

횡충격하중을 받는 빙해선박 구조물의 파단에 관한 연구

민덕기¹·조상래^{2,†}
(주)현대미포조선¹
울산대학교 조선해양공학부²

On the Fracture of Polar Class Vessel Structures Subjected to Lateral Impact Loads

Dug-Ki Min¹·Sang-Rai Cho^{2,†}
Hyundai Mipo Dockyard Co., Ltd.¹
University of Ulsan²

Abstract

Single frame structures with notches were fractured by applying drop impact loadings at room temperature and low temperature. Johnson–Cook shear failure model has been employed to simulate the fractured single frame structures. Through several numerical analyses, material constants for Johnson–Cook shear failure model have been found producing the cracks resulted from experiments. Fracture strain–stress triaxiality curves at both room temperature and low temperature are presented based on the extracted material constants. It is expected that the fracture strain–stress triaxiality curves can offer objective fracture criteria for the assessment of structural fractures of polar class vessel structures fabricated from DH36 steels. The fracture experiments of single frame structures revealed that the structure on low temperature condition fractures at much lower strain than that on room temperature condition despite the same stress states at both temperatures. In conclusion, the material properties on low temperature condition are essential to estimate the fracture characteristics of steel structures operated in the Northern Sea Route.

Keywords : Polar-class vessel(빙해선박), Single frame(단일 늑골), Fracture(파단), Impact loads(충격하중), Johnson–Cook fracture model(Johnson–Cook 파단모델)

1. 서론

선박 구조물에서의 영구 변형의 크기, 파단의 크기 등을 예측하기 위해서는 사용 강재의 소성 변형률 경화 (plastic strain hardening), 변형률속도 경화 (strain rate hardening), 파단에 대한 재료 특성을 동시에 알아야 한다. 본 연구에서는 제 5회, 제 6회 및 제 7회 ICCGS (International Conference on Collision and Grounding of Ship)에서 발표된 논문을 검토하고 파단 모델의 사용현황에 대하여 조사하였다. Table 1에서 나타났듯이 국내외 연구의 상당 부분은 아직도 전단 파단 조건 (shear fracture criterion)에 근거하기 때문에 파단의 기준 물리량으로서 등가 소성 변형률을 이용하고 있음을 알 수 있다. 전단 파단은 구조물에서 발생한 등가 소성 변형률이 파단 변형률에 도달했을 때 파단이 발생하는 조건을 가진다. 파단 변형률을 상수로 적용한다면, 전단 파단 조건은 기하학적인 형상에 따른 정수압 응력의 발달을

고려한 파단 조건을 제시하지 못한다. 이러한 이유로 동일한 재료임에도 구조물의 형상에 따라 매우 상이한 파단 변형률을 사용하고 있는 것이다.

Lehmann and Yu (1998)는 연속체 손상 역학(CDM, continuum damage mechanics)을 응용하여 파단 지수(rupture index)를 제시한 바 있으며, 이는 응력 삼축비(stress triaxiality)가 파단에 미치는 영향을 처음으로 도입한 사례로 보여진다. Urban (2003)과 Tornqvist (2003)는 Rice–Tracey의 기공 성장 모델(void growth model)과 Cockcroft–Latham의 전단 파단 모델(shear fracture model)을 조합한 RTCL 모델(Rice–Tracey and Cockcroft–Latham model)을 파단 조건으로 제시한 바 있다. 이들 연구 결과의 공통점은 편차 응력을 나타내는 von Mises 등가 응력뿐만 아니라 정수압 응력(hydrostatic pressure)도 파단을 지배하는 주요 원인으로 인식하였다는 점이다. 응력 삼축비는 정수압 응력과 등가 응력의 비로서, 재료의 파단 거동은 주로 응력 삼축비의 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

Choung (2007)은 다양한 조선 해양 구조물용 강재에 대한 재로실험과 수치해석을 통하여 이들 강재의 소성 특성 및 파단 특성을 통계적으로 제시한 바 있다. 즉 재료의 항복 함수로서 von Mises 모델, 연속체 손상 모델 및 기공률 소성 모델(porous plasticity model)을 이용하였고, 이에 상응하는 파단 조건으로서 등가 소성 변형률, 손상도 및 기공률을 각각 적용하여 기공률 소성 모델이 조선 해양 구조물용 강재의 소성 발전과 파단 예측에 적합하다고 제시하였다.

Table 1 Hardening and fracture criteria employed by authors in ICCGS 2004 , 2007 and 2010

Author	Hardening	Fracture criterion	Year
Konter	Piecewise isotropic	0.2	2004
Wu	Bilinear isotropic	0.35	2004
Simonsen	-	0.08, 0.26	2004
Zhang	Piecewise isotropic	0.1, 0.2	2004
Yamada	Bilinear isotropic	0.34 - 0.36	2004
Huatao	-	0.34	2004
Takaoka	Bilinear isotropic	0.2	2004
Vredeveldt	Bilinear isotropic	0.16	2004
Lehmann	-	0.05	2004
Okazawa	Piecewise isotropic	0.6 - 1.8	2004
Tornqvist	Piecewise isotropic	RTCL*	2004
Dimas	Bilinear isotropic	0.35	2004
Ehlers	-	0.54	2007
Tautz	-	0.1	2007
Cho	Bilinear isotropic	0.1	2007
Yamada	Piecewise isotropic	0.2 - 0.4	2007
Darie	Piecewise isotropic	-	2007
Hallquist	-	0.39, 0.66	2007
Cho	-	0.2	2007
Ehlers	-	0.1	2010
AbuBakar	Piecewise isotropic	0.35	2010
Hung	Bilinear isotropic	0.34	2010
Niklas	Piecewise isotropic	0.35	2010

주 *RTCL : Rice-Tracey and Cockcroft-Latham model

Choung and Cho (2008)는 판재의 인장 실험과 천공 실험 그리고 이에 대한 수치해석을 통하여 기공률 소성 모델이 구조물의 파단을 비교적 정확히 예측할 수 있음을 증명하기도 하였다. 그러나 기공률 소성 모델은 너무 많은 재료 상수를 요구하기 때문에 실선 또는 실제 해양 플랜트 설계에 적용하기에 매우 어려운 문제점을 가진다.

상기에 언급한 많은 파단 조건 중에서, 조선 해양 관련 분야 엔지니어와 가장 친숙하고, 공학적으로 직관적인 파단 조건은 파단 변형률을 이용하여 파단을 정의하는 전단 파단 조건이다. 재료 또는 구조물에서 발생한 등가 소성 변형률이 파단 변형률에 도달하였을 때 파단이 발생하는 조건이다.

따라서 본 논문에서는 정수압 응력과 등가 응력의 비 (σ_H/σ_{eq})를 전단 파단의 조건으로 하는 Johnson-Cook 파단 모델을 낙하충돌 파단실험 수치해석에 적용하여 Johnson-Cook 파단 모델의 적용성을 검증하고 Johnson-Cook 파단 모델에서 요구하는 재료상수를 수치해석을 통해 제시하고자 한다. 이를 위해 먼저 Johnson-Cook 파단 모델 재료상수에 대한 기존 연구를 조사하여 제시된 Johnson-Cook 파단 모델 재료상수를 기준으로 여러 차례 수치해석을 수행하여 DH36 강에 적절한 Johnson-Cook 파단 모델 재료상수를 구할 것이다.

2. Johnson-Cook 전단 파단모델 재료상수에 대한 기존 연구

Johnson and Cook (1985)은 식(1)과 같이 재료상수(d_1, d_2, d_3)와 응력 삼축비를 이용하여 파단 변형률을 정의 하였다. 여기서 η 는 응력 삼축비로 정수압 응력과 등가 응력의 비로서 재료의 파단 거동은 응력 삼축비의 영향을 받음을 의미한다.

$$\epsilon_f = d_1 + d_2 \exp(d_3 \eta) \tag{1}$$

$$\eta = - \frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \tag{2}$$

Tornqvist (2003)는 초기항복응력 348 MPa, 강도계수 850 MPa 그리고 소성 변형률 경화지수 0.2인 선박용 강재를 대상으로 인장실험 및 수치해석을 통하여 Johnson-Cook 전단 파단 모델의 재료상수를 구하였고 Choung, et al. (2011)은 EH36 강의 노치 인장시편 실험을 통해 Johnson-Cook 모델의 재료상수를 구하여 제시하였다. 제시된 재료상수를 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Material constant of Johnson-Cook failure model proposed by Tornqvist and Choung

Author	Material	d_1	d_2	d_3
Tornqvist	Unknown $\sigma_0 : 348 \text{ MPa}$	0.28	4.4	2.26
Choung	EH36	0.50	4.1	2.12

Fig. 1에서 알 수 있듯이 Tornqvist에의해 제안된 값은 전단 파단 변형률이 0.29에 접근하고, Choung의 값은 0.5에 접근 하고 있다. 이와 같은 차이는 재료가 다르기 때문인 것으로 판단 된다. Fig. 1로부터 낮은 응력 삼축비 상태 (즉, 정수압 응력이 낮은 상태) 에서는 재료 및 구조물이 파단을 경험하기 위해서는 상당히 큰 변형률 상태가 되어야 하고 반대로 응력 삼축비가 큰 상태에서는 낮은 변형률에서도 파단이 일어날 수 있다는 것을 알 수 있다.

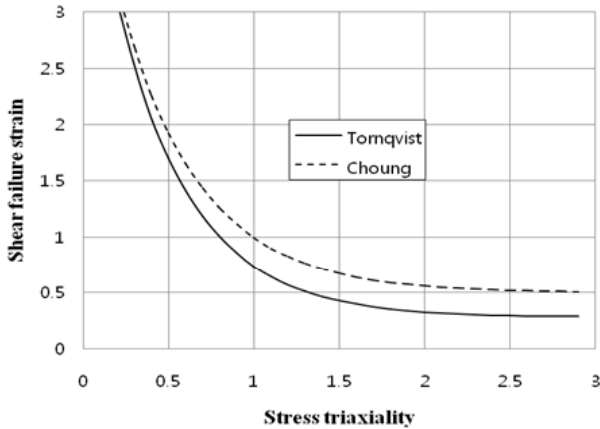


Fig. 1 Failure strain and stress triaxiality curves indicated by using material constants of Johnson-Cook model proposed by Tornqvist and Choung

3. 낙하충돌 파단실험

3.1 실험모델의 형상 및 치수

실험모델 제작을 위해 960mm x 357mm 선급인증 DH36 강판 6장을 준비하였다. 강판의 화학적성분은 Table 3에 나타내었고 실험모델의 형상과 치수는 Fig. 2와 같다. 모델의 중앙점에서 오른쪽으로 10mm 지점에 반경 15mm 노치의 중심점이 위치하도록 하였다. 낙하 충돌체의 낙하지점이 정 중앙에서 오른쪽으로 약 10mm~15mm 정도 떨어져 있다는 사실은 이전의 유사실험으로부터 확인되었기 때문에 불가피한 조치였다. 실험모델은 상온실험용 3개, 저온 실험용 3개로 총 6개를 제작하였다. 실험모델의 구분 및 실험 전 예측된 모델의 치수를 Table 4에 나타내었다. 모델 이름 중 첫 번째 한정자는 실험온도와 실험순서를 의미하고 두 번째 한정자는 준비된 판의 번호이다. 즉 RT1-4는 상온에서 첫 번째로 실험이 수행된 모델이고 준비된 6개의 판 중에서 4번 판에서 절단되어 제작된 모델임을 의미한다. 제작된 6개의 실험 모델 중에서 RT1-4의 50mm 깊이의 보강재 가스절단 시 과도한 열 영향으로 심하게 휘변형이 발생하여 모델제작 정도를 맞출 수 없어 보강재를 유압자기로 역지로 취부하고 상부 판과 보강재의 과도한 틈을 용접비드로 육성하여 제작하는 등 제공된 도면대로 제작된 모델로 간주하기 어려워 RT1-4 모델은 실험 테스트 모델로 선정하고 결과에 대한 평가에서는 제외하였다. 실험 전 수치

해석을 수행하여 파단을 유발할 것으로 예상되는 충돌체의 낙하 높이를 1.2m로 정하였다. 충돌체는 knife edge type striker로 총 중량이 440kg이 되도록 하였다.

Table 3 Chemical composition of DH36 steels (%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.18	0.50	1.06	0.04	0.04	0.3	0.04	0.2	0.08

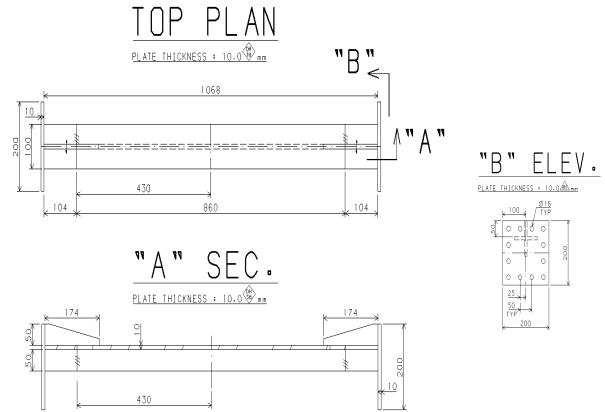


Fig. 2 Drawing of test model

Table 4 As-measured dimensions of test models before the drop test(unit: mm)

Test model	Upper plate thickness	Stiffener thickness
RT1-4	10.00	10.01
RT2-2	10.03	10.02
RT3-3	10.07	10.05
LT1-3	10.02	10.03
LT2-2	10.00	10.05
LT3-4	10.04	10.02

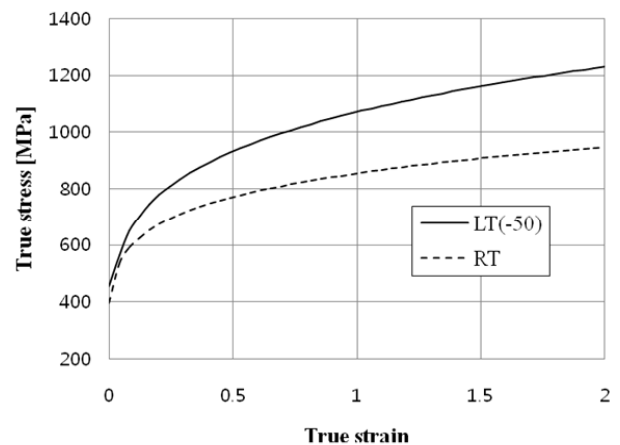


Fig. 3 Average true stress-true strain at room temperature and -50°C

실험모델 재료의 기계적 물성치를 확보하기 위해 모델의 모재

로부터 인장시편을 취하여 상온에서 인장실험을 실시하였다. 상온에서의 인장실험결과로부터 Min, et al. (2012)이 제안한 저온 소성경화 구성방정식을 이용하여 -50°C 에서의 평균 진응력-진변형률을 구하여 Fig. 3에 상온의 평균 진응력-진변형률과 함께 나타내었다.

3.2 낙하 충돌 파단실험결과

Fig. 4는 각 실험 모델의 충돌 후 노치상부에서의 크랙의 형상을 보여주고 있다. RT1-4 모델은 모델 제작상 문제가 있었어 실험 전 수치해석에서 예측한 파단을 발생시키는 충돌체의 낙하 높이 확정을 위한 테스트 모델로만 사용하고 실험결과의 평가에서 제외하였다.

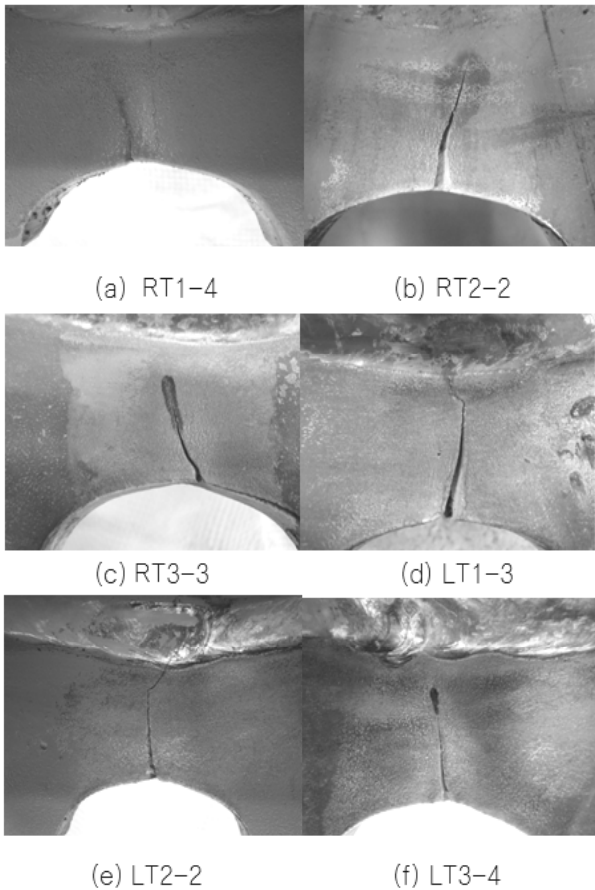


Fig. 4 Closeup photography of cracks for test models

또한 모델 LT3-4는 실험도중 실험모델에 부착된 4개의 온도 센서 중에서 3개의 센서가 작동하지 않아서 남은 1개의 온도센서에 의존하여 실험을 진행하였으나 결론적으로 측정이 이루어진 1개의 온도센서가 정확한 온도를 감지하였다는 확신을 할 수 없는 상황이었다. 따라서 LT3-4 모델은 실패한 실험으로 간주하였다. Table 5에 반경 15mm의 노치 상단에서 수직으로 크랙길이를 계측하여 나타내었다. 상온에서는 평균적으로 약 22.0mm, 저온(-50°C)에서는 용접선이 위치한 30mm 근방까지 크랙이 발생

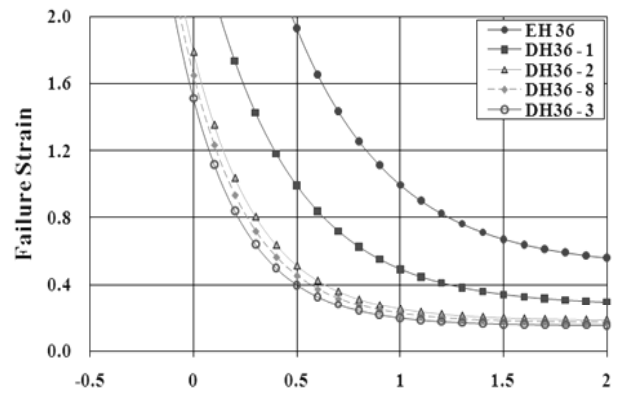
하였다. RT2-2 와 RT3-3 모델간에 크랙길이의 차이는 낙하 충돌체의 낙하 위치의 차이로 인해 발생된 것으로 판단된다. 실험 종료 후 실험모델에 충돌 흔적을 면밀히 조사해본 결과 각 모델 간에 충돌체의 낙하지점이 1mm ~ 2mm 정도의 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

Table 5 Crack length from the upper end of round notch

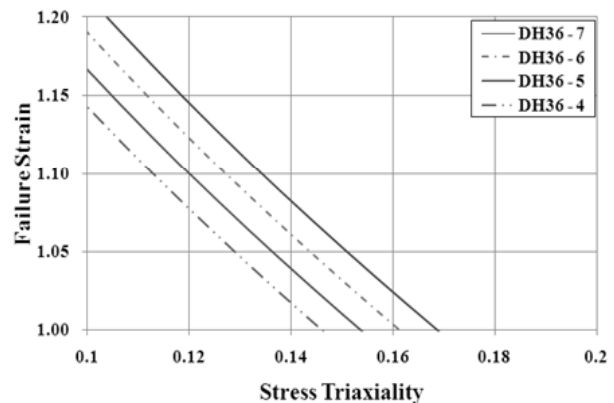
Model	Crack length(mm)
RT1-4	14.0
RT2-2	24.5
RT3-3	20.0
LT1-3	30.0
LT2-2	30.0
LT3-4	22.0

4. 낙하 충돌 파단실험 수치해석

수치해석은 상용 프로그램인 ABAQUS/Explicit을 이용하였다. 파단 모델은 Johnson-Cook 파단 모델을 적용하였다. 피충돌체 (Single frame)는 ABAQUS에서 지원하는 S4R요소로 정의하였고, 충돌체(Striker)는 강체로 가정하였으므로 Rigid요소인 R3D4로 정의하였다.



(a) Failure strain and stress triaxiality



(b) Magnification between strain 0.1 and strain 0.2

Fig. 5 Failure strain and stress triaxiality curves drifted left downward at room temperature

Johnson-Cook 파단 모델에서 요구하는 재료상수를 구하기 위해 Choung, et al. (2011)이 제시한 EH36 강 재료상수를 기준으로 여러 차례 수치해석을 수행하였다. Min, et al. (2010)이 수행한 DH/EH36 강재의 인장실험 결과로부터 DH36 강에 비해 EH36 강의 진 파단변형률이 훨씬 높다는 점을 감안해 볼 때, Fig. 1에서 점선으로 나타낸 곡선이 좌 하방향으로 이동할 것으로 예상되어 Fig. 1에서 최대 응력 삼축비 및 최대 파단 변형률을 기준으로 여러 차례 좌 하방향으로 이동시킨 후 곡선 적합을 통하여 각각의 d_1, d_2, d_3 를 구하였다. Fig. 5와 Fig. 6에 이들 곡선들을 나타냈고 각 곡선의 곡선 적합 결과를 Table 6에 보여 주었다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 문헌조사로 얻은 EH36 강의 d_1, d_2, d_3 로 형성된 곡선의 좌표 값을 처음에 45% 좌 하방향으로 이동시킨 후 d_1, d_2, d_3 를 곡선 적합하여 구하여 이를 Johnson-Cook 전단 파단모델의 재료상수로 적용하여 수치해석을 수행해본 결과 파단이 발생하지 않았다. 다음 단계로 Fig. 5의 DH36-1 곡선을 다시 16% 정도 이동하고 이후로 약 1.8% 더 이동하여 DH36-3 곡선을 구한 다음 곡선 DH36-2와 곡선 DH36-3 사이에서 미세 조정하여 상온실험에서 보여준 크랙 길이와 일치하는 수치해석 결과를 보여주는 곡선 DH36-8을 구하였다. 이와 동일한 방법으로 저온에서의 Johnson-Cook 전단 파단 모델의 재료상수를 Fig. 6의 DH36-8과 같이 구하였고 이들 최종 결과를 Table 6과 Fig. 7에 나타내었다.

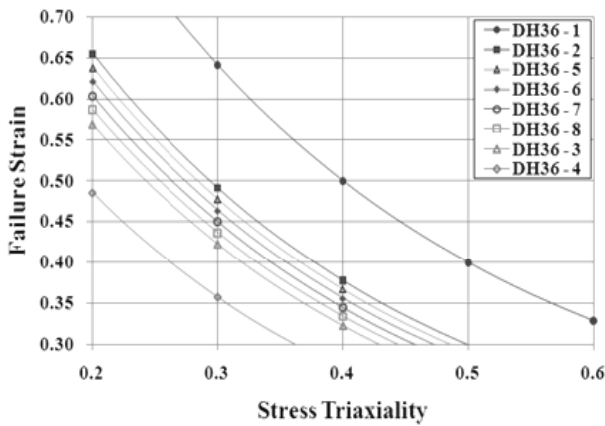


Fig. 6 Failure strain and stress triaxiality curves drifted left downward at low temperature

Table 6 Material parameter d_1, d_2, d_3 of Johnson-Cook shear failure model for DH36 steel

Temperature(°C)	d_1	d_2	d_3
Room temperature	0.169	1.484	3.292
-50°C	0.111	1.015	3.791

Table 6에 보여준 Johnson-Cook 전단 파단모델의 재료상수를 적용하여 수행한 저온 및 상온에서의 수치해석 결과를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타내었다. 해석결과에 의하면 Table 6과 Fig.

7에 제시된 Johnson-Cook 전단 파단 모델의 재료상수를 사용할 경우 낙하 충돌 파단실험의 크랙길이와 거의 일치하는 것으로 나타났다.

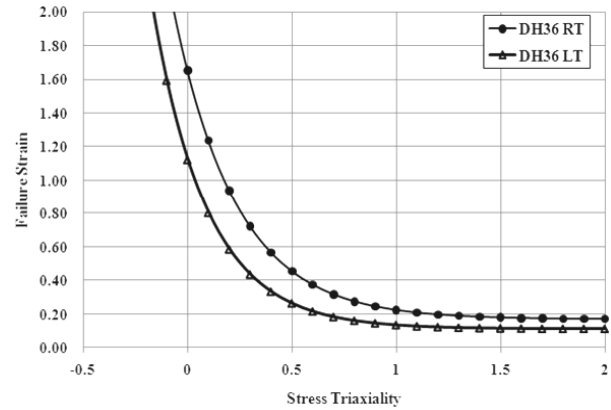


Fig. 7 Shear failure strain - stress triaxiality curve for Johnson-Cook shear failure model of DH36 steel

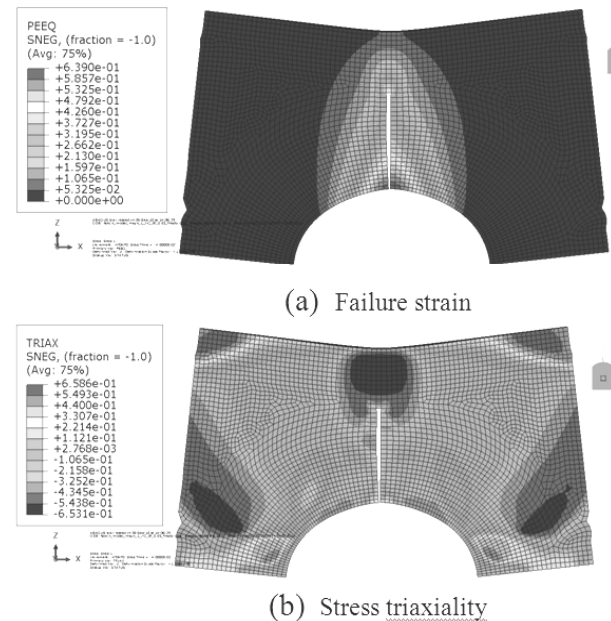


Fig. 8 Numerical analysis results for the drop fracture experiment at room temperature

5. 결론

대부분의 국내외 연구는 전단 파단 조건(shear fracture criterion)에 근거하기 때문에 파단의 기준 물리량으로서 등가 소성 변형률을 이용하고 있음을 알 수 있다. 전단 파단은 구조물에서 발생한 등가 소성 변형률이 파단 변형률에 도달했을 때 파단이 발생하는 조건을 가진다. 파단 변형률을 상수로 적용한다면, 전단 파단 조건은 기하학적인 형상에 따른 정수압 응력의 발달을 고려한 파단 조건을 제시하지 못한다. 이러한 이유로 동일한 재료임에도 구조물의 형상에 따라 매우 상이한 파단 변형률을 사용

하고 있는 것이다.

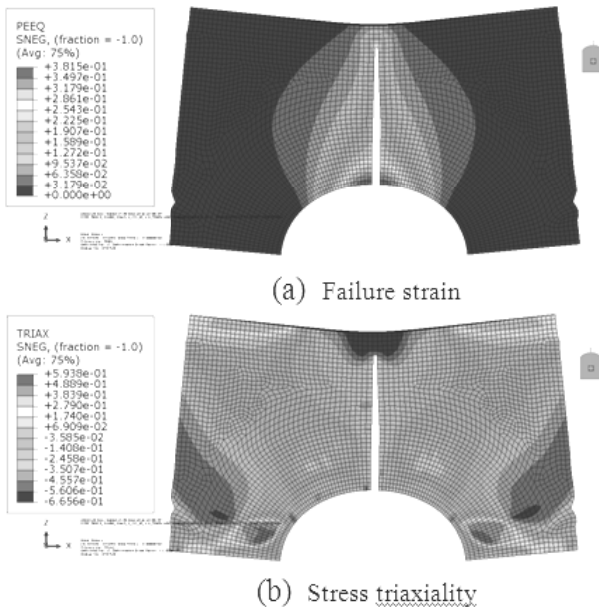


Fig. 9 Numerical analysis results for the drop fracture experiment at low temperature(-50°C)

따라서 본 논문에서는 정수압 응력과 등가 응력의 비를 전단 파단의 조건으로 하는 Johnson-Cook 파단 모델을 낙하 충돌 파 단실험 수치해석에 적용하여 Johnson-Cook 파단 모델에서 요구 하는 재료상수를 제시하였다. 제시된 재료상수를 적용한 Johnson-Cook 파단모델이 낙하 충돌 파단실험 결과 나타난 구 조물의 크랙을 거의 정확히 재현하였다. 따라서 제시된 DH36 강 의 파단 정의를 위한 응력 삼축비와 파단 변형률 관계는 적절한 것으로 판명되었다. 이로써 향후에는 DH36 강으로 구성된 구조 물의 파단 예측에 제시된 Johnson-Cook 재료상수와 이를 근거 로 작성된 파단 변형률-응력 삼축비 곡선이 유용하게 활용될 것 으로 기대한다.

상온 및 저온에서의 낙하 충돌 파단실험과 수치해석 결과로부 터 저온에서 충격하중에 대한 빙해선박 구조물의 충격에너지 흡 수 능력이 떨어진다는 사실을 확인하였다. 따라서 빙해선박의 사 고한계상태(Accidental Limit State)설계 관점에서 파단 예측 시 빙해선박용 강재의 저온 파단 특성이 고려된 파단 모델을 반드시 사용해야 한다. 그렇지 않고 기존의 연구들과 같이 상온으로 가 정한 파단 예측의 경우 빙해선박 및 해양구조물의 파단 특성을 과대평가하는 오류를 범할 수 있다.

참 고 문 헌

Choung, J.M. & Cho, S-R, 2008. Study on true stress correction from tensile test. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 22(6), pp.1039~1051.

Choung, J.M. Shim, C.S. & Kim, K.S., 2011. Plasticity and Fracture Behaviors of a Marine Structural Steel, Part II: Technical Backgrounds of Fracture. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 25(2), pp.92-100.

Choung, J.M., 2007. *On the Fracture Criteria of Steels for Marine Structures Subjected to Impact Loadings*. Ph.D. University of Ulsan.

Johnson, G.R. & Cook, W.H., 1985. Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strain, Strain Rates Temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*, 21(1), pp.31-48.

Lehmann, E. & Yu, X., 1998. On Ductile Rupture Criteria for Structural Tear in case of Ship Collision and Grounding. *7th International Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units*, pp.149-156.

Min, D-K, Shim, C.S. & Cho, S-R, 2010. On the Mechanical Properties at Low Temperature for Steels of Ice-Class Vessels. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(2), pp.171-177.

Min, D-K, Heo, Y-M & Cho, S-R, 2012. Low Temperature Plastic Hardening Constitutive Equation for Steels of Polar Class Vessels. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(3), pp.227-231.

Tornqvist, R., 2003. *Design of Crashworthy Ship Structures*. Ph.D. Technical University of Denmark.

Urban, J. 2003. *Crushing and Fracture of Lightweight Structures*. Ph.D. Technical University of Denmark.



민 덕 기

조 상 래