

## LNG저장탱크의 멤브레인용 국산 304 스테인리스강의 기계적성질 및 피로수명 평가

김 형 식\*

(2001년 3월 14일 접수, 2001년 7월 9일 심사완료)

### The Evaluation of Mechanical Properties and Fatigue Life for Domestic 304 Stainless Steel Used as Membrane Material in LNG Storage Tank

Hyoung-Sik Kim

**Key Words:** LNG Storage Tank(LNG저장탱크), Membrane(멤브레인), Axial Fatigue(인장 피로), Bending Fatigue(굽힘피로), Biaxial Fatigue(이축인장피로)

#### Abstract

Mechanical properties of domestic 304 stainless steel have been evaluated for membrane material used in LNG storage tank. LNG tank is operated around  $-162^{\circ}\text{C}$ . The temperature of membrane depends on LNG level. Accordingly, the membrane material is deteriorated by variation of liquid pressure and temperature. Tensile test and fatigue life test were performed at room temperature and  $-162^{\circ}\text{C}$  per code requirements. Especially the biaxial fatigue life test was conducted with shaped membrane sheet at a thermal strain of  $\Delta T=190^{\circ}\text{C}$ . The test results obtained with the domestic 304 stainless steel showed better properties compared to the values required by code.

#### 1. 서 론

청정연료인 천연가스는  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 액체상태로 액화하여 특수하게 설계된 용량 100,000  $\text{m}^3$  이상의 대형탱크에 저장된다.

액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG) 저장탱크의 내부에는 액체의 기밀성을 유지하기 위해 얇은 스테인리스 강 판재를 용접하여 원통형조를 설치하는데 이들 판재를 멤브레인이라 한다.<sup>(1)</sup> 판재의 두께는 1.2~2 mm이며 전면에 수평/수직 방향으로 주름이 교차되어 있어 열수축에 의한 하중을 이러한 주름이 흡수하게 되어있다. 그리고 멤브레인의 서비스 온도가 상온에서부터  $-162^{\circ}\text{C}$ 이기 때문에 초저온에서의 기계적 성질이 우수한 304 스테인리스강을 사용한다.

멤브레인의 주름의 경우 탱크 수명기간 동안 LNG를 채우고 비움의 반복에 따라 액압하중과 열하중에 의해 수축/팽창이 반복된다. 따라서

멤브레인으로서 사용되는 재료는 초저온에서의 안정적인 기계적성질이 확보되어야 할뿐만 아니라 이러한 하중의 반복에 의한 피로수명이 보장되어야만 한다. Table 1에 상용의 외국산 멤브레인 에 대한 서비스 중에 각 하중 조건에서 멤브레인 표면에 발생하는 최대 변형량을 나타내었다. 하중조건  $\Delta \epsilon 1$ ,  $\Delta \epsilon 2$ ,의 경우는 LNG의 채움과 비움에 의해 발생하는 액압변동과 온도변동( $\Delta T=90^{\circ}\text{C}$ )에 해당하며  $\Delta \epsilon 3$ 는 LNG를 완전히 비움상태(상온상태)의 반복에 의한 하중( $\Delta T=190^{\circ}\text{C}$ )이다.<sup>(2)</sup> 대부분의 대형 구조물의 작동하중이 탄성영역인데 비해 멤브레인의 경우는 최대 반복 변형량이 탄성범위를 초과하여 1%내외의 소성변형이 발생하는 것을 알 수 있다.

본 논문에서는 한국가스공사 인천생산기지 13, 14호에 적용된 IHI(Ishigawajima-Harima Heavy Industry) 멤브레인 용으로 사용할 국내산 304 스테인리스 강 의 성능을 평가하기 위해 수행한 상온 및  $-162^{\circ}\text{C}$ 에서의 기계적 성질 및 피로수명(인장, 굽힘) 그리고 실물 시험으로서 멤브레인을 2축 인장피로 시험한 내용을 소개하고자 한다.

\* 회원, 한국가스공사 연구개발원

E-mail : hskim@kogas.re.kr

TEL : (032)810-0371 FAX : (032)810-0360

**Table 1** Maximum induced strains on various membranes surfaces for three loading conditions

Company	Position	Max. strain( $10^{-6}$ strain)		
		$\Delta \epsilon_1$	$\Delta \epsilon_2$	$\Delta \epsilon_3$
Technigaz <sup>(3)</sup>	side	332	5,816	11,836
IHI <sup>(4)</sup>	side	840	5,500	12,800
MHI <sup>(2)</sup>	side	645	98	1,774

note) 1. IHI(Ishikawajima-Harima Heavy Industry)  
2. MHI(Mitsubishi Heavy Industry)

**Table 2** Chemical composition of 304 stainless steel(wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
304	0.045	0.61	1.08	0.022	0.003	18.14	8.66

## 2. 실험방법

### 2.1 304스테인리스 강

일반적으로 국내에서 유통되고 있는 304 스테인리스강의 경우 니켈을 8.1% 내외로 함유하고 있다. 하지만 본시험에 사용한 304스테인리스강의 경우 특별히 초저온에서 사용할 목적으로 국내에서 생산된 제품으로 Table 2에서 보는 바와 같이 8.66%의 니켈을 함유하고 있다(이는 IHI에서 특별히 요구해서 생산한 제품임). 두께는 2.0mm이며 프레스 공차(0.1~0.2mm)를 갖고 있다.

또한 IHI멤브레인 실물시편의 경우 국내산 304스테인리스강을 사용하여 일본 IHI에서 성형한 것으로 Fig. 4와 같이 십자형으로 주름이 교차된 멤브레인을 사용하였다.

### 2.2 인장시험

인장성질로는 상온과  $-162^{\circ}\text{C}$ 에서 길이방향(롤링방향)에서의 탄성계수, 항복강도, 인장강도, 연신율을 측정하였다. 시편의 형상은 ASTM E8M에 따랐다. 탄성계수는 인스트론의 저주기 피로시험용 소프트웨어에 포함되어 있는 탄성계수 측정 기능을 사용하여 상온,  $-100$ ,  $-162^{\circ}\text{C}$ 에서 시험하였다. 이 프로그램에서 시편에 300kg의 하중을 0.2Hz의 주기로 3회 인가하여 탄성계수를 측정하여 평균을 산출하였다. 그리고 이후 연속해서 인장시험 하여 다른 인장성

질들을 측정하였다. 인장성질시험에서는 각 온도당 3개의 시편에 대해 시험하여 평균값을 산출하였다.

### 2.3 인장 피로시험

고주기피로 성질 평가를 위해 인장피로시험을 하였다. ASTM E466에 따른 피로시편을 사용하였다. 시편은 길이방향으로 채취하였다. 하중제어로 시험하였으며 사용한 응력조건은 최대인장응력의 1/2이 평균응력인 편진인장응력상태에서 시험하였다. 시편의 최소 단면적 부위의 표면은 모두 #320 샌드페이퍼를 사용하여 길이방향으로 폴리싱하였다. 상온 시험시 시편의 온도상승을 방지하기 위해 선풍기로 시편표면을 공랭하였다. 피로수명은 동일조건에서 5회시험하여 최저/최고값을 제외한 나머지 3회의 평균값으로 산출하였다.

### 2.4 마르텐사이트의 양 측정

페라이트 스코프를 이용하여 마르텐사이트 양을 측정하였다. 모델명은 Fischer사의 FERITSCOPE MP3C이다.

### 2.5 굽힘 피로시험

멤브레인의 경우 열수축하중을 흡수하기 위해 주름이 설계되어 있다. 이 주름은 액위 및 온도 변화에 의해 서비스 기간 동안 수축/팽창을 반복하게 된다. 이러한 수축/팽창에 의해 멤브레인의 주름부에는 굽힘형태의 하중에 의해 큰 변형이 발생하게 된다. 따라서 설계수명의 확인을 위해서는 굽힘피로수명을 평가해야 한다.

굽힘피로시험 방법의 국제적인 규격화는 아직까지 미진한 상태이다. 다만 JIS에서 장치가 가져야할 개략적인 요건만을 규정하고 있다. JIS의 요건에 따라 제작한 굽힘피로지그를 인스트론과 시마쯔 등에서 판매하고 있다. 본 실험에서는 시마쯔의 굽힘피로지그를 기초로 하여 2mm 두께의 스테인리스강 판재의 굽힘피로시험에 적합하도록 Fig. 1과 같은 지그를 자체 제작하여 사용하였다.<sup>(6)</sup> 지그는 인장시험기에 장착되어 크로스헤드의 상하운동에 의해 굽힘시편에 4점굽힘 하중을 반복 인가한다. 그리고 시편형상을 Fig. 2에 나타내었다.

굽힘피로시험은 일정변형량의 반복인가에 의해 실험하였다. 하지만 본 실험에서 사용하는

굽힘피로시험에서는 수평이동량에 의해 변형량을 제어하는 익스텐서미터의 사용이 불가능하다. 따라서 굽힘시험기는 인장시험기에 장착하여 스트로크 컨트롤에 의하여 시험하고, 사전에 일정 스트로크의 반복에 의해 발생하는 시편중앙부의 표면변형반복량과의 관계를 마이크로스트레인게이지를 이용하여 측정후 원하는 변형량범위에서 해당하는 스트로크에서 시험하였다. Fig. 3은 이러한 스트로크와 표면 변형량과의 관계를 측정한 결과이다. 측정결과 스트로크 진폭과 변형량과의 관계가  $y(\text{변형율}) = -485.15 + 1602.0x(\text{스트로크})$ 로 직선적인 관계를 갖는 것으로 나타났다. 이때 사용한 마이크로스트레인게이지는 반복성이 우수한 고탄성/고변형의 Kyowa KFEL-2-120-C1을 사용하였다. 피로수명은 시편이 완전히 파단되어 분리되는 횟수로 하여 동일조건에서 3회시험하여 평균을 산출하였다.

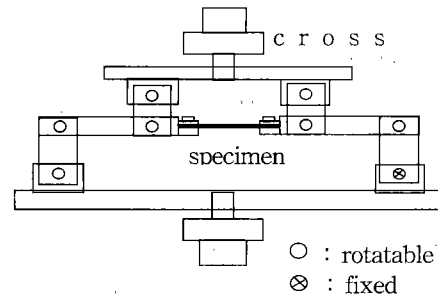


Fig. 1 Bending fatigue jig

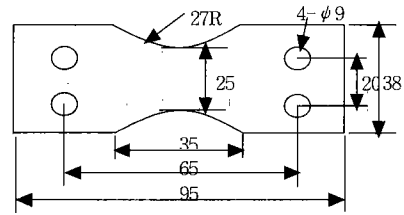


Fig. 2 Bending fatigue specimen

2.6 IHI 멤브레인 실물의 2축인장 피로시험

두께 2mm의 국내산 304 스테인리스강으로 제작된 IHI멤브레인으로 2축 인장피로시험을 하였다. 시험조건은  $\Delta \epsilon_3$ 하중에 대한 피로수명만을 측정하였다.

이를 위해 Fig. 4와 같이 십자형(Cruciform) 인장시험기(인스트론사 제품)를 사용하여 주름이 45°로 4방향에서 인장하여 주름이  $\Delta T = 190^\circ\text{C}$  (-162°C에서 상온까지의 온도차)의 열변형량만큼 팽창/수축이 반복되도록 하였다. 이 열변형량을 표점(x)간의 간격에 부가되도록 하였다.

IHI에서 설계한 한국가스공사 인천생산기지 13, 14호기 LNG탱크의 경우 앵커와 앵커사이의 간격(멤브레인이 단열재에 고정되는데 이 간격을 말함)이 최대 2.35m이고 두 앵커사이에 하나의 주름이 존재하므로  $\Delta T = 190^\circ\text{C}$ 의 열하중에 의해 한 주름이 흡수하는 열 수축량을 계산하면 다음과 같다.<sup>(4)</sup>

$$\begin{aligned} \text{수축량} &= \Delta T \times \text{스테인리스강의 선팽창계수} \\ &\quad \times \text{앵커사이 간격(mm)} \\ &= 190^\circ\text{C} \times 14 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \times 2,350 \\ &= 6.251 \text{ mm} \\ &\approx 6.3 \text{ mm} \end{aligned}$$

그리고 멤브레인의 열변형에 의한 안정적인 변형거동 여부와 최대 변형량을 확인하기 위해

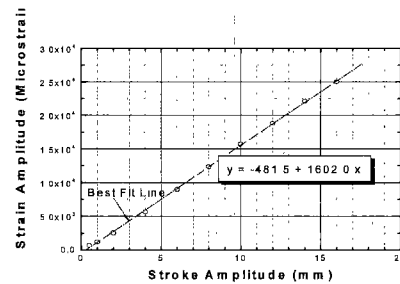


Fig. 3 Relation between Instron stroke and surface strain for the bending fatigue jig

유한요소 해석에 의해 얻은 최대 변형량 발생 위치에 마이크로스트레인 게이지를 부착하여 피로시험시 변형을 연속적으로 측정하였다.

피로수명은 스테인리스강 표면에 균열이 발생하여 두께방향으로 완전히 관통되는 횟수로 하였다. 관통여부의 확인은 육안검사와 액체침투탐상법을 사용하였다.

3. 시험결과

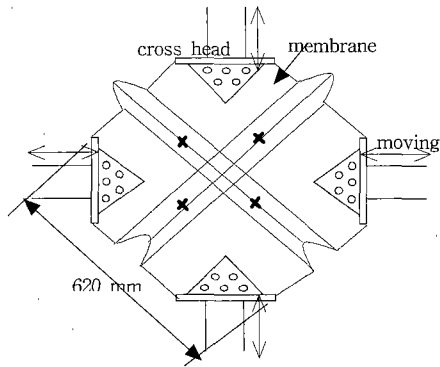


Fig. 4 Biaxial(cruciform) tensile machine with IHI cross membrane

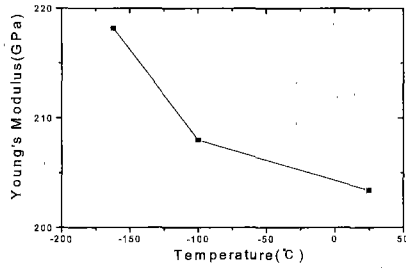


Fig. 5 Variations of Young's modulus according to temperature

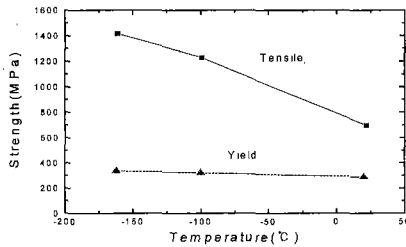


Fig. 6 Variations of strengths according to temperature

### 3.1 인장성질

Fig. 5, 6, 7에 304스테인리스강의 온도에 따른 인장성질들의 변화를 나타내었다.

탄성계수의 경우 Fig. 5에서 알 수 있듯이 온도감소에 따라 약간 증가하는 경향을 나타냈으며 상온에 비해 -162°C에서 약 15GPa 정도 증가하였다. 또한 이들 값들은 RPIS의 최소 탄성계수 요건이 194GPa를 초과하였다.

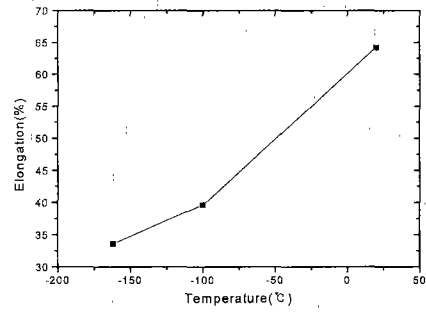


Fig. 7 Variations of elongation according to temperature

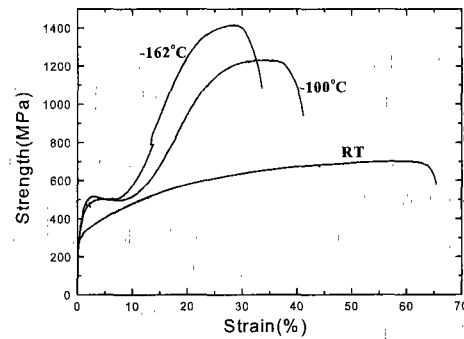


Fig. 8 Variations of stress-strain curve according to temperature

강도의 경우는 Fig. 6에서 알 수 있듯이 항복 강도의 경우는 상온에서 -162°C까지 약간 상승하는 경향이 보였다. 그러나 인장강도는 온도감소에 따라 급속히 증가하여 상온의 두배 이상의 값을 보였다.

Fig. 7의 연신율은 상온에서 평균64%를 보였으나 온도감소에 따라 급속히 감소하여 -162°C에서 평균 33.6%를 나타냈다.

이러한 인장성질의 변화는 Fig. 8의 응력-변형률 곡선의 변화와 밀접한 관계가 있다. 상온의 경우와 비교해 볼 때 저온의 경우에 가공경화가 급격히 일어나는 것을 볼 수 있다. 이는 304 스테인리스강에서의 변형유기 마르텐사이트의 변태의 영향으로 생각된다.<sup>(7)</sup> 인장시험후 마르텐사이트의 양을 측정된 결과 상온, -100, -162°C에서 각각 14.5, 62.7, 62.3%인 것으로 나타났다. 즉 저온으로 갈수록 준안정 오스테나이트의 마르

텐사이트 변태가 촉진되어 가공경화가 급속히 일어나는 것으로 생각된다.

### 3.2 인장피로 성질

Fig. 9에 인장피로시험 결과를 나타내었다. 상온에 비해  $-162^{\circ}\text{C}$ 에서의 피로성질이 훨씬 우수한 것을 알 수 있다. 또한 시험후 변형유기 마르텐사이트 양을 측정된 결과(Fig. 10) 상온의 경우 마르텐사이트의 변태가 거의 일어나지 않았으나  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 경우에는 응력진폭에 따라 34.1~42.5%가 변태한 것으로 나타났다.

일반적으로 변형량이 작거나 상온에서의 피로특성은 균열생성이 중요한 인자인 반면 변형량이 크거나 저온의 경우에는 피로수명은 균열 생성보다는 성장이 중요한 인자로 작용하는 것으로 알려져 있다. 따라서 저온의 경우 변형유기 마르텐사이트의 변태에 의해 피로시험시 균열성장이 억제되어 피로수명을 향상시킨 것으로 판단된다.<sup>(8)</sup>

한편 국내산 재료에 대한 본 시험의 결과가 1980년대에 IHI가 일본산 304 스테인리스강으로 시험한 결과에 비해 상온과  $-162^{\circ}\text{C}$ 에서 모두 우수한 인장피로성질을 나타내었다.

### 3.3 굽힘피로 성질

Fig. 11에 상온과  $-162^{\circ}\text{C}$ 에서의 굽힘피로성질 측정결과를 나타내었다. 인장피로성질과 마찬가지로 상온에 비해  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 경우가 피로성질이 우수한 것을 알 수 있다. 한편 일본에서는 1980년대에 RPIS(Recommended Practice for Inground Storage Tank)라는 LNG탱크에 대한 규격을 제정하기 위한 일환으로 여러 LNG탱크제작사(도쿄가스, KHI, IHI, MHI 등)가 공동으로 자국산 304 스테인리스강에 대한 상온 및 초저온에서의 피로성질을 측정하였다. 이로부터의 데이터를 종합하여 Fig. 11의 베스트핏 곡선과 설계곡선을 제정하였다.<sup>(2,9)</sup> 본 실험의 결과 상온 및  $-162^{\circ}\text{C}$  모두에서 이들 시험결과와 동등한 결과를 나타내었으며 RPIS의 설계곡선과 베스트핏 곡선보다 우수한 굽힘피로 성질을 나타내었다.

그리고 굽힘피로시험 후 마르텐사이트의 변태량을 측정된 결과 Fig. 12에서 알 수 있듯이 상온과  $-162^{\circ}\text{C}$ 에서 변형량이 클수록 변태량이 많았으며 후자의 경우 최고 85%까지의 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태하는 것으로 나타났다. 이러한 마르텐사이트로 인해 균열성장

이 억제되어  $-162^{\circ}\text{C}$ 에서의 피로수명이 향상되는 것으로 판단된다.

### 3.4 2축인장 피로시험

Fig. 13, 14는 2회에 걸친 마이크로 스트레인 게이지를 이용한 변형측정 결과를 보여 주고 있다. 변형측정결과에서는 스트레인 진폭의 균일성과 변형진폭이 중요하다. 그림에서 알 수 있듯이 변형진폭 5,500, 4,500이 일정하게 반복되는 것을 알 수 있다. 이러한 일정한 반복변형성은 멤브레인의 기능수행에 있어 중요한 인자이다. 왜냐하면 균일성이 보장되지않는다면 불완전한 국부변형의 증가에 의해 수명이 급속히 단축될 수 있기 때문이다. 그리고 이 결과를 굽힘피로시험에 의한 베스트핏 곡선에서 수명을 예측하면 10,000과 20,000회 정도 이다.

Table 3에 국내산 304 스테인리스강으로 제작된 십자형 IHI멤브레인의 2축인장피로에 의한 수명 측정결과를 나타내었다.  $\Delta T=190^{\circ}\text{C}$ 의 열수축/팽창하중이 반복될 때 평균 3,374회의 수명을 갖는 것으로 나타났다. 마이크로 스트레인 게이지에 의해 예측한 값보다는 적게 나왔다. 이는 최대변형을 지점에 정확히 스트레이지를 부착하기 어려움 때문인 것으로 생각된다.

한편 일반적으로 LNG저장탱크의 수명을 50년으로 볼 때  $\Delta T=190^{\circ}\text{C}$ 의 열수축/팽창하중이 가해지는 횟수는 다음과 같이 구할 수 있다.

$50\text{년(수명)} \times 52\text{주/년} \times 1\text{회/주} = 2600\text{회}^{(10)}$  위에서 실험시험의 수명이 평균 3,374회로 이러한 설계수명을 초과하는 수준으로 나타났다.

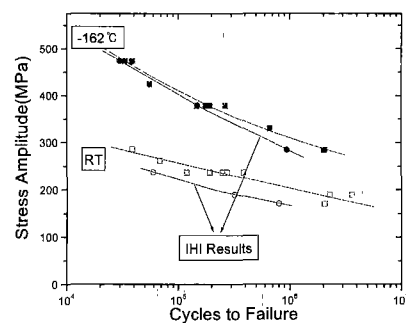


Fig. 9 Comparisons of axial fatigue properties at room and  $-162^{\circ}\text{C}$  between this experiments and IHI results

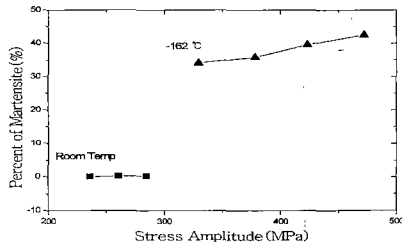


Fig. 10 Percent of martensite after axial fatigue for various stress amplitudes

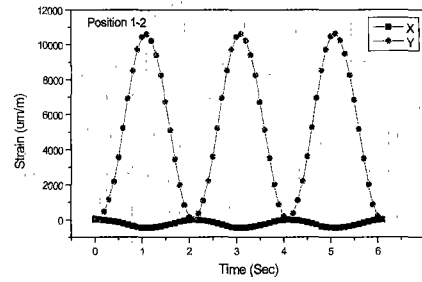


Fig. 13 Strain amplitude in first biaxial fatigue test

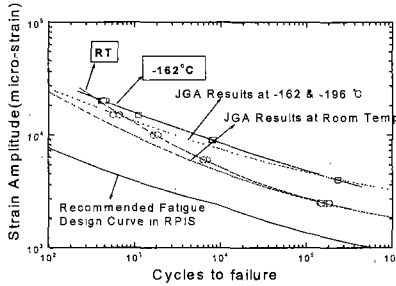


Fig. 11 Comparisons of bending fatigue properties at room and -162°C among this experiment, JGA and RPIS requirements

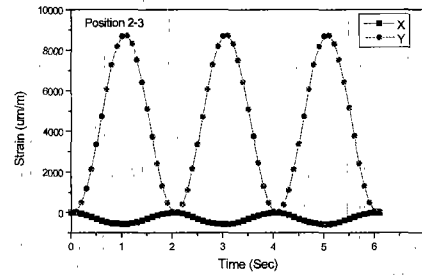


Fig. 14 Strain amplitude in second biaxial fatigue test

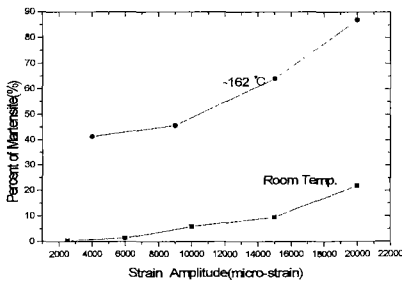


Fig. 12 Percent of martensite after bending fatigue test for various strain amplitudes

Table 3 Results of biaxial fatigue test

No. of test piece	No. of cycles
1	4,155
2	3,136
3	2,832
Ave.	3,374

4. 결론

LNG저장탱크용 국내산 304스테인리스강의 상온 및 초저온에서의 성능평가 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 인장성질

- 저온에서의 인장시험시에는 변형유기 마르텐사이트 변태가 촉진되어 가공경화가 급속히 일어난다.

- 상온에서 -162°C까지의 항복강도 변화는 크지 않았으나 인장강도는 두배이상 증가하였다.

- 상온 인장성질의 경우 ASTM 및 RPIS의 요건에 적합한 것으로 나타났다.

(2) 피로성질

- 상온보다는 -162°C에서 우수한 피로성질을 나타내었다. 이는 마르텐사이트의 변태에 의해 균열성장이 저지되었기 때문이라 판단된다.

- 굽힘피로수명의 경우 RPIS의 베스트핏 곡선 및 설계곡선 보다 우수한 수명을 나타냈다.

(3) 실물시험으로서 2축인장피로시험 결과  $\Delta T=190^{\circ}\text{C}$  열수축에 의한 피로수명이 LNG저장탱크의 설계수명 2,600회를 상회하는 평균 3,374회의 수명을 갖는 것으로 나타났다.

(4) 국내산 304스테인리스강의 인장, 피로 성질은 RPIS 규격과 탱크설계수명 측면에서의 요건에 모두 적합한 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

- (1) 김영규, 전인기, 윤인수, 이용원, 홍성호, 김창균, 1994, "액화천연가스 저장탱크용 멤브레인 유한요소해석," 대한기계학회, Vol. 18, No. 10(통권 109호), pp. 2797~2804, 1225~5963.
- (2) Recommended Practice for LNG Inground Storage, 1979, Japan Gas Association Committee on LNG Inground Storage.
- (3) 1998, "한국가스공사 인천생산기지 2단계 2차공사(#13, 14탱크)기술제외서," 대림산업.
- (4) 1998, "한국가스공사 인천생산기지 2단계 2차공사(#13, 14탱크)기술제외서," 삼성중공업.
- (5) 1998, "한국가스공사 인천생산기지 2단계 2차공사(#13, 14탱크)기술제외서," 현대건설.
- (6) Uniform Bending Test Apparatus Handling Manual, Shimazu Corporation, JAPAN.
- (7) 김정규, 김철수, 조동혁, 김도식, 윤인수, 2000, "LNG저장탱크용 멤브레인재의 강도 및 파괴인성에 미치는 저온효과," 대한기계학회 논문집, 제24권, 제3호, pp. 710~717.
- (8) 이태호, 김성준, 김형식, 양영철, 2000, "오스테나이트계 304 스테인리스강 판재의 굽힘피로 특성에 미치는 병형유기 마르텐사이트의 영향," 대한금속·재료학회지, 제 38권, 제 3호, pp. 434~441.
- (9) Teruyoshi Udoguchi, Komei Kasahara, Masaki Kitagawa, Toshiyasu Tsunenari, Takuzo Ichihara, Naruo Sakamoto, 1981, "Fatigue Characteristics of Type 304 Stainless Steel Thin Plates for LNG Inground Storage Tanks," JHPI, Vol. 19, No. 4, pp. 169~175.
- (10) 1998, "인천 인수기지 2차확장 2단계 #13~14 입찰안내서," 한국가스공사.