

## 압력용기용 SA-508 III강의 미세조직과 상온 피로균열 성장거동

김선용, 문승호, 임영록, 이후철, 신광선  
서울대학교 금속공학과, 신소재공동연구소

### 요 약

영광 3, 4호기에 사용되고 있는 원전 압력용기용 SA-508 III 강 의 미세구조 및 상온 피로균열 성장 특성을 고찰하였다. 본 강재의 미세구조, 석출물 분포 및 형상을 투과전자현미경을 통하여 관찰하였으며 임계영역에서의 거동 및 균열단합에 주목하여 피로균열성장 특성을 연구하였다. 다양한 형태의 (Fe, Mn)<sub>3</sub>C 세멘타이트 및 Mo<sub>2</sub>C 석출물이 입계, 래스경계면 및 입내에 분포되고 있음을 확인하였다. Paris 영역에서의 피로균열성장 속도는 ASME 기준선과 유사하였으며, 임계 영역에서는 일반적인 저합금강의 경우보다 다소 낮게 나타났다. 파면조사 결과 입내 연성파괴 현상이 전 ΔK 영역에서 나타나고 있으며, ΔK<sub>th</sub>부터 ΔK가 12 MPa√m 영역에서는 입계파괴 및 입내 평활면이 관찰되었다.

### 1. 서론

원자로에서 저합금강은 원자로 압력용기, 가압기, 증기발생기 및 대형 파이프 등에 사용되고 있으며 전체 원전설비용 재료 중량의 절반이상을 차지하고 있는 핵심적인 재료이다. 저합금강으로 제조된 원전부품은 고온·고압 및 부식성 분위기 하에서 사용되며 손상시 막대한 인명 및 경제적 손실을 가져올 수 있기 때문에 저합금강으로 이루어진 고압용기에 대한 손상방지기술은 오랫동안 연구개발의 대상이 되어왔으며 앞으로 원자로의 안정성을 제고시키고 수명을 연장하기 위하여는 지속적인 연구가 필요한 분야이다. 특히 저합금강의 피로균열성장과 부식피로 특성 평가 및 저항성 개선에 관한 연구는 손상방지기술 개발의 핵심적인 연구분야이다.<sup>[1-2]</sup>

원전용 저합금강은 국내 산업체에서 이미 제조 및 성형가공되고 있으나 아직 미세조직적 특성과 피로특성의 확립이 부족한 실정이다. 재료의 피로균열 성장 속도에 미치는 인자로는 항복강도, 미세조직 등의 금속학적 인자와 응력비, 응력주파수 등의 기계적 인자 및 외부 환경적 인자등 다양하다.<sup>[3-4]</sup> 피로균열 성장 시간의 대부분은 균열성장 속도가 아주 느린 임계(near-threshold) 영역에서 소요되고 있기 때문에 동 영역에서의 피로균열 성장거동에 관한 연구는 실제로 매우 중요하다.

본 연구에서는 현재 영광 3, 4호기에 사용되고 있는 국산 저합금강 SA-508 Class III 강재의 미세조직 특성 및 피로균열성장 특성에 대하여 고찰하였다. 광학현미경 및 투과전자현미경을 사용하여 동 강재의 미세조직 및 석출물 분포를 조사하였으며, 임계영역에서의 거동에 주목하여 피로균열 성장특성을 고찰하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 한국중공업에서 제조되어 현재 영광 3, 4호기의 압력용기에 사용되고 있는 SA-508 III 강과 동일한 surveillance test block을 시편재료로 사용하였다. 이 재료는 급냉 후 템퍼링 처리한 강재로 화학조성과 인장특성을 표 1에 나타내었다.

Element	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al	Fe	YS (MPa)	UTS (MPa)	R/A (%)	Elong. (%)
Content (wt.%)	.18	1.43	.008	.003	.08	.78	.04	.52	.006	.06	.005	bal.	424	597	71.4	29.3

Table 1 Chemical composition and tensile properties of SA-508 III steel

미세조직은 광학현미경과 투과전자현미경을 사용하여 조사하였다. 투과전자현미경 시편은 박막법(thin foil method)과 탄소추출복제법(carbon extraction replica method)을 이용하여 제조하였다. 피로균열 성장 시험을 위하여 ASTM E647에 규정된 W=50 mm인 S-L 방향의 CT시편을 제작하였다. 각 CT 시편에는 피로균열의 바른 성장을 위하여 쉘브론 노치(Chevron notch)를 만들었으며 시편 표면은 연마지 및  $0.3\mu\text{m Al}_2\text{O}_3$  분말로 연마하여 거울면과 같이 만들어 균열의 관찰이 용이하도록 하였다.

피로균열성장 시험은 ASTM E647 규정에 준하여 응력비 0.1, 응력주파수 20Hz의 조건으로 수행하였다. 균열 길이는 육안법과 직류 전위차법을 사용하여 측정하였으며, 균열단합의 정도를 측정하기 위하여 COD 게이지를 이용하여 컴플라이언스(compliance)를 주기적으로 측정하였다.  $\Delta K_{th}$ 값은 2,000,000 사이클 이상을 가하여도 균열이 성장하지 않는  $\Delta K$  값을 취하였다. 피로시험이 끝난 시편에 대하여 광학현미경 및 주사전자현미경을 사용하여 균열성장 경로 및 파단면 형상을 조사하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 미세조직 특성

그림 1은 시편의 미세조직을 나타내는 광학현미경 사진이다. 등축정의 결정립이 균일한 입도로 분포되어 있는데 이는 초기 오스테나이트 입자로 판단된다. 주단조방향과 그에 수직인 다른 방향들에서도 유사한 조직이 나타남을 확인하였으며 ASTM E112에 준하여 측정한 결정립 크기는 약  $60\mu\text{m}$ 로 나타났다. 잘 발달된 래스조직과 래스경계에 석출물이 집중적으로 나타난 것으로 볼때 미세조직은 템퍼드 베이나이트 조직임을 알 수 있다. 이는 본 단조품의 크기가 크므로 인하여,

수냉시 마르텐사이트 변태가 일어날 수 있을 정도로 냉각속도가 빠르지 못했기 때문으로 판단된다.

그림 2는 본 시편을 탄소추출복제법을 사용하여 관찰한 사진으로 전체적인 석출물 분포를 나타내고 있다. 결정립계를 따라서 비교적 조대한 등근모양의 석출물이 분포하고 있고 래스경계를 따라서는 길게 늘어진 막대모양의 석출물과 등근형태의 석출물이 분포하고 있음을 잘 보여주고 있다. 또한 래스 내부에는 침상형태의 석출물이 관찰되었다. 그림 3에 결정립계를 따라서 분포한 조대한 등근모양의 석출물이 나타나 있으며 그 크기는  $0.4 \sim 0.8 \mu\text{m}$  정도였다. 그림 4는 래스 경계와 래스 내부에 분포한 석출물을 보여주고 있으며 긴 막대모양의 석출물의 크기는 길이  $1 \sim 4 \mu\text{m}$ , 폭  $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$  정도였고, 등근모양의 석출물의 크기는  $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$  정도, 래스 내부의 침상 석출물의 크기는 길이  $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ , 폭  $0.02 \mu\text{m}$  정도였다. 래스 내부의 침상 석출물은 비교적 균일하게 분포되어 있었다. 이러한 석출물의 구조를 파악하기 위하여 EDS 분석과 회절도형 분석을 수행하였다. 등근형태의 입계 석출물과 래스경계 부근의 막대형태 및 등근형태의 석출물은  $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$ 형 세멘타이트인 것으로 확인되었다. 또한 미세한 침상 석출물은  $\text{Mo}_2\text{C}$  탄화물인 것으로 분석되었다.

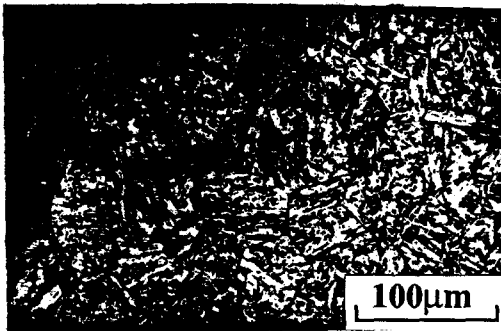


Fig. 1 Optical micrograph of SA-508 III steel.

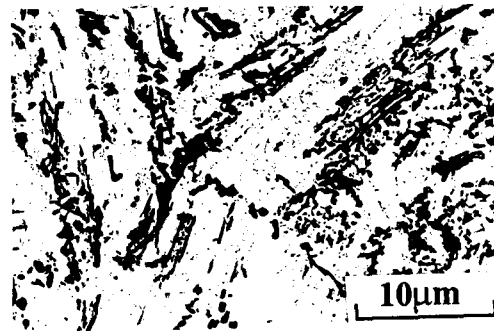


Fig. 2 TEM micrograph showing overall precipitates.

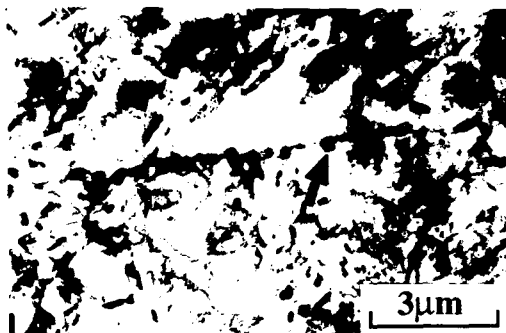


Fig. 3 TEM micrograph showing grain boundary precipitates. (Arrow indicates spherical precipitate.)



Fig. 4 TEM micrograph showing lath boundary and inside.

### 3.2 피로균열성장 특성

#### 3.2.1 균열성장 속도

일반적으로 피로균열성장 곡선은 균열성장 속도가 느린 임계영역(영역 I)과  $\log da/dN$  대  $\log \Delta K$  곡선이 직선으로 나타나는 Paris 영역(영역 II) 및 빠른 균열성장이 일어나는 높은  $\Delta K$  영역(영역 III)으로 구분된다. 균열단합 효과는 외부에서 가한  $\Delta K$ 보다 낮은  $\Delta K$ 값이 균열침단에 부가되어 균열성장속도가 감소하게 되는 현상을 초래한다. 균열단합의 원인으로는 균열의 거칠기, 산화물, 소성역 등 다양한 인자가 보고되고 있다.<sup>[4]</sup> 그림 5에 SA-508 III 강 of 피로균열성장 곡선을 나타내었고 임계영역에서의 특성을 표 2에 요약하였다. 그림 6은 균열단합의 정도를 파악하기 위한  $K_{cl}/K_{max}$  대  $\Delta K$  곡선으로, 본 강재의  $K_{cl}/K_{max}$ 값은  $\Delta K_{th}$ 에서는 0.48을 보이다  $\Delta K$ 가 증가함에 따라 감소하며  $\Delta K$ 가 9 MPa $\sqrt{m}$  이상이 되면 균열단합 현상이 거의 일어나지 않게 되어  $K_{cl}/K_{max}$ 값이 용력비와 같은 0.1로 일정하게 나타난다.

Paris 영역에서의 피로균열성장 속도는 다수의 연구결과가 보고된 바 있으며 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI에 기준선이 제시되어 있으나, 임계영역의 특성은 거의 보고되지 않고 있다. 본 강재의 임계영역 피로균열성장 속도는 일반적인 저합금강의 경우보다 약간 높게 나타나고 있으며, 문헌에 보고된 일반적인 저합금강의  $\Delta K_{th}$  값인 6~8 MPa $\sqrt{m}$  보다 다소 낮은 5.4 MPa $\sqrt{m}$ 을 보이고 있다. P. K. Liaw 등이 보고한 CrMoV 저합금강에 관한 연구<sup>[5]</sup>와 비교할 경우 본 강재의  $K_{cl}$ 값이 낮고 아울러 균열성장속도가 높게 나타나는데 이러한 차이는 이들 강재의 미세조직적 특성의 차이로 인한 것으로 사료된다. 한편  $K_{cl}/K_{max,th}$  값은 유사하게 나타나며 두 강재의 균열단합 기구 또한 유사한 것으로 판단된다. 그림 5에 나타난 바와 같이 본 강재의 Paris 영역의 균열성장 속도는 ASME 기준선과 거의 일치하여 해당 요건에 적합함을 확인할 수 있었다.

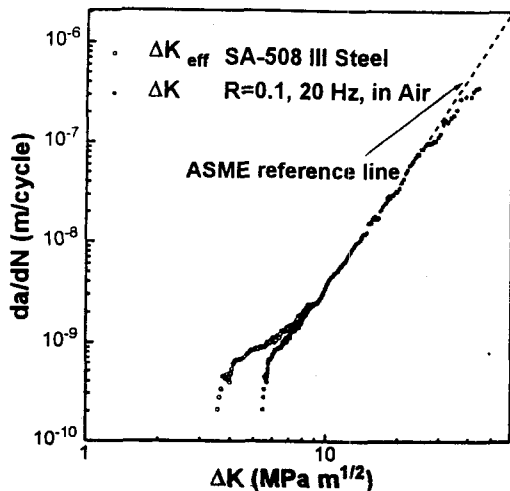


Fig. 5 Fatigue crack propagation rate of SA-508 steel.

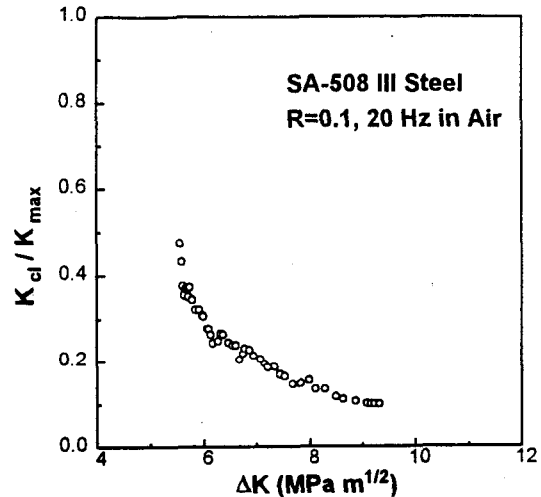


Fig.6. Variation of  $K_{cl}/K_{max}$  with  $\Delta K$  of SA-508 III steel.

$\Delta K_{th}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$K_{cl,th}$ (MPa $\sqrt{m}$ )	$K_{cl}/K_{max}$	$\Delta K_{eff,th}$ (MPa $\sqrt{m}$ )
5.4	2.6	0.48	2.8

Table 2 Summary of threshold values

### 3.2.2 균열성장 경로 및 파괴형상

일반적으로 피로균열은 결정립계에서 균열경로가 꺾이며, 이러한 현상은 거칠기 유도 균열닫힘 효과를 유발한다고 보고되고 있다.<sup>[4]</sup> 본 연구에서 관찰한 바에 의하면 균열은 50~80  $\mu m$  정도의 성장이 진행된 후 균열경로가 꺾이며, 동 길이는 본 시편의 초기 오스테나이트 결정립 크기와 유사하다는 점으로 판단할 때, 본 시편의 경우 주된 균열닫힘 기구는 거칠기 유도 균열닫힘인 것으로 판단된다.

피로파괴형상을 주사전자현미경으로 관찰한 사진을 그림 7에 나타내었다. 전 영역에서 입내 연성파괴 형상이 관찰되고 있으며,  $\Delta K$ 값이  $\Delta K_{th} \sim 12$  MPa $\sqrt{m}$ 인 영역에서 입계파괴 형상(그림 7 (a)) 및 입내 평활면(그림 7(b))이 존재함을 알 수 있었다. 입내파괴 형상 및 입내 평활면은 입계영역부터  $\Delta K$ 값이 증가할 수록 그 양이 증가한다.  $\Delta K$ 가 약 10 MPa $\sqrt{m}$ 인 영역에서 최대치를 보이며  $\Delta K$ 가 15 MPa $\sqrt{m}$  이상이 되면 사라진다. 입계파괴의 발생원인으로는 불순물의 입계 편석 및 수소취성 효과 등을 들 수 있으며, 입내평활면의 발생은 슬립밴드에 의한 수소의 이동으로 인한 슬립밴드 분리에 의한 것으로 설명될 수 있다.<sup>[6]</sup>

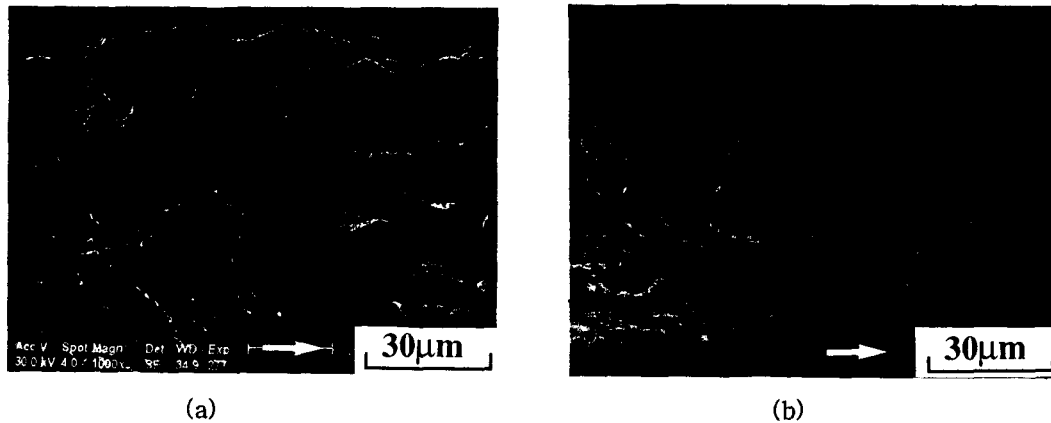


Fig.7 SEM fractographs of fatigue crack growth tested SA-508 III steel. ( $\Delta K = 10$  MPa $\sqrt{m}$ )  
(Arrow indicates general direction of crack growth.)

#### 4. 결론

원전용 저합금강 SA-508 III 강재의 미세구조 및 피로균열 성장특성을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 강재는 템퍼드 베이나이트 구조를 나타낸다.
2. 결정립계에는 등근 형태의 석출물이 존재하였고 래스경계부근에는 등근형태 및 막대형태의 석출물이 존재하였으며 이들은  $(Fe, Mn)_3C$  세멘타이트인 것으로 확인되었다. 래스내부에는 미세한 침상의  $Mo_2C$ 가 균일하게 석출하고 있었다.
3. Paris 영역에서의 피로균열성장 속도는 ASME 기준선과 유사하였다. 임계 영역에서는 일반적인 저합금강의 경우보다 다소 낮게 나타났으며  $\Delta K_{th}$ 값은  $5.4 MPa\sqrt{m}$ 로 나타났다.
4. 균열은 초기 오스테나이트 결정립 크기와 유사한 약  $50 \sim 80\mu m$  정도에서 꺾이면서 성장하였다. 입내 연성파괴 현상이 전  $\Delta K$ 영역에서 나타나고 있으며,  $\Delta K_{th}$ 부터  $\Delta K$ 가  $12 MPa\sqrt{m}$  영역에서는 입계파괴 및 입내평활면이 관찰되었다.

#### 후 기

본 연구는 한국 원자력연구소의 1994년도 원자력연구개발사업 원자력기반기술분야 연구의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. *Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors*, ed. by G. J. Theus and J. R. Weeks, The Metallurgical Society, (1988)
2. *Microstructures and Mechanical Properties of Aging Materials*, ed. by P. K. Liaw, R. Viswanathan, K. L. Murty, E. P. Simonen, and D. Frear, The Minerals, Metals & Materials Society, (1992)
3. S. Suresh, *Fatigue of Materials*, Cambridge University Press (1991)
4. S. Suresh and R. O. Ritchie, *Fatigue Crack Growth Threshold Concept*, ed. by D. L. Davidson and S. Suresh, The Metallurgical Society of AIME (1984) pp. 227~261
5. P. K. Liaw, *Acta Metall.* Vol. 33 No. 3 (1985) pp. 1489~1502
6. K. S. Ravichandran, H. C. Venkata Rao, E. S. Dwarakadasa, and C. G. Krishnadas Nair, *Met. Trans*, Vol 18A (1987) pp. 865~876