

〈논 문〉

90° 위상차의 이축하중 하에서 Al7075-T651의 부가적 손상에 관한 결정구조 의존성에 관한 연구

이현우* · 오세종**

(1996년 3월 9일 접수)

Additional Damage of Al7075-T651 under 90° Out-of-Phase Biaxial Loading from Crystal Structure Dependence

Hyun-Woo Lee and Se-Jong Oh

Key Words : Damageable Plane(손상가능면), Planar Slip Material(평면슬립재료), Biaxial Non-Proportional Loading(이축 비비례 하중경로), Additional Damage(부가적 손상), Crystal Structure Dependence(결정구조 의존성)

Abstract

Accounting for the additional damages come out from non-proportional loading path effect, material damage according to crystal structure dependence was studied. Microscopic observations of damaged material by SEM(Scanning Electron Microscope) showed crystal structure dependence. Biaxial in-phase loaded specimens showed the slips of same direction, which parallel each other, but biaxial 90° out-of-phase loaded specimens showed multiply crossed slips. S. H. Doong and D. F. Socie reported that wavy/planar or planar slip material showed the increase in the cyclic hardening level during non-proportional cycling. From these results, the additional hardening and non-proportional loading effects were related with slip mechanism, and the slip mechanism was related with crystal structure. In the present study, a damage mechanism which accounts for the non-proportional loading effect from crystal structure dependence was considered and applied to Al7075-T651.

기 호 설 명		
$\Delta\gamma/2$: 전단변형률 진폭	C_{BMK} : BMK 파라미터
$\Delta\varepsilon/2$: 인장변형률 진폭	C_{ELP} : 타원형 파라미터
$\Delta\gamma_i/2$: i 번째 손상가능면에서의 전단변형률 진폭	N_f : 피로수명
$\Delta\varepsilon_i/2$: i 번째 손상가능면에서의 인장변형률 진폭	λ : 변형률비
D_i	: i 번째 손상가능면에서의 피로손상	$\Delta\gamma_A/2, \Delta\gamma_B/2$: A, B, C 손상가능면에서의 변형률 진폭
C_{TRESCA}	: 최대 전단변형률 파라미터	$\Delta\gamma_c/2\Delta\gamma_{max}/2$: 최대 전단변형률
ε_n	: 임계평면에서의 인장변형률	

1. 서 론

*회원, 부산대학교 정밀기계공학과
**회원, 부산대학교 대학원

기하학적으로 복잡한 형상을 가지거나 다자유도의 하중을 받는 기계구조물은 이축이상의 하중상태

에 놓이게 된다. 이와 같이 이축이상의 하중을 받게 되는 경우에 재료의 피로거동은 단축의 경우와 서로 다르다. 그러므로 다축하중 상태 하에서의 피로거동에 관한 많은 연구가 있어 왔다. 특히, 단축이나 이축동위상(in-phase) 하중이 작용하는 경우와 같이 최대 전단변형률의 방향이 고정된 경우에 대하여는 좋은 상관관계를 획득하여 여러 가지 모델 식이 존재한 바 있다.⁽¹⁻³⁾ 그러나 이러한 모델 식은 위상차가 존재하는 다축하중이 가해지는 경우나 비비례 경로하중(non-proportional path load)이 가해지는 경우에 대하여는 효과적인 설명을 제공하지 못하고 있다. 이러한 하중경로효과를 반영하기 위하여 기존의 이축동위상 하중 하에서 잘 적용되는 모델의 여러 가지 수정 식들이 제안되었다.⁽⁴⁾ 또한 Ellyin과 Golos는 변형률 에너지밀도 손상 법칙(strain energy density damage law)에 근거한 다축피로이론을 제안⁽⁵⁾하였으며, 손상의 방향성과 비가역성을 반영하기 위하여 기억 표면(memory surface)의 개념을 도입하여 손상의 비가역성과 가공경화에 의한 부가적인 손상을 설명하려고 시도하였다.⁽⁶⁾

이상에서와 같이 하중경로효과에 따른 부가적인 손상을 반영하기 위해서는 재료 자체가 가지는 방향성과 손상의 비가역성 등을 고려한 포괄적인 손상메카니즘의 제시가 요구된다. Cailletaud는 Austenite stainless steel에 대한 미세구조 관측으로부터 이축동위상 하중 하에서는 주어진 결정립에 대하여 슬립이 동일한 방향으로만 생성되었음을 보여주었다.⁽⁷⁾ 또한 Doong과 Socie는 요동치는 슬립(wavy slip)을 갖는 재료에서는 부가적인 경화가 일어나지 않으며, 평면적인 슬립(planar slip)을 갖는 재료에서만 나타난다고 보고하고 있다.⁽⁸⁾ 이상의 결과로부터 부가적인 경화와 non-proportional 하중효과는 슬립의 메카니즘과 관계하며, 슬립현상은 결정구조에 관계한다. 그러므로 본 연구에서는 결정구조에 따른 하중경로효과를 반영하기 위하여 손상메카니즘을 제시하였으며, Al7075-T651에 대하여 적용하였다.

2. 손상평가

2.1 결정격자구조를 반영한 손상모델

단결정의 재료가 외부로부터 하중을 받는 경우에 결정립 내의 슬립은 결정격자의 밀도가 가장 높은

방향으로 일어난다. 그리고, 결정격자가 밀한 방향은 결정격자구조에 따라 정해진다. 본 연구에 사용된 재료는 Al7075-T651으로 이 재료의 화학적 조성은 Table 1과 같으며 주된 물질의 조성은 Al로써 면심입방구조를 갖는다. 면심입방구조를 갖는 결정의 미끄럼면(glide plane)은 Fig. 1(a)에 나타난 $\triangle ABC$ 면과 같이 4가지가 있으며, 각 면에는 모서리를 따라서 \overline{AB} , \overline{BC} , \overline{CA} 방향의 슬립(slip)이 가능하다. 이때, 본 연구에서 사용된 하중은 이축하중을 사용하고 원통형의 시편에 대하여 실험하였으므로 2차원의 평면에서 관측가능한 슬립선의 종류는 Fig. 1(b)와 같이 4가지가 되며, 그 각도는 0°, 45°, 90°, 135°이다. 본 연구에서 나타난 슬립선들의 종류는 Fig. 1(c)와 같다. 이 재료에 석출상으로 존재하는 또 다른 물질로는 Al_3Mg_2 (면심입방구조)와 Zn, CuZn, $MgZn_2$ (육방격자구조)가 있는데 이들은 재료의 강화에 기여하게 된다.

결정구조의 영향을 고려한 경우의 손상메카니즘

Table 1 Chemical composition(%)

Al	Zn	Mg	Cu	Cr
90.07	5.6	2.5	1.6	0.23

Face Centered Cubic

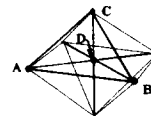


Fig. 1(a) Base material : Aluminium (12 slip system)

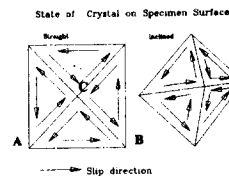


Fig. 1(b) Maximum class of slip lines is 4. (0°, 45°, 90°, 135°)

State of Slip Lines

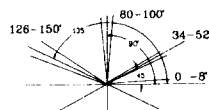


Fig. 1(c) Summary of slip lines (damage lines)

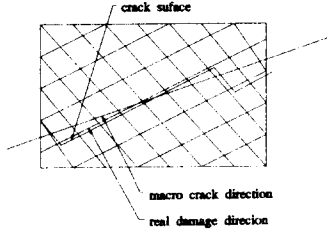


Fig. 2 Crack propagation mechanism of the single crystal

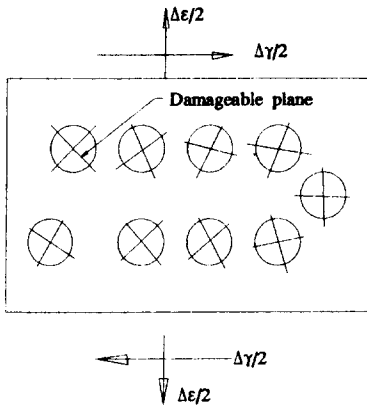


Fig. 3 State of the damageable plane

은 다음의 Fig. 2와 같이 거시적(macroscopic) 균열의 진행은 최대 전단변형률의 방향으로 진행하지만 미시적(microscopic)인 균열의 발생은 결정격자 상의 슬립이 일어나기 쉬운 면으로 일어나게 된다. 그러므로 균열의 실제 표면의 형상은 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 요철을 가지게 된다. 또한, 금속 재료는 Fig. 3과 같이 여러 개의 결정립의 집합체이며, 그 각 결정립의 손상가능방향은 거시적으로 볼때 등방성(isotropic)을 갖지만 미시적(microscopic)인 관점에서는 비 등방성(anisotropic)을 갖는 재료로 가정할 수 있다.

이러한 재료라면, 단방향이나 동위상(in-phase)의 이축하중을 받는 경우에는 어느 방향으로 하중이 작용하더라도 최대 전단변형률의 방향과 손상가능 방향이 일치하는 특정한 결정립이 최대의 손상을 입게 됨으로써 변형률비에 따른 등가변형률 파라미터와 수명 간에 일정한 손상상관관계를 획득할 수 있다. 그러나, 90도의 위상차가 존재하는 경우에는 최대 전단변형률의 방향이 회전함으로써 각각의 손상가능면에 동위상의 이축하중이 작용하는 경우보다 더 큰 전단변형률 진폭이 작용하게 된다.

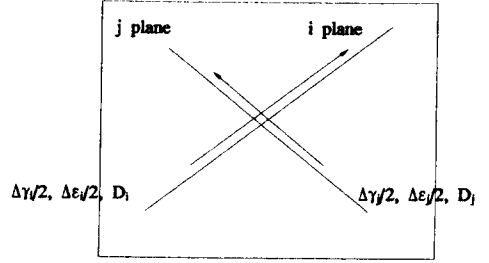


Fig. 4 Shear strain and normal strain component at the damageable plane

결과적으로 재료는 부가적인 손상을 입게 된다는 것이다. 이와 같은 경우에 균열은 손상을 가장 많이 받은 결정립에서 가장 먼저 발생하며, 그 손상은 Fig. 4와 같이 각 손상가능면 별의 손상의 합으로 고려될 수 있다.

이상의 결과로부터 다음의 식 (1)과 같은 손상식을 생각할 수 있다.

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_{fi}} \quad (1)$$

여기서, N_{fi} : i 번째 손상면에 가해진 등가변형률 파라미터값 (i 또는 주어진 다축피로손상이론별)이 가해지는 경우의 비틀림 저주기 피로수명 식에서의 수명이고, n 은 각 결정립에서의 손상가능면의 수이다. 위의 식 (1)에 주어진 손상관계식으로부터 예측수명은 다음의 식 (2)에 의하여 구하였다.

$$N_{predic} = \frac{1}{D} \quad (2)$$

2.2 손상평가에 이용된 등가변형률 파라미터

손상의 평가에 이용된 파라미터는 최대 전단변형률 이론에 근거한 식 (3)과 Brown, Miller 그리고 Kandil에 의해 제안된 식 (4), 그리고 Brown과 Miller에 의해 제안된 식 (5)를 이용하였다.⁽⁹⁾

$$C_{Tresca} = \frac{\Delta\gamma_{max}}{2} \quad (3)$$

$$C_{BMK} = \frac{\Delta\gamma_{max}}{2} + 1.34\epsilon_n \quad (4)$$

$$C_{eIP} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\gamma_{max}}{2}\right)^2 + (1.46\epsilon_n)^2} \quad (5)$$

3. 실험결과 및 토론

3.1 실험 및 실험결과

저주기의 피로시험은 10톤 용량의 유압식 이축피

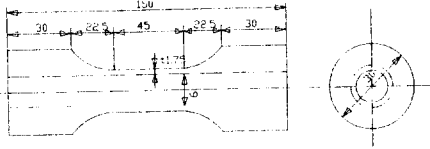


Fig. 5(a) Geometry of tubular specimen

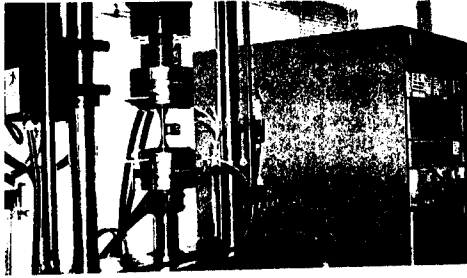


Fig. 5(b) MTS fatigue test system

로시험기를 이용하여 실시하였다. 시편은 Al7075-T651를 튜브형으로 결정립의 길이방향으로 가공하였다. 실험에 사용된 시편과 실험장비를 Fig. 5에 나타내었다. 튜브형의 시편에 가해진 비틀림방향하중과 동위상(in-phase)과 90°의 위상차(out-of-phase)를 가지는 이축하중의 제어는 변형률 제어를 통하였다.⁽⁹⁾ 그리고 파손의 정의는 축방향과 비

틀림방향의 하중 중에 하나가 10% 강하하는 것으로 정의하였다. 시편의 손상면은 SEM(scanning electron microscope)을 이용하여 촬영하였으며, 촬영에 사용된 샘플은 파손된 시편의 측면에서 균열이 존재하지 않는 부분을 채취하였다. 90° 위상차를 갖는 이축 저주기 피로실험 결과 다음의 Table 2와 같은 실험결과를 얻었다.

Al7075-T651 재료의 저주기 피로특성의 결정구조 의존성을 파악하기 위하여 Fig. 10과 같은 서로 다른 원형경로 3가지와 사각형경로 3가지 하에서 저주기 피로특성시험을 실시하였다. 하중경로는 이축 저주기 피로실험 결과로부터 얻어진 원통형 시편 측면의 SEM 사진의 촬영결과(Figs. 6(a)~9(a))로부터 나타난 슬립선의 상대각도로부터 선정하였다. 이상의 실험결과로부터 Table 3과 같은 실험결과를 얻었다.

수명의 예측에 사용된 비틀림 저주기 피로수명식은 비틀림방향의 저주기 피로실험결과로부터 이 실험결과에 대한 Coffin-Manson식을 다음의 식 (6)과 같이 얻었다.

$$\frac{\Delta\gamma}{2} = 0.0214(2N_f)^{-0.1176} + 0.3201(2N_f)^{-0.6842} \quad (6)$$

Table 2 90° out-of-phase biaxial low cycle fatigue test

$\Delta\epsilon/2$ (%)	$\Delta\gamma/2$ (%)	λ	N_f	$\Delta\epsilon/2$ (%)	$\Delta\gamma/2$ (%)	λ	N_f
0.588	0.299	0.5	2497	1.0	1.0	1	109
0.780	0.410	0.5	648	0.35	0.7	2	3932
1.057	0.508	0.5	370	0.383	0.710	2	1528
1.057	0.508	0.5	161	0.4	0.8	2	1238
0.4	0.4	1	4507	0.45	0.9	2	852
0.5	0.5	1	1567	0.5	1.0	2	298
0.7	0.7	1	395	0.596	1.05	2	265

Table 3 Biaxial-equally damaged load path test

Load path pattern	Original	I	II	III
Circular	$N_f=1528$ $N_f=1567$	$N_f=1784$	$N_f=1536$ $N_f=1945$	$N_f=1725$
Rectangle		$N_f=1587$	$N_f=1799$	$N_f=1696$ $N_f=1428$

3.2 시편 관측결과와 손상의 방향

원통형 시편의 표면의 사진은 SEM을 사용하였으며, 손상된 표면에 대한 사진은 Figs. 6~9의 (a)와 같이 주어진다. 손상된 시편의 표면사진은 축방향하중이 가해진 경우의 시편은 Fig. 6와 같이 한 방향으로만 슬립이 발생하였으며, 매우 드물게 주된 슬립방향에 대하여 약 80°방향으로 슬립이 나타나 있음을 알 수 있다. 이 경우의 손상가능면과 최대 전단변형률의 상관관계는 Fig. 6의 (b)와 같다. 동위상(in-phase) 하중이 가해진 경우의 시편은 Fig. 7과 같이 두 방향으로 주된 슬립이 발생하였으며, 그 각도는 6°로서 매우 작은 각도를 나타내었으며 이 경우에 대한 손상가능면과 최대 전단 변형률의 방향은 Fig. 7의 (b)와 같다. 또한 매우 드물게 주된 슬립방향에 대하여 약 62°방향으로 슬립이 나타나 있음을 알 수 있다. 변형률비가 2이고, 90°의 위상차를 갖는 이축하중이 작용하는 경우의 슬립의 방향은 Fig. 8과 같이 4가지 부류의 방향으로 슬립이 나타나 있음을 알 수 있다. Fig. 9의 경우는 변형률비가 1인 90°out-of-phase하중이 작용하는 경우로서 슬립의 방향은 Fig. 8과 같이 4가지 부류의 방향으로 슬립이 나타나 있다. 그러나 이 경우에는 뚜렷하게 나타나는 슬립은 Fig. 8의

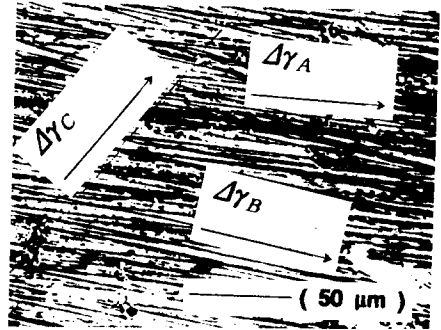


Fig. 7(a) Slip lines under in-phase load ($\lambda=1$)

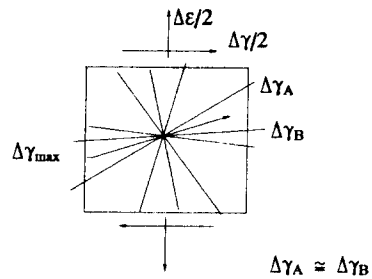


Fig. 7(b) State of shear strain at damageable plane under in phase ($\lambda=1$)

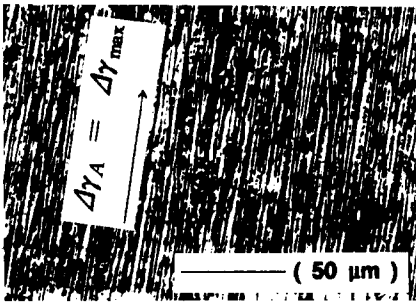


Fig. 6(a) Slip lines under axial load

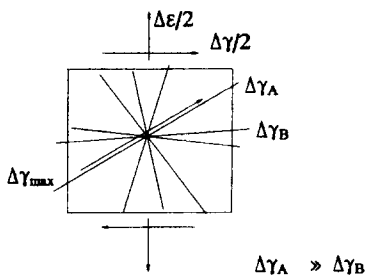


Fig. 6(b) State of strain at damageable plane under axial load

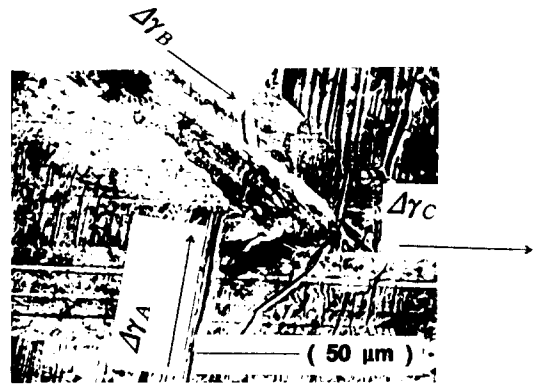


Fig. 8(a) Slip lines under out of phase load ($\lambda=2$)

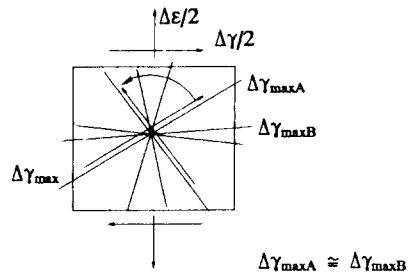


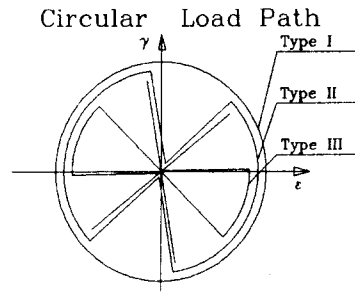
Fig. 8(b) State of shear strain at damageable plane under out-of-phase load ($\lambda=2$)

경우보다는 그 수가 적으며, 이는 변형률비에 따른 방향성에 기인한 것으로 사료된다.

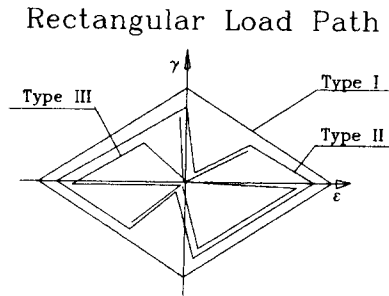
이상의 SEM 사진들로부터 나타난 슬립선들의 방향 성분은 각각 3~8°, 30~40°, 80~100°, 130~140°로써 나타났다. 이것은 Al7075-T651의 주된 조성 성분인 알루미늄의 결정구조가 면심입방정계이고 Fig. 1에서 논의한 바와 같이 나타날 수 있는 슬립선의 방향이 0°, 45°, 90°, 135°임을 감안한다면 사진에서 나타난 슬립선들이 예측된 각도를 중심으로 분산되었음을 알 수 있다. 또한 슬립선들이 분산되어 나타나는 것은 면심입방정계의 슬립가능한 경우의 수가 12가지⁽¹⁰⁾이고 일반적으로 단위 결정이 시편 표면의 관측면에 대하여 수직이지 않고 기울어져 있으며, 결정이 정육면체가 아닌 점을 감안하면 이러한 현상이 설명될 수 있을 것으로 사료된다.

제시한 손상메카니즘의 적절성을 파악하기 위하여 시편에 측면에 나타난 슬립선들로부터 손상가능 방향을 0°, 45°, 90°, 135°를 갖는 등손상하중경로를 Fig. 10과 같이 가하여 Table 3과 같은 실험 결과

를 얻었다. 이 실험결과 얻어진 시편 측면의 SEM 사진을 Figs. 11, 12에 나타내었다. 얻어진 슬립선들이 서로 다른 하중경로에 대하여 잘 일치하는 것을 보이고 있다. 또한 피로수명도 Fig. 13과 같이 통계적인 관점에서 동일한 수명 결과를 나타내고 있는데, 이것은 결정구조에 근거한 손상가능의 가정이 적절한 것을 나타내며 손상의 비등방성과 결정구조 의존성을 감안한 손상 모델은 타당한 것으로 사료된다.



(a) Circular



(b) Rectangular

Fig. 10 Equivalently damaged load path

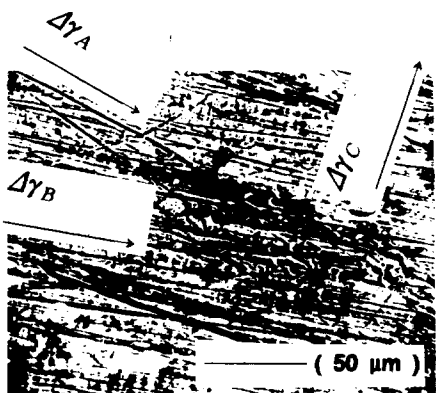


Fig. 9(a) Slip lines under 90° out-of-phase load ($\lambda = 1$)

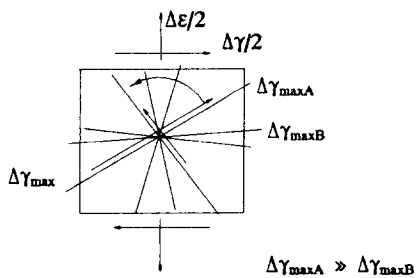


Fig. 9(b) State of shear strain at damageable plane under 90° out-of-phase load ($\lambda = 1$)

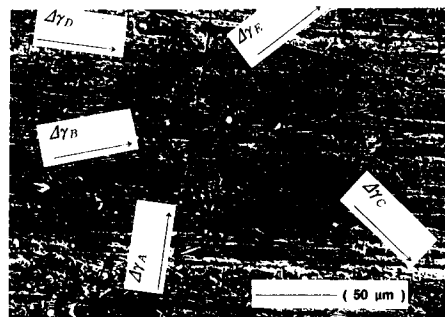


Fig. 11 Pictures of damaged surface of damaged specimen (circular path/tape ||)

3.3 비틀림 저주기 피로시험 결과로부터의 90° 위상차를 갖는 이축하중 하에서의 수명예측 이상과 같은 손상 모델에 근거하여 비틀림 저주

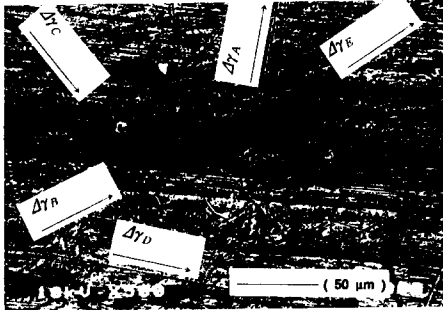


Fig. 12 Pictures of damaged surface of damaged specimen (rectangular path/tape III)

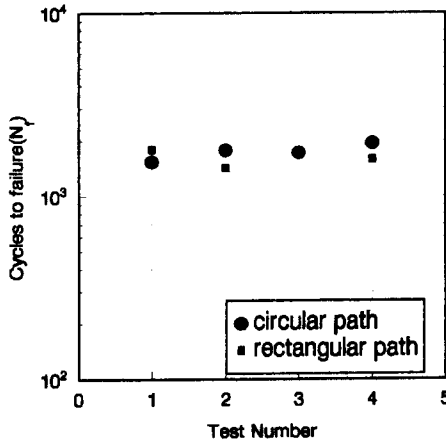


Fig. 13 Comparison of the test results (circular & rectangular biaxial load path)

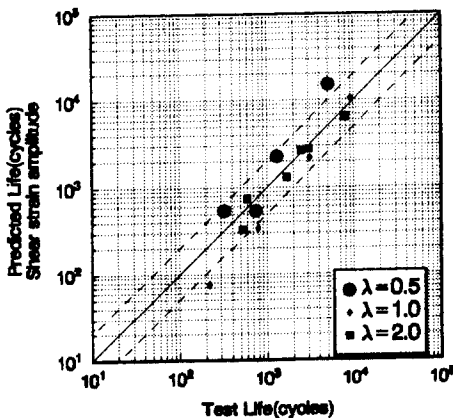


Fig. 14 Comparison of predicted lives by shear strain amplitude and actual lives of Al7075-T651 under 90° out-of-phase loading

기 피로수명 식으로부터 90° 위상차를 갖는 이축하중 하에서의 수명을 예측한 결과를 Figs. 14~16과 같이 나타냈다. 전단변형률 이론에 근거한 수명 예측은 Fig. 14와 같이 최대 전단변형률 성분에만 근거하여 수명을 예측하였기 때문에 축방향의 변형률 성분의 수명에의 기여도가 상대적으로 큰 변형률 비인 0.5에서 손상의 예측결과가 과소평가되는 것을 보이고 있다. 반면, 임계평면에 대하여 법선방향의 변형률 성분이 반영되고 있는 BMK 파라메터와 타원형 파라메터에 근거한 수명예측이 전체적으로 50~200%의 수명예측 범위 내에서 좋은 상관도를 보이고 있다. 특히, BMK 파라메터에 근거한 수명예측은 Fig. 15와 같이 1000 cycle 이상의 영역

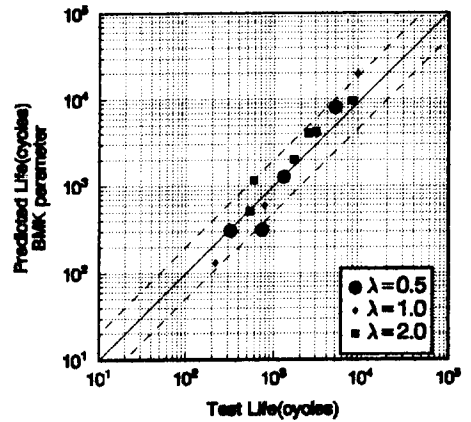


Fig. 15 Comparison of predicted lives by BMK parameter and actual lives of Al7075-T651 under 90° out-of-phase loading

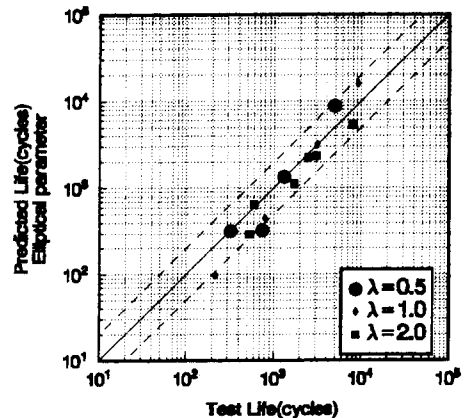


Fig. 16 Comparison of predicted lives by Elliptical parameter and actual lives of AL7075-T651 under 90° out-of-phase loading

에서는 매우 좁은 상관관계를 보이고 있다. 반면 타원형 파라미터에 근거한 수명예측은 Fig. 16과 같이 전체적으로 좁고, 고른 상관관계를 나타내고 있으며, 정확한 수명예측 결과를 보였다. 결론적으로 이상과 같은 예측수명과 측정 수명간의 좋은 상관관계는 제시된 파손메커니즘이 타당한 것임을 나타내는 것으로 보이며, 이는 일반적인 다축변동하중이 적용하는 경우로 확대적용될 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

이상의 연구 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Al7075-T651재료의 90° 위상차를 갖는 이축하중 하의 부가적인 손상은 결정 구조에 기인한 것으로 사료된다.

(2) 결정구조 의존성에 따른 손상가능면의 도입과 이에 따른 수명예측은 타당한 것으로 보인다.

(3) 제시된 손상메커니즘을 적용하면 비비례 하중경로 등의 일반적인 다축변동하중 하의 손상평가가 가능하다.

참고문헌

(1) Sakane, M., Ohnami, M. and Swada, M., 1987, "Fracture Modes and Low Cycle Biaxial Fatigue at Elevated Temperature," *Transaction of ASME, J. of Eng. Mater. and Technology*, Vol. 109, pp. 236~243.

(2) Lohr, R. D. and Ellison, E. G., 1980, "A Simple Theory for Low Cycle Multiaxial Fatigue," *Fatigue Eng. Mater. Struct.*, Vol. 3, No. 1, pp. 1~17.

(3) Socie, D., 1987, "Multiaxial Fatigue Damage Models," *Transaction of ASME, J. of Eng. Mater. and Technology*, Vol. 109, pp. 293~298.

(4) Fatemi, A. and Socie, D. F., 1988, "A Critical Plane Approach to Multiaxial Fatigue Damage Including Out-of-Phase Loading," *Fatigue Fracture Eng. Mater. Struct.*, Vol. 11, No. 3, pp. 149~165.

(5) Ellyin, F. and Golos, K., 1988, "Multiaxial Fatigue Damage Criterion," *Transaction of ASME, J. of Eng. Mater. and Technology*, Vol. 110, pp. 63~68.

(6) Xia, Z. and Ellyin, F., 1991, "Nonproportional Multiaxial Cyclic Loading: Experiments and Constitutive Modeling," *J. of Applied Mechanics*, Vol. 58, pp. 317~365.

(7) Cailletaud, G., Doquet V. and Pineau, A., 1991, "Cyclic Multiaxial Behaviour of an Austenite Stainless Steel: Microstructural Observation and Microchemical Modelling," *Fatigue under Biaxial & Multiaxial Loading*, ESISO, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 131~149.

(8) Doong, S. H. and Socie, D. F., 1991, "Deformation Mechanism of Metals under Complex Non-proportional Cyclic Loading," *Fatigue under Biaxial & Multiaxial Loading*, ESISO, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 305~320.

(9) 오세중, 이현우, 전제춘, "Biaxial Low Cycle Fatigue Behavior for Al7075-T651," 대한기계학회논문집, 제19권, 제 12호, pp. 3170~3176.

(10) Dieter, G. E., 1986, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, Inc., pp. 116~117.