

표적군 기반 공격 편대군 조합 최적화 모형

조상현 · 이문걸[†] · 장영배

국방대학교 운영분석학과 · 합동참모본부

Combinatorial Optimization Model of Air Strike Packages based on Target Groups

Sanghyeon Cho · Moongul Lee · Youngbai Jang

Department of Operations Research, Korea National Defense University · Joint Chief of Staff

In this research, in order to optimize the multi-objective function effectively, we suggested the optimization model to maximize the total destruction of ground targets and minimize the total damage of aircrafts and cost of air munitions by using goal programming. To satisfy the various variables and constraints of this mathematical model, the concept of air strike package is applied. As a consequence, effective attack can be possible by identifying the prior ground targets more quickly. This study can contribute to maximize the ROK air force's combat power and preservation of high value air asset in the war.

Keywords: Air-Strike Package, WTA(Weapon Target Assignment), Goal Programming, Combinatorial Optimization

1. 서론

공대지 표적업무의 시원은 제 1차 세계대전 발발이전, 美 캘리포니아 샌프란시스코 상공에서 Philip O. Parmalee가 조종하는 항공기로 부터 폭탄을 투하하였던 1911년 1월로 기록되고 있다. 이로부터 시작된 항공 표적업무의 역사는 항공기 및 무기 체계의 발전과 그 맥을 함께하고 있다. 제 1차 세계대전은 항공기가 하나의 전쟁 도구로서 등장하는 첫무대가 되었으나 가용 항공기 수가 적었고 낮은 기술 수준으로 인하여 무기 운반 도구로서 항공기를 효과적으로 사용할 수 없었다. 하지만 제 2차 세계대전 이후 전략폭격의 개념이 등장하고 항공기, 무기 및 방어수단들이 기술적으로 고도로 발전되어감에 따라 효과적으로 지상표적을 파괴하기 위한 계량적이고 분석적인 방법론 적용의 필요성이 대두되었다(Air Force HQ, 2012).

무장-표적 할당 문제(WTA)는 1950년대 이후부터 연구되어 온 분야로써 지금까지도 활발한 연구가 이루어지고 있으며 오늘날 항공기 및 무기체계 기술의 비약적인 발전으로 인하여 좀 더 효과적인 지상표적 파괴가 가능하게 되었다. 대표적인

사례로써 이라크 전에서 미군이 보여준 정밀유도무기를 활용한 효과적인 공대지 표적 공격전술은 이라크 전을 조기에 승리로 이끌 수 있었던 주요 원동력이었다. 이렇듯 전쟁에서 항공전력의 효과적인 운용은 전쟁승리를 위한 중요한 요소이며, 여러 지역에 분포해있는 다수의 표적군들을 제한된 가용 항공전력을 이용하여 효과적으로 공격하기 위해 공격편대군 작전 개념이 등장하였다. “공격편대군”이란 지상에 위치한 표적을 파괴하는 공통의 목적을 달성하기 위해 구성된 전투기 그룹을 의미한다. 이를 통해 대공제압 및 엄호 임무 수행 등 전투기 그룹 내 전투기간 효과적인 상호지원(Mutual Support)이 가능하며 공격임무를 효과적으로 수행하고 아군 전투기의 생존율을 높일 수 있는 장점이 있다(Griggs *et al.*, 1997).

따라서 본 연구에서는 각 표적군에 포함된 표적들의 속성에 따라 효율적으로 공격할 수 있는 맞춤형 공격편대군 조합 모형에 대해 다루고자 한다. 즉, 표적에 따른 전투기와 가용한 항공탄약을 할당하여 작전기획자가 원하는 목표를 달성하기 위한 계획을 수립하기 위한 도구를 개발하는 것이다.

제시한 최적화 모형의 목적함수는 항공기의 생존률, 표적의

[†] 연락저자 : 이문걸 교수, 10544 경기도 고양시 덕양구 제2자유로 33 국방대학교 운영분석학과, Tel : 02-300-2174, Fax : 02-309-8118,
E-mail : mglee@kndu.ac.kr

파괴율, 항공탄약 사용비용 등 다기준 목적함수를 다룬다. 총 n 개의 가상 표적군에 대해 m 대의 항공기를 할당하는 것이며, 이 때 표적군별로 t 개의 표적을 포함한다. 또한 표적별로 요구되는 최소 파괴요구량은 표적의 성질 및 속성에 따라 다르게 적용한다. Eiselt *et al.*(2007)의 항공기 출격 계획 모형에 관련한 혼합정수계획법 문제를 발전시켜서 여러 상충되는 목표를 최대한 만족시킬 수 있는 해를 제시하는 목표계획법을 활용하여 항공기 최적할당모형을 구성하였다. 또한 각 표적별 할당된 구체적인 전투기와 공격무장을 명시하여 신속하게 공격편대군 구성업무에 활용될 수 있도록 한다. 이 모델을 통해 표적군별, 표적-전투기 종류-공격 무장의 조합을 구체적으로 제시하고 효율적인 공격전력 투입이 가능하도록 한다.

목표계획법은 여러 개의 목적(Multi-objective)을 동시에 만족시키기 위해 목적별로 목표(Goal)를 정하고 실제 달성될 목표 지표와의 편차(Deviation)를 목적함수로 삼아 이를 극소화하는 대안을 찾는 방법론으로써 선형계획법을 확장한 것이다. 이 방법은 서로 상충되는 목표를 달성해야 할 경우, 목표치에 가장 근사한 값을 찾을 때 유용하다(Stanley, 1974). 이를 통해 특정 표적군에 불필요한 항공전력이 과잉 집중되는 현상을 방지하며 대상 표적에 적절한 항공 무장과 전투기가 할당될 수 있다. 아울러 본 모형을 이용하여 공군의 항공작전 계획시 신속하고 합리적인 의사결정(지휘) 과정을 지원이 가능할 것으로 기대된다. 본 모델을 활용하면 기존의 공격편대군 구성 업무 담당자의 직관적 경험에 의존한 전력구성 불균형 현상과 수기식 업무에 따른 업무 과중을 최소화하고 보다 효율적인 자원할당이 가능할 것이다.

2. 관련 연구 고찰

국내의 관련 연구로 Yoon(1988)은 제한된 항공자원을 이용하여 대상 표적의 파괴 요구수준이 도달될 때까지 공격하면서 잔류표적의 위협치가 최소화되도록 전투기 할당 모형을 구성하였다. 표적별 파괴 요구수준을 달성하고 기종별 가용 항공

자원 내에서 항공기가 할당된다는 제약 조건하에서 투입 전력의 손실률을 최소화시키는 항공기 출격횟수를 도출하는 정수 계획모형을 제시하였다. Lee(2008)에서는 혼합정수계획법을 이용하여 전투기와 표적의 최적할당에 관한 모형을 제시하였다. 이 연구에서는 표적 당 항공기를 할당하는 기존의 모형에서 벗어나 표적대비 출격횟수를 할당하는 개념의 모형을 적용하였다. Lee and Kim(2015)은 혼합정수계획법을 활용하여 공중충돌 방지를 고려한 항공기-할당 문제를 다루었다. 짧은 시간 동안 일정한 표적지역에 대규모로 투입되는 항공기들의 공중충돌 방지를 위해 표적지역을 세 구역으로 구분하는 공간분리 방법을 적용하였다. Kim *et al.*(2010)은 다수의 목표물과 다수의 임무, 그리고 장애물이 존재하는 상황 하에서 다수 무인항공기의 임무 할당을 하는 문제를 정의할 때도 혼합정수계획모형을 제시하였고 이와 아울러 문제의 크기가 커지면서 계산시간이 급격히 증가하는 것을 해결하기 위해 유전 알고리즘이라는 휴리스틱 방법론을 활용하여 근사해를 구함으로써 계산시간을 단축하였다.

외국 관련연구로 Lemus and David(1963)는 여러 종류의 표적이 집결되어 있는 지역에 아군이 보유하고 있는 가용무기를 어떻게 할당하면 위협치를 최소화시킬 수 있는가 하는 최적 할당 문제를 연구 발전시켰다. Brown *et al.*(1993)은 표적파괴와 표적 공격에 따른 항공기 손실을 절충한 항공기 출격과 무장할당관련 비선형계획 최적화모형을 제시하였다. 본 연구의 가정사항으로 표적 공격 이후 항공기 손실률을 적용하였고, 항공전사 자료상 대부분의 항공기 손실이 공격이후 적의 방공망의 탐지 및 근접 효과로 인해 회피(Egress) 단계에서 발생하는 것에 근거하였다. Griggs *et al.*(1997)은 공격임무 계획 시 공격성과 중대한 영향을 미치는 임무지역 기상요소를 고려하기 위해 의사결정 나무(Decision Tree) 기법을 활용하였다. Ahuja *et al.*(2003)은 할당문제 시간단축 해결을 위한 휴리스틱 중 네트워크 기법에 기반한 Lower-Bounding Scheme 및 VLSN(Very Large-Scale Neighborhood) 방법을 제시하였다. Rosenberger *et al.*(2005)은 항공기 무장 할당을 위한 연구에서 일반적인 다수 표적의 할당이 가능한 개념적 차원의 단순한 수리 모형을 제시하였다.

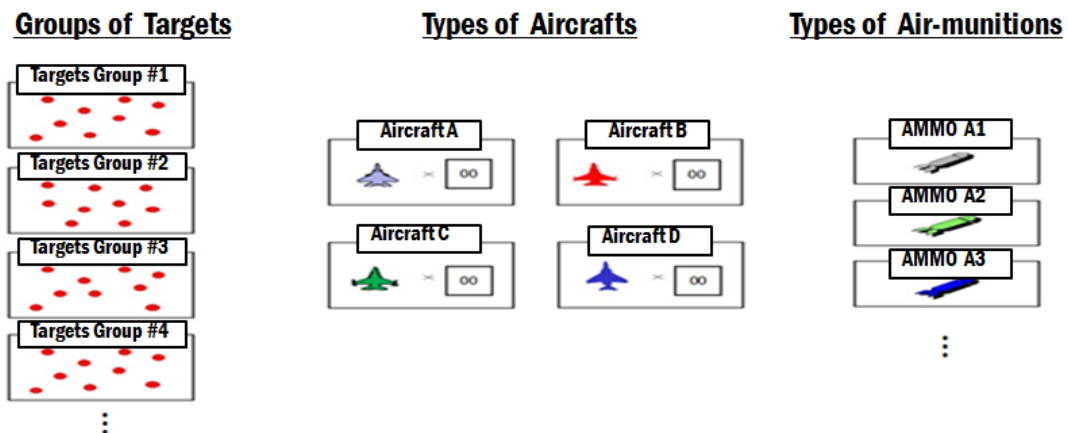


Figure 1. Combinations of Target groups, Aircrafts and Munitions

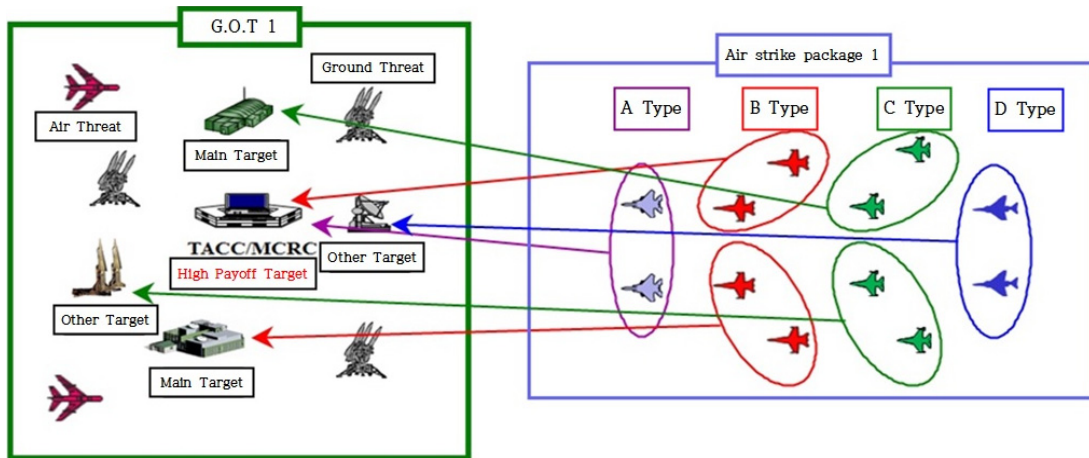


Figure 2. Example of Air Strike Packages based on TGT Group

이와 같이 제한된 항공자산을 효율적으로 할당하는 항공기의 WTA 문제에 대한 연구는 많이 이루어 졌으며 대다수가 혼합정수계획법에 대해 기반하고 있다. 이러한 방법은 제한된 자원 범위 내에서 목적함수가 표적의 파괴효과를 최대화하거나 항공기 손실을 최소화하는 형태로서 적정 수준의 자원관리 문제를 고려하기에는 제한적이다. 즉, 달성하고자 하는 목적들이 상호 대립되는 경우, 모든 제약조건을 만족하는 최적해를 도출하기에 어려움이 있다. 따라서 이러한 점을 보완하기 위해 본 연구에서는 목표계획법에 기반을 둔 최적화 모형을 제시한다. 본 모형은 목표들 사이에 상호희생을 감수하면서 중요도에 따른 우선순위를 기준으로 상위목표를 우선적으로 충족하는 해를 도출해 나갈 수 있는 장점이 있다. 즉, 다양한 속성의 표적군들을 공격함에 있어서 전장상황 및 지휘관의 판단에 따라 표적의 파괴율 과 아군 전투기 생존율은 최대화, 투입비용 최소화 등과 같이 달성해야 할 여러 목표들이 고려하여야 한다. 따라서 본 연구는 수시로 변화하는 각종 목표수준과 서로 상충되는 다양한 요소들을 동시에 충족시킬 수 있는 혼합정수계획법 기반의 목표계획법을 제시한다.

3. 문제정의 및 수리모형

3.1 문제정의 및 가정사항

본 문제는 한정된 가용 항공기 자산으로 작전기획자가 상황에 따라 설정하는 목표들을 최대한 만족시키면서 각각의 표적군을 효과적으로 공격할 수 있는 전투기와 무장의 조합, 즉 공격 편대군의 구성하는 것이다.

<Figure 1>에서 표적군 내에는 다수 표적들이 존재하며 전술적 중요도에 따라 가치가 부여된다. 그리고 이러한 표적들은 아군 공격으로부터 보호수단(敵 공중·지상 위협고려 필요)을 가지고 있다. 또한 이러한 표적들에 대해 작전 기획자는 공격 중요도에 따라서 핵심표적, 주표적 그리고 기타 표적으로 구분한다(Airforce, 2012). 이 표적군들을 공격하기 위해 적

합한 전투기와 공격무장을 조합하여 할당하는 것이 본 연구의 목적이다.

<Figure 2>는 하나의 공격편대군이 표적군을 공격하기 위해 전투기 편대와 표적간의 할당에 대한 예시를 나타낸 것이다.

이 때 해당 기종별 무장 할당은 항공기의 성능과 표적의 종류에 따른 명중률과 파괴확률에 따라 선택된다. 본 연구의 모형에서 적용되는 가정사항은 다음과 같다.

- 1) 모든 표적에 대하여 자원 할당이 이루어져야 한다.
- 2) 대상 표적에 대해 전투기 및 무장 등 가용한 자산 내에서 한번의 할당만 가능하다.
- 3) 전투기 종류에 따라 무장별 장착량의 차이가 존재하며 동일한 무장을 장착하더라도 전투기의 성능에 따라서 표적의 파괴확률이 다르다.
- 4) 전투기 종류에 따라 기동, 탑재 전자장비 등의 제원이 상이하고, 이에 따른 공격임무 시 생존확률이 다르다.
- 5) 각 표적을 공격은 요구되는 최소 파괴율 수준 이상을 만족하여야 한다.
- 6) 전장상황 및 지휘관의 작전 지휘방침에 따라 표적군에 포함된 표적들의 정보 가치는 가상으로 설정하며 현실적 물리적 상태를 고려한 값을 적용한다.
- 7) 표적군별 적의 위협수준은 전장상황 및 아군 지휘부 판단에 따라 가상으로 설정한다.
- 8) 항공기는 다양한 탄종을 장착할 수 있지만 한 개의 표적에 대해 한 가지 종류의 폭탄으로 공격한다.
- 9) 표적 할당 시 항공기는 기본 단위인 2대(분대)로 적용한다.
- 10) 전투기를 운용하는 비행단은 단일 기종만 운용한다.

3.2 수리모형

제 3.1절에서 기술한 문제와 가정사항을 전제로 표적군 내 표적의 공격임무(최소 파괴 요구수준), 항공기의 생존성, 항공단약의 적정 사용량을 만족하는 목표계획법에 기반한 혼합정수선형계획법 최적화 모형에 대해 설명한다.

3.2.1 집합 구성

모형을 구성하는 집합은 전투기, 항공무장, 표적군과 이에 속한 표적들로 구성되며 다음과 같다.

- $i \in I$: 모든 전투기 집합 ($I_1, I_2 \dots I_m \subset I$: m 개의 전투기 기종의 집합)
- $a \in A$: 모든 무장 집합 ($A = \{a_1, \dots, a_k\}$: k 개 무장 종류)
- $g \in G$: 표적군의 집합 ($G = \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$: n 개 표적군)
- $t \in T$: 공대지 표적, $G_g(t)$: 표적군에 속한 표적

3.2.2 매개변수

본 모형을 구성하는 매개변수는 표적군의 속성을 반영하기 위해 표적의 중요도를 나타내는 고유가치, 표적군의 방공자산을 고려한 지상, 공중 위협을 포함한다. 또한 전투기 특성 및 지리적 환경을 반영하기 위해 전투기 i 가 표적 t 를 공격할 때 표적군과 비행기와의 거리, 전투기 최대작전반경, 전투기 고유 생존율 그리고 전투기 i 가 무장 a 를 사용하여 표적 t 를 공격할 때의 명중률에 대한 정보를 표현한다. 자세한 내용은 실험결과 및 분석에서 설명하기로 한다. 보다 현실적인 모형화를 위해 표적 종류, 속성 등에 대한 수치화, 전투기 임무특성 수치, 생존률 그리고 항공무장의 정확도 및 파괴효과 등의 파라미터 값 설정이 필요하다. 이에 대한 수치화 근거는 현재 미국방성이 적용하는 합동무기효과교범(Joint Weapon Effectiveness Manual)을 토대로 어떤 항공기가 어떤 무장 0발을 탑재하여 어떠한 표적을 공격할 때 효과치를 분석한 자료를 활용하였으며 기존의 저명한 연구결과(Brown et al., 1993)에서 적용한 값을 재구성하였다.

- v_t : 표적 t 의 가치
- d_{it} : 표적 t 와 전투기 I_m 기종을 보유한 비행기와의 거리
- $Total_value_G_g$: 표적군별 표적의 총 가치

$$\sum_{t \in G_g} v_t = Total_value_g \quad \forall g \in G$$

- ac_val_i : 전투기 i 가치의 역수로 표현(목적함수에서 저성능의 항공기도 전력에 할당가능하도록 하기 위함)
- $ac_max_dist_i$: 전투기 i 의 최대 작전반경
- psv_ac_i : 전투기 i 의 고유 생존율
- $prob_hit_{ia}$: 전투기 i 가 무장 a 를 이용 정확히 명중할 확률
- $threat_gnd_t$: 표적 t 의 적 지상위협
- $threat_air_t$: 표적 t 의 적 공중위협
- $threat_tgt_t$: 표적 t 의 적의 총 위협

$$threat_tgt_t = (threat_gnd_t + threat_air_t) / 2$$

- $ac_survival_rate_{iat}$: 전투기 기종 i 가 표적 t 를 공격 할 때의 생존확률(여기서 무장의 종류 a 와는 생존율은 무관하나 수리모형 구성을 위해 추가함)

$$ac_survival_rate_{iat} = psv_ac_i \cdot (1 - threat_tgt_t)$$

- $rdamage_t$: 표적 t 의 파괴 요구수준
- $prob_{iat}$: 전투기 i 가 무장 a 로 표적 t 를 파괴할 확률

- $ammo_price_a$: 무장 a 의 가격
- $Goal_destroy_value_G_g$: 표적군별 요구되는 목표파괴가치
- $Goal_survival_rate_I$: 투입되는 전투기군의 목표 생존율
- $Goal_price_ammo_A$: 공격에 사용되는 무장의 목표 비용
- $Total_ac_expect_number$: 총 전투기 투입 예상 대수
- $Partial_expect_number$: 무장 투입 예상 발수

3.2.3 결정변수

본 모형을 구성하는 결정변수는 항공기-무장-표적 할당여부를 나타내는 이진변수와 목표계획비에 사용되는 비음실수로 구성되며 다음과 같다.

- x_{iat} : 전투기 i 가 무장 a 를 장착하여 표적 t 를 공격하면 1, 아니면 0인 이진변수
- y_{ig} : 전투기 i 가 표적군 g 에 할당되면 1, 아니면 0, 이진변수
- $d_destroy_g^+, d_destroy_g^-$: 목표 파괴율에 대한 양의 편차와 음의 편차를 나타내는 비음실수
- $d_survival$: 목표 생존율에 대한 편차를 나타내는 비음실수
- d_price_a : 목표 무장비용에 대한 편차를 나타내는 비음실수

3.2.4 목적함수

목적함수에서 w_1, w_2, w_3, w_4 ($w_1 + w_2 + w_3 + w_4 = 1$)는 표적의 파괴율, 항공기 생존률, 무장의 비용과, 항공기의 가중치를 나타내며, 이는 작전 기획자의 의도를 반영하기 위해 상대적 중요도를 설정할 수 있도록 한다. 목표 제약식에 있는 편차 변수들의 합이 최소가 되게 하여 목표값에 가장 근접 할 수 있게 하였다. 식 (1)에서 표적파괴 요구수준은 양과 음의 결과를 나타낼 수 있도록 하였으나 항공기 생존율 및 무장비용이 목표수준 이상을 만족해야 하기 때문에 부족할 경우에 해당하는 단일변수를 적용하였다. 또한 각 비음실수 변수와 대응되는 매개변수값은 목표제약식에서 정규화된 결과값으로 평가할 수 있도록 하여 한 개의 변수가 모형의 전체 결과값에 집중적인 영향을 받는 것을 방지하도록 하였다.

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & w_1 \cdot \sum_{g \in G} (d_destroy_g^+ + d_destroy_g^-) \quad (1) \\ & + w_2 \cdot d_survival + w_3 \cdot \sum_{a \in A} d_price_a \\ & - w_4 \cdot \sum_{i \in I} \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} (ac_val_i \cdot x_{iat}) \end{aligned}$$

3.2.5 일반제약식

식 (2)는 전투기 기종별 최대 작전반경 내에 있는 표적만 공격할 수 있도록 제약하는 식이다. 식 (3)과 식 (4)는 표적 하나당 단일 종류의 전투기와 단일 종류의 무장을 할당하기 위한 것이며, 식 (5)는 전투기가 하나의 표적군에만 할당 되도록 하는 제약식이다. 표적군들은 서로 떨어져있기 때문에 하나의 전투기가 여러 표적군에 할당되는 것을 방지하기 위함이다. 식 (6)과 식 (7)은 표적군에 할당된 전투기 기종별로 공격할 수 있는 표적의 수를 차등 적용한 제약식이다. 식 (8)은 표적을 파

괴하기 위해서 표적별로 요구 파괴수준 이상을 만족시킬 수 있는 전투기와 무장을 할당하기 위한 것이다.

$$d \cdot x_{iat} \leq ac_max_dist_i \quad \forall i \in I, a \in A, t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{a \in A} x_{iat} \leq 1 \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{t \in T} x_{iat} \leq 1 \quad \forall i \in I, a \in A \quad (4)$$

$$\sum_{g \in G} y_{ig} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (5)$$

$$\sum_{t \in G_g} \sum_{a \in A} x_{iat} \leq 2 \cdot y_{ig} \quad \forall g \in G, \forall i \in I_1 \cup I_2 \quad (6)$$

$$\sum_{t \in G_g} \sum_{a \in A} x_{iat} \leq 1 \cdot y_{ig} \quad \forall g \in G, \forall i \in I_3 \cup I_4 \quad (7)$$

$$\sum_{a \in A} \sum_{i \in I} prob_{iat} \cdot x_{iat} \geq rdamage_t \quad \forall t \in T \quad (8)$$

3.2.6 목표제약식

식 (9)~식 (11)은 달성하고자 하는 목표제약식으로서 표적군별 표적들의 요망되는 파괴율과 이들 표적에 대해 할당되는 전체 공격 전투기의 생존율 그리고 무장 사용 비용을 무장별 목표값을 초과하지 않는 범위 내에서 무장을 할당하기 위해 설정된 제약식이다.

$$\frac{1}{[Total_value_g]} \sum_{i \in I} \sum_{a \in A} \sum_{t \in G_g} prob_hit_{ia} \cdot v_t \cdot x_{iat} + d_destroy_g^+ - d_destroy_g^- = Goal_destroy_rate_G_g \quad \forall g \in G \quad (9)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{a \in A} \sum_{t \in T} ac_survival_rate_{iat} \cdot x_{iat} + d_survival \geq Goal_survival_rate_I \cdot Total_ac_expect_number \quad (10)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{t \in T} ammo_price_a \cdot x_{iat} - d_price_a = Goal_ammo_price_A \cdot Partial_expect_number_a \quad \forall a \in A \quad (11)$$

4. 실험결과 분석

4.1 모형적용을 위한 입력자료 적용

4.1.1 파괴확률의 산출

본본 연구에서는 합동무기효과교범에 의한 파괴율 선정 방법(JMEM/AS open-end method)에 근거하여 파괴확률을 적용한다. 표적 파괴확률은 특정한 무기로 선정된 표적을 명중하였을 때 표적을 파괴시킬 확률로서 무장의 종류, 전투기의 무장투하 정확도, 투하 방식, 무장의 수량 및 표적의 성질이 결정되면 전력 계산 산출표를 활용하여 파괴 확률을 계산하고 있다(Yoon, 1988). 따라서 본 연구에서도 이러한 확률을 적용하여 표적군 내 단일 표적에 대한 항공기와 무장의 파괴확률을 <Table 1>과 같이 적용하였다.

4.1.2 전투기 가치 및 무장비용

전투기를 운용하는데 있어서 전투기 가치산출과 관련된 요소는 운영 유지비, 무기 획득비용, 보조 지원 장비, 제반시설 운영비 그리고 조종사에 대한 비용 등을 고려하여 산출할 수 있다. 하지만 본 연구에서 고려하는 전투기 가치는 임무 중 격추되었을 때 발생하는 비용이기 때문에 전투기 단가와 장착 장비만을 고려하였다. 공격에 사용되는 무장 역시 전투기와 동일하게 무장 단가만을 적용하였다. 그 비용은 <Table 2>와 <Table 3>에 제시된 바와 같다(Erwin, 2007).

Table 2. Cost of Aircraft Type(unit : \$1,000)

Types	Aircraft	Auxiliary equipment	Cost of Fuel
A Type	43,000	5,500	1,5
B Type	26,000	3,555	1
C Type	18,000	3,555	1
D Type	8,500	1,500	0.8

Table 3. Cost of Air Munitions(unit : \$1,000)

Type	Cost per unit
A1 : 2,000lbs GPS guidance bomb	28
A2 : 2,000lbs Laser guided bomb	12.5
A3 : 4 2,000lbs free fall bomb	3.1

Table 1. Probability of Target Destruction by Aircraft-Ammunition Composition

Aircraft Type	Munition Type	Target's List					
		Target 1	Target 2	Target 3	Target 4	Target 5	...
A type aircraft	Ammo A1	0.17	0.25	0.23	0.32	0.27	...
	Ammo A2	0.26	0.24	0.24	0.29	0.37	...
	Ammo A3	0.35	0.36	0.33	0.35	0.34	...
B type aircraft	Ammo A1	0.22	0.21	0.23	0.22	0.24	...
	Ammo A2	0.42	0.43	0.44	0.42	0.43	...
	Ammo A3	0.52	0.53	0.54	0.55	0.54	...
C type aircraft	Ammo A1	0.32	0.33	0.32	0.34	0.35	...
	Ammo A2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Ammo A3	0.65	0.64	0.63	0.62	0.64	...
Min destruction requirement rate		0.65	0.75	0.3	0.4	0.45	...

4.1.3 항공기의 생존율 분석

본 모형에서는 생존율을 고려하지만 반대로 손실률은 생존율에서 1.0을 뺀 값으로도 이해 할 수 있다. 좀 더 현실적인 생존 확률을 산출하기 위해 전투기 i 가 표적 t 를 공격할 경우 생존할 확률인 $ac_survival_rate_{iat}$ 는 전투기 기종별 고유 생존율과 표적 주변 위협을 고려한 생존율 $psv_ac_i \times (1 - threat_tgt_t)$ 의 곱으로 구성된다. 전투기 기종별 고유 생존율은 전투기 기종별로 전자전장비, 레이더, 데이터 링크 등 탑재장비의 성능의 차이로 인하여 적의 위협으로부터 생존할 확률이 다른 것을 착안하여 설정하였다. 적 위협($threat_tgt_t$)은 전투기 폭격으로부터 표적 t 를 보호하기 위한 적의 방공전력인 지대공 미사일(SAM, Surface to Air missile), 대공포(AAA, Anti-Aircraft Artillery gun) 등의 지상 위협수준과 적 요격기의 공중 위협수준을 반영한 것이다.

표적군의 전술적 가치에 따라 적이 방어하고 있는 수준이 다르므로 적 공중위협으로부터 격추될 확률($threat_air_j$)과 지상위협으로부터 격추될 확률($threat_gnd_j$) 표적군에 따라 다르게 적용하였다. 본 연구에서는 Griggs *et al.*(1997)이 사용한 생존확률을 응용하여 <Table 4>와 같이 적용한다.

Table 4. Aircraft kill Probability Per Targets

Target Group	Threat of air	Threat of ground
# 1	0.012	0.015
# 2	0.008	0.007
# 3	0.018	0.021
# 4	0.011	0.013

전투기 기종별로 보유하고 있는 탑재장비의 성능에 따라 적 위협을 인지하고 회피할 수 있는 능력이 다르기 때문에 전투기의 기종별 성능이 임무 중 생존확률에 영향을 미친다. 본 연구에서 사용되는 전투기 자체 방어능력 및 공격무장이 미치는 생존율은 공군 위계임모델인 AWSIM과 Tac-Thunder 자료를 참고하였으며, 연구 목적 및 군사보안의 문제로 인해 가상치로 재구성하여 적용하였으며 값은 <Table 5>와 같다.

Table 5. Survival Rate of Types of Aircraft

Type of aircraft	Survival rate
A Type	0.95
B Type	0.83
C Type	0.76
D Type	0.68

Table 7. Subject of Experiment and Goal Rate

Groups of target	Type of target			Enemy threat	Goal Destruction rate	Goal Survival rate
	High	Main	Other			
1	30%	40%	30%	Medium	70%	80%
2	40%	30%	30%	Medium	70%	
3	80%	20%	-	High	80%	
4	-	20%	80%	Low	60%	

계획된 공격 표적에 대한 파괴 요구수준 결정은 전쟁 지휘관의 결심사항이며 작전 성공 여부를 좌우하는 매우 중요한 요소이다. 이 사항은 전쟁 상황 및 전쟁 수행 지침에 의해서 매우 가변적이다. 따라서 적의 전체적인 전력을 분석하여 파괴 수준을 결정하여야 하며 각 표적별 파괴 요구수준은 군 교범을 참고하여 <Table 6>과 같이 설정하였다(Airforce, 2012).

Table 6. Required Destruction Rate Per Types of Target

Type of Target	Required Destruction rate	Remark
Other target	30~40%	Supporting facility
Main target	50~60%	Building, Bridge, Ground Force
High Value target	≥ 70%	Command & Control Post

4.2 모형적용 및 결과분석

4.2.1 모형의 해법 절차

본 연구 모형의 문제해결 과정은 데이터 처리 단계와 목표 계획법 적용 단계로 나누어진다. 우선 초기 각 표적군별 공격할 표적들의 중요도를 고려한 가치부여와 파괴 요구수준 그리고 가용 전투기 기종별 대수 및 공격무장 관련 데이터 파일을 작성한다. 이후 목표계획법 적용 단계에서는 목표계획법을 활용하여 최적해를 산출 후 필요시 가중치와 우선순위를 조정하여 산출된 결과에 대한 검증 후 불만족 시 가중치 및 목표치를 수정하여 다시 목표계획법으로 산출한다.

4.2.2 모형 실험계획

이 절에서는 수리모형 적용 실험을 통한 표적군 할당 결과에 대해 살펴본다. 본 실험에서 적용한 인스턴스는 가상 표적군 대상으로 세 가지 경우를 구분하여 실시하였으며 최적화 프로그램인 GAMS 23.3.3버전을 사용하였다. 실험대상으로 활용된 표적군 및 공격전력 관련사항인 목표값은 <Table 7>과 같이 설정하였다. 실험적용 인스턴스는 다음과 같이 설정하였다.

- 4개 비행기지(4개 기종)는 전투기를 각각 30여대씩(대대급) 보유하고 있다.
- 총 4종류의 공격무장이 있으며 각 전투기마다 무장 장착능력이 다르다.
- A, B 기종은 고성능 기종으로서 3종류의 공격무장 모두 장착 가능
- C, D 기종은 일반성능 기종으로서 고성능 A1 무장을 제외한 A2, A3 무장 장착가능

실험방법은 가중치 우선순위를 3가지 경우로 가중치값을 부여하여 수행한다.

조건 1(Case 1) : 표적파괴율 > 전투기생존률 > 무장비용

조건 2(Case 2) : 전투기생존률 > 표적파괴율 > 무장비용

조건 3(Case 3) : 표적파괴율 = 전투기생존률 = 무장비용

본 실험을 통해 제시된 모형이 가중치에 따른 목표값이 근접하여 올바른 전력할당이 이루어지는지 여부를 검증한다. 무장비용의 가중치를 최우선으로 설정하여 실험하지 않은 이유는 상식적으로 무장비용의 달성 목표가 항공기 생존율과 표적의 파괴율 목표 달성보다 우선시 될 수 없기 때문이다.

4.2.3 실험 결과 및 분석

<Table 8>은 조건 1에 대한 실험 결과이며, 각 표적군에 대해 기종별 출격 횟수, 사용무장량, 그리고 목표값 대비 표적 파괴율과 항공기 생존률에 대해 각각 보여주고 있다. <Table 8> 표 아래 부분은 기종별 출격횟수의 합과 사용된 무장별 총 투입량을 나타낸 것이다.

<Table 9>는 표적군의 파괴 효과를 나타낸 것이며, 조건 1의 실험결과는 목표값(60%) 대비 다른 조건 대비 최소값이 1.5%에 근접한 결과를 보이고 있다. 이는 파괴효과에 가중치를 높게 된 당연한 결과이다.

마찬가지로 <Table 10>에서 보는 바와 같이 전투기 생존율에 우선 가중치를 둘 경우는 고성능 기종인 A, B 전투기를 다른 경우에 비해 상대적으로 많이 투입한 결과를 볼 수 있다.

Table 9. Results of Destructive Rate for Each Experimental Cases

Experimental Condition	Target Group (Goal unit : %)				Total Average
	#1(70)	#2(70)	#3(80)	#4(60)	
Case 1	68%	69%	83%	54%	68.50%
Case 2	64%	65%	78%	52%	64.75%
Case 3	65%	62%	71%	52%	62.50%

Table 10. Survival Rate and Number of Sorties for Each Experimental Cases

Experimental Condition	GOAL	Types of Aircraft				Total # of sorties
		A	B	C	D	
Case 1	77%	16	18	22	14	70
Case 2	83%	22	26	14	6	68
Case 3	74%	22	24	10	16	72

위의 실험결과는 임의의 작전 한 시점에서의 작전기획자들의 판단 상황을 나타내는 것으로서 작전의 지속적이고 연속적인 상황을 고려할 때 매번 최선의 전력을 투입하기에서는 현실적으로 많은 제한사항이 따를 것이다. 아울러 전투기 및 항공탄약 등 자원의 제약 또한 항상 수반되기 때문에 차선의 대비책을 마련해야 한다. 이러한 관점에서 제시된 모형은 현실적 상황과 자원 제약을 고려한 적정 공격편대군 구성에 적합함을 알 수 있다.

Table 8. Result of Experiment(Priority : Goal Destruction rate first)

Section	Air strike package						Destruction Rate (Goal)	
	Aircraft Allocation		Sub-total Sorties	Air ammunition				
				A1	A2	A3		
Group of target 1 (Main)	A type	4	18	-	4	4	68%(70%)	
	B type	6		-	4	8		
	C type	4		8	4	-		
	D type	4		-	4	-		
Group of target 2 (Main)	A type	4	18	-	-	8	69%(70%)	
	B type	4		-	-	8		
	C type	6		-	12	-		
	D type	4		8	4	-		
Group of target 3 (High)	A type	6	20	-	4	12	83%(80%)	
	B type	6		-	-	18		
	C type	6		8	8	-		
	D type	2		-	4	-		
Group of target 4 (Other)	A type	2	14	-	4	-	54%(60%)	
	B type	2		8	4	-		
	C type	6		8	8	-		
	D type	4		-	8	-		
Used Resources	A type	B type	C type	D type	A1	A2	A3	Survival Rate
	16	18	22	14	40	72	58	

4.3 실제 사례 비교 분석

제시된 모형의 타당성 검증을 위해 실제 사례 비교를 통한 분석을 수행한다. 매년 공군에서 실시하고 있고 있는 Max-Thunder 훈련에서 적용하는 공격편대군 조합과 본 수리모형이 도출한 결과를 살펴본다. 세부적인 공격전력 및 작전적 효과분석은 군사 보안상의 이유로 제한되어 본 연구에서 사용한 표적의 파괴율 및 아군 전투기의 생존율에 대한 목표값을 기준으로 적정 공격편대군 구성의 차이만을 살펴보았다.

실험결과는 <Table 11>과 같으며 전반적인 전투기 출격횟수 및 무장사용량은 유사하며, 투입 전력측면에서 다양한 항공기와 무장조합을 통해 좀 더 저렴한 자원 할당의 결과를 나타남을 알 수 있다. 비교결과를 통하여 본 연구의 모형이 공군 현행작전에도 활용될 수 있음을 보여주었다. 한 예로서 세 번째 표적군에 할당된 항공기와 무장을 비교해 보면 제안한 모형의 결과는 중급 전투기인 B-Type이 10% 감소되고, 상대적으로 저급인 C-Type이 10% 추가되었고, 고비용인 A3-Type 무장이 15% 감소되고 비용이 저렴한 A1-Type 무장이 15% 증가되었음을 알 수 있다.

Table 11. Comparison of Force allocation(unit : %)

	Max-Thunder Exercise					
	Aircraft			Air-munitions		
	A	B	C	A3	A2	A1
Group of target 1	70	30	-	65	35	-
Group of target 2	80	20	-	70	30	-
Group of target 3	50	30	20	55	45	-
Group of target 4	40	30	20	45	55	-
	Proposed Model					
	Aircraft			Air-munitions		
	A	B	C	A3	A2	A1
Group of target 1	60	20	20	60	40	-
Group of target 2	70	20	10	55	45	-
Group of target 3	50	20	30	40	45	15
Group of target 4	30	30	40	40	50	10

5. 결론 및 향후 연구방향

본 연구에서는 목표계획법을 이용하여 표적군별 적합한 공격편대군 조합을 제시하였다. 목표계획법은 서로 대립된 속성의 목표들을 충족시킬 수 있는 최적 가능해를 도출할 수 있기 때문에 다양한 고려요소와 달성목표들이 존재하는 전투에서 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 또한 최적화 프로그램을 활용한 자동화 할당 기법을 적용함으로써 임무 계획관의 업무로드를 줄이고 좀 더 신속하게 합리적인 전력구성을 위한 의사결정이 이루어질 수 있을 것이다.

기존의 공격편대군 할당모형들은 대부분 단일 표적군을 대상으로 표적할당을 실시하였다. 하지만 현실적으로 전쟁 중 수많은 표적군들이 지역에 따라 생성될 가능성이 매우 높으며, 경우에 따라 여러 표적군을 동시에 공격해야하는 상황이 빈번하게 발생할 것이다. 따라서 본 모형을 활용하여 다수 표적군을 대상으로 전력할당을 실시할 수 있으며, 표적 파괴와 전투기 생존율, 공격무장 비용과 같은 서로 상충되는 목표치와 상황에 따른 가중치를 설정하여 달성하고자 하는 목표에 가장 근접한 합리적인 최적해를 도출할 수 있을 것이다.

하지만 본 연구 모형이 실제 전쟁 상황에 좀 더 효과적으로 적용되기 위해서는 보완되어야 할 요소들이 있다. 첫째, 본 연구에 포함되지 않은 공격편대군의 추가 구성요소인 공중엄호기, 대공제압기, 전자전기, 공중급유기 등을 고려할 수 있어야 한다. 이들 추가 구성요소들은 공격편대군 생존율 및 파괴율 달성에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 위 요소들이 고려된다면 좀 더 실질적인 공격 편대군 전력을 할당할 수 있을 것이다. 둘째, 실시간으로 표적군의 상황을 고려하여 임무시간, 최적 비행경로, 공격순서 등의 조건이 반영된 전력을 할당할 수 있어야 한다. 시간에 따라 매우 가변적인 전쟁상황을 최대한 고려한 공격전력이 투입됨으로써 좀 더 효과적인 전력운용이 가능하기 때문이다. 이들 보완요소 해결을 통하여 좀 더 현실에 근접한 모형이 연구되길 기대해 본다.

참고문헌

- Ahuja, R. K., Kumar, A., Jha, K., and Orlin, J. B. (2007), Exact and heuristic methods for the weapon target assignment problem, *Operations Research*, **55**(6), 1136-1146.
- Airforce Head Quarter (2012), *Air Target Processing*, Korea Armed Forces Printing and Publishing Department, Daejeon, Korea.
- Brown, G. G., Coulter, D. M., and Washburn, A. R. (1993), *Sortie optimization and Munitions planning*, Naval Postgraduate School Research Paper, Monterey, CA.
- Choi, H.-J., Seo, J.-B., and Kim, Y.-D. (2010), Task Assignment of Multiple UAVs using MILP and GA, *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, **38**(5), 427-436.
- Eiselt, H. A. and Sandblom, C.-L. (2007), *Linear programming and its applications.*, Springer.
- Griggs, B. J., Parnell, G. S., and Lehmkühl, L. J. (1997), An air mission planning algorithm using decision analysis and mixed integer programming, *Operations Research*, **45**(5), 662-676.
- Jaiswal, N. K. (1997), *Military Operations Research : Quantitative Decision Making*, Kluwer Academic Publisher, Boston.
- Kalvelgen, E. (2007), *Solving Multi-Objective Models with GAMS*, The War, New York.
- Lee, D.-R. (2008), The Optimal Allocation of Aircrafts to Targets by Using Mixed Integer Programming, *The Korean Operations Research and Management Science Society*, **25**(1), 56-70.
- Lee, H. and Kim, S.-H. (2015), A Study on Aircraft-Target Assignment Problem in Consideration of Deconfliction, *The Korean Operations Research and Management Science Society*, **32**(1), 49-63.

- Lemus, F. and David, K. H. (1963), An optimum allocation of different weapons to a target complex, *Operations Research*, **11**(5), 787-794.
- Rosenberger, J. M., Hwang, H. S., Pallerla, R. P., Yucel, A., Wilson, R. L., and Brungardt, E. G. (2005), *The generalized weapon target assignment problem*, 10th International Command and Control Research and Technology Symposium the Future of C2, Mclean, VA.
- Ryu, H.-M. and Lee, M.-G. (2014), A study of Allocation of Military Airspace and Range Using Goal Programming, *The Korean Operations Research and Management Science Society*, **40**(2), 63-77.
- Stanley, Z. (1974), *Linear and integer programming*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Yoon, H. W. (1988), *A study on allocation of aircrafts to minimize the threat of enemy fixed targets*, Korea National Defense Univ, Master Thesis.