

저탄소강재 (SM25C) 의 피로크랙 전파거동에 미치는 결정립 크기의 영향

김 건 호*

The Influence of Grain Size on the Fatigue Crack Propagation Behavior in the Low Carbon Steel (SM25C)

G-H Kim*

Key words : Grain size(결정립 크기), Fatigue limit(피로한도), Small crack(미시크랙), Main crack(주크랙), Dependence of grain size(결정립 크기의 의존성), Fatigue crack propagation behavior(피로크랙 전파거동), Fatigue fracture life ratio(피로 파단 수명비), Fatigue life(피로수명)

Abstract

In this study, the rotary bending fatigue test was carried out with low carbon steel(SM25C). The specimens were heat-treated in order to change the grain size, and investigated items are fatigue limit, small crack initiation, fatigue crack propagation behavior and possibility of fatigue life prediction according to the different grain size.

The summarized result are as follows ; Fatigue limit of the smooth specimen was dependent upon the grain size. The fatigue crack initiation of the small grain size specimen was delayed more than that of the large grain size specimen. And the small cracks of small grain size specimen were distributed in the narrow region of the main crack circumference contrary to the large grain size specimen. The main crack was grown along the grain boundary having co-alliance with small cracks. The experiment material has quantitatively disclosed the possibility of fatigue life prediction because the fatigue crack propagation behavior is dependent upon the grain size.

1. 서 론

일반적으로 탄소강의 기계적 성질은 탄소 함유량 및 결정립 크기에 영향을 받는다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 금속조직학적으로 결정립 크기에 영향을 미치는 인자로서는 열처리 조건 즉,

열처리 방식, 온도 및 유지시간 등이 있으며, 결정립 크기는 금속의 피로강도에도 직접 영향을 미쳐 피로크랙 전파거동 및 피로수명 등이 변하게 된다.

결정립 크기가 작을수록 항복강도, 인장강도 및 피로한도 등이 향상되며, S-N곡선의 절곡점은 긴 수명사이클 쪽으로 기울어진다^{[1][4]}. 반면에 피로크

* 군산대학교 해양생산학 · 기관공학부

랙 전파속도는 결정립 크기에 대한 의존성이 적고, 매우 예리한 노치재의 피로한도는 결정립 크기에 거의 의존하지 않는다고 알려져 있다.¹⁵⁾¹⁶⁾ 탄소강재의 미세조직 중에서 결정립 퍼얼라이트는 슬립 발생에 영향을 주지 않으며, 퍼얼라이트 양이 어느 일정량 이하가 되면 피로크랙 발생 및 전파에 영향을 주지 않는다고 하였다¹⁷⁾. 순철재의 결정립계는 크랙전파에 큰 장애효과가 있으며, 슬립밴드 발생은 결정립이 미세한 경우에는 입내에서, 조대한 경우에는 입계에서 발생한다고 하였다¹⁸⁾.

기계 구조용강재를 사용할 피로수명예측을 위한 연구보고¹⁹⁾에서는 부하응력 및 크랙길이가 피로크랙 전파속도에 영향을 미친다고 하였다.

본 연구에서는 기계구조용강(SM25C)재를 열처리하여 결정립의 크기를 변화시켜 회전 굽힘 피로시험을 통하여 피로크랙 발생, 전파거동 및 피로수명 등을 비교·평가하였다.

2. 시험편 및 실험 방법

본 연구에 사용된 시험기는 회전굽힘 피로시험기로서 최대용량은 10kg·m, 3400rpm이며, 사용된 재료는 기아특수강(주)에서 제조한 기계구조용강을 열간단조(단조비 6.4S)시킨 SM25C이다.

Table 1과 2는 시험재료에 대한 화학적 성분 및 기계적 성질을 나타내고 있다. 시험편의 결정립 크기를 변화시키기 위한 열처리는 Table 3과 같이 최고가열온도 및 냉각방법의 차이에 의해 얻어졌다. Photo. 1은 금속 조직사진으로서 결정립이 작은 시험편(A재) 및 큰 시험편(B재)으로 구분되며, 평균 결정립 크기는 각각 25.0 및 70.4 μ m로 나타났다. 이때 결정립 크기 측정은 면적분석법에 의해 측정되었으며 Table 3에 표시하였다.

피로시험을 위한 시험편 가공은 CNC선반으로 선삭 가공한 후 크랙진전거동을 관찰하기 위해 시험편의 평행부를 연마지 #2,000까지 연마한 뒤 산화크롬을 이용하여 랩핑 가공하였다. 가공된 시험편 형상은 Fig. 1과 같으며, 시험편 평행부 표면의 미시크랙의 발생 및 전파과정을 관찰하기 위하여 2% 니탈용액으로 부식을 실시하여 표면에 결정립 경계가 나타나도록 하였다.

Table 1 Chemical compositions of specimen(wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S
SM25C	0.23	0.22	0.43	0.013	0.014

Table 2 Mechanical properties of specimen

Materials	Yield Streng. (MPa)	Tensile Streng. (MPa)	Fatigue limit (MPa)	Elong. (%)	Hardness (HB)
SM25C	264.9	441.5	136.5	21.3	153
	216.8	412.0	117.3	27.0	146

Table 3 Heat treatment condition and grain size of experimental materials

Materials	Condition of heat treatment	Average grain size (μ m)	ASTM No. of grain size	1/ δ (mm ^{-1/2})
A	910 $^{\circ}$ C, 2.5hr air cooling	25.0	8	6.32
B	1100 $^{\circ}$ C, 2.5hr Furnace cooling	70.4	5	3.77

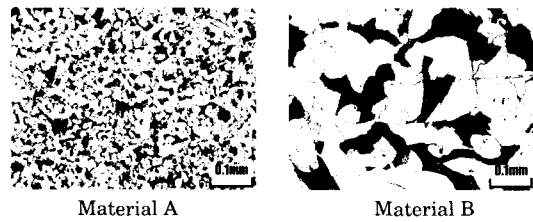


Photo. 1 Micro-structures of heat treatment materials (Cross section of axial direction, $\times 100$)

자연결함으로부터의 초기 미시크랙의 발생 및 성장에 대한 고찰은 난이한 문제이므로, 본 연구에서는 이를 대신 시험편 평행부 중앙에 직경과 깊이가 각각 300 μ m 미소 원공결함을 이용하여 응력집중에 의한 피로크랙 발생 및 전파를 유도하였다.

크랙측정을 위한 시험기 정지는 약 3000cycles 마다 수행되었으며, 이 때 소요된 시간은 매 회 약 1분 이내였으므로 크랙측정을 위한 시험기 정지는 피로수명에 큰 영향이 없었다고 사료된다. 또한 시험편 표면의 피로크랙길이는 레프리카법 및 이동현미경에 접안 이동측미계(Micrometer eyepiece, Model;OSM-4)를 부착하여 측정 관찰하였으며, 크랙이 노치효과를 무시할 수 있을 정도로 전파한 후에는 미소원공도 크랙의 일부로 간주되기 때문

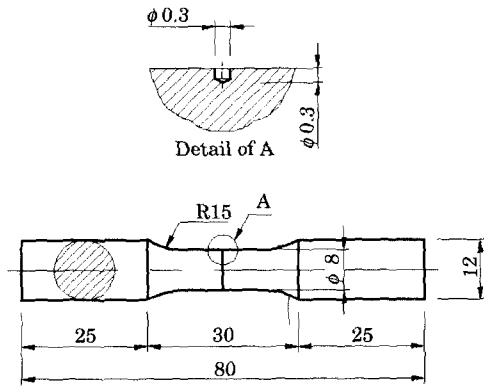


Fig. 1 Geometry of fatigue test specimen(mm)

에 미소 원공을 포함한 표면상의 전 크랙길이를 l 로 하였다.

한편, 노치재의 피로시험 응력은 A재 피로한도의 100% 및 128%인 136.5MPa 및 175.5MPa의 부하응력으로 실험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 결정립 크기와 피로한도

Fig. 2는 피로한도 실험으로부터 얻어진 결과를 나타낸 S-N선도이다. 이 때 피로한도는 $N=1 \times 10^7$ cycle까지 시험편이 파단되지 않을 때의 응력으로 하였다. 그림에 나타난 바와 같이 평활재의 피로한도는 A재 및 B재가 각각 136.5MPa 및 117.3MPa로서, 결정립이 작은 A재가 결정립이 큰 B재 보다 약 14%가 높게 나타났다. 또한, 평활

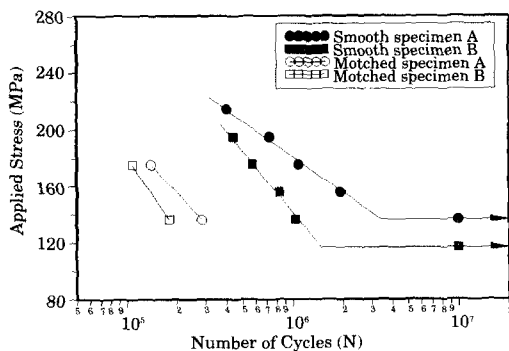


Fig. 2 S-N Curve

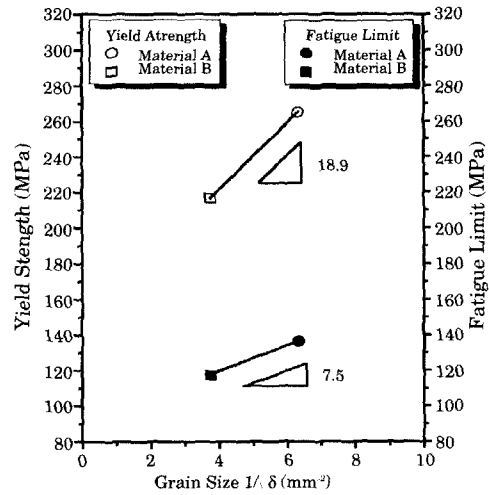


Fig. 3 The relation between yield strength and fatigue limit according to the grain size

재 및 미소원공 노치재의 S-N곡선의 기울기는 결정립이 작은 A재의 경우에 긴 수명쪽으로 기울며 피로한도 부근에서 더욱 피로수명이 길게 나타났다. 이와 같은 결과는 피로한도가 결정립 크기의 의존성을 갖는다는 Hall-Petch 등¹¹⁾의 연구와 잘 일치하고 있다.

또한, Fig. 3은 결정립 크기와 항복응력 및 피로한도와와의 관계를 나타낸 그림으로서 결정립이 클수록 피로한도에 비해 항복강도가 크게 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과는 피로한도 보다 항복강도가 결정립에 대한 의존성이 더 크다는 것을 알 수 있다.

3.2 결정립 크기가 피로크랙의 발생에 미치는 영향

피로크랙 유도를 위한 미소 원공결함이 가공된 시험편에서 초기 미소크랙은 미소원공 가장자리에서 축에 수직인 방향으로 발생한다. 그러나 평활재의 피로크랙은 슬립밴드로부터 미소크랙으로 발전, 성장하며 이들이 상호 간섭을 일으키면서 합체, 성장하여 주크랙이 되어 가속적으로 전파한다. 이렇게 슬립밴드가 미소크랙으로 성장하기까지는 전 피로수명의 약 10~20%를 차지하므로 이 부분에 대한 미소크랙의 전파거동을 검토하는 것은 중요하다.¹⁶⁾

Photo. 2는 결정립이 다른 두 시험편에 동일한 응력(136.5MPa)을 부하하여 미소원공 선단에서 미시크랙 생성을 조사한 사진이다. 이 두 사진의 크랙길이와 피로 파단수명비(N/N_f)를 서로 비교하여 보면, A재 및 B재의 피로 크랙길이는 거의 유사하나 파단수명비는 각각 0.58 및 0.29로서 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 결과로부터 결정립이 작은 A재의 초기크랙발생이 크게 지연되었음을 알 수 있으며, 초기 크랙발생에 소요되는 피로수명은 결정립의 크기와 의존성이 있다고 사료된다. 또한, 결정립이 작은 A재는 미소원공 선단에서 협소하고 좁은 영역에서 크랙이 나타난 반면 결정립이 큰 B재는 이와 반대로 넓은 영역에 걸쳐 크랙이 발생하였으며 서로 상호 함체하며 전파하는 모습을 나타냈다. 이러한 원인을 요시가와 등⁹⁾은 수 개의 결정립에 걸쳐서 크랙이 전파된 후 정류하고 있으며, 결정립이 조대할수록 정류크랙도 크며, 크랙이 정



$N/N_f=0.58, l=0.576\text{mm}$
Material A



$N/N_f=0.29, l=0.606\text{mm}$
Material B

Photo. 2 Behavior of initial micro-crack in the material A and B (Applied stress $\sigma_a=136.5\text{MPa}$)

류한 뒤에는 반복응력을 가하여도 크랙은 전파하지 않는다고 하였으며, 본 연구도 이와 이와 같은 현상을 발견할 수 있었다.

3.3 결정립 크기가 피로크랙 전파거동에 미치는 영향

Fig. 4와 5는 노치재 시험편의 cycle 증가에 따른 피로 크랙길이의 관계를 나타낸 것이다.

그림에 나타난 바와 같이 부하응력이 높을수록 미시크랙의 발생이 빠르며, 피로수명도 짧게 나타났다. 또한, 피로 크랙길이가 1.0mm까지 성장하는데 소요된 수명을 비교하여 보면 결정립이 작은 A재가 결정립이 큰 B재보다 크게 높게 나타났는데 이러한 원인은 A재의 경우 결정립계를 따라서 미시크랙들이 전파하면서 결정립계에서 피로크랙 전파를 방해하기 때문으로 분석된다.

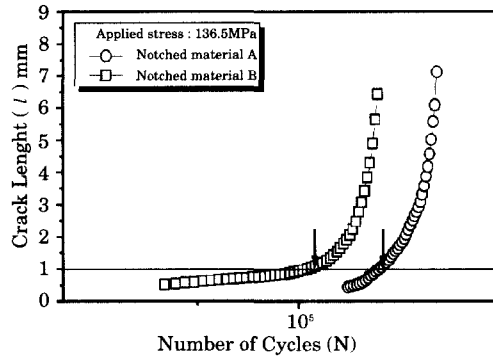


Fig. 4 $l-N$ curve of applied stress 136.5MPa in the material A and B

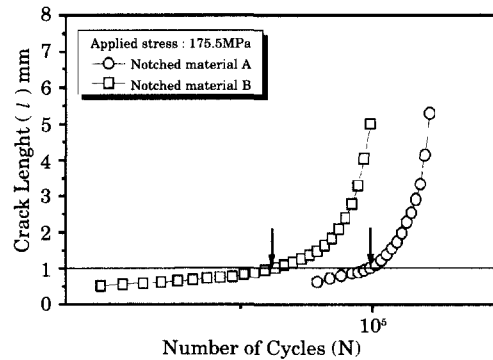


Fig. 5 $l-N$ curve of applied stress 175.5MPa in the material A and B

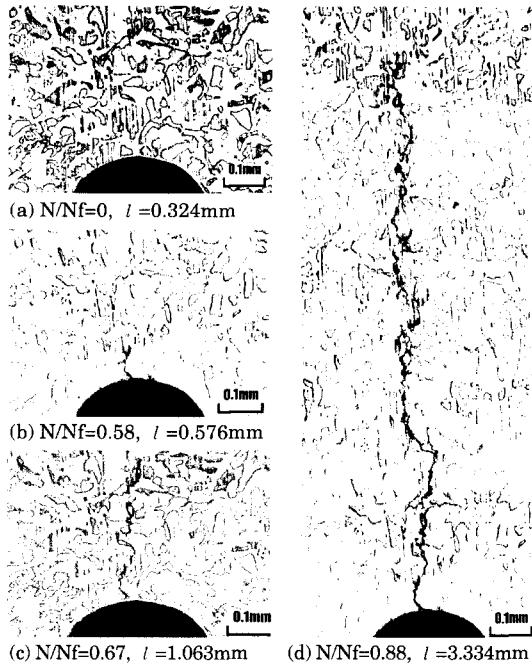


Photo. 3 Behavior of fatigue crack propagation with notched material A ($\sigma_a=136.5\text{MPa}$)

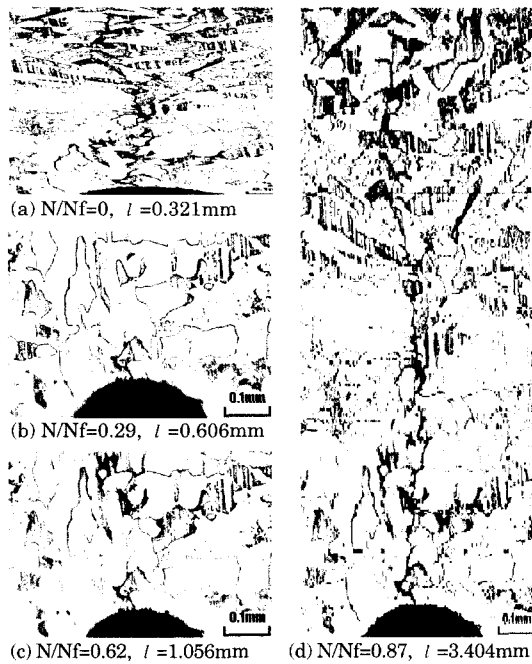


Photo. 4 Behavior of fatigue crack propagation with notched material B ($\sigma_a=136.5\text{MPa}$)

Photo. 3과 4는 동일한 응력하에서 노치재의 cycle 증가에 따른 피로크랙 전파거동을 연속적으로 보여주는 사진이다. 결정립의 크기가 작은 A재는 주크랙 주변에서 적은 수의 미시크랙이 발생되어 이웃한 다른 미시크랙과의 거의 합체하지 않고 좁은 폭의 주 크랙으로 성장함을 관찰할 수 있었다. 그러나 결정립이 큰 B재는 A재와 전혀 다른 반대의 양상을 보이고 있다. 이러한 현상은 페라이트 결정립 크기가 피로크랙 전파거동과 밀접한 관계가 있다고 사료된다.

3.4 결정립 크기와 피로크랙전파거동

Fig. 6은 결정립의 크기 및 부하응력에 따른 피로크랙의 발생·성장의 지연정도를 나타낸 그림이다. 1.0mm 초기크랙의 발생·성장이 A 및 B재 각각 전체 피로수명의 약 60% 및 35%임을 알 수 있다. 따라서 결정립이 작은 A재가 결정립이 큰 B재보다 초기크랙 발생 수명이 크게 지연되고 있음을 알 수 있으며, 그 지연정도는 부하응력의 고저에 반비례함을 알 수 있다.

Fig. 7은 1.0mm 이상의 피로크랙 길이와 1.0mm 이상의 피로 cycle에서 1.0mm일 때의 수명(cycle)을 각각 뺀 수명($N-N_l=1.0\text{mm}$)과의 관계

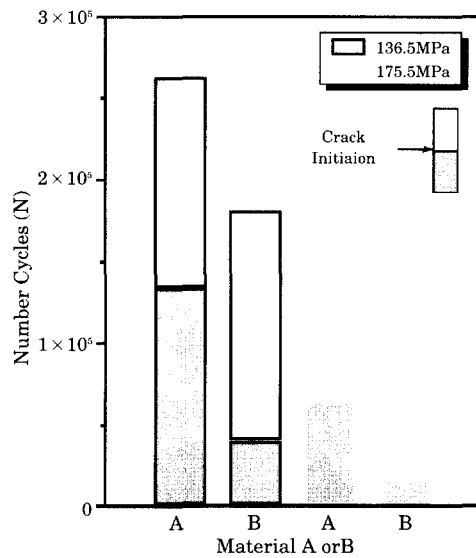


Fig. 6 Relation between notch tested materials and number of cycles

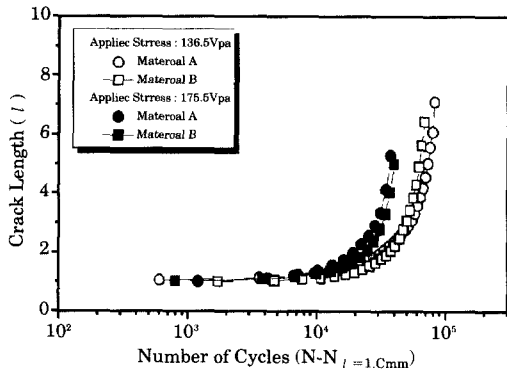


Fig. 7 Relation between crack length and $N-N_i$ ($N_i=1.0mm$)

를 나타낸 것이다($N_i=1.0mm$ 이상의 조사된 원래의 수명, $N_i=1.0mm$: 피로크랙길이 1.0mm일 때의 수명). 이 그림에 나타난 바와 같이 피로크랙 길이가 1.0mm 이상에서는 결정립의 크기에 관계없이 두 재료 모두 cycle의 증가에 따라 빠른 크랙전파속도를 나타내며 거의 유사한 피로수명곡선을 보이고 있다. 이러한 결과는 예리한 노치에 의한 피로크랙 전전으로서 주크랙 주위에 소성역이 넓게 형성되며 응력장의 민감성이 둔화되기 때문으로 분석되며 요시가와 등¹⁰⁾의 보고와 잘 일치하고 있다.

3.5 피로크랙 길이와 피로파단수명비

피로수명 예측을 정량적으로 나타내는 중요한 식으로서 피로크랙길이 l 과 수명비 N/N_f 의 관계를 나타내니 등¹⁰⁾은 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$\log l = a + b(N/N_f) \tag{1}$$

여기서 a 와 b 는 상수이다.

Fig. 8은 피로크랙길이의 대수값과 피로 파단수명비(수명비)의 관계를 나타낸 것으로서 피로크랙 성장 특성은 부하응력 및 결정립 크기와 관계없이 직선적인 비례관계를 나타내고 있다. 따라서 본 실험에서 얻어진 데이터를 위 식(1)에 적용해 본 결과 Table 5와 같이 비례상수 b 의 범위는 A재는 2.13~2.51, B재는 1.28~1.31 내에 있다. 이와 같이 본 연구에서 얻어진 결과는 정 등¹⁰⁾에 의해 제시된 보고와 일치하며, 본 재료에 대해서도 피로수명 예측 식이 적용 가능하다고 사료된다.

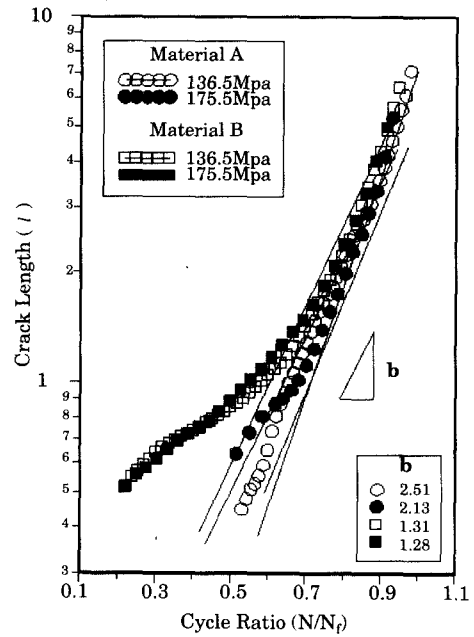


Fig. 8 Relation between fatigue crack length and fatigue fracture life ratio

Table 4 Material constants

Materials	Applied stress σ_a (MPa)	Material constants		
		a	b	
SM25C	A	136.5	-1.68	2.51
		175.5	-1.39	2.13
	B	136.5	-0.67	1.31
		175.5	-0.64	1.28

4. 결 론

저탄소강재(SM25C)에 있어서 결정립의 크기가 다른 두 재료에 대하여 피로한도, 미시크랙 발생, 피로크랙전파 거동 및 피로수명의 예측 가능성을 검토하기 위하여 회전굽힘피로시험을 수행하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 평활재의 항복강도 및 피로한도가 결정립이 큰 경우보다 작은 경우 높게 조사되어 결정립 크기에 따른 의존성을 나타내었다.
2. 피로크랙 길이가 약 1.0mm 성장할 때까지 소요된 피로수명은 전체수명의 절반 내외를 차지하며, 결정립이 큰 경우보다 작은 경우 더욱 많은

- 수명을 차지하였다.
3. 크랙 성장거동 특성은 결정립이 작은 경우 미시 크랙들이 주크랙 주변에서 협소하고 좁은 영역에 분포하였으며 이들이 합체하여 주크랙을 이루며 결정립계를 따라서 성장한 반면, 결정립이 큰 경우 주크랙 주변에 폭넓게 분포·성장하였다.
 4. 결정립 크기가 피로크랙 개시단계인 초기피로 크랙길이 약 1.0mm 이하의 경우 피로크랙 성장 속도에 큰 영향을 미치나, 그 이상의 길이에서는 무관하였다.
 5. 피로크랙 길이와 피로과단수명비와의 관계를 고찰한 결과 부하응력 및 결정립 크기에 관계없이 직선적인 비례관계를 나타냄으로서 피로수명에측 가능성을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2000학년도 군산대학교 자체 학술연구비 지원에 의하여 연구되었다. 본 연구의 실험 및 자료정리에 도움을 주신 해양과학대학 부속기관공장 김 영구 선생님과 조선대학교 대학원 이동길 선생님께 감사한다.

참 고 문 헌

- [1] T. L. Anderson, "Fracture Mechanics(2ed.)", CRC Press. Inc., pp. 285~289, 1995
- [2] 福原熙明, "切欠き材の疲れに及ぼす結晶粒大きさの影響", 日本機械學會論文集, 第38卷, 第305號, pp. 1~7, 1973
- [3] 中澤 一 外 5人, "結晶粒の大きさお えた低炭素鋼平滑および切欠き材の疲れき裂の舉動と疲れ限度", 日本機械學會論文集, 第40卷, 第329號, pp. 9~22, 1974
- [4] 長谷川典彦 外 2人, "低炭素鋼の高温疲労強度に及ぼす結晶粒寸法の影響", 日本機械學會論文集, 第43卷, 第370號, pp. 1995~2002, 1975
- [5] 宋森弘, 吳煥燮, "微小圓孔材의 疲勞크랙舉動과 페라이트 結晶粒度", 大韓機械學會論文集, 第9卷, 第4號, pp. 421~429, 1985
- [6] 吉川紀之 外 2人, "結晶粒度のすべり發生, き裂發生, 進展におよぼす影響について", 本機械學會論文集, 第36卷, 第281號, pp. 9~16, 1972

- [7] 西谷弘信外 2人, "フェライト粒徑をそろえた3種の炭素鋼の疲労強度", 日本機械學會論文集(A), 第56卷, 第524號, pp. 687~693, 1990
- [8] 長瀨康男外 2人, "疲労限度の結晶粒徑依存性及びす豫ひずみの影響", 日本機械學會論文集(A), 第55卷, 第514號, pp.1247~1254, 1989
- [9] 鄭 在康 外 1人, "미소원공을 갖는 선박 추진축재의 피로크랙전파거동에 관한 연구" 韓國船舶機關學會誌, Vol. 19, No. 2, pp. 36~46, 1995
- [10] 西谷弘信, 森光武則, "小穴付き試験片の回轉軸げ試験によるき裂傳ば特性の評價", 日本機械學會論文集, 第 42卷, 第 354號, p. 328, 1976.

저 자 소 개



김건호(金健鎭)

1946년 9월 12일생. 1976년 전북대학교 기계공학과 졸업(학사). 1989년 조선대학교 기계공학과 졸업(석사). 1996년 조선대학교 기계공학과 졸업(박사). 1979년~현재 군사대학교 해양생산학·기관공학부 교수.