

## 티탄합금의 변동하중하의 피로균열진전거동 A Study on the Fatigue Crack Growth Under Variable Loading of Titanium Alloy

이종형\*, 이상영\*\*, 이창현\*\*, 김윤곤\*\*, 임춘규\*\*, 이춘곤\*\*, 권영신\*\*  
Jong-Hyung Lee\*, Sang-Young Lee\*\*, Chang-Heon Yi\*\*, Yun-Gon Kim\*\*,  
Chun-Kyoo Lim\*\*, Chun-Kon Lee\*\*, Yung-Shin Kwon\*\*

### <Abstract>

Most of the fatigue fractures of various machine structures start at discontinuities or small defects. In this study property of crack growth of titanium alloy was also analyzed to investigate the difference compared with the carbon steel. Titanium alloy has very high specific strength, and the material is widely utilized in advanced engineering fields such as aerospace, atomic energy and ocean development because of its excellence in corrosion and heat resistance. Generally the machine structures experience irregular loadings rather than periodic forces. The prediction of the fatigue life therefore has been analyzed to provide fundamentals of the design and estimation of the machine structures under irregular loading conditions.

*Keywords : Titanium alloy, Fatigue crack*

### 1. 서 론

항공재료로서 비강도가 크고 내열·내식성이 우수한 특징을 갖는 티탄합금은 구조용 재료로서 널리 사용되고 있다.<sup>(1)</sup> 이 재료의 일반적 피로특성 및 피로균열 진전 특성 등의 중요성이 지적되어 이것들에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 여기서 최근의 기계나 구조물의 운전조건이 일정진폭하중이 아닌 실재는 복잡한 랜덤하중인 경우가 많다. 그것 때문에 이런 복잡한 실재 하중 하에서의 피로수명 특성이나 피로균열

진전 특성을 문제라고 할 때 주로 두 가지의 방법이 나타나고 있다.<sup>(2)</sup> 하나는 랜덤하중 하에서의 피로균열진전거동을 통계적으로 처리하고자 하는 입장이고 또 하나는 실제하중을 예를 들면, 2단반복변동하중이라고 하는 정상적 변동하중 또는 피크하중 부하라고 하는 비정상변동하중에 분석적으로 변환시켜 균열진전에 미치는 응력변동의 이력효과를 조사하고자 하는 입장이다. 이러한 이력효과를 검토하는 경우 균열선단부의 잔류응력, 균열면의 잔류응력, 잔류응력에 의한 균열폐구현상과 균열선단의 둔화 등

\* 교신저자, 정회원 금오공과대학교 기계공학부 교수 工博  
Email : leejh@kumoh.ac.kr

\*\* 준회원, 금오공과대학교 대학원

\* Corresponding Author, Prof., School of Mechanical Engineering, K.I.T

\*\* School of Mechanical Engineering, K.I.T

으로 생각되고 있다<sup>(3)</sup>. 그러나 변동하중에 의한 피로균열의 파괴기구에는 아직 불명확한 점이 많으며, 변동하중의 복잡성이 지적되고 있다<sup>(4)</sup>. 여기서 본 연구에서는 최근 주목되고 있는 티탄합금을 사용하여 일정진폭하중시험과 도중에서 단일 과대하중을 부하하는 단일과대하중시험, 2단반복변동하중을 실시하여 피로균열진전거동을 검토했다. 특히 변동하중하의 피로균열진전거동의 기구로서 생각되고 있는 균열개폐구 및 균열선단의 소성역에 중점을 두고 검토했다.

2. 실험방법

2.1. 시험편 및 실험장치

실험에 사용한 재료는 Ti-6Al-4V합금으로 화학적 성분을 Table 1.에 나타내고, 이 합금을 760°C×1hr 가열 후, 공랭의 열처리하여 사용하였다. 열처리 후의 기계적 성질을 Table 2.에 나타내었다. 시험편은 두께 4mm, 중앙에 방전 가공에 의해, 길이 4mm의 노치를 넣은 CCT시험편을 사용하였다. 그 형상치수를 Fig. 1.에 나타내었다. 균열길이의 측정을 용이하기 위해서 시험편 표면을 2000번의 샌드페이퍼로 연마하였다. 피로시험기는 전기 유압식서보 피로시험기(용량 100kN)를 사용하였다. 하중과형은 정현파, 하중값은 디지털 표시계에 입력되며, 시험도중에 하중값의 변경이 가능하도록 하였다. 균열길이는 중앙의 가공 노치부분의 4mm를 포함하여 2a로 하고 시험편의 표면에서 측정하였다. 측정에는 0.01mm까지 측정이 가능한 광학이동현미경을 사용했다.

Table 1. Chemical composition (wt.%)

Al	V	O	Fe	C	N	H	Ti
6.21	4.10	0.14	0.21	0.016	0.0015	0.0047	Bal.

이 단계에 있어서 A재의 실 단면응력은 ΔP 일정시험의 그것과 거의 동일하고 A재, B재의 그것은 ΔP 일정시험보다 적은 것으로부터 실 단면응력의 차이가 제 2b단계의 균열진전에 영향을 준다고 생각되어진다.

Table 2. Mechanical properties

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
997	1027	12.6	354

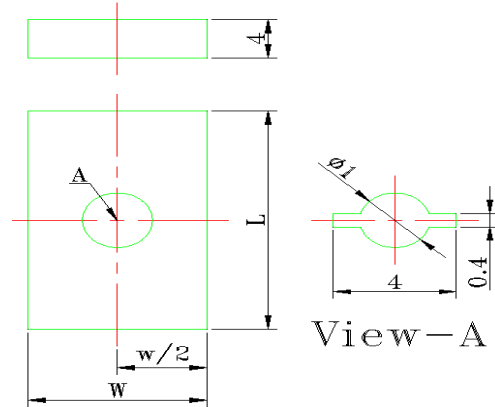
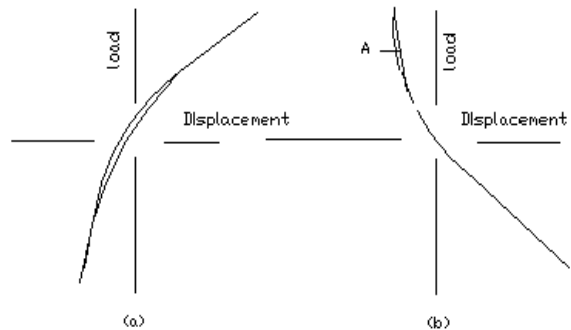


Fig. 1. Dimension of CCT specimen.



(a) signal before circuit (b) signal after circuit  
Fig. 2. Measurement of crack opening point.

2.2. 하중시험

균열개폐구 거동은 제하탄성 컴플라이언스법에 의해서 실시하였다. 이 방법의 특징은 균열개폐구 거동 측정의 고정도화이다. 균열을 포함한 시험편의 변위와 부하하중과의 히스테리시스를 그리면 Fig. 2.(a)같이 균열개폐구에 의한 컴플라이언스변화에 의해서 히스테리시스는 굴곡하지만, 어디에서 균열이 열리고 있는 것인가는 알 수 없다. 그것에 대해 Fig. 2.(b)는 감산 회로를 이용하여 제하탄성선이 하중축과 평행이 되도록 변위신호부터 하중에 비례하는 탄성 성분을 이용하는 것이다. 균열개구점의 측정정도가 상승한다. 여기서 균열개구점이라는 것은

균열이 완전히 열려있는 점이며, Fig. 2.(b)의 A점이다.

Table 3.에 나타난 것과 같이 일정진폭하중 시험에서는  $\sigma_{max}=120\text{MPa}$ (응력비  $R=0.33$ ),  $\sigma_{max}=160\text{MPa}$ ( $R=0$ )와  $\sigma_{max}=160$ ( $R=-0.25$ )의 세 종류에 대해서 실시하였다. 시험기의 반복속도는 10Hz, 균열선단부근에 스트레인게이지를 부착하여 균열개폐구거동도 측정하였다. 이때의 하중반복속도는 0.1Hz이다.

Table 3.에 나타난 단일과대하중 시험에서는 일정진폭하중 시험조건에 1회의 과대하중(0~200MPa과 -100~160MPa)을 각각  $\Delta K=13, 18, 25\text{MPa}\sqrt{m}$ 일 때 부하하여 실시하였다. 이때의 반복속도는 시험기의 추종성을 생각해서 과대하중이 0.1Hz로, 일정진폭하중 하에서는 10Hz로 실시하였다. Table 3.에 나타난 2단반복변동하중에서는 1회의 과대하중(단일과대하중시험과 같은 과대하중)과 99회의 일정진폭하중(40~120MPa)을 조합한 두 종류에 대해서 실시하였다. 또, 과대하중(0~160MPa, -40~160MPa)에 대해서도 같은 일정진폭하중에서 실시하여 합계 4종류에 대해서 실시하였다. 이때의 반복속도는 과대하중이 1Hz, 일정진폭하중이 10Hz로 실시하였다.

Table 3. Condition of Fatigue testing

구분	Waveform	구분	Load form(Mpa)			
Constant Amplitude Loading		$\sigma_{max}$	120	160	160	
		$\sigma_{min}$	40	0	-40	
Single Overloading		$\sigma_{max}$	200	160		
		$\sigma_{max}$ $\sigma_{min}$	120 40			
		$\sigma_{max}$	0	-100		
T steps Variable Loading		$\sigma_{max}$	200	160	160	160
		$\sigma_{min}$	120 40			
		$\sigma_{min}$ 0.1	0	-100	0	-40

### 2.3 실험결과의 정리법

본 연구에서는 균열진전거동을 정리할 때에 균열진전속도  $da/dN$ 이나 응력확대계수범위  $\Delta K$ 를 이용하였다.  $da/dN$ 은 균열진전곡선 상에서 측정점을 중심으로 전후 각 두 점을 포함하여 오점의 측정법을 최소자승법에 의해 근사시켜

구하였다.  $\Delta K$ 는 아래식과 같이 노치평판시험편의 인장압축의 응력확대계수공식을 사용하였다.

$$\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi a} \times \sec(2\pi a/W)$$

여기서,  $W$ 는 시험편 폭,  $\Delta\sigma$ 는 하중범위( $\sigma_{max}-\sigma_{min}$ )이다.

## 3 실험결과 및 고찰

### 3.1 일정진폭하중시험

Fig. 3.에 응력비  $R=0.33, R=0$ 와  $R=-0.25$ 의 일정진폭하중시험에서 얻은 피로균열진전속도  $da/dN$ 와 응력확대계수범위  $\Delta K$ 의 관계를 나타내었다. 균열진전속도는  $R=0.33, R=0, R=-0.25$ 의 순서로 빠른 결과가 나타났다. 이 차이를 균열개폐구거동으로 고찰하기 위하여  $da/dN$ 을 유효응력확대계수범위  $\Delta K_{eff}$ 로 정리하여 그 관계를 Fig. 4.에 나타내었다. 이것에 의해서 균열진전속도는 하나의 좁은 범위의 밴드 내에 모아졌다. 따라서 응력비의 영향에 의한 균열진전속도의 차이는 균열개폐구거동으로 설명할 수 있다. 여기에서 압축하중이 균열개폐거동에 미치는 영향을 보기 위하여  $\sigma_{max}$ 가 같은 응력비  $R=0, R=-0.25$ 에 대한 균열개구응력의 측정결과를  $\Delta K$ 로 정리한 것을 Fig. 5.에 나타내었다. 압축하중이 부하되고 있는  $R=-0.25$ 의 균열개구응력의 것이 낮게 나타내고 있다. 이것은 인장하중에 의해서 균열선단후방의 균열부분에 생기는 압축잔류응력이 압축하중에 의해서 완화되기 때문이라고 생각된다.

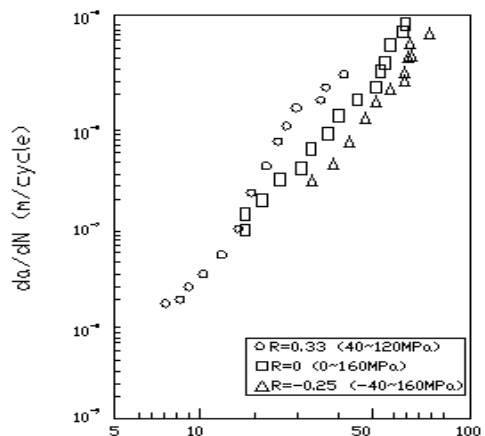


Fig. 3. Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$  at constant amplitude loading.

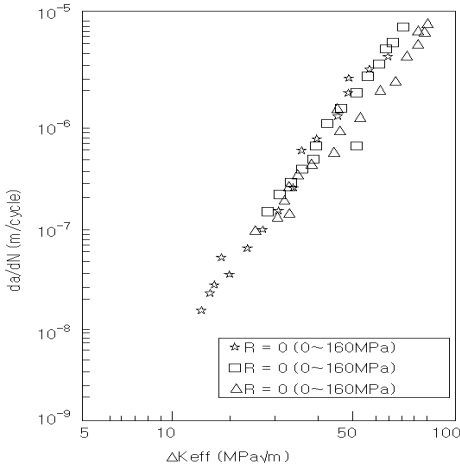


Fig. 4. Relation between da/dN and ΔK<sub>eff</sub> at constant amplitude loading.

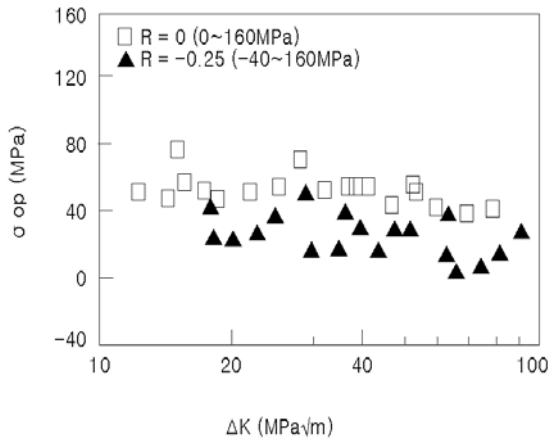


Fig. 5. Relation between σ<sub>op</sub> and ΔK at constant amplitude loading.

### 3.2 단일과대하중시험

일정진폭하중(R=0.33)에 과대하중을 각각 ΔK=13, 18, 25MPa√m에서 부하 한 실험결과를 Fig. 6에 ΔK와 da/dN의 관계를 Fig. 7에 각각 나타내었다. 여기에서 실선은 일정진폭하중의 균열진전속도선도를 최소 자승법으로 직선 근사한 것이다. Fig. 6과 Fig. 7에서 단일과대하중부하 후에는 명확한 지연이 생기고 ΔK의 증가에 따라 지연도가 감소하는 결과를 얻었다. 일반적으로 단일과대하중에서는 일정진폭하중에 대한 과대하중의 비의 효과가 최고로 크고 이것이 클수록 또는 시험편 두께가 얇을수록 그리고 재료강도가 낮을수록 지연의 효과는 크게 나타난다. 이것은 지연이 종료하는 균열진전 길이가 대략 과대하중에 의해 균열선단에 형성되는 소성역의 크기에 대응하고 있는 것이기

때문에 소성역의 크기가 크게 되는 조건으로 지연이 크게 된다고 생각할 수 있다. 거기서 소성역 내에서의 지연현상을 자세히 보기 위해서 ΔK=13MPa√m에서, 가로축에 균열길이의 정분 (da)/(인장과대하중에 의해 균열선단에 형성된 소성역 크기 P.Z.S. (Plastic Zone Size))를 하고 세로축에 (과대하중부하 후의 균열진전속도)/(ΔK에 대한 일정진폭하중 하에서의 균열진전속도)의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 소성역의 크기는 다음의 아래식을 이용하여 구하였다. 여기서 K는 응력확대계수이고 σ<sub>y</sub>는 항복응력이다.

$$P.Z.S. = (1/2\pi)(K/\sigma_y)^2$$

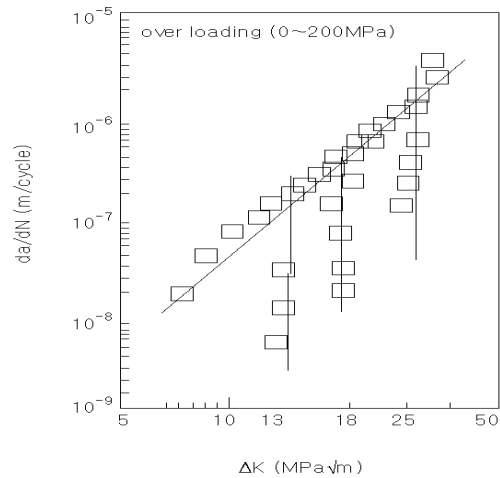


Fig. 6. Relation between da/dN and ΔK at only tension overloading.

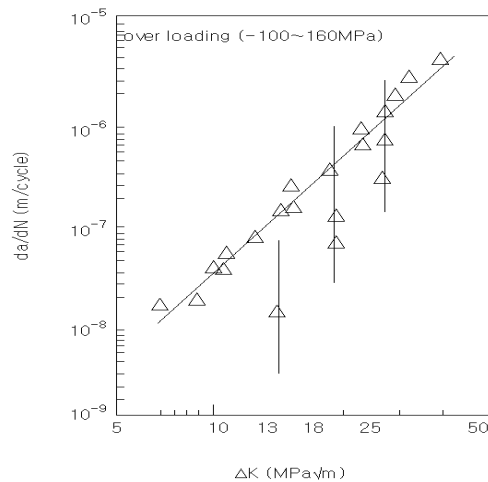


Fig. 7. Relation between da/dN and ΔK at tension-compression overloading

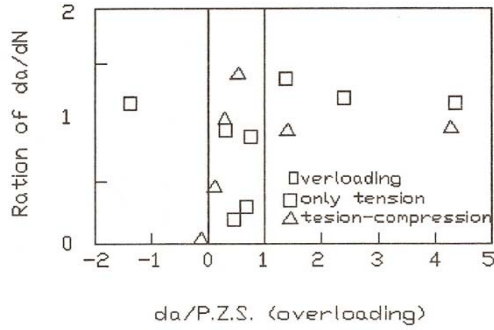


Fig. 8. Relation between ratio of da/dN and P.Z.S. at  $\Delta K=13\text{MPa}\sqrt{m}$

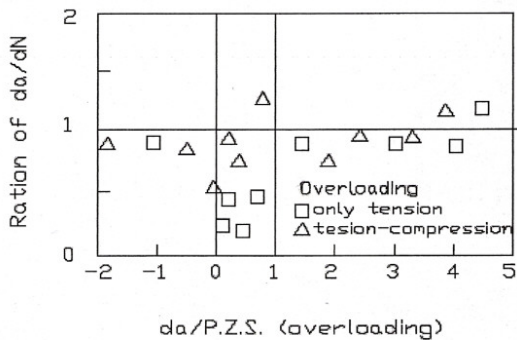


Fig. 9. Relation between ratio of da/dN and P.Z.S. at  $\Delta K=25\text{MPa}\sqrt{m}$

Fig. 8.에서 과대하중이 인장만인 경우는 (da/P.Z.S.)  $\approx$  0.5에서 지연도가 최대가 되고 (da/P.Z.S.)  $\approx$  0.8에서 속도비=1(지연이 종료한 시점)이 되고, 그 후 약간의 과속현상을 일으키고 있다. 이 경향은  $\Delta K=18\text{MPa}\sqrt{m}$  에서도 나타나지만, Fig. 9.에 나타낸 것과 같이  $\Delta K=25\text{MPa}\sqrt{m}$  에 있어서는 (da/P.Z.S.)  $\geq 1$ 이 될 때부터 속도비=1이 되며, 그대로 속도비=1을 유지하는 결과를 얻었다. 과대하중의 압축이 포함된 경우는 과대하중부하 후 바로 지연이 생성되며 (da/P.Z.S.)  $\approx$  0.5~1이 된다. 이 경향은  $\Delta K=18, 25\text{MPa}\sqrt{m}$  에서도 나타내었다. 이것으로부터 단일과대하중에 의한 소성역의 크기의 이내에서 균열진전의 지연이 최대가 되는 것을 알았다. 또, 균열개폐구거동으로부터 지연 현상을 고찰하기 위해서 개구비 U를  $\Delta K$ 로 정리한 관계를 Fig. 10., Fig. 11.에 나타내었다. 그림에서 과대하중이 인장만인 경우, 압축을 포함한 과대하중의 모두가 과대하중부하 후 개구비는 저하했다. 따라서 과대하중에 의한 균열진

전속도의 지연은 균열개폐구거동의 영향<sup>(5)</sup>이라고 생각된다.

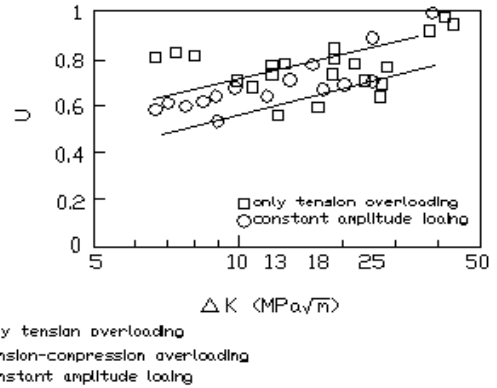


Fig. 10. Relation between crack opening ratio U and  $\Delta K$  at only tension overloading.

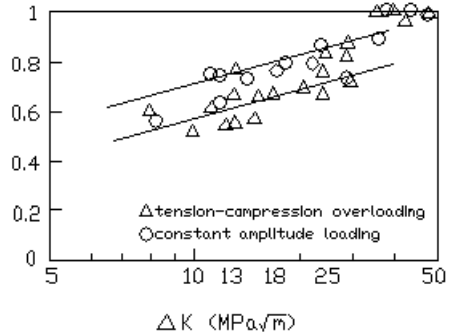


Fig. 11. Relation between crack opening ratio U and  $\Delta K$  at tension-compression overloading.

### 3.3 단반복변동하중시험

과대하중이 인장만인 경우와 압축을 포함한 경우의 2단반복변동하중시험에서 얻은 균열진전속도선도를 Fig. 12.에 나타내었다. 여기에서 실선은 일정진폭하중시험에서 얻은 직선 근사한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 지연이 생성되고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 단일과대하중시험에서의 결과에서 과대하중에 의한 영향이라고 생각된다. Fig. 13.에 양자의 균열진전속도와  $\Delta K_{\text{eff}}$ 와의 관계를 나타내었다. 이것으로부터 과대하중이 인장만인 경우는 일정진폭하중의 곡선과 일치하고 압축이 포함된 경우는 일치하지 않았다. 거기서 균열개폐구거동의 관점으로부터 고찰하기 위해서 균열개구응력  $\sigma_{\text{op}}$ 와  $\Delta K$ 의 관계를 Fig. 14.에 나타내었다. 이것에서 과대하중이 인장만인 경우의 균열개구응력은 일정진폭하중의 그것보다도 상승하고 있고 단일과대하중시험과 같은 모양의 균열진전속도의

지연은 균열개폐구거동에 영향이라고 생각한다. 한편, 압축이 포함된 경우의 균열개구응력은 일정진폭하중의 그것보다 저하하고 있다. 따라서 과대하중시험의 경우와 다르며 과대하중에 압축을 포함한 2단반복변동하중하에서는 균열개폐구거동에서 균열진전속도의 지연은 설명되지 않는다.

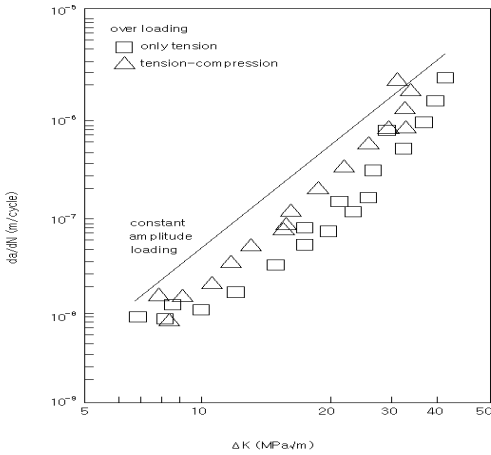


Fig. 12. Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K$  at two steps variable loading.

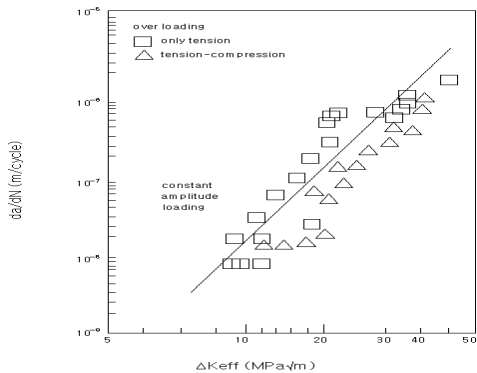


Fig. 13. Relation between  $da/dN$  and  $\Delta K_{eff}$  at two steps variable loading.

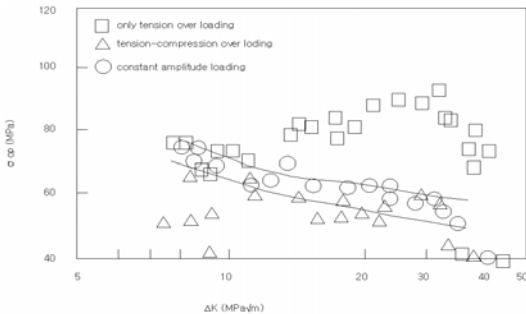


Fig. 14. Relation between  $\sigma_{op}$  and  $\Delta K$  at two steps variable loading

#### 4 결론

Ti-6Al-4V합금을 사용하여 일정진폭하중시험, 단일과대하중시험, 2단반복변동하중시험을 실시하고 과대하중에 압축성분을 포함한 경우, 인장성분만의 경우, 압축성분을 포함한 경우에 대한지의 균열진전거동을 균열개폐구거동을 중심으로 고찰하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 일정진폭하중하에서는 응력비의 상이에 의한 균열진전속도의 차이는 균열개구응력으로 정리된다.
2. 단일과대하중시험에 있어서 지연도의 최대는 과대하중에 의해서 형성된 소성역 내에서 생성하고 있다.
3. 단일과대하중시험에 있어서 균열진전속도의 지연은 균열개구응력의 영향을 받는다.
4. 단일과대하중시험에 있어서 과대하중이 인장만인 경우는 늦은 지연이 생기고 압축을 포함한 경우는 바로 지연이 생긴다.
5. 2단반복변동하중하에서의 균열진전속도의 지연은 과대하중이 인장만인 경우는 균열개구응력의 영향을 받고 있다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Wolf Elber, "Crack-closure and crack-Growth Measurements in surfa -ceflawed Titanium Alloy Ti-6Al-4V" NASA Technical note D-8010, pp. 1-16, 1975.
- 2) Wolf Elber, "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP 486, pp. 230-242, 1971.
- 3) M. H. EL Haddad, K. N. Smith, T. H. Topper, "Fatigue Crack Propagation of Short-Cracks", Transactions of the ASME Vol.101, pp.42-46. 1979.
- 4) R.A.Schmidt, P.C.Paris, "Threshold for Fatigue Crack Propagation and the Effects of Load Ratio and Frequency", ASTM STP 536, pp.79-94, 1973.
- 5) Lee, J. H. and Kobayashi, H, "Fatigue Limit and Non propagative Crack for Smoothand Precracked Specimen in a Carbon Steel" Trabsactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 447, pp.1209-1214, 1986

(2007년 4월 12일 접수, 2007년 11월 9일 채택)