

〈論 文〉

극저온 환경에서의 피로균열 선단의 온도상승에 관한 연구

이준현* · I. Maekawa**

1994년 2월 8일 접수

A Study on Temperature Rising near Fatigue Crack Tip at Cryogenic Temperature

Joon-Hyun Lee and Ichiro Maekawa

Key Words : Fatigue Crack Tip(피로균열 선단), Back Face Strain(배면 변형률), Cryogenic Environment(극저온 환경), Temperature Rising(온도상승), Stress Waveform(응력파형), Stress Intensity Factor(응력확대계수)

Abstract

The structural materials for cryogenic technology have been recently developed to support the many modern large-scale application from superconducting magnets for nuclear fusion reactor, magnetic levitation railway to LNG tankers. However it is pointed out that quenching phenomenon is one of the serious problems for the integrity of these applications, which is mainly attributed to the rapid temperature rising in the material due to some extrinsic factors of structures. From the viewpoint of fracture mechanics, it is therefore very important to clarify the mechanism of temperature rising of structural material due to cyclic loading at cryogenic temperature. From this purpose, fatigue test was carried out for high manganese steel at liquid helium temperature(4.2 K) using triangular stress waveform to identify both the mechanism of temperature rising near crack tip and the effect of loading stress waveforms on temperature rising. As the results, two types of temperature rising, that is, regular and burst types were observed. And a periodical temperature rising corresponding to the stress waveforms was also found. The peaks of the temperature rising were recorded near both the maximum and the minimum values of the applied stress. The sudden temperature rises, which indicated the higher values than those of periodical temperature rises under the repetition of stress, were observed at the final region of crack growth. It was shown that the peak values of the temperature rising increased with stress intensity factor range.

1. 서 론

최근 새로운 고속운송 수단 및 에너지 개발 등을

위한 자기부상열차, 핵융합로 및 대형 가속기 등의 극저온 기술의 개발에 국내, 외적으로 많은 관심이 모아지고 있고 또 이들의 실용화를 위해 여러분야에서의 연구개발이 진행중에 있다. 따라서 이들 극저온 기술을 지지하기 위해서는 무엇보다 저온 및 극저온 환경에 있어서의 뛰어난 기계적 특성을 가

*정회원, 부산대학교 기계기술연구소

**카나가와 공업대학 기계시스템공학과

지는 구조용 재료의 개발이 절실히 요구되어지고 있으며, 또 이미 개발된 구조용 재료에 대하여 안전 신뢰성 확보를 위한 파괴역학적 관점에서의 강도평가⁽¹⁾가 불가결한 과제로 대두되고 있다. 예를 들면 핵융합발전의 경우 그 기본 구조가 되는 초전도 회전자는 4.2 K에서 실온까지의 폭 넓은 온도 변화를 경험하기 때문에 사용 구조 재료의 요구 조건으로서는 이 온도 범위내에서의 재료의 인성 및 강도 등의 뛰어난 기계적 특성이 요구되어진다. 또 구조물의 신뢰성 평가의 측면에서도 이 온도 범위내에서의 재료의 파괴인성 및 피로균열진전 특성 등의 파악이 필수적이다. 또 초전도 기기가 실제로 작동할 때에는 강력한 전자력이 반복해 작용하기 때문에 극저온에 있어서의 작용 응력의 반복에 따른 재료의 피로거동의 규명은 실제 극저온용 기기의 설계에 있어서 극히 중요한 문제이다. 한편 극저온에 있어서는 재료의 비열 및 열전도율이 상온에 비해 현저히 저하하기 때문에 미세한 양의 발열에 대해서도 상온에서는 예측하지 못할 큰 온도상승이 발생하며 또 재료 내부에 미세한 균열이 존재해 있을 경우 균열 선단에 있어서는 이로 인한 급속적인 온도상승이 예측되어진다. 만일 재료가 초전도 관계의 구조 재료로서 사용 되어지는 경우 이 발열의 규모에 따라서는 초전도현상이 깨어지는 퀴닝(quenching) 현상의 발생원인이 되어질 수도 있다. 극저온에서의 인장시험에서는 점차적인 온도상승을 동반한 하중·변위 곡선상에 하중의 저하와 상승이 반복 되어지는 극저온 세레이션(serration) 변형이라고 하는 현상이 나타난다. 이 현상에서의 온도상승에 관한 문제는 변위속도의 영향^(2,3) 등을 포함하는 약간의 연구가 보고되고 있으나, 인장시험과 비교해 작은 응력이 반복 되어지는 피로시험에 있어서의 온도상승의 문제에 대해서는 최근까지도 거의 연구가 행해지지 않고 있다.

최근 개발되어진 25 Mn-5 Cr-1 Ni 오스테나이트강은 저온 환경에 있어서도 고 강도, 고 인성을 나타내고 또 비자성이기 때문에 종래의 스텐레스강을

대신하는 저온용 구조 재료로서 유망시되고 있다. 이 때문에 이 고 Mn강에 대한 피로 특성에 대해서는 일련의 연구⁽⁴⁻⁶⁾가 행해져 왔으나 이들 대부분은 액체질소 범위내에 한정되어졌다.

따라서 본 연구에서는 4.2 K의 극저온에 있어서 25 Mn-5 Cr-1 Ni강의 피로균열 선단에서의 발열에 의한 온도상승과 이를 지배하는 발열 메카니즘 및 이에 미치는 응력파형의 영향을 규명하고자 하였다.

2. 실험

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 재료는 최근 극저온용 재료로서 새로이 개발된 25 Mn-5 Cr-1 Ni 오스테나이트강이며 Table 1과 Table 2에 재료의 화학적 성분과 기계적 성질을 나타내었다.

또 본 시험에 사용한 시험편 형상은 두께 12.5 mm의 $\frac{1}{2}$ CT 시험편으로 모든 시험편에 대해서 ASTM-E647 규정⁽⁷⁾에 따라서 3 mm 피로예비균열을 도입하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용한 시험기는 Fig. 1과같이 서어보 유압 피로시험기로 이에 극저온용 저온조를 부착하여 사용하였다. 실험은 먼저 피로시험기에 시험편을 부착한 뒤, cryostat 내부원통에 액체질소를 충전시켜 약 1시간 예냉한 후 통 내부원통에 존재하는 액체질소를 제거한 후 다시 내부원통에 액체 헬륨(He), 외부원통에 액체질소를 유입시켜 시험편 온도가 4.2 K로 유지되도록 하였다. 또 액체헬륨

Table 1 Chemical composition (weight percent)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Nb	Al
0.21	0.24	24.43	0.024	0.010	1.10	4.99	0.05	0.004

Table 2 Mechanical properties

Temperature	Yielding strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%) (G.L.=50 mm)	Reduction of Area (%)
R. T.	379	734	56.0	61.9
4K	1025	1548	26.0	23.0

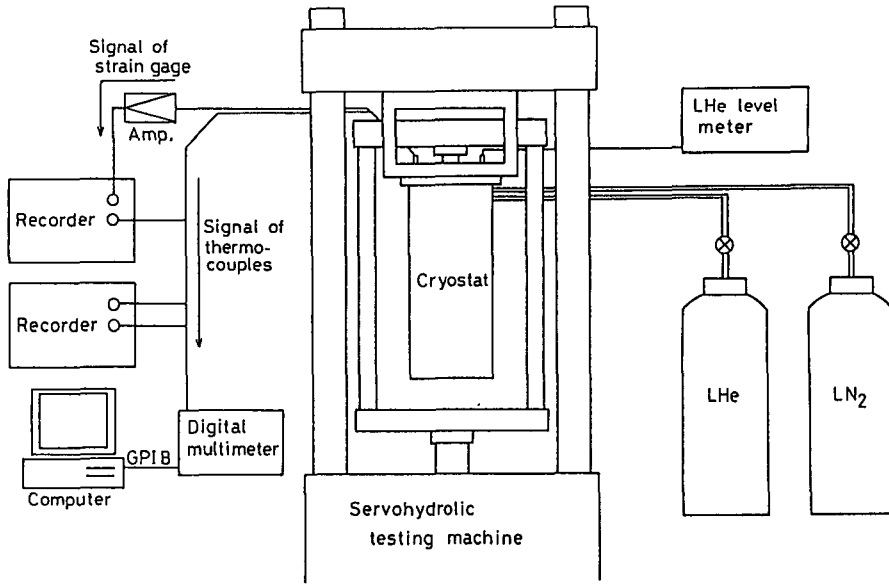


Fig. 1 Schematic diagram for fatigue test at 4.2 K

탱크에서 저온조의 액체헬륨 유입은 진공 이중구조의 이동튜브를 이용하였으며 실험중 시험편이 액체헬륨에 충분히 잠기도록 액면계(DLG-200)에 의해 저온조내의 액체헬륨 높이를 측정해, 액체헬륨 탱크의 밸브의 개폐에 따라 그 유량을 조절하였다. 한편 시험개시부터 파단까지의 걸리는 시간은 통상 1 시간 정도로 1회의 시험에 사용한 액체 헬륨량은 약 30 l이다.

2.3 균열길이 및 균열 선단에서의 온도 측정법

4.2 K에서의 시험편의 균열길이는 배면 스트레인 게이지(back face strain gage)법을 이용하여 얻어진 스트레인 게이지의 출력과 균열길이의 교정 곡선으로부터 구하였다. Fig. 2는 본 실험에서 측정된 배면 스트레인(back strain)과 균열길이와의 관계를 최소자승법에 의한 지수오차 함수로 근사시켜 나타낸 것으로, 종축은 균열진전시에 얻어진 배면 스트레인 ϵ 을 시험개시 직전에 있어서 구해진 배면 스트레인 ϵ_0 로 무차원화시킨 값을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 $a/W=0.6$ 의 범위까지는 ϵ/ϵ_0 와 a/W 사이에는 비교적 선형에 가까운 관계가 성립하지만 $a/W>0.6$ 의 범위에서는 급격한 균열진전으로 인한 시험편의 탄성 컴플라이언스(compliance)의 증가로 ϵ 은 지수함수적으로 증가하고 있으며 이 관계들로부터 4.2 K에 있어서의

균열 길이를 산출하였다.

한편 피로균열 선단근처의 온도변화를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 먼저 시험편 상단면에 깊이 20 mm, 직경 2 mm의 작은 구멍을 가공한 후 특히 균열 진전면으로부터 높이 1 mm 지점까지 도달할 수 있도록 깊이 9 mm, 직경 1 mm의 작은 구멍을 초경구 드릴에 의해 3 개를 가공하여 이 구멍에 열전대를 삽입함으로써 시험편 내부의 온도상승을 측

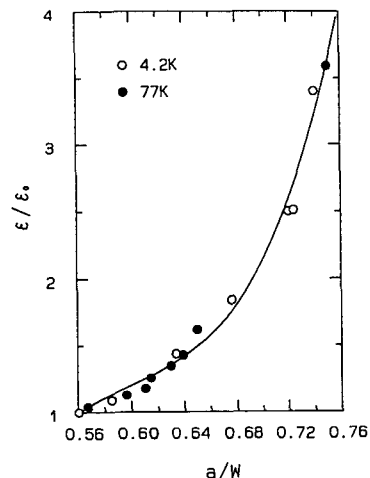


Fig. 2 Relation between back face strain and crack length

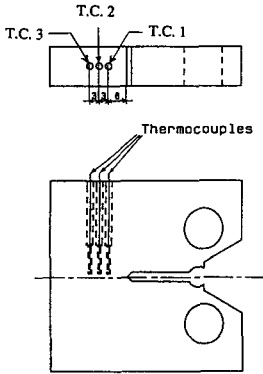


Fig. 3 The location of thermocouples

정했다. 열전대는 1K 부근에 있어서도 열기전력이 큰 직경 0.2 mm의 Au+0.07 Fe 및 크로멜선을 이용하였으며, 열전대 삽입 후 열전대를 고정해 열전도율을 좋게하기 위하여 동(copper)분말을 구멍에 충전시켰다. 열전대의 영점점은 치구 하부에 설치하여 시험편 내부의 온도상승을 주위의 액체헬륨과의 온도차로써 측정하였다. 또 열전대의 기전력의 기록에는 최대감도 $5 \mu\text{V}$ 의 X-Y 펜 기록계(GRAPHTEC社, W×2400)를 사용했으며 일부의 데이터는 디지털 Multimeter(AVDANTEST社, TR6851)와 퍼스널컴퓨터를 접속시킨 계측 시스템을 이용하여 $10^{-1} \mu\text{V}$ 정도의 기전력을 플로피 디스크에 기록하였다. 또 시험편 배면에 부착된 스트레인 게이지 신호는 열전대로부터의 기전력과 함께 X-Y기록계에 기록하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로균열 진전시의 시험편 내부의 온도상승

3.1.1 피로 균열선단의 온도상승과 응력파형 위치의 관계

피로균열 선단근처에서의 온도상승에 미치는 부하 응력파형의 영향을 규명하기 위하여 최대하중 1.5 ton, 응력비 0.1, 주파수 0.5 Hz의 삼각파형을 부하해 4.2 K에 있어서의 피로시험을 실시하였다. Fig. 4는 본 실험에서 얻어진 부하 응력파형과 피로 균열 선단근처에 있어서의 온도상승과의 관계를 나타낸 것으로 그림에서의 종축은 cryostat내의 액체헬륨 온도와 시험편 내부 온도와의 차를 온도 상승폭으로서 나타내었다. 그 결과 Fig. 4에서 알 수

있는 바와같이 부하응력 파형에 대한 온도 상승은 하중의 상승 및 강하시에 대응하는 규칙적인 온도 상승이 관찰되고 있다. 즉 피로균열 선단근처에 있어서의 온도상승은 응력파형의 최대하중 P_{max} 에 있어서 피크(peak)를 나타낸 후 저온조내의 액체헬륨 온도까지 하강한 뒤 다시 최소하중 P_{min} 에 있어서 피크를 나타내고 있다. 이 온도상승의 양상은 시험을 개시하고 나서 수백 사이클 후로부터 관찰되어졌으며 또 그 온도 상승폭은 서서히 증가하는 경향을 보였다. 한편 본 실험의 비교적 초기 단계에서 얻어진 온도 상승은 1K 이하의 매우 미소한 상승도를 보였다. 그러나 본 실험에 이용한 열전대의 4K 부근에 있어서의 열기전력은 $13 \mu\text{V}/\text{K}$ 이고 기전력을 기록한 디지털 멀티미터(multimeter)의 유효 분해능($10^{-1} \mu\text{V}$)을 생각하면 1K이하의 온도 상승에 있어서도 정확한 온도차가 측정 되어진 것으로 생각되어 진다.

3.1.2 피로균열 진전과 시험편 내부의 온도상승

앞의 Fig. 3에서 열전대는 시험편의 예비 균열 선단으로부터 각각 0, 3, 6 mm의 위치에 삽입되어졌으나 실질적으로 피로균열 선단상에 위치한 0 mm 위치의 열전대로부터는 명확한 온도상승은 관측되어지지 않았으며, 이는 온도상승의 주요 원(source)의 하나인 소성변형 기구가 피로균열 선단에서 일어나기 때문으로 생각되어 진다. 따라서 Fig. 5(a), (b)는 예비 균열로부터의 거리가 각각 3, 6 mm의 위치에 삽입된 각각의 열전대에 의한 각 사이클의 최대 및 최소하중시에 측정되어진 온도 상승폭과 반복 사이클수와의 관계를 나타내고 있다. 이 결과에서 알수 있는 바와 같이 하중의 반복 사이클수가 작을 때는 최대 및 최소하중시의 온도상승은 거의 동일하지만 점차적으로 반복 사이클수가 증가함에 따라서 최대하중시의 온도 상승폭이 증가하고 있다. 또한 이 경향은 측정위치가 균열선

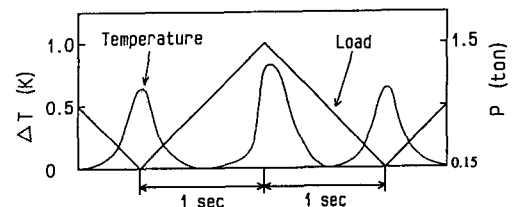


Fig. 4 Relation between waveform and temperature rising at near fatigue crack tip

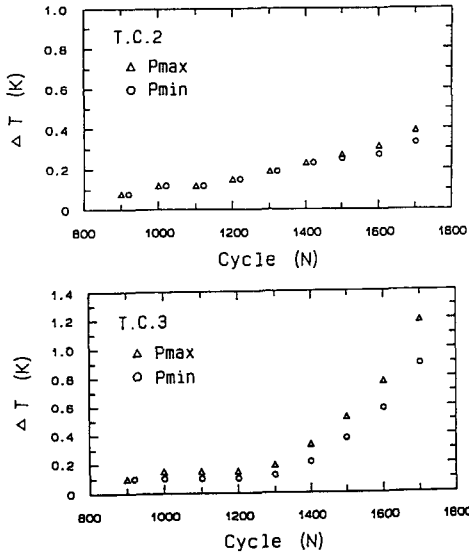


Fig. 5 Relation between number of cycle and temperature rising at different location of thermocouple

단에 가까운 열전대에 있어서 현저하게 나타나고 있으며 또 시험편이 파단되기 직전의 수십 사이클에 있어서는 초기 단계와 비교해 급격한 돌발적인 온도상승도 관찰되고 있다.

3.1.3 규칙적인 온도상승을 일으키는 발생원의 위치

규칙적인 온도상승을 야기시키는 발생원의 위치를 명확히 하기 위하여 앞의 실험에 의해 측정되어진 온도 상승폭과 측정에 이용되어진 열전대의 균열선단으로부터의 거리 l 과의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 $l > 0$ 은 균열 선단부가 열전대 위치까지 미도달했을 경우의 열전대로부터 균열 선단까지의 거리를 나타내고 있으며 또 $l < 0$ 에 있어서는 균열 선단이 이미 열전대의 위치까지 도달해 열전대로부터 떨어진 거리를 의미하고 있다. 여기서 $l = 3 \text{ mm}$ 부근에 축을 잡아 동일 반복 사이클수에 대한 온도 상승폭을 연결해 보면 축을 중심으로 동일 사이클수에서의 온도 상승폭이 대칭으로 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 즉 발열원은 균열 선단부로부터 3 mm 정도 떨어진 한곳에 존재하고 있는 것을 나타내고 있다. 그러나 일반적으로 피로 균열 선단은 시험편의 두께방향의 중앙 및 표면에서 각각 다르기 때문에 열전대가 삽입된 시험편두

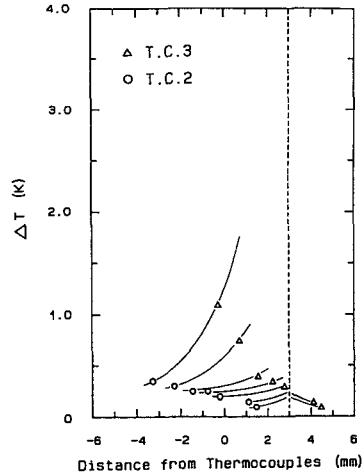


Fig. 6 The variation of temperature rising with the distance from thermocouples

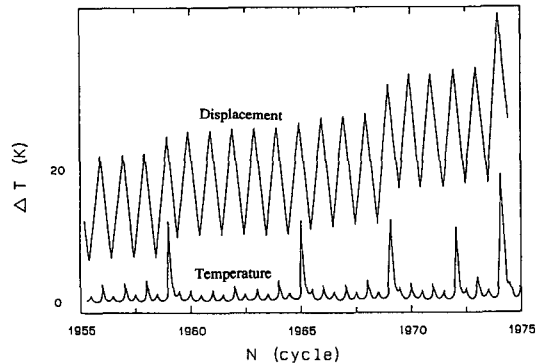


Fig. 7 Relation between back face strain and temperature rising

께 방향 중심에 있어서의 균열길이는 시험편 표면의 균열길이보다 길다. 따라서 이 점을 고려하면 발열원의 실질적인 위치는 균열 선단 가까이 응력집중이 생기는 부분에 존재하는 것으로 예상되진다.

3.1.4 돌발적인 온도상승의 발열 메카니즘

4.2 K에서의 피로시험에서 얻어진 파단전 45 cycle에 대한 시험편의 배면 변위와 온도상승과의 관계는 Fig. 7에 나타내었다. 이 결과에서 보여주는 바와같이 돌발적인 온도상승은 대부분의 경우 배면변위의 진폭이 윗쪽으로 벗어날 때 관찰되어지고 있고, 이것은 일방향(monotonic) 변형에 의해 시험편내에 커다란 잔류변위가 발생하였다는 것을 의미하고 있다. 또 대규모 소성변형이 생기는 초기

단계에서는 몇차례 응력파형이 반복되어진 후에 배면변위가 윗쪽으로 벗어나는 현상을 보이고 있다. 따라서 돌발적인 온도상승은 시험편의 대규모 소성변형에 동반하여 생기는 것으로 생각되어지며 또 그 소성변형은 하중의 반복에 의해 내부손상이 점차적으로 축적되어져 일정 임계치에 달했을때 생기는 것으로 여겨진다. 이 때문에 반복하중하에 있어서의 돌발적인 온도상승을 동반하는 소성변형 모델로서는 각 하중 사이클에 의한 재료 내부에 있어서의 전위(dislocation)의 미끄럼(slip)현상으로 인한 내부마찰 및 가공경화(work hardening)현상과 관계되는 전위의 축적(pile-up) 및 해방(release)에 의한 미끄럼(slip) 발생기구가 지배적⁽⁸⁾이라고 생각되어진다.

3.2 응력파형과 온도상승의 관계

3.2.1 온도상승에 대한 Fast-Slow 파형의 영향

Fig. 8(a), (b), (c)는 온도 4.2 K, 응력주파수 $f = 0.5$ Hz, 최대하중 $P_{max} = 1.5$ ton, 응력비 $R = 0.1$ 의 조건하에서 시험편의 온도 상승에 미치는 하중속도의 영향을 명확히 하기 위하여 동일 주파수에 있어서의 온도 상승에 대한 하중 상승시간(t_r) 및 하강시간(t_b)의 효과를 응력파형과 온도 상승폭과의 관계로서 나타낸 것이다. 한편 온도상승의 측정은 예 피로균열선단으로부터 6 mm 떨어진 지점에 위치에 열전대(T.C=3)에 의해서 행하여졌고, 온도측정시의 균열길이는 32.15~32.67 mm였으며 또 이때 균열 진전은 거의 관찰되지 않았다.

Fig. 8(a)의 $t_r = 1$ (sec), $t_b = 1$ (sec)의 응력 파형에 있어서는 최대부하시 및 최소부하시에 있어서 거의 같은 값의 0.2~0.3 K의 작은 온도상승이 관찰되지만 Fig. 8(b)의 $t_r = 0.5$ (sec), $t_b = 1.5$ (sec)의 응력파형에 있어서는 최소부하시에 대응하는 온도 피-크는 최대부하시의 약 50% 정도이고 최대부하시에는 0.4~0.6 K의 온도상승이 관찰되었다.

또 Fig. 8(c)의 $t_r = 0.2$ (sec), $t_b = 1.8$ (sec)의 응력파형에 있어서는 최소부하시의 온도상승의 피-크는 명확하지 않고 최대부하시에 0.5~0.7 K의 온도상승이 관찰되고 있다. 이와같은 결과로부터 알수있는 바와같이 Fast-Slow 파형에 있어서 비교적 큰 온도상승이 관찰되어진 이유로서는 주로 다음과 같은 세가지 원인이 생각되어진다. 먼저 하중부하속도를 증가시킴으로 인해 하중상승시에 생기는

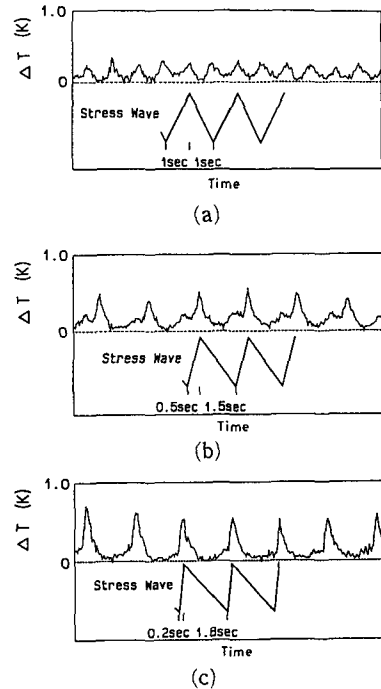


Fig. 8 Effect of loading waveforms on temperature rising

는 발열량의 증가에 의한 것, 둘째 앞의 Fig. 4에서 알수있는 바와같이 하중 상승시에 생기는 온도 상승폭은 서서히 그 크기가 증가해 최대부하시에 피-크가 되기때문에 하중 상승시간이 짧음으로 인해 그 사이에 생긴 열이 환경에 의해 충분히 냉각되어지지 않기 때문에, 세째 부하하중이 최소에서 최대로 되기까지 요하는 시간이 짧기 때문에 응력 상승 및 하강시에 생기는 온도상승이 중첩해서 나타나는 것에 의한 것으로 생각되어진다.

3.2.2 온도상승에 미치는 응력주파수의 영향

Fig. 9(a), (b)는 4.2 K에서 $P_{max} = 1.5$ ton, $R = 0.1$ 로 일정하게 유지하고 주파수를 1 Hz, 0.5 Hz로 변화시켰을 경우에 그때 구해진 응력파형과 온도상승 폭과의 관계를 나타내고 있다. 한편 온도 측정시의 균열길이는 32.79 mm 이고 온도측정은 이 균열선단으로부터 약 1.21 mm 전방에 위치하는 열전대에 의해 행하였다. 그 결과 주파수가 0.5 Hz의 경우, 온도는 최대하중 P_{max} 및 최소하중 P_{min} 에 있어서 피-크를 맞은 후 주위의 액체헬륨 온도까지 하강하고 있다. 반면에 주파수 1 Hz의 경우에는 0.5 Hz의 경우에 비해 온도상승의 피-크가

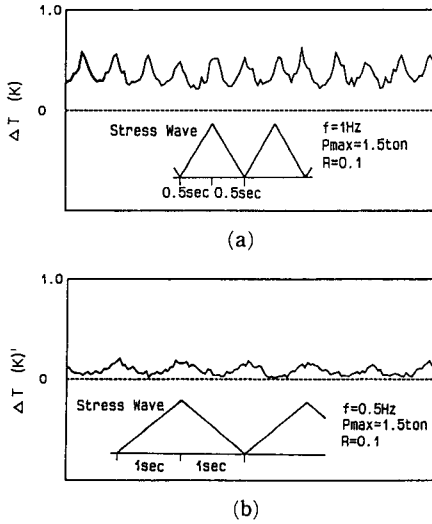


Fig. 9 Effect of frequency on temperature rising under the same waveform

높고 온도 상승폭은 0.27 K 이하로는 하강하지 않고 있다.

이것은 주파수가 1 Hz의 경우 0.5 Hz의 경우보다 하중 부하속도가 크기 때문에 앞의 Fast-Slow 파형과 동일하게 하중상승 시간이 짧기 때문에 생기는 열이 환경에 의해 충분히 냉각되어지지 않음으로 인해 온도 상승폭이 증가한 것으로 생각되어진다.

3.2.3 균열진전거동과 온도 상승폭의 관계

Fig. 10은 4.2 K에서 $P_{max}=1.5 \text{ ton}$, $f=0.5 \text{ Hz}$ 로 일정하게 하고 응력비 R 을 0.1, 0.3으로 변화시켰을 때에 균열 진전 속도 da/dN 와 ΔK 의 관계를 나타내고 있다. $R=0.3$ 인 경우, $P\Delta K > 65 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 인 영역에서는 $R=0.1$ 경우와는 달리 균열 진전이 불안정한 제 III 영역에 해당하고 있다. 따라서 위와 같이 균열 진전 거동이 다른 경우에 균열 선단 근처에서의 온도상승을 보다 명확히 하기 위해, Fig. 11(a), (b)에 응력확대 계수폭 ΔK 및 온도 상승폭과의 관계를 나타내었다. 그림에서 원형표시(○)는 규칙적인 온도상승, 삼각형(Δ)표시는 돌발적인 온도상승을 나타내고 있으며 또 온도 측정시의 열전대의 거리도 동시에 나타내었다. $\Delta K > 70 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$ 의 영역에서 Fig. 11(a)의 경우 규칙적인 온도 상승폭은 급격히 증가하고 있고 또 돌발적인 온도상승도 관찰되고 있다. 또 균열 선단으

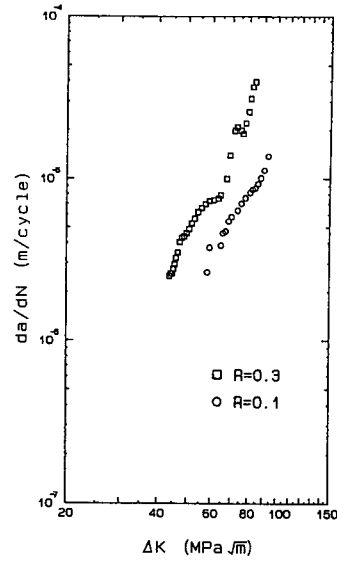


Fig. 10 Effect of stress ratio on crack growth rate

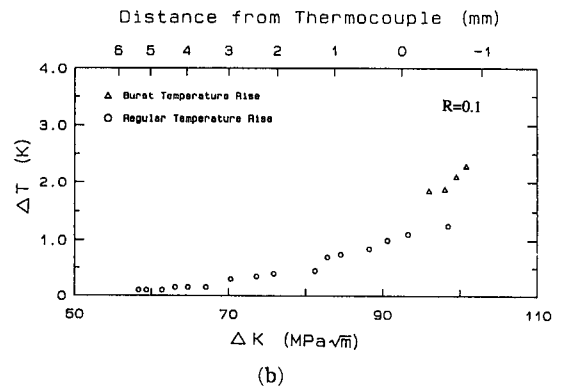
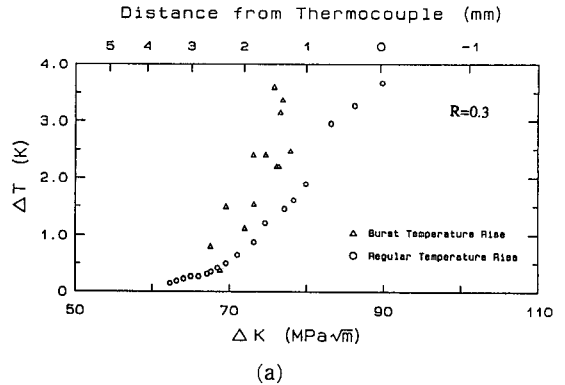


Fig. 11 Relation between stress intensity factor ΔK and temperature rising at different stress ratio

로 부터 열전대까지의 거리가 거의 0 mm에 가까운 $\Delta K \approx 90 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$ 부근의 온도 상승폭을 비교하면 $R=0.3$ 인 Fig. 11(a)의 경우가 규칙적인 온도 상승폭은 3배 정도 크게 관찰되고 있다. 또 Fig. 10에서 나타난 바와 같이 Fig. 11(a)와 (b)는 균열의 진전 기구가 다르기 때문에 Fig. 11(b)에 비해 Fig. 11(a)에서는 작은 ΔK 영역에서 커다란 온도 상승폭이 관찰되어지고 있다. 따라서 균열 선단 가까이에서의 온도상승은 하중부하속도의 증가에 의한 것만이 아니라 균열 진전 기구의 형태에 의해서도 영향을 받음을 알 수 있다.

I. 결 론

극저온 환경에 있어서 피로 균열선단의 온도 상승 및 이에 미치는 응력 파형의 영향을 규명하기 위하여 4.2 K에서 고 망간강을 이용하여 피로 시험을 행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 균열선단 근방에서의 온도상승은 실험개시 직후로부터 안정하게 온도상승 폭을 넓혀가는 규칙적인 온도상승과 불안정 균열 성장 개시와 동시에 나타나는 돌발적인 온도상승의 두가지 형태의 온도 상승이 관찰되었다.

(2) 규칙적인 온도상승의 피크는 최대부하 및 최소부하시에 대응하여 나타나고 반복 하중수가 증가함에 따라 최대부하시의 온도 상승폭이 최소부하시의 상승폭에 비해 증가하고 있다.

(3) 돌발적인 온도상승은 반복 응력 파형의 최대 부하시에 시험편이 대규모 소성변형을 일으켰을 때 생기고 그 발생 초기 단계에 있어서는 수차례 응력 파형이 반복되어질 때마다 관찰되어졌다. 따라서 돌발적인 온도상승을 일으키는 균열 선단에서의 미시적 기구 모델로서는 균열 선단에 있어서의 전위의 축적 및 그 해방과정에 의해 생기는 미끄럼 (slip) 기구가 지배적인 것으로 생각되어진다.

(4) 규칙적인 온도상승의 발열원은 균열 선단에 위치하고 그 발열 기구는 주로 균열 선단에서 행해진 소성일(plastic work)에 기인된다.

(5) 동일 응력 주파수에 있어서 부하 하중파형을 변화시켰을 경우 하중상승시간이 짧아질수록 온도 상승이 증가하였다.

참고문헌

- (1) Morris, J. W. Jr., 1986, "Structural Alloys for High Field Superconducting Magnets," *Advances in Cryogenic Engineering Materials*, Vol. 32, pp. 1~22.
- (2) Shibata, K., Sakamoto, H., Fujita, K. and Fujita, T., 1988, "Computer Simulation of Serration near Liquid Helium Temperatures," *Advances in Cryogenic Engineering Materials*, Vol. 34, pp. 217~223.
- (3) Shibata, K., Sakamoto, S., Fujita, K. and Fujita, T., 1988, "Effects of Testing Conditions on Serrated Deformation of Austenitic Steels at Very Low Temperatures," *ISIJ*, No. 5, pp. 143~150. (in Japanese)
- (4) Lee, J. H., Maekawa, I., Nishida, S., Kim G. N. 1989, "Influences on Characteristics of Fatigue Strength of High Manganese Steel," *Journal of the Society of Materials, Japan*, Vol. 38, No. 433, pp. 1176~1181.
- (5) Yokobori, T., Maekawa, I., Tanabe, Y., Jin, Z. and Nishida, S., 1985, "Fatigue Crack Propagation of 25Mn-5Cr-1Ni Austenitic Steel at Low Temperature," *ASTM STP* 857, pp. 121~139.
- (6) Maekawa, I., Tanabe, Y., Lee, J. H. and Nishida, S., 1987, "The Influence of Non-Metallic Inclusion on Fracture Behaviors of 25Mn-5Cr-1Ni Austenitic Steel," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 28, No. 5, pp. 577~587.
- (7) ASTM Standard Designation, E647-78T, 1981, "Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10^{-8} m/Cycle."
- (8) Maekawa, I., Shibata, H., Lee, J. H., Shimoda K. and Nishida, S., 1990, "Effects of Loading Wave Form and Temperature on Fatigue Strength of High Manganese Steel, Fatigue '90," Hawaii, MCEP Ltd., U. K. Vol. III, pp. 1747~1752.