

LNG 탱크 용접부 표면결합의 사용중 관통기동에 관한 예측

*조 상명, 김 우열(부산공업대학교 생산가공공학과)
김 중호(한국선급), 김 영식(한국해양대학교 해양재료공학과)

1. 서 언

용접에 의하여 각종 탱크와 고압파이프를 제작하기 위하여 설계하는 경우에는 허용응력과 허용결합의 결정이 매우 까다롭다. 특히 최근에는 해석에 의한 설계 (design by analysis) 기법을 도입하는 추세가 두드러지면서 이러한 응력 및 결합의 결정은 상당한 이론적 배경을 필요로 하게 되었다. 통상 유한요소해석등에 의하여 얻은 응력을 근거로 허용응력은 결정하지만 결합의 허용치는 종래의 관련규격에서 요구하는 값을 그대로 사용하고 있다. 따라서 안전성과 경제성의 확보가 합리적으로 이루어 지지 않는 설계로 되어 버리는 경향이 있다.

본 연구에서는 LNG 탱크에 생긴 용접결합의 허용치를 결정하기 위하여 피로균열 전파해석을 요구하는 IMO Gas Code를 참고하여 표면결합의 탱크벽 관통특성에 대한 해석방법을 개발하였다. 특히 초기결합의 탱크벽 관통특성에 미치는 각종 인자의 영향을 구체적으로 평가하는 기술을 개발하였다.

2. 재료의 피로균열전파특성

LNG 탱크에 사용되는 Mg계 알루미늄합금 A5083-O의 피로균열전파특성을 파악하기 위하여 피로시험을 행하여 얻은 결과는 Fig.1과 같다. 일반적으로 알려진 바와 같이 평균응력의 영향 즉 응력비R의 영향이 크게 나타났다. 또한 피로균열전파속도가 10^{-6} mm/cycle 이하로 되는 영역에서는 응력확대계수범위가 감소함에 따라 균열의 전파속도가 급작스럽게 떨어져서 ΔK_{th} 이하의 영역에서는 균열이 정지하는 현상이 나타나는 것은 철강재료와 유사하다.

본 연구에서는 A5083-O의 피로균열전파특성을 다음과 같은 식으로 나타내어 ΔK_{th} 를 고려할 수 있도록 하였다.

$$da/dN = C (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \text{-----}(1)$$

또한 응력비R의 영향은 Eq.(1)의 계수C와 지수m을 이용하여 다음과 같이 평가하였다.

$$m = \alpha R + \beta \text{-----}(2)$$

$$\log(C) = \eta m + \xi \text{-----}(3)$$

여기서, α, β 및 η, ξ : 재료상수(실험에 의하여 결정)

$$\Delta K_{th} = (\Delta K_{th})_0 (1-R)^g \text{-----}(4)$$

단, $(\Delta K_{th})_0$: R=0일 때의 ΔK_{th}

$$g = 0.7$$

3. 표면균열의 형상과 응력확대계수

LNG 탱크 벽에 존재하는 초기의 표면결합은 성장하면서 주로 반타원형의 표면균열로 되고 이에 대한 응력확대계수K는 Fig.2 (a) (b)와 같이 정의한다. Fig.2 (a)의 평판에 존재하는 표면균열의 응력확대계수는 Newman-Raju의 수치해석해를 이용하여 얻었다. (b)의 용접토우부에 존재하는 표면균열의 응력확대계수 K_{wa} , K_{wb} 는 평판(a)의 K_a , K_b 를 이용하여 다음식과 같이 구하였다.

$$K_{wa} = M_{ka} K_a \text{-----}(5)$$

$$K_{wb} = M_{kb} K_b \text{-----}(6)$$

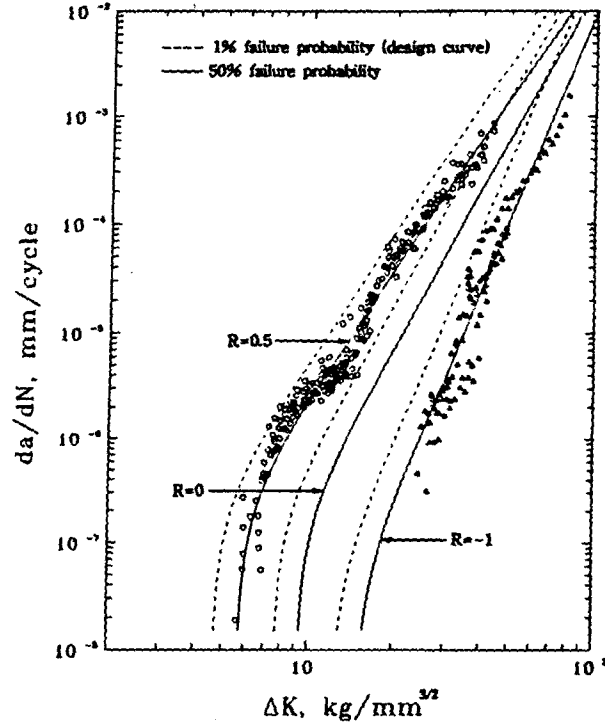


Fig.1 Fatigue crack propagation property of A5083-O

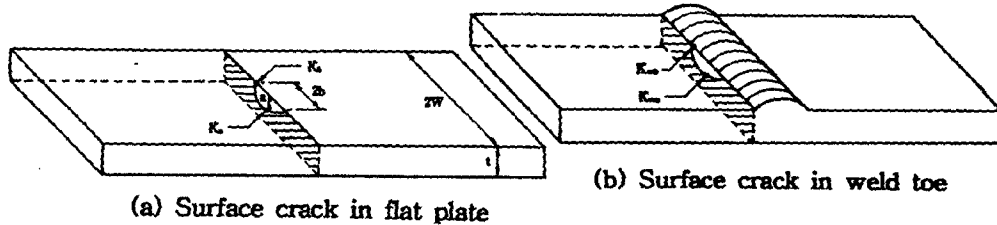


Fig.2 Stress intensity factors of surface cracks

단, M_{kn} , M_{kb} : 용접토우부의 응력집중을 고려하는 응력집중확대계수
(stress concentration magnification factor)

본 연구에서는 유한요소해석등에 의하여 趙등이 제안한 수정Pang의 방식을 채용하여 M_{kn} , M_{kb} 를 계산하였다.

Fig.3은 Fig.2 (b)와 같은 응력집중계수 $K_t=1.7$ 인 용접토우부에서 성장하는 표면균열의 형상변화에 대한 실험결과(□기호)와 趙등에 의한 수정Pang의 식에 의한 예측결과(실선)를 도시한 것이다. 파선은 $M_{kb}=K_t$ 로 두고 응력확대계수를 계산하여 예측한 결과로서 표면방향의 균열이 지나치게 빨리 전파하는 것으로 평가되기 때문에 균열형상비 a/b 가 전체적으로 낮게 예측됨을 알 수 있다.

4. 균열관통예측을 위한 기본자료

LNG탱크 벽면에 존재하는 초기표면결함의 사용중 관통여부에 대한 예측을 위해

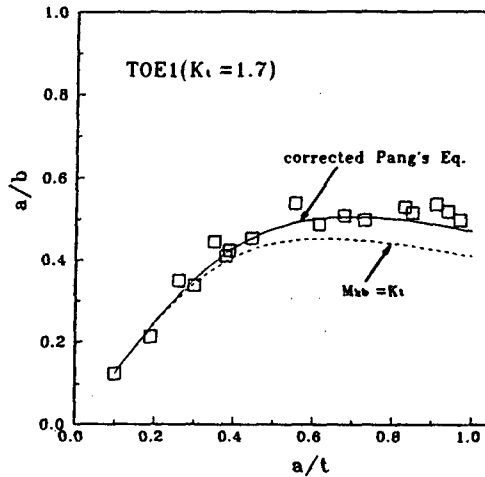


Fig.3 Variation of surface crack aspect ratio in weld toe

서는 다음과 같은 기본자료가 필요하다.

- 1) 탱크벽면의 두께와 형상(응력집중등)
- 2) 결함이 존재하는 부위에 대한 응력분포
- 3) 초기결함의 크기와 형상
- 4) 응력스펙트럼
- 5) 응력확대계수범위
- 6) 각종 재료상수

본 연구에서는 표면균열 관통여부에 대한 예측을 위하여 다음과 같은 기본자료를 사용하여 하나하나의 인자에 대한 영향을 구체적으로 평가하였다.

판두께 : 40mm

초기의 표면균열길이 $2b_i$: 50mm

초기의 표면균열깊이 a_i : 3mm

응력집중계수 K_t : 1.0

평균멤브레인응력 $S_{m,mean}$: 4.0kg/mm²

평균굽힘응력 $S_{b,mean}$: 0.0kg/mm²

응력스펙트럼 S_i :

$$S_i = \frac{17-2i}{16} S_{max}, \quad n_i = 0.9 \times 10^i \quad \text{-----(7)}$$

단, $i = 1, 2, 3, \dots, 8$

S_{max} : 하중 최대대값에 의해서 발생하는 응력

이러한 응력스펙트럼은 선박이 20년간 만나게 되는 10⁸회의 하중스펙트럼에 대응하는 것이다.

5. 표면균열 관통여부의 예측

표면균열의 관통여부는 설계수명동안 성장하는 균열깊이 a 에 의해 지배되며, 여기서는 탱크벽의 두께 t 로서 무차원화하여 a/t 로서 나타내었다. 따라서 10⁸회의 응력스펙트럼이 작용한 후에 a/t 가 1.0이 되면 관통한 것이 된다.

Fig.4 (a) (b) (c) (d) 및 (e)는 균열의 관통여부에 대한 예측의 결과로서 가로축

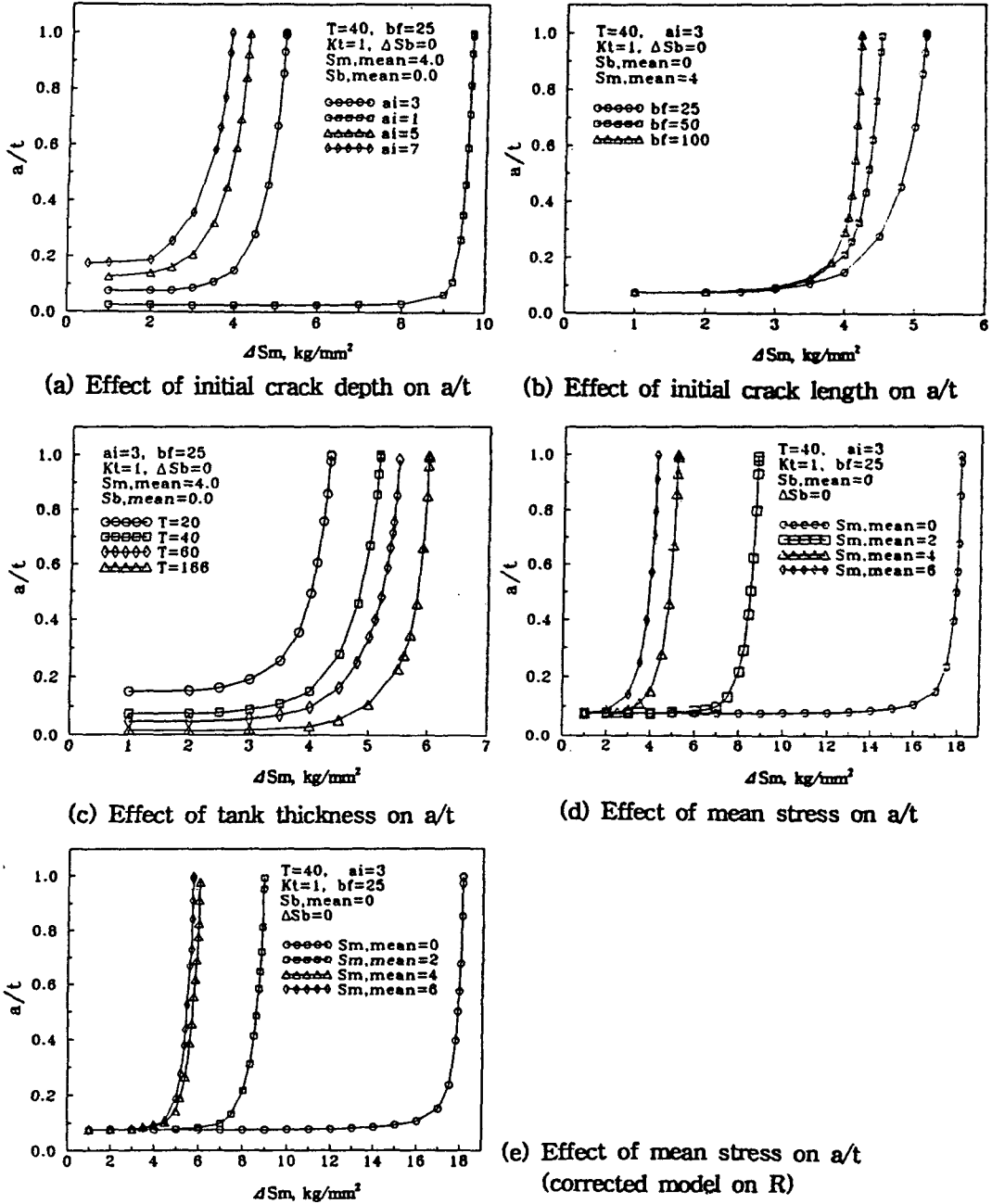


Fig.4 Estimation to penetration behavior of surface defect for design life

의 응력범위 ΔS_m 은 Eq.(7)의 S_{max} 에 해당하는 응력의 범위(range)를 의미한다. 전체 적으로 a/t 에 미치는 여러인자중에서 응력범위 ΔS_m 의 영향이 가장 현저하다고 할 수 있다.

Fig.4 (a)는 표면균열의 관통특성에 미치는 초기결함 깊이 a_i 의 영향을 평가한 것이다. $a_i=1\text{mm}$ 인 경우는 $\Delta S_m=9.5\text{kg/mm}^2$ 정도의 큰 응력이 작용하여도 10⁶회 동안 탱크벽을 관통하지 않지만 $a_i=3\text{mm}$ 인 경우는 $\Delta S_m = 5.5\text{kg/mm}^2$ 정도로 되어도 사용중에 균열이 관통하여 버리는 결과로 된다. 즉 초기결함의 탱크벽 관통특성에는 초기결함의 깊이 a_i 의 영향이 매우 큼을 알 수 있다.

Fig.4 (b)는 a/t 에 미치는 초기결함 길이 b_f 의 영향을 평가한 것이다. 이 때 초기결함 깊이 a_i 는 3.0mm로 일정하게 두었다. 초기결함 길이의 영향은 그다지 크지 않음을 알 수 있다.

Fig.4 (c)는 초기균열의 형상이 $a_i=3\text{mm}$, $b_f=25\text{mm}$ 일 때 탱크 벽두께의 영향을 검토한 것이다. 통상 외력이 일정한 상태에서 벽두께가 두꺼워지면 응력은 반비례하여 감소하지만 여기서와 같이 동일한 응력상태에서는 벽두께의 영향이 그다지 두드러지지 않는다.

Fig.4 (d), (e)는 모두 평균응력의 영향을 고려하여 관통특성을 예측한 결과이다. 평균응력은 응력비 R 의 형태로 Eq.(2)~(4)에 의하여 평가하였다. 다만 (d)는 Eq.(2) 및 Eq.(4)에서 지수 m 과 ΔK_{th} 가 R 이 1.0에 접근할 때까지 계속 감소하는 것으로 간주한 것이다. 그러나 (e)는 R 이 0.7이상이면 더이상 m 과 ΔK_{th} 가 변하지 않는 것으로 간주하고 예측한 결과이다. 일반적으로 철강재료에서는 R 이 0.7~0.8이상이면 지수 m 과 계수 C 및 ΔK_{th} 는 거의 일정하게 되는 것으로 알려져 있다.

A5083-O에 있어서 높은 R 의 영향에 관한 실험자료로서 실제 설계시에 주로 적용되는 낮은 da/dN 영역에 까지 유효한 자료는 그다지 발표되지 않고 있어서 금후의 연구성과가 기대된다.

6. 결론

LNG탱크에 사용되는 A5083-O의 피로균열전파특성과 용접부 표면균열에 대한 응력확대계수의 산정을 통하여 초기 표면결함의 탱크벽면 관통특성을 예측하여 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 초기결함의 탱크벽 관통특성에 미치는 응력범위의 영향은 가장 두드러짐을 확인하였다.
- 2) 초기결함의 탱크벽 관통특성에 미치는 초기깊이의 영향은 매우 현저함을 확인하였다.
- 3) 초기결함의 탱크벽 관통특성에 미치는 초기길이의 영향은 그다지 현저하지 않았다.
- 4) 동일한 응력상태일 때 초기결함의 탱크벽 관통특성에 미치는 벽두께의 영향은 그다지 크지 않음을 알 수 있었다.
- 5) 양의 작은 평균응력일 때는 초기결함의 탱크벽 관통특성에 현저한 영향을 미치나 양의 높은 평균응력이 되면 그다지 심각한 영향이 나타나지 않았다.
- 6) 초기결함의 탱크벽 관통특성에 미치는 영향을 해석하는 방법과 각 인자의 영향을 도시화하는 표현기법을 개발하였다.

<참고문헌>

- 1) IMO Gas code
- 2) "MOSS방식 LNG탱크의 파괴안전성평가", (사)한국선급, 1992.12
- 3) J.C.Newman, I.S.Raju, NASA Technical Paper 1578, 1979
- 4) H.L.J.Pang, "A review of stress intensity factors for semi-elliptical surface crack in plate and fillet welded joint", The Welding Institute, Nov. 1990