

〈논 문〉 SAE NO. 97370014

티탄계 초소성합금 SP-700의 저사이클 피로수명곡선의 절곡현상에 대하여

A Study on the Knee Point of Low-cycle Fatigue Life in High Formability Titanium Alloy SP-700

김 민 건*. 清水 眞佐男**, 지 정 근***
M. G. Kim, M. Shimizu, J. K. Ji

ABSTRACT

Previous studies has shown that the curve of low-cycle fatigue life was not expressed with the single lline subjected to Manson-Coffin's law type and bent to short life in low $\Delta\epsilon_p$ region. The main cause of this phenomenon has been considered that the localization of plastic strain in the crack initiation process fosters the crack initiation. In this study, the low-cycle fatigue life was investigated for each specimens omitted crack initiation process and it was found that fatigue life curve in $\log(\Delta\epsilon_p) - \log(N_f)$ was bent in low $\Delta\epsilon_p$ region as ever. Therefore, the main cause of appearance of knee point in fatigue life curve is not found in the crack initiation process but in the crack propagation process. In the crack propagation process, the localization of the plastic strain in the vicinity of crack tip and the influence of test environment on the crack propagation rate were observed and these inclinations were more remarkable in low $\Delta\epsilon_p$ region. Hence, it was concluded that these two phenomena in the crack propagation process were proved to the main cause which accelerates the crack propagation in low $\Delta\epsilon_p$ region and bent the fatigue life curve in result.

주요기술용어 : High Formability Titanium Alloy(초소성티탄합금), Low-cycle Fatigue(저사이클피로), Fatigue Life(피로수명), Knee(절곡), Plastic Strain Range(소성변형폭)

1. 서 론

저사이클 피로는 보통 파단까지의 사이클수가

10⁴회 이하의 영역을 말하며, 이 영역에서는 많은 재료에서 소성변형폭 $\Delta\epsilon_p$ 와 파단까지의 사이클수 N_f 의 관계가 양대수선도상에서 직선으로 되는 Manson-Coffin 법칙이 성립함이 밝혀져 있다. 그런데 고강도·저연성재료의 경우에는, 이러한 관계가 한개의 직선은 표현될 수 없고, 피로수명곡선은 저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서 단수명쪽으로

* 정회원, 강원대학교 기계공학과
** 게이오대학교 기계공학과
*** 강원대학교 대학원 기계공학과

구부러짐이 알려져 있다. 이러한 현상에 대하여 다음과 같은 연구결과가 보고되고 있다.

고강도·저연성재료에 있어서는, 미시적으로 소성변형은 결정립중의 어느부분에 집중적으로 발생하기 때문에, 시험편 게이지 길이의 소성변형의 분포는 결코 일정하지 않다. 따라서 피로크랙의 발생수명, 나아가서 피로수명을 직접 지배하는 것은 거시적으로 계속되어지는 소성변형이 아니라, 이 국부집중된 소성변형이다. 또한 이러한 현상은 제어되는 $\Delta\epsilon_p$ 가 작을수록 현저하게 되는 것으로 생각되어져, 피로수명곡선은 결국 저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서 단수명쪽으로 절곡하게 된다.^{1), 2), 3)}

그러나, 저사이클피로수명의 대부분은 사실상 크랙전파과정이라고 지적되고 있는^{4), 5), 6)}점으로부터 생각하면, 변형이 어느 결정립에 집중해서 크랙발생수명의 변화를 가져온다고 해도 그것이 전체 피로수명에 미치는 비율은 극히 작을 것으로 생각한다. 따라서, 소성변형의 국부집중에 따른 크랙발생수명의 차가 저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서의 절곡현상의 큰 원인이라고 생각하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는, 절곡현상의 원인을 밝히는 것을 목표로 하여, 크랙발생과정을 생략하기 위하여 시험편의 표면에 미소원공을 도입한 시험편과 미소원공의 가장자리에 크랙을 발생시킨 시험편을 사용하여, 고·저 $\Delta\epsilon_p$ 에서의 크랙발생·전파과정의 차가 절곡현상에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 진공을 상정한 환경중에서 저사이클피로시험을 행하여, 절곡현상에 미치는 공기의 영향에 대해서도 검토를 하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

본 연구의 사용재료는 Table 1에 표시한 화학성분을 갖는 티탄계 초소성합금 SP-700이다. 그 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다. 이 합금은 Ti-6L1-4V합금을 최근에 개량한 것으로, 열간 및 냉간 가공성, 초소성특성이 뛰어나서 스포츠용품, 공구류분야에 널리 사용되고 있으며, 앞으로 자동차분야에 널리 사용될 전망이다. 이 합금은 저사이클피로수명곡선상에서 명료한 절곡점을 나타내는 재료이며⁷⁾, 고강도이기는 하지

Table 1 Chemical composition of material investigated

	wt %							
	Al	V	Mo	Fe	O	C	N	H
SP-700	4.4	2.9	2.1	2.0	0.08	<0.01	0.01	0.0028

Table 2 Tensile properties

0.2% proof stress(MPa)	935
UTS(MPa)	964
RA(%)	55.2

만 단면수축율(RA) 55.2%의 비교적 연성이 좋은 재료이다.

시험편의 최소단면부의 지름은 $\phi 6$ 이며, R부 표면을 에머리페이퍼(#1200까지)로 연마하여 시험에 사용하였다.

시험편의 형상은 시험편표면에 직경, 깊이 모두 0.13mm의 미소원공을 가공한 것을 미소원공재, 미소원공 가장자리에 피로크랙을 도입하여 원공을 포함한 크랙길이가 약 0.2mm의 것을 예비크랙재 그리고 평활재이다.

시험은 유압제어피로시험기를 사용하였고, 피로예비크랙은 응력비 $R=0.5$ Hz에서 시험하여 도입하였으며, 피로수명을 구할때는 $R=-1$ 에서 수행하였다.

또한 기계가공에 의한 잔류응력을 제거하기 위하여, 미소원공재 및 예비크랙재의 경우에는 예비크랙도입시의 이력을 제거하기 위하여 800°C 1시간의 진공어닐링을 하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 크랙발생수명과 절곡현상과의 관계

고강도·저연성재료의 피로수명곡선의 저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서의 절곡현상의 원인은, 크랙발생과정에서 소성변형이 국부적으로 집중하기 때문이라고 생각되어져 왔다. 따라서 본 절에서는, 크랙발생과정을 생략할 수 있는 미소원공재 및 예비크랙재를 사용하여 저사이클피로시험을 행하여, 크랙발생과정의 절곡현상에 대한 영향을 검토하였다.

미소원공재는 직경, 길이 모두 약 0.13mm의 원공을 가공하여 이것을 초기크랙으로 간주한 것이고, 예비크랙재는 원공의 가장자리로부터의 크랙발생과정마저 제거하기 위해 미리 원공주위에 원공을 포함한 길이 약 0.2mm의 피로크랙을 도입한 시험편이다. 미소원공은 근사적으로 초기크랙으로 간주될 수 있는데, 원공으로부터의 새로운 크랙발생과정은 피할 수가 없기 때문에, 이러한 발생과정을 완전히 생략하기 위하여 원공에 피로크랙을 넣은 예비크랙재를 준비하게 된 것이다. 이러한 2종류의 시험편을 사용함으로써, 크랙발생과정과 절곡현상과의 관련이 명확해지리라 사료된다. 즉 고·저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서의 크랙발생과정의 상위에 의하여 절곡이 생기는 것이라면, 크랙발생과정을 생략함에 의하여 절곡점은 소멸할 것이다.

Fig.1에 평활재, 미소원공재 및 예비크랙재의 저사이클 피로시험의 결과를 $\log(\Delta\epsilon_p) - \log(N_f)$ 로 나타내었다. Fig.2는 Fig.1의 결과를 직선근사한 것이다.

그림으로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 미소원공재와 예비크랙재의 피로수명곡선사이에는 거의 차가 보이지 않는다. 이것은 판단수명의 극히 초기에 원공으로부터 크랙이 발생하기 때문이며, 종래의 연구결과^{4), 5), 6)}와 부합하고 있다. 따라서, 미소원공을 초기크랙으로 간주하여도 큰 문제가 없음을 알 수 있다. 또한 어느 시험편에서도, $\Delta\epsilon_p=0.01$ 부근에서 $\Delta\epsilon_p - N_f$ 의 관계가 단

수명쪽으로 절곡되고 있다. 절곡현상에서의 크랙발생과정의 영향을 고려하기 위하여 미소원공재와 예비크랙재를 사용했는데, 이들 시험편에서도 절곡점이 생긴 점으로보아 크랙발생과정의 절곡현상에서의 영향은 거의 없다고 말할 수 있다. 즉, 고·저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서의 크랙발생시기의 상위가 아니라, 크랙전파과정중에 무엇인가에 의한 전파메커니즘의 차에 의하여 절곡점이 형성되는 것으로 판단하는 것이 타당하다.

3.2 고·저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서의 크랙전파과정의 고찰

3.2.1 크랙전파법칙에 의한 검토

저사이클피로수명의 대부분이 크랙전파수명이므로, $\Delta\epsilon_p$ 와 N_f 의 관계를 나타내는 Manson-Coffin법칙은 크랙전파법칙과 관련지어질 수 있다⁴⁾. 그러므로, 고 $\Delta\epsilon_p$ 영역($\Delta\epsilon_p > 0.01$)과 저 $\Delta\epsilon_p$ 영역($\Delta\epsilon_p < 0.01$) 각각의 피로수명에 대하여 미소크랙전파법칙에 의한 검토를 시도하였다.

Fig.3에 고 $\Delta\epsilon_p$ 과 저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서의 무차원화한 크랙전파곡선을 나타내었다. 다음에 이들 결과에 대해서 크랙길이 i 와 크랙전파속도 $\frac{dl}{dN}$ 과의 관계를 조사하여, 다음식으로 나타내어지는 크랙전파법칙을 얻었다. 이때, 원공으로부터 전파한 초기크랙은 원공의 영향을 받기 때문에, 크랙길이는 원공직경의 3배이상의 것을 채택하였다.

$$\frac{dl}{dN} = 1.82 \Delta\epsilon_p^{1.27} \cdot l \quad (\Delta\epsilon_p > 0.01)$$

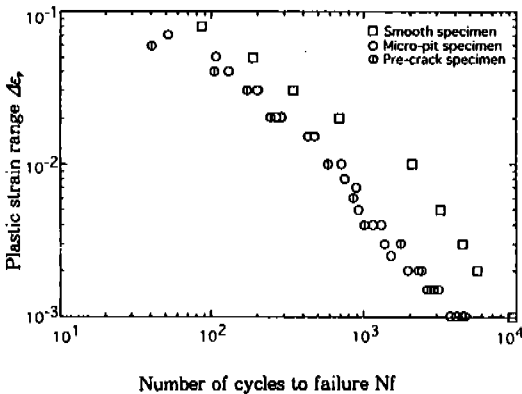


Fig.1 Curves of low-cycle fatigue test

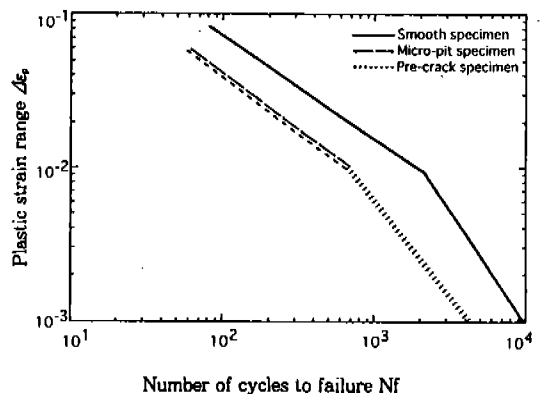
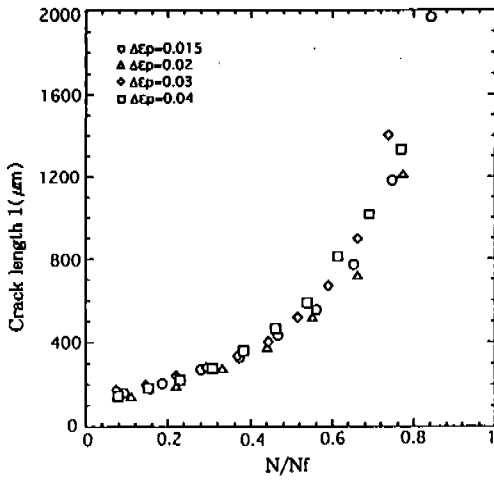
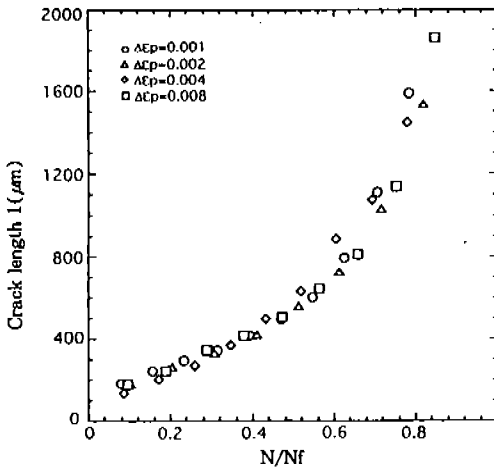


Fig.2 Approximate curves of Fig.1



(a) $\Delta\epsilon_p > 0.01$



(b) $\Delta\epsilon_p < 0.01$

Fig.3 Non-dimensional curves of crack propagation

$$\frac{dl}{dN} = 0.33 \Delta\epsilon_p^{0.87} \cdot l \quad (\Delta\epsilon_p < 0.01)$$

다음에, 크랙전파법칙과 Manson-Coffin법칙과의 관계를 풀어내기 위해 윗식을 적분하여 다음식을 얻었다.

$$\ln\left(\frac{l_f}{l_0}\right) = 1.82 \Delta\epsilon_p^{1.27} (N_f - N_0) \quad (\Delta\epsilon_p > 0.01)$$

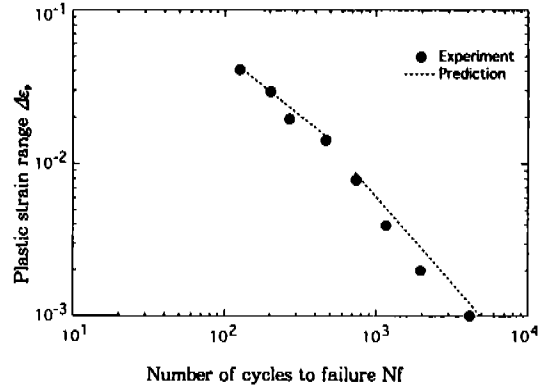


Fig.4 Comparison the values calculated from Manson-Coffin law being based micro-crack growth law with experimental values

$$\ln\left(\frac{l_f}{l_0}\right) = 0.33 \Delta\epsilon_p^{0.87} (N_f - N_0) \quad (\Delta\epsilon_p < 0.01)$$

여기서 l_0 는 N_0 회에 있어서의 초기크랙길이, l_f 는 파단시의 크랙길이이다. 본 연구에서는 l_0 를 미소원공의 직경(0.13mm), l_f 를 시험편의 직경(6mm), $N_0=0$ 로 근사적으로 놓고, Manson-Coffin법칙형의 다음식을 얻었다.

$$\Delta\epsilon_p \cdot N_f^{0.79} = 1.83 \quad (\Delta\epsilon_p > 0.01)$$

$$\Delta\epsilon_p \cdot N_f^{1.15} = 17.18 \quad (\Delta\epsilon_p < 0.01)$$

이상과 같이 해서 얻어진 Manson-Coffin법칙형의 피로수명곡선과 피로시험결과를 Fig.4에 함께 나타내었다. 그림으로부터, 저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서 피로수명은 단수명쪽으로 절곡함을 알 수 있으며, 또한 그 절곡점은 $\Delta\epsilon_p=0.01$ 근처로 크랙발생수명이 포함된 Fig.1의 결과와 잘 부합하고 있다. 이 사실은 수명곡선의 절곡은 주로 크랙전파과정에서 일어나는 현상임을 시사하고 있다.

3.2.2 미소원공주위에서의 크랙초기전파의 고찰
일반적으로, 재료의 불균일 변형은 강도레벨이 높은 재료일수록, 제어되는 $\Delta\epsilon_p$ 가 작을수록 현저해 진다고 생각되어지고 있다.²⁾ 또한 시험편표면을 관찰해 보면, 고강도의 재료는 저강도재료보

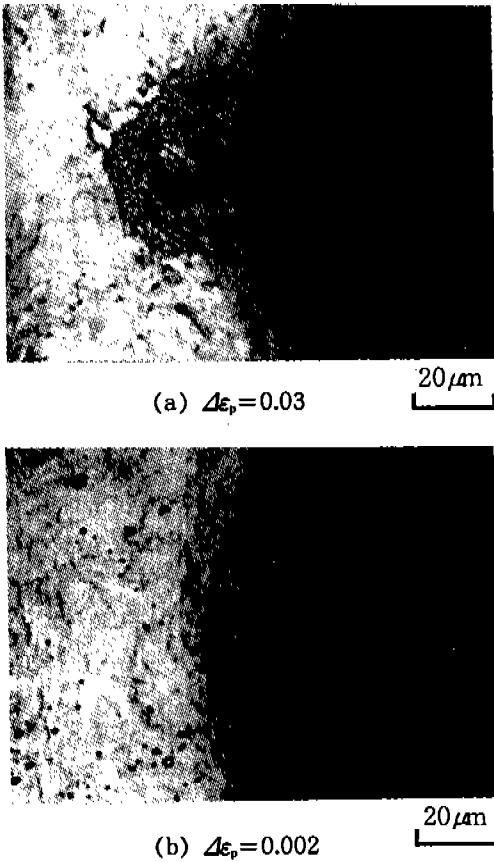


Fig.5 Distributional appearances of plastic strain in the vicinity of crack

다 슬립선이 국부화하여, 동일재료에서도 $\Delta\epsilon_p$ 의 저하에 수반하여 슬립선이 집중되는 경향이 있다고 알려져 있다²⁾.

따라서, 본 연구의 시험재료 SP-700에 있어서도 위와 같은 사실의 여부를 확인하기 위하여, $\Delta\epsilon_p=0.33$, $\Delta\epsilon_p=0.002$ 의 피로시험조건하에서 파단수명의 10~30% 정도에서 시험을 중지하여, 원공주위 표면을 레이저 현미경으로 관찰하였다. Fig.5의 (a), (b)에 각각의 관찰사진을 보였다. 그림으로부터 고 $\Delta\epsilon_p$ 영역의 크랙 주변에는 선상의 슬립이 폭넓게 분포하고 있는데 대하여, 저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서는 그런 모양은 없고 크랙 자체에 변형이 집중되어 있음을 알 수 있다. 즉, 본 재료에서도 소성변형의 국소화 현상은 저 $\Delta\epsilon_p$ 쪽으로

갈수록 현저해지는 것을 알 수 있다.

상기 사실로부터, 저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서의 변형집중 현상이 크랙진파에 영향을 주고 있는 것은 확실하며, 이것이 수명곡선굴곡의 한 원인이 되고 있다.

3.3 절곡현상에 대한 시험분위기의 검토

Coffin²⁾은 반복변형중에 생기는 환경에 의한 재질의 열화는, 장시간수명을 갖는 저 $\Delta\epsilon_p$ 영역 쪽이고 $\Delta\epsilon_p$ 보다 현저하여, 이와 같은 효과는 변형제어하에서의 크랙진파속도를 빠르게 하기 때문에, 피로수명곡선이 저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서 단수명쪽으로 절곡한다고 설명하고 있다. 또한 Martin²⁾은, C1113 및 4130강의 $\log(\Delta\epsilon_p) - \log(N_f)$ 곡선은, 공기중에서 시험이 실시될 경우에는 구부러지지만, 진공중에서 얻어진 수명곡선에는 이러한 절곡점이 나타나지 않는다고 보고하고 있다.

따라서 본 절에서는, 저사이클 피로수명에 미치는 분위기(여기서는 공기)의 영향을 조사하기 위하여, 진공상태로 간주되는 분위기중에서 피로 시험을 행하여, 시험분위기와 절곡현상과의 관련에 대하여 검토하기로 한다.

공기의 영향을 보기 위해서는 고진공중에서 시험을 행하여야 마땅하지만, 여기서는 간편함도 도모하기 위하여 시험편 표면에 고진공 시일용 오일 콤팩운드를 도포하는 방법으로 공기를 차단한 상태를 근사적으로 만들어서 시험하였다.

미소원공재에 대한 이러한 방법으로 실시한 피로시험결과를 Fig.6에 나타내었다. Fig.7은 이것을 직선회귀한 것이다. 결과에 의하면, 공기를 차단한 시험편의 수명은 공기중에서의 것에 비하여 전체적으로 수명이 증가하고 있다. 엄밀히 말하면, 고 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서는 둘 사이의 차가 거의 없지만, 절곡점($\Delta\epsilon_p=0.01$ 부근)을 넘어서 저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에 들어갈수록 수명의 증가폭이 크게 되고 있다. 즉, 공기차단에 의하여 수명곡선상의 절곡이 거의 소실하고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실은 전술한 Martin의 실험결과와 잘 부합하는 것으로서, 절곡현상의 원인을 밝히는데 있어서 대단히 흥미있는 사항이다.

공기중에서의 통상의 피로시험결과가 역학적

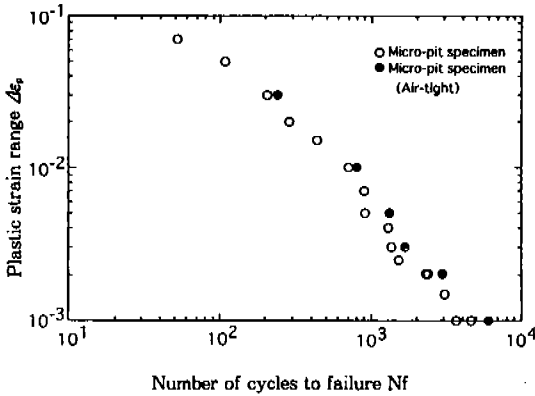


Fig.6 Comparison the low-cycle fatigue life using micro-pit specimens with it using air-tight specimens.

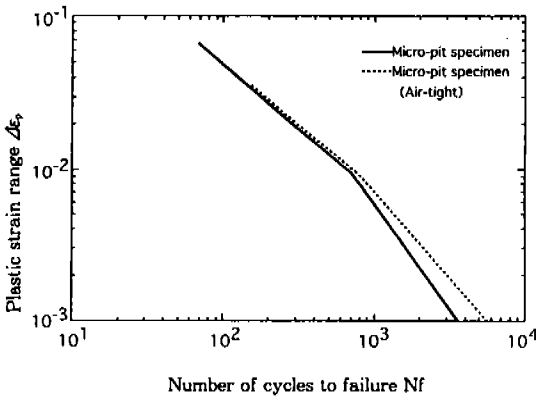


Fig.7 Regression analysis curves of Fig.6

으로 같은 조건에서 수행한 진공중 혹은 불활성 분위기중의 것과 비교해서 수명이 짧아지는 사실은 잘 알려져 있다⁸⁾. 크랙발생을 촉진하는 분위기의 효과로서는 슬립에 의하여 생긴 신생명의 산화⁹⁾. 슬립밴드중의 기체분자의 침입등에 의해 재응착이 방해되는 것¹⁰⁾등을 들 수 있다. 전파에 관해서는, 진공중에서는 일단 개구했던 크랙이 제하과정에서 닫힌 후, 크랙팁으로부터 어느정도 되돌아온 부분부터 다시 개구를 시작하는 점, 그 결과 동일한 크랙팁개구변위(CTOD)에 대한 크랙전파량이 공기중의 것과 비교해서 작다는 사실이 밝혀져 있다¹¹⁾. 또한, 크랙전파에 있

어서 분위기의 영향이 특히 뚜렷한 시기는 제1 단계로부터 제2단계 초기의 저속도전파영역이고, 고속도전파영역에서는 그렇게 다르지 않다는 점도 지적되고 있다.¹²⁾

이상의 사실들로부터 본 결과를 고찰하면 다음과 같이 정리될 수 있다. 본 연구에 사용한 재료는, 피로크랙의 발생 및 전파과정중에 공기의 침입에 의한 영향을 받아서 재료의 열화를 초래하게 된다. 이러한 것은 고 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서보다 크랙 전파속도가 느린 저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서 보다 현저할 것으로 예측되며, 따라서 저 $\Delta\epsilon_p$ 영역쪽으로 갈수록 수명이 단축되어 결국은 절곡현상이 나타나는 것으로 생각되어 진다. 그렇지만, 이러한 요인이 절곡원인의 전부라고는 생각하기 어렵고, 앞절에서의 변형국소화에 근거한 고찰을 포함하여 종합적으로 작용하여 절곡현상을 가져오게 했다고 할 수 있다.

4. 결 론

종래의 연구에 의하면, 티탄합금SP-700의 저사이클 피로수명곡선이 전체 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서 Manson-Coffin법칙형의 단일 직선으로는 표현될수 없고, 저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서 단수명쪽으로 절곡하는 사실이 알려져 있다.

본 연구에서는 티탄합금 SP-700을 사용하여, 이러한 저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서의 피로수명곡선의 절곡현상의 원인을 밝히려 하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 초기크랙을 상정한 미소원공재 및 예비크랙재를 사용하여, 저사이클 피로수명중에서 크랙의 발생단계를 생략한 피로시험을 수행한 결과, 피로수명곡선은 변함없이 $\Delta\epsilon_p = 0.01$ 부근에서 절곡현상을 보였다. 따라서, 크랙 발생과정에서의 소성변형국소화의 영향은 절곡현상의 주원인이라고 할 수 없다.
- 2) 미소크랙전파법칙으로부터 구해진 Manson-Coffin법칙형의 피로수명곡선은 고·저 $\Delta\epsilon_p$ 영역에서 서로 다른 2개의 직선으로 나타내어진다. 이것으로부터 절곡현상의 주원

인은 크랙전파과정에 있다고 할 수 있다.

- 3) 크랙전파과정에서의 소성변형의 국소화는 저 $\Delta\epsilon$ 영역에서 더욱 현저하였다. 이것이 크랙전파를 가속시켜 절곡현상의 한 원인이 되고 있다.
- 4) 공기를 차단한 시험편의 피로수명은 공기 중에서의 것보다 긴 수명을 보였다. 더욱이, 이러한 시험분위기의 영향은 $\Delta\epsilon$ 영역 쪽으로 갈수록 더욱 크게되면서 절곡현상을 거의 소멸시켰다. 따라서 공기의 접촉에 의한 재료의 산화도 절곡현상의 한 원인이 되고 있다.

참 고 문 헌

1. 菊川の 6명, “高強度材料の繰返し數領域における繰返し塑性ひずみの急減と定常ランダム荷重による渡れ”, 日本機械學會論文集, 39~327, pp. 3263~3271, 1973.
2. 幡中, 藤滿, “金屬材料の低サイクル疲労強度と繰返し變形特性に関する二, 三の考察”, 日本機械學會論文集, 50~451, pp. 291~299, 1984.
3. 松岡의 2명, “高強度鋼の低サイクル強度特性”, 日本機械學會論文集, 52~480, pp. 1831~1838, 1986.
4. 村上의 4명, “微小き裂の傳ば則, 低サイクル疲労法則およびマイナー則成立の相互關係について”, 日本機械學會論文集, 49~447, pp. 1411~1419, 1983.
5. 幡中, “金屬材料の繰返し應力-ひずみ特性と低サイクル疲労壽命”, 日本機械學會論文集, 50~453, pp. 831~838, 1984.
6. 原田의 4명, “微小き裂の發生, 傳ばに基づくS45C平骨材の低サイクル疲労壽命評價”, 日本機械學會論文集, 51~464, pp. 1215~1223, 1985.
7. 荒井의 3명, “チタン系超塑性材料の低サイクル疲労壽命特性と破壊機構”, 日本機械學會論文集, 20, pp. 37, 1996.
8. 例를 들면, N. J. Wadsworth, J. Hutchings, “The Effect of Atmospheric Corrosion on Metal Fatigue”, Phil. Mag., 3, pp. 1154, 1958.
9. P. Neumann의 2명, “On the Mechanisms of Fatigue Crack Growth”, Fracture 1977 Ref. 29, 2, pp. 1313, 1977.
10. N. Thompson의 2명, “The Origin of Fatigue Fracture in Copper”, Phil. Mag., 1, pp. 113, 1956.
11. M. Kikukawa의 2명, “Direct Observation and Mechanism of Fatigue Crack Propagation”, ASTM STP, 675, pp. 234~240, 1979.
12. C. Laird, G. C. Smith, “Initial Stages of Damage in High Stress Fatigue in Some Pure Metals”, Phil. Mag., 8, pp. 1945~1949, 1963.