

무기체계 단위비용을 고려한 K2 체계의 효과분석 방법 연구

정병기[†]

A Study on Effectiveness Analysis of K2 system with Weapon's unit cost

Byungki Jung[†]

ABSTRACT

This paper analyses the effectiveness of Kill Chain (KC) and Korea Air and Missile Defense (KAMD), also known as the K2 systems, using monte carlo simulation. It is assumed that the K2 systems are consisted with unitary KC and multi-layered (upper-tier and lower-tier) KAMD. And each system has two or three arbitrary weapon systems and its combination makes 12 scenarios. Measures of effectiveness (MOE) of the K2 systems were defined as ratio of eliminated ballistic missiles from total threats. And total cost was calculated by number of weapon launched and its unit cost. MOE and total cost of the K2 systems were estimated using monte carlo simulation with a thousand iteration for each scenario. Cost-effectiveness analysis was performed and the best candidate was selected using fixed effectiveness approach. As a result, the performances of KC are prime factor that affects both effectiveness and total cost of the K2 systems. It is also, acquired proper level of lower-tier KAMD to achieve desired defense effectiveness. For future work, it needs to be performed cost-effectiveness analysis based on practical specification and life cycle cost of weapon systems.

Key words : Effectiveness Analysis, M&S, Kill Chain, Korea Air and Missile Defense (KAMD), Monte Carlo

요약

본 연구는 무기체계의 단위비용을 고려한 K2(KC와 KAMD) 체계의 효과분석을 수행하였다. 단일 KC와 다중(고층 및 저층) KAMD를 가정하고, 각 체계에 임의의 무기체계를 설정하여 각각의 조합에 따라 총 12개의 시나리오를 작성하였다. 효과도는 전체 탄도미사일 위협 수량 대비 감소된 탄도미사일 위협의 비율로 정의하였으며, 비용은 발사된 무장의 수량과 단위비용으로 계산하였다. K2 체계의 효과도와 총비용은 몬테카를로 시뮬레이션을 1,000번 반복하여 추정하였다. 각각의 시나리오를 대안으로 하여 비용대 효과분석을 실시하였고, 효과조정법을 사용하여 최적 대안을 선정하였다. 연구 결과 KC 능력이 K2 체계의 방어 효과와 총비용을 결정하는 가장 중요한 요소였으며, 적정 수준의 저층방어체계를 갖춰야 요구되는 방어 효과를 달성할 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서 실질적인 무기체계 제원과 수명주기비용을 고려한 비용대 효과분석이 이루어진다면 더욱 현실적인 분석이 가능할 것이다.

주요어 : 효과분석, 국방 M&S, 킬체인, 한국형 미사일 방어체계, 몬테카를로 시뮬레이션

1. 서론: 연구논제

미군은 1991년 걸프전을 통해 킬체인(Kill Chain,

KC)과 미사일 방어(Air and Missile Defense)의 개념을 발전시켰다. 당시 미군과 연합군은 이라크군의 스커드(Scud) 미사일 공격 때문에 고전하였는데, 전쟁 기간 중 총 88기의 스커드 미사일이 발사되었다. 이라크군은 고정발사대와 이동식 발사대(Transporter Erector Launcher, TEL)를 함께 사용하여 미사일을 발사했는데, 특히 TEL을 적극적으로 활용하였다. TEL은 발사 위치를 이동할 수 있어 사전에 이를 차단하는 것이 매우 어렵고, 기만체

Received: 26 January 2017, Revised: 22 May 2017,
Accepted: 22 May 2017

[†] Corresponding Author: Byungki Jung

E-mail: byungki.jung.58@gmail.com

Defense Science Dept., KNDU, Seoul, Korea

나 은/엄폐 등을 통해 생존성 확보가 용이하기 때문이다. 이때 미군이 TEL과 같은 ‘시한성 긴급 표적(Time-sensitive target)’을 파괴하기 위해 발전시킨 개념이 현재의 KC이다. KC는 교전가능 시간이 짧은 표적을 효과적으로 공격하기 위해 ‘탐지-식별-추적-교전-평가’의 과정을 반복적으로 수행하는 순환타격체계로 제한된 시간에 효과적인 공격을 수행하기 위해 선제 타격의 개념을 포함하고 있다(Rosenau, 2001).

발사된 스커드 미사일을 요격하기 위해 발전된 개념이 SRBM(Short Range Ballistic Missile)에 대한 미사일 방어체계이다. 당시 미군은 소련의 대륙간 탄도미사일을 방어할 수 있는 미사일 방어체계를 보유하고 있었지만 비행시간이 5분 이하인 SRBM을 방어하기에는 부적합하였다. 이에 방공무기였던 패트리엇를 일부 개량하여 투입하였으며, 이후 지속적인 성능개량과 연구개발을 통해 현재의 미사일 방어체계를 구축하였다(Cirincione, 2000).

우리 군도 북한의 탄도미사일 위협에 대응하기 위해 KC와 한국형 미사일 방어체계(Korea Air and Missile Defense, KAMD), 즉, K2 체계를 구축하고 있다. 기존에 KC나 KAMD의 개별 효과분석 연구는 다수 진행되었으나(Krause, 2002; Lee and Jeong, 2006; Ender et al., 2010; Wilkening, 2000; Lee et al., 2015) 이를 함께 고려한 K2 체계에 대한 효과분석 연구는 미흡하였다. 이는 KC와 KAMD를 별도의 작전으로 인식하는 경향이 강했기 때문이다. 본 연구는 K2 체계를 통합적인 체계로 보고 확률 모형을 이용하여 효과도(Measures of Effectiveness, MOE)를 설정하고, 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 각 시나리오의 방어 효과와 총비용을 추정하였다. 특히, 교전 결과를 좌우하는 무기체계의 파괴확률을 확률 모형으로 정의하고, 구성요소에 감쇄효과를 적용하여 모형의 현실성을 높였다. 그리고 추정된 효과도와 총비용으로 비용대 효과분석을 수행하여 최적 대안을 도출하였다.

2장에서는 무기체계 효과분석의 개념과 파괴확률의 개념에 대해 살펴보고, 3장에서는 K2 체계가 운용될 교전 시나리오와 가정사항, 분석 절차를 소개한다. 4장에서는 시나리오별 시뮬레이션을 수행 결과를 분석하며, 비용대 효과분석을 통해 최적 대안을 제시하고, 위협 증가에 따른 민감도 분석을 수행한다. 5장 결론에서는 정책적 함의와 향후 연구방향을 기술한다.

2. 이론적 고찰

2.1 무기체계 효과분석

무기체계 효과분석은 무기체계의 효과도를 정량적으로 측정하는 것이다. 무기체계의 효과도는 전투효과와 간접효과로 구분되고, 이중 전투효과는 무기체계의 임무수행능력을 뜻한다(Park et al., 2001). 전투효과를 측정하는 방법을 정태적 방법(static analysis)과 동태적 방법(dynamic analysis)으로 구분하여 제시하였다. 정태적 방법은 전투효과지수(Indexed Combat Effectiveness)나 전투평가 설문 등이 있으며, 동태적 방법은 란체스터 전투모형, 시뮬레이션이나 위게임 등이 있다. 일반적으로 전투효과는 시뮬레이션 등 동태적 분석을 통해 측정하며(Park et al., 2015; Hong et al., 2010), 여기에서 묘사되지 못하는 요소에 대해서는 정태적 분석을 이용하여 보완한다(Park et al., 2001). 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 전투효과를 측정하였으며, K2 체계의 효과도를 다음의 세 가지로 정의하였다.

$$MOE_{K2} = 1 - \frac{TBM_{impacted}}{TBM_{total}} \quad (1)$$

$$MOE_{KC} = 1 - \frac{TBM_{launched}}{TBM_{total}} \quad (2)$$

$$MOE_{KAMD} = 1 - \frac{TBM_{impacted}}{TBM_{launched}} \quad (3)$$

여기에서 MOE_{K2} , MOE_{KC} , MOE_{KAMD} 는 각각 K2, KC, KAMD 체계의 효과도이며, TBM_{total} 은 적의 탄도미사일(Tactical Ballistic Missile, TBM) 총 보유량, $TBM_{launched}$ 는 발사된 탄도미사일의 총 수량, $TBM_{impacted}$ 는 낙탄된 탄도미사일의 총 수량이다. K2 체계의 효과도는 KC와 KAMD를 모두 고려한 것으로 적의 전체 탄도미사일 위협을 얼마나 감소시켰는가를 측정한다. KC의 효과도는 발사되는 탄도미사일을 얼마나 감소시켰는가로 측정하며, 이는 KC가 TEL을 파괴하여 발사되는 탄도미사일의 위협을 낮추는데 초점을 두기 때문이다. KAMD의 효과도는 발사된 탄도미사일을 얼마나 요격하였는가를 측정하며, 이는 미사일 방어체계의 목적인 탄도미사일 요격을 반영한 것이다.

2.2 무기체계의 파괴확률

무기체계의 파괴확률(Kill Probability, P_k)은 교전을 통해 표적이 파괴될 확률이다. K2 체계는 감시정찰(Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance, ISR) 자산과 무기체계(Weapon System, WS)가 네트워크를 통

해 연결되어 작동되기 때문에 파괴확률은 감시정찰자산의 표적획득확률(Target Acquisition Probability, P_{TA}^{ISR})과 무기체계의 단발교전파괴확률(Single Shot Engagement Kill Probability, P_{SSK}^{WS})에 의해 결정되며, Equation (4) ~ (6)과 같다(Jaiswal, 2012; Driel, 2013).

$$P_k = P_{TA}^{ISR} \times P_{SSK}^{WS} \quad (4)$$

$$P_{TA}^{ISR} = P_{detect}^{ISR} \times P_{track}^{ISR} \quad (5)$$

$$P_{SSK}^{WS} = P_{detect}^{WS} \times P_{track}^{WS} \times P_{launch}^{WS} \times P_{guide}^{WS} \times P_{lethal}^{WS} \quad (6)$$

여기에서 P_{detect}^{ISR} 과 P_{track}^{ISR} 는 표적 탐지확률, P_{track}^{ISR} 와 P_{track}^{WS} 는 표적 추적확률, P_{launch}^{WS} 는 무장발사확률, P_{guide}^{WS} 는 표적명중확률, P_{lethal}^{WS} 은 명중 시 파괴확률이다. 표적 탐지확률은 센서가 표적의 존재를 인지할 수 있는 확률이고, 표적 추적확률은 무장 발사가 가능하도록 표적을 식별하여 추적할 수 있는 확률이다. 무장발사확률은 무장이 정상적으로 작동하여 발사될 확률로 무장의 신뢰도를 뜻한다. 표적명중확률은 발사된 무장이 표적까지 날아가 명중할 확률로 무장의 정확도를, 명중 시 파괴확률은 명중된 무장이 표적을 파괴할 확률로 무장의 치명도를 의미한다. 각 확률은 독립적이며, 무기체계의 파괴확률은 각 확률의 곱으로 표현된다.

P_{TA}^{ISR} 은 감시정찰자산이 무장 발사가 가능한 표적정보를 획득할 수 있는 확률이다. 획득된 표적정보는 데이터 링크나 C4I(Command, Control, Communications, Computers, & Intelligence) 체계를 통해 무기체계에 전달되어 무장 발사에 활용된다. P_{SSK}^{WS} 는 무기체계가 자체 센서를 이용해 표적을 탐지, 추적하여 무장을 발사하고, 발사된 무장이 표적에 명중하여 파괴할 확률이다. 교전거리가 길어 직접적인 탐지가 제한되는 KC의 파괴확률은 P_{TA}^{ISR} 와 P_{SSK}^{WS} 가 모두 영향을 미치며, P_{detect}^{WS} 와 P_{track}^{WS} 은 고려되지 않는다. KAMD의 경우 발사된 탄도미사일을 추적할 수 있는 감시망이 한반도 전역에 다중으로 구축되어 모든 탄도미사일을 탐지할 수 있어 P_{TA}^{ISR} 의 영향은 미미하고, P_{SSK}^{WS} 가 주로 영향을 미친다.

3. 연구모형

3.1 교전 시나리오

적의 탄도미사일 작전지역(Ballistic Missile Operation

Area, BMOA)에는 하나의 재보급 진지와 다수의 발사진지가 위치하고 있고, 아츠의 목표지역(Objective Area)에는 핵심 국가/국방시설 등이 있는 3곳의 방어자산목록(Defended Asset List, DAL)이 위치하고 있다. 적은 우리의 전쟁수행능력을 파괴하기 위해 국가기능 유지와 전쟁지휘에 필수적인 DAL에 대한 공격과 민간 지역에 대한 대량살상무기(Weapon of Mass Destruction, WMD) 공격을 병행한다. BMOA에는 TEL 10대와 탄도미사일 100기가 운용되고 있다. 전체 탄도미사일 중 70%는 재래식(High Explosive, HE) 탄두, 30%는 WMD 탄두로 각각 DAL과 민간 지역 공격에 사용된다. 가용한 TEL 수 만큼 동시 발사가 이루어지며, 모든 TEL이 파괴되거나 모든 탄도미사일이 발사될 때까지 적의 공격은 계속된다. 각각의 DAL에는 점방어(Point Defense, PD)를 위한 저층방어체계 1개 포대가 위치하고 있고, 목표지역에는 지역방어(Area Defense, AD)가 가능한 고층방어체계 1개 포대가 위치하여 탄도미사일을 요격한다. KC는 목표 지역 외부에 위치하며 이동하는 적의 TEL을 공격한다. 이를 도식화하면 Figure 1과 같다.

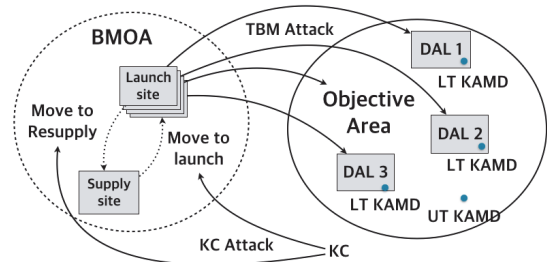


Fig. 1. Operational environment

KC 공격은 발사를 위해 발사진지로 이동하는 TEL을 공격하는 사전 공격(pre-launch TEL attack)과 발사 후 재장전을 위해 재보급 진지로 이동하는 TEL을 공격하는 사후 공격(postlaunch TEL attack)으로 구분된다. 사전 공격에서 TEL이 파괴될 경우 탑재된 탄도미사일은 발사되지 못하며, 살아남을 경우 아무런 방해 없이 탄도미사일이 발사된다. 사후 공격은 이미 발사된 탄도미사일에는 영향을 주지 못하지만 다음 공격에서 사용될 TEL을 감소시켜 위협을 경감시킨다(Shaver and Mesic, 1995).

KAMD는 저층방어와 고층방어로 구분된다. 저층방어체계는 각각의 DAL로 향하는 탄도미사일을, 고층방어체계는 WMD 탄도미사일과 DAL 2로 향하는 재래식 탄도미사일의 일부를 요격한다. 이는 고층방어체계의 실제 작전적 제한사항을 고려한 것이다. 교전 방법은 대응시간이

긴 고층방어체계는 위협에 대해 1발씩 교전하고, 대응시간이 짧은 저층방어체계는 2발 동시 교전을 한다. 다만 고층방어체계의 경우 다층방어가 제공되는 재래식 탄도 미사일에 대해서는 1회만 교전하고, WMD 탄도미사일은 다중 교전(Shot-Look-Shot) 개념에 따라 최대 2회까지 교전할 수 있다(Department of Army, 2002). KAMD 체계의 전체적인 동시교전 능력을 위협에 충분히 대응할 수 있는 것으로 가정한다.

3.2 가정 사항

분석을 위한 무기체계는 Table 1과 같이 가정하였다.

Table 1. Sample weapon systems of K2

| Cate. | Kill Chain | | | UT KAMD | | LT KAMD | |
|-----------|------------|---------|-------|---------|--------|---------|---------|
| | A1 | A2 | A3 | U1 | U2 | L1 | L2 |
| Type | CM | CM | BM | AD | AD | PD | PD |
| Max Rng | 500km | 1,000km | 500km | 200km | 100km | 30km | 40km |
| Max Alt. | - | - | - | 150km | 60km | 25km | 30km |
| Mach | 0.9 | 0.75 | 5 | 10 | 8 | 4 | 4 |
| Warhead | HE | HE | HE | HTK | HTK | Frag. | HTK |
| R/D type | Up-link | Up-link | - | X band | X band | X band | Ka band |
| Platform | Fighter | TEL | TEL | TEL | TEL | TEL | TEL |
| CEP | 3m | 3m | 100m | - | - | - | - |
| P_k | 90% | 90% | 25% | 85% | 70% | 40% | 60% |
| Unit cost | ₩2B | ₩2B | ₩4B | ₩15B | ₩12B | ₩2B | ₩3B |

KC 무기체계는 공대지/함대지 순항미사일(Cruise missile, CM)과 지대지 탄도미사일(Ballistic missile, BM)의 3종이, KAMD 무기체계는 지역방어체계와 점방어체계 각 2종이 포함되어 있다. KC 무기체계는 감시정찰자산에서 획득한 표적 정보를 활용하여 발사하며, 순항미사일은 발사 후 Up-link를 이용한 표적정보 최신화가 가능하지만 탄도미사일은 불가능하다. KC 무기체계 중 공대지 순항미사일 A1의 실제 교전거리는 약 300km, 함대지 순항미사일 A2는 약 400km로 가정하였는데, 전투기는 전방지역으로 신속하게 기동하여 공격할 수 있지만 함정은 상대적으로 후방에 배치되어 있고, 신속한 기동이 제한되기 때문이다. KAMD 무기체계는 자체 레이더를 보유하고 있으며, 자체 레이더에서 추적된 표적에 대해서만 교전이 가능하다. 고층방어체계 U1, U2는 요격가능거리와 고도에서 차이가 있고, 저층방어체계 L1은 파편효과 탄두(HE Fragment)를 사용하고, L2는 Hit-to-Kill (HTK) 탄두를 사용하여 P_{lethal}^{ISS} 에 차이가 있다. 또한, 저층방어체계는 교전 가능 시간이 짧고, 요격미사일의 기동 성능 등이 상대적으로 낮기 때문에 고층방어체계보다 낮

은 P_k 를 갖는 것으로 가정하였다.

KC 효과분석에 있어 중요한 요소는 감쇄효과(Reduce effects)를 적용하는 것이다. 감쇄효과는 감시정찰자산의 표적획득확률에 대한 감쇄효과와 무장 비행시간에 따른 감쇄효과로 구분되며, Table 2과 같이 가정하였다.

Table 2. Reduce effects of KC weapon system

| Category | | Reduce effects |
|------------------------|-----------------------|----------------|
| ISR target acquisition | Prelaunch TEL attack | 90% |
| | Postlaunch TEL attack | 30% |
| Weapon flight time | | 10% per 5 min |

감시정찰자산의 감쇄효과는 표적을 탐지할 가능성(P_{detect}^{ISR})에 영향을 미친다. Rosenau(2001)는 1991년 걸프전 당시 탄도미사일을 발사하기 전에 TEL을 탐지하는 것은 극히 제한되었으며, 발사 후에도 정확한 탐지 확률은 약 20% 정도였다고 분석하였다. 당시에는 F-15/16 등의 전투기에 장착된 장비의 성능이 제한되었기 때문인데, 이후 프레디터(Predator), 글로벌 호크(Global Hawk) 등과 같은 무인기의 등장과 탑재 장비의 발달로 탐지 확률이 많이 증가하였으며, 미군은 Roving Sands '95 훈련에서는 85%의 탐지 확률을 확인하였다(Schneider, 2004). 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 발사 직후 정보 획득이 어려운 사전 공격 시에는 90%, 발사 직후 포착으로 탐지 가능성은 증가하지만 TEL의 이동, 은폐 등으로 지속적인 추적이 제한되는 사후 공격에는 30%의 감쇄효과를 가정하였다. 즉, 사전 공격 시에는 적의 가용한 TEL 중 10%만 탐지/추적하여 공격할 수 있으며, 사후 공격에서는 70%만 탐지/추적할 수 있다는 것이다.

무장 비행시간에 따른 감쇄효과는 비행시간에 따른 표적 소실 가능성(P_{guide}^{ISS})을 반영한 것으로 비행시간이 증가하게 되면 그 사이 TEL이 이동할 가능성이 증가하기 때문이다. 이는 비행시간이 두배 증가할 때마다 예상 위치의 면적이 4배씩 증가하기 때문에 표적을 소실할 확률이 증가하기 때문이다. 다만 순항미사일의 경우 표적정보 최신화를 통해 소실 확률을 감소시킬 수 있다. 따라서 TEL이 탄도미사일을 발사하고 이동 준비에 소요되는 5분을 기준으로(Wiritz, 1997) 비행시간이 5분씩 증가될 때마다 10%씩 감쇄효과가 증가하는 것으로 가정하였다. 그 결과 무기체계 A1은 마하 0.9의 속도로 교전거리 300km를 비행할 때 약 18분이 소요되어 감쇄효과 40%가 적용되고, 무기체계 A2는 0.75의 속도로 교전거리 400km를 비행할 때 약 26분이 소요돼 감쇄효과 50%가

적용되었다. 탄도미사일의 경우 사거리 500km까지 비행 시간이 약 5분 이내로 본 연구의 교전 시나리오에서는 감쇄효과를 적용받지 않는다.

KAMD에는 감시정찰자산의 감쇄효과를 적용하지 않았다. 이는 현재 한반도에는 적 탄도미사일 위협을 탐지하기 위한 다층 감시망이 구축되어 있어 TEL에서 발사되는 탄도미사일을 충분히 탐지할 수 있기 때문이다.

3.3 시뮬레이션 분석 절차

본 연구에서는 RAND 연구소(Shaver and Mesic, 1995)에서 제시한 시뮬레이션 모형을 확장하여 시뮬레이션을 구성하였다. RAND 연구소는 발사 수단인 TEL을 파괴하는 것이 미사일 방어에 어느 정도 기여할 수 있는지를 확인하기 위해 TEL 파괴에 따른 탄도미사일 발사량의 감소를 수리적 모형, 마코프 행렬과 시뮬레이션을 통해 각각 분석하였다. 이 분석 모형은 현재 우리 군이 추진하고 있는 KC와 유사한 개념으로, 본 연구는 여기에 KAMD에 의한 탄도미사일 요격 과정을 추가하여 K2 체계의 교전 과정을 시뮬레이션 하였다. 본 연구의 분석 절차는 Figure 2와 같다.

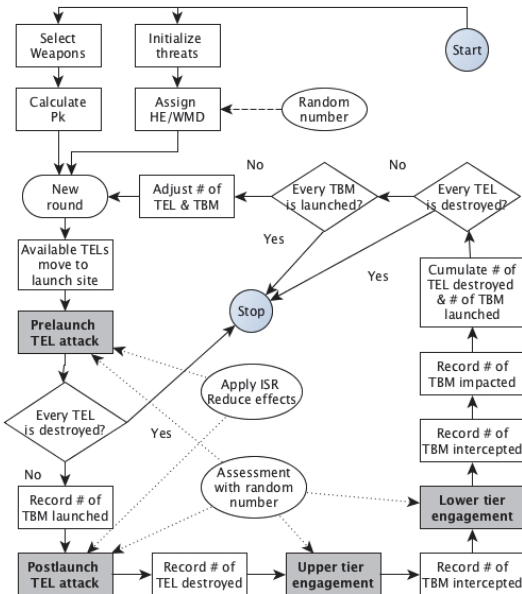


Fig. 2. Monte carlo simulation process

시뮬레이션이 시작되면 적 위협을 초기화하고, 탄도미사일 발사 순서에 따른 탄두의 종류와 목표지점은 난수에 의해 할당하고, 위협에 대응하기 위한 KC와 KAMD

무기체계를 선택한다. 새로운 라운드가 시작되면 가용한 TEL은 탄도미사일을 장착하고 발사진지로 이동하며, 이 과정에서 KC의 사전 공격이 이루어진다. 공격에서 살아남은 TEL은 아무런 방해 없이 탄도미사일을 발사하고, 발사된 수량을 기록한다. 발사를 완료한 TEL은 재장전을 위해 재보급 진지로 이동하며, 이 과정에서 사후 공격이 이루어진다. 감시정찰자산의 감쇄효과는 사전/사후 공격시에 적용되어 공격 가능한 TEL의 수량을 결정한다. 효과 측정과 비용 추정을 위해 누적된 TEL의 파괴 수량과 KC 무장의 발사량을 기록한다.

발사된 탄도미사일은 기설정된 목표를 향해 날아가며, 목표에 따라 고층방어체계, 저층방어체계 혹은 두 체계 모두 요격을 실시한다. 각 체계별로 발사된 요격미사일의 수량과 요격된 탄도미사일 수량을 누적하여 요격미사일의 총 발사량과 낙탄된 탄도미사일의 총 수량을 계산한다. 라운드가 종료되면 파괴된 TEL의 수량과 발사된 탄도미사일 수량을 통해 다음 라운드에서 가용한 TEL의 수량과 탄도미사일 재고를 조정한다. 모든 TEL이 파괴되거나 탄도미사일 재고가 전부 소모는 경우 시뮬레이션을 종료하고 K2 체계의 방어 효과와 총비용을 계산한다. 시뮬레이션에 사용된 난수는 균등분포(U[0,1])에 따라 생성된다.

4. 시뮬레이션 결과 분석

4.1 시나리오별 K2 체계 효과분석

Table 3과 같이 무기체계 조합에 따라 12개의 시나리오를 작성하였으며, Stata 13을 사용하여 분석하였다.

Table 3. Scenario of weapon system combination

| Scenario | Kill Chain | UT KAMD | LT KAMD |
|----------|------------|---------|---------|
| 1 | A1 | U1 | L1 |
| 2 | A1 | U1 | L2 |
| 3 | A1 | U2 | L1 |
| 4 | A1 | U2 | L2 |
| 5 | A2 | U1 | L1 |
| 6 | A2 | U1 | L2 |
| 7 | A2 | U2 | L1 |
| 8 | A2 | U2 | L2 |
| 9 | A3 | U1 | L1 |
| 10 | A3 | U1 | L2 |
| 11 | A3 | U2 | L1 |
| 12 | A3 | U2 | L2 |

적 위협은 TEL 10대와 탄도미사일 100기로 고정하여 각 시나리오별로 1,000번을 반복 수행하였으며, 결과는

Table 4. Simulation result of each scenario

| Scenario | K2 | | Kill Chain | | | KAMD | | | |
|----------|-------|----------------|------------|---------------|----------------|-------|------------------|------------------|----------------|
| | MOE | Total Cost(₩B) | MOE | # of launched | Total Cost(₩B) | MOE | # of UT launched | # of LT launched | Total Cost(₩B) |
| 1 | 0.854 | 515.1 | 0.545 | 36.5 | 73.0 | 0.664 | 22.1 | 55.3 | 442.1 |
| 2 | 0.966 | 566.5 | 0.547 | 36.2 | 72.4 | 0.911 | 21.9 | 55.3 | 494.1 |
| 3 | 0.851 | 470.8 | 0.541 | 36.9 | 73.8 | 0.646 | 23.7 | 56.4 | 397.0 |
| 4 | 0.967 | 516.5 | 0.549 | 36.2 | 72.4 | 0.898 | 23.1 | 55.7 | 444.1 |
| 5 | 0.783 | 773.7 | 0.319 | 54.5 | 109.0 | 0.666 | 33.3 | 82.4 | 664.7 |
| 6 | 0.952 | 842.7 | 0.331 | 53.8 | 107.5 | 0.912 | 32.8 | 80.9 | 735.2 |
| 7 | 0.779 | 698.8 | 0.318 | 54.6 | 109.3 | 0.648 | 35.2 | 83.5 | 589.5 |
| 8 | 0.949 | 776.9 | 0.319 | 54.6 | 109.1 | 0.895 | 34.5 | 84.6 | 667.8 |
| 9 | 0.73 | 1,089.5 | 0.155 | 67.7 | 270.6 | 0.662 | 40.9 | 103 | 818.9 |
| 10 | 0.939 | 1,207.1 | 0.151 | 67.9 | 271.6 | 0.909 | 42 | 102 | 935.5 |
| 11 | 0.721 | 990.7 | 0.149 | 67.7 | 270.7 | 0.64 | 42.3 | 106 | 720.0 |
| 12 | 0.938 | 1,108.4 | 0.154 | 67.6 | 270.4 | 0.893 | 44.3 | 102 | 838.0 |

Table 4와 같다. 여기에서 각각의 효과도는 Equation (1) ~ (3)을 이용하여 계산되었으며, 총비용은 각 무장의 발사량과 단위비용을 곱해 얻은 결과이다. KAMD는 고층방어체계와 저층방어체계의 발사수량을 각각의 단위비용에 곱한 후 합산하여 얻은 결과이다. Table 5는 각 시나리오가 목표 방어 효과 95%를 달성하였는지 여부에 대해 t검정을 수행한 결과이며, 가설은 다음과 같다.

$$H_0 : MOE_{K2} < 0.95$$

$$H_a : MOE_{K2} \geq 0.95$$

Table 5. T-test result of each scenario

| Scen. | Mean | Std.Err. | Std.Dev | df | t | p |
|-------|-------|----------|---------|-----|---------|-------|
| 1 | 0.854 | 0.002 | 0.068 | 999 | -44.795 | 1.000 |
| 2 | 0.966 | 0.001 | 0.022 | 999 | 23.604 | 0.000 |
| 3 | 0.851 | 0.002 | 0.066 | 999 | -47.062 | 1.000 |
| 4 | 0.967 | 0.001 | 0.022 | 999 | 24.043 | 0.000 |
| 5 | 0.783 | 0.003 | 0.092 | 999 | -57.334 | 1.000 |
| 6 | 0.952 | 0.001 | 0.029 | 999 | 1.712 | 0.044 |
| 7 | 0.779 | 0.003 | 0.095 | 999 | -57.01 | 1.000 |
| 8 | 0.949 | 0.001 | 0.028 | 999 | -1.587 | 0.944 |
| 9 | 0.73 | 0.003 | 0.1 | 999 | -69.768 | 1.000 |
| 10 | 0.939 | 0.001 | 0.031 | 999 | -10.886 | 1.000 |
| 11 | 0.721 | 0.003 | 0.102 | 999 | -71.019 | 1.000 |
| 12 | 0.938 | 0.001 | 0.033 | 999 | -11.93 | 1.000 |

분석 결과 시나리오 2, 4는 99% 유의 수준에서, 6번은 95% 유의 수준에서 각각 귀무가설을 기각하여 목표 방어효과를 달성하였으며, 시나리오 8의 경우 유의확률(p)이 0.944로 귀무가설을 기각하지 못하였고, 나머지 시나

리오도 목표 방어 효과를 달성하지 못하였다.

이 결과를 통해 몇 가지 정책적 함의를 확인할 수 있다. 먼저 KC의 중요성이다. K2 체계의 방어 효과를 살펴 보면 동일한 미사일 방어체계가 적용된 시나리오를 비교했을 때, 무기체계 A1과 A3의 방어 효과가 최대 12%p(시나리오 3, 11) 정도 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 파괴확률이 가장 낮은 A3가 포함된 시나리오의 경우 목표 방어 효과를 한 번도 달성하지 못했고, A1이 포함된 시나리오에 비해 총비용이 평균 두 배 이상 높게 소요된 것으로 분석되었다. 이는 TEL의 파괴가 늦어지면서 발사되는 탄도미사일이 증가하고, 이에 대응하기 위한 각 체계의 무장 발사량이 함께 증가하였기 때문이다. 따라서 적정 수준의 KC 능력을 구축하는 것이 목표 방어 효과 달성과 전체 비용을 감소시키기 위해 중요한 요소임을 확인할 수 있다.

다음은 저층방어체계 능력의 중요성이다. 상대적으로 요격확률이 낮은 무기체계 L2를 사용한 시나리오는 무기체계 L1을 사용한 시나리오에 비해 작게는 약 11%p(시나리오 1, 2), 크게는 약 21%p(시나리오 11,12) 정도 낮은 방어 효과를 보여주었다. 이는 고층방어체계가 재래식 탄도미사일 중 일부에 대해서만 대응하도록 설정하였기 때문인데, DAL로 향하는 위협의 약 83%(전체 위협의 약 58%)는 저층방어체계가 단독으로 방어하였기 때문이다. 하지만 이는 매우 현실적인 가정으로 미국의 경우도 비용문제로 인해 고층방어를 제공할 수 있는 THAAD를 6개 포대만 보유하고 있고, 포대 당 요격미사일은 48발로 제한되어 있어 모든 위협에 대한 방어를 제공하는 것은 상당히 제한적이기 때문이다(Balle, 2014). 따라서 모든

위협에 대해 다층방어를 제공하지 못한다면 저층방어체계의 요격확률을 증가시키는 것이 전체 방어 효과를 증가시키기 위해 필수적인 요소라고 할 수 있다.

Figure 3은 각 시나리오의 방어 효과와 총비용의 관계를 보여주고 있다. 각 점은 시나리오별 해당 무기체계 조합이고, 그래프 상단의 실선은 방어 효과 95%의 참조선이다. 또한, 목표 방어 효과를 달성한 시나리오를 대상으로 비용대 효과분석을 실시하였으며, Table 6과 같다.

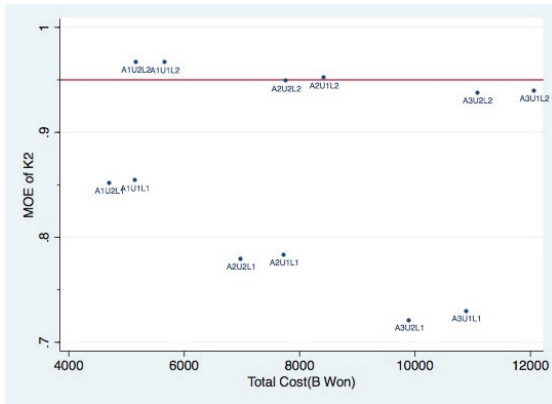


Fig. 3. Cost and effectiveness relation

Table 6. Cost-effectiveness analysis of optimal scenario

| Scenario | MOE | Total Cost(₩B) |
|----------|-------|----------------|
| 2 | 0.966 | 566.5 |
| 4 | 0.967 | 516.5 |
| 6 | 0.952 | 842.7 |

분석 결과 3개의 시나리오 중 총비용이 가장 작은 ‘시나리오 4(A1-U2-L2)’가 최적 대안으로 선정되었다. 즉, KC에는 공대지 순항미사일인 A1을 이용하고, 고층방어체계는 최대사거리와 요격고도는 짧지만 상대적으로 경제적인 U2, 저층방어체계는 비용은 상대적으로 비싸지만 요격확률이 우수한 L2를 사용하는 것이 가장 효과적이었다. 이러한 분석결과는 연구자가 설정한 임의의 무기체계를 바탕으로 한 결과로 실제 무기체계 자료를 활용하면 더욱 정확한 분석이 가능할 것이다.

4.2 민감도 분석: 적 위협 증가 시 민감도 변화

현재 북한은 약 1,000여 기의 탄도미사일을 보유하고 있으며, 이중 한반도 공격에 사용할 것으로 예상되는 스커드 미사일은 약 600여 기를 보유하고 있는 것으로 평가된다(Matthew, 2015). 지리적/작전적 제약으로 최소 2개

이상의 BMOA를 운용할 것으로 예상되며, 이 경우 하나의 BMOA에서 발사하는 탄도미사일의 수는 최소 100여 기에서 최대 500여 기로 추정된다. 따라서 민감도 분석에서는 전체 탄도미사일 위협이 각각 300발과 500발로 증가한 경우를 분석하였다. 또한, 일반적인 TEL과 탄도미사일의 비율인 1:10보다 TEL의 수가 증가된 1:5 비율(20대의 TEL이 100발의 탄도미사일을 발사하는 경우)도 함께 분석하였다. 이는 발사 수단인 TEL 수량의 증가에 따른 방어 효과의 변화를 살펴보기 위한 것이다. 민감도 분석 결과 방어 효과와 총비용의 관계는 Figure 4와 같다.

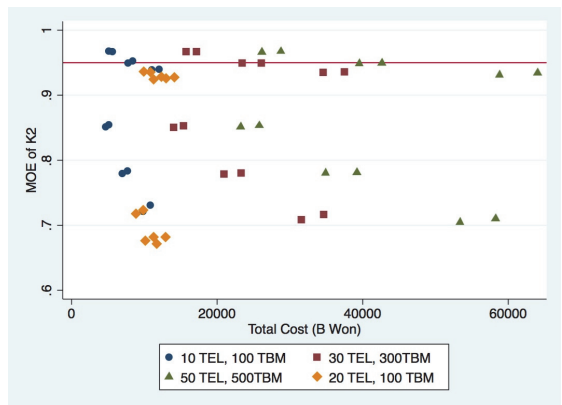


Fig. 4. Sensitivity analysis: Threat increasing

여기에서 TEL과 탄도미사일의 비율이 1:10으로 유지된 경우 탄도미사일 수량의 증가에 따라 총비용은 증가하지만 방어 효과는 큰 변화가 없었다. 하지만 발사 수단이 증가된 경우(20 TEL, 100 TBM)에는 모든 시나리오가 목표 방어 효과를 달성하지 못하였다. 이는 최적 대안(시나리오 4)의 효과도 변화(Table 7)를 살펴보면 더 정확하게 확인할 수 있다.

Table 7. Sensitivity comparison of optimal scenario

| Scenario | MOE of K2 | MOE of Kill Chain | MOE of KAMD | Total Cost(₩B) |
|-----------------|-----------|-------------------|-------------|----------------|
| 10 TEL, 100 TBM | 0.967 | 0.549 | 0.898 | 516.5 |
| 30 TEL, 300 TBM | 0.966 | 0.543 | 0.897 | 1,577.5 |
| 50 TEL, 500 TBM | 0.966 | 0.544 | 0.896 | 2,615.8 |
| 20 TEL, 100 TBM | 0.936 | 0.127 | 0.894 | 995.7 |

비율이 1:10으로 유지된 세 개의 시나리오는 K2 체계의 방어 효과가 96.6 ~ 96.7%로 큰 변화가 없지만 100발의 탄도미사일을 20대의 TEL이 발사했을 때는 93.6%로

감소하였다. 특히, KC의 효과도가 크게 감소하였는데, KAMD의 효과도는 89.8%에서 89.4%로 거의 변화가 없지만 KC의 효과도는 54.9%에서 12.7%로 대폭 감소하였다. 이는 TEL의 수가 증가하면서 동시에 발사되는 탄도 미사일의 수량이 증가할 뿐만 아니라 KC 공격에서 살아남는 TEL이 많아져 저장된 탄도미사일을 발사할 확률도 증가하였기 때문이다. 즉, 탄도미사일의 수량이 증가하는 것보다 발사 수단인 TEL이 증가하는 것이 더 위협적이며, 이에 효과적으로 대응하기 위해서는 KC의 능력을 강화시키는 것이 중요한 요소임을 확인할 수 있다.

5. 결론: 정책적 함의

본 연구는 우리 군에서 구축하고 있는 K2 체계에 대한 효과분석을 실시하였다. 탄도미사일 대응 절차에 따라 시뮬레이션을 구성하고, 3종의 KC 무기체계와 2종의 고층방어체계, 2종의 저층방어체계를 가정하여 각각의 조합을 12개의 시나리오로 작성하였다. 시나리오별 1,000번의 반복 실험으로 K2 체계의 방어 효과를 분석하고, 사용된 무장의 발사량과 단위비용을 통해 총비용을 추정하였으며, 이를 바탕으로 비용대 효과분석을 실시하여 최적의 대안을 도출하였다. 또한 적 위협 증가에 따른 민감도 분석을 수행하였다.

본 연구의 의의와 기여는 다음과 같다.

첫째, K2 체계의 작전 개념을 반영한 효과분석을 실시하였다. 현재까지 KC나 KAMD, 혹은 개별 무기체계에 대한 효과분석은 진행되었으나 이를 종합적으로 고려한 K2 체계에 대한 효과분석 연구는 미흡하였다. 본 연구는 K2 체계의 대응 절차를 반영하였으며, 비교적 정밀한 교전상황을 가정하여 각 체계의 운용 조건, 방법 등을 구체화해 현실적인 분석을 실시할 수 있었다.

둘째, K2 체계에서 KC의 상대적인 중요성을 확인하였다. KC는 발사 수단인 TEL을 공격하여 파괴하기 때문에 이것이 효과적으로 이루어진다면 전체 탄도미사일 위협을 크게 감소시킬 수 있다. KC의 능력에 따라 전체 방어 효과의 달성여부는 물론 총 비용의 변화가 크게 발생하기 때문에 효과적이고 효율적인 K2 체계 구축을 위해서는 적정 수준의 KC 능력 구축이 필요하다.

셋째, 확고한 저층방어체계 능력 구축 및 적절한 KAMD 운용 개념 정립의 필요성을 확인하였다. 본 연구에서는 고층방어체계가 발사된 전체 위협에 대응하는 것이 아닌 일부 위협에 대해 선택적으로 대응하도록 가정하여 분석하였다. 고층방어체계의 구축과 운영비용을 고

려했을 때 이는 매우 현실적인 가정으로 저층방어체계가 구축된 지역에서 대해서는 저층방어체계가 확고한 미사일 방어 능력을 제공해 주어야한다. 동시에 고층방어체계의 능력과 제약을 고려한 교전 범위와 우선순위, 운용 절차 등 전반적인 KAMD 운용 개념이 정립되어야한다.

마지막으로 본 연구의 분석에서는 포함하지 않았지만 감시정찰 능력의 중요성이다. KC 능력에 큰 영향을 미치는 요소 중 하나가 감시정찰자산의 표적획득능력이다. 본 연구에서는 사전 공격과 사후 공격에서 각각 90%와 30%의 감쇄효과를 가정하였는데, 이것을 감소시킬 수 있다면 동일한 무기체계를 운용하여 더욱 높은 방어 효과를 달성할 수 있다. 따라서 K2 체계의 방어 효과를 극대화하기 위해서는 현재의 감시정찰자산을 운용하여 효과적인 정보수집, 전파가 이루어질 수 있도록 체계가 구축되어야 할 것이다.

본 연구의 한계점과 향후 연구 방향은 다음과 같다.

첫째, 수명주기비용 관점에서의 비용대 효과분석이 이루어져야한다. 본 연구에서는 발사되는 무장의 단위비용을 통해 총비용을 추정했는데, 더욱 현실적인 연구를 위해서는 연구개발비, 획득비, 운영유지비를 모두 반영한 수명주기비용 관점에서의 비용분석이 이루어져야한다.

둘째, KC와 KAMD에서 사용되는 무기체계에 대해 무기체계 단위의세부적인 효과분석이 이루어져야한다. 여기에는 사격을 위한 표적 획득과 비행 단계에서의 생존성과 취약성, 명중단계에서의 명중확률과 명중시 파괴확률 등이 종합적으로 고려되어 무기체계의 파괴확률 혹은 운용효과에 대한 분석이 포함되어야한다. 이러한 자료를 바탕으로 K2 체계의 효과분석을 실시한다면 더 정확하고 현실적인 분석이 가능할 것이다.

References

- Cirioncione, J. (2000) "Brief History of Ballistic Missile Defense and Current Programs in the United States", *Carnegie Endowment of International Peace*, Available at <http://carnegieendowment.org/> (Downloaded February 01. 2017).
- Defense Agency of Technology and Quality (2016) *Defense Science and Technology Glossary*, Available at <http://dtims.dtaq.re.kr:8084/dictionary.do> (Accessed December 5. 2016).
- Department of Army (2002) FM 3-01.85 (FM 44-85) *Patriot Battalion and Battery Operations*, Washington

- D.C.
- Driels, M.R. (2013) *Weaponeeing: Conventional weapon system effectiveness*, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Ender, T., R.F. Leurck, B. Weaver, P. Miceli, W.D. Blair, P. West, D. Mavris (2010) "Systems-of-systems analysis of ballistic missile defense architecture effectiveness through surrogate modeling and simulation", *IEEE Systems Journal*, 4(2), 156-166.
- Hong, J, Y. Park, S.C. Park, Y. Kwon (2010) "A Technology on the Framework Design of Virtual based on the Synthetic Environment Test for Analyzing Effectiveness of the Weapon Systems of Underwater Engagement Model", *Journal of the Korean Society for Simulation*, 19(4), 291-299.
- Jaiswal, N.K. (2012) *Military operations research: Quantitative decision making*, Boston: Kluwer Academic Publisher.
- Balle, J.K.O. (2014.10.22.) "About the THAAD System", *Defense Intelligence Report 2014*, Available at <http://www.bga-aeroweb.com/Defense/THAAD.html> (Accessed December 8. 2016).
- Krause, M.E. (2002) Attack Operations for Missile Defense, Occasional Paper No. 28, Maxwell AFB: Air University.
- Lee, K.-H., H.-P. Seo, Y.-S. Kwon, J. Kim (2015) "Analysis of the Flight Trajectory Characteristics of North Korea SLBM", *Journal of the Korean Society for Simulation*, 24(3), 9-16.
- Lee, S.-H., I.-C. Jeong (2006) "Optimal Allocation Model of KDX for Missile Defense", *Journal of the Korean Society for Simulation*, 15(4), 69-77.
- Matthew, M., W. Daniel (2015) *Issue Brief: North Korea's Ballistic Missile Program*, Available at <http://www.ncnk.org/resources/briefing-papers/all-briefing-papers> (Accessed December 8. 2016).
- Park, J., S. Choi, Y. Kim (2015) "A Study on Simple Methodology of Distruction Effects Analysis 3 Dimensional Building Target's by Weapon Systems", *Journal of the Korean Society for Simulation*, 24(3), 89-96.
- Park, T.G., J.S. Um, J.K. Kim, Y.H. Son (2001) *A Study on Cost-Effect Analysis Method of National Defense Investment Project*, Seoul: Korea Institute for Defense Analyses.
- (박태감 · 엄중선 · 김종국 · 손영환. (2001) "국방투 자사업 비용대 효과분석 방법론 연구"(연구보고서 무01-1727). 한국국방연구원)
- Rosenau, W. (2001) "Coalition Scud-Hunting in Iraq, 1991", *Special Operations Forces and Elusive Enemy Ground Targets: Lessons from Vietnam and the Persian Gulf War*, CA: RAND Corporation.
- Schneider, B.R. (2004) *Counterforce targeting capabilities and challenges*, Maxwell AFB: Air University.
- Shaver, R.D., Mesic, R. (1995) *Calculating the Utility of Attacks Against Ballistic Missile Transporter - Erector-Launchers*, CA: RAND Corporation.
- Tirpak, J.A. (2000) "Find, Fix, Track, Target, Engage, Assess", *Air Force Magazine Journal of the Air Force Association*, Available at <http://www.airforcemag.com/MagazineArchive/pages/2000/july%202000/0700find.aspx> (Accessed December 7. 2016).
- Wilkening, D.A. (2000) "A simple model for calculating ballistic missile defense effectiveness", *Science & Global Security*, 8(2), 183-215.
- Wiritz, J.J. (1997) "A Joint Idea: An Antisubmarine Warfare Approach to Theater Missile Defense", *Airpower Journal*, Spring 1997.



정 병 기 (byungki.jung.58@gmail.com)

2004 해군사관학교 전산과학학과 학사
 2009 국방대학교 국방관리학과 석사
 2014~ 현재 국방대학교 국방과학학과 박사과정

관심분야 : 효과분석, 국방 M&S, 미사일 방어, 소요기획