

◎ 論 文

### 微小缺陷을 갖는 炭素鋼材의 疲勞破壞舉動<sup>+</sup>

宋 森 弘\* · 吳 煥 燮\*\*

(1989년 10월 17일 접수)

#### Behavior of Fatigue Fracture for Carbon Steel with Surface Flaw

S. H. Song\* and H. S. Oh\*\*

Key Words : Non-propagating Crack(정류크랙), Artificial Small Defect(인공 미소결함), Fatigue Limit(피로한도), Limit Small Defect(한계미소결함), Maximum Non-propagation Crack(최대정류크랙)

#### Abstract

The behavior of fatigue fracture was studied by using low carbon steel bar with micro-hole(artificial small defect) under the condition of rotary bending stress which is made artificially at smooth surface and round notch root.

The results obtained can be summerized ; The behavior of non-propagating cracks which are produced at both tips of small defect occurred to dissymmetry, and it is found to be double size of small defect. For the range of  $l > lc$ , threshold stress intensity is constant. However, for the range of  $l < lc$ , it approaches to fatigue limit which artificial small defect is not contained. For the small defect within round notch root, its effect on fatigue limit is lower than the case of smooth surface, and it is no more effective than the round notch is.

#### 1. 서 론

결함이 존재하면 탄소강의 피로강도는 정적강도가 증가하는 비율만큼 낮게되지는 않고 경도를 현저하게 높게하면 피로강도는 저하하는 것으로 알려져 있다.

이와같은 현상에 대하여 결함이나 개재물의 존재가 피로강도의 현저한 저하의 원인으로 지적<sup>1)</sup>되고 있다. 즉 동일한 재료를 열처리에 의하여 인장

강도를 높이더라도 정적강도의 상승만큼 피로강도가 상승되지 않는 것은 피로강도에 영향을 미치지 않던 결함이나 개재물이 열처리를 한 후 경도의 상승과 더불어 피로강도에 영향을 미치게 된다고 생각된다. 피로강도에 미치는 결함이나 개재물의 영향에 대해서는 지금까지 수많은 연구가 되어왔다.

특히 탄소강의 경우 경도가 높은 고경도, 고장력강 (Hv>500)에서 결함이나 개재물은 피로크랙의 발생 기점<sup>2)</sup>이 되고, 이것을 기점으로 하는 피

+ 1988년도 한국해양공학회 춘계학술대회 발표(1988년 6월)

\* 정희원, 고려대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 정희원, 경희대학교 공과대학 기계공학과

로크랙은 최종파괴를 일으키고 파괴한도를 저하시킨다. 피로크랙의 발생원인은 결함이나 비금속 개재물 그 자체가 되지만 이것을 포함하는 국부영역이 응력집중원<sup>3), 4)</sup>이 된다는 연구결과가 있다.

결함이나 개재물과 같이 응력집중원이 될 수 있는 인공미소결함(미소원공)을 갖는 재료에 대한 인공결함의 크기가 피로강도에 미치는 영향을 조사한 것<sup>5), 6)</sup>, 인공결함제의 정류크랙과 피로파괴를 논한 것<sup>7), 8)</sup>, 원공주위에 발생하는 응력분포 해석에 관한 것<sup>9), 10)</sup> 등을 들 수 있다.

상기와 같은 결과들을 종합하면 이들은 서로 모순되는 결과를 가지면서도 어느것이나 재료의 피로거동에 대하여 결함은 중요한 역할을 하고 있다는 공통적인 특징을 알 수 있다. 피로거동은 결함이나 개재물의 인자에 따라서 다양하고, 이것이 피로파괴 거동에 미치는 영향은 매우 복잡함을 예측할 수 있다.

그러나 어떠한 결함에 의하여 어느정도 영향을 미치는가에 대해서는 아직 정량적인 지적이 없고 피로강도의 관점에서 결함이 갖는 의미가 규명되어 있지 않으므로 단편적인 것이라고 생각된다.

이상과 같은 연구 결과들을 살펴보면

1) 자연결함을 대상으로 하는 경우 실험의 재현성이 없다는 것과,

2) 인공미소 결함의 경우 자연결함(크기, 형상, 종류)와 같은 미소인공 결함의 가공이 불가능하고,  
3) 미소결함의 경우 금속조직적 인자의 영향으로 탄성론적 응력해석의 적용이 곤란하다는 것으로 인하여 동일된 견해가 없었다고 생각된다.

이와같은 결함이 피로강도 및 피로거동에 어떻게 기여하느냐를 분명히 하기 위해서는 자연결함과 인공결함이 실제로 형상, 크기, 종류 등이 다르다 하여도 이것이 갖는 역학적 인자만을 고려하면 인공미소 결함을 갖는 결함제의 피로파괴 거동은 결함의 기하학적인 형상의 인자만으로 취급이 가능하다.

그러므로 본 연구에서는 평활재와 노치재에 미소원공을 가공하고, 크기는 인위적으로 가공 가능한 최소의 지름을 갖는 범위에서 4종류( $d=50mm$ ,  $d=60mm$ ,  $d=100mm$ ,  $d=300mm$ )를 선택하고 미소결함의 크기가 갖는 역학적 인자를 바탕으로 피로파괴 거동에 대한 결함의 의미를 분명히 하고자 한다.

## 2. 실험재료 및 시험방법

실험에 사용한 재료는 SM15C압연 환봉재이고 화학성분은 Table 1과 같다. SM15C재의 소재는

Table 1 Chemical composition of specimen

Test piece	Composition (wt %)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Mild steel	0.17	0.12	0.53	0.01	0.01	0.18	0.23	0.13	0.14

Table 2 Mechanical properties of specimen

Test piece	Tensile strength <sup>1)</sup> ( $kgf/mm^2$ )	Elongation (%)	Reduction of area(%)	Hardness of Hv for 100gr	Dia. of average grain size <sup>2)</sup> $\phi(mm)$	Heat treatment condition
Mild steel	46.2	36.4	11.8	151	0.025	900°C 1hr air cooling

1) KS B 0801 Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials

2) KS D 0209 Determination of Ferrite Grain Size

압연 그대로의 것과 풀림 열처리한 것을 준비하였고, 열처리 조건과 기계적 성질을 Table 1에 표시하였다. 시험편의 모양 및 치수는 Fig.1과 같고,

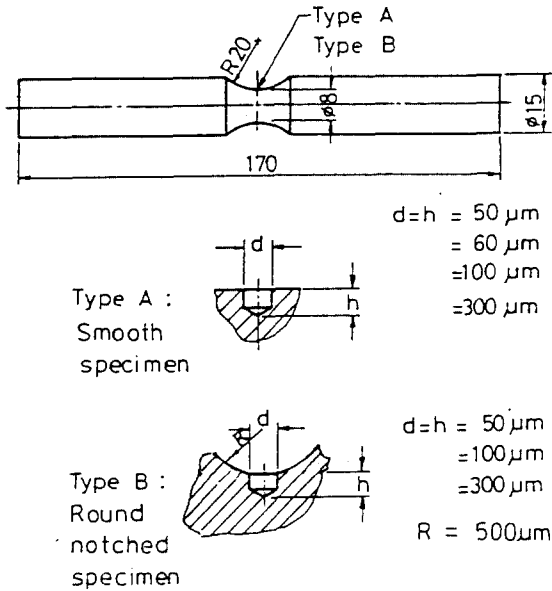


Fig. 1 Geometries of fatigue test specimen

평활재(TypeA)와 노치재(TypeB)에 도입한 인공미소 결함의 크기는 50mm, 60mm, 100mm, 300mm의 4종류이다. 미소구멍의 가공은 미소드릴을 사용하여 지름과 깊이를 같게하여 평활부의 표면과 노치재의 곡률최저부에 각각 가공하였다. 그후 시험편의 표면은 크랙의 발생과 관찰을 용이하게 할 목적으로 전해 연마하였다. 또한 시험편의 모양중 Type A는 평활부에 인공결함이 존재하는 경우이고, Type B는 라운드 노치의 곡률 저부에 인공결함이 존재하는 경우로서 결함 주위의 응력장의 특성과 피로한도의 문제를 검토하기 위한 것이다. 피로한도의 결정은 0.5kgf/mm<sup>2</sup>의 응력레벨로 up-down method에 의하였고, 결함으로 인한 단면계수의 저하정도는 미소하므로 무시하고 공칭응력으로 표시하였다.

실험에 사용한 시험기는 오노형 회전굽힘 피로 시험기(Ono's type rotary bending fatigue tester)로서 최대용량은 10kgf·m, 3,400rpm이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 결함의 크기와 피로강도

표면미소결함을 갖는 평활재인 HN재와 round notch의 곡률저부에 표면미소결함을 갖는 RHN재의 S-N 곡선은 각각 Fig.2 및 Fig.3과 같다. 유

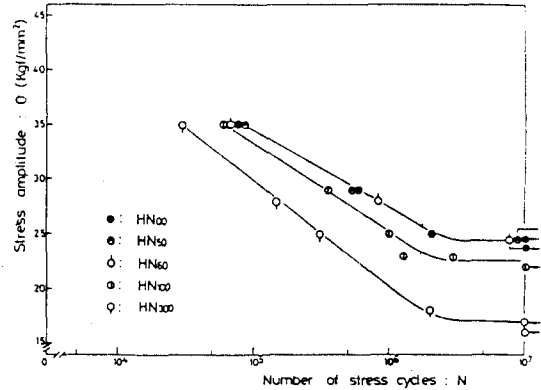


Fig. 2 S-N Curve of HN series

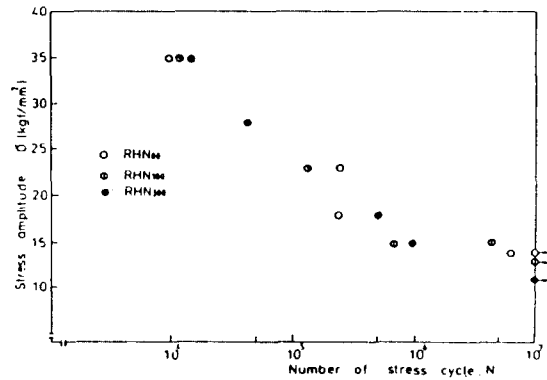


Fig. 3 S-N Curve of RHN series

한의 피로수명 영역에서 피로강도에 대한 결함의 영향은 HN재의 경우 Fig.2에서 알 수 있듯이 결함의 크기의 관점에서 응력레벨이 높을수록 작고, 피로한도에 가까워질수록 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig.4는 피로한도에 대한 영향을 표시한 것이다. 전보<sup>8)</sup>에서 이미 보고한 바와 같이 평활재의 표면에 결함이 있는 HN재의 경우나 라운드 노치의 곡률 저부 즉, 응력집중부에 결함이 존재하는 RHN재의 경우 모두 결함의 치수가 어느정도 작게되면

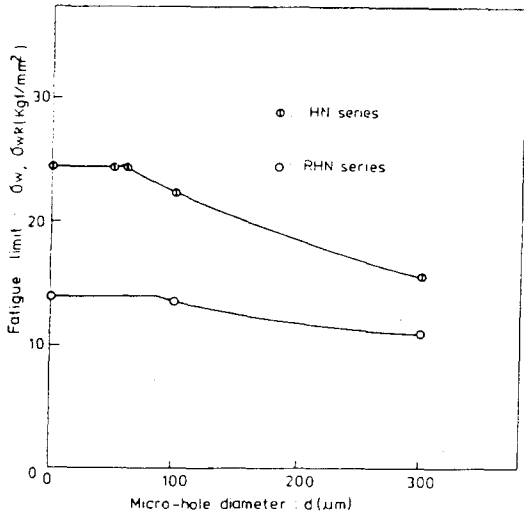


Fig. 4 Relation between the micro-hole diameter and its fatigue limit

피로한도는 점차 증가하여 인공결함이 없는 평활재의 피로한도에 접근하게 되고, 피로한도가 저하되지 않는 한계결함의 크기가 존재한다. 따라서 HN재의 경우 인공결함이 없는 평활재라 하더라도 이것은 한계결함의 크기<sup>8), 13)</sup>에 상응하는 자연적 결함의 크기(조직학적 결함, 개재물 등)을 갖는 결함재이다. 표면인공결함의 크기가 피로한도 거동에 미치는 영향은 Fig. 5에서 알 수 있듯이 한계결함의

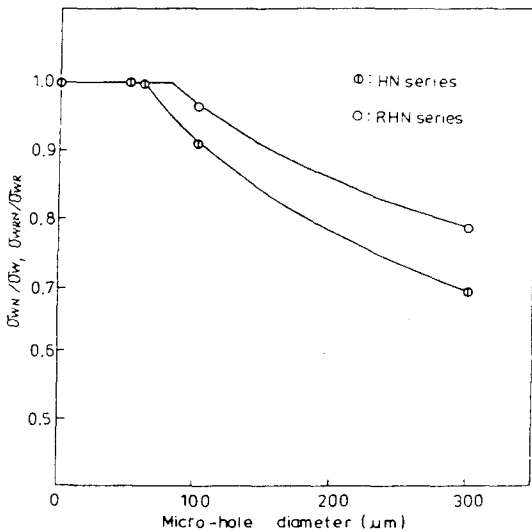


Fig. 5 Relation between the micro-hole diameter and its fatigue limit ratio

크기가 HN재의 크기( $d_c$ )보다 RHN재의 것( $d_c$ )이 크고, 또  $d > d_c$ 인 범위에서 동일한 결함의 크기를 기준으로 볼때 응력비  $\{\sigma_{WN} / \sigma_W : \text{HN재의 평활재의 피로한도}(\sigma_W) \text{와 결함재의 피로한도}(\sigma_{WN}), \sigma_{WRN} / \sigma_{WR} : \text{RHN재의 평활재의 피로한도}(\sigma_{WR}) \text{와 결함재의 피로한도}(\sigma_{WRN})\}$ 는 HN재의 것( $\sigma_{WN} / \sigma_W$ )에 비하여 RHN재의 쪽( $\sigma_{WRN} / \sigma_{WR}$ )이 크다는 것이다. 즉 회전굽힘 응력하에서 응력집중부에 결함이 존재하는 경우가 평활재의 표면결함이 존재하는 경우보다 피로한도의 저하에 대한 영향이 적고, 안전축에 있음을 알 수 있다. 이러한 점들을 분명히 할 목적으로 결함의 크기를 기준으로 HN재와 RHN재의 피로한도의 비와 결함의 크기와의 관계를 표시한 것이 Fig. 6이다. 여기서  $\sigma_{WR} / \sigma_W$ 는 응력집중부에 존재하는 결함의 크기가 점차 작아짐에 따라서 그것의 영향은 작아지고 그것의 크기가 0인 경우는 라운드 노치재의 노치계수( $\sigma_{WR} / \sigma_W$ )가 된다.

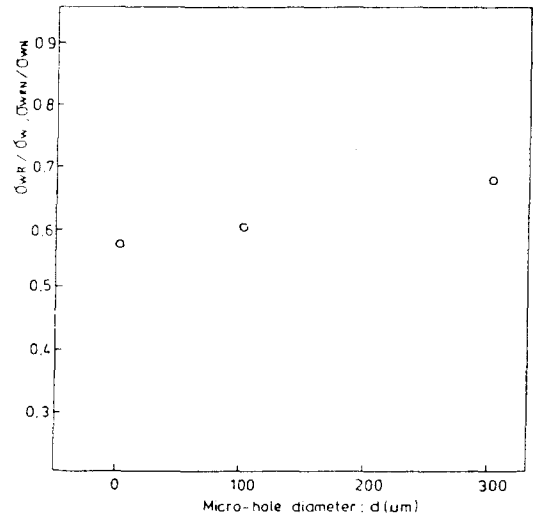


Fig. 6 Effect of micro-hole size under stress concentration

이와같은 결과는 평활재를 결함재라고 간주하면 라운드노치의 곡률저부에 존재하는 결정립 크기 정도의 조직학적 결함을 내포하는 상태가 된다는 점에서 이해될 수 있다. 그러나 같은 결함의 크기가 응력집중부에 존재할 때에 비하여 그 영향이 작다는 것은 현재의 단계에서는 두개의 인접하는 결함이 존재할 때의 간섭효과<sup>11)</sup>와 응력집중효과 및 라운드노치의 곡률저부의 제한된 면적에 자연적

결합이 존재할 수 있는 확률이 적다는 것 등을 들 수 있다. 결합의 크기(d)가 한계결합(dc)보다 큰 영역에서 피로한도가 저하하는 것은 합리적이지 못하다. 따라서 이와 관련하여 평활재에서 허용되는 정류크랙의 최대크기와 이것의 표면에 존재하는 결합의 크기와 결합선단의 정류 크랙의 거동을 규명하는 것은 중요하다.

3.2 피로한도에서의 정류크랙 거동

탄소강의 피로한도는 크랙이 발생하지 않는 한계응력이 아니라 발생된 크랙이 전파를 정지하는 한계응력이다. Fig. 7은 이와같은 관점에서 Fig. 2 및 Fig. 3의 피로한도에서 관찰된 정류크랙의 일례를 표시한 것이다. Fig. 7의 (a)는 자연결합의 주위에 발생된 정류크랙의 예이고, (b)는 한계결합보다 작은 인공결합 선단에 발생된 인공결합 선단에 발생된 정류크랙이며, (c)는 한계결합보다 큰 인공결합 선단에 발생된 크랙의 예이다. 여기서 어느 것이나 크랙의 발생거동은 결합을 중심으로 반드시 대칭적인 거동을 하지 않음이 분명하다. 따라서 비교적 경도치가 낮은 저탄소강재는 조직학적 결합을 고려하면 결합선단의 응력장은 이들의 영향으로 특이한 응력장이 형성될 것이 예상된다. 따라서 결합선단에 발생된 비대칭성의 관점에서 결합의 크기에 무관하게 미소결합은 응력집중원으로서 피로크랙 발생의 의미만을 갖는다고 생각된다.

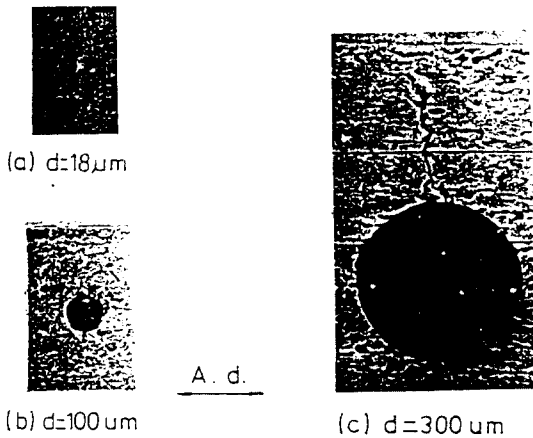


Fig. 7 Illustration of nonpropagating crack around micro-hole under fatigue limit( $N=10^7$ )  
A.d. : Axial direction

Fig. 8은 이상과 같은 관점에서 인공결합의 크기와 Fig. 7과 같이 피로한도에서 관찰된 결합선단에 발생된 최대정류크랙을 표시한 것이다. 여기서 결합(d)과 결합선단에서의 정류크랙(l)은  $l=2d$ 의 관계가 있고, 전술한 한계결합(dc)은 평활재의 피로한도의 저하에 영향을 주지않고 최종파괴를 가져오는 결합의 최대크기(d)에 등가인 것이다.

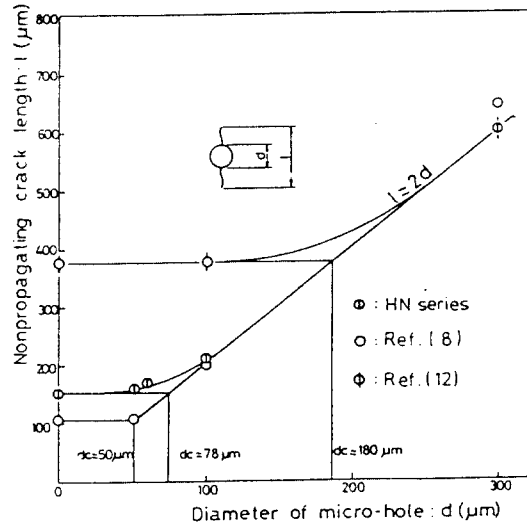


Fig. 8 Relation of micro-hole diameter and nonpropagating crack length

따라서 재료자체가 내포하는 자연적인 결합의 최대크기는 한계결합에 대응하는 것이다. 인공결합이 없는 평활재의 피로한도에서 허용되는 최대정류크랙( $l_c$ )은 한계결합( $d_c$ )을 기점으로 발생된 것이며, 그것의 의미는 한계결합과 같다.

3.3 결합재의 미소크랙거동의 하한계 특성

평활재의 피로한도에서 허용되는 최대정류크랙( $l_c$ )을 정의하는 것, 즉 정류크랙( $l_c$ )이 전파하는 한계응력(하한계 조건  $\Delta\sigma_{th}$ )을 결정하는 것은 매우 어렵다. 따라서 저자들은 Fig. 8에서와 같이 인공결합선단에서 관찰되는 정류크랙을 기준으로 평활재에서 관찰된 정류크랙이 피로한도에 영향을 미치지 않는 결합의 크기에서 관찰된 정류크랙과 동등한 경우 그것의 적합성을 인정하고 최대정류크랙( $l_c$ )으로 하였다. Fig. 9는 이상과 같이 정의한 최대정류크랙과 하한계 응력과의 관계를 표시한 것이고, 구배는  $-1/2$ 의 직선관계가 있고, 크랙의 길이가 크게될

수록  $\Delta\sigma_s$ 는 저하한다. 경사선은  $\Delta\sigma_{th}^{1/2}l = \text{일정}$ 의 관계가 있고,  $\Delta K_{th}$ 가 일정한 것을 의미한다. 크랙 길이가 최대정류크랙보다 작아짐에 따라 서서히 평활재의 피로한도( $\sigma_w$ )에 접근한다.

한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 1987년도 전반기 기초 연구비 지원에 의하여 이루어졌으며 동재단 관계 제위께 감사드립니다.

參 考 文 獻

- 1) 西谷, “材料の 缺陷と 強さ”, 機械 の研究, Vol. 30, No. 1, pp. 31~38, 1978
- 2) 宋森弘, 國尾武, “高強度鋼のマイクロ領域における疲労き裂生成過程”, 日本機械學會論文集 第40卷 第334號 pp. 1503~1510, 1970
- 3) Brooksank, D. and K. W. Andrews, “Stress Fields around Inclusion and their Relation to Mechanical Properties”, Journal Iron & Steel Inst., 210-4 Series pp. 246~255, 1972
- 4) Trantina, G. G. and M. Barishpolsky, “Elastic-Plastic Analysis of Small Defect-void and Inclusion”, Engng. Fracture Mech., Vol. 20, No. 1, pp. 1~10, 1984
- 5) Goodier, J. N., “Concentration of Stress around Spherical and Cylindrical Inclusion and Flaws”, Applied Mech., APM 55-6, pp. 39~44
- 6) Sadosky, M. A. and E. Sternberg, “Stress Concentration around an Ellipsoidal Cavity in an Infinite Body under Arbitrary Plane Stress Perpendicular to the Axis of Revolution of Cavity”, J. of Applied Mech., A, pp. 191~201, 1947
- 7) 村上, 原藤, “疲労強度におよぼす微小缺陷の影響評價法”, 日本機械學會論文集, 第49卷, 第438號, pp. 127~136, 1983
- 8) 宋森弘, 吳煥燮, “表面缺陷에서 發生하는 疲労 크랙舉動(저탄소강재를 중심으로)”, 大韓機械學會論文集, 第9卷, 第2號, pp. 150~157, 1985
- 9) 齊藤, 中原, “半球 ビット有する半無限板の一軸引張り”, 日本機械學會論文集, 第33卷, 第247號, pp. 343~350, 1967
- 10) Chen, Y. Z., “Solutions of Multiple Crack Problem of Circular Hole by Using Fredholm In-

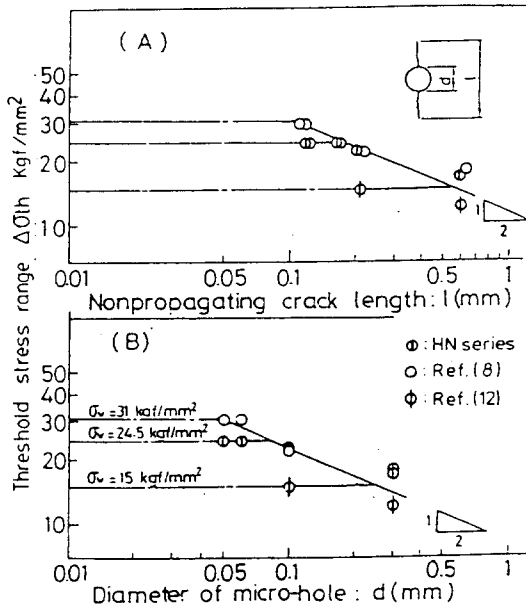


Fig. 9 Dependence of the fatigue threshold stress A) nonpropagating crack length and B) diameter of microhole

4. 결 론

결합을 갖는 탄소강재의 피로파괴거동을 분명히 하기 위하여 평활재의 표면 및 노치재의 곡률저부에 인공미소결합을 가공하고 최전극응력하에서 피로강도와 정류크랙거동에 대하여 고찰하였다. 중요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 결합의 크기가 평활재 및 노치재의 피로강도에 미치는 영향은 작지만 노치재에 비하여 평활재 쪽이 작다.
- 2) 결합선단에서 발생하는 정류크랙은 미소결합주위에서 발생된다. 이때 결합은 응력집중원의 의미만 갖는다.
- 3) 크랙성장의 하한계조건은 정류크랙의 길이( $l$ )가 최대정류크랙( $l_c$ )보다 큰 영역에서  $\Delta K_{th}$ 는 일정이고, 이 영역에서는 평활재의 피로한도에 접근

tegral Equation Approach”, Int. J. of Fracture,  
Vol. 25, pp. 155~168, 1984

- 11) 宋森弘, 吳煥燮, “微小圓孔주위의 疲勞크랙發  
生傳播舉動에 관한 研究”, 海洋工學會誌, 第1

卷, 第2號, pp. 74~82, 1987

- 12) 吳煥燮, “疲勞強度에 대한 表面微小 缺陷의 影  
響”, 自動車工學會誌, 第11卷, 第1號, 1989

★ 뉴 스 ★

국제 학술대회 참가 안내

제1회 내부유동의 실험 및 전산 공기열역학 국제 심포지움  
- 1st International Symposium on Experimental  
and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows -

주 관 : Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences

분 야 : - Flow in fans, compressors, turbines and pumps.

- Flow in channels, pipes, intakes and nozzles.

- Transonic flow, shock boundary layer interaction.

- Viscous flow, turbulent flow, engineering turbulence models.

- Unsteady flow, aerodynamic elasticity, aerodynamic acoustics.

- Multi-phase flow, non-equilibrium reacting flow.

- Flow measurement and experimental techniques.

일 시 : 1990년 7월 7일~11일(5일간)

장 소 : 중국 북경(Beijing, China)

※ 기타 자세한 내용은 한국과학기술원 기계공학연구부 김광호 박사께 문의바람.

연락전화번호 : (02)967-8801 교환 4679번