

## 미시역학 소성모델을 이용한 충격하중을 받는 보강판의 파단 예측

정준모<sup>†\*</sup>, 조상래<sup>\*\*</sup>, 김경수<sup>\*</sup>

인하대학교 선박해양공학과<sup>\*</sup>  
울산대학교 조선해양공학부<sup>\*\*</sup>

### Fracture Estimation of Stiffened Plates under Impact Loading using Micromechanics Plasticity Model

Joonmo Choung<sup>†\*</sup>, Sang-Rai Cho<sup>\*\*</sup> and Kyung Su Kim<sup>\*</sup>

Dep' t of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University<sup>\*</sup>  
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan<sup>\*\*</sup>

#### Abstract

This paper first reviews the physical meanings and the expressions of two representative strain rate models: CSM (Cowper-Symonds Model) and JCM (Johnson-Cook Model). Since it is known that the CSM and the JCM are suitable for low-intermediate and intermediate-high rate ranges, many studies regarding marine accidents such as ship collision/grounding and explosion in FPSO have employed the CSM. A formula to predict the material constant of the CSM is introduced from literature survey. Numerical simulations with two different material constitutive equations, classical metal plasticity model based on von Mises yield function and micromechanical porous plasticity model based on Gurson yield function, have been carried out for the stiffened plates under impact loading. Simulation results coincide with experimental results better when using the porous plasticity model.

※Keywords: Stiffened plate(보강판); Impact test(충돌 실험); von Mises yield function; Gurson yield function; Equivalent plastic strain(등가 소성변형률); Void volume fraction(기공률); Strain rate(변형률 속도).

---

접수일: 2009년 1월 22일, 승인일: 2009년 10월 19일

†교신저자: jmchoung@inha.ac.kr, 032-860-7346

## 1. 서론

최종강도 한계상태(ULS, Ultimate Limit State) 또는 사고 한계상태(ALS, Accidental Limit State)에 대한 정량적인 파손 확률을 예측하기 위해서, 파단을 포함하는 재료의 소성 특성 파악이 필수적이다. 구조물용 강재의 소성 특성은 준정적 특성과 동적 특성으로 분류되며, 전자의 경우 통상 준정적 인장실험 또는 밀시트(Mill sheet)를 통하여 얻을 수 있는 초기 항복 강도, 공칭 인장강도, 파단 연신률 등을 의미한다.

선박해양구조물용 강재의 경우 변형을 경화(Strain hardening 또는 Work hardening)가 비교적 우수한 것으로 알려져 있으며, Choung(2008)의 연구 결과에 의하면 일부 API 강재 및 선급 강재의 소성변형을 경화 지수(Plastic strain hardening exponent)는 신뢰성 지수(Reliability index)가 2.0 수준에서 0.2 이상으로 제시되었다. 따라서 초기 항복 강도나 공칭 인장 강도 등의 데이터를 가지고 최종강도 한계 상태 또는 사고 한계 상태에 대한 구조물의 저항 능력을 정확히 예측하기 어렵다. 강재의 동적 소성 특성은 주로 변형률 속도에 따른 소성변형을 경화를 의미한다. 선박해양구조물용 강재의 경우, 동적 소성 특성에 대한 연구를 찾아보기 어렵다. Nemat-Nasser and Guo (2003)는 고장력강(DH36)에 대하여 상온 및 고온에서 변형률 속도에 따른 동적 재료 실험을 수행한 바 있다. 이 연구결과에 의하면 고장력강의 경우 변형률 속도에 따른 소성 경화는 상당히 작은 것으로 제시되었다.

Lehmann and Yu (1998)는 연속체 손상 역학(CDM, Continuum Damage Mechanics)을 응용한 파단 지표(Rupture index)를 파단 기준으로 제시한 바 있으며, 이는 조선해양분야에서 미시역학을 파단에 응용한 첫 번째 사례로 인정된다. Urban (2003)과 Törnqvist (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 제시

한 바 있다. 이들 연구 결과의 공통점은 편차 응력(즉 등가 소성 변형률) 뿐만 아니라 정수압 응력도 파단을 지배하는 주요 원인으로 인식하였다는 점이다. Choung et al. (2007)과 Choung(2009a)는 다양한 선박 및 해양구조물용 강재에 대한 재료 시험과 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), 이에 상응하는 파단 조건으로서 등가 소성 변형률, 손상도 및 기공률을 각각 적용하여 기공률 소성 모델이 선박해양구조물용 강재의 소성발전과 파단예측에 적합하다고 제시하였다.

Choung and Cho(2008)와 Choung(2009b)는 판재의 인장실험과 천공실험 그리고 이에 대한 수치해석을 통하여 기공률 소성모델이 구조물의 파단을 비교적 정확히 예측할 수 있음을 증명하였다.

본 연구의 근본 목적은 동적인 파단문제에 기공률 소성 모델을 적용하여 그 유효성을 검증하는 것이다. 이를 위하여 우선적으로 변형률 속도에 대한 두가지 대표적인 구성 방정식 즉 Cowper and Symonds(1957) 모델(CSM)과 Johnson and Cook(1985) 모델(JCM)의 이론적 배경을 간단히 기술한다. Lee and Kim (2007)에 의하여 제시된 CSM 재료상수 추정식에 대하여 기술한다. 최종적으로 Cho and Lee (2009)에 의하여 실시되었던 보강판 충돌 실험 데이터를 토대로 수치해석을 실시하여 동적 파단 문제에서 기공률 소성 모델의 유효성을 검증할 것이다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 변형률 속도 구성방정식

약 1/s 이하의 변형률 속도는 통상 저변형률 속도로 간주되어 준정적 문제로 취급된다. 즉 구조부재 전체가 외력에 대한 힘의 평형을 이루고 관성을 무시할 수 있다. 또한 저변형률 속도에서는 열로 소산되는 소성 변형 에너지가 거의 없으므로 통상 등온상태로 취급된다. 중변형률 속도는 보통

1/s - 1000/s 사이의 변형률 속도를 의미하며 이 구간에서는 내력과 외력의 불균형으로 인한 관성력과 응력파의 영향이 상당히 증가한다. 소성변형에 의하여 발생한 열이 주위로 전파할 시간이 충분하지 않기 때문에 일부의 열이 부재의 온도를 상승시킨다. 재료가 1000/s 이상의 고변형률 속도로 변형하면 주로 응력파가 부재의 변형에 영향을 미치게 되며, 빠른 변형으로 인하여 부재에서 발생된 열이 전도될 시간을 가지지 못하여 단열상태로 간주된다. 따라서 소성변형에 의하여 발생된 열의 대부분이 부재의 온도상승에 기여한다.

변형률 속도에 대한 구성방정식은 소성변형으로 인한 온도와 밀접한 관련이 있으며, 많은 연구자들이 적절한 가정을 도입하여 재료의 소성영역에서의 변형률 속도와 온도에 대한 의존성에 초점을 맞추어서 연구를 진행해왔다. 대표적인 변형률 속도 구성방정식인 CSM 과 JCM 은 모두 변형률 속도의 변화에 따른 동적 항복응력을 정적 항복응력의 동적 계수(DHF, Dynamic Hardening Factor)로서 근사한 경우이며 각각 저-중변형률 속도와 중-고변형률 속도에 적합한 것으로 알려져 있다. 정적 항복응력  $\sigma_Y^s(\epsilon^P)$  으로부터 동적 항복응력  $\sigma_Y^d(\epsilon^P, \dot{\epsilon}^P)$  을 결정하는 DHF 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서

- $\epsilon^P$  : 소성 변형률
- $\dot{\epsilon}^P$  : 소성 변형률 속도

CSM 에서 동적계수는 식(2)와 같이 표현된다. 여기서  $D_{CS}$  와  $q_{CS}$  는 CSM 재료상수이다. 최종적인 CSM 은 식(3)과 같이 표현되며 식(3)에서 종속변수를 변형률 속도로 나타내면 식(4)와 같이 표현된다. 식(4)로부터, 재료상수  $D_{CS}$  는 동적 유동응력이 정적 유동응력의 2 배가 되는 변형률 속도를 알 수 있다.

$$DHF(\dot{\epsilon}^P) = \left[ 1 + \left( \dot{\epsilon}^P / D_{CS} \right)^{q_{CS}} \right] \quad (2)$$

$$\sigma_Y^d = \sigma_Y^s \left[ 1 + \left( \dot{\epsilon}^P / D_{CS} \right)^{q_{CS}} \right] \quad (3)$$

$$\dot{\epsilon}^P = D_{CS} \left[ \left( \frac{\sigma_Y^d}{\sigma_Y^s} \right) - 1 \right]^{q_{CS}} \quad (4)$$

JCM 을 이해하기 위해서는 Johnson-Cook 정적 소성 경화 모델을 우선적으로 이해해야 한다. 식(5)와 같이 Johnson-Cook 정적 경화 모델은 기본적으로 소성변형률 경화항과 온도 연화항으로 구성된다. 이때 요구되는 재료상수는 Ludwik 모델로 나타내어지는  $A_{JC}$ ,  $B_{JC}$ ,  $n$  그리고 온도에 관련된  $m$  네가지이며 모두 재료의 천이온도  $T_{trans}$  (재료 내부에서 온도의 상승에 따른 항복응력의 저하가 발생하지 않는 최대 온도) 이하에서 계측된 값이어야 한다.  $T_{melt}$  는 재료의 용융온도를 의미한다. 또한 무차원온도  $T^*$  는 식(6)과 같이 정의된다. 여기서  $T$  는 재료의 현재온도 (Instantaneous temperature)를 의미한다.

$$\sigma_Y^s = \left( A_{JC} + B_{JC}(\epsilon^P)^n \right) \left( 1 - T^{*m} \right) \quad (5)$$

$$T^* = \begin{cases} 0.0 & \text{for } T < T_{trans} \\ \frac{T - T_{trans}}{T_{melt} - T_{trans}} & \text{for } T_{trans} \leq T \leq T_{melt} \\ 1.0 & \text{for } T > T_{melt} \end{cases} \quad (6)$$

JCM 에 있어서 동적계수는 식(7)과 같이 나타내어지며 식(1)과 식(5)를 이용하면 최종적으로 변형률 속도를 고려한 JCM 을 식(8)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $\dot{\epsilon}_{ref}$  (Reference strain rate)는 통상 1/s 로 간주한다.

$$DHF(\dot{\epsilon}^P) = \left( 1 + C_{JC} \ln \frac{\dot{\epsilon}^P}{\dot{\epsilon}_{ref}} \right) \quad (7)$$

$$\sigma_Y^d = \left( A_{JC} + B_{JC}(\epsilon^P)^n \right) \left( 1 - T^{*m} \right) \left( 1 + C_{JC} \ln \frac{\dot{\epsilon}^P}{\dot{\epsilon}_{ref}} \right) \quad (8)$$

식(8)의 첫 번째 괄호는 재료의 소성 변형률로 인한 경화를, 두 번째 괄호는 열의 발생으로 인한 연화(Thermal softening)를, 마지막으로 세 번째 괄호는 소성 변형률 속도로 인한 경화를 나타내어

변형을 속도 경화와 열적 연화를 동시에 나타낼 수 있는 장점이 있다. 그러나 재료의 온도가 용융 온도를 초과하면 경화 이력이 완전히 무시되므로, 통상 등방성(Isotropic) 또는 이동성(Kinematic) 경화 법칙을 같이 적용하기 어려운 단점이 있다.

CSM 의 경우 열 발생으로 인한 재료의 연화를 고려할 수 없기 때문에 고변형을 속도에는 적합하지 않은 것으로 알려져 있다. 반면에 연화항이 포함되지 않으므로서 재료의 각종 소성 구성 방정식에 곧장 이식이 가능하다. 예를 들어 LS-Dyna 또는 Abaqus/Explicit 같은 상용유한요소 코드에서 제공하는 전단 파단 모델, 연속체 손상역학 모델, 기공률 소성 모델 등은 CSM 을 기본적으로 채택하고 있다.

2.2 변형을 속도 재료상수 추정식

최근 자동차 또는 항공 분야에 있어서 재료의 동적 물성에 대한 관심이 높아지고 구조물의 충격하중에 대한 거동을 파악하기 위하여 많은 연구자가 동적 물성 실험을 수행하여 왔다. 반면 조선 분야에서 선박해양구조물용 강재에 대한 동적 재료 실험 데이터는 거의 얻을 수 없는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 충돌해석과 관련하여 재료의 동적 재료특성에 관한 연구가 가장 활발하게 진행되고 있는 자동차분야에서 수행되었던 실험데이터를 문헌들에서 발췌 정리하였다.

Lee and Kim (2007)는 자동차의 충돌 시 통상적인 변형을 속도 범위(0.003/s-200/s)에서 17종의 차체용 냉연강판에 대한 동적 재료 데이터를 확보하였다. 그리고 이들 강재에 대하여 변형을 속도에 따른 초기 항복강도의 변화를 관찰하여 CSM 재료 상수를 도출한 바 있다. 식(9) 및 Fig. 1은 초기 항복응력과 재료상수  $D_{CS}$ 의 관계를 나타내고 있다. 재료의 준정적 초기항복응력( $\sigma_0$ )이 증가할수록 변형을 속도에 둔감해지는 것을 확인할 수 있다. 즉 고강력 강재의 경우 변형을 속도에 따른 경화가 거의 없는 것으로 나타났다.

$$D_{CS} = \begin{cases} 92000 \times \exp\left(\frac{\sigma_0}{364\text{MPa}}\right) - 193779 & \text{for } \sigma_0 > 271\text{MPa} \\ 40 & \text{for } \sigma_0 \leq 271\text{MPa} \end{cases} \quad (9)$$

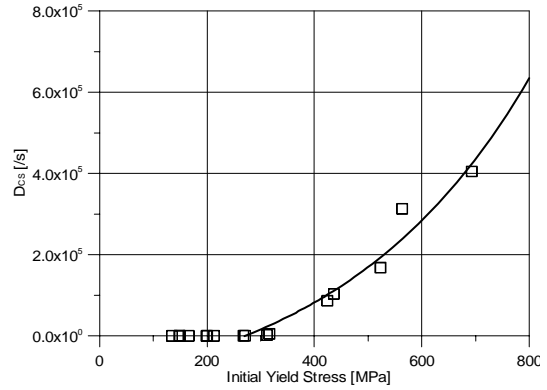


Fig. 1 Material constant estimation curve of CSM (Lee and Kim 2007)

2.3 기공률 소성 모델

미시역학(Micromechanics)적 관점에서 재료의 소성변형은 재료 내부에 존재하는 마이크로/나노 수준의 미소한 개재물(Inclusions) 또는 2 차상(2<sup>nd</sup> phase particles)이 강재(Steel matrix)로부터 박리(Debonding)되어 기공(Void)이 생성(Nucleation) 및 성장(Growth)하는 현상을 의미하며, 파단은 성장한 기공들이 서로 병합(Coalescence)하는 현상을 의미한다. 기공률 소성 모델은 연속체 재료 내부에 별도의 기공 등을 묘사하지 않고 내부적으로 손상의 발전을 거시적 관점으로 표현할 수 있는 장점이 있다.

기공률 소성 모델은 Gurson (1977)에 의하여 최초로 제안되었는데, 항복함수  $\Phi$ 는 von Mises 항복함수에 정수응력으로 인한 항복면(Yield surface)을 축소시킬 수 있는 종속항이 존재한다. Gurson 항복함수는 Tvergaard (1981)와 Needleman and Tvergaard (1984)에 의하여 수정되어 GTN 모델(Gurson-Tvergaard-Needleman model)모델로도 불리며, 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.  $f^*$ 는 유효 기공률로서 식(11)과 같다.

$$\Phi = \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_Y}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{3}{2} \frac{q_2 \sigma_H}{\sigma_Y}\right) - [1 + q_3 f^{*2}] \quad (10)$$

$$f^* = \begin{cases} f & \text{for } f \leq f_c \\ f_c + \frac{f_u - f_c}{f_f - f_c} (f - f_c) & \text{for } f > f_c \end{cases} \quad (11)$$

$$f_u = \frac{q_1 + \sqrt{q_1^2 - q_3}}{q_3} \quad (12)$$

여기서

- $\sigma_{eq}$  : von Mises 등가 응력
- $\sigma_Y$  : 항복 응력
- $\sigma_H$  : 정수압 응력
- $q_1, q_2, q_3$  : 재료 상수
- $f$  : 기공률
- $f_c$  : 임계 기공률
- $f_f$  : 파단 기공률
- $f_u$  : 최종 기공률

기공률은 성장 기공률( $f_G$ )과 생성 기공률( $f_N$ )의 합으로서, 기공률 속도  $\dot{f}$  는 식(13)과 같이 기공률 성장속도와 생성속도의 합으로 표현된다. Needleman and Tvergaard (1984)는 생성된 기공의 성장속도를 식(15)로 나타내었으며, Chu and Needleman (1980)은 계수 A 를 식(16)과 같이 제안하였다.

$$\dot{f} = \dot{f}_G + \dot{f}_N \quad (13)$$

$$\dot{f}_G = (1-f)\dot{\epsilon}_{ij}^p \delta_{ij} \quad (14)$$

$$\dot{f}_N = A\dot{\epsilon}_{eq}^p \quad (15)$$

$$A = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\dot{\epsilon}_{eq}^p - \epsilon_N}{S_N} \right)^2 \right] \quad (16)$$

여기서

- $\dot{\epsilon}_{eq}^p$  : 등가 소성 변형률
- $\epsilon_N$  : 정규분포로 나타낸 생성 기공률 평균
- $S_N$  : 정규분포로 나타낸 생성 기공률 표준편차

### 3. 보강판 충돌 실험

#### 3.1 실험 개요

Cho and Lee (2009)는 33 개의 보강판을 대상으로 횡 충돌실험을 실시하고 소성 한지선 이론

(Plastic hinge line theory)을 이용하여 손상을 추정하는 바 있다. 이때 250kgf 이상의 충돌체(Striker)를 진자 운동시키므로써 충돌을 구현하였다. 충돌 실험을 위한 장치는 Fig. 2 에 보인 바와 같이 충돌체(중량물), 진자지지 기둥, 진자 높이 조정대로 구성되었다. Fig. 3 에 나타낸 보강판을 150mm×150mm×10/8mm H 형에 볼트로 고정하였다.

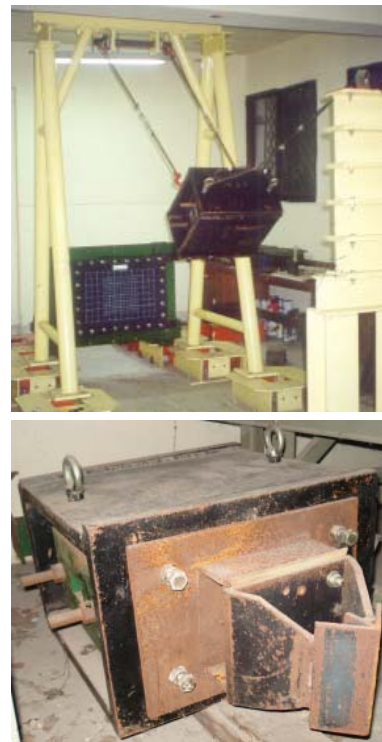


Fig. 2 A photo of pendulum type collision testing machine (Cho and Lee 2004)

보강판이 제작된 모재로부터 판형 인장시편을 채취하여 초기 항복응력을 계측하였으나, 기타 소성데이터는 별도로 계측되지 않았다. 33 개의 보강판 시편 중에서 이상적인 정면 충돌과 편심 충돌이 발생한 CS3 및 CS6 을 대상으로 수치해석을 수행하였다. Table 1 은 수치해석을 위하여 필요한 CS6 및 CS3 의 기하학적 형상과 재료데이터를 나타낸다.

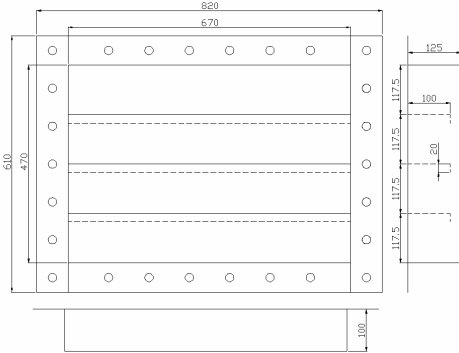


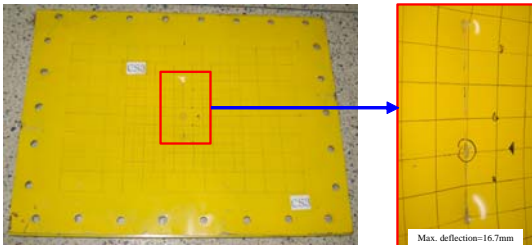
Fig. 3 Geometry of stiffened plate

Table 1 Geometric and material properties and collision test results

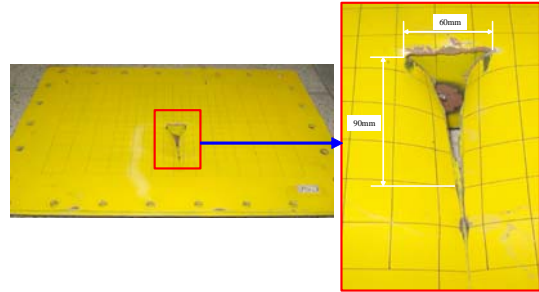
Stiffened plate			
	Plate[mm]	Stiffener[mm]	$\sigma_0$ [MPa]
CS3	670×470×1.87	100×20×1.87	295.5
CS6	670×470×1.87	100×20×1.87	297.6
Striker			
	Mass[ton]	Velocity[mm/s]	Energy[J]
CS3	0.4148	2330	1126
CS6	0.5148	2520	1635

3.2 실험 결과

Fig. 4(a)는 CS3 에 대한 충돌실험 사진을 보여 주고 있다. 중앙 보강재를 중심으로 정면 충돌이 발생하였기 때문에 파단은 발생하지 않았으며 최대 변위는 약 16.6 mm 정도로 예측되었다. Fig. 4(b)는 CS6 에 대한 충돌실험 사진을 보여주고 있다. 보강재 사이에서 충돌이 발생했으며, 종방향(보강재 방향)으로 약 60mm, 횡방향으로 90mm 정도 찢김이 발생하였다.



(a) CS3



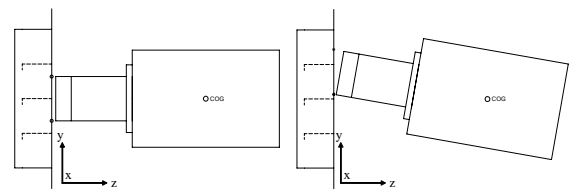
(b) CS6

Fig. 4 Deformed shape after striking

4. 보강판 충돌 수치해석

4.1 모델과 시나리오

보강판 충돌 실험에 있어서, Fig. 2 에 보인 바와 같이 충돌체는 날카로운 웨지 형상이기 때문에 충돌부위 요소의 크기를 두께수준(2.0mm×2.0mm)로서 매우 상세하게 분할하였다. Fig. 5 는 CS3 및 CS6 에 대한 충돌 각도를 나타낸다. 보강판의 경계조건으로서, 보강판과 지지대가 고정되는 부분 즉 Fig. 3 에서 670mm×470mm 의 외곽부를 완전 구속하였다. 충돌체는 완전강체로 가정하였으며, 충돌체의 질량 및 초기 속도는 Table 1 에 나타낸 값을 적용하였다. 이때 충돌체의 무게중심에 질량요소를 배치하여 전체 질량을 보정하였으며 충돌체의 무게중심에서 회전 질량 관성모멘트(Rotary inertia)는 Table 2 와 같이 결정하였다.



(a) CS3

(b) CS6

Fig. 5 Schematics for collision simulations

Table 2 Applied rotary inertia [ ton·mm<sup>2</sup> ]

$I_{xx}$	$I_{yy}$	$I_{zz}$
21450	15400	15400

Table 3 에 나타난 바와 같이 재료의 탄성계수는 공칭값 206GPa을 적용하였고 CS3 및 CS6 에서의 초기 항복 응력은 큰 차이가 없으므로 공히 295.5MPa 을 적용하였다. 충돌실험 재료에 대한 변형을 경화특성이 계측되지 않았다. 따라서 참고 문헌(Choung, 2008)에 따르면 소성 변형을 경화지수(n)는 연강의 경우에도 통상 20%이상이므로, 0.2 로 가정하였다. 그리고 식(17)에 보인 바와 같은 Swift 경화법칙을 이용하여 재료의 항복응력을 적용하였다. Fig. 6 은 수치해석에 최종적으로 적용된 등가 진응력-로그 진변형을 곡선을 나타낸다.

$$\sigma_Y^s = \sigma_0 \left( 1 + \frac{\epsilon^p}{\epsilon_0} \right)^n \quad (17)$$

여기서

$\epsilon_0$  : 초기 항복 변형률(=  $\sigma_0/E$ )

Table 3 Applied mechanical properties

E	$\sigma_0$	n
206 GPa	295.5 MPa	0.2

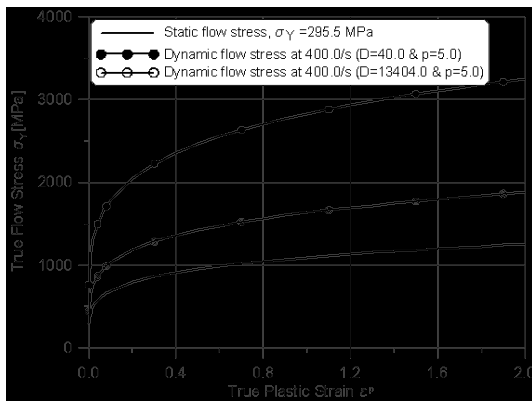


Fig. 6 Equivalent true stress-true strain data applied to FE model

충돌실험에 적용되었던 강재는 일반적인 연강이므로, Choung and Cho (2008)와 Choung(2009b)에 의하여 확인된 기공률 소성 모델 재료상수를 적용하였다(Table 4 참조).

Table 4 Identified material constants

$q_1$	$q_2$	$q_3$	$f_0$	$f_f$	$f_c$	$\epsilon_N$	$f_N$	$s_N$
1.50	1.00	2.25	0.00	0.06	0.05	0.30	0.05	0.1

일반적인 연강의 경우 통상적인  $D_{CS}$  는 40/s 을 적용하며, 식(9)에 의한  $D_{CS}$  는 약 13,404/s 이므로 두가지 경우를 모두 시나리오로 설정하였다. 구조물에 발생한 소성변형을 속도가 약 400/s 일 경우 준정적 유동응력이 각각 경화되는 정도를 Fig. 6 에 비교하여 나타내었다.  $q_{CS}$  에 의한 동적 항복응력의 변동은 심하지 않으므로 통상적인 5.0 을 적용하였다. Table 5 는 해석 시나리오 요약표이며 Fig. 7 은 수치해석 모델을 나타낸다. 실제 충돌문제에서 전단파단 모델을 적용할 경우 발생하는 문제점을 확인하기 위하여, 연강에 대하여 통상 적용하는 20% 파단 변형률을 적용한 시나리오도 동시에 준비하였다(NTSI 2004).

Table 5 Scenarios for impact simulations

Scenarios	Strain Rate [/s]	Yield function
CS3-D00-GUR	$D_{CS} = 13404, q_{CS} = 5$	Gurson
CS3-D40-GUR	$D_{CS} = 40, q_{CS} = 5$	Gurson
CS3-D00-MIS	$D_{CS} = 13404, q_{CS} = 5$	Mises
CS3-D40-MIS	$D_{CS} = 40, q_{CS} = 5$	Mises
CS6-D00-GUR	$D_{CS} = 13404, q_{CS} = 5$	Gurson
CS6-D40-GUR	$D_{CS} = 40, q_{CS} = 5$	Gurson
CS6-D00-MIS	$D_{CS} = 13404, q_{CS} = 5$	Mises
CS6-D40-MIS	$D_{CS} = 40, q_{CS} = 5$	Mises

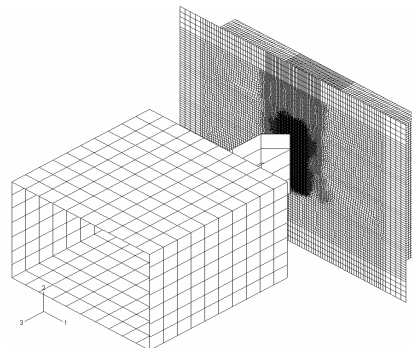


Fig. 7 FE model for numerical analyses

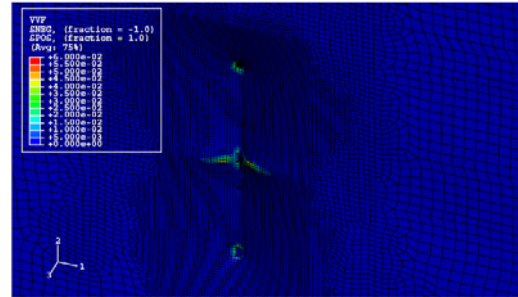
4.2 수치해석 결과 : 변형도 분석

Fig. 4 (a)에 보인 바와 같이 정면 충돌한 CS3의 경우 실제 파단이 발생하지 않았다. Fig. 7에 보인 바와 같이 CS3-D00-MIS를 제외한 나머지 경우는 실험 결과와 유사한 변형양상을 보여 주었다. Fig. 4 (b)에 보인 바와 같이 편심 충돌한 CS6의 경우 판재의 찢김이 60mm×90mm 정도 발생하였다. Fig. 8에 보인 바와 같이 CS6-D40-GUR 및 CS6-D00-MIS의 경우 손상의 범위를 과소 또는 과대 평가하고 있음을 확인할 수 있다. Table 6에 수치해석 결과로부터 얻은 찢김량을 정리하였다. 결론적으로 실험결과와 가장 유사한 수치해석 시나리오는 CS6-D00-GUR과 CS6-D40-MIS로 나타났다.

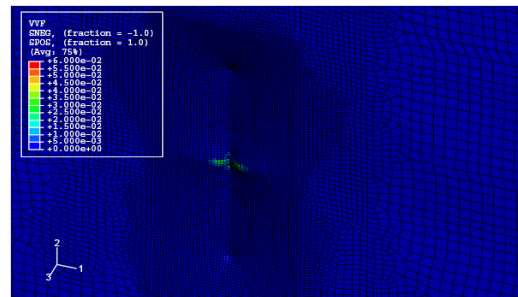
식(9)에 의하면 CS3 및 CS6에 사용된 강재는 변형을 속도에 민감하지 않기 때문에 다음과 같은 결론을 추론할 수 있다. CS6-D40-MIS의 경우 실제 강재의 변형을 속도 효과가 크지 않지만, 매우 변형을 속도 경화를 과대 평가한 후 상당히 보수적인 20% 파단 변형률을 적용하여 서로의 효과가 상쇄되어 실험 결과와 일치하는 것처럼 보였을 것이다. 반면에 CS6-D00-GUR의 경우 실제 강재와 같이 변형을 속도의 효과 작게 간주하고 실질적인 파단 기공률을 적용하여 실험 결과와 물리적으로 일치하였을 가능성이 크다.

Table 5 Tearing lengths for CS6

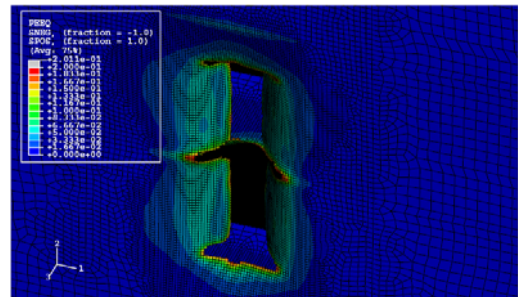
Scenarios	Parallel to wedge	Normal to wedge
Experiment	90.0mm	60.0mm
CS6-D00-GUR	129.1mm	63.3mm
CS6-D40-GUR	56.2mm	35.4mm
CS6-D00-MIS	161.5mm	90.6mm
CS6-D40-MIS	127.2mm	60.9mm



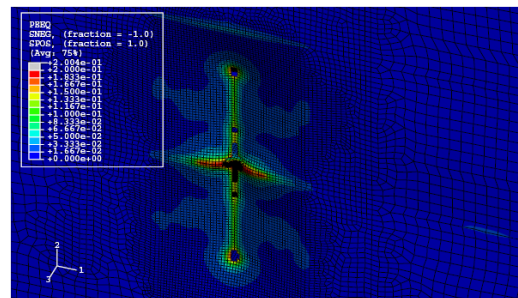
(a) CS3-D00-GUR



(b) CS3-D40-GUR



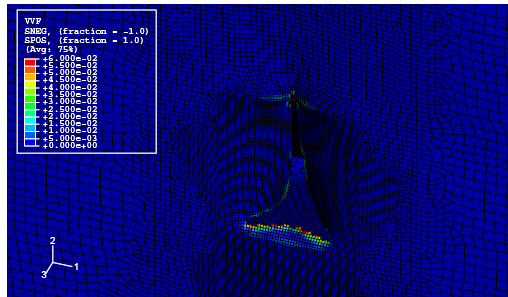
(c) CS3-D00-MIS



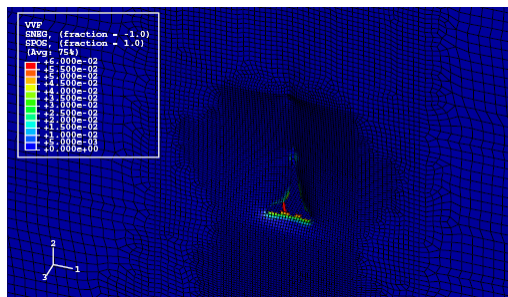
(d) CS3-D40-MIS

Fig. 8 Comparison of deformed shapes for CS3

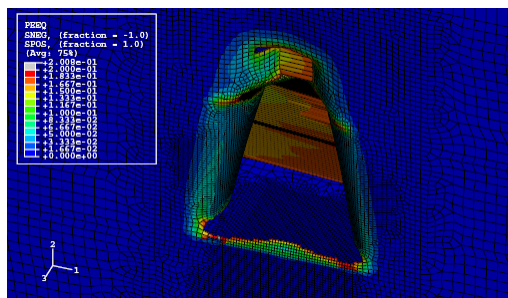




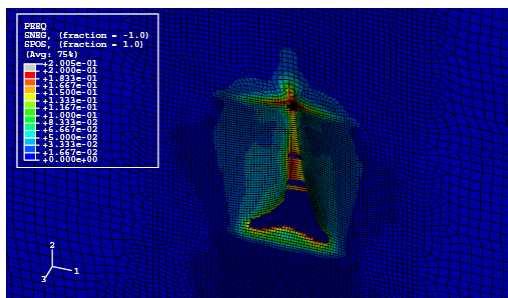
(a) CS6-D00-GUR



(b) CS6-D40-GUR



(c) CS6-D00-MIS



(d) CS6-D40-MIS

Fig. 9 Comparison of deformed shapes for CS6

### 4.3 수치해석 결과 : 변형률 속도 분석

본 논문에서는 첫번째 충돌이 발생한 지점에서의 시간에 따른 변형률 속도 이력을 Fig. 10에 나타내었다. 이때 매우 빠른 변형률 속도 전파를 고려하여 본 논문에서는 1.0E-5 초 단위로 데이터를 샘플링하였다.

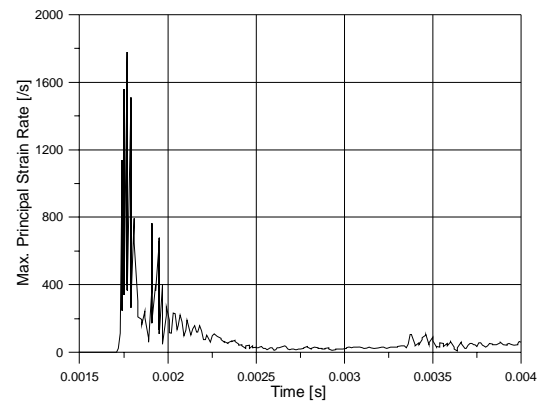


Fig. 10 Comparison of strain rate histories for CS6

최대 변형률 속도가 약 1,800/s 정도까지 발생함을 확인할 수 있다. 그러나 식(9)에 의하면 본 재료의 변형률 속도는 13,404/s 이 되어야 동적 항복 응력이 정적 항복 응력의 2 배가 되기 때문에 1,800/s 정도의 변형률 속도가 항복응력의 경화를 크게 발생시키지는 않은 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 논문에서는 충격하중을 받는 보강판의 수치해석에 앞서 변형률 속도의 물리적 의미와 이론적 배경에 대하여 설명하였다. 또한 현재 널리 사용되고 있는 CSM 과 JCM 의 변형률 속도 구성방정식의 용도에 대하여 고찰하였다.

Cho and Lee(2009)에 의하여 실시되었던 보강판의 충돌실험 데이터를 사용하여 보강판 충돌에 대한 수치해석을 실시하였다. 수치해석의 소성 구성 방정식으로서 가장 널리 사용되는 von Mises 항복 모델 및 기공률 소성 모델을 적용하였고, 이

에 상응하는 파단 기준으로서 등가 소성 변형을 및 기공률을 각각 적용하였다. CSM 재료 상수는 연강에 대하여 일반적인 값과 Lee and Kim (2007)이 제시한 재료상수 추정식을 이용한 값을 각각 적용하였다. Choung and Cho (2008)와 Choung(2009b)에 의하여 확인된 기공률 소성 모델 재료상수를 적용하여 수치해석을 수행하였다.

Von Mises 항복 모델을 사용하여 수치해석을 수행한 결과 20% 파단 변형률은 재료의 파단을 과대하게 모사하지만, 과도한 변형을 경화를 고려할 경우 서로의 효과가 상쇄되어 실제와 유사하게 보임을 확인 하였다. 반면에 기공률 소성 모델을 적용한 결과 실제 강재와 같이 변형을 속도의 효과를 작게 간주하였음에도 불구하고 물리적으로 타당한 파단 기공률을 적용함으로써 실험 결과와 잘 일치하는 결과를 도출하였다.

## 후 기

본 연구 논문은 인하대학교 및 울산대학교 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- Cho, S.R. and Lee, H.S., 2009, "Experimental and Analytical Investigations on the Response of Stiffened Plates Subjected to Lateral Collisions," *Marine Structures*, 22, pp. 84-95.
- Choung, J.M., 2008, On the Fracture Criteria of Steels for Marine Structures Subjected to Impact Loadings, Ph.D Thesis, University of Ulsan.
- Choung, J.M., 2009a, "Comparative Studies of Fracture Models for Marine Structural Steels," *Ocean Engineering*, 36, pp. 1164-1174.
- Choung, J.M., 2009b, "Micromechanical Damage Modeling and Simulation of Punch Test," *Ocean Engineering*, 36, pp. 1158-1163.
- Choung, J.M. and Cho, S.R., 2008, "Experimental and Theoretical Investigations on the Fracture Criteria for Structural Steels," *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 45, No. 2, pp.157-167.
- Choung, J.M., Cho, S.R. and Yoon, K.Y., 2007, "On Comparative Studies of Fracture Models for Shipbuilding and Offshore Structural Steels," *Proceedings of Fourth International Conference on Collision and Grounding of Ships(ICCGS 2007)*, pp. 177-185.
- Chu, C. and Needleman, A., 1980, "Void Nucleation Effects in Biaxially Stretched Sheets," *J. Eng. Matl. Tech.*, 102, pp. 249-256.
- Cowper, G. and Symonds, P., 1957, Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Loading of Cantilever Beams, Brown Univ. Applied Mathematics Report, Report No. 28.
- Gurson, A., 1977, "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth:Part 1 -Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media," *ASME J. Eng. Mat. and Tech.*, 99, pp. 2-15.
- Johnson, G.R. and 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.
- Lee, H.J. and Kim, B.J., 2007, "A Study on the Application of Material Properties in Ship Collision Analysis," *Proceedings of the Annual Autumn Meeting SNAK*, pp. 1050-1057
- Lehmann, E. and Yu, X., 1998, "On Ductile Rupture Criteria for Structural Tear in the Case of Ship Collision and Grounding," *Seventh International Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units*, pp. 149-156.
- Needleman, A. and Tvergaard, V., 1984, "An Analysis of Ductile Rupture in Notched Bars," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 32, pp. 461-490.

- Nemat-Nasser, S. and Guo, W.G., 2003, "Thermomechanical Response of DH-36 Structural Steel over a Wide Range of Strain Rates and Temperature," *Mech. Mat.*, 35, pp. 1023-1047.
- Norwegian Technology Standard Institution (NTSI), 2004, NORSOK Standard N-004 Design of Steel Structures.
- Tvergaard, V., 1981, "Influence of Voids on Shear Band Instabilities under Plane Strain Condition," *Int. J. Fract. Mech.*, 17, pp. 389-407.
- Tvergaard, V. and Needleman, A., 1984, "Analysis of the Cup-Cone Fracture in a Round Tensile Bar," *Acta Metallurgica*, 32, pp. 157-169.
- Törnqvist, R., 2003, Design of Crashworthy Ship Structures, Technical University of Denmark, Ph.D Thesis.
- Urban, J., 2003, Crushing and Fracture of Lightweight Structures, Technical University of Denmark, Ph.D Thesis.



< 정 준 모 > < 조 상 래 > < 김 경 수 >