

## 유한요소 손상 해석을 이용한 다중 관통균열 인장시편의 연성 파괴 시뮬레이션

전준영<sup>\*†</sup> · 김낙현<sup>\*</sup> · 오창식<sup>\*</sup> · 김윤재<sup>\*</sup>

\* 고려대학교 기계공학부

### Ductile Failure Simulation of Tensile Plates with Multiple Through-Wall Cracks Based on Damage Mechanics

Jeon Jun Young<sup>\*†</sup>, Nak-Hyun Kim<sup>\*</sup>, Chang-Sik Oh and Yun-Jae Kim<sup>\*</sup>

\* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.

(Received December 13, 2010; Revised December 21, 2011; Accepted December 22, 2011)

**Key Words** : Multiple Crack(다중 균열), Damage Mechanics(손상 누적 기법), Ductile Failure(연성 파괴)

**초록:** 본 연구는 간단한 수치해석적 방법을 통해 연성재료의 파괴를 예측하는 방법을 소개하였다. 응력에 의해 계산된 파괴 변형률을 통해 손상을 계산하는 과정을 다중 관통균열이 있는 평판 인장시편의 유한요소 해석을 통해 구현하였다. 이 기법은 ABAQUS 에서 제공하는 user-defined subroutine 을 이용하여 구현되었다. 제시된 기법을 적용하여 다중균열 해석을 수행하였고 이 결과를 일본 연구자에 의해 수행된 실험 결과와 비교하였다. 해석결과와 실험결과가 비교적 잘 일치함을 확인하였고 이를 통해 제시된 기법의 타당성을 검증할 수 있었다.

**Abstract:** This paper proposes a simple numerical method, based on the stress-modified fracture strain-damage model with the stress-reduction technique, for predicting the failure behaviors of ductile plates with multiple through-wall cracks. This technique is implemented using the user-defined subroutines provided in ABAQUS. For validation, the results simulated using the proposed method are compared with published experimental data of Japanese researchers.

- 기호설명 -

$\varepsilon_{ef}$  : 파괴 변형률  
 $\varepsilon_p$  : 소성 변형률  
 $\Delta\omega$  : 손상  
 $\sum\omega$  : 손상 누적량  
 $\sigma_m / \sigma_e$  : 삼축 응력  
 $\sigma_m$  : 정수압 응력  
 $\sigma_e$  : 등가 응력

열은 중요한 관심 대상이다. 이러한 균열 중에는 한 개가 아닌 여러 개가 생성되어 서로 상호 작용을 하며 성장해 가는 경우가 있는데 이를 다중 균열이라 한다.

균열 성장으로 인한 구조물의 파괴를 예측하는 것은 안전도 평가에 있어서 필수적이다. 그러나 다중 균열은 균열 간의 상호 작용이 매우 복잡하다. 두 개 이상의 균열이 진전하는 도중 서로 합쳐진 후 파괴가 발생하기도 하고, 서로 합쳐지지 않고 계속해서 진전하여 파괴에 이르기도 한다. 각 경우에 대한 구조물의 최대 지지 하중은 다르다. 때문에 다중 균열이 있는 구조물의 평가 기준을 세우는 데에는 어려움이 있다.

실험에 의한 다중 균열 자료는 매우 제한적이다. 실제로 발생할 수 있는 구조물 내 다중 균열은 균열의 길이, 방향, 위치 및 하중의 형태 등이 매우 다양하다. 그에 반해 실험으로 평가할 수 있는 균열의 경우의 수는 한정되어 있다. 또한 실험을 통해 다중

### 1. 서 론

발전소 내부의 여러 형태의 하중을 받는 구조물들의 평가에 있어서 응력 부식에 의해 생성된 균

† Corresponding Author, [karn2000@korea.ac.kr](mailto:karn2000@korea.ac.kr)

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

균열 거동을 평가하기 위해서는 많은 비용이 필요하다. 따라서 유한요소 해석을 통해 많은 경우에 대한 다중 균열의 거동을 평가하는 것이 필요하다.

지금까지 많은 연구자들에 의해 균열의 거동을 해석적으로 평가하는 방법이 개발되어 왔다. 연속체 역학적 개념에 기반하여, 다중 균열이 있는 연성 재료의 한계 하중을 예측하는 방법이 있다. 그러나 이러한 방법으로는 균열의 성장과 합체를 모사할 수 없기 때문에 실제에 비해 높은 하중값, 즉 비보수적인 예측을 하게 된다. 근접한 두 균열 사이의 리가먼트(ligament)에 대한 국부적 응력-변형률을 기반으로 하여 균열 거동을 평가하는 방법도 있다. 그러나 균열 형상과 하중모드(mode I, mode II 또는 mixed mode)의 다양성 때문에 위의 방법들 역시 충분하지 못하다. 또한 평가를 통해 균열 합체 하중을 예측하여도 이를 통해 구조물의 전체적인 붕괴를 예측할 수 없다. Gurson-Tvegaard-Needleman(GTN) 모델<sup>(1-3)</sup>과 같은 손상 모델들을 적용한 유한요소 해석은 다중 균열이 있는 구조물의 소성 붕괴를 예측하는데 사용될 수 있다. 그러나 현존하는 손상 모델은 많은 변수를 포함하므로 계산이 복잡하다. 또한 각 하중 모드에 대한 일반적인 적용의 가능성에도 여전히 의문이 남아있다. 따라서 다중 균열이 있는 구조물의 파괴 및 거동을 좀더 간단하고 효과적으로 평가할 수 있는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 간단한 수치 해석적 방법을 통해 관통 다중 균열이 있는 평판 인장시험편의 균열 거동을 예측해 보았다. 이 방법은 손상 누적의 개념을 기반으로 하는 유한요소 해석법이다. 몇 가지 다중 균열 형상에 대한 실험 결과와 유한요소 해석 결과를 비교함으로써 제시된 방법의 타당성을 검토하였다.

## 2. 연성 파괴

연성 파괴의 과정은 크게 나누어 공극의 생성, 성장, 합체로 설명할 수 있다. 초기 재료의 불순물 혹은 계재물 등으로부터 공극은 생성 되어진다. 생성된 공극은 소성 변형률과 정수압 응력에 의해 성장을 하게 된다. 공극의 크기가 커지면서 주변 공극들 사이에서 국부적인 변형과 넥킹이 발생하게 되고, 마침내는 성장한 공극과 부근 공극들이 합체를 하며 연성 파괴가 되는 것으로 설명될 수 있다.

공극의 성장과 합체에 관한 많은 수학적 모델이 제시되고 있으나, 이 중에서 가장 널리 참조되고

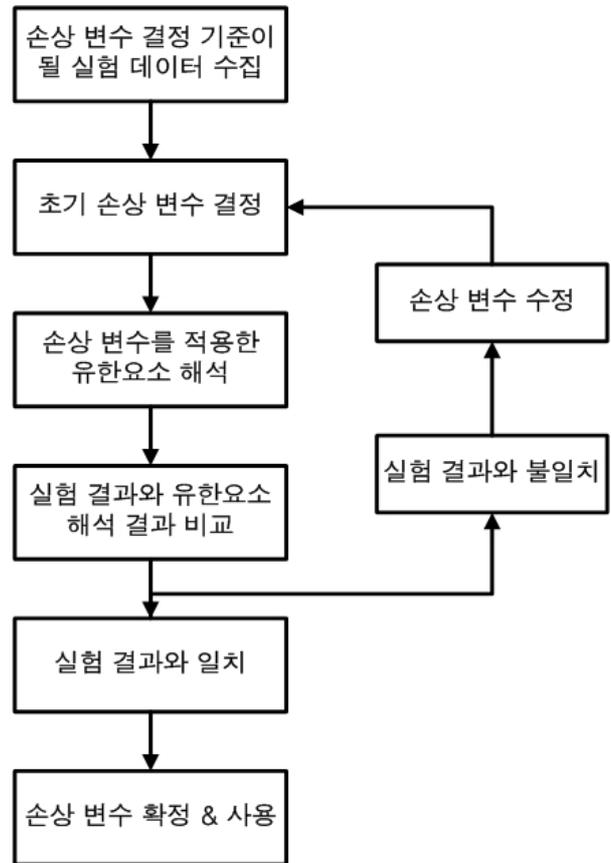


Fig. 1 Process of Gurson-Tvegaard-Needelman model

있는 것은 Gurson 이 제안한 모델 등이다. Fig. 1 은 Gurson 이 제시한 모델의 전체적인 과정을 보여준다. 그러나 이러한 모델들을 공통적으로 많은 변수를 필요로 하기 때문에 충분한 재료 데이터와 복잡한 계산 과정이 요구되기 때문에 비현실적인 경우가 많다. 또한 이러한 모델의 경우 mixed mode 에 대한 적용이 타당한지 여부에 대해서는 아직 의문이 남아있다.

## 3. 손상 누적 기법

### 3.1 손상 누적 기법의 개념

손상 누적 기법은 stress-modified fracture strain model 을 기반으로 한다. 여기서 ‘손상( $\Delta\omega$ )’ 이란 파괴 변형률에 대한 소성 변형률의 증분이다. 각 해석 단계의 응력 상태에 대한 손상값을 계산한 후 이를 누적시켜서 누적된 값( $\sum\omega$ )이 1 에 도달하게 되면 파괴가 발생된다고 판단한다. 따라서 파괴를 예측하기 위해서는 손상을 계산할 수 있어야 하며 이를 위해서는 각 단계의 응력 상태에 대한 파괴 변형률을 계산할 수 있어야 한다.

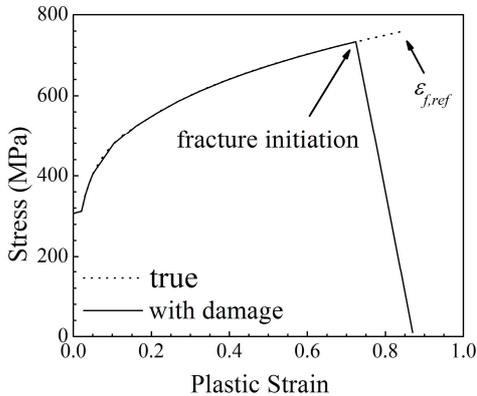


Fig. 2 Schematic illustration of ductile failure technique

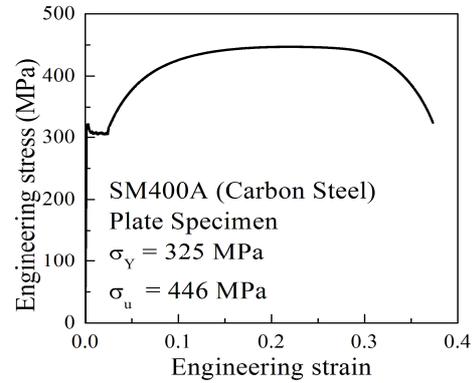


Fig. 3 Engineering stress-strain curves for JIS SM400A

$$\Delta\omega = \left( \frac{\Delta\varepsilon_p}{\varepsilon_{ef}} \right) \quad (1)$$

$$\sum\omega = \omega_0 + \Delta\omega \quad (2)$$

파괴 모사를 위해 해당 요소의 적분점 응력을 강제로 떨어뜨려준다. 이를 Fig. 2 에 나타내었다.

연성 파괴에서 파괴 변형률은 삼축 응력과 밀접한 관계가 있다고 알려져 있다.<sup>(4)</sup> 삼축 응력은 등가 응력( $\sigma_e$ )에 대한 정수압 응력( $\sigma_m$ )의 비로서 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\text{삼축 응력} = \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \quad (3)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (4)$$

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 \right]^{0.5} \quad (5)$$

여기서  $\sigma_i (i=1,2,3)$  는 주응력이다. 삼축 응력과 파괴 변형률은 아래 식과 같은 관계에 있다.

$$\varepsilon_{ef} \propto \exp\left(-\alpha \frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right) \quad (6)$$

식 (6)과 같은 형태의 파괴 변형률 기준을 정하

게 되면 삼축 응력을 통해 최종적으로 손상을 계산할 수 있게 된다.

#### 4. 실험

##### 4.1 재료 및 형상

손상 누적 기법을 적용하기 위해 일본 연구자들에 의해 수행되어진 실험 결과를 선택하였다.<sup>(5)</sup> 이 실험은 관통 균열이 두 개 이상 있는 평판에 대한 인장 실험 결과이다. 평판 재료는 JIS SM400A 이다. 시편 두께는 5.7 mm, 높이는 600 mm 이며 폭은 108 mm 와 180 mm 두 가지가 있다. 균열이 없는 평판 인장 실험에 의한 공칭 응력-공칭 변형률 그래프를 Fig. 3 에 나타내었다. 관통 균열의 개수 및 균열 위치에 따라 크게 4 가지로 분류할 수 있으며 총 31 가지 형상에 대해 수행되었다. 이를 Fig. 4 와 Table 1 에 정리하였다. 균열의 개수는 2 개와 3 개가 있으며 2 개의 경우 균열 길이가 6 mm~ 30 mm 까지 다양하며 두 균열간 위치에 따라 DN, DNW, DL, DLW 로 나뉘어진다. 균열 개수 3 개의 경우 가운데 균열의 길이는 30 mm 로 일정하며 양쪽 균열의 길이는 9 mm~39 mm 로 다양하다. 가운데 균열과 양쪽 균열간 위치에 따라 TOH 와 TSH 로 나뉘어지며 두 경우 모두 시편의 폭은 108 mm 로 일정하다.

##### 4.2 결과

실험에 의한 결과를 Fig. 5 와 Table 1 에 나타내었다. Fig. 5 는 실험을 통한 DLW, TSH, TOH 시편의 하중-하중점 변위 그래프이다. Table 1 에는 각 형상에 대한 최대하중을 표시하였다.

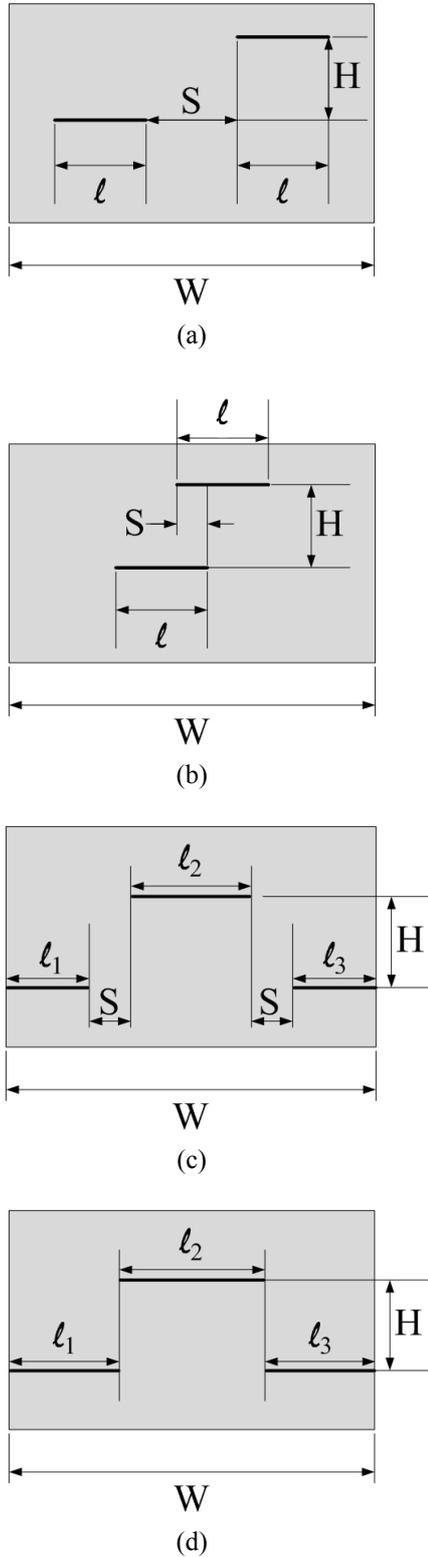


Fig. 4 Schematic illustrations of through-wall cracked plates: (a) Twin flaws-offset type, (b) Twin flaws-overlapped type, (c) Three flaws-offset type, and (d) Three flaws-adjusted type

Table 1 Summary of plate tensile tests with through-wall cracks

Test No.	Flaw Length, $\ell$ (mm)	W (mm)	H (mm)	S (mm)	$P_{max}$ (kN)
DN-01	10.0	108	12.4	0.0	243
DN-02	10.0	108	12.4	9.9	221
DN-03	10.0	108	12.4	19.5	220
DN-04	10.0	108	12.4	30.0	202
DN-05	10.0	108	6.4	0.0	216
DN-06	10.0	108	17.0	10.0	227
DN-07	10.0	108	22.0	10.0	232
DN-08	10.0	108	17.0	17.0	226
DN-09	10.0	108	22.0	22.0	227
DN-10	18.0	108	12.5	10.3	180
DN-11	6.0	108	12.5	20.0	243
DN-12	23.0	108	19.8	5.1	172
DNW-1	30.0	180	6.4	0.0	282
DNW-2	30.0	180	10.0	0.0	295
DNW-3	30.0	180	20.0	0.0	307
DNW-4	30.0	180	20.0	5.0	303
DL-14	20.0	108	5.0	10.0	182
DL-15	20.0	108	21.9	9.9	205
DLW-5	30.0	180	5.0	15.0	311
DLW-6	30.0	180	15.0	15.0	323

Test No.	$\ell_1, \ell_3$ (mm)	$\ell_2$ (mm)	W (mm)	H (mm)	S (mm)	$P_{max}$ (kN)
TSH-1	29.0	30.0	108	10.0	10.0	72
TSH-2	19.0	30.0	108	10.0	20.0	123
TSH-3	29.0	30.0	108	20.0	10.0	97
TSH-4	19.0	30.0	108	20.0	20.0	132
TSH-5	29.0	30.0	108	30.0	10.0	115
TSH-6	9.0	30.0	108	30.0	20.0	145
TOH-1	39.0	30.0	108	10.0	0.0	36
TOH-2	39.0	30.0	108	15.0	0.0	51
TOH-3	39.0	30.0	108	20.0	0.0	65
TOH-4	39.0	30.0	108	25.0	0.0	84
TOH-5	39.0	30.0	108	30.0	0.0	87

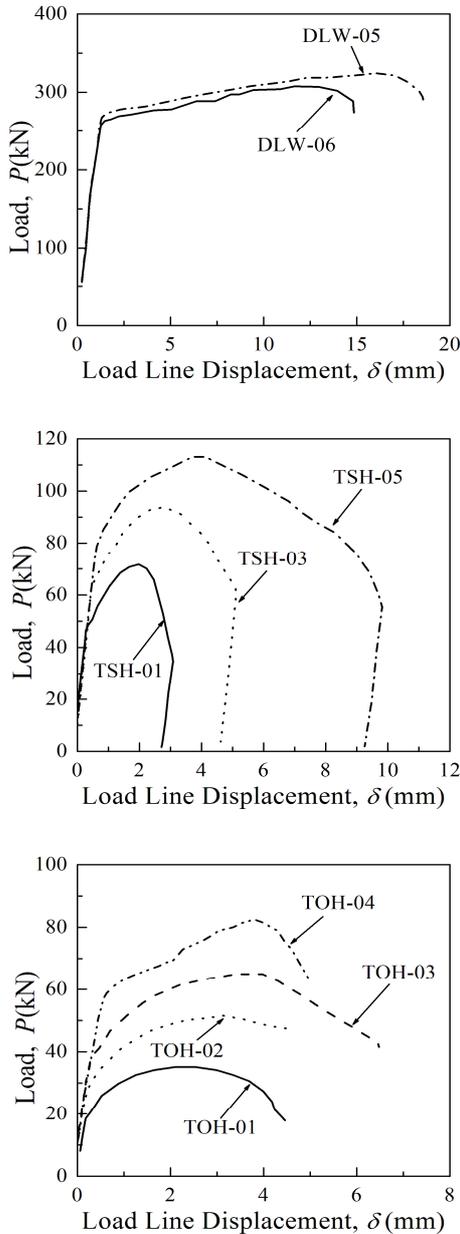


Fig. 5 Experimental load-displacement curves

## 5. 손상 누적 기법의 적용

### 5.1 파괴 변형률 기준 선정

본 연구에서는 손상 누적 기법 적용을 위한 파괴 변형률 기준을 세 가지로 생각해보았다. 실험에서 쓰인 시편 형상 중 몇 가지를 선정 한 후, 세 대안식들을 적용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 그리고 이 결과들 중 실험과 가장 잘 맞는 결과에 대한 식을 JIS SM400A 에 대한 파괴 변형률 기준으로 선정하게 되었다.

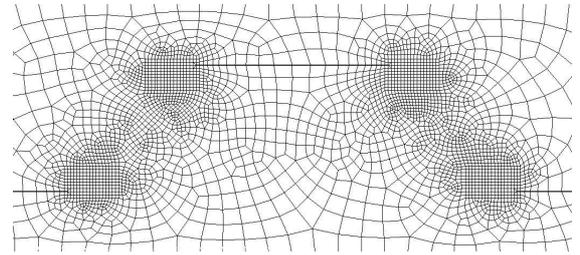


Fig. 6 FE meshes with the elements size of 0.5mm for a TSH specimen

대안식들은 Rice 와 Tracey 가 제시한 exponential 함수를 기반으로 선정하였다.<sup>(4)</sup>

$$\epsilon_{ef} = C_1 \cdot \exp\left(-\frac{3 \sigma_m}{2 \sigma_e}\right) \quad (7)$$

#### 5.1.1 파괴 변형률 기준 (1)

첫 번째 파괴 변형률 기준은 인장 시편 삼축응력의 이론적 계산에 의해 선정하였다. 인장 시편 삼축 응력의 이론적 계산 과정은 다음과 같다.

$$\epsilon_{ef} = C_1 \cdot \exp\left(-\frac{1}{2}\right) \quad (8)$$

$$C_1 = \frac{\epsilon_{ef}^*}{\exp(-0.5)} = \frac{0.84}{\exp(-0.5)} = 1.39 \quad (9)$$

식 (8)은 단축 인장시편의 경우 삼축응력이 1/3 임을 이용하였다. 또한 식 (9)에서  $\epsilon_{ef}^*$  값 0.84 는 JIS SM400A 의 인장 실험에서 구해진 진과파괴 변형률 값에 해당한다. 구해진  $C_1$  값을 대입한 첫 번째 파괴 변형률 기준식은 아래와 같다.

$$\epsilon_{ef} = 1.39 \exp\left(-\frac{3 \sigma_m}{2 \sigma_e}\right) \quad (10)$$

#### 5.1.2 파괴 변형률 기준 (2)

두 번째 파괴 변형률 기준은 Rice 와 Tracey 가 제시한 exponential 함수와 실험을 통해 구해진 노치가 없는 평판 시편 인장 결과를 통해 구해질 수 있다. 이를 통해 구해진 두 번째 파괴 변형률 기준은 아래와 같다.

$$\epsilon_{ef} = 2.687 \exp\left(-\frac{3 \sigma_m}{2 \sigma_e}\right) \quad (11)$$

#### 5.1.3 파괴 변형률 기준 (3)

세 번째 파괴 변형률 기준은 아래 식 (12)와 같

이 Rice 와 Tracey 가 제시한 함수에 상수  $C_2$  를 더 해준 형태이다.

$$\epsilon_f = C_1 \cdot \exp\left(-\frac{3 \sigma_m}{2 \sigma_e}\right) + C_2 \quad (12)$$

상수  $C_2$  는 이전에 수행되어진 연구에서 다른 재료에 대한 파괴 변형률 기준들이 공통으로 가지는 삼축응력-파괴 변형률 값을 기준으로 결정할 수 있었다. 이를 통해 구해진 세 번째 파괴 변형률 기준은 아래와 같다.

$$\epsilon_{ef} = 2.333 \exp\left(-\frac{3 \sigma_m}{2 \sigma_e}\right) + 0.15 \quad (13)$$

5.1.4 유한요소 해석 및 기준 선정

세 가지 파괴 변형률을 사용하여 손상해석을 수행한 후 결과를 비교하여 가장 타당한 기준식을 선정하였다.

유한요소 해석을 위해 ABAQUS 6.9v 을 사용하였다. 3 차원 8 절점 적분 1 차 요소(C3D8)를 사용하였으며 대변형 해석을 수행하였다. 두께 방향으로 대칭 조건이 성립하므로 해석 시간 단축을 위해 1/2 모델을 사용하였다. 시편 아래쪽 끝단을 고정하고

위 끝단에 변위를 부여하였다. 균열부와 균열 끝단의 요소 형상을 Fig. 6 에 나타내었다. 균열 진전

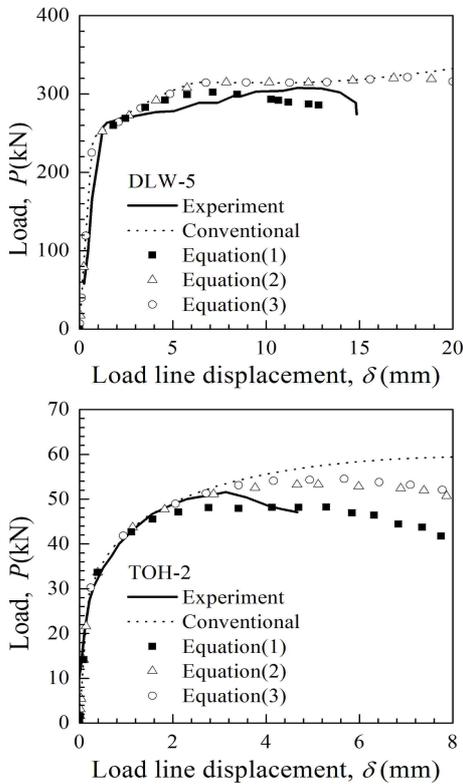


Fig. 7 Comparison of experimental load-displacement curves for selected specimens with simulated results by three other equations

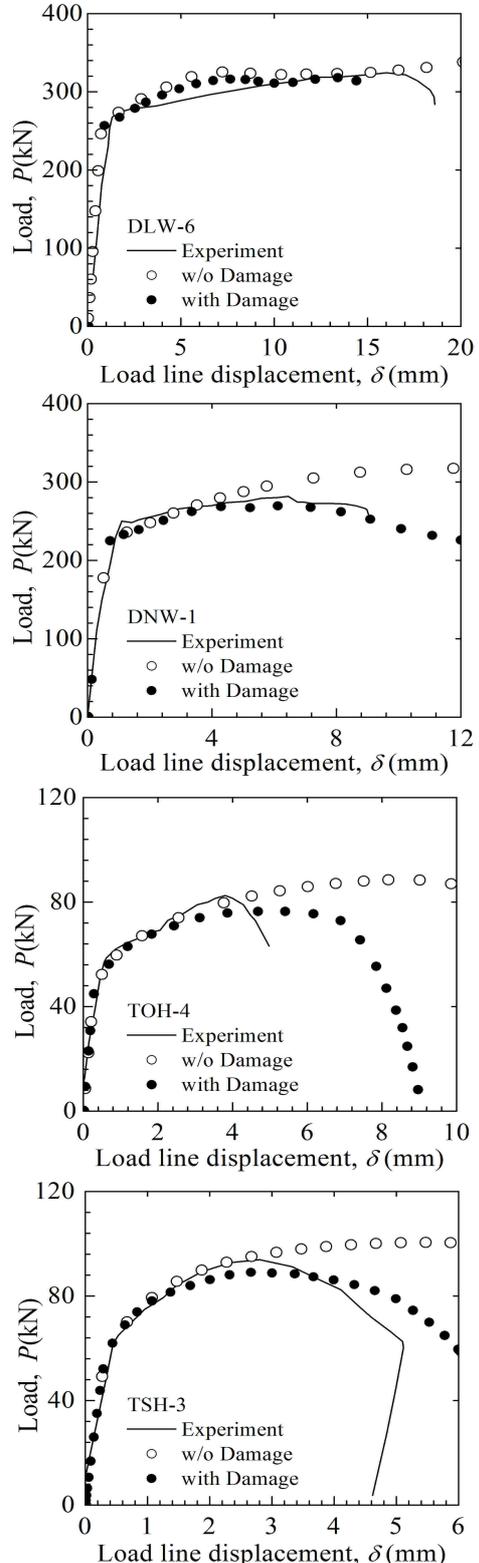


Fig. 8 Comparison of experimental load-displacement curves for selected JIS SM400A specimens with simulated ones

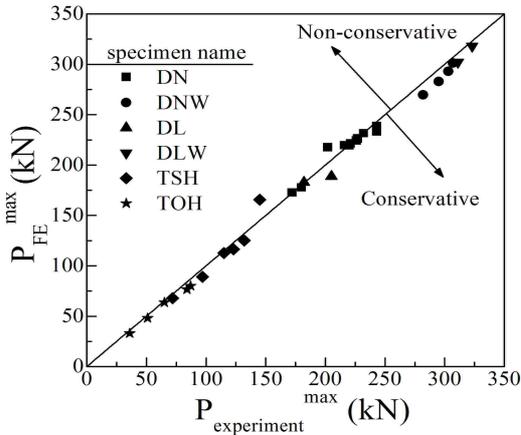


Fig. 9 Comparison of experimentally-measured maximum loads with simulated ones for JIS SM400A specimens

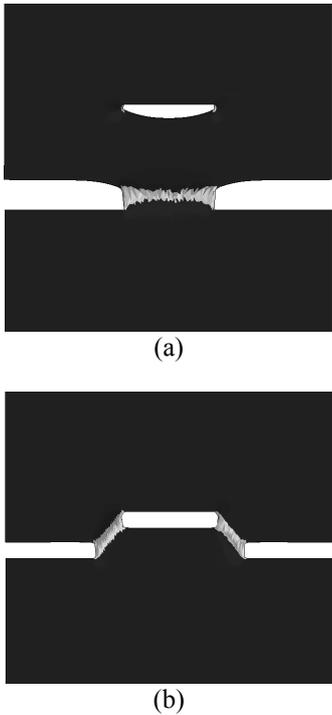


Fig. 10 Simulated (a) non combined (b) combined crack failure behaviors of tensile plates with through-wall cracks

부 요소의 크기는 0.5 mm 로 균일하다. 손상누적 기법 적용을 위해 ABAQUS 에서 제공하는 User-Subroutine UHARD Option 을 사용하였다.<sup>(6)</sup>

해석 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 그래프의 실선은 실험 결과이며, 점선은 손상 모델이 적용되지 않은 일반 유한요소 해석 결과이다. 파단이 일어나는 지점을 지나 계속해서 응력이 증가하는 것을 통해 일반 유한요소 해석은 균열 진전을 모사할 수 없음을 확인할 수 있다. 점들로 나타낸 결과가 파괴

변형률 기준 (1) ~ (3)에 의한 손상 기법 해석 결과이다. 기준 (2)와 기준 (3)에 의한 결과를 균열 진전을 모사하고 있으나 최대 하중값을 실험 결과와 비교해 보았을 때 다소 비보수적인 예측을 하고 있음을 알 수 있다. 기준 (1)에 의한 결과를 보면 경향성은 실험과 다소 차이가 있으나 최대 하중값을 비교해 보았을 때 실험과 비슷하거나 보수적인 예측을 하고 있음을 알 수 있다. 따라서 기준 (1)을 JIS SM400A 의 파괴 변형률 기준으로 선정하는 것이 적합하다는 결론을 내릴 수 있다.

### 5.2 유한요소 해석 결과

5.1 절에서 정해진 파괴 변형률 기준을 적용하여 실험에서 수행된 31 가지 균열 시편 형상에 대한 유한요소 해석을 수행하였다. 실험과 유한요소 해석에 의한 하중-하중선 변위선도를 Fig. 8 에 나타내었다. 전체적으로 실험과 유사한 경향을 보이는 경우가 있는 반면 다소 차이가 나는 경우도 있음을 확인할 수 있다. Fig. 9 는 모든 경우에 대해 실험에 의한 최대 하중값-해석에 의한 최대 하중값 그래프를 나타내고 있다. 시편의 최대 하중 예측에 있어 손상 누적 기법에 의한 해석 결과가 실험 결과와 전반적으로 잘 일치하고 있으며, 대부분의 경우에 대해 보수적인 예측을 하고 있음을 알 수 있다. Fig. 10 에는 유한요소 해석에 의한 시편의 균열진전을 나타내었다. 균열의 진전 경향이 형상에 따라 다르다는 것을 확인할 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 발전소 내부에서 부식에 의해 발생할 수 있는 다중 균열 구조물에 대한 평가를 위해 손상 누적 기법을 적용한 유한요소 해석을 제시하였다. 손상 누적 기법을 적용하여 다중 균열 해석을 하기 위해, 일본 연구자들에 의해 수행된 다중균열 평판 시험결과를 선택하였다. 시험편 재료에 대한 세 가지 파괴 변형률 기준식을 세울 수 있었으며, 표본 형상에 대한 해석과 결과를 통해 파괴 변형률 기준(1)이 가장 타당함을 알 수 있었다. 파괴 변형률 기준(1)을 적용하여 총 31 개 형상에 대한 해석을 수행하였다. 간단화된 수치해석적 모사기법임에도 다중 균열 시편의 최대 하중값을 잘 예측하고 있음을 확인할 수 있었다. 실험에 의한 최대 하중값에 대한 유한요소 해석에 의한 최대 하중값의 오차율은 최대 8% 이며 대부분의 형상에 대해 다소 보수적이거나 유사한 하중값 예측을 하고 있음을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- (1) Gurson, A.L., 1997, "Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part 1-Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 99, pp. 2~15.
- (2) Tvergaard, V., 1982, "On Localization in Ductile Materials Containing Spherical Voids," *International Journal of Fracture*, Vol. 18, pp. 237~252.
- (3) Chu, C.C. and Needleman, A., 1980, "Void Nucleation Effects in Biaxially Stretched Sheets," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 102, pp. 249~256.
- (4) Rice, J.R. and Tracey, D.M., 1969, "On the Ductile Enlargement of Voids in Triaxial Stress Fields," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 17, pp. 201~217.
- (5) Hasegawa, K., Miyazaki, K., Personal Communication.
- (6) ABAQUS Version 6.9, 2009, User's Manual. Inc. and Dassault Systemes.
- (7) Ranganath, S. and Carter, R., 2007, "Structural Capability of Austenitic Piping and Shells with Parallel Offset Cracks," *Proceedings PVP2007*, PVP2007-26688.
- (8) Ranganath, S., Carter, R., Ku, F. and Herrera, M., 2005, "Flaw Proximity Rules for Parallel Planar Flaws Under Limit Load Conditions," *Proceedings PVP2005*, PVP2005-71763.
- (9) Kamaya, M., 2007, "Interaction Effect of Twin Circumferential Surface Cracks on Limit Load of Pipe Under Tension," *Proceedings PVP2007*, PVP2007-26221.
- (10) Moon, S.I., Kim, Y.J., Lee, J.H., Park YW and Song MH, 2005, "Optimum Local Failure Model of Steam Generator Tubes with Multiple Axial Through-Wall Cracks," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 235, pp. 2099~2108.
- (11) Moon, S.I., Chang, Y.S., Kim, Y.J., Song, M.H., Choi, Y.H. and Hwang, S.S., 2006, "Assessment of Plastic Collapse Behaviors for Tubes with Collinear Cracks," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, pp. 296~308.
- (12) Moon, S.I., Chang, Y.S., Kim, Y.J., Lee, J.H., Park, Y.W. and Song, M.H., 2007, "Determination of Failure Pressure for Tubes with Two Non-Aligned Axial Through-Wall Cracks," *International journal of Fracture*, Vol. 144, pp. 91~101.