

EQPS를 이용한 복합장갑의 해석 및 최적설계

The analysis and optimization of dual armor plate considering EQPS

박명수* 유정훈** 정동택***
Park, Myungsoo Yoo, Jeonghoon Chung, Dong-Teak

ABSTRACT

For the precise analysis of high velocity impact problem through FEM with element erosive method, the adequate mesh size and critical equivalent plastic strain(EQPS) is chosen prior to the simulation. In this research, it is strongly required from a standpoint that critical EQPS is used to decide whether perforation occurs or not. The optimization of dual armor plate consisting of 4340 steel and 2024 aluminium against a die steel sphere with high-velocity has been suggested using Lagrangian explicit time-integration code, NET2D. The response surface method based on the design of experiment is utilized for the size optimization. The optimized thickness of each layer, in which perforation does not occur, the strength of multi-layer is maximized and total weight is minimized, is obtained at a constant velocity of a pellet with a designated total thickness.

1. 서론

고속 충돌 및 파괴해석은 크게 실험적 방법, 해석적 방법, 수치모사 방법으로 나뉘어 진다. 이중 실험적 방법은 정확한 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있어 과거에는 대부분의 연구가 이를 통해 이루어졌다. 그러나 이는 원하는 공학적 수치들을 얻기가 어렵고, 또한 충돌체가 어느 수준 이상의 속도로 진행되는 경우 등에는 안전상의 문제로 실험 자체가 어렵다는 단점이 있다. 반면에 수치모사 방법은 실험적 방법으로는 구현이 힘든 복잡한 형상이나 초고속 충돌과 같은 한계상황에 대해서도 해석이 가능하다.⁽¹⁾ 이러한 이유로 인해 최근에는 수치모사를 이용한 연구가 많은 학자들에 의해 활발히 진행 중이다. 특히 각 시간 단계별로 모델의 해석을 필요로 하는 충돌 현상을 위해서는 여러 수치 모사법 중 외연적 시간적분 유한요소법(Explicit Time-Integration Finite Element Method)이 유용하게 쓰일 수 있다.

이미 Yoo 등은 시간적분 유한요소법을 이용한 2차원 해석 코드인 NET2D를 통해 고속변형 문제^(2,3) 및

* 회원·연세대학교 대학원 기계공학과 석사과정

** 연세대학교 기계공학부 교수

*** 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 교수

Table 1. 존슨-쿡 모델에서의 알루미늄 물성치 (단위: *Gpa, mm, mg, μs, °C*)

	A	B	C	n	m
알루미늄	0.265	0.426	0.015	0.34	1.00

고속 충돌에 의한 파괴문제⁽⁴⁾를 해석하였다. 또한, 3차원 해석 코드인 NET3D도 그 이후에 개발되어 고속 경사충돌에 관한 해석에 이용되었다.⁽⁵⁾ 그 후 Yoo⁽⁶⁾ 등은 steel제질의 두께 층으로 이루어진 구조체의 장갑능력에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구에서는 전면부와 후면부 판재의 전체 두께 합은 일정하게 유지한 상태에서 두 판재의 두께비를 조절한 결과, 충돌체에 대한 상대속도가 느린 후면부 판재의 두께가 두꺼워질수록 장갑 능력이 향상되는 경향성을 파악하였다. Yoon⁽⁷⁾ 등은 NET2D를 이용하여 수직 충돌을 받는 다중판재를 해석하였다. 이 연구에서는 지금까지의 최적화가 정적 문제에 국한되어 왔던 것을 대표적인 동적, 비선형 문제인 고속 충돌을 받는 판재에 적용할 수 있는 방법론을 제시하고자 한다. 또한 2차원 해석 코드인 NET2D를 이용하여, 구 관통자와 Al 및 Steel로 이루어진 복합장갑 사이에 일어나는 충돌현상을 등가소성변형률을 고려한 수치 모사법을 통하여 실제 충돌 현상과 일치하는 해석결과를 얻을 수 있는 방법론을 제시하고, 이를 토대로 장갑 구조의 경량화와 강성 향상을 위한 최적화를 수행하고자 한다.

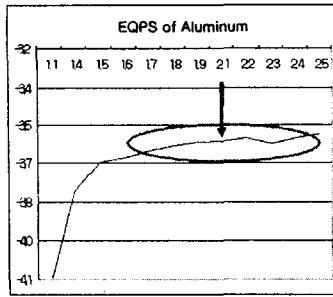
2. 고속 충돌

2.1 재료 모델링

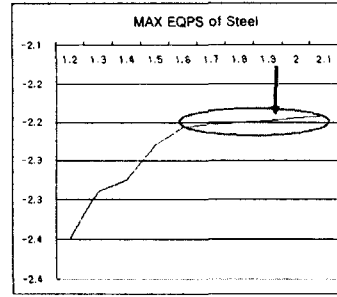
고속 충돌을 받는 판재는 선형구간을 넘어서는 비선형 변형을 한다. 특히 고온을 동반한 소성 변형을 하기 때문에 이를 적절히 표현할 수 있는 구성방정식의 선택이 필수적이라 할 수 있다. 여러 가지 구성방정식 중 변형률 경화효과, 변형률 속도 경화 효과, 열적 연화 효과 등의 온도와 관련된 변화를 적절히 표현할 수 있는 구성방정식으로 존슨-쿡 모델이 널리 사용되고 있다. 존슨-쿡 모델은 여러 가지 다양한 효과를 비연성화하여, 많은 파라미터를 독립적으로 조절할 수 있도록 되어있다. 또한 수치적으로 강건하여, 손쉽게 시뮬레이션 코드에 적용할 수 있어 금속체의 충돌문제에 관련된 해석에 매우 용이하게 쓰일 수 있다.⁽⁸⁾ 실제로 Jablokov⁽⁹⁾ 등은 온도와 변형률의 변화에 따른 강의 변형을 모델링하기 위해 존슨-쿡 모델링 기법을 사용하였다. Hubert⁽¹⁰⁾ 등도 존슨-쿡 모델링 기법의 장점을 기술하고, 이를 이용하여 1200m/s 이상의 고속 충돌을 받는 티타늄 합금을 모델링 하였다. 또, 이를 토대로 하여 시뮬레이션을 한 결과와 실제 실험 결과와 잘 부합하는 것을 알 수 있었다. 이 연구에서도 복합 판재 중 알루미늄의 모델링을 위해서 식(1)로 나타낼 수 있는 존슨-쿡 모델을 구성방정식으로 사용하였다.

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}) \left(1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \right)^m \right) \quad (1)$$

여기서 A, B, C, n, m 은 각각 각 재료에 따른 물성치를 나타내고 이에 해당하는 값은 Table 1에 표시하였다.⁽¹¹⁾ σ_y 는 항복응력, $\varepsilon, \dot{\varepsilon}$ 은 각각 소성변형률과 소성변형률 속도를 나타낸다. 또, T_{ref} , 그리고 T_{melt} 는 각각 기준 온도, 녹는점을 의미한다. 판재의 두 번째 재료인 철의 모델링을 위해서는 이미 실험을 통해 검증된 데이터를 확보하고 있는 Phenomenological Material Method(PMM)라는 실험근사 모델을 이용하였다.⁽⁵⁾



(a)알루미늄의 관통깊이



(b)철의 관통깊이

그림1. MAX EQPS 값의 선택을 위한 각 재료의 관통깊이 변화

2.2 요소소진 알고리즘과 EQPS

요소소진 알고리즘은 해석 도중 주어진 파괴 조건을 만족하거나 변형이 심하게 발생한 요소를 제거하는 해석 기법이다.⁽¹²⁾ 고속 충돌 중 발생하는 관통의 해석 등에서 심하게 변형된 요소는 시간증분의 크기를 감소시켜 해석 시간이 증가하게 되며, 해석을 중단시키는 경우도 있으므로 심하게 변형되어 더 이상 물리적으로 영향을 주지 않는다고 생각되는 요소는 소진시키게 된다.⁽⁵⁾ 따라서 대변형이 필수적으로 일어나는 고속 충돌의 해석에 요소소진 알고리즘을 이용할 경우 관통의 과정을 적절히 나타낼 수 있다. 이 연구에서 수치해석을 위해 사용한 NET2D 역시 구형 충돌체에 의해 판재가 관통되는 현상을 요소소진 알고리즘으로 구현하였다. 사용자가 해석 전에 미리 지정한 기준을 요소가 넘게 되면 그 요소는 앞으로 진행되는 해석에서 제외되는 것이다. 결국, 제외된 이 요소 주위에서부터 관통이 시작된다. 결과적으로 요소소진 알고리즘은 과도한 요소의 변형을 미연에 방지하여 수치해석 중에 나타날 수 있는 오류를 미연에 방지하고 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있도록 도와준다.

특히, NET2D에서는 소진의 판단 기준으로 등가소성변형률(EQPS: Equivalent Plastic Strain)을 이용하였다. 변형률은 일반적으로 방향성을 갖는 2계도 텐서의 형태로 표현하는 반면, EQPS는 스칼라 형태로 표시가 가능하도록 해 준다. 이것은 변형률을 등가변형률로 변환하는 식 (2)을 통해 가능해진다.⁽¹¹⁾

$$\varepsilon_{equi} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

이렇게 구한 스칼라 형태의 EQPS를 요소소진 알고리즘에서 사용하는 것이다. 즉, 시뮬레이션 전에 사용자가 지정한 특정 MAX EQPS값을 넘는 요소는 바로 소진을 하게 된다. 그러나 MAX EQPS를 소진의 판단기준으로 사용한 연구는 많이 있었으나 대부분의 연구들은 MAX EQPS값을 실험을 통해 결정해왔다.^(13,14) 또, 실제 해석상에서 MAX EQPS값이 결과에 지대한 영향을 끼치기 때문에 시뮬레이션에 쓰이는 재료에 따라 알맞은 MAX EQPS 값을 찾는 것은 매우 중요하다. 이에 Chen은 실험이 아닌 시뮬레이션을 통해 정확한 결과를 얻을 수 있는 적합한 값을 찾을 수 있는 방법론을 제시하였다.⁽¹⁵⁾ 임의의 탄환체가 대상 판재에 충돌 시 생기는 관통깊이는 EQPS값에 민감한 영향을 받는다. 그림 1의 (a), (b)는 각각 이 연구에서 쓰인 재료인 알루미늄과 철의 MAX EQPS값을 구하기 위한 시뮬레이션의 결과이다. 각각의 그래프에서 녹색으로 표시된 부분이 합당하다고 판단되는 각 재료의 MAX EQPS값들이다. 즉, 알루미늄의 경우 약 1.6에서 2.4사이의 값을, 철의 경우 약 1.6에서 2.1사이의 값이 적당한 소진의 판단 기준이 된다. 이 중 알루미늄과 철의 MAX EQPS값으로 다음에 설명할 격자의 크기와 모양, 그리고 파단의 형상을 고려하여 각각 2.1과 1.6을 선택하였다.

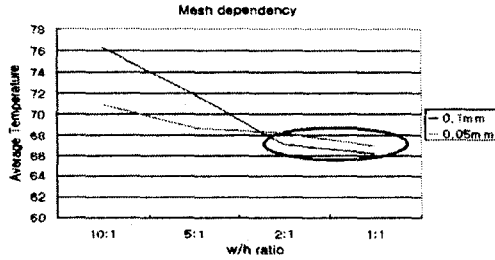


그림2. 격자의 가로/세로 비율과 크기의 영향성



그림3. 파단 형상의 종류

2.3 파단 형상과 격자 의존성

전산모사를 통해 현상을 해석하는데 있어서 결과에 큰 영향을 미치는 요인 중 하나로 격자의 형상과 크기를 들 수 있다. 특히, 고속충돌의 해석에 있어서는 충돌과 관통이 일어나는 부근의 요소가 큰 변형을 하게 되므로 격자 의존성이 더욱 높아 이에 대한 확인이 필요하다. 그림 2은 격자의 세로 길이가 0.1mm와 0.05mm인 경우에 대하여 가로, 세로 비율이 각각 10:1, 5:1, 2:1, 1:1인 격자를 사용한 경우의 결과를 요약한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 종횡비가 1:1에 가까워질수록, 격자의 크기가 작을수록 온도가 낮아지다가 어느 수준에서 수렴해나가는 경향을 알 수 있다. 여기서는 response로 온도를 취했으나, 이것은 하나의 예로서 온도를 나타낸 것이고, 어떤 정량적 값을 써도 비슷한 결과가 나온다. 여기서는 녹색으로 표시된 영역이 비교적 수렴성을 보인 구간이라고 보고 이 구간에 들어가는 종횡비와, 격자의 절대적 크기의 조합을 선택하고자 한다. 그러나 무조건 격자의 크기가 작은 것을 취하거나, 종횡비가 1:1에 가까운 조합을 선택하는 것이 좋은 것이 아니라는 사실을 주의해야 한다. 왜냐하면, 크기가 너무 작은 격자를 선택하거나 1:1에 가까운 종횡비를 선택할 경우 비슷한 결과가 나옴에도 불구하고, 요소의 수가 급격하게 늘어나 불필요하게 계산시간이 기하급수적으로 늘어날 수 있기 때문이다. 게다가 요소가 너무 작을 경우 충돌의 해석상에서는 singularity 문제도 발생할 수 있다는 것을 염두에 두어야 한다.

여기서 관통 시 나타나는 파단도 동시에 고려해야 한다. 파단의 종류를 알아보면 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 먼저 dishing은 일반적으로 연성의 재료로 이루어진 얇은 판재가 끝이 뾰족한 형상의 충돌체와 충돌할 때 일어나는 파단 형상으로 알려져 있다. 중심부에서부터 구멍이 생성되고 그것이 원주방향으로 성장하여 관통이 일어난다. 두 번째 파단 형상인 plugging은 끝이 평평한 충돌체와 상대적으로 취성의 성질이 많은 판재가 충돌할 때 생기는 파단 형상이다.⁽¹⁾ 이 연구에서 실제로 사용된 알루미늄과 철로 실제 충돌 실험을 해 본 결과, 두 재료 모두 두 가지 파단 형상 중 plugging 파단 형상을 나타내었다.

이렇게 위에서 언급한 격자의 크기와 종횡비, 그리고 파단의 형상을 종합적으로 고려한 결과 실제 실험 결과 즉, 파단형상으로 plugging을 나타내면서 동시에 계산 시간을 크게 증가시키지 않는 조합으로 격자의 세로 길이를 0.05mm, 가로세로의 비를 2:1로 선택하였다. 또한, 앞에서 언급한 각 재료의 MAX EQPS도 격자와 연성이 있고, 이 또한 실제 실험 결과와 부합하는 파단인 plugging 형상의 파단을 나타내는 조합

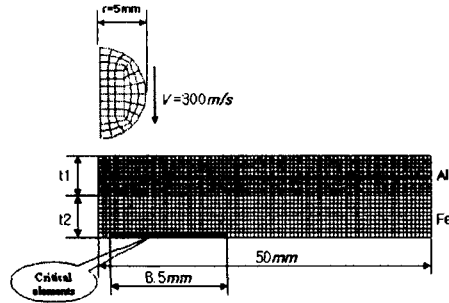


그림 4. 관통 판별을 위한 중요 요소들의 위치

로, 알루미늄과 철의 MAX EQPS를 각각 1.9와 1.6으로 선택하였다.

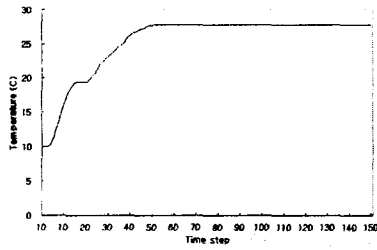
2.4 관통의 판별

이 연구에서 사용된 복합 판재는 실질적으로는 장갑구조체에 응용되기 위한 것이다. 이것은 곧, 복합 판재가 그 목적상 관통이 일어나지 말아야 한다는 것을 의미한다. 그러나 지금까지는 전산 모사를 통해 얻은 결과에서 관통여부를 판별할 수 있는 명확한 방법이 제시되지 않았었다. 이에 이 연구에서는 위에서 구한 각 재료의, 특히 하판인 철의 MAX EQPS값을 이용한 관통의 판별방법론을 제시하고자 한다. 그림 4에서 'Critical element'로 표시된 검은색 요소는 관통 판정에 특히 중요한 의미를 갖는다. 위에서 알아본 바와 같이 복합판재는 관통 시 dishing이 아닌 plugging의 형태로 관통이 일어난다. 즉, 대략 그림5의 'Critical element'중 한 요소에서부터 관통이 시작된다는 것을 알 수 있다. 이것은 요소소진 알고리즘에서 말한바와 같이 이 검은색 요소들 중 지정된 MAX EQPS값, 즉, 철의 MAX EQPS값인 1.6이 넘게 되면 바로 관통이 일어났다고 판별할 수 있는 것이다. 그러나 관통의 판별이 최적화 과정에서 구속조건으로 쓰이기 위해서는 수학적 함수식으로 표현이 되어야하고, 이는 반응표면법을 이용하여 구현할 수 있다.

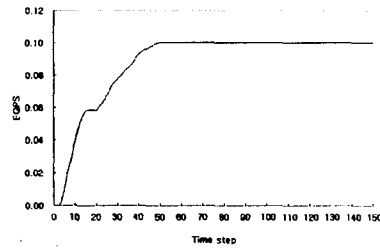
2.5 목적 함수

지금까지 고속충돌과 관련된 문제의 최적화가 많이 이루어지지 않은 원인으로 여러 가지를 생각해 볼 수 있다. 앞에서 말한 바와 같이 고속 충돌의 경우 비선형성과 열 및 온도에 의한 소성, 소진의 영향으로 인해 그 해석이 어려운 것이 하나가 될 수 있다. 또 다른 원인으로 생각해 볼 수 있는 것이 시간의 고려 여부이다. 지금까지 대부분의 최적화 문제는 정적 상황에서 이루어졌다. 다시 말해 고속 충돌과 같이 시간에 따라 변화가 일어나는 문제에서는 어떤 순간을 최적화의 단계로 설정할지가 문제가 되었다. 물론 충돌 문제에서 관통 여부에 중점을 둘 경우 관통이 시작되는 시점이나 관통이 일어난 후 해석의 마지막 단계를 최적화의 순간으로 지정할 수 있으나, 이럴 경우 다른 시점들에서의 변화가 간과되는 문제가 있다. 이런 문제의 해결책으로 제시된 것이 정량적 값의 평균을 취하는 것이다. 이렇게 얻은 정량적 평균값은 각 수준에서의 특징을 잘 나타낼 수 있는 대표값으로 쓰인다. 곧, 최적화 문제에서 각 수준의 response로써 사용되는 것이다.

여기서 해결되어야 할 또 하나의 문제가 여러 가지 공학적 수치들 중에서 어떤 값을 정량적 값으로 선택해야 하는가에 관련된 것이다. Yoon등은 이에 대해서 온도를 제안한 바 있다.⁽⁷⁾ 충돌 후 충돌체가 판재에 함입되는 경우에는 충돌체의 속도가 0이 된다. 여기서 식(3)으로 나타내어질 수 있는 에너지 보존 법칙으로부터 기본적인 상태 방정식을 얻을 수 있다.



(a) 온도



(b)EQPS

그림5. 온도와 EQPS의 비교

Table 2. 평균 EQPS와 MAX EQPS의 중심합성계획법 배열

Thickness of each layer		Average EQPS	MAX EQPS
(Al : Fe) Natural variable	(Al : Fe) Coded variable		
1.4:1.4	(1, 1)	0.15994	0.45212
1.4:0.6	(1, -1)	0.24098	0.71113
0.6:1.4	(-1, 1)	0.26311	0.6840
0.6:0.6	(-1, -1)	0.49183	1.6000
1.0:1.0	(0, 0)	0.25282	0.65288
1.0:1.0	(0, 0)	0.25282	0.65288
0.434:1.0	($-\sqrt{2}$, 0)	0.42110	1.6000
1.566:1.0	($\sqrt{2}$, 0)	0.157713	0.39056
1.0:0.434	(0, $-\sqrt{2}$)	0.45579	1.6001
1.0:1.566	(0, $\sqrt{2}$)	0.20982	0.62478

$$\sum E_i + \sum \frac{1}{2} \rho v_i^2 = \sum E_f + \sum \frac{1}{2} \rho v_f^2 + W \quad (3)$$

또, 고속충돌에서는 초기 속도가 매우 높으므로(이 연구에서는 300m/s) 탄성에너지는 거의 무시되어지고, 초기 에너지는 초기 속도에 의한 운동에너지만으로 나타내어질 수 있다. 충돌 후에는 앞에서 언급한 바와 같이 속도가 0이 되어 대부분의 초기 에너지가 변형에너지의 형태로 변환된다. Rosakis등에 따르면 이렇게 변환된 에너지의 대부분이 온도로 나타낼 수 있는 열에너지로 변환되고, 결국 최적화의 response로 온도가 쓰일 수 있게 된다. 그림 5는 특정 요소의 온도와 EQPS와의 관계를 보여주고 있다. (a)와 (b)에서 나타나는 바와 같이 두 정량적 값의 크기는 다르지만 그 경향을 거의 일치하는 것을 알 수 있기 때문에, 이 논문에서는 최적화의 각 수준에 해당하는 response로 EQPS의 평균값을 취하도록 한다. 그리고 이에 대한 수식적 유도는 차후 연구에서 좀 더 자세한 내용을 다루도록 할 예정이다.

3. 최적화 설계

3.1 반응표면법

이 연구에서의 최적화는 주어진 부피 안에서 알루미늄으로 이루어진 상판과 철로 이루어진 하판의 두께 비를 조절함으로써 전체 구조의 무게는 줄이면서 동시에 장갑능력은 향상시키는 다중목적 최적화이다. 여기서 구조의 무게는 각 판재의 밀도와 두께를 이용하여 구한 부피로 나타낼 수 있으나, 평균 EQPS로 나타낼 수 있는 구조의 강도는 분석적 유도를 통해 수식화 하는 것이 어렵다. 또한, 앞에서 언급한 판통 여부를 나타내는 MAX EQPS 역시 수식적 유도가 필요하다. 이에 여기서는 반응표면법(Response Surface Method)을 이용하고자 한다. 실험계획법에 기반을 둔 반응표면법은 이 연구에서와 같이 여러 개의 변수에

Table 3. 최적화 결과 개선정도

	Initial model upper:lower=(1.0:1.0)	Optimized model upper:lower=(1.35:0.65)	Improvement
EQPS	0.253	0.237	6.18%
Mass(g)	83.57	76.62	8.31%

영향을 받는 response를 수식적인 유도가 아닌, 수학적, 통계적 방법을 이용하여 수식화하는 방법이다.⁽¹⁷⁾ Table 2는 목적함수로 쓰인 평균 EQPS와 구속조건으로 쓰인 MAX EQPS값을 수식화하기 위해 중심합성 계획법(Center Composite Design)을 이용하여 배열을 만든 것이다. 이것을 바탕으로 각 수준에 해당하는 response를 통해 반응표면법을 쓰게 되면 다음과 같은 수식으로 최적화 문제가 요약될 수 있다.

$$\text{Minimize : } F = \frac{EQPS(t_1, t_2)}{EQPS_0} + \frac{W_0}{W(t_1, t_2)}$$

$$\text{where, } EQPS(t_1, t_2) = 1.00791 - 0.25323t_1 - 0.58575t_2 - 0.21121t_1t_2 - 0.06909t_1^2 + 0.14320t_2^2 + 0.14882t_1^2t_2 + 0.07216t_1t_2^2$$

Subjected to

$$\text{MAX } EQPS = 0.74888 - 0.07090t_1 - 0.16953t_2 - 0.35505t_1^2 + 0.10573t_2^2 + 0.01219t_1^2 - 0.12493t_1t_2^2 + 0.26535t_1^4 + 0.08216t_1^2 < 1.6$$

$$0.4 \leq t_1, t_2 \leq 1.6 \quad t_1 + t_2 \leq 2 \quad (4)$$

3.2 결과

위에서 수학적 수식으로 나타낸 치수최적화 문제를 MATLAB 함수인 'constr'을 이용하여 결과를 도출하였다. Table 3에 나타난 바와 같이 초기 상판과 하판의 두께가 각각 1mm에서 1.35mm와 0.65mm로 최적화 되었다. 또한, 평균 EQPS가 6.18% 감소하였고, 이는 최적화된 구조의 장갑 능력이 증가하였다는 것을 의미하고, 동시에 무게는 8.31%감소하여 경량화 역시 이루었다. 또한 결과로 얻어진 상판과 하판의 두께를 1.35mm와 0.65mm로 조정하여 재해석을 해 본 결과 관통이 일어나지 않았고, 동시에 위에서 얻은 결과가 합당하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 경량 장갑구조를 위한 초기 목표가 성공적으로 달성되었다는 의미한다.

4. 토 의

본 연구에서는 고속충돌의 비선형성 및 열적 변형, 그리고 동적 변형 등의 어려움을 해결하는 최적화 기법을 등가소성변형률을 이용하여 제시하였다. 해석 결과가 실제의 결과와 부합하도록 하기 위해 요소소진 알고리즘에서의 파라미터, 격자의 크기와 형상을 조정하고 관통여부의 판별을 수학적 수식으로 표현하였다. 또한, 최적화 기법으로 실험계획법에 바탕을 둔 반응표면법을 이용함으로써 수식적 유도가 어려운 비선형문제의 목적함수와 제한 조건을 얻을 수 있었다. 이를 통하여 장갑구조의 강성 증가와 함께 경량화를 실현하였고 이의 결과를 토대로 앞으로의 장갑구조의 제작에 많은 공헌을 할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

- (1) Zukas, J.A., "High Velocity Impact Dynamics," John Wiley& Sons, Inc., New York, 1990, p. 1-2.
- (2) 유요한, 정동택, "엑스플리시트 시간 적분 유한요소법을 이용한 고속 성형 해석(Ⅰ) -마찰 및 관성 효과-", 대한기계학회논문집, 제15권 제1호, 1991, pp. 1519-1529.
- (3) 유요한, 정동택, "엑스플리시트 시간 적분 유한 요소법을 이용한 고속 성형 해석(Ⅱ) -고속 압연 해석-", 대한기계학회논문집, 제15권 제5호, 1991, pp. 1551-1562.
- (4) 정동택, 유요한, "4340강의 단열 전단밴드생성에 대한 유한요소해석 및 실험적 고찰", 대한기계학회 논문집, 제18권 제5호, 1994, pp. 1134-1143.
- (5) 유요한, 장순남, 정동택, "연강 판재에 대한 연강 구의 고속경사충돌 수치해석", 대한기계학회논문집 A, 제26권 제3호, 2002, pp. 1134-1143.
- (6) Yoo, Y.H., Shin, H.H., "Protection capability of dual flying paltres against obliquely impacting long-rod penetrators", International Journal of Impact Engineering, Vol. 30, 2004, pp. 55-68.
- (7) 윤덕현, 박명수, 유정훈, 정동택, "다중판재의 고속충돌에 관한 최적설계", 대한기계학회논문집 A, 제 27권 제10호, 2003, pp. 1793-1799.
- (8) Meyer H.W., Kleponis, D.S., "Modeling the high strain rate behavior of titanium undergoing ballistic impact and penetration", International Journal of Impact Engineering, Vol. 26, 2001, pp. 509~521.
- (9) Jablovkov, V., Goto, D.M., Koss, D.A., McKirgan, J.B., "Temperature, strain rate, stress state and the failure of HY-100 steel", Materails Science & Engineering A, Vol. 302, 2001, pp. 197-205.
- (10) Hubert, W. Meyer, Jr., David, S.K., "Modeling the high strain rate behavior of titanium undergoing ballistic impact and penetration", International Journal of Impact Engineering, Vol. 26, 2001, pp. 509-521.
- (11) Meyers, M.A., "Dynamics Behavior of Materials," John Wiley& Sons, Inc., New York, 1994.
- (12) Sewell, D.A., Ong, A.C., Hallquist, J.O., "Penetration Calculation Using an Erosion Algorithm in DYNA", 12th International Symposium on Ballistics.
- (13) Cottrell, M.G., Yu, J., Owen, D.R.J., "The Adaptive and Erosive numerical modelling of Confined Boron Carbide Subjected to Large-scale Dynamic Loadings with Element Conversion to Undeformable Meshless Particles", International Journal of Impact Engineering, Vol. 28, 2003, pp. 1017-1035.
- (14) Bessette, G.C., Becker, E.B., Taylor, L.M., Littlefield, D.L., "Modeling of Impact Problems Using an H-adaptive, Explicit Lagrangian Finite Element Method in Three Dimensions", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 192, 2003, pp. 1649-1679.
- (15) Chen, E.P., "Numerical Simulation of Penetration of Aluminum Targets by Spherical-nose Steel Rods", Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 22, 1995, pp. 159-164.
- (16) Rosakis, P., Rosakis, A.J., Ravichandran, G., "A Thermodynamic Internal Variable Model for the Partition of Plastic Work into Heat and Stored Energy in Metals", Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 48, 2000, pp. 581-607.
- (17) Montgomery, D.C., "Design and Analysis of Experiments," John Wiley& Sons, Inc., New York, 2001.