

미소원공결함을 갖는 자동차 전륜구동축재의 온도변화에 따른 피로크랙전파거동에 관한 연구

A Study on the Fatigue Crack Propagation Behavior in F.F. Shaft Materials of Vehicle with Small Circular Defect at Variable Temperature

이 상 열*, 이 동 길**, 정 재 강***
S. R. Lee, D. G. Lee, J. K. Chung

ABSTRACT

In this study, the rotary bending fatigue test was carried out with two kinds of material, S43C and S50C, using in the Front engine and Front drive wheels(F.F.) of vehicle. The one part of specimens was heated by high frequency induction method(about 1mm depth and H_RC 56~60) and tested environment temperature were -30°C, +25°C and +80°C in order to look over the influence of the heat treatment and the temperatures.

In the experimented result at +25°C and +80°C, the fatigue life of non-heated specimens were decreased about 35%, but that of heated specimens were decreased about only 5% at +80°C more than at 25°C. And in the experiment result at -30°C and +25°C, the non-heated and heated specimens were about 110%, 120% higher fatigue life at -30°C than at the +25°C each other. On the other hand, the fatigue crack propagation rate of S50C was higher than that of S43C.

주요기술용어 : F.F. Shaft(Front Engine and Front Drive Shaft, 전륜구동축), Crack Length(크랙 길이), Fatigue Life(피로수명), Cycle Ratio(피로파단수명비), Fatigue Crack Propagation Rate(피로크랙전파속도)

1. 서 론

최근 자동차의 경량화 및 고성능화와 동력의 효율화를 얻기 위해 전륜축을 이용한 전륜구동방식

이 많이 채택되어지고 있다. 전륜구동축에 의해 구동되는 자동차의 구동축은 엔진의 회전력을 바퀴에 직접 전달하는 기능을 수행하는 부품으로서 주행중 사용조건에 따라 축부재에 다양한 부하변동과 함께 주변환경의 영향을 받고 있다. 특히 축부재에 힘이 발생하면 심한 소음 및 진동발생으로 차체의 흔들림이 크게 되고, 또한 Toe-in(전차륜 정

* 정회원, 목포과학대학
** 조선대학교 대학원
*** 조선대학교 기계공학부

렬)이 변하여 다이어의 편마모를 가져오거나 핸들의 스플릿현상으로 인하여 조향성 불량 등을 야기시킬 수 있다.

이렇듯 사용중 발생 가능한 요인 외에도 재료가 갖는 개재물이나 기공들과 같은 자연결합과 설계시 제작된 의도적인 결합인 나사구멍, 오일구멍 등에서 균열이 성장할 때 이들 결합은 그 주위에 응력이 집중되어 크랙 발생원이¹⁾ 되며, 구조물과 각종 기기에 발생하는 파괴손상의 대부분이 그 부재의 표면과 접합부에 존재 가능한 형상의 불연속부 또는 작은 결함을 기점으로 시작한다.²⁾

이들 결합은 어느 한계 이하의 크기에서는 예기치 못한 파괴사고를 일으키지 않지만, 장시간 사용함에 따라 반복하중을 받으면 피로균열이 발생하고 서서히 성장하여 어떤 한계길이에 달하면 구조물 및 기기에 치명적인 파괴를 불러올 수 있다.

실제 중요한 구조물인 원자로, 압력탱크, 고압배관계, 차축 및 항공기 등에서의 파괴, 파손의 원인이 부재 표면에 존재 가능한 작은 표면 결함에서 발생한 미소 표면균열의 성장에 의한 경우가 많은 것으로 분석^{3,4)}되고 있다. 그러나 자연결합 또는 비금속 개재물은 그 크기나 형상이 다양하며 그에 따라 피로파괴에 미치는 영향은 일정하지 않으므로 자연결합을 대상으로 피로특성을 규명하는 어려움이 따르며, 결과에 대한 실험적 재현성이 어렵고 이들의 크기와 형상을 야금학적으로 제어하는 것은 기술상의 한계가 있다. 이러한 이유로 인하여 자연결합 대신 인공결합을 이용하여 미소결합재의 피로특성을 규명하는 것이 필요하다. 더욱이 내수 및 수출 자동차의 사용환경은 계절에 따라 주변의 온도가 크게 달라지므로 안전성을 위해 구동축재의 정확한 피로한도의 선정과 온도변화에 따른 피로크랙 전파특성 및 피로수명도 고려되어야 한다.

그러나 지금까지 회전굽힘피로시험기를 이용하여 원공결합의 크기나 형태에 관한 연구^{5,6)}, 고온^{7,8)} 및 부식 피로시험⁹⁾ 등은 지금까지 상당히 많은 연구가 활발하게 이루어진 상태이나 저온 피로시험은 아직 미흡한 실정이다.

따라서 논 연구에서는 실제 자동차가 운행되고 있는 온도범위에 해당하는 상·고·저온시험(+80

~-30°C)을 모두 실시하여 각각의 온도조건에 따른 피로수명 및 피로크랙전파특성을 고찰하고자 하였다.

2. 시험재료 및 시험편

본 연구에 사용한 재료는 현재 국내에서 사용하고 있는 자동차 전륜구동용 축재로서 크게 A社의 Cr이 첨가된 S43C와 B社의 Mn이 첨가된 S50C이다.

이들 재료의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다.

Table 1 Chemical composition of specimens (wt. %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr
S43C	0.43	0.19	0.78	0.02	0.01	0.16	0.24
S50C	0.49	0.23	0.95	0.04	0.05	0.10	0.01

Table 2 Mechanical properties of specimen

Material	Yield Streng. (MPa)	Tensile Streng. (MPa)	Elong. (%)	Reduc. of area (%)	Young's Modulus $\times 10^3$ (MPa)
S43C	375.7	647.5	35.7	25.6	8.930
S50C	567.2	680.9	20.7	10.5	9.065

본 실험에 사용한 시험편의 제작은 CNC선반으로 가공한 후 크랙진전거동의 용이한 관찰을 위해 연마지 #2000까지 표면연마 후 0.3 μ 입자크기의 산화알루미나(Al_2O_3)를 사용하여 다시 연마하였다. 더욱 용이한 크랙관찰 및 표면크랙 사진촬영을 위해 12V, 20A에서 약 20초간 전해연마를 실시하였으며, 이때 사용된 전해액의 성분은 Acetic acid (756ml) + Perchloric acid(185ml) + Water(50ml)이다.

미소원공결합은 다이얼게이지가 부착된 소형드릴링머신으로 직경과 깊이를 각각 0.3mm씩 가공하였다. 이때 더욱 정밀한 원공가공을 위해 광학현미경을 이용하여 정확도를 확인, 선별하였다.

西谷¹⁰⁾은 표면에 존재하는 비관통 미소원공결합에 대한 연구에서 시험편의 자름에 대한 치수효과

는 지름이 $5 \leq D \leq 10\text{mm}$ 인 범위에서는 거의 영향이 없다고 하였다. 따라서 본 실험에 사용된 시험편의 지름은 8mm이므로 지름에 대한 치수효과는 없다고 생각된다.

다음으로 실제 사용되고 있는 자동차의 전륜구동축과 유사한 조건을 얻기 위해 고주파열처리(출력: 64kW, 가열온도: 900°C, 이송속도: 50mm/sec)를 축의 직경과 열처리 깊이 비가 실제와 유사하게 실시하여 표면깊이 약 1.0~1.1mm가 되게 얻었으며, 경도는 실제 자동차 축재의 경도값(HRC 56~60)과 동일하게 준비하였다. 시험편의 모양 및 치수는 Fig.1과 같고, 열처리된 시험편의 경도값 분포는 Fig.2와 같다.

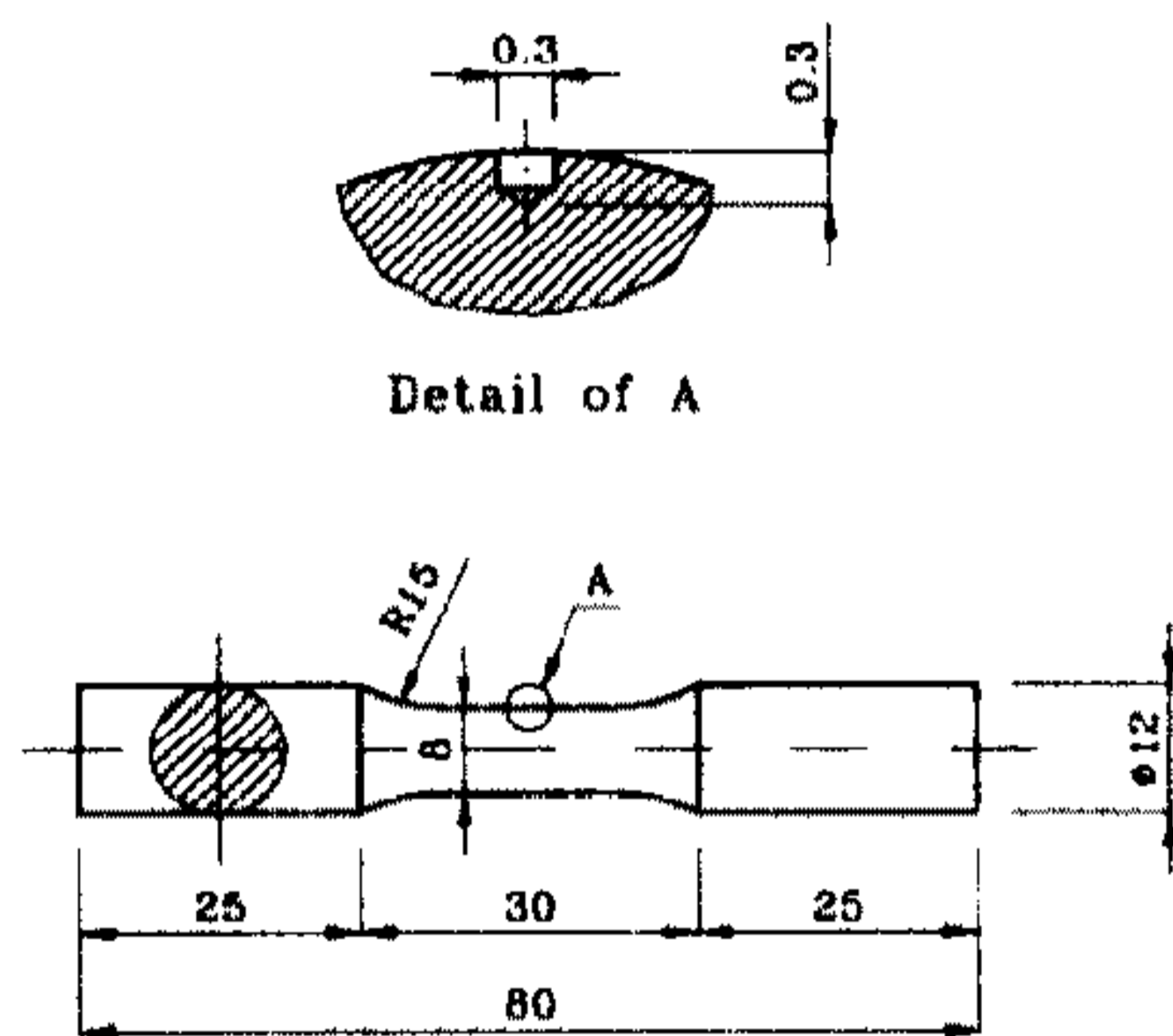


Fig.1 Geometry of fatigue test specimen

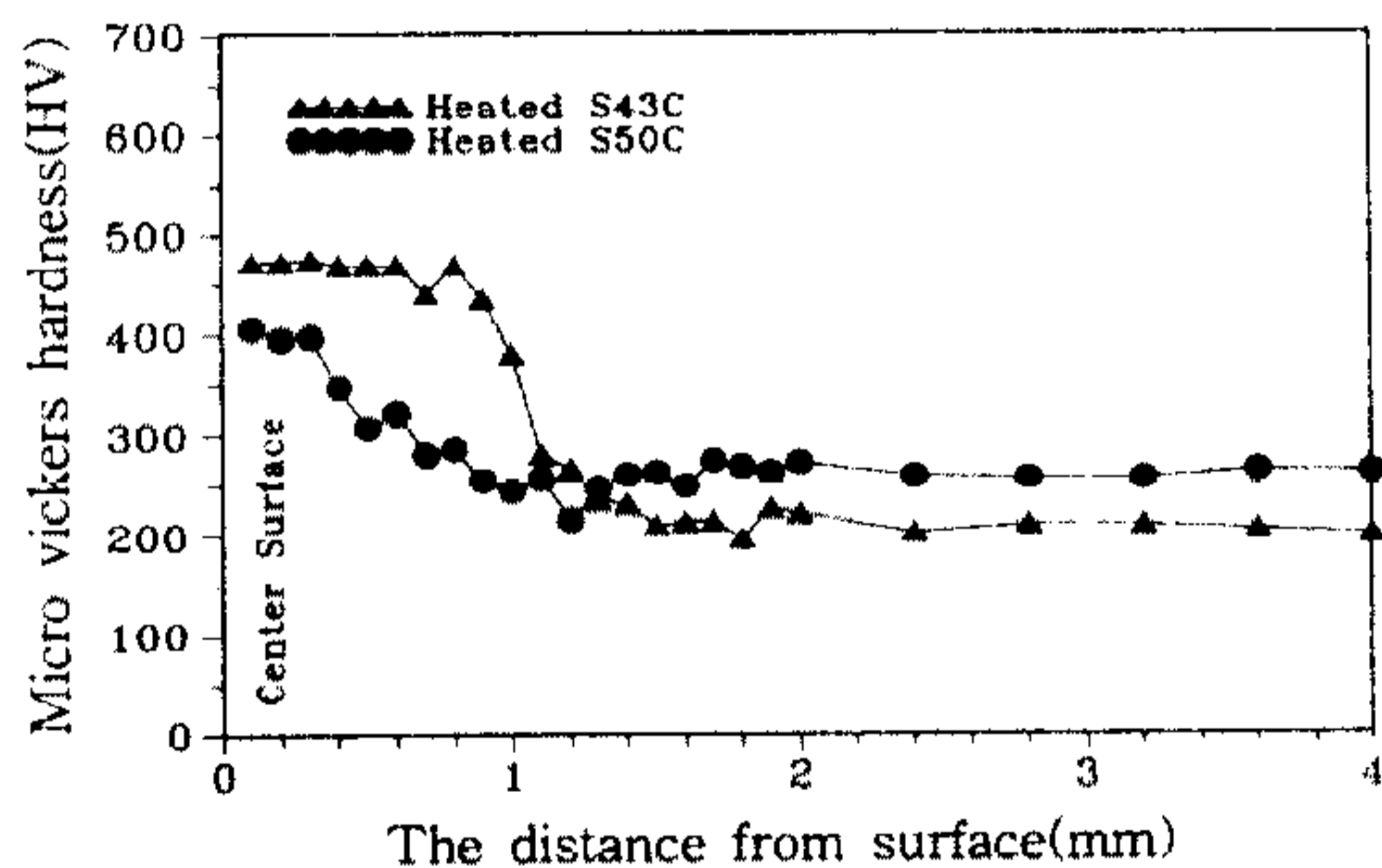


Fig.2 The hardness gradient distribution

3. 시험방법

본 연구에 사용된 시험기는 오노형 회전굽힘피로시험기(Ono's type rotary bending fatigue testing Machine, Shimadzu, Model H-7)로서 최대용량은 10kgf·m, 3400rpm이다.

시험조건은 일반적인 온도에 해당하는 25°C를 기준으로 하여 하절기를 고려한 +80°C, 동절기를 고려한 -30°C의 3가지로 대별하여 각 온도에서의 피로크랙 발생 및 전파거동을 비교·검토하였다.

시험용력의 결정에 있어서 각각의 결함크기에 대하여 서로 다른 용력을 적용하면 결함간의 절대적인 비교평가를 할 수 없다. 따라서 본 실험에서는 동일한 용력하에서 결함크기에 따른 피로크랙 전파거동을 살펴보기 위해 평활재에 대한 피로시험을 25°C에서 용력을 단계적으로 낮추어 가며 수행한 결과 비열처리재 S43C와 S50C의 피로한도는 각각 98.1MPa, 107.9MPa이었으나, 열처리 후에는 147.1MPa, 156.9MPa로서 고주파열처리에 의하여 두 재료 모두 약 49MPa씩 증가하였다. 이때 피로한도는 $N=1 \times 10^7$ Cycle까지 시험편이 파단되지 않는 용력으로 하였다.

Fig.3은 피로한도시험으로부터 얻어진 결과를 나타낸 S-N선도로서, 비열처리재의 평활재와 노치재는 거의 유사한 기울기를 나타내고 있으나 열처리 후에는 노치재의 기울기가 크게 증가하였다.

본 실험에 있어서 노치재의 피로시험용력은 평활재에 대한 피로한도의 120%로 결정하였다.

Kunio¹¹⁾는 크랙길이 측정을 위한 시험기의 정지는 약 10분 이하인 것이 바람직하다고 하였으며, 房¹²⁾은 큰 변동을 동반하지 않는 회전굽힘시험의 경우 상온의 낮은 용력에서는 약 12시간, 높은 용력에서는 약 70시간마다 시험기 정지가 피로수명에 큰 영향이 없다고 하였다. 따라서 본 실험에서는 2,000~4,000cycles 마다 시험기 정지 후

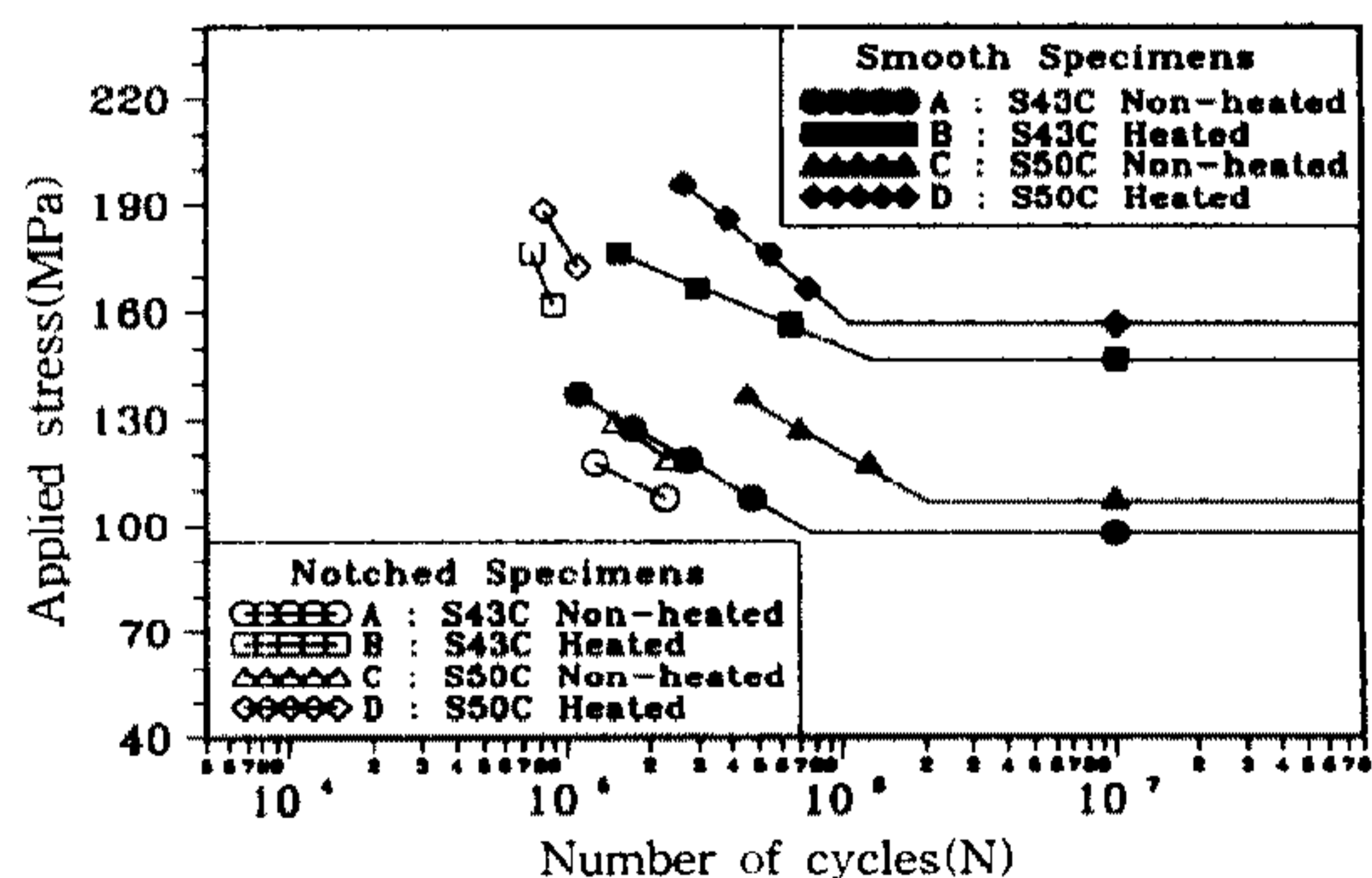
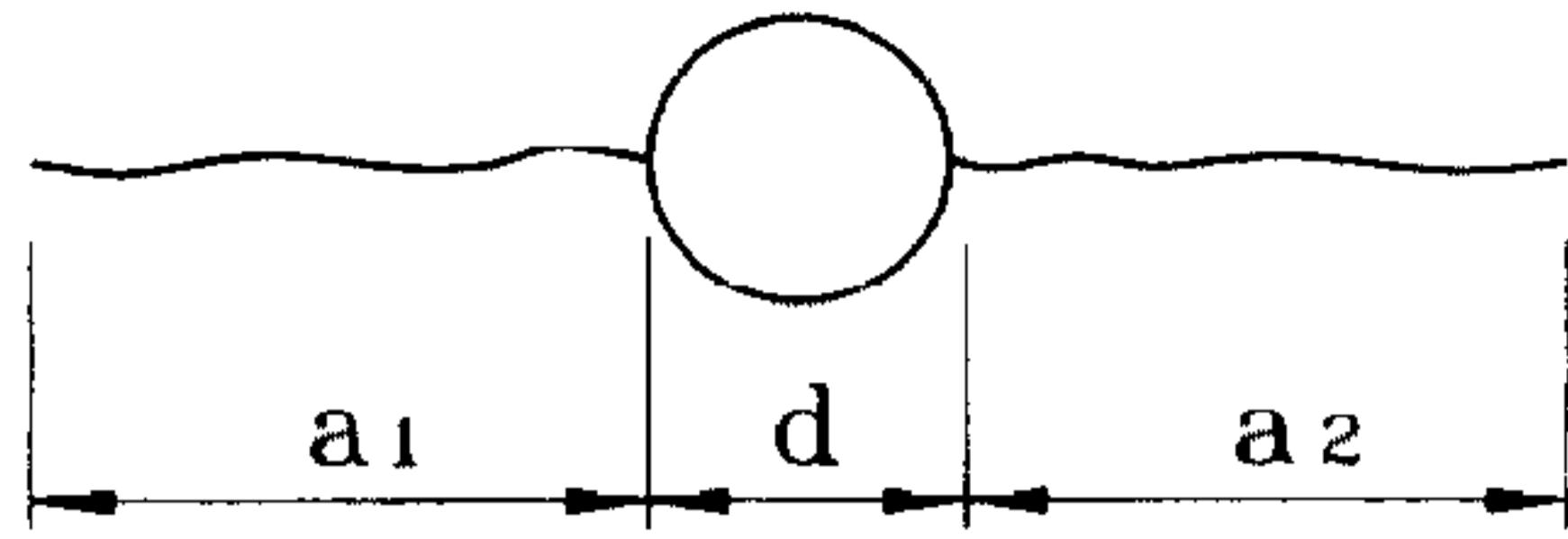
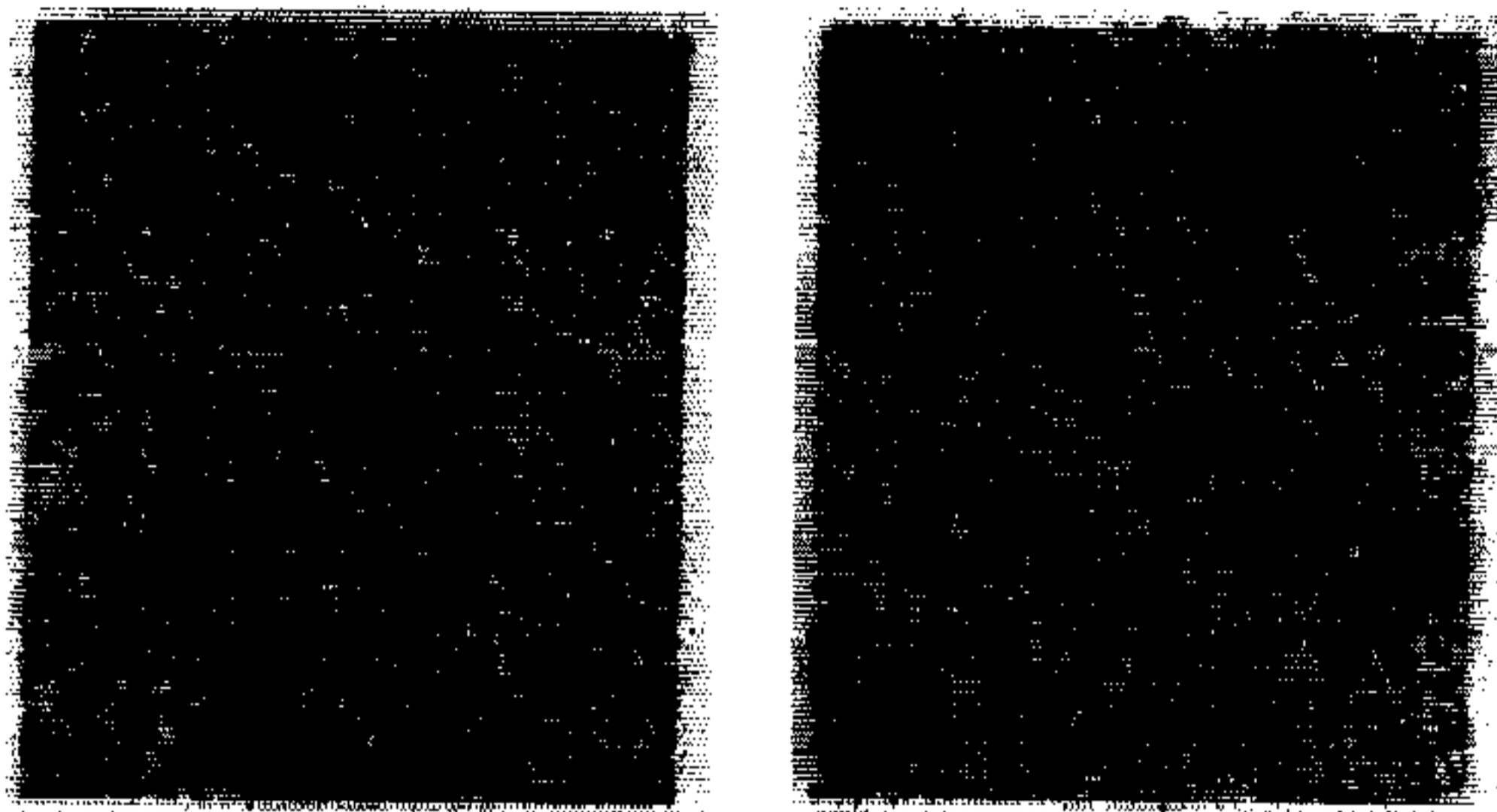


Fig.3 S-N Diagram



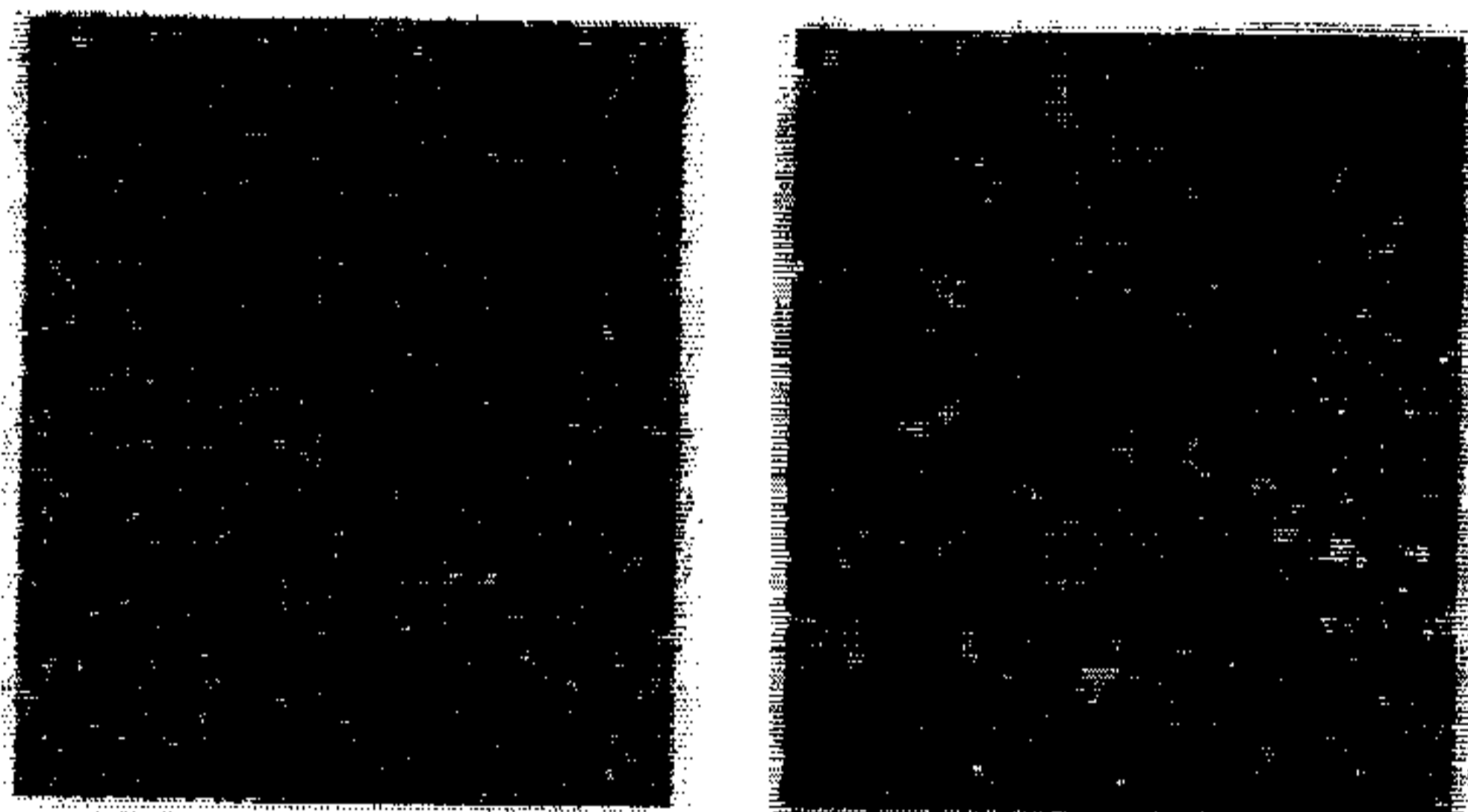
Crack length $2a = a_1 + a_2 + d$

Fig.4 Crack length measurement



S43C Non-heated

S43C Heated



S50C Non-heated

S50C Heated

Photo.1 Micro structure obtained by etching

크랙을 측정하였으며, 소요된 시간은 매 회 1분이내였으므로 크랙측정을 위한 시험기 정지는 피로수명에 큰 영향이 없었다고 생각된다. 그리고 표면크랙길이 측정은 레프리카법 및 이동현미경을 설치한 후 집안이동측미계(OSM)을 부착하여 측정 관찰하였으며, 이때 피로크랙길이는 크랙이 노치 효과를 무시할 수 있을 정도로 전파한 후에는 노치부도 크랙의 일부로 간주되기 때문에 Fig.4와 같이 원공을 포함한 표면상의 전 크랙길이를 $2a$ 로 하였다.

또한 피로크랙진전속도(da/dN)는 7점나향식근사법(seven point incremental method)¹³⁾을 이용하여 구하였다.

Photo.1은 본 실험에 사용된 재료에 대한 금속

조직사진이다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유한요소 해석

본 연구에서는 미소 원공결함이 있는 회전굽힘 피로시험편의 원공결함 주변의 응력분포를 고찰하기 위하여 유한요소법을 사용하였다. 먼저 미소 원공결함이 있는 시험편의 1/4을 3차원으로 모델링한 다음 메시를 하는 단계에서 해석의 정확도를 높이고자 미소 원공결함 부분을 보다 작은 요소로 분할하여 경계조건 및 자중을 고려한 하중조건을 설정하였다.

본 연구에 사용된 유한요소 해석 프로그램은 Ansys(Swanson Analysis System, Inc. U.S.A. Model 5.3)이며, 해석에 사용된 요소는 3차원 8절점등방체요소를 사용하였고 요소의 수는 16,390개, 절점의 수는 18,384개로 모델링되었다.

Fig.5는 본 연구에서 사용한 시험편의 유한요소 해석을 위한 경계조건과 하중조건 및 미소 원공결함을 확대하여 보여주고 있는 그림이다. 이 때, 하

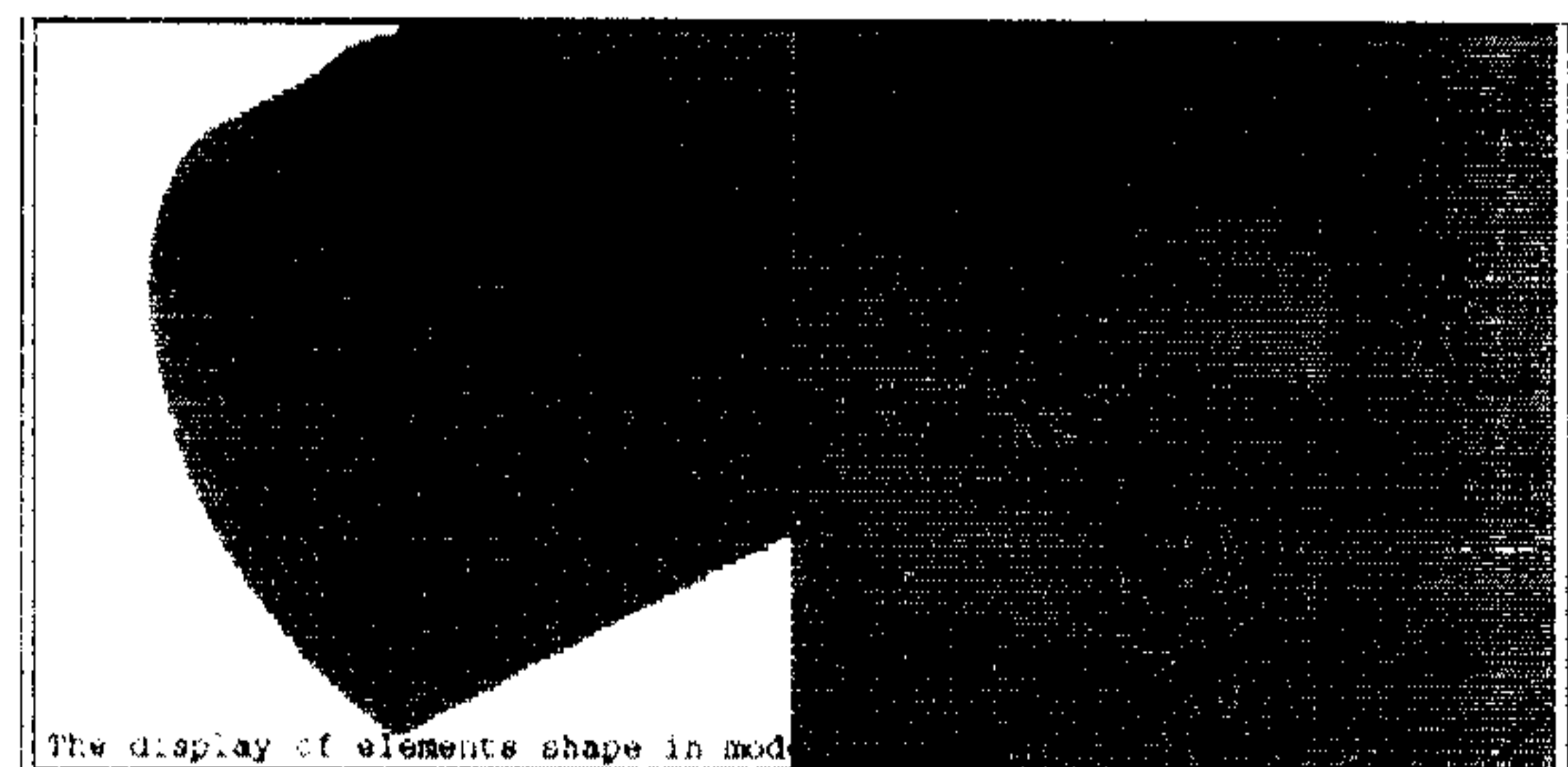
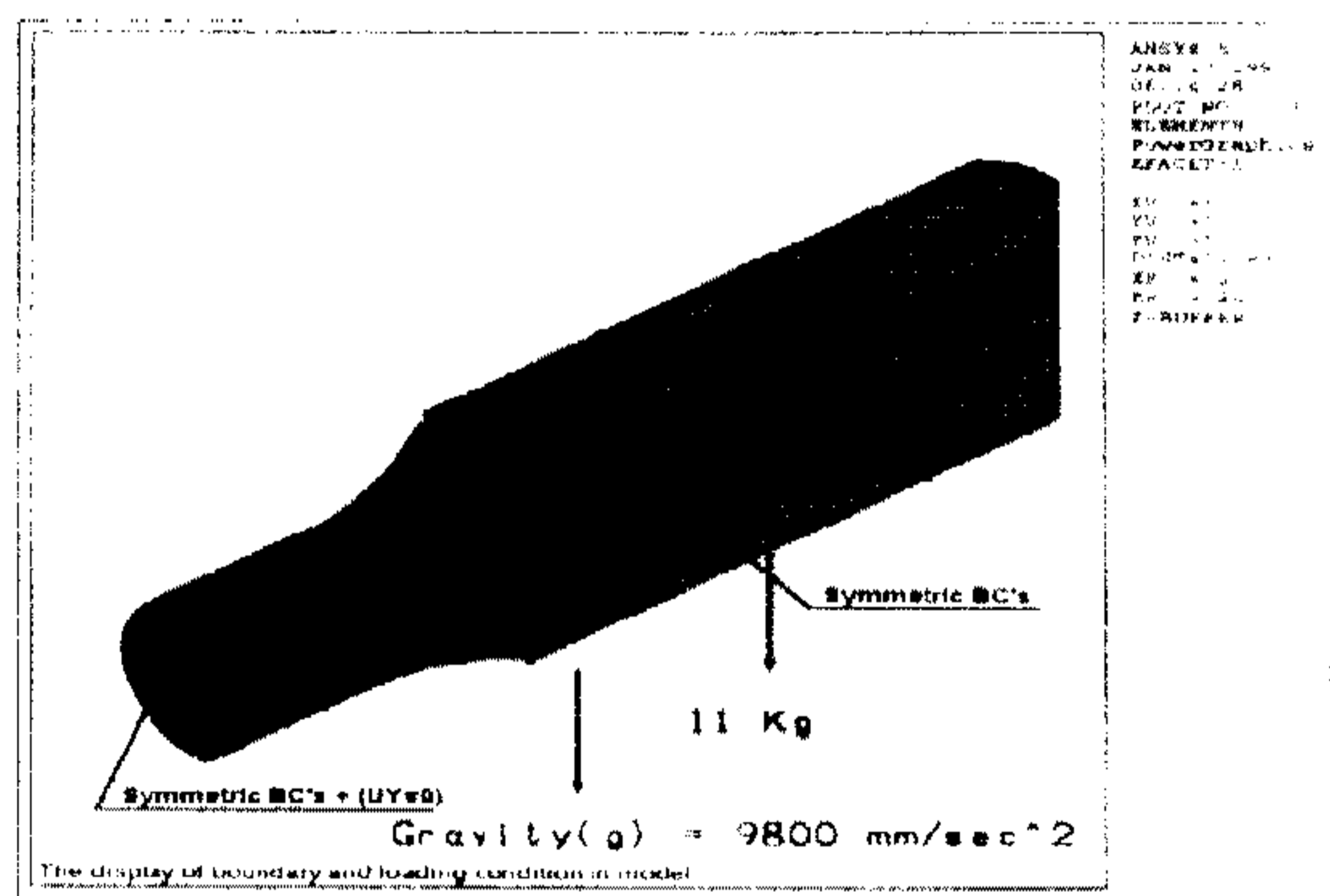


Fig.5 Boundary and loading conditions and finite element model

중 11kg(107.9MPa)이 위에서 아래로 가해지는 경우를 부(-)하중으로 하고 반대로 아래에서 위로 가해지는 경우를 정(+하중으로 표시하여, 두 하중조건에서 미소 원공결함 및 반대편 부위의 응력 분포를 살펴보았다.

Fig.6은 시험편에 정(+하중과 부(-)하중이 가해졌을 경우에 있어서 응력이 가해지는 방향 즉, Y방향의 응력분포를 나타내고 있다. 이 두 그림에 나타난 바와 같이 하중이 가해진 방향에 인장 응력이 발생하며, 하중의 반대방향은 압축응력이 그림과 같은 분포가 나타나게 되는데 각각의 하중 방향에서 미소 원공결함 부분과 반대쪽 부분의 압축응력과 인장응력을 비교하여 보면 다음과 같다.

정(+하중이 가해진 경우 미소 원공결함 부위의 압축응력이 부(-)하중이 가해진 경우 미소 원공결함 반대쪽 부분의 압축응력보다 약 2배 정도 높게 나타났으며, 또한 부(-)하중이 가해진 경우

미소 원공결함 부분의 인장응력이 정(+하중이 가해진 경우 미소 원공결함 반대쪽 부분의 인장응력보다 약 2배 정도 높게 나타나고 있다. 그리고 최대 변위는 미소 원공결함 쪽에서 하중이 가해진 부(-)하중의 경우가 정(+하중의 경우보다 다소 높게 나타나고 있다.

이와 같은 결과는 미소 원공결함 부분에 국부적인 응력 집중원이 발생되어 나타난 결과라고 생각되며, 인장응력 및 압축응력의 분포가 큰 곳은 미소 원공결함을 최고점으로 하여 축에 수직인 방향으로 분포됨을 알 수 있다. 따라서 미소결함이 부재나 구조물에 존재할 경우 이와 같은 인장응력과 압축응력이 반복적으로 가해짐에 따라 미소 원공결함으로부터 축에 수직 방향으로 피로크랙이 발생·성장한다고 생각할 수 있다.

Fig.7은 정(+하중과 부(-)하중이 가해졌을 경우의 주응력 분포를 나타내고 있는 그림으로서 Fig.6과 거의 동일한 경향을 보이고 있다.

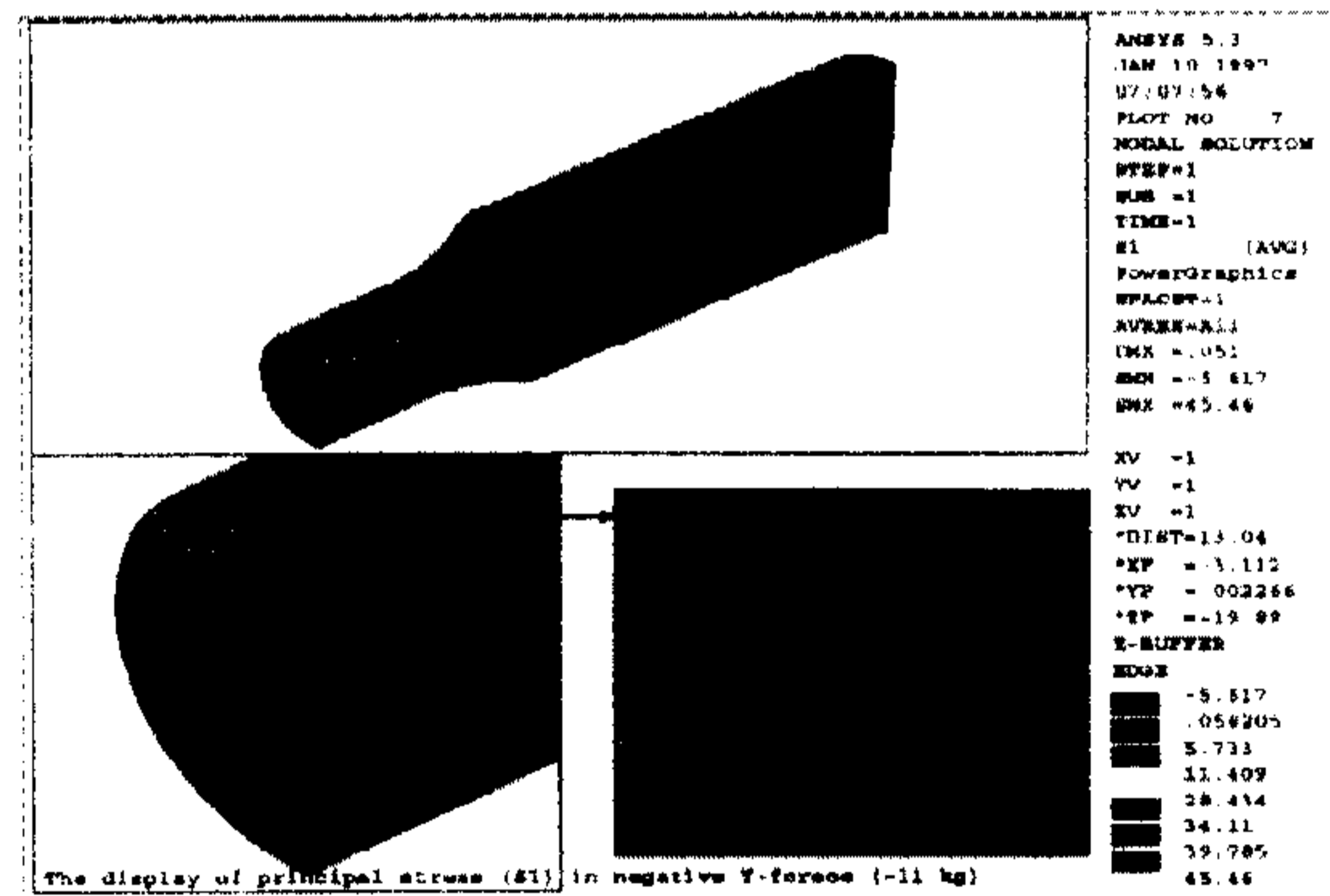
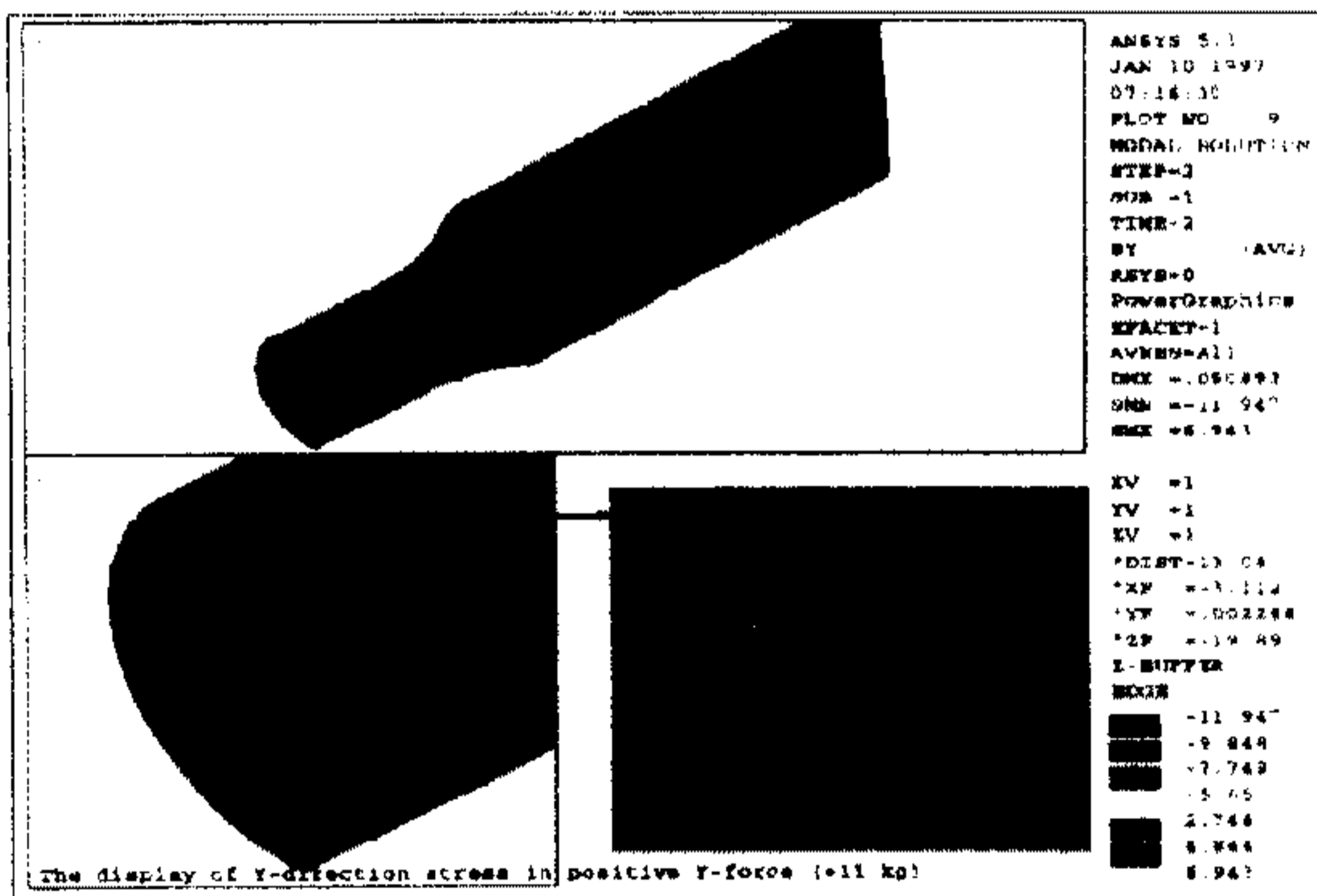


Fig.6 Y-direction stress distribution at positive and negative force

Fig.7 Principal stress distribution at positive and negative force

4.2 피로크랙 발생 및 전파거동

피로크랙 유도를 위해 미소원공결합이 가공된 시험편에서 초기 미소크랙은 미소원공 가장자리의 축에 수직인 방향으로 발생하고, 평활재의 피로크랙은 슬립밴드로부터 미시크랙으로 발전, 성장하며 이들이 상호 간섭을 일으키면서 합체, 성장하여 주크랙이 되어 가속적으로 전파한다. 이렇게 슬립밴드가 미시크랙으로 성장하기까지는 전 피로수명의 약 10~30%를 차지하므로 이 부분에 대한 미시크랙의 전파거동을 검토하는 것은 중요하다.

Photo.2는 열처리된 S43C 노치재의 회전수 증가에 따른 피로크랙전파거동을 연속적으로 보여주는 사진으로서 초기 미소크랙은 미소원공 가장자리에서 축에 수직방향으로 수 개가 관찰되었으며,

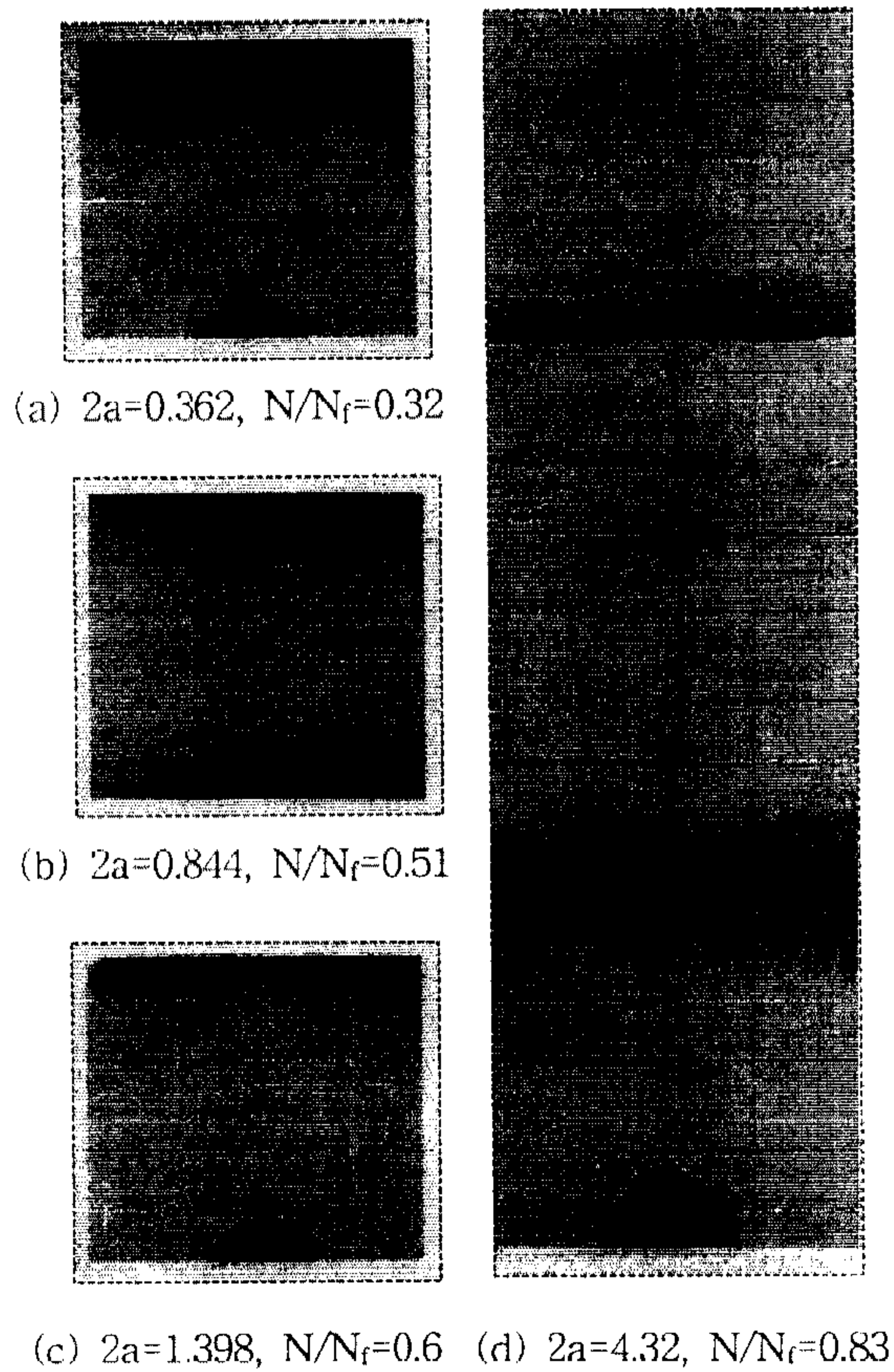


Photo.2 Photographs of fatigue crack propagation with notch in heated S43C ($\sigma_a=172.7\text{MPa}$, $\times 100$)

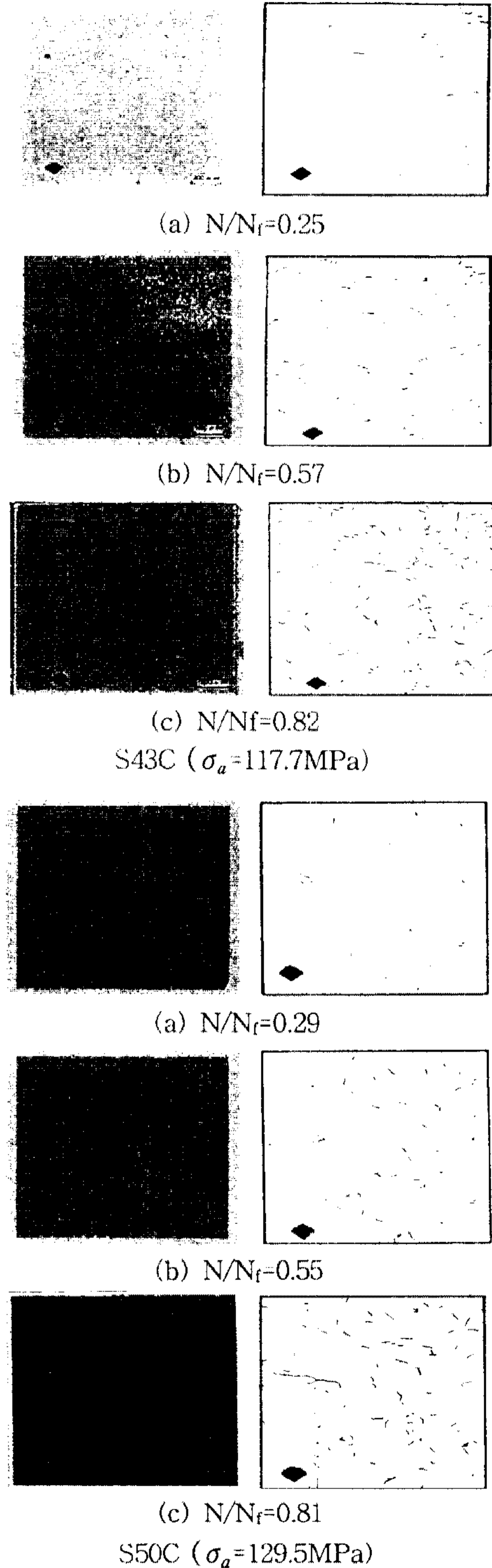


Photo.3 Photographs of micro crack in non-heated smooth specimens

Table 3 Image processing result

Material	N/N _f	Number of cracks	Average crack length (μm)
S43C	0.25	22	44
	0.57	84	78
	0.82	134	98
S50C	0.29	18	56
	0.55	65	82
	0.81	102	106

이들이 서로 간섭·합체하면서 주크랙으로 성장하였는데 이때 비열처리재보다 열처리재가 더 빠른 성장속도를 나타냈다.

Photo.3는 열처리를 하지 않은 평활재의 대표적인 피로수명비에서 관찰된 미시크랙을 보여주는 사진으로서 이러한 미시크랙들은 피로반복수가 증가함에 따라 그 수는 증가하여 일부 미시크랙들은 합체하면서 성장하는 과정을 보여준다. Table 3은 이러한 미시크랙들을 좀 더 명확하게 확인하기 위하여 화상처리(digital image process, NEXUS QUBE)방법으로 일정한 면적에서 미시크랙의 수 및 평균크랙길이를 조사한 결과로서 S43C는 S50C에 비하여 동일수준의 반복수에서 미시크랙의 수가 많았으나 평균크랙길이는 짧게 조사되었다.

4.3 a-N 선도 고찰

Fig.8, 9는 원공결합이 있는 시험편의 응력증가에 따른 피로크랙 2a와 반복수 N의 관계를 나타낸 것이다.

이 그림에 나타낸 바와 같이 동일한 응력수준끼리 비교하여 보면, 열처리와 온도에 관계없이 항복강도가 낮은 S43C가 항복강도가 높은 S50C보다 피로크랙 발생이 빨리 개시되었고 피로수명도 짧았다. 또한 열처리재가 비열처리재보다 피로한도는 높지만 피로크랙진전속도는 비열처리재보다 크게 나타났다.

실험결과 저온(-30℃)에서의 피로수명은 상온(25℃)의 실험결과와 비교하여 볼 때 비열처리재는 약 110% 증가한 반면, 열처리재는 약 120% 증가하였으나 파단 직전에 관찰된 크랙길이는 저온에서 오히려 짧았다. 이는 저온하에서 재료가 다

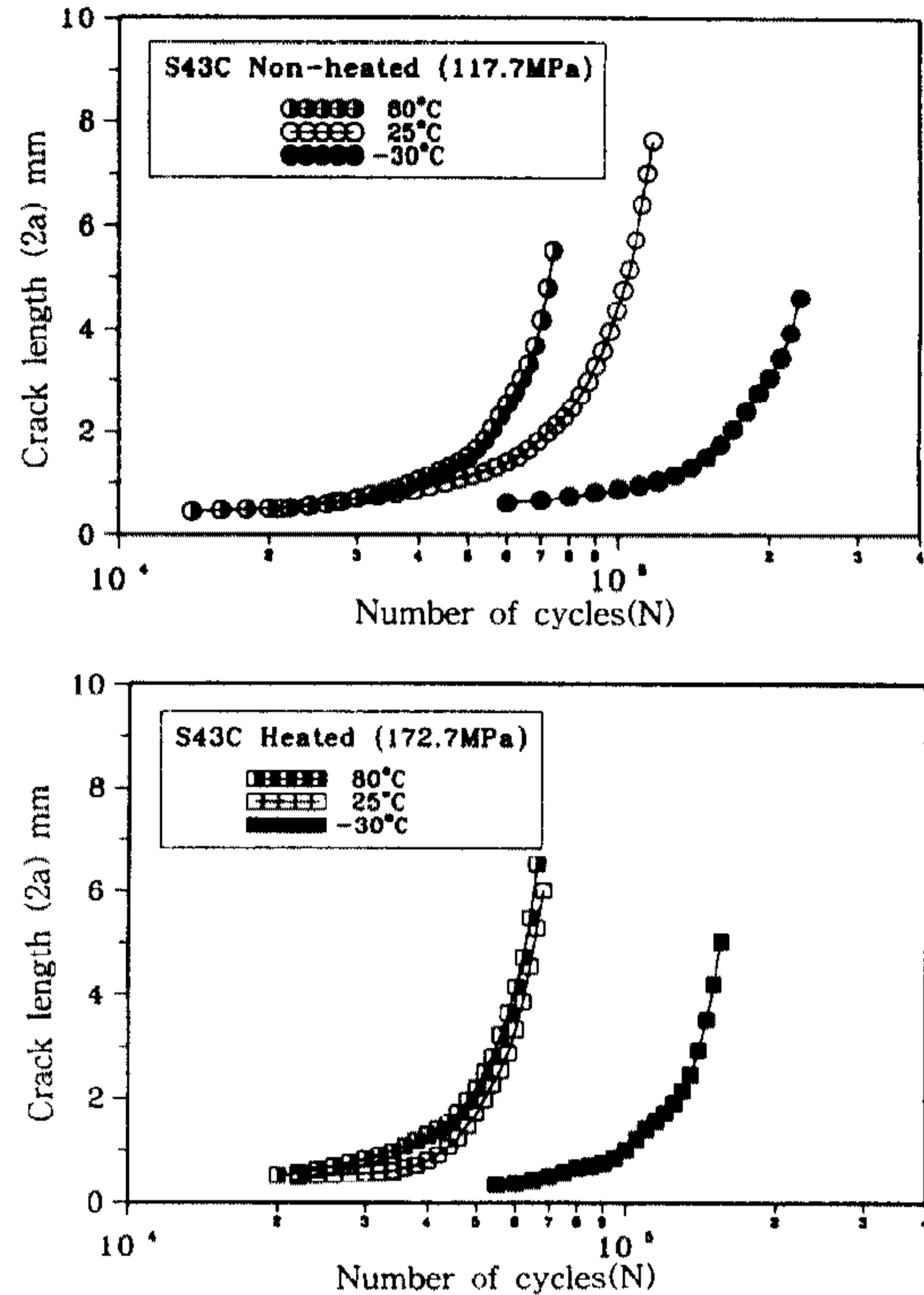


Fig.8 The relation between crack length and number of cycles for S43C

소 취성적인 경향을 보인 것으로 생각된다. 그리고 고온(+80℃)의 실험결과를 상온(25℃)과 비교하여 본 결과 비열처리재는 약 35% 피로수명이 감소한 반면, 열처리재는 겨우 5%의 감소를 나타내었다.

이와 같은 결과는 일반적으로 시험온도가 상승함에 따라 피로한도는 내려가며, 탄소강의 탄성계수, 항복점 및 탄성한도도 감소하며, 시험온도가 낮아짐에 따라 피로한도는 증가한다는 이론¹⁴⁾과 일치하나 열처리재는 고주파열처리에 의해 감소율이 줄어 상온과 거의 유사한 수명을 나타내었다.

4.3 피로파단면 고찰

재료의 파단면에는 파괴의 진행을 나타내는 특징적 형태가 남아 있으며, 이것을 조시함으로써 파괴원인과 파괴기구에 관한 정보를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 주사현미경(SEM)을 이용하여 파단면을 관찰하였으며, 관찰부위는 미소원

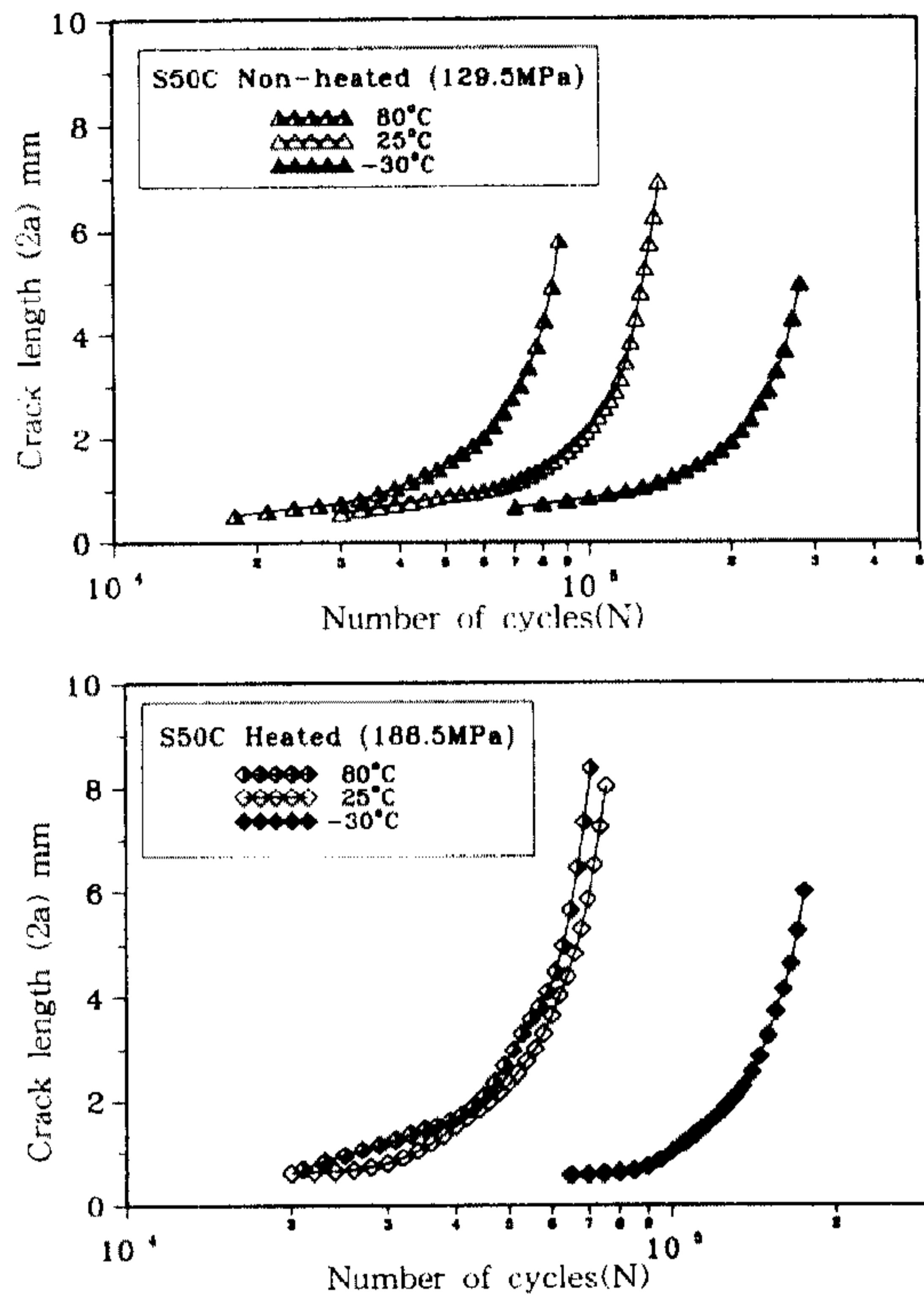
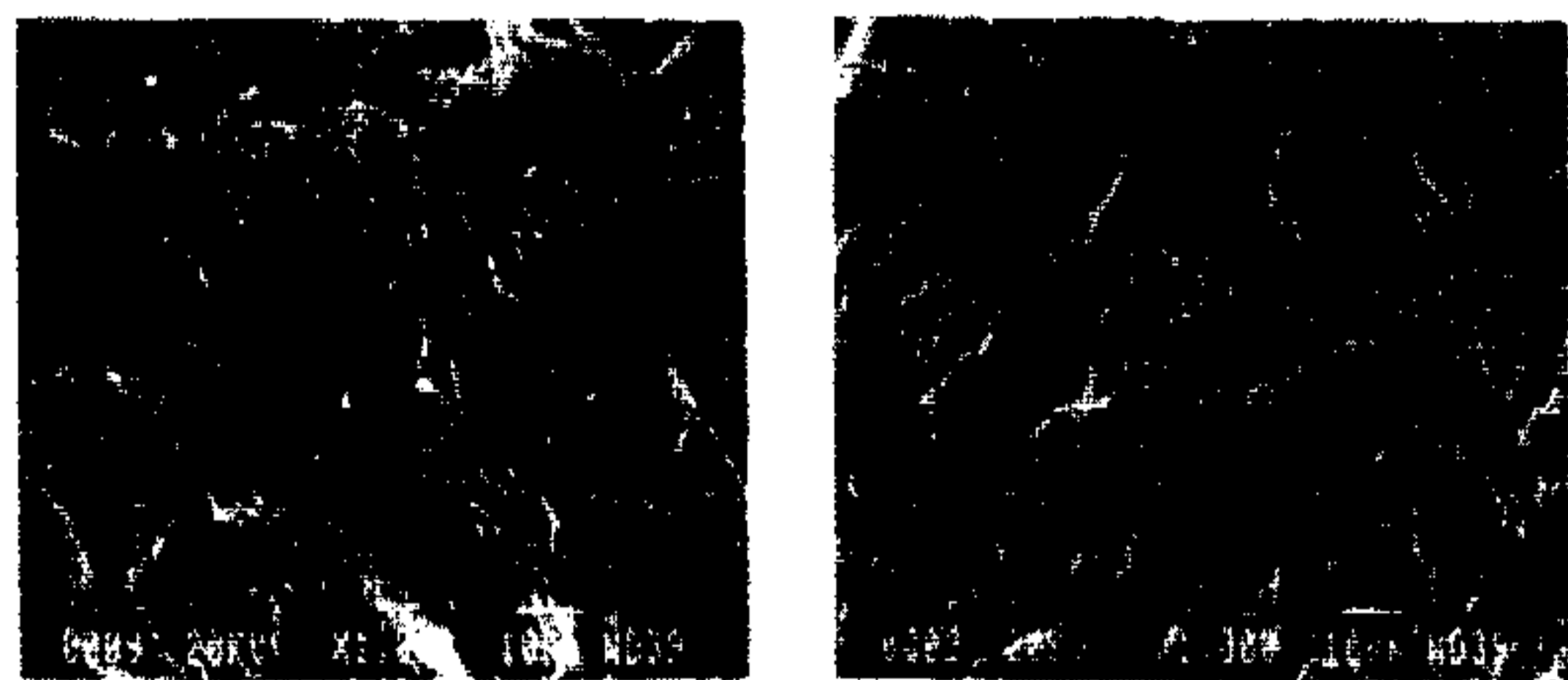
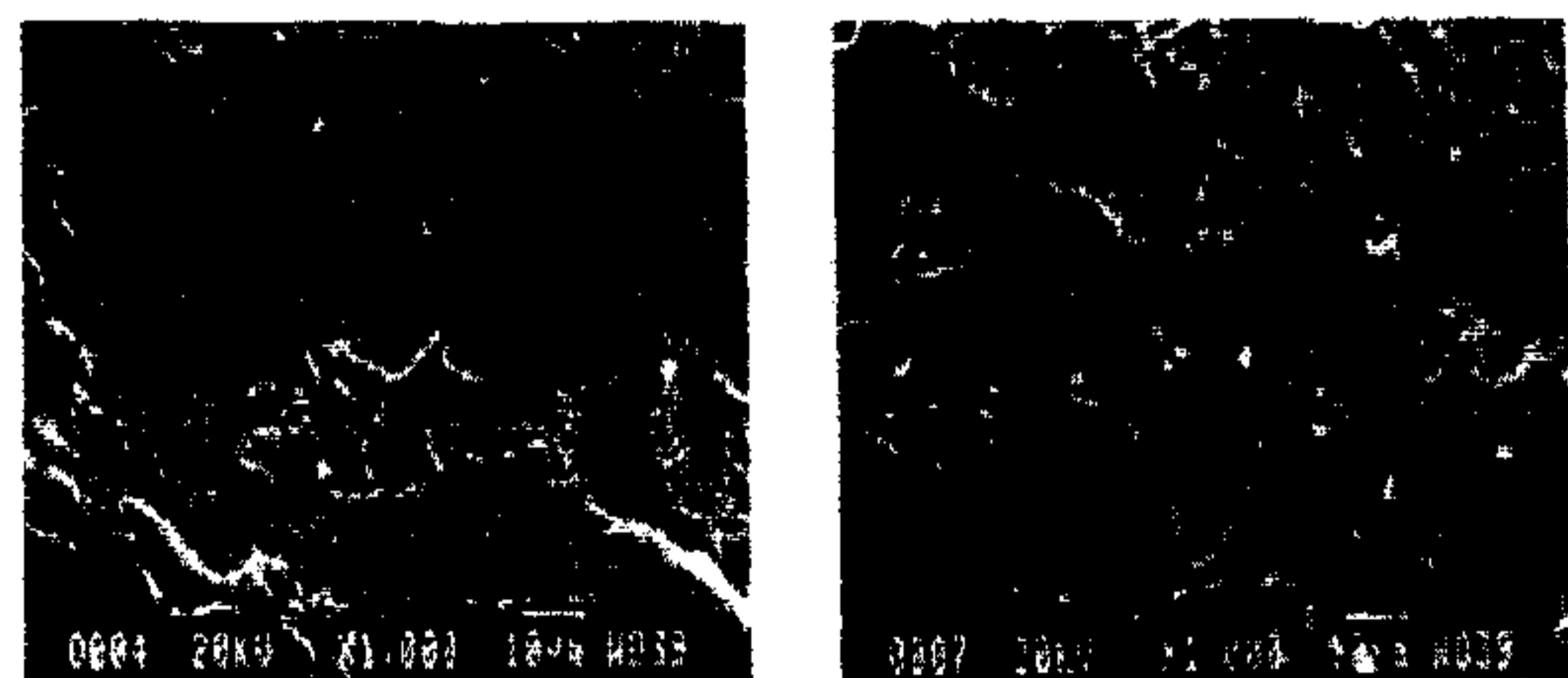


Fig.9 The relation between crack length and number of cycles for S50C



(a) Non-heated S43C (b) Heated S43C



(c) Non-heated S50C (d) Heated S50C

Photo.4 SEM fractographs of fracture surface in non-heated materials($\times 1000$)

공으로부터 미소원공 깊이의 약 2배 떨어진 곳 (약 0.6mm)이다.

Photo.4는 S43C 및 S50C 비열처리재와 열처리재의 피로파단면 사진으로서 비열처리재의 파단면에는 큰 입계 주변에서 약간의 마시 striation과 tire track을 나타내는 연-취성 파면을 나타내고 있는 반면 열처리재는 일반적인 취성파면을 나타내고 있다.

4.4 피로크랙 길이와 파단수명비의 관계

크랙길이와 수명비의 관계에서 西谷¹⁵⁾은 이들 관계를 다음과 같이 나타내었다.

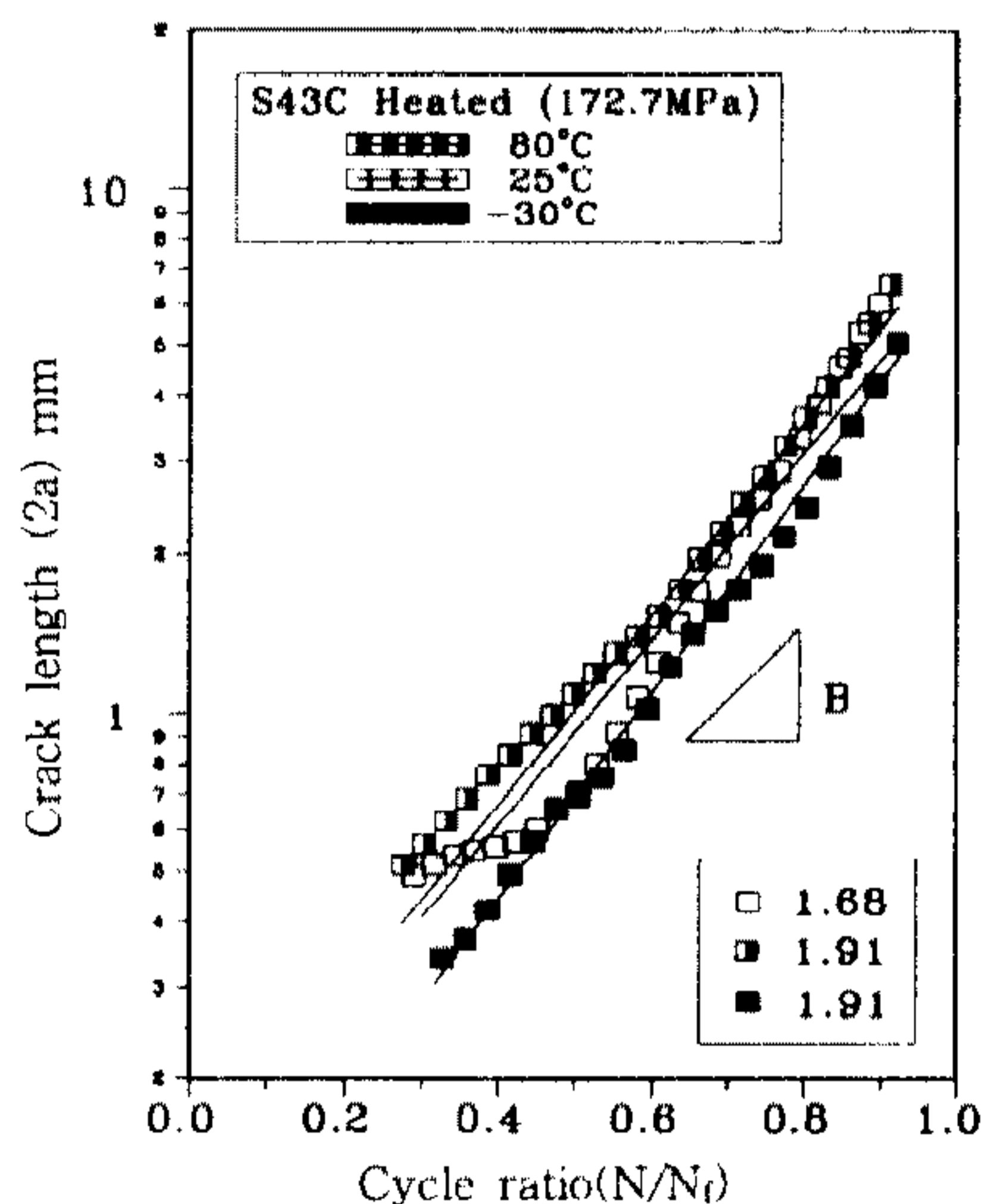
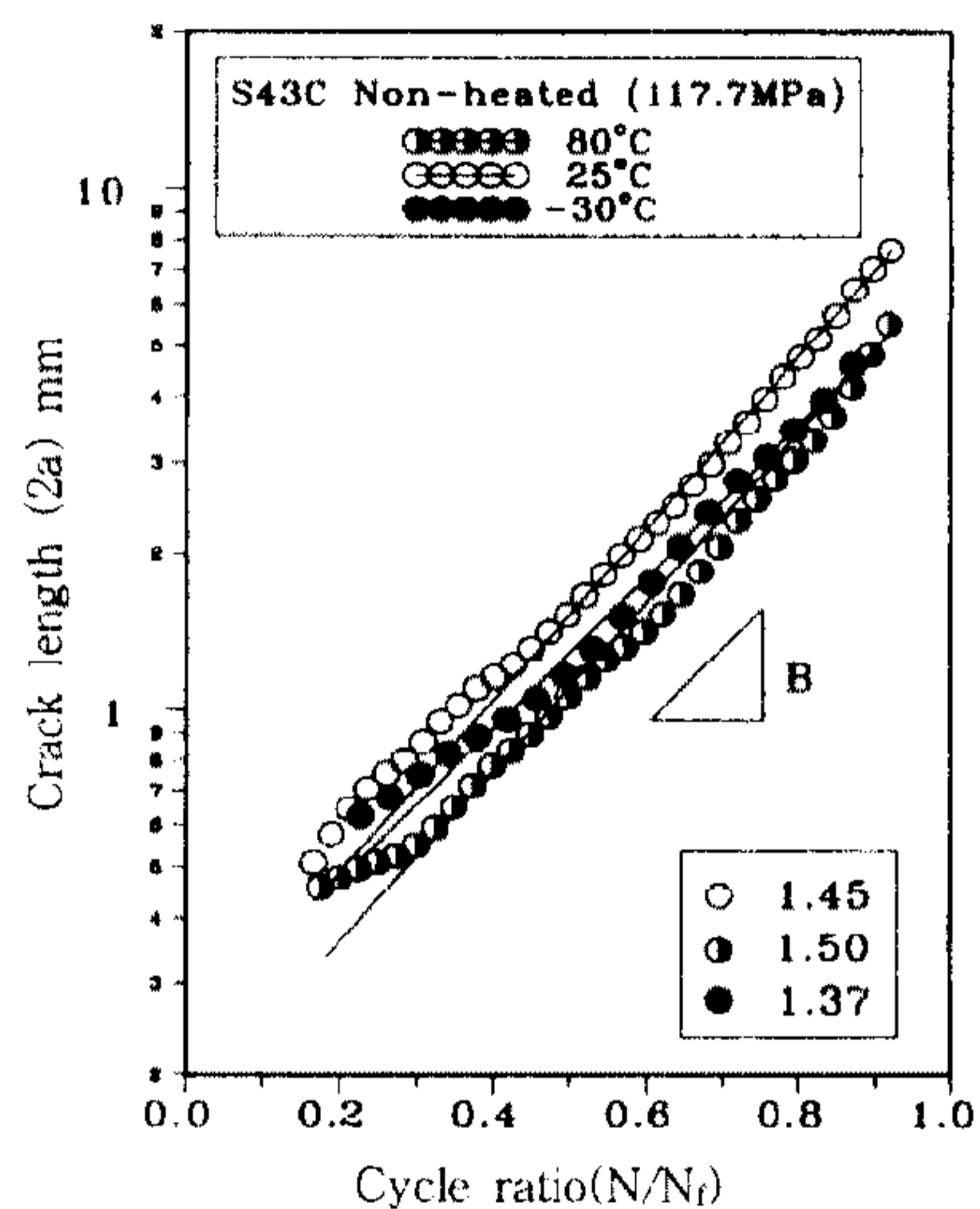


Fig.10 Relation between crack length and cycle ratio for S43C

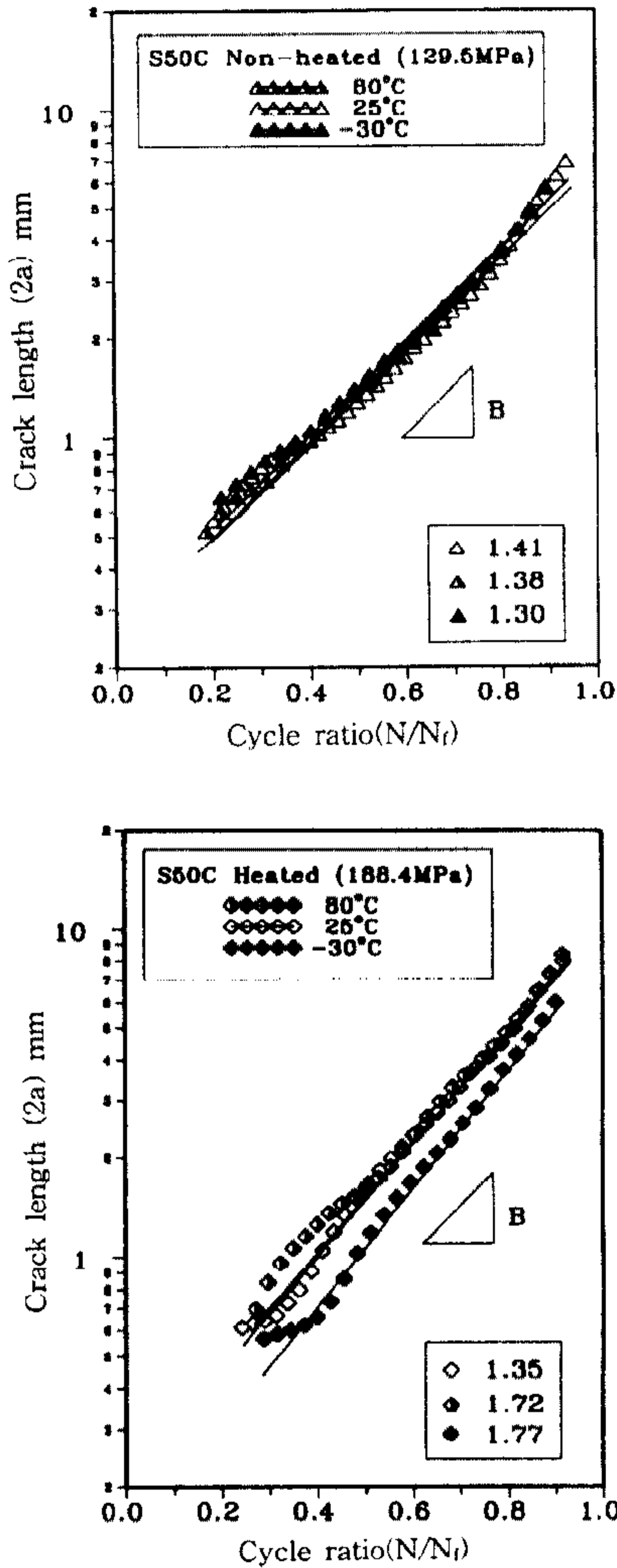


Fig.11 Relation between crack length and cycle ratio for S50C

$$(\log 2a) = A + B(N/N_f) \quad (1)$$

西谷등은 지름과 깊이가 0.3mm인 미소원공을 갖는 일반강재 및 황동재에서 응력반복수에 대한 원공결함 유무가 크랙전파속도에 영향을 미치지 않는, 즉 노치효과가 사라지는 크랙길이 0.5mm 이후에는 비례상수 B가 1.0~1.29의 범위 내에 있다고 하였다.

Fig.10, 11은 표면크랙길이 2a와 파단수명비 N/N_f 와의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에 나타난

Table 4 Material constants of equation(1)

Materials	Applied stress (MPa)	Tested temp. (°C)	Material constants	
			A	B
S43C	117.7	80	-0.6747	1.4507
		25	-0.5347	1.5006
		-30	-0.5659	1.3742
	172.7	80	-0.7858	1.6753
		25	-1.0120	1.6108
		-30	-1.1161	1.7132
S50C	129.5	80	-0.4591	1.4078
		25	-0.5464	1.3765
		-30	-0.4877	1.2961
	188.4	80	-0.4558	1.3456
		25	-0.6770	1.7210
		-30	-0.9677	1.7667

바와 같이 열처리 및 온도에 관계없이 피로크랙의 성장특성은 각각의 데이터들이 직선의 좁은 범위 내에 표시되어 2a와 N/N_f 사이에는 비례관계가 있음을 알 수 있다.

Table 3은 본 실험에서는 식 (1)을 이용하여 얻어진 재료상수 A와 B로서 B값의 범위가 1.29~1.72임을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 현재 생산되고 있는 자동차의 전륜 구동축재료 S43C와 S50C를 대상으로 회전굽힘 피로시험을 통해 고주파열처리와 온도조건(-30°C, +25°C, +80°C)에 따른 피로크랙의 발생, 전파거동을 고찰하였으며 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 비열처리재 S43C 및 S50C의 피로한도는 각각 98.1MPa, 107.9MPa이었으며, 열처리재는 각각 147.1MPa, 156.9MPa로서 열처리 후 두 재료 모두 약 49MPa씩 증가하였다.
- 2) 유한요소해석 결과 미소 원공결함 부분의 응력이 부(-)하중의 경우가 정(+하중의 경우

보다 다소 높게 나타났으며 이러한 원인은 미소원공결합이 응력의 국부적인 집중원이 되었기 때문으로 분석된다.

- 3) 피로크랙길이와 파단수명비의 관계 $\log(2a) = A + B(N/N_f)$ 식에 본 실험재료를 적용한 결과 고주파열처리와 온도에 관계없이 비례관계가 있었으며, 얻어진 재료상수 B는 1.29~1.77의 범위에 있었다.
- 4) 표면 미시크랙의 발생은 비열처리 S43C 및 S50C재에서 수명비 $N/N_f \approx 0.2$ 정도에서 처음 관찰되었으며, 동일한 수명비에서 관찰된 미시크랙의 수는 S43C가 많았고, 평균길이는 S50C가 길었다.
- 5) 저온(-30°C)에서의 피로수명은 상온(25°C)의 실험결과와 비교하여 볼 때 비열처리재는 약 110% 증가한 반면, 열처리재는 약 120% 증가하였으나 파단 직전에 관찰된 크랙길이는 오히려 짧았다.
- 6) 고온(80°C)에서의 피로수명은 상온(25°C)의 실험결과와 비교하여 볼 때 각각의 재료에서 비열처리재는 약 35% 정도 감소하였으나 열처리재는 약 5% 정도 감소하여 25°C와 거의 차이가 없었다.

참 고 문 헌

1. 宋森弘, 國尾武, “高硬度鋼のミクロ領域における疲労き裂生成課程”, 日本機械學會論文集, 第40巻, 第334號, pp. 1503~1510, 1970.
2. 姜用求, “表面龜裂의 成長特性에 관한 破壞力學的 研究”, 工學博士 學位論文, 慶北大學校, p. 5, 1990.
3. David Broek, “Elementary Engineering Fracture Mechanics”, Sijthoff & Noordhoff, pp. 3~23, 1978.
4. Richard, W.Hertzberg, “Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials”, 2nd, ed., JOHN WILEY & SONS, pp. 619~665, 1983.
5. 宋森弘, 吳煥燮, “微小缺陷을 갖는 炭素鋼材의 疲勞破壞舉動”, 韓國海洋工學會誌, 第3巻, 第2號, pp. 601~607, 1989.
6. 宋森弘, 吳煥燮, “微小圓孔주위의 疲勞크랙發生傳播 舉動에 관한 研究”, 韓國海洋工學會誌, 第1巻, 第2號, pp. 250~258, 1987.
7. 서창민, 이정주, 김영호, “304스테인리스강의 고온표면미소 균열의 거동에 관한 기초적 연구”, 大韓機械學會論文集, 第12巻, 第6號, pp. 1320~1326, 1986.
8. 西谷弘信, 皮籠石 紀 雄, “炭素鋼の高温回轉軸げにおける微小疲労き裂”, 伝小ば則拵, 日本機械學會論文集(A編), 第53巻, 第491號(昭, 62-7) pp. 1163~1166.
9. 大谷 隆一外 4人, “環境高温強度學”, オーム社, pp. 11~38.
10. 西谷弘信, 鹿毛正治, “電解研磨した廣穴材の回轉曲げ”, 日本機械學會論文, 第39巻, 第323號, pp. 2005~2012, 1966.
11. Kunio, 國尾武, 重擇日, “破壞力學 實驗法”, 1986.
12. 房雄柱, “微小圓孔缺陷을 갖는 鍛造鋼材의 疲勞크랙 傳播舉動에 관한 研究”, 朝鮮大學校 碩士學位 論文, p. 14, 1994.
13. Annual Books of ASTM Standards, Vol. 0301, E647-88, “Standard test method for measurement of Fatigue Crack Growth Rates”, pp. 328, 1976.
14. 金宗河, “金屬材料 疲勞強度의 設計資料”, 機電研究社, pp. 21~29, 1995.
15. 西谷弘信, 森光武則, “小穴付き試驗片の回轉軸げ試験によるき裂傳は特性の評價”, 日本機械學會論文集, 第42巻, 第354號, pp. 328, 1976.