특집

충격하중을 받는 강재구조물의 재료 특성

조상래 (울산대학교)

1. 서 론

선박에 작용하는 충격하중은 질량충격(mass impact)과 압력충격(pressure impact)으로 나눌 수 있다. 질량충격은 한 차례의 충격으로 끝나는 충돌과 좌초가 있고, 반복충격하중으로 분류되는 빙하중이 있다. 압력충격하중으로는 대부분 반복적으로 작용하는 슬래밍(slamming), 슬로싱(sloshing)과 그린워터(green water)가 있고, 함정의 설계에 고려하는 수중폭발과 공중폭발은 일회성 충격압력하중이다. 선박 구조설계에 있어 정적 하중이 작용되는 경우는 대부분 재료의 정적 항복응력만을 고려하게 되나, 충격하중이 작용하게 되면 정적 항복응력 외에 변형률경화, 변형률속도경화와 파단변형률을 고려하여야 한다.

충격하중을 받는 구조물의 재료특성의 이해에 앞서 충격하중을 받는 구조물의 전체 거동에 대한 이해가 필요하다. Fig. 1에는 충격하중을 받는 구조물의 변위이력을 보여주고 있다. 이와 같은 거동은 질량충격이나 압력충격에 상관없이 유사한 결과를 보여주게 된다.

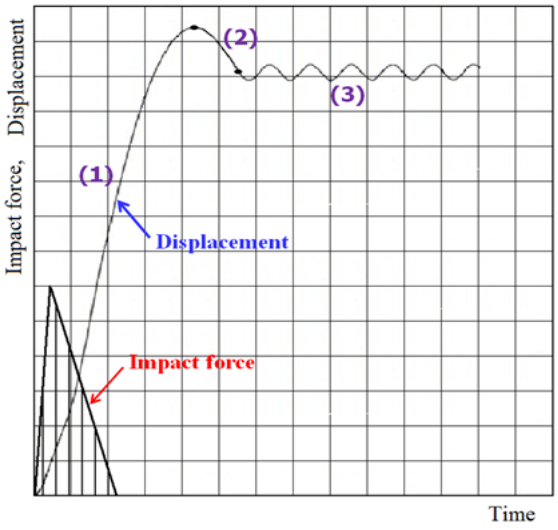


Fig. 1 Displacement of structure subjected to impact loading

Fig. 1에서 (1)의 구간(시작점부터 최대변형점까지)은 탄소성 거동으로 충격력이 작용하는 방향으로 변형이 일어나게 된다. 하지만 충격이 커지면 이 구간에서 구조물에 파단이 발생하기도 한다. (2)의 구간은 탄성회복(elastic spring-back) 구간으로 충격력의 작용방향과 반대 방향으로 변위가 발생하고 이어서 (3)번 구간에서는 탄성 진동(elastic vibration)이 이어진다. 충돌의 경우는 (2)구간과 (3)구간의 경계에서 충돌체와 피충돌체가 분리되게 된다.

충격력이 작용하는 동안에는 구조물이 가속되어 변형속도가 증가하고 충격력의 작용이 끝나면 변형속도가 감소하기 시작하여 최대 변형점에서는 속도가 '0'이 된다. 충격력의 작용이 끝난 후 감속이 되는 것은 구조물이 가지고 있는 운동에너지가 구조물의 소성변형, 마찰 등의 원인으로 소진되기 때문이다. 이 그림은 감쇠가 없는 것으로 가정한 경우이고, 실제 상황에서는 감쇠가 있기 때문에 진동의 진폭이 줄어들어 구조물의 운동이 끝나게 되고 최종의 잔류변형을 남기게 된다.

구조물이 충격하중을 받게 되면 (1)의 구간에서 적어도 부분적으로 대변형률을 보이게 된다. 변형률이 커지면 이에 상응하는 응력을 적절히 추정하여야 하는데 이 과정에서 필요한 것이 변형률경화방정식이다. 또한 구조물의 변형이 짧은 시간에 발생하게 되면 소위 변형률속도의 영향으로 재료의 동항복응력이 증가하게 된다. 연강의 경우는 변형률속도의 영향이 큰 재료로 알려져 있고, 고장력강의 경우는 비교적 변형률속도의 영향을 덜 받는 것으로 알려져 있다. 변형률속도를 고려하여 동항복응력을 추정하는 식으로는 식 (1)로 주어진 Cowper-Symonds 모델을 많이 사용하고 있다.

$$\frac{\sigma_{YD}}{\sigma_Y} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{1/q} \quad (1)$$

여기에서 σ_{YD} 는 동항복응력, σ_Y는 정항복응력, $\dot{\epsilon}$는 변형률속도 그리고 D 와 q 는 재료상수이다.

재료가 최대인장응력에 도달하면 단면이 급격히 줄어드는 네킹(necking)현상이 시작되고 네킹이 더 진행되면 파단이 일어나게 된다. 파단의 발생여부에 따라 충격하중을 받는 구조물의 거동은 많은 차이가 있게 된다. 따라서 파단의 발생여부를 정확히 추정하는 것은 충격하중을 받는 구조물의 성능평가 추정의 정확도에 많은 영향을 미치게 된다. 지금까지는 변형

률속도가 커지면 파단변형률이 작아지는 것으로 알려져 왔으나 최근의 저속 동인장시험 (Cho, et al., 2002)과 중속 동인장시험(임지호, 2005) 결과에 의하면 변형률속도가 커지면 파단변형률도 커지는 경우도 보고되고 있다.

앞에서 언급하였듯이 구조물이 충격하중을 받게 되면 정적 항복응력 외에 변형률경화, 변형률속도경화와 파단변형률을 고려하여 야 한다. 하지만 Choung, et al. (2013)이 지적하였듯이 최근에 발표된 논문에서 조차도 이런 동적 재료특성이 정확히 규명되지 않은 채 임의의 값들이 사용되고 있다. 본 고에서는 강재가 충격하중을 받을 때의 변형률경화, 변형률속도경화와 파단변형률에 관한 사항을 설명하고자 한다.

2. 소성경화 방정식

2.1 기존의 소성경화 방정식

기존의 소성경화 방정식은 선형과 비선형으로 나눌 수 있다. 선형 소성경화 방정식은 식 (2)로 주어진 식이 많이 사용되고 있다.

$$\sigma = \sigma_Y + \frac{EE_h}{E - E_h}\epsilon_p \tag{2}$$

여기에서 σ는 유동응력(flow stress), E 는 탄성계수, E_h는 경화계수(hardening modulus) 그리고 ϵ_p는 소성변형률이다.

비선형 소성경화 방정식은 Ludwik (1909), Hollomon (1945) 그리고 Swift (1952)의 소성경화방정식을 들 수 있고, 이 중에서 Hollomon 방정식은 ASTM (2008)에서 채택하고 있다. 각 소성경화방정식을 식으로 나타내면 다음과 같다.

Ludwik 소성경화방정식

$$\sigma = \sigma_Y + K_L(\epsilon_p)^{n_L} \tag{3}$$

여기에서 K_L는 Ludwik 상수응력, n_L 은 Ludwik 소성경화지수이다.

Hollomon 소성경화방정식

$$\sigma = K_H(\epsilon_p)^{n_H} \tag{4}$$

여기에서 K_H 는 Hollomon 상수응력, n_H 은 Hollomon 소성경화지수이다.

Swift 소성경화방정식

$$\sigma = K_S(m + \epsilon_p)^{n_S} \tag{5}$$

여기에서 K_S 는 Swift 상수응력, m 은 무차원상수, n_S 는 Swift 소성경화지수이다.

식 (4)로 주어진 Hollomon 소성경화 방정식의 상수응력, K_H 와 소성경화지수, n_H는 인장시험의 결과가 있는 경우 최소제곱법으로 구할 수 있고, 공칭 최대인장강도(s_T)와 공칭 최대인장변형률(e_T)이 주어지면 n_H와 K_H 를 다음의 식 (6)과 식 (7)를 사용하여 결정할 수 있다.

$$n_H = \ln(1 + e_T) \tag{6}$$

$$K_H = s_T\left(\frac{e_T}{n_H}\right)^{n_H} \tag{7}$$

그리고 Zhang, et al. (2004)은 공칭 최대인장강도와 공칭 최대인장변형률의 관계를 식 (8)과 같이 제안하였다.

$$e_T = 1/(0.24 + 0.01395 s_T) \tag{8}$$

2.2 항복분지를 고려한 소성경화 방정식

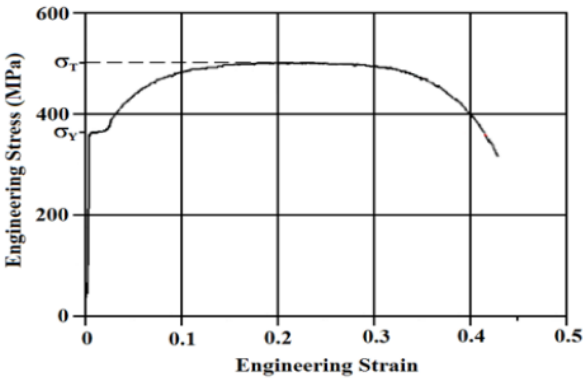


Fig. 2 Engineering stress–engineering strain curve of steel for marine use

선박에 사용하는 강재의 정인장시험 결과를 Fig. 2에서 보

여주고 있다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 항복의 초기에 현저한 항복분지(yield plateau)를 보여주고 있다. 이 항복분지의 영향은 변형률이 큰 경우는 그 영향이 그리 크지 않겠으나 공칭 변형률이 0.2 정도의 범위에서는 그 영향을 무시할 수 없을 것이다.

항분분지가 끝나는 변형률, 즉 소성경화가 시작되는 변형률인 ϵ_N 까지의 진응력–진변형률 관계는 별 어려움 없이 수식화할 수 있으므로 ϵ_N 이후의 진응력–진변형률 관계를 제공하는 방정식을 Ludwik의 구성방정식을 변형한, 식 (9)으로 구할 수 있다.

$$\sigma = \sigma_Y(1 + K\epsilon_p^n) \tag{9}$$

여기에서

$$n = (\epsilon_T - \epsilon_Y)\frac{\sigma_T}{\sigma_T - \sigma_Y} \tag{10}$$

$$K = \frac{1}{(\epsilon_T - \epsilon_N)^n}\frac{\sigma_T - \sigma_Y}{\sigma_Y} \tag{11}$$

항복분지를 고려한 소성경화방정식, 식 (9), 식 (10) 및 식 (11)을 사용하기 위해서는 재료의 항복응력 (σ_Y) 뿐만 아니라 최대인장응력 (σ_T), 최대인장변형률 (ϵ_T)과 소성경화 시작변형률 (ϵ_N)을 알아야 한다.

소형 실험 모델 제작에 많이 사용되는 SS41강의 정 인장시험으로부터 얻은 재료 상수값을 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Mean and COV of material properties obtained for SS41 steel

	Mean	COV
σ_Y	306.2 (MPa)	2.5 (%)
σ_T	397.2 (MPa)	1.2 (%)
ϵ_T	0.195	1.8 (%)
ϵ_N	0.0218	10.5 (%)

3. 변형률속도 경화

3.1 동인장 시험

변형률속도는 항복응력 뿐만 아니라 항복에 도달한 이후의 유동응력(flow stress)에 도 큰 영향을 미친다. 항복응력과 유동응력에 미치는 변형률속도의 영향을 규명하기 위해서는 동인장시험을 수행하여야 한다.

Fig. 3에는 동인장시험을 수행할 수 있는 창원의 재료연구소(KIMS)에서 보유하고 있는 동인장시험기를 보여주고 있다. 이 시험기를 사용하여 SS41강에 대해 변형률속도가 약 50(1/s)에서 수행한 동인장시험 결과를 Fig. 4에 정리하였다. Fig. 4(a)에는 동인장시험을 수행하여 얻은 자료를 그대로 보여주고 있고, Fig. 4(b)에서는 이를 필터링한 결과를 수록하였다.

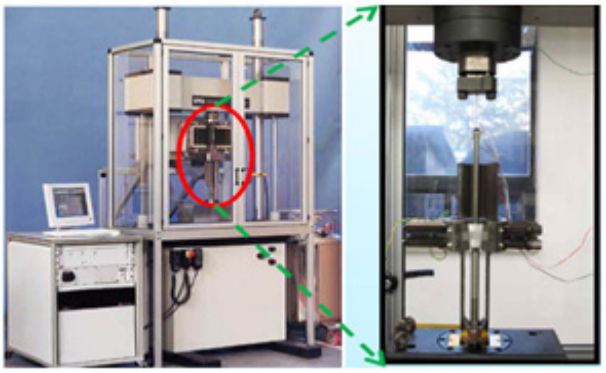
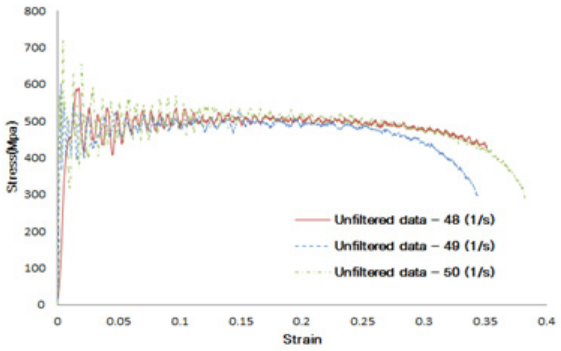
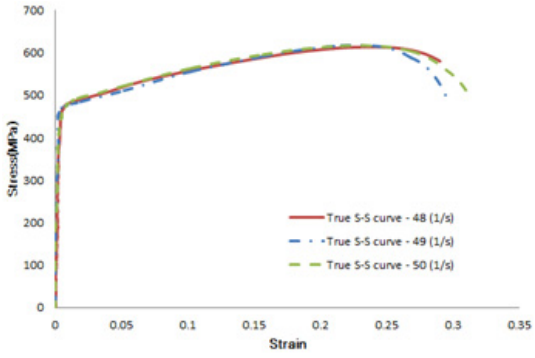


Fig. 3 High speed tensile testing machine (KIMS)



(a) unfiltered data



(b) filtered data

Fig. 4 Dynamic tensile test results of SS41 steel

3.2 항복응력에 대한 변형률속도의 영향

항복응력에 대한 변형률속도의 영향을 고려하는 식 중 가장 많이 사용하는 식이 식 (12)로 주어진 Cowper-Symonds 식이다.

$$\frac{\sigma_{YD}}{\sigma_Y} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D}\right)^{1/q} \quad (12)$$

여기에서 σ_{YD}는 동항복응력, $\dot{\epsilon}$는 변형률속도이고 D, q는 재료상수이다.

Cowper and Symonds (1957)는 1957년 이전에 수행한 동인장 시험의 결과를 활용하여 연강의 경우 D = 40.4, q = 5를 사용할 것을 제안하였다. Fig. 5에는 최근에 수행한 SS41 강의 동인장 시험 결과와 Cowper and Symonds가 제안한 재료상수를 비교한 결과를 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 최근에 수행한 동인장시험의 결과에 의하면 Cowper and Symonds가 제안한 값과는 상당한 차이가 있다. 재료상수 D = 40.4, q = 5는 최근까지도 많은 연구자들이 사용하고 있는데 이에 대한 검토가 필요하다.

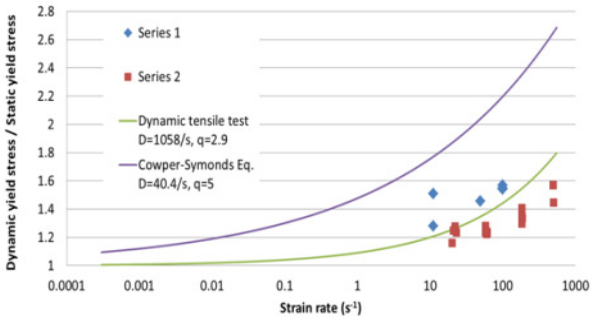


Fig. 5 Comparison of Cowper-Symonds material coefficients with recently perfomed dynamic tensile test results of SS41 steel

3.3 영구변형에 대한 변형률속도의 영향

어떤 변형률속도 구성방정식을 사용하느냐에 따라 충격하중을 받는 구조물의 영구변형은 차이가 날 수 있다. 이를 검토하기 위해 충돌하중을 받는 비보강판에 대한 수치해석을 수행하였다. Fig. 6에는 이 수치해석에 사용한 유한요소 모델을 보여주고 있다.

Table 2에는 9개 비보강판의 충돌실험 자료와 비교한 결과를 보여주고 있다. 이 표에는 동인장시험의 결과를 직접사용한 경우(DI)와 의 Cowper-Symonds 재료상수와 정인장시험의 결과를 사용한 경우(CS)를 비교한 것이다. 이 표에서 알 수 있듯이 동인장시험 결과로 변형률속도의 영향을 고려하면 추정의 평균값과 COV가 모두 개선됨을 알 수 있다.

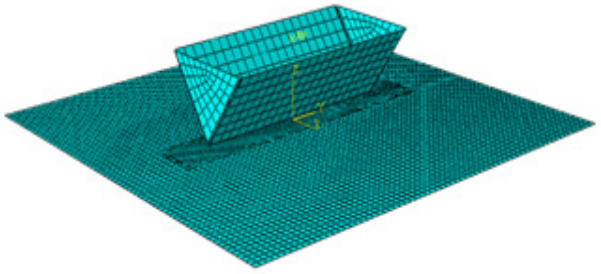


Fig. 6 Meshed model for permanent deflection analysis

Table 2 Numerical predictions of permanent deflections

model	non-dimensional permanent deflection			ratio	
	exp.	DI*	CS**	DI/exp.	CS/exp.
SE-5-1	7.25	7.62	7.95	1.05	1.10
SE-4-1	7.05	7.43	7.74	1.05	1.10
SE-3-1	6.69	7.09	7.63	1.06	1.14
SE-5-2	9.55	9.59	9.89	1.00	1.04
SE-4-2	8.35	9.23	9.54	1.10	1.14
SE-3-2	8.02	8.99	9.11	1.12	1.14
SE-5-3	9.90	10.28	10.61	1.04	1.07
SE-4-3	11.65	9.77	10.13	0.84	0.87
SE-3-3	8.39	9.27	9.70	1.10	1.16
Average				1.04	1.08
COV (%)				8.12	8.23

4. 파단변형률

4.1 충격하중으로 인한 파단의 크기

구조물이 충격하중을 받게 되면 충격이 격심한 경우 파단이 발생하게 된다. 파단이 발생하면 손상을 입은 구조물의 잔류강도에도 큰 영향을 미치지만 구조물이 유지해야할 수밀성을 잃게 되고 누유의 문제도 생기게 된다. 따라서 파단의 발생 여부와 파단의 크기를 정확히 추정하는 것은 중요한 사안이다.

파단의 크기를 추정하는데 있어, 어떤 변형률속도 구성방정식을 사용하는냐, 어떤 파단조건을 사용하느냐 그리고 유한요소해석에 있어 요소의 크기를 얼마로 하느냐에 따라 그 결과가 달라지게 된다. 이를 검토하기 위해 충돌하중을 받아 파단이 일어난 비보강판에 대해 전단파단조건(shear fracture criterion)을 사용하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 7에는 이 수치해석에 사용한 유한요소 모델을 보여주고 있다.

Table 3에는 8개 비보강판의 충돌실험 자료에 대해 실험에서 얻은 파단의 크기와 동일한 추정값을 주는 파단변형률 값을 보여주고 있다.

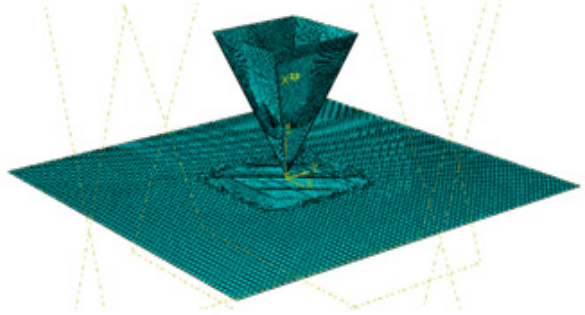


Fig. 7 Meshed model for dynamic fracture analysis

이 표에는 동인장시험의 결과를 직접사용한 경우(DI)와 의 Cowper-Symonds 재료상수와 정인장시험의 결과를 사용한 경우(CS)를 모두 보여주고 있다. 이 표에서 알 수 있듯이 어떤 변형률속도 구성식을 사용하느냐에 따라 전단파단변형률의 크기가 상당히 차이가 남을 알 수 있다.

Table 3 Selected shear fracture criterion

model	Shear strain fracture criterion	
	DI	CS
F-3-1	0.31	0.19
F-3-2	0.31	0.18
F-4-1	0.37	0.23
F-4-2	0.36	0.21
F-4-3	0.36	0.21
F-5-1	0.28	0.18
F-5-2	0.33	0.18
F-5-3	0.37	0.23

4.2 파단해석에 있어 유한요소의 크기

정적인 문제의 유한요소해석에서도 적절한 요소의 크기의 선정은 중요하다. 이를 해결하기 위해 통상 본 해석을 수행하기 전에 수렴성테스트 (convergence test)를 수행하여 적절한 요소의 크기를 정하게 된다. 충격하중을 받아 파단이 일어나는 경우를 해석할 때는 요소의 평균 변형률이 파단기준보다 큰 지, 작은 지에 따라 파단의 발생을 평가하게 되는데 어떤 크기의 요소를 사용하느냐는 계산결과에 큰 영향을 미치게 된다. Samuelides, et al. (2007)은 요소의 크기와 파단병형률의 관계를 식 (13)과 같이 제안하였다.

$$\epsilon_r = 0.056 + 0.54\frac{h}{l_e} \tag{13}$$

여기에서 ϵ_r은 파단변형률, h는 판의 두께이고 l_e는 요소의 크기이다.

동인장시험의 결과를 직접사용한 경우(DI)와 의 Cowper-Symonds 재료상수와 정인장시험의 결과를 사용한 경우(CS)에 대해 요소의 크기를 변화시키면서 전단파단변형률을 구한 결과를 Fig. 8에서 보여주고 있다.

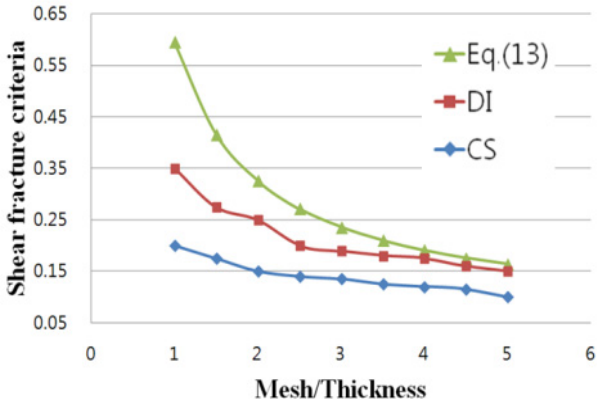


Fig. 8 Rupture strains for numerical analyses obtained by numerical study compared with that proposed by Samuelides, et al. (2007)

이 그림에서 알 수 있듯이 어떤 변형률속도 구성방정식을 사용하느냐에 따라 그 결과가 상당히 차이가 남을 알 수 있다.

5. 결 론

이상에서 설명한 내용을 아래와 같이 요약할 수 있다.

- 보다 정확히 변형률경화를 고려하기 위해서는 변형률경화 구성방정식에 항복분지를 고려하는 것이 필요하다.

- 변형률속도가 동항복응력 및 유동응력에 미치는 영향을 보다 정확이 규명하기 위해서는 다양한 조선용 강재에 대해 동인장시험을 수행하고 이를 수식화할 필요가 있다.

- 유한요소법으로 파단의 크기를 추정하는 경우 요소의 크기 뿐만 아니라 채택되는 변형률속도 구성방정식에 따라 해석의 결과에 많은 영향을 미친다.

- 본 고에서는 언급하지 못하였으나 충격하중을 받는 구조물의 영구변형과 파단의 크기는 크기 효과 (scale effect)의 영향을 받는 것으로 알려져 있다 (Jones, 1989). 따라서 충격하중을 받는 구조물의 영구변형과 파단의 크기에 미치는 크기효과에 대한 실험 및 이론적 연구가 필요하다.

후 기

본 논문은 국방과학연구소 산학연 주관 응용연구의 일환으로 수행 중인 "폭발강화격벽 설계 및 검증기술 연구" 과제 연구결과의 일부입니다. 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 감사의 말씀을 드립니다.

참 고 문 헌

ASTM (2008). 'Standard test method for tensile strain–hardening exponents (n–values) of metallic steel materials: E646–07', American Society of Testing Materials.

Cho, S.–R., Kim, I.–W. and Lee, S.–B.(2002). 'Experimental investigations on the plastic damage of plates due to lateral collisions' Jour. of Ship and Ocean Technology(SOTECH) vol. 6, no. 3, pp. 1–10.

Choung, J., Nam, W. and Lee, J.–Y. (2013). 'Dynamic hardening behaviours of various marine structural steels considering dependencies on strain rate and temperature', Marine Structures, vol. 32, pp. 46–67.

Cowper G. and Symonds P. (1957). 'Strain hardening and strain rate effects in the loading of cantilever beams', Brown Univ. Applied mathematics report no. 28 1957.

Hollomon, J. H. (1945). 'Tensile deformation', Transaction of American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers(AIME), vol. 162, pp. 260–290.

Jones N, (1989). 'Structural impact', chapter 11, First ed., Cambridge University Press, Cambridge.

Ludwik, P. (1909). 'Elemente der technologischen mechanik', Springer, Berlin.

Samuelides MS, Voudouris G, Toulios M, Amdahl J and Dow R, 2007 'Simulation of the behavior of double bottoms subjected to grounding actions', Proceedings of the 4th International Conference on Collision and Grounding of Ships, Schiffbau technische Gesellschaft, Hamburg, pp93–102.

Swift, H. (1952). 'Plastic instability under plane stress', Journal of Mechanical Physics and Solids, vol. 1, pp. 1.

임지호(2005). '차체강판의 중변형률 숙도에서의 동적 인장시험 및 물성 구성방정식에 관한 연구', KAIST 박사학위 논문.

조 상 래

■ 1952년생
■ 1997년 Glasgow대학교 조선해양공학과 박사
■ 현 재 : 울산대학교 교수
■ 관심분야 : 선박해양구조물 최종강도, 충격강도
■ 연 락 처 : ***–****–****
■ E – mail : srcho@ulsan.ac.kr