고속발사 충격을 받는 보강사각판의 연구

A Study on the Stiffened Rectangular Plate under High Velocity Impact

우 대 현*

Dae-Hyun Woo

이 영 신**

Young-Shin Lee

Abstract

The velocity response of stiffened rectangular plate under high velocity impact was studied. Numerical simulation was conducted on the stiffened plate with four stiffeners under various impact positions. Considered stiffener types were rib, I, hat and T stiffener. For the center impact position of I stiffened plate, the simulated residual velocity was 365.6 m/s with the initial projectile velocity 500 m/s. The reinforcing characteristic of I stiffened plate was excellent among four stiffeners.

Keywords : High Velocity Impact, Stiffened Rectangular Plate, Projectile

1. 서론

구조물에 하중이 작용하여 변형이 크게 발생하는 경우에 이를 감소시키는 방법으로써 구조물을 전체적으로 보강하는 것은 구조물 자체의 중량을 크게 증가시키게 되어 항상 바람직하다고 말할 수 없다. 작용하는 하중의 특성에 맞추어 구조물의 형태 및 보강 방법을 선택하면 구조물의 기능을 살리는 최적의 구조물을 설계할 수 있다^[1~3]. 판구조 요소는 모든 공학적 구조물의 기본 구조 요소로서 항공기, 잠수함, 선박, 우주 왕복선, 미사일 등과 같은 분야에서 활용되고 있다. 이러한 구조 요소들은 강성을 향상시키기 위해서 보강재를 사용하는 보강 기술을 이용한다. 보강으로 인

한 강성의 향상은 각종 정적 및 동적 외부 하중에서의 역학적 응답을 저감시킨다^[4~6]. 충돌문제의 해석은 크게 실험적, 분석적, 수치적 방법 등의 세 가지 접근 방법으로 나눌 수 있다. 이중 실험적 방법은 원하는 공학적 수치들을 얻기가 어렵고, 또한 발사체가 어느 수준 이상의 속도로 진행되는 경우 등에는 안전상의 문제로 실험 자체가 어렵고, 실험에는 막대한 시설과 비용이 많이 드는 단점이 있다. 반면에 수치모사 방법은 실험적 방법으로는 구현이 힘든 복잡한 형상이나 초고속 충돌 같은 한계상황에 대해서도 해석이 가능하다. 이러한 이유로 인해 최근에는 해석 이론 및 프로그램에 대한 관심이 높아지고 있으며 대변형을 모사하는데 사용하는 이론과 상용 프로그램인 LS-Dyna^[7], AutoDyn 등이 사용되고 있다^[8,9]. 유한요소법을 사용한 고속 충돌현상에 대한 연구는 초기에는 2차원 문제에 대해 진행되어 오다가, 현재는 3차원 문제의 해석에 중점을 두고 있다^[10~14]. 판통현상에 영향을 주는 인자는 크게 표적과 발사체에 영향을 주는 인자로 나뉜다.

† 2012년 3월 2일 접수~2012년 5월 4일 게재승인

* 한국항공우주연구원(Korea Aerospace Research Institute)

** 충남대학교(Chungnam National University)

책임저자 : 이영신(leeysh@cnu.ac.kr)

표적에 영향을 주는 인자로는 재료의 경도, 강도, 연성, 취성 및 소성변형 등의 기계적 성질과 밀도와 용융점도등의 물리적 성질이 있다^[15~17]. 발사체에 영향을 주는 인자로는 탄자의 속도와 그 형상 및 타격각과 재료의 특성 등이 있으며 이외에도 재료조성과 불균질성 등의 여러 인자가 있다. 구조물의 변형 거동을 해석하는데 있어서 변형이 발생하는 속도가 증가함에 따라 해석에 어려움이 더 해진다. 변형의 정도는 변형률로 변형이 발생하는 속도는 변형률속도로 정의되는데 작용하는 하중이 적어도 변형을 발생시키는 속도가 크면 기존의 준정적 이론에 더하여 고변형률속도와 이에 따른 온도상승 등을 고려하여야 한다^[18].

본 연구에서는 고속충격을 받는 보강사각판에 대한 연구를 진행하였다. 기존 문헌 및 실험 검증을 통해 재료 상수를 결정하였고, 이를 보강사각판에 적용하였다. 고속 충격을 받는 보강사각판에 보강형상, 충격 위치 및 동일 중량의 비보강판과 비교하였다.

2. 해 석

가. Johnson-Cook 이론 및 평판 실험에 의한 재료상수

재료의 소성 거동에 대한 연구는 그 동안 많은 연구가 이루어져 왔는데, 그 중에서도 Johnson-Cook이 제안한 방정식이 어느 정도 타당성을 인정받고 있다. Johnson-Cook 방정식은 식 (1)의 형태를 띠게 된다^[19,20].

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

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r}$$

여기서, σ 는 von-Mises 유동 응력, ϵ 은 유효소성 변형률, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ 은 무차원 소성 변형률 속도로 $\dot{\epsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$, T^* 는 균일 온도를 각각 나타내며, A, B, C, n, m은 실험을 통해 결정하게 된다.

Table 1은 실험재료의 기본 물성이며, 사용되는 강판은 100×100 mm에 두께 t = 6 mm, 10 mm를 사용하였다. 강구 또한 5 mm, 10 mm, 20 mm의 강구를 사용하고, 충돌속도는 약 400 m/s로 하였다.

본 충격실험에 사용된 시험 장치는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 시험 장치 및 회수챔버 그리고 발사

체가 있고, 그 외 속도 계측기 및 공이 발사부, 발사버튼 및 압력 측정 장치 등이 있다.

Table 1. Mechanical properties of plate and ball

Physical Properties	S45C steel plate	Die steel ball
Density(kg/m ³)	7850	7880
Modulus of Elasticity(GPa)	210	210
Poisson's Ratio	0.28	0.3
Yield Strength(MPa)	343	1170

(a) Launching equipment

(b) Tubes

(c) Gas control equipment

(d) Fixture

(e) Recovery chamber

(f) ball and Serve

Fig. 1. Testing equipments of impact test

Fig. 2는 발사충격에 의한 사각평판의 변형 깊이를 보여주고 있다. 직경 5 mm 발사체는 판의 우측에 치우쳐서 충격이 이루어지는 것을 볼 수 있었다. 이는 발사체와 동일한 직경의 판을 사용한 것이 아니라 발사체와 serve를 결합하여, 발사가 이루어진다. 이때 판

을 통과후 serve 분리될 때 생기는 오차이다. 나머지 10 mm, 20 mm 발사체는 판의 중앙부에 가깝게 충격이 이루어 졌다. 강구에 직접적으로 충격을 받은 위치는 강구모양과 비슷한 형태로 파이게 되었고, 두께에 따라 파이게 된 변형 깊이를 확인하였다. 실험과 비교하기 위해 CATIA를 이용 FE 모델을 구현하였고, Hypermesh를 이용 요소망을 생성하고 발사 속도 및 경계조건을 적용하였다. 해석은 LS-Dyna를 이용하였고, 해석 시간은 0.35 sec이었으며, Simplified Johnson Cook 모델을 적용하여 온도를 고려하지 않고 해석을 수행하였다. Fig. 3은 LS-Dyna를 이용한 해석한 결과이다. 실험에서와 같이 강구의 고속충격에 의해 판의 중앙부가 움푹 들어가게 되는 결과를 보이고 있다. 실험과 해석을 비교하기 위하여 판의 변형된 중앙부의 변형 값과 해석 값을 비교하였다. 여기서 각 $\phi 5$ 의 강구에 대한 결과 값을 제외한 나머지 결과는 약 10 % 내의

Fig. 2. Rectangle plate deformation depth by projectile impact(V = 400 m/s)

차이를 보이고 있었다. Table 3과 같이 실험결과로부터 Johnson-Cook 상수를 결정하였고, 그 값을 해석에 적용하였다.

Fig. 3. Penetration depth of high speed impact by simulation result

Table 2. Penetration depth of high speed impact by experiment and simulation

Plate dimension (mm)	Ball size (mm)	Penetration depth(mm)		Deviation (%)
		Experiment	Simulation	
100×100×6 (l×w×t)	Ø5	1	0.83	17
		1		
	Ø10	3.3	3.42	6.8
		3.1		
	Ø20	11	11.81	10.8
		10.3		
100×100×10 (l×w×t)	Ø20	6.1	6.83	11.7
		5.8		

Table 3. Johnson-Cook mechanical constant

Material	A	B	n	C
Plate	0.31	0.51	0.3	0.007

나. 보강판의 기하학적 형상 및 조건

고속발사에 의한 충격거동에 대하여 실험과 해석을 비교하여 얻은 데이터를 기반으로 보강사각판에 대한 충격거동 연구를 하였다. 해석 대상은 $L = 200 \text{ mm}$, $t = 6 \text{ mm}$ 의 정사각형 판을 기본으로 하였고, 발사체는 $\varnothing 25 \text{ mm}$, 길이 $l = 51 \text{ mm}$ 의 발사체로 가정하였다. 사각재의 보강을 위해 보강재의 기하학적 형상에 대해 고려하여야 한다. Fig. 4는 일반적으로 많이 이용되고 있는 보강형상이다. 각 형상은 두께 $t = 5 \text{ mm}$, 전체 높이 $h = 16 \text{ mm}$ 로 설계를 하였다.

CATIA를 이용하여 각 형상에 대한 모델을 생성 하였다. 사각판의 크기는 $200 \times 200 \text{ mm}$ 로 정사각형 형태이며 가로 및 세로 방향의 보강을 하여 Fig. 5와 같이 구성하였다. 이때 모델은 완전 접합된 상태로 가정하여 하나의 모델로 구현하였다.

판의 가장자리 부분을 완전고정으로 적용하였고, 소화기 및 항공기용 탄의 발사 속도가 $420 \sim 870 \text{ m/s}$ ^[19]로 나와 있어 - Z 방향으로 500 m/s 로 가정하였다. 해석에 사용되는 판재의 재질은 S45C steel 재질로 가정하여 적용하였고, 재질의 특성은 Table 1에 기술되어 있다. 보강판에 대한 Johnson-Cook 모델 물성은 박명수^[20] 논문에서 인용된 상수를 바탕으로 논문 검증 및 실험을 통한 결과값을 비교하여 Table 3과 같이 적용하였다.

Fig. 5와 같이 총 4곳에 대해 충격 해석을 수행하여, 각 보강형상 및 위치에 따른 충격거동에 관한 연구를 수행하였다. 각 타격 위치는 4곳으로 ① (0,0) 위치로 세로 및 가로 방향 보강재가 만나는 위치로서 해석 모델의 중심부이다. 발사체가 보강판의 중심에 충격이 이루어지면서 세로 및 가로 방향 보강재에 대한 영향을 받게 되며, ② 위치는 가로 방향 보강재에 대한 영향을 보기 위한 것으로 발사체가 보강판의 중심으로부터 40 mm 이격된 위치에서 보강판에 충격이 이루어지며, 가로 방향 보강재에 대한 영향을 받게 된다. ③ 위치는 보강재 근방에 대한 영향을 보기 위한 것으로 발사체가 보강판의 중심으로부터 가로 20 mm , 세로 -20 mm 이격된 위치에서 보강판에 충격이 이루어졌다. ④ 위치는 발사체가 보강판의 중심으로부터 가로 40 mm , 세로 -40 mm 이격된 위치에서 보강판에 보강되지 않은 위치에 충격이 이루어지며, 위치에 대한 좌표로 나타내면 ① (0,0), ② (40,0), ③ (20, -20), ④ (40, -40)와 같다.

Fig. 4. Schematic drawing of stiffener geometry

Fig. 5. Impact position of stiffened plate

CATIA를 이용하여 모델링한 보강판을 Hypermesh로 불러들여 요소망을 생성하고 지지조건 및 하중조건 (발사체의 속도)을 적용하였다. 이때 요소의 크기는 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 로 하여 각 모델에 따라 $20,000 \sim 28,000$ 개의 element를 가진다.

Fig. 6. Simulation result of Rib stiffener plate

다. 고속 충격을 받는 보강판의 해석

고속 충격을 받는 보강판에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 6은 보강판 중에서도 Rib stiffener plate에 대한 해석을 수행한 결과로 각 위치에 대한 해석 결과와 발사체의 속도 그래프를 나타내고 있다. 관통은 $t = 0.3$ s에서 일어나기 시작하여 $0.7 \sim 1.4$ s에서 완전한 관통이 일어나는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 보강판의 충격위치에 따라 관통 후 발사체의 속도를 보게 되면 발사체의 관통 후 속도는 가로, 세로방향의 보강재가 교차하는 위치의 (A) 위치에서 가장 많은 속도 감소를 보이고 있는 것을 알 수 있다. (A) 위치에서 -410.9 m/s, (B) 위치에서 -436.2 m/s, (C), (D) 위치에서는 -465 m/s의 속도로 감소한 것을 볼 수 있었다. 비보강판에 대해 해석을 수행한 결과 보강판의 (D) 위치를 관통 할 때와 유사한 거동을 보이고 있으며 관통 후 속도는 464.2 m/s를 보이고 있다.

Table 4는 보강판과 각 위치별 관통후 속도를 나타낸 표이다. 각 위치에 따라 보강재의 속도가 다르게 나타나고 있고, (A) 위치에서는 I stiffener 보강판에 의한 속도감소가 가장 크게 나타나고 있고, (B) 위치에서는 Hat stiffener 보강판에 의한 속도 감소가 가장 크게 나타났다. 나머지 (C), (D) 위치에서는 Rib stiffener 보강판과 유사한 것을 확인 할 수 있었다. (C) 위치에서 Hat stiffener 보강판의 관통 했을 때 다른 보강판 보다 속도가 감소한 것은 관통과정 중 보강재를 부분적으로 관통하면서 속도가 감소한 것이다.

(C), (D) 위치에서는 비보강 위치로 관통을 할 때 발사체의 속도 감소에 영향을 미치지 못한 것을 볼 수 있었다. 하지만 보강판의 (C), (D) 위치를 관통한 후 관통면을 관찰한 경우 보강재에 의한 관통 위치의 변형과 비보강판을 관통한 후의 변형과 비교 했을 때, 변형이 줄어든 것을 확인 할 수 있었다. 그 결과

는 각 보강판의 변형과 비교하여 Table 4에 나타내었고, 관통에 의한 변형이 보강재에 의해 줄어든 것을 확인 할 수 있었다. ㉔ 위치에서 Hat stiffener 보강판의 변형이 감소한 것은 위의 속도와 같은 경우로 보강재를 부분적으로 관통하면서 변형이 줄어든 것으로 보인다.

Table 4. Displacement of stiffened plate on the ㉔, ㉕ impact position(mm)

Stiffened plate	Unstiffened plate	Rib stiffener	T stiffener	Hat stiffener	I stiffener
㉔	11.8	6.5	5.2	2.5	4.3
㉕		10.5	10.3	10.2	10.7

라. 보강판과 동일 중량의 비보강판의 해석

보강에 따른 중량증가를 계산하였고, 판이 고정된 상태에서 두께 변화를 고려하여, 각각의 모델 중량과 동일하게 하는 판의 두께를 결정하였으며, 그 결과를 바탕으로 해석을 수행하였다. 가장 많은 중량변화를 가진 I stiffener와 비교 했을 때 두께는 10.7 mm로 증가되었고, 이때 관통후 속도는 436.7 m/s로 감소하였다. 각각의 동일 중량의 비보강판에 대한 관통후 속도는 Table 5와 같이 감소하였다.

3. 보강판에 따른 고속충격 고찰

보강판의 고속 충격 특성은 충격후 잔류속도를 비교하여 고찰하였다. 보강판의 잔류속도는 위치마다 다르며, 중앙점 ㉔를 기준으로 각 보강판의 잔류속도를 비교하였다. Table 6은 식 (2)를 적용하여 비보강판과 보강판에 관통 후 잔류속도를 무차원화한 결과(normalized residual velocity*) 이다. 식 (2)에서 기준중량(reference weight**)은 Table 6에서 구한 비보강판의 중량이고, 기준잔류속도(reference residual velocity***)는 Table 5의 비보강판의 잔류속도이다.

보강사각판 중에서 I stiffener 보강판 및 hat stiffener 보강판이 잔류속도가 가장 작아 보강특성이 우수 하였으며, 그 다음으로 T stiffener 보강판 이었고, Rib stiffener가 가장 높았다. 동일 중량의 비보강판으로 고찰한 결과도 동일한 순서로 잔류속도가 변하였다.

Table 5. Residual velocity results of unstiffened plate with thickness variation on the center position ㉔

Thickness (mm)	Self weight (kg)	Residual velocity (m/s)	Equivalent stiffened plate velocity	Remark
6	1.88	464.2	-	-
8.31	2.61	460.4	410.9	Rib stiffener
8.94	2.81	455.7	402.1	T stiffener
10.63	3.34	441.2	393.2	Hat stiffener
10.70	3.36	436.7	385.6	I stiffener

Table 6. Normalized residual velocity of stiffened and unstiffened plate

Stiffened plate		Unstiffened plate	
Type	Normalized residual velocity*	Thickness (mm)	Normalized residual velocity*
-	-	6.00	1.00
Rib stiffener	0.64	8.31	0.71
T stiffener	0.58	8.94	0.66
Hat stiffener	0.47	10.63	0.53
I stiffener	0.46	10.70	0.52

$$v_{normalized} = \frac{W_{reference}}{v_{reference}} \times \frac{v_{residual}}{W_{residual}} \quad (2)$$

$v_{normalized}$: Normalized residual velocity

$W_{reference}$: reference weight

(weight of unstiffened plate form Table 6)

$W_{residual}$: weight of stiffened and unstiffened plate

$v_{reference}$: reference residual velocity

(velocity of unstiffened plate form Table 6)

$v_{residual}$: weight of stiffened and unstiffened plate

4. 결 론

보강사각판의 고속 발사충격에 의한 거동을 연구하였다. 보강재의 형상은 Rib, T, Hat 및 I형 네 가지를 고려하였으며, 타격 위치를 고려하여 해석을 수행하였다.

- 1) 실험과 해석결과의 비교를 통해 Johnson-Cook 방정식의 상수를 결정하였다. 고속충돌에 의한 비보강사각판의 변위에 대해 실험 및 LS-Dyna의 해석결과와 비교였다. 비교한 결과, 5~10 % 내의 차이를 가지는 것을 확인하였다.
- 2) 보강형상에 따른 발사체의 관통 후 속도는 I stiffener 보강판의 중앙부를 관통했을 때 500 m/s의 발사체 속도에서 관통직후 탄환의 속도가 385.6 m/s 속도로 감소하고 있다.
- 3) 비보강판과 보강판의 관통후 잔류속도를 무차원화한 결과, 보강사각판 중에서 I stiffener 보강판 및 Hat stiffener 보강판이 보강특성이 우수 하였으며, 동일 중량의 비보강판의 잔류속도도 동일한 특성을 보였다.

후 기

본 논문은 한국연구재단 2012년도 일반 연구자지원 지역대학 우수과학자 지원사업(과제번호 : 2012-0004596)의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

References

[1] 장진건, 이영신, 양태호, “링 보강 원통셀의 고유진동수 최적화에 관한 연구”, 대한기계학회 논문집 A권, 제36권, 제3호, pp. 305~312, 2012.

[2] 이용호, 정동택, 강형, “세라믹 구를 이용한 동적 파괴 특성 연구”, 2002년도 기계관련 산학연 연합심포지엄 강연 및 논문 초록집, pp. 552~557, 2002. 11.

[3] 김창욱, 이형복, “질화유리의 고속충돌 저항물성”, 한국세라믹학회지, 제43권 제10호(통권 제293호),

pp. 646~652, 2006. 10.

[4] 김하윤, “관통자에 의한 경사복판의 관통현상에서 유한요소법을 근간으로한 라그랑지 코드의 변수의 영향에 관한 연구”, 대한기계학회 2004년도 추계학술대회 논문집, pp. 55~60, 2004.

[5] 박성수, 신형섭, 최광, “에어건을 이용한 마그네슘 합금 판재의 강구 관통 거동”, 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 강연 및 논문 초록집, pp. 228~230, 2009. 11.

[6] 김일진, 이복원, 임 건, 김천곤, 백종규, 윤병일, “탄두형상에 따른 케블라 직물의 방탄특성 연구”, 한국군사과학기술학회 학술대회논문집, Mar 2009.

[7] LS-DYNA Version 970 Keyword User's Manual, Livermore Software.

[8] 주재현, 김학인, 구만희, 박지우, “내충격 개방형 구조물에 대한 피탄 및 폭압 충격 해석”, 한국군사과학기술학회지, 제13권 제5호, pp. 933~940, 2010. 10.

[9] 김용석, 여환곤, “소형 관통자의 콘크리트 표적 수직충돌 침투특성 연구”, 한국군사과학기술학회지, 제14권 제2호, pp. 321~325, 2011. 4.

[10] G. Paulus, and V. Schirm “Impact Behaviour of PELE Projectiles Perforating thin Target Plates”, International Journal of Impact Engineering, Vol. 33, pp. 566~569, 2006.

[11] J. B. Jordan, and C. J. Naito, “Calculating Fragment Impact Velocity from Penetration Data”, International Journal of Impact Engineering, Vol. 37, pp. 530~536, 2010.

[12] T. Saburi, S. Kubota, M. Yoshida, Y. Wada, and Y. Ogata, “Experimental Impact Study using an Explosive Driven Projectile Accelerator and Numerical Simulation”, International Journal of Impact Engineering, Vol. 35, pp. 1764~1769, 2008.

[13] V. S. Galvez, and L. S. Paradela, “Analysis of Failure of add-on Armour for Vehicle Protection Against Ballistic Impact”, Engineering Failure Analysis Vol. 16, pp. 1837~1845, 2009.

[14] Z. H. Tan, X. Han, W. Zhang, and S. H. Luo, “An Investigation on Failure Mechanisms of Ceramic/metal Armour Subjected to the Impact of Tungsten Projectile”, International Journal of Impact Engineering, Vol. 37, pp. 1162~1169, 2010.

- [15] C. Yong, Y. Wang, P. Tang, and H. X. Hua, "Impact Characteristics of Stiffened Plates Penetrated by Sub-ordnance Velocity Projectiles", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 64, pp. 634~643, 2008.
- [16] B. G. Prusty, "Linear Static Analysis of Composite Hat-stiffened Laminated Shells using Finite Elements", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 39, pp. 1125~1138, 2003.
- [17] C. Mittelstedt, and K. U. Schroder, "Local Postbuckling of Hat-stringer-stiffened Composite Laminated Plates under Transverse Compression", *Composite Structures*, Vol. 92, pp. 2830~2844, 2010.
- [18] 민옥기, 정동택, 유정훈, "고속 충격을 받는 판구조의 해석 및 최적설계", *한국과학재단, 연구보고서*, 2004.
- [19] 박종일 역, "방호공학개론(Modern Protective Structures)", 도서출판 씨아이알, 2011.
- [20] 박명수, 유정훈, 정동택, "복합판재의 수치-실험적 고찰 및 최적화 설계", *대한기계학회 2004년도 고체 및 구조역학 부문 학술대회 논문집*, pp. 24~27, 2004.