규모에 대한 예측



출처: Joel S. Wit, Sun Young Ahn, 'North Korea's Nuclear Futures: Technology and Strategy' US-KOREA INSTITUTE AT SAIS, 2015.

이 없다. 이와 반대로 한국과 비슷한 안보상황에 처해 있는 이스라엘의 경우 효과적인 다층미사일 방어시스템을 구축한 것으로 알려져 있다.

이스라엘은 헤즈볼라, 이란 등 주변의 적대세력으로부터 야기되는 다양한 사거리의 미사일 위협에 대처하기 위하여 다층 미사일 방어망을 구축하고 있다. 구체적으로 이스라엘은 2017년부터 4중 구조의 촘촘한 미사일 방어망을 운용하고 있다: (1) 요격 고도가 외기권인 Arrow-3, (2) 요격 고도가 성층권인 Arrow-2, (3) 종말 단계의 David's Sling, (4) 단거리 미사일과 포탄 격추도 가능한 Iron Dome 방어 시스템. 이러한 4중 미사일 방어체계는 가자지구나 레바논에서 날아올 수 있는 단거리 미사일은 물론 이란에서 발사될 수 있는 중거리 탄도미사일로부터 이스라엘을 방어할 수 있다.

안보위협 차원에서 이스라엘과 한국의 차이점은 북핵 위협에 직면한 한국과 달리 이스라

엘은 현재 핵 보유국으로부터 위협을 받지 않는다는 것이다. 이스라엘은 1981년 6월 이라크의 오시락 핵시설을 선제 공격했고 2007년 9월 시리아의 원자로 시설도 공습하여 제거하는 등 자국에 대한 핵 위협을 사전에 제거하면서 중동 유일의 핵 보유국 지위를 지켜왔다. 이와 함께, 독자적으로 정교한 기술을 발전시켜 현재의 다층 미사일 방어체계를 운영하고 있다.

현재 미국의 경우 운용하는 미사일 방어 시스템은 모두 8가지에 달하는데, 미국 본토와 동맹국들을 방어하는 데 이 시스템들을 배치하고 있다. 가장 중요한 4가지 시스템은 요격고도가 외기권인 지상기반 외기권 방어(Ground-based Midcourse Defense, GMD), 요격고도가 500km인 Aegis Sea-based SM-3, 고고도(40~150km)인 사드, 저고도(20~40km)인 PAC-3이다. GMD 시스템을 제외한 모든 시스템은 세계 여러 곳에 배치되어 있으며, 2015년에는 2중 방어망에 의한 요격미사일 실험을 성공적으로 마쳤다.⁶ 또한 2017년 5월 미국 본토에 대한 북한의 대륙간 탄도미사일(Intercontinental Ballistic Missile, ICBM) 공격을 상정하고 가진 첫 요격시험에서 가상의 ICBM을 격추하는 데 성공했다고 미 국방부가 밝혔다.

이스라엘과 미국의 미사일 방어체계 구축 노력에 비추어 볼 때, 한국의 사드 배치 필요성은 분명해진다. 북한의 미사일 위협에 비해 한국이 보유한 미사일 방어 능력이 턱없이 부족한 사실을 고려하면, 사드 배치를 둘러싼 논란이 얼마나 부적절하고 무책임한 것인지 자명해진다.

아래에서는 북한 미사일 위협에 대비하기 위한 미사일 방어체계의 개별 성능과 한계를 살펴보고, 또한 시뮬레이션을 통해 비용과 성능에 따라 최적화된 방어체계의 수준을 추산하고, ‘충분한 방어’ 개념을 활용하여 각 방어체계의 형태와 요격미사일 수에 따른 성능 격차를 분석할 것이다.

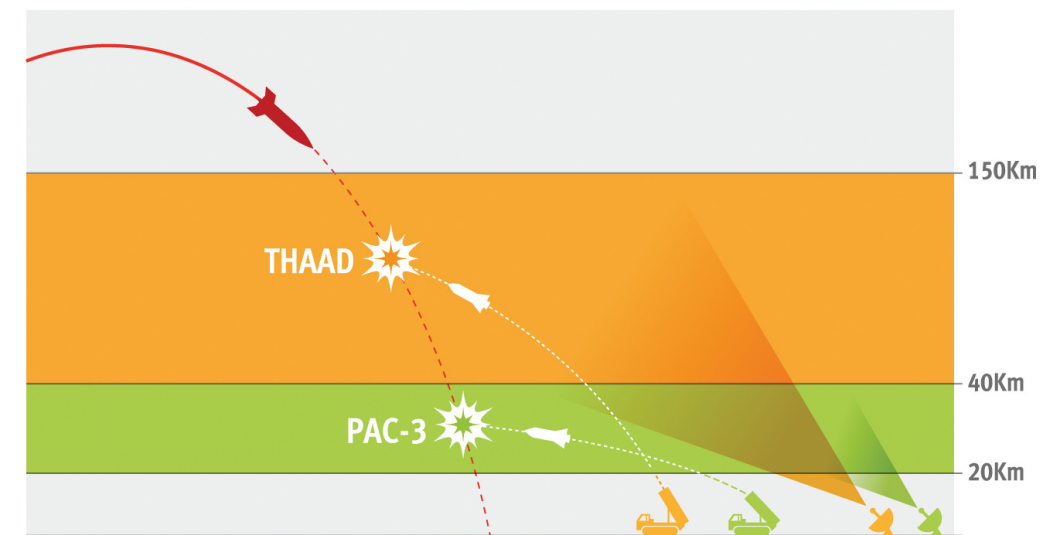
6. Aegis 시스템이 요격에 실패한 미사일을 사드 미사일로 격추시켰다.

3. 북한의 미사일 위협과 방어체계에 관한 시뮬레이션

이 장에서는 현재 일각에서 제기하고 있는 사드 배치 반대 논리는 과학적 사실에 근거를 둔 것이라고 보기 어렵다는 점을 시뮬레이션을 통해 밝혀보고자 한다. 시뮬레이션에서는 [그림 2]와 같이 사드와 PAC-3가 고도에 따라 2중 미사일 방어망을 구축하는 것으로 전제했다. 2장에서 본 바와 같이, 이런 설정은 이스라엘이나 미국에 비해 취약한 방어체계이기는 하지만, PAC-3 포대의 배치도 불충분한 한국의 현실을 감안하여 가능한 범위 내의 조건을 반영한 시뮬레이션을 설정하고자 하였다. 설정된 시뮬레이션은 고고도 방어체계인 사드가 먼저 방어하고 실패할 경우 저고도 방어체계인 PAC-3가 요격에 나서는 형태다. 이들 체계는 모두 Hit-to-Kill 방식⁷으로 요격한다.

[그림 3]의 왼쪽은 PAC-3만으로 구축된 단층 방어망을 운용하는 상황을 보여주며 오른쪽

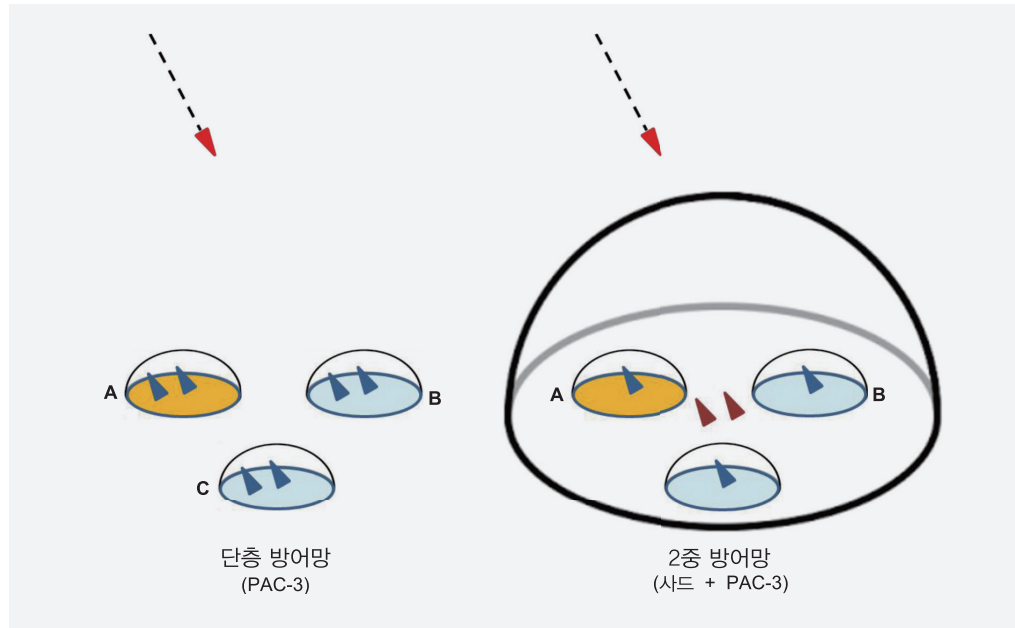
[그림 2] 사드와 PAC-3 2중 방어 개념도



인포그래픽: 최성한, 아산정책연구원.

7. 대상에 직접 부딪혀 요격하는 방식으로 적 미사일이나 탄두의 궤도에 여러 발을 발사한 뒤 스스로 요격 기회를 찾는다.

[그림 3] 단층 방어망과 2중 방어망 비교



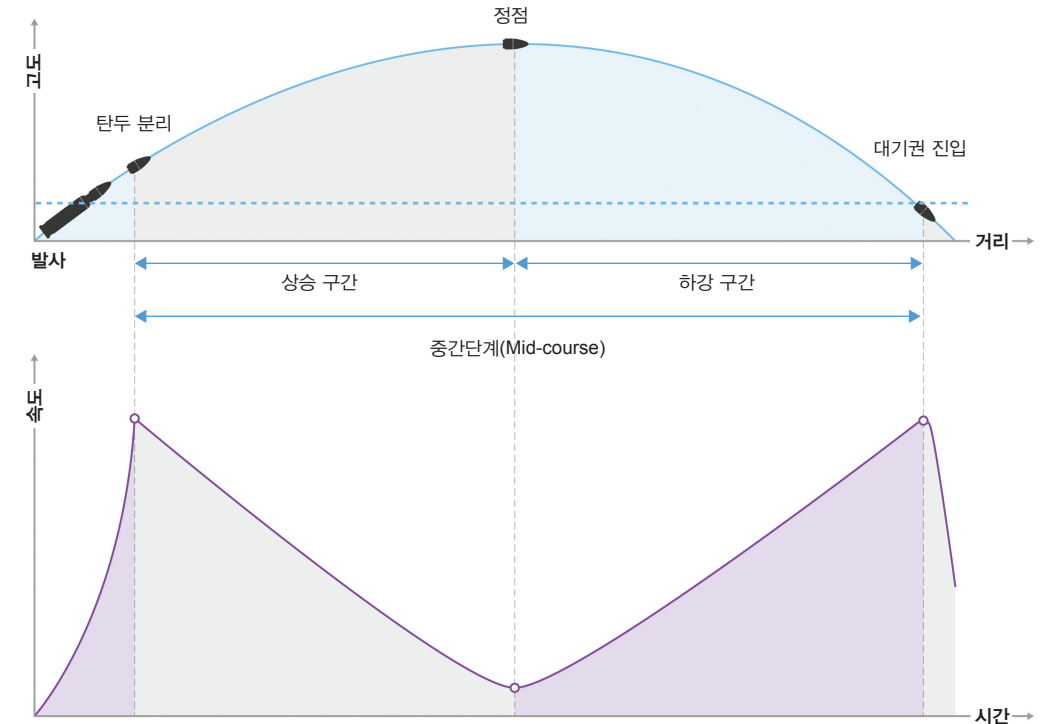
은 여기에 사드로 2중 방어망을 구축해 운용하는 상황이다. 파란 삼각형은 PAC-3 요격미사일, 고동색 삼각형은 사드 요격미사일, 빨간색 삼각형은 요격 대상인 북한의 탄도미사일을 나타낸다. 왼쪽은 PAC-3가 2발씩 표시되어 있는 반면 오른쪽은 PAC-3가 1발만 표시되어 있는 것은 사드를 배치하는 경우 PAC-3를 덜 배치하는 것을 의미하고⁸ 오른쪽은 여러 개의 PAC-3 포대가 사드 방어 범위 안에 배치되어 있음을 상징적으로 보여준다.⁹

북한이 발사한 탄도미사일은 ‘발사-연소 종료-탄두 분리-상승-하강-대기권 진입-종말’ 단계를 거치며 궤도를 따라 비행한다. 대개 3분 내외의 가속 단계를 지나 연소가 완료되면 탄두 덮개가 열리고 탄두가 방출된다. 탄두는 연소 종료 시 운동에너지의 힘으로 상승을 계속해 정점에 도달한 뒤 하강을 시작한다. 연소 종료 이후 더 이상의 추진력이 제공되지 않는 이 과정은 멀리 던진 공이 포물선을 따라 운동하는 것과 같다. 따라서 탄도미사일의 발

8. 이와 관련된 내용은 71쪽에서 확인할 수 있다.

9. 보고서의 비용을 포함한 모든 계산은 노란색으로 표시된 지역 A에 국한되어있다.

[그림 4] 미사일 발사 후 구간별 고도와 속도 변화 개념도



인포그래픽: 최성한, 아산정책연구원.

사 초기 조건을 산출할 수 있으면 미사일의 궤도와 목표 지점을 계산할 수 있다. [그림 4]는 미사일이 발사된 후 발사체의 고도와 속도 변화를 보여준다.

현대의 미사일 방어체계는 중간단계 요격에 집중하는데, 그 이유는 공기 저항이 없는 중간 단계에서는 탄두의 궤도가 일정하여 미사일 요격에 적합하기 때문이다. 미사일 요격에는 다음과 같은 요소가 필요하다. 우선 탐색 레이더가 적의 미사일을 포착하고 추적해야 한다. 그 다음 적의 미사일을 탐지한 후 지휘부가 요격 결정을 내리는 과정에서 의사소통 네트워크의 신속성과 효율성이 확보돼야 한다. 세 번째는 요격미사일의 사거리와 고도에 적 탄두가 진입해야 한다. 네 번째는 요격미사일의 가속 성능이다. 중간단계라도 원거리에서 요격하려면 가급적 빠르게 적 미사일에 접근해야 하기 때문에 충분한 가속이 필요하다. 요격미사일이 적 탄두의 속력을 따라가지 못하면 순식간에 요격 기회를 잃게 된다.

현재 사드와 PAC-3가 어떤 방식으로 요격미사일을 발사하는지에 대한 공개된 정보는 없다. 사드의 경우 적 미사일 1발당 2발의 요격미사일을 발사하는 방식인 것으로 추정된다.¹⁰ 시뮬레이션에서는 현재 미국 MDA의 실험에 사용된 방식을 고려해 사드와 PAC-3 미사일을 적 미사일 1발에 대해 각각 2발을 기본으로 하고 최대 3발까지 발사하여 요격하는 경우를 가정하였다.¹¹ 또한 격추 여부를 확인하는 ‘Assess(Look)’ 과정은 사드와 PAC-3 구간 사이에서 작동한다고 보았다.¹²

북한의 핵과 미사일 능력에 대해서 다양한 추정치가 존재하지만¹³ 시뮬레이션에서는 북한이 10, 20, 50, 100발의 미사일로 동시에 공격하는 경우를 전제하였다. 또한 사드와 PAC-3의 요격 정확도를 나타내는 지표인 SSPk¹⁴를 0.6, 0.7, 0.8, 0.9로 다양하게 가정하였다.

이러한 다양한 형태의 북한 미사일 공격 상황에서 사드와 PAC-3 미사일 각각의 SSPk와 북한 미사일 1발에 대해 발사하는 요격미사일 수를 조합한 총 256가지 시나리오에 대한 시뮬레이션 결과를 살펴보고자 한다. 요격미사일은 기술적·운용적 한계가 항상 존재하기 때문에 시뮬레이션 결과 분석 시 이 점을 함께 고려해야 한다. 그리고 어느 정도의 기술적 한계를 용납할 수 있는가와 함께 ‘충분한 방어’의 수준을 제공하는 기술의 비용적인 측면도 살펴볼 필요가 있다.

시뮬레이션 결과와 ‘충분한 방어’의 추산

본 연구는 PAC-3 단층 방어망 지역에 사드 방어망을 추가로 구축할 경우 이 지역의 방어 수준이 어느 정도 개선되는지를 수리적으로 살펴보았다. 시뮬레이션에서는 북한이 동시 다

발적으로 공격할 수 있는 미사일 수를 최대 100발로 잡았다.

PAC-3 단층 방어망

시뮬레이션 결과는 PAC-3만의 단독 방어망은 위험부담이 너무 크며 추가 미사일 방어 시스템이 꼭 필요하다는 점을 기술적으로 보여준다.¹⁵ 현재의 PAC-3 미사일 단층 방어망에서 SSPk가 0.7이라고 가정하면 적 미사일 1발당 PAC-3 2발로 요격할 경우 적 미사일에 대한 최종 SSPk는 0.9정도로 올라간다. 적이 미사일 20발을 쏘고 각각의 미사일에 대해 PAC-3 미사일을 2발씩 발사하는 경우 약 2발이 격추되지 않고 목표 지점에 떨어지게 된다. 같은 계산방식을 적용할 경우, 적이 미사일 50발로 공격하면 적 미사일 1발당 PAC-3 미사일을 3발씩 쏘아도 약 1발 이상이 격추되지 않는 것으로 분석된다. PAC-3만으로 구축된 단층 방어망에서는 1차 요격에 실패하면 추가 요격 기회가 없기 때문에 적의 공격에 의한 피해가 발생하게 된다. 이스라엘의 경우 4중 방어망 체계를 구축하여 첫 번째 방어망에서 요격에 실패해도 나머지 3중 방어망에서 다시 요격을 시도함으로써 적의 공격이 성공할 확률을 크게 낮춘다.

PAC-3만으로 구축된 단층 방어망 위에 PAC-3와 동일한 SSPk(0.7)를 갖는 사드 요격체계를 갖춘다고 가정해보자. 적이 20발의 미사일을 발사하는 경우 2중 미사일 방어망을 통과하여 피해를 입힐 적의 미사일 수는 적 미사일 한 발당 발사되는 사드 요격미사일이 2발인 경우 약 0.16, 3발인 경우 0.05발에 달한다. (적이 50발을 발사할 경우에 이 수치는 0.4, 0.12발로 늘어난다). 발사된 적 미사일 모두가 잠재적으로 핵 탄두를 싣고 있다고 가정하면 1발도 남김없이 격추시켜야 할 것이다. 적이 발사한 미사일 모두를 격추시킬 확률 [Probability of no leakage; Pr(no leakage)]¹⁶을 계산하면, 단층 방어망에서 적 미사일이 20발일 경우 15.2%(50발일 경우는 0.9%)이나 2중 방어망에서는 85~98.6%까지 증가(50발일 경우 66.6~96.4%)하는 것으로 나타났다.

2중 방어망의 미사일 방어 능력 개선 효과: 단층망의 최소 6배에서 최대 1,000배

SSPk 0.7은 진행된 시뮬레이션 범위 안에서는 비교적 낮은 수치에 속한다. 구체적으로

10. MDA(Missile Defense Agency), Ballistic Missile Defense Intercept Flight Test Record.

11. ‘북한 미사일’과 ‘적 미사일’은 같은 의미로 사용된다. 적 미사일 1발에는 오직 한 개의 탄두만 장착된 상황을 가정하였고, 여러 개의 탄두가 장착된 상황은 고려하지 않았다. 요격 대상은 스커드인 경우 미사일 자체이며 노동미사일인 경우는 (핵)탄두이다. 본문에서는 구분 없이 ‘적 미사일’로 통합하였다.

12. 부록 1 참고.

13. 국방부에서 발간한 ‘2016 국방백서’에 따르면 북한은 핵무기를 만들 수 있는 플루토늄 50여 Kg 보유하고 있는 것으로 추정하였고, 이는 10개 안팎의 핵무기를 만들 수 있는 양이다.

14. SSPk(Single Shot Probability of Kill)은 1발의 요격미사일이 적 탄도 미사일을 성공적으로 격추시킬 수 있는 확률을 의미한다. 또한 SSPk가 1.0이라는 것은 요격할 확률이 100%라는 뜻이다.

15. 보고서에서는 2중 방어망의 구성을 현재 배치되어있는 PAC-3와 배치 예정중인 사드로 보았지만 반드시 이러한 형태로 국한시켜 해석할 필요는 없다. SM-3와 사드로 구성된 2중 방어망 등의 결과로도 다양하게 적용할 수 있다.

16. Pr(no leakage)은 모든 적의 미사일을 격추시킬 확률이다. 자세한 내용은 부록 1 참고.

사드 체계를 도입하게 되면 적이 발사한 총 미사일 수 가운데 미사일 방어체계를 통과하는 미사일 개수의 비율인 leakage rate¹⁷이 PAC-3 단일 방어망에 비해 최소 6배에서 1,000배 가량 개선된다. 1,000배 개선이라는 의미는 1,000발 뚫렸던 미사일 방어망이 1발만 뚫린다는 것이다.¹⁸ 만약 단층 방어망만 구축하게 되면 다량의 PAC-3 미사일이 요격 태세를 갖추고 있어야 한다. 그러나 사드 방어망이 있다면 대부분의 적 미사일을 1차 요격하고, 이를 통과한 나머지 미사일을 2차 요격할 수 있게 된다. 그만큼 하층 방어망인 PAC-3 미사일 배치에 대한 과도한 부담이 줄어들게 될 것이다.¹⁹

‘충분한 방어’를 위해 사드 3발 요격 방식일 경우 SSPk가 0.785 이상이 돼야

시뮬레이션을 통해서 북한이 최대 100발의 미사일을 발사할 경우 ‘충분한 방어’에 필요한 최소한의 SSPk 값과 요격미사일 수에 대하여 분석해 보고자 한다. 본 연구에서는 ‘적의 미사일을 완전히 격추 시킬 확률’이 90% 이상이 되는 것을 ‘충분한 방어’의 기준으로 제시하였다. 이는 한국이 얼마만큼 위험 부담(risk-tolerance)을 감내할 수 있는가의 정도를 말한다. ‘완전히 적의 미사일을 격추시킬 확률’이 90%가 되면 미사일 방어망을 뚫는 평균 적의 미사일 수는 1발보다 훨씬 적은 약 0.1발 정도가 된다.

적의 미사일 1발에 대해 사드 3발과 PAC-3 2발로 요격할 경우 각각의 SSPk가 0.785이면 ‘완전히 적의 미사일을 격추시킬 확률’은 95.5%에 달한다. 같은 SSPk 가정하에서 사드 3발과 PAC-3 3발로 요격할 경우에는 99%가 된다. 만약 사드 2발과 PAC-3 2발로 요격할 경우 SSPk가 각각 0.82이면 ‘완전히 적의 미사일을 격추시킬 확률’은 90%에 달한다. SSPk가 각각 0.82인 경우 사드 2발과 PAC-3 3발로 요격하면 98.1%가 된다. 그러므로 사드 SSPk가 적어도 0.785 이상은 되어야만 ‘충분한 방어’ 기준에 부합한다고 할 수 있다.

본 연구에서 제시한 ‘충분한 방어’의 기준을 충족하기 위해서는 천문학적 비용이 들어간다.²⁰ 비용을 줄이기 위해서는 무조건적인 사드와 PAC-3의 추가 배치보다는 한국이 독자 개발 중인 L-SAM과 M-SAM의 활용도를 높여 사드 및 PAC-3체계와 연동하는 방식을 생각해 볼 수 있다. L-SAM과 M-SAM은 사드와 PAC-3 같은 요격 능력 구축을 목표

로 하면서도 가격이 저렴해 고정비용과 소모성 비용 모두를 크게 줄일 수 있을 것이다. 다만 L-SAM과 M-SAM의 SSPk가 어느 정도 확보될 수 있는지에 대한 불확실성은 존재한다.²¹

사드는 제한적이지만 한국의 생존에 결정적인 억지력을 제공해줄 수 있는 현실적인 옵션임이 분명하다. 또한 적 미사일을 요격할 수 있는 시간과 공간을 확보해주며 PAC-3에 비해 방어지역도 훨씬 광범위하다. 따라서 PAC-3 방어지역은 사드 배치에 따라 방어능력이 한층 더 강화될 것이다. 현재 진행 중인 주한미군의 사드 배치는 신속히 계획대로 추진되어야 한다. 방어 능력이 우수한 무기의 확보는 양보할 수 없는 국가 안보적 이익이며 이를 견제하는 대내외의 어떠한 압력에도 굴복해서는 안 된다. 사드를 중심으로 하는 2중 방어망의 성능과 한계에 대한 과학적 연구 결과가 사드의 필요성 여부를 둘러싼 소모적인 논쟁과 극단적인 대립에 종지부를 찍는 계기가 되기를 바란다. 이제는 방어체계의 규모, 비용 문제, ‘충분한 방어’의 기준, 적정한 위험 부담의 정도 등 세부 사안에 대한 토의를 통해 국론을 모아갈 필요가 있다.

4. 결론

성능이 100% 검증되지 않은 사드가 북한의 미사일을 완전히 방어할 수 있겠느냐 하는 질문은 무의미하다. 앞서 지적한 대로, 완벽한 방어체계는 인류 역사상 존재하지 않았다. 과학적으로 완전한 미사일 방어는 SSPk가 1.0일 때나 가능하다고 보지만 이는 기술적으로 불가능하다. 그렇다면 과연 한국은 북핵 위협이 고조되는 동안 완벽한 미사일 방어 체계의

17. 자세한 내용은 부록 1 참고.

18. 추가로 적 미사일 1발에 사드 요격미사일 1발을 추가하는 것이 SSPk를 0.1 높이는 것보다 leakage rate의 개선 효과가 더 크다는 것을 시뮬레이션을 통해 관찰하였다. 자세한 내용은 부록 2 참고.

19. 이와 관련된 자세한 내용은 부록 2.3 참고.

20. ‘충분한 방어’의 기준을 토대로 적의 미사일 100발을 요격하는 데 드는 평균 비용을 산출해보면 다음과 같은 결과가 도출된다. 적 미사일 1발당 사드 3발 요격 시 7개 포대 규모의 사드 요격미사일(300발)이 필요하고 PAC-3 비용을 포함해 대략 5조 5천억 원의 비용이 든다. 만약 사드 2발 요격 시에는 5개 포대 규모(200발)가 필요해 대략 3조 8천억 원의 비용이 든다. 산출된 총 비용에는 요격에 필요한 미사일 값만 포함한다. 자세한 내용은 부록 2.3 참고.

21. M-SAM은 운용평가시험에서 공중에서 고속으로 날아오는 탄도미사일 표적을 5차례 모두 명중시킨 것으로 알려졌다. M-SAM의 실전배치는 2019년부터 시작된다. http://news.chosun.com/site/data/html_dir/2017/06/17/2017061700665.html.

완성을 계속 기다리고만 있어야 할 것인가? 중요한 것은 사드가 북핵 위협에 대응할 수 있는 현존하는 최상의 미사일 방어 시스템인지를 판단하는 것이다. 2016년 국방백서에 사드는 “현존하는 미사일 방어체계 중 가장 요격 성공률이 높은 것으로 평가 받고 있다”고 기술되어 있다.

Leakage rate과 Pr(no leakage) 두 지표를 기준 삼은 시뮬레이션 결과를 통해 사드와 PAC-3의 2중 미사일 방어망이 PAC-3만의 단층 방어망보다 방어능력이 탁월하다는 것을 수리적으로 확인하였다. 이는 안보의 측면에서 볼 때 사드가 절대적으로 필요하다는 것을 의미한다. 더 나아가 현재 성주에 배치 중인 사드 1개 포대만으로는 ‘충분한 방어’를 기대하기 어려우므로 추가 포대의 배치가 필요하다는 것을 말해준다.

사드와 PAC-3의 2중 미사일 방어체계가 만능은 아니며 북한의 모든 미사일을 완벽하게 막을 수 있는 것도 아니다. 하지만 완벽하지 않다고 해서 불필요하다는 논리적 비약을 해서도 안 된다. 북한의 모든 형태의 공격에 완벽히 대비할 수 있는 미사일 방어체계를 갖추는 것은 비용을 포함한 여러 요소들을 고려해볼 때 현실적으로 어려운 점이 많다.

하지만 2장에서 살펴봤듯 한국의 현재 방어체계는 북한의 위협에 대비하기에는 매우 불충분한 것으로 평가된다. 이스라엘의 경우는 주변국으로부터 핵 위협과 같은 치명적 위협을 받고 있지 않는데도 다층방어망을 갖추고 있다는 점에 비추어 볼 때, 사드 배치를 둘러싸고 벌어진 국내의 논란은 매우 부적절하다고 해도 과언이 아니다.

‘충분한 방어’의 수준을 충족시키기 위한 적정한 수준의 부담도 논의되어야 할 것이다. 비용 부담을 고려하여, 무조건적인 사드와 PAC-3의 추가배치보다는 한국이 독자 개발 중인 L-SAM²²과 M-SAM을 활용해 기존 체계와의 연계성을 높이는 방식을 생각해 볼 수 있다.²³ 국내에서 제작된 요격미사일은 가격이 비교적 저렴하여 미사일 방어에 드는 비용을 큰 폭으로 줄일 수 있다. M-SAM의 가격은 약 15억 원²⁴으로 알려져 있어 PAC-3의 발당 약 60억 원에 비해 1/4 수준이다. 따라서 ‘저비용-고효율’의 조합으로 미사일 방위력을 강

화할 수 있을 것이다. 또한 Kill-Chain의 선제타격 능력을 적극 활용해서 유사시 북한이 발사할 수 있는 미사일의 수를 최소화하는 것 역시 중요하다. 제한된 수의 미사일만 요격한다면 미사일 방어체계의 부담이 적어지고 보다 효과적인 방어가 가능할 것이다. “궁수들을 죽일 수 없다면 결코 화살(미사일)을 충분히 요격할 수 없을 것”이라는 빈센트 브룩스 주한 미군사령관의 말과 같이 미사일 방어망의 효과를 극대화하기 위해서는 적의 미사일이 발사되기 전에 먼저 제거하는 것이 필요하다.

북핵 위협이 지속적으로 증가하는 만큼 현재 진행 중인 사드 배치는 계획대로 신속히 추진되어야 한다. 방어 능력이 우수한 무기의 확보는 국가 안보를 위한 최우선적 과제이며 이를 방해하는 대내외의 어떠한 압박에도 굴복해서는 안 될 것이다. 특히 외국의 경제적 압박에 굴복해 주권적 결정을 반복하는 잘못된 선례를 남겨서는 안 된다. 이번 연구를 통해 국내의 사드와 관련된 논의가 구체적이고 실질적인 방향으로 발전하길 기대한다.

22. 2017년 국방예산에는 작년보다 203% 증액된 1,140억 원이 L-SAM의 연구개발에 반영돼있다.

23. http://kookbang.dema.mil.kr/kookbangWeb/view.do?parent_no=25&bbs_id=BBSMSTR_000000000138&ntt_writ_date=20160930.

24. http://www.koreatimes.co.kr/www/news/nation/2016/12/116_220410.html.

부록 1 - 방법론

탄도 미사일 방어 시스템(Anti-Ballistic Missile Defense System, ABMDS)의 유효성과 관련해 가장 중요하게 고려할 지표는 leakage rate과 Pr(no leakage)이다. Leakage rate은 미사일 방어망을 관통한 적 미사일 수를 총 발사된 적 미사일 수로 나눈 값으로 정의한다.²⁵ 즉, 미사일 방어망을 관통한 적 미사일의 비율을 측정한 것이다. 예를 들어 leakage rate이 0.1이면 발사된 적 미사일 중 10%는 격추되지 않고, leakage rate이 1.0이면 적 미사일이 하나도 격추되지 않았다는 의미다. Pr(no leakage)은 모든 적의 미사일을 격추시킬 확률이다. 적의 핵 탄두가 단 1발이라도 지상에 떨어진다면 상상할 수 없을 만큼 큰 피해가 발생하기 때문에 이 지표가 갖는 의미는 매우 크다. 본 연구의 목표는 leakage rate을 낮추고, Pr(no leakage)을 높이는데 있어서 사드와 PAC-3의 조합이 어떤 영향을 미치는지 알아보는 데 있다.²⁶ 이에 본 연구진은 leakage rate과 Pr(no leakage)을 계산하기 위해 ‘Anti-Ballistic Missile Defense System Effectiveness Estimator (ABMDSEE)’ software tool을 개발하였고, 다양한 시나리오를 가정한 ABMDSEE 분석 결과와 그 의미를 통해 정책 제안을 하고자 한다.

1.1 기본 가정과 이론적 배경

ABMDSEE가 계산되는 과정을 우선 간단한 예를 통해 설명하고, 이를 복잡한 상황으로 확장시키고자 한다.

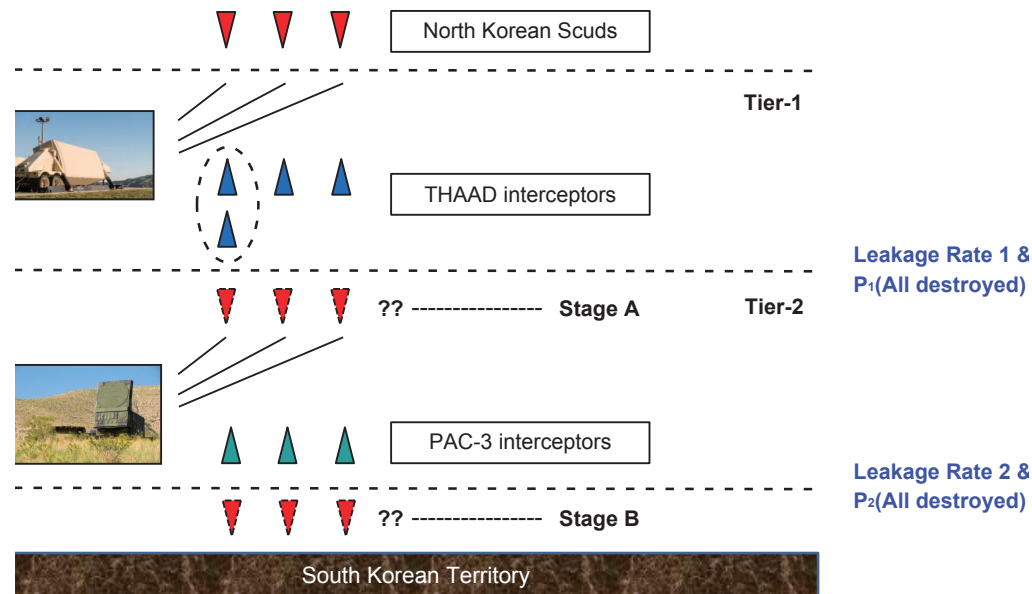
1.1.1 Shoot-Assess-Shoot

미사일 방어체계는 Tier-1에 사드, Tier-2 에 PAC-3 배치를 가정한 2단계로 모델링하였다. 간단한 예로 [그림 5]는 북한이 한국에 3발의 미사일을 발사할 경우, 한국은 Tier-1에서 요격 준비를 마친 사드 4발로 대응을 하고, 실패로 판단(Assess)되면 계속 추적하여 Tier-2에서 다시 요격 준비를 마친 PAC-3 3발로 대응하는 2단계 미사일 방어 시스템 [Shoot-Assess(Look)-Shoot]을 운용한다고 가정하였다. 적 미사일 1발에 사드 2발로 요

25. Tier-1과 Tier-2에서의 정확한 의미는 뒷부분에서 참고.

26. Leakage rate이 감소하면 Pr(no leakage)이 높아짐으로 서로 관련이 있지만 두 지표 모두 중요하다.

[그림 5] 적 미사일 3발에 대한 사드 4발과 PAC-3 3발 방어



격하는 경우, 첫 번째 사드 미사일이 요격에 성공하면 두 번째 사드 미사일은 낭비가 된다. 여기서 각각의 사드 미사일은 독립적이고, 1발의 적 미사일에 대해 2발 이상의 요격미사일을 발사할 수도 있다.

이때, 발사되는 요격미사일은 각각의 적 미사일에 순환(wrap around) 방식으로 분배된다고 가정하였다. 예를 들어 2발의 적 미사일에 5발의 요격미사일로 대응하는 경우, [그림 6]의 왼쪽 같이 2발씩 순환 분배 후 남은 1발은 적 미사일 1발을 선택하여 대응하게 된다. 결과적으로, 각각의 적 미사일에 대응하는 요격미사일의 수가 최대 1발 이상 차이가 나지 않는다.

[그림 6] 요격미사일 분배 방식



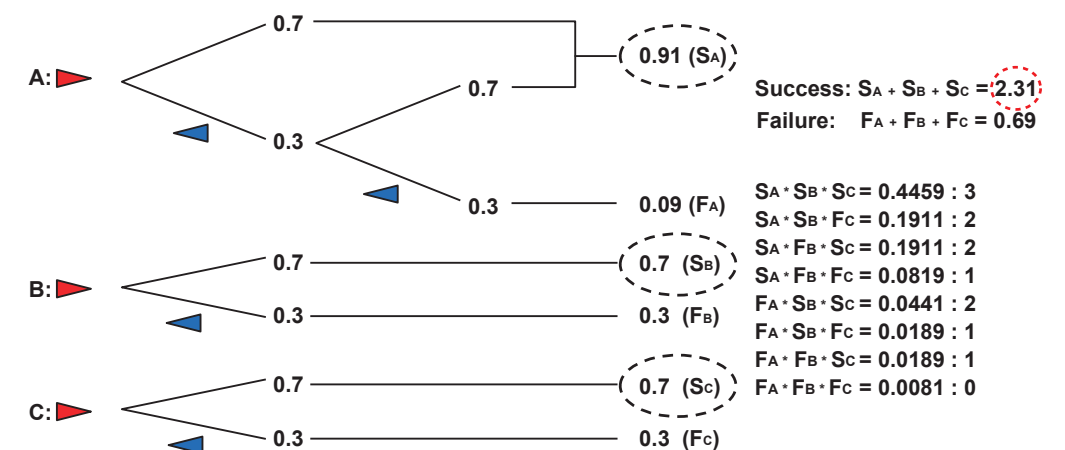
이제 위와 같은 가정 아래 ABMDSEE를 사용해 각 단계의 끝(Stage A/B)에서의 leakage rate과 $Pr(\text{no leakage})$ 을 계산하고, 이를 통해 2중 탄도미사일 방어체계가 단일 탄도미사일 방어체계에 비해 방어 능력이 어느 정도 개선될 수 있는지 확인하고자 한다.

1.1.2 Tier-1: THAAD

[그림 7]의 빨간색 삼각형으로 표기된 A, B, C는 북한에서 발사된 탄도 미사일이다. Tier-1에서는 SSPk(Single-Shot Probability of Kill)가 0.7인 사드 미사일 4발을 A에는 2발, B와 C에는 1발을 발사해 요격한다는 가정하에 leakage rate과 $Pr(\text{no leakage})$ 의 계산 과정을 설명하고자 한다.

여기서 SSPk 0.7은 1발의 요격미사일이 적 탄도 미사일을 70%의 확률로 성공적으로 요격한다는 뜻이다. 2발의 요격미사일을 사용하는 적 미사일 A의 요격 성공 확률 S_A 는 $0.7 + (0.7 \times 0.3) = 0.91$, 요격 실패 확률 F_A 는 $0.3 \times 0.3 = 0.09$ 로 계산이 된다.²⁷ 또한, 1발의 요격미사일로 대응하는 적 미사일 B와 C는 요격 성공 확률 $S_B = S_C = 0.7$, 요격 실패 확률 $F_B = F_C = 0.3$ 을 갖게 된다. 이 확률값들을 성공과 실패로 나누어 합하면 적 미사일 3발 중 2.31발은 성공적으로 요격되고, 나머지 0.69발은 요격에 실패한다는 결과가 나온다. 이제

[그림 7] Tier-1의 요격 성공과 실패 경우의 수와 확률



27. 1발의 적 미사일에 N개의 요격미사일로 대응하면 요격 성공 확률은 $1 - (1 - \text{SSPk})^N$, 실패 확률은 $(1 - \text{SSPk})^N$ 이 된다.

Tier-2에서 계산을 하기 위해서는 Tier-1 직후 나올 수 있는 결과들과 각 경우의 확률을 알아야 한다. 일반적으로 W개의 적 미사일이 발사된 경우 Tier-1 이후 W+1개의 가능한 결과들이 나오게 된다. W=3인 위의 예제의 경우에는 Tier-1 이후 격추된 미사일의 수가 0, 1, 2, 3이므로 총 4가지 결과가 나올 수 있다. 각각의 적 미사일은 Tier-1에서 요격이 시도된 후 ‘격추됨’ 또는 ‘격추되지 않음’ 두 가지의 상태로 존재한다. 위의 예제의 발사된 3개의 적 미사일은 총 $8(=2^3)$ 가지의 조합의 상태가 가능하고 각 상태에 따른 확률을 갖게 된다. 예를 들면 $S_A * S_B * S_C = 0.4459$ 는 적 미사일 3개가 모두 격추된 상태와 그 확률을 보여주고, $S_A * S_B * F_C = 0.1911$ 는 적 미사일 A와 B는 격추되고 C는 격추되지 않은 상태의 확률을 보여준다. 모든 8가지 확률이 계산되면 각 조합은 결과 4개 그룹 중 하나에 배치되고, 그룹별로 확률을 모두 합치면 최종적으로 Tier-1 직후 나올 수 있는 경우와 각각의 확률을 구할 수 있다.

[표 1] Tier-1 직후 나타날 수 있는 경우의 확률

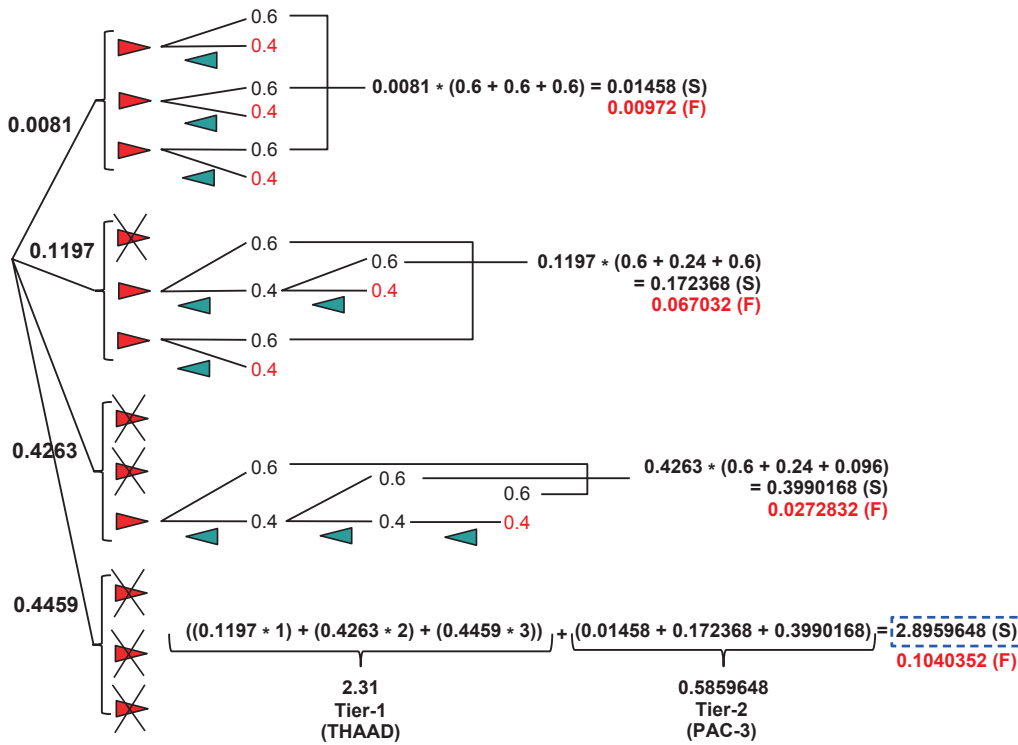
W	Number of enemy missiles destroyed	Pr	Number of enemy missiles destroyed * Pr
3	3	0.4459	1.3377
3	2	0.4263	0.8526
3	1	0.1197	0.1197
3	0	0.0081	0
		1	2.31

[표 1]은 최종 계산된 확률을 보여준다. 모든 경우의 확률 값(Pr)의 합은 1이고, 각각의 확률과 요격된 적 미사일의 수(Number of enemy missiles destroyed)를 곱한 결과를 합치면 이전에 얻은 결과와 같은 2.31의 기대값이 나온다. 이제 Tier-1 결과에 따른 Tier-2의 계산 과정을 알아보자.

1.1.3 Tier-2: PAC-3

Tier-2에서는 SSPk가 0.6인 PAC-3 미사일 3발을 Tier-1에서 격추하지 못한 적 미사일에 발사한다. [그림 8]은 각각의 경우에 대한 성공 또는 실패 확률과 Tier-2 이후 최종 성

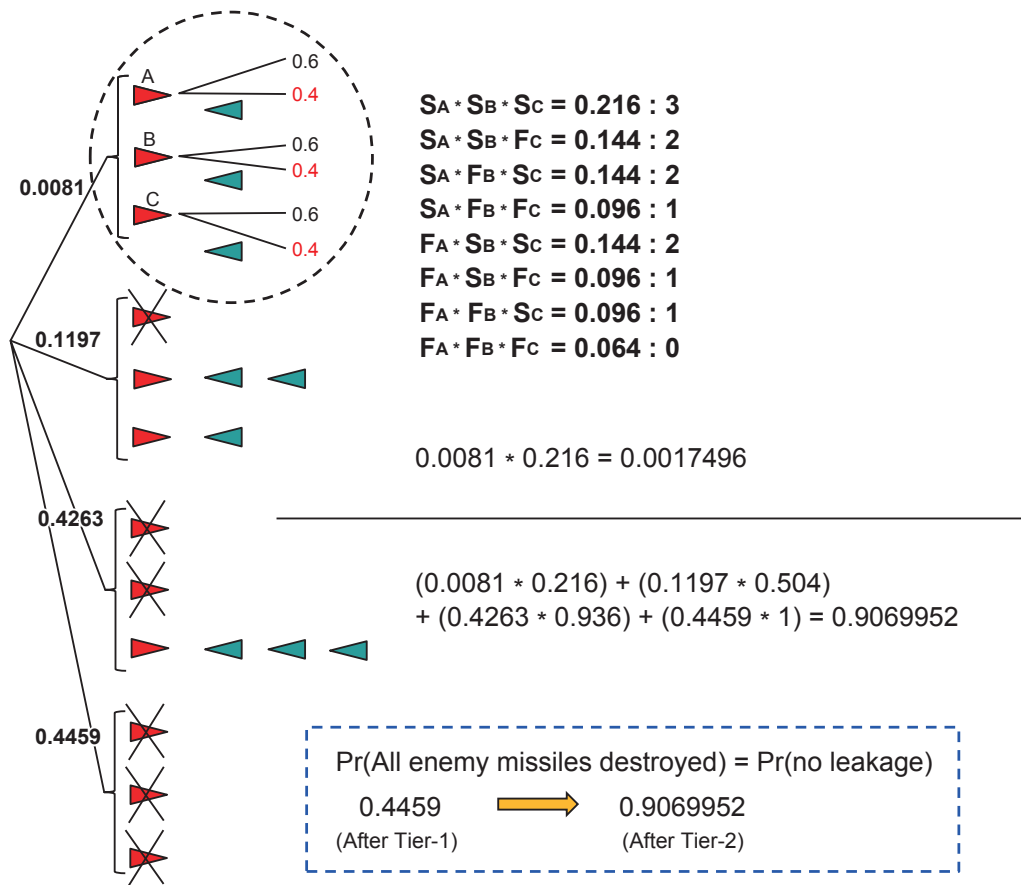
[그림 8] Tier-2의 요격 성공과 실패 경우의 수와 확률



공 확률의 합을 보여준다. 첫 번째 경우는 모든 적 미사일이 Tier-1에서 사드에 의해 격추되지 않은 경우이고 그 확률은 0.0081이다. 이 때의 확률 0.0081과 Tier-1에서 격추되지 않은 적 미사일이 Tier-2에서 PAC-3에 격추되는 확률의 합 1.8을 곱하면 첫 번째 경우의 Tier-2 이후 성공 확률 0.01458이 나오게 된다. 이러한 방식으로 Tier-1 이후 격추되지 않은 미사일이 적어도 하나 이상 남은 경우의 확률 값을 모두 더하면 0.5859648이 된다. 이 값은 Tier-1에서 격추되지 않고 관통한 적 미사일을 격추하는 Tier-2의 기여도를 나타낸다. 이를 앞서 계산한 Tier-1의 값 2.31과 합치면, 최종적으로 적 미사일 3발에 대해 최종적으로 2.8959648발이 요격된다고 기대할 수 있게 된다. 이를 통해 Tier-2가 종료된 후 최종 Terminal leakage rate은 $(3 - 2.8959648) / 3 = 0.0346$ 으로 계산되고, 이는 Tier-1이 종료된 후 leakage rate인 $(3 - 2.31) / 3 = 0.23$ 에 비해 감소하는 것을 확인할 수 있다.

다음으로 Pr(no leakage) 계산 과정을 알아보자. 계산 방법은 앞서 4가지 경우에 대한 확

[그림 9] Tier-2의 요격 성공과 실패 경우의 수와 Pr(no leakage)



률을 구하는 방법과 동일한 원리이다.

[그림 9]를 보면 앞선 예제에서 Tier-1 이후 나타나는 4가지 경우를 확인할 수 있다. Tier-1에서 3발의 미사일이 모두 관통된 경우 Tier-2에서 적 미사일 3개에 대해 PAC-3 3발을 이용한 방어의 결과로 총 8가지의 확률 계산이 나오고, 이는 최종적으로 Tier-2 이후 격추된 미사일의 수가 0, 1, 2, 3 총 4가지 결과로 압축된다.

4가지 경우 각각의 확률은 [표 2]에 나와 있다.

위의 경우, PAC-3로 적 미사일 3발 모두 요격할 확률은 $0.0081 \cdot 0.216 = 0.0017496$ 이다.

[표 2] Tier-2 직후 나타날 수 있는 경우의 확률

Number of enemy missiles destroyed	Pr	Number of enemy missiles destroyed * Pr
3	0.216	0.648
2	0.432	0.864
1	0.288	0.288
0	0.064	0
	1	1.8

Tier-1에서 적 미사일 2발이 관통된 경우는 총 4(=2²)가지 확률 계산이 나오고, Tier-2 이후 격추된 미사일의 수가 0, 1, 2 총 3가지 결과로 압축된다. 이때, PAC-3로 적 미사일 2발을 모두 격추할 확률은 $0.1197 \cdot 0.504 = 0.0603288$ 이다. 이러한 방식으로 가능한 모든 경우의 확률을 구해 합하게 되면 최종적으로 모든 적 미사일을 격추할 확률인 Pr(no leakage)은 0.9069952(i.e., 90.7%)가 된다. 이는 Tier-1 직후의 Pr(no leakage)인 0.4499(i.e., ~45%)보다 개선되었음을 알 수 있다.

위에서는 Tier-1 이후 적 미사일이 관통된 경우에 남은 PAC-3 미사일 3발을 모두 사용한다고 가정하고 계산하였다. 그러나 Tier-1을 관통한 미사일이 1발인 경우를 생각해 보면 다음 공격에 대비하기 위한 요격미사일 일부를 남겨놓기 위해 적 미사일 1발에 대응하는 PAC-3 미사일 수를 2개 이하로 제한해야 할 수도 있다. 위의 예제에서 Tier-1 이후 모두 적 미사일 3개 모두 관통했을 때 적 미사일 1발당 PAC-3 미사일 1발로 한도를 정해도 결과에 영향을 미치지 않는다. 그러나 적 미사일이 1발 또는 2발이 관통된 경우에는 제한된 요격미사일 1발로 인해 leakage rate과 Pr(no leakage)의 값에서 차이가 난다.

Tier-2에서 적 미사일 1발당 대응하는 요격미사일의 수의 제한은²⁸ 소프트웨어의 입력 중

28. Tier-1의 경우, 적 미사일 1발당 대응하는 요격미사일의 발수의 제한을 별도의 입력 없이 estimation process의 일부로 구현할 수 있다.

하나로 설정이 되며, 다음은 ABMDSEE에 필요한 6가지 입력이다.

- 동시 발사된 적의 미사일 수
- Tier-1에서 요격 준비를 마친 THAAD 미사일의 수
- Tier-1 요격미사일(THAAD)의 SSPk
- Tier-2에서 요격 준비를 마친 PAC-3 미사일의 수
- Tier-2 요격미사일(PAC-3)의 SSPk
- Tier-2에서 적 미사일 1발당 요격할 수 있는 최대 PAC-3 미사일 수²⁹

1.2 ABMDSEE 추정치의 해석

이번 장에서는 Tier-1과 Tier-2 이후에 계산된 ABMDSEE 추정치를 해석하는 방법에 대해 설명하고자 한다. 앞 절의 기본 프로세스에 대한 이해가 잘 되었다면 어렵지 않게 해석을 할 수 있을 것이다.

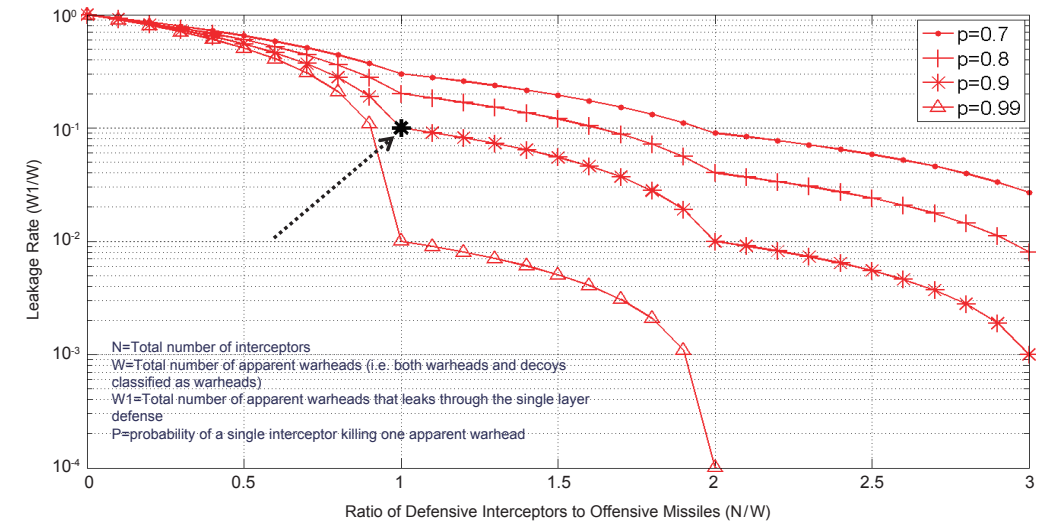
1.2.1 Tier-1

앞서 보았듯이 W개의 적 미사일 발사되었다고 생각했을 때, Tier-1 이후 W+1가지의 경우에 대해 고려해야 하는 Tier-2에 비해 방어해야 할 적 미사일의 수가 고정되어 있는 Tier-1은 Tier-2보다 간단하게 해석할 수 있다. 우리 연구는 Jaganath, Sankaran과 Brian Fearey가 일본의 탄도 미사일 방어 능력의 효과에 대해 분석하면서 사용한 접근법과 유사한 형태를 따른다.³⁰ 기존 연구의 [그림 10]은 단층 방어망에서 요격미사일이 다양한 형태의 SSPk 값을 가질 때 적 미사일 수에 대한 요격미사일 수의 비율에 따른 leakage rate을 보여준다. 기존 연구에서는 만약 SSPk가 0.9인 요격미사일의 수가 적 미사일의 수와 같으면 탄두 10발 중 1발이 관통되고, 적 미사일의 수의 절반이면 탄두 절반 이상이 관통한다고 설명하고 있다. (i.e., leakage rate=0.55) 또한 스커드 미사일의 가격(~\$2M)과 요격미사일 SM-3의 가격(>\$10M) 사이의 불균형으로 인해 북한의 스커드를 1:1로 요

29. 입력된 값을 통해 적 미사일 1발당 요격할 수 있는 PAC-3 미사일 수를 제한하며 요격 준비를 마친 PAC-3 미사일 수에 따라 적 미사일 1발당 대응하는 PAC-3 미사일의 수가 입력된 값보다 적을 수 있다. 여기서 '적 미사일'은 Tier-1 방어망을 관통하는 미사일을 의미한다.

30. Sankaran, Jaganath and Fearey, Brian L. "Deterring North Korea: An Examination of the East Asian Missile Defense Architecture," Los Alamos National Laboratory, 2015.

[그림 10] 단층 방어망에서 적 미사일 1발 당 대응하는 요격미사일 수에 대한 leakage rate



출처: Sankaran, Jaganath and Fearey, Brian L. "Deterring North Korea: An Examination of the East Asian Missile Defense Architecture," Los Alamos National Laboratory, 2015.

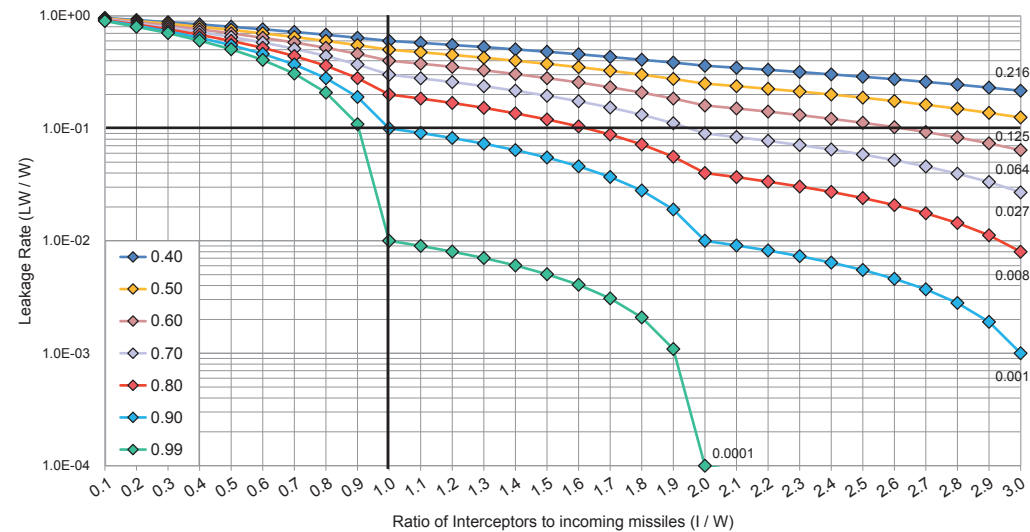
격하기 어렵다는 점을 지적하고 있다.

본 연구에서는 [그림 11]에서처럼 ABMDSEE를 사용해 기존 연구보다 다양한 형태의 SSPk를 추가해 재현해 보았다. 여기서 'LW', 'W', 'I'는 각각 관통된 평균 탄두 수, 적 미사일 수, 요격미사일 수를 뜻한다. 적 미사일 1발에 대해서 SSPk가 0.6인 THAAD 요격미사일 3발로 대응한다면 leakage rate이 1에서 0.064로 떨어지는 것을 확인할 수 있다.³¹ 여기서 0.064(=LW/W)는 비율이고, LW=0.064*W로 다시 쓸 수 있다. W=50 이라면 LW=0.064*50=3.2로 적 미사일 50발 중 3.2발이 관통한다는 의미이다. 적 미사일 20발에 대해서는 LW=1.28, 적 미사일 5발에 대해서는 LW=0.32가 된다. 이러한 방법으로 해당 경우의 leakage rate에 대해 다양한 W 값을 생각해 볼 수 있고, 각 경우마다 적 미사일이 얼마나 평균적으로 관통되는지 확인할 수 있다.

다음과 같은 방법으로 발사된 적 미사일에 대한 요격미사일의 비율을 해석할 수 있다.

31. 명료성을 위해 그래프에서 log-scale을 사용하였고, leakage rate 1은 모든 적 미사일이 관통됨을 뜻한다.

[그림 11] Tier-1에서 다양한 SSPk에 대한 leakage rate 그래프



W=50일 때, $I/W=1.7$ 인 경우를 고려하면 $I=85$ 가 된다. 이 경우에는 적 미사일 35발은 요격미사일 2발로 대응되며, 나머지 적 미사일 15발은 1발의 요격미사일로 대응된다.³² 만약 $I/W=3.0$ 이면 $I=150$ 이 되고, 이 경우에는 적 미사일은 모두 요격미사일 3발로 대응하게 된다. I/W 가 정수일 경우 적 미사일에 대응하는 요격미사일의 수가 같아지면서 leakage rate이 꺾이는 것을 그래프에서 확인할 수 있다. 이 현상은 SSPk가 높아질수록 두드러지게 나타나며 꺾인 후 기울기가 완만해진다.

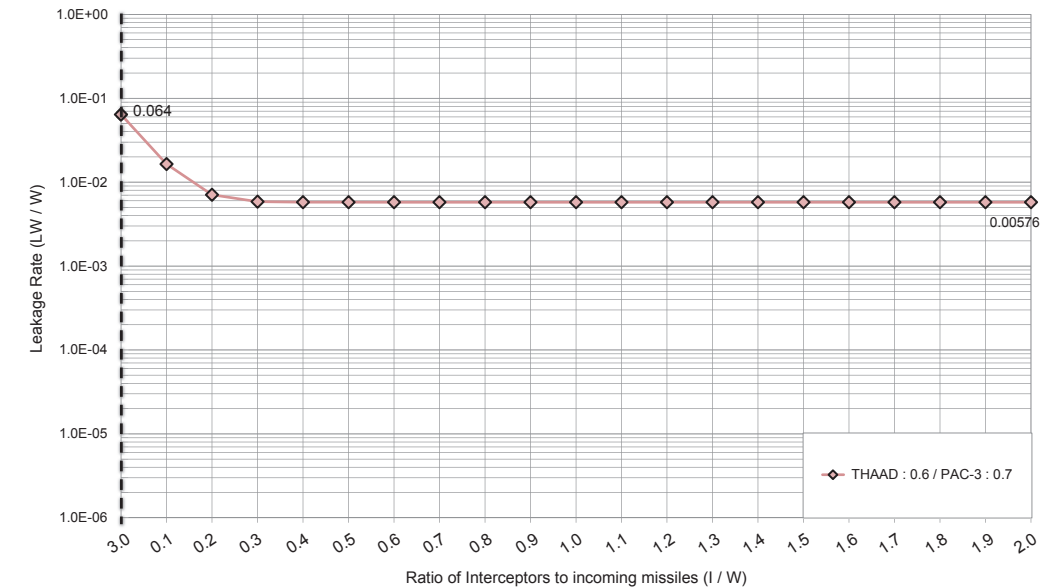
적 미사일 1발에 요격미사일 3발로 대응하는 경우를 예로 들자. 요격미사일 3발이 차례로 발사되고, 그 중 첫 번째 요격미사일이 적 미사일을 격추하였다고 하자. 이때, 각 요격미사일 발사 후 요격 결과를 확인하는 모니터링 과정이 없으므로 나머지 2발은 낭비되는 것을 기억해야 한다.

1.2.2 Tier-2

앞서 보았던 적 미사일 1발에 대해 SSPk가 0.6인 사드 요격미사일 3발로 대응하여

32. 앞서 설명하였듯이 요격미사일은 발사된 적 미사일에 대해 순환 분배하여 대응한다.

[그림 12] Tier-2의 leakage rate 그래프 (W=50)



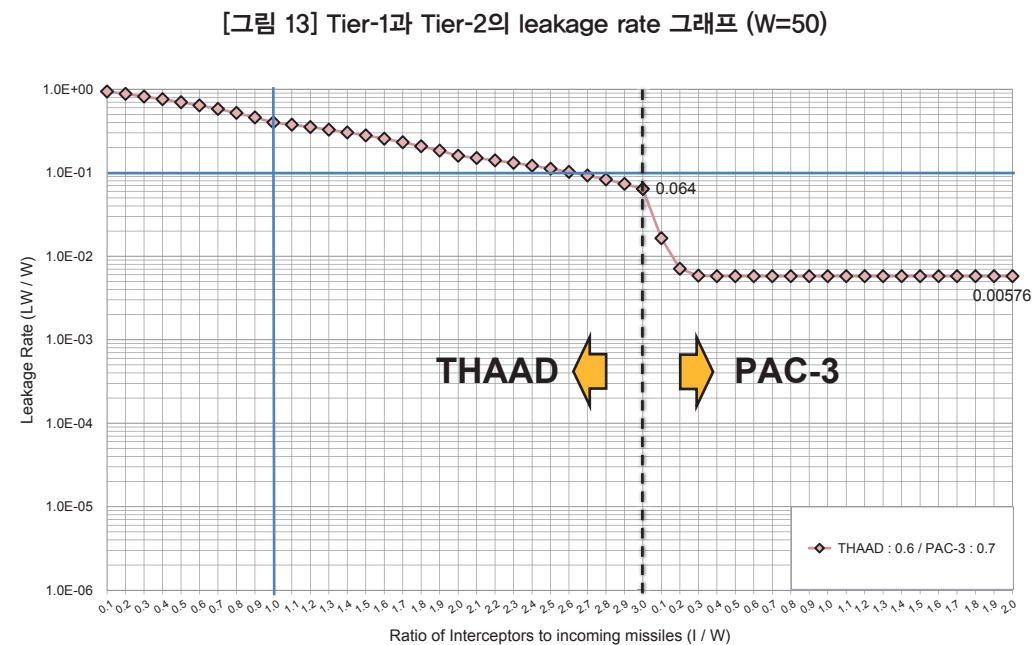
leakage rate이 0.064로 감소한 상황을 고려해보자. [그림 12]의 왼쪽 점선은 Tier-1의 끝과 Tier-2의 시작을 나타낸다. 앞서 설명했듯이 W개의 적 미사일이 발사된 경우 Tier-1 이후 W+1개의 가능한 결과들이 나오므로, W=50이면 Tier-1 이후 0~50개의 미사일이 요격된 총 51가지의 경우가 나오게 된다. Tier-2에서는 적 미사일에 대해 SSPk가 0.7인 PAC-3를 배치하여 대응한다고 가정하였다. 여기서 $I/W=1.7$ 은 Tier-1 이후 나올 수 있는 51가지 경우에 대해 $85(=1.7 \times 50)$ 발의 PAC-3 요격미사일을 준비하는 것을 의미한다.

또한 앞서 설명하였듯이 PAC-3를 사용해 방어하기 전에는 모니터링(Assess) 단계가 있다는 것을 기억해야 한다. Tier-1 이후 모니터링 결과 모든 적 미사일이 격추되었다면 PAC-3를 발사할 필요가 없게 된다. Tier-1에서 관통된 미사일이 있는 경우에는 ABMDSEE에서 설정된 적 미사일 한발당 대응하는 최대 PAC-3 미사일 수에 따라 대응하게 된다. Tier-2를 설명하는 그래프에서 X축(적 미사일 1발당 대응하는 요격미사일의 수의 비율: I/W) 마지막 숫자는 사실상 ABMDSEE에서 설정한 적 미사일 1발당 대응하는 최대 PAC-3 미사일 수다. [그림 12]에서 보면, X축의 마지막 숫자 2.0은 적 미사일 1발에 대응할 때 PAC-3 미사일을 최대 2발까지 사용하여 대응하는 것을 의미한다. 예를 들어, $I/W=1.7$ 일 때 적 미사일 50발 중 Tier-1에서 5발이 관통되었다면 PAC-3 미사일 10발이 방어에

사용된다. 이 경우 PAC-3 170발이 준비되어 있으므로 적 미사일 1발당 PAC-3 2발로 대응하기에 충분하다. 그러나 Tier-1에서 만약 50발의 적 미사일 모두 관통되는 상황이 생긴다면 적 미사일 35발은 요격미사일 2발로 대응되며, 나머지 적 미사일 15발은 1발의 요격미사일로 대응된다. Tier-1에서 50발 모두 관통된 경우 Tier-2에서 적 미사일 모두 PAC-3 2발로 대응하려면 100발이 준비되어 있어야 하고, I/W=2.0인 경우가 유일하다. 여기서, leakage rate은 0.00576이며 W=50인 경우에서 생각해 보면 Tier-2에서 평균 관통하는 미사일이 0.288발로 Tier-1에서의 3.2발에서 감소한 것을 확인할 수 있다.

물론 Tier-1 이후 나오는 51가지의 경우 중 일부 결과는 나올 가능성이 매우 높은 경우도 있고, 적 미사일 50발이 모두 관통되는 경우처럼 나올 가능성이 희박한 경우도 있을 것이다. 그러나 기억해야 할 중요한 점은 51가지 경우 모두 발생할 가능성이 있다는 점이다.

최종적으로 Tier-1과 Tier-2의 결과를 합치면 [그림 13]과 같이 나타낼 수 있다. 이를 통해 우리는 2중 탄도미사일 방어체계를 구축함으로써 개선된 방어 능력을 직접 측정할 수 있게 된다. 연구 전반에 걸쳐 위와 같은 그래프를 사용하기 때문에 그 의미를 이해하는 것이 중요한데, 특히 Tier-2와 관련된 다소 복잡한 내용을 이해하는 것이 중요하다.



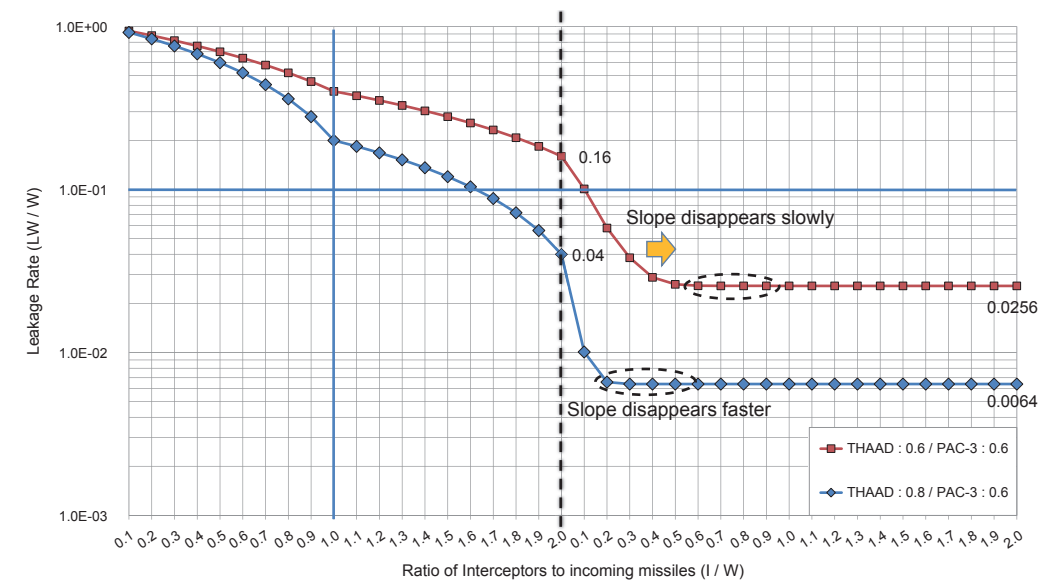
1.3 leakage rate 그래프에서 나타나는 특징들

이번 절에서는 leakage rate 그래프에서 나타나는 현상들에 대해서 설명하고자 한다.

1.3.1 Tier-2 에서의 leakage rate 그래프의 수렴

[그림 14]에서는 사드의 SSPk가 각각 0.6, 0.8이고, PAC-3의 SSPk는 0.6으로 동일한 경우 적 미사일 50발에 대해 Tier-1과 Tier-2에서 적 미사일 1발에 대해 각각 최대 2발로 대응하는 두 개의 leakage rate 그래프를 보여주고 있다. 이때, Tier-2에서는 Tier-1을 관통한 적 미사일에 대해서만 1발당 PAC-3 미사일을 최대 2발 발사한다.³³ 그래프를 살펴보면 빨간색과 파란색의 두 그래프 모두 Tier-2 중간 부분부터 leakage rate이 수평으로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 점선 타원으로 표시된 부분은 수평이 시작되는 지점을 나타낸다. 여기서 우리는 어떤 이유로 leakage rate이 수렴하게 되는지에 대해 의문을 가질 수 있다.

[그림 14] 사드의 SSPk가 다를 경우 leakage rate 그래프 (W=50)

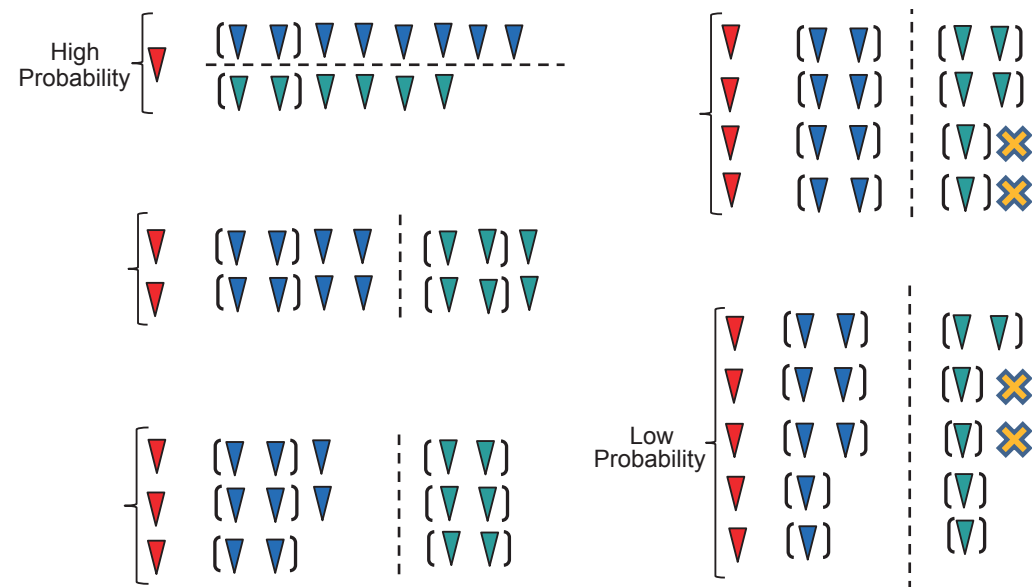


33. Tier-1을 관통한 적 미사일 발수에 비해 Tier-2에서 준비하고 있는 요격미사일의 발수가 여유가 있어도 최대 2발까지만 대응하게 된다.

먼저 사드 SSPk가 0.8인 파란색 그래프를 살펴보면, Tier-1 이후 평균적으로 2발(=50*0.04) 관통됨을 알 수 있다. 그러므로 Tier-2에서 대응하는데 평균적으로 PAC-3 4발이 필요하게 된다. 이때, Tier-2에서 수렴이 시작되는 I/W=0.3에서 PAC-3 15발(=50*0.3)이 준비되어 있으므로 관통된 미사일에 대응하기에 충분하다. 그러나 만약 적 미사일 2발 이상, 심지어 50발 모두 Tier-1을 관통하게 되면 어떨까?

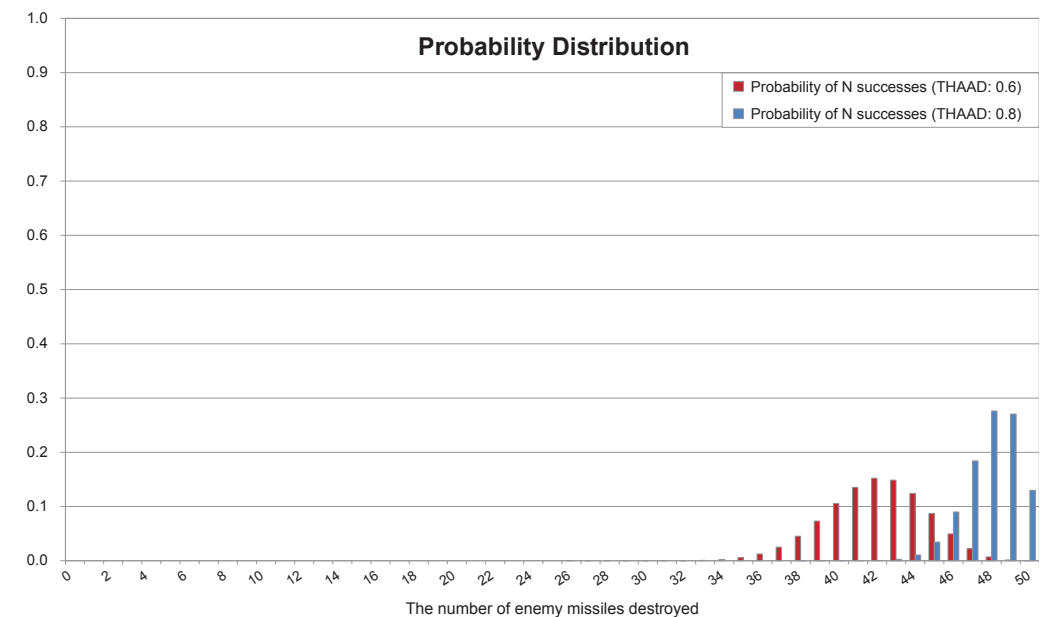
이해를 돕기 위해 간단한 예를 통해 살펴보자. [그림 15]는 Tier-1 이후 1~5발(빨간색)이 관통된 상황을 가정했을 때 PAC-3 8발(파란색)과 6발(녹색)이 준비된 두 가지 경우이며, 적 미사일 1발당 최대 2발의 PAC-3로 대응한다. 적 미사일이 3발 이하로 관통될 때는 두 경우 PAC-3 대응에 있어서 차이가 나지 않지만, 4발 이상이 관통되는 경우에는 노란색 표시가 된 부분에서 적 미사일 대응에 있어 차이가 생긴다. 그럼에도 적 미사일이 4발 또는 5발 관통되는 경우의 확률이 매우 낮다면 결국 두 경우의 전체 leakage rate은 유의한 차이가 나타나지 않는다. 즉, 낮은 확률로 적 미사일이 관통될 경우는 전체 leakage rate에 미치는 영향의 크기가 매우 작다는 것이다. 사드의 SSPk가 높을수록 다량의 적 미사일이 Tier-1을 관통할 확률은 낮아지며 최종적으로 leakage rate에 미치는 영향이 더 적어진다는 것을 알 수 있다.³⁴

[그림 15] Tier-1 이후 상황에 따른 Tier-2에서의 두 가지 대응



[그림 16]은 [그림 14]의 두 가지 경우 Tier-1에서 격추된 적 미사일 수에 대한 확률분포이다.³⁵ 희박한 확률이지만 적 미사일 50발 전부 Tier-1에서 관통되는 (격추되는 미사일이 없는) 확률은 이론적으로 존재한다. 두 경우 모두 적 미사일 50발이 모두 관통될 확률은 ~0.0%³⁶이다. 사드의 SSPk가 0.8인 경우를 살펴보면, 적 미사일 6발 또는 7발이 관통될 확률은 각각 1.08%, 0.28%로 8발 이상이 관통될 확률은 매우 작아지게 된다. 이를 leakage rate과 연관해 생각해보자. Tier-2에서 I/W=0.3인 경우 PAC-3 15발(=50*0.3)을 준비하게 되는데 이는 관통된 적 미사일 7발까지는 1발당 PAC-3 2발로 대응할 수 있는 수준이다. 반면, 앞서 보았듯이 Tier-1에서 8발 이상 관통될 확률은 매우 적기 때문에 더 많은 PAC-3(I/W > 0.3)를 준비해 놓더라도 16발 이상 사용할 가능성이 매우 낮아지고, 그 결과 leakage rate이 더 이상 크게 감소하지 않고 수렴하게 되는 현상이 나타난다.³⁷ 확률이 낮게 나오는 경우를 대비하는 차원에서 적 미사일 50발에 대해 수렴 시작 지

[그림 16] Tier-1에서 격추된 적 미사일 수에 따른 확률분포



34. 다양한 형태의 SSPk와 요격미사일의 발수인 상황을 테스트해 보면 분명하게 관찰된다.

35. 두 분포의 각각의 확률 값의 합은 항상 1이다.

36. 50발 모두 관통될 확률은 0에 가깝지만 그렇다고 절대적으로 0은 아니다.

점보다 조금 여유로운 PAC-3 20발($I/W=0.4$) 수준으로 대응을 준비하게 된다면 조금 더 안전한 방어망을 구축할 수 있다.³⁸

[그림 14]의 사드 SSPk가 0.6인 빨간색 leakage rate 그래프를 보면, I/W 가 약 0.6부터 수렴하기 시작한다. 이 경우 30발($=50 \times 0.6$)의 PAC-3 미사일로 관통한 미사일에 대응하게 되고, Tier-1 이후 평균적으로 관통하는 적 미사일 8발($=50 \times 0.16$)에 대응하기 충분하다. [그림 16]에서 확률분포를 보면 사드의 SSPk가 0.8인 경우보다 넓게 퍼져있는 것을 확인할 수 있다. 이 경우 적 미사일이 14, 15발 관통될 확률은 각각 1.3%, 0.58%이며 16발 이상 관통될 확률은 0.24%로 매우 작아진다. 그러므로 적 미사일 50발에 대해 PAC-3 40발($I/W=0.8$) 수준으로 대응을 준비하게 된다면 보다 안전한 방어망을 구축할 수 있다.

앞서 본 두 그래프의 결과 최초의 적 미사일 수인 50발 각각에 PAC-3 2발로 대응하기 위해 100발까지 필요하지 않음을 알 수 있고, Tier-1에서 더 많은 적 미사일이 격추될수록 Tier-1 이후에 leakage rate이 큰 폭으로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

1.3.2 leakage rate 그래프의 수렴 속도

모든 입력이 동일한 경우에 적 미사일 수를 다르게 입력하면 leakage rate 그래프의 모양이 Tier-2 중간 부분에서 다르게 나타난다. [그림 17]은 사드와 PAC-3의 SSPk가 모두 0.6으로 동일하다고 가정한 상황에서의 두 leakage rate 그래프를 보여준다. 두 곡선의 유일한 차이점은 적 미사일 수이다. 노란색 그래프는 적 미사일 10발, 빨간색 그래프는 적 미사일 50발에 대응하는 경우이다. 적은 수의 적 미사일을 방어함에도 불구하고, Tier-2에서 노란색 그래프가 빨간색 그래프에 비해 천천히 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

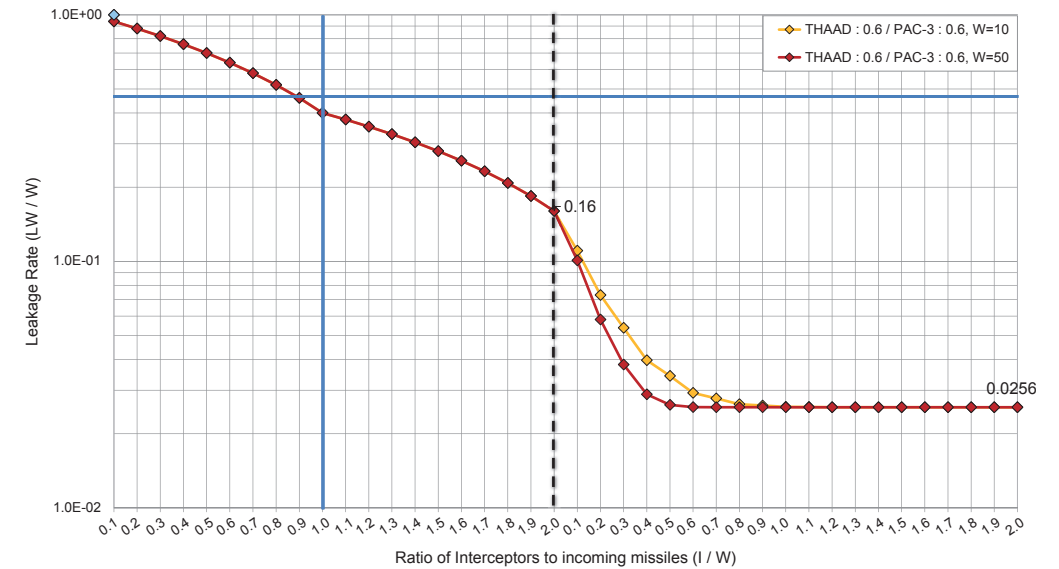
이러한 leakage rate 그래프의 특징은 이항 분포를 통해 설명할 수 있다. [그림 18]은 앞서 살펴본 두 경우 각각에 대한 Tier-1 이후 격추된 미사일 수를 확률변수로 갖는 이항 분포이다.

Tier-1 이후 적 미사일의 절반 이하가 격추된 경우를 살펴보자. $W=10$ 인 경우는 격추된 미

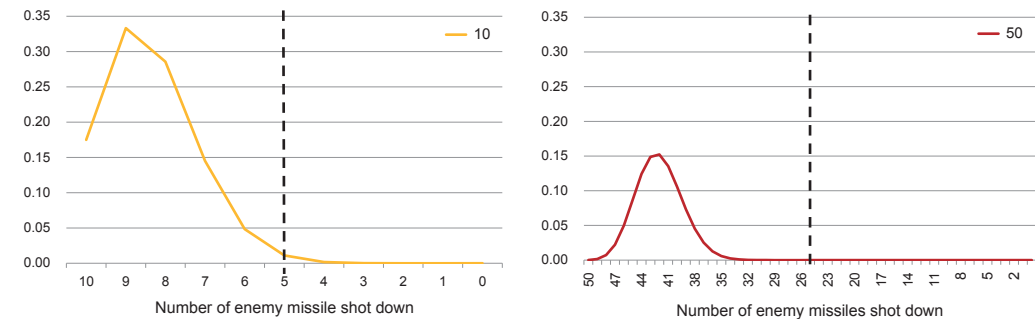
37. 이 경우는 적 미사일 1발당 대응하는 최대 PAC-3 미사일 발수가 2발로 설정된 경우이고, 3발로 늘릴 경우 leakage rate은 더 낮아지게 된다.

38. 이는 얼마나 많은 위협을 감당하느냐에 따라 기준이 달라질 수 있다.

[그림 17] 적 미사일 수가 다를 경우 leakage rate 그래프 모양 변화 ($W=10, 50$)



[그림 18] Tier-1에서 격추된 적 미사일 수에 대한 확률분포 ($W=10, 50$)



사일이 0~5발, $W=50$ 인 경우는 격추된 미사일이 0~25발인 경우의 확률을 합산하면 각각 1.3%와 0.0000025%가 나오게 된다. 즉, $W=10$ 인 경우 $W=50$ 일 때보다 절반 이상 관통될 확률이 높은 것을 확인할 수 있다. 그 결과, 적 미사일의 수가 적을 때 Tier-1 직후 leakage rate이 천천히 감소하는 현상이 나타나게 된다. 최종적으로는 두 경우 모두 leakage rate이 0.0256으로 같은 값으로 수렴한다.

부록 2 - 시뮬레이션 세부 내용

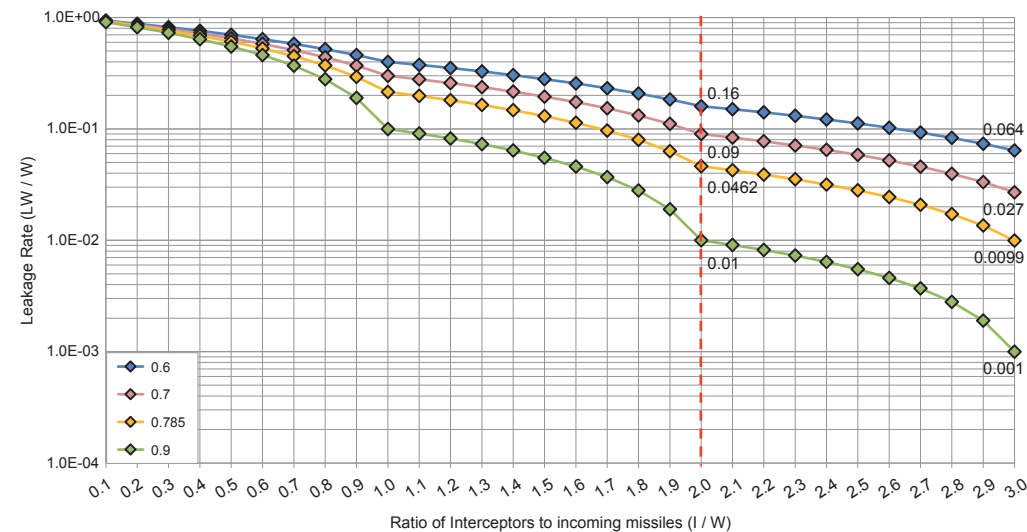
2.1 발견 1: PAC-3만의 단층 방어망은 극히 위험하다.

SSPk 0.6인 PAC-3 단층 방어망으로는 핵 탄두 10발에 1.6발 관통

[그림 19]는 PAC-3의 SSPk가 0.6과 0.7일 때의 leakage rate을 파란선과 분홍선으로 보여준다. 파란선과 빨간 수직선(점선)의 교차점은 PAC-3를 2발로 요격할 경우 leakage rate이 0.16이 된다는 것을 보여준다. 이는 북한 미사일 공격이 10발일 때 1.6발, 20발일 때 3.2발, 50발일 때 8발, 100발일 때 16발 관통한다는 것을 의미한다.

PAC-3의 사격 방식이 개선돼 추가로 1발을 더해 3발로 요격할 수 있다면 leakage rate은 낮아진다. 10발일 때 0.64발, 20발일 때 1.28발, 50발일 때 3.2발, 100발 공격 때 6.4발 관통한다. PAC-3의 SSPk가 향상되면 leakage rate이 개선되어 방어에 도움이 된다.³⁹

[그림 19] PAC-3 단층 방어망에서 SSPk와 요격미사일 수에 따른 leakage rate 그래프



39. Leakage rate이 개선되었다는 것은 항상 감소를 의미한다.

SSPk 0.7일 때는 2발로 요격할 경우 분홍선과 빨간 수직선의 교차점에서 leakage rate은 0.09다. 10발 공격 시 0.9발, 20발 공격 시 1.8발, 50발 공격 시 4.5발, 100발 공격 시에는 9발이 관통한다는 의미다. 여기에 추가로 1발을 더하여 3발로 요격을 하더라도 10발일 때 0.27발, 20발일 때 0.54발, 50발일 때 1.35발, 100발 공격 때 2.7발이 관통한다. SSPk가 0.9일 때는 2발과 3발로 요격 시 leakage rate이 각각 0.01과 0.001로 줄어든다. 각각 100발 때 1발, 1,000발 때 1발 관통한다는 의미다. Leakage rate이 낮아지는 것은 성능이 향상된다는 것을 뜻한다.

적 미사일 100발일 때 1발 미만 관통되려면 PAC-3 SSPk 0.785 넘어야

단층 방어망에서 적 미사일 1발당 PAC-3 3발로 요격 시 leakage rate이 0.01 수준 아래로 떨어지기 위해서는 SSPk가 최소한 0.785는 넘어야 한다. 그래야만 적 미사일 100발 중 평균 1발 미만이 방어망을 관통한다.

PAC-3의 SSPk와 관련한 공식적인 자료는 찾기 힘들다. MDA가 통상 요격미사일을 설계할 때 SSPk는 0.8~0.9로 잡는다고 한다.⁴⁰ 이를 통해 PAC-3의 SSPk는 최대 0.9라고 가정할 수 있다. 하지만 실제 PAC-3의 미사일 요격 성능은 정확히 알려져 있지는 않다. 또한 한국의 상황에서 PAC-3 미사일은 고도 12~15km에서 1초 사이에 기회가 있다는 분석 결과도 있다.⁴¹ 이 경우 한국의 미사일 방어체계는 마지막 1초 구간에 승부를 거는 것과 다를 없다. 결국 PAC-3만의 단층 미사일 방어망은 짧은 시간 동안 PAC-3의 요격 성능에 의존해야 하는데 이러한 '단독 방어망'에 북한 핵 방어의 책임을 전적으로 맡기는 것은 너무 위험하다. 더구나 북한이 수십 발 이상을 동시에 발사할 경우 요격에 실패하면 더 이상의 기회는 없다.

2.2 발견 2: 2중 미사일 방어망의 leakage rate의 개선 효과 - 단일 방어망보다 최소 6배 최대 1,000배

2중 미사일 방어망은 절대적으로 필요하다. SSPk가 일정 수준 이상인 요격미사일로 구축한 2중 방어망은 북한이 동시에 다량의 미사일로 공격⁴²을 하더라도 최종적으로 관통하는

40. Michael Elleman and Michael J. Zagurek Jr., "THAAD: What It Can and Can't Do", March 10, 2016.

41. <http://news.donga.com/3/all/20160204/76303227/1#csidxa840508e8e84a5b9c26b33aebfdd0e>.

42. 이러한 공격 방식을 'salvo'라고 한다.

탄두 혹은 미사일을 1발 미만으로 낮출 가능성을 높인다.

시뮬레이션에 따르면 ‘사드 & PAC-3’의 2중 방어망은 PAC-3 단일 방어망 때보다 SSPk에 따라 Terminal leakage rate⁴³을 최소 6배, 최대 1,000배까지 줄인다.⁴⁴

2.2.1 PAC-3 단층 방어망 대비 사드와 PAC-3 2중 방어망의 방어력 개선 효과

PAC-3 단층 방어망에 사드를 추가하면 얼마나 방어 효과가 개선되는지 알아보자. 개선 효과가 가장 낮은 6.25배와 가장 높은 1,000배가 될 경우에 한해 보았으며 6.25~1,000배 사이의 개선 효과의 자세한 내용은 부록 3에 실었다.

SSPk 0.6-사드 2발 추가 시 6.25배 개선

[그림 20]에서 SSPk가 각각 0.6인 사드 2발과 PAC-3 2발인 2중망 체계로 요격할 경우 Terminal leakage rate(TLR)은 0.0256가 된다. 단층 방어망에서 PAC-3 2발로 요격할 경우의 leakage rate⁴⁵ 0.16과 비교하면 leakage rate이 약 6배 정도 개선된다는 의미다. 북한이 10발로 공격할 경우 PAC-3 단층 방어망에서는 1.6발이 관통했지만 2중망에서는 0.25발이 관통된다. 20발일 경우는 3.2발에서 0.5발, 50발일 경우 8발에서 1.3발, 100발일 경우 16발에서 2.56발로 사드 방어망의 추가 설치는 최종 관통하는 적의 미사일 수를 대폭 줄여준다. 이처럼 2중 방어망을 할 경우 6.25배 향상되는 조합은 [표 3]과 같다.

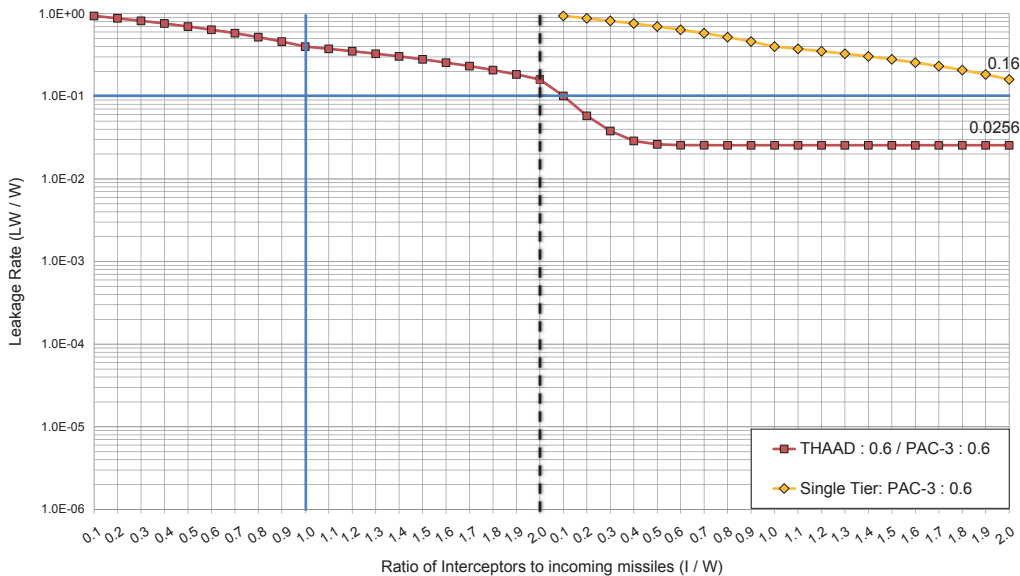
이 8가지 조합은 다양한 형태로 2중망을 구성할 수 있는 방법을 제시한다. 현재 SSPk가 0.6이며 적 미사일 1발당 2발을 발사하는 사드는 하층 방어망인 PAC-3의 SSPk와 발수에 관계없이 개선 효과가 6.25배에 달한다. 다음은 개선 효과가 가장 높은 1,000배일 경우를 보자.

43. 최종 leakage rate을 말함. 단일 방어망일 경우 이것이 뚫릴 비율, 2중 방어망인 경우는 Tier-2가 뚫릴 비율이며 leakage 그래프가 수렴하는 값을 가리킨다.

44. 시뮬레이션 범위 안에서의 개선 효과이다. 만약 사드의 SSPk가 0.95가 되면 8,000배까지도 개선된다.

45. Leakage rate은 문맥에 따라 Tier-1, Tier-2 또는 단층 방어망 이후의 leakage rate을 의미한다.

[그림 20] 사드: 2발, PAC-3: 2발 (SSPk: 0.6, 0.6, W=100)⁴⁶



[표 3] 2중 방어망 구축 시 개선 효과가 6.25배 향상되는 조합

PAC-3			THAAD			(A)/(B) 개선 효과
발수	SSPk	단층 방어망 TLR (A)	발수	SSPk	2중 방어망 TLR (B)	
2	0.6	0.160	2	0.6	0.025600	6.25
2	0.7	0.090	2	0.6	0.014400	6.25
2	0.8	0.040	2	0.6	0.006400	6.25
2	0.9	0.010	2	0.6	0.001600	6.25
3	0.6	0.064	2	0.6	0.010240	6.25
3	0.7	0.027	2	0.6	0.004320	6.25
3	0.8	0.008	2	0.6	0.001280	6.25
3	0.9	0.001	2	0.6	0.000160	6.25

46. 앞으로 나오는 ‘W’는 적 미사일 발수를 뜻한다.

SSPk 0.9-사드 3발 추가 시 1,000배 개선

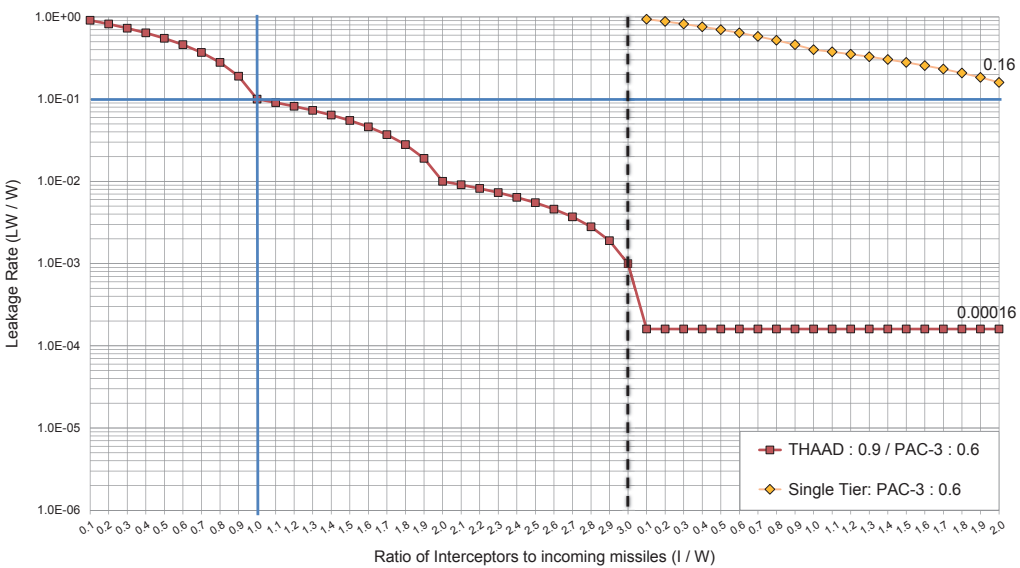
SSPk가 0.6인 PAC-3 미사일을 2발 발사할 경우 SSPk가 0.9인 사드 미사일 3발과 결합해 요격하면 leakage rate은 PAC-3 단독 방어보다 1,000배 향상된다.

[그림 21]을 보면 2중망의 경우에는 leakage rate이 0.00016으로 낮아지므로 단층 방어망과 비교하면 방어 효과가 약 1,000배 개선된다. 북한이 10발로 공격할 경우 PAC-3 단층 방어망에서는 1.6발이 관통했지만 2중망에서는 0.0016발이 관통된다. 20발일 경우는 3.2발에서 0.0032발, 50발일 경우 8발에서 0.008발, 100발일 경우 16발에서 0.016발로 줄어든다. Leakage rate이 1,000배의 개선되는 PAC-3와 사드의 조합은 [표 4]와 같다.

[표 5]는 하층 방어망의 요격 수준, 다시 말해 PAC-3의 SSPk와 발 수에 관계없이 사드의 SSPk와 발 수에 따른 leakage rate의 개선 효과를 정리해 보여준다.

여기서 관찰할 수 있는 것은 적 미사일 1발에 사드 미사일 1발을 추가 발사하는 것이 SSPk를 0.1 높이는 것 보다 leakage rate의 개선 효과가 더 크다는 점이다. 예를 들어 SSPk가 0.6인 사드를 2발 발사할 경우 방어력은 PAC-3 단독망보다 6.25배 개선 효과가 있다.

[그림 21] 사드: 3발, PAC-3: 2발 (SSPk: 0.9, 0.6, W=100)



[표 4] 2중 방어망 구축 시 개선 효과가 1,000배 향상되는 조합

PAC-3			THAAD			(A)/(B) 개선 효과
발수	SSPk	단층 방어망 TLR (A)	발수	SSPk	2중 방어망 TLR (B)	
2	0.6	0.160	3	0.9	0.000160	1,000
2	0.7	0.090	3	0.9	0.000090	1,000
2	0.8	0.040	3	0.9	0.000040	1,000
2	0.9	0.010	3	0.9	0.000010	1,000
3	0.6	0.064	3	0.9	0.000064	1,000
3	0.7	0.027	3	0.9	0.000027	1,000
3	0.8	0.008	3	0.9	0.000008	1,000
3	0.9	0.001	3	0.9	0.000001	1,000

[표 5] 상층 방어망 설치 시 Terminal leakage rate (TLR) 개선 효과⁴⁷

THAAD		TLR 개선 효과 (단위: 배)
SSPk	# of THAAD interceptors	
0.6	2	6.25
0.7	2	11
0.6	3	15.6
0.8	2	25
0.7	3	37
0.9	2	100
0.8	3	125
0.9	3	1,000

47. 하층 방어망인 PAC-3의 요격 수준(SSPk, 요격미사일 발 수)과 관계 없이 THAAD의 요격 수준에 따라 개선 효과가 차이난다.

SSPk가 0.1 높아진 SSPk 0.7 사드 2발을 발사할 경우 11배 개선된다. 반면 SSPk는 0.6으로 같으나 요격미사일 1발을 더 추가해 발사할 경우 방어력은 15.6배 높아진다. 이러한 패턴은 SSPk가 높아져도 마찬가지이다. 개선 효과 25배를 기준으로 보면 SSPk가 0.9인 사드 2발을 발사하면 개선 효과는 PAC-3 단층 방어망 보다 100배 커지지만 SSPk가 0.8인 사드 3발을 발사하면 125배로 더 높은 방어 수준이 가능하다. 이는 SSPk의 개선이 어려울 경우 발사하는 요격미사일 수를 늘리는 방법으로 방어력을 향상할 수 있다는 점을 보여준다.

[표 6]과 [표 7]은 PAC-3로 구성된 단층 방어망과 그 위에 사드를 추가했을 경우 개선 효과

[표 6] PAC-3의 SSPk: 0.6~0.7, 2발 요격 기준

PAC-3 단층 방어망 운용 시			THAAD를 추가해 2중 방어망 운용 시			(A)/(B) 개선 효과
# of PAC-3	SSPk of PAC-3	TLR (A)	# of THAAD	SSPk of THAAD	TLR (B)	
2	0.6	0.16	2	0.6	0.025600	6.25
				0.7	0.014400	11.11
				0.8	0.006400	25.00
				0.9	0.001600	100.00
			3	0.6	0.010240	15.63
				0.7	0.004320	37.04
				0.8	0.001280	125.00
				0.9	0.000160	1,000.00
2	0.7	0.09	2	0.6	0.014400	6.25
				0.7	0.008100	11.11
				0.8	0.003600	25.00
				0.9	0.000900	100.00
			3	0.6	0.005760	15.63
				0.7	0.002430	37.04
				0.8	0.000720	125.00
				0.9	0.000090	1,000.00

다. 단층 방어망의 요격 수준이 고정되어 있는 상태에서 [표 6]은 발 수가 2발이며 SSPk가 낮은 수준인 PAC-3에 사드를 추가한 경우이며 [표 7]은 발 수가 3발이며 SSPk가 높은 수준인 PAC-3에 사드를 추가할 경우 leakage rate의 개선 효과를 대표적으로 보여준다.⁴⁸

[표 6]에서 보면 2중 방어망의 설치는 leakage rate을 최소 6.25배에서 최대 1,000배까지 감소시킨다. 이는 다시 말해 방어력을 PAC-3 단층 방어망보다 최소 6.25배에서 최대 1,000배 높인다는 의미다.

[표 7] PAC-3의 SSPk: 0.8~0.9, 3발 요격 기준

PAC-3 단층 방어망 운용 시			THAAD를 추가해 2중 방어망 운용 시			(A)/(B) 개선 효과
# of PAC-3	SSPk of PAC-3	TLR (A)	# of THAAD	SSPk of THAAD	TLR (B)	
3	0.8	0.008	2	0.6	0.001280	6.25
				0.7	0.000720	11.11
				0.8	0.000320	25.00
				0.9	0.000080	100.00
			3	0.6	0.000512	15.63
				0.7	0.000216	37.04
				0.8	0.000064	125.00
				0.9	0.000008	1,000.00
3	0.9	0.001	2	0.6	0.000160	6.25
				0.7	0.000090	11.11
				0.8	0.000040	25.00
				0.9	0.000010	100.00
			3	0.6	0.000064	15.63
				0.7	0.000027	37.04
				0.8	0.000008	125.00
				0.9	0.000001	1,000.00

48. 나머지 조합들의 결과는 부록 3 참고.

SSPk가 0.6인 PAC-3 2발로 적 미사일 1발을 요격하는 하층 방어망 위에 SSPk가 0.7인 사드 2발을 추가로 대응할 경우 개선 효과는 11배이며 사드 3발로 대응할 경우 개선 효과가 37배에 달하는 것을 보여준다.

[표 6]과 [표 7]에서 알 수 있듯이 단층 방어망의 요격 수준이 고정되면 상층 방어망으로 추가로 인한 개선 효과는 이와 관계 없이 일정한 패턴으로 반복되는 것을 알 수 있다.⁴⁹

[표 8]은 PAC-3가 낮은 요격 수준(SSPk=0.6, 2발)일 때와 높은 요격 수준(SSPk=0.9, 3발)일 때에 추가로 사드 요격미사일을 2발이나 3발을 발사할 경우 사드의 SSPk 값에 따라 최종적으로 얼마만큼 적의 미사일이 관통하는지를 보여준다.

예를 들어 단층 방어망에서 PAC-3의 SSPk가 0.6이며 2발 요격 시 적이 20발의 미사일로 공격할 경우 평균 3.2발이 관통하는데 SSPk가 0.6인 사드 2발을 추가하면 0.5발 수준으

[표 8] 가장 낮고 높은 요격 수준의 방어망 체계에 따른 적 미사일의 평균 관통 수

		적 미사일 수 (W)						적 미사일 수 (W)			
# of PAC-3	SSPk of PAC-3	10	20	50	100	# of THAAD	SSPk of THAAD	10	20	50	100
		관통하는 평균 미사일 수						관통하는 평균 미사일 수			
2	0.6	1.6	3.2	8	16	2	0.6	0.256	0.512	1.28	2.56
							0.7	0.144	0.288	0.72	1.44
							0.8	0.064	0.128	0.32	0.64
							0.9	0.016	0.032	0.08	0.16
3	0.9	0.01	0.02	0.05	0.1	3	0.6	0.0006	0.0012	0.003	0.006
							0.7	0.00027	0.00054	0.00135	0.0027
							0.8	0.00008	0.00016	0.0004	0.0008
							0.9	0.00001	0.00002	0.00005	0.0001

49. 수식으로 볼 때 개선 효과는 $1/(1 - SSPk)^{\# \text{ of THAAD}}$ 로 간략하게 표현되며 이때의 SSPk는 사드의 SSPk를 말한다. (1 - SSPk)는 요격에서 실패할 확률이다.

로 감소한다. 만약 가장 높은 요격 수준을 갖춘 모두 SSPk=0.9인 PAC-3 3발과 사드 3발로 요격 시 적이 100발로 공격을 해와도 0.0001, 즉 만분의 1발만 관통한다.

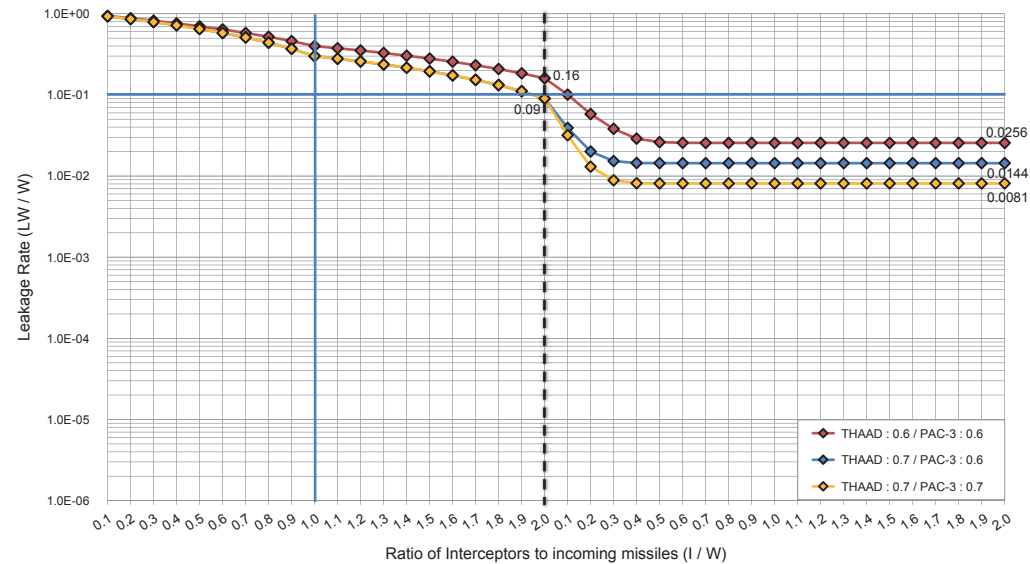
2.2.2 요격 수준이 낮은 체계: PAC-3와 사드의 SSPk가 0.6~0.7, 요격미사일 수 2~3발
요격 수준이 낮은 체계를 기준으로 leakage rate의 개선 효과가 어떻게 달라지는지 알아보자. [표 9]는 사드와 PAC-3의 SSPk가 0.6이나 0.7에서 2발 또는 3발로 요격할 때 가능한 16개 조합을 보여준다.

[표 9] SSPk가 0.6~0.7에서 사드와 PAC-3를 2발과 3발 요격 시 가능한 조합들⁵⁰

ID	THAAD		PAC-3	
1	0.6	2	0.6	2
2=3		2		3
3		3		2
4		3	0.7	3
5=9		2		2
6=11		2		3
7	0.7	3	0.6	2
8=12		3		3
9		2	0.7	2
10=7		2		3
11		3		2
12=8		3		3
13		2	0.7	2
14=15		2		3
15		3		2
16		3		3

50. 조합 중 ID 6번과 11번의 최종 leakage rate 값은 같다. 다시 말하자면 SSPk가 0.6인 사드 2발 발사 후 확인 뒤 SSPk 0.7인 PAC-3 3발을 발사하는 것과 SSPk가 0.7인 사드 3발 발사 후 확인 뒤 SSPk 0.6인 PAC-3 2발을 발사하는 조합의 최종 leakage rate 값은 동일하다. 이와 같은 경우 하나는 제외시켰다.

[그림 22] 사드: 2발, PAC-3: 2발 (SSPk: 0.6~0.7, W=100)

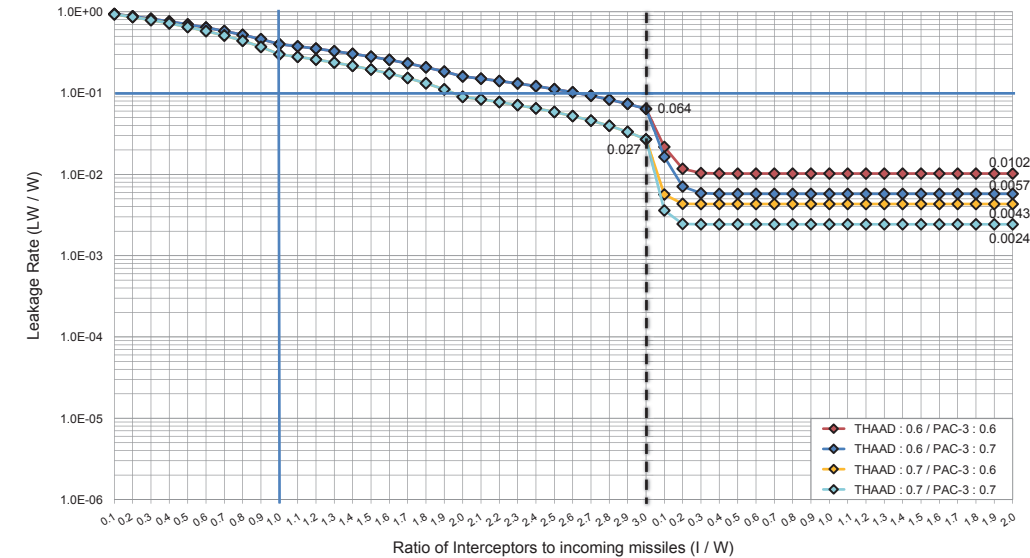


[그림 22]는 사드와 PAC-3의 SSPk가 0.6~0.7 범위에 있을 때 2중망을 통해 확보할 수 있는 단계별 leakage rate을 보여준다. Tier-1에서는 사드 2발, Tier-2에서는 PAC-3 2발로 요격한다. 두 미사일 모두 SSPk가 0.6일 때 leakage rate은 0.0256이 된다. 사드나 PAC-3의 SSPk 중 어느 한쪽이 0.1만 올라도 leakage rate은 0.0144로 단층망에 비해 11배 개선되어, 10발이면 0.14발만, 20발이면 0.29발, 50발이면 0.72발, 100발이면 1.44발 관통한다. 두 미사일 모두 SSPk가 0.7이 되면 leakage rate은 0.0081이 되어 10발이면 0.081발, 20발이면 0.16발, 50발이면 0.41발, 100발이어도 1발 미만인 0.81발만 관통된다. 사드와 PAC-3의 SSPk가 모두 0.6일 때와 비교하면 3.16배 개선되었다.⁵¹

[그림 23]은 [그림 22]에 사드 1발 추가 시 가능한 4조합의 leakage rate을 보여준다. 여기서 두 미사일 모두 요격 수준이 가장 낮은 SSPk인 0.6일 때 leakage rate은 0.01024이다. 적 미사일 10발 공격 시 0.1발, 20발이면 0.2발, 50발이면 0.51발, 100발 공격 시 1.02발 관통하며 사드 2발, PAC-3 2발로 요격했을 때보다 2.5배 개선된다.

51. 여기서 유념해야 할 점은 하층 방어망의 요격 수준을 고정하지 않고 2중 방어망의 개선 효과를 비교했다는 점이다.

[그림 23] 사드: 3발, PAC-3: 2발 (SSPk: 0.6~0.7, W=100)



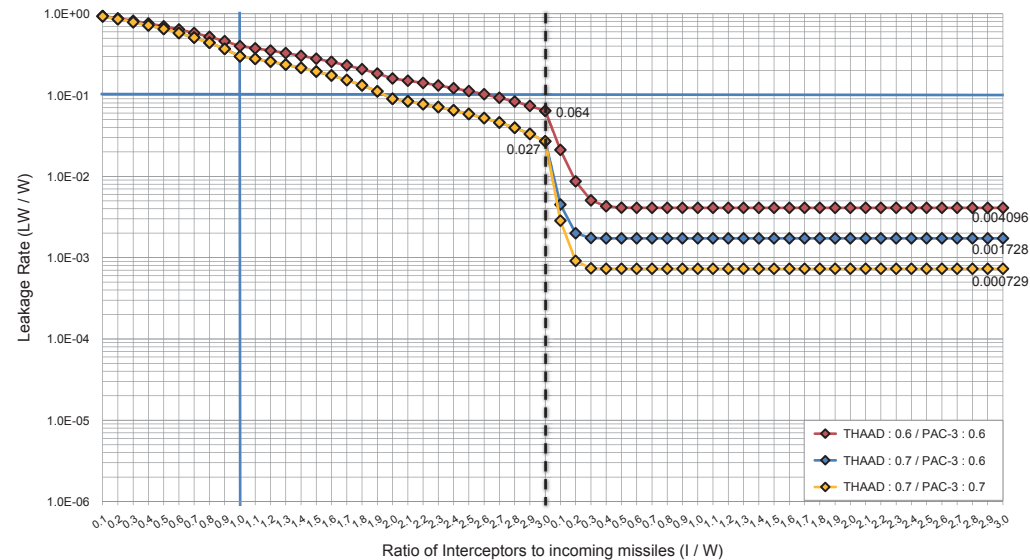
만약 사드 SSPk가 0.7, PAC-3는 0.6이면 적 미사일 10발 공격 시 0.043발, 20발이면 0.086발, 50발이면 0.22발, 100발이면 0.432발, 반대로 사드가 0.6, PAC-3는 0.7이면 10발이면 0.057발, 20발이면 0.12발, 50발이면 0.28발, 100발이면 0.576발, 두 미사일 모두 0.7이 되면 100발에 0.24발, 50발에 0.12발, 20발에 0.05발, 10발에 0.02발 관통된다. 어느 경우라도 사드와 PAC-3 중 하나만 SSPk가 0.7이 되면 최종적으로 적의 미사일을 평균 1발 미만만 허용한다. [그림 19]에서 보았듯 단층 방어망에서 PAC-3가 각각 0.6과 0.7일 때 허용했던 '100발 공격 시 16발과 9발 관통'에 비교하면 개선 효과가 뚜렷하다.

사드 SSPk가 0.6과 0.7일 경우 첫 번째 방어망인 Tier-1에서 leakage rate은 각각 0.064와 0.027로 100발 공격 시 6.4발과 2.7발이 관통한다. 중요한 점은 Tier-1이 Tier-2가 요격해야 할 적 미사일 수를 100발에서 10발 미만으로 크게 줄여 준다는 것이다.

2중 방어망에서 사드 0.6, PAC-3 0.6을 기준으로 보면 leakage rate이 사드 0.6, PAC-3 0.7이면 1.7배, 사드 0.7, PAC-3 0.6이면 2.37배, 둘 다 0.7이면 4.2배 정도 개선된다.

[그림 24]는 SSPk가 0.6과 0.7일 때 사드 3발, PAC-3 3발로 요격 시 3조합의 leakage rate을 보여준다. 시나리오 중 Tier-1과 Tier-2에서 대응하는 요격미사일 숫자가 가장

[그림 24] 사드: 3발, PAC-3: 3발 (SSPk: 0.6~0.7, W=100)



많은 경우이다. 두 미사일 모두 요격 수준이 가장 낮은 SSPk 0.6일 때 leakage rate은 0.004096이다. 적 미사일 10발 공격 시 0.04발, 20발이면 0.08발, 50발이면 0.2발, 100발 공격 시 0.4발로 모두 1발 미만이다. 사드 3발과 PAC-3 2발 요격보다 2.5배, 사드와 PAC-3 각각 2발 요격 보다 6.25배의 개선 효과가 있다.

사드와 PAC-3 중 하나만 SSPk가 0.1 오르면 leakage rate은 0.001728로 떨어진다. 50발을 쏘면 0.086발, 100발을 쏘아도 0.17발만 관통한다. 두 미사일 모두 0.7로 개선될 경우 leakage rate은 0.000729로 50발이면 0.036발, 100발이면 0.073발만 허용한다. 적이 100발로 공격을 해오더라도 관통되는 미사일이 0.1발 미만이며 적이 1,000발을 쏘더라도 평균 0.7발로 1발 미만을 유지한다. 이는 2중 방어망에서 가장 낮은 수준이었던 SSPk가 모두 0.6인 사드 2발과 PAC-3 2발로 요격할 때와 비교하면 35배, 사드 3발과 PAC-3 2발 요격 시와 비교하면 14배, SSPk가 모두 0.7인 사드 2발과 PAC-3 2발 요격 시와 비교하면 11배, 사드 3발과 PAC-3 2발 요격 시와 비교하면 3.3배의 개선 효과가 있다.

또 단층 방어망에서 요격 수준이 고정되어 있지 않은 SSPk가 0.7인 PAC-3 3발 요격 시와 비교하면 37배, SSPk가 0.6인 PAC-3 3발 요격 시와 비교하면 88배, SSPk가 0.7인 PAC-3 2발 요격 시 비교하면 123배, SSPk가 0.6인 PAC-3 2발 요격 시와 비교하면 219

배의 개선 효과가 있다.

이처럼 사드의 SSPk가 0.6~0.7 수준에서도 2중 방어망으로 인한 leakage rate의 개선 효과는 뚜렷하게 나타난다.

이론적으로 단층 방어망의 요격 수준을 고정시키지 않고 비교하자면 가장 낮은 수준의 방어 방식은 단층 방어망에서 SSPk가 0.6인 PAC-3 미사일 2발로 요격하는 것이며 이때 leakage rate은 0.16이다. 반면 가장 높은 수준의 방어 방식은 SSPk가 모두 0.9인 사드 미사일 3발과 PAC-3 미사일 3발로 요격하는 것으로 이때 leakage rate은 0.000001이다. 이럴 경우 단일 방어망 대비 2중 방어망의 개선 효과는 무려 160,000배에 달한다.

2.2.3 Terminal leakage rate이 같은 경우

[표 10]은 SSPk가 0.8인 사드와 PAC-3를 각각 3발과 2발, 2발과 3발로 요격 시 사용된 미사일의 평균 비용이다.⁵² 여기서 사드 1발당 가격은 15.47M 달러(~180억 원), PAC-3 1발당은 5.19M 달러(~60억 원)이다.⁵³ 두 경우 모두 최종 관통 미사일 수와 Pr(no leakage)은 0.032와 96.9%로 동일하다. 하지만 비용 면에서는 차이가 난다. 사드와 PAC-3를 각각 3발과 2발의 경우 총 4,692.9M 달러(~5조 5천억 원)이며 이 중 PAC-3 비용은 51.9M 달러(~609억 원)이다. 2발과 3발로 요격 시 사용된 미사일의 평균 비용은 총 3,249.7M 달러(~3조 8천1백억 원)이며 이 중 PAC-3 비용은 155.7M 달러(~1천8백억 원)이다.⁵⁴ 2발과 3발일 때는 약 1조 7천억 원이 절감되어 비용 부담을 줄이게 된다. 하지만

[표 10] 적 미사일 100발 공격 시 요격에 드는 비용 (사드와 PAC-3의 SSPk: 0.8)

Type		Tier-1		Tier-2		비용 (\$M, 2015)		
THAAD	PAC-3	관통 미사일 수	Pr(no leakage)	관통 미사일 수	Pr(no leakage)	THAAD	PAC-3	총 합계
3	2	0.8	44.8%	0.032	96.9%	4,641.0	51.9	4,692.9
2	3	4	1.7%	0.032	96.9%	3,094.0	155.7	3,249.7

52. PAC-3의 비용을 산출할 때 leakage rate이 수렴하는 지점 수준까지 요격미사일이 필요한 것으로 가정하였다.

53. 계산에 적용된 사드와 PAC-3 가격은 "Program Acquisition Cost by Weapon System, US DoD Fiscal Year 2016 Budget Request"에서 인용하였다.

이 경우에는 Tier-1에서 적 미사일이 4발씩이나 관통하며 100발 모두를 격추시킬 확률은 2% 미만이다. 만에 하나 PAC-3 단계에서 남은 4발 중 1발만 놓쳐 핵 폭발로 이어지면 그 피해는 돈으로 환산하기 어렵다. 적 미사일이 핵 탄두를 장착하고 있다 가정한다면 목표에 가까워지기 전에 최대한 멀리서 격추시켜야 하기 때문에 이 점에서 사드의 추가가 더욱 필요하다.⁵⁵

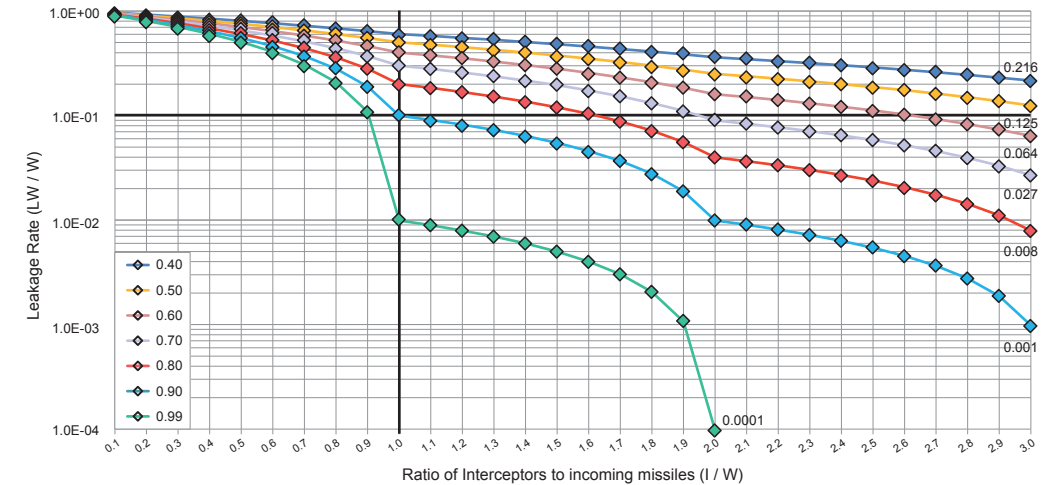
2.3 발견 3: 3발 요격 방식이면 사드 SSPk가 0.785 이상은 돼야⁵⁶

다양한 기준이 있을 수 있지만 요격미사일이 갖추어야 할 최소한의 SSPk를 leakage rate 과 Pr(no leakage) 관점으로 살펴보자. 북한이 동시 다발적으로 미사일 공격을 해오더라도 Tier-1에서 관통하는 평균 미사일 수를 가능한 한 최대 1발로 제한하는 기준을 만들 수 있다. 이런 후 최종적으로 Tier-2에서 관통하는 미사일 수를 1발 미만으로 크게 줄이는 방식을 택하였다.

2.3.1 Leakage rate 관점

북한이 10발의 미사일로 공격할 경우 Tier-1의 상황을 [그림 25]를 통해 보면 SSPk가 0.6인 사드 2발로 요격 시 1.6발(> 1)이 관통하나 2.6발⁵⁷로 요격 시 약 1발 정도로 낮아진다. 이는 SSPk가 0.8인 사드 1.6발로 요격하는 것과 결과가 비슷하다. 다시 말해 SSPk가 0.6인 사드 2.6발을 쏘면 SSPk가 0.8인 사드 1.6발을 쏜 것과 동일한 수준의 leakage rate을 얻을 수 있다. 1.6발에서 2.6발로 1발의 요격미사일을 추가하자 비슷한 결과가 나온 것이다. SSPk(0.6)의 변동이 없어도 요격미사일만 1발 늘려 3발로 요격하면 10발당 1.6발에서 0.64발(< 1발)만 관통된다. SSPk가 낮은 경우 요격미사일의 수를 늘리면 leakage

[그림 25] Tier-1에서 SSPk와 최대 3발의 요격미사일 수에 따른 leakage rate 그래프



rate이 개선된다.

그러나 만약 SSPk가 0.5 수준으로 떨어지면 3발로 요격해도 적의 미사일이 1.25발 살아 남게 돼 받아 들일 수 없다. 적이 10발로 공격을 해 올 것으로 가정하에 leakage rate만을 고려한다면 SSPk가 최소 0.6 이상은 되어야 감내할 수 있는 수준으로 적 미사일 관통 수를 낮출 수 있다.

[그림 26]은 적 미사일 1발당 최대 사드 미사일 5발로 Tier-1에서 요격할 경우 leakage rate을 보여준다. 빨간 수직선(점선)과 교차점은 현재 고려하고 있는 최대 사드 미사일 3발 때 값이다. 3발을 쏘 경우 SSPk가 0.536 수준이면 leakage rate이 0.1이 돼 적의 미사일 10발 중 평균 1발만 관통시킨다. SSPk가 0.4가 되면 비슷한 수준의 leakage rate을 얻기 위해서는 4.6발을 발사해야 하는데 그렇게 되면 너무 많은 사드 미사일이 필요하다.⁵⁸

앞서 본 ‘사드 SSPk 0.6 기준’은 북한이 10발 정도의 미사일로 공격하는 경우에 적용할 수

54. 요격에 들어가는 비용은 사드가 대부분을 차지하기 때문에 사드와 PAC-3 요격미사일 발수가 3발, 2발인 경우와 2발, 3발인 경우의 총비용을 비교하면 사드 미사일의 발사수인 약 3:2의 비율이 나온다. 또한 스커드 100발 가격이 대략 200M 달러(스커드 1발당 가격은 ~\$2M)인 것을 감안하면 방어를 위해 적 미사일 비용의 약 16배에서 23배 정도의 비용이 더 소요된다.

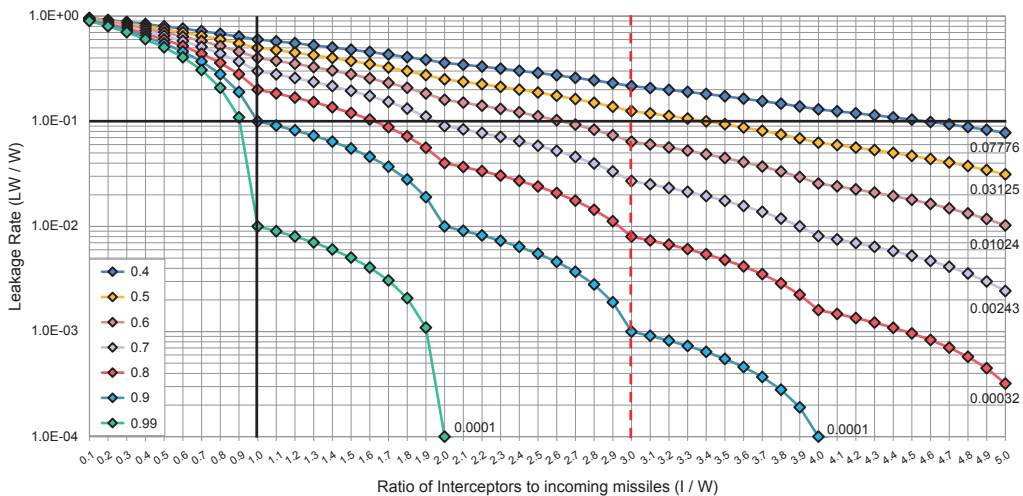
55. 2중 방어망 위에 고고도 요격미사일 체계인 SM-3(Standard Missile)를 한층 더 구축하면 미사일 방어망은 더욱 더 강화되며 사드가 PAC-3의 부담을 덜어 주었듯이 SM-3도 사드의 부담을 덜어 준다. SM-3는 고도 70~500Km 구간에서 적 미사일을 격추 시킨다.

56. 시뮬레이션에서 적 미사일이 가장 많은 100발을 기준으로 삼았을 경우이다. 이때, 2발 요격 방식이면 사드 SSPk가 0.82이상이어야 한다.

57. 적의 미사일 10발을 사드 미사일 26발로 요격함.

58. 주목할 부분은 leakage rate이 0.1에서 10배 개선된 0.01(i.e., 1.0E-2, 100분의 1) 수준에서는 SSPk 값 0.1의 차이와 요격미사일 약 1발의 차이가 5발 범위 내에서는 비슷하다는 점이다. 예를 들어 SSPk가 거의 완벽한 0.99 수준인 요격미사일 1발과 0.9인 요격미사일 2발의 leakage rate은 동일하다.

[그림 26] Tier-1에서 SSPk와 최대 5발의 요격미사일 수에 따른 leakage rate 그래프



있는 기준이다. 북한이 그 이상의 미사일로 대대적인 공격을 해 올 때는 SSPk는 0.6 이상이 돼야 한다. [표 11]은 적 미사일 1발당 사드 미사일 2발, 3발로 요격 할 경우 적 미사일 수가 각각 10발, 20발, 50발, 100발일 때 Tier-1을 관통하는 미사일 수를 1발로 낮추기 위해 필요한 사드의 최소 SSPk 값을 보여준다.

[표 11] 적 미사일 1발 당 사드 미사일 2발, 3발로 요격 시 Tier-1을 관통하는 적 미사일 수를 1발로 제한하기 위해 필요한 사드의 최소 SSPk 값 및 총 미사일 수와 포대 수⁵⁹

적의 미사일 수 (W)	SSPk (2발 요격)	SSPk (3발 요격)	총 사드 미사일 수	총 사드 포대 수
10	0.684	0.536	20:30	1
20	0.777	0.632	40:60	1:2
50	0.859	0.729	100:150	3:4
100	0.9	0.785	200:300	5:7

59. 사드 1포대 48발 기준.

북한의 공격 미사일이 10개일 때는 사드의 SSPk가 0.54~0.68에서도 ‘1발 관통’이라는 기준을 받아들일 수 있어 1포대 규모로 방어가 가능하지만 그 이상이 되면 SSPk도 따라서 향상돼야 하며 더 많은 요격미사일을 필요로 한다.

그렇다면 주한미군에 배치될 예정인 사드 1포대의 대응 능력은 어느 정도인지 알아보자. 사드 1포대의 요격미사일은 48발이다. 적 미사일 1발당 2발로 요격할 경우 24발, 3발로 요격할 경우 16발까지 대응이 가능하다. 적 미사일 10발 공격 시 SSPk가 0.6인 사드 3발로 대응하면 적 미사일 0.64발 정도가 Tier-1을 관통해 ‘Tier-1에서 수용할 수 있는 수준’의 위협이라는 것을 앞서 보았다. 그러나 20발을 공격한다면 적 미사일 1발당 2.4발로 요격이 가능하나 leakage rate은 0.1216이 돼 적 미사일 2.4발이 Tier-1을 관통하게 된다 ([그림 25] 참고). 이는 ‘수용 가능한 수준’을 넘어선다. 3발로 요격할 경우 SSPk가 0.632 라면 leakage rate이 0.05가 돼 20발 중 1발만 관통하기 때문에 ‘수용할 수 있는 수준’이 된다. 그런데 이를 위해서는 60개의 요격미사일이 필요하다. 사드 1개 포대 규모가 요격미사일 48발이므로 모자라는 12개를 위해 별도의 사드 요격미사일이 추가돼야 한다. 만약 적의 미사일 수가 100발이 되면 사드 3발 발사를 기준으로 하면 SSPk가 0.785가 되어야 하며 총 300발 (사드 포대 7개 규모)의 사드 요격미사일이 필요하다.

이는 북한이 공격할 미사일이 20발이 넘을 경우, 변동되는 미사일 수에 따른 새로운 위협 평가를 통해 사드를 추가해야 한다는 점을 의미한다. 사드 미사일 1발 당 비용이 \$15.5M (~180억 원)이며 북한의 스커드는 \$2M(~23억 원)이라는 것을 감안하면 한국이 북한의 ‘미사일 증가’에 따라 ‘비싼 사드’를 지속적으로 늘려야 하는 상황임을 직시해야 한다.

2.3.2 Pr(no leakage) 관점

적 미사일이 전부 요격하는 것이 최상이지만 SSPk가 1.0이 아니면 적 미사일을 모두 격추시키지 못할 가능성은 항상 존재한다. 그런데 실제로 SSPk의 한계가 있으므로 적어도 Pr(no leakage)이 100%에 어느 정도 근접(90% 이상)할 수 있어야 한다. 2중 방어망에서는 Tier-1과 Tier-2 종료 시점에서의 Pr(no leakage)이 있다.

[표 12]는 사드와 PAC-3의 SSPk가 같으며 각각 2발로 요격할 경우 각 시점별 Pr(no leakage)과 관통하는 적의 평균 미사일 수를 나타낸다. 이 표에서는 사드와 PAC-3의 SSPk 값을 동일하게 하여 2중망을 구성하였다.

[표 12] 사드 2발:PAC-3 2발 요격 시 Tier-1과 Tier-2에서의 Pr(no leakage)과 관통하는
평균 미사일 수

관찰 지점	SSPk		Pr(no leakage)				관통하는 평균 미사일 수 (발)			
			적의 미사일 수 (W)				적의 미사일 수 (W)			
			10	20	50	100	10	20	50	100
Tier-1	THAAD	0.6	17.49%	3.06%	0.02%	~0.0%	1.6	3.2	8	16
Tier-2	PAC-3	0.6	77.16%	59.53%	27.34%	7.48%	0.256	0.512	1.28	2.56
Tier-1	THAAD	0.7	38.94%	15.16%	0.9%	0.01%	0.9	1.8	4.5	9
Tier-2	PAC-3	0.7	92.19%	84.99%	66.59%	44.34%	0.081	0.162	0.405	0.81
Tier-1	THAAD	0.8	66.48%	44.2%	12.99%	1.69%	0.4	0.8	2	4
Tier-2	PAC-3	0.8	98.41%	96.85%	92.31%	85.2%	0.016	0.032	0.08	0.16
Tier-1	THAAD	0.9	90.44%	81.79%	60.5%	36.6%	0.1	0.2	0.5	1
Tier-2	PAC-3	0.9	99.9%	99.8%	99.5%	99%	0.001	0.002	0.005	0.01

적이 10발의 미사일로 공격해오면 SSPk가 0.6일 때 Tier-1에서의 Pr(no leakage)은 17.5%이며 1.6발이 관통하는데, Tier-2에서는 77.2%와 0.26발로 개선된다.

SSPk가 0.7이 되면 Pr(no leakage)과 관통 미사일 수가 Tier-1에서는 38.9%, 0.9발, Tier-2에서는 92.2%, 0.08발이다. Tier-1에서 Pr(no leakage)이 90% 수준에 도달하려면 SSPk가 0.9 이상은 되어야 한다. 하지만 적 미사일 숫자가 20발이 되면 SSPk가 0.9가 되어도 Tier-1에서 미사일 모두를 격추 시킬 확률은 81.8% 정도이며 50발이면 60.5%, 100발이면 36.6%로 줄어든다.

북한이 미사일 100발로 공격해온다면 SSPk가 0.6일 때 Tier-2 종료 시 Pr(no leakage)은 7.48%에 불과하며 0.7에서는 44.3%, 0.8은 85%, 0.9가 되면 99%에 도달한다.⁶⁰ 사드 2발, PAC-3 2발 발사 시 SSPk가 0.8 수준에서는 50발까지 공격을 해와도 Tier-2에

60. SSPk가 0.85일 때 Tier-2에서의 Pr(no leakage)은 95%가 됨으로 90% 수준을 달성하기 위해서는 SSPk가 0.8~0.85 범위 사이에 있다.

[표 13] 사드 3발:PAC-3 2발 요격 시 Tier-1과 Tier-2에서의 Pr(no leakage)과 관통하는
평균 미사일 수

관찰 지점	SSPk		Pr(no leakage)				관통하는 평균 미사일 수 (발)			
			적의 미사일 수 (W)				적의 미사일 수 (W)			
			10	20	50	100	10	20	50	100
Tier-1	THAAD	0.6	51.61%	26.64%	3.66%	0.13%	0.64	1.28	3.2	6.4
Tier-2	PAC-3	0.6	90.22%	81.4%	59.77%	35.73%	0.1024	0.2048	0.512	1.024
Tier-1	THAAD	0.7	76.06%	57.84%	25.45%	6.48%	0.27	0.54	1.35	2.7
Tier-2	PAC-3	0.7	97.6%	95.25%	88.55%	78.4%	0.0243	0.0486	0.1215	0.243
Tier-1	THAAD	0.8	92.28%	85.16%	66.92%	44.79%	0.08	0.16	0.4	0.8
Tier-2	PAC-3	0.8	99.68%	99.36%	98.41%	96.85%	0.0032	0.0064	0.016	0.032
Tier-1	THAAD	0.9	99%	98.02%	95.12%	90.48%	0.01	0.02	0.05	0.1
Tier-2	PAC-3	0.9	99.99%	99.98%	99.95%	99.9%	0.0001	0.0002	0.0005	0.001

서의 Pr(no leakage) > 90%가 가능하다. Tier-1에서는 SSPk가 0.9가 되더라도 미사일 100발 공격 시 1발은 관통한다.

[표 13], [표 14], [표 15]는 [표 12]의 발사 방식에서 각각 사드 1발, PAC-3 1발, 사드와 PAC-3 모두 1발씩을 추가 했을 때의 Pr(no leakage)과 관통하는 평균 미사일 수를 보여준다.

[표 13]을 보면 적의 미사일이 10발인 경우 SSPk가 최소 0.8은 되어야 Tier-1의 Pr(no leakage)이 90% 수준을 넘으며 0.08발만 관통시킨다. SSPk가 0.9가되면 100발까지 쏘아도 Tier-1에서 완전히 격추 할 수 있는 확률이 90%를 넘어선다. SSPk가 0.8이면 Tier-1에서의 Pr(no leakage)은 100발인 경우 44.8%이지만 Tier-2에서는 96.8%에 달한다. Tier-2에서는 SSPk가 0.7이어도 50발을 쏘면 완전히 격추할 수 있는 확률이 90%, 100발이면 80%에 다가선다.⁶¹ 관통하는 평균 미사일 수로 보면 SSPk가 0.8이상이 되면 100발로 공격을 해도 Tier-1을 관통하는 평균 미사일 수는 1발 미만이다.

[표 14] 사드 2발:PAC-3 3발 요격 시 Tier-1과 Tier-2에서의 Pr(no leakage)과 관통하는
평균 미사일 수

관찰 지점	SSPk		Pr(no leakage)				관통하는 평균 미사일 수 (발)			
			적의 미사일 수 (W)				적의 미사일 수 (W)			
			10	20	50	100	10	20	50	100
Tier-1	THAAD	0.6	17.49%	3.06%	0.02%	~0.0%	1.6	3.2	8	16
Tier-2	PAC-3	0.6	90.22%	81.40%	59.77%	35.73%	0.1024	0.2048	0.512	1.024
Tier-1	THAAD	0.7	38.94%	15.16%	0.9%	0.01%	0.9	1.8	4.5	9
Tier-2	PAC-3	0.7	97.6%	95.25%	88.55%	78.4%	0.0243	0.0486	0.1215	0.243
Tier-1	THAAD	0.8	66.48%	44.2%	12.99%	1.69%	0.4	0.8	2	4
Tier-2	PAC-3	0.8	99.68%	99.36%	98.41%	96.85%	0.0032	0.0064	0.016	0.032
Tier-1	THAAD	0.9	90.44%	81.79%	60.5%	36.6%	0.1	0.2	0.5	1
Tier-2	PAC-3	0.9	99.99%	99.98%	99.95%	99.9%	0.0001	0.0002	0.0005	0.001

[표 13]과 [표 14]를 보면 SSPk가 같을 때 Tier-2에서 Pr(no leakage) 값과 평균 관통하는 미사일 수가 동일하다. 예를 들면 적이 10발로 공격을 한다면 SSPk가 0.7일 때 Tier-2에서 Pr(no leakage)은 두 표에서 모두 97.6%란 것을 볼 수 있으며 평균 0.0243발 관통한다. 하지만 Tier-1에서 Pr(no leakage)은 사드를 3발 쏜 경우 76.1%이며 사드를 2발 쏜 경우 38.9%여서 3발로 요격했을 때의 요격 확률이 2발 때보다 2배 정도 높다. 적의 미사일이 100발이면 차이는 더 두드러지게 나타난다. SSPk가 0.8인 경우 Tier-1에서 Pr(no leakage)은 사드 3발인 경우 44.8%이나 사드 2발인 경우는 1.7%에 불과하다. 최대한 멀리서 적 미사일을 격추시켜야 하므로 사드 3발로 먼저 요격할 필요가 있다.

[표 15]는 가장 높은 단계의 방어를 할 때 Pr(no leakage)과 관통하는 평균 미사일 수를 보여준다. Tier-1에서 사드 3발로 요격하기 때문에 Tier-1의 결과는 [표 13]과 동일하며 여기에 PAC-3 1발을 추가한 것임으로 Tier-2의 결과만 개선된다. Tier-2에서의 Pr(no leakage)을 살펴보면 SSPk가 0.7에서도 100발을 쏘 경우 92.9%가 되며 0.8에서는 99.4%

61. SSPk가 0.75이면 100발을 쏘아도 Tier-2에서 완전히 격추할 수 있는 확률은 90.7%이며 0.097발 관통한다.

[표 15] 사드 3발:PAC-3 3발 요격 시 Tier-1과 Tier-2에서의 Pr(no leakage)과 관통하는
평균 미사일 수

관찰 지점	SSPk		Pr(no leakage)				관통하는 평균 미사일 수 (발)			
			적의 미사일 수 (W)				적의 미사일 수 (W)			
			10	20	50	100	10	20	50	100
Tier-1	THAAD	0.6	51.61%	26.64%	3.66%	0.13%	0.64	1.28	3.2	6.4
Tier-2	PAC-3	0.6	95.98%	92.12%	81.45%	66.34%	0.04096	0.08192	0.2048	0.4096
Tier-1	THAAD	0.7	76.06%	57.84%	25.45%	6.48%	0.27	0.54	1.35	2.7
Tier-2	PAC-3	0.7	99.27%	98.55%	96.42%	92.97%	0.00729	0.01458	0.03645	0.0729
Tier-1	THAAD	0.8	92.28%	85.16%	66.92%	44.79%	0.08	0.16	0.4	0.8
Tier-2	PAC-3	0.8	99.94%	99.87%	99.68%	99.36%	0.00064	0.00128	0.0032	0.0064
Tier-1	THAAD	0.9	99%	98.02%	95.12%	90.48%	0.01	0.02	0.05	0.1
Tier-2	PAC-3	0.9	100%	100%	100%	99.99%	0.00001	0.00002	0.00005	0.0001

에 달하여 거의 완벽한 수준의 격추가 가능하다. [표 11]에서 보았듯이 사드 3발을 쏘 경우 SSPk가 0.785는 되어야 적 미사일 100발 중 1발만이 관통해 하층 방어망에서 PAC-3에 의해 요격된다. SSPk가 0.6이어도 Tier-2에서의 1발 미만인 0.41발이 관통하며 0.7이면 0.073발만 관통한다. 다시 말해 100발을 쏘아도 평균적으로 관통하는 최종 적 미사일 수는 매우 적다 (<< 1).

[표 16]에서는 PAC-3 2발로 요격 할 경우 SSPk와 적의 미사일 수에 따른 Pr(no leakage) 값을 정리하였다. 이 표에서 사드와 PAC-3의 SSPk 값은 동일하다.

적의 미사일이 10발이면 단층 방어망에서도 SSPk가 0.9인 PAC-3 2발로도 Pr(no leakage)이 90.4%를 얻을 수 있다. 2중 방어망을 설치하면 SSPk가 각각 0.6인 사드 3발과 PAC-3 2발로 요격해 Tier-2에서 Pr(no leakage)이 90.2%에 이른다. 적 미사일 100발을 고려할 때 단층 방어망에서는 SSPk가 0.9이라도 Pr(no leakage)은 36.6%에 그치지만 2중 방어망에서는 SSPk 0.8~0.85 범위 내에서 Tier-2의 Pr(no leakage)을 90% 수준으로 끌어 올릴 수 있다. 사드 1발을 추가할 경우 SSPk가 0.75가 되면 Tier-2에서

[표 16] 단층 방어망과 2중 방어망에서의 Pr(no leakage) - PAC-3는 2발 기준

SSPk	PAC-3 2발 (단층 방어망)				THAAD 2발/PAC-3 2발				THAAD 3발/PAC-3 2발				관찰 지점
	적의 미사일 수 (W)												
	10	20	50	100	10	20	50	100	10	20	50	100	
0.6	17.49%	3.06%	0.02%	~0.0%	17.49%	3.06%	0.02%	~0.0%	51.61%	26.64%	3.66%	0.13%	Tier-1
					77.16%	59.53%	27.34%	7.48%	90.22%	81.40%	59.77%	35.73%	Tier-2
0.7	38.94%	15.16%	0.9%	0.01%	38.94%	15.16%	0.9%	0.01%	76.06%	57.84%	25.45%	6.48%	Tier-1
					92.19%	84.99%	66.59%	44.34%	97.6%	95.25%	88.55%	78.4%	Tier-2
0.8	66.48%	44.2%	12.99%	1.69%	66.48%	44.2%	12.99%	1.69%	92.28%	85.16%	66.92%	44.79%	Tier-1
					98.41%	96.85%	92.31%	85.2%	99.68%	99.36%	98.41%	96.85%	Tier-2
0.9	90.44%	81.79%	60.5%	36.6%	90.44%	81.79%	60.5%	36.6%	99%	98.02%	95.12%	90.48%	Tier-1
					99.9%	99.8%	99.5%	99%	99.99%	99.98%	99.95%	99.9%	Tier-2

100발 모두 격추시킬 확률은 90.7%에 달한다.⁶²

단층 방어망에서는 SSPk가 0.8에서도 100발의 Pr(no leakage)이 1.7%이므로 사실상 불가능에 가깝다. 2중 방어망에서 Tier-1의 Pr(no leakage)이 90% 넘는 경우는 SSPk가 0.9가 돼야만 가능하다.

[표 17]에서는 PAC-3 3발로 요격할 경우 SSPk 값과 적의 미사일수에 따른 Pr(no leakage) 값을 정리하였다. 이 표에서 사드와 PAC-3의 SSPk 값은 동일하다.

적의 미사일이 10발일 경우 단층 방어망에서도 SSPk가 0.8이면 PAC-3 3발로도 Pr(no leakage)이 92.3%가 된다. SSPk가 0.9가 되면 100발로 공격해도 완전히 격추시킬 확률은 90.4%나 된다. 사드 2발과 PAC-3 3발의 경우 [표 16]의 사드 3발과 PAC-3 2발의 최

62. SSPk가 0.75일 때의 결과는 [표 16]에 나타나 있지 않다. 그리고 여기서 언급되는 SSPk는 사드와 PAC-3 요격미사일 모두 동일하게 적용된다.

[표 17] 단층 방어망과 2중 방어망에서의 Pr(no leakage) - PAC-3는 3발 기준

SSPk	PAC-3 3발 (단층 방어망)				THAAD 2발/PAC-3 3발				THAAD 3발/PAC-3 3발				관찰 지점
	적의 미사일 수 (W)												
	10	20	50	100	10	20	50	100	10	20	50	100	
0.6	51.61%	26.64%	3.66%	0.13%	17.49%	3.06%	0.02%	~0.0%	51.61%	26.64%	3.66%	0.13%	Tier-1
					90.22%	81.4%	59.77%	35.73%	95.98%	92.12%	81.45%	66.34%	Tier-2
0.7	76.06%	57.84%	25.45%	6.48%	38.94%	15.16%	0.9%	0.01%	76.06%	57.84%	25.45%	6.48%	Tier-1
					97.6%	95.25%	88.55%	78.4%	99.27%	98.55%	96.42%	92.97%	Tier-2
0.8	92.28%	85.16%	66.92%	44.79%	66.48%	44.2%	12.99%	1.69%	92.28%	85.16%	66.92%	44.79%	Tier-1
					99.68%	99.36%	98.41%	96.85%	99.94%	99.87%	99.68%	99.36%	Tier-2
0.9	99%	98.02%	95.12%	90.48%	90.44%	81.79%	60.5%	36.6%	99%	98.02%	95.12%	90.48%	Tier-1
					99.99%	99.98%	99.95%	99.9%	99.99%	100%	100%	99.99%	Tier-2

종 결과와 동일하나 후자가 더 바람직하다는 것을 몇 차례 강조했다.

가장 많은 적 미사일 100발을 고려할 때 단층 방어망에서는 SSPk가 0.7일 때 PAC-3 3발로 요격 시 Pr(no leakage)은 6.5%에 지나지 않으나 2중 방어망에서 사드 3발과 PAC-3 3발 요격 시는 Tier-2에서 Pr(no leakage)은 93%나 된다. 하지만 SSPk가 0.8이 되어도 Tier-1에서 Pr(no leakage)은 50% 미만이며 0.9는 되어야 90.5%에 이른다.⁶³ SSPk가 0.9에서는 사드 수에 관계없이 PAC-3를 2발로 요격하던 3발로 요격하던 Pr(no leakage)의 변화는 미미하므로 큰 의미가 없다. 2발로 요격해도 충분하다.

결론적으로 방어하는 입장에서는 SSPk가 높을수록 좋다. 이론적으로 PAC-3도 SSPk가 0.9이상이면 단일 방어망으로 운용할 수 있다. 그러나 이 정도 수준의 SSPk가 가능한지는 알 수가 없다. 적 미사일 100발 공격을 가정할 때 Tier-1에서 Pr(no leakage)을 90%

63. [표 17]에는 나타나 있지 않으나 2중 방어망에서 SSPk가 0.85가 되면 사드 3발 요격 시 적 미사일 100발을 Tier-1에서 Pr(no leakage)은 71% 정도다.

충족시키는 것은 기술적으로 어려울 수 있다. 따라서 조건을 완화하여 사드 3발로 요격할 경우에는 Tier-1에서 관통하는 적 미사일을 1발 이하로 제한하고 Tier-2에서의 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 을 90% 이상을 충족시키도록 기준을 정할 수 있다. 여기서 꼭 90%라고 규칙을 정해놓을 필요는 없다. 얼마만큼 위험 부담(risk-tolerance)을 감내할 수 있는지에 대한 합의가 있어야 한다. 사드 2발로 요격할 때는 $\text{SSPk} < 0.9$ 하에서 Tier-1을 관통하는 적 미사일을 1발로 제한할 수 없으므로 두 번째 조건인 Tier-2에서의 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 을 90% 이상을 만족시키는 것으로 기준을 삼을 수 있다. $\text{Pr}(\text{no leakage}) \geq 90\%$ 수준이 되면 평균적으로 관통하는 최종 적 미사일 수는 매우 적다(< 1).

적 미사일 100발 공격 가정 시

- 사드와 PAC-3의 $\text{SSPk}=0.785$: 사드 3발로 요격 시 Tier-1을 관통하는 평균 적 미사일 수는 1발이며 이후 PAC-3 3발 요격 시 최종적으로 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 은 99%, 관통하는 미사일 수는 ~ 0.01 발이다. PAC-3 2발로 요격 시는 최종 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 은 95.5%, 관통 미사일 수는 0.046발이다.
- 사드와 PAC-3의 $\text{SSPk}=0.82$: 사드 2발 요격 시 Tier-1을 관통하는 평균 적 미사일 수는 3.24발이며 이후 PAC-3 3발 요격 시 최종 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 은 98.1%, 관통 미사일 수는 0.018발이다. PAC-3 2발 요격 시 최종 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 은 90%, 관통 미사일 수는 0.105발이다.

적 미사일 20발 공격 가정 시⁶⁴

- 사드와 PAC-3의 $\text{SSPk}=0.65$: 사드 3발 요격 시 Tier-1을 관통하는 평균 적 미사일 수는 0.86발이며 이후 PAC-3 3발 요격 시 최종 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 은 96.4%, 관통 미사일 수는 0.036발이다. PAC-3 2발 요격 시는 최종 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 은 90%, 관통 미사일 수는 0.105발이 된다. 만약 두 미사일의 SSPk 를 모두 0.632로 잡으면 Tier-1에서 관통하는 평균 적 미사일 수는 1발이 되나 PAC-3 2발로 요격하면 최종 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 은 87.3%로 위의 조건($\text{Pr}(\text{no leakage}) \geq 90\%$)을 충족하지 않는다.
- 사드와 PAC-3의 $\text{SSPk}=0.731$: 사드 2발로 요격 시 Tier-1을 관통하는 평균 적 미사일 수는 1.45발이며 이후 PAC-3 3발 요격 시 최종 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 은 97.2%, 관통 미사일 수는 0.028발이다. PAC-3 2발 요격 시 최종 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 은 90%, 관통 미사일 수는 0.104발이 된다.

위에 적용된 적 미사일 20발 공격 시의 기준은 적 미사일 100발 공격 시의 기준이다. 이보다 강화시킨 다음과 같은 기준도 가능하다.

- 사드와 PAC-3의 $\text{SSPk}=0.827$: 사드 3발 요격 시 Tier-1의 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 은 90%이며 평균 0.1발 관통하며 이후 PAC-3 2발 요격 시 최종 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 은 99%이며 관통 미사일 수는 0.003발이다. PAC-3 1발 더 추가하는 것은 무의미하다.
- 사드와 PAC-3의 $\text{SSPk}=0.777$: 사드 2발 요격 시 Tier-1에서 관통하는 평균 적 미사일 수가 1발이며 이후 PAC-3 3발 요격 시 최종적으로 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 은 98.9%, 관통하는 미사일 수는 0.01발이다. PAC-3 2발로 요격 시는 최종 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 은 95.2%, 관통 미사일 수는 0.05발이다. Tier-1에서 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 이 90%가 되려면 SSPk 가 0.93은 되어야 가능하다.

적 미사일 100발 공격 가정 시 요격에 드는 비용은 다음과 같다. [표 18]은 사드 3발과 PAC-3 2발, 사드 3발과 PAC-3 3발 요격 시 사용되는 평균 비용을 보여준다. 사드 3발과 PAC-3 2발일 때 총 4,692.9M 달러(~ 5 조 5천억 원), 사드 3발과 PAC-3 3발일 때 총 4,718.9M 달러(~ 5 조 5천3백억 원)의 비용이 든다.⁶⁵

64. 밑의 표는 Michael Elleman (IISS) and Michael J. Zagurek의 38 North에 게재된 논문에서 인용한 것이다.

Table 1. Benefits of layering defenses.

Warheads in Attack	Probability of No Leakage $P(0)=0.75$		Probability of No Leakage $P(0)=0.90$	
	20	50	20	50
One Layer	$\text{SSPk}=0.881$	$\text{SSPk}=0.924$	$\text{SSPk}=0.928$	$\text{SSPk}=0.954$
Two Layer	$\text{SSPk}=0.654$	$\text{SSPk}=0.725$	$\text{SSPk}=0.731$	$\text{SSPk}=0.786$

적의 미사일 20발과 50발 공격 시 사드2발과 PAC-3 2발로 대응할 때 필요한 SSPk 를 제시하였다. $P(0)$ 은 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 과 같으며 0.75와 0.9는 각각 75%와 90%를 의미한다. 2중 방어망(Shoot-Assess-Shoot)에서 50발로 공격 시 SSPk 가 모두 0.786인 경우 Tier-1에서 평균 2.3발, Tier-2에서는 0.1발이 관통한다. 만약 SSPk 가 0.729인 사드 3발과 PAC-3 2발로 요격 시 Tier-1에서 평균 1발, Tier-2에서 0.07발 관통하며 최종 $\text{Pr}(\text{no leakage})$ 은 93% 수준이다.

[표 18] 적 미사일 100발 공격 시 요격에 드는 비용 (사드와 PAC-3의 SSPk: 0.785)

Type		Tier-1		Tier-2		비용 (\$M, 2015)		
THAAD	PAC-3	관통 미사일 수	Pr(no leakage)	관통 미사일 수	Pr(no leakage)	THAAD	PAC-3	총 합계
3	2	~1	36.83%	0,046	95.51%	4,641	51.9	4,692.9
3	3			0,010	99.02%	4,641	77.9	4,718.9

[표 19] 적 미사일 100발 공격 시 요격에 드는 비용 (사드와 PAC-3의 SSPk: 0.82)

Type		Tier-1		Tier-2		비용 (\$M, 2015)		
THAAD	PAC-3	관통 미사일 수	Pr(no leakage)	관통 미사일 수	Pr(no leakage)	THAAD	PAC-3	총 합계
2	2	3.24	3.71%	0,105	90.03%	3,094	103.8	3,197.8
2	3			0,019	98.13%	3,094	155.7	3,249.7

[표 19]는 사드 2발과 PAC-3 2발, 사드 2발과 PAC-3 3발 요격 시 사용되는 평균 비용을 보여준다. 사드 2발과 PAC-3 2발일 때 총 3,197.8M 달러(~3조 7천5백억 원), 사드 2발과 PAC-3 3발일 때 총 3,249.7M 달러(~3조 8천1백억 원)의 비용이 든다.

사드가 주축이 되어 방어를 맡기 때문에 사드의 비용이 큰 부분을 차지하며 사드 3발과 2발로 요격 시 소요되는 비용은 예상대로 3:2 비율이다.

사드 3발로 방어 시 7 포대 규모의 사드 요격미사일이 필요하며 1포대⁶⁵ 정도의 PAC-3 요격미사일 수를 갖추면 충분하다. 사드 2발로 방어 시에는 5포대 규모의 사드 요격미사일이 필요하며 마찬가지로 PAC-3 1포대면 충분하다. 앞에서 산출한 비용은 [그림 3]에서도 보듯 PAC-3가 방어하는 지역 A에 국한되어 있다. 사드가 방어하는 범위 안에 지역 방어를 맡은 PAC-3 포대가 지역 B와 지역 C 같이 여러 개 있으면 이를 고려하여 PAC-3 비용을

65. 사드 1발당 가격은 15.47M 달러(~180억 원), PAC-3 1발당 가격은 5.19M 달러(~60억 원)로 계산하였다. PAC-3의 비용을 산출 할 때 leakage rate이 수렴하는 지점 수준까지 요격미사일이 필요한 것으로 가정하였다.

66. '2016 국방백서'에 따르면 패트리엇 1포대는 60여발 구성돼 있다.

산출해야 한다.

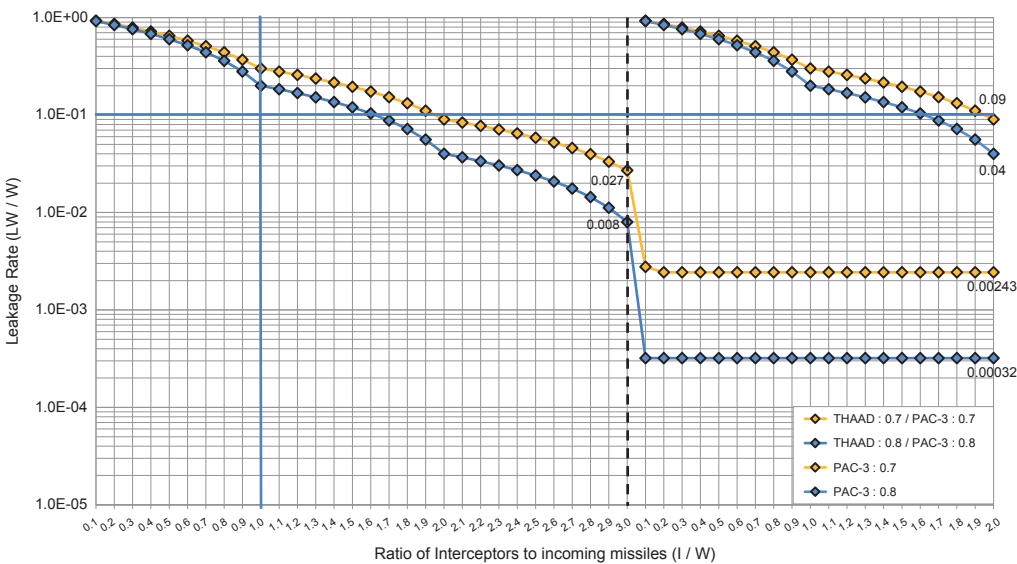
사드 구축하면 PAC-3 요격미사일이 많을 필요가 없다.

사드로 상층 방어망을 구축하면 PAC-3의 부담이 줄어든다. [그림 27]에서는 사드 3발과 PAC-3 2발로 요격 시 SSPk가 두 미사일 모두 동일한 0.7과 0.8의 leakage rate을 예로 들었다.

적 미사일 100발 공격 시 2중 방어망일 경우 SSPk가 0.7일 때 Tier-1에서 2.7발 관통하나 PAC-3의 I/W 값이 0.2만 되어도 I/W값이 2.0에 해당하는 Terminal leakage rate 0.00243과 큰 차이가 없다. 다시 말하면 PAC-3를 최소 I/W 0.2에 해당하는 20발 이상을 준비해 놓는다면 충분한 대비가 될 것이다. 0.2일 때는 100발 중 0.24발 관통한다. 여기서 SSPk가 0.1 올라 0.8일 때는 PAC-3를 최소 10발 이상만 대비해 놓으면 된다. 왜냐하면 SSPk가 0.8이면 0.7일 때 보다 더 많은 적 미사일을 Tier-1에서 격추시킬 확률이 높기 때문이다.

[그림 27]의 오른쪽 상단은 PAC-3 단층 방어망일 경우 200발을 모두 소진할 경우 leakage rate을 보여주며 SSPk가 0.7일 때 9발과 0.8일 때는 4발이 관통한다. 지역 방어를 함에

[그림 27] 사드: 3발, PAC-3: 2발 (SSPk: 0.7, 0.8, W=100)



있어 사드 요격시스템 설치 시 PAC-3의 숫자가 단일 방어망일 때만큼 필요로 하지 않으므로 적정량만을 보유하면 된다.

다양한 SSPk와 요격미사일 수의 조합에 따른 leakage rate과 Pr(no leakage)의 개선 효과 적의 미사일이 10발, 20발, 50발, 100발 일 때 SSPk와 요격미사일 수에 따른 각각 64개 조합에 대하여 시뮬레이션을 진행하였다. [표 20]은 이 조합을 보여준다.

적 미사일이 수가 고정되었을 경우 64개 조합이므로 총 256(64*4)개 조합을 시뮬레이션 하였으며 그 결과물인 leakage rate 그래프와 Pr(no leakage) 표들은 부록 4에 실었다. 적 미사일 수가 50발과 100발인 경우 leakage rate 그래프는 큰 차이를 보이지 않아 같이 놓았다. 시뮬레이션으로 얻어진 결과를 통해 사드와 PAC-3의 SSPk가 동일하지 않을 때 leakage rate과 Pr(no leakage)의 개선 효과를 가늠해 볼 수 있다.

[표 20] SSPk와 요격미사일 수의 조합 (W 고정 시 64개 조합)

THAAD		PAC-3	
SSPk	요격미사일 수	SSPk	요격미사일 수
0.6	2발 또는 3발	0.6	2발 또는 3발
		0.7	
		0.8	
		0.9	
0.7		0.6	
		0.7	
		0.8	
		0.9	
0.8		0.6	
		0.7	
		0.8	
		0.9	
0.9		0.6	
		0.7	
		0.8	
		0.9	

부록 3 - 2중 방어망 운용 시 leakage rate 개선 효과

3.1 적 미사일 1발당 PAC-3 2발 대응 시

PAC-3 단일 방어망 운용 시			THAAD를 추가해 2중 방어망 운용 시			(A)/(B) 개선 효과
# of PAC-3	SSPk of PAC-3	Terminal leakage rate (A)	# of THAAD	SSPk of THAAD	Terminal leakage rate (B)	
2	0.6	0.16	2	0.6	0.025600	6.25
				0.7	0.014400	11.11
				0.8	0.006400	25.00
				0.9	0.001600	100.00
			3	0.6	0.010240	15.63
				0.7	0.004320	37.04
				0.8	0.001280	125.00
				0.9	0.000160	1,000.00
	0.7	0.09	2	0.6	0.014400	6.25
				0.7	0.008100	11.11
				0.8	0.003600	25.00
				0.9	0.000900	100.00
			3	0.6	0.005760	15.63
				0.7	0.002430	37.04
				0.8	0.000720	125.00
				0.9	0.000090	1,000.00
	0.8	0.04	2	0.6	0.006400	6.25
				0.7	0.003600	11.11
				0.8	0.001600	25.00
				0.9	0.000400	100.00
			3	0.6	0.002560	15.63
				0.7	0.001080	37.04
				0.8	0.000320	125.00
				0.9	0.000040	1,000.00
	0.9	0.01	2	0.6	0.001600	6.25
				0.7	0.000900	11.11
				0.8	0.000400	25.00
				0.9	0.000100	100.00
			3	0.6	0.000640	15.63
				0.7	0.000270	37.04
				0.8	0.000080	125.00
				0.9	0.000010	1,000.00

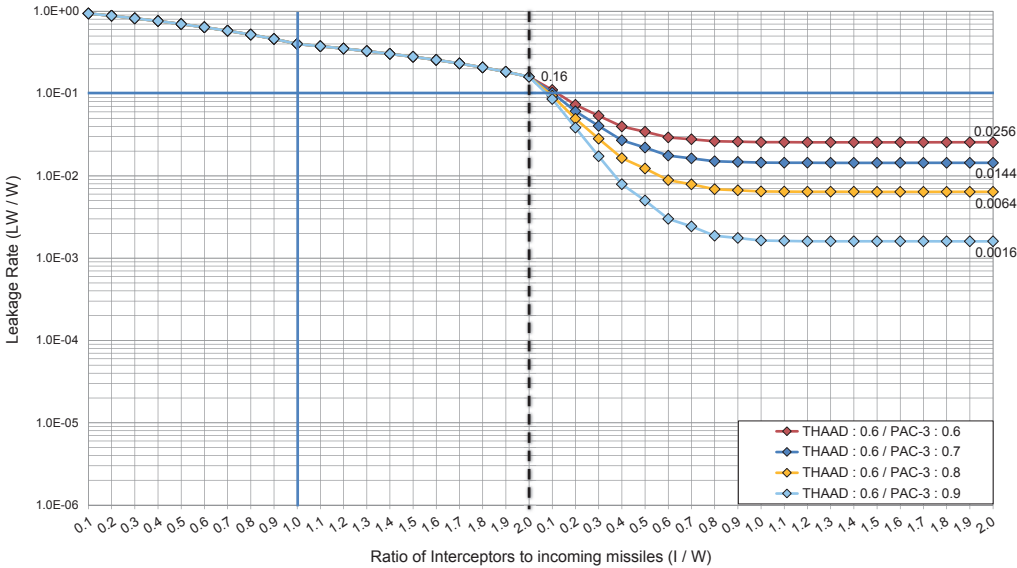
3.2 적 미사일 1발당 PAC-3 3발 대응 시

PAC-3 단일 방어망 운용 시			THAAD를 추가해 2중 방어망 운용 시			(A)/(B) 개선 효과
# of PAC-3	SSPk of PAC-3	Terminal leakage rate (A)	# of THAAD	SSPk of THAAD	Terminal leakage rate (B)	
3	0.6	0.064	2	0.6	0.010240	6.25
				0.7	0.005760	11.11
				0.8	0.002560	25.00
				0.9	0.000640	100.00
			3	0.6	0.004096	15.63
				0.7	0.001728	37.04
				0.8	0.000512	125.00
				0.9	0.000064	1,000.00
	0.7	0.027	2	0.6	0.004320	6.25
				0.7	0.002430	11.11
				0.8	0.001080	25.00
				0.9	0.000270	100.00
			3	0.6	0.001728	15.63
				0.7	0.000729	37.04
				0.8	0.000216	125.00
				0.9	0.000027	1,000.00
	0.8	0.008	2	0.6	0.001280	6.25
				0.7	0.000720	11.11
				0.8	0.000320	25.00
				0.9	0.000080	100.00
			3	0.6	0.000512	15.63
				0.7	0.000216	37.04
				0.8	0.000064	125.00
				0.9	0.000008	1,000.00
	0.9	0.001	2	0.6	0.000160	6.25
				0.7	0.000090	11.11
				0.8	0.000040	25.00
				0.9	0.000010	100.00
			3	0.6	0.000064	15.63
				0.7	0.000027	37.04
				0.8	0.000008	125.00
				0.9	0.000001	1,000.00

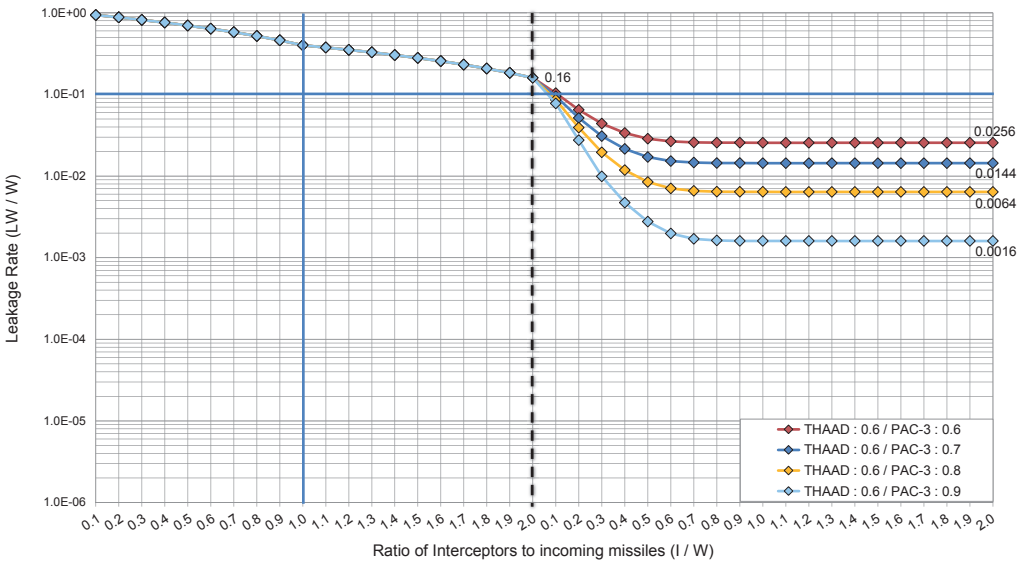
부록 4 - Leakage rate 그래프와 Pr(no leakage)

4.1 THAAD(SSPk=0.6) 2발, PAC-3(SSPk=0.6~0.9) 2발

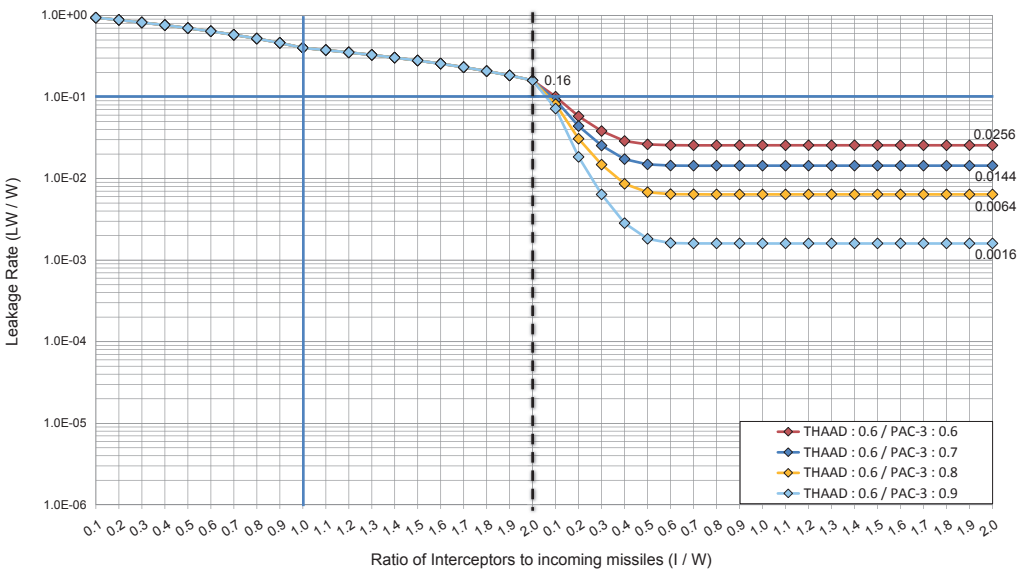
4.1.1 적 미사일 10발인 경우 leakage rate 그래프



4.1.2 적 미사일 20발인 경우 leakage rate 그래프



4.1.3 적 미사일 50, 100발인 경우 leakage rate 그래프

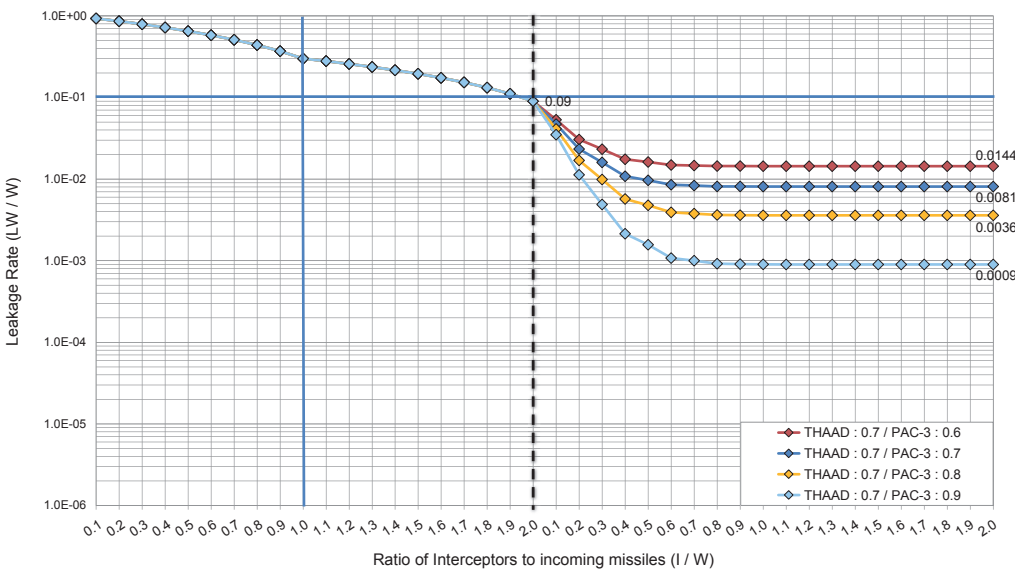


4.1.4 적 미사일 수에 따른 Pr(no leakage)

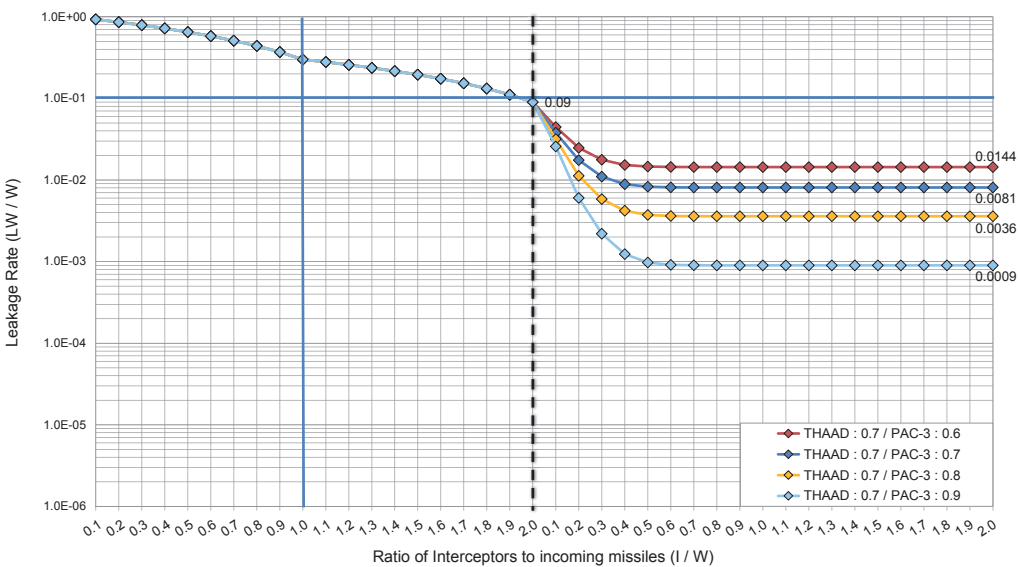
Probability that all enemy missiles are destroyed (%)						
Observation point	Probability of a single interceptor killing one apparent warhead		No of Enemy Missiles			
			10	20	50	100
After the 1st tier defense	THAAD	0.6	17.49%	3.06%	0.02%	0.00%
		0.7	77.16%	59.53%	27.34%	7.48%
After the 2nd tier defense	PAC-3	0.6	86.50%	74.82%	48.42%	23.45%
		0.7	93.78%	87.95%	72.54%	52.62%
		0.8	98.41%	96.85%	92.31%	85.20%

4.2 THAAD(SSPk=0.7) 2발, PAC-3(SSPk=0.6~0.9) 2발

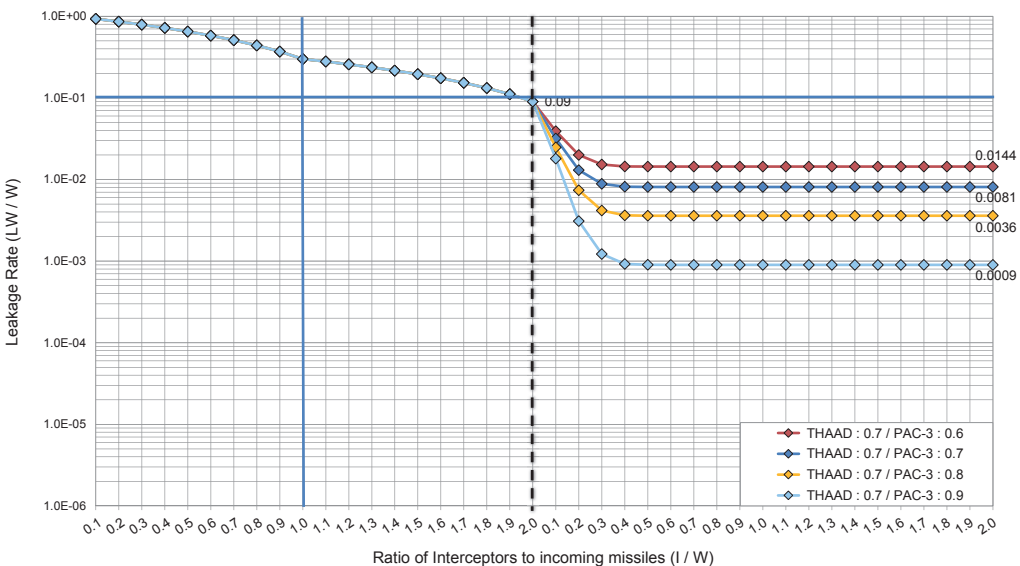
4.2.1 적 미사일 10발인 경우 leakage rate 그래프



4.2.2 적 미사일 20발인 경우 leakage rate 그래프



4.2.3 적 미사일 50, 100발인 경우 leakage rate 그래프

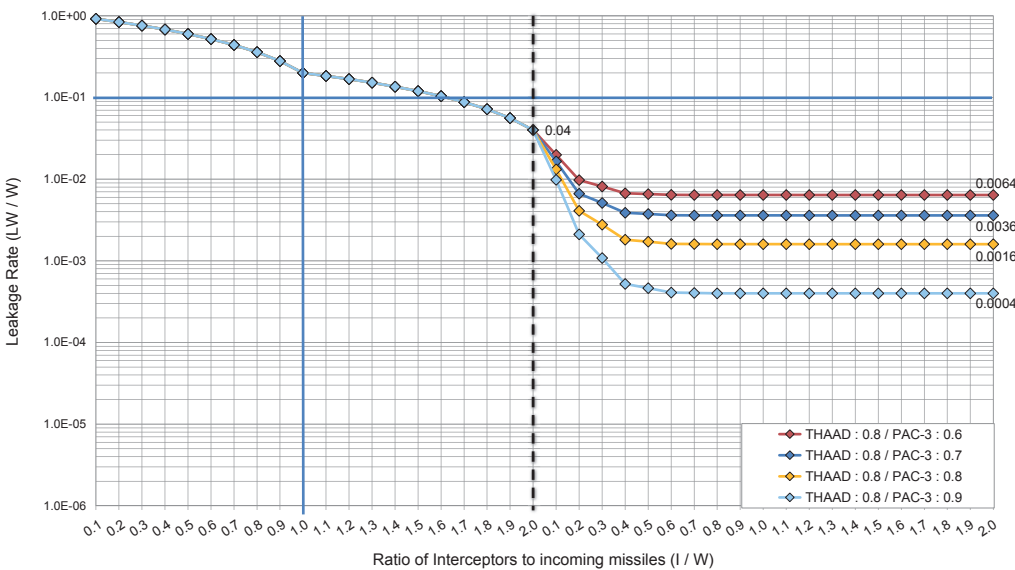


4.2.4 적 미사일 수에 따른 Pr(no leakage)

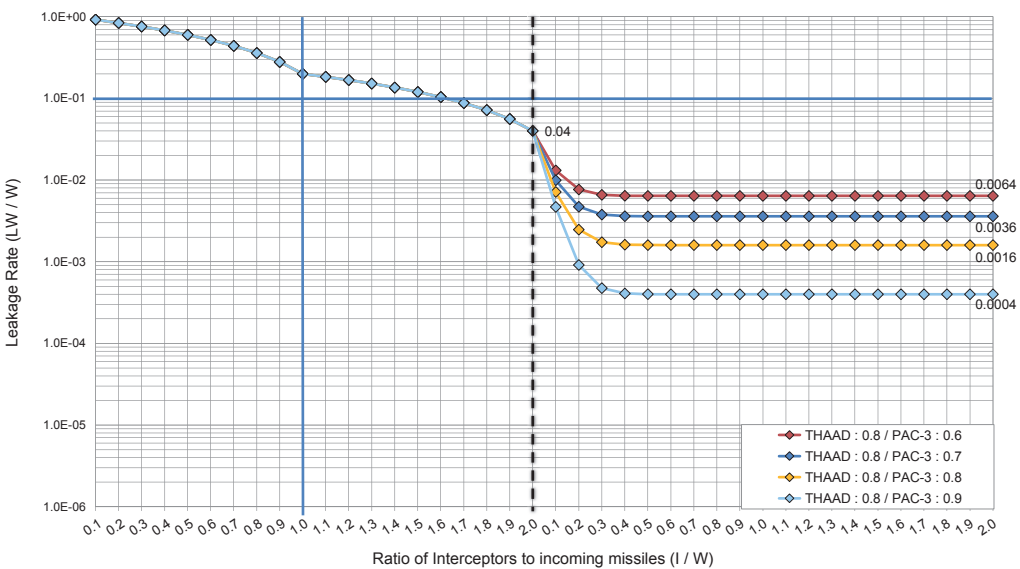
Probability that all enemy missiles are destroyed (%)						
Observation point	Probability of a single interceptor killing one apparent warhead		No of Enemy Missiles			
			10	20	50	100
After the 1st tier defense	THAAD	0.7	38.94%	15.16%	0.90%	0.01%
		0.6	86.50%	74.82%	48.42%	23.45%
After the 2nd tier defense	PAC-3	0.7	92.19%	84.99%	66.59%	44.34%
		0.8	96.46%	93.04%	83.50%	69.72%
		0.9	99.10%	98.22%	95.60%	91.39%

4.3 THAAD(SSPk=0.8) 2발, PAC-3(SSPk=0.6~0.9) 2발

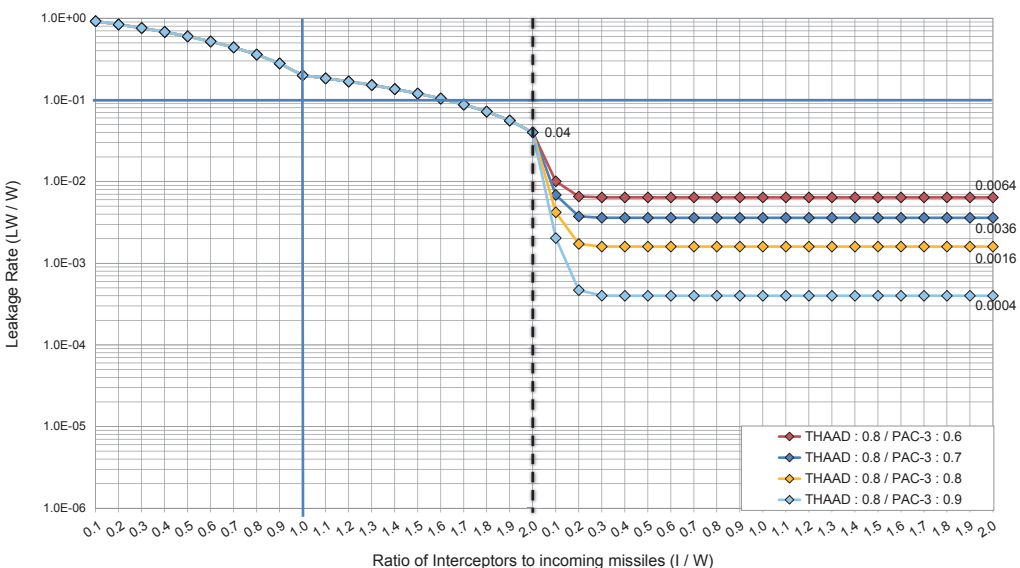
4.3.1 적 미사일 10발인 경우 leakage rate 그래프



4.3.2 적 미사일 20발인 경우 leakage rate 그래프



4.3.3 적 미사일 50, 100발인 경우 leakage rate 그래프

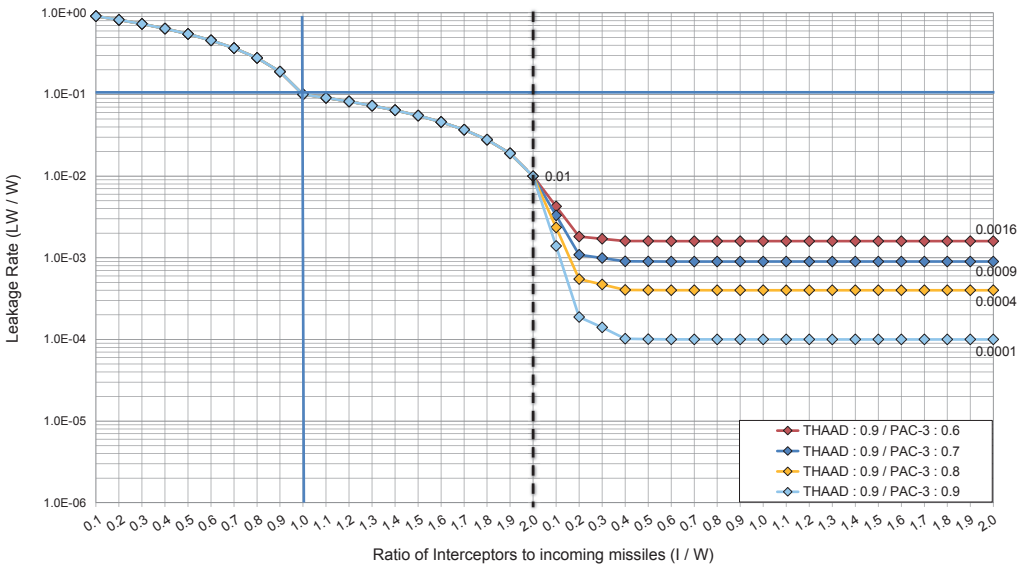


4.3.4 적 미사일 수에 따른 Pr(no leakage)

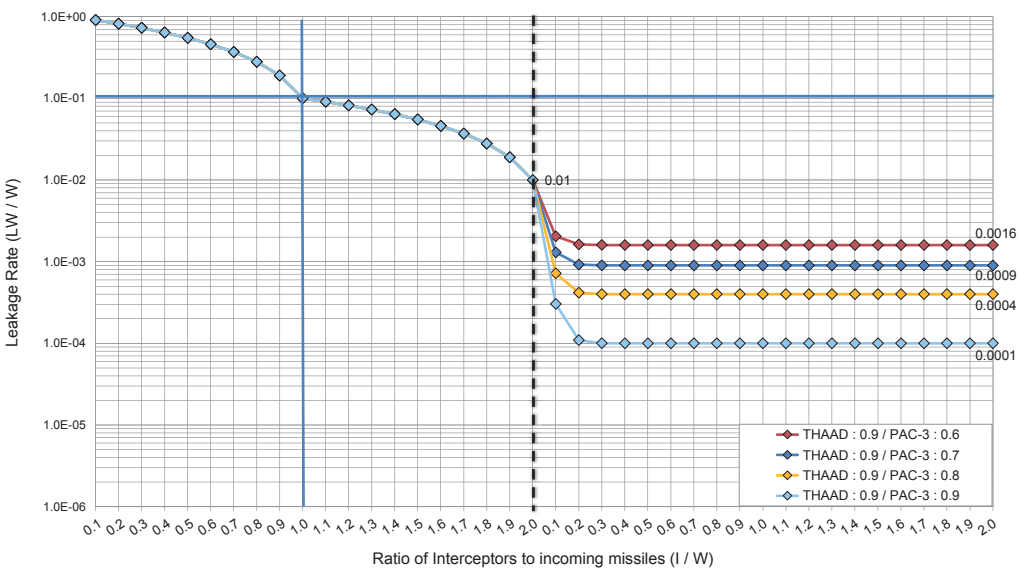
Probability that all enemy missiles are destroyed (%)						
Observation point	Probability of a single interceptor killing one apparent warhead		No of Enemy Missiles			
			10	20	50	100
After the 1st tier defense	THAAD	0.8	66.48%	44.20%	12.99%	1.69%
		0.6	93.78%	87.95%	72.54%	52.62%
After the 2nd tier defense	PAC-3	0.7	96.46%	93.04%	83.50%	69.72%
		0.8	98.41%	96.85%	92.31%	85.20%
		0.9	99.60%	99.20%	98.02%	96.08%

4.4 THAAD(SSPk=0.9) 2발, PAC-3(SSPk=0.6~0.9) 2발

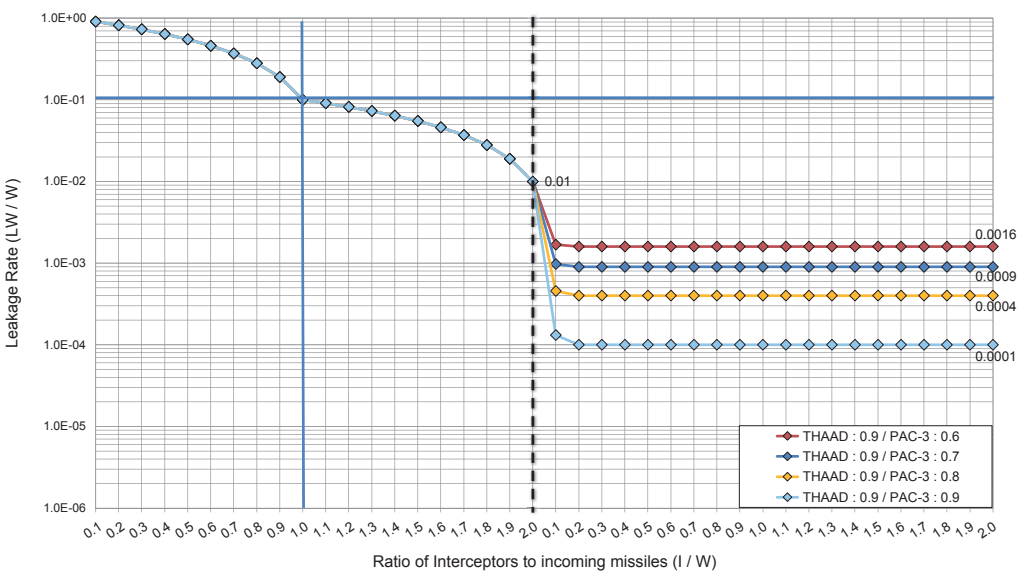
4.4.1 적 미사일 10발인 경우 leakage rate 그래프



4.4.2 적 미사일 20발인 경우 leakage rate 그래프



4.4.3 적 미사일 50, 100발인 경우 leakage rate 그래프

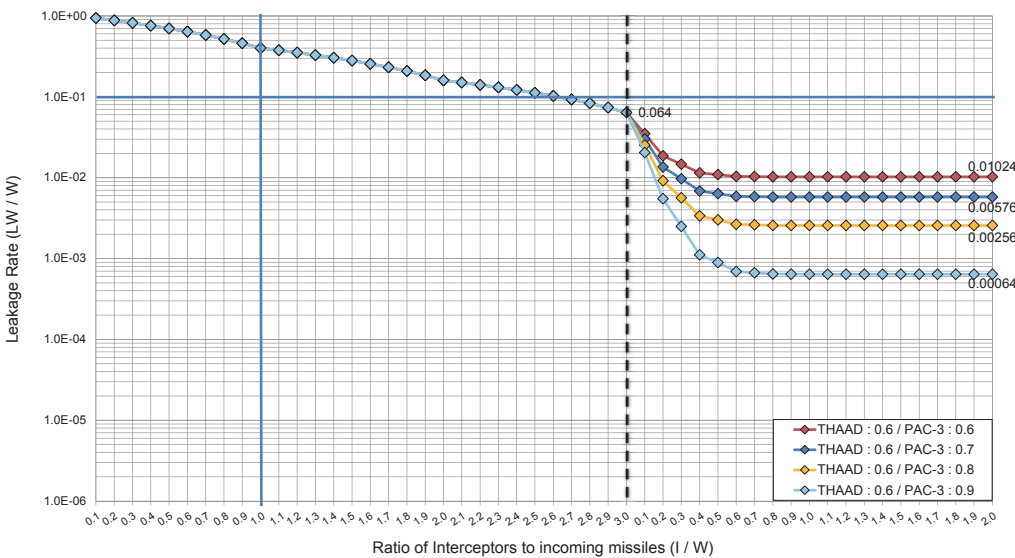


4.4.4 적 미사일 수에 따른 Pr(no leakage)

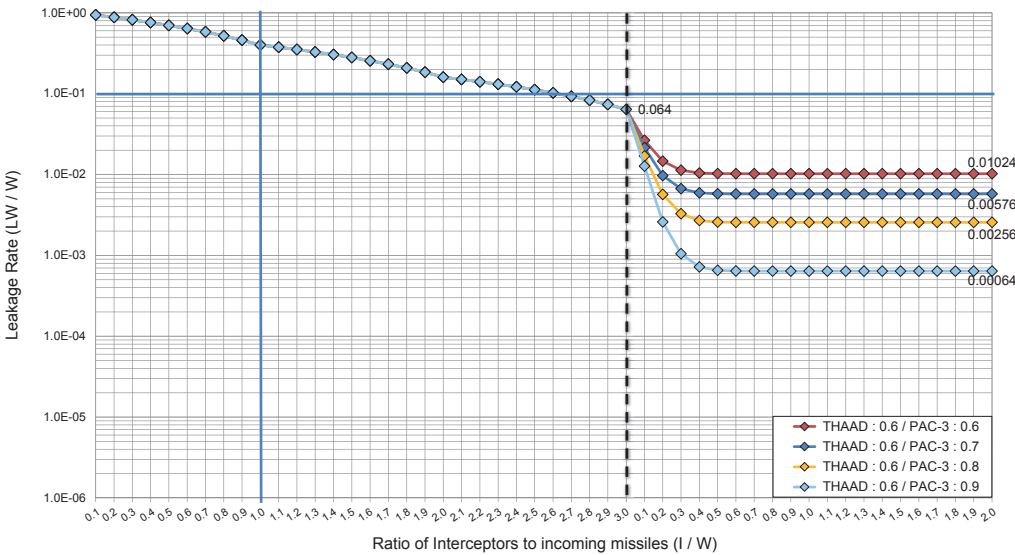
Probability that all enemy missiles are destroyed (%)						
Observation point	Probability of a single interceptor killing one apparent warhead		No of Enemy Missiles			
			10	20	50	100
After the 1st tier defense	THAAD	0.9	90.44%	81.79%	60.50%	36.60%
		0.6	98.41%	96.85%	92.31%	85.20%
After the 2nd tier defense	PAC-3	0.7	99.10%	98.22%	95.60%	91.39%
		0.8	99.60%	99.20%	98.02%	96.08%
		0.9	99.90%	99.80%	99.50%	99.00%

4.5 THAAD(SSPk=0.6) 3발, PAC-3(SSPk=0.6~0.9) 2발

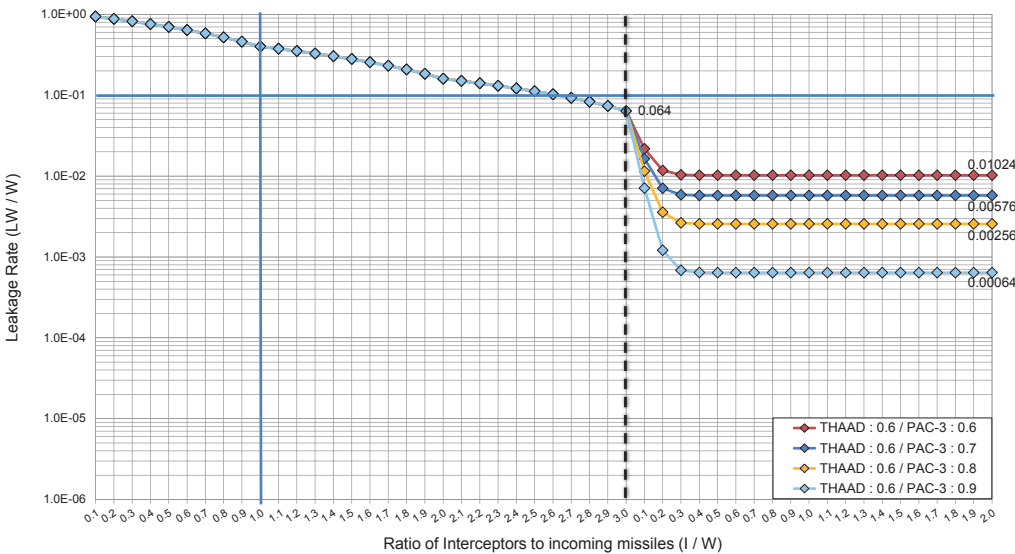
4.5.1 적 미사일 10발인 경우 leakage rate 그래프



4.5.2 적 미사일 20발인 경우 leakage rate 그래프



4.5.3 적 미사일 50, 100발인 경우 leakage rate 그래프

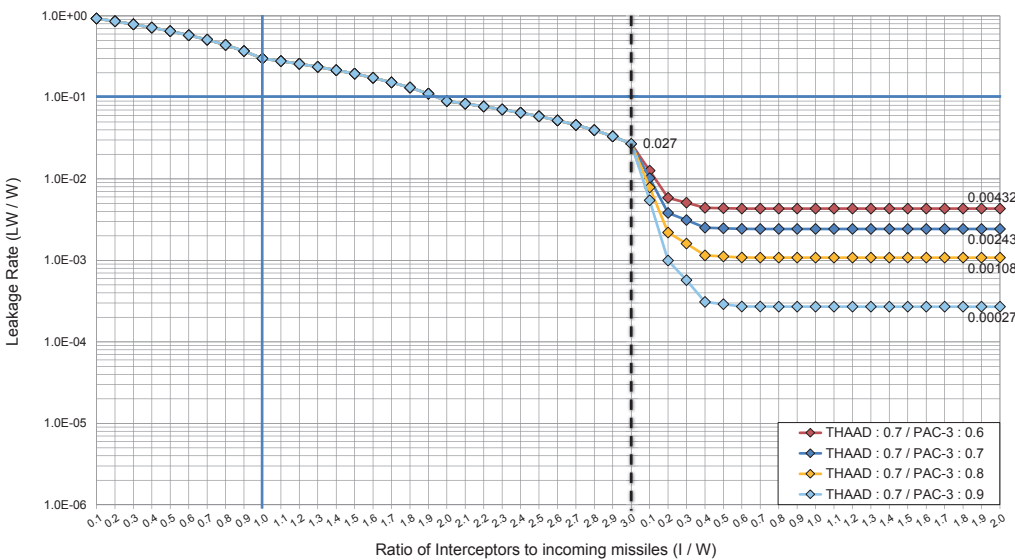


4.5.4 적 미사일 수에 따른 Pr(no leakage)

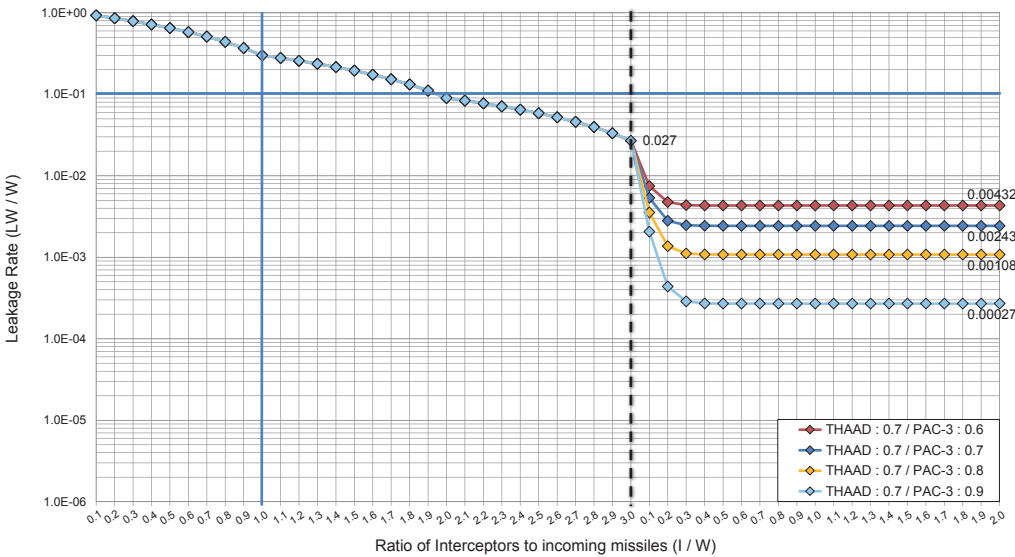
Probability that all enemy missiles are destroyed (%)						
Observation point	Probability of a single interceptor killing one apparent warhead		No of Enemy Missiles			
			10	20	50	100
After the 1st tier defense	THAAD	0.6	51.61%	26.64%	3.66%	0.13%
		0.7	90.22%	81.40%	59.77%	35.73%
After the 2nd tier defense	PAC-3	0.6	94.39%	89.09%	74.91%	56.12%
		0.7	97.47%	95.00%	87.97%	77.39%
		0.8	99.36%	98.73%	96.85%	93.80%

4.6 THAAD(SSPk=0.7) 3발, PAC-3(SSPk=0.6~0.9) 2발

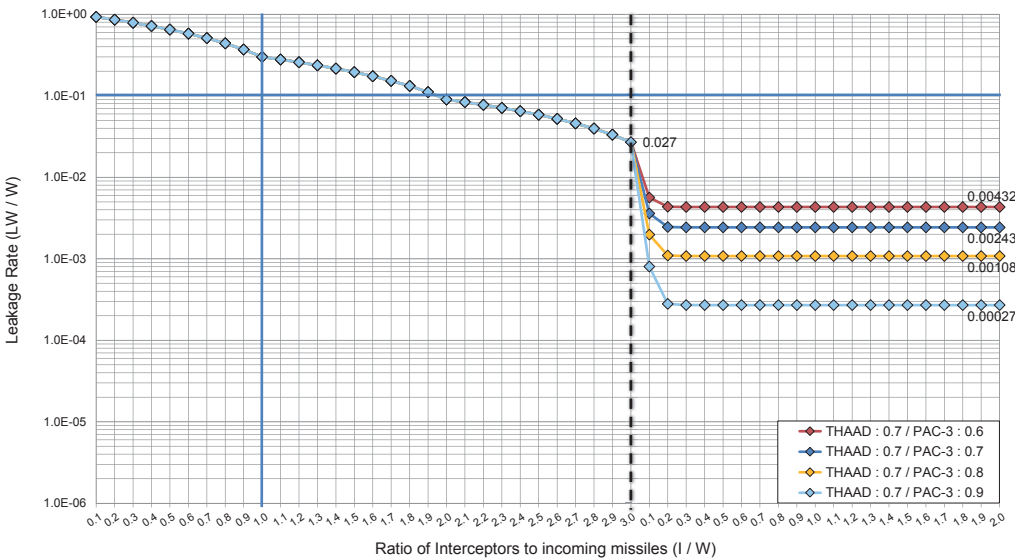
4.6.1 적 미사일 10발인 경우 leakage rate 그래프



4.6.2 적 미사일 20발인 경우 leakage rate 그래프



4.6.3 적 미사일 50, 100발인 경우 leakage rate 그래프

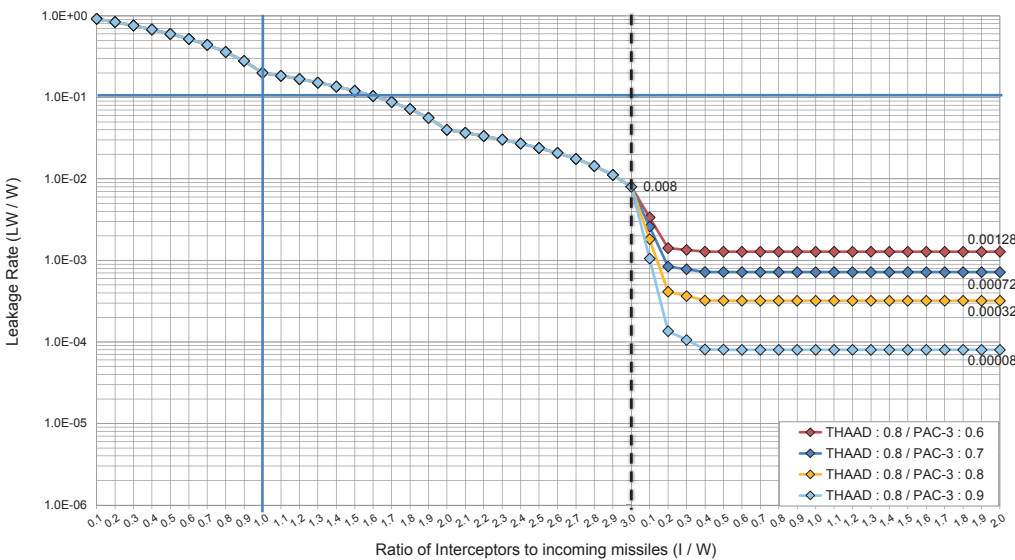


4.6.4 적 미사일 수에 따른 Pr(no leakage)

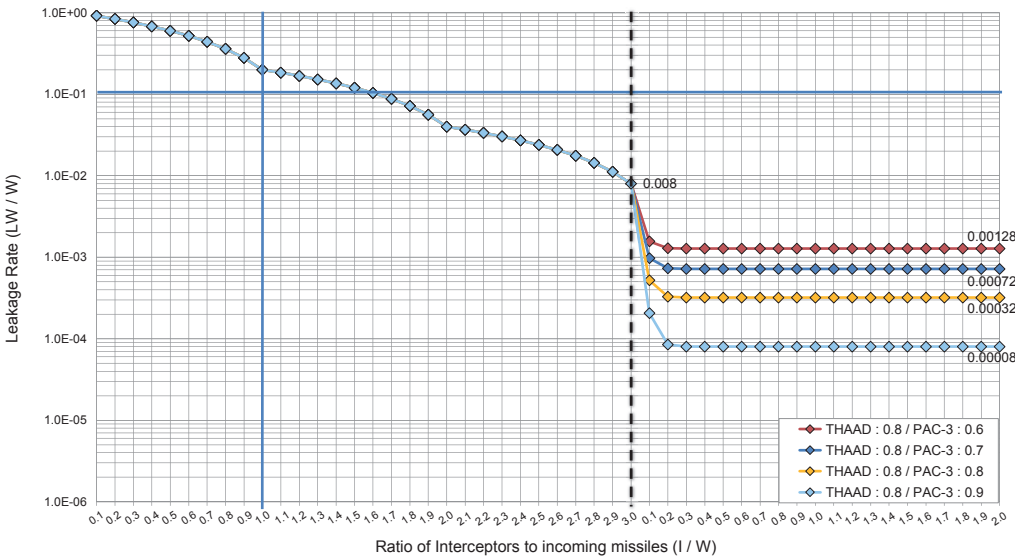
Probability that all enemy missiles are destroyed (%)						
Observation point	Probability of a single interceptor killing one apparent warhead		No of Enemy Missiles			
			10	20	50	100
After the 1st tier defense	THAAD	0.7	76.06%	57.84%	25.45%	6.48%
		0.6	95.76%	91.71%	80.54%	64.86%
After the 2nd tier defense	PAC-3	0.7	97.60%	95.25%	88.55%	78.40%
		0.8	98.93%	97.86%	94.74%	89.76%
		0.9	99.73%	99.46%	98.66%	97.34%

4.7 THAAD(SSPk=0.8) 3발, PAC-3(SSPk=0.6~0.9) 2발

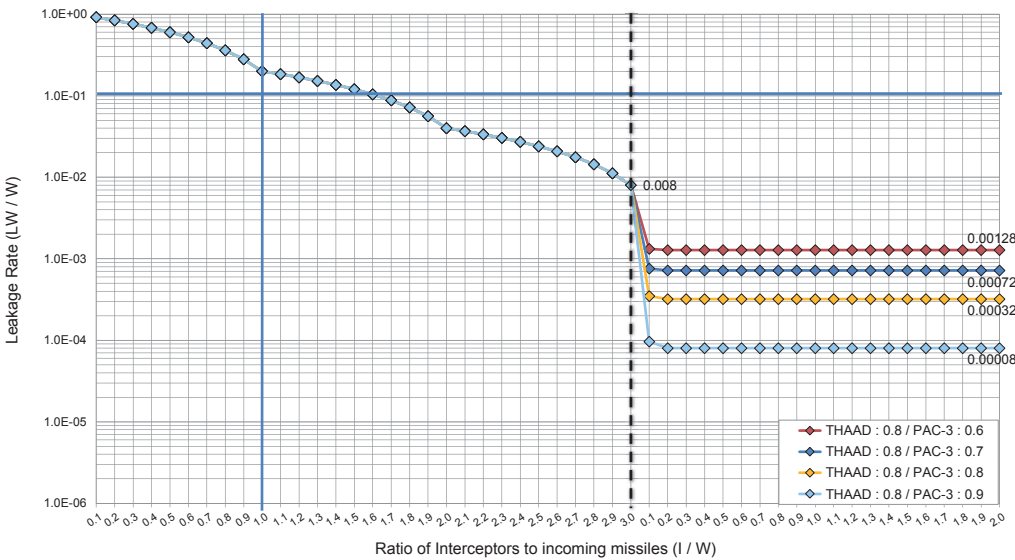
4.7.1 적 미사일 10발인 경우 leakage rate 그래프



4.7.2 적 미사일 20발인 경우 leakage rate 그래프



4.7.3 적 미사일 50, 100발인 경우 leakage rate 그래프

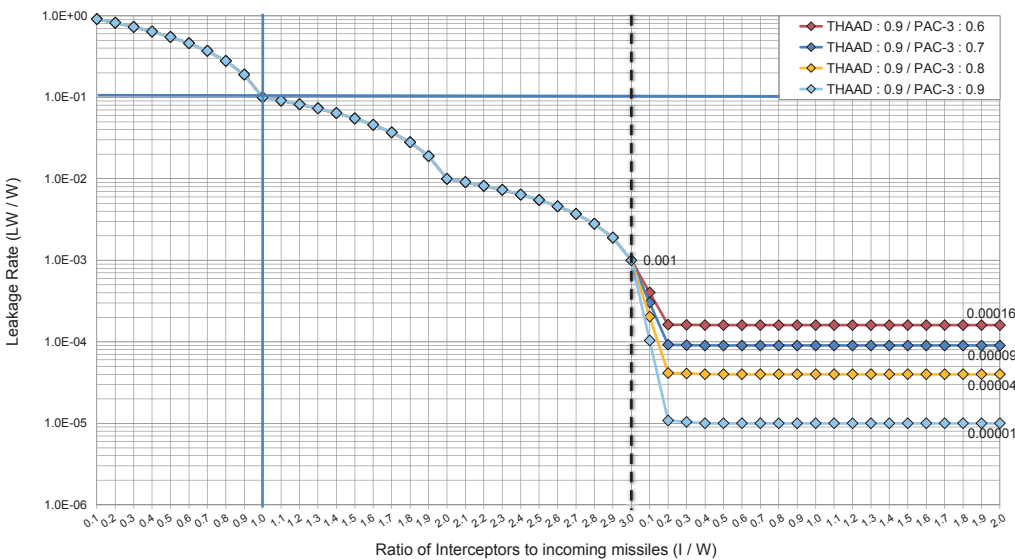


4.7.4 적 미사일 수에 따른 Pr(no leakage)

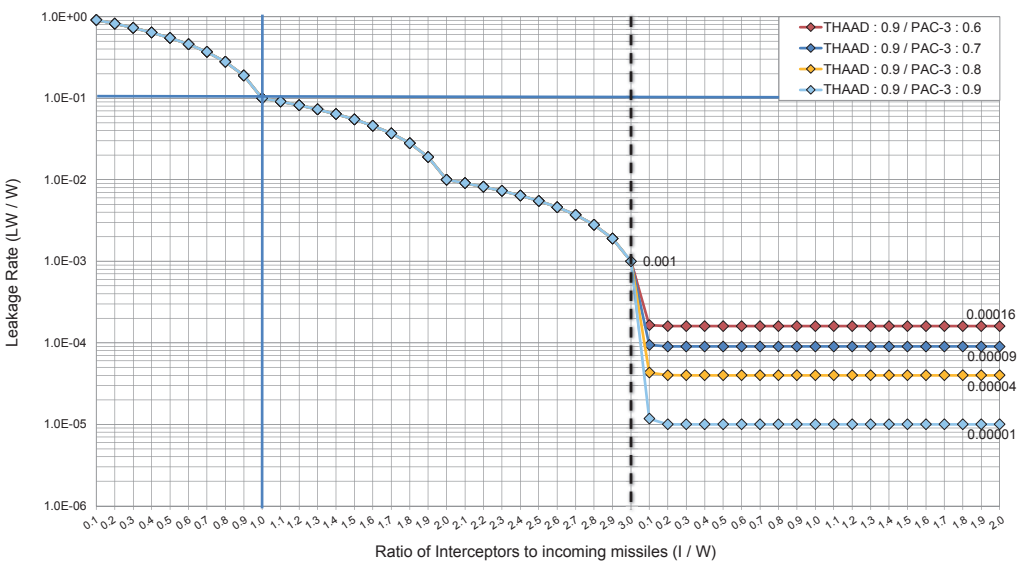
Probability that all enemy missiles are destroyed (%)						
Observation point	Probability of a single interceptor killing one apparent warhead		No of Enemy Missiles			
			10	20	50	100
After the 1st tier defense	THAAD	0.8	92.28%	85.16%	66.92%	44.79%
		0.6	98.73%	97.47%	93.80%	87.98%
After the 2nd tier defense	PAC-3	0.7	99.28%	98.57%	96.46%	93.05%
		0.8	99.68%	99.36%	98.41%	96.85%
		0.9	99.92%	99.84%	99.60%	99.20%

4.8 THAAD(SSPk=0.9) 3발, PAC-3(SSPk=0.6~0.9) 2발

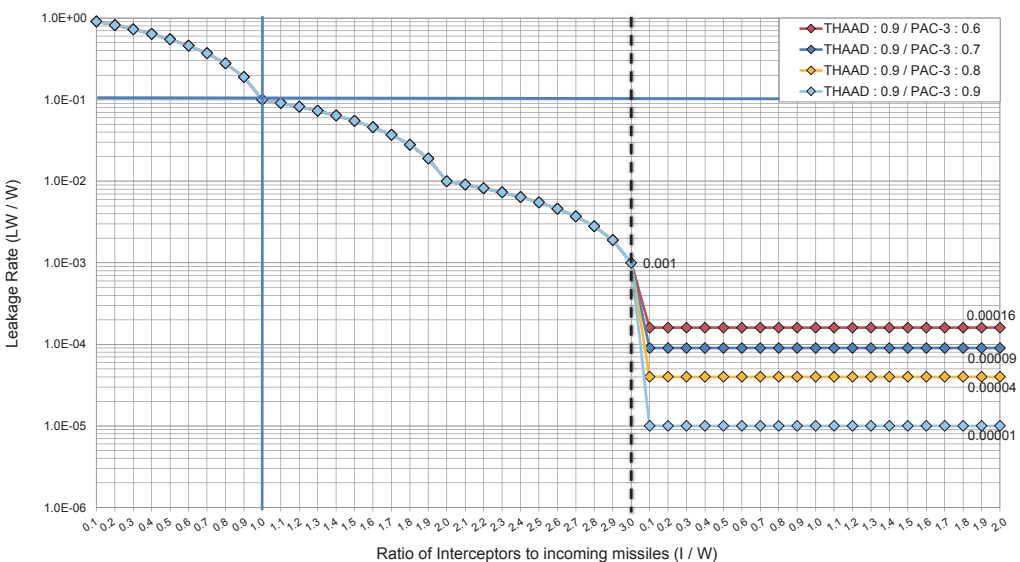
4.8.1 적 미사일 10발인 경우 leakage rate 그래프



4.8.2 적 미사일 20발인 경우 leakage rate 그래프



4.8.3 적 미사일 50, 100발인 경우 leakage rate 그래프

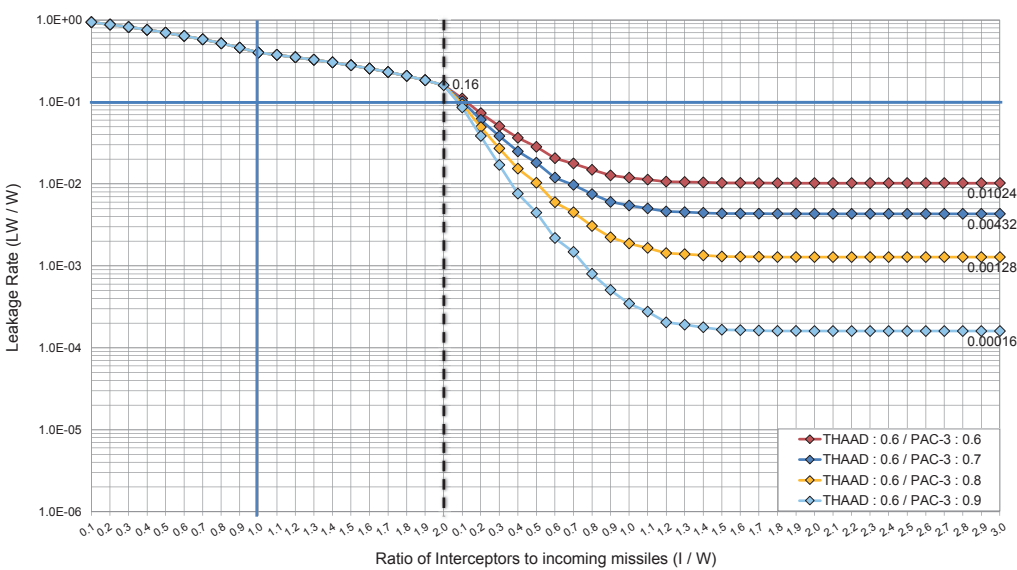


4.8.4 적 미사일 수에 따른 Pr(no leakage)

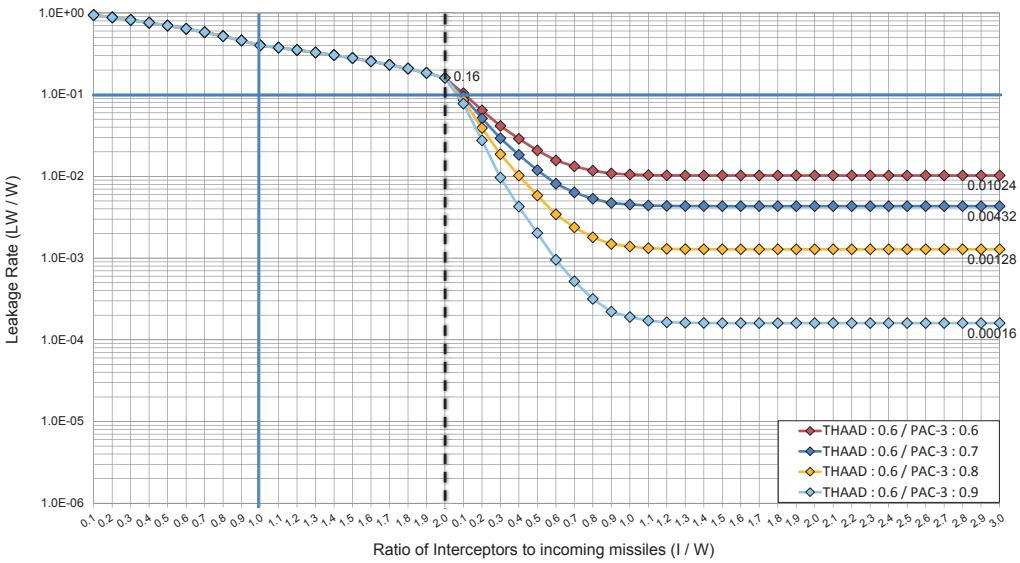
Probability that all enemy missiles are destroyed (%)						
Observation point	Probability of a single interceptor killing one apparent warhead		No of Enemy Missiles			
			10	20	50	100
After the 1st tier defense	THAAD	0.9	99.00%	98.02%	95.12%	90.48%
		0.6	99.84%	99.68%	99.20%	98.41%
After the 2nd tier defense	PAC-3	0.7	99.91%	99.82%	99.55%	99.10%
		0.8	99.96%	99.92%	99.80%	99.60%
		0.9	99.99%	99.98%	99.95%	99.90%
		0.6	99.84%	99.68%	99.20%	98.41%

4.9 THAAD(SSPk=0.6) 2발, PAC-3(SSPk=0.6~0.9) 3발

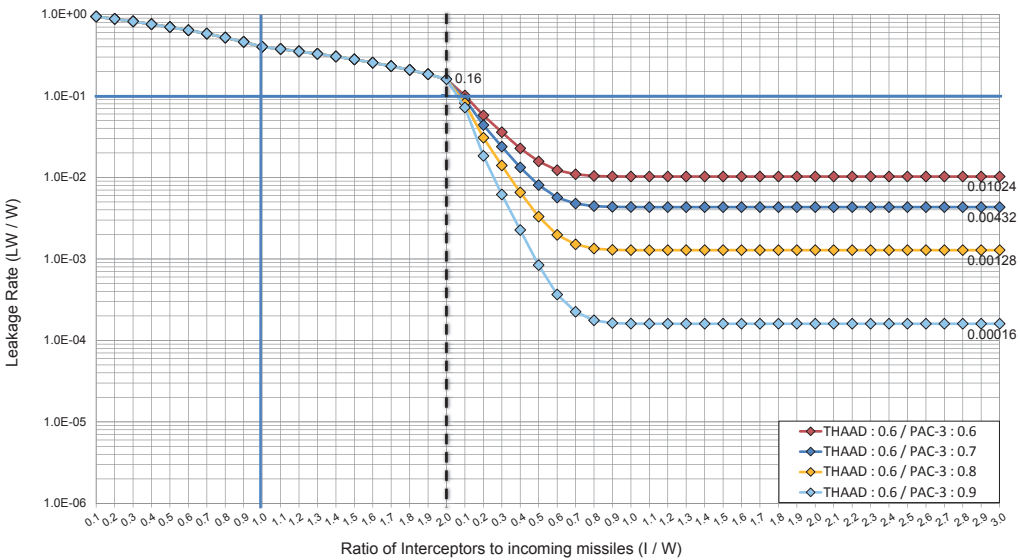
4.9.1 적 미사일 10발인 경우 leakage rate 그래프



4.9.2 적 미사일 20발인 경우 leakage rate 그래프



4.9.3 적 미사일 50, 100발인 경우 leakage rate 그래프

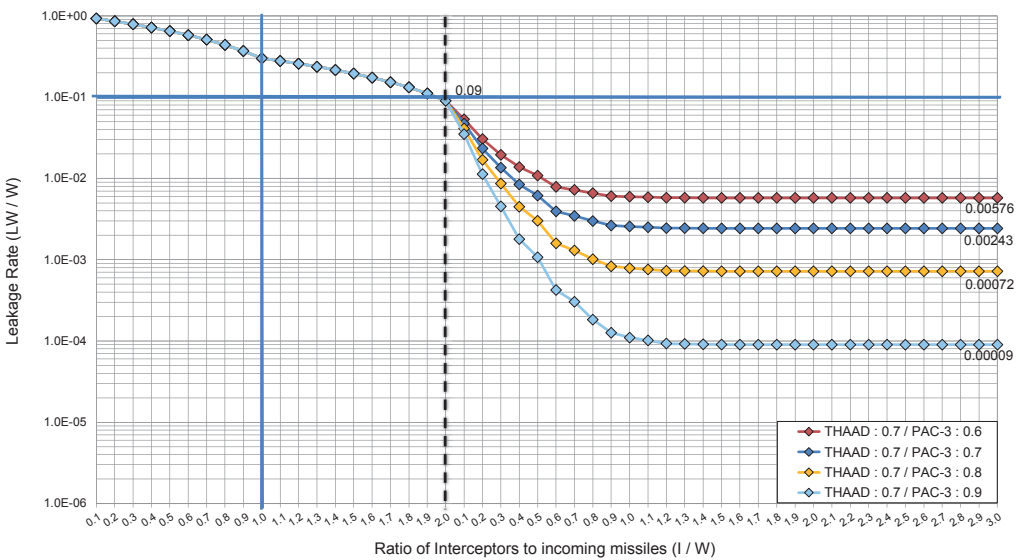


4.9.4 적 미사일 수에 따른 Pr(no leakage)

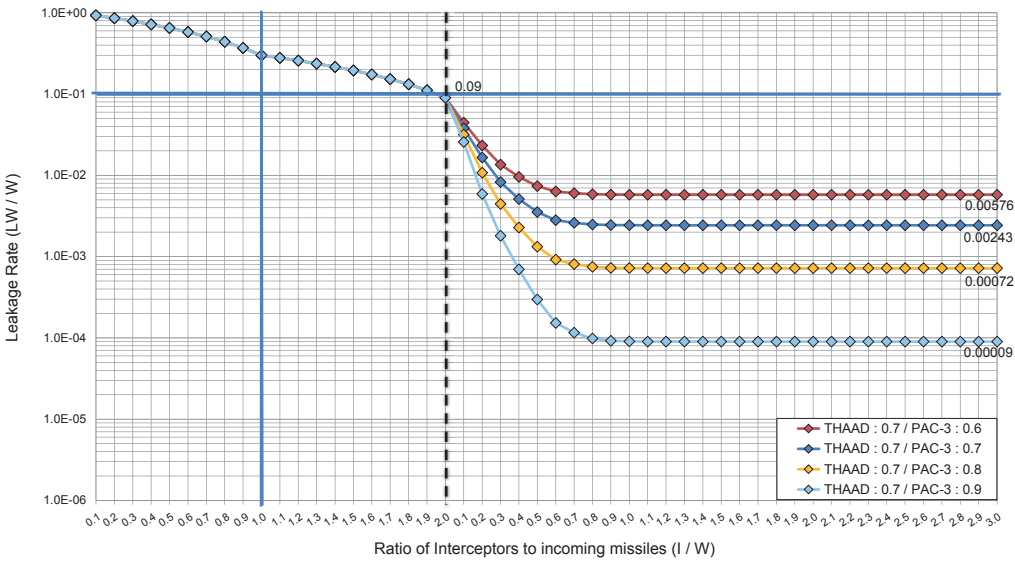
Probability that all enemy missiles are destroyed (%)						
Observation point	Probability of a single interceptor killing one apparent warhead		No of Enemy Missiles			
			10	20	50	100
After the 1st tier defense	THAAD	0.6	17.49%	3.06%	0.02%	0.00%
		0.6	90.22%	81.40%	59.77%	35.73%
After the 2nd tier defense	PAC-3	0.7	95.76%	91.71%	80.54%	64.86%
		0.8	98.73%	97.47%	93.80%	87.98%
		0.9	99.84%	99.68%	99.20%	98.41%

4.10 THAAD(SSPk=0.7) 2발, PAC-3(SSPk=0.6~0.9) 3발

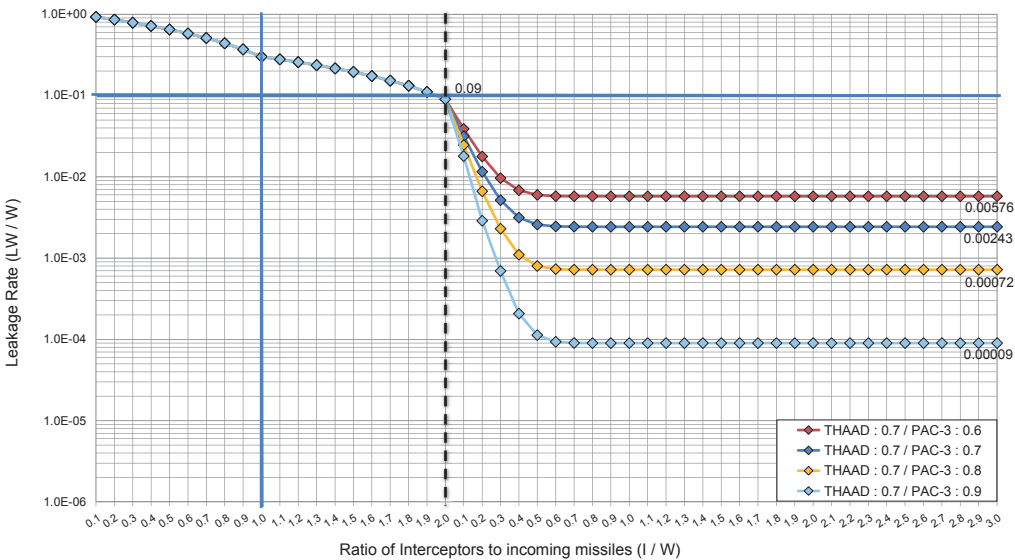
4.10.1 적 미사일 10발인 경우 leakage rate 그래프



4.10.2 적 미사일 20발인 경우 leakage rate 그래프



4.10.3 적 미사일 50, 100발인 경우 leakage rate 그래프

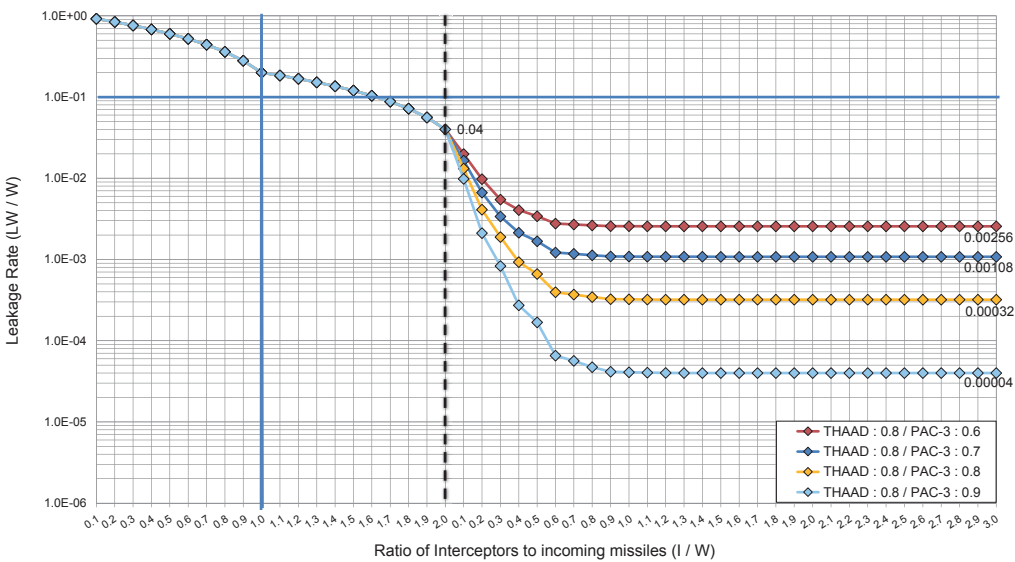


4.10.4 적 미사일 수에 따른 Pr(no leakage)

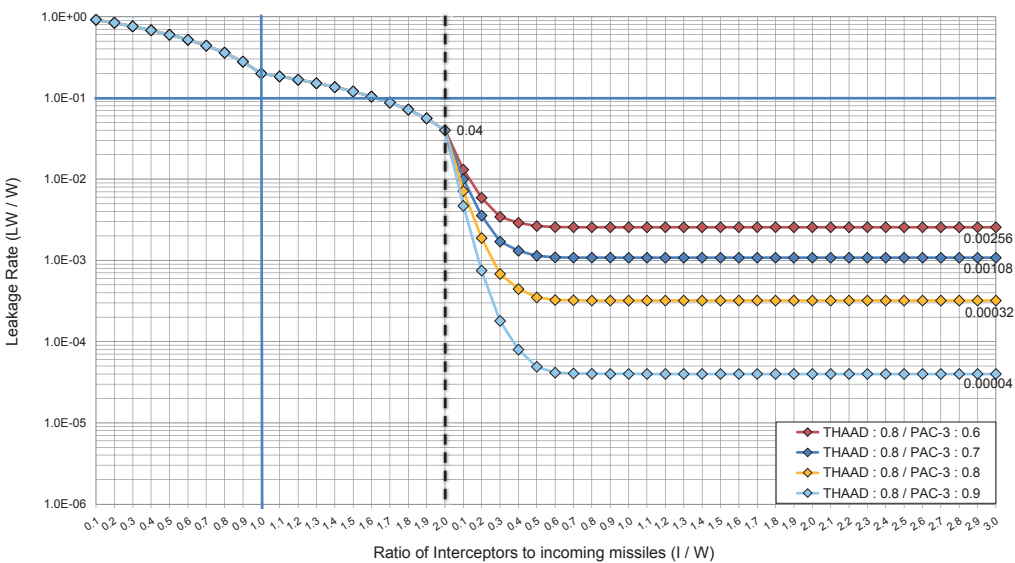
Probability that all enemy missiles are destroyed (%)						
Observation point	Probability of a single interceptor killing one apparent warhead		No of Enemy Missiles			
			10	20	50	100
After the 1st tier defense	THAAD	0.7	38.94%	15.16%	0.90%	0.01%
		0.6	94.39%	89.09%	74.91%	56.12%
After the 2nd tier defense	PAC-3	0.7	97.60%	95.25%	88.55%	78.40%
		0.8	99.28%	98.57%	96.46%	93.05%
		0.9	99.91%	99.82%	99.55%	99.10%

4.11 THAAD(SSPk=0.8) 2발, PAC-3(SSPk=0.6~0.9) 3발

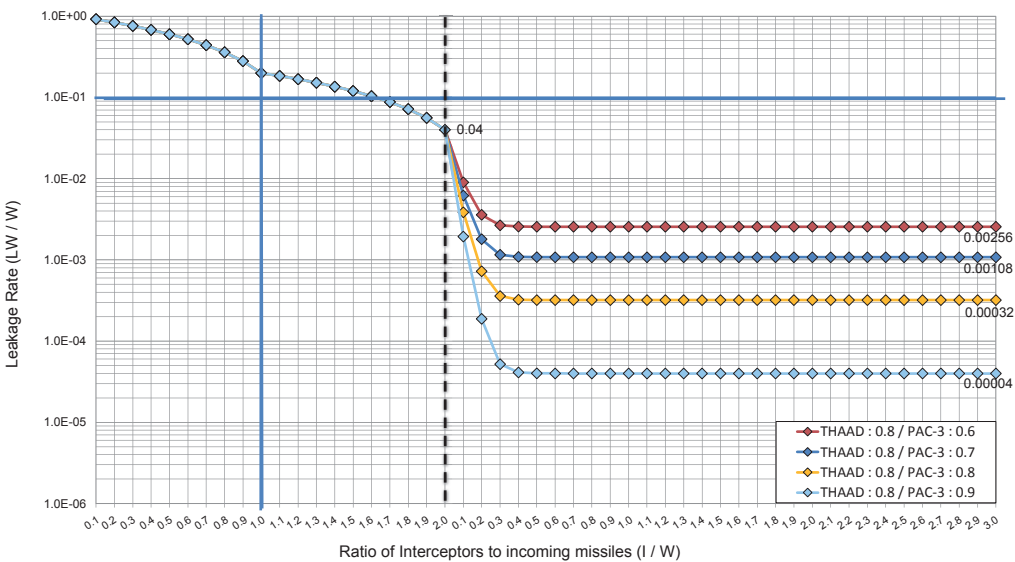
4.11.1 적 미사일 10발인 경우 leakage rate 그래프



4.11.2 적 미사일 20발인 경우 leakage rate 그래프



4.11.3 적 미사일 50, 100발인 경우 leakage rate 그래프

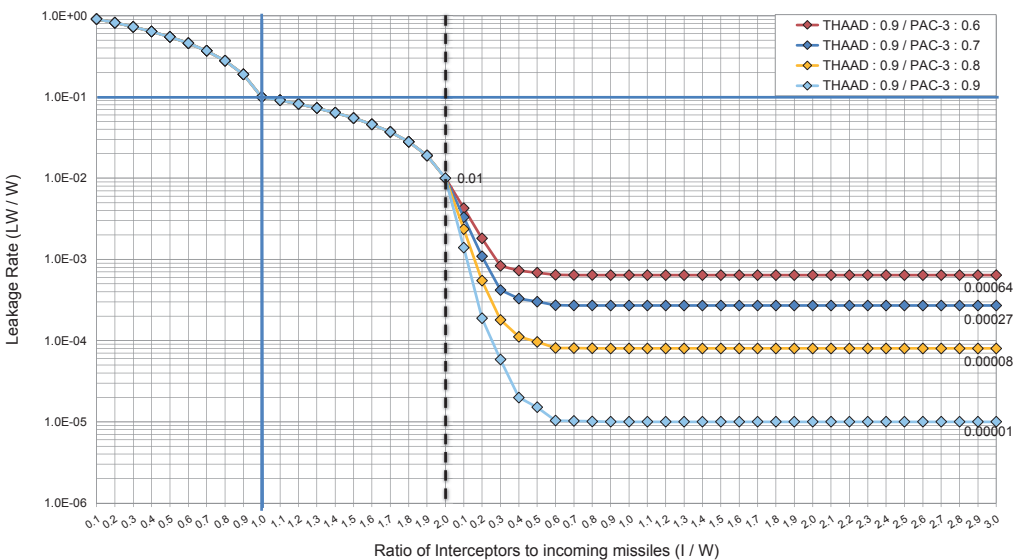


4.11.4 적 미사일 수에 따른 Pr(no leakage)

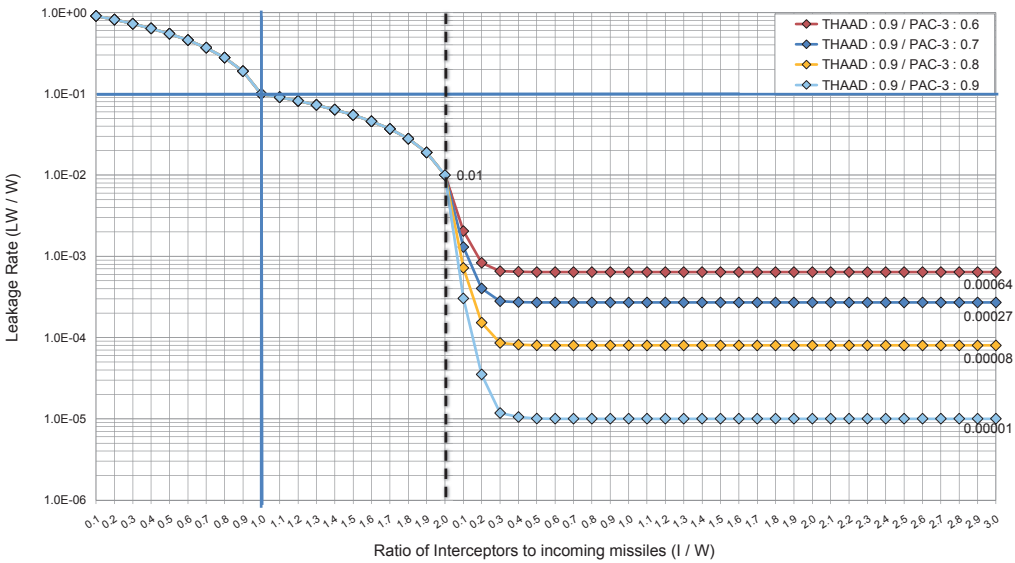
Probability that all enemy missiles are destroyed (%)						
Observation point	Probability of a single interceptor killing one apparent warhead		No of Enemy Missiles			
			10	20	50	100
After the 1st tier defense	THAAD	0.8	66.48%	44.20%	12.99%	1.69%
		0.6	97.47%	95.00%	87.97%	77.39%
After the 2nd tier defense	PAC-3	0.7	98.93%	97.86%	94.74%	89.76%
		0.8	99.68%	99.36%	98.41%	96.85%
		0.9	99.96%	99.92%	99.80%	99.60%

4.12 THAAD(SSPk=0.9) 2발, PAC-3(SSPk=0.6~0.9) 3발

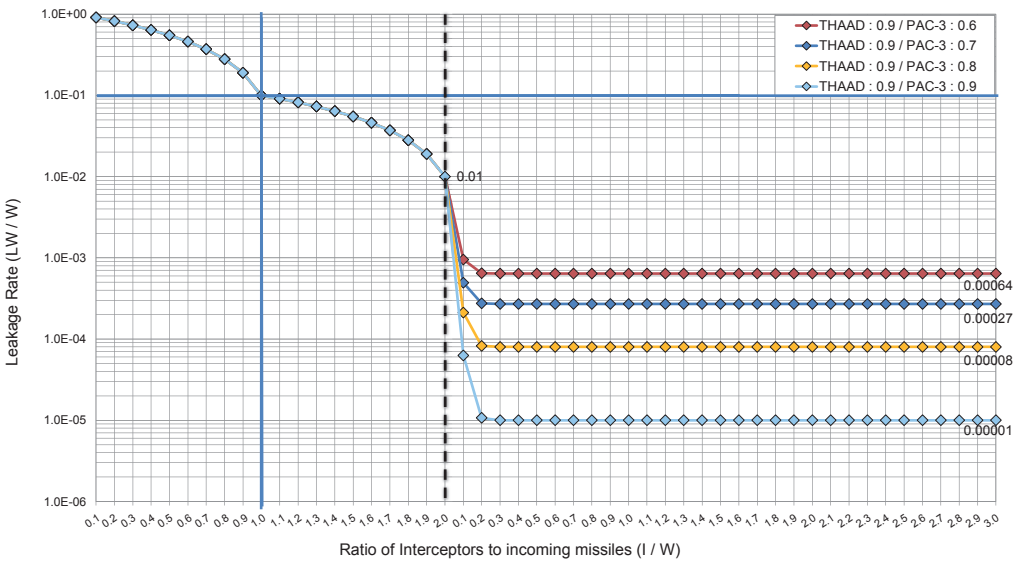
4.12.1 적 미사일 10발인 경우 leakage rate 그래프



4.12.2 적 미사일 20발인 경우 leakage rate 그래프



4.12.3 적 미사일 50, 100발인 경우 leakage rate 그래프

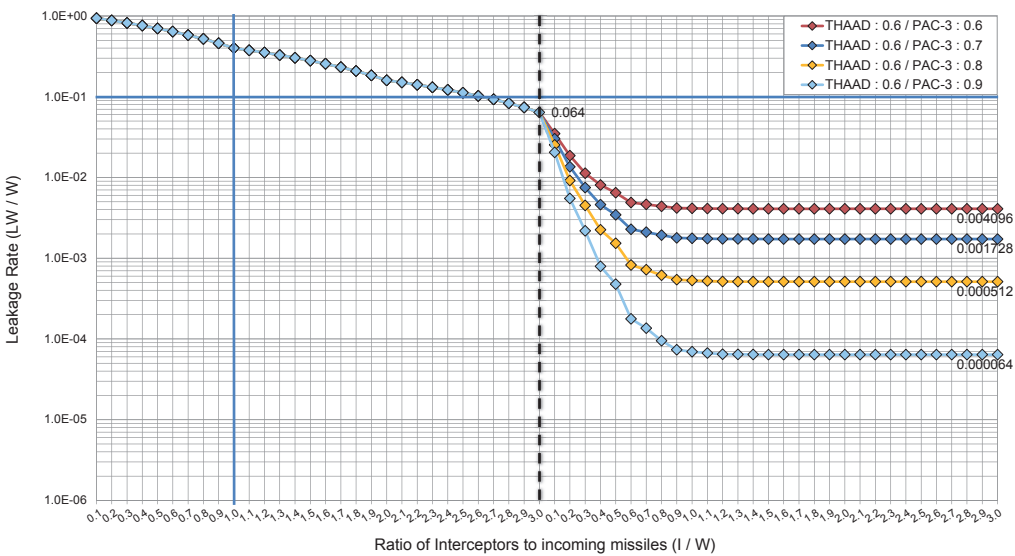


4.12.4 적 미사일 수에 따른 Pr(no leakage)

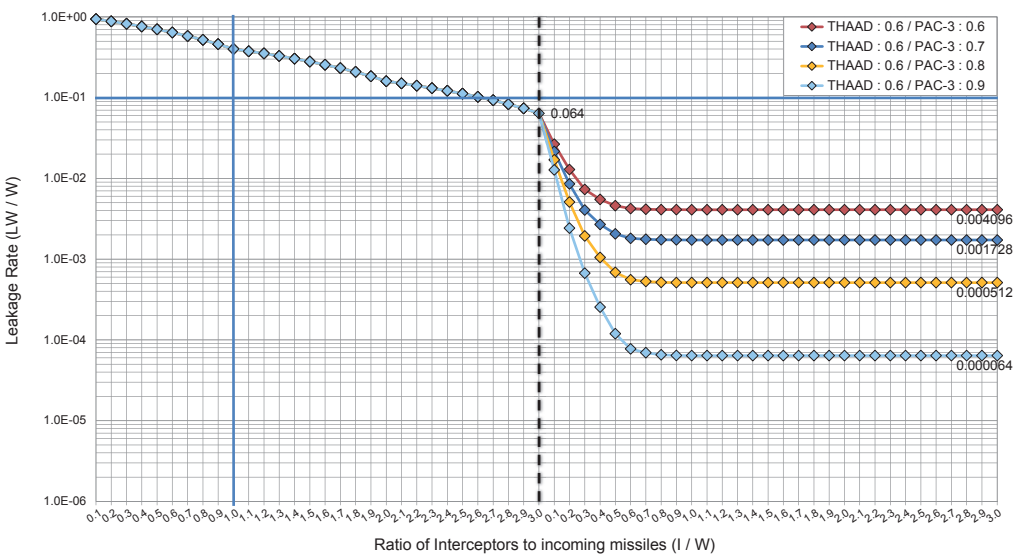
Probability that all enemy missiles are destroyed (%)						
Observation point	Probability of a single interceptor killing one apparent warhead		No of Enemy Missiles			
			10	20	50	100
After the 1st tier defense	THAAD	0.9	90.44%	81.79%	60.50%	36.60%
After the 2nd tier defense	PAC-3	0.6	99.36%	98.73%	96.85%	93.80%
		0.7	99.73%	99.46%	98.66%	97.34%
		0.8	99.92%	99.84%	99.60%	99.20%
		0.9	99.99%	99.98%	99.95%	99.90%

4.13 THAAD(SSPk=0.6) 3발, PAC-3(SSPk=0.6~0.9) 3발

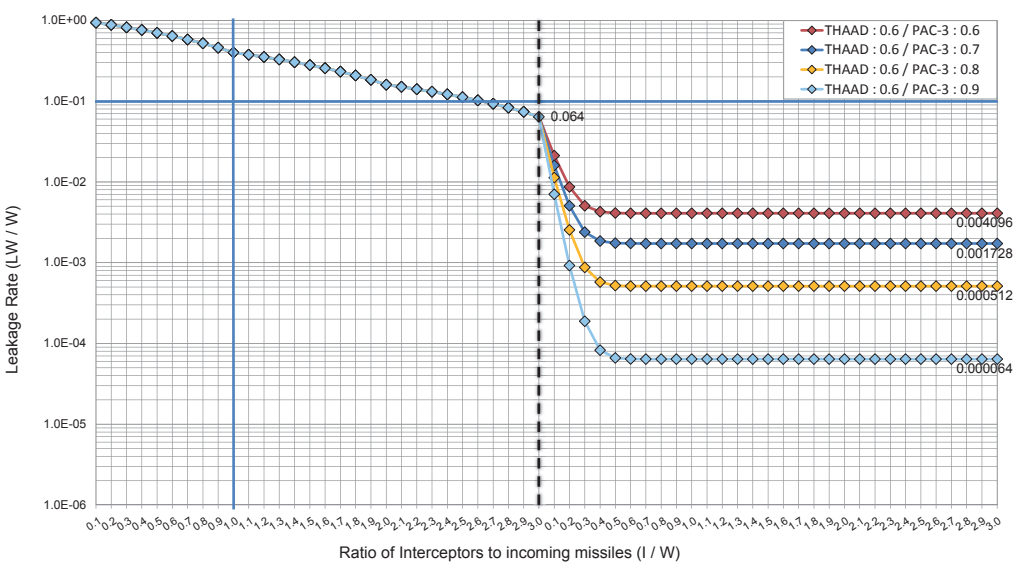
4.13.1 적 미사일 10발인 경우 leakage rate 그래프



4.13.2 적 미사일 20발인 경우 leakage rate 그래프



4.13.3 적 미사일 50, 100발인 경우 leakage rate 그래프

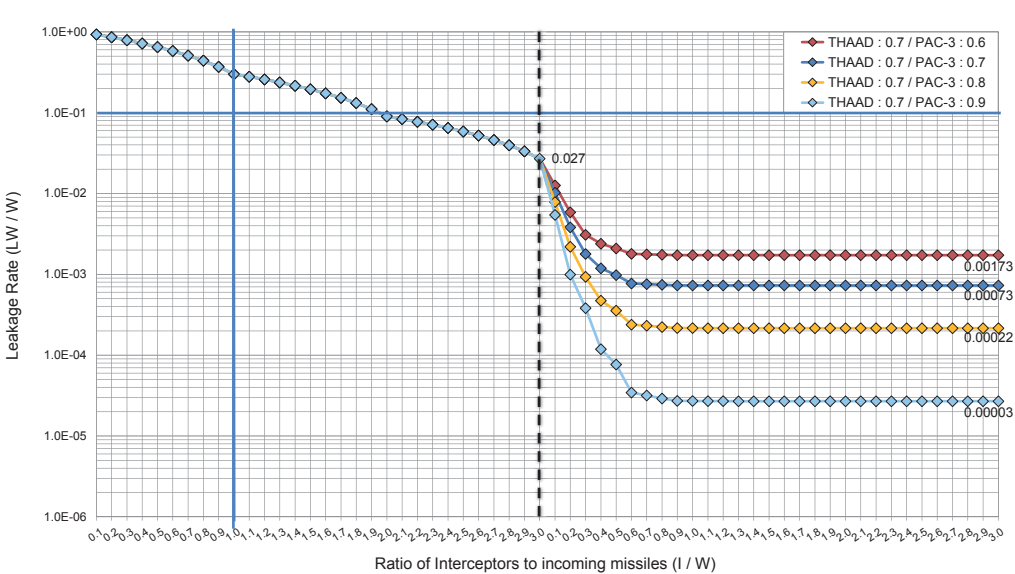


4.13.4 적 미사일 수에 따른 Pr(no leakage)

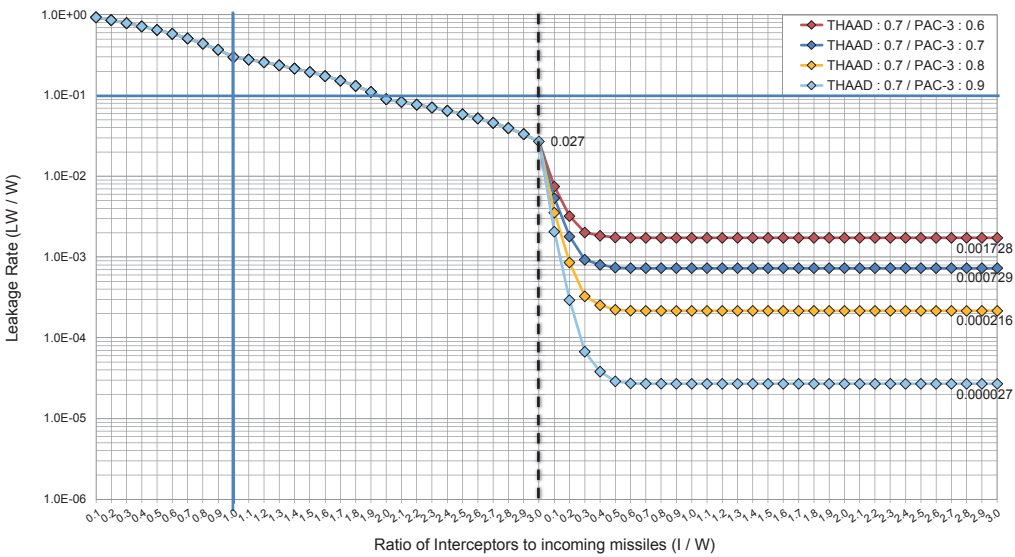
Probability that all enemy missiles are destroyed (%)						
Observation point	Probability of a single interceptor killing one apparent warhead		No of Enemy Missiles			
			10	20	50	100
After the 1st tier defense	THAAD	0.6	51.61%	26.64%	3.66%	0.13%
		0.6	95.98%	92.12%	81.45%	66.34%
After the 2nd tier defense	PAC-3	0.7	98.29%	96.60%	91.72%	84.12%
		0.8	99.49%	98.98%	97.47%	95.01%
		0.9	99.94%	99.87%	99.68%	99.36%

4.14 THAAD(SSPk=0.7) 3발, PAC-3(SSPk=0.6~0.9) 3발

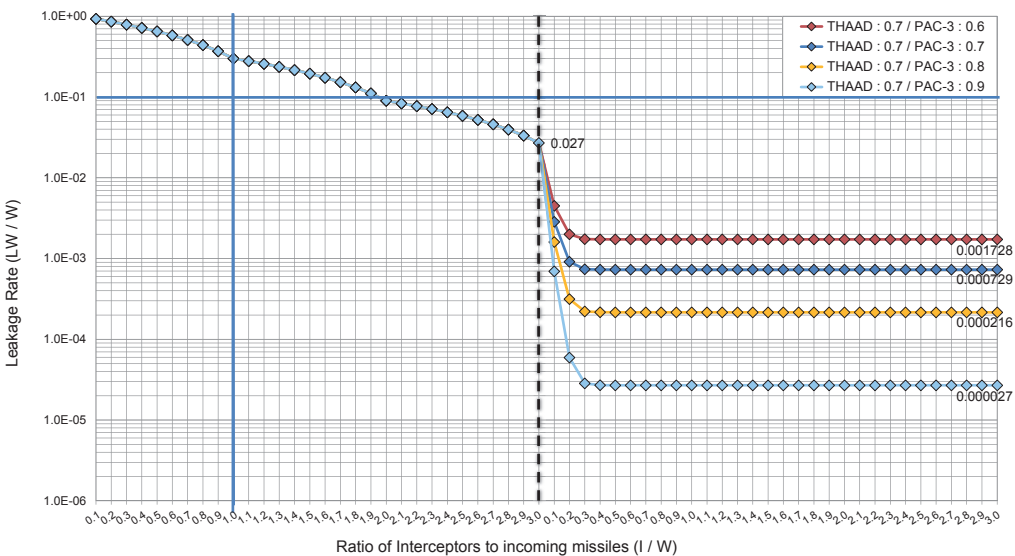
4.14.1 적 미사일 10발인 경우 leakage rate 그래프



4.14.2 적 미사일 20발인 경우 leakage rate 그래프



4.14.3 적 미사일 50, 100발인 경우 leakage rate 그래프

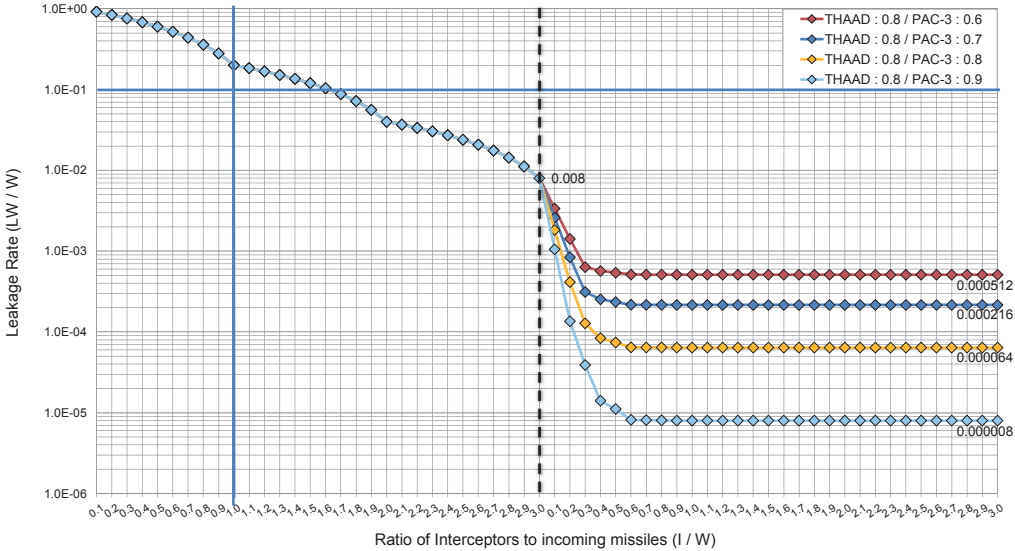


4.14.4 적 미사일 수에 따른 Pr(no leakage)

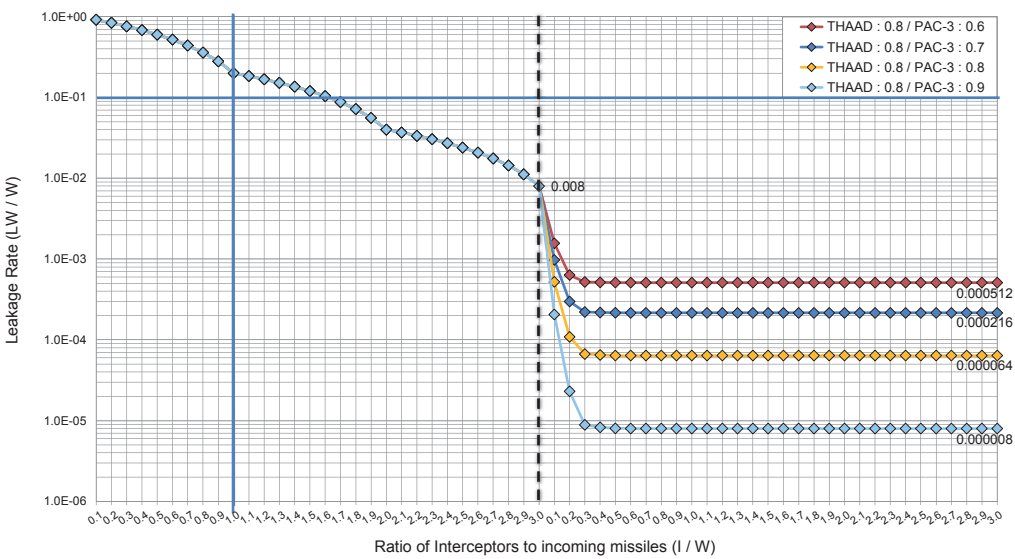
Probability that all enemy missiles are destroyed (%)						
Observation point	Probability of a single interceptor killing one apparent warhead		No of Enemy Missiles			
			10	20	50	100
After the 1st tier defense	THAAD	0.7	76.06%	57.84%	25.45%	6.48%
After the 2nd tier defense	PAC-3	0.6	98.29%	96.60%	91.72%	84.12%
		0.7	99.27%	98.55%	96.42%	92.97%
		0.8	99.78%	99.57%	98.93%	97.86%
		0.9	99.97%	99.95%	99.87%	99.73%

4.15 THAAD(SSPk=0.8) 3발, PAC-3(SSPk=0.6~0.9) 3발

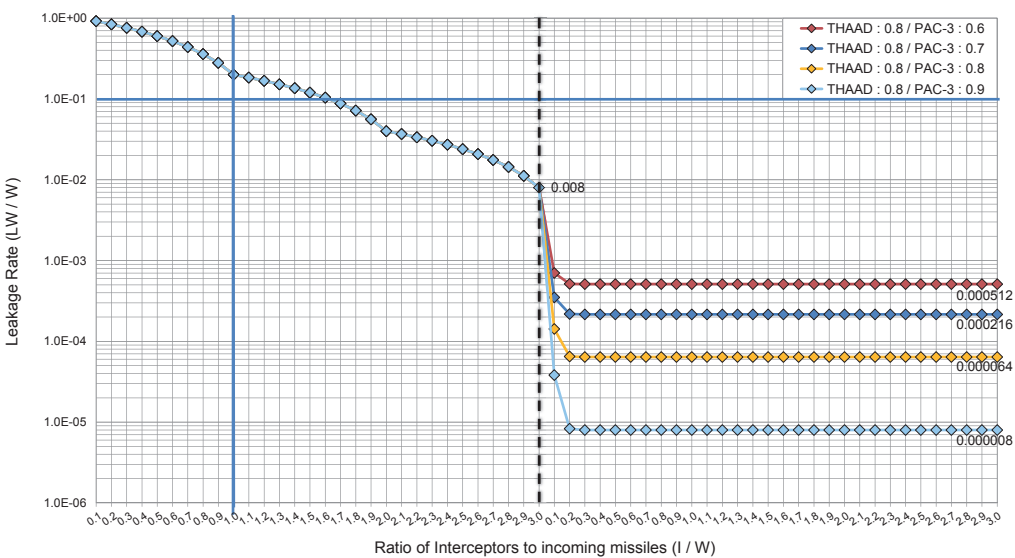
4.15.1 적 미사일 10발인 경우 leakage rate 그래프



4.15.2 적 미사일 20발인 경우 leakage rate 그래프



4.15.3 적 미사일 50, 100발인 경우 leakage rate 그래프

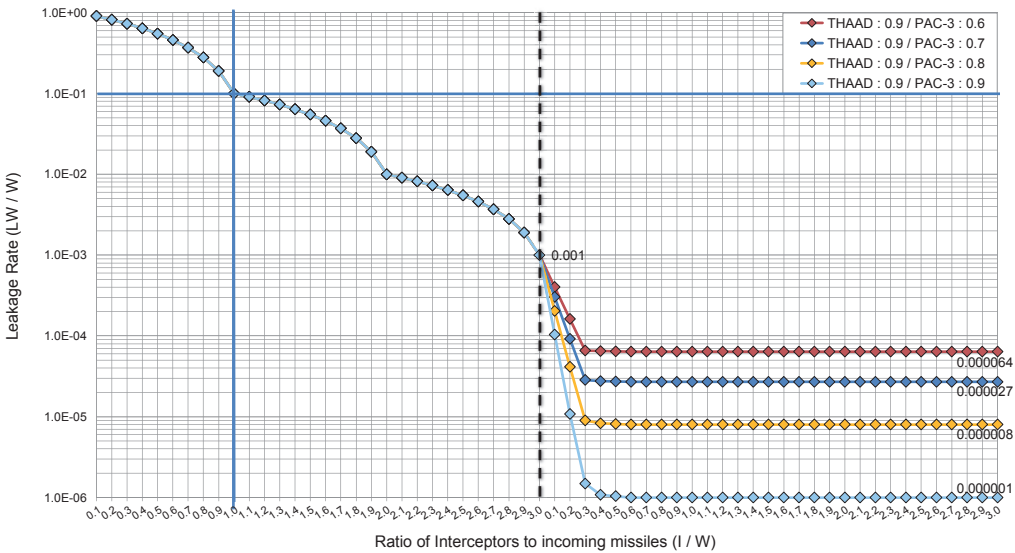


4.15.4 적 미사일 수에 따른 Pr(no leakage)

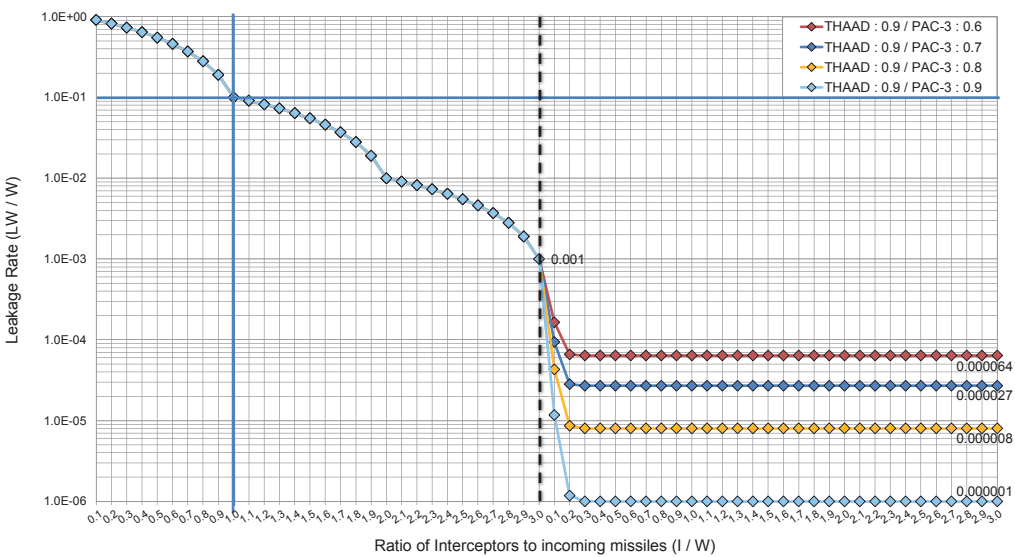
Probability that all enemy missiles are destroyed (%)						
Observation point	Probability of a single interceptor killing one apparent warhead		No of Enemy Missiles			
			10	20	50	100
After the 1st tier defense	THAAD	0.8	92.28%	85.16%	66.92%	44.79%
		0.6	99.49%	98.98%	97.47%	95.01%
After the 2nd tier defense	PAC-3	0.7	99.78%	99.57%	98.93%	97.86%
		0.8	99.94%	99.87%	99.68%	99.36%
		0.9	99.99%	99.98%	99.96%	99.92%
		0.6	99.49%	98.98%	97.47%	95.01%

4.16 THAAD(SSPk=0.9) 3발, PAC-3(SSPk=0.6~0.9) 3발

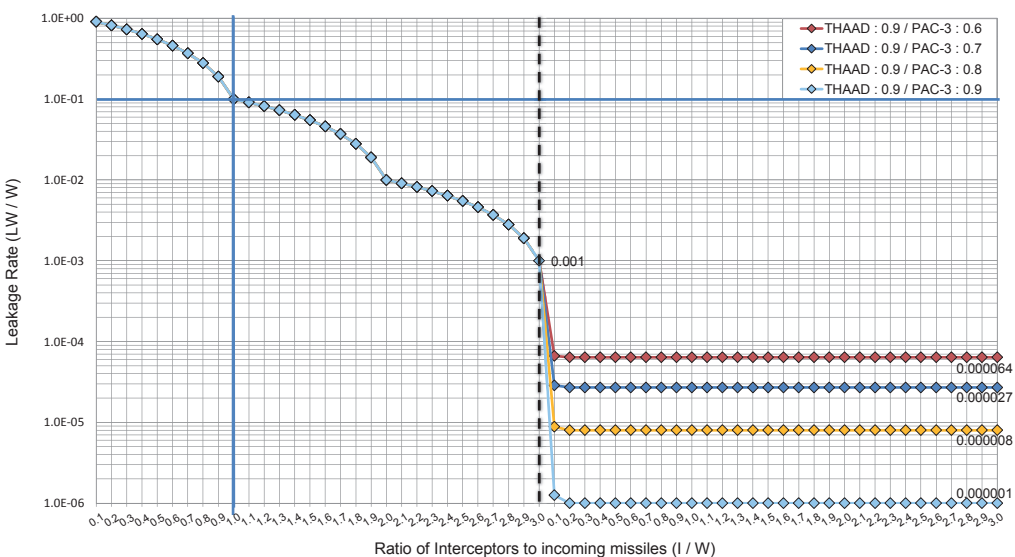
4.16.1 적 미사일 10발인 경우 leakage rate 그래프



4.16.2 적 미사일 20발인 경우 leakage rate 그래프



4.16.3 적 미사일 50, 100발인 경우 leakage rate 그래프



4.16.4 적 미사일 수에 따른 Pr(no leakage)

Probability that all enemy missiles are destroyed (%)						
Observation point	Probability of a single interceptor killing one apparent warhead		No of Enemy Missiles			
			10	20	50	100
After the 1st tier defense	THAAD	0.9	99.00%	98.02%	95.12%	90.48%
		0.6	99.94%	99.87%	99.68%	99.36%
After the 2nd tier defense	PAC-3	0.7	99.97%	99.95%	99.87%	99.73%
		0.8	99.99%	99.98%	99.96%	99.92%
		0.9	100.00%	100.00%	100.00%	99.99%

A S A N
R E P O R T

시뮬레이션 기법을 통한 미사일 방어체계 효과 분석

발행일 2017년 7월

지은이 김종우, 김진우, 안성규, 함건희

펴낸곳 아산정책연구원

주소 (03176) 서울시 종로구 경희궁1가길 11

등록 2010년 9월 27일 제 300-2010-122호

전화 02-730-5842

팩스 02-730-5849

이메일 info@asaninst.org

홈페이지 www.asaninst.org

편집 디자인 EGISHOLDINGS

ISBN 979-11-5570-186-7 93340 비매품



ISBN 979-11-5570-186-7