

초고속 충돌을 받는 모자형 보강 패널의 충격 저감 특성에 관한 연구[§]

양 태 호* · 이 영 신*†

* 충남대학교 기계설계공학과

A Study of Impact Reduction Characteristics of Hat-Shaped Stiffened Panel Under Hypervelocity Impact

Tae-Ho Yang* and Young-Shin Lee*†

* Dept. Mechanical Design Engineering, Chungnam Nat'l Univ.

(Received December 28, 2012 ; Revised March 24, 2013 ; Accepted April 4, 2013)

Key Words: Hypervelocity Impact(초고속 충돌), Hat-Shaped Stiffener(모자형 보강재), Impact Reduction(충격 저감)

초록: 본 논문은 사각 보강 패널에 사용되는 모자형 보강재의 크기 최적화에 대한 결과를 제시하였다. 보강 패널은 1500 ~ 2500 m/s의 속도를 가지는 발사체와 충돌한다. 모자형 보강재의 크기를 결정하기 위해서 크기 최적화가 수행되었다. 크기 최적화를 수행하기 위해서는 3 개의 함수들로 구성되어 있다. 이 함수들은 목적함수, 제한함수 그리고 설계 함수로 이루어져 있다. 목적 함수는 보강 패널의 1 차 고유진동수의 최대화가 되도록 하는 것이다. 제한 함수는 보강재의 부피가 사각 패널 부피의 10 % 이내가 되도록 하는 것이며, 설계 변수로는 모자형 보강재의 치수가 된다. 최적화된 모자형 보강재를 이용한 보강 패널을 사용하여 초고속 충돌에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 최적화된 보강재에 대해서 속도와 운동 에너지 변화에 대한 결과를 얻었다. 보강 패널의 충돌 저감을 평가하기 위해서 발사체의 운동 에너지와 속도를 무차원화 계산을 수행하여 비교 분석 하였다.

Abstract: This paper presents the results of sizing optimization of a hat-shaped stiffener on a rectangular stiffened panel. The stiffened panel is subjected to impact loading by a projectile with a velocity of 1500–2500 m/s. To determine the size of the hat-shaped stiffener, sizing optimization was performed. The sizing optimization consists of three functions: objective, constraint, and design functions. The objective function is used to maximize the fundamental frequency of the stiffened panel. The constraint function is that the stiffener volume is less than 10% of the plate volume. The design function is the dimensions of the hat-shaped stiffener. By using the stiffened panel with the optimized hat-shaped stiffener, a hypervelocity impact was simulated, and the velocity and kinetic energy on the optimized stiffener was obtained. To evaluate the impact reduction on the stiffened panel, the velocity and kinetic energy of the projectile was normalized and compared.

1. 서 론

곡률을 가지는 패널은 다양한 기계 구조 분야에서 주요 구조 요소로써 적용된다. 패널의 기계적 특성을 향상 시키기 위해서 다양한 보강재를 이용한다. 보강재를 사용하여 보강을 함으로써 사각 패널의 기계적 특성을 질량이나 부피대비 증가

시키는 중요한 역할을 한다.

보강재의 중요성으로 인해서 패널에 대한 다양한 보강재의 형상 및 크기에 관련된 최적화의 논문이 수행이 되었다.

Bedair 는 Z 형 보강재를 이용하여 보강판 패널의 동적 응답특성을 분석하며, Z 형의 보강재의 크기 최적화에 관해서 수행하였다.⁽¹⁾ Alinia 는 전단 하중을 받는 판에 대해서 T 형보강재를 사용하여 하중 특성을 최대화 시키는 보강재에 대한 연구를 수행하였다.⁽²⁾ 보강재는 보강의 위치도 최적화를 하는데 중요한 역할을 한다. Aki 는 등간격 보강재로 보강된 판의 정적 동적 특성 분석을 통

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012.

11. 7.-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, leeys@cnu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

하여, 보강재의 레이아웃에 대한 연구를 수행하였다.⁽³⁾

최근 관통 및 방호에 대한 관심이 증대 되면서, 많은 국내외 연구자들이 발사체에 관한 연구를 수행하였다. Zukas 는 관통에 관한 다양한 연구 및 실험식을 정리하였다.⁽⁴⁾ Burton 은 탄두의 형상에 대한 초고속 충돌의 연구를 수행하였다.⁽⁵⁾ Kawai 등은 초고속 충돌을 받는 세라믹에 관한 파괴거동에 대한 연구를 수행하였으며, Weber 는 적층 알루미늄 표적에 관한 응답 특성을 연구하였다.^(6,7)

탄에 대한 다양한 연구가 이루어지면서 이와 동시에 방호에 대한 연구 또한 다양하게 이루어지고 있다. 다양한 단면을 가지는 보강재는 적은 질량 및 부피 증가로도 관통 저감에 대한 연구가 다양하게 수행되고 있다.

본 논문에서는 모자형 보강재의 크기를 결정하기 위해서 진동 최적화를 수행하여 곡률이 있는 패널에 보강되는 모자형 보강재의 크기를 결정하였다. 그리고 보강재의 크기는 1 개에서 최대 3 개 까지 보강하였으며, 보강 방향은 원주 방향 그리고 길이 방향으로 보강하였다.

보강된 패널을 이용하여 1500 ~ 2500 m/s 의 속도를 가지는 발사체에 대한 관통 해석을 수행하였다. 발사체의 속도와 운동에너지를 이용하여 보강재의 충격 저감 특성에 대해서 연구하였다.

2. 모자형 보강재 형상의 진동 최적화

2.1 모자형 보강재의 형상 및 최적화 변수

본 논문에서 사용되는 모자형 보강재의 형상과 변수는 Fig. 1 과 같다. 변수는 총 7 개의 변수가 존재한다. 하지만 최적화를 수행하기 위해서 고려된 변수는 W_{side} , W_{bottom} , $h_{stiffener}$ 이며 모자형 보강재의 두께는 모두 t_1 으로 동일하다고 가정하였다.

보강재가 강성에 미치는 영향으로 형상에 대한 변수 뿐만 아니라 레이아웃 및 개수에 대한 변수 또한 중요한 영향을 미친다. 그리고 보강판의 적층수 또한 발사체에 대한 충격 저감 특성에 영향을 미친다. 본 논문에서는 단층 보강판을 적용하였다. 보강재의 개수는 원주 방향으로 최대 3 개, 그리고 길이 방향으로 3 개까지 적용하였다. 각각에 대한 형상의 크기를 결정하였다.

2.2 최적화 방법

모자형 보강재의 형상을 결정하기 위해서 최적화를 수행하였다. 최적화를 수행하기 위해서 프로그램은 ANSYS Workbench V13 의 Goal Driven

Table 1 Design optimal function

Optimization methods	Screening Approach Method
Object function	Maximize the fundamental natural frequency
Constraint function	Volume of total stiffeners
Design Variable function	Stiffener dimension

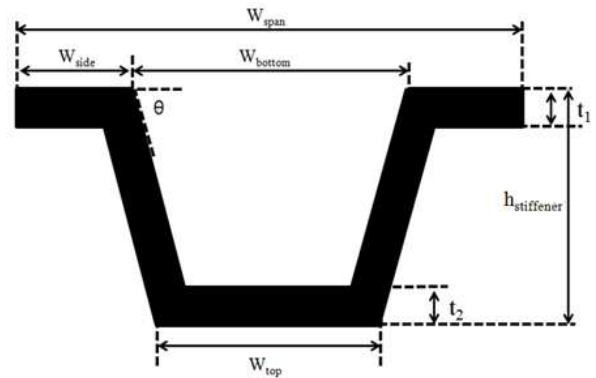


Fig. 1 A cross-section and variables of the hat-shaped stiffener

Optimization 을 이용하였다.

ANSYS Workbench 에서 제공하는 최적화 방법으로는 Screening, MOGA, NLPQL 접근법이 존재한다.⁽⁸⁾

Screening 접근법은 Hammersley 알고리즘을 기반으로 임의숫자 발생자에 의해서 비상호 샘플링 방법이다. 이 방법은 MOGA 와 NLPQL 접근법으로 다루기 힘든 문제들을 해결하기 위한 새로운 접근법이다.

최적화를 수행하기 위해서는 목적, 제한, 설계 변수 함수가 필요하며 이에 대한 정리는 Table 1 과 같다.

최적화의 목적 함수로는 모자형 보강재를 사용한 보강 패널의 1 차 고유 진동수인 기본 고유진동수를 최대화하는 것을 목적함수로 수행하였다. 보강재의 형상을 무조건 키우기 힘들기 때문에 이를 제한 하기 위해서 보강재에 사용되는 부피를 모재 패널 부피의 10% 이내가 되도록 하였다.

Screening 접근법은 임의의 샘플링을 통해서 분포를 파악하여 해석을 수행하기 때문에 1000 개의 샘플링을 설정할 수 있도록 하였다.

설계 변수로는 4 개의 모자형 보강재의 형상 변수가 되며, 이 변수들의 범위는 식 (1)에서와 같이 정의하였다.

Table 2 Results of the sizing optimization on hat-shaped stiffener

No. of stiffener	t_1 (mm)	$h_{\text{stiffener}}$ (mm)	w_{wing} (mm)	w_{bottom} (mm)	Freq. (Hz)	
Unstiffened plate	-	-	-	-	3931	
Ring direction	1	0.702	6.971	2.637	1.804	4057
	2	0.651	6.940	2.093	2.393	4112
	3	0.615	4.879	2.028	2.701	4058
Longitude direction	1	1.140	4.922	2.407	2.962	4045
	2	1.020	4.917	2.283	2.579	4079
	3	0.636	4.821	2.305	4.821	4096

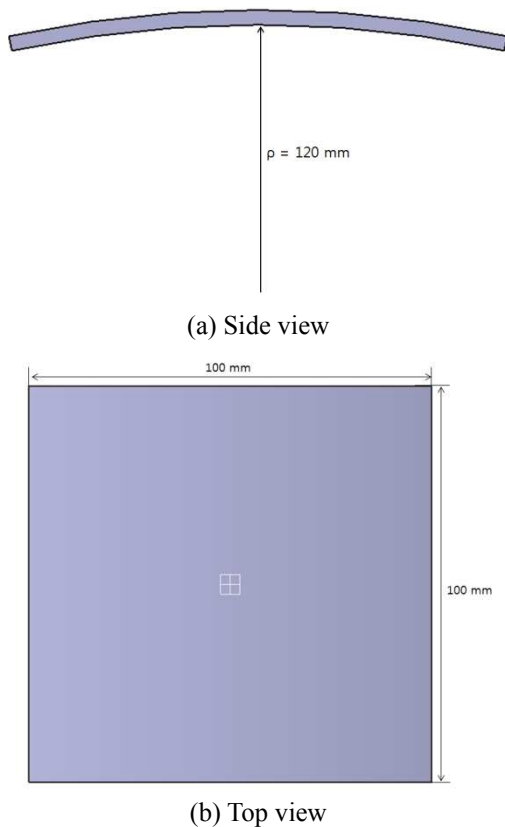


Fig. 2 Geometry of the unstiffened panel

$$\begin{aligned}
 &0.6 \leq t_1 \leq 1.4 \\
 &3 \leq h_{\text{stiffener}} \leq 7 \\
 &2 \leq w_{\text{side}} \leq 3.5 \\
 &1 \leq w_{\text{bottom}} \leq 3
 \end{aligned} \tag{1}$$

2.3 최적화 수행 결과

Table 2 는 최적화를 수행한 결과이다. 보강재의 특징으로 패널의 원주 방향으로 보강할 경우 대체적으로 보강재의 높이가 다른 보강재에 비해서 높

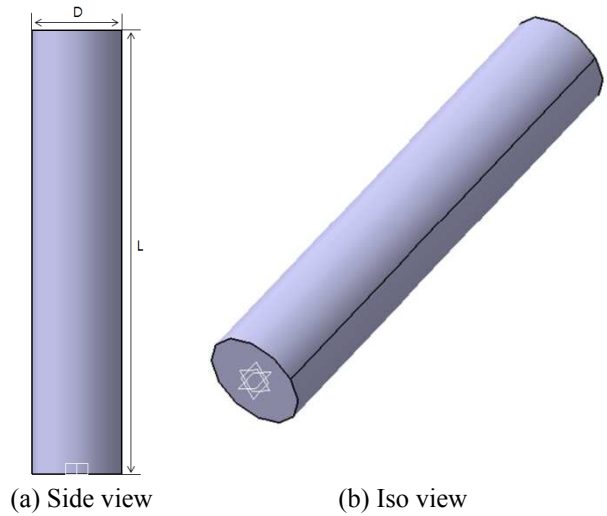


Fig. 3 Three-dimensional model of a projectile

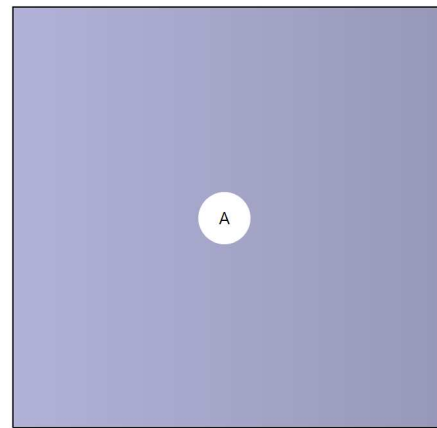


Fig. 4 Position of a projectile

다는 높다는 것을 알 수 있으며, 축방향으로 보강한 보강재의 경우 두께가 높은 것을 알 수가 있다.

Table 2 에서 보는 바와 같이 최적화된 결과를 통하여 보강재의 치수를 결정하고 이를 이용하여 관통해석을 수행하였다.

3. 해석 조건 및 결과

3.1 해석 모델

Fig. 2 는 단일 곡률 패널의 윗면뷰이다. 패널의 3 mm 이며, 곡률 반경은 R 120 mm 이다. Fig. 3 은 비보강 패널의 형상 크기 및 곡률 반경을 나타낸 모습이다. 비보강판에 계산 결과된 보강재를 이용하여 관통해석을 수행하였다. 발사체로는 Fig. 4 와 같이 L/D 가 5 인 발사체를 사용하였다.⁽⁹⁾ 보강재는 패널과 완전 접합되어 있다고 가정하였다.

그러므로, 보강재와 패널의 노드는 서로 공유가 되도록 구성하였다.

3.2 해석 조건

3.2.1 경계 조건 및 하중 조건

보강 패널의 관통 해석을 하기 위해서 경계조건으로는 자유 경계조건을 주어 해석을 수행하였다.

Table 3 Physical properties on the 1002 steel and 5052 Aluminum⁽¹¹⁾

Physical Properties	1002 Steel	5052 Al
Density(kg/m ³)	7850	2616
Modulus of Elasticity (GPa)	210	70
Poisson's Ratio	0.28	0.28
Yield Strength (MPa)	343	183

Table 4 Constants of the Johnson-Cook equation

	A	B	C	n
Aluminum	185	253	0.015	0.45
Steel	310	510	0.007	0.15

발사체는 Fig. 4 와 같이 L/D 가 5 의 형상비를 가진다. 이 발사체는 Fig. 5 에서 보이는 위치와 같이 보강 패널의 중앙에 위치하며, 수직하게 관통하도록 하였다.

발사체와 보강패널은 모두 사각격자를 생성하였으며, 격자의 크기는 모두 0.5 mm 의 크기로 생성하였다.

발사체는 1500, 2000, 2500 m/s 의 초고속도로 변화를 주어 각각의 속도에 따른 관통 저감 특성을 파악하였다.

3.2.2 해석 재료

발사체는 탄소강을 그리고 보강 패널과 보강재는 모두 알루미늄 합금을 사용하였다. 재료에 대한 재료 특성은 Table 3 과 같다.

관통 해석을 수행하기 위해서 LS-DYNA 를 이용하여 해석을 수행하였다. 발사체와 보강 패널에 대해서 식 (2)와 같이 Johnson-Cook 방정식을 적용하였다.⁽¹⁰⁾

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}) \left(1 - \left(\frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}}\right)^m\right) \quad (2)$$

LS-Dyna 에서는 다양한 Johnson-Cook 방정식이 존재한다. 본 논문에서는 온도에 대한 영향을 적용하지 않은 Simplified Johnson-Cook 방정식을 적용하였다. Simplified Johnson-Cook 은 열적 효과 및 손상에 대해서 무시하며, 최대 응력값이 항복응력을 줄이는데 중요한 역할을 하는 열적연화에 의해서 최

Table 5 Results of the Velocity and Kinetic energy on the projectile

	Velocity (m/s)			Kinetic Energy (J)		
	Initial	Residual	Reduction ratio	Initial	Residual	Reduction ratio
Unstiffened	1500	1460	0.9733	34659	33537	0.9676
	2000	1952	0.9760	61615	59479	0.9653
	2500	2467	0.9868	96057	93494	0.9733
1 ring stiffener	1500	1449	0.9660	34659	32521	0.9383
	2000	1953	0.9765	61615	58464	0.9489
	2500	2457	0.9828	96057	92256	0.9604
2 ring stiffener	1500	1459	0.9727	34659	33225	0.9586
	2000	1960	0.9800	61615	58547	0.9502
	2500	2464	0.9856	96057	93499	0.9734
3 ring stiffener	1500	1452	0.9680	34659	32730	0.9443
	2000	1953	0.9765	61615	58056	0.9422
	2500	2456	0.9824	96057	92795	0.9660
1 long stiffener	1500	1442	0.9613	34659	32841	0.9475
	2000	1942	0.9710	61615	58235	0.9451
	2500	2458	0.9832	96057	92281	0.9607
2 long stiffener	1500	1461	0.9740	34659	33229	0.9587
	2000	1959	0.9795	61615	58813	0.9545
	2500	2463	0.9852	96057	93395	0.9723
3 long stiffener	1500	1451	0.9673	34659	32726	0.9442
	2000	1955	0.9775	61615	58124	0.9433
	2500	2456	0.9824	96057	93490	0.9733

Table 6 Results of the normalized velocity and kinetic energy on the stiffened panel

	Initial velocity	Normalized Velocity	Normalized kinetic energy
Unstiffened	1500	1.000	1.000
	2000	1.000	1.000
	2500	1.000	1.000
1 ring stiffener	1500	0.950	0.928
	2000	0.957	0.941
	2500	0.953	0.944
2 ring stiffener	1500	0.924	0.916
	2000	0.929	0.910
	2500	0.924	0.925
3 ring stiffener	1500	0.907	0.890
	2000	0.913	0.891
	2500	0.908	0.906
1 long stiffener	1500	0.934	0.926
	2000	0.941	0.926
	2500	0.943	0.934
2 long stiffener	1500	0.910	0.901
	2000	0.913	0.899
	2500	0.908	0.909
3 long stiffener	1500	0.908	0.891
	2000	0.915	0.893
	2500	0.909	0.913

대 응력이 제한되는 특징을 가진다. 그리고 Fully Johnson-Cook 방정식보다 열적 연화 효과와 손상에 대한 계산을 줄임으로서 계산 속도가 50% 빠른 것이 특징이다. 본 논문에서 보강재의 충격 저감 특성에 대한 연구는 Simplified Johnson-Cook 방정식이 적정하다. 해석에 적용되는 상수는 A, B, n, C를 적용한다. 상수에 대한 정보는 Table 4 와 같다.⁽¹¹⁾ 파단 조건으로 주응력 모드를 적용하였다.

관통해석을 수행하는데 중요한 요인 하나는 Eroding strain rate 이다. 일반적으로 해석을 수행할 때 Eroding strain rate 는 150 % 로 설정해주어 해석을 수행하기 때문에 본 논문에서도 150 %를 적용하였다.

3.2.3 해석 결과

충격 저감 특성을 분석하기 위해서는 속도와 운동에너지를 이용하여 특성 분석을 하는 것이 중요하다. Table 5 은 발사체의 잔류 속도 및 운동 에너지의 결과이다.

4. 고 찰

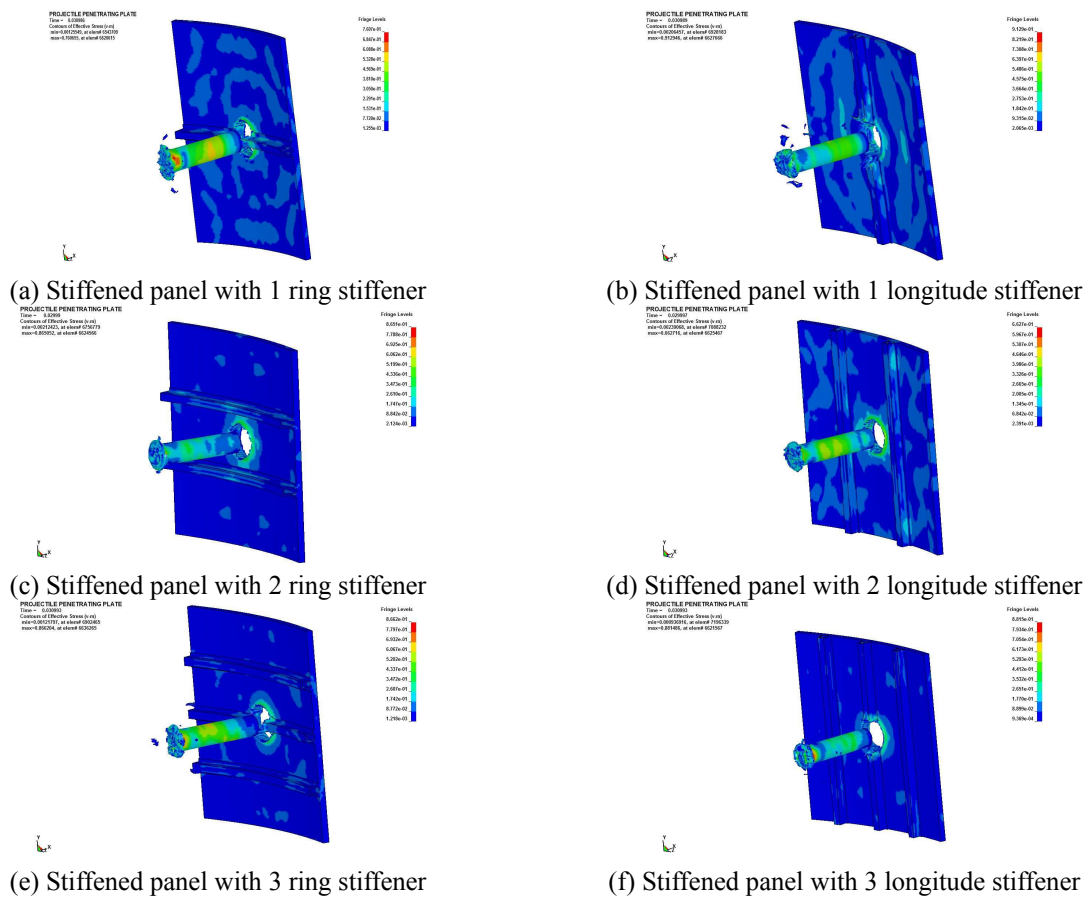


Fig. 6 The stress distribution on the stiffened panel under the hypervelocity impact

$$\begin{aligned} & * \text{Normalized velocity reduction} \\ & = \frac{\text{Velocity reduction ratio of stiffened panel}}{\text{Velocity reduction ratio of unstiffened panel}} \times \frac{1}{\text{Increased volume ratio}} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & * \text{Normalized kinetic energy reduction} \\ & = \frac{\text{kinetic energy reduction ratio of stiffened panel}}{\text{kinetic energy reduction ratio of unstiffened panel}} \times \frac{1}{\text{Increased volume ratio}} \end{aligned} \quad (4)$$

보강 패널의 보강재에 의한 충격 저감 효과를 알기 위해서 발사체의 속도와 운동에너지의 무차원화를 통해서 비교 분석 하였다. 무차원화를 하기 위해서 아래의 식 (3)과 (4)를 기반으로 계산하였다.

식 (3)은 증가된 부피 대비 감소된 속도량을 나타내며, 식 (4)는 증가된 부피 감소된 운동 에너지를 나타낸다.

무차원화를 통해 얻은 계산 값은 부피 증가 비에 대해서 속도 및 운동 에너지 감소율을 비교한다. 계산 값은 Table 6 에서 나타내었으며, Fig. 6 은 2000 m/s 에서 각각의 보강 패널의 완전 관통된 그림이다.

모든 보강 패널의 충격 특성 효과는 5%이상의 충격 저감 효과를 가진다. 2 개의 보강재가 사용된 경우 충격 특성은 비보강 패널의 충격 과정과 비슷하지만 비보강 패널보다 충격 지점과의 경계조건 거리가 짧아지기 때문에 좀더 강성이 증가한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 모자형 보강재에 대한 형상을 결정하기 위해서 진동 최적화를 통해 형상의 크기를 선정하였다. 그리고 선정된 크기의 보강재로 보강하여 보강된 패널을 L/D 가 5 인 발사체로 관통하였을 때, 발사체의 속도와 운동에너지를 무차원화하여 비보강 패널과의 충격 저감 특성을 비교하였다.

(1) 모자형 보강재는 5 % 이상의 충격 저감 효과를 가진다.

(2) 보강재를 이용하여 단일 곡률을 가지는 패널을 보강할 때 원주 방향과 길이 방향으로 보강하는 방향에 따라서 충격 저감 효과가 크게 달라진다.

(3) 1 개 또는 2 개의 보강재를 사용하는 경우, 원주 방향으로 보강한 경우보다 길이방향으로 보강한 경우가 더 좋은 충격 저감 효과를 보이지만 3 개의 보강재를 사용하는 경우부터는 원주 방향이나 길이방향에 대해서 크게 영향을 미치지 않는다.

후 기

이 논문은 2012 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2012-0004596)

참고문헌

- (1) Bedair, O., 2011, "Free Vibration Characteristics of Thin Walled Panels Attached to Zee-Stiffeners," *Thin-Walled Structures*, Vol.49, No.4, pp.494~501.
- (2) Alinia, M.M., 2005, "A Study into Optimization of Stiffeners in Plates Subjected to Shear Loading," *Thin-Walled Structures*, Vol.43, No.5, pp.845~860.
- (3) Aki, W., Ei-Sabbagh, A. and Baz, A., 2008, "Optimization of the Static and Dynamic Characteristics of Plates with Isogrid Stiffeners," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 44, No. 8, pp. 513~523.
- (4) Jukas, J.A., Nicholas, T., Swift, H.F., Greszczuk, L.B. and Curran, D.R., 1982, "Impact Dynamics," *Wiley-Interscience*.
- (5) Cour-Palaz, B.G., 2001, "The Shape Effect of Non-Spherical Projectiles in Hypervelocity Impacts," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.26, No. 1-10, pp.129~143.
- (6) Kawai, N., Tsumi, K., Shindo, D., Motoyashiki, Y. and Sato, E., 2011, "Fracture Behavior of Silicon Nitride Ceramics Subjected to Hypervelocity Impact," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.38, No. 7., pp.542~545.
- (7) Weber, K., Holmquist, T.J. and Templeton, D., W., 2001, "The Response of Layered Aluminum Nitride Targets Subjected to Hypervelocity Impact," *International Journal of Impact Engineering*, Vol.26, No.1-10, pp.831~841.
- (8) ANSYS Workbench V13.0 User's manual, ANSYS Inc.
- (9) Jo, J.H. and Lee, Y.S., 2012, "A Study on Hypervelocity Penetration Characteristics of Cylindrical Rod Penetrator with Various L/D Geometry," *Proceeding of Annual Conference on Missile Division of the Korean Institute of Military Science and Technology*, pp. 428~433.

- (10) LS-DYNA Version 970 Keyword User's Manual, Livermore Software.
- (11) Part, M.S., Yoo, J.H. and Chung, D.T., 2004 "Numerical-Experimental Investigation and Optimal

Design of Dual Plate," *Proceeding of Spring Conference on Solid and Structure Division of the Korean Society of Mechanical Engineers*, pp. 24 ~ 27.