

알루미늄 합금 5083-0 용접부의 피로특성

* 황 주환, 박 동환
현대중공업(주) 산업기술연구소

1. 서론

천연 액화 가스 (Liquid Natural Gas, LNG)는 -162°C 의 극저온 상태에서 저장 및 운송되므로, LNG tank 설계와 제작시 가장 중요하게 고려되는 것은 조업중 tank 외부로의 LNG 누출방지이다. 이를 위해서는 LNG tank 구조에 대한 상세한 응력해석을 통한 결정된 정적하중을 기초로 한 안전 설계가 기본이나, LNG tank는 운항중에 발생하는 선체진동, tank 내의 액체유동 및 파랑하중 등의 피로하중을 받기 때문에 피로설계 역시 반드시 수반되어야 한다. 피로해석을 위해서는 LNG tank를 구성하고 있는 모재 및 그 용접부의 피로특성 평가가 선행되어야 하며, 이를 토대로 조업중 LNG tank 에서 피로파괴가 발생하지 않도록 최종 설계가 이루어져야 한다. 즉, 조업중 피로균열 발생이 없어야 하며, 혹 용접부 결함으로 인하여 피로균열이 발생하더라도 LNG tank의 사용수명까지는 전파 되지 않도록 설계되어야 한다. LNG tank에서 피로균열을 야기할 수 있는 부분은 모재내의 미세결함, 용접부의 toe 혹은 root부 (응력집중) 또는 용착금속내의 결함 여컨데 기공 등이 있다.

따라서 본 연구에서는 MOSS 방식 LNG tank용 Al 5083 합금 및 그 용접부의 피로특성 즉, S-N 곡선을 통한 피로강도 평가와 용접부의 피로균열 전파속도 측면에서 평가하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 재료는 두께 25 mm 비열처리형인 Al-Mg계 5083 합금이었으며, 압연후 annealing 된 것이었다 : Al5083-0. Table 1에 Al 5083-0 합금의 화학적 조성 과 기계적 성질을 나타내었다.

<Table 1> Chemical composition and mechanical properties of Al 5083-0 alloy

Chemical composition (wt%)							Mechanical properties		
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Y.S (kg/mm ²)	T.S (kg/mm ²)	El. (%)
0.14	0.34	0.03	0.91	4.8	0.1	0.10	17.2	30.2	20

용접부의 개선은 single bevel groove 형상을 선정하여 열영향부의 피로 특성을 평가하기에 적합하도록 하였다. 용접은 입향 자세로 auto carriage에 정착된 자동 MIG 용접을 실시하였다. 용접재료는 모재와 동급인 Al-5183 wire (1.6mm dia.)이었고 용접조건은 현업 공정과 동일하였다.

피로특성은 모재와 여송을 제거한 용접부에 대하여 high cycle fatigue (HCF), low cycle fatigue (LCF) 그리고 하중 혹은 ΔK 제어방식으로 ΔK threshold 값 및 피로균열 전파속도 평가시험 등을 통하여 평가하였다. 피로시험은 상온에서 25톤 과 50톤 용량의 servo hydraulic 시험기로 실시하였다.

3. 실험 결과

3.1 반복경화 특성

일정변형율하에서 얻어진 용착금속과 모재의 hysteresis loops을 살펴볼때 모재와 용착금속은 모두 반복 하중하에서 경화되어짐을 알 수 있다. Fig.1에서 보여주듯이 cycle수 즉, 피로 횟수가 증가할수록 경화현상이 현저해져 파괴직전의 경화정도는 초기 cycle에 비하여 160% 증가하였다.

Fig.2는 반복 하중하에서의 응력 대 변형율간의 관계를 정적 인장시의 결과와 함께 보여주고 있다. 모재나 용착금속이 반복하중에 의하여 약 10 Kg/mm² 정도로 경화되었다. 반복경화 현상은 모재와 용착금속 모두 변형율이 증가할수록 더욱 현저하며, 경화율은 초기에 급격히 증가하다가 점차 일정한 값으로 수렴하고 있다. 항복후 즉, 소성변형후 응력과 변형율의 관계는 power law " $\sigma = K(\epsilon)^n$ " 으로 나타낼 수 있다.

3.2 피로 강도

모재 및 용접부의 피로강도를 구하기 위하여 Fig.3에서 보여주듯이 응력진폭을 약 1 kg/mm² 간격으로 하여 high cycle fatigue 실험을 실시하였다. 피로강도는 1×10^7 cycle에서 피로균열의 발생이 없는 응력으로 결정하였다. Fig.3에서 모재의 피로강도는 약 16 - 17 Kg/mm² 정도이며, 용접부의 피로강도는 12 - 13 Kg/mm² 사이로써 모재보다 약 4 kg/mm² 정도 낮음을 알 수 있다. 용접부의 피로파괴는 표면과 내부의 porosity가 용착금속에서 항상 발생되었으므로 결국 용착금속의 피로강도가 곧 용접부의 피로강도임을 알 수 있다.

3.3 피로 균열 전파속도

용접부에서의 피로균열 전파속도는 Fig.4에서 보여주듯이 상호 차이가 크게 없으나, 저 ΔK 영역 ($\Delta K = 7 \sim 25 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$)에서는 열영향부의 전파속도가 늦으며, 높은 ΔK 영역 (25이상)에서는 용착금속의 전파속도가 빠름을 알 수 있다. 한편, ΔK threshold 값은 모재, HAZ나 용착금속에 관계없이 약 $4 \sim 5 \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ 정도로 평가되었다.

4. 결 론

- 1) Al 5083-0 합금과 용접부 (bead off) 의 피로강도는 각기 16 kg/mm^2 , 12 kg/mm^2 보다 약간 높다.
- 2) 용착금속, 열영향부 및 모재의 피로균열 전파속도나 ΔK threshold 값은 큰 차이가 없으며 ΔK threshold 값은 $4 \sim 5 \text{ kg/mm}^{-3/2}$ 정도이었다.

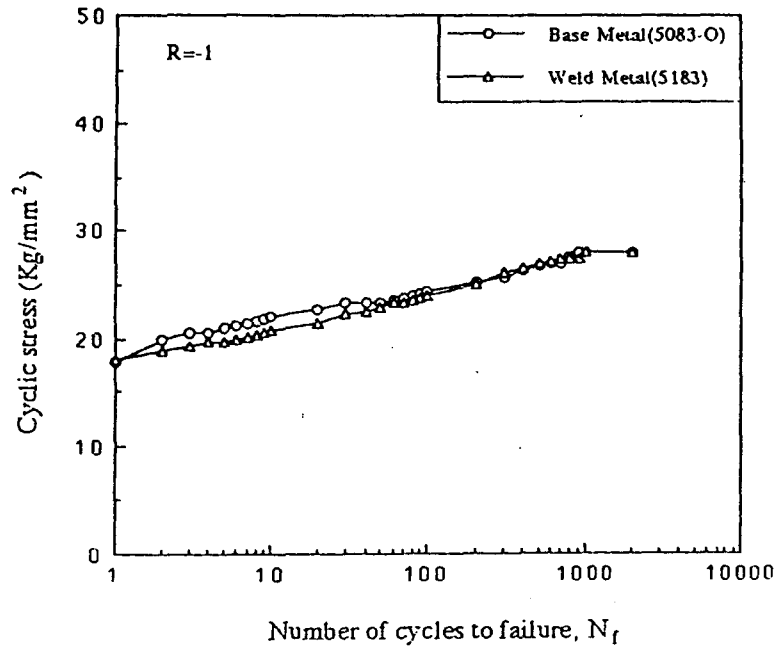


Fig.1 Cyclic stress-number of cycles curves of Al 5083-0 weldment

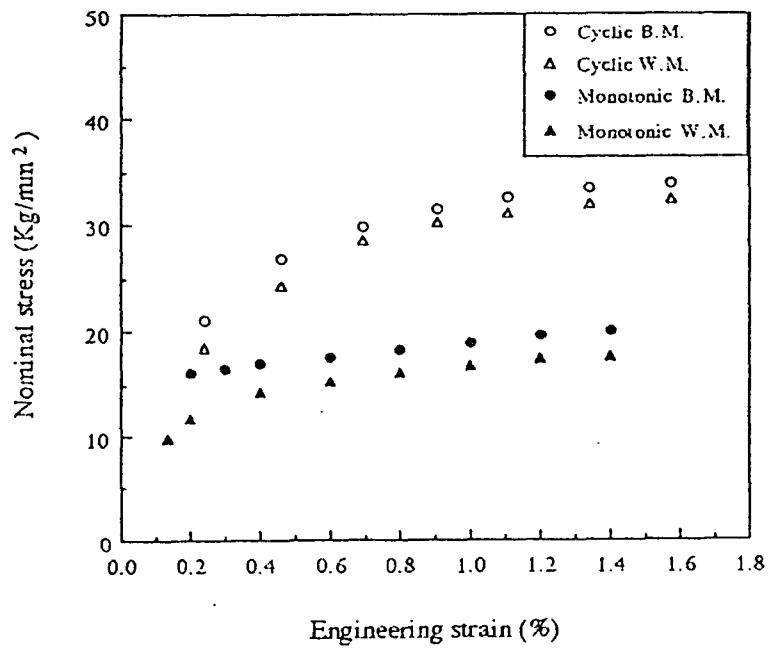


Fig.2 Comparison of monotonic & cyclic stress strain curves

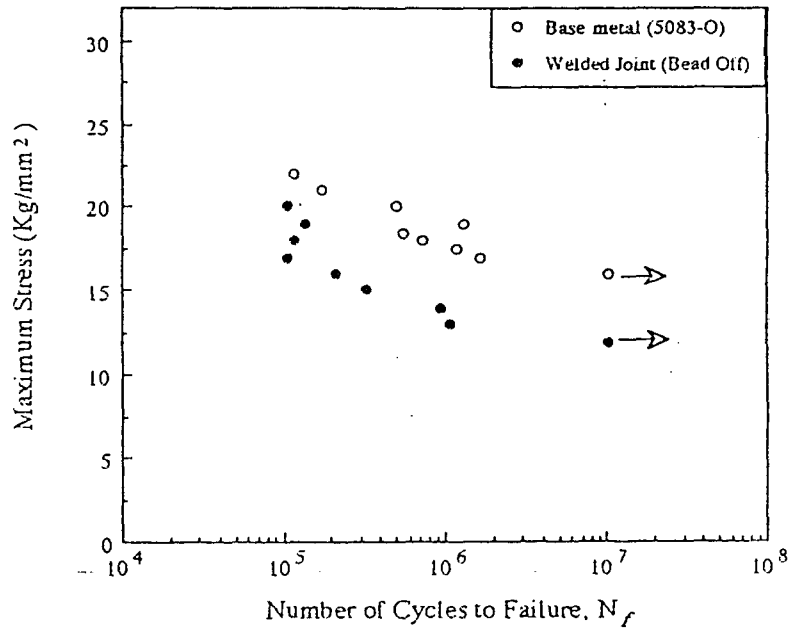


Fig.3 S-N curves for Al 5083-0 weldment

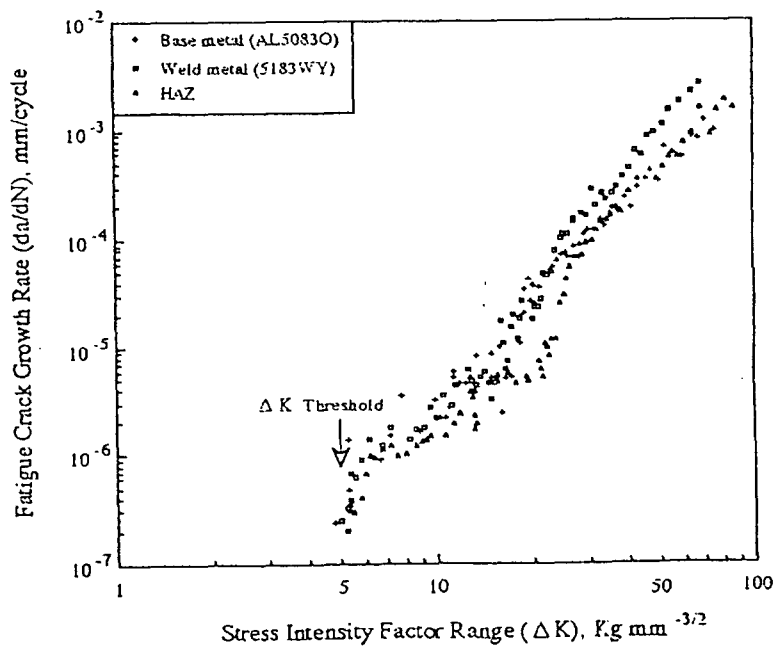


Fig.4 Fatigue crack growth rate for Al 5083-0 weldment