

다중판재의 고속충돌에 관한 최적설계

윤덕현* · 박명수** · 유정훈† · 정동택***

(2003년 5월 14일 접수, 2003년 8월 2일 심사완료)

Optimal Design of a Multi-Layered Plate Structure Under High-Velocity Impact

Deok-Hyun Yoon, Myung-Soo Park, Jeonghoon Yoo and Dong-Teak Chung

Key Words : Size Optimization(치수최적화), Explicit Time-Integration Finite Element Method(외연적 시간적분 유한요소법), High-Velocity Impact(고속충돌), Response Surface Method(반응 표면법)

Abstract

An optimal design of a multi-layered plate structure to endure high-velocity impact has been suggested by using size optimization after numerical simulations. The NET2D, a Lagrangian explicit time-integration finite element code for analyzing high-velocity impact, was used to find the parameters for the optimization. Three different materials such as mild steel, aluminum for a multi-layered plate structure and die steel for the pellet, were assumed. In order to consider the effects of strain rate hardening, strain hardening and thermal softening, Johnson-Cook model and Phenomenological Material Model were used as constitutive models for the simulation. It was carried out with several different gaps and thickness of layers to figure out the trend in terms of those parameters' changes under the constraint, which is against complete penetration. Also, the measuring domain has been shrunk with several elements to reduce the analyzing time. The response surface method based on the design of experiments was used as optimization algorithms. The optimized thickness of each layer in which perforation does not occur has been obtained at a constant velocity and a designated total thickness. The result is quite acceptable satisfying both the minimized deformation energy and the weight criteria. Furthermore, a conceptual idea for topology optimization was suggested for the future work.

1. 서론

고속 충돌과 관련된 비선형 해석은 지금까지 대부분 방위산업과 같은 군사적 목적을 위해 제한된 범위 내에서 발전해왔다. 결국 그 결과도 보안을 이유로 논문의 형태로 발간된 것이 매우 드문 실정이다. 그러나, 우주 왕복선이나, 초음속 항공기 등의 제작과 같은 민간 산업분야에서도 점차적

로 비선형 문제의 해석을 필요로 함에 따라 좀 더 효율적인 형태의 해석을 위한 연구가 요구되고 있다. 방위산업의 특성상 막대한 시설과 비용을 투자하여 실험적 해석을 해올 수 있었던 반면, 이제는 좀 더 비용을 고려한 경제적인 해석법이 필요로 하게 되었고, 이는 수치해석을 도입하는 직접적인 이유가 되었다. 특히 최근에는 수치해석의 시간에 직접적으로 영향을 미치는 컴퓨터의 처리속도가 급속도로 발전함에 따라 점차적으로 수치해석의 비중이 높아지고 있다.

대표적인 비선형 문제인 고속 충돌을 받는 판재 구조물의 최적화는 기존의 준정적 이론에 고변형률 속도와 이에 따른 온도의 상승등을 고려하여야 한다. 그러므로 충돌에 의한 변형을 해석하기 위해서는 기존의 연속방정식, 에너지 보존식 및 모멘텀 보존식 이외에 고변형률과 고변형률 속도의

* 회원, 현대자동차

** 연세대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : yoojh@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2859 FAX : (02)362-2736

*** 회원, 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

영향을 나타내는 구성방정식과 탄소성과의 거동을 고려한 상태방정식 등이 필요하게 되어 수치적 해석의 어려움은 커지게 된다. 한편, 구조물을 전체적으로 보강하는 것은 구조물 자체의 중량을 크게 증가시키게 되므로 작용 하중의 특성에 맞추어 구조물의 보강 재료들을 선택하고 형태를 변경하면 충돌시의 강성을 높이고 무게는 줄이는, 기능적인 구조물을 설계 할 수 있을 것이다.

최적화의 방법으로는 크게 치수최적화(size optimization), 형상최적화(shape optimization), 위상최적화(topology optimization)등으로 분류할 수 있다.⁽¹⁾ 치수최적화의 경우 빔 단면의 면적이나 설계영역 자체가 설계 변수가 되며, 형상최적화의 경우 트러스 절점의 위치나 구조물의 형상 등이 경계면의 물질 위치의 변화로 표현되고, 위상최적화의 경우 구멍의 크기나 모양, 추가 절점의 위치 등을 대상으로 하여 밀도법이나 균질화법 등을 이용하여 수행된다.⁽²⁾ 본 연구에서는 치수 최적화를 통해 비선형 특성을 가진 고속충돌을 받는 다중판재의 서로 다른 재료의 두께를 설계변수로 선정하여 최적화를 수행하였고, 추후 재료의 두께로서 대표되어지는 설계변수를 재료 특성으로 대체하여 위상 최적화로 발전시킬 수 있는 최적화 방안을 제시하였다.

2. 충돌 해석

충돌의 해석에서는 다양한 조건 하에서 최적화를 위한 설계변수 및 관통 여부의 판단을 위한 기준 등을 제시하고, 최적설계를 위한 알고리즘을 개발하는 데에 주안점을 두었다.

2.1 수치 해석 프로그램

수치 모사를 위해 유한요소법(finite element method, FEM)을 근간으로 한 라그랑지(Lagrangian) 2 차원 해석 코드인 NET2D 를 사용하였다. NET2D 는 Yoo^(3,4) 등에 의해 개발되어 이미 2 차원 고속 변형 문제 및 고속 충돌에 의한 파괴 문제^(5,6) 등을 해석하여 실제 실험과 비교, 검토되어 재료의 물성치 확보와 결과의 신뢰도가 검증된 바 있으며 코드가 수정 가능하여 최적화를 수행하기 위한 인자들을 찾아내는 데에 용이하다. Fig. 1 에 나타난 것처럼 NET2D 는 모델링 및 격자(mesh) 생성을 위한 전처리기(pre-processor)인 Fastq, 격자 파일 및 재료의 물성치와 접촉조건 등을 설정하는 Control File 을 이용하여 수치해석을 수행하는 해석부인 NET2D, 그래픽을 표현하도록 만들어진 Bear, 결과 데이터를 처리하기 위한 Tplot 등의 후처리기(post-processor)로 구성되어 있다.

2.2 해석 방법

최적화를 위해 관통 여부의 판별, 관찰 영역 선정 등의 인자들을 찾아내기 위해 400m/s 로 지름 10mm 의 강구가 한 면의 길이 100mm 인 정사각형

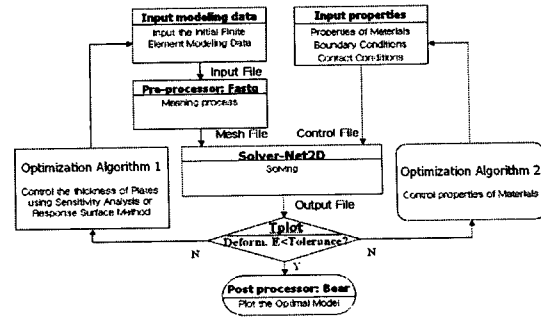


Fig. 1 Overall flow chart

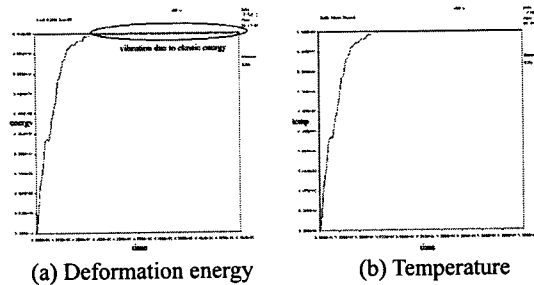


Fig. 2 Comparison between the deformation energy and temperature

Table 1 Material characteristics

	A	B	C	n	m
Aluminium	0.265	0.426	0.015	0.34	1.00

모양의 알루미늄(aluminum) 과 철(steel)로 구성된 이중판에 충돌하는 모사가 실시되었다

탄성영역을 지난 소성영역 구간에서의 비선형적 거동은 변형을 경화 효과(strain hardening effect) 변형률 속도 경화 효과(strain rate hardening effect), 열적 연화 효과(thermal softening effect) 등의 온도 및 재료의 특성에 기인한 영향이 큰데, 알루미늄의 경우 다음의 식 (1)로 가장 잘 표현되는 Johnson and Cook 모델을 이용하여 해석하였으며 철은 이미 실험을 통해 검증된 데이터를 확보하고 있는 PMM(Phenomenological Material Model)이라는 실험 근사 모델로 해석하였다.⁽⁷⁾

$$S_y = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon})(1 - T_h^m) \quad (1)$$

여기서 S_y 는 항복응력, T_h 는 상응온도(homologous temperature), $\epsilon, \dot{\epsilon}$ 는 각각 소성변형률과 소성변형률 속도를 나타낸다. Table 1에 표시된 바와 같이 A, B, C, n, m은 재료상수이다. 상응온도는 다음의 식에 의해 구한다.

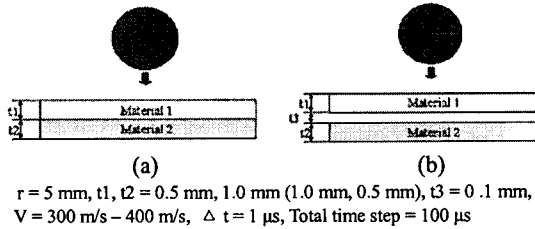


Fig. 3 Various simulation cases

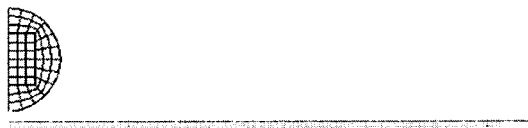


Fig. 4 Finite element model

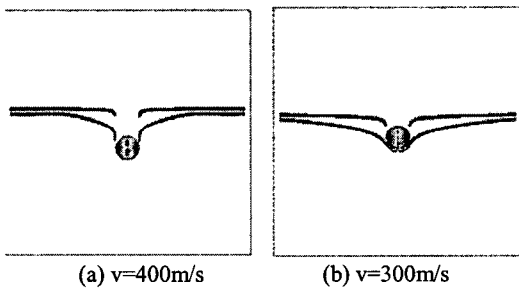


Fig. 5 Displacements due to the difference of velocity

$$T_h = \frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \quad (2)$$

T_{ref} 는 기준온도, T_{melt} 는 용점온도를 표시한다.

Fig. 2 는 관통 여부의 판별을 위해 수치적으로 명확한 상수값을 가져서 알고리즘 상에서 판별이 용이한 관통의 전 과정의 판재의 변형에너지와 잔류온도를 관찰한 결과이다. NET2D 는 소성에너지와 탄성에너지 모두를 변형에너지로 표시하며 탄성에너지의 영향으로 변형에너지는 Fig. 2(a)에 보이는 것과 같은 떨림 현상을 나타낸다. 잔류 온도의 경우는 시간의 변화에 따른 측정영역 전체 온도의 합을 표시하게 되며 이를 그래프로 나타내면 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 변형에너지와 같은 경향을 보이면서 떨림 현상은 나타나지 않고 있다.

경향 분석을 위해 재질을 달리한 이중 판재의 위치, 두께, 접촉 조건 등을 Fig. 3과 같이 변화시켜 충돌에 미치는 영향을 해석하였다. 실제의 해석에서는 대칭을 고려하여 Fig. 4와 같은 유한요소 모델을 구성하였다.

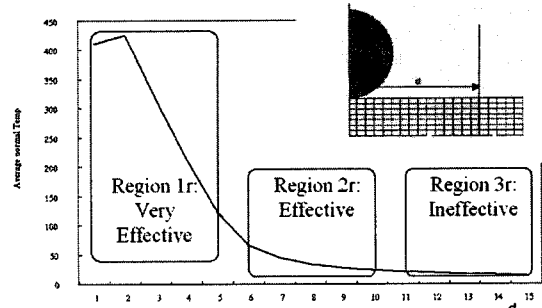


Fig. 6 Horizontal effectiveness of measuring domain

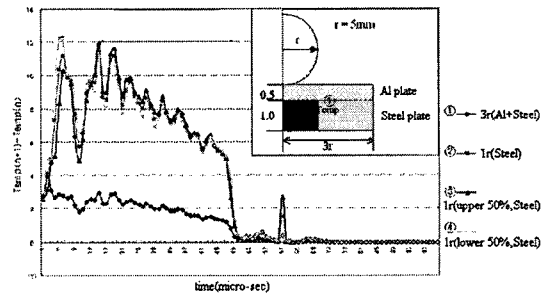


Fig. 7 Regional effectiveness of measuring domain

2.3 해석 경향 분석

Fig. 5는 탄환의 속도가 저속(300m/s)과 고속(400m/s)인 경우에 있어서의 관통여부를 모사한 결과이다. 고속(400m/s)의 경우 판의 길이 방향으로 휨이 적고 관통이 일어나며 저속의 경우 관통이 일어나지 않고 Bouncing이 되면서 전체적으로 판이 심하게 휘는 것을 볼 수 있다. 이는 관통이 일어나지 않는 저속의 조건 하에서는 판 전체에 탄성 영향이, 고속의 조건 하에서는 열에 의한 소성(plasticity), 소진(eroding)의 영향이 더욱 지배적임을 보여주며 관통이 일어날 때는 충돌에너지의 대부분이 열 에너지로 변환되어 요소의 소실이 발생한다는 것을 의미한다. 따라서 고속 충돌에서의 효과적인 장갑판의 설계를 위한 최적화 과정에서는 온도의 변화를 설계변수로 하여 충돌이 일어나는 측정 영역을 선정 후 그 영역에서 평균 온도를 측정한다.

위의 결과를 바탕으로 하여 측정된 평균온도를 기반으로 하여 판의 두께에 대한 민감도 해석을 수행하고 관통이 일어나지 않는 최적의 두께를 찾아내는 방향으로 연구를 수행한다. Fig. 6은 판의 길이 방향으로 온도의 영향을 알아보기 위해 관통의 영향으로 변위가 가장 많이 일어나는 중심으로부터 탄환의 반지름의 약 3배정도까지의 단위 요소 column당 평균 온도를 관찰한 결과이다. 시간

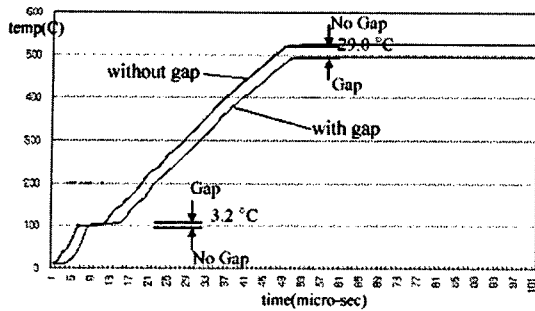


Fig. 8 The effect of a gap

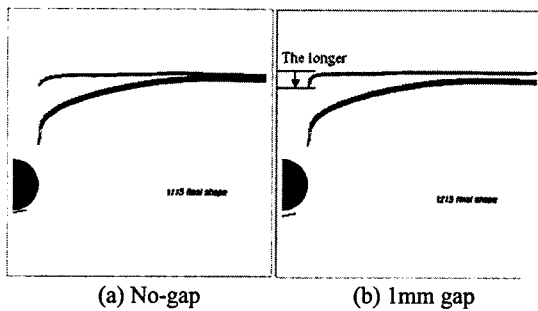


Fig. 9 Final shape difference due to a gap

에 따라 영향을 받는 영역은 중심으로부터 탄환의 반지름의 1배까지가 민감하며 2~3배의 영역에서는 미미한 영향이 있거나 충돌에 의한 온도변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 온도 변화로 나타나는 에너지 변화를 관찰하기 위한 영역은 중심으로부터 탄환 반지름의 1배인 1r영역으로 보아도 무방함을 확인할 수 있다. Fig. 7은 측정영역의 종방향 설정을 위해 단위 시간당 온도의 변화량을 4가지의 서로 다른 영역에서 측정한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 ②의 경우에서 시간에 따른 온도의 변화를 나타내는 그래프의 면적이 가장 넓다. 따라서 본 연구에서 사용하는 측정영역으로는 횡방향으로는 탄환의 반지름의 길이만큼을, 종방향으로는 아래부분 판의 두께만큼을 측정영역으로 고려하는 것이 적절하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8는 두 개의 판 사이에 공간이 있을 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 관통 전후의 측정영역에서의 평균온도의 변화를 나타내고 있다. 평균 온도는 각 측정 시간에서 측정영역의 온도의 평균값을 나타내며 측정영역은 탄환 반지름의 관통 직후에는 변형을 위한 온도의 변화가 없으므로 일정한 온도를 유지하게 된다. Fig. 8에 나타난 것처럼 판 사이에 공간이 있을 경우에 그렇지 않은 경우보다 아래쪽 판의 동일 요소에서 초기에 온도의 상승이 나타났다. 또한 최종적인 관통에 크게 영향을 미치는 관통 후의 잔류온도는 공간이 없는 경우가

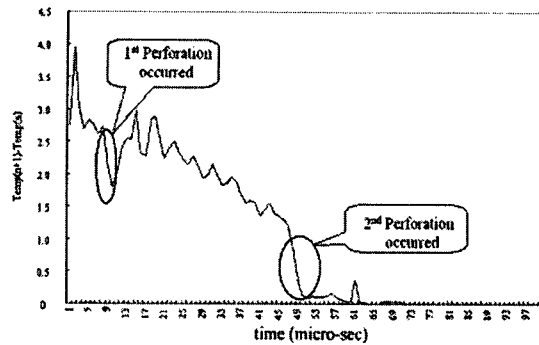


Fig. 10 Instantaneous change rate of temperature

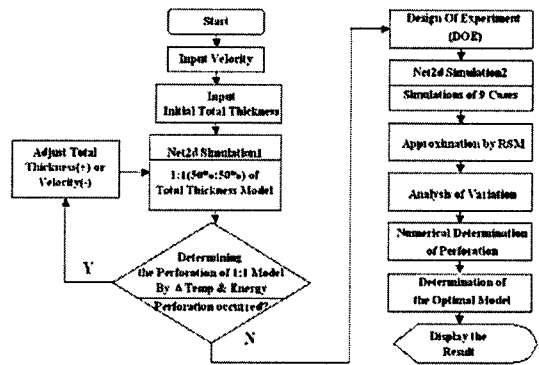


Fig. 11 Optimization Algorithm

훨씬 더 크게 나타났다. 이것은 판 사이에 공간이 있을 때 더 우수한 장갑능력을 갖는다는 것을 의미한다. 최종 변위는 Fig. 9에 보여지는 바와 같이 두 경우에 거의 같게 나타났지만 윗 판의 경우 공간이 있을 때 변위가 큼을 볼 수 있다.

본 연구의 목적은 경량화된 다중 판재의 장갑판의 설계에 있으므로 시뮬레이션을 통한 판재의 관통여부의 판별이 필요하다. Fig. 10은 단위시간당 온도의 변화량을 측정한 것으로 각 판재의 관통시마다 온도의 변화가 급격히 일어남을 볼 수 있으며 이를 이용하여 판재의 관통여부를 판단할 수 있다.

3. 판재의 최적화

최적화를 위한 목적함수는 충돌체의 반지름의 크기를 갖는 측정영역에서의 평균온도를 최소화시키고 복합판의 무게를 최소화하는 것으로 정의한다. 설계의 제한 조건으로는 공간적인 제약 조건에 의한 두 개의 판재 두께의 합과 주어진 탄환의 속도에 대해 판재의 관통이 일어나지 않은 것으로 설정한다. 판재의 관통의 판정은 순간 온도 변화율의 측정으로 결정된다.

Table 2 Simulation cases for the optimization

Thickness(mm)		Total Number of Elements
Aluminium layer	Steel layer	
0.8	0.8	2000
0.8	1	2250
0.8	1.2	2500
1	0.8	2250
1	1	2500
1	1.2	2750
1.2	0.8	2500
1.2	1	2750
1.2	1.2	3000

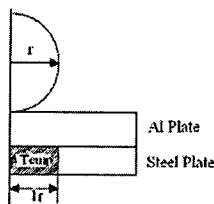


Fig. 12 Axisymmetric model for the simulation

3.1 최적화 알고리즘

판재 두께의 최적설계를 위해서는 설계변수(각 판의 두께) 변화에 따른 목적함수의 변화를 나타내는 민감도 해석이 요구된다. 목적함수가 수식적으로 유도되고 이를 설계변수로 미분 계산이 가능하면 민감도 해석은 수식적으로 완벽히 표현될 수 있다. 그러나 일반적인 충돌 문제는 비선형성으로 인하여 이러한 수식적 유도의 가능성을 확인하기 어렵다. 따라서 설계 변수의 레벨을 변화시킨 전산모사 결과로 민감도 해석을 수행 하고 이와 함께 반응표면법(response surface method)과 통계적 기법 등을 이용한 설계변수에 의한 목적함수를 설정하여 최적화를 수행하였으며 Fig. 11 은 이에 따른 최적화 알고리즘을 보여주고 있다.

최적화 과정에서는 먼저 초기 속도와 초기 전체 두께를 지정하고 윗판과 아랫판의 두께가 1:1의 비율인 모델을 기준으로 하여 NET2D 해석을 통해 관통의 해석 기준인 순간 온도 변화율을 측정한다. 관통이 일어날 경우 전체 두께를 늘리거나 속도를 낮추어 관통이 일어나지 않는 영역에서의 최적화를 목적으로 관통이 일어나지 않으면서 두께를 최소로 하는 구속조건을 만족시키고자 한다.

관통이 일어나지 않는 경우에 대하여 Table 2에 나타난 바와 같은 9번의 실험을 수행하여 실험 데이터를 획득한다. 그 결과를 이용하여 반응표면법을 사용한 근사식을 세우고 회귀분석을 실시한 후에 주어진 두께 내에서 임의의 가중치 조건을 만족하는 최적의 두께 분포를 찾아내도록 하였다.

3.2 최적화를 위한 수치해석

수치해석에는 계산시간 절감을 위해 Fig. 12와 같은 축대칭(axisymmetric) 모델이 사용되었다. 상

Table 3 Design of experiments

	Al : Steel	c	a	b	ab	Average Temperature
1	0.8 : 0.8	1	-1	-1	1	244.4919
2	0.8 : 1.0	1	-1	0	0	214.6411
3	0.8 : 1.2	1	-1	1	-1	170.5966
4	1.0 : 0.8	1	0	-1	0	212.752
5	1.0 : 1.0	1	0	0	0	208.7146
6	1.0 : 1.2	1	0	1	0	188.4320
7	1.2 : 0.8	1	1	-1	-1	202.6412
8	1.2 : 1.0	1	1	0	0	197.4186
9	1.2 : 1.2	1	1	1	1	198.9270

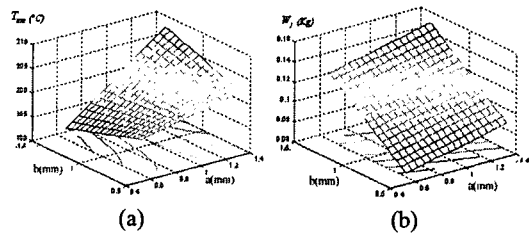


Fig. 13 Temperature and weight distribution

판(Aluminum)과 하판(Steel)이 밀착되어있는 구조의 판재의 전체 두께를 2mm로 구속하고 관통이 일어나지 않는 조건인 시속 300m/s에서 10mm 지름의 강구(Die steel)가 양 끝단에서 모든 자유도가 구속되어있는 상태로 충돌하도록 하였다.

3.3 반응표면법(Response Surface Method)

반응표면법은 작은 수의 실험으로 가장 좋은 결과를 얻도록 통계적인 방법을 이용한 실험계획법의 한 방법으로, 여러 개의 서로 다른 독립 변수들이 특정한 반응 변수에 영향을 주고 있을 때의 반응 표면에 대한 수학적, 통계적 분석 방법을 말한다.^(8,9) 최소자승법에 근거한 수학적식은 다음과 같이 표현된다.

$$X'Xb = X'y \tag{3}$$

여기서 X 는 표면 행렬을, y 는 실험 결과 벡터를 그리고 b 는 계수 결정을 위한 벡터를 의미한다.

3.4 최적화 결과 및 분석

Table 3에 표시된 바와 같이 0.8mm 에서 1.2mm 까지의 3수준으로 판의 두께를 변화시키면서 실험 구성을 하여 결과를 도출하였다. 분산분석(Analysis of Variance)의 결과 평균온도 계산을 위한 근사식을 다음과 같이 결정하였다.

$$T_{ave} = 204.2906 - 5.1238(a) - 16.98823(b) + 17.54528(ab) \tag{4}$$

위의 식에서 a 와 b 는 상판(알루미늄판)과 하판(철판)의 두께를 각각 표시한다. 최적화 과정에서는 식 (4)에 근거하여 평균온도를 산출하였으며, 경량

Table 4 Optimization Result

	a(mm)	b(mm)	T_{ave} (°C)	W_r (Kg)	P
Initial model	1	1	204.2906	0.1066	0.9903
Optimized model	1.2	0.8	198.6098	0.0964	0.6158

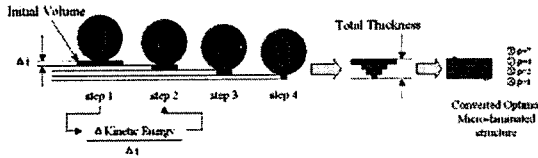


Fig. 14 Conceptual idea for topology optimization

$$\begin{aligned} \text{Minimize } F &= [W/(W)_{max}] + [(T)_{ave}/(T)_{max}] \\ \text{Subject to } & a+b \leq \text{Total Thickness,} \\ & 0.8\text{mm} \leq a, b \leq 1.2\text{mm} \end{aligned} \quad (5)$$

화를 고려하여 평균 온도(T_{ave}) 뿐만 아니라 중량 W 을 최소화 하기 위해 다음의 최적화 문제를 만족하는 최적의 판 두께를 결정하였다.

Fig. 13(a)는 식 (4)에 따른 평균 온도분포를, Fig. 13(b)는 설계변수에 따른 중량분포를 나타내고 있다. 최적화 알고리즘에는 평균 온도분포와 중량 분포간의 편차를 줄이기 위해 Normalization을 하였다. Table 4는 최적화 결과를 나타내고 있으며 실제 최적화 결과 값은 제한조건의 경계에서 산출되었음을 알 수 있다. 초기모델에 비해 평균온도는 2.8%가 감소하였으며 중량은 9.6%가 감소하였다. 실험에서 제한된 두께인 2mm 안에서는 하판(알루미늄판)을 보강하는 것이 경량화를 위한 최적의 결과로 나타났으며 구속조건의 주어진 극값에서 결과를 얻을 수 있었다.

3.5 위상최적화 방법의 제안

주후의 연구에서는 재료의 밀도를 변화 시킴으로써 형상최적화를 적용할 수 있다. 각각의 판재가 유한개의 박판의 합으로 이루어져 있다고 가정하면, 아래의 Fig. 14와 같이 각각의 시간변위 Δt 에 대해서 전체 판재가 뚫리지 않는 제한 범위 안에서 박판의 횡 방향 길이를 조절할 수 있다. 이렇게 조절된 횡 방향의 길이는 각 박판의 밀도를 조절함으로써 횡방향 길이라는 변수를 각 박판의 밀도라는 변수로 대치할 수 있게 되며, 이것은 최종적으로 전체 구조물의 위상 최적화를 의미한다. 이렇게 하여 얻은 판재는 초기의 판재에 비하여 같은 강성을 갖으면서도 전체구조물의 무게는 줄어드는 효과를 나타낼 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 고속 충돌 하에서의 최적설계를

위해 관계된 인자들을 찾아내고 민감도 해석을 통해 관통여부를 판별하도록 하여 최적화 알고리즘을 구성하였다. 충돌의 문제가 시간에 따라 연속적으로 현상이 변화됨을 고려하여 전체측정 시간에 대한 평균온도를 측정인자로 설정하였다.

이를 바탕으로 하여 알루미늄과 철의 두 가지 서로 다른 판재로 이루어진 구조물을 대상으로 제한된 두께 내에서 관통이 일어나지 않도록 변형에너지를 대신한 평균온도와 중량을 최소로 하는 최적의 구조물을 설계하였다. 또한, 판재의 두께대신 단위 박판의 횡 방향 길이를 설계 변수로 한 고속 충돌에서의 위상최적화의 개념을 제시하였다.

본 연구의 최적화의 결과는 설계변수의 경계 조건에서 결정되었으며 이러한 경계조건은 관통이 발생하지 않은 실험상의 설계변수의 한도 내에서 결정되었다. 그러나 이러한 경계 조건을 고려하지 않은 최적화의 값은 결과로 제시된 최적화의 값-상판 1.2mm, 하판 0.8mm-보다 더 두꺼운 상판의 두께를 가질 수 있다. 그러나 그에 따른 결과의 관통여부는 Fig. 10에 제시된 단위시간당의 온도의 변화를 모사하여야만 판단이 가능하며 향후의 연구에서는 이러한 제한점을 극복할 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 요구된다.

후기

본 연구는 한국 과학재단 목적기초연구(과제 번호: R01-2001-000-00390-0)의 지원으로 이루어진 것으로, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Suzuki, K., Kikuchi, N., 1991, "A Homogenization Method for Shape and Topology Optimization," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 93, pp. 291~318.
- (2) Bendsoe, M.P., Kikuchi, N., 1988, "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 71, pp. 197~224.
- (3) Yoo, Y. H., Chung, D. T., 1991, "An Analysis of High Speed Forming Using the Explicit Time Integration Finite Element Method (I) - Effects of Friction and Inertia Force -," *Journal of KSME*, Vol. 15, No. 1, pp. 1~10.
- (4) Yoo, Y. H., Chung, D. T., 1991, "An Analysis of High Speed Forming Using the Explicit Time Integration Finite Element Method (II) - Application to High Speed Rolling -," *Journal of KSME*, Vol. 15, No. 5, pp. 1551~1562.
- (5) Yoo, Y. H., Jun, K. Y., Chung, D. T., 1992, "Finite

- Element Analysis of Adiabatic Shear Band," *Journal of KSME*, Vol. 16, No. 8, pp. 1519~1529.
- (6) Yoo, Y. H., Chung, D. T., 1991, "The Analysis of Spall Phenomenon by Plate Impact," '91 *KSME Fall Annual Conferences*, pp. 129~132.
- (7) Yoo, Y. H., Chang, S. N., Chung, D. T., 2002, "Numerical Simulation of High-Velocity Oblique Impact of Mild Steel Spheres Against Mild Steel Plates," *Journal of KSME*, Vol. 26, No. 3, pp. 576~ 585.
- (8) Park, S.H., 2001, *Modern Design of Experiment*, Minyoung Inc.
- (9) Myers, R.H., Montgomery, D.C., 1995, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons, Inc., New York.