

< 논문 >

## 파괴변형률모델에 기초한 결함이 존재하는 API X65 배관의 연성 파괴 해석

오창균\* · 김윤재† · 백종현\*\* · 김영표\*\* · 김우식\*\*  
(2006년 1월 26일 접수, 2006년 6월 22일 심사완료)

### Ductile Failure Analysis of Defective API X65 Pipes Based on Stress-Modified Fracture Strain Criterion

Chang-Kyun Oh, Yun-Jae Kim, Jong-Hyun Baek, Young-Pyo Kim and Woo-Sik Kim

**Key Words :** Ductile fracture(연성파괴), API X65 steel(API X65 강), Stress triaxiality(삼축응력), Fracture strain(파괴변형률)

#### Abstract

A local failure criterion for the API X65 steel is applied to predict ductile failure of full-scale API X65 pipes with simulated corrosion and gouge defects under internal pressure. The local failure criterion is the stress-modified fracture strain for the API X65 steel as a function of the stress triaxiality (defined by the ratio of the hydrostatic stress to the effective stress). Based on detailed FE analyses with the proposed local failure criteria, burst pressures of defective pipes are estimated and compared with experimental data. The predicted burst pressures are in good agreement with experimental data. Noting that an assessment equation against the gouge defect is not yet available, parametric study is performed, from which a simple equation is proposed to predict burst pressure for API X65 pipes with gouge defects.

#### 1. 서 론

지하에 매설된 가스배관의 사용적합성(fitness-for-service)을 판단하기 위해서는 부식이나 가우지와 같은 발생 가능한 결함에 대한 공학적 평가법이 필요하다.<sup>(1-3)</sup> 가스배관과 같이 충분한 연성을 갖는 배관의 건전성 평가에는 실단면 한계하중 접근법(net-section limit load approach)이 사용되어질 수 있다.<sup>(4,5)</sup> 이러한 방법에서는 단면 전체가 완전 소성 상태에 도달할 때 결함배관은 파단되는 것으로 가정한다. 비록 한계하중접근법이 적용하기는 단순하나, 검증을 위한 많은 실험실 실험을 필요로 하는 등의 어려움이 있다. 연성파괴에 대한 보다 더 근본적인 평가는 국부파손모델(local failure criteria)에 기초하여 수행되어질 수 있다. 연성계료

의 파괴는 정수압응력(hydrostatic stress)과 매우 밀접한 관련이 있으며, 응력상태를 고려한 파괴변형률을 사용함으로써 효과적으로 예측되어질 수 있다.<sup>(6-12)</sup> 최근에 본 논문의 저자들은 API X65 강에 대한 파괴변형률 모델을 정수압응력과 등가응력(equivalent stress)의 비인 삼축응력(stress triaxiality)의 함수로 제시한 바 있다.<sup>(13)</sup> 저자들은 인장시편과 4 가지의 노치반경을 갖는 노치인장시편에 대한 실험과 유한요소해석의 결과를 바탕으로 파괴변형률 기반의 국부파손모델을 개발하였다.

본 논문에서는 저자들에 의해 개발된 API X65 강에 대한 국부파손모델을 적용하여 내압을 받는 부식과 가우지 결함배관의 연성파괴를 예측하고자 한다. 제안된 국부파손모델과 3 차원 유한요소해석을 바탕으로 결함배관의 파괴압력을 예측하고 실험실 실험 결과와 비교함으로써 저자들에 의해 제안된 연성파괴 예측방법의 타당성을 검증하고자 한다. 가우지 결함배관의 건전성을 평가하기 위한 공학적 방법에 대한 연구는 아직 미미한 상태이다 따라서 다양한 형상의 가우지 결함배관의 건전성 평가에 대한 연구는 필요하다. 본 연구에서는 다

† 책임저자, 회원, 고려대학교 기계공학과  
E-mail : kimy0308@korea.ac.kr  
TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)926-9290

\* 회원, 고려대학교 기계공학과

\*\* 회원, 한국가스공사(KOGAS)

양한 gauze 결함 형상에 대한 유한요소해석의 결과를 바탕으로 gauze 결함배관의 파열압력을 예측하기 위한 공학적 평가식을 제시하였다.

### 2. 파괴변형률 모델

저자들은 최근에 API X65 강 of 연성파괴를 예측하기 위한 국부파손모델을 파괴변형률에 기초하여 제시하였다.<sup>(13)</sup> 이 장에서는 제안된 파괴변형률 모델에 대한 간략한 설명을 하고자 한다.

먼저, 삼축응력의 영향을 알아보기 위해 인장시편과 4 가지의 노치반경의 노치인장시편에 대한 인장실험을 수행하였다. 시편은 천연가스 소송에 주로 사용되는 API X65 배관에서 길이방향으로 채취하였다. 실험으로부터 노치반경이 감소함에 따라 항복강도와 인장강도는 증가한 반면, 파괴가 발생하기까지의 변형률은 감소함을 알 수 있었다.

인장 및 노치인장시편에 대한 인장실험을 모사하기 위한 유한요소해석을 ABAQUS 6.4<sup>(14)</sup>을 사용하여 수행하였다. 해석 모델의 요소는 8 절점 축대칭 요소인 CAX8R 을 사용하였으며, 기하학적 비선형을 고려한 해석을 수행하였다. 유한요소해석의 결과로부터 응력과 변형률의 정보를 직접적으로 구할 수 있었다. 파괴변형률 모델은 인장 및 노치인장 시편에 대한 실험과 유한요소해석의 결과를 병행함으로써 구해질 수 있다. Fig. 1 은 저자들에 의해 제안된 파괴변형률 모델을 나타낸 것으로서 파괴가 발생하는 시점의 등가변형률과 삼축응력의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 식 (1)은 파괴가 발생하는 위치에서의 응력과 변형률 값을 바탕으로 구해진 모델이며, 다음과 같다.

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

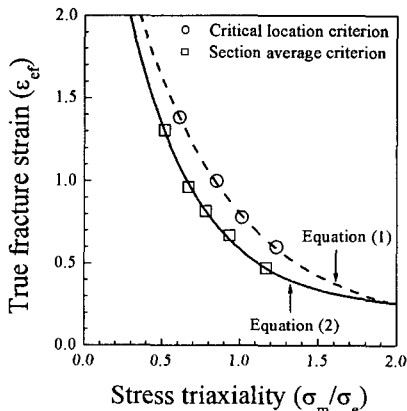


Fig. 1 True fracture strains(equivalent strain to fracture) as a function of the stress triaxiality<sup>(13)</sup>

또한 Fig. 1 의 식 (2)는 초소단면의 평균 응력과 변형률 값을 바탕으로 구해진 모델이며, 다음과 같다.

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

식 (1), (2)에서  $\sigma_m$  은 정수압응력(hydrostatic stress)이며, 다음과 같이 주응력(principal stress)에 의해 정의된다.

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

또한 식 (1), (2)에서  $\sigma_e$  은 등가응력(equivalent stress)를 나타내는 것이며, 다음과 같다.

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

Fig. 1 은 API X65 강에 대한 파괴변형률이 삼축응력의 증가에 따라 매우 급격하게 감소함을 의미한다. 또한 이러한 삼축응력에 따른 파괴변형률의 지수함수적인 감소 경향은 다른 연구가들에 의해서도 언급된 바 있다.<sup>(7,9,11)</sup> 한가지 주목할 만한 것은 삼축응력에 입각한 파괴변형률 모델이 응력과 변형률의 이력을 포함한다는 것이다. 따라서 식 (1)과 (2)의 삼축응력은 다음과 같이 평균 삼축응력을 사용해야 한다.

$$\left( \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right)_{ave} = \frac{1}{\epsilon_{ef}} \int_0^{\epsilon_{ef}} \frac{\sigma_m}{\sigma_e} d\epsilon_e \quad (5)$$

식 (5)는 연성파괴에 대한 응력과 변형률의 하중이력을 고려하기 위한 것이다.

### 3. 부식배관의 파열압력 예측

부식 결함배관의 파열압력 기준을 마련하기 위한 연구들이 최근 20 년간 많이 수행되어왔으며, ASME B31G<sup>(15)</sup> RSTRENG<sup>(16)</sup> PCORRC<sup>(17)</sup> 등과 같은 많은 평가법들이 제안되었다. 이러한 평가법들은 부식 결함배관의 한계하중에 입각하여 제시된 것이다. 고인성 재료를 사용한 배관인 경우에는 이러한 한계하중접근법은 타당하며, 적용의 편의성에 의해 실제적으로 많이 사용되어진다.<sup>(4,5)</sup> 이 장에서는 기존의 연구에서 적용된 한계하중접근법 대신 2 장에서 제안된 파괴변형률 모델을 적용하여 부식 결함배관의 건전성 평가를 수행하였으며, 실패관 실험의 결과와 비교하였다.

#### 3.1 부식배관에 대한 실패관 파열압력 실험

API X65 강에 대한 실패관 파열압력 실험이 가스 공사에서 수행되어졌다. 실험에 적용된 배관의 외경은 762mm 이고, 두께는 17.5mm 이다. 실험배관의 양 끝은 반구형 캡을 용접하여 부착하였다. 실험에 적용된 배관의 기하학적 형상은 Fig. 2 에 나타내었으며, 구체적인 부식배관의 형상은 Table 1 에 요약하여 나타내었다. Fig. 2 에서와 같이 직사각형의 부식결함을

갖도록 기계가공하였으며, 결합부위에서의 두께를 일정하게 유지하였다. 또한 부식결합에서의 과도한 응력집중 현상을 방지하기 위해 내부표면 모서리에서 약간의 곡률을 주어 가공하였다. 그리고 부식결합의 형상을 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 부식의 깊이, 폭, 길이를 각각  $d, c, l$  을 사용하여 나타내었다.

배관의 압력은 물을 사용하여 가해졌으며, 실험으로부터 부식배관이 파단되는 시점의 파열압력을 측정하였다. Fig. 3 은 실패관 실험장치를 나타낸 것이다. 모든 실험배관은 결합부위에서 과도한 소성변형에 의해 팽창변형(bulging deformation)을 보였으며, 결합부위에서 배관의 길이방향으로 관통 균열이 발생하며 파단되었다. 파열압력 실험의 결과는 Table 1 에 요약하여 나타내었으며 파열압력은 결합의 깊이와 길이에는 영향을 받지만 결합의 폭에는 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

3.2 부식배관에 대한 유한요소해석

부식 결합배관에 대한 실패관 실험을 모사하기 위해 상용 프로그램인 ABAQUS 6.4<sup>(14)</sup>를 사용하여 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 4 는 본 연구에서 적용된 직사각형의 부식배관에 대한 전형적인 3 차원 유한요소모델의 형상을 나타낸 것이며, Fig. 5 는 본 연구에서 적용된 API X65 강의 인장물성이다. 모델은 전체 형상의 대칭성을 고려하여 1/4 만을 해석에서 고려하였으며, 대칭 부위에는 적절한 면대칭 경계조건을 가하여 해석을 수행하였다. 배관의 양 끝단의 캡에 의한 영향을 고려하기 위해 내압에 의해 발생하는 등가 축방향 응력을 배관의 끝단에 작용시켰다. 해석에 적용된 요소는 20 질점 육면체 요소인 C3D20R 을 사용하였으며 부식 결합부위에서의 소성변형을 충분히 모사하기 위해 대변형해석을 수행하였다. 또한 결합부위의 네킹과 같은 국부적인 단면 감소에 의해 발생하는 불안전성 문제를 고려하기 위해 ABAQUS 에서 지원하는 RIKS 옵션<sup>(14)</sup>을 사용하였다.

3.3 실패관 실험과 유한요소해석 결과 비교

Fig. 6 은 부식배관에 대한 전형적인 유한요소해석의 결과로부터 구해진 하중과 결합부위의 반경방향 변위의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 6 은 DB 부식배관에 대한 유한요소해석의 결과이며 하중변위 곡선의 기울기가 0 이 되는 최대하중 지점과 2 장에서 제시한 파괴변형률 모델[식 (1) 혹은 (2)]을 적용하여 예측된 파손시점을 포함하고 있다. Fig. 6 은 초기에는 내압이 증가함에 따라 반경방향의 변형이 증가하며, 최대하중에 도달한 이후에는 변형이 증가함에도 불구하고 하중이 감소함을 보여주는 것이다. 최대하중 이후의 변형형상은 Fig. 7 과 같으며, 국부적인 단면감소가 발생함을 알 수 있다. 따라서 파괴변형률 모델에 의해 예측되는 파손 시점은 항상 최대하중에 도달한 이후에 발생하게 된다. 하지만 실패관 실험은 하중제어(load-controlled) 방식에 의해 진행되므로 내압이 최대값

에 도달하게 되면 소성불안정(plastic instability) 파열은 시작된다. 따라서 식 (1)과 식 (2)의 두가지 파괴변형률 모델은 같은 최대압력(파열압력)의 결과를 제시하게 된다. 또한 부식 결합배관의 파손은 소성불안정 파열에 의한 소성붕괴(plastic collapse)로 생각할 수 있다.

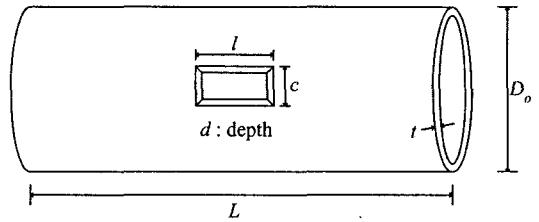


Fig. 2 Pipe with a simulated corrosion defect

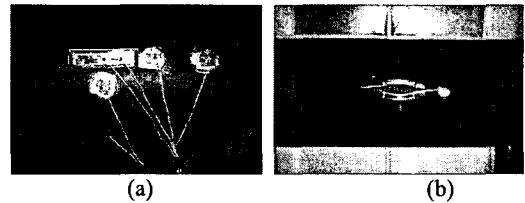


Fig. 3 Test set-up of full-scale burst test for pipes; (a) defect (b) failure

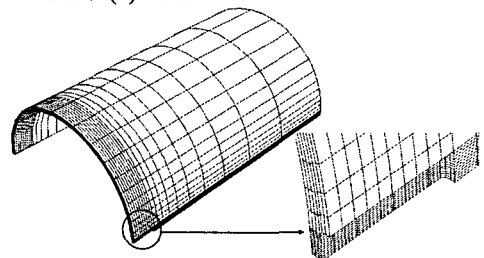


Fig. 4 A FE mesh for pipe with the simulated corrosion defect

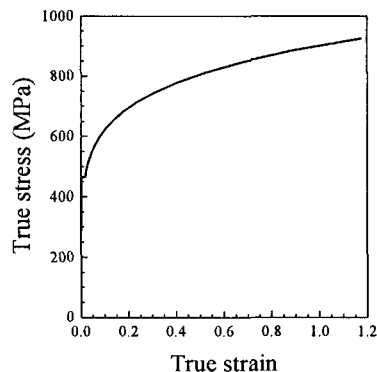
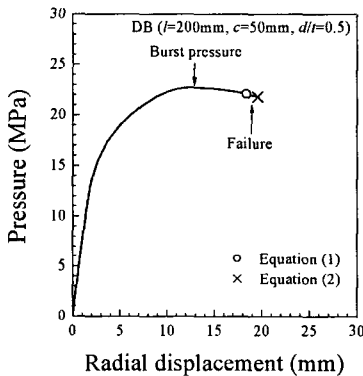


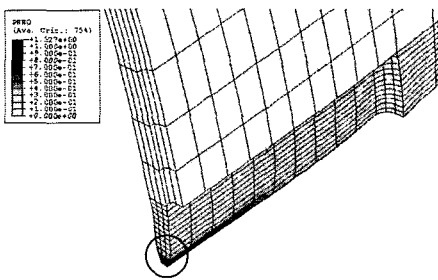
Fig. 5 True stress-strain data for API X65, used in the present FE analysis

**Table 1** Summary of full-scale tests of pipes with corrosion defect

Pipe no.	$l$ (mm)	$c$ (mm)	$d/t$	$P_{exp}$ (MPa)	$P_{pred}/P_{exp}$
DA	200	50	0.25	24.11	1.025
DB	200	50	0.5	21.76	1.044
DC	200	50	0.75	17.15	1.035
LA	100	50	0.5	24.30	1.025
LC	300	50	0.5	19.80	1.042
CB	200	100	0.5	23.42	0.967
CC	200	200	0.5	22.64	0.989



**Fig. 6** A typical FE load-radial displacement record for pipes with simulated corrosion defects with failure points predicted from the present approach



**Fig. 7** Deformed shape in the defective region for pipes with simulated corrosion defects

Table 1 에서는 유한요소해석으로부터 예측된 최대 압력( $P_{pred}$ )과 실험에 의한 파열압력( $P_{exp}$ )의 비를 요약하여 나타내었다. 전체적으로 예측된 값은 실험과 5% 이내에서 매우 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 가우지배관의 파열압력 예측

본 연구에서 고려한 두번째 결함은 외부 물체와의 원치않는 접촉을 통해 표면결함이 발생하는 가우지

결함이다. 가우지 결함 역시 표면에서의 재료손실로 인해 배관의 하중지지 능력을 감소시키는 가스배관의 주요 결함의 하나이다. 본 연구에서는 부식결함에서와 동일하게 2 장에서 제시된 파괴변형률 모델을 적용하여 가우지 결함배관의 최대압력을 예측하고, 실험관 실험결과와 비교하여 타당성을 검증하고자 한다. 또한 다양한 가우지 결함에 대한 유한요소 변수해석을 수행하여 가우지 결함에 대한 공학적 평가식을 제시하고자 한다.

4.1 가우지 결함배관에 대한 실험관 파열압력 실험

Fig. 8 은 가우지 결함배관에 대한 기하학적 형상을 나타낸 것이다. 가우지 결함배관에 대한 주요 치수는 Table 2 에 요약하여 나타내었다. 배관의 기하학적 형상은 부식배관의 경우와 동일하다. 배관의 외경( $D_o$ )은 762mm 이고 두께( $t$ )는 17.5mm 이다. 또한 배관의 실험 배관의 총길이( $L$ )는 2300mm 이다. 가우지는 45°의 V-노치를 갖으며 2mm의 노치반경을 갖는 것으로 가정하였다. 모든 실험에서 가우지 결함의 깊이는 배관 두께의 50%( $d/t=0.5$ )인  $d=8.75$ mm 로 고정하였으며, 가우지 길이( $l$ )는 100 ~ 600mm의 변화를 갖도록 하였다. 배관은 물을 매질로 하여 가압하였으며, 라가먼트가 파단되는 시점에서의 압력을 측정하였다. Fig. 9 는 실험관 실험에 의한 가우지 결함배관의 파열 모습을 실험 전과 후로 나타낸 것이다. 실험을 수행하는 동안에 배관의 표면에서의 변형률 값을 변형률계(strain gauge)를 사용하여 Fig. 9(a)와 같은 위치에서 측정하였다. S1 과 S2 의 두 변형률계는 가우지 중심으로부터 원주방향으로 각각 24.9 mm 와 54.9 mm 떨어진 위치에 부착되어졌다.

4.2 가우지배관에 대한 유한요소해석

본 연구에서는 가우지 결함배관에 대한 파열압력을 예측하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 10 은 본 연구에서 적용된 가우지 결함배관에 대한 전형적인 3 차원 유한요소 모델의 형상을 나타낸 것이다. 유한요소해석에 적용된 하중은 내압만을 고려하였으며, 내압에 의해 발생하는 등가 축방향 응력을 배관의 양 끝단에 작용하였다. 유한요소해석은 상용프로그램인 ABAQUS 6.4 를 사용하였으며, 해석 모델의 요소는 20 절점 육면체 요소인 C3D20R 을 사용하였다. 또한 가우지 결함 부위에서의 소성변형을 충분히 모사하기 위해 대변형해석을 수행하였다.

4.3 실험관 실험과 유한요소해석 결과 비교

Fig. 11 은 MNA 배관과 MNC 배관의 S1 과 S2 위치에서 측정된 원주방향 변형률의 값을 유한요소해석의 결과와 비교하여 나타낸 것이며, 배관의 내압과 변형률의 관계로 나타내었다. Fig. 11 에서 실험은 배관이 파열되는 순간까지의 값을 나타낸 것이며, 유한요소해석의 값은 2 장에서 제시된 식 (1)을 적용하여 예측된 파열압력까지의 값을 나타낸 것이다. 2 장에서 제시된 두가지 파괴변형률 모델에 대한 비교는 다시 언

급할 것이다. MNC 배관은 실험과 유한요소해석의 결과가 가장 일치하지 않는 경우에 해당하며, 다른 경우에는 실험과 해석의 결과가 매우 잘 일치하였다.

Fig. 12는 파괴가 발생하는 시점에서 가우지 결합의 리가먼트에서의 삼축응력( $\sigma_m/\sigma_e$ )과 등가변형률( $\epsilon_{eq}$ )의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 12(a)는 MNB 배관에 대한 분포이고 Fig. 12(b)는 MNE 배관에 대한 결과이다. 또한 그림의 x 축은 가우지 결합부위의 리가먼트를 무차원화하여 나타낸 것으로, 0은 배관의 내부표면을 나타내는 것이고 1은 가우지 결합선단을 나타내는 것이다. Fig. 12로부터 등가변형률은 가우지 결합선단에서 매우크게 발생하는 반면에 삼축응력은 리가먼트의 중앙에서 가장 큰 값을 갖음을 알 수 있다.

식 (1)을 적용하여 결합배관의 파열압력을 예측하기 위해서는 최소 리가먼트의 모든 점에서 응력과 변형률 값을 구해야하며, 이러한 값들을 바탕으로 파괴가 발생하는 지점을 찾아야 한다. 본 연구에서 고려하는 모든 경우의 파괴 발생은 가우지 결합선단에서 발생하였으며, 이러한 지점에서의 응력과 변형률 값을 식 (1)에 적용하여 파열압력을 예측하였다. 또한 식 (2)를 적용한 파열압력의 예측에는 가우지 선단에서 배관의 내부표면까지의 최소 리가먼트에서의 응력과 변형률 값을 평균하여 사용하였다.

Fig. 13은 유한요소해석으로부터 구해진 삼축응력과 등가변형률의 관계를 식 2장에서 제시된 방법에 의해 예측된 파괴 시점까지 나타낸 것이다. 본 연구에서는 2장에서 언급한 바와 같이 두가지 파괴변형률 모델을 적용하여 연성파괴의 예측을 수행하였다. 또한 Fig. 13에서 점선으로 나타낸 것은 응력과 변형률의 이력의 영향을 고려하기 위해 식 (5)와 같이 삼축응력의 평균값을 적용한 결과를 나타낸 것이다. 모든 배관에서 삼축응력과 등가변형률의 관계는 유사한 결과를 나타내었으며, 삼축응력이 등가변형률에 무관하게 거의 일정한 분포를 나타내었다. 또 하나의 주목할만한 것은 평균 삼축응력의 값이 매우 낮다는 것이다. 가우지 선단의 국부적인 응력과 변형률 값을 바탕으로 하는 경우에는 약 0.6 정도이고, 최소 리가먼트의 평균 응력과 변형률 값을 바탕으로 하는 경우에는 약 0.85 정도의 삼축응력 값을 나타내었다. 이러한 낮은 삼축응력 값은 내압을 받는 배관의 경우에 일반적인 값이다. 그리고 식 (2)를 적용한 경우의 삼축응력 값이 식 (1)을 적용한 경우보다 작은 것은 Fig. 12와 같은 최소 리가먼트에서의 삼축응력 분포를 갖기 때문이다.

Fig. 14는 유한요소해석의 결과를 압력과 결합부위의 반경방향 변형의 관계로 나타낸 것이며, 파괴가 발생할 것으로 예측되는 시점까지 나타낸 것이다. 본 연구에서는 100~600 mm의 가우지 결합의 길이를 고려하였으며, 그림에서와 같이 가우지 결합의 길이가 증가할수록 배관의 강성은 낮아지며, 파열압력도 낮아짐을 알 수 있었다. 식 (1)

과 (2)에 의해 예측되는 파손은 모든 경우에 소성불안정(plastic instability) 파열이 시작되는 압력 이전에 발생하였으며, 두 식에 의한 최대압력의 차이는 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 부식배관에서와는 달리 가우지 배관의 파손은 연성파괴에 의해 진행됨을 알 수 있다. 부식배관의 파손은 연성파괴에 의한 파손이 아닌 소성불안정 파열이 발생하는 소성붕괴(plastic collapse)에 의한 파손이었다.

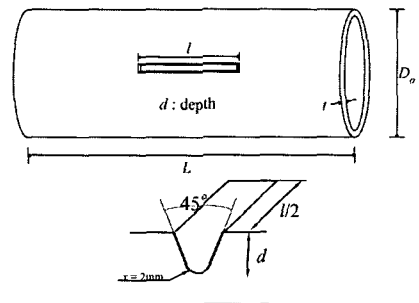


Fig. 8 Schematic illustrations for pipes with gouge

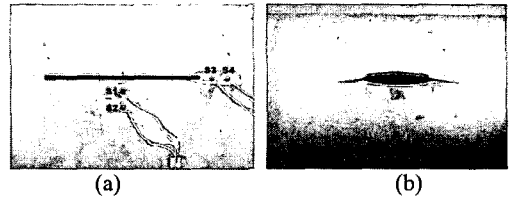


Fig. 9 (a) Initial gouge defect and strain measurement locations, and (b) gouge at failure

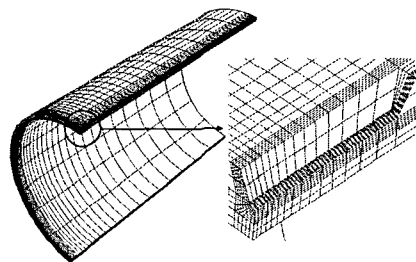


Fig. 10 A typical finite element mesh for pipes with gouge

Table 2 Summary of full-scale tests of pipes with gouge defect

Pipe no.	d/t	l (mm)	P <sub>exp</sub> * (MPa)	P <sub>pred</sub> /P <sub>exp</sub> Eq. (1)	P <sub>pred</sub> /P <sub>exp</sub> Eq. (2)
MNA	0.5	100	24.68	0.979	0.983
MNB	0.5	200	22.48	0.960	0.973
MNC	0.5	300	17.70	1.103	1.117
MND	0.5	400	18.14	1.003	1.011
MNE	0.5	600	16.57	1.020	1.021

$$P_f = P_o \left( \frac{1 - \frac{d}{t}}{1 - \frac{d}{t} \cdot \frac{1}{M_g}} \right) ; M_g = \sqrt{1 + 0.64 \frac{d}{t} \cdot \frac{\ell^2}{4R_m t}} \quad (8)$$

식 (8)에 의해 예측된 파열압력은  $d/t$ 가 작은 경우에는 다소 보수적인 예측을 하지만,  $d/t$ 가 큰 경우에는 유한요소해석의 결과와 매우 잘 일치한다. 식 (8)은 특정형상( $D_o=762\text{mm}$ ,  $t=17.5\text{mm}$ ,  $R_m/t=21.3$ )의 배관에 대하여 구해진 식이다. 따라서 만일 API 5L X65 강으로 만들어진 배관의  $R_m/t$  값이  $R_m/t=21.3$  과 크게 다르지 않다면, 식 (8)은 적용될 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 API X65 강에 대한 국부파손모델을 적용하여 내압을 받는 부식배관과 가우지배관에 대한 실패관 파열압력을 예측하였다. 연구에서 적용된 국부파손모델은 API X65 강에 대한 삼축응력의 영향을 고려한 파괴변형률 모델이다. 이러한 국부파손모델과 3 차원 유한요소해석의 결과를 바탕으로 결함배관의 연성파괴를 예측하였으며, 실패관 실험과 비교하였다.

부식결함배관의 파손은 최대하중에 도달한 이후에 발생하며, 국부적 단면감소가 발생하는 소성붕괴에 의한 파손이다. 유한요소해석에 의해 예측된 부식배관의 파열압력은 실패관 실험과 약 5% 이내에서 매우 잘 일치하였다. 반면에 가우지결함배관의 파손은 소성붕괴가 아닌 연성파괴에 의해 진행되며, 예측된 파열압력은 실패관 실험과 매우 잘 일치하였다. 또한 본 연구에서는 다양한 가우지 결함형상에 대한 유한요소해석의 결과를 바탕으로 가우지결함배관에 대한 공학적 건전성 평가 식을 제안하였다.

본 연구에서는 국부파손모델을 실구조물에 적용하고 실패관 실험 결과와 비교함으로써 국부파손모델에 기초한 연성파괴 예측 방법론에 대한 체계적인 연구를 수행하였으며, 이러한 방법론에 대한 충분한 타당성을 입증하였다. 그러므로 이러한 국부파손모델을 적용한 연성파괴 예측 방법론은 다양한 결함 및 하중조건에 적용되어 연성재료의 파괴예측에 매우 유용하게 적용될 것으로 생각된다.

### 참고문헌

(1) Wilkoski, G., Stephens, D., Krishnaswamy, P., Leis, B. and Rudland, D., 2000, "Progress in Development of Acceptance Criteria for Local Thinned Areas in Pipe and Piping Components," *Nuclear Engineering Design*, Vol. 195, pp. 149~169.  
 (2) Cosham, A. and Hopkins, P., 2004, "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.  
 (3) American Petroleum Institute, 2000, Specification for Line Pipe.  
 (4) Kanninen, M.F., Zahoor, A., Wilkoski, G., Abousayed, I., Marschall, C., Broek, D., Sampath, S., Rhee, H., and Ahmad, J., 1982, "Instability Predictions for Circumferentially Cracked Type-304 Stainless Pipes Under Dynamic Loading," EPRI report NP-2347, Electric Power research Institute, Palo Alto, USA.  
 (5) ASME, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section IX, 1992.  
 (6) McClintock, F. A., 1968, "A Criterion of Ductile Fracture by the Growth of Holes," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, pp. 363~371.  
 (7) Rice, J. R. and Tracey, D. M., 1969, "On the Ductile Enlargement of Voids in Triaxial Stress Fields," *Journal of the Physics and Mechanics of Solids*, Vol. 17, pp. 201~217.  
 (8) Clausing, D. P., 1970, "Effect of Plastic Strain State on Ductility and Toughness," *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol. 6, pp. 71~85.  
 (9) Hancock, J. W. and Mackenzie, A. C., 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*, Vol. 24, pp. 147~169.  
 (10) Mackenzie, A., Hancock, J. and Brown, D., 1977, "On the Influence of State of Stress on Ductile Failure Initiation in High Strength Steels," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 9, pp. 167~188.  
 (11) 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.  
 (12) Alves, M. and Jones, N., 1999, "Influence of Hydrostatic Stress on Failure of Axisymmetric Notched Specimens," *Journal of the Physics and Mechanics of Solids*, Vol. 47, pp. 643~667.  
 (13) Oh, C. K., Kim, Y. J, Park, J. M, Baek, 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  
 (14) Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc., 2005, ABAQUS Version 6.4 User's manual.  
 (15) ANSI/ASME B31 G, 1991, Manual for Remaining Strength of Corroded Pipelines.  
 (16) Kiefner, J. F. and Vieth, P.H., 1989, "A Modified Criterion for Evaluating the Remaining Strength of Corroded Pipe," *American Gas Association*, Catalog No. L51609, PR3-805.  
 (17) Stephens, D. R., Leis, B. N., Kurre, J. D. and Rudland, D. L., 1999, "Development of an Alternative Failure Criterion for Residual Strength of Corrosion Defects in Moderate-to-High Toughness Pipe," Battelle report to PRC International Report, A. G. A. Gatalog Number L51794, January.