

혼합정수계획법을 이용한 항공기-목표물 최적할당에 관한 연구

이대력* · †양재환**

The Optimal Allocation of Aircrafts to Targets by Using Mixed Integer Programming

Dae Ryeock Lee* · †Jaehwan Yang**

■ Abstract ■

In recent warfare, the performance improvement of air weapon systems enables an aircraft to strike multiple targets on a single sortie. Further, aircrafts attacking targets may carry out an operation as a strike package that is composed of bombers, escort aircrafts, SEAD (Suppression of Enemy Air Defenses) aircrafts and etc. In this paper, we present an aircraft allocation model that allocates multiple targets to a single sortie in the form of a strike package.

A mixed integer programming is developed and solved by using a commercially available software. The new model is better than existing ones because not only it allocates aircrafts to multiple targets but also it models the concept of the strike package. We perform a computational experiment to compare the result of the new model with that of existing ones, and perform sensitivity analysis by varying a couple of important parameters.

Keywords : Aircraft Allocation, WTA(Weapon Target Assignment), Mixed Integer Programming, Strike Package

논문접수일 : 2007년 01월 19일 논문게재확정일 : 2008년 03월 04일

* 한국해양수산기술진흥원

** 서울시립대학교 경영학부

† 교신저자

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

1940년대 제 2차 세계대전에서는 60ft × 100ft 크기의 표적 하나를 파괴하기 위해서 B-17 폭격기가 1500회 출격해서 250 파운드의 폭탄 9000발을 투하해야 했고, 1970년대 베트남전에서는 하나의 표적을 파괴하기 위해서 F-4 전폭기가 30회 출격해서 500 파운드 폭탄 176발을 투하해야 했다[19]. 하지만 1991년 걸프전부터는 정밀유도무기가 등장하기 시작해서 F-117 스텔스 전폭기가 2000파운드 폭탄 두 발을 탑재하고 출격해서 두 개의 표적을 공격할 수 있게 되었다[19]. 최근 이라크전에서는 정밀유도무기의 성능이 더욱 향상되어 10년 전에 7~8% 정도였던 활용률이 68%까지 이르게 되었다. 특히 새롭게 등장한 합동직격탄(JDAM : Joint Direct Attack Munition)은 GPS(Global Positioning System) 유도방식을 이용하여 주간은 물론 야천후 및 야간에도 불과 3m의 오차범위 내에서 목표물을 명중시킬 수 있으며, 대당 가격도 순항미사일의 50분의 1인 30,000달러로 경제성과 효과성이 뛰어난 무기로 평가된다. 따라서 한 번의 쏘티(Sortie)에 할당되어지는 표적의 수는 더욱 늘어나게 되었다. 실례로 이라크전에서 공중 공격 계획을 수립했던 미국 공군은 표적 당 몇 쏘티의 전력이 필요한가에서 한 쏘티로 몇 개의 표적을 파괴할 수 있을까에 대해 고민할 정도였다[4]. 여기서 1 쏘티는 항공기가 부여된 작전을 수행하기 위하여 이륙할 때부터 작전수행 후 착륙할 때까지를 의미한다[2].

본 연구는 효과적인 전쟁 수행을 지원하기 위해 표적 당 쏘티를 할당하는 개념에서 쏘티 당 표적을 할당하는 개념으로 바뀐 항공기 최적할당모형에 관한 연구이다. 항공기 최적할당모형 구축을 위한 고려요소는 각 표적에 대한 파괴요구수준을 달성하고, 손실 비용을 최소화하는 것이다. 현대 무기 체계의 높은 가격을 생각한다면 손실 비용을 최소화하는 것은 중요한 목적이 된다. 그리고 보다 현

실적인 모형을 구축하기 위해서 공격편대군(Strike Package) 개념을 도입한다. 공격편대군이란 표적을 파괴하는 공통의 목표를 달성하는 동안 적의 위협에 대해서 서로를 지원하기 위해 결합된 전투기와 폭격기의 그룹이다[21]. 공격 임무를 맡은 전투기, 공격기, 폭격기들이 표적을 공격하는 동안 대공 화기와 같은 적의 지상위협으로부터 적 방공망 제압(SEAD) 임무를 수행하는 대공제압기 편대와 요격기와 같은 적의 공중위협으로부터 아군 항공기를 보호하는 엄호기(Escort) 편대를 공격기 편대에 추가함으로써 보다 현실적인 모형이 만들어진다.

따라서 본 연구에서는 쏘티 당 표적을 할당하는 개념과 공격편대군 개념을 항공기 할당모형에 둘 다 적용하고, 공세제공작전¹⁾ 시 제한된 항공 전력으로 각 표적에 대한 파괴요구수준을 달성하면서, 손실 비용을 최소화하는 항공기 최적할당모형을 개발하도록 한다.

1.2 연구 범위 및 방법

본 연구는 기존의 항공기 최적할당모형을 기초로 하여 연구 목적에 부합하도록 여러 가지 제약사항을 보충 발전시켜서 공세제공작전에 적용할 수 있는 모형을 구축한다. 구축된 모형은 기존의 일반적인 모형인 표적 당 쏘티를 할당하는 개념의 모형이 아니라 최근에 나타난 쏘티 당 표적을 할당하는 개념의 모형이다. 그러므로 한 번의 쏘티에 한 개 이상의 표적을 할당할 수 있는 모형이다. 또한 보다 현실적인 접근을 위해서 공격편대군 개념을 도입한 모형이다. 본 연구에서는 Griggs et al[22]의 연구와 같이 공격편대군의 구성을 공격기, 대공제압기, 엄호기로 구성한다. 그러므로 공격편대군의 형태는 표적을 공격하는 임무를 맡은 공격기 편대로만 구성된 기본 형태와 공격기 편대에 엄호기 편

1) 공세제공작전은 공중우세를 확보하기 위하여 적 지역에 대해 항공력을 공세적으로 운용하여 작전을 수행하는 것이다. 공중강타, 대공제압, 전투기소탕, 엄호, 미사일공격, 비행장공격 등의 임무를 포함한다[12].

대가 추가되어진 형태, 공격기 편대에 대공제압기 편대가 추가되어진 형태, 공격기 편대에 엄호기 편대와 대공제압기 편대가 모두 추가되어진 형태의 네 종류로 구분한다.

본 연구 모형에서는 공격편대군의 형태를 결정해야 하고, 표적별로 할당 될 항공기 대수는 정수이기 때문에 혼합정수계획법을 이용한다. 모형설정을 위한 연구방법은 다음과 같다.

첫째, 항공기 할당모형에 관한 기존 연구의 관련 변수 및 접근 방법들을 분석하고 종합한다. 둘째, 제약조건식을 구성한다. 제약조건식으로는 표적에 대한 무기의 파괴확률 및 적의 공중위협과 지상위협으로부터의 항공기 생존확률을 고려하여 표적에 대한 파괴요구수준 달성하는 제약조건식, 공격편대군의 형태를 결정하는 제약조건식, 공격편대군 형태에 속한 변수들에 관한 제약조건식이 있다. 그리고 편대 구성의 최소 기본 단위 제약조건식과 가용한 항공기의 종류와 수에 대한 제약조건식도 있다. 셋째, 목적함수를 구성한다. 목적함수는 손실 비용이 최소화 되도록 구성한다. 구성된 제약조건식과 목적함수를 결합시킴으로써 공세제공작전에 사용 가능한 항공기 최적할당모형이 구축된다. 넷째, 설정된 모형의 해를 구하는 절차를 제시하고, 모형을 적용하여 그 결과를 분석한다.

본 연구의 구성은 제 1장 서론에서 연구 배경 및 목적을 기술하고, 제 2장에서는 기존의 항공기 표적할당모형을 분석하며, 제 3장에서는 혼합정수계획법에 의한 항공기 할당모형을 구축한다. 제 4장에서는 항공기 할당모형에 관한 입력 자료를 분석하고, 입력 자료를 모형에 적용하여 결과를 분석한다. 또한 불확실성을 갖는 변수에 대한 민감도 분석을 실시하여 모형의 타당성 및 기대효과를 제시한다. 마지막으로 제 5장에서는 결론과 발전방향을 제시한다.

2. 기존 모형의 연구

2.1 기존 항공기 할당모형

1957년 선형계획법에 관한 학회에서 인원할당문

제와 유사한 제약사항을 가진 비선형의 표적할당모형이 제안된 이후 수십 년 동안 여러 분야에서 무기체계를 표적에 할당하는 문제인 Weapon-Target Assignment(WTA) 문제가 계속해서 연구되고 있다[31]. Ahuja et al[16]은 NP-Complete 문제인 WTA 문제를 빠르게 해결하기 위해서 VLSN(Very Large-Scale Neighborhood) 탐색 알고리즘을 사용하여 무기체계를 표적에 할당하는 연구를 하였고, Luo et al[30]은 HAGA(Heuristic Adaptive Genetic Algorithm)를 이용해서 적 항공기 편대의 잔류위협치를 최소화하도록 아군 항공기 편대가 가지고 있는 공대공 미사일을 적 항공기에 할당하는 연구를 하였다. Hosein and Athans[23]는 방어 입장에서 표적인 적 공격 무기에 대해 단계적으로 방어 무기를 할당하여 적 공격 무기의 잔류위협치를 최소화하는 연구를 하였다. Kwon et al[26]은 전체 사격 비용 최소화를 목적으로 포병 화력을 표적에 할당하는 표적할당모형에 대해서 라그랑지완화법(Lagrangian relaxation)과 분기한정법(branch and bound) 방법을 적용하는 연구를 하였다. 김진곤[3]은 표적에 대한 파괴요구수준과 표적의 잔류위협치를 고려해서 지대공 미사일을 공중 표적에 할당하는 표적할당모형을 구축하고, 그 모형에 대한 해법으로 목표계획법을 이용하였다. 이 외에도 무기체계를 표적에 할당하는 연구는 많이 찾아볼 수 있다[5, 9, 27, 29].

본 연구와 보다 밀접하게 연관된 항공기 할당모형에 관한 연구는 WTA 문제의 한 분야로서 그동안 많은 연구가 있었고, 접근 방법에 따라 다양하게 발전하였다. 항공기 할당모형은 표적 당 쏘티를 할당하는 개념의 모형과 쏘티 당 표적을 할당하는 개념의 모형으로 분류될 수 있다[18]. 또한 목적에 따라 크게 위협치 최소화화 손실비용 최소화로 나누어진다[26].

2.1.1 표적 당 쏘티를 할당하는 모형

현재까지 연구되어진 대부분의 모형은 표적 당 쏘티를 할당하는 모형이다. 이런 모형은 목적에 따

라서 크게 제한된 항공 전력으로 적의 위협치를 최소화하거나 손실 비용을 최소화하는 모형으로 나누어진다. 참고로, 피해의 반대가 잔류 위협치므로 적의 잔류 위협치 최소화는 표적에 대한 총 피해를 최대화하는 것과 같다.

1) 위협치 최소화 모형

윤현욱[6]은 제한된 항공자원을 가지고 파괴요구수준을 달성하고, 적의 잔류 위협치를 최소화하는 항공기 할당모형을 구성하였다. 그리고 목적함수는 기존의 Lemus and David[28]의 모형에서 사용된 파괴확률을 기대파괴확률로 확장하였다. 기대 파괴확률은 도달확률과 파괴확률의 곱으로 구성된다. 즉, 표적 상공에 도달한 항공기가 적의 위협, 표적식별, 무장 투하 문제로 인해서 도달확률만큼 그 파괴력이 약해졌다는 것을 의미한다.

또한 표적을 어느 정도 파괴할 것인가 하는 기준을 설정해서 파괴요구수준을 달성할 때까지 표적을 공격하는 제약조건식을 추가하였다. 이 연구에서는 비선형계획모형에 대한 해를 구하기 위해 휴리스틱을 이용하였다.

2) 손실 비용 최소화 모형

허중준, 김충영[15]은 제한된 항공자원을 가지고 파괴요구수준을 달성하면서, 손실 비용을 최소화하는 항공기 할당모형을 구성하였다. 이들은 항공기에 대한 손실 비용의 측정 기준을 표적을 공격하기 위한 침투, 이탈 경로 상에서 아군의 항공기가 적 대공화기에 의해서 피격되었을 때 발생하는 손실 비용과 무사히 귀환했을 발생하는 단순 손실 비용으로 구분하였다. 손실 비용을 최소화하는 목적함수는 구성하였으며, 파괴요구수준을 달성하기 위한 제약식을 구성하였다. 여기서 파괴요구수준을 달성하기 위한 제약조건식은 표적 상공까지 무사히 침투한 항공기만이 표적을 공격할 수 있다는 것을 조건으로 만들어진 제약조건식이다.

3) 다수 목표 최적화 모형

정병주, 김충영[10]은 제한된 자원으로 표적의 위

협치 최소화, 파괴요구수준의 달성, 손실 비용 최소화 등의 목표를 동시에 충족할 수 없으므로 그 해법으로 작전지휘관의 목표우선순위 요구를 반영할 수 있도록 목표계획법을 통해서 모형을 구성하였다.

4) 공격기 편대에 엄호기 편대와 대공제압기 편대를 적용한 모형

한상문[14]과 최훈문[13]은 편대군 개념을 도입하여 항공기 할당모형을 연구했다. 그러나 두 연구에서는 공격기 편대를 지원하기 위한 엄호기 편대만을 고려하였다. Griggs et al[22]은 기존의 모형과는 다르게 공격편대군 개념을 도입해서 엄호기 편대와 대공제압기 편대를 격자 박스에 할당하는 항공기 할당모형을 구축했다. 또한 의사결정나무를 이용하여 기상에 대한 효과도 고려하였다. Griggs et al[22]은 표적 지역에 격자를 만들어서 격자 내에 있는 표적을 공격하는 공격기 편대를 구성하고, 각 격자 박스에 엄호기 편대나 대공제압기 편대를 할당하는 방법을 취하였다. 엄호기 편대나 대공제압기 편대가 공격편대군에 편성되면 즉, 엄호기 편대나 대공제압기 편대가 격자 박스에 할당되면 해당 격자 박스로 공격 임무를 수행하는 공격기 편대에 대한 공중위협이나 지상위협이 절반으로 줄어든다고 가정하였다.

2.1.2 쏘티 당 표적을 할당하는 모형

Rosenberger et al.[33]은 쏘티 당 표적을 할당하는 모형으로 Assignment²⁾ 개념을 도입하였다. 그들은 항공기에 하나 또는 그 이상의 무기를 장착하고, 한 번의 쏘티에 다수의 표적을 공격할 수 있는 모형을 개발해서 한 번의 쏘티에 하나의 표적만을 공격하는 기본적인 WTA 문제를 확장시켰다. 항공기는 비행장을 출발해서 첫 번째 표적을 공격하고, 남은 무장으로 다시 두 번째 표적을 공격한 후 원

2) 본 연구에서는 좀 더 정확한 의미 전달을 위해서 Target drop, Target drop set, Assignment에 대해서 영문을 그대로 사용한다.

래의 비행장으로 도착할 수 있다.

이들이 사용한 Assignment를 만들기 위해서는 Target drop, Target drop을 조합한 Target drop set, 그리고 각 Target drop set을 플랫폼으로 사용될 각 항공기와 결합하는 단계가 필요하다. 이 부분에 대해서는 본 연구의 모형에 대한 설명에서 자세히 설명한다.

2.2 기존 모형 분석 종합

앞에서 설명한 기존의 항공기 할당모형들은 대부분 한 번의 쏘티에 하나의 표적만을 할당하는 표적 당 쏘티를 할당하는 모형이다[6, 10, 13-15, 22]. 최근 전쟁 상황에서 기존의 항공기 할당모형을 현실에 적용하기에는 많은 한계를 가지게 된다. 한 번의 쏘티에 두 개 이상의 표적을 공격할 수 있는 항공기를 하나의 표적에만 할당함으로써 보유하고 있는 항공 전력을 효율적으로 활용하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 또한 높은 가격의 항공기와 무기를 효율적으로 활용하지 못하여 전쟁 비용의 상승을 초래할 수 있다. 그러므로 한 번의 쏘티에 여러 표적을 할당할 수 있는 쏘티 당 표적을 할당하는 항공기 할당모형에 대한 연구가 요구된다. Rosenberger et al.[33]은 Assignment를 사용하는 항공기 할당모형을 통해서 한 번의 쏘티에 여러 표적을 할당할 수 있는 모형을 구축했다. 하지만 연구의 목적이 문제 해결에 활용 할 알고리즘 수행 속도를 비교하는데 있었기 때문에 기존 항공기 할당

모형에 비해서 모형의 현실성이 부족하다.

또한 기존의 항공기 할당모형들은 대부분 다른 지원 요소를 고려하지 않고, 공격기 편대만을 표적에 할당하였다. 그리고 일부 항공기 할당모형에서는 지원 편대로서 엄호기 편대만을 고려하였다[13, 14]. 하지만 레이더와 같은 탐지 장비의 성능과 지대공 미사일의 성능이 계속해서 향상됨에 따라서 적 방공망을 제압하는 임무는 갈수록 중요해지고 있다. <표 1>에서 보는 것과 같이 총 전투 임무 쏘티 중에서 적 방공망 제압 쏘티의 비중은 점점 커지고 있다. 그러므로 항공기 할당모형을 구축할 때 공격기 편대가 엄호기 편대나 대공제압기 편대와 함께 공격편대군을 구성해서 임무를 수행하는 것에 대한 고려가 필요하다.

Griggs et al.[22]은 공격기 편대, 엄호기 편대, 대공제압기 편대로 공격편대군을 구성하여 임무를 수행하는 것을 고려한 항공기 할당모형을 구축하였다. 하지만 이들의 연구는 한 번의 쏘티에 여러 표적을 할당할 수 있는 모형은 아니다.

3. 혼합정수계획법에 의한 항공기 최적할당모형

3.1 모형 설정을 위한 일반사항

본 연구에서는 쏘티 당 표적을 할당하는 항공기 할당모형을 만들기 위해서 Rosenberger et al.[33]이 제시한 Assignment를 이용한다. 이들은 각 항공기에 대한 Assignment를 사용하였으나 본 연구

<표 1> 총 전투임무 쏘티와 적 방공망 제압 쏘티^{a)}

전쟁	전투 임무 쏘티	적 방공망 제압 쏘티	%
Vietnam	219,407	11,389	5.2
Desert Storm(Iraq)	68,150	4,326	6.3
Bosnia	2,451	785	32.0
Kosovo	21,111	4,538	21.5
Northern/Southern Watch ^{b)}	268,000	67,000	25.0

주) ^{a)} CRS Report for Congress[20]를 참고하였음.

^{b)} 1992년 8월~2003년 3월 이라크의 UN 안전보장회의 이행 감시활동.

에서는 항공기 기종에 대한 Assignment를 사용한다. 항공기 기종에 대한 Assignment를 사용하는 것은 모형의 내용은 유지하면서 Assignment의 수를 줄이기 때문에 계산량을 줄이게 된다. 본 연구에서는 Assignment를 이용해서 각 표적에 대한 파괴요구수준을 달성하고, 손실 비용을 최소화하는 항공기 할당모형을 구축한다. 또한 본 연구 모형은 공격편대군 개념을 적용한다. Griggs et al.[22]처럼 공격기 편대, 엄호기 편대, 대공제압기 편대로 공격편대군을 구성하여 항공기 할당모형에 적용한다. 그러므로 적 대공화기로부터 아군 항공기들을 보호하는 대공제압기와 적 요격기로부터 아군 항공기를 보호하는 엄호기를 공격편대군에 추가할 것인가를 고려해야 한다. 따라서 일반적인 정수계획법에 이진변수를 추가해서 최적해를 구하는 방법인 혼합정수계획법을 사용해서 모형을 설정한다.

3.1.1 모형의 가정

본 연구 모형은 쏘티 당 표적들을 할당하고, 적의 위협을 공중위협과 지상위협으로 구성한다. 그리고 항공기를 폭탄을 운반하는 플랫폼으로 사용한다. 따라서 본 연구 모형에서 사용되는 가정 사항은 다음과 같으며, 이러한 가정들은 기존의 연구들과 일관성을 갖는다.

- 1) 공격편대군은 같은 임무에 할당된 항공기들로 구성한다.
- 2) 각 항공기는 적의 공중위협과 지상위협에 대해서 서로 독립적으로 위협받는다[22].
- 3) 표적에 대한 파괴효과는 공격하는 항공기의 수에 따라서 지수적으로 증가한다[22].
- 4) 항공기는 한 종류 또는 그 이상의 폭탄을 가지고 있지만, 한 표적에 대해서 한 종류의 폭탄만으로 공격한다. 즉, 공격 시에 한 종류의 폭탄만을 투하하고 이동한다[33].
- 5) 단일 기간과 모든 가용한 자산 내에서 한 번만 할당이 이루어진다.
- 6) 각 기종의 항공기는 무장을 나르는 플랫폼으로서 표적에 대한 파괴확률에는 영향을 미치지 않는다.

3.1.2 변수 정의

본 연구에서 사용되는 상수 및 변수들은 다음과 같이 정의한다.

J : 모든 가능한 Assignment들의 집합

j : Assignment, $j = 1, 2, \dots, |J|$

n : 표적의 수

s : 공격편대군의 수

a : 비행장의 수

h : 항공기 기종의 수

t : 표적, $t = 1, 2, \dots, n$

k : 공격편대군, $k = 1, 2, \dots, s$

d_t : 표적 t 에 대한 파괴요구수준, ($t = 1, 2, \dots, n$)

P_{jt} : Assignment j 에 속한 항공기 한 대가 표적 t 를 공격해서 표적 t 를 파괴시킬 확률,
($j = 1, 2, \dots, |J|$; $t = 1, 2, \dots, n$)

X_j : 공격기 편대로만 구성된 공격편대군 중에서 Assignment j 에 속한 항공기의 수,
($j = 1, 2, \dots, |J|$)

EX_j : 공격기 편대와 엄호기 편대로 구성된 공격편대군 중에서 Assignment j 에 속한 항공기의 수, ($j = 1, 2, \dots, |J|$)

SX_j : 공격기 편대와 대공제압기 편대로 구성된 공격편대군 중에서 Assignment j 에 속한 항공기의 수, ($j = 1, 2, \dots, |J|$)

BX_j : 공격기 편대, 엄호기 편대, 대공제압기 편대로 구성된 공격편대군 중에서 Assignment j 에 속한 항공기의 수,
($j = 1, 2, \dots, |J|$)

$P(L)_j$: 공격기 편대로만 구성된 공격편대군 중에서 Assignment j 에 속한 항공기가 임무 경로 상에서 생존할 확률, ($j = 1, 2, \dots, |J|$)

$P(E)_j$: 공격기 편대와 엄호기 편대로 구성된 공격편대군 중에서 Assignment j 에 속한 항공기가 임무 경로 상에서 생존할 확률,
($j = 1, 2, \dots, |J|$)

$P(S)_j$: 공격기 편대와 대공제압기 편대로 구성된 공격편대군 중에서 Assignment j 에

속한 항공기가 임무 경로 상에서 생존할 확률, ($j = 1, 2, \dots, |J|$)

$P(B)_j$: 공격기 편대, 엄호기 편대, 대공제압기 편대로 구성된 공격편대군 중에서 Assignment j 에 속한 항공기가 임무 경로 상에서 생존할 확률, ($j = 1, 2, \dots, |J|$)

$P(t)$: 표적 t 가 공격으로부터 잔류할 확률

T_t : 표적 t 를 공격하는 Assignment들의 부분집합, ($t = 1, 2, \dots, n$)

SP_k : 공격편대군 k 에 속한 Assignment들의 부분집합, ($k = 1, 2, \dots, s$)

L_k : 공격기 편대로만 구성된 공격편대군 형태를 결정하는 이진변수, ($k = 1, 2, \dots, s$)

E_k : 공격기 편대와 엄호기 편대로 구성된 공격편대군 형태를 결정하는 이진변수, ($k = 1, 2, \dots, s$)

S_k : 공격기 편대와 대공제압기 편대로 구성된 공격편대군 형태를 결정하는 이진변수, ($k = 1, 2, \dots, s$)

B_k : 공격기 편대, 엄호기 편대, 대공제압기 편대로 구성된 공격편대군 형태를 결정하는 이진변수, ($k = 1, 2, \dots, s$)

AB_{fg} : f 비행장의 g 형 항공기로 구성된 Assignment들의 부분집합, ($f = 1, 2, \dots, a ; g = 1, 2, \dots, h$)

ABN_{fg} : f 비행장의 g 형 항공기의 수, ($f = 1, 2, \dots, a ; g = 1, 2, \dots, h$)

JC : Assignment j 에 속한 항공기의 손실 비용

TC : 총 손실 비용.

3.2 항공기 할당모형 설정

3.2.1 Assignment를 만드는 절차

본 연구는 Rosenberger et al.[33]이 사용한 방법과 유사하게 Target drop을 만들고, Target drop의 조합으로 Target drop set을 만든 후, Target drop set과 플랫폼으로 사용될 항공기를 운용 가능한 무장의 종류, 탑재량, 비행 거리 등의 조건을 만

족하도록 결합시켜서 Assignment를 만들게 된다.

1) Target drop

Target drop은 무기의 종류와 수량을 표적과 결합시킨 것이다. 예를 들면, A 폭탄 3발과 표적 1을 결합하면 하나의 Target drop이 되는 것이다. 이때 폭탄의 종류와 수량 그리고 표적 1의 성질을 통해서 A 폭탄 3발이 표적 1을 파괴하는 효과를 예상할 수 있다. 그리고 그 효과를 0과 1사이의 파괴 확률로 표현할 수 있다.

2) Target drop set

Target drop set은 서로 다른 표적을 가지는 Target drop들이 결합된 것이다. 예를 들면, A 폭탄 3발과 표적 1이 결합된 Target drop을 [A]라고 하고, B 폭탄 2발과 표적 1이 결합된 Target drop을 [B]라고 하고, C 폭탄 2발과 표적 2가 결합된 Target drop을 [C]라고 하고, D 폭탄 1발과 표적 3이 결합된 Target drop을 [D]라고 하자. 각각의 Target drop은 자신 하나만으로도 하나의 Target drop set이 될 수 있다. 그리고 [A][C], [B][D] 또는 [A][C][D]처럼 두 개 이상의 Target drop이 결합해서 하나의 Target drop set이 된다. 하지만 [A][B]처럼 같은 표적을 가지는 Target drop은 결합될 수 없다.

3) Assignment

Assignment는 Target drop set과 플랫폼이 될 항공기의 결합이다. 그러나 항공기마다 운용할 수 있는 무기의 종류와 수량이 다르고, 비행할 수 있는 거리가 다르기 때문에 각 조건에 맞추어서 결합되어야 한다. 예를 들면, 위의 Target drop set 중 [A][C][D]는 총 비행 거리가 2000km이라고 하자. 이런 경우 1500km만을 비행할 수 있는 항공기와는 결합할 수 없다. 또한 [B][D] 경우 D 폭탄을 운용할 수 없는 항공기와는 결합할 수 없고, 폭탄의 총 중량이 항공기가 탑재 가능한 무장 중량을 초과한다면 해당 항공기와는 결합할 수 없다.

3.2.2 모형의 제약조건식 구성

1) 파괴요구수준 달성에 관한 제약조건식

Assignment j 에 속한 항공기 한 대가 지정된 무장으로 해당 표적 t 를 파괴시킬 확률을 P_{jt} 라고 하면, 해당 표적 t 가 공격으로부터 잔류할 확률은 $1 - P_{jt}$ 라고 할 수 있다. 만약 사상 A를 표적 1을 공격하는 Assignment 중에서 Assignment 1의 공격으로부터 잔류할 사상이라고 하고, 사상 B를 표적 1을 공격하는 Assignment 중에서 Assignment 2의 공격으로부터 잔류할 사상이라고 할 때, 사상 A와 B를 서로 독립이라고 하면, 표적 1이 Assignment 1과 Assignment 2의 공격으로부터 잔류할 확률은 $P(A \cap B) = P(A) \times P(B)$ 이다. 그런데 $P(A) = 1 - P_{11}$ 이고, $P(B) = 1 - P_{21}$ 이므로 $P(A \cap B) = (1 - P_{11})(1 - P_{21})$ 이다. 표적 1을 공격하는 Assignment 1의 항공기 수가 X_1 대일 경우 그리고 각 항공기의 공격이 독립이라고 할 때 표적 1이 Assignment 1의 공격으로부터 잔류할 확률은 $(1 - P_{11})^{X_1}$ 이다. 따라서 표적 1이 Assignment 1에 속한 항공기 X_1 대와 Assignment 2에 속한 항공기 X_2 대의 공격으로부터 잔류할 확률은 $(1 - P_{11})^{X_1} (1 - P_{21})^{X_2}$ 이 된다. 그러므로 하나의 표적이 그 표적을 공격하는 모든 Assignment의 공격으로부터 잔류할 확률은 식 (3-1)과 같다.

$$P(t) = \prod_{j \in T_t} (1 - P_{jt})^{X_j}, \quad t = 1, 2, \dots, n. \quad (3-1)$$

본 연구에서는 공격편대군을 구성해서 표적을 공격한다. 그러므로 공격기만으로 구성된 공격편대군 형태, 공격기 편대에 대공제압기 편대가 추가된 공격편대군 형태, 공격기 편대에 엄호기 편대가 추가된 공격편대군 형태, 공격기 편대에 대공제압기 편대와 엄호기 편대가 추가된 공격편대군 형태를 고려하면 식 (3-1)은 다음과 같이 확장된다. 네 종류의 형태 중에서 한 종류의 형태만을 선택하게 된다.

$$P(t) = \prod_{j \in T_t} (1 - P_{jt})^{X_j} (1 - P_{jt})^{EX_j} \\ (1 - P_{jt})^{SX_j} (1 - P_{jt})^{BX_j}, \quad t = 1, 2, \dots, n.$$

그런데 항공기가 표적지역으로 진입할 때 또는 공격 중에 피격되어서 일부 항공기는 표적 공격에 실패하는 경우가 발생할 수 있다. 그래서 임무 경로 상에서 생존할 확률을 고려할 경우, $P(L)_j X_j$, $P(E)_j EX_j$, $P(S)_j SX_j$, $P(B)_j BX_j$ 대만이 공격이 가능하므로 표적이 잔류할 확률은 식 (3-2)과 같다.

$$P(t) = \prod_{j \in T_t} (1 - P_{jt})^{P(L)_j X_j} (1 - P_{jt})^{P(E)_j EX_j} \\ (1 - P_{jt})^{P(S)_j SX_j} (1 - P_{jt})^{P(B)_j BX_j}, \quad (3-2) \\ t = 1, 2, \dots, n.$$

$P(t)$ 는 표적 t 가 공격으로부터 잔류할 확률이기 때문에 $1 - P(t)$ 는 표적 t 가 공격으로부터 파괴되어지는 확률이 된다. 이때 표적에 대한 파괴효과는 파괴요구수준(d_t) 보다 커야한다. 그러므로 $1 - P(t) \geq d_t$ 조건을 만족시켜야 한다.

$$1 - \prod_{j \in T_t} (1 - P_{jt})^{P(L)_j X_j} (1 - P_{jt})^{P(E)_j EX_j} \\ (1 - P_{jt})^{P(S)_j SX_j} (1 - P_{jt})^{P(B)_j BX_j} \geq d_t, \quad (3-3) \\ t = 1, 2, \dots, n.$$

선형의 조건식으로 만들기 위해 식 (3-3)의 양변에 자연대수(ln)를 취하고 전환하면 식 (3-4)와 같다.

$$\sum_{j \in T_t} P(L)_j X_j \ln(1 - P_{jt}) + P(E)_j EX_j \ln(1 - P_{jt}) \\ + P(S)_j SX_j \ln(1 - P_{jt}) \\ + P(B)_j BX_j \ln(1 - P_{jt}) \leq \ln(1 - d_t), \quad (3-4) \\ t = 1, 2, \dots, n.$$

그러므로 파괴요구수준을 달성하기 위해서는 식 (3-4)를 만족해야 한다.

2) 공격편대군 형태에 관한 제약조건식

공격편대군은 네 종류의 형태로 구분된다. 첫째, 다른 항공기의 지원 없이 표적을 공격하는 공격기 편대로만 구성된 공격편대군이 있다. 둘째, 공격기 편대와 엄호기 편대가 함께 구성된 공격편대군이 있다. 셋째, 공격기 편대와 대공제압기 편대가 함께 구성된 공격편대군이 있다. 넷째, 공격기 편대와 엄호기 편대 그리고 대공제압기 편대가 함께 구성된 공격편대군이 있다. 표적을 공격하는 임무를 수행할 때 각 공격편대군은 네 종류의 형태 중 한 가지를 선택해야 한다. 그러기 위해서는 다음 제약조건식을 만족해야 한다.

$$L_k + E_k + S_k + B_k \leq 1, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

3) 공격편대군 형태에 속한 변수들에 관한 제약조건식

공격편대군의 형태가 결정되면 다른 형태의 공격편대군은 존재할 수 없기 때문에 다른 형태의 공격편대군에 속한 변수들은 0이 되어야 한다. 그러기 위해서는 다음 제약조건식을 만족해야 한다.

$$\sum_{j \in SP_k} X_j - 100L_k \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{j \in SP_k} EX_j - 100E_k \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{j \in SP_k} SX_j - 100S_k \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{j \in SP_k} BX_j - 100B_k \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

4) 편대 구성의 최소 기본 단위 제약조건식

일반적으로 표적 공격을 위한 편대의 구성은 두 대를 최소 기본 단위로 하여 구성된다. 그러기 위해서는 다음 제약조건식을 만족해야 한다.

$$\sum_{j \in SP_k} X_j - 2L_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{j \in SP_k} EX_j - 2E_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{j \in SP_k} SX_j - 2S_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{j \in SP_k} BX_j - 2B_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

5) 가용한 항공기 종류와 수에 대한 제약조건식
비행장별로 가용한 항공기의 종류와 수량에 제한이 있기 때문에 다음의 제약조건식을 만족해야 한다.

$$\sum_{j \in AB_g} X_j + EX_j + SX_j + BX_j \leq ABN_{fg},$$

$$f = 1, 2, \dots, a, g = 1, 2, \dots, h.$$

본 연구에서는 엄호기와 대공제압기의 대수에 대해서는 상황에 맞게 별도의 제약조건식을 통해서 통제하고, 가용한 무기의 수량에 대해서는 제한을 하지 않는다.

3.2.3 목적함수

본 모형의 목적은 파괴요구수준을 달성하고, 손실 비용을 최소화하는 것이다. 손실 비용의 측정 기준은 표적을 공격하기 위해서 표적지역으로 침투 또는 공격 중에 적의 대공화기나 요격기에 의한 격추로 발생하는 손실 비용 C_j 와 격추되지 않고 무사히 귀환했을 때 발생하는 단순 손실 비용 A_j 로 크게 구분할 수 있다[15].

C_j 는 항공기가 격추되었을 때 발생하는 손실 비용이므로, 항공기, 조종사, 보조 지원 장비의 손실 비용과 격추되지 않았을 때의 폭탄, 기본 무장, 연료의 단순 손실 비용으로 구성된다.

$$C_j = AC_j + PC_j + EQC_j + A_j$$

$$A_j = BW_j + MC_j + FC_j.$$

AC_j : 항공기 단가

PC_j : 조종사 손실 비용

EQC_j : 항공기 보조지원 장비 가격

(예: ECM pod)

BW_j : 항공기의 공대공 기본 무장 단가

(예: AIM-9, AIM-120)

MC_j : 폭탄의 단가

FC_j : 연료 소비 비용.

조종사 손실 비용은 수치로 환산하기가 어려우며 실제로 항공기가 피격될 때 조종사는 기체에서 탈출하여 생존할 수 있으므로 비용요소에서 고려하지 않는다. 그리고 항공기의 공대공 기본 무장은 무사히 귀환했을 시에 소모되었을 수도 있고, 그렇지 않을 수도 있다. 본 연구 모형에서는 소모되었다고 가정한다. 공대공 기본 무장은 단거리 공대공 미사일인 AIM(Air Interceptor Missile)-9 2발, 중거리 공대공 미사일인 AIM-120 2발로 가정한다[32].

Assignment j 에 속한 항공기가 무사히 귀환할 확률은 전체 임무 경로 상에서 생존할 확률인 $P(L)_j$, $P(E)_j$, $P(S)_j$, $P(B)_j$ 와 같다. $P(L)_j$ 은 엄호기나 대공제압기의 지원 없이 표적을 공격하는 공격편대군 중에서 Assignment j 에 속한 항공기가 임무 경로 상에서 생존할 확률이다. 이것은 Assignment j 에 속한 항공기가 적의 공중위협으로부터 생존할 확률 PSA_j 와 적의 지상위협으로부터 생존할 확률 PSG_j 의 곱으로 나타낼 수 있다. $P(E)_j$ 는 공격기 편대와 엄호기 편대로 구성된 공격편대군 중에서 Assignment j 에 속한 항공기가 임무 경로 상에서 생존할 확률이다. $P(S)_j$ 는 공격기 편대와 대공제압기 편대로 구성된 공격편대군 중에서 Assignment j 에 속한 항공기가 임무 경로 상에서 생존할 확률이고, $P(B)_j$ 는 공격기 편대와 엄호기 편대 그리고 대공제압기 편대로 구성된 공격편대군 중에서 Assignment j 에 속한 항공기가 임무 경로 상에서 생존할 확률이다.

Griggs et al.[22]이 사용했던 것처럼 본 연구에서도 엄호기 편대나 대공제압기 편대가 공격기 편대와 함께 공격편대군을 구성하면 공격편대군에 대한 적의 공중위협 또는 지상위협의 위협치가 이전의 절반으로 줄어든다고 가정하겠다. 위의 사항을 정리하면 다음과 같다.

$$P(L)_j = PSA_j \cdot PSG_j$$

$$P(E)_j = \{PSA_j + (1 - PSA_j)/2\} \cdot PSG_j$$

$$P(S)_j = PSA_j \cdot \{PSG_j + (1 - PSG_j)/2\}$$

$$P(B)_j = \{PSA_j + (1 - PSA_j)/2\} \cdot \{PSG_j + (1 - PSG_j)/2\}.$$

적 지역에서의 공격기 임무 단계 중 적으로부터 위협을 받는 임무 단계는 표적 지역으로의 침투, 공격, 이탈 세 단계로 나눌 수 있다. 본 연구 모형에서는 하나의 표적을 공격한 후에 바로 다음 표적으로 침투하는 경우도 있기 때문에 이탈 시 생존 확률은 고려하지 않는다. 그래서 표적지역으로의 침투 또는 공격 중에 격추될 확률은 각각 $1 - P(L)_j$, $1 - P(E)_j$, $1 - P(S)_j$, $1 - P(B)_j$ 가 된다. 그러므로 Assignment j 에 속한 항공기의 손실 비용은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$JC = [(1 - P(L)_j)X_j + (1 - P(E)_j)EX_j + (1 - P(S)_j)SX_j + (1 - P(B)_j)BX_j] C_j + [P(L)_jX_j + P(E)_jEX_j + P(S)_jSX_j + P(B)_jBX_j] A_j.$$

본 연구 모형에서는 엄호기 편대와 대공제압기 편대가 공격편대군에 포함되기 때문에 그에 대한 손실 비용도 고려하여야 한다. 엄호기는 두 대의 항공기로 1개의 편대를 이루고, AIM-9 2발과 AIM-120 4발로 무장한다고 가정한다.³⁾ 대공제압기 또한 두 대의 항공기로 1개의 편대를 이루고, 대공제압 공대지 미사일인 AGM(Air-to-Ground Missile)-88 HARM(High speed Anti Radiation Missile) 2발과 AIM-9, AIM-120을 각각 2발씩 무장한다고 가정한다. 문제의 단순화를 위해 엄호기와 대공제압기는 격추되지 않는다고 가정하고, 단순 손실 비용만을 고려한다. 엄호기와 대공제압기의 생존확률을 고려한다면 앞에서와 같이 생존했을 경우의 손실 비용과 격추되었을 때의 손실 비용으로 구분해서 적용할 수 있다.

3) 1개 편대의 항공기 수는 상황에 따라서 달라질 수 있다. 본 연구에서는 2대로 가정한다. 무장에 대해서는 PACAF Instruction 21-202[32]를 참고하였다.

EC: 엄호기 편대가 추가되었을 때의 단순 손실 비용

SC: 대공제압기 편대가 추가되었을 때의 단순 손실 비용

BC: 엄호기 편대와 대공제압기 편대가 추가되었을 때의 단순 손실 비용.

따라서 전체 표적에 할당된 총 항공기 수에 대한 총 손실 비용은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 TC = & \sum_{j \in J} [(1-P(L)_j) X_j + (1-P(E)_j) EX_j \\
 & + (1-P(S)_j) SX_j + (1-P(B)_j) BX_j] C_j \\
 & + [P(L)_j X_j + P(E)_j EX_j + P(S)_j SX_j \\
 & + P(B)_j BX_j] A_j + EC \sum_{k=1}^n E_k \\
 & + SC \sum_{k=1}^n S_k + BC \sum_{k=1}^n B_k.
 \end{aligned}$$

3.2.4 혼합정수계획 모형

목적 함수와 제약조건식을 조합하여 항공기 할당모형에 대한 혼합정수계획 모형을 구성하면 다음과 같다.

Minimize

$$\begin{aligned}
 TC = & \sum_{j \in J} [(1-P(L)_j) X_j + (1-P(E)_j) EX_j \\
 & + (1-P(S)_j) SX_j + (1-P(B)_j) BX_j] C_j \\
 & + [P(L)_j X_j + P(E)_j EX_j + P(S)_j SX_j \\
 & + P(B)_j BX_j] A_j + EC \sum_{k=1}^n E_k \\
 & + SC \sum_{k=1}^n S_k + BC \sum_{k=1}^n B_k
 \end{aligned}$$

Subject to

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j \in T_t} P(L)_j X_j \ln(1-P_{jt}) + P(E)_j EX_j \ln(1-P_{jt}) \\
 & + P(S)_j SX_j \ln(1-P_{jt}) \\
 & + P(B)_j BX_j \ln(1-P_{jt}) \leq \ln(1-d_t), \\
 & t = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned}$$

$$L_k + E_k + S_k + B_k \leq 1, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{j \in SP_k} X_j - 100L_k \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{j \in SP_k} EX_j - 100E_k \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{j \in SP_k} SX_j - 100S_k \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{j \in SP_k} BX_j - 100B_k \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{j \in SP_k} X_j - 2L_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{j \in SP_k} EX_j - 2E_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{j \in SP_k} SX_j - 2S_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{j \in SP_k} BX_j - 2B_k \geq 0, \quad k = 1, 2, \dots, s$$

$$\sum_{j \in AB_{fg}} X_j + EX_j + SX_j + BX_j \leq ABN_{fg},$$

$$f = 1, 2, \dots, a, g = 1, 2, \dots, h$$

$$X_j, EX_j, SX_j, BX_j \geq 0, \quad \text{정수}$$

$$L_k \begin{cases} 1, & \text{공격기뿐만 구성된 공격편대군 } k \text{가 선택되면} \\ 0, & \text{선택되지 않으면} \end{cases}$$

$$E_k \begin{cases} 1, & \text{공격기 편대와 엄호기 편대로 구성된} \\ & \text{공격편대군 } k \text{가 선택되면} \\ 0, & \text{선택되지 않으면} \end{cases}$$

$$S_k \begin{cases} 1, & \text{공격기 편대와 대공제압기 편대로 구성된} \\ & \text{공격편대군 } k \text{가 선택되면} \\ 0, & \text{선택되지 않으면} \end{cases}$$

$$B_k \begin{cases} 1, & \text{공격기, 엄호기, 대공제압기 편대로 구성된} \\ & \text{공격편대군 } k \text{가 선택되면} \\ 0, & \text{선택되지 않으면} \end{cases}$$

제시된 모형은 쏘티 당 표적을 할당하는 항공기 할당모형으로 파괴요구수준을 달성하면서 손실 비용을 최소화하는 항공기 할당 쏘티수를 결정할 수 있고, 공격기 편대가 엄호기 편대나 대공제압기 편대와 함께 공격편대군을 구성할 수 있다.

4. 모형의 적용 및 결과 분석

본 장에서는 항공기 할당모형을 실제 문제에 적용하기 위하여 모형을 구성하는 입력 자료를 분석

하고, 기존 모형에 비해서 개선되었는지를 확인하고자 한다. 우선 표적 당 쏘티를 할당하는 개념의 기존 항공기 할당모형과 쏘티 당 표적을 할당하는 개념의 항공기 할당모형의 결과를 서로 비교한다. 그리고 공격기만 할당하는 항공기 할당모형과 공격기 편대에 엄호기 편대나 대공제압기 편대를 추가할 수 있는 공격편대군 개념을 적용한 항공기 할당모형의 결과를 서로 비교한다. 각 모형은 ILOG CPLEX 10.1을 이용해서 결과를 도출하였다.

4.1 적용을 위한 입력 자료의 분석

4.1.1 파괴효과 분석

Assignment j 에 속한 항공기 한 대가 표적 t 를 공격해서 파괴시킬 확률인 P_{jt} 는 표적식별확률(PI_{jt}), 무장투하확률(PR_{jt}) 그리고 해당 무기가 표적에 명중해서 표적을 파괴시키는 표적파괴확률(PD_{jt})의 곱으로 구성된다.

$$P_{jt} = PI_{jt} \cdot PR_{jt} \cdot PD_{jt}$$

1) 표적식별확률(PI_{jt})

표적식별은 일반적으로 표적에 대한 인지, 인식, 확인으로 이루어지며 이에 영향을 미치는 요소들은 크게 표적특성(크기, 형태, 위장), 환경(지형지물, 차폐, 기상), 항공기의 위치, 탐지 장비 등이 있다. 많은 요소들이 결합된 표적식별확률은 표적을 공격하는데 있어서 많은 부분을 차지한다. 본 연구에서는 윤현욱[6]이 사용한 것처럼 모든 표적에 대해서 0.95라고 가정한다.

2) 무장투하확률(PR_{jt})

무장투하확률에 영향을 미치는 요소로는 비행고도, 속도, 공격진입각도, 최저 투하거리 및 고도, 기상, 조종사의 숙련도 등 여러 가지가 있다. 하지만 본 연구에서는 윤현욱[6]이 사용한 것처럼 무장투하확률을 1이라고 가정한다.

3) 표적파괴확률(PD_{jt})

표적파괴확률은 기존의 논문들을 참고하여 정했다[8, 13, 20]. 본 연구에서 사용되는 파괴확률은 <표 2>와 같다.

4.1.2 항공기 비용 분석

항공기를 운영하는데 있어서 관련 비용은 연구 개발비 및 투자비에 의해 결정되어지는 무기의 획득비용과 운영 유지비, 무기의 운반수단, 보조 지원 장비, 제반시설운영비 그리고 인력에 대한 비용 등으로 결정할 수 있다. 하지만 본 연구에서 고려하는 손실 비용은 항공기가 격추되었을 때 발생하는 비용이기 때문에 항공기의 격추와 관련된 항공기 단가, 보조지원 장비, 기본 무장, 폭탄, 연료비용만을 포함한다. 그 비용은 <표 3>과 <표 4>에 제시된 바와 같다.

4.1.3 표적분석

1) 표적별 파괴요구수준

표적에 대한 공격임무를 계획 시 표적을 어느 정도 파괴할 것인지를 결정해야 한다. 표적에 대한 파괴요구수준의 결정은 작전지휘관의 중요 결심 사항이며 작전의 성공 여부를 결정하는 중요한 요

<표 2> 무장별 표적파괴확률

구 분	표적 1	표적 2	표적 3	표적 4	표적 5	표적 6
MK-82 (6) ^{a)}	0.18	0.26	0.31	0.41	0.23	0.22
MK-84 (2)	0.25	0.24	0.41	0.43	0.41	0.25
GBU-10 (2)	0.62	0.26	0.61	0.43	0.61	0.43
BLU-107 (6)	0.22	0.32	0.15	0.22	0.28	0.05

주) ^{a)} 괄호 안의 수치는 폭탄의 수량

<표 3> 기종별 관련 비용^{a)} 단위 : \$

구 분	단위 가격	보조지원 장비(ECM pod)	연료 비용
펠콘	43,000,000	3,555,123	1,500
이글	22,000,000	3,555,123	1,000

주) ^{a)} 대한민국 공군 홈페이지[4], 정호영[11], 김승수와 강성진[1]을 참고하였다.

<표 4> 탄약 비용^{a)} 단위 : \$

무장 종류	단위 비용	무장 종류	단위 비용
AIM-120	386,000	GBU-10	28,000
AIM-9	84,000	AGM-65	180,000
MK-82	2,500	BLU-109	12,500
MK-84	3,100	AGM-88	316,856

주) ^{a)}공군 홈페이지[4]와 FAS[34]를 참고하였다.

<표 5> 파괴수준과 확률^{a)}

파괴수준	설명	파괴확률
가벼운 피해	작은 피해, 일부 기능 상실, 여전히 작전 수행 가능	0.1
중간 정도의 피해	광범위한 피해, 많은 기능 상실, 여전히 작전 수행은 가능하지만 효과는 줄어들음	0.5
심각한 피해	작전 수행 불가능	0.9

주) ^{a)} Introduction to naval weapons engineering(ES 310)[24]을 참고하였다.

<표 6> P_{ji} 와 표적별 파괴요구수준

구 분	표적 1	표적 2	표적 3	표적 4	표적 5	표적 6
MK-82 (6) ^{a)}	0.17	0.25	0.29	0.39	0.22	0.21
MK-84 (2)	0.24	0.23	0.39	0.41	0.39	0.24
GBU-10 (2)	0.59	0.25	0.58	0.41	0.58	0.41
BLU-109 (2)	0.21	0.30	0.14	0.21	0.27	0.05
파괴요구수준	0.75	0.55	0.85	0.90	0.65	0.60

주) ^{a)} 괄호 안의 수치는 폭탄의 수량

소이다. 따라서 적의 전체적인 전력을 분석해서 파괴 수준을 결정하여야 한다. 표적에 대한 파괴수준은 가벼운 피해, 중간 정도의 피해, 심각한 피해와 같은 용어로 표현하기도 하고, 파괴확률과 같은 확률로 표현하기도 한다<표 5>.

- 2) 무장별로 예상되는 파괴확률(P_{ji})과 표적별 파괴요구수준 앞서 제시한 바와 같이 P_{ji} 는 표적식별확률(PI_{ji}),

무장투하확률(PR_{ji}), 표적파괴확률(PD_{ji})의 곱으로 구할 수 있다. 표적별 파괴요구수준은 <표 6>을 참고하여 확률 값으로 결정하였다.

4.1.4 항공기의 생존확률 분석

항공기의 생존확률은 적의 공중위협으로부터 생존할 확률(PSA)과 적의 지상위협으로부터 생존할 확률(PSG)로 구성된다. 본 연구에서는 Griggs[21]가 사용한 생존확률을 사용한다. 생존확률은 <표

7>과 같다.

〈표 7〉 항공기별 표적별 생존확률

항공기	표적	PSA	PSG
펠콘	1	0.988	0.990
	2	0.992	0.990
	3	0.992	0.985
	4	0.992	0.985
	5	0.988	0.990
	6	0.996	0.998
이글	1	0.979	0.992
	2	0.982	0.978
	3	0.982	0.978
	4	0.985	0.978
	5	0.979	0.992
	6	0.991	0.994

4.2 모형 적용 및 결과 분석

모형을 적용함에 있어서 먼저 항공기가 표적을 어떻게 공격할 것인지를 알아야 한다. 표적에 대한 공격 순서, 공격 시간, 비행경로 등에 따라서 결과 값이 다르게 나올 수 있다. 본 연구에서는 쏘티 당 할당 가능한 표적의 수를 2개로 하였고, 표적을 공격하는 순서는 생존확률이 높은 곳부터 공격하도록 하였다. 또한 표적과 표적 사이의 거리, 표적과 비행장 사이의 거리는 직선으로 가정하고 모형에 적용하였다. 쏘티 당 할당 가능한 표적의 수를 더 크게 할 경우 역시 위와 비슷한 방법으로 또는 작전 상황에 맞게 정하여 모형에 적용할 수 있다. 다만 쏘티 당 할당 가능한 표적의 수가 늘수록 As-assignment의 수가 늘어나기 때문에 계산량이 증가하게 된다.

4.2.1 표적 당 쏘티를 할당하는 모형과 쏘티 당 표적을 할당하는 모형의 비교

1) 모형 적용

비교를 위해서 표적 당 쏘티를 할당하는 모형에

대해서는 각 표적에 대한 파괴요구수준을 달성하고, 손실 비용 최소화를 목적으로 설정하였다. 그리고 본 연구 모형에 대해서는 공격기로서 구성된 공격편대군만을 선택하도록 수정하였으며, 다음과 같은 상황을 부여한다.

- ① S 공군기지는 두 종류의 항공기를 각각 10대씩 보유하고 있다.
- ② 각 항공기는 네 종류의 무장 형상을 탑재할 수 있다.
- ③ 지금 S 공군기지는 6개의 표적에 대한 공격 계획을 세우려고 한다.
- ④ 펠콘은 허용 무장 탑재량이 10000lbs, 비행 제한 거리가 1300km이다.
- ⑤ 이글은 허용 무장 탑재량이 6000lbs, 비행 제한 거리가 1300km이다.

표적 당 쏘티를 할당하는 모형에서는 거리를 고려하지 않았다. 그래서 거리를 고려하는 쏘티 당 표적을 할당하는 모형에서는 표적 당 쏘티를 할당하는 모형과 동일한 조건을 부여하기 위해 이글의 비행 제한 거리를 1300km로 설정하였다. 본 연구에서 사용되는 이글의 비행 제한 거리는 900km이다. 항공기별 표적별 생존확률은 <표 7>과 같다. 무장 형상과 관련 비용은 <표 8>과 같다. 무장 형상별로 예상되는 파괴확률과 파괴요구수준은 <표 9>와 같다.

〈표 8〉 무장 형상과 관련 비용^{a)}

무장 형상	탄종	수량	중량(lb)	비용(\$)
A	MK-82	6	3000	15000
B	MK-82	12	6000	30000
C	MK-84	2	4000	6200
D	MK-84	4	8000	12400

주) ^{a)} 폭탄의 중량에 대한 자료는 공군 홈페이지에서 참고하였고, 편의상 십의 자리에서 올림을 하였다.

2) 결과 분석

각 모형에 대한 결과는 <표 10>와 <표 11>에서

〈표 9〉 P_j 와 표적별 파괴요구수준

구 분	표적 1	표적 2	표적 3	표적 4	표적 5	표적 6
A	0.17	0.25	0.29	0.39	0.22	0.21
B	0.24	0.23	0.39	0.41	0.39	0.24
C	0.26	0.37	0.43	0.58	0.33	0.31
D	0.36	0.34	0.58	0.61	0.58	0.36
파괴요구 수준	0.75	0.55	0.85	0.90	0.65	0.60

〈표 10〉 표적 당 쏘티를 할당하는 모형의 결과

구 분	공격기 편대		쏘티수
	표적 - 무장	공격기	
표적 1	1-D 1-C	펠콘 2대 이글 2대	4
표적 2	2-C	펠콘 2대	2
표적 3	3-D 3-C	펠콘 1대 이글 2대	3
표적 4	4-C	이글 3대	3
표적 5	5-D 5-C	펠콘 1대 이글 1대	2
표적 6	6-C	펠콘 3대	3
표적별 파괴요구수준 달성			총 17쏘티
총 손실 비용 : \$ 29,804,075			

보는 것과 같다. 표적 당 쏘티를 할당하는 모형의 경우 총 17쏘티가 표적에 할당되었고, 총 손실 비용은 29,804,075달러이다. 그리고 쏘티 당 표적을 할당하는 모형은 총 12쏘티가 표적에 할당되었고, 총 손실 비용은 25,991,309달러이다. 결과적으로 표적에 대한 파괴요구수준을 달성하는 동일한 조건 하에서 쏘티 당 표적을 할당하는 모형이 표적 당 쏘티를 할당하는 모형보다 총 쏘티수에서는 5쏘티의 감소를 가져왔고, 총 손실 비용에서는 3,812,766달러의 비용 감소를 가져왔다. 이런 결과가 발생한 이유는 쏘티 당 표적을 할당하는 모형에서 공격기 편대 2가 표적 1과 표적 2를 공격함으로써 표적 당 쏘티를 할당하는 모형에서 표적 1에 할당되었던 4쏘티 중 2쏘티를 줄일 수 있었다. 또한 공격기 편대 4가 표적 4와 표적 6을 공격함으로써 두 표적에 할당된 총 6쏘티 중 3쏘티를 줄일 수 있었다. 결과

에서 보는 것처럼 쏘티 당 여러 표적을 공격하는 것이 가능한 현대의 항공전에서는 쏘티 당 표적을 할당하는 모형이 더 현실적이고, 효율적인 결과를 가져온다. 표적의 수가 많아지면 그 차이는 더 커지게 될 것이다.

〈표 11〉 쏘티 당 표적을 할당하는 모형의 결과

구 분	공격기 편대의 구성		쏘티수
	표적 - 무장	공격기	
1	1-D	펠콘 2대	2
2	1-C	펠콘 2대	2
	2-C		
3	3-D	펠콘 1대	3
	3-C	이글 2대	
4	4-C	펠콘 3대	3
	6-C		
5	5-D	펠콘 1대	2
	5-C	이글 1대	
표적별 파괴요구수준 달성			총 12쏘티
총 손실 비용 : \$ 25,991,309			

4.2.2 공격기만 할당하는 모형과 공격편대군 개념을 적용한 모형의 비교

1) 모형 적용

비교를 위해서 본 연구 모형을 공격기로 구성된 공격편대군만 선택하도록 수정한 모형과 원래의 연구 모형을 사용하였다. 그리고 다음과 같은 상황을 부여한다.

- ① S 공군기지와 K 공군기지는 두 종류의 항공기를 각각 10대씩 보유하고 있다.
- ② 각 항공기는 세 종류의 무장 형상을 탑재할 수 있다.
- ③ 두 종류의 항공기 모두 엄호기와 대공제압기로 사용 가능하다.
- ④ 지금 각 공군기지는 5개의 표적에 대한 공격 계획을 세우려고 한다.
- ⑤ 펠콘은 허용 무장 탑재량이 10000lbs, 비행

제한 거리가 1300km이다.

⑥ 이글은 허용 무장 탑재량이 6000lbs, 비행 제한 거리가 900km이다.

항공기별 표적별 생존확률은 <표 7>과 같다. 무장 형상과 관련 비용은 <표 12>와 같다. 무장 형상별로 예상되는 파괴확률과 파괴요구수준은 <표 13>과 같다.

<표 13> P_{jt} 와 표적별 파괴요구수준

구 분	표적 1	표적 2	표적 3	표적 4	표적 5
A	0.17	0.25	0.29	0.39	0.22
B	0.24	0.23	0.39	0.41	0.39
C	0.21	0.30	0.14	0.21	0.27
파괴요구 수준	0.75	0.55	0.85	0.90	0.65

<표 12> 무장 형상과 관련 비용

무장 형상	탄종	수량	중량(lb)	비용(\$)
A	MK-82	6	3000	15000
B	MK-84	2	4000	6200
C	BLU-109	2	4000	25000

2) 결과 분석

모형에 대한 결과는 <표 14>와 <표 15>에서 보는 것과 같다. 공격기만 할당하는 모형의 경우 총 14쏘티가 표적에 할당되었고, 총 손실 비용은 35,480,612달러이다. 그리고 공격편대군 개념을 적용한 모형은 지원 임무를 수행하는 편대를 포함하

<표 14> 공격기만 할당하는 모형의 결과

구 분	공격편대군의 구성				쏘티수
	공군기지	표적 - 무장	공격기	지원 편대	
1	K	1-B	펠콘 6대	-	6
2	S	2-A, 5-B 2-B, 5-B	펠콘 2대 펠콘 1대	-	3
3	S	3-B 4-B	펠콘 5대	-	5
표적별 파괴요구수준 달성					총 14쏘티
					총 손실 비용 : \$ 35,480,612

<표 15> 공격편대군 개념을 적용한 모형의 결과

구 분	공격편대군의 구성				쏘티수
	공군기지	표적 - 무장	공격기	지원 편대	
1	S K	1-B	펠콘 2대 펠콘 4대	-	6
2	S	2-A, 5-B 2-B, 5-B	펠콘 2대 펠콘 1대	-	3
3	S	3-B 4-B	펠콘 5대	대공제압기	7
표적별 파괴요구수준 달성					총 16쏘티
					총 손실 비용 : \$ 35,233,696

여 총 16쏘티가 표적에 할당되었고, 총 손실 비용은 35,233,696달러이다. 결과적으로 공격편대군을 적용한 모형이 공격기만 할당하는 모형보다 많은 쏘티를 할당하였지만 비용적인 면에서는 246,916달러를 줄일 수 있었다. 이 결과는 같은 임무를 수행할 경우 엄호기 편대나 대공제압기 편대의 지원을 받으면 더 효율적인 결과를 얻을 수 있음을 보여준다. 항공기의 생존확률이 낮아지고, 공격기 편대의 크기가 커진다면 그 차이는 더 커질 것이다.

4.2.3 민감도 분석

본 연구 모형을 현실 상황에 적용함에 있어서 모형의 변수 즉, 항공기의 생존확률, 표적에 대한 파괴요구수준 등은 전쟁의 상황, 작전지휘관의 판단에 따라 수시로 변화하기 때문에 상당한 불확실성을 가지고 있다. 그러므로 모형에 관련된 불확실한 변수의 변화가 최적해에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 민감도분석을 실시하여 살펴보고자 한다. 또한 모형에 대한 타당성 검증의 수단으로 민감도 분석을 사용해서 모형의 결과가 현실 세계와 유사하게 변하는지를 알아보려고 한다[25].

1) 표적에 대한 파괴요구수준의 변화

전쟁 상황의 변화와 작전 지휘관의 판단에 따라서 표적에 대한 파괴요구수준은 언제든지 변할 수

있다. 따라서 표적에 대한 파괴요구수준을 변화시킬 경우 표적에 대한 항공기 할당 결과가 어떻게 변하는지를 보고자 한다.

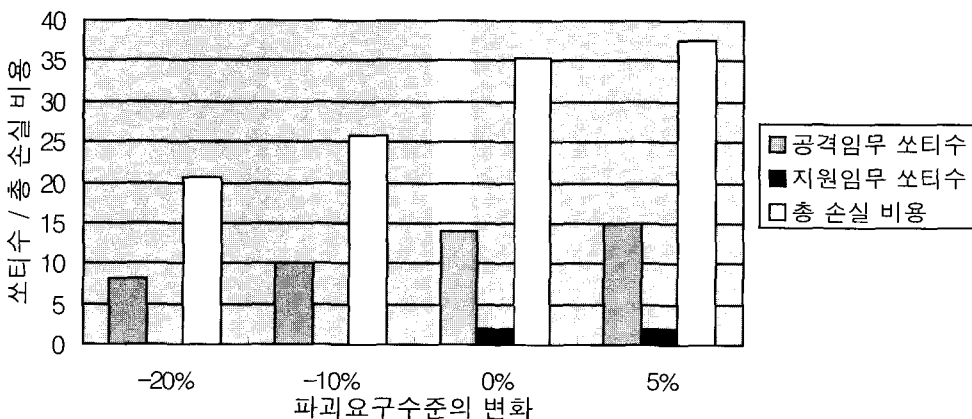
앞의 공격편대군 개념을 적용한 모형을 이용하여 표적에 대한 파괴요구수준을 일률적으로 증감시키면서 표적에 대한 항공기 할당 결과가 어떻게 변하는지를 알아보았다. 그 결과는 <그림 1>과 같다.

민감도 분석 결과 표적에 대한 파괴요구수준이 증가함에 따라 표적에 할당되어지는 쏘티수와 총 손실 비용이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 위협에 노출되는 항공기 수가 증가함에 따라 지원 임무를 수행하는 항공기 편대의 수가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 민감도 분석 결과에서 보는 바와 같이 본 연구 모형의 결과가 현실 세계와 유사하게 변하는 것을 볼 수 있다.

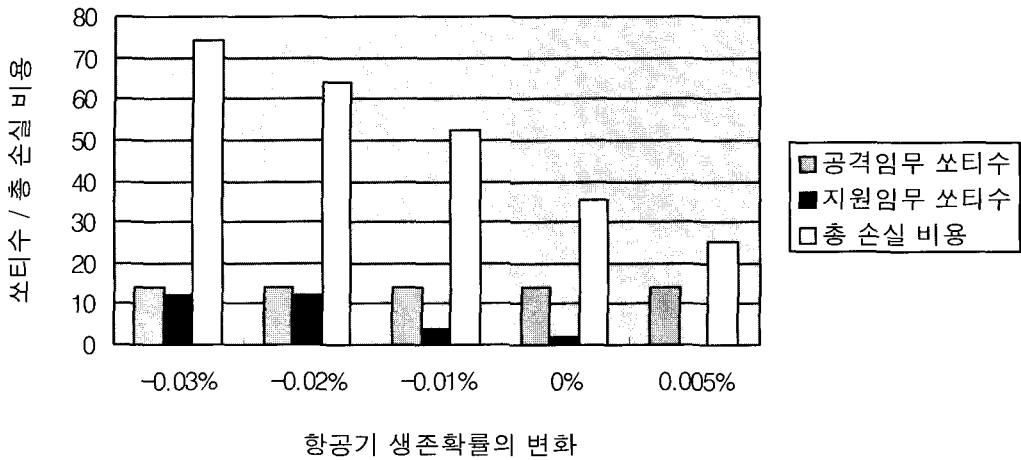
2) 항공기의 생존확률의 변화

항공기의 생존확률은 적 공군 전력의 변화와 아군의 지원 전력 즉, 전자전기 및 공중조기경보기 등의 도움에 따라서 많은 변화가 일어난다. 따라서 항공기의 생존확률을 변화시킬 경우 표적에 대한 항공기 할당 결과가 어떻게 변하는지를 보고자 한다.

앞의 공격편대군 개념을 적용한 모형을 이용하여 각 항공기의 생존확률을 구성하는 적 공중위협으로부터 생존할 확률(PSA)과 적 지상위협으로부터



<그림 1> 파괴요구수준 변화에 따른 항공기 할당 결과



〈그림 2〉 항공기 생존확률 변화에 따른 항공기 할당 결과

터 생존할 확률(PSG)을 일률적으로 증감시키면서 표적에 대한 항공기 할당 결과가 어떻게 변하는지를 알아보았다. 그 결과는 <그림 2>와 같다.

민감도 분석 결과 항공기의 생존확률이 증가함에 따라 적의 위협이 감소하기 때문에 지원임무를 수행하는 항공기 편대의 수와 총 손실 비용이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 경우에서는 항공기의 생존확률 PSA와 PSG가 각각 0.005% 이상 증가하면 대공제압기나 엄호기와 함께 작전을 수행하지 않는 것이 손실 비용을 최소화하는데 도움이 된다는 것을 알 수 있다. 이 결과에서도 본 연구 모형의 결과가 현실 세계와 유사하게 변하는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 소티 당 표적을 할당하는 개념과 공격편대군 개념을 도입하여 공세제공작전 시 제한된 항공 전력으로 각 표적에 대한 파괴요구수준을 달성하고, 손실 비용을 최소화하는 기존 연구 대비 가장 현실적인 항공기 최적할당모형을 제시하였다.

기존의 항공기 할당모형들은 대부분 한 번의 소티에 하나의 표적만을 공격하는 표적 당 소티를 할

당하는 개념의 모형들이었다. 하지만 현대의 항공전에서는 정밀유도무기의 등장으로 한 번의 소티에 여러 표적을 공격하는 것이 가능해졌고, 미래의 전쟁에서는 더욱 향상된 성능을 가진 정밀유도무기가 개발되어 사용될 것으로 예상된다. 따라서 소티 당 표적을 할당하는 개념의 항공기 할당모형에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 Assignment를 이용해서 소티 당 표적을 할당하는 개념의 항공기 최적할당모형을 구성하였다. 또한 보다 현실적인 모형을 구축하기 위해서 공격편대군 개념을 도입하였다. 공격기 편대가 엄호기 편대나 대공제압기 편대의 지원을 받으면서 임무를 수행할 수 있도록 공격편대군을 구성하였다.

본 모형을 공세제공작전 시에 공군의 전력 할당에 적용한다면 각 표적에 대한 파괴요구수준을 달성하고, 손실 비용을 최소화하는 항공기 할당 소티수를 결정하는 문제에 활용되어, 효과적인 작전 수행을 지원하는데 도움이 될 수 있을 것이다.

그러나 본 연구 모형이 실제 상황에 보다 효과적으로 적용되기 위해서는 보완되어야 할 사항이 있다. 첫째, 항공기가 무장을 선택함에 따라서 항공기의 생존확률이 변하는 것을 고려하여야 한다. 이석 외[7]의 연구에 따르면 모의분석 결과에서 일반 폭탄에 비하여 레이저 유도폭탄을 탑재한 항공

기의 손실이 22% 정도 낮음을 볼 수 있다. 둘째, 본 연구에 포함되지 않은 공격편대군의 다른 구성요소인 전자전기, 공중조기경보기, 공중급유기, 무인항공기, 순항미사일 등과 타군과의 합동 교전을 고려할 수 있어야 한다. 그렇게 된다면 더욱 현실적인 모형이 될 것이다. 셋째, 공격편대군이 안전하게 임무를 수행할 수 있도록 표적에 대한 공격 순서, 공격 시간, 최적의 비행경로 등에 대한 설정이 더 자세하고 정확해야 한다. 넷째, 엄호기와 대공제압기가 다른 항공기의 생존확률에 미치는 효과와 기종별 단위 출격에 의한 피격확률이 보다 정확하게 산정되어야 한다.

참고 문헌

- [1] 김승수, 강성진, "PRICE 모델을 이용한 무기체계 경제수명 결정에 관한 연구", 「한국국방경영분석학회지」, 제30권, 제2호(2004).
- [2] 김용복, 민계료, "다수 표적을 공격하는 편대항공기의 최적작전시간 결정 모형", 「한국군사운영분석학회지」, 제18권, 제1호(1992).
- [3] 김진곤, "목표계획법을 이용한 지대공 미사일의 적정 소요 산출에 관한 연구", 석사학위논문, 국방대학원, 2003.
- [4] 대한민국 공군, www.airforce.mil.kr.
- [5] 심장희, "전투함의 무장할당 연구", 석사학위논문, 부산대학교, 2004.
- [6] 윤현욱, "적 고정표적 위협의 최소화를 위한 항공기 할당에 관한 연구", 석사학위논문, 국방대학원, 1988.
- [7] 이석, 조한상, 김병로, 고대우, 현용희, 구자민, 지철규, 류태규, "정밀유도무기가 항공기 전투효과증대에 미치는 영향성 연구", 「제12차 유도무기학술대회」, 2003.
- [8] 이용화, 김충영, "선형계획법을 이용한 항공전력 규모결정에 관한 연구", 「한국군사운영분석학회지」, 제21권, 제1호(1995).
- [9] 장상국, 강성진, "포병 표적할당에 관한 개선모형", 「한국군사운영분석학회지」, 제20권, 제2호(1994).
- [10] 정병주, 김충영, "목표계획법을 이용한 항공기 할당모형에 관한 연구", 「한국군사운영분석학회지」, 제20권, 제1호(1994).
- [11] 정호영, "고유가 물리치는 전술 배양", 「국방저널」, 11월호, 국방홍보원, 2004.
- [12] 지용기 "시뮬레이션을 이용한 공격편대군 운영에 관한 연구", 석사학위논문, 국방대학원, 2005.
- [13] 최훈문, "목표계획법을 이용한 편대군 항공기 할당모형에 관한 연구", 석사학위논문, 국방대학원, 1996.
- [14] 한상문, "공중편대군 임무별 최적전력 할당에 관한 연구", 석사학위논문, 고려대학교, 1994.
- [15] 허중준, 김충영, "고정목표 공격을 위한 최적항공기 할당모형에 관한 연구", 「한국군사운영분석학회지」, 제12권, 제2호(1987).
- [16] Ahuja, R.K., A. Kumar, K. Jha, and J.B. Orlin, "Exact and heuristic methods for the weapon target assignment problem," MIT Sloan working paper, (2003), pp.4464-03.
- [17] Bolkcom, C., "Military Suppression of Enemy Air Defenses(SEAD) : Assessing Future Needs," *CRS Report for Congress*, Order Code RS21141, 2005.
- [18] Castro, D.R., "Optimization models for allocation of air strike assets with persistence," MS Thesis, Naval postgraduate school, 2002.
- [19] Crowder, G.L., "Effects-Based Operations," Air Combat Command, www.au.af.mil/au/awc/awcgate/dod/ebo_slides/030318-D-9085-024.pdf, 2003.
- [20] CRS Report for Congress, Order Code RS21141, *Military Suppression of Enemy Air Defenses(SEAD) : Assessing Future Needs*, http://www.fas.org/sgp/crs/weap-

- ons/RS21141.pdf.
- [21] Griggs, B.J., "An air mission planning algorithm for a theater level combat model," MS Thesis, Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, OH, 1994.
- [22] Griggs, B.J., G.S. Parnell, and L.J. Lehmkuhl, "An air mission planning algorithm using decision analysis and mixed integer programming," *Operations Research*, Vol.45, No.5(1997), pp.662-676.
- [23] Hosein, P.A. and M. Athans, "An asymptotic result for the multi-stage weapon-target allocation problem," *29th IEEE Conference Decision Control*, Honolulu, 1990.
- [24] Introduction to naval weapons engineering(ES310), Damage prediction, www.fas.org/man/dod-101/navy/docs/es310/dam_crit/dam_crit.htm.
- [25] Jaiswal, N.K., *Military Operations Research : Quantitative Decision Making*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.
- [26] Kwon, O-J., D-H. Kang, K-S. Lee, and S-S. Park, "Lagrangian relaxation approach to the targeting problem," *Naval Research Logistics*, Vol.46, No.6(1999), pp. 640-653.
- [27] Lee, Z-J., S-F. Su, and C-Y Lee, "Efficiently solving general weapon-target assignment problem by genetic algorithms with greedy eugenics," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B : Cybernetics*, Vol.33, No.1(2003), pp.113-121.
- [28] Lemus, F. and K.H. David, "An optimum allocation of different weapons to a target complex," *Operations Research*, Vol.11, No. 5(1963), pp.787-794.
- [29] Lu, H-Q., H-G. Zhang, X-J. Zhang, and R-X. Han, "An improved genetic algorithm for target assignment optimization of naval fleet air defense," *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China, (2006) pp.3401-340.
- [30] Luo D-L., C-L. Shen, B. Wang, and W-H. Wu, "Air combat decision-making for cooperative multiple target attack using heuristic adaptive genetic algorithm," *Proceedings of the 4th International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Guangzhou, (2005), pp.473-478.
- [31] Matlin, S., "A review of the literature on the missile-allocation problem," *Operations Research*, Vol.18, No.2(1970), pp.334-373.
- [32] PACAF Instruction 21-202, www.e-publishing.af.mil/pubfiles/pacaf/21/pacafi21-202/pacafi21-202.pdf, 1997.
- [33] Rosenberger, J.M., H-S. Hwang, R.P. Pallerla, A. Yucel, R.L. Wilson, and E.G. Brungardt, "The generalized weapon target assignment problem," 10th International Command and Control Research and Technology Symposium the Future of C2, Mclean, VA, 2005.
- [34] The Federation of American Scientists, www.fas.org.