

# SUS304L 겹침 용접부에 대한 극저온에서의 인장 및 피로강도에 관한 실험적 연구

김경수\* · 부승환\* · 박창열\* · 조영근\* · 이정수\*\*

\*인하대학교 선박해양공학과

\*\*한진중공업(주)

## An Experimental Study on the Tensile and Fatigue Strengths of SUS304L Lap Joint Weld at the Cryogenic Temperature

KYUNG-SU KIM\*, SEUNG-HWAN BOO\*, CHANG-YOUL PARK\*, YOUNG-GUN CHO\* AND JEUNG-SOO LEE\*\*

\*Dept. of Naval Architecture Engineering, Inha University, Incheon Korea

\*\*Hanjin Heavy Industries & Construction Co. Ltd. Busan, Korea

**KEY WORDS:** LNG(Liquefied natural gas) 액화천연가스, Membrane 멤브레인, Lap joint weld 겹침 용접, Tensile strength인장강도, Fatigue strength 피로강도, S-N curve S-N 선도

**ABSTRACT:** As LNG tank is operated around  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ , an experimental approach on the cryogenic temperature tensile and fatigue strengths of SUS304L lap joint weld is very important at the design stage of membrane type LNG tank. In this study, in order to estimate the tensile and fatigue strengths of SUS304L lap joint weld at cryogenic temperature condition, tensile and fatigue tests were conducted. Also, S-N curves are presented with statistical testing method recommended by JSME. As a result of the experimental approach, the design guide of fatigue strength is proposed and that is expected to be useful for membrane type LNG tank design.

### 1. 서 론

최근 우리나라에서 천연가스(NG, Natural gas)의 수요는 에너지 자원의 다양화와 더불어 청정 무공해 에너지라는 장점으로 인하여 소비량이 점점 늘어나고 있는 추세이다. 천연가스는 저장 및 운반을 편리하게 하기 위해  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$  상태의 액화천연가스(LNG, Liquefied natural gas)로 만들어 사용한다. 또한 천연가스 수요의 증가에 따라 이를 수송하는 고부가 가치 선박인 LNG선의 수요도 증가하고 있다. LNG의 운반을 위한 탱크는 일반적인 구조물과는 달리 LNG를  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 극저온 및 고압의 액체 상태로 장기간 저장해야 하므로 액체의 압력은 물론 극저온에 따른 영향에 대해서도 충분한 안전성의 검토가 필요하다.

멤브레인 형 LNG탱크는 NO-96 타입과 Mark III 타입으로 나누어지며 LNG와 직접 접촉하는 부분과 방열재에 따라 단열 및 설계 방식이 달라진다. 멤브레인 형식은 구조물 내벽에 단열시스템을 설치하여 LNG를 보관하게 된다. 그러나 이 단열재는 기밀성이 없으므로 단열재 내부에 별도의 기밀성을 유지할 수 있도록 벽을 만드는데 이를 멤브레인이라 한다. 이러한 멤브레인 형식에는 일반적으로 In-Var 강(오스테나이트 계열의

스테인리스 강(Mark III type)을 사용하는 방법이 있다. 특히 Mark III type LNG선의 1차, 2차 방벽으로 사용되는 오스테나이트 계 SUS304L은 용접을 하여 접합되는데, 용접현상은 국부적으로 단시간에 가열, 냉각되기 때문에 용접부에서 변형, 수축이 발생되며, 용접부에 잔류응력이 남아있어 균열발생 및 전파로 인한 파괴가 발생하기 쉽다. 이러한 피로에 의한 파괴가 LNG탱크에서 발생하게 되면 막대한 경제적 손실과 인적 손실을 초래하게 된다. 따라서 안전한 LNG선의 설계를 위해서는 극저온에서 용접부의 피로특성을 정량화 할 필요가 있다.

본 연구에서는 Mark III type 방식 LNG선의 1차, 2차 방벽으로 사용되는 SUS304L의 용접부에 대해  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 인장 및 피로실험을 실시하였다. 또한 용접부의 피로수명 및 특성을 연구 평가하기 위해 S-N 선도를 도출하였다. 최종적으로 파단면 분석을 실시하여 온도변화 조건에서 하중작용 형태에 따른 파단면의 형상과 특성을 관찰하였다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1 재료 및 시편

본 연구에 사용되는 재료는 SUS304L로 시편은 각각 두께

교신저자 김경수: 인천광역시 남구 용현동 253 인하대학교  
032-860-7341 ksukim@inha.ac.kr

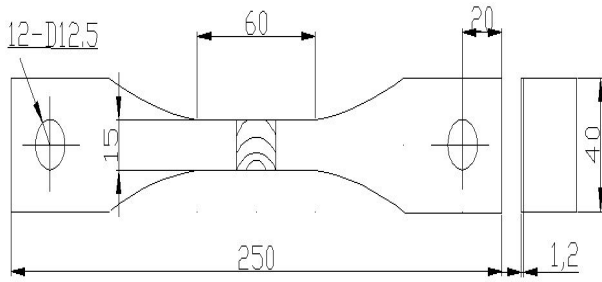


Fig. 1 Dimension of the specimen (unit: mm)

Table 1 Chemical composition (wt%)

C	Si	Mn	P	Ni	Cr
0.016	0.377	1.145	0.0249	10.18	18.72

Table 2 Welding method and parameters

Welding position :		Type of corrugation :			
flat		large			
Current [A]		Voltage [V]	Duty (%)	Plasma gas [l/min]	Hz
Base	Peak				
20	90	17	45	0.36	5.5

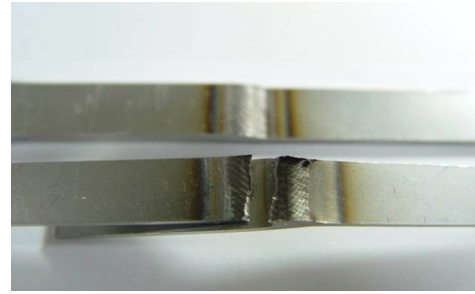


Fig. 3 Failure picture after monotonic tensile test

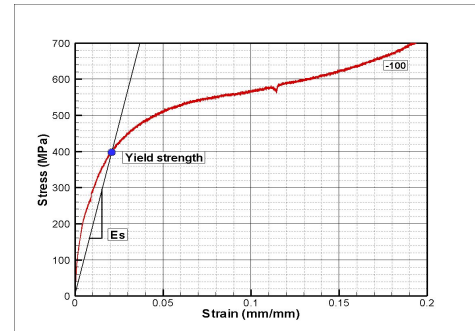


Fig. 4 Non-linear elastic behavior region of stress-strain curve at -100 °C condition

MTS 극저온용 변형률 측정 장치를 시편에 부착하였다. 또한 챔버 내에서 시편을 물리기 위해 지그를 제작하였고 지그와 시편의 부착된 사진은 Fig. 2와 같다.

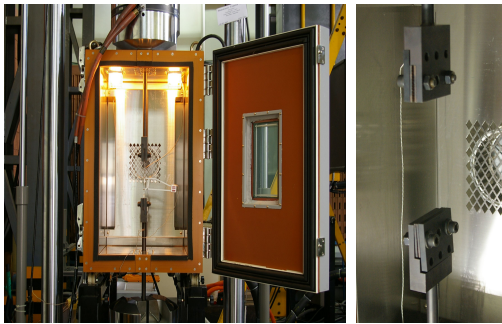


Fig. 2 Test setting picture

1.2 mm로 겹침 용접 된 상태이다. 또한 시편은 멤브레인 시트 자동 플라즈마 용접 장비로 용접한 용접제이고 그 모양과 치수는 Fig. 1과 같다. 화학성분과 용접조건은 Table 1, 2와 같다.

2.2 실험 장비

본 연구에서는 저온 및 극저온에서 실험을 수행하기 위하여 극저온 챔버를 제작하였다. 온도를 낮추기 위하여 액화질소를 극저온 챔버 내에 직접 분사시키고 온도 조절을 위하여 팬을 설치하였다. 공기 중 온도와 시편의 온도를 측정하기 위하여 온도계를 설치하였고 실험 과정을 볼 수 있도록 뷰파인더를 설치하였다. 그리고 극저온에서의 변형률을 측정하기 위하여

2.3 인장실험

인장실험은 온도에 따른 기계적 특성의 변화를 검토하기 위하여 25 °C, -100 °C, -163 °C의 3가지 온도에서 수행하였다. 실험속도는 마르텐사이트 변태에 영향을 주기 때문에(김정규 등, 2003) 이의 영향을 최소화하기 위해 충분히 낮은 속도로 생각되는 5mm/min으로 하였다.

고주기 피로실험 시 겹침 용접부에 대한 S-N 선도를 작성함에 있어서 파단 위치에서의 단면 응력범위에 대해 정리하면 이음부재의 치수에 영향을 받지 않는 S-N 선도를 작성할 수 있다(김중호, 1999). 따라서 인장실험 결과를 피로실험과 마찬가지로 기준응력을 파단이 발생하는 위치에서의 단면을 기준으로 산정하였고 단면의 면적은 파단이 발생하는 용접 목부에서의 치수를 미소 균열 길이까지 측정할 수 있는 BMI program을 이용하여 산정하였다. Fig. 3은 실제 인장실험과 피로실험 후 겹침 용접 목부에서 발생한 파단을 보여준다.

인장실험의 결과로서 각 온도 조건에서의 탄성계수, 항복강도, 인장강도, 연신율을 측정하였고 실험결과 저온으로 갈수록 초기의 응력-변형률 거동이 Fig. 4와 같이 콘크리트나 플라스틱과 같은 비선형 탄성거동의 양상을 보였다. 알루미늄 합금이나 스테인리스 강 같이 비선형 탄성거동을 보이는 재질에 대해서는 응력-변형률 선도가 선형 탄성거동을 보이지 않으므로 탄성계수 산정에 어려움이 많다. 이런 비선형 탄성거동을 보이는 재질에 경우 유용한 탄성계수 산정 방법으로서 Secant

modulus 나 Tangent modulus를 사용하는 것이 효과적이다(Schneider et al, 2005). 따라서 본 연구에서는 2% Secant modulus 방법(ASTM D5323, 2006)을 이용하여 탄성계수와 항복강도를 산정하였다. 또한 응력-변형률 선도에서 끝점의 응력과 변형률로부터 인장강도와 연신율을 산정하였다.

2.4 고주기 피로실험

고주기 피로실험은 응력 비  $R=0.05$ 의 조건으로 25℃, -100℃, -163℃의 온도 조건에서 실험을 수행하였다. 피로실험 파형은 인장-인장 형태의 정현파로 실험하였고 저온에서의 실험 속도는 1Hz에서 시작하여 온도 조절이 안정화 될 때까지 조금씩 속도를 높여 안정화된 후에 5~8Hz로 실험하였다. 25℃ 조건에서는 하중 속도의 변화 없이 5Hz로 실험을 하였다. Lap 부 치수의 영향을 받지 않는 S-N 선도를 작성하기 위해 파단 위치에서의 실 단면 응력범위를 사용하였고, S-N 선도의 경사부를 결정하기 위해서 최대 응력레벨을 항복강도의 약 90%에 준하는 응력으로 하여 하중 크기를 낮춰가면서 8~9 단계로 실험을 진행하였다. 또한 JSME S-002(1994)에서 제시한 통계적 기법에 따라 파괴확률 50%의 S-N 선도와 파괴확률 10%, 90%의 S-N 선도를 작성하였다.

2.5 P-S-N 선도의 결정

JSME S-002(1994)에서 제시한 통계적 기법에 따라 P-S-N 선도를 작성하였다. 고주기 피로실험으로부터 P-S-N 선도를 구할 경우, 이하의 방법으로 구한다. 계산된 결과로부터 P-S-N 선도는 파괴확률  $P=10\sim90\%$ 의 절편을 갖는다. 우선,  $P=50\%$ 에 대응하는 S-N 선도의 경사부는 다음 식과 같이 구해진다. 편 대수 좌표로서 피로실험 데이터를 정리하면, S-N 선도는 식 (1)으로 표현된다.

$$\log N = \hat{\alpha}_1 + \hat{\beta}_1 S \tag{1}$$

양 대수 좌표(Log-log scale)로 피로실험 데이터를 정리하면, 파괴확률 50%의 S-N 선도는 식 (2)로 표현되고,

$$\log N = \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \log S \tag{2}$$

식 (3)~(6)으로부터  $\hat{\alpha}_2, \hat{\beta}_2, \overline{\log N}, \overline{\log S}$  을 구할 수 있다.

$$\hat{\alpha}_2 = \overline{\log N} - \hat{\beta}_2 \overline{\log S} \tag{3}$$

$$\hat{\beta}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\log S_i - \overline{\log S})(\log N_i - \overline{\log N})}{\sum_{i=1}^n (\log S_i - \overline{\log S})^2} \tag{4}$$

$$\overline{\log N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log N_i \tag{5}$$

$$\overline{\log S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log S_i \tag{6}$$

파괴확률 10, 90%에 대응하는 P-S-N 선도는 식 (7)로 얻을 수 있고,

$$\log N = \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \log S \pm 1.28\hat{\sigma}(\log N) \tag{7}$$

$\hat{\sigma}(\log N)$ 은 식 (8)로 표현된다.

$$\hat{\sigma}(\log N) = \left[ \frac{1}{6} \sum_{i=1}^n \{ \log N_i - (\hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \log S_i) \}^2 \right]^{1/2} \tag{8}$$

여기서,

- $\hat{\alpha}_1$ : 편 대수 좌표에서 S-N 선도의 절편을 나타내는 계수
- $\hat{\beta}_1$ : 편 대수 좌표에서 S-N 선도의 기울기를 나타내는 계수
- $\hat{\alpha}_2$ : 양 대수 좌표에서 S-N 선도의 절편을 나타내는 계수
- $\hat{\beta}_2$ : 양 대수 좌표에서 S-N 선도의 기울기를 나타내는 계수
- $\overline{\log N}$ : 실험 결과로서 파단수명의 평균 값
- $\overline{\log S}$ : 적용 응력의 평균 값
- $\hat{\sigma}(\log N)$ : 파단 수명의 표준편차 값

3. 실험 결과

3.1 인장실험 결과

인장실험은 25℃, -100℃, -163℃ 조건에서 각각 3회씩 총 9회 진행되었으며 Fig. 5은 실험 결과로서 시편의 응력-변형률 선도를 나타낸다. Fig. 6-7은 실험 온도에 따른 탄성계수, 항복강도, 인장강도, 연신율의 평균값을 그래프로 나타낸 것이다.

탄성계수와 항복강도는 재료의 거동이 비선형탄성 거동을 보이기 때문에 2% Secant modulus 방법으로 얻었으며 그 결과 탄성계수와 항복강도는 실험 온도가 낮아짐에 따라 증가하는 경향을 보였다. 탄성계수는 상온에 비해 -100℃에서 16%, -163℃에서는 38% 증가함을 보였으며 항복강도는 상온에 비해 -100℃에서 15%, -163℃에서 38% 증가함을 보였다. 인장강도 또한 실험 온도가 낮아질수록 증가하는 경향을 보였으며 상온에 비해 -100℃에서 66%, -163℃에서 81%가 증가하였다. 연신율은 대체로 감소하는 경향을 보였으나 -100℃에서 오히려 약 5%정도 증가하였으며 -163℃에서는 38%로 감소하는 결과를 나타냈다. 이는 SUS304L 스테인리스강의 인장 성질이 소성 변형에 의해 생성되는 가공유기 마르텐사이트와 관련이 있으며 생성되는 마르텐사이트 량은 변형 온도와 변형 량에 따라 달라지기 때문에 인장 성질 또한 실험 온도에 따라 다르게 나타난 것으로 판단된다(이해우 등, 1999). 또한 저온으로 갈수록 비선형 탄성거동이 눈에 띄게 발생하는 이유 역시 가공유기 마르텐사이트 변태와 밀접한 관련이 있으며 저온으로 갈수록 가공유기 마르텐사이트 변태 량의 변형률에 대한 의존성이 크기 때문이라고 판단된다.

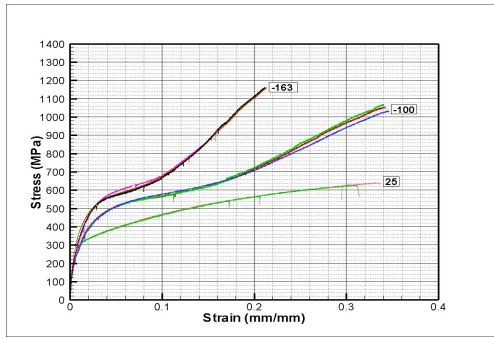


Fig. 5 Stress-strain curve of the specimens

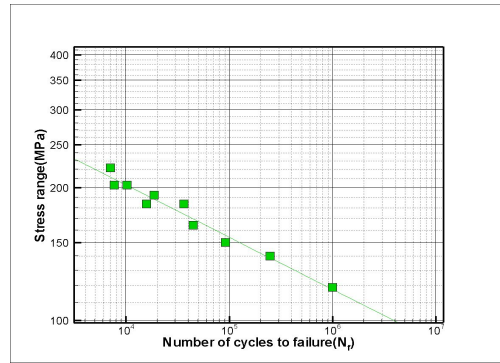


Fig. 8 S-N curve of the specimen at 25 °C condition

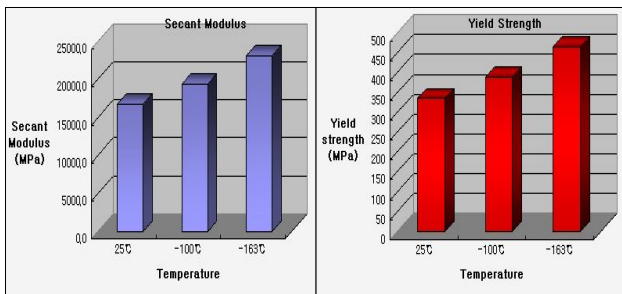


Fig. 6 Secant modulus & yield strength of the specimen

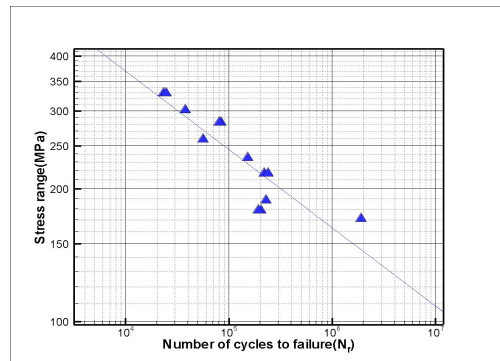


Fig. 9 S-N curve of the specimen at -100 °C condition

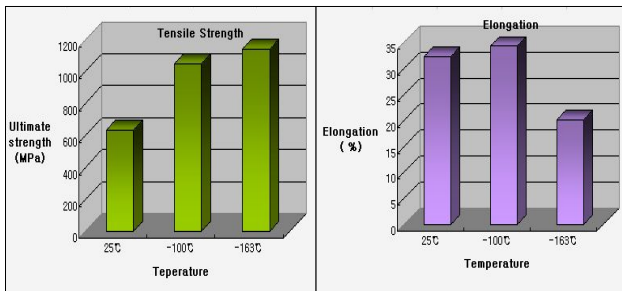


Fig. 7 Tensile strength & elongation of the specimen

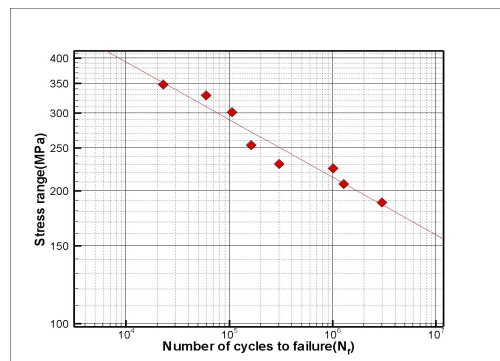


Fig. 10 S-N curve of the specimen at -163 °C condition

### 3.2 고주기 피로실험 결과

SUS304L의 겹침 용접부에 대한 S-N 선도를 작성함에 있어서 본 연구에서는 피로실험 결과를 파단 위치에서의 실 단면 응력범위를 기준으로 정리하였다. 피로실험은 응력비  $R=0.05$ , 부하 속도는 5~8Hz로 하였다. Fig. 8-10은 25 °C, -100 °C, -163 °C에서의 피로실험 결과를 응력 범위와 파단 수명의 관계로 나타낸 것이다. Fig. 11은 25 °C, -100 °C, -163 °C에서의 피로실험 결과를 함께 나타낸 것이다. 일반적으로 실제 적용되는 LNG선과 같은 저온 조건에서의 피로강도는 증가하는 것으로 알려져 있으며 본 연구를 통하여 SUS304L의 용접부에 대한 피로강도는 저온으로 갈수록 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 상온에서의 피로특성은 균열 생성이 중요한 인자인 반면 저온에서의 피로수명은 균열 생성보다는 성장이 중요한 인자로 작용하는 것으로 알려져 있다(김형식, 2001). 따라서 저온으로 갈수록 가공유기 마르텐사이트 상이 상온보다 다량으로 생성되고, 균열 성장이 억제되어 피로수명을 향상시킨 것으로 판단된다.

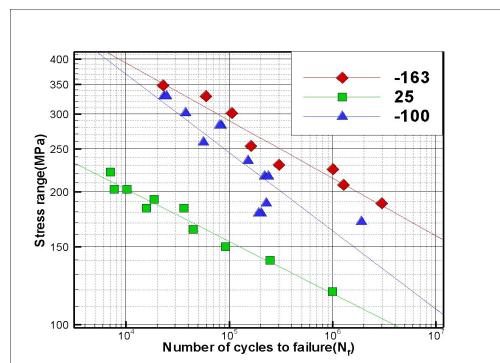


Fig. 11 Total s-n curve of the specimen

3.3 고주기 피로실험 결과의 통계적 처리

파괴확률 50%의 P-S-N 선도는 식 (2)로 표현되고, 실험 결과를 대입하여  $\hat{\alpha}_2 = 22.619$ ,  $\hat{\beta}_2 = -8.05030$ 로 계산된다. 따라서 파괴확률 50%의 P-S-N 선도의 식은 식 (2)로부터  $\log N = (22.619) + (-8.05030) \log S$ 로 표현된다. 그리고 파괴확률 10, 90%의 P-S-N 선도는 식 (7)로 표현되고, 실험 결과를 식 (8)에 대입하면  $\hat{\sigma}(\log N) = 0.136$ 로 계산된다. 따라서 파괴확률 10, 90% P-S-N 선도의 식은 얻어진 결과로부터  $\log N = (22.619) + (-8.0503) \log S \pm 0.174$ 으로 계산된다. Fig. 12~14는 각 온도에 따른 SUS304L의 P-S-N 선도이다. 실선은 파괴확률 10%의 선이고, 점선은 50%의 선, 1점 쇄선은 파괴확률 90%의 P-S-N 선도를 나타낸다.

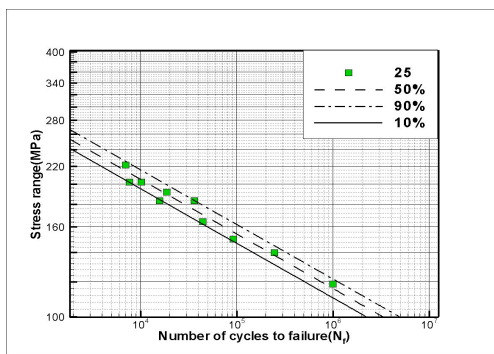


Fig. 12 P-S-N curve of the specimen at 25 °C condition

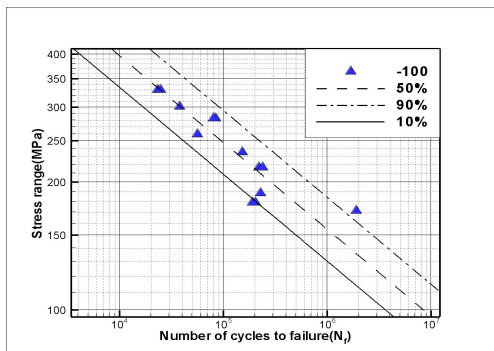


Fig. 13 P-S-N curve of the specimen at -100 °C condition

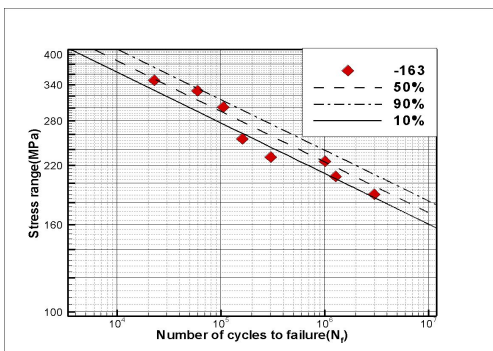
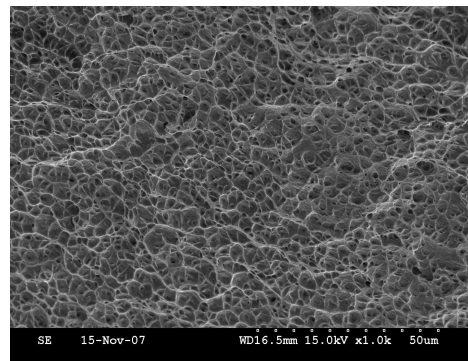


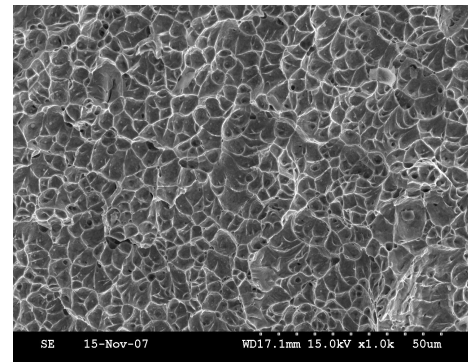
Fig. 14 P-S-N curve of the specimen at -163 °C condition

피로실험 결과로부터 낮은 파괴확률을 갖는 P-S-N 선도를 도출하여 겹침 용접부에 대한 설계 피로선도로 사용할 수 있으며(한명수 등, 1994), 본 연구 결과로서 얻어진 온도 변화에 따른 파괴확률 10% P-S-N 선도는 멤브레인 타입의 LNG tank의 설계에 있어서 SUS304L 겹침 용접부의 피로강도 설계 기준으로 유용하게 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

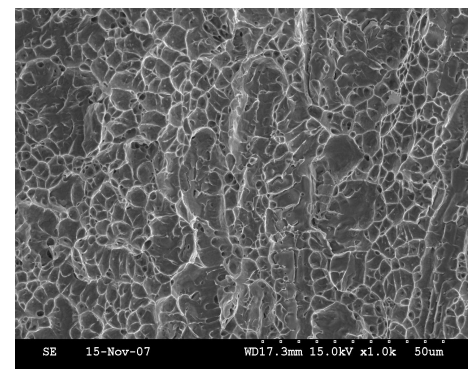
또한 실제 선박에서는 멤브레인 시트가 면외 변형 구속 조건이나 본 실험에서는 자유변형 조건이므로 응력분포 양상이 더 가혹하게 나타난다. 따라서 자유변형 조건인 본 실험 결과로부터 실선의 피로강도를 평가하는 경우 실선에서의 구속조건에 의한 것과 비교할 때 더욱 안전함을 알 수 있다.



(a) Temperature: 25 °C



(b) Temperature: -100 °C

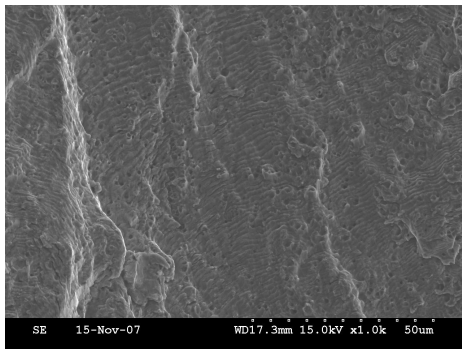


(c) Temperature: -163 °C

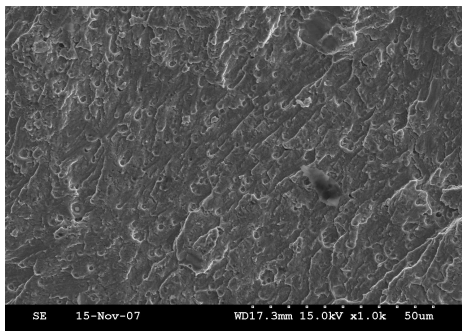
Fig. 15 SEM photographs of fracture surface of each temperature after monotonic tensile test

### 3.4 실험 결과의 파단면 분석

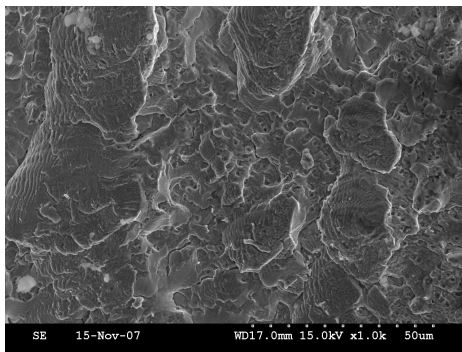
인장실험과 피로실험의 하중의 작용형태 및 온도에 따른 파단면의 형상과 특성을 관찰하기 위하여 주사현미경을 이용하여 파단면을 관찰하였다. Fig. 15는 SUS304L 겹침 용접 시편에 대한 상온과 저온에서의 인장실험을 행한 후, 파단면을 1000배 확대하여 관찰한 사진이다. 각 온도에 대한 파단면을 분석한 결과 연성재료에서 나타나는 Dimple이 뚜렷하게 나타났으며 온도에 따라 파단면 형상이 조금씩 차이가 있음을 알 수 있다. 25 °C에서는 작은 Dimple의 모습을 보이고 있으나 저온으로 갈수록 Dimple의 크기가 커지면서 미소균열이 관찰되었다. 이는 저온에 따른 가공 유기 마르텐사이트의 생성에 기인한 것으로 생각된다(강계명 등, 1997).



(a) Temperature: 25 °C



(b) Temperature: -100 °C



(c) Temperature: -163 °C

Fig. 16 SEM photographs of fracture surface on fatigue specimens (a) tested at 25 °C, (b) tested at -100 °C, (c) tested at -163 °C

Fig. 16은 피로실험 후 1000배 배율로 확대한 파단면 사진으로 고 주기 피로균열에 의해 발생한 미세조직 사진이다. 인장 파단면과는 다르게 피로 파단면에서는 반복적인 사이클에 의한 피로 파단면의 전형적인 형상인 피로줄무늬(Striation)를 관찰할 수 있으며 파단면이 평탄하고 소성변형이 적은 것을 볼 수 있다. 파단면은 각각의 온도에 따라 조금씩 다른 형상을 보이는데 저온으로 갈수록 파단면이 거칠어지고 조직이 입내 형의 파괴양상으로 되는 것을 알 수 있다(강명수 등, 2002). 이것은 저온으로 갈수록 피로 파단면은 조직상의 크기에서 뚜렷한 차이를 나타내어 저온일수록 취성의 성질을 갖는 파괴가 발생한 것으로 판단된다(박경동 등, 2000).

## 4. 결 론

멤브레인 방식 LNG선의 1차 방벽으로 사용되는 SUS304L의 겹침 용접부의 25 °C, -100 °C, -163 °C의 저온 및 극저온에서의 인장 및 피로실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 저온으로 갈수록 탄성계수, 항복강도, 인장강도는 증가하는 경향을 보였고 연신율은 대체로 감소하는 경향을 보였다. 이는 SUS304L 겹침 용접 시편이 저온에서의 기계적 특성 변화가 온도가 낮을수록 가공유기 마르텐사이트 변태량의 의존성이 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한 저온으로 갈수록 비선형 탄성거동이 눈에 띄게 발생하는 이유 역시 가공유기 마르텐사이트 변태와 밀접한 관련이 있으며 저온으로 갈수록 가공유기 마르텐사이트 변태량의 변형률에 대한 의존성이 크기 때문이라고 판단된다.

(2) SUS304L의 용접부에 대한 피로강도는 저온으로 갈수록 피로특성이 향상되었다. 이는 25 °C에서의 피로특성은 균열 생성이 중요한 인자인 반면 저온의 경우에는 피로수명은 균열 생성보다는 성장이 중요한 인자로 작용하기 때문이고 저온으로 갈수록 가공유기 마르텐사이트 상이 상온보다 다량으로 생성되고 균열 성장이 억제되어 피로수명을 향상시킨 것으로 판단된다.

(3) 온도 변화에 따른 파괴확률 별 P-S-N 선도는 멤브레인 타입의 LNG tank의 설계에 있어서 SUS304L 겹침 용접부의 피로강도 설계 기준으로 유용하게 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

(4) 실제 선박에서는 멤브레인 시트가 면의 변형 구속 조건이나 본 실험에서는 자유변형 조건이므로 응력분포 양상이 더 가혹하게 나타난다. 따라서 자유변형 조건인 본 실험결과로부터 실선의 피로강도를 평가하는 경우 실선에서의 구속조건에 의한 것과 비교할 때 더욱 안전함을 알 수 있다.

(5) 인장실험 후 파단면 분석 결과 저온으로 갈수록 Dimple의 크기가 커지면서 미소균열이 관찰되었다. 피로실험 후 시편의 파단면은 저온으로 갈수록 거칠어지고 조직이 입내 형의 파괴양상을 보였다. 또한 피로 파단면은 조직상의 크기에서 뚜렷한 차이를 나타내어 저온일수록 취성의 성질을 갖는 파괴가 발생한 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 ㈜한진중공업의 연구비 지원을 받아 수행된 연구로, 위 기관의 후원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 강계명, 최종운 (1997). "오스테나이트 304 스테인레스 강의 응력 부식균열에 미치는 냉간 가공의 영향", 한국산업안전학회지, 제12권, 제1호, pp 19-28.
- 강명수, 정진성, 하정수 (2002). "12Cr 강에 대한 저주기 피로 수명 평가", 대한기계학회 2002년도 춘계학술대회 논문집, pp 95-100.
- 김정규, 김철수, 조동혁, 김도식, 윤인수 (2003). "LNG저장탱크 멤브레인 재(STS 304강)의 강도 및 파괴 인성에 미치는 저온효과", 대한기계학회논문집 A권, 제24권, 제3호, pp 710-717.
- 김중호 (1999). "LNG 탱크 겹침 용접부의 피로강도에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제13권, 제13호, pp 29-35.
- 김형식 (2001). "LNG 저장탱크의 멤브레인 용 국산 304 스테인리스 강의 기계적 성질 및 피로수명 평가", 대한기계학회논문집 A권, 제25권, 제10호, pp 1644-1650.
- 박경동, 박상오 (2002). " SUP9강의 저온 피로 크랙 전파 특성에 관한 연구", 한국해양공학회지, 제16권, 제5호, pp 80-87.
- 이해우, 신용택, 박정웅, 이재원, 강창룡 (1999). "멤브레인형 LNG 탱크용 오스테나이트 계 스테인리스 강의 저온 강도 및 피로 강도에 관한 연구", 대한용접학회지, 제17권, 제3호, pp 50-54.
- 한명수, 한종만, 한용섭 (1994). "LNG선 용 INVAR(Fe-36% Ni)강 Lap 이음부의 피로강도와 허용 응력에 관한 연구", 대한용접학회지, 제12권, 제1호, pp 102-115.
- ASTM D5323-92 (2006). Standard Practice for Determination of 2% Secant Modulus for Polyethylene Geomembranes.
- JSME S 002 (1994). Standard Method of Statistical Fatigue Testing, Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, pp 10-42.
- Schneider, S., Schneider, S.G., Marques da Silva, H. and Neto, C. de M. (2005). "Study of the Nonlinear Stress-Strain Behavior in Ti-Nb-Zr Alloys", Materials Research, Vol 8, No 4, pp 435-438.

---

2008년 4월 2일 원고 접수

2008년 4월 30일 최종 수정본 채택