

소성가공이 멤브레인 피로 수명에 미치는 영향

윤인수*, 김영균*, 김정규**
(*한국가스공사 연구개발원, **한양대학교 기계공학부)

The Effect of Plastic Working on the Membrane Fatigue Life

I.S. Yoon*, Y.K.Kim*, J.K. Kim**
Kogas R&D Center*, Hanyang university**

Abstract

An investigation was made on the fatigue characteristics of type 304 stainless steel membrane manufactured by plastic working. To investigate the effect of plastic deformation, tests were performed with 5 types of specimens having different amount of plastic deformation. Fatigue tests were executed under both room and LNG temperatures (-162°C). All the test results were compared with the fatigue data provided by RPIS(Recommended Practice for Inground LNG Storage Tank). On the basis of these results, it was confirmed that RPIS's design fatigue curve could be applied to evaluate fatigue life of KOGAS membrane manufactured by pressing.

1. 서론

2003년 하반기부터 시작된 국제유가 상승세가 지속되면서 고유가 체제가 장기화될 가능성 까지 제기되고 있는 상황이다. 에너지 다소비형 산업이 주축인 우리나라에서는 지속적인 경제 발전을 위해서는 에너지의 안정적 공급이 필수적이다. 이를 위해서 해외 유전 개발 강화 및 에너지 이용 다변화 정책이 본격화될 것이다. 대체에너지 적용에 있어 환경문제의 중요성 또한 커지고 있으며 특히 국제기후변화 협약인 교토의정서를 비준함으로써 온실가스 감축 노력이 본격적화 될 것으로 예상된다. 따라서 경제 발전, 에너지 사용 그리고 환경 보존의 세 가지 문제를 동시에 풀어야 한다. 이러한 여러 문제를 해결할 수 있는 대안으로 도시가스 및 화력 발전소등의 기본 에너지 원료로서 사용되는 천연가스가 언급되고 있다. 즉 청정 연료로서의 장점과 석유 대체 에너지로서의 가능성이 커 그 수요가 증가 하고 있다. 천연가스는 운송 및 저장시 대기압, -162°C 상태에서 액화상태로 탱크에 저장되며 이러한 탱크는 충분한 안전성과 안정성을 요구한다. LNG 저장탱크는 내조의 형식에 따라 9% Ni형강을 이용한 자립형 탱크와 스테인리스 판을 가공하여 제작한 멤브레인을 이용하여 내조를 구성한 멤브레인형이 있다. 멤브레인은 주름을 가지고 있는, 두께 1.2~2 mm의 박판으로 LNG저장에 따라 발생하는 열변형을 주름부에서 신축적인 작용으로 흡수하여 액체의 기밀을 유지하는 구조로서, LNG저장탱크 및 LNG선박에서 사용되고 있다. LNG에 의한 액하중은 LNG선박의 경우는 선체에서, LNG탱크의 경우는 단열재 및 외부 콘크리트 구조물에 의해 지지하게 된다. 멤브레인의 거동을 살펴보면, 평판 부에서는 열변형이 거의 발생하지 않고 주름

부에서 항복강도를 초과하는 고변형률이 발생하도록 디자인한 것으로, 기밀성, 저온 인성 및 열전도성의 특성이 요구된다. 또한, 저장탱크 내의 LNG 방출과 충전으로 인한 압력과 온도의 반복적인 부하에 대해 충분한 피로수명강도가 요구된다. 멤브레인의 성능평가는 RPIS 기준에서 규정하고 있다. RPIS는 주 내용은 멤브레인의 안정적 거동 여부 확인 및 피로 수명 강도 평가로 이루어져 있다. 이러한 평가는 LNG 저장탱크 실제 운전 시 예측되는 각각의 하중 조건에서 발생하는 멤브레인 주름부의 변형률을 시험 또는 해석에 의해 구한 후 이 변형률 값을 이용하여 평가를 하게 된다. 특히 장기간 운전에 따른 멤브레인의 피로 강도의 확인이 중요하며 이 평가는 변형률 값을 조합하여 Design Fatigue Curve에 적용 하여 멤브레인의 피로 수명 강도를 평가하게 된다.

멤브레인과 같이 소성가공에 의한 주름 생성 방식에 의해 제작 되는 경우에는 주름부는 소성가공에 따른 변형이 발생하며 이에 따른 기계적 특성 및 피로특성 변화의 확인이 필요하다. 이를 위해 일본에서는 멤브레인식 LNG 저장탱크 운영회사 (Tokyo Gas), 건설 4개사 (IHI, MHI, KHI, NKK) 그리고 학계에서 공동으로 모재 및 냉간가공재에 대한 굽힘 피로 시험을 수행하여 RPIS에 피로수명 평가에 적용할 수 있는 설계 피로 곡선 (Design Fatigue Curve)를 제시 하고 있다. 한국가스공사에서 RPIS에서 제시한 곡선을 이용하여 KOGAS 멤브레인의 피로 수명 평가를 수행 하였다. 그러나 RPIS에서 수행한 피로 시험의 시험편 조건은 압연공정에 의한 냉간가공 방식으로 제작한 평판 및 봉 형상의 시험편에 최대 20% 소성변형을 부하하는 방식으로 제작되었다. 따라서 KOGAS 멤브레인과 같이 프레스 작업에 의해 제작 하는 경우 동일한 설계 피로 곡선을 적용에 따른 문제 발생 여부를 확인할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 멤브레인 제작시 발생하는 소성가공 그중 프레스 가공에 의한 피로수명의 영향을 평가 하고자 소성변형량을 달리하는 5종류의 시험편을 제작하여 상온 및 LNG 온도인 -162°C 환경에서 피로시험을 수행 하였다. 이 시험 결과를 이용하여 멤브레인의 소성가공에 따른 영향을 분석하였다. 또한 KOGAS 멤브레인의 피로수명 평가법에 적용 가능한 설계 피로 곡선을 확립하여 정확한 피로수명 평가가 수행될 수 있도록 함을 그 목표로 하였다.

2. 재료 특성 및 시험 방법

시험편 제작에 사용된 소재는 POSCO사 STS 304 제품으로 기계적 특성을 Table 1에 화학적 조성을 Table 2에 나타냈다. 소성 가공량을 달리 하는 5 종류의 시험편을 제작 하고자 Fig.2와 같이 프레스 가공 고정부의 거리를 조절하여 소성 변형량이 다른 시험편을 제작 하였다. 시험편의 제작은 길이(L)의 끝단에 요철의 홈을 가공하여 이 요철의 홈에 의하여 평판의 시험편을 고정한 후 멤브레인의 주름의 형상을 갖는 편치로 고정부 사이에서 균일한 소성변형이 일어나도록 멤브레인의 형상을 성형하였다. 이러한 일련의 가공 과정으로 5종의 멤브레인 시험편을 제작하였으며, 성형에 따른 길이 변화율을 Table 3에 나타내었다. 소성가공 후에 시험편의 길이를 동일하게 절단하여 시험편 길이에 의한 오차가 발생하지 않도록 Fig.2와 같은 시험편을 제작하였다.

Table 1. Mechanical Properties of STS 304 steel. (POSCO)

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
STS 304	279.5	637.5	56

Table 2. Chemical Compositions. (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.06	0.60	1.30	0.035	0.01	8.1~8.5	18.10~18.70

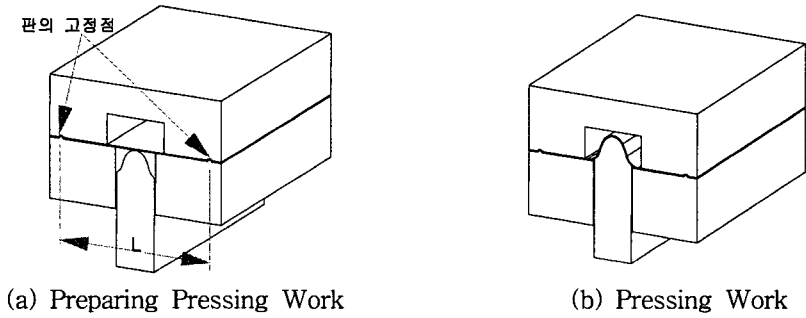


Fig. 1 Manufacturing of Test Specimen

Max. Strain Point

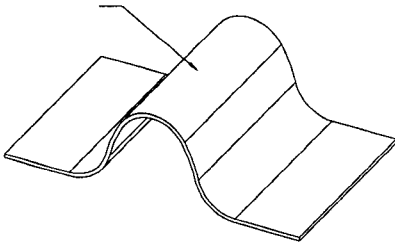


Fig. 2 Specimen Configuration.

Table 3. Specimen dimensions.

Type	L	변형률(%)	Remarks
S1	130	34.6	Pressing
S2	164	27.4	Pressing
S3	202	22.2	Pressing
S4	271	16.6	Pressing
S5	-	0	Bending

2.2 시험 방법

시험장비는 다이내믹 만능시험기(INSTRON사, model:8504)를 이용하였으며, 분위기 조성은 액체질소의 기화열을 이용하여 온도조절을 할 수 있도록 고안된 별도의 챔버를 이용했다. 챔버의 온도제어는 액체질소의 공급량을 솔레노이드 밸브로 제어하는 방식을 사용하였으며, LNG온도인 -162°C 를 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 오차범위로 제어하였다.

피로시험은 일정 변위제어(stroke control) 방식으로 수행하였으며, LNG 저장탱크 내에서의 멤브레인 실제 거동조건인 변위량비 $R=0$ 에서 주파수 0.5Hz sine 파형으로 시

험을 수행하였다.

변형률 측정은 최대 변형이 예측되는 주름 상부에 Strain Gage (일본 KYOWA사, 상온모델:KFG-1-120-D16, 저온모델: KGL-1- 120-C1)를 부착하여 측정하였으며 측정 장비(HBM사 MGC-Plus)를 사용하여 데이터를 획득 하였다.

3. 시험결과

3.1 소성가공 영향

Fig. 3~4는 상온 및 LNG 온도 (-162℃) 환경에서 수행한 시험편의 피로 시험 결과를 나타냈다. 결과에 의하면 소성 가공에 따른 각각의 시험편에 미치는 영향을 분석한 결과 소성 량이 각각 다른 시험편의 피로 시험 결과가 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타나고 있다. 즉, 본 시험에 적용된 소성 가공량인 20% 범위 내에서 냉간가공에 의해 부하된 소성 변형은 멤브레인의 피로수명에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한, 소성가공에 의한 주름 발생에 따른 경도 증가 현상 또는 프레스 가공 제작 시 발생하는 미세 크랙 등의 생성에 따른 피로 수명 감소 현상은 발생하지 않는 것으로 나타나, 소성가공 및 제작 과정에 의한 영향이 크지 않음을 알 수 있었다.

3.2 온도 영향

피로시험은 상온과 LNG온도(-162℃) 환경에서 수행하였으며, 이를 통해 온도 환경 변화에 따른 피로수명에 미치는 영향을 평가 하고자 하였다. Fig. 3~4의 시험결과에 의하면 LNG 온도에서의 시험 결과가 상온에서의 시험결과보다 더 큰 수명을 갖는 것으로 나타났다. 특히 이러한 현상은 고주기 피로 사이클에서 크게 나타났다.

이러한 현상은 상온의 경우 마르텐사이트 변태가 점진적으로 진행되는 반면 저온의 경우 피로시험 초기에 마르텐사이트 변태가 급격히 발생하여 위의 균열전파역제가 중요한 기구로 작용한 것으로 사료된다. 즉 선행 연구결과에 의해 제시된 바와 같이 저온 피로시험 후 균열주위에 기지보다 많은 변형유기 마르텐사이트가 관찰되었으며, 이런 변형유기 마르텐사이트의 균열전파에너지를 흡수하여 피로특성을 향상시킨 것으로 설명된다.

3.3 RPIS Best Fit Curve와의 비교

Fig. 3~4는 또한 저온 및 상온에서 구한 피로시험 결과데이터를 RPIS에서 제시한 Best Fit Curve와 비교하여 도시한 결과이다. 상온의 경우 결과에서 보이듯이 RPIS 곡선과 시험 결과가 고주기 영역에서는 비교적 잘 일치하나, 저주기 영역에서는 잘 일치하지는 않는 것으로 나타났다. 반면에 저온에서는 모든 영역에서 근소하나마 낮은 값을 나타내는 것을 알 수 있었다. 즉 상온 과 저온 환경 모두 저 사이클 수명 영역 결과에서는 RPIS 값과 비교할 경우 피로 수명 값이 낮은 영역에 분포 하고 있는 것으로 나

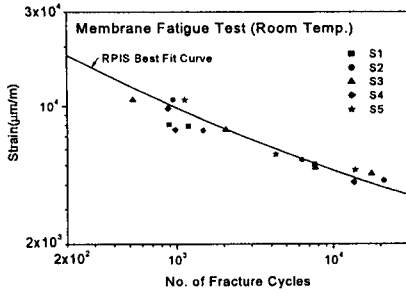


Fig. 3 Comparison of Fatigue Data with RPIS Curve at Room Temperature.

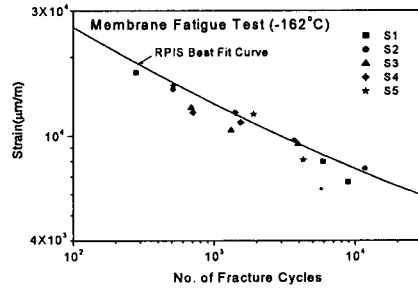


Fig. 4 Comparison of Fatigue Data with RPIS Curve at Low Temperature.

타났다. 그 이유는 서론에서 밝혔듯이 RPIS 제시 결과는 평판에 압연가공 방식의 성형 가공이 적용된 표준시험편의 시험결과이며, 본 논문에서 수행된 시험에선 소성 가공을 적용하여 주름을 생성하는 방식의 멤브레인시험편의 결과이기 때문으로 사료된다. 즉 이것은 소성가공의 영향보다는 멤브레인의 형상에 의한 응력의 집중현상과 관련된 것으로 분석된다. 그러나 10^4 사이클 이상에서는 오히려 수명이 크게 나타났다. 이러한 현상은 멤브레인 제작시 생성되는 마르텐사이트 변태가 10^4 사이클을 기준으로 고 스트레인 영역에서는 균열전파 에너지 흡수가 낮고, 저 스트레인 영역에서서는 크게 나타나는 특성이 있으며, 이러한 특성이 각각의 조건에서의 수행된 시험편의 피로수명에 직접 영향을 미치는 것으로 사료된다.

3.4 RPIS Design Fatigue Curve 적용

멤브레인의 피로강도 평가는 유한요소해석 또는 시험에 의해 구한 변형률 값을 이용하여 수행하게 된다. 변형률 값을 구하여 설계 피로 곡선의 (Design Fatigue Curve) 변형률에 적용하여 이에 해당하는 허용 사이클을 구해 피로 강도를 평가하게 된다. 이러한 설계피로곡선 (Design Fatigue Curve) 은 시험을 통해 구한 값을 이용하여 결정한 Best Fit Curve에 안전율을 적용하여 구해진다. 본 논문에서 제시한 피로 시험 결과는 3.3절에 나타난 바와 같이 RPIS Best Fit Curve와는 완전하게 일치 하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 KOGAS 멤브레인 주름부의 피로 강도 평가 시 기존의 RPIS 제시 설계 피로 곡선 적용 여부를 판단할 필요가 있다. RPIS의 설계피로곡선 결정에 기본이 되는 시험 Best Fit Curve는 여러 시험 데이터를 종합 하여 결정한 곡선이다. 따라서 Best Fit Curve 결정에 사용된 각각의 데이터 값과 본 시험을 통해 구한 피로 수명 데이터 값을 비교 하였다.

상온 및 저온 조건에서의 시험 결과를 각각 Fig. 5 ~ Fig. 6에 나타냈다. 상온 환경 및 저온 환경에서 실시된 두 가지 시험 모두 RPIS의 피로시험 결과 값이 분포되는 영

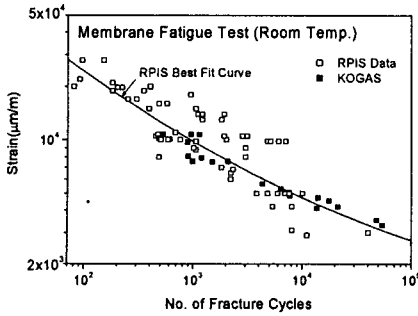


Fig. 5 Comparison of Fatigue Data with RPIS data at Room Temperature.

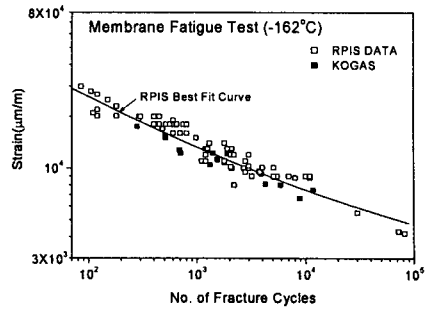


Fig. 6 Comparison of Fatigue Data with RPIS data at LNG Temperature.

역 내에 본 시험에서 얻은 결과 값이 분포되어 있는 것으로 나타났다. 따라서 RPIS Best Fit Curve를 이용하여 구한 설계 피로 곡선을 KOGAS 멤브레인 피로 강도 평가 시 RPIS의 데이터를 이용하여 피로 수명 평가를 수행하여도 문제가 발생하지 않을 것으로 판단 된다. RPIS의 피로시험 데이터의 경우 여러 회사가 참여하는 방식으로 시험이 수행되어 각 사별로 시험 환경 상이 등의 영향으로 시험 결과 값의 차이가 발생하는 것으로 사료된다. 한편 저온 시험에서 데이터의 분포가 크지 않은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 저온 환경에서는 온도변화가 주된 요인으로 작용하여 기타 시험환경차이 등에 의한 영향이 감소하게 되어 각 조건에서의 피로 시험 결과 값의 분포가 상온보다 작게 나타나는 것으로 사료된다.

4. 결론

멤브레인 제작시 발생하는 소성 변형에 의한 피로수명에 미치는 영향을 파악하고자 소성변형량을 달리하여 STS 304 재료 5가지 시험편에 대한 피로 시험을 상온 및 LNG 온도에서 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 일정범위 내에서 소성 변형량이 피로 수명 사이클에 미치는 영향을 평가한 결과 차이가 없는 것으로 나타났다.

(2) 상온 및 LNG 온도 환경에서 피로 시험을 수행 한 결과 저온 환경에서 피로 수명이 향상 되는 것으로 나타났다.

(3) 소성가공에 의한 주름을 갖는 스테인리스 재료를 이용하여 제작되는 KOGAS 멤브레인의 피로수명 평가 시 기존에 제시된 RPIS 설계피로곡선을 적용하여도 평가가 가능한 것으로 나타났다.