'99 춘계학술대회 논문집
한국원자력학회

고온고압 수화학분위기에서의 피로균열성장 속도에 미치는 여러가지 인자들의 영향

The Effect of various factors on Fatigue Crack Growth Rate in High Pressure and Temperature Water Envrionment

이 상 규, 김 인 섭
대전시 유성구 구성동 373-1

요약

가동분위기에서 압력용기강의 피로균열성장 특성을 평가하기 위하여 고온고압 수화학분위기에서 피로균열성장 시험을 하였다. 하중 주파수, 용존산소량 및 온도를 변수로 하였다. 용존산소가 제거된 조건에서 하중주파수에 상관없이 공기분위기 시험결과와 유사하였으며, 용존산소량이 8000ppb **일 경우 하중 주파수가 낮아질수록 균열성장 속도가 크게 증가하는 경향을 보였다. 균열성장 속도의 증가는 황개재물 주위에서 생성되는 환경유기 균열 발생에 기인함을 파면 관찰 및 분석을 통해 확인되었다.** da/dN vs ΔK **곡선을** da/dt vs dε/dt **곡선으로 변환하여 균열선단 변형률속도가 균열성장 속도에 미치는 영향을 확인하였다. 낮은 변형률 속도**($<10^{-3}$ /s)**에서 변형률 속도의 영향을 동적변형시효와 산화막파괴거동의 상호작용으로 설명할 수 있었다.**

Abstract

To assess Fatigue Crack Growth Behavior of Reactor Pressure Vessel at operating condition, Fatigue Crack Growth Rate Test was performed in high temperature and pressure water environments. Test parameters were load frequency, dissolved oxygen(DO) content and temperature. At low DO condition, result was similar to that of air environment. At high DO condtion(8000ppb), crack growth rate was increased as load frequency was low. It was found through fractographic study and surface analysis that the enhancement of crack growth rate was due to environmentally assisted crack near sulfur inclusion. With changing curve format from da/dN vs ΔK to da/dt vs dε/dt , crack tip strain effect on crack growth rate was investigated. At low strain rate($<10^{-3}$ /s), the effect of strain rate on crack growth rate was understood with correlating between dynamic strain ageing and oxide fracture behavior.

I. 서론

압력용기강의 피로현상을 일으키는 요인은 여러 가지가 있을 수 있다. 전형적인 압력용기의 경우 수명기간 동안 startup/shutdown (50,000cycles), step increases/decreases output(10,000 cycles), minor trip (1,000 cycles), **그리고** hydro-leak test(20cycles) **등의 피로하중을 받는 것으로 알려져 있으며, 이러한 하중은 균열을 발생 혹은 성장 시킬 수 있다**[1].

`71 년 Kondo[2] 등의 발표이후, 현재까지 하중과 재료 및 수화학 환경의 조합으로 환경유기 균열이 발생하며, 환경유기 균열의 거동이 컴포넌트의 건전성에 미치는 영향을 연구하여 왔다. ASME 에서는 1980 년대 이후는 고온고압 수화학분위기의 영향을 고려하여 가동 중 검사에 이용하도록 Code 를 제시하고 있다[3].

90 년대에 이르러서는 재료 및 가동 조건의 개선으로 인해 ASME Code 의 지나친 보수성에 대한 문제점 및 다양한 환경을 획일적으로 고려하고 있는 등의 문제점이 제시되었으며, 대안으로 다양한 조건에서 균열성장 속도를 예측할 수 있도록 모델을 개발하여 발표하고 있다[1, 4 - 9]. 하중비 및 하중 주파수의 영향을 균열선단 변형률 속도로 해석하는 Ford-Andresen 의 모델이 가장 유력하며 아래의 식으로 표현된다[5-8]. 피로하중에 의해 균열선단에서 산화막 파괴 및 bare metal 의 용해가 반복적으로 일어나기 때문에 균열이 성장한다는 물리적인 이해에 기초한 모델이다.

$(da/dt)_{env} = A(d\varepsilon/dt)^n$

A, n 은 재료 및 수화학 조건에 의해 결정되는 상수이다. 현재 A, n 은 여러가지 물리적인 타당한 가정 및 모사장치에서 값을 측정해 내고 있고, $(d\varepsilon/dt)$ 역시 여러가지 가정에 의해 식이 제안되고 있다. 모델 제안식은 실험에 의해 얻어진 균열성장 속도와 균열선단 변형률 관계를 잘 나타내고 있다. 하지만, 균열성장 속도의 최소치 및 최대치를 예측하는 수준에 있으며, 균열선단에서의 변형률 속도와 산화막 파괴를 고려할때 재료의 기계적인 성질이 고려되고 있지 않으며, 특히 온도에 따라 변하게 되는 산화막 파괴와 균열선단 변형률 속도의 상관관계에 대한 고려가 없다.

본 연구에서는 고온고압 수화학 분위기에서의 균열성장 속도 시험을 수행하고, 얻어진 결과의 타당성을 확인하며, 균열선단에서의 여러가지 인자와 균열성장 속도의 관계에 대해 논의하고자 한다.

II. 실험방법

II.1 시험 시스템

고온 고압 수화학분위기를 모사하기 위하여 Autoclave 및 water Loop 를 제작하였다. autoclave 는 170kgf/cm^2 과 340°C 분위기를 모사할 수 있으며, 용량은 5liter inner volume 으로 제작되었다. Water Loop 는 5liter/h 의 유속을 모사할 수 있다. Push/Pull rods 의 sealing 으로 인해 생기는 friction 을 최소

화 하기 위해 pressure balance type 으로 제작되었다. 측정된 friction 은 공학적 오차 2% 이내에 있도록 조절 되었다. 균열성장은 Reversing DCPD 방법으로 모니터링하였다.

II.2 시험 재료

시험에 이용된 재료는 한국중공업에서 제작된 압력용기용 SA508 –3 저합금강이었다. 실험재료의 화학조성을 표 1 에 나타내었다. 열처리 이력은 880ºC + 7hr → water quenching → 655ºC+9hr → air cooling 이며 기계적인 성질은 표 2 에 나타내었다. 재료의 조직은 그림 2.1 과 같이 템퍼드 베이나이트 조직이었다.

II.3 균열성장 시험

피로균열성장 시험은 ASTM E647 에 따라 수행되었다. 용존산소의 제거는 질소가스를 시험전 24 시간 전부터 water loop 에 주입하는 방법으로 하였다. 하중비 R=0.5, 하중주파수 1, 0.5, 0.1 및 0.05Hz 의 조건에서 수행되었다. 288°C 에서 대부분 수행되었으며, 온도의 영향을 확인하기 위해 200°C 에서 수행되었다. Precracking 은 공기분위기에서 수행되었다. 공기분위기에서 만든 Precracking 의 영향을 제거하기 위하여 고온고압 수화학에 시편을 24hr 이상 시효처리한 후 시험을 시작하였으며, 2.5mm 정도 수화학 분위기에서 균열성장 후, 자료를 획득하여 해석에 이용하였다.

II.4 파면 관찰 및 분석

시험이 끝난 시편을 액체질소에서 파단한 후, 시험후 균열교정을 수행하였다. 또한 SEM 장비를 이용하여 파면을 관찰하였고, 특정 파면에 대해 성분 분석을 하였다.

III. 결과 및 토의

III.1 용존산소량과 하중주파수가 피로균열성장 속도 미치는 영향

그림 2 및 3 에 시험결과를 나타내었다. 그림 2 에서와 같이 용존산소가 없는 경우 하중 주파수의 영향은 나타나지 않았으며, 공기분위기 결과와 유사하다. 그림 3 의 경우 용존산소가 8000ppb 일 경우

하중 주파수가 낮을 경우 균열성장 속도는 크게 증가 하며, 1Hz 조건의 경우는 공기분위기 결과와 동일하다.

파면관찰을 통해 균열성장속도가 증가한 원인은 용존산소가 있는 경우, 그림 4 에 나타낸 바와 같이 개재물 용해된 지역에서 보여지는 환경유기 균열 발생 때문임을 확인하였다. 용존산소가 낮은 경우 및 용존산소가 높더라도 하중주파수가 1Hz 인 경우에는 환경유기 균열이 발생하지 않았다. 개재물을 규명하기 위해 표면 분석을 수행하였으며, 그 결과는 그림 5 와 같이 Mn-S 로 이루어진 황개재물임을 확인할 수 있었다.

일반적으로 황개재물은 균열이 성장할 때 균열선단과 만나 수화학에 노출 및 용해되어 균열내부를 심각한 부식환경으로 만드는 것으로 알려져 있다[10]. 시험에 사용된 재료의 경우 황원자 함량이 아주 낮은 수준이므로, 용존산소가 없는 경우 황개재물 용해는 환경유기 균열을 발생하지 못하고 있고, 용존산소가 높은 경우 황개재물 용해로 인해 환경유기 균열 형성이 가능한 것으로 보인다. 이러한 현상은 전위차에 의한 음이온의 균열내부에 농축될 수 있기 때문으로 해석된다[11].

$$C_{ct} = C_{ext}\,(10)^{\Delta\phi/0.4} = C_{ext}\,(314)^{\Delta\phi}$$

균열외부는 용존산소가 높으며, 균열내부는 기하학적으로 밀폐되어 있으므로 용존산소가 제거된 조건과 동일한 전기화학상태 있게 된다. 용존산소가 높은 경우 균열외부와 내부의 전위차가 크기 때문에 균열선단에 더 많은 음이온이 농축될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 수화학에 오염된 이온은 없었고, 전기 전도도를 0.1μS/cm 이하로 조절하였다. 균열내부를 오염시킬 수 있는 요인은 재료 자체내의 황원자 함량이라는 사실과 1Hz 조건에서는 동일한 수화학 환경임에도 불구하고 환경유기 균열이 발생하지 않았다는 사실을 감안할 때, 용존산소가 많은 경우 증가된 균열성장 속도를 황개재물 용해에 의한 것으로만 설명하는 것은 부족하다. 전위차로 인한 황이온의 균열내부 오염에 의한 용해량의 증가 뿐만 아니라 균열선단에서의 용존산소량의 차이에 의한 산화막 특성의 변화를 고려해야 할 것으로 판단된다.

III. 2 온도의 영향

온도가 부식피로균열성장 속도에 미치는 영향은 Atkinson 이 PWR 수화학환경에서의 시험결과로 최초보고 하였으며, Katada 등에 의해 BWR 조건에서 온도 영향이 보고 되었으며, PWR 환경과 BWR 환경의 차이는 없는 것으로 보고되었다[12, 13]. 그림 6 에 온도에 따른 시험결과를 나타내었으며, 본 연구결과는 보고된 결과와 유사한 경향을 보여주고 있다. 100 °C 에서 균열성장 속도가 최대에 도달하며, 175°C 에서 최소에 이르는 경향에 있다. 이러한 복잡한 온도 의존성을 갖는 것은 온도에 따라 균열선단의 수화학차이, 산화막 특성 차이, 재료의 동적변형시효 등의 차이에 기인하는 것으로 예측하고 있으며, 최근까지는 자료의 부족으로 해석이 제대로 이루어지지 않고 있다[14].

III. 3 균열선단 변형률 속도의 영향

균열선단의 변형률 속도에 대한 계산은 어려우며, 측정 또한 특별한 기하학적인 균열에서만 가능하다. 현재까지 여러 연구자들이 균열선단의 변형률 속도 계산식을 제안하고있으며[5-9], 피로하중을 받는 경우 아래의 Ford-Andresen 의 제안식으로 계산할 수 있다[8].

$$d\varepsilon/dt = 800 \times \text{frequency} \times A_R \times (\Delta K)^4$$
$$R < 0.42,\ A_R = 3.7473 \times 10^{-11}\ w$$
$$R > 0.42,\ A_R = -4.2848 \times 10^{-11} + 1.7124 \times 10^{-10}\ R + 8.4585 \times 10^{-11}\ R^2$$
$$\Delta K : \text{MPam}^{0.5}$$

그림 7 에 균열선단의 변형률속도와 균열성장 속도의 관계를 나타내었다. 공기분위기 시험결과는 균열선단 변형률에 대해 log-linear 의존성을 보이고 있다. 수화학분위기 시험결과는 0.05Hz 시험의 경우, 넓은 변형률 속도 범위에 대해 큰 균열성장 속도를 보이고 있으며, 0.1Hz 에서의 결과는 2.5×10^{-4} (/s) 균열선단 변형률보다 낮은 곳에서 수화학 인자에 의해 균열성장 속도가 증가를 보이고 있다. 이에 비해 1Hz 의 경우는 공기분위기와 동일하게 변형률속도에 대해 log-linear 의 의존성을 보이고 있다.

파면 분석결과 0.05Hz 이외의 경우 황개재물 용해로 인한 환경유기 균열 발생빈도가 아주 낮았다. 즉 0.05Hz 시험결과는 황개재물의 용해로 인해 균열선단의 오염이 균열성장 속도 증가에 기여하였다고 해석된다. 0.1Hz 에서의 결과는 황개재물의 용해의 영향은 없으며, 단지 낮은 변형률에서 산화막 파괴거동이 높은 변형률속도와 다르기 때문으로 해석할 수 있다. 시험온도 288°C 및 10^{-4} ~ 10^{-3}

(/s) 변형률 속도에서는 508 Cl-3 저합금강은 동적변형 시효현상을 일으키며[15], 이로 인해 균열선단에서 변형률이 집중될 수 있다[16]. 집중된 변형률로 인해 높은 변형률 속도에서의 산화막 파괴에 비해 더 큰 폭으로 산화막이 파괴되기 때문인 것으로 예측된다. 그러므로 부식피로균열성장 속도 모델을 만들기 위해서는 균열선단에서의 수화학 오염 뿐만 아니라 변형률속도에 따른 산화막 파괴 거동의 차이를 반드시 고려해야 하고, 동적변형 시효현상이 저합금강 고온부식피로균열성장 속도 거동에 무시할 수 없는 영향을 준다고 판단된다.

IV. 결론

고온고압 수화학분위기에서 수행된 실험결과를 바탕으로 여러가지 인자들이 부식피로균열성장 거동에 미치는 영향을 고려하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1.고온고압 수화학분위기에서 피로균열 성장속도에 영향을 주는 가장 중요한 인자는 용존산소량이었으며, 용존산소량이 제거될 경우 균열성장 거동은 공기분위기와 유사하였다.

2. 부식피로 균열성장 속도의 온도 의존성은 아직 규명되고 있지 않으며, 이를 규명하기 위해서는 보다 많은 자료 생산 및 확보가 우선되어야 한다. 또한 수화학 인자의 온도 의존성만으로는 부식피로균열 성장속도의 온도 의존성을 이해할 수 없고, 재료의 기계적 성질에 따른 온도 의존성을 적용해야 할 것으로 판단된다.

3. 균열선단 변형률에 따른 고온부식피로균열 성장 속도를 해석한 결과, 균열선단 수화학인자의 오염 뿐만 아니라, 변형률속도에 따른 산화막 파괴거동이 균열성장 속도를 지배하였다. 황개재물의 영향이 없는 경우, ~ 10^{-3} (/s) 이하에서의 균열성장속도는 재료의 동적변형시효 현상과 관련지어 설명할 수 있었다.

4.부식피로균열성장 속도 모델을 만들기 위해서는 균열선단에서의 수화학 오염 뿐만 아니라 변형률속도에 따른 산화막 파괴거동의 차이를 반드시 고려해야 할 것이다.

참고문헌

1. K. Toerroenen, et al. , ASTM STP 770 (1982) p 460

2. T. Kondo, et al., Proc. Conf. On Corr. Fati. on Chemistry, Mechanics and Microstruecture, NACE-2 (1971) p539
3. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI. (1988)
4. J. D. Atkinson, et al. , PVP – Vol. 306 (1995) p 3
5. F. P. Ford, Corr. Vol. 52, No. 5 (1996) p 375
6. P. L. Andresen, F. P. Ford, Int. J. Pres. Ves. & Piping 59(1994) p 61
7. F. P. Ford, J. of Press. Ves. Tech. Vol. 110 (1988) p 113
8. F. P. Ford, et al., EPRI NP 5064M Project 2006-6 final report (1987)
9. J. Wozniak, et. al, 8th International Symp. On Envi. Deg. of mat. In Nuclear Power Systems-water reactors, Vol. 2(1997) p941
10. J. H. Bulloch, Int. J. Pres.. Ves. & Piping 56(1993) p 149
11. P. L. Andresen, International Symp. On Envi. Deg. of mat. In Nuclear Power Systems-water reactors, (1988) p301
12. J. D. Atkinson, et al., Proc. of IAEA specialists meeting on subcritical crack growth, Freiburg, (1981) p.459
13. Y. Katada, et al., Corr. Sci. vol. 25 (1985) p 693
14. Y. Katada, et al., 8th International Symp. On Envi. Deg. of mat. In Nuclear Power Systems-water reactors, Vol. 2(1997) p916
15. S. S. Kang, Ph. D. Thesis, Aug., 1994, KAIST
16. C. W. Marschall, ASTM STP 1074(1990) p 339

표 1. 재료의 화학성분

	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	Al	Cu	V
(wt/o)	0.21	0.25	1.24	0.002	0.007	0.88	0.21	0.47	0.008	0.03	0.004

표 2. 상온에서의 기계적인 성질

0.2% Yield Strength	65KSI
Tensile Strength	86KSI
Elongation	29%
Reduction of Area	74%
Charpy Energy	138J
RT_{NDT}	-30ºC
Microhardness	180 ~ 208HB

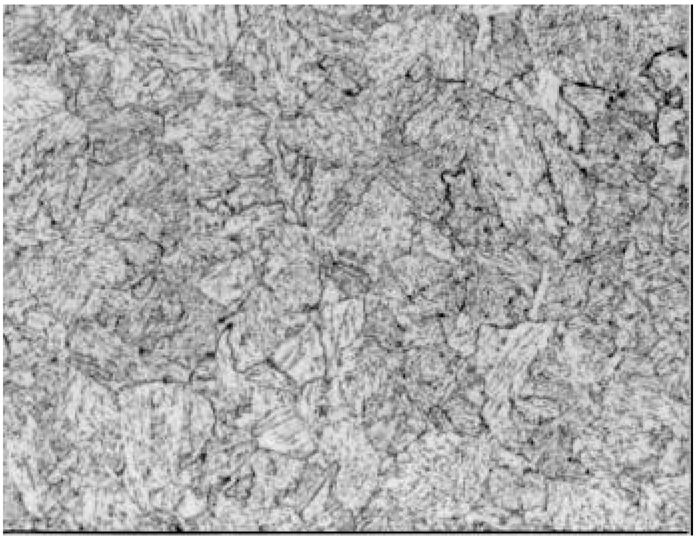

그림 1. SA 508-3 **재료의 미세조직**

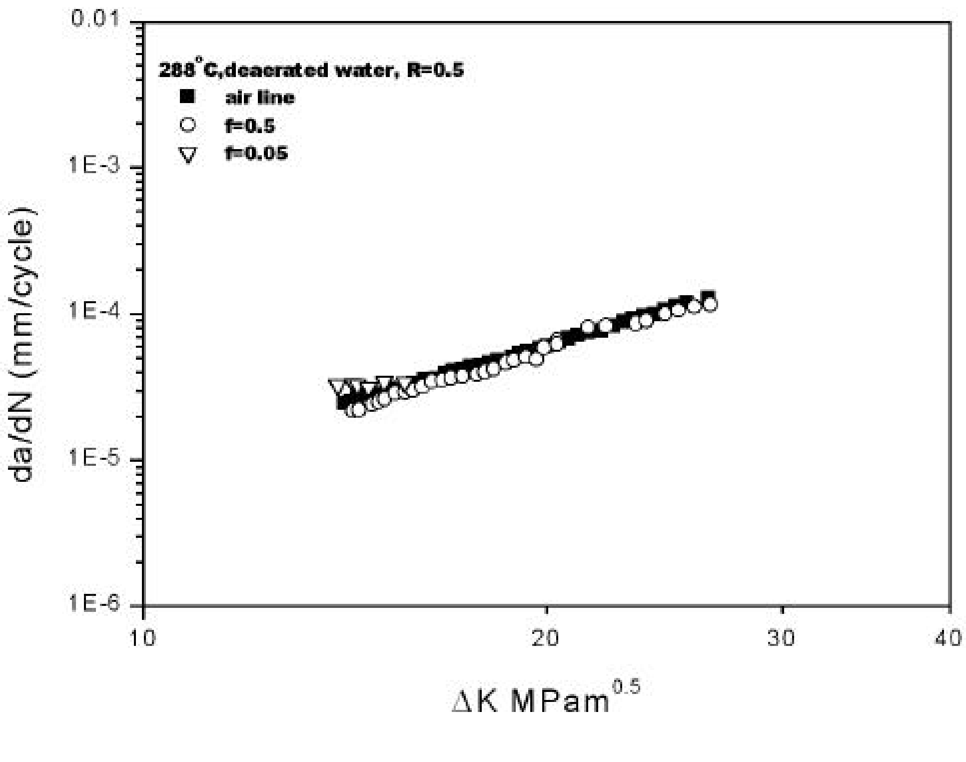

그림 2. **산소가 제거된 조건에서의 피로균열성장 속도 결과**

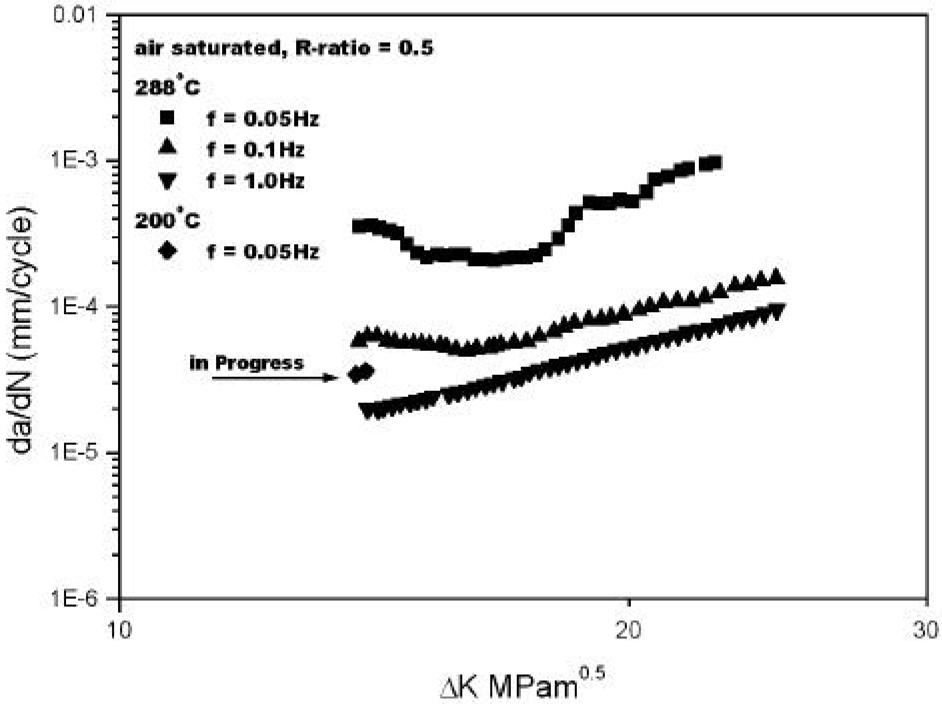

그림 3. **용존산소가 높은 경우의 피로균열성장 시험 결과**

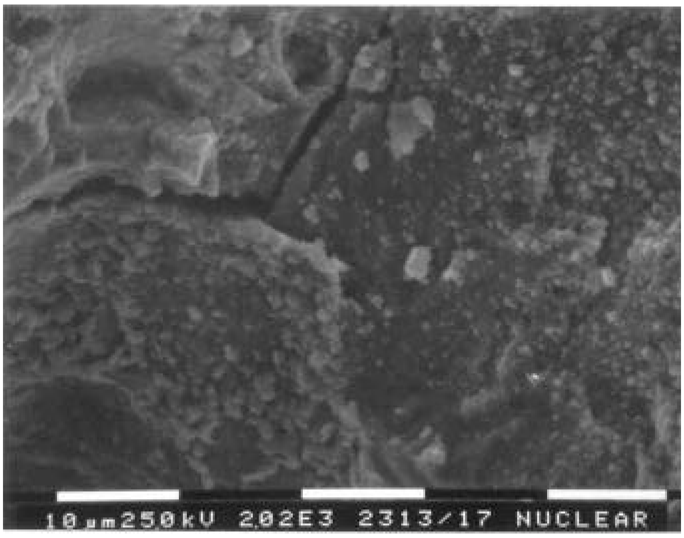

그림 4. **환경유기 균열** – **개재물의 용해된** hole **근처에서 발생**

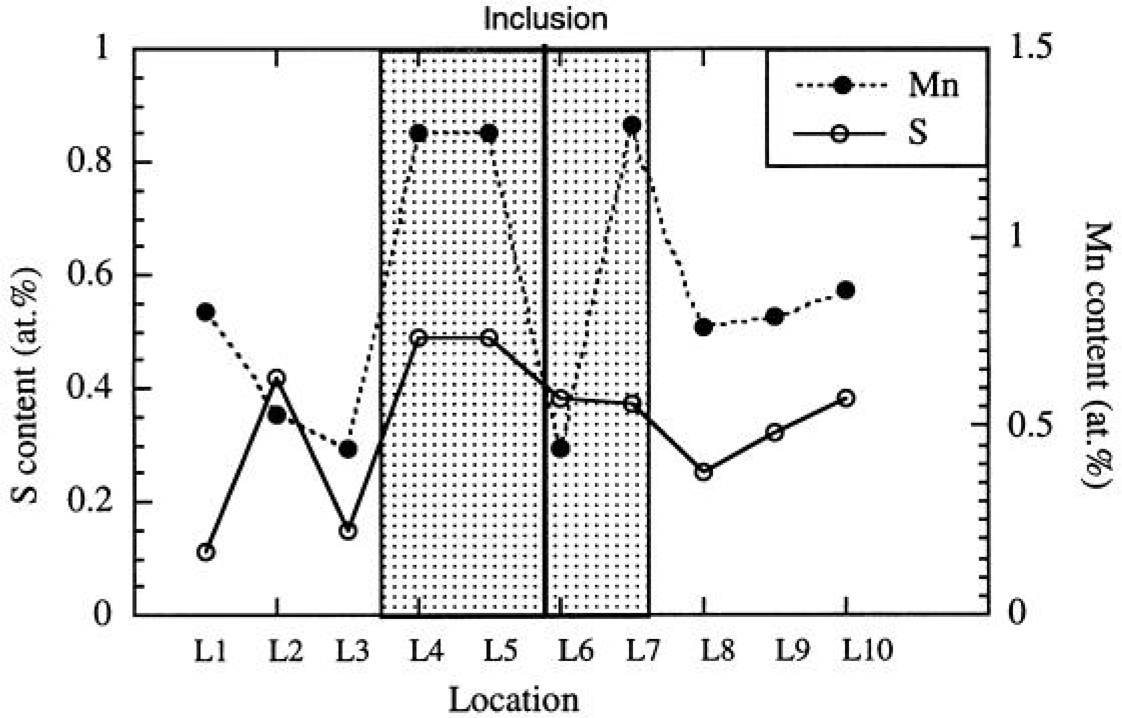

그림 5. 개재물 용해에 영향을 받은 산화막 성분 분석 결과

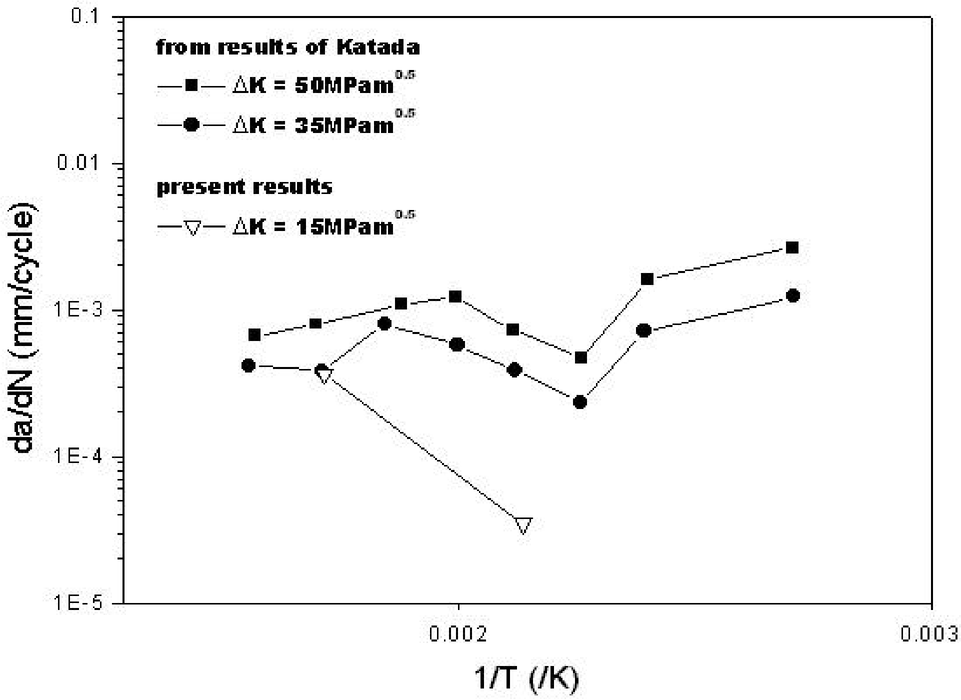

그림 6. 부식피로균열성장 속도의 온도 의존성

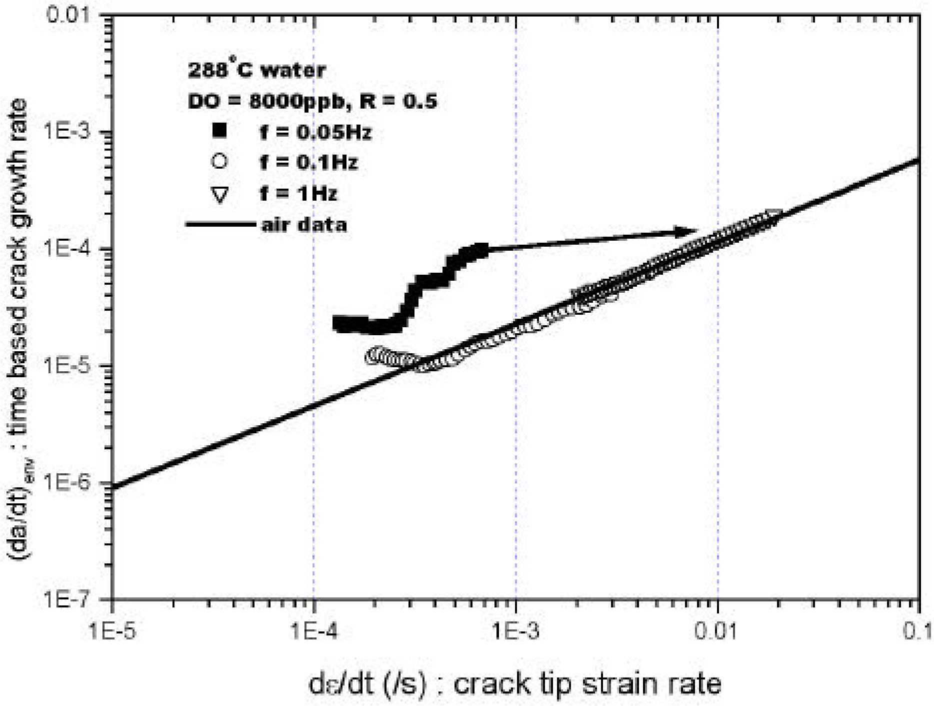

그림 7. 균열선단 변형률 속도가 부식피로균열성장 속도에 미치는 영향