

가스배관 용접부위 부식에 대한 파열압력 평가

김영표[†]·김우식*·이영광**·오규환**

The Evaluation of Burst Pressure for Corroded Weld in Gas Pipeline

Young-Pyo Kim, Woo-Sik Kim, Young-Kwang Lee and Kyu-Hwan Oh

Key Words: Corrosion defect(부식손상), Burst Pressure(파열압력), Corroded Weld(용접부 부식)
Full scale burst test(실배관 파열시험), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract

The failure assessment for corroded pipeline has been considered with the full scale burst test and the finite element analysis. The burst tests were conducted on 762 mm diameter, 17.5 mm wall thickness and API 5L X65 pipe that contained specially manufactured rectangular corrosion defect. The failure pressure for corroded pipeline was measured by burst testing and classified with respect to corrosion sizes and corroded regions - the body, the girth weld and the seam weld of pipe. Finite element analysis was carried out to derive failure criteria of corrosion defect on the pipe. A series of finite element analyses were performed to obtain a limit load solution for corrosion defects on the basis of burst test.

As a result, the criteria for failure assessment of corrosion defect within the body, the girth weld and the seam weld of API 5L X65 gas pipeline were proposed.

1. 서 론

기호설명

D	배관외경
t	배관두께
L	부식길이(배관길이방향)
W	부식폭(배관 원주방향)
d	부식깊이
σ_{YS}	배관의 항복강도
$\sigma_{UTS, True}$	배관의 진 인장강도
$\sigma_{UTS, Engineering}$	배관의 공칭 인장강도
P_f	파열압력

일반적으로 지하에 매설된 가스배관은 부식이 발생할 가능성이 항상 존재한다. 부식손상 배관이 발생하면 운전압력의 감소, 보수 혹은 교체 등에 많은 비용이 소요된다. 또한 배관의 안전성과 건전성 확보는 배관 사고시 발생하는 손실을 줄이기 위해 무엇보다 중요한 사항이다. 따라서 배관에 발생하는 부식손상이 배관 건전성에 미치는 영향에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다.

압력만이 작용하는 경우, 부식배관의 파열압력을 평가하는 기준 중 가장 널리 알려진 것은 ASME B31G 및 Modified B31G 기준이다.^(1,2) 이러한 기준들은 광범위하게 사용되고 있지만 최근 제작된 고인성 배관에는 너무 보수적인 평가 결과를 나타낸다.

1990년대 초반부터 실크기 배관 파열시험과 유한요소해석 결과를 토대로 새로운 평가기준을 개발하였다. 고인성 배관에 적용할 수 있는 대표적

[†] 한국가스공사 연구개발원

E-mail : ypkim@kogas.re.kr

TEL : (031)400-7482 FAX : (031)416-9014

* 한국가스공사 연구개발원

** 서울대학교 재료공학부

인 부식배관 파열압력 평가 기준은 Battelle에서 개발한 PRCI/Battelle PCORRC 소성붕괴 기준(이하 PCORRC)과 British Gas와 DNV가 공동으로 개발한 BG/DNV Level 1(이하 BG/DNV) 기준이다.⁽³⁻⁴⁾ PCORRC 기준과 BG/DNV 기준은 부식손상부의 파괴는 배관재료의 유동응력보다는 인장응력에 의해 제어된다고 설명하였다. 이외에도 많은 기준이 최근에 제안되었고, 부식손상부의 보수 혹은 교체를 결정하기 위해 부식배관의 파열압력을 평가하기 위해 사용되고 있다.

그러나 이러한 기준들은 서로 다른 평가 결과를 나타내기 때문에 어떤 기준이 주어진 배관에 가장 적당한지 명확하지 않은 실정이다. 또한, 이러한 기준들은 배관 원주용접부와 심용접부에 발생한 부식손상에 대해서는 파열압력을 평가할 수 없다고 제한하고 있다.

가스배관의 경우, 원주용접 후 열수축튜브로 코팅한 부분에서 부식이 다수 발생하고 있다. 따라서 본 연구에서는 원주용접부 및 심용접부가 부식배관의 파열압력에 미치는 영향을 파악하여 배관모재에 발생한 부식부의 파열압력과의 차이를 명확히 하고자 한다. 이를 위해 배관 모재, 원주용접부 및 심용접부 부식손상에 대하여 실패관 파열시험으로 파열압력을 평가하였다. 또한 실패관 파열시험과 유한요소해석 결과를 비교하여 유한요소해석상의 파괴기준을 설정한 다음 다양한 부식크기에 대하여 유한요소해석을 수행하여 배관 모재, 원주용접부 및 심용접부에 부식이 발생한 부식배관의 파열압력을 평가할 수 있는 한계 하중해를 제시하였다.

2. 부식배관에 대한 실패관 파열시험

실패관 파열시험은 API 5L X65 등급, 762mm 외경 및 17.5mm 두께의 배관을 사용하였다. 실패관 파열시험편 길이는 약 2.3m 정도 이었으며 배관의 양단은 cap으로 용접하였다. 부식손상은 기계가공으로 배관 외부표면에 직사각형 형태로 만들었으며, 부식손상부의 바닥 모서리는 응력집중을 줄이기 위해 반경 5mm로 완만하게 가공하였다. 파열시험은 물을 사용하여 파괴가 될 때까지 압력을 증가시켰다.

실패관 파열시험편은 부식크기 및 부식위치에 따라 표 1과 같이 분류하였다. 모재에 대한 파열

시험편은 부식폭 및 부식깊이는 일정하게 하고 부식길이만을 변화시켰다. 부식폭이 파열압력에 영향을 미치지 않는다는 것에 대해서는 본 연구자들의 선행 연구를 통해 규명한 바 있다.⁽⁵⁾ 원주용접부와 심용접부 파열시험편은 부식크기를 일정하게 하였으며 그림 1과 같이 부식손상부와 용접부의 상대적 위치만을 변화시켰다.

그림 2는 모재 부식배관의 실패관 파열시험 결과이다. 부식길이가 증가함에 따라 파열압력이 감소함을 알 수 있다. 그림 3은 원주용접부 및 심용접부 부식배관의 실패관 파열시험 결과이다. 원주용접부 및 심용접부 부식배관의 파열압력은 동일한 부식크기를 가지는 모재 부식배관의

Table 1. The summary for corrosion size and region of burst test pipe.

Specimen No.	Corrosion Length L(mm)	Corrosion Depth d (mm)	Corrosion Width W (mm)	Corrosion Region
LA	50	8.75	50	Body of pipe
LB	100	8.75	50	
LC	200	8.75	50	
LD	300	8.75	50	
LE	600	8.75	50	
LF	900	8.75	50	
WA	300	8.75	50	Girth weld
WB	300	8.75	50	
WC	300	8.75	50	
SA	300	8.75	50	Seam weld
SB	300	8.75	50	

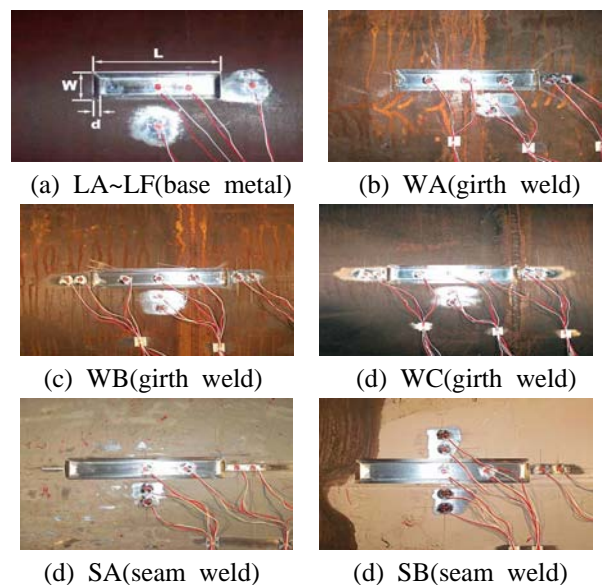


Fig. 1 The shape and region of artificial corrosion defect within the body, the girth weld and the seam weld of pipe.

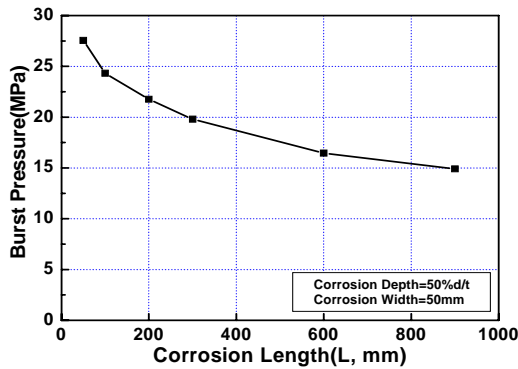


Fig. 2 Burst test result for corrosion defect within the body of pipe.

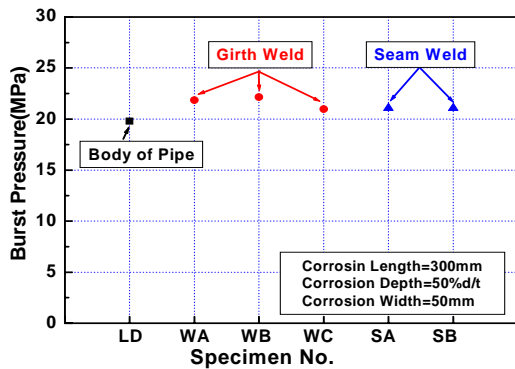


Fig. 3 Burst test result for corrosion defect within the girth weld and seam weld of pipe.

파열압력보다 조금 높게 나타났다. 그러나, 부식 손상과 용접부간의 상대적 위치 변화는 파열압력에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

3. 부식배관에 대한 유한요소해석

3.1 유한요소해석 모델

부식배관의 파괴기준을 설정하고 한계하중해를 개발하기 위해 3-차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 ABAQUS를 사용하였으며 대칭관계를 고려하여 그림 4와 같이 모재는 1/4 및 용접부는 1/2 모델을 수행하였다. 원주용접부와 심용접부 모델은 실제 용접부의 용착금속 및 열영향부의 크기와 일치하도록 모델을 수행하였다.

정수압은 모델의 내부표면에 추가하였으며, 실패관 파열시험시 양단을 cap으로 밀봉한 상태를 고려하여 유한요소해석 시에도 이에 상응하는 축

방향 응력을 추가하였다. 인장시험으로 모재, 용착금속 및 이에 인접한 열영향부의 기계적 특성을 평가하여 부위별 진인장-진응력곡선을 유한요소해석에 사용하였다. 각 부위의 기계적특성은 표 2에 나타내었다.

3.2 유한요소해석시 파괴기준

유한요소해석상에서 파괴기준을 설정하기 위해 부식손상부에 발생하는 von Mises 응력과 실패관 파열시험 결과를 비교하였다. 그림 5는 진인장응력의 90%를 참조응력으로 하여 유한요소해석을 수행한 결과와 실패관 파열시험 결과의 비교를 보여주고 있다. 진인장응력의 90%를 부식손상부가 파괴되는 참조응력으로 하였을 때 실험값과

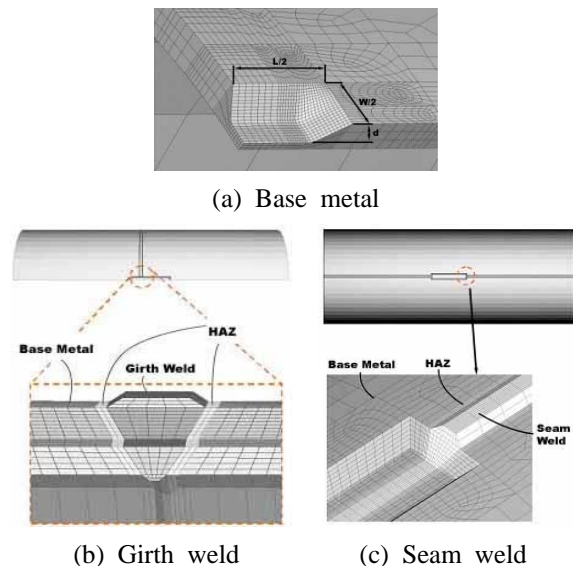


Fig. 4. The finite element model of corrosion defect within the body, the girth weld and the seam weld of pipe

Table 2. The material properties for base metal, weld metals and related heat affected zones of API 5L X65 pipe.

Test Position (Direction)	Yield Stress (MPa)	Engineering UTS (MPa)	True UTS (MPa)
Body of pipe (circumferential)	495	565	649
Girth weld metal	530	615	678
Seam weld metal	568	626	681
HAZ(girth weld)	423	500	550
HAZ(seam weld)	401	535	609

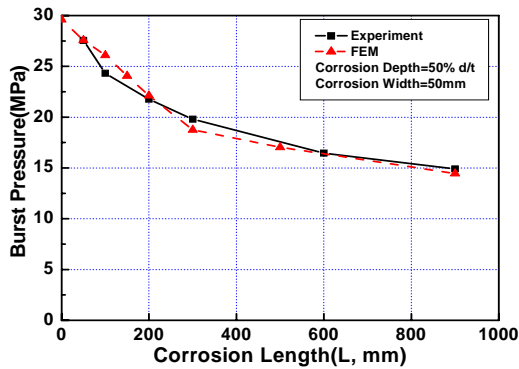


Fig. 5 The comparison of experimental result and finite element analysis result for the body corrosion defect.

잘 일치함을 알 수 있다. 따라서, 유한요소해석에서 부식손상부의 내부표면이 진인장응력의 90%에 도달하였을 때 파괴가 발생한다고 가정하였다.

3.3 부식배관 평가를 한계하중해 도출

부식배관 파열압력 평가를 위한 한계하중해를 도출하기 위해 우선 실패관 파열시험 결과와 현재 널리 사용되고 있는 부식배관 파열압력 평가 기준으로 계산한 파열압력을 비교해 보았다.

그림 6은 API 5L X65 배관 모재의 진항복강도 및 진인장강도를 토대로 현재 대표적으로 사용되고 있는 부식배관 파열압력 평가기준으로 계산한 파열압력과 실험 결과의 비교를 보여주고 있다. 배관길이에 따라 차이는 있지만 대체적으로 ASME B31G 및 modified B31G 기준은 보수적인 평가를 PCORRC 및 BG/DNV 기준은 비보수적인 평가 결과를 나타내었다. 그러나, 실패관 파열시험 결과와 각각의 기준으로 계산된 파열압력을 비교하였을 때, ASME B31G, modified B31G 및 BG/DNV 기준으로 계산한 파열압력은 부식길이 변화에 따라 보수성 혹은 비보수성의 정도가 변화하지만 PCORRC 기준으로 계산한 파열압력은 부식길이 변화에 관계없이 일정한 비보수성을 나타내고 있었다. 실험값과 PCORRC 기준으로 계산한 값을 비교한 결과 PCORRC 기준에서 사용하는 공칭인장강도를 진인장강도의 95%로 대체하였을 때 실험값과 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 PCORRC 기준을 토대로 API 5L 배관에 발생한 모재 부식손상의 파열압력 평가 한계하중

해는 다음과 같이 제안하였다.

$$P_f = 0.95\sigma_{UTS, True} \frac{2t}{D} \left[1 - \frac{d}{t} \left(1 - \exp \left(-C \frac{L}{\sqrt{R(t-d)}} \right) \right) \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 C는 부식손상부의 global failure behavior를 나타내는 curve fitting 상수로써 PCORRC 기준에서는 0.157을 사용하고 있다.

그림 7은 배관 모재내 부식손상에 대하여 부식길이 및 깊이 변화에 따른 유한요소해석 결과와 유한요소해석 결과를 식(1)을 토대로 회귀분석한 curve fitting 결과를 보여주고 있다. 식(1)에서 C 값은 부식깊이에 따라 표 3과 같이 0.142~0.224까지 변화함을 알 수 있었다. 보수적인 한계하중해를 개발하기 위해 C 값은 0.224를 택하였으며 유한요소해석 및 이에 대한 curve fitting의 결과를

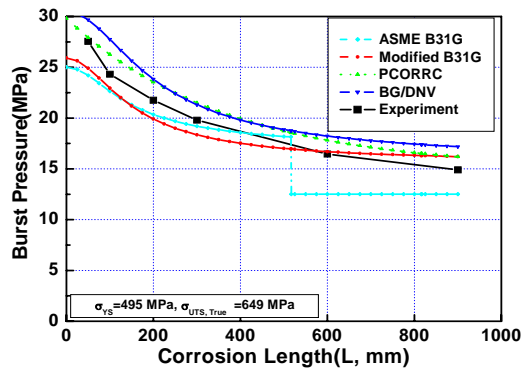


Fig. 6 The comparison of experimental result and calculated burst pressure with assessment criteria for body corrosion defect.

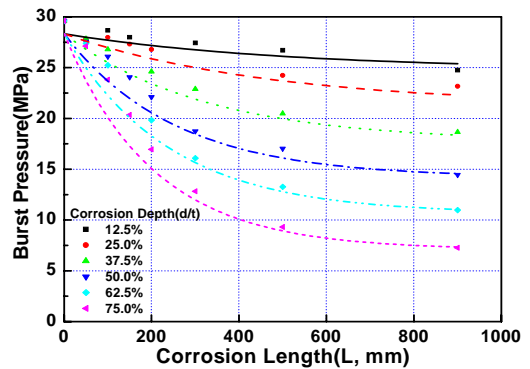


Fig. 7 The curve fitting for FEA result of corrosion defect within the body of pipe.

Table 3. C value at the equation (1) due to curve fitting procedure.

Corrosion Depth, d/t(%)	C
12.5	0.142
25.0	0.161
37.5	0.205
50.0	0.224
62.5	0.219
75.0	0.202

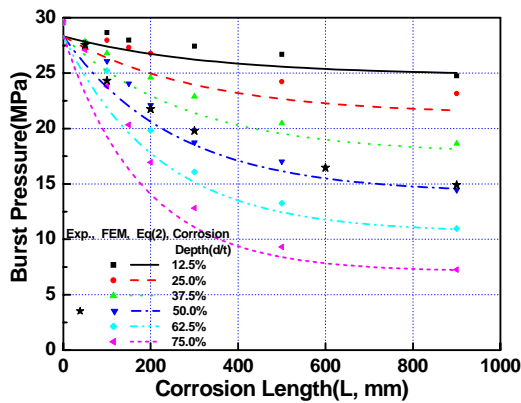


Fig. 8 The comparison of experimental result, FEA result and calculated burst pressure by equation (2).

토대로 다음과 같이 배관모재 부식배관의 파열압력 평가 기준을 제시하였다.

$$P_{f,Body} = 0.95\sigma_{UTS,True} \frac{2t}{D} \left[1 - \frac{d}{t} \left(1 - \exp \left(- \frac{0.224L}{\sqrt{R(t-d)}} \right) \right) \right] \quad (2)$$

그림 8은 식 (2)를 사용하여 계산한 파열압력, 실패관 파열시험 결과 및 유한요소해석 결과의 비교를 보여주고 있다. 모재 부식배관의 파열압력을 평가하는 식 (2)으로 계산한 파열압력은 실패관 파열시험 결과와 유한요소해석 결과보다 약간 보수적인 평가 결과를 나타냄을 알 수 있다.

실패관 파열시험 때와 동일한 부식크기 및 부식위치에 대하여 유한요소해석으로 배관의 원주용접부와 심용접부에 존재하는 부식부의 파열압력을 평가하였으며, 유한요소해석 및 실패관 파열시험 결과를 그림 9에 나타내었다.

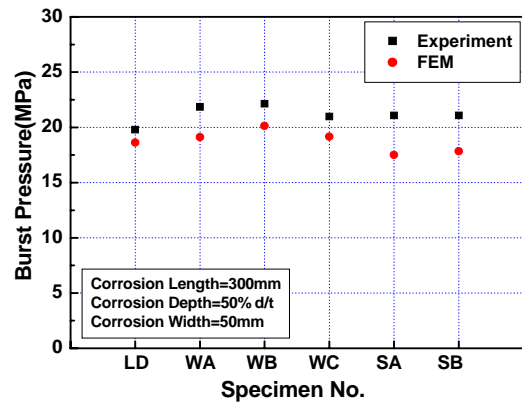


Fig. 9 The results of experimental burst test and finite element analysis for corrosion defect with the body, the girth weld and the seam weld of pipe.

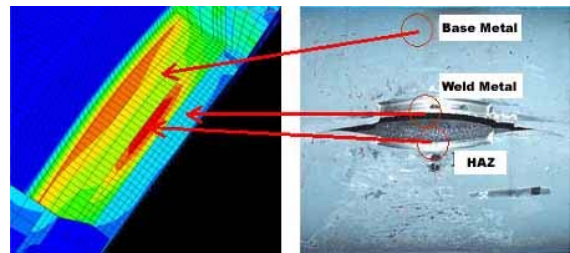


Fig. 10 The stress profile of finite element analysis and the failure shape of burst test specimen for seam weld.

유한요소해석에 의한 원주용접부 부식배관의 파열압력은 실패관 파열시험 결과보다 낮게 나타났다. 그러나 원주용접부 부식배관에 대한 유한요소해석 결과로부터 원주용접부 부식배관의 파열압력은 부식부와 원주용접부의 상대적 위치에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 또한 모재 부식배관의 파열압력보다 약간 높게 나타남을 알 수 있다. 따라서 원주용접부 부식배관에 파열압력 평가기준은 보수성이 약간 더 증가하지만 모재부 부식배관의 파열압력을 평가하는 식 (2)를 그대로 사용해도 무방할 것으로 판단된다.

유한요소해석으로 평가한 심용접부 부식배관의 파열압력은 실패관 파열시험으로 평가한 심용접부 부식배관의 파열압력보다 낮게 나타났다. 또한 유한요소해석으로 평가한 심용접부 부식배관의 파열압력은 유한요소해석으로 평가한 모재부 부식배관의 파열압력보다 낮게 나타났다. 이는 그

림 10에서 보는바와 같이 유한요소해석시 심용접부 형상으로 인해 나타나는 응력집중과 심용접 열영향부의 낮은 인장강도에 기인한다고 생각된다. 실패관 파열시험과 유한요소해석에 의한 파열압력이 차이가 나타나지만, 이는 실패관 파열 시험시 파괴가 심용접 열영향부를 따라 발생하는 것과 잘 일치한다.

유한요소해석 결과간의 비교에서 심용접부 부식배관의 파열압력이 모재 부식배관의 파열압력보다 낮게 나타났기 때문에 식 (2)를 심용접부 부식 부식배관의 파열압력을 평가하기 위해 적용하는 것은 약간의 위험이 따른다고 판단된다.

따라서 심용접부 부식배관의 파열압력 변화를 살펴보기 위해서 부식부의 중심과 심용접부의 중심이 일치하면서 부식길이 만을 100~500mm로 변화시켜 심용접부 부식배관에 대하여 유한요소해석을 수행하였다. 그림 11은 심용접부 SA 시험편에 대한 실제 파열압력, 모재 부식배관의 유한요소 해석결과 및 심용접부 부식배관의 유한요소 해석결과를 보여주고 있다. 모재부와 심용접부 부식배관에 대한 유한요소해석 결과를 비교하면 부식길이에 관계없이 심용접부 부식배관의 파열압력이 낮게 나타남을 알 수 있다.

그림 11에서 심용접부 유한요소해석 결과에 의한 파열압력은 식 (2)로 평가한 값보다 낮지만 식 (2)에 0.9를 곱한 값보다는 높게 나타남을 알 수 있다. 따라서 심용접부 부식배관의 파열압력 평가기준은 모재부 파열압력을 평가하는 식 (2)에 0.9를 곱하여 다음과 같이 제시하였다.

$$P_{f,SeamWeld} = 0.9 \times P_{f,Body}$$

$$= 0.86 \sigma_{UTS, True} \frac{2t}{D} \left[1 - \frac{d}{t} \left\langle 1 - \exp \left(- \frac{0.224L}{\sqrt{R(t-d)}} \right) \right\rangle \right] \quad (3)$$

4. 결 론

부식크기 및 부식위치가 배관의 파열압력에 미치는 영향을 평가하기 위해 실패관 파열시험과 유한요소해석을 수행하였다. 실패관 파열시험과 유한요소해석 결과를 토대로 배관의 모재, 원주용접부 및 심용접부에 존재하는 부식부의 파열압력을 평가하는 기준을 제시하였다.

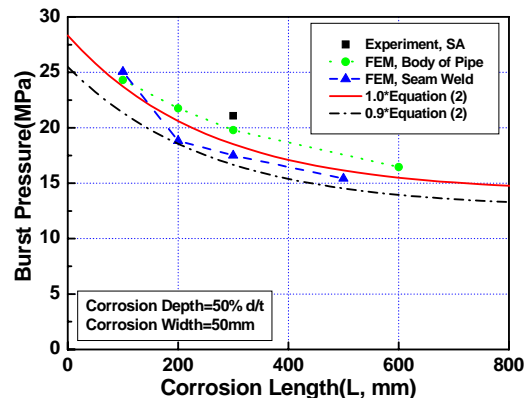


Fig. 11 The finite element analysis result for corrosion defects within the seam weld of pipe.

참고문헌

- (1) American National Standard Institute(ANSI)/ American Society of Mechanical Engineers(ASME), 1991, ASME B31G-1991, "Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded pipelines."
- (2) John F. Kiefner and Paul H. Vieth, 1989, "A Modified Criterion for Evaluating the Remaining Strength of Corroded Pipe," Battelle Memorial Institute.
- (3) D. R. Stephens, B. N. Leis, M. D. Kurre and D. L. Rudland, 1999, "Development of and alternative failure Criterion for Residual Strength of Corrosion Defects in Moderate to High Toughness Pipe," Battelle Memorial Institute.
- (4) Fudfinnur Siquidsson, E. H. Gramer, O. H. Bjornoy, B. Fu and D. Ritchie, 1999, "Introduction to DNV RP-F101, Corroded Pipelines," *Proceeding of OMAE 99, 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, OMAE99/PIPE-5030
- (5) Young Pyo Kim, Jong Hyun Baek, Woo Sik Kim and Young Tai Kho, 2002, "The Evaluation of Burst Pressure for Corroded Pipeline by Full Scale Burst Test," *KSME Journal A*, Vol. 26, No. 1, pp. 203~210.