

LNG탱크 熔接部 피로균열의 貫通後 전파거동

* 조 상명(부산공업대학교 생산가공공학과)
 김 종호(한국선급)
 박 동환, 황 주환(현대중공업 산업기술연구소)
 김 영식(한국해양대학교 재료공학과)

1. 서 언

LNG선의 화물탱크는 내부온도가 -162°C의 초저온이므로 탱크에 손상이 생겨서 LNG가 누설하면서 불안정파괴가 발생하면, 선체의 취성파괴 뿐만 아니라 폭발 및 화재로 인하여 엄청난 피해가 초래될 위험성이 있다. 따라서 IMO Gas Code에서는 설계시에 피로수명해석 및 피로균열전파해석과 같은 특별한 해석을 요구하고 있다.

본 연구의 前報¹⁾²⁾에서는 피로균열전파해석에 필요한 균열전파특성과 표면균열의 전파거동을 해석하였다. 이와 관련하여 本報에서는 표면균열이 탱크벽을 관통한 후에 문제시되는 LBB(Leak Before Break)개념을 적용하기 위하여 파괴역학적 수단을 구사하여 A5083-O판재에서 표면균열이 관통한 직후부터의 전파특성을 해석하였다.

2. 표면균열관통직후의 상태에 대한 용력확대계수의 해석

Fig.1은 上部(발생측 또는 표면)에서 발생한 표면균열이 下部(관통측 또는 뒷면)까지 전파하여 관통한 직후의 모양으로서 발생측균열 b_f 와 관통측균열 b_b 를 파괴역학적으로 해석하기 위한 것이다. 여기서 점 $b_f, b_b, a', -b_b - b_f$ 를 잇는 곡선을 반타원으로 가정하면 A측과 B측은 대칭축이다(점 a' 는 가상의 점). 따라서 두께 t 인 판의 $t/2$ 에서 균열길이 b_e 도 간단히 얻을 수 있을 것이다.

安藤등은³⁾ 관통직후 표면균열의 中心位置 즉 Fig.1의 점 a_f, a_e, a_b 에서의 개구변위(Crack Opening Displacement)를 $\delta_f, \delta_e, \delta_b$ 로 두고 인장하중만을 받는 부재에 대해서 이들은

$$\delta f = \delta e = \delta b \quad \text{-----(1)}$$

와 같이 서로 같은 것으로 간주하였다. 즉 균열의 길이 b_f, b_e, b_b 에 관계없이 인장하중만이 작용하면 각 위치균열의 중심에서는 같은 량의 개구변위가 생긴다고 가정하여 용력확대계수를 역으로 계산하였으므로 b_b 가 b_f 에 비하여 짧을수록 b_b 의 용력확대계수는 크게 됨을 알 수 있다.

그러나 실제의 탱크나 파이프벽에서 작용하는 용력은 인장(멤브레인)용력 뿐만 아니라 굽힘용력도 함께 작용하는 것이 일반적이지만 여기에 관한 해석결과는 아직 보고되고 있지 않다. 따라서 이러한 경우에 관한 관통직후 균열의 용력확대계수를 구하기 위하여 본 연구에서는 각 부분 균열의 개구변위는 다음과 같은 관계가 있는 것으로 간주하였으며, 이것을 관통균열COD모델이라 한다.

$$\frac{\delta_f}{(S_{eq})_f} = \frac{\delta_e}{(S_{eq})_e} = \frac{\delta_b}{(S_{eq})_b} \quad \text{-----(2)}$$

여기서, $S_{eq} = S_m + H \cdot S_b$

단, H : Newman-Raju⁴⁾의 표면균열에 대한 K해석식에서 계수 $a/t=1$ 일 때의 값

Fig.2 (a)는 安藤등의 균열개구변위에 대한 모델이고 (b)는 본 연구에서의 모델 즉 식(2)를 모식적으로 나타낸 것이다. 식(2)는 굽힘용력 $S_b=0$ 이면 식(1) 및 Fig.2 (a)와 같이 되어 安藤등의 모델보다 일반화 된 것임을 알 수 있다.

한편, 판두께의 중심($t/2$)에서 길이 b_e 인 균열의 개구변위 δ_e 는 폭 $2W$ 인 얇은 판 중앙에 길이 $2b_e$ 인 2차원 관통균열이 있을 때, 균열중앙부에서의 개구변위와 같은 것으로 한다. 즉

$$\delta e = \frac{4}{E} \sqrt{\frac{be}{2\pi}} \cdot Ke \quad \text{-----(3)}$$

여기서, $Ke = (S_{eq})_e \sqrt{\pi be} F(be/W)$, for CCT

이 성립하는 것으로 본다. 또한 발생측과 관통측에 대해서도 길이 b_f, b_b 를 가진 균열의 개

구변위량 δ_f , δ_b 와 응력확대계수 K_f , K_b 의 관계는 위와 같다고 할 수 있고, 이로부터 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\frac{K_f}{K_s} = \frac{(S_{eq})_f}{(S_{eq})_s} \sqrt{\frac{be}{bf}} \quad \text{-----}(4)$$

$$\therefore K_f = \frac{(S_{eq})_f}{(S_{eq})_s} \sqrt{\frac{be}{bf}} K_e \quad \text{-----}(5)$$

$$K_b = \frac{(S_{eq})_b}{(S_{eq})_s} \sqrt{\frac{be}{bb}} K_e \quad \text{-----}(6)$$

따라서 발생측과 관통측의 응력확대계수는 K_e 만 구하면 위식과 같이 얻을 수 있다. 또한 이로부터 반복응력이 Δn 만큼 작용하여 전파한 발생측균열과 관통측균열의 증분비는 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{\Delta bf}{\Delta bb} \right) = \left\{ \frac{(S_{eq})_f}{(S_{eq})_b} \right\}^m \left(\frac{bb}{bf} \right)^{m/2} \quad \text{-----}(7)$$

3. 관통직후의 일시적 불안정 파괴

표면균열이 판두께를 관통한 직후 즉 b_b 가 매우 작을 때는 식(6)으로부터 알 수 있듯이 K_b 는 무한대에 가까운 값을 가진다. 따라서 관통순간에는 일시에 상당량의 길이까지 b_b 가 성장하여 일시적 불안정 파괴가 생긴후 응력확대계수가 감소함에 따라 정상적인 피로파괴를 거듭하게 된다. 이러한 현상은 실험시에도 항상 관찰되는 것으로서 상기의 식들은 바로 이 현상을 모델화한 것이다. 즉,

$$(K_b)_{\max} \geq K_{IC} \text{ or } K_C \quad \text{-----}(8)$$

이면 일시적 불안정 파괴가 생기게 되고, 한 사이클동안의 최대응력확대계수가 재료의 파괴인성보다 작아지면 피로파괴하게 된다. 그러나 판두께가 커지면 관통하기까지 발생측의 균열 b_f 와 중심부의 b_c 가 상당히 많이 성장하게 되므로 식(6)으로부터 알 수 있듯이 b_b 가 다소 증가하여도 관통측균열의 응력확대계수는 계속 높은 값을 가지게 됨으로 상당한 위험이 뒤따른다.

4. 관통후 피로균열의 안정성장 특성과 개구거동에 대한 시뮬레이션

관통후 안정성장하는 피로균열의 응력확대계수범위 ΔK 는 식(6)으로부터 구할 수 있으므로 균열전파속도를 해석할 수 있다. 따라서 일정기간(예를들면, LNG선에서 관통후 15일)동안 성장하는 균열을 정량적으로 평가할 수 있는 것이다.

또한 균열의 개구량과 개구단면적은 손상된 LNG탱크에 있어서 LNG의 누설량 계산을 위해서 필수적으로 요구되는 자료이다. 본 연구에서는 Dugdale모델에 의하여 균열선단개구량을 구하여 이 값을 선형탄성파괴역학적으로 구한 모든 균열면의 개구량에 더하는 방식으로 전체균열개구량을 산정하였다. 즉,

$$\delta_b = \frac{4}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} K_b + \delta_{np} \quad \text{-----}(9)$$

여기서 δ_{np} : Dugdale 모델에 의한 균열선단개구량

Fig.3 (a), (b), (c)는 인장응력(Membrane stress)만이 작용하는 두께 $t=40\text{mm}$ 인 탱크벽을 관통한 후의 안정피로균열성장 특성을 관통후 일수(0.1585Hz로 계산)에 대하여 표시한 것이다. 평균응력 $S_{m,mean}=4.0\text{kg/mm}^2$, 응력범위 $\Delta S_m=6.0\text{kg/mm}^2$ 가 작용하였다. 관통측(back surface)균열은 관통직후 $2b_b=27\text{mm}$ 정도로 갑자기 성장한 후 일수가 지남에 따라 발생측(front surface)균열길이에 접근하게 됨을 볼 수 있다.

Fig.4 (a), (b)는 인장응력(Membrane stress)과 굽힘응력(Bending stress, 관통측이陰인 굽힘응력)이 함께 작용하는 경우로서 일수가 지나도 관통측균열은 발생측균열길이에 접근하지 못한다. 특히 (b)의 개구거동을 보면 관통측균열 b_b-1 의 균열중앙부에서의 개구변위가

발생층의 그것보다 작게 나타남을 볼 수 있다.

Fig.5 (a), (b)는 LNG탱크의 적도링(두께166mm)에 인장응력만이 작용하는 경우를 가정하여 해석한 예이다. 관통시에 발생층균열이 $2b_f=460\text{mm}$ 정도로 크기 때문에 관통층균열은 관통직후 일시적 불안정파괴에 의해 $2b_b=300\text{mm}$ 정도로 바로 성장하여 버린다. 이와 같이 두께가 매우 큰 벽면에서 균열이 관통하는 경우는 관통시에 모든 균열이 크기 때문에 바로 불안정파괴에 이르러 탱크전체가 파손될 우려가 비교적 높게 되므로 신중한 해석이 요구된다.

5.결 언

- 1) 표면균열을 가진 판에 인장응력과 굽힘응력이 함께 작용하여 균열이 관통하는 경우, 발생층 및 관통층균열의 응력확대계수 산정을 위한 관통균열COD모델을 개발하였다.
- 2) 표면균열 관통직후의 일시적 불안정파괴 가능성을 본 관통균열COD모델과 재료의 파괴인성을 이용하여 설명할 수 있었다.
- 3) 관통후 피로균열의 성장량과 개구량 및 개구단면적을 연속적으로 계산하는 기술을 개발하여 이를 가시화 하였다.

<참고문헌>

- 1) 조상명 외3인, "A5083-O MIG용접부의 표면균열성장특성", 1992년 추계학술발표개요집, pp.215-218
- 2) 조상명 외3인, "LNG탱크 용접부 표면결합의 사용중 관통거동에 관한 예측", 1993년 춘계학술발표개요집, pp.45-49
- 3) 安藤任 外4人, "表面き裂貫通挙動 - 第1報 引張荷重を受ける場合", 日本機械學會論文集, 第52巻 第483號, pp.2463, 1986
- 4) J.C.Newman, I.S.Raju, "Analysis of Surface Cracks in Finite Plates under Tension or Bending Loads", NASA Technical Paper 1578, 1979

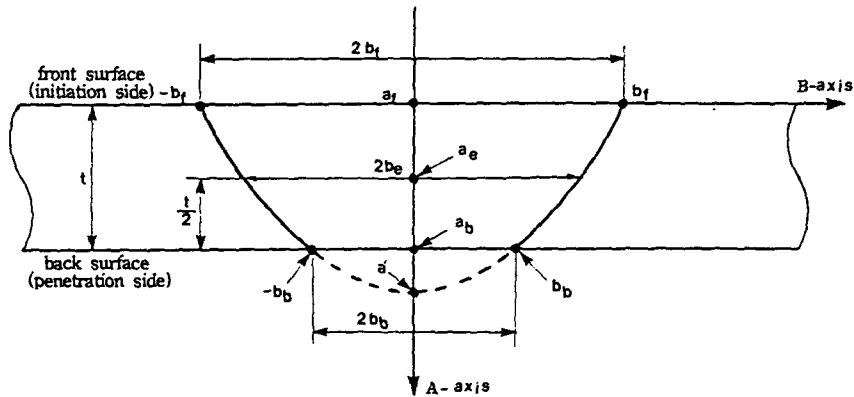


Fig.1 Model for the crack after penetration through thickness

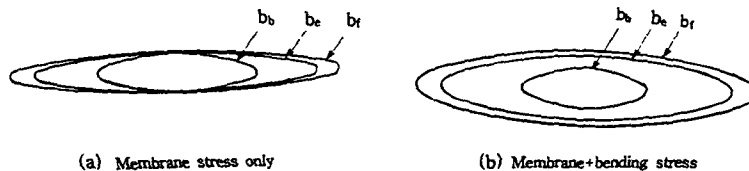
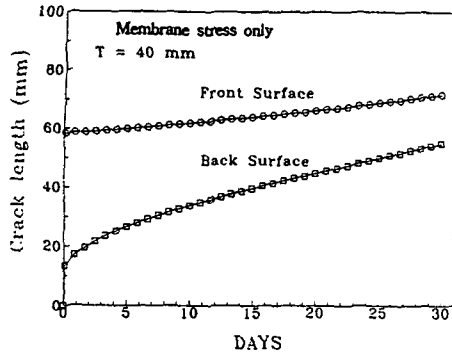
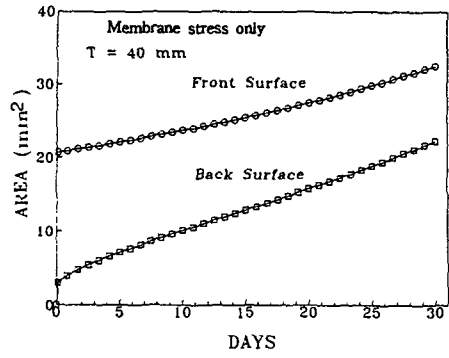


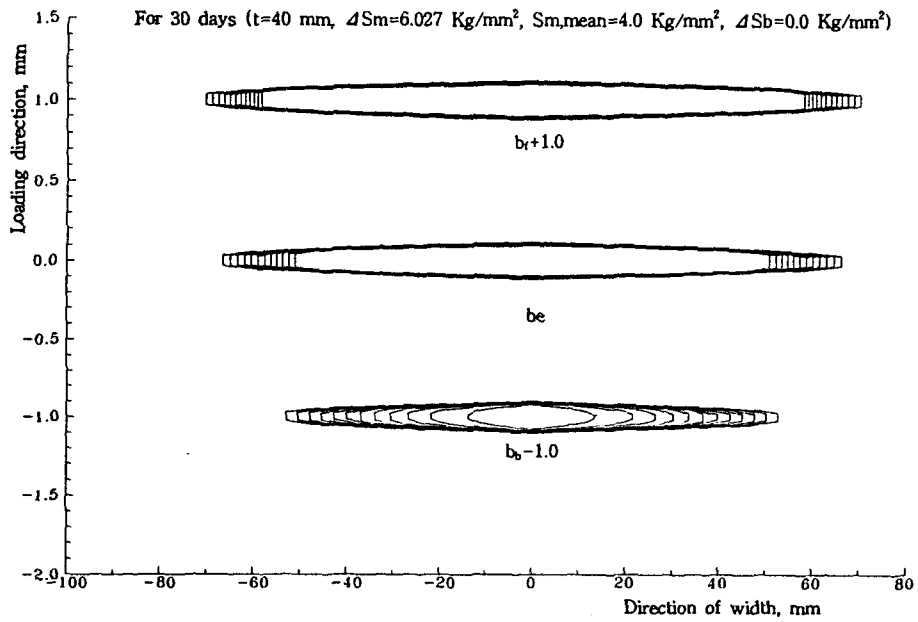
Fig.2 Crack opening behavior in front surface, center of thickness and back surface by COD model for a through crack



(a) Crack propagation behavior



(b) Variety of crack opening area



(c) Crack opening behavior in front surface, center of thickness and back surface

Fig.3 Fatigue crack propagation behavior after penetration through thickness(membrane stress only)

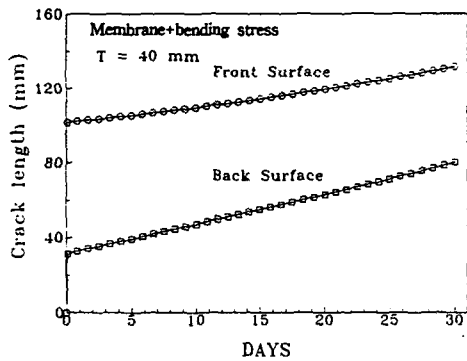


Fig.4 (a) Crack propagation behavior

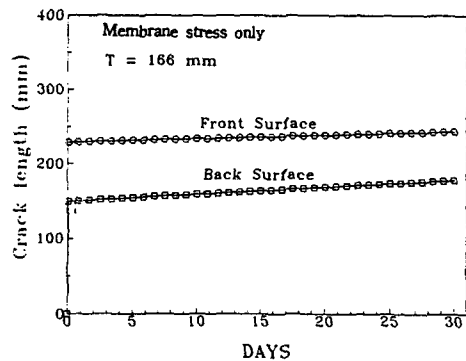
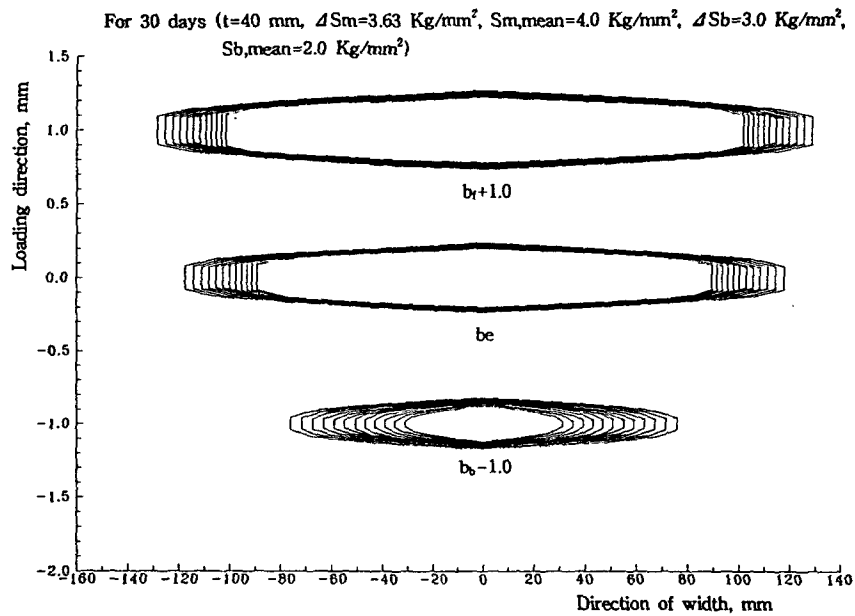
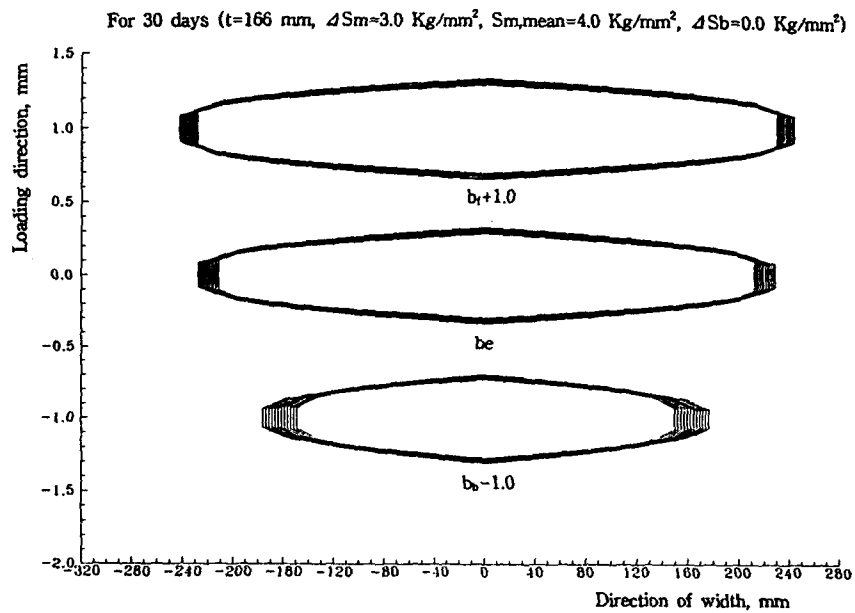


Fig.5 (a) Crack propagation behavior



(b) Crack opening behavior in front surface, center of thickness and back surface

Fig.4 Fatigue crack propagation behavior after penetration through thickness(membrane+bending stress)



(b) Crack opening behavior in front surface, center of thickness and back surface

Fig.5 Fatigue crack propagation behavior after penetration through thickness(membrane stress only)