

Membrane용 304 스테인리스 박판의 굽힘피로특성

이태호, 김성준, 김형식*, 김철만*, 홍성호*

한국기계연구원 재료공정연구부, *한국가스공사 연구개발원

Bending Fatigue Properties of 304 Stainless Steel Sheets for Membrane

Tae-Ho Lee, Sung-Joon Kim, Hyoung-Sik Kim*, Cheol-Man Kim* and Seong-Ho Hong*

Dept. of Materials Processing, Korea Institute of Machinery & Materials

** R&D Center, Korea Gas Corporation*

1. 서 론

최근 그 사용이 급격히 증대되고 있는 액화천연가스(LNG)는 극저온 상태에서 저장 또는 운반되며 저장온도와 사용온도(상온) 사이에서 액화 및 기화가 반복되기 때문에 재료의 선택과 시설물 유지에 각별한 주의를 요한다. 초저온용 재료 중 오스테나이트계 304 스테인리스강은 다른 재료에 비해 열적, 전기적 특성이 우수하고 특별한 열처리를 행하지 않아도 되므로 제조가 간편하며, 용접성과 성형성이 우수하여 LNG용 설비의 piping, valve용 소재나 LNG 탱크 내 membrane 소재로 많이 사용되고 있다.

LNG 탱크 내 membrane 소재의 경우 액화 및 기화가 반복되어 재료자체에 열피로를 받고, 저온에서 주름진 부위에 굽힘피로가 반복적으로 가해지기 때문에 실제 사용환경에서의 피로수명 평가 및 예측은 LNG 설비의 수명과도 연관되므로 매우 중요하다. 그러나 현재 굽힘피로 특성에 대해서는 정확한 실험방법이나 시편 및 지그에 대한 기준이 확립되어 있지 않은 상태이며, 매우 제한된 연구결과만이 보고되고 있다.[1] 본 연구의 목적은 LNG 탱크내의 Membrane 소재로 사용되고 있는 오스테나이트계 304 소재의 굽힘피로 시험에 대한 실험방법을 확립하고, 실제 사용온도에서 굽힘피로 특성을 평가하였으며, 이러한 피로수명과 기존의 JGA(Japan Gas Association)에 보고된 데이터[1]와 피로특성을 비교·분석하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 재료는 2.0mm의 판재 오스테나이트계 304 스테인리스강이며 화학조성은 표 1에 나타내었다. 굽힘피로시험은 INSTRON 8501 dynamic machine을 이용하여 상온 및 저온(-162℃)에서 주파수 0.5Hz 조건으로 실험하였으며, 실험에 사용된 시편은 두께 2mm 길이 220mm 폭 25mm의 직사각형 판재로 사용하였다. 굽힘피로 특성은 인장·압축이 반복되는 stroke control로 시험을 행하였으며, 피로시험 이전에 시험편 중앙부에 가해지는 실제 변형량을 측정하였다. 변형량 측정에는 gauge factor $2.15 \pm 1.0\%$ 의 strain gauge(CAS사)를 사용하였으며, 총변형량($\Delta \epsilon / 2$)이 0.4~1.7%의 범위에서 시험을 수행하였다. 피로시험 후 강내 변형유기 마르텐사이트 부피분율은 Mo K α 특성 X선을 이용한 X-선 회절분석으로 측정하였으며[2], 미세조직 관찰은 글리세리기어(글리세린 30ml+염산 20~50ml+질산 10ml) 에칭액으로 화학적 에칭후 관찰하였으며, 파단면 분석은 가속전압 20kV의 JSM-5800 주사전자현미경을 사용하여 수행하였다.

Table 1 Chemical composition of 304 stainless steel analysed (unit : wt.%)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
304 S. S.	0.040	0.51	1.10	0.017	0.006	8.13	18.20	0.028

3. 실험 결과

3. 1 변형량 측정

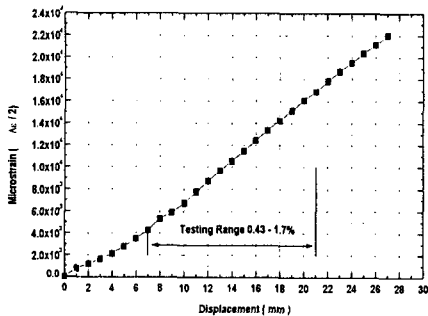


Fig. 1 Displacement vs. microstrain curve

그림 1은 변위량에 따른 변형량의 변화를 나타낸 것으로, 일축인장으로 0~2.2%까지의 변형량을 측정된 결과 변위량이 증가됨에 따라 변형량은 거의 직선적으로 증가되는 경향을 나타내었다. 변형량 측정 후 실제 굽힘피로 시험시 상온의 경우 변형량이 0.4~1.7%(7~21mm), 그리고 저온의 경우 0.97~1.7%(13~21mm)의 범위에서 stroke control로 실험하였다.

3. 2 굽힘피로 특성

그림 2는 총변형량($\Delta \epsilon \sqrt{2}$) 0.4~1.7%에서 상온 및 저온 굽힘피로시험 결과를 나타낸 그림이며, 그림 3은 피로시험 후 강내 마르텐사이트 부피분율을 X선 회절 분석한 결과이다. 그림 2에 나타난 것처럼 총변형량이 증가될수록 피로수명은 감소하며, 동일한 총변형량에서 상온보다 저온의 피로특성이 더 우수하게 나타났다. 또한 그림 3에 나타난 것처럼 상온에서 굽힘피로시험을 수행했을 경우 총변형량이 증가됨에 따라 변형유기 마르텐사이트 부피분율이 직선적으로 증가하다가 총변형량 1.0% 이상에서는 85% 정도의 일정한 값을 나타내었다. 그러나 저온 굽힘시험 후 마르텐사이트 부피분율은 90%이상으로 거의 모든 기지조직이 마르텐사이트로 변태된 것으로 나타났다. 이처럼 변형량이 증가됨에 따라 마르텐사이트 부피분율이 증가되는 이유는 준안정 오스테나이트가 변형 중 응력/변형유기 마르텐사이트로 변태되어 나타나는 현상으로 알려져 있으며[3], 동일한 조건에서 저온에서의 마르텐사이트 부피분율이 훨씬 높은 이유는 온도가 낮아짐에 따라 마르텐사이트 변태를 일으키는 구동력이 감소하기 때문이다. 이러한 변형유기 마르텐사이트 변태는 비탄성 변형 중에 재료내부에 축적되는 내부변형 에너지를 기계적 구동력으로 하여 일어나며, 결과적으로 이 내부변형 에너지가 마르텐사이트 변태를 통해 연속적으로 이완되면서 연신율이 증가되고 이때 생성된 경질의 마르텐사이트에 의해 강도가 증가되는 것으로 보고되고 있다.[4] 따라서 이러한 변형유기 마르텐사이트 변태에 기인된 연성 및 강도향상이 저온 피로특성을 증가시킨 것으로 판단된다. 그림 4는 굽힘피로 시험 전·후의 미세조직을 주사전자 현미경을 이용하여 관찰한 결과이다. 초기 오스테나이트 기지조직(그림 4(a))에서

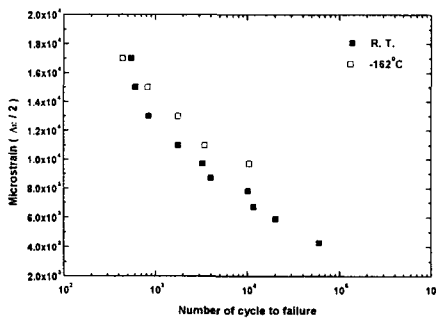


Fig. 2 Results of 3 point bending fatigue test of 304 stainless steels

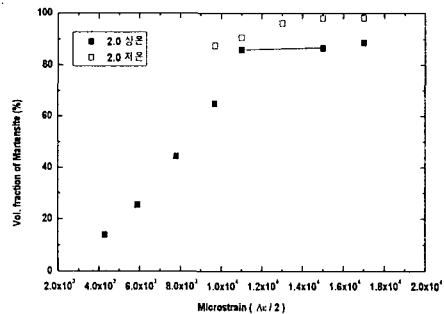


Fig. 3 Variations of martensite volume fraction with microstrain

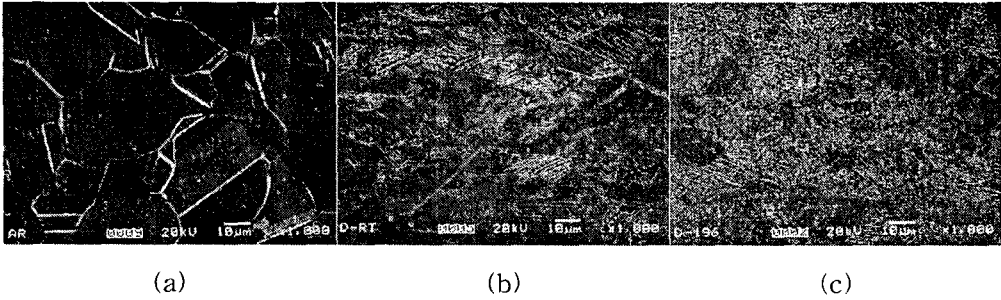


Fig. 4 SEM micrographs of 304 stainless steels ; (a) as-received, (b) $\Delta \varepsilon / 2 = 0.8\%$ at room temperature and (c) $\Delta \varepsilon / 2 = 1.7\%$ at -162°C

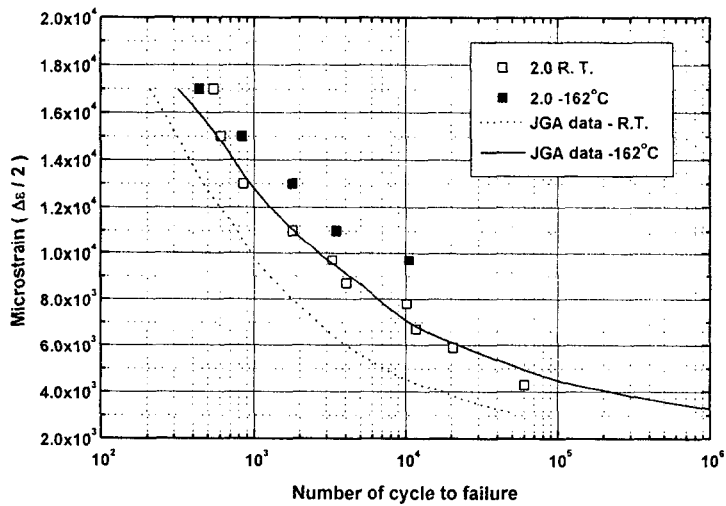


Fig. 5 Comparison of 3-point bending fatigue test results obtained in this study with JGA reports

오스테나이트 결정립계 내부에 마르텐사이트가 형성된 것을 관찰할 수 있으며(그림 4(b), 보다 마르텐사이트 함량이 높은 저온에서는 거의 모든 기지조직이 마르텐사이트로 구성되어 있음을 알 수 있다. 그림 5는 기존에 보고된 JGA(Japan Gas Association) 데이터와 본 연구에서 수행된 굽힘피로 특성을 비교한 그림이다. 상온 및 저온 모두에서 JGA (Japan Gas Association) 기준을 만족하고 있으

며, 저온 특성은 유사하지만 상온 피로특성은 국산소재가 훨씬 우수한 것으로 나타났다.

그림 6~7은 상온 및 저온 굽힘피로 시험 후 얻어진 파단면을 주사전자현미경을 이용하여 관찰한 결과이다. 그림 6에 나타난 것처럼 굽힘피로 시험시 균열은 시편의 양쪽 표면부위에서 발생되어 시편 내부로 진전되다가 중앙부에서 만나는 것을 알 수 있으며, 균열은 시편 표면의 여러 곳에서 동시에 발생된 것을 알 수 있고 균열 시작점에서 균열이 진행됨에 따라 striation 간격은 점차로 증가됨을 관찰할 수 있다. 그림 7은 -162°C 에서 총변형량 0.97, 1.7%로 굽힘피로시험한 시편에서 관찰된 주사전자현미경 조직이다. 동일한 온도에서 총변형량이 증가됨에 따라 균열전파속도가 빨라져 striation 간격이 훨씬 넓은 것을 관찰할 수 있으며, 그림 6의 상온 실험 후와 비교해서 균열시작 지점에서 마르텐사이트 부피분율이 높은 것을 알 수 있으며, 동일한 총변형량에서 피로특성이 우수한 저온에서 striation 간격이 좁은 것을 관찰할 수 있다.

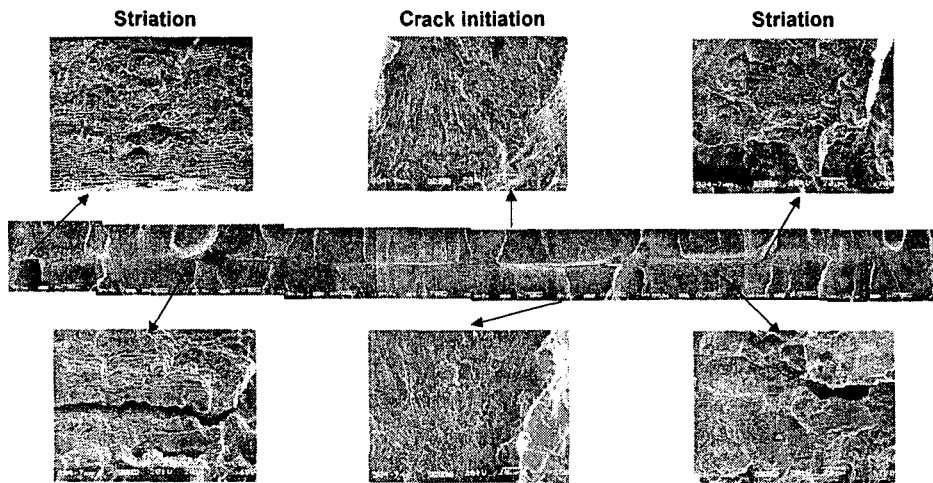


Fig. 6 SEM micrographs of fatigue fractured surface tested at RT specimen ($\Delta \epsilon / 2 = 0.4\%$) showing crack initiation and crack propagation sites

4. 결 론

Membrane용 오스테나이트계 304 스테인리스강을 총변형량 0.4~1.7% 범위에서 굽힘피로시험을 수행한 결과 다음의 결론을 얻었다.

(1) 총변형량이 증가됨에 따라 피로수명은 감소하였으며, 상온보다 저온 굽힘

피로특성이 우수하였으며, 이는 변형유기 마르텐사이트 변태에 의한 강도 및 연성향상에 기인한 것으로 판단된다.

(3) 기존에 보고된 JGA 결과와 비교해서 저온 굽힘피로 특성은 유사하였으며, 상온 특성은 훨씬 우수한 것으로 나타났다.

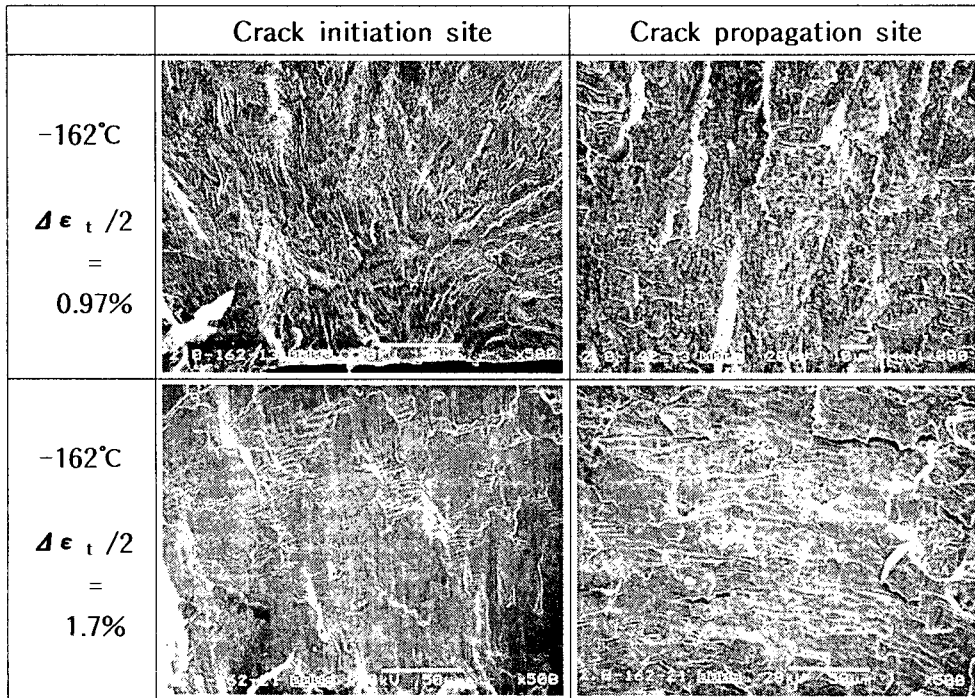


Fig. 7 SEM micrographs of fatigue fractured surface tested at -162°C ($\Delta \epsilon_t / 2 = 0.97$ and 1.7%)

5. 참고문헌

- (1) Japan Gas Association Committee on LNG Inground Storage : "Recommended practice for LNG inground storage", March, p.123 (1979)
- (2) R. L. Miller : Trans. ASM, **61**, p.592 (1968)
- (3) D. Peckner and I. M. Bernstein : Handbook of Stainless Steel, Mc-Graw Hill Inc., 4 (1987)
- (4) 신흥철, 하태권, 장영원 : 대한금속학회지, **34**, p.1550 (1996)