

〈기술논문〉

P92와 STS 316L강의 고온 피로 균열 성장에 미치는 하중 파형의 영향

The Effect of Loading Waveform on the High Temperature Fatigue Crack Propagation in P92 and STS 316L Steel

김수영*, 임병수**
Sooyoung Kim, Byeongsoo Lim

ABSTRACT

High temperature fatigue crack growth behavior of P92 and STS 316L steel were investigated under four load conditions using CT type specimens. Loading and unloading times for the four wave forms were combinations of 1 sec. and 50 sec., which were two symmetric wave forms and two unsymmetric wave forms. Their behaviors are characterized using ΔK parameter.

In STS 316L, Crack growth rate generally increases as frequency decreases. However, sensitivity of the loading rate to crack growth rate was found to be far greater than that of the unloading time. It is because as loading time increases, creep occurs at crack tip causing the crack growth rate to increase. However creep does not occur at the crack tip even if the unloading time is increased.

In P92 steel, crack growth rate showed same behavior as in STS 316L. But the increase in loading or unloading time made almost no difference in crack growth rate, suggesting that no significant creep occurs in P92 steel even though loading time increases.

After conducting high temperature tensile tests and comparing high temperature fatigue crack growth rates under various wave forms, it was proved that P92 steel has not only good high temperature properties but also improved, better high temperature fatigue properties than STS316L.

주요기술용어 : Fatigue(피로), Creep(크리프), Load waveform(하중 파형), P92 steel(개량형 9Cr강),

1. 서론

스테인리스 강은 고온 강도 및 내 부식성이 우수하여 일반적으로 자동차의 배기 가스계나 몰딩, 머플러에 사용된다. 특히 오스테나이트계 스테인리스 강은 가공성, 용접성 및 고온강도가 뛰

어나기 때문에 자동차 외에도 고온 설비등 작동 온도가 높은 설비들의 배관계통에 쓰이고 있다.¹⁾

개량형 9Cr강인 P92강의 경우 고온에 쓰이는 재료들 중 비용 절감 효과 측면 뿐 아니라 열 효율성이 뛰어나기 때문에 국내에 도입될 예정이다. 그러나 P92강에 대한 고온 데이터들은 거의

* 회원, 성균관대학교 대학원

** 회원, 성균관대학교 기계공학부

존재하지 않는 상태이며 이에 대한 연구도 거의 없는 상태이다.

Bendick 등은 P92강을 이용하여 크리프 파단 실험을 한 결과 이전의 P91강에 비해 크리프 물성치가 향상되었음을 확인하였다.²⁾

구조물 또는 기계 부품들은 사용조건에 따라 정적 또는 동적 하중을 독립적으로 받으면서 사용되고 있지만 대부분의 경우 정도의 차이는 있으나 정적, 동적 하중이 동시에 작용되는 조건하에서 사용되고 있다. 이렇게 고온에서 정하중과 동하중이 동시에 또는 반복적으로 작용되는 경우 크리프 변형에 의한 재료의 손상과 피로에 의한 균열의 생성 및 전파가 재료의 조기파단을 초래하게 된다. 특히 원자력 발전소의 압력용기, 발전용 보일러 및 핵반응로 등과 같은 고온 구조물은 가동 혹은 가동 전후로 하여 고온에서 정적인 하중과 동적인 하중을 동시에 받게 되며 이로 인해 재료는 피로 손상과 더불어 크리프 손상을 받게 된다.^{3,4)}

Zhang 등은 Ni₃Al(B) 합금을 이용하여 600℃, 800℃에서 대칭 피로 파형과 비대칭 파형을 이용하여 균열 성장 거동을 관찰한 결과, 온도의 영향은 균열 선단에서 취성을 유발하는 산화와 강한 관련이 있으며 이러한 산화는 피로 균열 성장 속도의 주요 영향 인자임을 보고하였다.⁵⁾ 그는 크리프 피로, 취성을 유발하는 산화 그리고 균열 닫힘을 유발하는 산화막 사이의 복잡한 상호작용은 고온의 서로 다른 하중 파형에서 각각 다른 피로 균열 성장 거동을 나타낸다고 보고하였다.

Rao 등은 850℃ 800H 합금에서 동일한 하중 증가와 감소속도[fast-fast, slow-slow]와 인장/압축에서 비대칭 하중 증가와 감소 속도[fast-slow, slow-fast]의 조건하에서 관찰한 결과 합금의 피로 수명은 파형의 영향을 강하게 받는것을 보고하였다.⁶⁾ 즉 파형에 따라 피로 수명의 변화가 있으며, 파단 형태 또한 인장 하중 증가 속도의 영향을 받아 증가 속도가 빠른 경우 입내 균열 생성과 진전이 관찰되었으나, 증가 속도가 늦은 경우

는 입계 균열의 생성과 진전을 야기 시킨다고 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 기존의 고온 구조물 또는 부품 재료로 쓰이고 있는 STS 316L과 최근 개발되어서 국내에 도입이 되고 있는 P92강을 이용하여 고온의 재료 성질, 하중 파형에 따른 고온 피로 균열 거동 등을 비교 분석하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 시편의 제작

시편재료는 오스테나이트계 스테인리스인 STS 316L과 개량형 9Cr강인 P92강을 사용하였으며, 각 재료의 화학적 성분을 Table 1과 2에 나타내었다.

2.2 인장 실험 및 피로 실험

상온과 600℃에서 STS 316L과 P92강의 인장 실험을 수행하였으며, 고온 피로균열에 미치는 하중 파형의 효과를 평가하기 위하여 대칭 하중 파형과 비대칭 하중 파형을 이용하여 고온 피로 실험을 수행하였다. 인장 실험용 시편은 KS B 0801에 준하여 14A호 시편으로 제작하였고, 10 ton 용량의 전기 유압식 Shimadzu Dynamic Testing System으로 ASTM E 8에 준하여 상온 인장 실험을, ASTM E 21에 준하여 600℃에서 고온 인장 실험을 수행하였다.

피로실험은 600℃에서 ASTM E 647에 의하여 인장 실험에 사용된 같은 시험기로 수행하였다. 피로실험 시편은 CT시편 형상으로 Fig. 1과 같

Table 1 Chemical composition of STS 316L(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
0.02	0.62	0.69	0.021	0.002	17.37	12.23	2.16	Bal.

Table Chemical composition of P92 steel(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	V	Nb	N	W	B	Fe
0.10	0.22	0.48	0.017	0.006	0.010	9.11	0.18	0.470	0.18	0.056	0.040	1.710	0.0029	Bal.

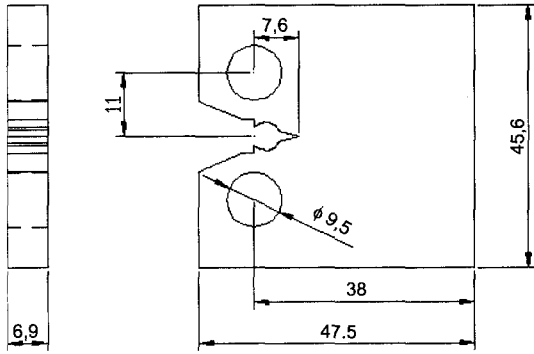


Fig. 1 Geometry of CT specimen

다. 피로 균열 길이는 전위차법(Electric Potential Drop Method)을 이용하여 측정하였다.

3. 실험 결과

3.1 인장 실험

STS 316L과 P92강의 상온 및 600°C에서의 인장실험 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 3에서 알 수 있듯이 항복 강도와 인장강도 그리고 연신율은 온도가 600°C로 증가하면 모두 감소하는 경향을 보였다. 특히, P92강의 항복 강도는 STS 316L에 비해 현저히 높은 것으로 조사되었으며, 온도의 상승에 따른 항복 강도 감소 비율도 STS 316L에 비해 상당히 작게 나타났다. 연신율은 두재료 모두 온도가 증가하면 감소하였으나 P92강의 경우 감소율이 더 낮게 나타났다.

3.2 하중 파형에 따른 피로 실험

3.2.1 STS 316L

Table 4에는 STS 316L과 P92강을 이용한 하중 파형에 따른 피로실험조건을 나타내었으며, Fig. 2에서는 본 실험에 사용된 하중 파형을 도식적으로 표시하였다. 피로실험의 하중 조건은 하중 증가 및 감소속도의 변화 외에, 실구조물이나 부품의 정하중 조건을 고려하여 최대 인장 값에서 짧은 인장 유지 시간을 갖도록 하였다.

Fig. 3에는 STS 316L을 이용하여 하중 증가 시

Table 3 Tensile properties of STS316L and P92 steel

Material	Temp.	Y.S. (MPa)	U.T.S. (MPa)	Elong. (%)
STS316L	R.T.	239.8	589.0	46.7
	600°C	132.1	422.3	26.5
P92 steel	R.T.	440	620	23.6
	600°C	332.7	375.5	15.9

Table 4 Conditions of the fatigue tests

Loading waveform	Loading time	Hold time	Unloading time	Load ratio
Trapezoidal 1	1 sec.	5 sec.	1 sec.	0.1
Trapezoidal 2	1 sec.	5 sec.	50 sec.	0.1
Trapezoidal 3	50 sec.	5 sec.	1 sec.	0.1
Trapezoidal 4	50 sec.	5 sec.	50 sec.	0.1

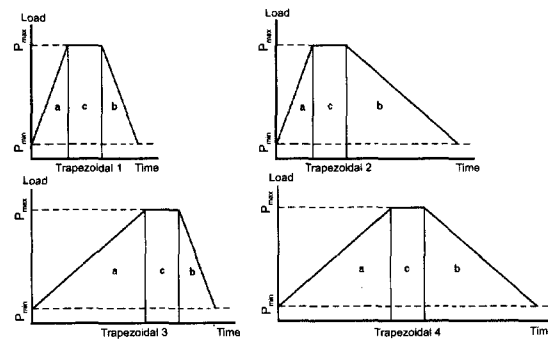


Fig. 2 The schematics of fatigue waveshapes (a: increasing time, b : decreasing time, c : holding time)

간을 각각 1초와 50초, 그리고 하중 감소 시간을 각각 1초와 50초 설정한 대칭 및 비대칭 하중 파형을 이용한 피로 실험의 결과를 da/dN 과 ΔK 선도로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 하중 감소 시간의 차이와는 무관하게 하중 증가 시간이 증가하는 경우 균열 전파 속도가 모두 현저히 빨라진 것으로 조사되었다. 그러나 같은 하중 증가 시간 조건에서는 하중 감소 속도의 차이가 균열 전파 속도에 영향을 미치는 것으로 나타나 하중 감소 속도가 느린 것이 균열 전파 속도가 빠르게 조사되었으나 증가의 폭은 하중 증가 시간의 영향에 따른 증가폭보다 현저히 낮았다.

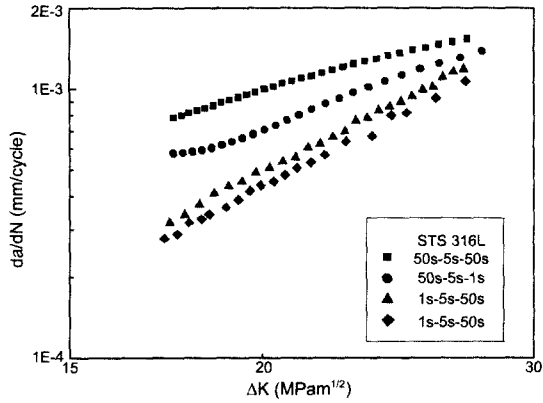


Fig. 3 da/dN vs. ΔK curve under various loading waveform at 600°C in STS 316L

이는 하중 증가 시간이 하중 감소 시간에 비해 균열 성장에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 나타내고 있다.

이상의 실험에서 STS 316L은 본 연구에서 수행한 ΔK 영역에서 하중 증가와 감소시간이 증가할수록 균열 성장 속도는 증가하는 경향을 보였다. 그러나 하중 감소시간 보다는 하중증가 시간의 증가가 균열 성장 속도를 더 민감하게 증가시킨다는 것으로 조사되었다.

3.2.2 P92강

Fig. 4에는 P92강을 이용하여 STS 316L과 동일한 조건으로 피로 시험을 행한 결과를 da/dN과

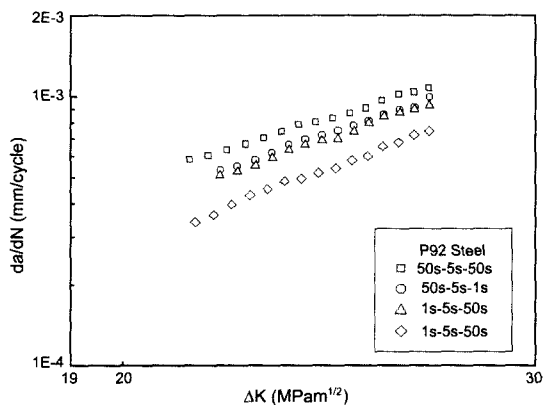


Fig. 4 da/dN vs. ΔK curve under various loading waveforms at 600°C in P92 steel

ΔK 의 선도로 나타내었다.

그림에서 알 수 있듯이 하중 증가 시간과 감소 시간이 증가함에 따라 균열 성장 속도가 더 빠르게 나타났다. 그러나 비대칭 파형에서 하중 증가 시간 조건과 하중 감소 시간 증가 조건에 따른 균열 성장 속도의 차이는 매우 적은 것으로 나타났다.

따라서 개량형 9Cr강인 P92강은 Fig. 3에 나타난 같은 피로하중 조건으로 수행한 STS 316L의 결과와 비교하여 볼 때, 하중 증가 시간 동안 발생하는 피로 이외의 크리프와 산화의 영향이 현저하게 줄어든 것으로 생각된다. 즉, STS 316L에 비하여 P92강은 크리프나 산화의 효과가 하중 증가 동안 피로 균열 전파 속도를 그다지 높이지 않는 것으로 생각된다.

3.2.3 STS 316L과 P92강의 비교

Fig. 5는 Table 4에서 나타낸 실험 조건하에서 STS 316L과 P92강의 하중 파형에 따른 고온 피로 실험의 결과인 Fig. 3과 4를 직접 비교하기 위하여 하나의 그림으로 나타낸 것이다.

그림 5에서 볼 수 있듯이 모든 조건에서의 균열 성장 속도는 STS 316L에 비해 P92강에서 더 느리다는 것을 알 수 있다. 그리고 하중 파형에 따른 균열 성장 속도에서 STS 316L은 하중 증가 시간이 증가함에 따라 균열 성장 속도가 상당히 빨라지는 반면 P92강의 경우 하중 증가 시간 증

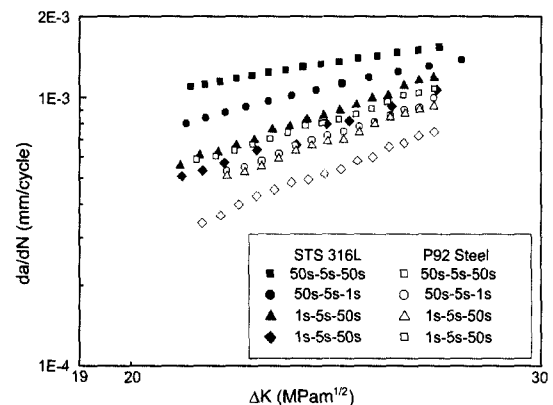


Fig. 5 da/dN vs. ΔK curve under various loading waveforms at 600°C in STS 316L and P92 steel

가에 의한 균열 성장 속도의 변화는 아주 적은 것으로 나타났다.

따라서 하중 증가 시간이 증가함에 따라 P92강의 균열 성장 속도 증가량은 STS 316L의 균열 성장 속도 증가량보다 적음을 알 수 있다. 이는 하중 증가 시간이 증가함에 따라 발생하는 시간 의존적 균열 성장 기구들이 STS 316L보다 P92강에서 훨씬 감소함을 의미한다.

이상의 결과에서 새롭게 개발된 P92강은 STS 316L 보다 하중 파형에 따른 고온피로 균열 성장에 대한 저항성이 뛰어나다는 것을 알 수 있으며 이는 차세대 자동차 소재로서 이용될 수 있는 좋은 기계적 성질이라 하겠다.

4. 결론

본 연구에서는 STS 316L와 P92강을 이용하여 하중 증가 시간을 각각 1초와 50초를 준 대칭 파형과 비대칭 파형을 사용하여 고온 피로 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) STS 316L의 하중 파형에 따른 균열 성장 속도는 하중 파형에 따라 서로 다른 피로 균열 성장 거동을 한다. 하중 증가와 감소 시간이 증가할수록 균열 성장 속도는 증가하였다. 이때 균열 성장 속도는 하중 감소 시간보다는 하중 증가 시간에 더욱 민감한 경향을 보였다. 이러한 경향의 이유는 하중 증가 시간 동안의 크리프의 영향에 의한 것이다.

2) P92강의 하중 증가 시간의 변화가 피로균열 전파 속도에 미치는 영향은 하중 감소시간의 변화가 피로균열전파 속도에 미치는 영향과 거의 같은 것으로 나타났다.

3) P92강은 기존의 고온 재료인 STS 316L과 비

교하여 균열 성장 속도가 상당히 느리며, 하중 파형에 따른 영향도 훨씬 작게 나타났다. 이는 P92강이 고온 피로 성질이 상당히 개선되었음을 나타내는 것이다.

후 기

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 성균관대학교 SAFE 연구소에서 수행되었음.

참 고 문 헌

- 1) 김용서, 조진호, 박경석, 정태용, 임병수, "자동차 기술 핸드북," 한국자동차공학회, Vol. 4, pp.8-12, 1996.
- 2) W. Bendick, F. Deshayes, K. Haarmann, J.C. Vaillant, "New 9-12%Cr Steels for Boiler Tubes and Pipes Operating Experiences and Future Developments," SAN SEBASTIAN, 1998.
- 3) 이진호, "하중증가 조건을 고려한 크리프 파괴 매개 변수에 관한 연구," 성균관대학교 박사학위 논문, 1997.
- 4) 남수우, 홍지원, "고온피로와 크리프 변형의 특성과 상호작용에 관한 최근의 연구," 대한기계학회지, Vol.24, No.4, pp.225-261, 1984.
- 5) G. P. Zhang, Z. G. Wang, "Creep-Fatigue Crack Growth of Intermetallic Compound Ni3Al(B) at Elevated Temperature," Material Science and Technology, Vol.15, pp.1230-1236, 1999.
- 6) K. Bhanu Sankara Rao, H. Schuster, G. R. Halford, "Mechanisms of High-Temperature Fatigue Failure in Alloy 800H," Metallurgical and Materials Transactions A, Vol.27A, pp.851-861, 1996.