

## 삼축응력 기반의 파괴변형률 기준을 적용한 가우지 손상배관의 건전성 평가

오창균\*(고려대 대학원 기계공학과), 김윤재(고려대 기계공학과), 박진무(고려대 기계공학과), 백종현(한국가스공사), 김영표(한국가스공사), 김우식(한국가스공사)

### Structural Integrity Assessments of Pressurized Pipes with Gouge using Stress-Modified Fracture Strain Criterion

C. K. Oh(Mecha. Eng. Dept. KU), Y. J. Kim(Mechanical Eng. Dept., KU) , J. M. Park(Mechanical Eng. Dept., KU) , J. H. Baek(KOGAS) , KU) , Y. P. Kim(KOGAS) , KU) , W. S. Kim(KOGAS)

#### ABSTRACT

Structural integrity assessment of defected pipe is important in fitness for service evaluation and proper engineering assessment is needed to determine whether pipelines are still fit for service. This paper present a failure prediction of gas pipes made of API X65 steel with gouge using stress-modified true fracture strain, which is regarded as a criterion of ductile fracture. For this purpose, API X65 pipes with gouge are simulated using elastic-plastic FE analyses with the proposed ductile failure criterion and the resulting burst pressures are compared with experimental data. Agreements are quite good, which gives confidence in the use of the proposed criteria to defect assessment for gas pipelines. Then, further extensive finite element analyses are performed to obtain the burst pressure solution of pipes with gouge as a function of defect depth, length and pipeline geometry.

**Key Words** : Ductile fracture(연성파), Stress triaxiality(삼축응력), Fracture strain(파괴변형률), Gouge defected pipe(가우지손상배관), Burst pressure(파열압력)

#### 1. 서론

지하에 매설된 가스배관은 환경적인 원인과 원치않는 외부의 원인들로 인해 부식(corrosion), 가우지(gouge), 덴트(dent)등의 다양한 손상이 발생하게 된다. 부식은 주로 환경적인 원인으로 발생하는 결함이고, 덴트는 둔탁한 외부의 기계하중에 의해 배관의 형상이 변형되는 결함이다. 또한 가우지는 외부 물체와의 접촉을 통해 재료의 손실이 발생하는 표면결함으로 정의될 수 있으며, 표면에서의 재료 손실이 발생하므로 배관의 두께가 감소하게 되어 건전성에 문제가 발생하게 된다. 이러한 손상배관에 대한 건전성 평가는 매우 중요하며, 적절한 공학적 평가법이 필요하다.<sup>(1,2)</sup> 그러한 손상배관의 공학적인 평가법은 두 가지로 분리될 수 있다. 첫 번째 방법은 실단면 한계하중접근법(net-section limit load approach)이며<sup>(3,4)</sup>, 단면 전체가 완전소성 상태에

도달할 때 손상배관은 과단되는 것으로 가정한다. 실단면 한계하중접근법은 충분한 연성을 갖는 배관 재료에 적합한 방법이다. 비록 실단면 한계하중접근법이 적용하기에는 단순하나, 검증을 위한 많은 실험을 필요로하는 등의 어려움이 있다. 배관 실단면의 항복을 기준으로 하는 실단면 한계하중접근법은 응력을 기반으로 하는 광범위기준(global criterion)에 해당한다. 두 번째 방법은 삼축응력(stress triaxiality)의 영향을 고려한 변형률기준(strain criterion)이며, 앞의 기준보다 더 근본적인 기준이다. 많은 연구자들은 연성재료의 파괴가 공극(void)의 생성, 성장, 합체 등의 일련의 과정을 통해 이루어지며, 정수압응력(hydrostatic stress)에 매우 밀접한 관련이 있음을 명시하였다.<sup>(5-7)</sup> 응력 영향을 고려한 변형률 모델은 응력과 변형률 같은 기계적인 변수들과 금속재료에 연관된 재료 상수로 구성되어 있다. 이러한 재료 상수는 일반적인 재료 물성으로

간주되며, 주어진 재료에 대해 결정되어야만 한다. 이러한 재료 상수들과 국부적인 응력과 변형률 정보를 이용하여 응력 영향을 고려한 변형률기준은 결함이 존재하는 구조물의 연성과파괴를 예측하기 위해 적용될 수 있다.

본 연구의 저자들은 천연가스배관에 주로 사용되는 API X65 강의 연성과파괴 해석을 위한 삼축응력 영향을 고려한 파괴변형률 기준을 제시한 바 있다.<sup>(8)</sup> 저자들은 파괴변형률 기준을 제시하기 위해 5가지의 다른 노치 반경을 갖는 인장시편에 대한 실험과 유한요소해석을 수행하였으며, 진과파괴변형률을 삼축응력의 함수로 제시하였다. 본 연구에서는 저자들에 의해 개발된 파괴변형률 기준을 적용하여 내압을 받는 가우지 손상배관에 대한 건진성 평가를 수행하였다. 평가 방법의 타당성을 검증하기 위해 5가지의 가우지 형상에 대한 실험과 유한요소해석 과정을 추가로 수행하였으며, 배관의 파열 압력을 가우지 결함의 함수로 제시하였다. 2 장에서는 저자들에 의해 개발된 삼축응력 기반의 파괴변형률 기준에 대한 간략한 요약할 것이고, 3 장에서는 가우지 손상배관에 대한 실험과 유한요소해석 과정에 대해 설명할 것이다. 그리고 4 장에서는 본 연구의 결론을 언급할 것이다.

## 2. 삼축응력 기반의 파괴변형률

### 2.1 인장실험

삼축응력이 연성과파괴에 미치는 영향을 정량화하기 위해 5가지의 인장 실험이 가스공사에서 수행되었다. 인장시편은 배관의 길이 방향에서 채취하여 실험조건에 맞도록 기계가공하였다. 실험에 사용된 시편의 형상은 Fig. 1 과 같으며, 노치가 없는 인장시편과 노치가 있는 인장시편으로 분리되어질 수 있다. Fig. 1 (a)는 노치가 없는 인장시편이며, Fig. 1 (b)는 노치 반경이 0.2R 인 시편이고, Fig. 1 (c)는 노치 반경이 1.5R, 3R, 6R 인 노치인장 시편이다. 하중에 따른 변형을 측정하기 위해 표점거리(gauge length)가 25 mm인 변위계(extensometer)를 사용하였다. 인장실험에 사용된 시험기의 최대 용량은 50 톤이며, 탄성영역에서는 0.5 mm/min, 이후에는 2.5 mm/min 의 속도로 인장실험을 실시하였다. 각 경우에 대해 실시된 실험의 회수는 3 회씩이다.

Fig. 2 는 본 연구에서 수행된 실험의 결과를 종합하여 공칭응력(engineering stress)과 공칭변형률(engineering strain)의 관계로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 각각의 경우에 대체로 일관된 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 2로부터 노치의 반경이 증가함에 따라 인장강도(tensile strength)는 감소하고, 파괴공칭

변형률(engineering fracture strain)은 증가함을 알 수 있다.

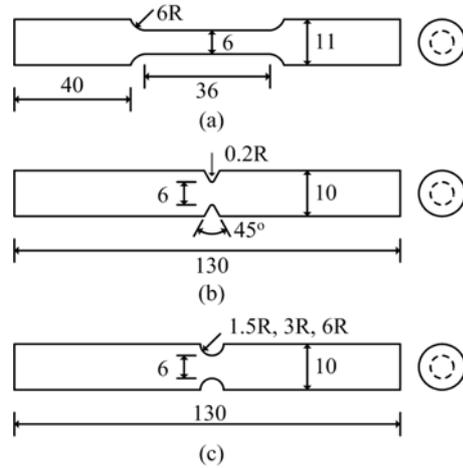


Fig. 1 Schematic models: (a) tensile specimens and (b, c) notched tensile test specimens

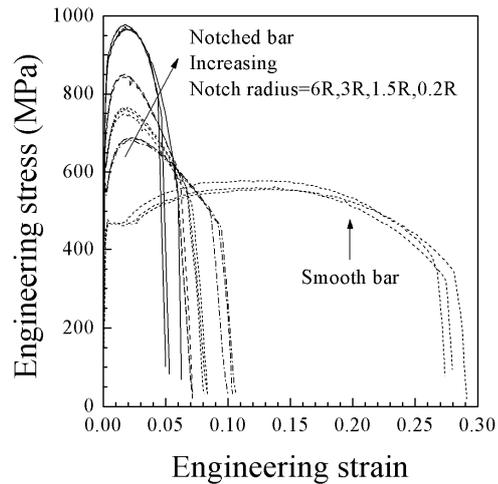


Fig. 2 Experimental results for tensile tests and notched tensile tests

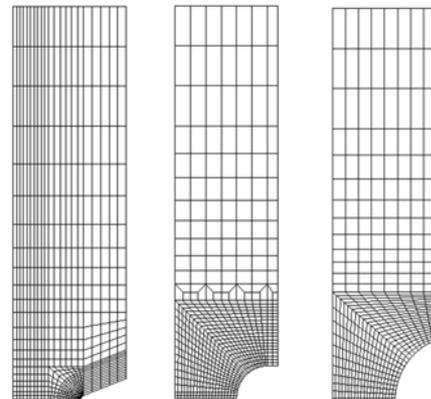


Fig. 3 FE meshes for notched tensile specimens: (a) notch=0.2R, (b) notch=1.5R and (c) notch=3R.

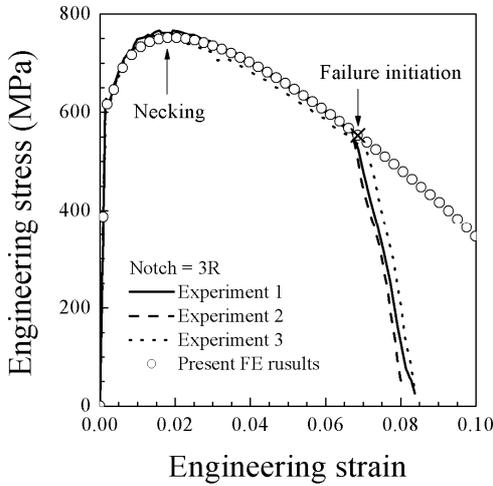


Fig. 4 Comparison of notched tensile tests with FE results, notch=3R

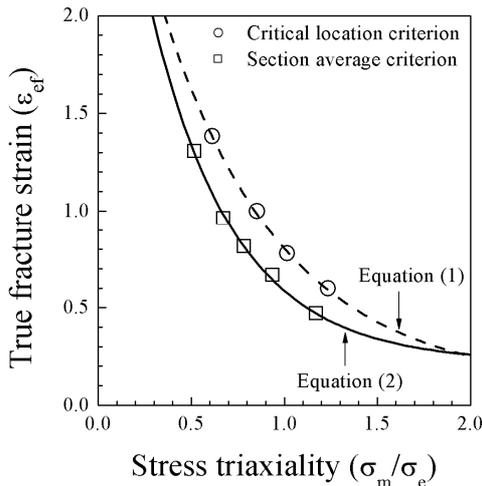


Fig. 5 Comparison of stress-modified fracture strain criterions

## 2.2 인장시편에 대한 유한요소해석

인장시편 및 노치인장시편의 실험 결과를 모사하고, 삼축응력 및 변형률의 분포를 구하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 적용된 유한요소 모델의 일부 형상은 Fig. 3 과 같다.

유한요소해석은 상용 프로그램인 ABAQUS 6.4 를 사용하였으며, 해석 모델의 요소는 8 절점 축대칭 요소인 CAX8R 를 사용하였다. 해석의 경계조건은 축대칭 조건과 면대칭 조건을 적용하였으며, 시편의 끝단에서 길이방향으로 강제 변위를 가하여 해석을 수행하였다. 노치 부위에서 발생하는 소성 변형을 충분히 모사하기 위해 대변형해석(large

deformation analysis)을 수행하였으며, 해석에 적용된 진응력-진변형률 선도는 Fig. 2 의 노치가 없는 인장시편에 대한 인장실험의 결과를 진응력과 진변형률로 변환하여 사용하였다.

Fig. 4 는 노치반경이 3R 인 노치인장시편에 대한 유한요소해석과 실험의 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 그림은 실험과 유한요소해석의 결과를 공칭응력과 공칭변형률의 관계로 나타낸 것이다. 그림으로부터 유한요소해석은 시편의 거동을 파괴전까지는 거의 정확하게 모사할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 4 로부터 전형적인 유한요소해석은 넥킹을 포함한 파괴가 발생하기 전까지의 거동은 잘 모사를 하나 균열 발생에 의한 급격한 응력 감소를 모사하지 못함을 알 수 있다.

## 2.3 파괴변형률 기준

실험과 유한요소해석의 결과를 바탕으로 삼축응력의 영향을 고려한 파괴변형률기준을 다음의 두가지 방법으로 고려하였다.

Criterion 1 : 삼축응력과 등가변형률의 모두를 고려하여 파괴가 발생할 것으로 예상되는 가장 결정적인 위치에서의 삼축응력과 등가 변형률을 고려하는 방법.

Criterion 2 : 국부적인 단면 감소가 발생하는 단면의 평균 삼축응력과 평균 등가응력을 고려하는 방법.

기준 1 과 기준 2 에 따른 파괴시의 등가변형률과 삼축응력의 결과를 바탕으로 각각에 대한 파괴변형률 기준을 개발하였다. Fig. 5 는 두 가지 기준에 따른 파괴시의 등가변형률과 삼축응력의 관계를 종합하여 나타낸 것으로, 각각의 경우가 그림과 같은 지수함수의 분포를 갖음을 알 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 5 의 결과를 바탕으로 다음과 같은 API X65 재료에 대한 삼축응력 영향을 고려한 파괴변형률 기준을 개발하였다.

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

$$\varepsilon_f = 3.41 * \exp\left(-2.23 \frac{\sigma_m}{\sigma_e}\right) + 0.22 \quad (2)$$

식 (1)은 기준 1 에 따른 파괴변형률 기준이고, 식 (2)는 기준 2 에 따른 파괴변형률 기준이다.

## 3. 가우지 손상배관의 파열압력

### 3.1 실패관 실험

Fig. 6 은 본 연구에서 고려한 이상화된 가우지 결함의 형상을 도식적으로 나타낸 것이다. 가우지 결함은 일반적으로 그림에서와 같이 결함의 폭은

좁고 긴 날카로운 형상을 취하게 된다. 본 연구에서는 결함의 발생 각도( $45^\circ$ )와 결함 선단의 곡률 반경( $r=2\text{ mm}$ )은 일정한 것으로 가정하고, 가우지 깊이( $d$ )와 길이( $l$ )를 변수로 고려하여 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 전절에서 설명한 방법을 적용하여 다양한 가우지 결함이 존재하는 배관에 대한 파열압력을 예측하였다. 또한 예측 방법의 타당성을 검증하기 위해 가스공사에서 수행된 실패관 파열압력 실험의 결과와 비교하였다. 가스공사에서 수행된 가우지 손상배관에 대한 파열압력 실험은 5가지의 가우지 길이에 대한 것이며, 동일한 깊이의 결함 형상을 고려하였다. 실험에 적용된 배관의 기하학적 형상은 Table 1에 정리하여 나타내었다. Fig. 7은 가우지 결함에 대한 실패관 실험을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 압력을 가하기 전의 실험 모습이고, Fig. 7(b)는 실험 후의 파열된 배관의 모습을 나타낸 것이다. 실험에 적용된 배관은 외경이 762 mm이고 두께가 17.5 mm이며, 배관의 총 길이는 2300 mm이다. 배관의 양단은 Fig. 7(a)에서와 같이 캡(cap)을 사용하여 용접하였으며, 물을 매질로 하여 압력을 가하였다.

### 3.2 유한요소해석

Fig. 8은 본 연구에서 적용된 가우지 결함을 갖는 배관의 전형적인 3차원 유한요소 모델의 형상을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 국부적인 소성 변형이 주로 발생하게 되는 결함 부위의 요소를 상대적으로 작게 모델링하였으며, 전체 형상의 대칭성을 고려하여 1/4만을 해석에서 고려하였다. 유한요소해석에 적용된 하중은 내압만을 고려하였으며, 내압에 의해 발행하는 등가 축방향 응력을 배관의 양 끝단에 작용하였다. 유한요소해석은 상용프로그램인 ABAQUS 6.4를 사용하였으며, 해석 모델의 요소는 20절점 육면체 요소인 C3D20R을 사용하였다. 또한 가우지 결함 부위에서 발생하는 소성변형을 충분히 모사하기 위해 대변형해석(large deformation analysis)을 수행하였으며, 해석에 적용된 진응력-진변형률 선도는 Fig. 9와 같다.

### 3.3 가우지 손상배관의 파열압력 예측

2장에서 설명한 파괴변형률 기준을 적용한 파열압력 예측의 타당성을 검증하기 위해 실험을 수행한 5가지 가우지 형상의 결과를 유한요소해석의 결과와 비교하였다. Fig. 10은 실험과 동일한 가우지 결함에 대한 유한요소해석 결과를 압력과 가우지 부위의 반경방향 변형의 관계로 요약하여 나타낸 것이다. 그림은 2장의 파단조건을 적용하여 구해진 압력까지 만을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 가우지 결함의 길이가 증가할수록 파열압력은 낮아지

며, 배관의 변형에 따른 강성도 낮아짐을 알 수 있다. Fig. 11은 실험과 유한요소해석에 의한 파열압력을 비교하여 나타낸 것이다. 가우지 길이가 300 mm인 경우를 제외하고는 모든 경우에서 실험결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 가우지 결함의 길이가 300 mm인 경우는 다른 손상배관의 경향성을 고려할 때 문제가 있는 것으로 생각된다. 따라서 파괴변형률을 적용한 가우지 손상배관의 파열압력 예측은 타당한 것으로 생각된다.

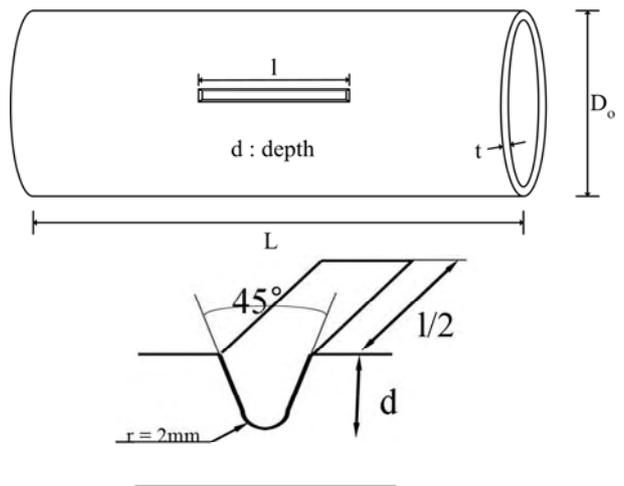


Fig. 6 Schematic illustration for pipes with gouge



(a)



(b)

Fig. 7 Test set-up of full scale burst test for pipes with gouge

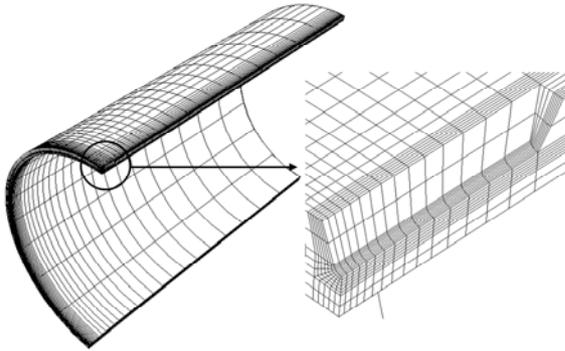


Fig. 8 Typical finite element mesh for pipes with gouge

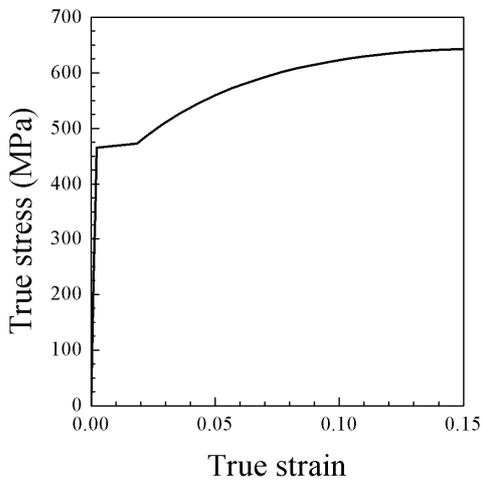


Fig. 9 True stress-strain curve for API X65, used in the present FE analysis

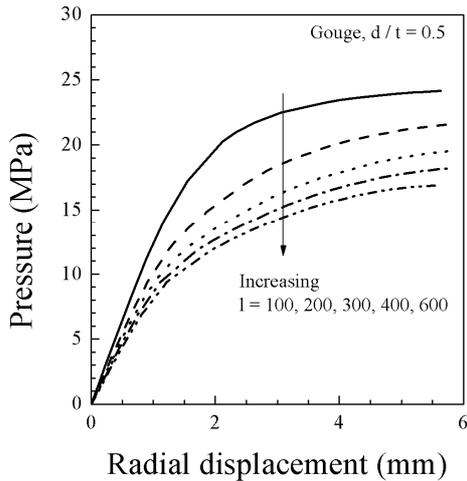


Fig. 10 Effect of gouge length on burst pressure of pipes with gouge,  $d/t=0.5$

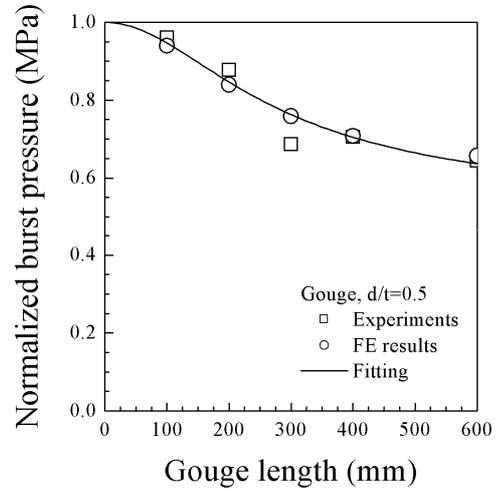


Fig.11 Comparison of burst pressure between experimental test and FE results

Table 1 Burst test geometries of pipes with gouge

Pipe no.	l (mm)	d/t	Test (MPa)	FEM (MPa)
MNA	100	0.5	24.71	24.16
MNB	200		22.56	21.58
MNC	300		17.65	19.51
MND	400		18.14	18.20
MNE	600		16.57	16.89

Fig. 11 의 파열압력은 다음과 같은 결함의 존재하지 않는 배관의 파열압력으로 무차원화한 것이다.

$$P_o = \frac{t}{R_m} \sigma_f \quad (3)$$

여기서  $t$ 와  $R_m$ 은 각각 배관의 두께와 평균반경을 나타낸 것이며,  $\sigma_f$ 는 유동응력(flow stress)으로 항복응력(yield stress)과 인장강도(tensile strength)의 평균값이다.

본 연구에서는 실험을 수행한 결함 형상을 포함한 다양한 가우지 결함 형상에 대한 파열압력을 예측하기 위해 Table 2 와 같은 결함을 갖는 배관에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 수행된 결함의 형상은 총 25 가지이다. Fig. 12 는 Table 2 의 모든 경우에 대해 유한요소해석으로부터 예측된 파열압력의 결과를 종합하여 나타낸 것이다. 그림의 심볼은 유한요소해석의 결과를 나타내는 것으로 모든 경우에서의 경향성은 일치하는 것을 알 수 있다. 또한 그림의 실선은 유한요소해석의 결과를 바탕으로 수행된 곡선적합(curve fitting)의 결과를 나타낸 것이며 다음과 같다.

$$P_f = P_o \left( \frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{t} \sqrt{1 + 0.16 \frac{d l^2}{t R t}}} \right) \quad (4)$$

여기서  $P_o$ 는 식 (3)과 같은 결함이 존재하지 않는 경우의 파열압력이다.

Table 2 Analysis matrix of pipes with gouge

Thickness t (mm)	Gouge depth d/t	Gouge length l (mm)
17.5	0.25	100
		200
		300
		400
		600
	0.375	100
		200
		300
		400
		600
	0.5	100
		200
		300
		400
		600
	0.625	100
		200
		300
		400
		600
0.75	100	
	200	
	300	
	400	
	600	

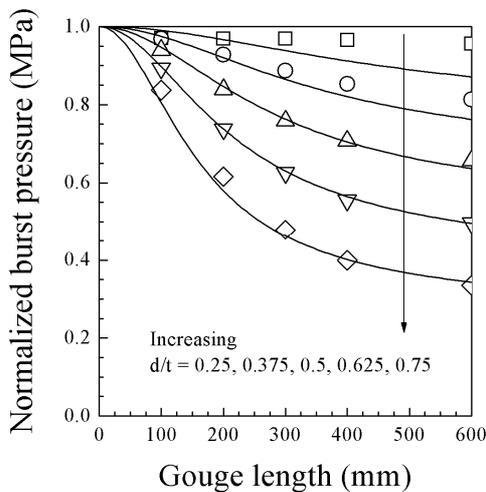


Fig. 12 Burst pressure solution for pipes with gouge

#### 4. 결론

본 연구에서는 가우지 손상배관의 건전성 평가를 수행하기 위해 삼축응력 기반의 파괴변형률 기준을 적용하였으며, 실패관 실험결과와 비교하여 방법의 타당성을 검증하였다. 또한 다양한 가우지 형상에 대한 유한요소해석을 수행하였으며, 가우지 손상배관의 파열압력을 가우지 결함의 깊이와 길이의 함수로 제시하였다.

#### 참고문헌

1. Wilkoski, G., Stephens, D., Krishnaswamy, P., Leis, B. and Rudland, D., "Progress in development of acceptance criteria for local thinned areas in pipe and piping components," Nuclear Engineering Design, Vol. 195, pp. 149-169, 2000.
2. Cosham, A. and Hopkins, P., "The effect of dents in pipelines-guidance in the pipeline defect assessment manual," International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 81, pp 127-139, 2004.
3. Kanninen, M.F., Zahoor, A., Wilkoski, G., Abousayed, I., Marschall, C., Broek, D., Sampath, S., Rhee, H., and Ahmad, J., "Instability predictions for circumferentially cracked Type-304 stainless pipes under dynamic loading," EPRI report NP-2347, Electric Power research Institute, Palo Alto, USA, 1982.
4. ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section IX, 1992.
5. Hancock, J. W. and Mackenzie, A. C., "On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subject to multi-axial stress states," Journal of the Physics and Mechanics of Solids, Vol. 24, pp 147-169, 1976.
6. McClintock, F. A., "A criterion of ductile fracture by the growth of holes," Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, pp 363-371, 1968.
7. Rice, J. R. and Tracey, D. M., "On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields," Journal of the Physics and Mechanics of Solids, Vol. 17, pp 201-217, 1969.
8. Oh, C. K., Kim, Y. J., Park, J. M., Baek, J. H. and Kim, W. S., "Development of stress-modified fracture strain for ductile failure of API X65 steel," International Journal of Fracture, Submitted.