

횡충돌 하중을 받는 비보강 강판의 구조거동에 대한 크기 효과

조상래^{1,†}·박정열²·송승욱¹·박상현¹
울산대학교 조선해양공학부¹
일본선급²

Scale Effects on the Structural Behavior of Steel Unstiffened Plates Subjected to Lateral Collisions

Sang-Rai Cho^{1,†}·Jeong-Yul Park²·Seung-Uk Song¹·Sang-Hyun Park¹
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan¹
Class NK²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The scale effects on the permanent deformations and fractures of structures subjected to impact loadings have been aware by structural engineers for a long time. Experimental investigations have been performed with various structures to demonstrate the effects, but very few are directly related with marine structural elements. Furthermore, the causes of the scale effects have not clearly been answered yet. In this study, to quantify the scale effects on the permanent deflections, lateral collision tests were performed on steel unstiffened plates and the numerical analyses of the tested models were also conducted using a commercial package, Abaqus. After the substantiation of the numerical tool using the test results, a parametric study was carried out considering and neglecting the strain-rate hardening. Based upon the parametric study results, it may be concluded that the main cause of the scale effects on the permanent deflections of steel unstiffened plates subjected to lateral collision loads is the strain-rate effects.

Keywords : Lateral collision(횡충돌), Scale effect(크기효과), Steel plate(강판), Strain-rate hardening(변형률속도 경화), Permanent deflection(영구처짐)

1. 서론

선박과 해양구조물의 안전사고 중에서 충돌, 좌초나 접촉은 재산, 인명 피해뿐만 아니라 심각한 환경오염을 야기할 수 있다. 이와 같은 사고가 발생하면 구조물은 대변형률을 동반하는 소성 변형이 발생하고 경우에 따라서는 파단이 일어날 수도 있다. 특히 충격하중에 대한 구조물의 소성변형의 크기나 파단의 발생 여부와 발생한 파단의 크기에 대한 예측은 선박의 안전성 평가에 매우 중요하다. 따라서 사고 회피를 위한 능동적 설계에 대한 노력과 더불어 사고의 발생 시 환경과 인명의 피해를 최소화하는 설계가 필요하다. 자항 능력이 있는 선박의 경우도 그렇지만 해양구조물과 같이 해상에서 오랫동안 한 자리에 머무는 구조물의

경우는 보수가 어려워 사고로 인해 구조물에 발생하는 손상에 대해 초기 설계 단계에서부터 고려하여야 한다.

이러한 충격하중을 고려한 선박이나 해양구조물의 구조설계를 위해 대부분의 설계에서는 상용 프로그램을 사용한 동적 비선형 수치해석을 수행하고 있다. 정적하중을 받는 경우도 마찬가지지만 특히 충격하중을 받는 경우는 반드시 실험결과와 비교하여 사용하는 수치해석법의 검증이 반드시 필요하다. 이런 검증을 위해서는 실선 규모의 모델을 사용한 충돌 실험 결과를 활용하는 것이 바람직하다. 하지만 이에 소모되는 비용이나 시간을 감안하면 부득이 축소 모델을 사용하여 충돌 실험을 하게 된다. 이러한 축소 모델에 대한 충돌 실험의 결과를 실선에 적용하기 위해서는 크기효과(scale effect)를 고려하여야 한다. 왜냐하면 충격 하중을 받는 경우 같은 재료로 그리고 동일한 제작 방법으로 제작된

구조물이라 하더라도 크기가 작을수록 손상이 작아지는 경향이 있기 때문이다 (Booth et al., 1983). 따라서 이러한 크기효과에 대한 검토 없이 소형 모델의 실험 결과를 모델보다 훨씬 큰 실제 구조물에 적용하면 구조물의 충격 저항능력을 과대평가하게 된다. 그럼에도 불구하고 충격을 고려한 설계에서는 축소모델에서의 크기효과를 고려하지 않고 구조설계에 활용하고 있다.

지금까지 발표된 크기효과에 관한 실험연구는 다양한 형태의 구조물을 대상으로 이루어졌다. 하지만 선박해양구조물에 많이 쓰이는 비보강판이나 보강판을 대상으로 한 연구는 미흡하다.

Wen and Jones (1993)는 연강과 알루미늄합금으로 제작한 원형 판의 주변을 고정하고 원통형의 충돌체를 3.10 m/s - 5.04 m/s 의 속도로 충돌시켰다. 연강은 변형률속도에 민감한 재료로 선택한 것이고 알루미늄합금은 변형률속도에 둔감한 재료의 예로 선택한 것이다. 이 충돌로 모델의 횡 소성변형도 일어나고, 관통 손상이 일어나기도 하였다. 관통 손상에서는 변형률속도의 민감성이 그리 중요하지 않음을 보고하였다.

Paik and Lee (1996)는 찢김 응답에 대한 치수(판 두께) 및 동적 효과를 고려하기 위해 비보강판과 보강판에 대해 판 두께를 변화 시켜 찢김 시리즈 실험을 수행하였다. 연구 결과로부터 판 두께에 대해서 일정한 기하학적 상사법칙이 성립함을 밝혔다. 다만 판 두께가 2 mm이하인 극히 박판의 경우 판 두께가 3 mm이상의 상대적으로 두꺼운 판은 서로 다른 기하학적 상사법칙을 보였다.

Shen et al. (1998)은 비보강판에 대해 판의 절단강도에 미치는 크기효과를 규명하기 위해 날카로운 웨지를 사용하여 준정적 실험연구를 수행하였다. 이 연구에서 굽힘 변형이나 마찰에너지는 크기비를 따르지만 절단에너지는 크기비를 따르지 않음을 밝혔다. 또한 모델의 크기가 절단에너지에 영향을 미치지 않음도 확인하였다.

Jiang et al. (2006)의 연구에서는 연강으로 원형 고깔 모델을 제작하여 고깔 꼭지점을 축방향으로 타격하여 모델 길이의 감소량을 측정하였다. 충격은 압축가스를 이용하여 발사시킨 충돌체를 이용하였으며 속도의 범위는 38.6 m/s - 54.0 m/s이었다. 크기비가 1/1에서 1/4로 작아질수록 변위를 두께로 무차원화한 값이 약 33% 감소하였다.

Schleyer et al. (2004)은 변의 길이가 0.5 m이고 두께가 1 mm인 정사각형 모델과 변의 길이가 1.0 m이고 두께가 2 mm인 모델을 제작하였다. 재료는 연강이었고, 다양한 경계조건을 부여하여 횡충격 압력 실험을 수행하였다. 실험 모델 양쪽에 동일한 압력을 가한 후 압력을 방출하는 시간을 조절하여 횡충격압력 실험을 수행할 수 있는 압력용기가 사용되었다. 모델의 경계조건에 따라 크기비의 영향이 다름을 보고하였다.

동적 충격하중을 받는 저온 강재의 재료 특성과 구조물의 충격 거동에 관한 연구 결과도 국내에서 많이 보고되었다. Min and Cho (2012)는 저온에서 DH36강의 재료특성을 밝히고 DH36강으로 제작한 보 구조물에 대한 횡충돌 실험을 상온과 저온에서 수행하였다. Noh et al. (2016a, 2016b)은 저온에서 EH32강과 FH32강의 재료특성을 밝히고, 이 강으로 제작된 보강판에 대한 횡충돌 수치해석을 수행하였다.

본 연구에서는 선박해양구조물에 많이 사용되는 비보강 강판을 대상으로 크기효과가 소성변형에 미치는 영향을 정량적으로 규명하고자 하였다. 낙하충돌실험 장치를 사용하여 자유낙하실험을 실시하고 유한요소해석을 통하여 이 충돌실험을 모사해 보았다. 낙하실험장치의 제한으로 비보강판의 상대 크기비가 1.0, 1.33 그리고 1.67인 모델을 각 3개씩 제작하여 충돌실험을 수행하였다. 다양한 속도에서의 크기효과를 알아보기 위해 낙하위치를 달리하여 실험을 수행하였다. 충돌체(sriker)의 질량은 크기비에 맞추어 86 kg, 206 kg 그리고 400 kg인 것을 사용하였다.

낙하충돌실험 모델에 대한 수치해석도 수행하였으며, 수치해석 결과와 실험 결과를 비교하여 수치해석에 사용된 상용프로그램의 정확도와 신뢰성을 검토하였다. 또한 Parametric study를 수행하여 변형률속도가 크기 효과에 미치는 영향을 수치적으로 규명해 보았다.

2. 실험 모델

2.1 모델의 치수

충돌 실험을 위해 3가지 크기별로 각각 3개의 모델을 제작하였다. 모든 모델은 정사각형 비보강 강판으로 실험부의 치수는 각 모델의 크기비에 따라 제작하였다. 모델의 형상은 Fig. 1에서 보여주고 있다. 이 그림의 가운데 부분(A2 × A2)은 시험부이고 시험부의 비갈 부분에는 모델을 지그에 고정하기 위해 60개의 볼트 구멍을 뚫었다. 전체 모델의 크기(A1 × A1)와 시험부의 크기(A2 × A2)를 각 시리즈 별로 Table 1에 수록하였다. 모델의 공칭 두께가 3 mm인 SE-3 시리즈의 경우 A1은 800 mm이고 모델의 공칭 두께가 각각 4 mm와 5 mm인 SE-4와 SE-5 시리즈는 각각 1,000 mm와 1,150 mm이다. 시험부의 치수(A2)는 SE-3 시리즈가 600 mm이고 SE-4 시리즈와 SE-5 시리즈는 각각 800 mm와 1,000 mm이다.

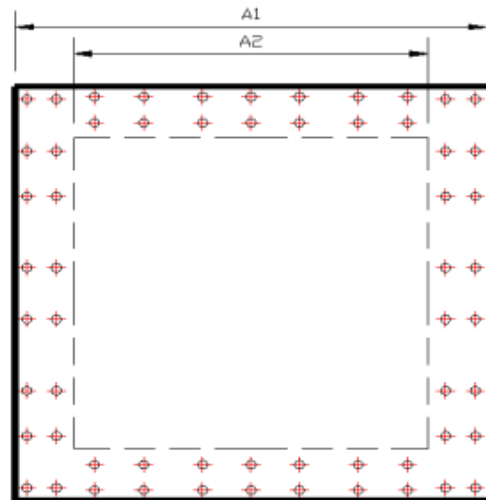


Fig. 1 Geometry of models

Table 1 Dimension of models

Model	t* (mm)	A1 (mm)	A2 (mm)
SE-3-1, -2, -3	3	800	600
SE-4-1, -2, -3	4	1,000	800
SE-5-1, -2, -3	5	1,150	1,000

note: * nominal thickness of plate

2.2 인장 시험

인장 시험용 시편을 KS (1998)에 따라 제작하고 시험 모델의 항복응력(σ_y)과 탄성계수(E)를 얻기 위해 인장 시험을 수행하였다. 인장 시험 시편은 각 모재마다 5개씩 제작하였다. Table 2에 정리된 값은 각 모재 별로 5개 인장 시험결과와의 평균값이다. 모델의 두께는 공칭 두께보다 조금 작게 나왔고, 모델 SE-4-2와 -3을 채취한 4번 모재의 항복응력이 다른 모재들보다 20 - 40 MPa 정도 큰 것을 알 수 있다.

Table 2 Material properties

Plate no.	t (mm)	σ_y (MPa)	E (GPa)	Model
1	2.85	272	219	SE-3-1, -2, -3
2	3.86	301	209	SE-4-2, -3
3	3.86	266	218	SE-4-1
4	4.85	267	203	SE-5-3
5	4.85	267	214	SE-5-1, -2

3. 횡충돌 실험

3.1 실험 장치

본 연구에 사용된 자유낙하식 충돌실험 장치를 Fig. 2에서 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 충돌실험 장치는 Testing frame, 충돌체, 충돌체 인양용 전자석, 제어대 그리고 자료 처리장치로 구성된다. 최대 낙하높이는 3,050 mm이고, 전자석의 용량은 1.5 Ton이다.

앞에서 언급하였듯이 본 실험에서는 모델의 크기비에 따라 3 종류의 충돌체를 사용하였다. 사용한 충돌체는 모두 knife-edge 형이었고, 충돌체의 질량과 길이를 Table 3에 정리하였다. 모든 충돌체 끝단의 반경은 15 mm이었다. 충돌체의 edge length는 모델 변길이(A2)의 절반으로 하였고 질량은 scale factor의 세제곱비로 하였다.



Fig. 2 Free drop collision testing machine

Table 3 Mass and edge length of striker

Scale factor	Mass (kg)	Edge length (mm)
1.00	86	300
1.33	206	400
1.67	400	500

3.2 충돌실험 조건

다양한 속도에서의 크기효과를 확인하기 위해 낙하 높이를 변화 시켜주었다. 각 모델별 충돌 실험의 낙하높이와 낙하높이를 사용하여 구한 충돌 속도를 Table 4에 정리하였다.

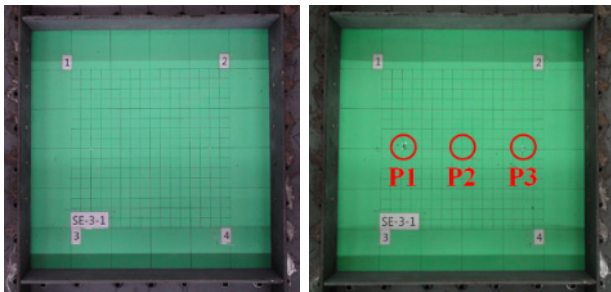
Table 4 Data about drop test models

Scale factor	Model	Drop height (m)	Collision velocity (m/s)
1.00	SE-3-1	1.303	5.06
	SE-3-2	2.000	6.26
	SE-3-3	2.297	6.71
1.33	SE-4-1	1.299	5.05
	SE-4-2	1.996	6.26
	SE-4-3	2.299	6.72
1.67	SE-5-1	1.300	5.05
	SE-5-2	2.005	6.27
	SE-5-3	2.293	6.71

3.3 실험 결과

충돌실험 전 후 model SE-3-1의 형상을 Fig. 3에서 볼 수 있다. 이 그림에서 점 P1, P2, P3는 충돌실험 후 영구처짐을 계측한 위치를 나타내고 있다. P1과 P3는 충돌체의 양쪽 끝과 접촉한 위치이고 P2는 중앙이다.

세 지점에서 계측한 영구처짐값을 Table 5에 정리하였다. P1과 P3에서 계측한 처짐값을 각각 d_1 , d_3 라 하였고 중앙부(P2)에서의 처짐값을 d_M 이라 하였다. 이 표에서 알 수 있듯이 낙하과정에서 충돌체의 횡동요로 인해 d_1 과 d_3 이 차이가 났다. 이 표에는 d_1 과 d_3 의 평균을 d_E 이라 하고 이 값도 포함되어 있다. 영구처짐값(d)을 무차원화 하기 위해 식 (1)을 사용하였다.



(a) before (b) after

Fig. 3 Deformation shape of model SE-3-1

$$\delta = \frac{d}{t} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} \quad (1)$$

여기에서

δ = Non-dimensional permanent deflection

t = Plate thickness

σ_Y = Yield strength

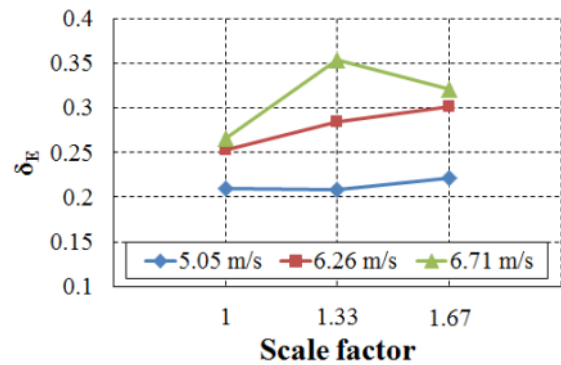
E = Young's modulus

식 (1)은 무차원화된 영구처짐 값을 구하기 위해 영구처짐값을 판 두께로 나누고 재료 특성값을 고려하기 위해 $\sqrt{\sigma_Y/E}$ 을 곱한 것이다. 항복응력이 서로 다른 모델도 같이 비교할 수 있도록 하였다. d_E 와 d_M 을 무차원화 한 δ_E 와 δ_M 도 포함하였다.

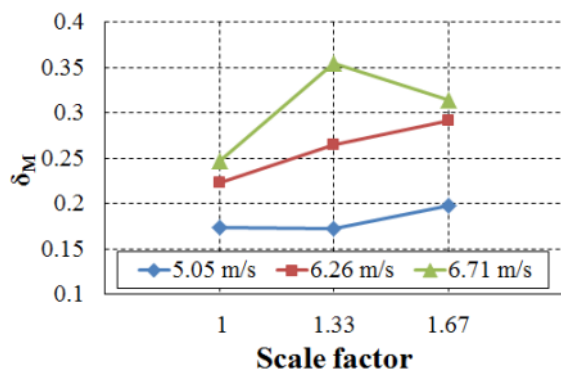
Table 5에 주어진 충돌체의 양 끝(δ_E)과 중앙(δ_M)에서의 무차원화된 영구처짐값을 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림에서 보는 바와 같이 대체적으로 모델의 크기가 커지면 무차원화된 영구처짐값도 커짐을 알 수 있다. 하지만 충돌속도가 6.26 m/s이고 모델의 공칭 두께가 4 mm인 모델 SE-4-3의 경우는 이 경향을 따르고 있지 않다. 이에 대해서는 추후 실험연구를 더 수행할 필요가 있겠다. 본 연구에서 수행된 충돌실험을 통해 횡충돌 하중을 받는 비보강 강판의 크기 효과를 확인할 수 있었다.

Table 5 Measured permanent deflection

Model	Permanent deflection (mm)				Non-dimensional permanent deflection	
	d_1	d_3	d_E	d_M	δ_E	δ_M
SE-3-1	18	16	17.0	14	0.210	0.173
SE-4-1	25	21	23.0	19	0.208	0.172
SE-5-1	31	30	30.5	27	0.222	0.197
SE-3-2	20	21	20.5	18	0.253	0.223
SE-4-2	29	29	29.0	27	0.285	0.265
SE-5-2	43	40	41.5	40	0.302	0.291
SE-3-3	25	18	21.5	20	0.266	0.247
SE-4-3	35	37	36.0	36	0.354	0.354
SE-5-3	44	42	43.0	42	0.322	0.314



(a) Permanent deflections at ends of striker knife-edge



(b) Permanent deflection at mid-length of striker knife-edge
Fig. 4 Plots of non-dimensional permanent deflections against scale factors

4. 수치 해석

충격 하중을 받는 구조물의 동적 응답에는 재료의 소성 경화 (strain hardening)와 변형률속도 경화(strain-rate)가 영향을 미

친다. Chung et al. (2009, 2011)과 Cho (2014)는 이에 대한 물리적 의미와 이론적 배경에 대해서 자세히 다루었다. Song (2008)은 변형률속도를 무시한 경우와 변형률속도를 고려한 경우에 대한 수치해석 연구를 통해 변형률속도를 고려한 구성모델이 실험 결과와 더 일치하는 것을 보였다.

따라서 본 연구에서도 유한 요소 해석에서 소성 경화와 변형률속도 경화를 모두 고려하여 수치해석을 수행하였다. 이를 통해 크기 효과에 영향을 미치는 인자가 무엇인지를 규명하고자 하였다. 또한 본 수치해석에 앞서 적절한 수준의 계산의 정확성과 효율성을 제공해 주는 요소의 크기를 결정하기 위한 수렴성 검증 작업도 거쳤다.

4.1 실험 모델의 재료 특성

4.1.1 소성경화 구성방정식

구조물의 충격하중을 받게 되면 구조물의 일부 또는 광범위한 범위가 소성경화 영역에 진입하게 된다. 따라서 구조 충격해석을 올바르게 수행하기 위해서는 소성경화를 고려하여야 한다. 소성경화 방정식에는 선형 소성경화 구성방정식과 비선형 소성경화 구성방정식이 있다. 본 연구에서는 Chung (2008)이 제시한 식 (2)과 같은 비선형 소성경화 구성방정식을 사용하였다.

$$\sigma = \sigma_Y \left(1 + \frac{\epsilon^p}{\epsilon_Y}\right)^n \quad (2)$$

여기에서

σ_Y = Yield strength

ϵ^p = Plastic strain

ϵ_Y = Yield strain

n = Plastic strain hardening exponent

실험에 사용된 연강의 경우 보수적 관점에서 식 (1)에서의 소성 경화지수(n)의 값을 0.2로 가정하였다. Fig. 5에는 n 을 0.2로 가정하고 모델의 재료 특성을 대입한 구성방정식을 그림으로 보여주고 있다.

4.1.2 변형률 속도 경화

충격 하중을 받는 구조물의 동적응답에 영향을 미치는 변형률 속도효과(strain-rate effect)를 고려하기 위해 Cowper-Symonds의 소성 구성방정식 (Cowper & Symonds, 1957), 식 (3), 을 사용하였다. 이 식의 재료상수 D_{cs} 와 q_{cs} 는 Jones (2012)가 제시한 40.4와 5.0을 각각 적용하였다.

$$\sigma_Y^d = \sigma_Y^s \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}^p}{D_{cs}}\right)^{\frac{1}{q_{cs}}}\right] \quad (3)$$

σ_Y^d = Dynamic yield strength

$\dot{\epsilon}^p$ = Equivalent strain rate

D_{cs}, q_{cs} = Material constant

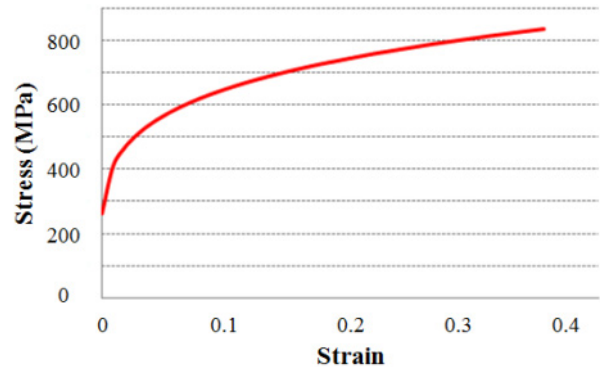


Fig. 5 Applied non-linear strain hardening relationship

4.2 수렴성 검증

이 연구의 수치해석에서는 4절점 쉘 요소를 사용하였다. 본 수치해석에 앞서 유한요소의 적절한 크기를 선정하기 위해 수렴성을 검증하였다. 수렴성 검증을 위한 수치해석에서 적용한 충돌 조건은 Table 6에 정리하였다. 모델의 크기는 가로, 세로가 모두 1,000 mm이고 두께는 5.0 mm이었으며, 충돌속도는 5.0 m/s이었다. 충돌체의 질량은 400 kg, 길이는 500 mm 그리고 충돌부의 끝단은 반경이 15 mm로 가정하였다. 요소의 크기를 판의 두께와 같은 5 mm에서부터 30 mm까지 변화시키면서 해석을 수행하였다. 수렴성 검증의 결과를 Fig. 6에서 보여주고 있다. 요소의 크기가 모델의 두께인 5 mm일 때 충분히 수렴된 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 본 구조해석에서는 각 모델의 두께와 같은 크기의 요소를 사용하여 계산을 수행하였다.

Table 6 Collision conditions for convergence test

Model size (mm)	Collision vel. (m/s)	Striker		
		Mass (kg)	Length (mm)	Header Type
1,000×1,000×5	5.00	400	500	Knife-edge

4.3 수치 해석 결과

4.3.1 에너지 평형과 처짐 이력

Fig. 7은 모델 SE-5-3의 충돌체 운동에너지와 피충돌체인 모델의 내부 변형에너지의 변화를 보여주고 있다. 에너지평형상태를 비교하는 것은 이것이 충돌문제와 같은 비선형 손상해석에서 해석의 신뢰도를 평가하는 기준이기 때문이다. 최대 처짐 상태에

서는 충돌체의 운동에너지가 모두 피충돌체의 내부 변형에너지로 모두 변환됨을 확인 할 수 있다. 최대 처짐 이후에는 탄성회복(elastic spring-back)에 의한 처짐의 감소가 있고 탄성진동이 그 뒤를 따르고 있다. 실제 상황에서는 감쇄에 의해 탄성진동은 소멸된다. 충돌체는 모델과 분리되는 시점에서의 되튀김(rebound) 속도로 진행되어야 하나 계산의 오차로 속도가 약간 줄어들고 있다.

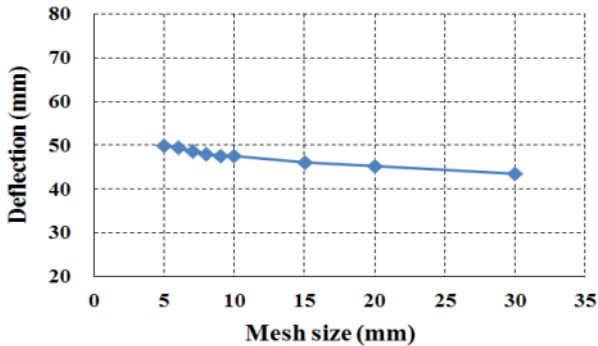


Fig. 6 Results of convergence test

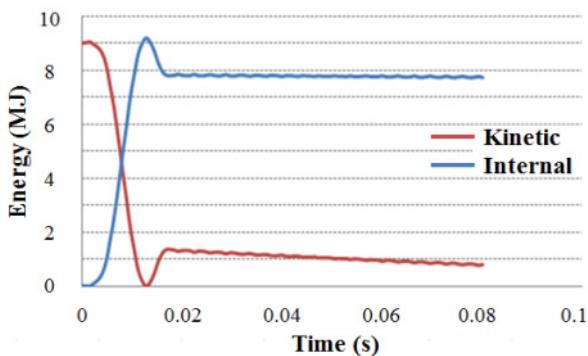


Fig. 7 Energy conservation

Fig. 8에서는 모델 SE-5-1의 P1지점의 시간에 따른 처짐의 변화를 보여주고 있다. Fig. 8에서 보여주는 모델의 변형에너지의 변화와 유사하게 최대 처짐 후 탄성회복이 있고 탄성진동이 뒤따르고 있다. 탄성진동 처짐의 평균값이 영구 처짐이다.

4.3.2 최종 변형 형상

수치해석으로 추정된 최종 변형 형상과 실험에서 계측한 실험 후 변형 형상을 Fig. 9에서 비교하여 보여주고 있다. 실험에서는 실험 전에 그어둔 격자점에서의 처짐을 레이저 거리측정기를 사용하여 계측하였다. Fig. 9(a)와 9(b)를 비교하면 실험에서 얻은 결과를 수치해석에서 대체로 잘 모사하고 있음을 알 수 있다. 하지만 실험에서는 충돌 중앙부가 양쪽 끝에 비해 처짐이 눈에 띠일 정도로 작지만 수치해석에서는 이런 현상을 그대로 따라가고 있지는 못하다. 또한 경계를 고정으로 가정한 수치해석과는 달리 실험에서는 Fig. 10에서 보여 주듯이 볼트로 고정하였다. 볼트로

고정하면 실험 과정에서는 고정과 같이 가정할 수 있겠으나 실험 후 볼트를 풀게 되면 탄성회복 현상으로 인해 경계부의 추가 변형이 생겨 모델의 변두리가 뒤틀려 있음을 알 수 있다, 이에 관해서는 추후 더 많은 수치해석 연구가 필요하다고 판단된다.

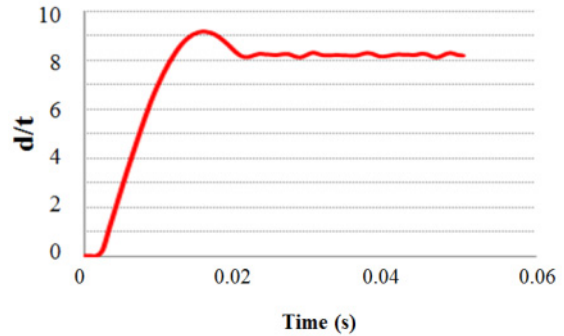
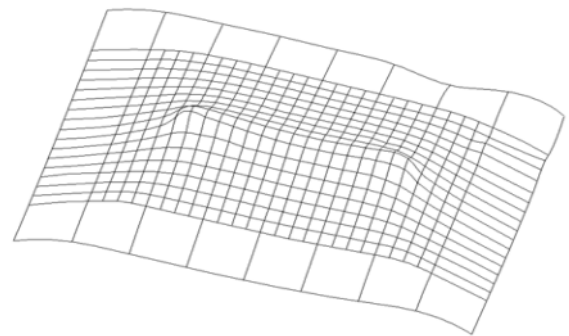
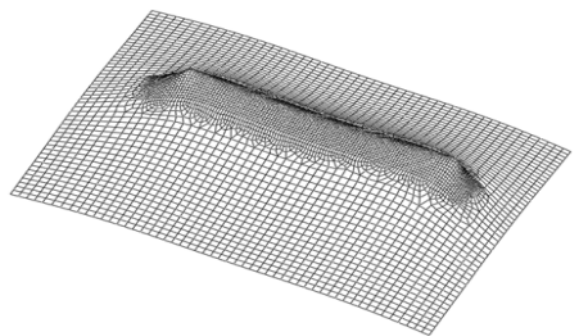


Fig. 8 Deflection history of point P1 of model SE-5-1



(a) Experiment



(b) Numerical analysis

Fig. 9 Permanent set of model SE-5-3

4.3.3 실험 결과와의 비교

수치해석으로 추정된 최종 처짐값을 실험값과 비교한 자료가 Table 7에 정리되어 있다. 이 표에는 식 (1)로 주어진 무차원 영구처짐값을 충돌부 양끝의 평균값 (δ_E) 과 충돌부 중앙값 (δ_M) 으로 비교하였다.

Table 7 Comparison of predicted permanents set by numerical analysis with those of experiment

Collision velocity (m/s)	Model	δ_E			δ_M		
		Exp.(1)	Num.(2)	$X_m(2)/(1)$	Exp.(1)	Num.(2)	$X_m(2)/(1)$
5.05	SE-3-1	0.210	0.227	1.081	0.173	0.210	1.214
	SE-4-1	0.208	0.227	1.091	0.172	0.214	1.244
	SE-5-1	0.222	0.237	1.068	0.197	0.224	1.137
6.26	SE-3-2	0.253	0.291	1.150	0.223	0.274	1.229
	SE-4-2	0.285	0.293	1.028	0.265	0.275	1.038
	SE-5-2	0.302	0.293	0.970	0.291	0.277	0.952
6.71	SE-3-3	0.266	0.303	1.139	0.247	0.287	1.162
	SE-4-3	0.354	0.311	0.879	0.354	0.291	0.822
	SE-5-3	0.322	0.318	0.988	0.314	0.301	0.959

이 표에는 처짐의 추정값을 실제 계측값으로 나누어 X_m 이라고 하고 이 값도 나타내었다, 양끝 처짐의 경우는 X_m 의 평균이 1.044이고 COV가 8.35% 이고, 중앙부의 평균과 COV는 각각 1.084와 13.69%이다. 양끝 처짐의 평균과 COV는 충격실험의 불확실성을 감안할 때 수치해석법이 상당히 우수한 편이라고 할 수 있다. 하지만 중앙부의 경우는 평균과 COV 모두 양끝의 경우보다 못하다. 앞에서 처짐 형상에서도 언급하였듯이 수치해석법의 개선이 요구되는 부분이다.

개선의 여지는 있으나, 이 논문에서 채택한 소성경화, 변형률 속도 경화를 비롯한 수치해석 기법을 사용하여 parametric study 를 수행할 수 있다고 판단된다.

5. Parametric study

5.1 수치 해석 모델

크기효과를 규명하기 위한 실험 연구에서는 실험 장비의 제한이 있어 크기비를 1.00, 1.33 그리고 1.67의 경우만 다루었다.

크기비의 범위를 더 넓히기 위해 본 연구에서 개발된 해석기법을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석 모델의 재료특성은 Table 8에 정리하였다.

재료는 연강으로 가정하여 항복강도 (σ_Y)는 235 MPa, 탄성계수 (E)는 206,000 MPa를 사용하였다. 구조적 거동에 대한 변형률속도의 영향을 고려하기 위해 Cowper-Symonds의 소성 구성방정식, 식(3), 의 재료상수 D_{cs} 와 q_{cs} 는 각각 40.4 (s^{-1})와 5를 사용하였다.

앞에서 언급한 바와 같이 크기 효과를 확대하기 위해 parametric study에서는 크기비는 1.0, 2.0 그리고 10.0의 경우를 다루었다. 각 크기비의 판 크기는 Table 9에서 보여주고 있다. 기본인 크기비가 1.0일 때의 판은 가로, 세로 그리고 두께가 각각 500 mm, 225 mm 그리고 1.8 mm 이다. 크기비가 2.0과 10.0의 경우는 크기가 각각 2.0 배와 10.0 배가 된다.

Table 8 Material properties of models for parametric study

Yield strength (MPa), σ_Y	235.0
Elastic modulus (MPa), E	206,000
Mass density (Ton/mm ³), ρ	7.85×10^{-9}
Poisson's ratio, ν	0.3
Material constant D_{cs} (s^{-1})	40.4
Material constant q_{cs}	5

Table 9 Geometry of parametric study models

Scale factor	Plate size (a × b × t) [mm]
1.0	500 × 225 × 1.8
2.0	1,000 × 450 × 3.6
10.0	5,000 × 2,250 × 18.0

Parametric study에서의 충돌 조건을 Table 10에 정리하였다. 기본인 크기비 1.0에서의 질량을 20.0 kg으로 정하고 크기비가 2.0과 10.0에서는 질량이 각각 크기비의 세제곱비로 늘어난 80.0 kg과 1,000 kg이 된다. 충돌속도는 크기비와 상관없이 3.00 m/s, 7.75 m/s와 10.0 m/s의 세 가지를 다루었다.

Table 10 Collision conditions for parametric study

Scale factor	Mass (kg)	Collision velocity (m/s)
1.0	20.0	3.00, 7.75, 10.00
2.0	160.0	
10.0	2,000.	

또한 모델의 재료가 변형률속도의 영향을 받는 경우와 변형률속도의 영향을 무시한 경우에 대해 수치해석을 수행하였다.

5.2 수치 해석 결과

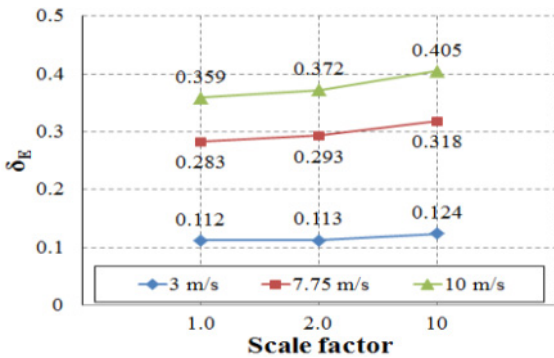
수치해석의 결과를 Table 11에 정리하였다. 이 표에는 변형률속도 효과를 고려하였을 때와 무시하였을 때의 무차원 영구변형 값을 보여주고 있다. 이 값들은 크기비와 충돌속도별로 정리하였다.

Table 11 Strain-rate effect on the non-dimensional permanent deflection

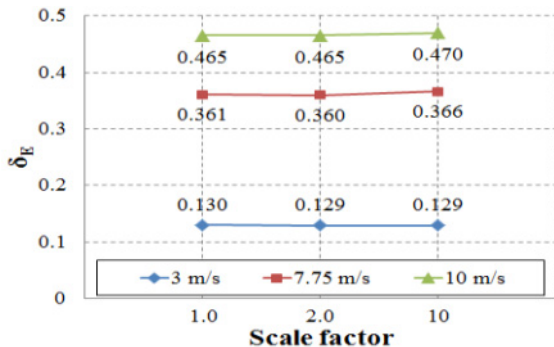
Scale factor	Considering strain-rate effect			Neglecting strain-rate effect		
	Collision velocity (m/s)			Collision velocity (m/s)		
	3.0	7.75	10.0	3.0	7.75	10.0
1.0	0.112	0.283	0.359	0.130	0.361	0.465
2.0	0.113	0.293	0.372	0.129	0.360	0.465
10.0	0.124	0.318	0.405	0.129	0.366	0.470

Fig. 10(a)에는 변형률 속도 효과를 고려했을 경우의 결과를 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 충돌속도에 상관없이 크기비가 증가하면 무차원 영구변형값도 증가함을 알 수 있다. 예를 들면, 충돌속도가 10.0 m/s일 때 크기비가 1.0이면 무차원 영구변형값이 0.359 인데 크기비가 10.0이 되면 0.405가 된다.

변형률 속도 효과를 무시한 경우의 무차원 영구변형값을 Fig. 10(b)에서 보여주고 있다. 이 경우는 변형률속도의 영향을 고려한 경우와는 달리 무차원 영구변형값이 크기비에 상관없이 거의 일정함을 알 수 있다.



(a) Non-dimensional permanent deflections when considering strain-rate effect



(b) Non-dimensional permanent deflections when neglecting strain-rate effect

Fig. 10 Results of parametric study

이 결과로부터 크기비가 커지면 무차원 영구변형값의 크기가 커지는 주된 원인은 변형률속도의 영향이라고 판단할 수 있다. 하지만 제한된 경우에 대한 수치해석의 결과로부터 얻은 경향을 선불리 일반화하는 것은 바람직하지 못하다. 따라서 일반화 시킬 수 있는 결론을 얻기 위해서는 더 많은 실험과 수치해석 연구가 필요하다고 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 횡충돌 하중을 받는 비보강 강판의 구조거동에 미치는 크기효과의 영향을 규명하기 위해 수행한 실험 및 수치해석 연구의 결과를 보고하였다. 이를 통해 얻어진 결론을 아래와 같이 정리할 수 있다.

- (1) 낙하 실험을 9개의 비보강 강판 모델에 대해 수행하였다. 모델의 크기비는 1.0, 1.33 그리고 1.67의 세 종류이었고, 충돌속도는 5.05 m/s, 6.26 m/s 그리고 6.71 m/s의 세 종류이었다. 이 실험연구를 통해 크기비가 커지면 무차원 영구처짐 값도 커짐을 확인하였다.
- (2) 상용 수치해석 프로그램인 Abaqus를 사용하여 실험 모델에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 의한 처짐의 추정 값과 실험의 처짐값의 비(χ_m)를 구하고 χ_m 의 평균과 COV를 계산하였다. 양끝 처짐의 경우는 평균이 1.044이고 COV가 8.35% 이고, 중앙부 처짐의 경우는 평균과 COV가 각각 1.084와 13.69%이다. 양끝 처짐의 평균과 COV는 충격실험의 불확실성을 감안할 때 수치해석법이 상당히 우수한 편이라고 할 수 있다. 하지만 중앙부의 경우는 평균과 COV 모두 양끝의 경우보다 못해 수치해석법의 개선이 요구된다.
- (3) 변형률속도의 효과를 고려하여 수치해석을 수행한 결과, 크기비가 증가하면 무차원 영구변형값도 증가함을 알 수 있다. 하지만 변형률 속도 효과를 무시하고 수치해석을 하면 무차원 영구변형값이 크기비에 상관없이 거의 일정함을 알 수 있다. 이 결과로부터 크기비가 커지면 무차원 영구변형값의 크기가 커지는, 즉 크기 효과의 주된 원인은 변형률속도의 영향이라고 판단할 수 있다. 하지만 제한된 경우에 대한 수치해석의 결과로부터 얻은 경향을 선불리 일반화하는 것은 바람직하지 못하다. 따라서 일반화 시킬 수 있는 결론을 얻기 위해서는 더 많은 실험과 수치해석 연구가 필요하다고 판단된다.
- (4) 향후 소성변형에 대한 연구도 더 수행되어야 하고 파단이 동반되는 충격하중에 대한 연구도 수행할 필요가 있다. 또한 비보강판뿐만 아니라 선박이나 해양구조물에 많이 사용되는 보강판에 대한 크기 효과 연구도 필요하다.

후기

본 연구는 울산대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행하였으며, 이에 감사드립니다.

References

- ABAQUS, 2010. *User's Manual*, 6.10. Simulia: Providence.
- Booth, E., Collier, D. & Miles, J., 1983. Impact scalability of plated steel structures, *Structural Crashworthiness*, ed. N. Jones & T. Wierzbicki, Butterworths, London, pp.136–174.
- Cho, S–R., 2014. Material properties of steel structures under impact loadings. *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(3), pp.13–18.
- Choung, J., 2008. On the fracture criteria of steels for marine structures subjected to impact loadings. Ph.D. Thesis. University of Ulsan.
- Choung, J., Cho, S–R. & Kim, K.S., 2009. Fracture estimation of stiffened plates under impact loading using micromechanics plasticity model. *Journal of the Society of Naval Architecture of Korea*, 46(6), pp.611–621.
- Choung, J., Shim, C–S. & Kim, K.S., 2011. Plasticity and fracture behaviors of marine structural steel, Part I: Theoretical backgrounds of strain hardening and rate hardening. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(2), pp.134–144.
- Choung, J., Shim, C–S. & Kim, K.S., 2011. Plasticity and fracture behaviors of marine structural steel, Part II: Theoretical backgrounds of fracture. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(2), pp.92–100.
- Cowper, G. & Symonds, P., 1957. *Strain hardening and strain rate effect in the loading of cantilever beams*. Technical report, Division of Applied Mathematics, Report No. 28.
- Jiang, P., Tian, C.J., Xie, R.Z. & Meng, D.S., 2006. Experimental investigation into scaling laws for conical shells struck by projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 32(8), pp.1284–1298.
- Jones, N., 2012. *Structural impact*. Cambridge University Press: Cambridge.
- KS B 0801, 1998. *Test pieces for tensile test for metallic materials*.
- Min, D–K. & Cho S–R., 2012. On the fracture of polar class vessel structures subjected to lateral impact loads. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(4), 281–286.
- Noh, M–H., Lee, J–H., Park, S–J. & Choung, J., 2016a. Study on crashworthiness of icebreaker steel: Part I Steel properties, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 30(4), pp.268–276.
- Noh, M–H., Lee, J–H., Park, S–J. & Choung, J., 2016b. Study on crashworthiness of icebreaker steel: Part II Ship side structural behavior due to impact bending. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 30(4), pp.277–286.
- Paik, J.K. & Lee, T.K., 1996. Scaling and dynamic effects on the plate cutting response. *Journal of the Society of Naval Architecture of Korea*, 33(3), pp.48–55.
- Schleyer, G.K., Hsu, S.S. & White, M.D., 2004. Scaling of pulse loaded mild steel plates with different edge restraint. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46, pp.1267–1287.
- Shen, W.Q., Fung, K.W., Triantafyllos, P., Wajid, N.M. & Nordin, N., 1998. An experimental study on the scaling of plate cutting. *International Journal of Impact Engineering*, 21(8), pp.645–662.
- Song, Y–S., 2008. Application of field test to the rate–dependent relation in constitutive model. *Journal of the Korea Academia–Industrial cooperation Society*, 9(2), pp.470–474.
- Wen, H–M. & Jones, N., 1993. Experimental investigation of the scaling laws for metal plates struck by large masses, study on the scaling of plate cutting. *International Journal of Impact Engineering*, 13(3), pp.485–505.



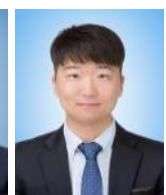
조상래



박정열



송승욱



박상현