열성형 판 부재의 동적거동에 관련된 재료상수 산출에 관한 연구

이 주 성^{1*} · 임 형 군²

¹울산대학교 조선해양공학부, ²현대미포조선(주) 선체생산설계부

On the Derivation of Material Constants Associated with Dynamic Behavior of Heat Formed Plates

Joo-Sung Lee^{1*} and Hyung-Kyun Lim²

¹School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, 44610, Korea

²Division of Ship Production Design, Hyundai Mipo Dockyard Co. Ltd., Ulsan, 44113, Korea

Abstract

When impact load is applied to a plate structure, a common phenomenon that occurs in structures is plastic deformation accompanied by a large strain and eventually it will experience a fracture accordingly. In this study, for the rational design against accidental limit state, the plastic material constants of steel plate which is formed by line heating and by cold bending procedure have been defined through the numerical simulation for the high speed tension test. The usefulness of the material constants included in Cowper-Symonds model and Johnson-Cook model with the assumption that strain rate can be neglected when strain rate is less than the intermediate speed is verified through comparing the present numerical results with those in references. This paper ends with describing the future study.

Keywords : cold forming, dynamic hardening factor, fracture, heat forming, line heating, material constant, plastic hardening, strain rate

1. 서 론

자동차, 선박 등 운송체의 충돌사고는 사고 유형 중 가장 빈번하게 발생하는 것으로서 각 구조물의 형태마다 충돌에 의한 붕괴거동과 파단형태는 구조물을 구성하는 구조부재들의 충돌에너지 흡수 능력 등의 영향으로 충돌현상도 크게 다르게 나타나서 충돌로 인한 구조적 손상 및 파단을 정확하게 추정하기란 매우 어렵고 이는 선박 같은 대형 구조물에서 더욱 그러하다(Choung, 2007; Choung *et al.*, 2011; Min *et al.*, 2011; Min and Cho, 2012). 구조물의 충돌사고 시 구조물에 발생하는 공통적인 현상은 대현형률을 동반하는 소성변형과 최종적으로 그에 따른 파단을 경험하게 된다. 최근까지도 많은 연구자에 의해 충돌사고시 구조물의 파단을 최소화하면서 구조물의 소성 변형을 극대화하려는 연구가

활발히 진행 중이다. 선체 구조물의 경우 구성하는 구조부재들의 다양성과 복잡성 때문에 소성변형 및 파단 특성에 관한 연구는 주로 선박 내부 구조의 강도나 구조배치에 관한 연구들을 중심으로 이루어지고 있을 뿐 선박의 외판을 형성하고 있는 곡 외판에 대한 소성 및 파단 특성에 관한 기초적인 연구는 아직까지 미미한 수준이다. 선박의 선수 및 선미를 구성하는 외판(outer shell)의 60%이상은 선상가열법과 같은 열가공법으로 성형되는데, 열성형 후 재료적 특성치의 변화가 있지만 이를 구조설계나 충돌시 구조적 손상에 고려하고 있지 않다. 선박 충돌의 경우 충돌선은 선수부이고 피충돌선은 선측부 사이에 이루어지는데, 선체구조는 용접과 가열이라는 열성형에 의해 제작되므로 보다 합리적인 설계를 위해서는 용접이나 선상가열법과 같은 열가공법으로 제작 또는 성형되는 구조의 열성형에 따른 동적거동과 관련된 재료상수의 엄밀한

* Corresponding author:

Tel: +82-52-259-2162; E-mail: jslee2@ulsan.ac.kr

Received September 14 2015; Revised October 26 2015;

Accepted March 21 2016

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

정의가 필요하다.

본 연구에서는 사고한계상태(accidental limit state)에 대비한 합리적인 설계를 위하여 선상가열법(Jang *et al.*, 2001; Lee, 1997) 등으로 열간성형되는 선박 외판 강재의 소성재료특성을 규명하려는 연구의 일환으로 열간가공된(또는 열성형된) 강재의 동적 재료 물성치를 수치해석을 통하여 분석 및 정의하는데 연구의 주된 목적을 두었다. 본 연구의 결과로부터 선상가열법으로 열성형된 강재의 기계적 물성치는 열하중에 의해 재료의 강도는 증가하나 열에 의한 경화로 인해 진파단 변형률(true fracture strain)은 낮아졌다(Lim, 2012). 또한, 가열하지 않은 일반 강재에 비해 충격 하중에 의한 에너지 흡수 능력이 급격히 저하된다는 사실을 확인할 수 있었다. 이것은 사고한계상태 설계 관점에서는 불리할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 본 연구에서는 선상가열이 적용된 외판 구조물의 충돌과 같은 동적인 파단 문제를 다루고자 하는데, 이를 위해 우선 변형률 속도에 대한 두 가지 대표적인 구성방정식인 Cowper-Symonds 모델과 Johnson-Cook 모델의 이론적 배경을 설명하고, Cowper-Symonds 모델의 재료상수의 타당성을 검토하였다. 변형률 속도에 따른 재료 데이터를 확보하는 방법으로는 주로 고속 인장실험을 시행하여 재료 데이터를 확보하거나, 기존 연구자들의 문헌 검토 및 재료 데이터 발체를 통해 재료상수를 추정하는 방법이 있다. 그러나 고속 인장실험은 1/s~1000/s 사이의 중변형률 속도 이상에서 실시해야 하기 때문에 공압 또는 유압식 고속 시험기를 사용하여 물성실험을 해야 하지만 아직까지 명확한 실험방법이나 시편 등에 대한 표준이 확립되어 있지 않다. 본 연구에서는 수치해석을 이용하여 선상가열 적용 강재에 대한 고속인장실험의 구현을 통해 재료 데이터를 확보하였다. 또한 확보된 재료 데이터를 이용하여 Cowper-Symonds 및 Johnson-Cook 변형률 속도 구성방정식의 재료상수를 도출하고 기존의 연구 결과와 비교함으로써 본 연구에서 수행한 수치해석 방법론의 유효성을 검증하였다. 최종적으로 도출된 재료 데이터는 향후 선박의 충돌과 같이 대변형률을 동반하는 문제에 있어서 선상가열 적용 강재의 손상을 구현하는 기초 자료로 활용될 것이다.

2. 변형률 속도 구성방정식

약 1/s이하의 변형률 속도는 통상 저변형률 속도(low strain rate)로 간주되어 준정적 문제(quasi-static problem)로 취급된다. 중변형률 속도(intermediate strain rate)는 1/s~1000/s 사이의 변형률 속도를 의미하며 이 구간에서는 힘의 불균형으로 인한 관성력과 응력파의 영향이 상당히 증가한다.

저변형률 속도 구간과 달리 소성변형에 의하여 발생한 열이 주위로 전파할 시간이 충분하지 않기 때문에 일부의 열이 부재의 온도를 상승시킨다. 그리고 재료가 1000/s이상의 고변형률 속도로 변형하면 주로 응력파가 부재의 변형에 영향을 미치게 되며, 빠른 변형으로 인하여 부재에서 발생한 열이 전도될 시간을 가지지 못하여 단열상태로 간주된다. 따라서 소성변형에 의하여 발생한 열의 대부분이 부재의 온도 상승에 기여한다.

Fig. 1은 변형률 속도에 따른 탄소강의 동적 항복응력의 변화를 나타내고 있다. 이는 1/s이하의 변형률 속도에 대하여는 준정적 물성실험으로부터 얻은 것이고, 약 100/s 이상의 변형률 속도에 대하여는 흡킨슨 바 실험으로부터 얻은 결과이다. 변형률 속도가 증가할수록 항복응력이 점차 증가하고 약 500/s를 지나면 동적 항복응력이 매우 급격히 증가함을 알 수 있다. 변형률 속도에 대한 구성방정식은 소성변형으로 인한 온도와 밀접한 관련이 있지만 이를 이론적으로 완벽하게 나타낼 수 있는 구성방정식은 존재하지 않으며 많은 연구자들이 적절한 가정을 도입하여 재료의 소성 영역에서의 변형률 속도 및 온도에 대한 의존성에 초점을 맞추어서 연구를 진행하였다.

Fig. 1 Dynamic yield stress according to strain rate (Meyer, 1994)

대표적인 변형률 속도 구성방정식인 Cowper-Symonds 모델과 Johnson-Cook 모델은 모두 변형률 속도의 변화를 정적 항복응력의 동적 경화계수(DHF; dynamic hardening factor)로서 근사한 경우이며 각각 저변형률 속도와 중-고 변형률 속도에 적합한 것으로 알려져 있다. 정적 유동응력, $\sigma_Y(\epsilon^p)$ 과 동적 유동응력, $\sigma_Y^d(\epsilon^p, \dot{\epsilon}^p)$ 을 연결하는 동적 경화계수, $DHF(\dot{\epsilon}^p)$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_Y^d(\epsilon^p, \dot{\epsilon}^p) = \sigma_Y^s(\epsilon^p) \cdot DHF(\dot{\epsilon}^p) \quad (1)$$

Cowper-Symonds 구성방정식에서 동적경화계수는 식 (2)와 같이 표현된다. 여기에서 D_{CS} 와 q_{CS} 는 모델의 재료상수이다. 최종적인 Cowper-Symonds 구성방정식은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$DHF(\dot{\epsilon}^p) = \left(1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}^p}{D_{CS}} \right)^{\frac{1}{q_{CS}}} \right) \quad (2)$$

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

Johnson-Cook의 변형률 속도 모델을 이해하기 위해서는 Johnson-Cook의 정적 소성경화(plastic hardening) 모델을 우선적으로 이해해야 한다. 식 (4)와 같이 Johnson-Cook 정적 경화모델은 기본적으로 소성 변형률과 온도를 변수로 가진다. 이때 요구되는 재료상수는 A_{JC} , B_{JC} , n 와 m 이며, 모두 재료의 천이온도 T_{trans} (재료에서 온도의 상승에 따른 항복응력의 저하가 발생하지 않는 최대 온도) 이하에서 계측된 값이어야 한다. 또한 무차원 온도 T^* 는 식 (5)와 같이 정의된다. 여기에서 T 는 재료의 현재 온도(instantaneous temperature)이다.

$$\sigma_Y^d = (A_{JC} + B_{JC}(\epsilon^p)^n)(1 - T^{*m}) \quad (4)$$

$$T^* = \begin{cases} 0.0 & \text{for } T < T_{trans} \\ \frac{T - T_{trans}}{T_{melt} - T_{trans}} & \text{for } T_{trans} < T < T_{melt} \\ 1.0 & \text{for } T > T_{melt} \end{cases} \quad (5)$$

Johnson-Cook 모델에 있어서 동적경화계수는 식 (6)과 같이 나타내어지며 식 (1)과 (4)를 이용하면 최종적으로 변형률 속도를 고려한 Johnson-Cook 구성방정식을 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 $\dot{\epsilon}_{ref}$ (reference strain rate)는 통상 1/s로 간주한다.

$$DHF(\dot{\epsilon}^p) = \left(1 + C_{JC} \ln \frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_{ref}} \right) \quad (6)$$

$$\sigma_Y^d = (A_{JC} + B_{JC}(\epsilon^p)^n) \left(1 + C_{JC} \ln \frac{\dot{\epsilon}^p}{\dot{\epsilon}_{ref}} \right) \cdot (1 - T^{*m}) \quad (7)$$

3. 선상가열실험 및 인장실험

본 연구에서는 먼저 선상가열을 적용한 강재의 재료 물성치를 얻기 위해 선박구조물용 강재에 대해 동일한 가열

조건하에서 선상가열을 실시하였다. 냉각방식으로는 실제 조선소의 성형작업과 동일한 방법인 수랭(water cooling)을 적용하였다. 실험에 사용한 강판은 공칭항복응력이 235MPa인 연강재이고, 가열하는 이면에서의 온도를 측정하기 위해 K형 열전대(K type thermocouple)를 이용하여 가열선 중심점에서 0, 10, 20과 50mm 떨어진 위치에서 시간 이력에 따른 온도변화를 계측하였다. 계측한 변위와 온도는 열전달 및 열탄소성 해석에 이용하였다. 시편의 크기는 가로×세로×두께=300×1000×10.0mm이고, 가열속도는 400mm/min이다. 실험 조건들을 Table 1에 나타내었고, 냉각방법은 수랭(water cooling)이다. Fig. 2는 자동가열장치를 이용한 선상가열실험 장면을 보여준다. 선상가열 실험 시 K형 열전대로 측정된 이면에서의 온도의 시간에 따른 변화 추이가 Fig. 3과 같다. 보는 바와 같이 열성형시 재료가 급열과 급냉이라는

Table 1 Conditions of line heating experiment

Heat source	LPG
LPG pressure	1.7kgf/cm ²
Oxygen pressure	4kgf/cm ²
LPG flow rate	23L/min
Oxygen flow rate	50L/min
LPG heat value	2,400kcal
Distance between torch tip and plate surface	50mm
Torch tip number	3000
Cooling method	Water cooling

(a) Line heating equipments (b) Water cooling after line heating

Fig. 2 Photos of heating apparatus and line heating test

Fig. 3 Temperature history of line heating at 10mm steel

Table 2 Specimens for tension test

Serial	Heating speed (mm/min)	Direction	Quantity
F1	-	Parallel	3
F2	-	Normal	3
F3	400	Parallel	3
F4	400	Normal	3

Fig. 4 Wire cutting after line heating and Tensile test specimens

(a) 300kN tensile test equipment (b) after necking (c) after fracture

Fig. 5 Necking and fracture of specimen

거친 열사이클을 경험하는 것을 확인할 수 있다.

전술한 방법으로 선상가열한 강재에 대한 인장시험을 수행하기 위해 Table 2와 같이 네 가지 경우에 대한 시편을 각각 3개씩 제작하였다. 시편 F1과 F2는 열가공을 하지 않은 것으로 강판 제작시 롤 방향에 평행하게 채취한 것(parallel to roll direction)과 그에 수직인 방향(normal to roll direction)으로 채취한 것이고, F3와 F4는 속도 400mm/min으로 가열한 판에서 롤 방향에 평행 및 수직인 방향으로 채취한 것을 나타낸다. 각 경우 시편 개개에는 '-1, -2' alc '-3'을 부여하였다. 곧, F1 계열의 세 개의 시편은 동일한 조건의 것인데, 각각 F1-1, F1-2 그리고 F1-3와 같이 모델번호를 부여하였다. 절단 시 시편에 투입되는 입열을 막기 위해 플라즈마 절단이나 가스절단에 비해 열 영향이 적은 것으로 알려진 전선절단기(wire cutting machine)를 사용하여 가열선의 중심부가 포함되도록 ASTM의 인장시험 규격에 부합되도록 채취하였다. Fig. 4는 선상가열로 열성형한 강재의 가열 중심부를 전선절단기로 절단하는 모습과 절단된 시편의 사진을 나타낸다. 인장시험은 300kN 만능 인장시험기를 이용하여 시행되었으며, 인장시험 시 속도는 2.0mm/min가 되도록

변위를 제어하였다. 연신율은 표점거리(gage length)가 50mm인 신율계(extensometer)를 이용하여 계측하였다. Fig. 5는 인장시험기에 시편을 장착한 상태와 인장시편의 확산 네킹 발생부터 파단까지의 과정을 보여준다.

4. 실험 결과

본 연구의 주목적은 선상가열을 적용한 강재의 재료 특성을 얻는 것이므로 인장시험 데이터를 면밀히 분석하여 항복강도(σ_y), 인장강도(σ_U), 파단변형률(ϵ_f^p), 경화지수(n) 및 강도 계수(K) 등과 같은 재료의 물성치를 얻었다.

인장시험 결과 데이터를 Fig. 6에 나타내었고, Table 3과 4에 가열하지 않은 강재와 열성형 강재의 물성치를 나타 내었다. 여기에는 재료의 소성을 정의하기 위한 기본적인 데이터 즉, 항복강도, 인장강도, 로그 진파단변형률, 소성 변형률 경화지수, 강도계수 등이 포함된다. 또한, 본 연구를 통해 제시된 재료실험 결과에 대해 통계분석을 실시하여 평균(mean), 표준편차(standard deviation: SD)를 함께 제시 하였다. 가열속도 400mm/min으로 선상가열을 적용한 두께

(a) Roll direction : Parallel

(b) Roll direction : Nominal

Fig. 6 Results of tensile test

Table 3 Mechanical properties for the present non-heat formed specimens

Serial	σ_Y (MPa)	σ_U (MPa)	ϵ_f^P	n	K (MPa)
F1-1	304.06	455.72	1.301	0.170	907.61
F1-2	317.34	469.47	1.289	0.168	890.23
F1-3	300.97	451.87	1.319	0.163	852.36
F2-1	303.92	451.86	1.312	0.165	874.73
F2-2	299.45	448.21	1.341	0.167	886.82
F2-3	296.37	447.01	1.359	0.169	912.65
Mean	303.69	454.02	1.320	0.167	887.40
SD	7.2852	8.1714	0.026	0.003	22.103

Table 4 Mechanical properties for the present heat formed specimens

Serial	σ_Y (MPa)	σ_U (MPa)	ϵ_f^P	n	K (MPa)
F3-1	384.90	498.24	1.263	0.193	1217.60
F3-2	386.63	500.48	1.246	0.179	1028.60
F3-3	370.20	472.18	1.271	0.216	1114.00
F4-1	380.76	495.76	1.277	0.182	1136.60
F4-2	386.48	499.54	1.268	0.220	1291.80
F4-3	374.97	487.43	1.273	0.208	1134.20
Mean	380.66	492.27	1.267	0.200	1153.80
SD	6.7709	10.9099	0.012	0.018	90.613

10mm인 강재의 평균 항복강도는 가열하지 않은 일반강재에 비해 약 25% 증가하였고, 최대인장강도는 가열하지 않은 일반강재에 비해 9% 증가하였다. 그러나 로그 진파단변형률은 가열하지 않은 일반강재에 비해 5% 정도 감소하였다.

5. 수치해석

열전달해석에 사용된 열원(heat flux)은 Tsuji(1988)가 제안한 2중 가우시안 열속(double gaussian heat flux)을 Fig. 7과 같은 형태로 적용하였다. 열전달해석에 사용된 단위시간당 입열량은 2,400cal/sec로 실험과 동일하다. 선상 가열 시편은 Patran을 이용하여 가로, 세로 300mm×300mm 크기에 두께가 10mm인 모델을 생성하였다. 수치해석은 Aabqus를 이용하였는데, 가열속도를 400mm/min으로 하여 열전달해석을 수행하였다.

일반적으로 선상가열 시 냉각방식은 수랭을 적용한다. 이에 본 연구에서도 급냉(수랭)에 의한 열손실을 고려하였으며 수랭효과를 고려하기 위해 열원에서 150mm 떨어진 위치에서부터 대류계수(convection factor)를 적용하여 열 손실을 구현하였다. 이때 실험과 동일한 가열 및 냉각조건을 부여하기 위해 상온의 온도는 20℃으로 간주하고, 열손실계수는 수차례의 수치해석을 통하여 공랭 시 $6.0 \times 10^{-6} \text{ cal/mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$,

Fig. 7 Double gaussian heat flux **Fig. 8** Heat transfer analysis of 10mm steel(Heating Speed: 400mm/min)

수랭 시 $4.0 \times 10^{-3} \text{ cal/mm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 로 적용하였다. 이때 잠열은 65,000cal/kg이다.

Fig. 8에 열원(heat flux)의 이동 위치에 따른 단계별 열전달 해석의 진행과정을 나타내었다. 열원의 이동 후 수랭 효과 때문에 수치해석 모델이 급속히 냉각되는 것을 볼 수 있다.

열탄소성 해석은 이론적으로 열전달 문제와 열변형 문제가 연성된 형태이다. 따라서 열전달 해석의 결과를 이용하여 열원이 통과하는 과정의 온도분포를 계산한 후, 이 결과를 열하중으로 입력하여 탄소성 해석을 수행함으로써 입열에 의한 잔류 소성변형을 계산하였다. 그리고 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 본 연구에서는 입열에 의한 각변형량과 수축량이 재료의 물성치에는 큰 영향을 끼치지 않는다고 판단하여 무시하였다. 수치해석에 사용된 온도변화에 따른 소성경화지수, n 는 Fig. 9와 같다. 탄소성해석을 위한 경계조건으로 모델의 각 모서리 바닥부분에 강체 운동의 제어를 위한 구속조건을 부여하였다.

Fig. 9 Relations of stress and temperature according to strain hardening exponent, n

(a) During heating (b) During cooling

Fig. 10 Result of thermo-elasto-plastic analysis

인장시험을 수치적으로 구현하는데 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였는데, 감차적분 8절점 사각기둥 요소(C3D8R)를 이용하였다. 수치해석에 사용된 시편 모델과 해석 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 해석모델 요소 크기는 표점거리 이내의 시편 중앙부는 1.25mm로 시편의 고정 부는 천이구간을 두고 5mm로 하였다. 경계조건으로 대칭면에서 각 대칭 방향으로 이동 변위를 구속하였으며, 인장하중을 구현하기 위해 강제 변위를 그림의 끝단부에 부여하였다. 입열량 변화, 즉, 온도에 따른 재료의 물성치 변화를 고려하기 위해 앞서 수행한 열전달 해석 및 열탄소성 해석 결과 값을 이용하고 가열속도에 따른 평균 진응력-로그 진변형률을 구하여 선상 가열 재료 데이터로 사용하였다. 그리고 탄성계수는 210GPa 이고 Poisson 비는 0.3이다. 수치해석은 인장시험과 동일하게 변위를 2mm/min로 제어하여 모든 시편 모델에 대해 수치 해석을 수행하였다. 수치해석의 유효성을 검증하기 위해 실험과 수치해석에서 얻은 재료 데이터를 이용하여 평균 진응력-진변형률 선도를 Fig. 12에 비교하여 나타내었다. Fig. 12에서 볼 수 있듯이 수치해석을 통하여 얻은 평균 진응력-진변형률이 실험값과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 11 Result of numerical analysis of 10mm steel (A-grade)

Fig. 12 Comparison of average stress-strain curves from experiment and numerical analysis for heated specimen

6. 재료상수 도출 및 수치해석 유효성 검증

변형률속도에 대한 두 가지 대표적인 구성방정식인 Cowper-Symonds 모델과 Johnson-Cook 모델의 동적 구성방정식의 재료상수인 D_{CS} 와 C_{JC} 는 고속 인장시험을 통해서 구해야 한다. Choung 등(2011)은 EH36-TM 및 DH36-TM 강재에 대한 고속 인장시험을 상온과 -40°C 에서 준정적 변형률속도 (0.001/s), 저변형률속도(1/s, 10/s) 그리고 중변형률속도 (100/s, 200/s)에 대해 수행한 바 있다. 본 연구에서는 고속 인장시험을 수행하는 대신 수치해석을 통해 고속 인장시험 결과를 취하여 Cowper-Symonds 모델과 Johnson-Cook 모델의 재료상수를 구하였다. 그리고 수치해석 결과로부터 동적 경화계수를 도출하여 변형률 속도에 따른 관계를 도식화 하였다. 이를 위해 먼저 본 연구에서는 관련 문헌을 통해 동적경화 구성방정식이 변형률 속도만의 함수로 나타내어도 큰 오차가 없다는 가정을 하고, Choung 등(2011)이 상온에서 실시한 DH36 강재에 대한 고속 인장시험 결과와 본 연구의 수치해석 결과를 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 수치해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(Simulia, 2013)를 이용하였으며, 이때 변형률속도는 준정적 변형률속도

Fig. 13 Comparison of true stress-true strain curves of DH36 at several strain rates curves from Choung's experiment(2011) and numerical analysis

(0.001/s)로 수행한 인장실험 결과를 기준으로 변형률을 시간으로 미분하여 계산하였다. 그 결과, 모든 변형률속도에서의 응력-변형률이 Choung 등(2011)의 실험결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이것은 본 연구에서 가정한 동적경화 구성방정식이 변형률속도만의 함수로 나타내어도 큰 오차가 없다는 것을 입증하는 결과로 볼 수 있다.

선상가열 적용 강제에 대한 고속 인장실험 수치해석 모델은 5절에서 수행하였던 인장시험 모델과 동일하며, 수치해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 변형률 속도(strain rate)를 변화시키면서 해석을 수행하였다. 일반적으로 약 1/s이하의 변형률속도는 저변형률속도(low strain rate)로 간주되어 준정적(quasistatic)인 문제로 취급된다. 즉 구조부재 전체가 외력에 대한 힘의 평형을 이루고 관성을 무시할 수 있다. 또한, 저변형률속도에서는 열로 소산되는 소성변형에너지가 거의 없으므로 통상 등온상태로 취급된다. 중변형률속도(intermediate strain rate)는 1/s~1000/s 사이의 변형률속도를 의미하며 이 구간에서는 힘의 불균형으로 인한 관성력과 응력파의 영향이 상당히 증가한다. 저변형률속도 구간과 달리 소성변형에 의하여 발생한 열이 주위로 전파할 시간이 충분하지 않기 때문에 일부의 열이 부재 온도를 상승시킨다. 소성변형에 의한 열이 온도 상승에 미치는 비율은 변형률속도, 부재의 재질/형상, 그리고 단열 상태에 따라 변동적이다. 따라서 본 연구에서는 준정적 변형률속도(0.001/s)와 1/s 이하의 저변형률속도는 정적해석(static analysis)을, 10/s~100/s사이의 중변형률 속도는 동적해석(dynamic analysis)을 수행하였다. 선박의 일반적인 충돌이나 좌초사고의 경우 거의 대부분이 20노트 이하의 저속 충돌이어서 본 연구에서는 1000/s이상의 고변형률 속도의 경우는 제외하였다. 본 연구에서는 일반적인 연강과 선상가열을 적용한 강제에 대한 고속

인장실험을 수치적으로 구현하기 위해 아래와 같은 순서에 따라 변형률 속도에 따른 재료 데이터를 확보하였다.

- 선상가열 및 인장실험과 해석 결과를 이용하여 변형률 속도에 따른 고속인장실험에 대한 수치해석 수행
- 일반 연강에 대해서도 (a)와 동일한 방법으로 고속 인장실험에 대한 수치해석을 수행
- (a)와 (b)의 수치해석 결과로부터 변형률 속도에 따른 평균 진응력-진변형률 관계 데이터를 도출
- 준비된 재료 데이터를 이용하여 변형률 수준에 대한 동적 경화계수를 도출
- (d)에서 구한 동적 경화계수로부터 Cowper-Symonds 와 Johnson-Cook 모델의 재료상수 도출
- (e)에서 구한 재료상수 값을 참고문헌의 기존 연구 결과와의 비교를 통해 타당성 검증

본 연구에서 사용한 두께가 10mm인 “A”급 연강에 대해 위의 순서 (a)~(c)를 수행하여 변형률 속도에 따른 진응력-

(a) Line heating steel

(b) Non-heating steel

Fig. 14 Estimated true stress-true strain curves for various strain rates by numerical analysis

(a) Line heating steel

(b) Non-heating steel

Fig. 15 Dynamic hardening factors of “A” grade steel

진변형률 관계를 Fig. 14에 나타내었다. 또한 수치해석 결과로부터 동적 경화계수를 도출하여 변형률 속도와의 관계를 Fig. 15와 같이 나타내었다. Fig. 15에 보인 바와 같이 변형률 수준에 따른 동적경화계수의 변화를 파악하기 위해 소성 변형률이 각각 0.05, 0.1, 0.15 그리고 0.2인 네 경우에 대한 동적경화계수를 표시하였다.

가열하지 않은 강재(Fig. 15(b))와 선상가열을 적용한 강재(Fig. 15(a)) 모두 변형률 속도가 증가할수록 동적경화 계수가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이것은 동적경화 계수는 변형률 속도의 함수로, 동적경화 구성방정식을 변형률 속도만의 함수로 나타낼 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 13(a)에 나타난 선상가열 적용 강재의 동적 경화계수들을 이용하여 5% 항복강도(5% proof stress)를 기준으로 Cowper-Symonds와 Johnson-Cook 모델의 재료상수를 구하여 Table 5에 나타내었다. 가열하지 않은

Table 5 Material constants of the present “A” grade steel (unit : /s)

Constitutive model	Type	D_{CS}	q_{CS}	C_{JC}
Cowper-Symonds	Heat formed steel	410	5	N/A
	Non-heat formed steel	40	5	N/A
Johnson-Cook	Heat formed steel	N/A	N/A	0.1824
	Non-heat formed steel	N/A	N/A	0.1715

Table 6 Material constants by other references (unit : /s)

Author	D_{CS}	q_{CS}
Jones(1989)	40	5
Lee(1983)	355	5
Paik(1995)	3200	5
Lim(2012)	Eq. (8)	5

(a) Line heating steel

(b) Non-heated steel

Fig. 16 Comparison of dynamic plastic hardening of “A” grade steel

강재에 대한 Cowper-Symonds 모델의 재료상수 D_{CS} 와 q_{CS} 는 일반적으로 연강에 많이 적용되는 재료상수 값과 유사하게 나타나 관련문헌(Jones, 1989)의 값을 나타내었다.

본 연구의 타당성을 검증하기 위하여 고속인장실험을 구현하는 수치해석을 통해 도출된 동적경화계수와 재료상수를 참고문헌들의 결과와 비교하여 Table 6과 Fig. 16에 나타내었다. D_{CS} 는 다음의 식과 같이 정의된다.

$$D_{CS} = \begin{cases} 92000 \exp\left(\frac{\sigma_0}{364}\right) - 193779 & \text{for } \sigma_0 > 271 \text{ MPa} \\ 40 & \text{for } \sigma_0 \leq 271 \text{ MPa} \end{cases} \quad (8)$$

Fig. 16에서 알 수 있듯이 선상가열을 적용한 강재의 경우 Lee(1983)에 의해 제안된 Cowper-Symonds 변형률 속도 구성방정식의 재료상수에 대한 추정식이 본 연구의 수치해석 결과와 가장 유사한 것으로 나타났으며, 그 외는 동적경화를 너무 과대 또는 과소평가하고 있는 것으로 나타났다.

7. 결 론

본 연구에서는 열성형된 강재의 동적거동과 관련된 거동 특성을 분석하고 관련 재료상수의 도출에 관한 내용을 다루었다. Johnson-Cook 모델은 중-고변형률속도에 적합하며, Cowper-Symonds 모델은 소성변형으로 인한 열의 발생과 이에 따른 재료의 연화를 고려할 수 없기 때문에 선박과 같은 구조물의 사고한계상태에 적절한 모델로 알려져 있다. 본 연구에서는 열성형된 경우와 그렇지 않은 일반 연강에 대해 위의 두 가지 모델의 대표적인 구성방정식의 재료상수인 D_{CS} , q_{CS} 와 C_{JC} 를 고속인장실험 대신 수치해석을 이용하여 도출하고 변형률속도에 따른 관계를 도식화하였다. 그리고 수치해석 결과를 기존 연구자들에 의해 제안된 값들과 비교함으로써 본 논문에서 수행한 고속인장실험 수치해석 방법론과 그 결과로 제시된 재료상수들의 타당성을 확인하였다. 본 연구에서 적용한 방법은 보다 실제적인 구조물예의 충돌이나 좌초사고에 대한 수치적 구현을 통해 그 실용적 적용성을 입증해야 할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구자지원사업으로 지원된 결과물의 일부임(NRF-2013R1A2A2A01017021).

References

- Choung, J.M.** (2007) On the Fracture Criteria of Steels for Marine Structures Subjected to Impact Loadings, Ph.D. Thesis, University of Ulsan.
- Choung, J.M., Shin, C.S., Kim, K.S.** (2011) Plasticity and Fracture Behaviors of a Marine Structural Steel, Part II: Technical Backgrounds of Fracture, *J. Ocean Eng. & Tech.*, 25, pp.92~100.
- Jang, C.D., Ko, D.E., Kim, B.I., Park, J.U.** (2001) An Experimental Study of Characteristics of Plate Deformation by Heating Process, *J. Soc. Nav. Arch. Korea*, 38, pp.62~70.
- Jones, N.** (1989) Structural Impact, Cambridge University Press, Cambridge.
- Lee, J.W.** (1983) On the Optimization Design of Soft Bow Structure, *Proc. of the 2nd Internal Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units*, pp.429~435.
- Lee, J.S.** (1997) Plate Forming Automation System of Steel Plates by Line Heating Method (III), *J. Soc. Nav. Arch. Korea*, 34, pp.85~89.
- Lim, H.K.** (2012) On the Behavior Characteristics by Impact Loadings of Steels for Ship Shell Structures with Line Heating, Ph.D. Thesis, University of Ulsan.
- Meyers, M.A.** (1994) Dynamic Behavior of Materials, John Wiley & Sons, New York.
- Min, D.K., Shim, C.S., Shin, D.W., Cho, S.R.** (2011) On the Mechanical Properties at Low Temperatures for Steels of Ice-Class Vessel, *J. Soc. Nav. Arch. Korea*, 48, pp.171~177.
- Min, D.K., Cho, S.R.** (2012) On the Fracture of Polar Class Vessel Structures Subjected to Lateral Impact Loads, *J. Soc. Nav. Arch. Korea*, 49, pp.171~177.
- Paik, J.K., Pedersen, P.T.** (1995) Collision Strength Analysis of Double Hull Tanker, *J. Soc. Nav. Arch.*, 32, pp.102~117.
- ABAQUS** (2012) *Abaqus V.6.12 Analysis User Manual*, Simulia.
- Tsuji, I., Okumura, Y.** (1988) A Study on Line Heating Process for Plate Bending of Ship Steel, *J. West. Soc. Nav. Arch.*, 76, pp.149~160.
- Cowper, G., Symonds, P.** (1957) Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Loading of Cantilever Beams, Technical Report, Brown University,

Division of Applied Mathematics, Report No.28.

Johnson, G.R., Cook, W.H. (1985) Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various

Strain, Strain Rates Temperatures and Pressures, *Eng. Fract. Mech.*, 21(1), pp.31~48.

요 지

구조물에 충격하중이 작용하면, 그 구조물은 통상적으로 대변형을 동반하는 소성변형과 최종적으로 그에 따른 파단을 경험하게 된다. 본 연구에서는 사고적 극한 상태에 대한 합리적인 설계를 위해 열성형된 판과 냉간성형된 판의 재료상수를 고속인장시험에 대한 수치시현을 통해 정의하였다. 변형율이 중간 속도 이하인 경우에는 변형률 속도의 영향을 무시할 수 있다는 가정과 함께 Cower-Symond 모델과 John-Cook 모델에 포함되는 재료상수들의 유용성을 참고문헌들의 결과와 비교하여 입증하였다. 본 논문은 향후 연구 내용에 대한 언급을 포함하면서 마무리하였다.

핵심용어 : 냉간성형, 동적경화계수, 파단, 열성형, 선상가열, 재료상수, 소성경화, 변형률속도