

# 장갑차량의 개념설계를 위한 대안분석에서의 응답표면분석법 적용

## Application of Response Analysis to Trade-off Methods for the Conceptual Design of Armored Vehicle

신용석\*      이희각\*\*      김진우\*\*\*  
Shin, Yong-Seok, Lee, Hee-Gag, Kim, Jin-Woo

### ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a method of applying response surface analysis to trade-off techniques for the conceptual design of armored vehicle. The problem areas of concern are the use of this method in the selection of optimum design points when user requirements are in conflict. The application of this method to trade-offs of performance parameters in terms of weight are presented.

주요기술용어: 대안분석(Trade-Off Analysis), 응답표면분석(Response Surface Analysis), 개념설계(Conceptual Design)

### 1. 서론

다양하고 복잡해지는 현대 무기체계의 개발환경에서 동시공학 이론의 적용은 제한된 조건하에서 사용자의 요구사항을 최적화 하여 무기체계의 성능개량 및 개발에 있어 비용 절감과 개발기간 단축이라는 궁극적 목표에 접근할 수 있게 한다.

본 연구에서는 동시공학 적용기법 중 사용자 요구사항을 최적화 하기 위한 대안분석에 응답표면분석법(Response surface analysis)을 적용하여 손쉽게 사용자 요구조건의 충족 및 최적화 된 ROC 도출을 가능케

할 수 있는 응답모델(Response model) 대안분석 방법을 개발하였다.

대안분석은 설계 개념의 대안들을 선택된 기준과 제약조건에 의해 평가하고, 우선 순위가 높은 성능 요소의 향상을 위해 보다 덜 중요한 성능 요소를 상대적으로 희생시켜 중요한 성능이 발휘될 수 있도록 하는 설계 개념을 제시하는데 그 목적이 있다.

대안분석 기법에서의 사용자 요구사항은 주요 제약 조건과 성능인자로 나눌 수 있으며, 무기체계 획득시 최초 사용자 요구는 개략적인 ROC가 되고 전투중량 및 비용 등이 중요 제약조건에 해당된다.

본 연구에서는 전투중량을 제약조건으로 선정하여 여러 문헌<sup>(1,2,3)</sup>을 통해 발표되었던 장갑차량의 전투중량 방정식을 토대로 성능인자간의 대안분석을 수행하였으며, 장갑차량의 성능인자로는 승무원 수, 항속거

\* 군사과학대학원 무기공학과 부교수

\*\* 군사과학대학원 무기공학과 교수

\*\*\* 군사과학대학원 무기공학과 교수

리, 톤당 마력, 주포의 포구에너지, 탄약 적재량, 평균 장갑두께가 고려되었다.

기존에 사용되었던 대안분석 기법<sup>(3,4)</sup>에서는 먼저 전투중량 방정식에서 한 개의 성능인자를 변수로 하고, 나머지는 사용자 요구조건에서 지정한 값을 대입하여 하나의 성능인자 변수와 전투중량과의 관계를 구함으로써 사용자 제약조건에 적합한 각 성능인자별 대안 값들을 도출하였다. 그런 다음 2개 성능인자들의 조합을 전체 성능인자를 대상으로 구성하고, 일정한 전투중량에 대한 두 인자간의 상관관계를 분석하여 실현 가능한 대안을 선정하는 방법이 사용되었다. 이러한 대안분석기법에서는 전체 성능인자에 대해 동시에 대안분석을 수행하기가 곤란할 뿐만 아니라 각각의 성능인자별 대안 분석을 수행하여야 하므로 분석해야 할 성능인자의 수가 증가할수록 분석과정의 복잡성 또한 증가하게 되어 효율적인 대안분석을 어렵게 한다.

따라서 본 연구에서는 사용자 요구조건에서 각각의 성능인자 변화량이 전투중량에 미치는 영향을 전체 성능인자에 대해 동시에 분석할 수 있고, 주요 성능인자의 결정과 그에 따른 전투중량의 변화 정도를 예측할 수 있는 응답모델 대안분석 방법을 제시하였다.

## 2. 전투중량 방정식

전투중량을 기준으로 대안분석 기법을 적용하기 위해서는 총 중량에 대한 성능인자의 상호관계를 나타낸 중량방정식을 필요로 한다. 총 중량은 주요 구성품의 중량을 합산하여 구하게 되며, 각 구성품의 중량과 성능인자간의 관계를 규정한 장갑차량의 전투중량 방정식<sup>(1,2)</sup>은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} W = & 265C + 1252 \times 10^{-6}E + 684 \\ & + (12.42 \times 10^{-6}E + 1.83)N + 700 \\ & + 0.1272W - 309 + 0.2332W - 527 \\ & + 0.005268HW + 1185 + 0.0001263RW \\ & + 39.075T \{ 47C + 8.571 \times 10^{-6}E \\ & + (0.1823 \times 10^{-6}E - 0.0392)N \\ & + 67.2 \times 10^{-6}HW + 2.381 \times 10^{-6}RW \\ & + 97.1 \} + 1638 \end{aligned}$$

이 식을 전투중량, W에 대하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} W = & \frac{V_1}{V_2}, \\ V_1 = & 3371 + 265C + 1.252 \times 10^{-3}E \\ & + (12.42 \times 10^{-6}E + 1.83)N \\ & + 39.075T \{ 47C + 8.571 \times 10^{-6}E \\ & + (0.1823 \times 10^{-6}E - 0.0392)N + 97.1 \} \\ V_2 = & 0.6396 \\ & - (5.268 \times 10^{-3} + 2.6274 \times 10^{-3}T)H \\ & - (0.1894 \times 10^{-3} + 93.0376 \times 10^{-6}T)R \end{aligned}$$

## 3. 응답표면분석법

여러 인자의 변화에 따라 복잡하고 다양한 결과를 갖는 공학적인 문제들은 선형 혹은 비선형 회귀분석법(regression analysis)을 이용하여 여러 독립변수들로 구성된 하나의 방정식으로 표현될 수 있다. 이 방정식에서 종속변수에 대한 독립변수들의 함수관계를 그래프로 표현한 것이 응답표면(response surface)이다. 문제의 결과에 영향을 미치는 인자들에 대한 응답모델(response model)을 구하기 위해 인수분석(factorial analysis)과 회귀분석을 이용한 통계적인 처리과정을

수행하고 응답모델의 최적 조건을 찾는 기법이 응답 표면분석법<sup>(5)</sup>이다.

인수분석 과정을 수행하기 위해 각 독립변수 값들은 일정한 크기의 범위에서 그 중심값과 변화폭에 대한 비례인자(scale factor)를 이용하여 -1과 +1 사이의 값을 갖는 변수인자로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$x_i = \frac{X_i - X_{oi}}{X_{si}} = \frac{\text{독립변수값} - \text{중심값}}{\text{비례인자}}$$

이렇게 생성한 변수인자들을 이용하여 변수인자들의 조합형을 구성하고, 각 조합별 종속변수 값의 결과를 회귀분석 처리하여 하나의 방정식 형태, 즉 변수인자에 대한 응답모델로 나타낼 수 있다.

독립변수가 3개인 경우,  $m^3$ 개의 조합형을 구성할 수 있으며, 이때  $m$ 은 변수인자의 값을 0을 중심으로 대칭 되게 나눈 구간의 수에 1을 더한 값이 된다. 기본적인 구조인 변수인자의 최대값과 최소값을 이용할 경우 표 1과 같이  $2^3$ 개의 단위크기를 갖는 변수인자들의 조합형이 구성된다.

[표 1] 변수인자의 조합형과 응답값 구성

Run No.	Level of factor						$y_i$
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	$y_1$
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	$y_2$
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	$y_3$
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	$y_4$
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	$y_5$
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	$y_6$
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	$y_7$
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	$y_8$

이 경우 응답모델은 두 변수사이의 상호영향(interactions)항을 포함하여 변수인자의 새로운 함수관계로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3$$

위의 식에서 매개변수  $b_i$ 값들을 구하기 위한 연립 방정식의 행렬 형태는 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} n & \sum x_1 & \sum x_2 & \cdots & \sum x_2x_3 \\ \sum x_1 & \sum x_1^2 & \sum x_1x_2 & \cdots & \sum x_1x_2x_3 \\ \sum x_2 & \sum x_2x_1 & \sum x_2^2 & \cdots & \sum x_2^2x_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum x_2x_3 & \sum x_1x_2x_3 & \sum x_2^2x_3 & \cdots & \sum x_2^2x_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y \\ \sum yx_1 \\ \sum yx_2 \\ \vdots \\ \sum yx_2x_3 \end{bmatrix}$$

여기서 다루어지는 변수인자,  $x_i$ 는 0을 중심으로 대칭 되는 -1과 +1의 값만을 갖게되므로 변수인자 조합형에 대한 합산 결과에서 왼쪽 행렬은 오직 대각선 항 만이 존재하게 되어 매개변수,  $b_i$ 값들은 다음과 같이 간단하게 구할 수 있다.

$$b_i = \frac{\sum yx_i}{\sum x_i^2} = \frac{\sum yx_i}{n}$$

이때  $b_1 \sim b_{23}$ 의 값을 각각 대응되는 변수인자의 비례인자로 나누면 다음과 같이 독립변수 중심값에서의 단위변화량에 대한 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$y = b_0 + b'_1\Delta x_1 + b'_2\Delta x_2 + b'_3\Delta x_3 + b'_{12}\Delta x_1\Delta x_2 + b'_{13}\Delta x_1\Delta x_3 + b'_{23}\Delta x_2\Delta x_3$$

따라서 위와 같이 변환된 응답모델에서 독립변수 단위 변화량에 대한 응답값,  $y$ 를 전투중량으로 나타내면 매개변수 값의 크기를 비교함으로써 주요 성능인자를 결정할 수 있고, 각 성능인자의 변화량이 전투중량에 미치는 영향을 예측할 수 있다.

### 4. 대안분석 결과

대안분석에 응답모델을 어떻게 활용하는가를 보이기 위하여 모델 T71 장갑차량에 대한 사용자 요구조건을 예로 선정하였다. 주어진 구속조건은 전투중량이 40,000lb이고, 기술적 요구조건으로부터 도출한 성능인자의 값이 표 2와 같다고 가정하였다.

[표 2] 기술적 요구조건에서의 성능인자 제원

구분	제원
승무원 수	C = 4 명
톤당 마력	H = 18.62 bhp/ton
항속거리	R = 165 miles
포구에너지	E = 2.08×10 <sup>6</sup> ft-lb
탄약 적재량	N = 63 발
평균장갑두께	T = 0.85 in
전투중량	W = 42,910 lbs

6개의 성능인자를 변수인자로 변환하기 위해 임의로 비례인자를 각 성능인자의 1%되는 값으로 정하면, 표 3과 같이 최대값과 최소값을 설정할 수 있다.

[표 3] 성능인자의 변화폭 및 비례인자

성능인자	Design center	Lower level	Upper level	Scale factor
C	4.0	3.96	4.04	0.04
H	18.62	18.434	18.806	0.186
R	165	163.35	166.65	1.65
E	2.08	2.059	2.101	0.021
N	63	62.37	63.63	0.63
T	0.85	0.842	0.859	0.009

6개의 변수인자들로 구성되는 2<sup>6</sup>개의 조합형에서 +1로 표시되는 변수인자는 해당되는 성능인자의 최대값을, -1로 표시되는 변수인자는 성능인자의 최소값을 전투중량방정식에 대입하여 전투중량을 구한 후, 회

귀분석을 실행하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 W^R = & 42910.4 + 4007.9\Delta C + 706.5\Delta H + 25.3\Delta R \\
 & + 5927.3\Delta E + 85.5\Delta N + 33870.2\Delta T \\
 & + 66.0\Delta C\Delta H + 2.4\Delta C\Delta R + 0.0\Delta C\Delta E \\
 & + 0.0\Delta C\Delta N + 4596.2\Delta C\Delta T + 0.8\Delta H\Delta R \\
 & + 97.6\Delta H\Delta E + 1.4\Delta H\Delta N + 904.7\Delta H\Delta T \\
 & + 3.5\Delta R\Delta E + 0.1\Delta R\Delta N + 32.3\Delta R\Delta T \\
 & + 40.5\Delta E\Delta N + 2556.2\Delta E\Delta T + 41.2\Delta N\Delta T
 \end{aligned}$$

위에서 상수항은 전체 성능인자 중심값에서의 전투중량을 나타내며, 1차 항의 매개변수 값들은 전투중량 방정식으로부터 구할 수 있는 각 성능변수 중심값에서의 기울기와 같게 된다. 이때 비례인자의 크기를 작게 할 수록 전투중량 방정식으로부터 직접 구하는 값에 근접하게 된다.

매개변수 값의 크기를 비교할 때, 성능인자의 단위 크기 변화량에 따라 전투중량에 제일 큰 영향을 미치는 성능인자는 평균장갑두께(T)이며, 그 다음은 포구에너지(E)와 승무원 수(C)의 순서인 것을 알 수 있다.

전투중량의 변화에 영향이 적은 항을 소거하면 기술적 요구조건에서의 중량관계식을 다음과 같이 응답모델의 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 W^R = & 42910.4 + 4007.9\Delta C + 706.5\Delta H + 25.3\Delta R \\
 & + 5927.3\Delta E + 85.5\Delta N + 33870.2\Delta T \\
 & + 66.0\Delta C\Delta H + 4596.2\Delta C\Delta T + 97.6\Delta H\Delta E \\
 & + 904.7\Delta H\Delta T + 32.3\Delta R\Delta T + 40.5\Delta E\Delta N \\
 & + 2556.2\Delta E\Delta T + 41.2\Delta N\Delta T
 \end{aligned}$$

대안분석의 한 예로서, 사용자의 구속조건을 만족하며, 기동성 향상을 위해 승무원 수와 탄약 적재량을 줄이는 대신 톤당 마력과 항속거리를 늘리는 대안을 위의 관계식을 이용하여 표 4와 같이 설정할 수 있다. 이때 포구에너지와 평균장갑두께를 고정하면 이들의

[표 4] 기동성 향상을 위한 대안분석

구분	구분	$\Delta$ 성능인자		$\Delta W$
고정	E=2.08×10 <sup>9</sup>	$\Delta E$	0	0
	T=0.85	$\Delta T$	0	0
1안	C=3	$\Delta C$	-1	-4007.9
	H=20.67	$\Delta H$	2.05	1448.3
	R=180	$\Delta R$	15	379.5
	N=56	$\Delta N$	-7	-598.5
		$\Delta C\Delta H$	-2.05	-135.3
		$W^R = 39997$ $W = 40007$		
2안	C=3	$\Delta C$	-1	-4007.9
	H=21.75	$\Delta H$	2.05	1448.3
	R=200	$\Delta R$	15	379.5
	N=42	$\Delta N$	-7	-598.5
		$\Delta C\Delta H$	-2.05	-135.3
		$W^R = 39997$ $W = 39992$		

[표 5] 화력 향상을 위한 대안분석

구분	구분	$\Delta$ 성능인자		$\Delta W$
고정	E=2.50×10 <sup>6</sup>	$\Delta E$	0	0
	T=0.85	$\Delta T$	0	0
	C=3	$\Delta C$	0	0
1차	H=18.0	$\Delta H$	-0.62	-422.5
	R=150	$\Delta R$	-15	-366.0
	N=57	$\Delta N$	-6	-615.0
		$W^R = 39988$ $W = 40014$		
2차	H=18.0	$\Delta H$	0	0
	R=149.4	$\Delta R$	-0.6	-13.9
	N=57	$\Delta N$	0	0
		$W^R = 40000$ $W = 40000$		

응답모델은 아래와 같이 구해진다.

$$W^R = 40014.1 + 646.5\Delta H + 23.1\Delta R + 100.6\Delta N$$

따라서 사용자의 요구조건에서 제시하는 성능인자 값을 기준으로 각 인자의 변화량에 대한 응답모델을 구성하면, 사용자 관점의 성능 및 기능에 대한 중요도를 토대로 전체 성능인자의 영향을 동시에 고려하여 사용자 요구사항에 근접한 최적의 대안 설정이 가능한 대안분석을 수행할 수 있다.

변화량과 관련 있는 항은 0이 된다.

또 다른 예로, 화력을 보장시키기 위해 포구에너지를 2.5×10<sup>6</sup>ft-lb로 향상시키는 대신 승무원 수를 3명으로 줄이고, 평균장갑두께를 고정할 경우의 대안 분석을 위해 나머지 3개의 성능인자만을 대상으로 새로운 응답모델을 구하면, 전투중량의 변화에 영향이 적은 항을 소거하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W^R = 41391.4 + 681.5\Delta H + 24.4\Delta R + 102.5\Delta N$$

이 모델에 의해 대안분석을 시행한 결과 표5의 1차 분석에서 보는바와 같이 응답모델의 결과와 전투중량 방정식의 결과에 차이점이 발생하였으며, 이는 응답모델에서 소거시킨 항의 영향이나 반올림 오차로 추정된다. 이 경우 순차적 접근 방법으로 1차 대안분석에서 구해진 성능인자들을 중심값으로 하여 다시 응답모델을 구해 대안분석을 실시하면 표 5의 2차 분석과 같은 결과를 얻을 수 있다. 2차 대안분석을 위한

## 5. 결 론

본 연구에서는 여러 문헌을 통해 발표된 장갑차량의 전투중량 방정식을 토대로 전투중량에 미치는 전체 성능인자의 영향을 동시에 고려할 수 있는 대안분석 방법을 응답표면분석법을 적용하여 개발하였다.

본 연구의 응답모델 대안분석 방법에서는 사용자

요구조건에서 제시하는 성능인자 값을 기준으로 각 인자의 변화량에 대한 전투중량의 응답모델을 구성하여 매개변수 값의 크기를 비교함으로써 주요 성능인자를 결정할 수 있었고, 각 성능인자의 변화량이 전투중량에 미치는 영향을 예측하여 최적의 대안을 도출할 수 있었다.

응답모델 대안분석 방법을 모델 T71 장갑차량에 대한 예제 문제에 적용한 결과, 기존의 대안분석기법에서 개별 성능인자에 대한 대안분석으로 인해 성능인자의 수가 증가할수록 분석과정이 복잡해질 수밖에 없는 비효율성을 극복할 수 있었으며, 사용자 관점의 성능 및 기능에 대한 우선 순위에 따라 전체 성능인자에 대해 동시에 또는 순차적 접근방법으로 최적의 대안을 도출할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. J. M. Owen et. al., "Application of Trade-Off Methods to Armored Vehicle Design Evaluation", DDC, Virginia, 1963
2. 이희각, "전투차량의 중량감소시 요구운용능력에 미치는 효과", 화랑대연구소, 1995
3. 김진우, 소한균, "차세대 주력전차의 개념설계를 위한 동시공학의 적용", 한국군사과학기술학회지 Vol. 2, No. 1, 1999, pp. 38-60
4. 선승규, 이희각, 김충관, "IFV의 ROC 도출을 위한 동시공학기법의 적용", 한국군사과학기술학회지 Vol. 2, No. 1, 1999, pp. 19-29
5. G. E. Dieter, "Engineering Design : A Materials and Processing Approach", McGraw-Hill, 1983, pp. 428-435