

## 페라이트계 스테인리스강 재현 용접 열 영향부의 석출거동 및 열피로 특성에 미치는 구속응력의 영향

한규태\* · 강용준\*\* · 이상철\* · 홍승갑\* · 정홍철\* · 이창희\*\*†

\*POSCO 철강솔루션마케팅실 PAC 접합연구그룹

\*\*한양대학교 신소재공학부

### Effect of Restraint Stress on the Precipitation Behavior and Thermal Fatigue Properties of Simulated Weld Heat Affected Zone in Ferritic Stainless Steel

Kyutae Han\*, Yongjoon Kang\*\*, Sangchul Lee\*, Seunggab Hong\*, Hongchul Jeong\* and Changhee Lee\*\*†

\*POSCO Steel solution marketing department, Product application center,  
Welding and joining research group, Pohang 790-300, Korea

\*\*Dept. of Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

†Corresponding author : chlee@hanyang.ac.kr

(Received November 4, 2015 ; Revised November 24, 2015 ; Accepted December 7, 2015)

#### Abstract

Thermal fatigue life of the automobile exhaust manifold is directly affected by the restraint force according to the structure of exhaust system and bead shape of the welded joints. In the present study, the microstructural changes and precipitation behavior during thermal fatigue cycle of the 18wt% Cr ferritic stainless steel weld heat affected zone (HAZ) considering restraint stress were investigated. The simulation of weld HAZ and thermal fatigue test were carried out using a metal thermal cycle simulator under complete constraint force in the static jig. The change of the restraint stress on the weld HAZ was simulated by changing the shape of notch in the specimen considering the stress concentration factor. Thermal fatigue properties of the weld HAZ were deteriorated during cyclic heating and cooling in the temperature range of 200°C to 900°C due to the decrease of Nb content in solid solution and coarsening of MX type precipitates, laves phase, M<sub>6</sub>C with coarsening of grain and softening of the matrix. As the restraint stress on the specimen increased, the thermal fatigue life was decreased by dynamic precipitation and rapid coarsening of the precipitates.

Key Words : Thermal fatigue, Ferritic stainless steel, Heat affected zone, Precipitation

#### 1. 서 론

우수한 내식성 및 열피로 저항성을 갖는 페라이트계 스테인리스강은 자동차 배기계의 소재로 널리 사용되고 있으며, 특히 배기 매니폴드의 경우 사용조건에 따라 최고 900°C에서 상온까지의 연속적인 온도 변화가 발생하게 된다<sup>1-3)</sup>. 따라서 고온강도, 고온 내산화성, 열피로 저항성이 요구되며, 특히 열피로 저항성 향상을 위하

여 Nb, Ti, Mo, W 등을 첨가, Nb 고용강화, MX-, Laves-, M<sub>6</sub>C 타입 석출물로 인한 석출강화 및 열피로 중 결정립 성장 억제, 석출물 조대화에 대한 연구가 활발히 진행되었다<sup>4-9)</sup>.

운행 중 복합적인 열 사이클로 연속적인 인장 및 압축응력이 수반되는 배기계의 열피로 수명은 특히 조직적, 형상적으로 모재 대비 취약한 용접부에서의 응력집중, 열 영향부 물성 열화에 좌우된다<sup>10-13)</sup>. 본 연구에서는 열피로 중 Nb, Ti, Mo 첨가 페라이트계 스테인리스강

용접 열영향부의 석출거동을 포함한 조직의 변화를 분석하였고, 특히 용접부에 작용하는 구속응력의 변화가 석출거동 및 조직 열화, 열피로 수명에 미치는 영향에 대한 검토 결과를 소개하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시험재와 시편의 제작

본 시험에 사용된 강종은 Nb, Ti, Mo 복합 첨가강으로, 상세 합금성분은 Table 1과 같다. 시험편은 1.5 × 90 × 6.5 mm<sup>3</sup> 로 가공 후 Fig. 1a와 같이 시편 중앙에 notch를 내었다. 열피로 시험 중 가열 / 냉각 시 발생하는 buckling을 제어하기 위하여 지그를 제작, 시편을 내부에 삽입하였다. 열전대 (K-type) 는 지그 중앙에 부착되어 온도를 측정하였다.

### 2.2 용접열영향부 재현과 열피로 시험

용접 열영향부의 재현과 열피로 시험은 MTCS (Metal Thermal Cycle Simulator)를 사용하여 실시되었다. 재현 열 사이클은 GMA용접 (175A, 23V, 77cm/min)을 실시한 후 CGHAZ 조직 (평균 결정립 크기: 103μm)과 동일한 미세조직을 갖는 조건으로 결정되었다. Fig. 1b와 같이 승온 속도 130°C/sec로 1300°C까지 가열 후 10초간 유지, 헬륨 분위기에서 70°C/sec의 냉각속도로 상온까지 냉각하였다. 열 영향부 재현이 완료된 시

험편은 100% 구속률로 Fig. 1b와 같이 200-900°C의 온도범위에서 시행되었다. 냉각 /승온 속도는 동일하게 17.5°C/sec, 900°C, 유지온도는 30초로 설정하였으며, 각 사이클 내의 최대 인장 하중을 측정하여 그 변화를 기록하였다. 각 열피로 사이클 별 미세조직 변화와 석출거동 분석을 위하여 5, 25, 50, 200, 파단시의 사이클로 반복 시험되었다.

### 2.3 구속률 제어

열피로 거동에 대한 용접비드 형상 및 구속도의 영향 분석 관련, 시험편에 가해지는 구속률의 변화를 위하여, MTCS 장비 내 100% 구속 유지 상태에서 시험편 중앙 노치 형상을 변수로 두었다. 즉 용접 비드와 모재가 이루는 각도와 토우부 곡률반경의 영향 등은 각각 시험편의 노치 각도 / 깊이, 곡률반경 변화로 응력집중계수 (stress concentration factor)를 제어하였다<sup>14)</sup>. Fig. 2에 시험편의 노치 형상과 변수들이 나타나 있다. 각각의 영문 이니셜, W는 시편의 폭 (6.5mm, 상수), r은 노치의 곡률 반경, α는 노치각도, d는 노치 깊이를 나타낸다. F의 일축 응력 하에서의 시편에 가해지는 응력 집중 계수 (K<sub>t</sub>, 탄성 영역에서의 이론적 응력집중 계수) 는 다음의 식으로 표현될 수 있다<sup>14)</sup>.

$$K_t = C_1 + C_2 \sqrt{K_{tu}} + C_3 K_{tu} \quad (1)$$

이 때, 90° ≤ α ≤ 150°, 1.6 ≤ K<sub>tu</sub> ≤ 3.5 의 조건에서, 상수 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>는 각각,

$$\begin{aligned} C_1 &= 5.294 - 0.1225\alpha + 0.000523\alpha^2 \\ C_2 &= -5.0002 + 0.1171\alpha - 0.00043\alpha^2 \\ C_3 &= 1.423 - 0.01197\alpha - 0.000004\alpha^2 \end{aligned}$$

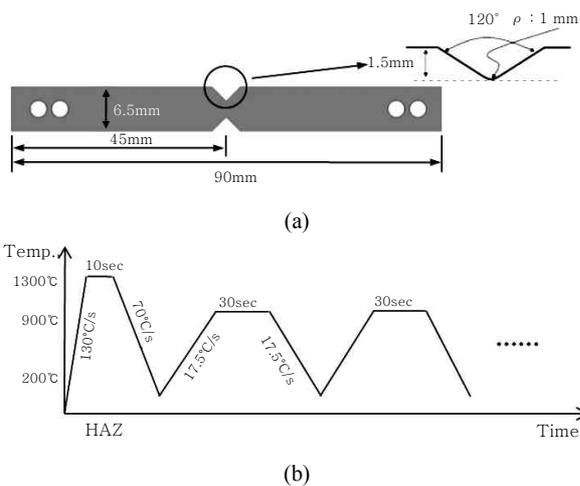


Fig. 1 (a) Specimen and (b) thermal cycle

Table 1 Chemical composition of the alloy used in this study (weight percent)

C	N	Cr	Mo	Nb	Ti	Fe
0.005	0.014	18.42	1.76	<1.0	<0.3	Bal.

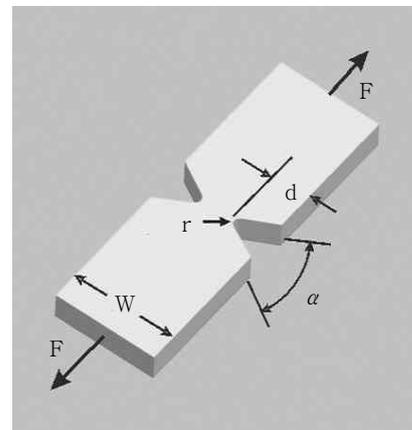


Fig. 2 Schematic of specimens

로 표현된다.

이 때,  $0.1 \leq d/r < 2.0$  의 조건이 만족할 경우,

$K_{tu}$  (유한 두께 판, 일축 응력 하 U-노치 응력집중 계수)는,

$$K_{tu} = C_4 + C_5(2d/W) + C_6(2d/W)^2 + C_7(2d/W)^3 \quad (2)$$

으로 표현되며 각각의 상수는,

$$C_4 = 0.955 + 2.169\sqrt{d/r} - 0.081d/r$$

$$C_5 = -1.557 - 4.046\sqrt{d/r} + 1.032d/r$$

$$C_6 = 4.013 + 0.424\sqrt{d/r} - 0.748d/r$$

$$C_7 = -2.461 + 1.538\sqrt{d/r} - 0.236d/r$$

이다. 각각의 식이 만족하는 범위 내에서 식 2를 이용하여 구한  $K_{tu}$  를 식 1에 대입하여 각 노치 형상을 갖는 일축 응력 시험편에 걸리는 응력 집중 계수를 구할 수 있다. 따라서 이를 적용하면 시험편의 형상  $W = 6.5\text{mm}$ ,  $d = 1.5\text{mm}$ ,  $r = 1\text{mm}$ ,  $\alpha = 120^\circ$  일 때의 응력집중 계수  $K_t$ 의 값은 2.42 를 가진다. 본 노치 형상을 구속도 100% 로 보았을 때,  $K_t = 1.69$ 를 가지는 노치형상,  $W = 6.5\text{mm}$ ,  $d = 1\text{mm}$ ,  $r = 3\text{mm}$ ,  $\alpha = 150^\circ$  으로 변형하여 약 70% 구속응력에서의 열피로 시험을 실시하였다. 또한 노치가 없는 시험편에 대한 시험도 실시, 구속응력 변화 (100%, 70%, 0%)에 대한 열피로 거동 및 수명 변화를 분석하였다.

## 2.4 미세조직 관찰

미세조직 관찰을 위한 시험편의 연마는  $0.3\mu\text{m}$  알루미늄으로 마무리 되었고 33vol. %  $\text{HNO}_3$ , 33vol. %  $\text{HCL}$ , 33vol. %  $\text{CH}_3\text{COOH}$  혼합액으로 식각되었다. 석출물은 기계적 연마 이후 상온조건에서 10vol.%  $\text{HClO}_4$ , 90vol.%  $\text{CH}_3\text{COOH}$  혼합액으로 전해 연마한 후, carbon extraction replica를 이용, 투과 전자 현미경 (JEM-2010, 200kV)으로 관찰되었다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 모재조직 분석

Table 1의 합금조성과 Fig. 3의 미세조직, 본 조성의 Fe-C 준안정 상태도<sup>8)</sup>을 통해 알 수 있듯이 모재의 조직은 100% 페라이트이며 용접 열영향부 재현 온도인  $1300^\circ\text{C}$  이하 열피로 시험구간인  $900^\circ\text{C}$ 에서  $200^\circ\text{C}$

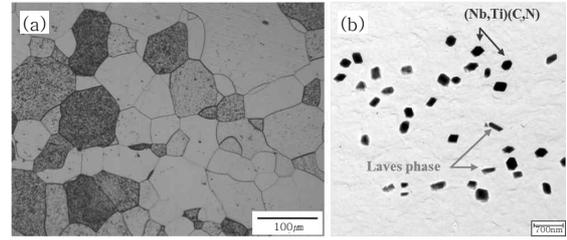


Fig. 3 (a) Microstructure of the base metal and a (b) TEM image of precipitates

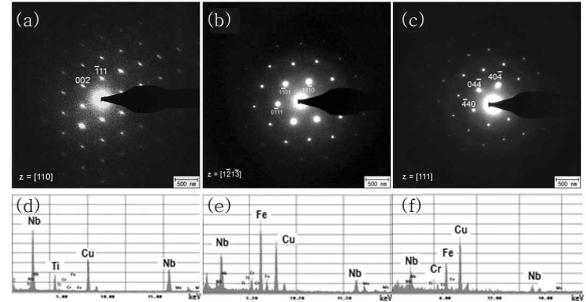


Fig. 4 SADP and EDS spectrum of the precipitates: (a), (d) of (Nb,Ti)(C,N), (b), (e) of Laves, and (c), (f) of M6C

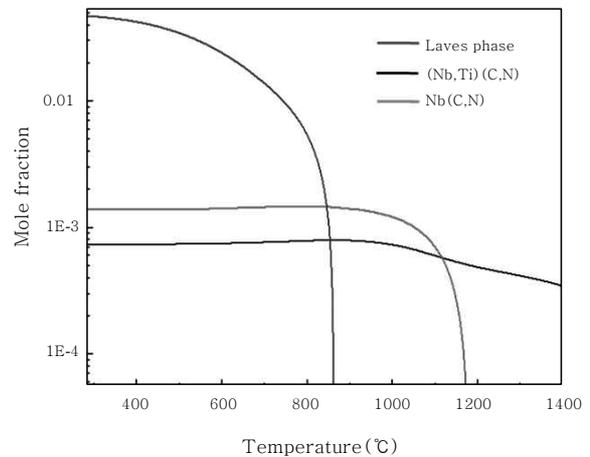


Fig. 5 Equilibrium mole fraction of precipitates<sup>8)</sup>

까지의 전 구간에서 상변태가 일어나지 않는다. 평균 결정립 크기와 경도는 각각  $75\mu\text{m}$ ,  $197\text{Hv}$ 로 분석되었으며, Fig. 3b와 같이 평균 크기  $152\text{nm}$ 의 석출물이 분포하였다. 관찰된 석출물은 크게 두 종류로, 다소 불규칙한 rectangular, rod 타입의 석출물로 구분되었으며, SADP (selected area diffraction pattern)와 EDS (energy dispersed spectroscopy) 분석을 통하여 각각 (Nb,Ti)(C,N) 과 Laves 상임을 확인하였다 (Figs. 4 a,b,d,e). Fig. 5의 온도별 각 석출물의 평형 몰 분율 계산 결과를 보면, 라베스상의 경우 각각  $860^\circ\text{C}$  에서 완전히 용해(dissolve)되나, (Nb,Ti)(C,N)

의 경우 1300°C 이상의 온도에서도 완전 고용이 일어나지 않는 것을 알 수 있다. 모재 내 희박한 확률로 존재하는 Nb(C,N)의 경우 (Nb,Ti)(C,N)와 달리 1170°C에서 완전히 고용되는데 이는 Ti, Nb 복합 석출물의 고온 안정성 때문이다. Nb, Ti의 복합 첨가를 통해 모재 고용 C, N을 저감시키고, 저온 용해 석출물인 Nb(C,N)의 석출을 억제시키는 한편, 고용 Nb량을 증가시킨 결과로 사료된다.

### 3.2 구속도에 따른 열피로 거동과 미세조직의 변화

Fig. 6은 시험편 노치부에 가해진 구속률 변화에 따른 완전 파단까지의 열피로 수명을 나타내고 있다. 수회의 반복 시험 결과, 구속률 100% 일 때의 열피로 수명은 평균 380사이클, 70%, 0%의 구속률에서는 900사이클 이상에서도 파단이 일어나지 않았으며, 노치 부근의 초기 균열조차 발생하지 않음을 확인하였다. 100% 구속 열피로 시험 중 시험편에 가해지는 응력 변화 분석 결과, 초기 180사이클에서는 큰 응력 변화가 관찰되지 않으며, 180사이클 이후 노치에서 균열 발생 시작, 응력 값이 점차적으로 감소하기 시작하여, 250사이클 이후에서 급격히 감소되어 파단에 이르는 것으로 분석된 바 있다<sup>8)</sup>.

Fig. 7 과 8에 구속도별 열피로 사이클에 따른 결정립 크기의 변화와 경도의 변화가 나타나 있다. Fig. 7a와 같이, 재현 열영향부의 결정립 크기는 초기 5사이클 이후 50사이클까지 급격히 증가하고, 이후 파단 사이클에 이르기까지 완만한 증가를 보이며, 경도의 경우 대체적으로 결정립 크기의 변화와 반대의 경향성을 보인다. 초기 5사이클 이내에서의 경도의 급격한 상승은 열영향부 재현 시 용해되었던 석출물의 열피로 온도 범위에서의 급격한 석출로 설명될 수 있다. 100% 구속 시

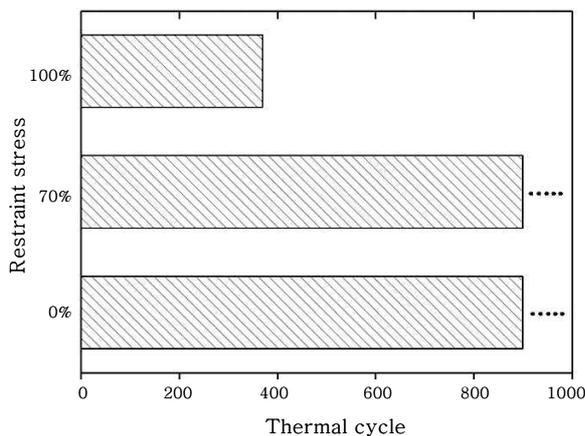


Fig. 6 Results of thermal fatigue tests

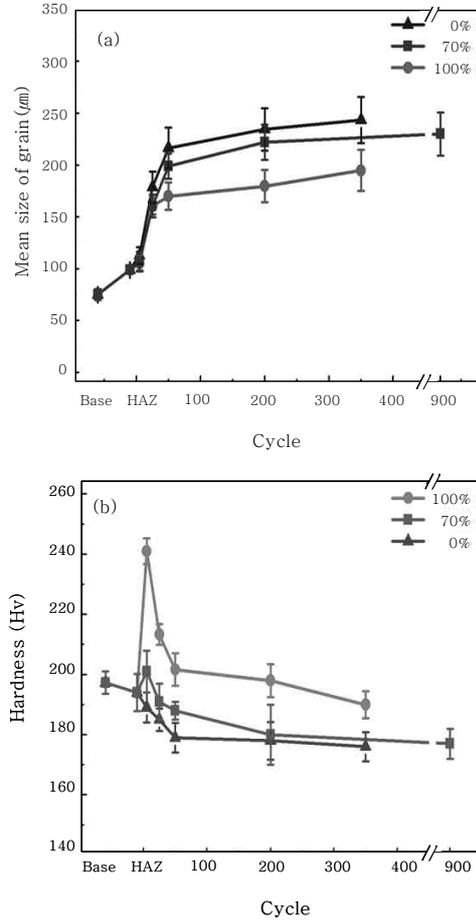


Fig. 7 (a) grain size and (b) hardness variation during thermal cycle

험편의 경우 균열 발생 시작점인 180 사이클 전후로 결정립 크기 변화나 경도의 급격한 차이는 발견되지 않았다. 결과적으로 개별 구속도의 시험편 별 결정립 크기와 경도 변화의 열사이클에 대한 경향성은 거의 유사하였으나, 노치에 작용하는 구속력 차이에 따라 평균 결정립 크기와 경도의 차이가 유발됨이 확인되었다. 구속도가 증가할수록 결정립 크기가 작아지는 이유는 노치부에 집중되는 응력차이에 의한 재결정 정도의 차이로 설명할 수 있다. 열피로 사이클 중의 동적 재결정은 냉각과 승온 과정에서의 반복적인 인장 / 수축에 의해 축적된 전위가 임계 전위밀도 ( $\rho_{cr}$ )에 도달할 때 급격히 생성되어 성장하는데, 외부에서 인가되는 구속력의 차이가 재결정이 일어나는데 필요한 에너지의 축적을 가속화시켰다고 판단할 수 있다.

### 3.3 구속도에 따른 열피로 중 석출 거동의 변화

Fig. 9, 10, 11에 각각 구속도와 열피로 사이클에 따른 석출거동과 평균 석출물 사이즈의 변화, 석출물 종류별 평균사이즈, 석출량의 변화가 나타나 있다. 열

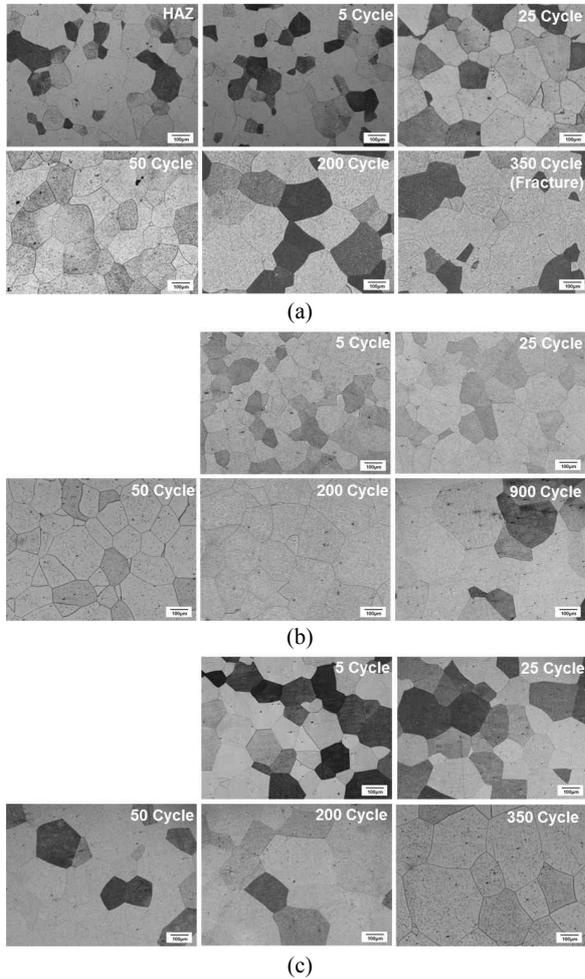


Fig. 8 Microstructure at each cycle: (a) 100%, (b) 70%, and (c) 0% restraint stress

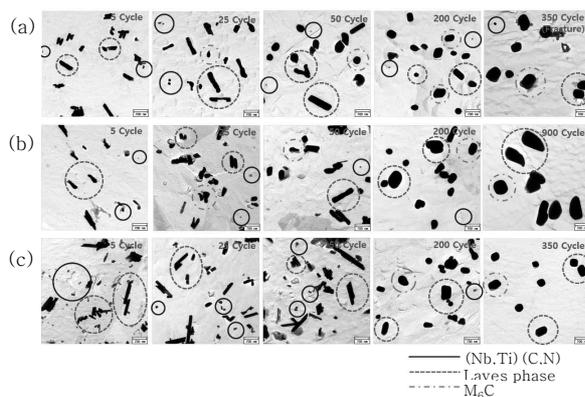


Fig. 9 Precipitation behavior at each thermal cycle: (a) 100%<sup>8)</sup>, (b) 70%, and (c) 0% restraint stress

사이클의 증가에 따라 평균적인 석출물 조대화가 관찰되며 구속력 100%, 70% 시료의 경우 25사이클, 0% 시료의 경우 200사이클 이후 모재에서 분석된 (Nb, Ti)(C,N), laves 상 이외에 M<sub>6</sub>C 타입의 석출물이 관찰되었다 (Figs. 9, 4c, 4f). M<sub>6</sub>C의 경우 900°C 이상

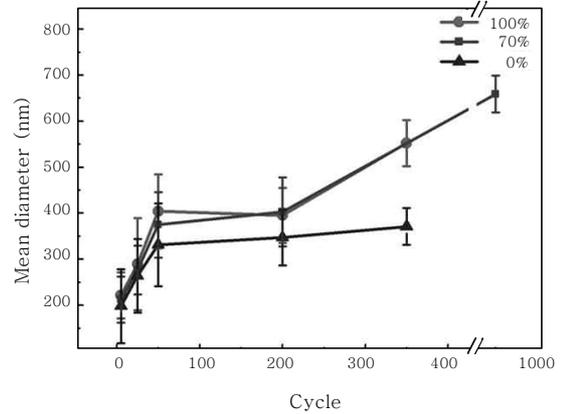
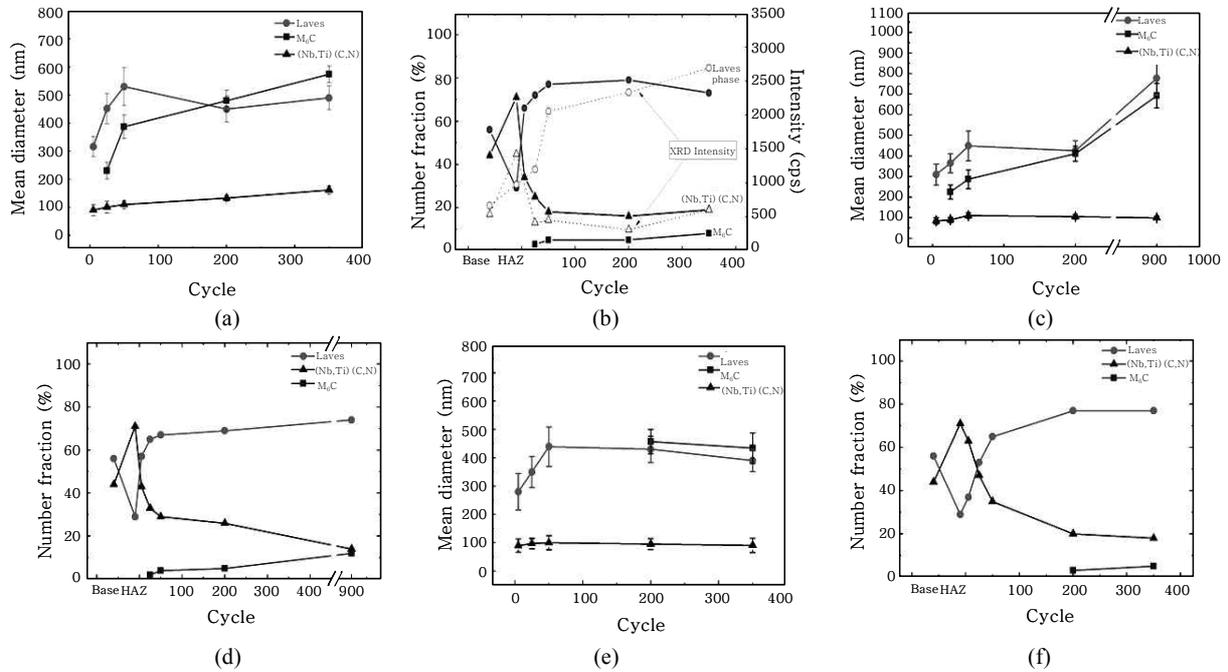


Fig. 10 Mean size of precipitates as a function of thermal cycle, restraint stress

에서의 안정상으로 주로 장시간의 시효나 열피로 시 발생하며 조대화로 열피로 특성을 크게 저해한다고 알려져 있다<sup>2-4,15)</sup>. 사이클이 증가할수록 석출물 종류에 따라 석출물의 크기가 변화함을 확인 할 수 있다(Fig. 10). Fig.11에서 확인되듯이, 사이클 증가에 따른 (Nb, Ti)(C,N)의 크기는 크게 변화하지 않는 반면, 라베스 상은 큰폭으로 조대화됨이 관찰된다. 석출물 종류별 성장속도 및 정도의 차이는 기지와 각 석출물의 계면사이의 정합도에 의해 결정된다. 라베스상의 경우 사이클 증가에 따라 부정합 방향으로 크게 성장한 것을 확인할 수 있다. 50 사이클 이상에서는 라베스 상 성장에 따른 모재와 석출물 사이의 격자 뒤틀림에 의한 변형 에너지 증가로 정합성이 깨지면서 석출 형상이 구형으로 변화하는 것을 확인 할 수 있다. 석출물의 조대화는 모든 시험편에서 초기 50사이클까지 급격히 증가하다가 이후에는 완만해 지는 거동을 보인다. 또한 초기 50사이클에서 (Nb,Ti)(C,N)의 양이 줄어드는 반면 열영향부 재현 후 완전히 용해되었던 라베스상이 대량 석출하는 것을 확인할 수 있다 (Figs. 11b, d, f).

전해 추출법으로 얻은 잔사를 ICP - AES (Inductively coupled plasma atomic emission spectrometer) 로 분석한 결과 적은 양으로 intensity가 낮은 M<sub>6</sub>C를 제외한 (Nb,Ti)(C,N)과 라베스상의 경우 사이클에 따른 석출량의 변화와 유효한 거동을 확인하였다 (Fig. 11b). 지난 연구에서<sup>8)</sup>, 초기 50사이클에서 라베스상이 대량으로 석출, 성장하는 동안 페라이트계 스테인리스강의 열피로 수명에 지대한 영향을 미치는<sup>16)</sup> 고용 Nb 함량이 급격히 감소되는 것을 확인한 바 있다. 하지만 거의 대부분의 고용 Nb는 초기 50사이클에서 라베스 상의 석출 및 조대화와 함께 급격히 고갈된 후 완만한 감소율을 나타내므로 고용 Nb의 감소만으로 최소 180 사이클 (100% 구속력의 경우) 이후의 균열의 생성에



**Fig. 11** Mean size and fraction of the precipitates as a function of thermal cycle, restraint stress. (a),(b): 100%<sup>8)</sup>, (c),(d): 70%, and (e),(f): 0% restraint stress

대하여 설명 할 수 없다. 열피로 중 균열의 시작은 주로 개재물 등의 결함에 의해 야기되는 슬립 또는 입계 미끄러짐에 의한 ‘점소성(visco plasticity)’, ‘입계 산화막의 형성’, 최대 인장응력에 수직인 입계에 존재하는 석출물과 기지간의 분리(decohesion)로 인한 기공(cavity)으로부터 시작되거나, 주응력에 대해 45° 방향의 입계에 있는 석출물 / 기지 계면에서 생성된 돌출부에서의 입계 미끄러짐에 의해 발생하는 ‘Cavitation’, 세 개 인자의 복합적인 작용에 의해 야기된다고 알려져 있다<sup>17)</sup>. 상기한 세가지 인자는 공통적으로 기지와 개재물 또는 석출물 사이의 결함, 즉 기공의 존재로부터 야기되는데, 기공이 전위를 발생시키기 충분한 크기로 성장하면 반복적인 응력에 의한 변형으로 조대화가 일어나며, 이때 조대화의 정도는 석출물 크기에 의한 변형량에 의해 결정된다. 결과적으로 고용 Nb의 감소로 열화된 기지, 석출물의 조대화 정도에 따라 열피로 수명이 결정되었다고 할 수 있다.

Fig. 10과 11를 보면 알 수 있듯이 구속력 증가에 따라 (Nb,Ti)(C,N) 분율이 작아지는 반면, 라베스상과 M<sub>6</sub>C의 석출량과 조대화가 증대되고, M<sub>6</sub>C의 석출 시기가 빨라짐이 확인된다. 즉, 높은 응력 하에서 석출물의 조대화 및 타입 변화가 가속된다고 할 수 있다. Fujita<sup>16)</sup>는 Nb 함유 페라이트계 스테인리스강의 고온 시효와 고온 인장 시험 석출물 비교를 통해 인장에 의한 라베스상과 M<sub>6</sub>C의 석출을 관찰하였으며, 이를 응력 하에서의 고용 Nb의 감소, 즉 동적 석출로 설명하였다.

동적 석출은 응력하에서 전위와 같은 핵생성 자유에너지가 낮은 곳에서 일어나며, 조대화를 위한 확산계수는 전위 밀도가 클수록 커져 조대화 속도가 가속될 수 있다<sup>18)</sup>. 따라서 높은 구속응력하의 열피로 과정 중 유발되는 높은 전위 밀도에 의해 석출물의 조대화와 라베스상, M<sub>6</sub>C로의 석출 타입의 변화를 유발했다고 결론지을 수 있다. M<sub>6</sub>C의 석출은 고용 Nb 감소 및 라베스상의 크기 또는 분율 감소 (라베스상의 평균 고용온도 = 860°C) 때문으로 사료되며, 라베스상의 고온 안정화 원소 W 등을 첨가하면 석출을 방지 또는 지연시킬 수 있다고 지난 연구에서 보고한 바 있다<sup>9)</sup>.

#### 4. 결 론

Nb, Ti, Mo 복합 첨가 스테인리스강의 구속력 변화에 따른 용접 열영향부 열피로 시험결과를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접 열영향부의 열피로 수명은 응력집중계수를 고려한 노치의 형태 변화에 좌우되었으며, 이는 실 구조물의 구속도, 용접부의 비드각도, 토우 곡률 반경 등의 열피로 수명에 대한 영향을 시사한다.

2) 구속응력 증가에 따라 동적석출에 의해 라베스상 및 M<sub>6</sub>C의 석출량, 조대화가 증대되고, M<sub>6</sub>C의 석출 시기가 빨라진다.

3) 열피로 중 재료의 열화 및 균열은 고용 Nb의 저하와 함께 석출물의 조대화, 그에 따른 응력집중에 의

한 석출물과 기지간의 분리, 기공의 형성과 성장에 인  
해 야기된다.

## 후 기

본 연구는 주식회사 포스코의 지원을 받아 수행되었  
으며 이에 감사드립니다.

## References

1. N. Matsuura, The 2nd Annual Conference of the Inter-  
national Stainless Steel Forum, *Market Development  
Committee* (1998), 1-16
2. N. Fujita, H.K.D.H. Bhadeshia, M. Kikuchi, Modelling  
M<sub>6</sub>C precipitation in Niobium-alloyed ferritic stainless  
steel, *Metall. Mater. Trans. A*, 33 (2002), 3339-3347
3. N. Fujita, M. Kikuchi, K. Ohmura, Expressions for sol-  
ubility products of Fe<sub>3</sub>Nb<sub>3</sub>C carbide and Fe<sub>2</sub>Nb Laves  
phase in Niobium alloyed ferritic stainless steels, *ISIJ  
Int.* 43 (2003), 1999-2006
4. N. Fujita, K. Ohmura, A. Yamamoto, Changes of micro-  
structures and high temperature properties during high  
temperature service of Niobium added ferritic stainless  
steels, *Mater. Sci. Eng. A*, 351 (2003), 272-281
5. S.S. Manson, Metal Fatigue Damage-Mechanism,  
Detection, Avoidance, and Repair, *ASTM Special  
Technical Publication*, (1971), 61-122
6. S.H. Kim, S.C. Lee, K. Han, S. Hong, C. Lee, Cracking  
behavior in a dissimilar weld between high silicon nod-  
ular cast iron and ferritic stainless steel, *Met. Mater. Int.*  
16 (2010), 483-488
7. J.K. Kim, S. Hong, K.B. Kang, C.Y. Kang, Microstructure  
and high temperature properties of the dissimilar weld  
between ferritic stainless steel and carbon steel, *Met.  
Mater. Int.* 15 (2009), 843-849
8. K. Han, S. Hong, C. Lee, The effect of the precipitates  
type on the thermal fatigue properties of 18% Cr ferritic  
stainless steel weld HAZ, *Mater. Sci. Eng. A* 546 (2012),  
97-102
9. D. Oh, K. Han, S. Hong, C. Lee, Effects of alloying ele-  
ments on the thermal fatigue properties of the 15wt% Cr  
ferritic stainless steel weld HAZ, *Mater. Sci. Eng. A* 555  
(2012), 44-51
10. D. Radaj, C.M. Sonsino, Fatigue assessment of welded  
joints by local approaches, *Abington Publishing,  
Cambridge* (1998)
11. F.V. Lawrence, R.J. Mattos, Y. Higashida, J.D. Burk,  
Estimating the fatigue crack initiation life of welds,  
*ASTM International STP* 648, (1978), 134-158
12. J.Y. Yung, F.V. Lawrence, Analytical and graphical  
aids for the fatigue design of weldments, *Fatigue Fract.  
Eng. Mater. Struct.* 8 (1985), 223-241
13. S. Hong, M.H. Cho, K.B. Kang, Thermal fatigue prop-  
erties of synthetic heat affected zone in ferritic stainless  
steel, *Journal of KWJS* 27 (2009), 79-84 (in Korean)
14. W.C. Young, R.G. Budynas, Roark's formulas for stress  
and strain, *McGraw-Hill, New York* (2002), 771-797
15. N. Fujita, H.K.D.H. Bhadeshia, M. Kikuchi, Precipitation  
sequence in niobium-alloyed ferritic stainless steel,  
*Model. Simul. Mater. Sci. Eng.* 12 (2004), 273-284
16. N. Fujita, K. Ohmura, M. Kikuchi, T. Suzuki, S. Funaki,  
I. Hiroshige, Effect of Nb on high-temperature proper-  
ties for ferritic stainless steel, *Scripta Mater.* 35 (1996),  
705-710
17. C.H. Wells, High Temperature Fatigue, in edited book,  
Fatigue and microstructure, 1979, *American society for  
metals, metal park, Ohio* 44073, 307-333
18. E.W. Hart, On the role of dislocations in bulk dif-  
fusion, *Acta Metall.* 5 (1957), 597



- 한규태
- 1980년생
- POSCO 철강솔루션마케팅실 PAC
- 용접야금
- e-mail : kthan99@posco.com



- 홍승갑
- 1972년생
- POSCO 철강솔루션마케팅실 PAC
- 용접야금
- e-mail : sgab@posco.com



- 강용준
- 1985년생
- 한양대학교 신소재공학부
- 용접야금
- e-mail : yjkang85@hanyang.ac.kr



- 정홍철
- 1964년생
- POSCO 철강솔루션마케팅실 PAC
- 용접야금
- e-mail : jeonghc@posco.com



- 이상철
- 1979년생
- POSCO 철강솔루션마케팅실 PAC
- 용접야금
- e-mail : leesch@posco.com



- 이창희
- 1956년생
- 한양대학교 신소재공학부
- 용접야금, 표면개질
- e-mail : chlee@hanyang.ac.kr