

천연가스 수송용 API 5L X65 배관에 대한 소성붕괴해

백종현[†] · 김우식* · 심도준** · 최재봉**

(2004년 1월 31일 접수, 2004년 7월 29일 심사완료)

Plastic Collapse Solution for API 5L X65 Natural Gas Linepipe

Jong-hyun Baek, Woo-sik Kim, Do-jun Shim and Jae-boong Choi

Key Words: API X65 Linepipe, Finite Element Analysis(유한요소해석), FFS(사용적합성), Local and Global Plastic Collapse Solution(국부 및 광범위 소성붕괴해)

Abstract

To assess the integrity of the pipeline is the most important problem to be solved first of all for prevention of any fracture accident of the pipeline. As a result of exerting such efforts, a number of plastic collapse assessment equations have been suggested, however, the scope of using or applying such assessment equations has not been exactly defined. In this study, the case that a surface crack existed in the circumferential direction in the external side of the natural gas pipeline and a bending load was applied to the pipeline was analytically identified as the most critical condition, and a plastic collapse assessment equation for it was suggested. The flow stress of the API X65 linepipe was defined through the experiment conducted on SENT specimens. Also, a local assessing criterion of a 3-dimensional crack behavior considering not only the crack depth but also the crack length was suggested. Finally, a plastic collapse assessment equation for the API X65 linepipe was developed by performing the 3-dimensional finite element analysis.

1. 서론

결합이 존재하는 배관의 건전성평가는 파손사고 방지를 위한 가장 중요한 선결문제로서, 지속적인 연구대상이 되어왔다. 이러한 노력의 결과로 공학적 해석기법에 기초한 사용적합성형식의 결합평가 기준이 제시되었으며 비파괴검사로 검출된 결합의 건전성평가가 진행되어 왔다.⁽¹⁻³⁾

또한 배관의 파괴거동 해석을 위해서는 BS 7910,⁽⁴⁾ API RP 579,⁽⁵⁾ R6⁽⁶⁾ 등과 같은 코드가 널리 사용되고 있으며, 이러한 코드들은 손상평가도(Failure Assessment Diagram; FAD)를 이용한 파괴역학적 평가를 수행하도록 제시하고 있다. FAD를 이용한 평가법은 취성파괴와 소성붕괴를 동시에 고려한 평가법으로서, 두 가지 파손형태에 대한 파괴역학적 해석을 기초로 하고 있다. 현재까지 배관에 대한 다양한 실험과 수치해석을 통해 많은 소성붕괴평가식을 제안하였다.⁽⁷⁻⁹⁾

그러나, 이러한 평가식들에 대한 사용범위 또는 적용범위가 정확히 규정되어 있지 않다. 또한, 대부분의 소성붕괴평가식은 한계하중법에 기초하고 있으므로 특정 재료의 변형률 경화나 대변형 효과를 고려하지 않는다.

[†] 책임저자, 회원, 한국가스공사 연구개발원
E-mail : jhbaek@kogas.re.kr
TEL : (031)400-7487 FAX : (031)416-9014

* 회원, 한국가스공사 연구개발원

** 회원, 성균관대학교 기계공학부

천연가스 배관에서 발생하는 결함의 방향은 원주방향과 길이방향으로 구분될 수 있다. 길이방향의 결함은 배관의 내압에 의해 발생하는 원주방향 응력으로 인한 파괴로서 이에 대한 평가식은 ASME B31.G와 DNV-RP-F101에 규격화되어 사용되고 있으며,^(10,11) 국내에서도 실배관 파열시험을 통하여 파열압력을 예측하는 연구를 수행해 왔다.⁽¹²⁾

본 연구에서는 천연가스배관으로 사용되는 API X65 배관 외부에 원주방향으로 표면균열 존재시 배관에 굽힘하중이 작용하는 경우를 가장 위험한 상태로 분석하고 이에 대한 소성붕괴 평가식을 제안하였다. 우선 균열의 길이만을 고려하는 2차원적 균열인 SENT 시편에 대한 실험을 통하여 API X65 배관에 대한 유동응력(flow stress)을 정의하였다.

또한, 균열의 길이뿐만 아니라 균열의 길이까지도 고려한 3차원적인 균열거동은 광폭평판시험 및 유한요소해석을 수행하여 국부평가기준을 제시하였다. 최종적으로, 실배관에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하여 API X65 배관에 대한 소성붕괴 평가식을 개발하였다.

2. 실험 및 유한요소 해석방법

2.1 API X65 배관 및 원주 용접부

본 실험에 사용된 API X65 배관은 외경 762 mm, 두께가 17.5 mm 인 가스배관으로 항복강도가 448 MPa, 인장강도가 573 MPa로 연신율은 30~35% 정도를 나타내며, -40℃에서 충격흡수에너지가 400J인 고인성 TMCP강이다.⁽¹²⁾ GDS 분석기에 의한 성분분석 결과는 탄소함량은 0.09%, 망간은 1.51%, 실리콘은 0.30%, 나이오비움과 마나듐은 0.06%를 함유하고 있다.

원주용접부는 두 번째층까지는 직경 2.4mm인 ER70S-G 용가재를 사용하여 GTAW 용접하고 그 상층부는 직경 3.2, 4.0mm인 E9016-G 용접봉을 사용하여 SMAW 공정으로 제작하였다.

2.2 SENT 시편에 대한 소성붕괴 평가

SENT 시편의 구속효과는 실배관과 가장 유사하기 때문에 실배관에 존재하는 균열에 대한 평가를 단순하게 수행하게 위해서 SENT 시험을 실시하였다.^(13,14) SENT 실험은 모재부와 원주용접부

에 대하여 3가지 균열깊이($a/t=0.25, 0.5, 0.75$)에 대하여 3점 굽힘에 의한 피로하중을 시편에 작용시켜 예비균열을 Fig. 1과 같이 제작하였으며, 각 균열깊이에 대하여 3개의 시편을 제작하여 평가하였다. SENT 시편은 배관 길이방향에서 채취하였으며 노치는 L-C 방향으로 가공하였으며, 시험이 진행되는 동안 하중과 변위를 연속적으로 측정하여 최대실단면응력을 측정하였다. 최대실단면응력은 SENT 시험으로부터 측정된 최대하중을 노치와 피로균열부를 제외한 잔여 리가먼트부의 실단면으로 나눈 값이다.

2.3 광폭평판 시편에 대한 소성붕괴 평가

굽힘하중이 작용하는 실제배관에 존재하는 원주방향 반다원 표면균열은 인장하중이 작용하는 광폭평판으로 단순화시킬 수 있다.⁽¹⁵⁾ 광폭평판 시편의 균열부의 노치는 0.5mm 와이어(wire)를 이용하여 방전가공으로 제작하였으며, 노치선단에는 3점 굽힘으로 피로하중을 부가하여 피로예비균열을 만들었으며, 각 시편에 대한 노치형상은 깊이(a)와 길이(c)를 고려하여 Fig. 2와 같이 4가지 종류로 제작하였다. 광폭평판 시편은 배관 길이방향에서 채취하였으며 노치는 L-C 방향으로 가공하였으며, 시험시 변위와 CMOD 값은 ASTM E740의 Fig. X2.1에 의거 측정하였다.⁽¹⁶⁾

실험결과를 바탕으로 3차원 유한요소해석을 수행하여 표면균열의 잔여 리가먼트에서의 응력분포를 분석하였다. 유한요소해석 모델은 대칭성을 고려하여 1/4 모델링을 하였으며 20절점 평면 변형률 요소를 사용하여 구성하였다. 해석은 실험과 동일하게 변위제어방식으로 대규모 변형률 해석을 이용하여 수행하였으며, 해석을 통해 실험과 동일하게 하중, 변위, CMOD 값을 측정하였다.

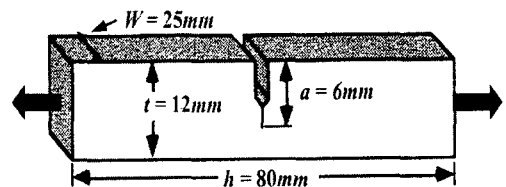


Fig. 1 Geometry of an SENT specimen

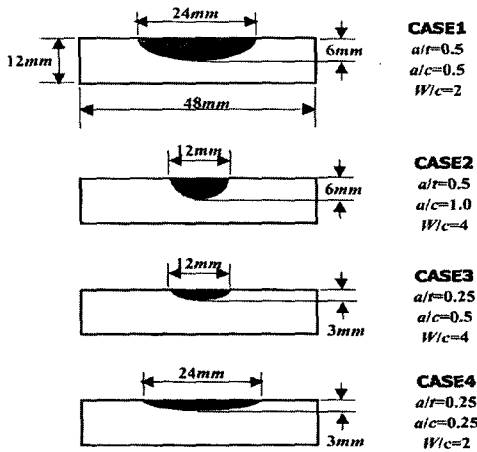


Fig. 2 Geometries of EDM notches in wide plate specimen

2.4 실패관 유한요소 해석

유한요소해석을 API X65 배관에 대해 총 20종류에 대하여 수행하였다. 균열의 깊이 a/t는 0.2에서 0.8까지 고려하였으며, 균열의 길이는 배관 원주의 10%에서 50%까지 고려하였다. 유한요소모델은 대칭성을 고려하여 1/4 모델링을 하였으며 20절점 평면 변형률 요소를 사용하였다. 작용하중은 배관 전체에 굽힘하중이 작용할 수 있도록 배관 끝단에 일정한 굽힘모멘트를 가하였다.

유한요소해석은 2가지 방법을 이용하여 수행하였다. 첫 번째 방법은 대규모 변형률 해석으로서, 이 방법은 구조물에 큰 변형이 발생하는 것을 정확히 모사하기 위해 사용하는 해석방법이다. 두 번째 방법은 RIKS 해석방법으로서 이 방법은 구조물의 붕괴(collapse)나 좌굴(buckling) 해석시 사용되며 ABAQUS 프로그램에서 지원하는 해석방법이다.⁽¹⁷⁾

기존의 소성붕괴평가식과 비교하기 위해 Miller가 제안한 실단면 소성붕괴평가식(net-section collapse solution)과 해석결과를 비교하였다.⁽¹⁸⁾

$$M_{pc} = 4R^2 t \sigma_f \left[\cos \left\{ \frac{(a/t)\beta}{2} \right\} - \frac{(a/t)\sin\beta}{2} \right] \quad (1)$$

여기서, 유효응력은 SENT 시편으로부터 정의한 값을 사용하였다.

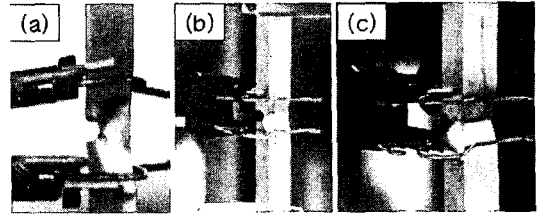


Fig. 3 Photograph showing the failure mechanism of an SENT specimen (a) Necking (b) Crack penetration (c) Final failure

3. 실험결과 및 고찰

3.1 SENT

Fig. 3은 SENT 시험시 파손과정을 나타내는 사진이다. SENT 시편은 하중이 증가함에 따라 균열선단은 둔화되고 균열면과 45°방향을 이루는 슬립면을 따라 응력이 작용하였다. 하중이 계속 증가함에 따라 소성변형은 두 개의 슬립면 사이의 영역에 집중되며, 이때 균열의 진전은 발생하지 않았다. 최대하중에서는 시편의 뒷면에서 네킹이 발생하기 시작하였으며, 변형이 국부적인 영역에서만 발생되며, 네킹 이후에는 더 이상 하중이 증가하지 않았으며, 시편의 잔여 리가먼트의 단면은 급격히 감소하였다. 단면이 감소한 영역에서는 변형률과 실단면응력이 증가하였으며, 균열선단에서의 정수압 응력 또한 증가하였다. 이러한 현상으로 인해 잔여 리가먼트에서는 찢김이 발생하며 파단 되었다. 균열의 깊이가 증가할수록 최대 하중은 감소하였으며, 모재부와 용접부에서 동일한 경향을 나타내었다. 실험이 진행되는 동안 하중의 급격한 변화는 없었으며, 시편의 파단면 관찰 결과 균열의 진전이 없었으므로, 모든 시편의 파괴형태는 소성붕괴로 판단되었다.

Fig. 4는 각 시편에 대한 실험으로부터 구한 최대실단면응력을 나타낸 것이다. 모재부는 균열의 깊이가 증가할수록 최대실단면응력이 증가하는 경향을 나타내었지만, 용접부는 a/t=0.25, 0.5인 경우에는 유사한 최대실단면응력을 나타내었고 a/t=0.75인 경우의 실단면응력은 a/t=0.25, 0.5인 경우보다 약 10% 정도 높았다. 이와 같이 용접부에서는 재료의 불균질로 인해 많은 분산이 발생하였다.

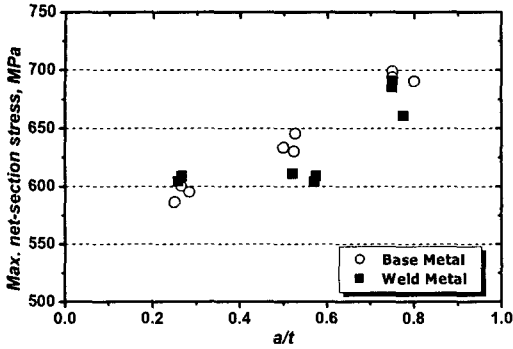


Fig. 4 Maximum net section stresses result

Fig. 4에서 보수성을 고려하면 SENT 시편의 균열 잔여리가먼트의 허용응력은 600MPa이다. 모재부에서 균열의 깊이가 증가할수록 실단면응력이 증가하는 것은 구속효과에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 5는 각 시편으로부터 구한 유동응력을 나타낸 것으로서, 유동응력은 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다.⁽¹⁸⁾

$$\sigma_f = \frac{P_c}{1.155 \left(1 - \frac{a}{t}\right) t W} \quad (2)$$

여기서 P_c 는 최대하중, a 는 균열깊이, t 는 시편의 두께, W 는 시편의 폭이다. 식 (2)는 실험으로부터 구한 최대하중을 대입하고 von Mises 항복조건을 이용하여 유동응력을 정의하였다. 보수적인 결과를 사용하기 위해 유동응력은 하한값을 이용하였으며 계산결과 유동응력은 520MPa로 산출되었다. 이는 본 시험에 사용된 API X65 배관의 항복강도(448MPa)와 인장강도(573MPa)의 평균으로 정의되는 유동응력(511MPa) 보다 약 1.8% 높으며, 천연가스배관 분야에서 일반적으로 사용되는 항복강도에 68.95(MPa)을 더하여 정의되는 유동응력(=517MPa)과 1% 이내에서 일치하는 값이다.⁽¹⁹⁾

3.2 광폭평판 (Wide Plate Test)

Fig. 6은 광폭평판 시험시 파손상태를 나타내는 과정이다. 광폭평판 시험시 인장하중이 증가함에

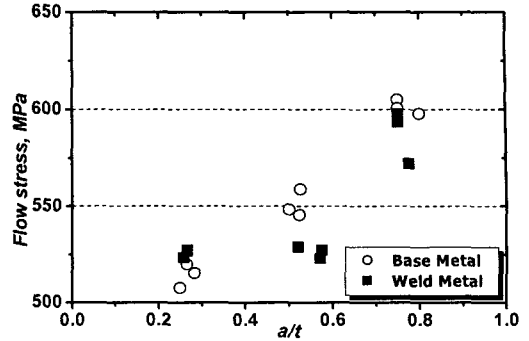


Fig. 5 Flow stresses resulting from SENT specimen tests

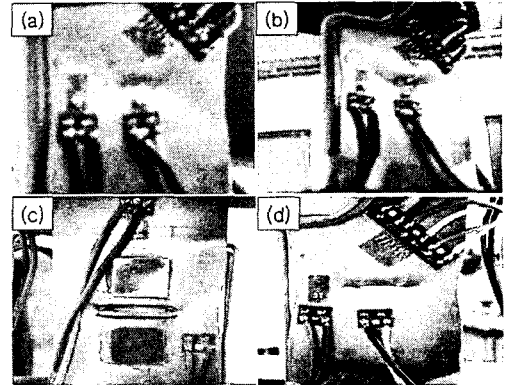


Fig. 6 Photograph showing the failure mechanism of wide plate specimen

따라 균열선단은 둔화되고 최대하중에서는 균열부 뒷면에서 국부적인 네킹이 발생한다. 하중이 계속 증가하면 균열부 뒷면은 균열 쪽으로 급격히 진전하며, 이로 인해 균열부의 잔여 리가먼트는 급격히 감소한다. 연속적으로 하중이 증가하면 균열선단에서 찢김이 발생하게되며 결국 균열이 시편을 관통하게된다. 균열면 관찰결과 실험이 진행되는 동안 연성균열진전은 없었던 것으로 나타났다. 이러한 파손 메카니즘은 SENT 시편에서 관찰된 파손형태와 동일한 것으로 광폭평판 시편도 소성붕괴에 의해 파손된다고 판단할 수 있다. 실험시 측정된 최대하중값(P_{max})과 실험을 수행한 후 파단된 시편으로부터 측정된 균열형상을 이용하여 최대 공칭응력과 최대 실단면응력을 계산하였다.

모재부 실험에서 측정된 최대 실단면응력의 최소값은 565MPa, 최대값은 578MPa로 약 2%의 변동을 나타내었다. 용접부 최대 실단면응력값은 최소값이 578MPa, 최대값이 603MPa로 나타나 약 4%의 변동을 나타내었다. 모재부 시편이나 용접부 시편에 있어서 최대 실단면응력은 균열의 형상에 많은 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각의 실험으로부터 얻은 최대 실단면응력($\sigma_{net,max}$)을 인장강도(σ_{ut})로 무차원화하여 나타낸 것으로서, 균열의 깊이와 균열의 길이가 각각 실단면응력에 미치는 영향을 분석한 것이다. 모든 모재부 시편의 최대 실단면응력값은 균열의 형상과 무관하게 모재부의 인장강도(573MPa)와 2% 이내에서 일치하였다. 용접부 시편의 최대 실단면응력은 균열의 형상과 무관하게 용접부의 인장강도(650MPa)보다 10% 작은 응력인 585MPa에서 3% 이내에서 일치하였다. 따라서, 모재부 시편의 경우에는 균열의 형상과 무관하게 실단면응력이 인장강도와 같아지면 소성붕괴가 발생한다고 결론을 내릴 수 있다.

균열의 형상이 평판의 소성붕괴에 영향을 미치지 못하는 이유는 균열부의 리가먼트에서 발생하는 변형률경화와 실단면 전체로 응력이 재분배되는 현상으로 설명할 수 있다. 실험을 통해 확인한 바와 같이 API X65 재질은 연성이 높기 때문에 균열선단에서 발생하는 응력집중에 의해 균열이 진전하기보다는 잔여 리가먼트에서 응력을 흡수하여 재질이 변형률경화를 일으킨다. 또한, 잔여 리가먼트부에 집중되는 응력은 균열이 존재하지 않는 부분으로 재분배되어, 결국 실단면 전체에 작용하는 응력이 인장강도에 도달하면 시편은 광범위의 소성붕괴를 일으킨다.

시편이 최대 하중에 도달하기 전에 균열부 뒷부분에서는 국부적인 네킹이 발생하고, 그 후에 시편은 바로 최대하중에 도달하고 계속해서 하중이 증가하면 결국 표면균열은 이 국부적인 영역에서 시편을 관통하게 된다. 실패판에 있어서는 광범위의 소성붕괴가 발생하기 이전에 표면균열이 관통될 수 있다. 따라서, 보수적인 측면에서 소성붕괴를 평가하기 위해서는 균열부의 네킹 시점을 소성붕괴가 발생한 시점으로 정의할 수 있으며, 본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 네킹의 시점을 측정하였다.

Fig. 9는 유한요소해석으로부터 구한 실단면응

력과 실험에서 구한 응력값으로 무차원화하여 a/t 에 대하여 나타낸 것이며, Fig. 10은 W/c에 대하여 나타낸 것이다.

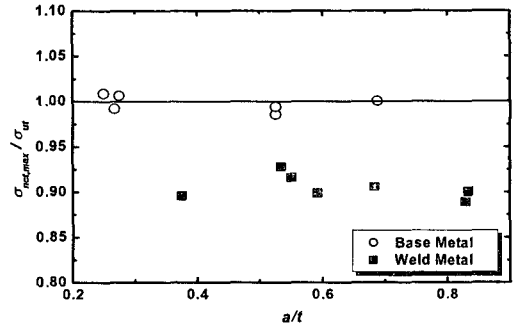


Fig. 7 Normalized maximum net-section stress vs a/t

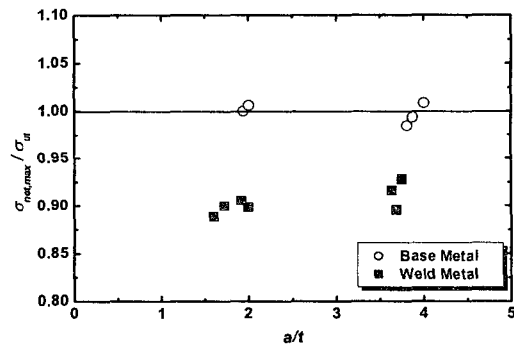


Fig. 8 Normalized maximum net-section stress vs. W/c

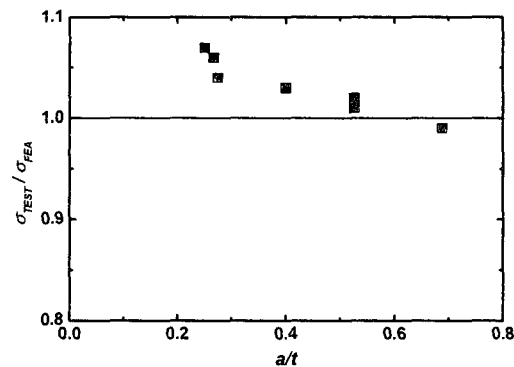


Fig. 9 Comparison between maximum load obtained from FEA and test results versus a/t

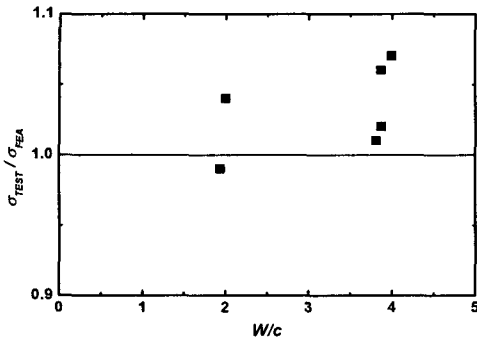


Fig. 10 Comparison between maximum stress obtained from FEA and test results versus W/c

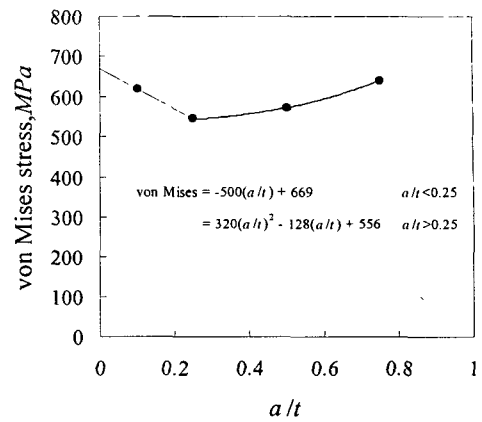


Fig. 12 Local criterion obtained from SENT specimen in terms of von Mises stress

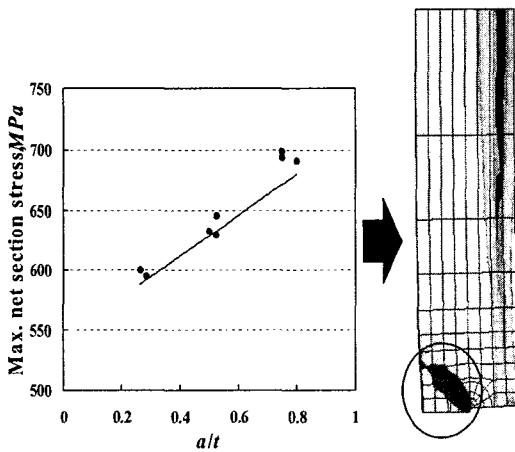


Fig. 11 (a) Maximum net-section stress obtained from SENT specimen tests versus a/t (b) Contour plot of von Mises stress at maximum net section stress

균열 깊이가 작고 균열 길이가 긴 균열에서 해석으로부터 구한 응력과 실험으로 구한 응력값과의 오차를 나타내었다.

3.3 Local criterion 제안

광폭평판에서의 von Mises 응력분포는 일정 하중에 도달하면 소성역은 시편의 뒷면까지 형성된다. 이와 같이 잔여 리가먼트의 국부적인 영역이 하중 지지능력을 상실하는 것을 국부적인 소성붕

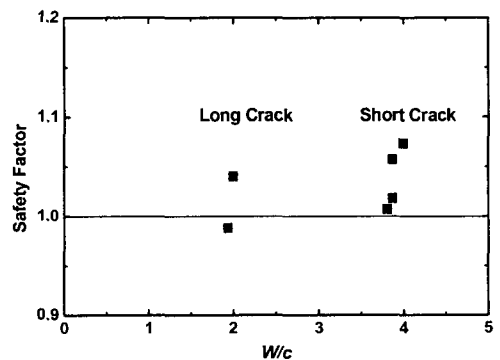
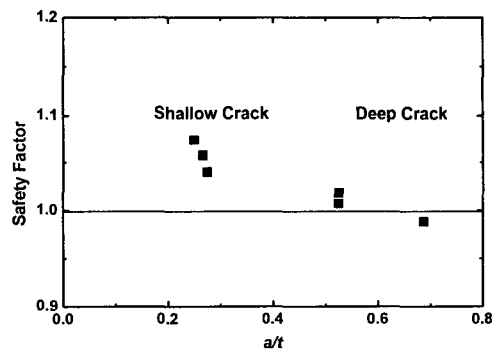


Fig. 13 Crack geometry effect on local criterion solution

괴로 정의할 수 있다. 하중이 계속해서 증가하면 소성역이 균열면에 전체적으로 형성된다. 본 연구에서는 표면균열의 최심점에서 소성역이 시편의 뒷면까지 형성되는 시점을 국부적 네킹이 발생하는 시점으로 정의하고, 이때의 von Mises 응력을 기준으로 local criterion을 제시하였다.

Fig. 11(a)는 균열깊이에 따른 모재부 SENT 시험으로부터 얻은 최대 실단면응력과 균열깊이와의 관계를 나타내었다. 이 결과로부터 세 가지 균열깊이($a/t=0.25, 0.5, 0.75$)에 대한 실험적 최대 실단면응력을 산출한 후, 각 균열깊이에 대한 유한요소 해석결과로부터 실단면응력이 실험적 최대 실단면응력과 같아지는 시점을 찾아내었다. Fig. 11(b)는 이 시점에서의 응력분포를 나타낸 것으로서 이를 통해 응력분포가 시편의 뒷면까지 형성되는 von Mises 응력값을 도출하여 그 값을 각 균열 깊이에 대한 local criterion으로 설정하였다.

Fig. 12는 각 균열깊이에 대한 von Mises 응력을 나타낸 것이다. 균열깊이에 따른 평판에 대한 local criterion을 다음과 같이 제안하였다.

$$\begin{aligned} \text{von Mises stress} &= -500\left(\frac{a}{t}\right) + 669 \quad \frac{a}{t} < 0.25 \quad (3) \\ &= 320\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 128\left(\frac{a}{t}\right) + 556 \quad \frac{a}{t} \geq 0.25 \end{aligned}$$

평판에 대한 공칭 소성붕괴응력을 산출하기 위해서 평판에 존재하는 표면균열에 대한 a/t 값을 식 (3)에 대입하여 local criterion(von Mises 응력)을 산출한 후 유한요소해석에서 최심점에서의 응력분포가 local criterion과 같아지는 시점을 찾아내었고, 그 시점에서의 하중을 이용하여 소성붕괴응력을 산출하였다.

Fig. 13은 균열의 형상이 local criterion을 이용한 평가법에 미치는 영향을 분석한 것이다. Local criterion을 이용한 평가법은 균열의 깊이가 얇으면 균열의 길이에 무관하게 기존의 평가법(18,20,21)과 유사한 결과를 나타내었으며, 균열의 깊이가 깊으면 균열의 길이에 무관하게 본 실험 결과가 기존의 평가법 보다 더 정확하게 예측하였다.

균열의 깊이가 얇은 경우에는 국부적인 네킹이 발생하는 시점과 광범위의 소성붕괴가 일어나는 시점이 유사하기 때문에 기존의 평가법과 local

criterion을 이용한 평가법이 유사한 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 균열의 깊이가 깊은 경우에는 광범위의 소성붕괴가 발생하기 이전에 국부적인 네킹이 먼저 발생하기 때문에 local criterion을 이용한 평가법이 기존의 평가법보다 실험결과를 잘 예측하였다.

3.4 소성붕괴 평가식

Fig. 14는 유한요소해석으로부터 구한 소성붕괴 모멘트와 Miller의 식 (1)을 이용하여 구한 소성붕괴 모멘트를 비교한 것으로서 동일한 균열깊이에 대하여 균열깊이 변화에 따른 소성붕괴 모멘트의 변화를 나타낸 것이다. RIKS 해석법을 이용하여 구한 결과는 Miller식을 이용하여 구한 결과보다 높게 나타났다. Miller식은 Tresca 항복조건을 이용하여 해석적으로 얻어진 식이며, 표면균열의 형상을 일정깊이의 균열로 가정하고 있기 때문에 많은 보수성이 내포되어 있다. 반면, 유한요소해석에서는 표면균열을 반타원으로 가정하고, Mises 항복조건을 이용한다. 따라서, 유한요소해석으로부터 구한 소성붕괴 모멘트가 더 정확한 결과라고 볼 수 있다.

국부평가기준을 이용하여 얻은 국부소성붕괴 모멘트는 RIKS 해석결과보다 낮은 결과를 나타냈으며, 균열의 깊이가 증가할수록 더 많은 차이를 나타내었다. 가스배관의 소성붕괴 평가를 위해서는 광범위의 소성붕괴보다는 국부적인 소성붕괴를 고려해야 안전성이 확보될 것이다.

API X65 배관에 대한 광범위소성붕괴와 국부(local)적인 소성붕괴 평가식은 Fig. 14의 유한요소해석을 통해 계산된 값에 대해 curve fitting으로 유도하였다. API X65 배관에 대한 광범위 소성붕괴 평가식은 다음과 같다.

$$M_{pc} = 4R_m^2 t \sigma_0 \left[A_1 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + A_2 \left(\frac{a}{t}\right) + A_3 \right] \quad (4)$$

여기서,

$$A_1 = 0.5079 \left(\frac{\beta}{\pi}\right)^2 - 1.5086 \left(\frac{\beta}{\pi}\right) - 0.0435$$

$$A_2 = 0.0442 \left(\frac{\beta}{\pi}\right)^2 - 0.0597 \left(\frac{\beta}{\pi}\right) + 0.0291$$

$A_3 = 1$ 이며, β 는 원주방향 균열의 반각이다.

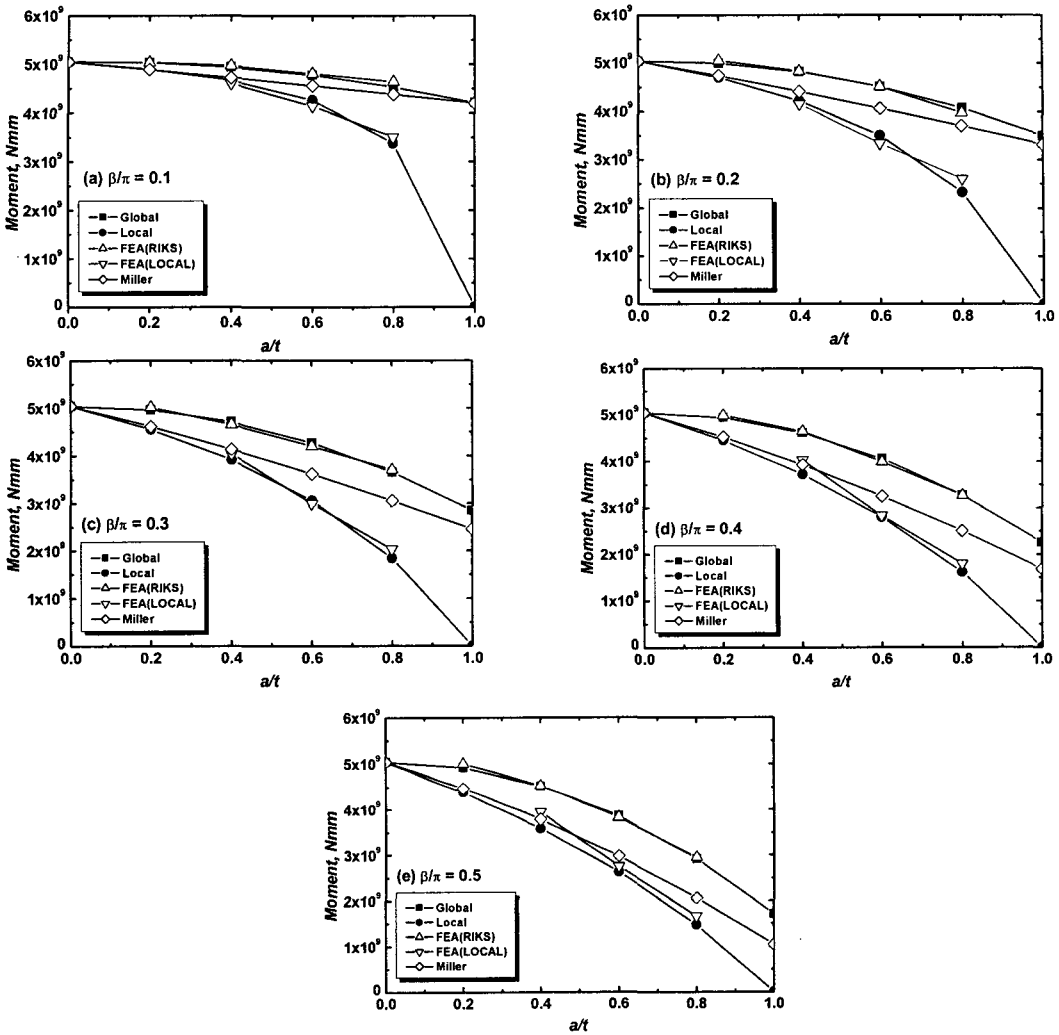


Fig. 14 Comparison of FE results with known solution

4. 결론

또한, API X65 배관에 대한 국부적인 소성붕괴 평가는 식 (5)와 같은 형태로 유도되었다.

$$M_{pc} = 4R_m^2 t f_j \left[\frac{1 - \frac{a}{t}}{1 - \frac{a/t}{M_o}} \right] \quad (5)$$

여기서,

$$M_o = \left[1 + \left(\frac{\beta}{\pi} \right) + 20 \left(\frac{\beta}{\pi} \right)^2 \right]^{0.5}$$

API X65 배관에 존재하는 다양한 균열에 대한 파괴거동 분석을 위해 다양한 시편실험과 유한요소해석을 수행하여 배관의 건전성 평가에 적용하기 위한 소성붕괴 평가식을 제시하였다.

(1) SENT 시편의 파괴형태는 모두 소성붕괴이었다. SENT 시편 실험을 통해 구한 API X65 배관의 하한계 유동응력은 520MPa이다.

(2) 광폭평판 시편에 대한 실험을 수행한 결과 모든 시편에 대하여 균열의 성장은 없었으며 파

괴형태는 모두 소성붕괴이었다. 광폭평판 시편은 균열의 형상과 무관하게 실단면응력이 일정한 값 (모재부는 인장강도, 용접부는 인장강도의 90%)에 도달하였을 때 소성붕괴를 일으켰다.

(3) API X65 배관에 대한 유한요소해석을 수행하여 배관 전체가 소성붕괴를 일으키는 광범위의 소성붕괴 평가식과 가스의 누출을 고려한 국부적인 소성붕괴 평가식을 제안하였다.

참고문헌

- (1) American Petroleum Institute, 1999, "Welding of Pipelines and Related Facilities, App. A : Alternative Acceptance Standards for Girth Welds", API 1104.
- (2) Canadian Standards Association, 1996, "Oil and Gas Pipeline Systems, App. K : Standards of Acceptability for Circumferential Pipes Butt Welds Based on Fracture Mechanics Principles," CSA Z662.
- (3) Japan Welding Engineering Society, 1997, "Method of Assessment for Flaws in Fusion Welded Joints with Respect to Brittle Fracture And Fatigue Crack Growth," WES 2805.
- (4) British Standards Institution, 1997, "Guidance on Methods for the Assessing the Acceptability of Flaws in Fusion Welded Structures," BS 7910.
- (5) American Petroleum Institute, 2000, "Fitness for Service," API RP 579.
- (6) British Energy, 1998, "Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects," R/H/R6-Revision 3, Gloucester, U.K.
- (7) Huh, N. S., Park, Y. J., Kim, Y. J. and Kim, Y. J., 2003, "New Engineering J and COD Estimation Methods for Axial Through-Wall Cracked Pipes," *Transaction of the KSME(A)*, Vol. 27, No. 2, pp. 239~246.
- (8) Kim, J. S., Kim, Y. J. and Kim, Y. J., 2002, "Fracture Behavior Estimation for Circumferential Surface Cracked Pipes (I)," *Transaction of the KSME(A)*, Vol. 26, No. 1, pp. 131~138.
- (9) Kim, J. S., Kim, Y. J. and Kim, Y. J., 2002, "Fracture Behavior Estimation for Circumferential Surface Cracked Pipes (II)," *Transaction of the KSME(A)*, Vol. 26, No. 1, pp. 139~146.
- (10) American Society of Mechanical Engineers, 1991, "Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines," ASME B31G.
- (11) Det Norske Veritas, 1999, "Corroded Pipelines," DNV-RP-F101.
- (12) Kim, Y. P., Baek, J. H., Kim, W. S., and Kho, Y. T., 2002, "The Evaluation of Burst Pressure for Corroded Pipeline by Full Scale Burst Test," *Transaction of the KSME(A)*, Vol. 26, No. 1, pp. 203~210.
- (13) Nyhus, B., 1998, "Oseberg Hyperbaric Welding Procedure Development. Fracture Mechanics Testing and ECA Analysis," SINTEF Report.
- (14) Choi, J. B., 1997, "Plastic Collapse of Circumferential Surface Defects in Pipeliner Materials," Ph. D. thesis, Univ. of Waterloo, Canada.
- (15) Pisarski, H.G., Goldthorpe, M. R., 1995, "Behaviour of Semi-elliptical Cracks in Welds with Yield Strength Mismatch," TWI Report 7160.01/95/857.2.
- (16) American Society for Testing & Materials, 1988, "Standard Practice for Fracture Testing with Surface-Crack Tension Specimens," ASTM E 740-88.
- (17) ABAQUS, 1998, Standard User's Manual, Ver. 5.8, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.
- (18) Miller, A. G., 1988, "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 32, pp. 197~327.
- (19) Kiefner, J.F., Maxey, W.A., Eiber, R.J. and Duffy, A.R., 1973, "Failure Stress Levels of Flaws in Pressurized Cylinders," ASTM STP 536, pp. 461~481.
- (20) Goodall, I. W., 1999, "C* for Partially-penetrating Semi-elliptical Flaws in Plates: Propagation Through the Thickness," ICON Report ME 196/01 Issue 2, June.
- (21) Sattari-Far, I., 1994, "Finite Element Analysis of Limit Loads for Surface Cracks in Plates," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 57, pp. 237~243.