

결함이 있는 배관의 파열압력 예측을 위한 유한요소 해석기법

강혜민* · 오창식* · 김윤재†

Finite Element Analyses for the Estimates of the Burst Pressures of the Pipes with Defects

Hye-Min Kang, Chang-Sik Oh and Yun-Jae Kim

Key Words: Burst Pressure (파열압력), Gouge (가우지), Corrosion (부식), Finite element analysis (유한요소해석)

Abstract

This paper provides the methods to estimate the burst pressures of the pipes with defects, based on finite element analyses. FE codes are frequently adopted for the simulations of the burst tests of the pipes with defects. However, those do not give the burst pressure directly. Because the post-processing should be followed; determination of the fracture strains in accordance with triaxialities, monitoring the strains of pipes, etc. In the present work, these efforts are implemented in the user subroutine UHARD within the general-purpose FE code, ABAQUS. Four fracture criteria are introduced to estimate the burst pressure of pipes, and a simple fracture strain estimate is also developed. FE analyses for the pipe with gouge and corrosion are performed, and the results are compared with the experiment results.

1. 서 론

기존 연성파괴에 대한 평가로, 많이 사용되는 방법은 국부파손모델(local failure criteria)이다. 이 방법은 응력상태를 고려한 파괴변형률을 사용함으로써 연성파괴를 예측할 수 있다는 것이다.¹⁻⁵ 그러나 이 방법은 배관의 손상위치에 대한 변형률을 실시간으로 점검해야 하는 번거로움을 수반하게 된다. 또한, 결함을 포함한 실 배관의 유한요소 모델에 연성파괴 모델을 적용할 경우, 요소수의 증가로 인해 많은 시간과 비용이 요구된다.

따라서 실 배관의 파괴 압력을 예측하기 위한 간략 기법의 필요에 따라, 본 논문에서는 간략기법을 적용시킨 ABAQUS에서 제공하는 subroutine을 사용하였다.⁶ 이는 또한 결함이 있는 배관의 파열 압력을 측정하여 이를 실험결과와 비교하고,⁵ 연성파괴의 간략기법을 사용하여 결함이 있는 실 배관에서의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 파괴 변형률 모델

본 논문에서는 실험값과의 비교를 위해 동일한 재료인 API X65 강의 인장물성을 사용하였다. 재료의 진응력-진변형률 선도는 Fig. 1에 나타난 것과 같으며, 항복강도(Yield strength)는 464.5 (MPa), 탄성계수(Young's modulus)는 210.7 (GPa), 포아송 비(Poisson's ratio, ν)는 0.3이다. 결함이 있는 실 배관의 파괴 압력을 예측하기 위한 4가

† 고려대학교 기계공학과

E-mail : kimy0308@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)926-9290

* 고려대학교 기계공학과 대학원

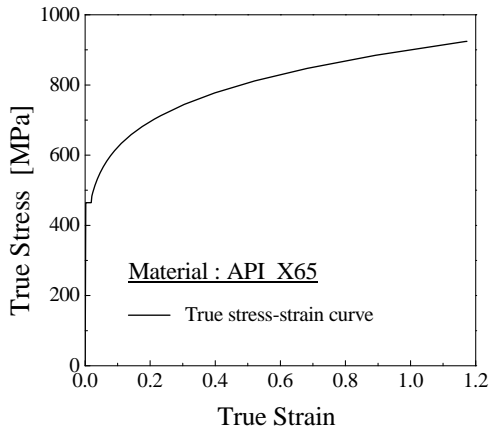


Fig. 1 True Stress-Strain curve for API X65, used in the present FE analysis

지 모델을 가정하였다. 각 모델은 ABAQUS에서 제공하는 user-subroutine을 이용하여 구현되었다. Subroutine은 모델의 각 적분 점에서 얻을 수 있는 삼축응력을 통해 변형률을 측정하고 이를 파괴 변형률과 비교하여 파괴변형률보다 값이 크게 되면 국부 파괴가 발생했다고 가정하여 강제적으로 응력을 낮춰주는 작업을 함으로서, 배관의 국부적인 손상을 예측한다.

2.1 Model 1

첫 번째 경우인 Model 1은 Fig. 1의 진응력-진 변형률 선도에서 파괴까지의 전체곡선만을 재료 물성치로 적용하였다. 여기서는 파괴변형률을 사용하지 않아, 파괴 거동을 예측하지 못하게 된다.

2.2 Model 2

두 번째 경우인 Model 2는 Model 1과 같은 Fig. 1의 진응력-진 변형률 선도 전체를 적용한 것에 파괴변형률 식 (1)을 이용하였다. 국부파손모델에 기초한 식 (1)은 파괴가 발생하는 위치에서의 응력과 변형률 값을 바탕으로 구해진 모델이며, 다음과 같다.¹

$$\varepsilon_f = 3.29 \exp\left(-1.54 \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right) + 0.10 \quad (1)$$

이는 보다 정확한 결과를 얻기 위한 삼축응력의 영향을 고려한 방법이나, 많은 실험과 수고가 따르게 된다.

2.3 Model 3

앞서 언급한 식 (1)의 번거로움을 줄이고 다양하게 적용될 수 있는 식을 제안하기 위하여, 두 번째 식인 삼축응력을 고려하기 위한 간략한 방법을 사용하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{f,ref}} = \frac{\exp\left(-1.5\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right)\right)}{\exp\left(-1.5\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}}\right)_{ref}\right)} \quad (2)$$

위 식 (2)에서 API X65 강의 인장실험을 통한 진응력-진 변형률 선도에서의 파괴변형률 값($\varepsilon_{f,ref}$)과, 정수압응력과 등가응력의 비인 삼축응력($(\sigma_m/\sigma_{eq})_{ref}$)을 구함으로서, 식 (3)을 최종적으로 얻을 수 있다.

$$\varepsilon_f = 1.1633 \exp\left(-1.5\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} - \frac{1}{3}\right)\right) \quad (3)$$

Model 3에서는 식 (3)을 적용하여, Fig. 1의 진응력-진 변형률 선도로부터 파괴 발생까지의 전 구간을 적용한 재료물성으로 해석하였다. Fig. 2에서는 앞서 제시한 식 (1)과 식 (3)으로부터 파괴변형률과 삼축응력의 관계를 보여주고 있는데, 식 (3)은 식 (1) 보다 보수적인 결과를 나타내므로 실 배관의 적용 가능성을 예측할 수 있다.

2.4 Model 4

Model 4에서는 식 (3)을 적용하고, 재료 물성을 위 세 가지 Model과 달리, Fig. 1의 진응력-진 변형률 선도에서 최대인장강도 기준까지 적용시켜 상대적으로 보수성을 확보하려 시도하였다.

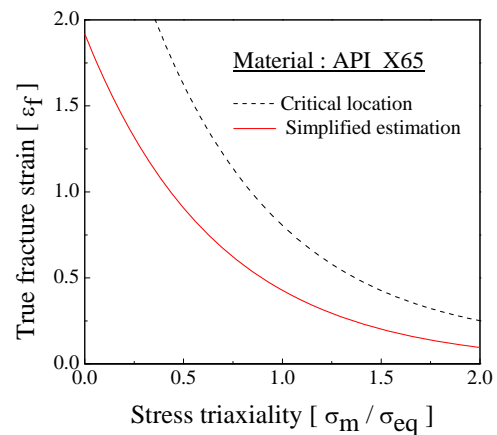


Fig. 2 True fracture strains (equivalent strain to fracture) as a function of stress triaxiality

3. 인장, 노치인장 시편의 모사

2장에서 제시된 4가지 해석 기법의 타당성 검증을 위해 API X65의 인장실험을 수행 하였다. Fig. 3은 해석에 사용된 시편의 형상으로서, (a)는 평행봉 인장시편, (b)와 (c)는 각각 노치 반경이 $R=6\text{mm}$ 와 $R=3\text{mm}$ 인 노치인장시편을 나타낸다. 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS 6.7을 사용하여 해석하였다. 해석 모델은 1/4 모델로 축대칭요소(CAX8R)를 적용하였으며, 노치부위에서의 소성변형을 충분히 모사하기 위해 대변형 해석(Large deformation analysis)으로 수행하였다.

해석은 2장에서 제시된 4가지 모델로 수행하였다. Fig. 4는 해석결과를 실험결과와 비교하여 공칭응력과 공칭변형률의 관계로 나타낸 것이다. 시편에서는 적용된 4가지 모델 모두 최대하중을 정확히 예측하였음을 알 수 있다. 그러나 파괴변형률을 적용하지 않은 경우에는 파괴가 일어나는 현상을 구현하지 못하는 것을 볼 수 있고, 파괴 모델 세 번째와 네 번째를 적용한 경우는 최대하중까지는 정확하게 예측하나, 그 이후의 거동은 파괴변형률보다 매우 보수적인 결과를 보이며 파괴가 발생했음을 알 수 있다. 반면, 두 번째 모델

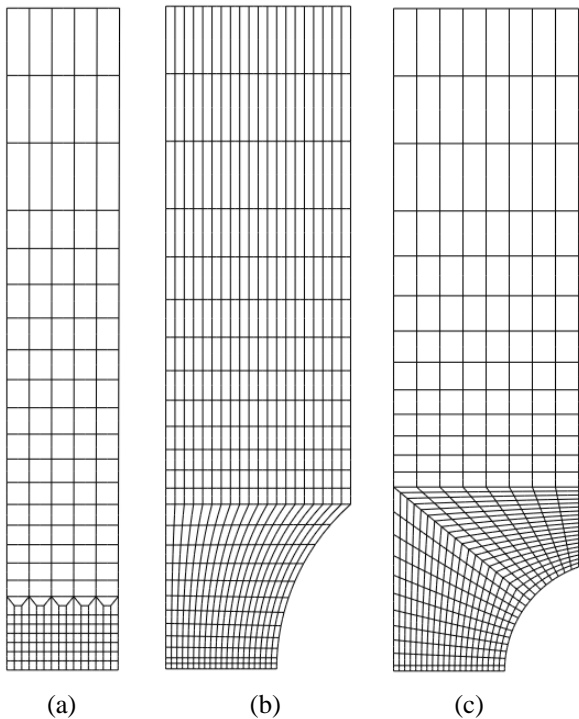


Fig. 3 FE mesh for tension test specimen

에서는 인장시편 3가지 형태 모두에서 최대하중과 파괴를 정확하게 묘사하여 식 (1)에 나타난 파괴변형률 제안 식은 정확히 예측된 식임을 다시 한 번 확인 할 수 있었다.

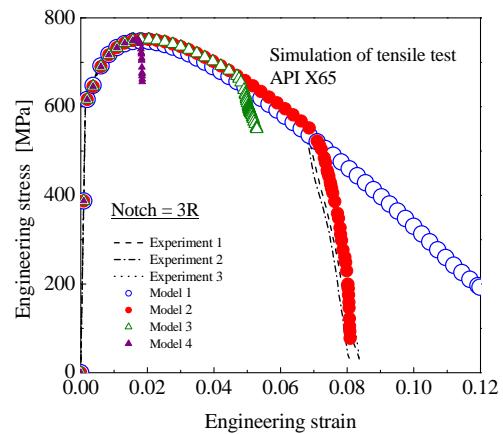
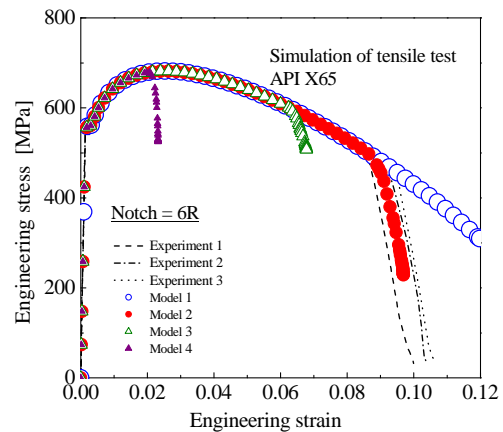
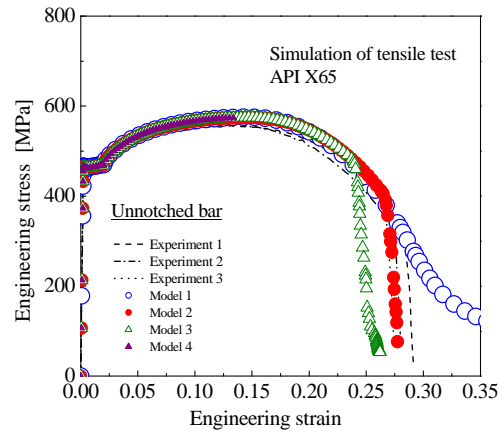


Fig. 4 Tension test simulations of API X65, compared with the experimental results

4. 결함 배관의 유한요소 해석

4.1 가우지

4.1.1 가우지 배관의 유한요소 해석

배관의 축 방향으로 45° V-노치를 가지는 가우지 형태의 결함배관 형상을 Fig. 5, Fig. 6 에 나타내었다. 이에 대한 각기 다른 축 방향 결함 길이에 따른 결함 치수를 Tbl. 1 에 요약하였다. 배관의 외경과 총 길이는 Tbl. 1 에 나타난 것과 같으며, 두께(t)는 17.5mm 이다. 유한요소 모델은 전체 형상을 고려하여 1/4 대칭조건을 적용시켰으며, 해석에 사용된 요소는 20 절점 등각주요소 (C3D20R)를 사용하였다. 배관 내의 하중은 내압을 가하였으며, 대칭부위와 배관의 양 끝단에는 적절한 경계조건과 하중을 가해 주었다. 또한 결함부위에서의 충분한 소성변형을 보기위해 대 변형 해석으로 수행하였으며, 네킹(necking)과 같은 국부적인 급격한 단면감소에 의한 문제를 고려하여 RIKS 옵션을 사용하였다.

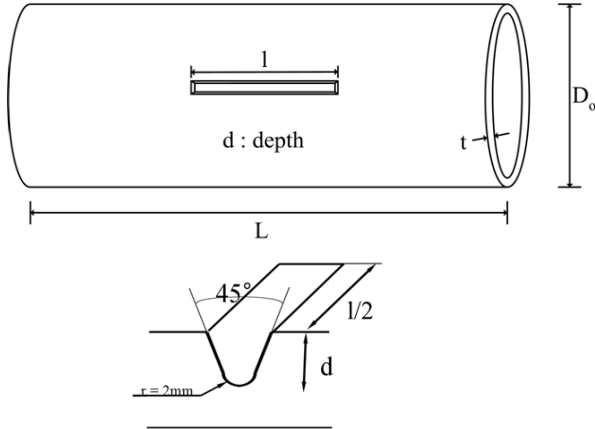


Fig. 5 Schematic illustrations for pipes with gouge

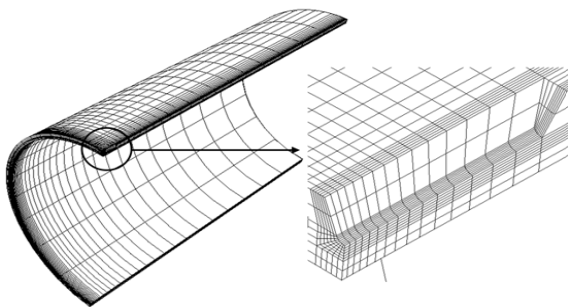


Fig. 6 A typical FE mesh for pipes with gouge

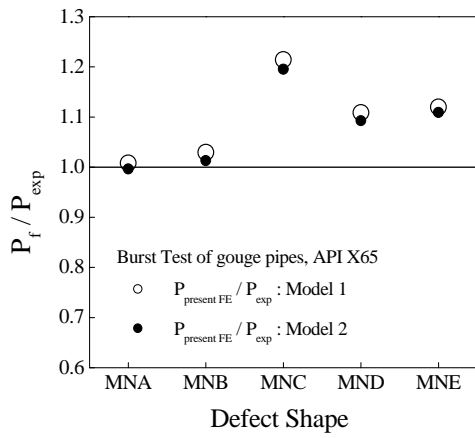
Table 1 Summary of full-scale tests of pipes with gouge defect.

pipe no.	Do (mm)	L (mm)	d/t	l (mm)
MNA	762	2300	0.5	100
MNB				200
MNC				300
MND				400
MNE				600

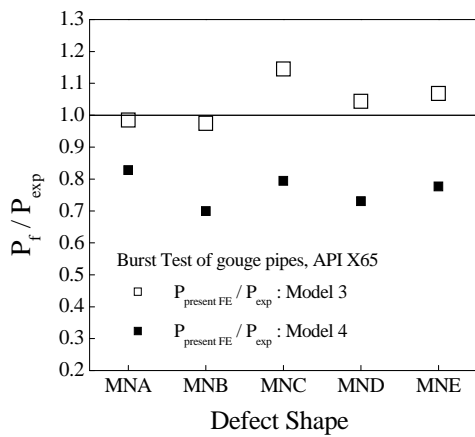
4.1.2 가우지 배관의 해석 결과

앞서 제시한 4가지 모델에 대하여 가우지 배관의 해석을 수행하였다. Fig. 7은 해석을 통해 얻은 파열압력 결과를 실험결과와 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 가우지 길이가 300mm인 MNC의 경우 실험상의 오차로 인해 Fig. 7에서의 해석 값과 비교하는데 약간의 문제가 있었음을 참고한다.

Figure 7 (a)를 보면 대체로 비보수적임을 알 수 있다. 그리고 큰 차이는 없지만 모든 경우에 대하여 Model 2 보다 Model 1의 값이 다소 높게 나오는데, 이는 Model 1이 파괴 변형률을 사용하지 않고 재료 물성만으로 유한요소 해석을 통해 얻어진 값으로 파괴거동을 구현하지 못하여 상대적으로 비보수적인 결과를 보이고 있는 것이다. 게다가 3장의 인장시편에서 정확히 일치하던 Model 2의 경우는 실 배관에서는 매우 비보수적인 결과를 보이며 오차를 나타내고 있다. 여기서 적용된 파괴변형률 모델은 국부적인 손상해석에 속하는데, 이는 파괴가 발생할 것으로 예측되는 부분에서의 요소 크기나 형태가 중요한 요인으로 작용하게 되기 때문이다. 이를 실 배관에서는 충분히 모사 할 수 없기 때문에 연성 재료의 파괴 거동에 영향을 미치게 되는 것이다. 따라서 식 (1)의 파괴변형률을 다양한 형태의 실 배관에 적용시키기에는 많은 시간과 노력이 따르게 된다. 그러므로 본 논문에서는 인장실험만을 통해 보다 쉽게 얻을 수 있는 식 (3)에 제시된 간략기법을 제안하였다. Fig. 7 (b)를 보면 (a)에 비하여 상당히 비보수성이 줄고, 특히 재료 물성을 최대한 장강도 기준까지 적용한 Model 4의 경우에는 모든 가우지 길이에서 보수적이 됨을 알 수 있다. 이는 다소 큰 안전계수를 필요로 할 수도 있



(a)



(b)

Fig. 7 Comparison of experimental burst pressure for pipes with defect with the FE results : (a) Model1, Model2, (b) Model3, Model4

으나 실 배관의 파괴 거동을 예측하는 데에는 유용하며, 건전성 평가에서도 큰 무리 없이 적용될 수 있을 것으로 보인다.

4.2 부식

4.2.1 부식 배관의 유한요소 해석

Figure 8은 부식 결함을 가진 배관의 기하학적 형상을 나타낸 것이다. 실험에 적용된 배관의 두께(t)는 17.5mm 이며, 보다 구체적인 결함형상은 Tbl. 2 에 정리하였다. 부식의 깊이(d), 폭(c), 길이(l)로 나타낸 직사각형의 부식배관에 대한 전형적인 3차원 유한요소모델을 Fig. 9 에 나타내었다. ABAQUS 해석 조건은 4.1.1 의 가우지 배관의 경

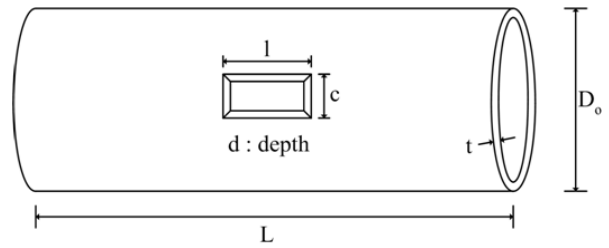


Fig. 8 Pipe with a simulated corrosion defect

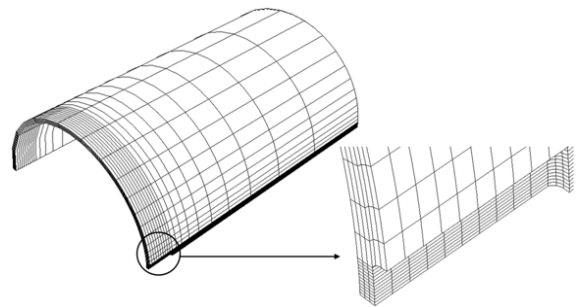


Fig. 9 A FE mesh for pipe with the simulated corrosion defect

Table 2 Summary of full-scale tests of pipes with corrosion defect.

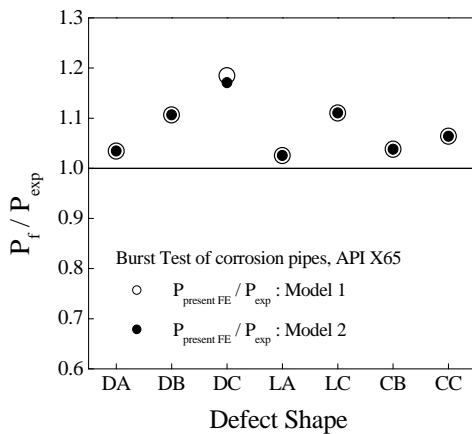
pipe no.	Do (mm)	L (mm)	l (mm)	c (mm)	d/t
DA	762	2300	200	50	0.25
DB			200	50	0.5
DC			200	50	0.75
LA			100	50	0.5
LC			300	50	0.5
CB			200	100	0.5
CC			200	200	0.5

우와 동일하게 적용시켰다.

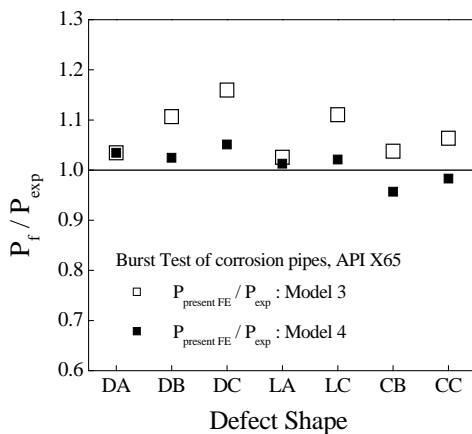
4.2.2 부식 배관의 해석 결과

Figure 10은 4가지 모델에 대한 부식 결함이 있는 배관의 해석결과를 실험결과와 비교하여 나타낸 그림이다. 가우지에서 살펴본 결과와 마찬가지로 Fig. 10 (a)에서는 비보수적으로 (b)에서는 상대적으로 낮은 결과인 보수성을 띄고 있음을 볼 수 있다. Fig. 10 (a)를 보면, 식 (1)에 따른 Model 2 에서 요소의 크기나 형태를 충분히 모사할 수 없기 때문에, 가우지에서와 마찬가지로 실 배관에서의 실험값이 다소 큰 차이를 가져오게 됨을 볼 수 있다.

다음으로 최대인장강도까지의 물성치와 식 (3)을 적용한, Model 4에 대한 가우지와 부식의 경우를 비교해 보고자 한다. 가우지는 연성파괴(ductile fracture)에 의한 파손인 반면, 부식의 경우 소성붕괴(plastic collapse)에 의한 파손임을 기존 논문을 통해 찾아 볼 수 있다. 따라서 Model 4의 경우에서 부식은 가우지보다 그 영향을 덜 받아 다소 보수성이 줄어들음을 알 수 있다. 여기서 일부 비보수적인 결과도 있었으나, 이는 5%내외의 오차를 보이며 건전성 평가에 있어 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 10 Comparison of experimental burst pressure for pipes with defect with the FE results : (a) Model1, Model2, (b) Model3, Model4

본 논문에서는 연성재료의 국부 접근법에 기초한 파괴변형률 모델을 각기 다르게 적용하여, 실 배관에서의 건전성 평가에 보다 간단하고 유용하게 사용될 수 있는 방법을 제시하였다. 먼저 재료의 파괴변형률과 삼축응력의 관계를 간략한 방법으로 제시하고, 파괴 거동의 모사를 위한 파괴변형률을 사용하여 해석을 수행하였다. 인장과 노치인장실험을 통해 검증해 보고, 다음 가우지와 부식의 결합이 있는 실 배관에 적용시켜 파열 압력을 측정함으로써, 제시된 간략한 파괴변형률에 대한 건전성평가에 있어서의 타당성을 검증해 보았다. 따라서 실험결과와 비교하여 보수적인 결과 값을 얻음으로서 연성재료의 국부파괴예측에 유용하게 적용 될 수 있을 것으로 보인다.

참고문헌

- (1) Oh, C. K., Kim, Y. J., Park, J. M., Beak, J. H., and Kim, W. S., 2005, "Development of Stress-Modified Fracture Strain Criterion for Ductile Fracture of API X65 Steel," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 29, No. 12, pp. 1621~1628.
- (2) C. K. Oh, Y. J. Kim, J. H. Beak, Y. P. Kim, and W. S. 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*, Vol. 84, pp. 512~525.
- (3) Gurson AL., 1977, "Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth-yield criteria and flow rules for porous ductile media," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 99, pp. 2~15.
- (4) Bao Y., 2005, "Dependence of ductile crack formation in tensile test on stress triaxiality, stress and strain ratios," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 72, pp. 505~522.
- (5) C. K. Oh, Y. J. Kim, J. H. Kim, 2006, "Effect of Pre-Strain on Integrity Assessment of Gas Pipeline Based on Finite Element Analysis" *Korea Gas R&D Division*, pp. 28~39, 83~110.
- (6) Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc., 2006, ABAQUS Version 6.7., "User's manual".

5. 결론