

알루미늄 합금재의 피로크랙 전파거동에 미치는 미소원공결함

김건호† · 이호연*

(원고접수일 : 2008년 7월 21일, 원고수정일 : 2008년 9월 2일, 심사완료일 : 2008년 9월 29일)

The Influence of the Small Circular Hole Defect on the Fatigue Crack Propagation Behavior in Aluminum Alloys

G.H.Kim† · H. Y. Lee*

Abstract : We carried out fatigue testing with materials of aluminum alloy(7075-T6, 2024-T4) by rotary bending fatigue tester. We investigated fatigue limit, fatigue crack initiation, fatigue crack propagation behavior and possibility of fatigue life prediction to the different small circular hole defect. The summarized result are as follows : Fatigue limit of the smooth specimens were related tensile strength and yield strength. In case of more large applied stress and small circular hole crack defect, the fatigue crack was grown rapidly. The fatigue crack propagation behavior proceed at according to inclusion. Fatigue crack propagation ratio appeared instability and retardation phenomenon in the first half of fatigue life but appeared stability and replied in the latter half. On other hand, this experimental data of the materials are appeared fatigue life predictability.

Key words : Small circular hole defect(미소원공결함), Fatigue limit(피로한도), Fatigue crack propagation behavior(피로크랙전파거동), Fatigue crack length(피로크랙길이), Fatigue crack life ratio(피로파단수명비), Fatigue life(피로수명)

1. 서 론

각종 기계 및 구조물의 파괴 중 피로파괴로 인한 사고가 약 60~90%에 이른다고 보고 되고 있다^[1]. 더욱이 이러한 사고는 사전 예기하지 못한 사고로 큰 피해를 입게 된다. 기계 및 구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 설계 시 엄밀한 파괴역학적 해석은 물론, 피로파괴역학적 해석과 실험을 통한 안정성 평가 또한 필수적이다.

최근 기계 및 구조물은 대형화, 고속화, 경량화의 추세에 따라, 비강도가 큰 알루미늄 합금의 사용이 급격히 증가하고 있다^[2]. 각종 기계 및 구조물에 사용되는 재료는 제조과정에서 생기는 자연결함과 가공 상 생기는 인공결함이 있다. 이에 실존 가능한 미소 표면결함의 크기에 따른 피로균열 발생과 성장특성 및 피로수명에 관한 기초 자료들이 피로파괴의 관점에서 피로설계에 요구되고 있다. 이에 대한 지금까지의 연구동향을 살펴보면, 여

† 교신저자(군산대학교 동력기계시스템공학전공, E-mail:ghkim@kunsan.ac.kr, Tel: 063)469-1846)

* 군산대학교 일반대학원

러 가지 크기의 미소 인공결함을 사용하여 피로크랙의 발생과 성장거동을 프랙토그래피 연구와 더불어 미소 슬립과 초기크랙의 발생 시기, 주 크랙의 전파 거동 등에 관해서 연구 보고되고 있다^[3)-(7)]. 또한 이러한 주 크랙의 전파 거동을 정량화하여 피로수명 예측의 가능성을 연구 보고한 것도 있다^[8)-(9)].

본 연구에서는 회전굽힘 피로시험을 통하여 알루미늄 합금재인 7075-T6 및 2024-T4재에 미소원공결함을 가공하여 결함의 크기에 따른 피로균열 발생 및 성장 거동 및 수명예측가능성을 고찰하였다.

2. 시험재료 및 실험방법

본 실험에 사용한 재료는 풀립 열처리한 알루미늄합금으로서 7075-T6 및 2024-T4재(이하에서 7075-T6재를 A재 및 2024-T4재를 B재로 각각 명명함)이며, 그 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table.1 및 2와 같다.

Table 1 Chemical composition of materials (wt. %)

| Element Material | Cu | Mg | Cr | Fe | Zn | Al |
|---------------------|-----|-----|------|-----|------|---------|
| A(Al7075-T6) | 1.2 | 2.1 | 0.18 | 0.5 | 5.1 | Remain. |
| B(Al2024-T4) | 3.8 | 1.2 | 0.1 | 0.5 | 0.25 | Remain. |

Table 2 Mechanical properties of materials

| Property Material | Tensile strength (MPa) | Yield strength (MPa) | Elongation (%) | Vickers hardness (Hv) |
|----------------------|------------------------|----------------------|----------------|-----------------------|
| A(Al7075-T6) | 572 | 503 | 11 | 175 |
| B(Al2024-T4) | 469 | 324 | 20 | 137 |

시험편 가공은 CNC선반으로 가공한 후 피로크랙 전파 거동을 관찰하기 위해 시험편 평활부를 사포지 #2000까지 연마한 후 산화크롬 분말을 사용하여 랩 가공하였다.

평활부의 전 표면에서 발생하는 초기 미시크랙의 발생 및 성장에 대한 관찰은 매우 어려운 문제이기 때문에 본 실험에서는 이를 시험편 평활부 중앙에 미소 원공노치를 인위적으로 가공하였으며, 이의

미소원공 크기를 달리하여 피로크랙발생 및 전파거동을 시험고찰 하였다. 가공된 평활부 표면의 미시크랙의 발생 및 전파과정을 관찰하기 위하여 불산(0.5ml)과 증류수(99.5ml)를 혼합하여 만든 부식액으로 부식시켰다. 시험편의 형상은 Fig.1과 같다.

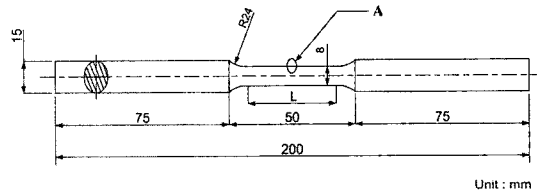
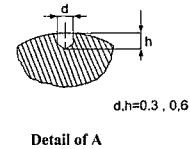


Fig. 1 Geometry of fatigue test specimen

본 실험에 사용된 시험기는 오노형 회전굽힘피로 시험기(Ono's type rotary bending fatigue testing machine)로서 최대용량은 $10kg_f \cdot m$, 3000rpm이며, 본 실험의 회전속도는 1850rpm으로 하였다. 표면크랙길이 측정은 이동식 현미경에 접안 이동측미계(Micrometer eyepiece Model: OSM-4)를 부착하여 일정 사이클마다 시험기를 정지하여 측정하였으며, 측정을 위한 정지 시간은 3분 내외였으며 본 실험에서는 시효현상의 영향이 없는 것으로 생각된다^[10)].

피로크랙 전진길이는 Fig. 2와 같은 미소원공결함을 포함한 피로크랙길이를 a로 하였다.

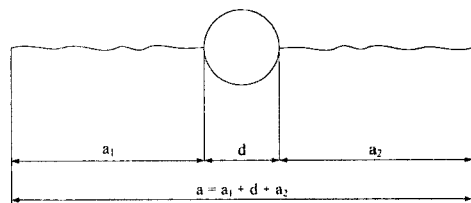
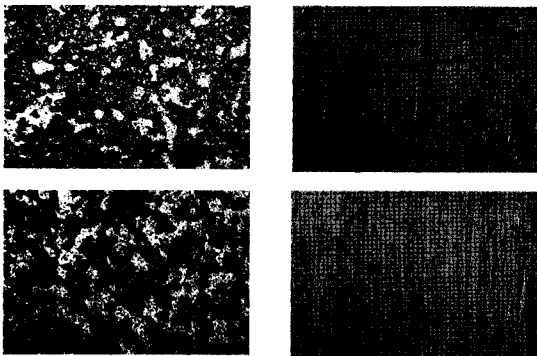


Fig. 2 Definition of crack length measurement

피로시험 부하응력은 A재의 평활재의 피로한도 186.9MPa에 대해 104%인 196.96MPa 및 93.9%인 175.46MPa로 두 하중을 설정하여 시험하였다. 시험 부하하중을 두 재료 A 및 B재의 피로한도를 기준하여 각각 설정하여야 하나, 동일하게 적용한 것은 피로시험기의 구조상 시험 부하조건을 세분하여 시험하기 어려운 관계로 A재를 기준으로 하여 적용하였다.

미소원공의 크기는 0.3mm 및 0.6mm에 대해 부하하중을 196.96MPa 및 175.46MPa를 각각 적용하여 피로크랙전파거동을 시험 조사하였다. 여기서 미소원공크기에 따른 응력집중계수는 평활면의 단면적에 비해 극히 작고, 같은 형상임으로 노치라 하기 보다는 미소원공결함크기로서 간주하고 이를 고려하지 않았다. Photo.1은 시험편 A재 및 B재의 축 및 단면 방향의 조직사진이다. 이 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이 A 및 B재 각각의 주성분인 화합물 및 개재물의 분포가 거의 비슷한 양상을 나타내고 있다.



cross section axial direction
Photo. 1 Micro-structures of crystal grains in material A(upper) and B(lower)

3. 결과 및 고찰

3.1 S-N곡선의 특성

Fig. 3은 A 및 B재의 평활재의 피로한도 실험으로부터 얻어진 결과를 나타낸 S-N선도이다.

이때 피로한도는 $N = 1 \times 10^7$ 사이클까지 시험편이 파단 되지 않을 때의 응력으로 하였다. 그림

에 나타난 바와 같이 평활재의 피로한도는 A 및 B재가 각각 186.9, 149.0 MPa로서 A재가 B재보다 약 125%가 높게 나타났다. 이러한 결과는 인장강도 및 항복강도의 크기에 영향이 있는 것으로 사료된다^[4].

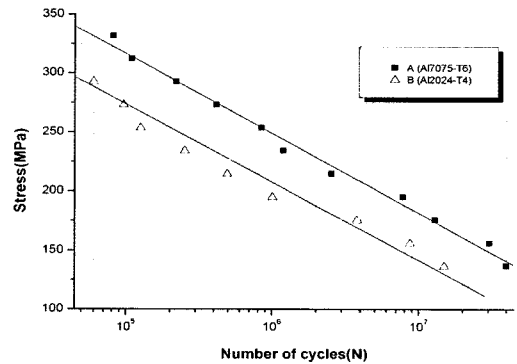


Fig. 3 S-N Curves in material A and B

3.2 미소원공 크기와 피로크랙 발생의 관계

Fig. 4 및 5는 A 및 B재의 피로크랙 길이와 피로 사이클의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 초기미시크랙 발생은 미소원공의 크기 또는 시험부하 하중의 크기와 관계없이 거의 같은 시기이다. 피로크랙 성장 거동은 1×10^5 사이클에서 시험부하 하중이 높고 미소원공이 큰 쪽에서 약 125% 빠르게 진전하는 것으로 나타났다.

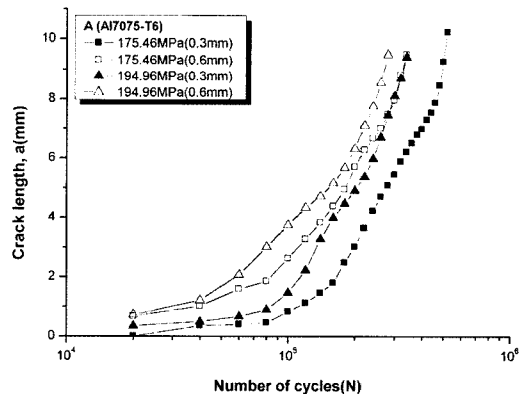


Fig. 4 Effect of fatigue crack length and number of cycles in material A

Photo. 2 및 3은 A 및 B재의 피로크랙 발생 및 피로크랙 전파 거동을 나타낸 사진이다. 발생한 미시크랙은 주 크랙 주변에 미시크랙이 발생하지 않고 피로크랙 진전방향에 있는 개재물을 따라 단일 크랙으로 계속 성장하였다.

이러한 피로크랙의 발생과 전파 거동은 연성과 인성을 갖는 재료로서 인근 개재물 사이의 간섭의 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다^[5].

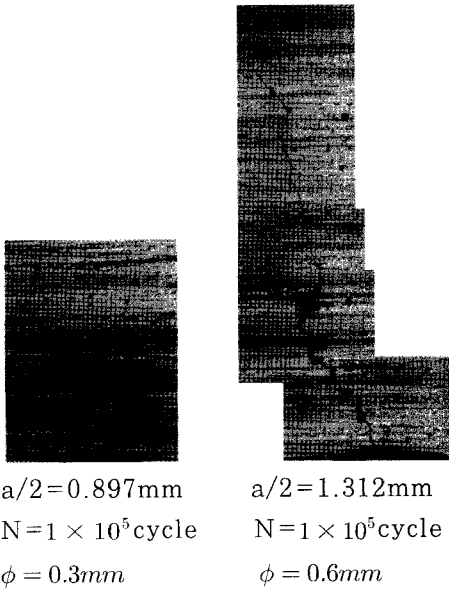


Photo. 2 Effect of fatigue crack length and number of cycles in material A ($\sigma_a = 175.46MPa$)

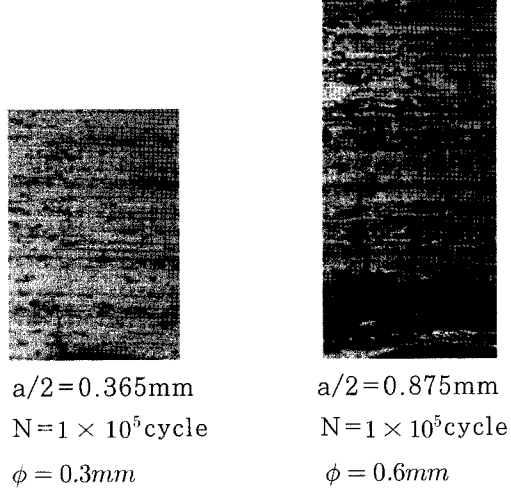


Photo. 3 Effect of fatigue crack length and number of cycles in material B ($\sigma_a = 175.46MPa$)

3.3 피로크랙 길이와 파단수명비의 관계

Fig. 6은 A재의 피로크랙 길이와 피로 수명비를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 피로 수명비 약 0.5이하에서는 미소원공 결함이 크고 시험부하 하중이 높은 쪽에서 보다 피로크랙 길이가 크게 성장하나, 그 이상에서는 거의 같은 크기로 성장하는 것으로 나타내었다. 이러한 현상은 미소원공 결함 및 시험부하 하중의 크기에 따른 노치현상의 영향을 두드러지게 나타내고 있음을 알 수 있다^[6].

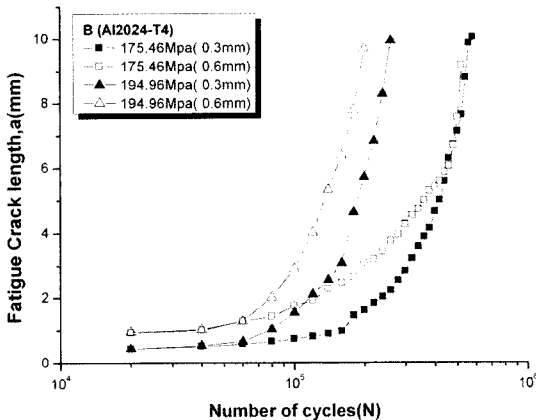


Fig. 5 Effect of fatigue crack length and number of cycles in material B

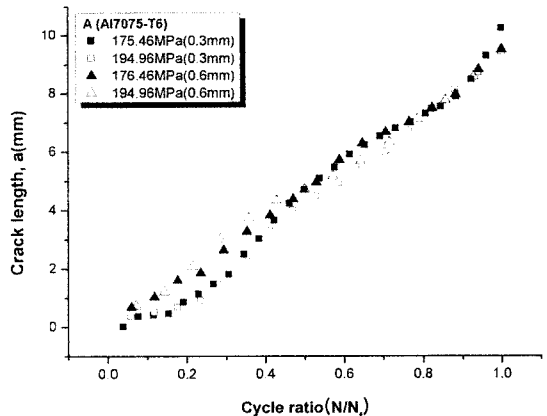


Fig. 6 The relation between fatigue crack length and fatigue life ratio in material A

Fig. 7은 B재의 피로크랙길이와 피로수명비의 관계를 나타낸 것으로, Fig. 6의 A재와 거의 같은 양상을 보이고 있으나 피로수명비 약 0.6 이위에서 나타내었다. 이것은 재료의 인장강도 및 항복강도가 크기 때문인 것으로 생각된다.

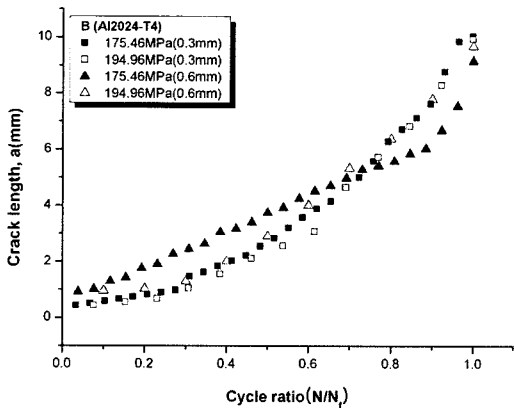


Fig. 7 The relation between crack length and fatigue life ratio in material B

3.4 미소원공결합의 크기에 따른 균열성장속도

Fig. 8은 A재의 피로크랙 전파속도와 피로 수명비와의 관계를 나타낸 그림이다. 이 그림에 의하면 피로 수명비 약 50%이내에서는 피로크랙 전파속도가 감소하면서 정류하는 현상을 나타내고 있으며, 그 이상에서는 선형적으로 증가하는 현상을 나타내고 있다. 한편 미소원공 결합이 큰 쪽에서 작은 쪽보다 전파속도가 빠른 것을 나타내고 있다.

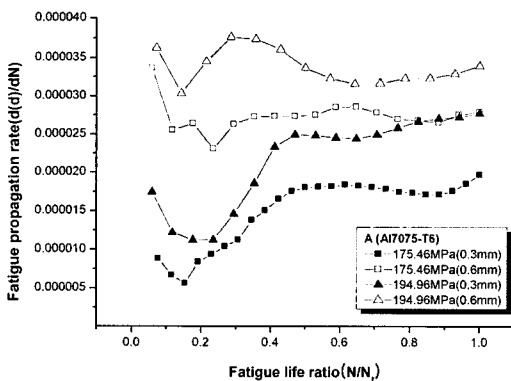


Fig. 8 The relation between fatigue propagation rate and fatigue life ratio in material A

이러한 현상은 피로수명 전반에는 미소원공 결합의 노치현상으로서 초기 미시크랙의 발생과 성장은 불안정한 과정을 나타내며, 그 후반에서는 안정된 선형적 피로크랙 전파 거동의 양상을 나타내고 있다⁽⁷⁾.

Fig. 9는 B재의 피로크랙 전파 속도와 피로수명비의 관계를 나타낸 것으로 Fig.8의 A재와 유사한 양상으로서 약 40% 내외에서 나타내고 있다. 한편 높은 부하하중에서 전파 속도가 빠른 것은 재료의 인장강도 및 항복강도가 낮은 영향 때문인 것으로 생각된다.

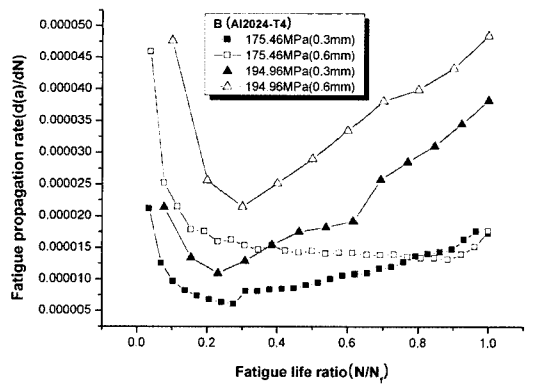


Fig. 9 The relation between fatigue propagation rate and fatigue life ratio in material B

3.5 피로크랙 길이와 피로파단 수명비의 관계

니시타니⁽⁸⁾ 및 김⁽⁹⁾ 등은 피로수명 예측을 정량적으로 나타내기 위해 피로크랙길이(a)와 피로 수명비(N/N_f)의 관계를 $\log a = A + B(N/N_f)$ 의 관계식으로 나타낼 수 있음을 연구 보고하였다.

Fig.10의 A재 및 11의 B재는 피로크랙길이를 대수로한 값과 피로 수명비의 관계를 나타낸 그림이다. 앞 절에서 고찰한 바와 같이 본 실험에서 A 및 B재 모두가 피로수명비 약 50%이내에서는 불안정 성장으로 피로수명 예측이 불가능 하나 피로 수명비 약 50%이상에서는 가능성을 보이고 있다. 따라서 본 실험에서 얻은 피로수명비 50%이상의 자료를 정리하여 Table 3과 같이 재료상수 A 및 B를 구하였다. A재에 있어서는 재료상수 A는 0.3412~0.4078 B는 0.5676~0.6365의 범위를

갖고, B재에 있어서는 재료상수 A는-0.1951~0.2148, B는 0.6860~1.2285의 넓은 범위의 값

을 갖는다. 따라서 A재가 B재보다 재료상수의 범위가 작은 값으로 미소원공결합의 크기와 부하응력의 정도에 크게 관계없이 좁은 범위 내에서 수명에 측이 보다 정확성을 갖고 있다는 것을 알 수 있다. 김^[9]이 보고한 연구와 유사하며 본 재료에 대해서도 피로수명 예측이 적용이 가능한 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2008년 군산대학교 수산과학연구소 학술연구지원에 의하여 연구되었음.

4. 결 론

본 연구는 알루미늄 합금 두 재료에 있어서 미소원공 결합의 크기가 다른 경우를 회전굽힘피로시험을 수행하여 피로한도, 미시크랙 발생, 피로크랙 전파 및 피로수명 예측 가능성 등을 검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

본 시험 재료인 평활재의 피로강도는 인장강도 및 항복강도와 상관관계가 있으며, 미소원공 결합과 시험하중이 큰 쪽에서 피로크랙이 보다 빠르게 성장하였으며, 피로크랙 전파 거동은 개재물을 따라서 진전하였다. 피로크랙 전파속도는 피로수명 중반까지 피로크랙 성장은 불안정하고 정류하는 현상을 나타내었으며, 그 후에는 안정된 성장으로 속도가 점차적으로 빠르게 진전하였다. 이러한 현상은 피로수명 중반까지 미소원공 결합이 크고, 시험 부하응력이 큰 쪽에서 노치현상의 영향이 두드러지게 나타났으나 그 후에는 노치현상이 소멸되는 것으로 나타났다. 한편 본 시험자료는 피로크랙전파 성장거동에 대한 수명예측이 가능함을 나타내고 있다.

참고문헌

[1] H.O. Fuchs and R.I. Stephens, "Metal fatigue in engineering", John Wiley and Sons, inc. pp.1-3, 1980.
 [2] William D and Callister, Jr, "Materials

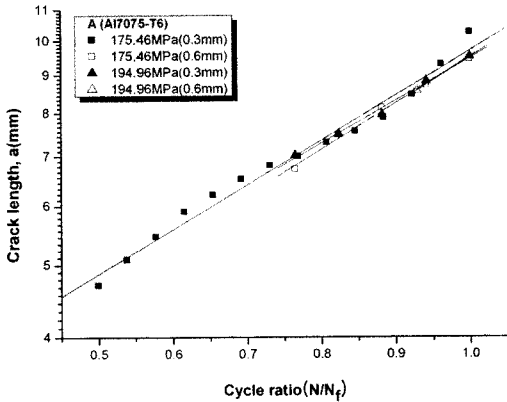


Fig. 10 The relation between fatigue crack length and fatigue life ratio in material A

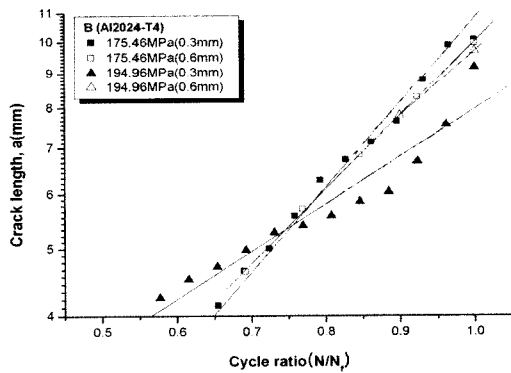


Fig. 11 The relation between fatigue crack length and fatigue life ratio in material B

Table 3 Material constants of equation in material A and B

| Material | Applied stress (MPa) | Circular hole (mm) | constants | |
|------------------|----------------------|--------------------|-----------|--------|
| | | | A | B |
| A (Al7075-T4) | 175.46 | 0.3 | 0.4078 | 0.5676 |
| | | 0.6 | 0.3412 | 0.6365 |
| | 194.96 | 0.3 | 0.3885 | 0.5975 |
| | | 0.6 | 0.3624 | 0.6142 |
| B (Al7075-T6) | 175.46 | 0.3 | -0.1951 | 1.2285 |
| | | 0.6 | -0.0723 | 1.0714 |
| | 194.96 | 0.3 | 0.2148 | 0.6860 |
| | | 0.6 | 0.0425 | 0.9434 |

Structure and Engineering an Introduction(6th Ed)", John Wiley and Sons, Inc., pp. 347-349, 2003.

- [3] R. Koterazawa, M. Mori, T. Matsui and D. Shimo, "Fractographic Study of Fatigue Crack Propagation", Transactions of the ASME, pp. 202-212, 1973.
- [4] 김정규, 박병훈, 류석현, "7075-T73 알루미늄 합금의 피로균열진전거동 및 지연현상에 미치는 영향 대한기계학회논문집 제13권 제4호, pp. 670-679, 1989.
- [5] 송삼홍, 배준수, "두 개의 미소원공결합에서의 피로크랙발생과 전파에 관한 연구", 대한기계학회논문집(A) 제21권 제5호, pp. 842-849, 1997.
- [6] C. Makabe and D. F. Socie, "Branching and Propagation Behavior of Fatigue Crack in Pre-cracked Specimen", J. Soc. Mat. Sic. Japan, Vol. 50, No.12, pp. 1329-1334, 2001.
- [7] C. Makabe and D. F. Socie, T. Sueyoshi and T. Uehara, "Mechanism of Shear Mode Fatigue Crack Growth in Pure Aluminum", Journal of the Japan Society of Mechanical Engineering(A), Vol. 70, No. 689, pp. 84-92, 2004.
- [8] 西谷弘信, 森光武則, "小穴付き試験片の回轉曲げ試験による龜裂伝播特性評価", 日本機械學會論文集, 第42卷, 第354号, pp. 328~334, 1976.
- [9] 김건호, "저탄소강재(SM45C)의 피로크랙 전파거동에 미치는 결정립 크기의 영향", 박용기관학회지 제26권 제 1호, pp. 76-82, 2002.
- [10] William D and Callister, Jr, "Materials Structure and Engineering an Introduction(6th Ed)", John Wiley and Sons, Inc., pp. 370-376, 2003.

저 자 소 개



김건호(金健鎬)

1946년 9월 12일생. 1976년 전북대학교 기계공학과 졸업(학사). 1989년 조선대학교 기계공학과 졸업(석사). 1996년 조선대학교 기계공학과 졸업(박사). 2003년 10월 (사)한국박용기관학회 최우수 종합 논문상. 2005년 2월~2006년 2월 일본 고베대학 교환교수. 1979년~현재 군산대학교 해양과학대학 동력기계시스템공학전공 교수



이호연(李浩淵)

1978년 6월 2일생. 2005년 군산대학교 동력기계시스템공학과 졸업(학사) 2008년 군산대학교 해양산업공학과 동력기계시스템공학전공 졸업(석사)