

수치해석을 이용한 현상학적 연성파괴 모사 기법

김낙현[†] · 오창식* · 민성환* · 김윤재**

A Numerical Ductile Failure Simulation Technique Based on Phenomenological Damage Concept

Nak-Kyun Kim[†], Chang-sik Oh*, Sung-hwan Min* and Yun-Jae Kim**

ABSTRACT

This paper proposes a simple numerical method to simulate ductile failure behaviors. The method is based on finite element analysis with a simple damage theory. To validate the proposed method, simulated results are compared with experimental data. Despite its simplicity, the proposed method well predicts experimental results systematic analyses are also performed to investigate the effect of the element size.

Key Words : Damage(손상), Ductile failure(연성파괴)

기호설명

ϵ_p = plastic strain
 ϵ_f = fracture strain
 ϵ_f^* = fracture strain measured from tensile tests of smooth bars or thin plates
 σ_e, σ_m = effective stress and mean normal stress, respectively
 σ_y, σ_u = yield (0.2% proof) strength and tensile strength, respectively
 ω = damage

1. 서론

다양한 하중을 받는 시설물은 응력 부식 균열 (Stress corrosion crack)에 의해 손상을 입게 된다. 따라서 균열이 시설물의 안정성에 미치는 영향을

파악하는 것은 시설물의 유지 보수 관점에서 매우 중요하다.

실제 시설물은 형상이 복잡하고 하중이 다양하기 때문에 전통적 유한요소 방법을 이용한 균열 평가는 한계가 있다. 최근에 이러한 한계를 극복하기 위해 GTN(Gurson-Tvergaard-Needleman) 방법과¹⁻⁴⁾ cohesive zone 방법¹⁴⁻¹⁵⁾ 등 손상해석 기법을 이용한 연성파괴 모사 기법이 개발되었다. 그러나 기존에 개발된 이러한 기법들은 이론적으로 복잡하고 재료상수 등 변수가 많아 실제 구조물에 적용하기 어렵고 한계가 있다. 예를 들면, GTN 기법은 이론적으로 매우 복잡하며, 유한요소 해석을 위해서는 8개의 변수를 조정해 주어야 한다. 이 변수들은 독립적이지 않기 때문에 여러 개의 변수 조합이 가능하며 재료가 같더라도 한 개의 변수 조합을 여러 형상이나 하중조건에 적용하기 어렵다.

따라서 기존의 연성파괴 모사기법을 대체 할만한 새로운 기법의 개발이 필요하다. 이번에 제시한 현상학적 연성파괴 모사 기법은 이론이 간단하고 재료에 따른 변수가 적어 유한요소 해석을 수행하기 위해 필요한 실험이 많지 않고 여러 형상과 다양한 하중에 광범위하게 적용이 가능하다.

[†] 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과 대학원

E-mail : man5047@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3749 FAX : (02)929-1718

* 고려대학교 기계공학과 대학원

** 고려대학교 기계공학과

Table 1 Chemical compositions and mechanical tensile properties at room temperature of the API X65 steel

Young's modulus	Poisson's ratio	Yield strength	Tensile strength			
E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)			
210.7	0.3	464.5	563.8			
Element (wt %)						
C	P	Mn	S	Si	Fe	Ceq
0.08	0.019	1.45	0.03	0.31	Balance	0.32

2. 실험 결과

본 논문의 목적은 새로운 연성파괴 기법을 제안하는 것이다. 기법에 대한 설명과 적용 뿐 아니라 검증에 위하여 여러 가지 실험 결과와 비교를 하였다. 노치가 있는 인장시편과 SE(B), SE(T)에 대한 실험결과를 새로운 연성파괴 기법을 이용한 유한요소 해석 결과를 비교하였다. 본 논문의 실험은 한국가스공사에서 수행한 결과이다.

재료는 API X65 재료를 사용하였다. 이 재료는 국내 가스배관에 주로 쓰이는 재료이다. API X65 재료의 화학물질을 Table 1에 정리하였다.

2.1 인장시편 실험 결과

삼축 응력이 연성파괴에 미치는 영향을 파악하기 위해 다양한 노치반경, 6.0mm(R6), 3.0mm(R3)와 1.5mm(R1.5)의 노치가 있는 인장시편 실험을 수행하였다.

인장실험은 25mm의 거리를 갖는 변형률계를 사용하였다. 동일한 시편에 3번의 실험을 수행하였다. 모든 시편에서 최소반경은 6.0mm로 고정하였다. 시편형상을 Fig. 1(a)에 정리하였다. 과는 Fig. 1(b)에 정리하였다. 노치 반경이 감소할수록 항복응력과 인장응력이 증가하였고, 파괴변형률은 감소하였다. API X65 재료의 노치가 없는 인장시험 결과를 이용하여 진응력-진변형률을 구하고 Fig. 2에 정리하였다.

2.2 균열이 있는 시편의 실험 결과

균열길이와 하중종류에 따른 구속효과가 파괴거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 균열이 있는 시편의 실험이 수행되었다. API X65 재료에 대하

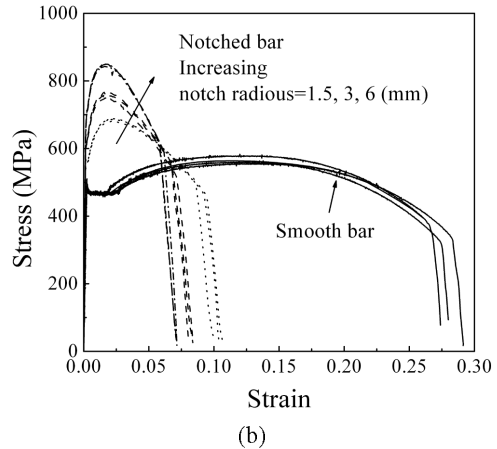
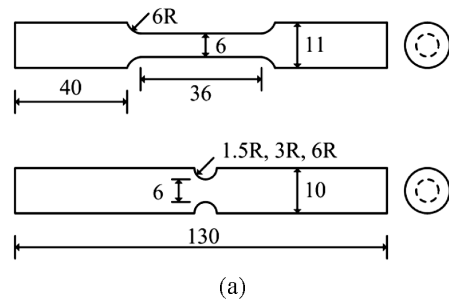


Fig. 1 (a) Schematic illustrations of tensile specimens (unit=mm) and (b) experimental results

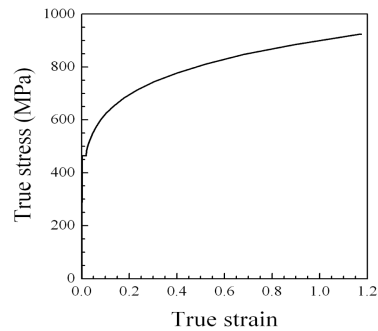


Fig. 2 True stress-strain data of API X65

여 3점 굽힘 시험 (single-edge cracked bent bar, SE(B))과 인장시험(single-edge cracked tension bar, SE(T))이 수행되었다. 실험에 사용된 시편의 형상을 Fig. 3에 도시하였다. SE(B) 시편은 폭의 46%에 해당하는 균열이 있는 시편을 사용하였고 SE(T) 시편은 균열길이가 파괴 거동에 미치는 영향을 파악하기 위해 폭의 25%, 50%, 75%에 해당하는 세 가지 균열길이가 있는 시편을 사용하였다. 모든 실험

험에서 10mm 길이를 갖는 변형률계를 사용하여 균열 개구 열림 변위(CMOD)를 하중에 따라 구하였다. 실험 결과는 Fig. 4에 정리하였다.

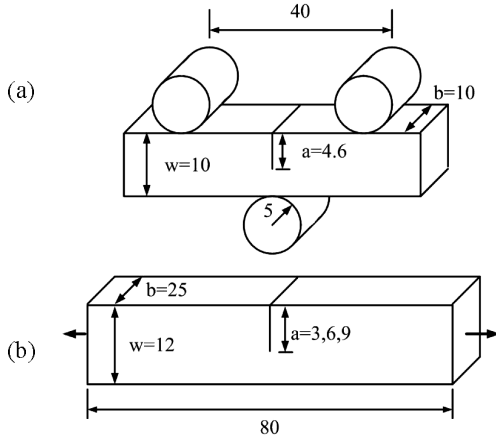


Fig. 3 Schematic illustrations of (a) SE(B) and (b) SE(T) specimens (units: mm).

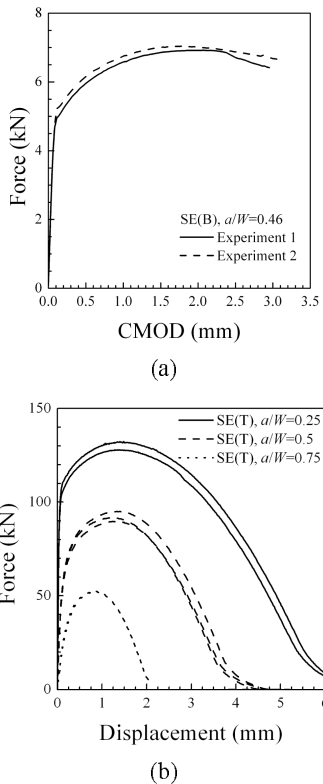


Fig. 4 Experimental results of (a) SE(B) and (b) SE(T)

3. 새로운 연성 파괴 기법

3.1 손상 모델과 모사 기법

본 논문에서 제시하는 손상모델은 stress-modified fracture strain model을^{5,10)} 기반으로 한다. 연성파괴에서 파괴변형률은 삼축 응력과 밀접한 관계에 있다고 알려져 있다. 삼축 응력은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_e} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3\sigma_e} \quad (1)$$

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

여기서 $\sigma_{(i=1-3)}$ 은 주응력이다. 삼축 응력과 파괴 변형율은 아래 식과 같은 관계에 있다^{10,12)}.

$$\epsilon_f \approx \exp\left(-\alpha \frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right) \quad (3)$$

α 는 상수이다. 2.1절의 노치가 있는 인장실험 결과를 이용하여 삼축 응력이 파괴변형율에 미치는 영향을 파악하였다. 삼축 응력에 의한 파괴변형율이 결정되면 소성변형에 의한 손상을 계산할 수 있다.

$$\Delta\omega = \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{\epsilon_f}\right) \quad (4)$$

$\Delta\epsilon_p$ 는 소성변형율 증가량이다. 누적된 손상값 $\omega = \Sigma\Delta\omega = 1$ 이 되면 연성파괴를 가정하고 유한요소의 적분점에서의 응력 값을 강제로 낮춰 줄으로서 균열 진전을 모사한다. 응력을 0으로 낮춰줄 경우 수치해석적 문제가 발생하므로 하한값(cut-off value)을 주었고 응력을 급격하게 낮춰줄 경우 유한요소 해석이 불안정해 지므로 적절한 기울기를 주어 응력을 낮춰주었다. Fig. 5에 이러한 내용을 그림으로 정리하였다. 기울기와 응력 하한값이 유한요소 해석에 미치는 영향을 파악하기 위해 민감도 해석을 수행하였다. 이 결과는 다른 질에서 언급하겠다.

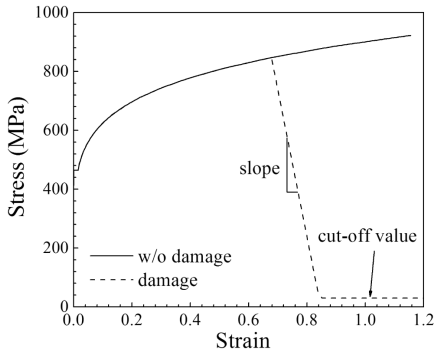


Fig. 5 Schematic illustration of phenomenological damage concept

3.2 ABAQUS에 손상모델의 적용

파괴 변형율이 재료에 따라 주어져있다고 가정하면 손상 누적계산은 유한요소 해석에서 구한 삼축 응력과 소성변형을 증가량을 이용하여 구하게 된다. 따라서 본 논문에서 제시한 방법은 상업용 유한요소 해석 프로그램에 적용하기가 쉽다. ABAQUS에¹³⁾ 적용하기 위하여 두 가지의 사용자정의함수 (user subroutine)를 사용한다. USDFLD 사용자정의함수를 사용하여 적분점의 값들을 재 정의 해준다. 재 정의된 적분점의 값들과 정수압응력, 등가 응력을 UHARD 사용자정의함수에 넘긴다. 그런 후에 식(4)를 사용하여 손상값을 계산한다. 누적된 손상 값이 1이 될 경우 응력을 강제로 낮추어 준다.

3.3 파괴변형을 결정

본 논문에서 제시한 손상모델을 적용하기 위한 첫번째 과정은 삼축 응력에 의한 파괴변형을 찾는 것이다. 이것은 노치가 있는 인장시편 실험결과와 탄-소성 유한요소 해석을 이용하여 구하게 된다. 축 대칭 요소를 이용한 유한요소 해석을 통하여 인장시험을 모사하고 시편에서의 삼축 응력과 변형율의 변화를 파악하였다. 노치가 있는 인장시편의 유한요소 형상을 Fig. 6에 도시하였다. 484~658개의 요소와 1557~2089개의 절점을 사용하였다⁶⁾.

Fig. 7에 다양한 인장시편에 대해 유한요소 해석적으로 구한 등가변형율에 따른 삼축 응력의 변화를 보였다. 등가변형율은 아래와 같이 표현할 수 있다.

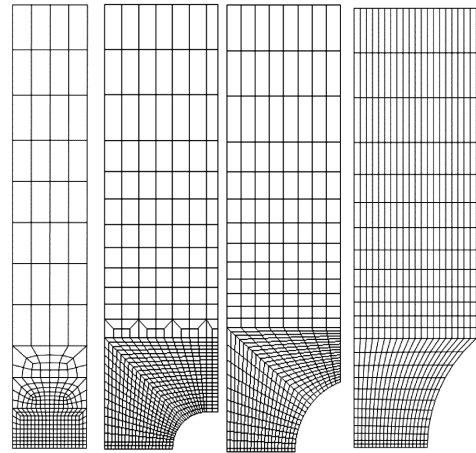
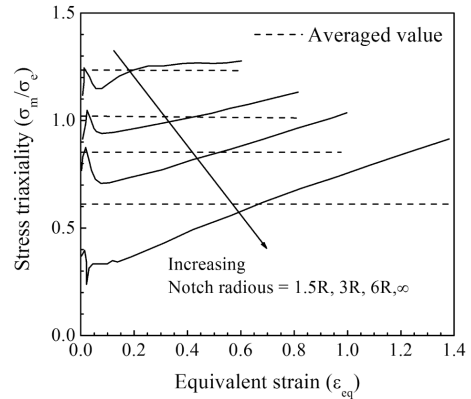
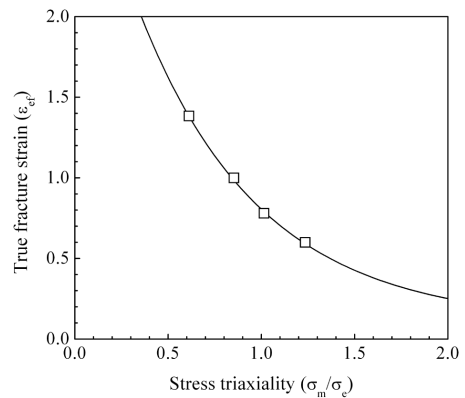


Fig. 6 FE meshes for tensile specimens



(a)



(b)

Fig. 7 Fracture strain determination

$$\epsilon_e = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_1 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_2)^2]^{0.5} \quad (5)$$

시편의 파괴는 삼축 응력과 등가변형율이 가장 높은 최소 단면적 부분의 중심에서 발생한다고 알려져 있다. 따라서 Fig. 7(a)에 보여진 삼축 응력과 등가변형율은 유한요소 해석을 통해 시편의 최소 단면적 위치에서 측정하였다. Fig. 7(a)에서 삼축 응력은 등가변형율과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 등가변형율에 따라 변하는 삼축 응력을 아래와 같은 식으로 평균하였다.

$$\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right)_{ave} = \frac{1}{\epsilon_{ef}} \int_0^{\epsilon_{ef}} \frac{\sigma_m}{\sigma_e} d\epsilon_e \quad (6)$$

ϵ_{ef} 는 파괴가 시작되는 상당변형율이다. 주어진 노치반경에 따른 평균적 삼축 응력은 상수이며 이 값을 Fig.7(a)에 점선으로 보였다. 각 시편의 파괴가 시작될때의 평균적 삼축 응력값과 파괴변형율을 이용하여 삼축 응력에 따라 파괴가 발생하는 등가변형율을 Fig. 7(b)에 보였다. 각 점들은 다른 노치반경의 인장시편에 해당하는 결과이다. Fig. 7(b)의 점들과 식(3)을 기반으로 구한 삼축 응력에 따른 파괴변형율 식은 아래와 같다.

$$\epsilon_{ef} = 3.29 \exp\left(-1.54 \frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right) + 0.10 \quad (7)$$

위 식은 Fig. 7(b)의 실선으로 표시하였다.

4. 민감도 분석

본 논문에 제시된 연성파괴 모사 기법을 유한요소 해석에 적용하기 위해서 몇 가지 민감도 분석을 수행하였다. 요소는 1차원요소를 사용하였다. 2차원에서는 CPE4, 3차원에서는 CPE8 요소를 사용하였다. 2차원 요소를 사용시에는 해석이 불안정하였다.

전통적으로 유한요소 손상해석은 요소크기에 민감하다. 적절한 요소 크기는 재료에 따라 다르다. 본 논문에서는 API X65재료에 대해 이미 알려진 적절한 요소 크기인 0.15mm 크기의 요소를 사용하였다.

3.1절에서 언급한 바와 같이 본 논문에 새롭게 제시한 연성파괴 모사 기법은 손상이 누적되면 적

분점의 응력값을 강제로 낮추어 균열의 진전을 모사한다. 적분점의 응력을 급격하게 낮추거나 너무 작은 값으로 낮추면 해석이 불안정하다. 따라서 적

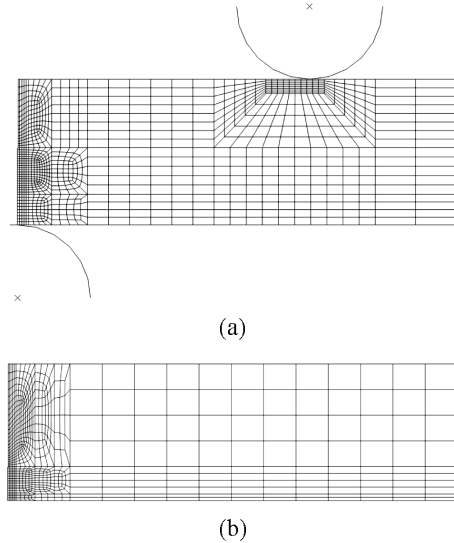


Fig. 8 FE meshes for (a) SE(B) and (b) SE(T) specimens

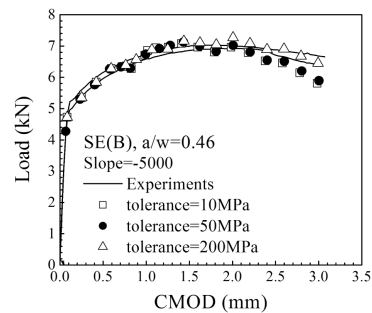
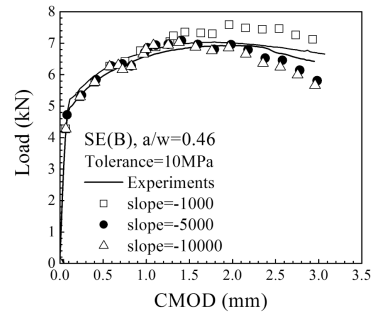


Fig. 9 Sensitivity of (a) slope and (b) cut-off value

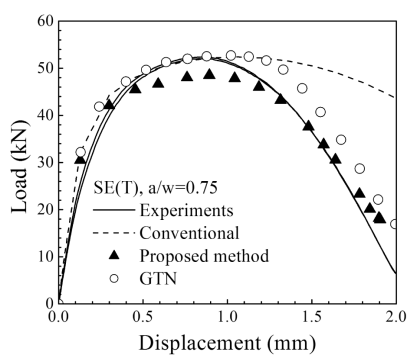
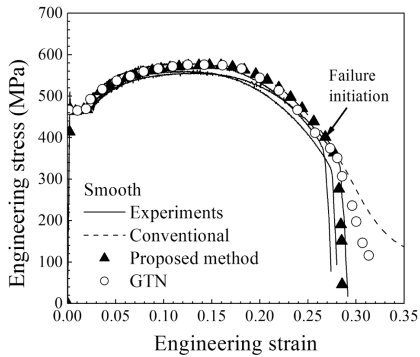
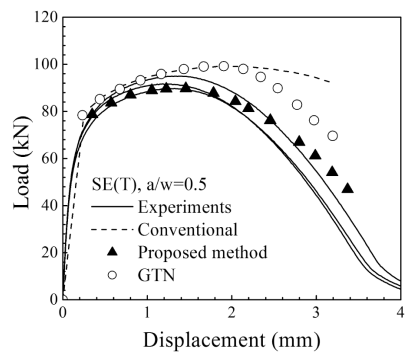
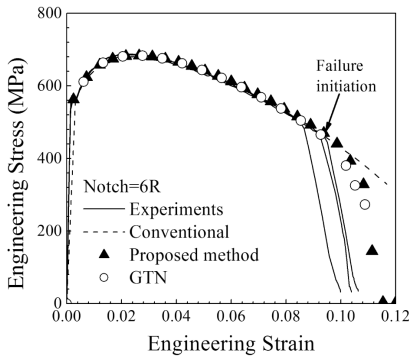
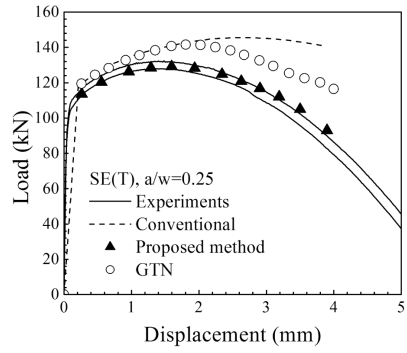
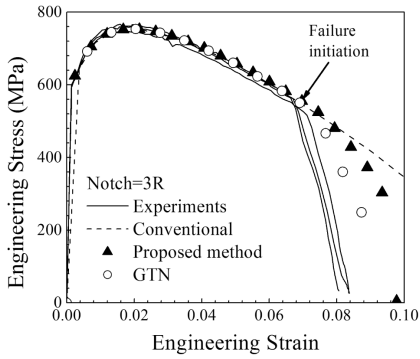
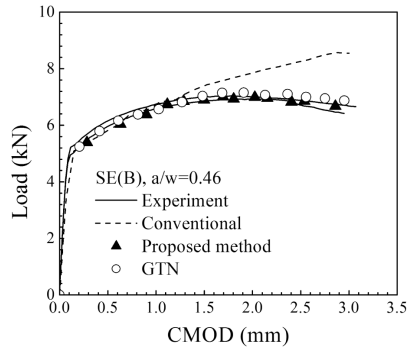
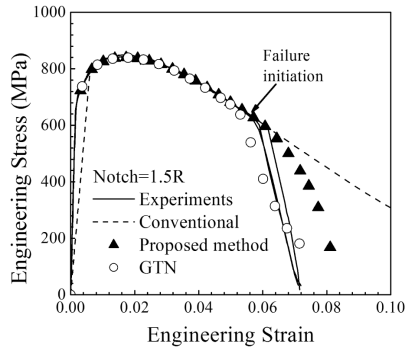


Fig. 10 Comparison of experimental results and FE results for tensile specimens

Fig. 11 Comparison of experimental results and FE results for SE(B) and SE(T) specimens

절한 기울기와 하한값을 정해야 한다. 이러한 민감도 분석을 위해 SE(B), SE(T) 시편에 대한 실험결과와 유한요소 손상해석 결과를 비교하였다.

유한요소 해석을 위한 요소 형상을 Fig. 8에 도시하였다.

실험 결과와 유한요소 해석 결과의 비교는 Fig. 9에 정리하였다. 기울기는 그 크기가 5000(변형율이 0.1 증가할 경우 응력값이 500MPa 작아짐) 보다 큰 경우 해석결과에 미치는 영향이 매우 작았으며 기울기가 너무 급격하면 해석이 불안정해 짐으로 적절한 기울기는 5000으로 설정하였다. 응력 하한값은 항복응력의 10%보다 작은 경우 해석결과에 미치는 영향이 매우 작았다. 응력 하한값은 너무 작은값으로 설정할 경우 해석이 불안정해 지므로 항복응력 5~10%를 적절한 값으로 설정하였다.

5. 기존 손상해석 방법과의 비교

기존의 손상해석 방법 중 가장 널리 사용되는 방법은 GTN방법이라 하겠다. 이 방법은 널리 쓰이고 있으나 서론에 언급한 바와 같이 이론이 복잡하고 변수가 많아 한계가 많다. 그러나 현재 대중적으로 쓰이고 있기 때문에 새로 제안한 방법과의 결과 비교가 필요하다.

인장실험 결과를 바탕으로 GTN 방법과 새로 제시한 방법을 비교한 결과를 Fig. 10에 정리하였다. 두 가지 방법 모두 파괴가 시작되는 시점을 기준으로 실험결과와 매우 비슷함을 알 수 있다.

균열 진전에 따른 하중변화 모사를 비교하기 위해 균열이 있는 SE(B)와 SE(T)시편의 실험결과를 바탕으로 GTN방법과 새로 제시한 방법의 비교를 Fig. 11에 정리하였다. GTN방법을 사용한 결과가 다소 비 보수적이나 새로 제시한 방법의 결과는 비교적 정확하거나 보수적이다.

새로 제시한 방법의 이론이 간단하고 조정해야 할 변수가 적음에도 불구하고 해석 결과는 GTN 방법보다 더 실험에 가깝게 모사가 가능함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 새로운 유한요소 손상해석 기법

을 제시하였다. 이 방법은 stress-modified fracture strain model을 기반으로 하여 이론이 간단할 뿐 아니라 변수가 적어 변수를 조정하는데 큰 어려움이 없으며 기존 방법에 비해 변수를 조정하기 위해 요구되는 실험이 상대적으로 적다. 또한 상용 유한요소 프로그램에 적용이 가능하다. 균열진전 모사가 가능하며 다양한 하중이나 형상에 적용이 가능하다. 실험과 기존 손상해석기법 결과의 비교를 통해 새로 제시한 기법의 타당성을 증명하였다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(원자력연구개발사업 고유장점기술육성분야, M2080608000208M060800210)

참고문헌

1. Gurson AL, 1977, Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: part I - yield criteria and flow rules for porous ductile media. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 99, 2-15.
2. Tvergaard V, 1982, On localization in ductile materials containing spherical voids. *International Journal of Fracture*, 18, 237-252.
3. Chu CC and Needleman A, 1980, Void nucleation effects in biaxially stretched sheets. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 102, 249-256.
4. Rivalin F, Besson J, Pineau A and Di Fant M, 2001, Ductile tearing of pipeline-steel wide plates II-modeling of in-plane crack propagation. *Engineering Fracture Mechanics*, 68, 347-364.
5. Anderson T, 1995, *Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*. CRC Press.
6. Kanninen MF, Popelar CH, 1985, *Advanced Fracture Mechanics*. Oxford University Press.
7. McClintock FA, 1968, A criterion of ductile fracture by the growth of holes. *Journal of Applied Mechanics*, 35, 363-371.
8. Rice JR and Tracey DM, 1969, On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*,

- 17, 201-217
9. Hancock JW and Mackenzie A, 1976, On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subject to multi-axial stress states. *Journal of the Physics and Mechanics of Solids*, 24, 147-169.
 10. Hancock JW and Cowling MJ, 1980, Role of state of stress in crack-tip failure processes. *Metal Science*, 293-304.
 11. Bao Y, 2005, Dependence of ductile crack formation in tensile test on stress triaxiality, stress and strain ratios. *Engineering Fracture Mechanics*, 72, 505-522.
 12. Bao Y and Wierzbicki T, 2004, On fracture locus in the equivalent strain and stress triaxiality space. *International Journal of Mechanical Sciences*, 46, 81-98.
 13. ABAQUS Version 6.7, 2008, User's manual. Inc. and Dassault Systemes.
 14. Dugdale DS, 1960, Yielding of steel sheets containing slits, *J Mech Phys Solids*, 8:100-4
 15. Barenblatt GI, 1962, The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture, *Adv Appl Mech*, 7:55-129
 16. Chang-Kyun Oh, Yun-Jae Kim, Jong-Hyun Baek, Young-Pyo Kim, Woo-Sik Kim, 2007, Ductile failure analysis of API X65 pipes with notch-type defects using a local fracture criterion, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Volume 84, 512-525