

## 論文

## 랜덤하중이 하이브리드 금속복합재료의 피로수명에 미치는 영향

김성훈\*, 배성인\*, 송정일\*\*

## The effect of random spectrum on the fatigue life of hybrid metal matrix composites

Sung-hoon Kim\*, Sung-in Bae\*, and Jung-il Song\*\*

## ABSTRACT

This research makes comparisons of empirical fatigue-lives between AC8A Al alloy and the metal matrix composites(Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p), and also includes comparisons of fatigue-lives between empirical fatigue-lives and estimated fatigue-lives from regular-periodic load testing, AE method to predict fatigue-crack initiation before visible in sight and SEM(scanning electron microscope) photographs of each material. According to the test results of the notched specimen, the fatigue life of the hybrid metal matrix composites and the metal matrix composites, which are more brittle than the base matrix was shorter than that of the base matrix under both types of loads. In addition, the fatigue-life estimated from the damage summation method and that from experiments at random loads were fairly identical.

## 초 록

본 연구는 알루미늄 합금(AC8A)과 금속복합재료 (Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 및 혼합금속 복합재료(Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>p)의 피로시험 결과 비교와, 일정진폭 피로하중으로부터 예측한 수명과 실험으로부터 얻은 피로수명의 비교하는 것이고, 음향방출 (Acoustic Emission, AE) 방법을 이용하여 피로시험시 균열 발생의 측정 및 예측을 하고자 하였다. 노치재의 실험결과에 따르면, 세라믹 보강재의 첨가로 인해 기지재 보다 연성이 저하된 하이브리드 금속복합재료와 단일 금속복합재료의 피로수명은 두 가지 하중조건에서 모두 기지재 보다 더욱 짧은 수명을 나타내었다. 또한 누적피로수명평가 방법을 통해 예측된 피로수명은 랜덤하중 하에서 실험을 통해 얻어진 피로수명과 거의 일치하였다.

**Key Words :** 랜덤하중(random spectrum), 하이브리드 금속복합재료(hybrid metal matrix composites), 피로수명(fatigue life), 초음파 방출법(acoustic emission method)

## 1. 서 론

지금까지 공학적인 가치가 높아지고 있는 금속복합재료에 대한 기초적인 연구와 응용은 그 동안 많이 이루어져왔다. 특히 알루미늄 기지 금속복합재료는 내마모성이 뛰어나고 열전도성도 좋으며 경량화에 효과적이어서 지대한 관

심의 대상이 되어 왔다[1-8]. 그러나 금속복합재료의 제조 방법 및 보강재의 종류에 따른 기계적 성능 저하현상으로 적용범위가 제한되어 있는데 이를 보완하기 위해 최근에는 보강재를 2개 이상 첨가하는 하이브리드 금속복합재료 (Hybrid metal matrix composite)의 개발에 관심이 높아지고 있다[2-4,7,8].

\* 창원대학교 기계공학과

\*\* 창원대학교 기계공학과, 교신저자(E-mail:jisong@changwon.ac.kr)

이러한 금속복합재료의 이용이 기계 구조물로 확대됨에 따라 이들 재료에 대한 피로실험과 데이터 획득이 시급하다. 그러나 지금까지 일정 진폭 하에서의 피로수명 연구는 많이 이루어져 있지만 랜덤하중 하에서는 별로 이루어져 있지 않다[5,6]. 실제 구조물이나 기계부품이 받는 하중은 일정 진폭하중 하에서의 피로거동 보다는 랜덤하중 하에서의 피로거동에 더 가깝다고 할 수 있다[9-11]. 또한 경량화를 위해 금속복합재료가 항공 우주 산업이나 자동차의 내열 내마모재로 특히 응용되고 있어 이와 관련된 소재의 안정성과 신뢰성을 높이기 위해서는 실제 사용조건과 비슷한 랜덤하중에서의 실험이 필수적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 랜덤하중을 받는 자동차의 브라킷(rear axle bracket)으로부터 운행 중에 발생하는 불규칙한 하중을 랜덤하중으로 정하였고, 사용 소재는 경제성을 고려하여 알루미늄( $Al_2O_3$ ) 단섬유(short fiber)에 비해 저렴한 알루미늄 입자(particle)를 혼합한  $Al/Al_2O_3/Al_2O_3p$  혼합금속복합재료를  $Al/Al_2O_3$  금속복합재료, 기지체인 Al-Si계의 주조용 알루미늄 합금 AC8A와 피로균열 발생수명을 비교하였다. 또한 실험에 의한 피로수명과 일정진폭하중을 이용한 이론적 수명 예측방법을 통해 얻어진 랜덤하중하의 피로균열 발생수명 값을 각각 비교하였다. 그리고 음향 방출법(acoustic emission method)을 이용한 피로균열 발생 수명을 측정하였다[12].

## 2. 이론적 배경

### 2.1 피로 수명 예측법

평활 시험편의 응력-수명선도(S-N curve)를 이용하여 노치 시험편의 응력-수명 선도를 추정할 후, 랜덤하중이력에 대해 레인 플로우 법[13]으로 계산된 히스토그램 데이터를 공칭 응력 이력으로 변환하여 추정된 랜덤하중 하의 노치 응력-수명선도와 비교하여 누적손상법칙을 적용함으로써 피로수명을 예측한다. 노치 응력-수명선도 예측에 있어 피로 노치 계수는 Peterson의 경험식을 적용하였다[14].

$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \frac{a}{r}} \tag{1a}$$

여기서,  $K_t$ 는 탄성 응력집중계수,  $r$ 은 노치 선단 반경,  $a$ 는 재료상수 이다.

평활시험편의 응력-수명선도는 다음 식과 같다.

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^b \tag{1b}$$

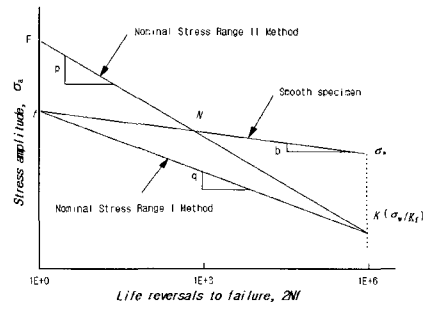


Fig. 1 Method for estimating notched stress and life curve.

여기서  $b$ 는 선도의 기울기를 의미한다. 다음은 평활 시험편의 응력-수명선도를 이용하여 추정된 노치 시험편의 응력-수명선도(Fig. 1)를 나타내는 식으로 공칭응력 범위법 I (nominal stress range method I)과 공칭응력 범위법 II (nominal stress range method II)의 S-N 선도식이다[15].

$$\sigma_a = \sigma'_f (2N_f)^q \tag{1c}$$

$$\sigma_a = K_f \sigma'_f (2N_f)^b \tag{1d}$$

여기서  $q$ 와  $p$ 는 추정된 응력-수명선도의 기울기를 의미한다. 그리고 누적손상법칙은 수정 Miner가설과 Corten-Dolan의 수정 S-N선도 법, Marin의 누적손상이론, Manson의 2차누적손상이론을 이용하였다[15-18].

### 2.2 음향 방출법(AE)

음향방출법(AE)에 대한 연구는 독일의 J. Kaiser가 1950년 재료가 외력을 받아 변형할 때 재료에서 소리(Tin-Cry)가 방출된다고 보고하면서 시작되었다. 발생되어진 AE 신호를 검출하는 센서는 piezoelectric disc를 사용하여 탄성과 전기적 에너지로 변환시키는 것이며 초음파용보다는 40dB에서 60dB정도 민감하다. 센서에서 감지된 탄성과는 전기적으로 변환되어 다음과 같이 정의된다.

$$dB = 20 \log\left(\frac{V_0}{V_i}\right) \tag{2}$$

여기서,  $V_i$ 와  $V_0$ 는 각각 증폭 전후의 AE 신호 크기를 나타낸다. 일반적으로 센서에서 검출된 신호의 감쇠를 방지하기 위해 메인 앰프와 센서 사이에 프리앰프를 사용한다. 이렇게 증폭된 AE 신호는 신호처리장치에서 여러 AE parameter로 분석, 저장된다. AE를 간략히 요약하면 어떤 물체가 외력을 받으면 물체의 내부에너지는 여러가지 형태

의 에너지로 변환되는데, 이들 에너지 중 탄성파를 AE신호(acoustic emission signal)라고 한다. 재료의 내부에너지의 변화가 클 때 예를 들어 항복이나 균열이 일어날 때 탄성파가 많이 발생하며 이들 발생횟수를 기록함으로써 피로 균열 발생을 예측할 수 있다[12].

### 3. 실험 방법

#### 3.1 시편 제조

이 연구에 사용된 기지재는 내열성, 내마모성이 우수하고 열팽창계수가 낮아 자동차 및 디젤기관의 피스톤, 실린더등에 많이 사용되는 Al-Si계의 AC8A 알루미늄 합금이다. Table 1은 기지재의 기계적성질과 화학적 성분비를 나타낸 것이다. 보강재는 영국 ICI사의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> RF grade의 단섬유(상품명 : Saffil)로서 δ 결정상을 가지며 Al합금과의 결합력을 높이는 Silica를 5% 정도 포함하고 있다. Table 2에는 알루미늄과 단섬유와 입자의 기계적 성질을 각각 나타내었다.

Table 1 Chemical composition and mechanical property of AC8A aluminum alloy

Mat.	Chemical composition(w/o)										T.S $\sigma_{ut}$ (MPa)
	Si	Cu	Mg	Ni	Fe	Mn	Zn	Ti	Pb	Al	
AC8A	12.7	1.1	0.9	1.57	0.8	0.1	0.12	0.15	0.04	rem	275

Table 2 Specifications of reinforcements

Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Diameter ( $\mu$ m)	Length ( $\mu$ m)	T.S (GPa)	E (GPa)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Short fiber	3.3	3.0	60	2.0	310
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle	3.95	50	-	-	310

시험에 이용된 장비는 최대하중 100kN의 MTS 810 만능시험기와 AE 신호획득을 위한 AMSY4-SF, 데이터 신호획득을 위한 PCL-812PG가 이용되었다.

예비 성형체의 제조는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 부피비 20%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub>하이브리드는 전체 부피비 20%에 Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub>가 5%로 하여 진공압 추출법을 이용하였으며, 금속복합재료의 제조는 가압용침법을 사용하였다[4-8]. 제조된 시편은 모두 T6 열처리를 하였으며, Fig. 2는 노치시험편의 치수이다.

#### 3.2 피로 및 AE시험

피로시험을 위해서는 10톤 용량의 유압식 MTS를 사용

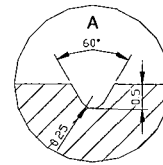
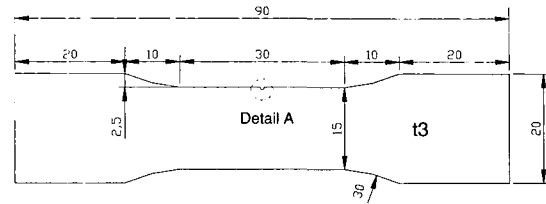


Fig. 2 Dimensions of specimen[unit:mm].

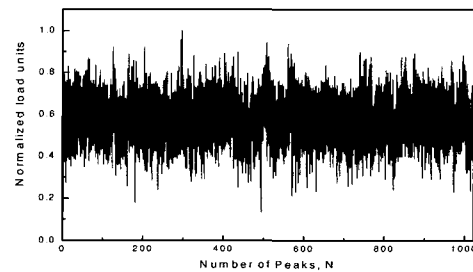


Fig. 3 Random load history of rear axle bracket.

하였으며, 시험재료의 항복강도를 기준으로 단계별로 하중을 감소시킨 하중을 각 하중범위의 최대하중(P<sub>max</sub>)으로 하고 이때 하중비 R는 0.1을 적용하였다. 그리고 하중 반복 주파수는 일정 진폭일 경우 10Hz, 랜덤하중일 경우에는 3Hz로 하였다. 랜덤하중이력은 비포장도로를 25.8km/h의 속도로 주행하는 자동차의 브래킷(Rear axle bracket)에 스트레인 게이지를 붙여 하중이력을 기록한 것으로 피크 값 1022개, 최대값은 1, 최소값은 0.1로 Fig. 3에 나타내었다[10].

그림과 같이 하중이력을 한 블록으로 설정하고 피로수명 또한 블록 수로 고찰하였다. AE측정을 위해 2채널 짜리 AMSY4를 이용하였고, 센서는 압전공지형을 사용하였다. 피로시험시 AE 신호는 연속적으로 획득하였으며, 신호 획득시 입력신호를 34dB 증폭하였고 잡음의 제거를 위하여 문턱 값을 35dB로 설정하였다.

### 4. 결과 및 고찰

4.1 재료 및 인장강도

Fig. 4 (a), (c)는 보강재간의 결합 상태를 보여주는 예비성형체이고, Fig. 4 (b), (d)는 기지재에 보강된 보강재의 분포를 광학현미경으로 관찰한 것이다. 그림과 같이 예비성형체의 분포와 MMCs의 제조상태가 양호함을 알 수 있다.

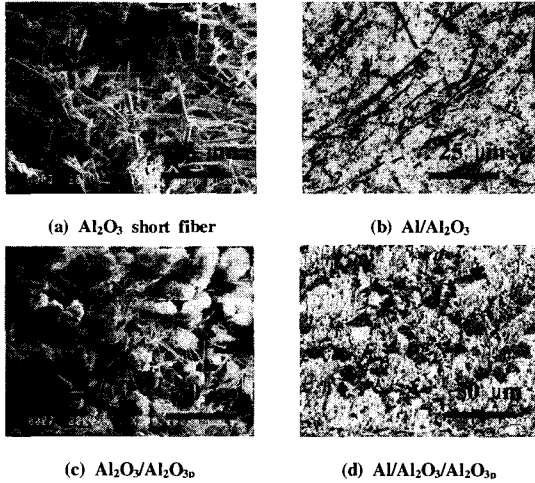


Fig. 4 Photos of preforms and MMCs.

Table 3 Results of tensile test(unit:MPa)

	AC8A	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3p</sub>
Unnotched S	262	287	337
Notched S	244	238	225

Fig. 5과 Fig. 6은 기지재인 AC8A와 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 및 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub> 하이브리드 금속복합재료의 인장시험결과를 평활시편과 노치시편으로 구분하여 나타낸 것이다. Fig. 6과 같이 인장시험결과 평활 시편에서는 알루미늄 단섬유에 구형의 입자를 혼합 보강한 하이브리드 금속복합재료의 인장강도가 가장 증가한결과를 보였다. 이것은 하중작용시 단섬유와 입자간 연결(cross link) 부분이 기지재의 유동성을 방해(barrier)시키는 효과를 보여 강도가 가장 높은 결과를 나타내었다[8]. 인공 노치를 넣은 시편에서는 기지재의 인장강도가 가장 높게 나타났다. 즉 노치 시편의 경우 평활시편에 비해 기지재는 7%, 금속복합재료는 17%, 하이브리드 금속복합재료는 33% 정도의 인장강도 저하를 보였다. 자세한 데이터는 Table 3과 같으며, 여기서 S는 specimen을 의미한다. 이는 금속복합재료의 경우 균열이 생성되지 않은 상태에서는 첨가된 보강재가 기지금속의 조직을 미세화시킴에 따라 기지재와의 균열을 구속하는 역할을 하는

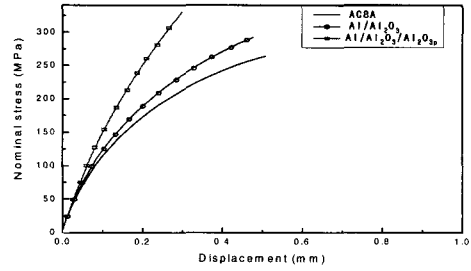


Fig. 5 Stress-Displacement curve of MMCs for the unnotched specimen.

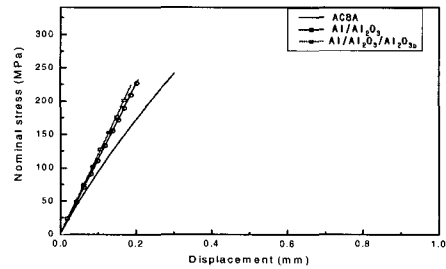


Fig. 6 Stress-Displacement curve of MMCs for the notched specimen.

데 비해, 균열이 형성된 상태에서는 오히려 기지금속을 미세화시킨 보강재가 기지재와의 결합능력을 저하시켜 인장강도가 낮은 결과를 보인 것이다[4,5].

4.2 일정하중과 랜덤하중에 따른 피로수명 평가

인장시험 결과를 바탕으로 각 재료에 대한 일정진폭 및 랜덤하중하의 피로시험을 각각 실시한 결과이다. 일정진폭 피로시험의 경우 작용 하중은 인장강도의 80%에서 50%까지 10%씩 감소시켰으며, 이때 하중비는 0.1로 하였다.

Fig. 7에 나타난 바와 같이 일정진폭하중하의 평활시험편의 경우는 단섬유 금속복합재료 및 하이브리드 금속복합재료의 피로수명이 기지재에 비해 길게 나타났다. 이는 인장시험 결과에서도 알 수 있듯이 기지재에 단섬유와 혼합 결합된 입자에 의해 향상된 인장강도의 결과가 피로강도도 향상시킨 결과를 잘 반영하고 있는 것이다[5,6]. 특히 작용하중이 높은 경우 기지재에 비해 피로수명의 향상은 두드러졌으며, 두 금속복합재료의 비교에서도 마찬가지로 하이브리드 금속복합재료의 경우 단섬유만으로 보강된 금속복합재료보다 더욱 미세화된 조직으로 인해 재료의 표면에 균열이 발생시까지의 시간, 즉 피로발생수명은 더욱 향상된 결과를 보인 것이다[5,7,8]. 이와는 반대로 Fig. 8와 같이 노치재의 경우 금속복합재료의 피로수명이 기지재에 비해

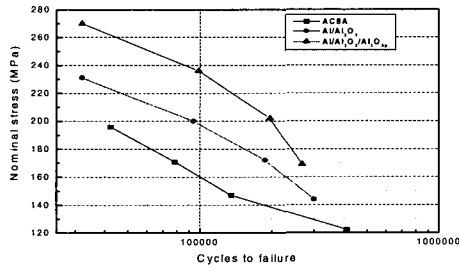


Fig. 7 Constant amplitude fatigue lives of MMCs for the unnotched specimen.

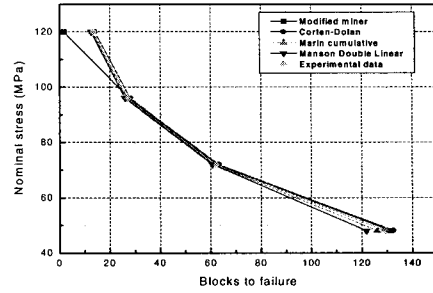


Fig. 10 Experimental and predicted fatigue lives with AC8A alloy for the notched specimen.

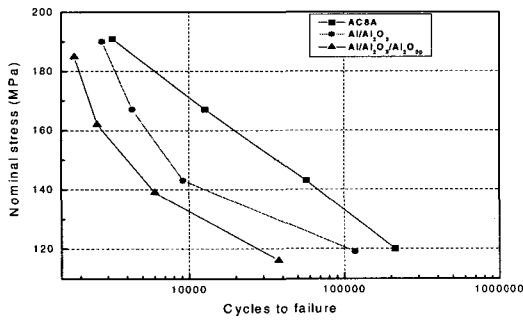


Fig. 8 Constant amplitude fatigue lives of MMCs for the notched specimen.

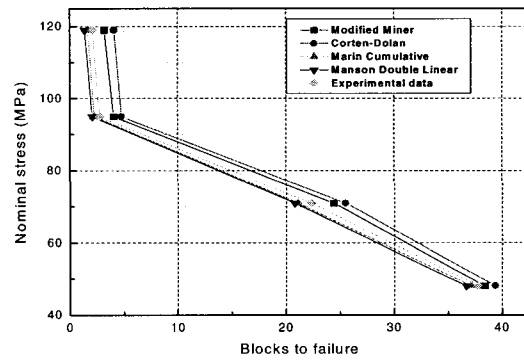


Fig. 11 Experimental and predicted fatigue lives with Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite for the notched specimen.

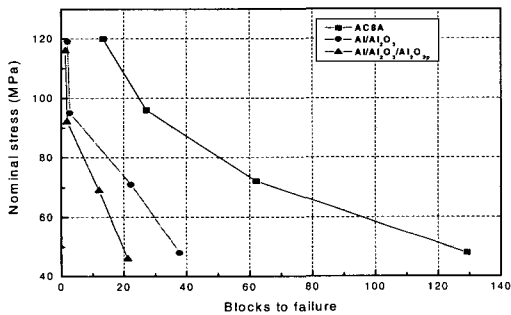


Fig. 9 Random fatigue lives of MMCs for the notched specimen.

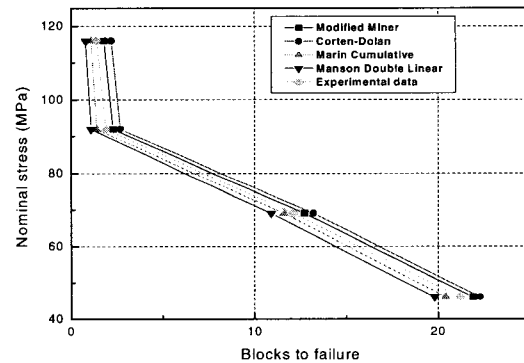


Fig. 12 Experimental and predicted fatigue lives of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub> hybrid composite for the notched specimen.

저하되었으며, 특히 작용하중이 낮아질 수록 피로수명은 더욱 저하되었다. 이는 균열이 형성된 상태에서는 오히려 기지금속을 미세화시킨 보강재가 저항성이 떨어져 파단을 가속시키는 것으로 생각된다.

Fig. 9은 노치시험편에 대하여 랜덤피로하중 부과시 피로수명을 나타낸 것이다. 이것은 항복강도의 50%에서 20% 까지 10%씩 감소시킨 하중과 하중비 0.1로 하였을 때의 결

과이다. 일정진폭하중시험 결과 보다 기지재에 비하여 금속복합재료의 피로수명이 하중변화에 따라 현저히 감소하는 것을 알 수 있으며, 특히 하중범위가 항복강도 40%에서

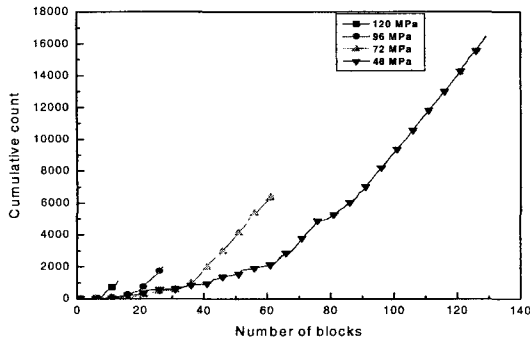


Fig. 13 AE cumulative count of AC8A alloy for the notched specimen.

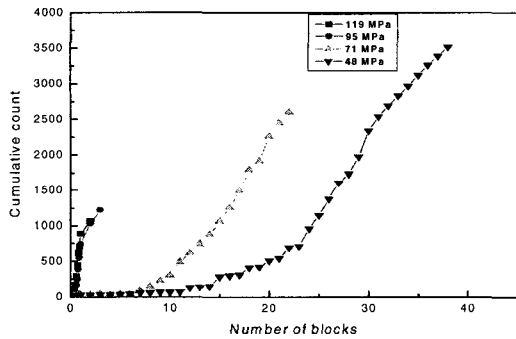


Fig. 14 AE cumulative count of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite for the notched specimen.

의 결과는 50%와 거의 차이가 없을 정도로 랜덤하중에 의한 피로수명이 저하되는 것을 알 수 있었다. 랜덤하중에서도 하이브리드 금속복합재료가 단일 보강 금속복합재료 보다 피로수명이 저하된 결과는 유사하였다[7,9].

**4.3 누적 손상법에 의한 피로수명 예측**

Fig. 10-12은 노치 시험편의 일정진폭 피로시험 결과를 이용하여서 주어진 랜덤하중이력에 대해 단순화된 레인 플로우법으로 계산한 결과를 하중-수명선도와 비교하여 기존에 제시된 여러 가지 누적손상이론을 적용, 수명예측을 한 후 랜덤하중하의 피로시험결과와 비교한 것이다.

Fig. 10에서와 같이 기지재의 경우는 누적 손상 가설법에 의해 피로수명을 예측한 결과와 실험결과가 거의 일치하였으며, Fig. 11-12의 두가지 금속복합재료에서는 모두 수정 Miner 법과 Corten-Dolan 법은 약간 과대하게 Marin 법과 Manson 법은 보수적으로 수명 예측이 이루어졌으나 그 차이는 크지 않았다. 누적 손상법에 의한 피로수명을

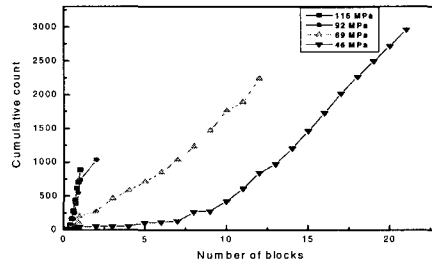


Fig.15 AE cumulative count of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub> hybrid composite for the notched specimen.

본 실험데이터와 비교한 결과, 금속복합재료의 거시적인 피로거동이 일반 금속재료와 유사하게 나타나기 때문에 기존의 수명예측법은 금속복합재료에서도 비교적 정확하게 이루어짐을 알 수 있었다. 특히 수정된 Miner 법과 Marin 에 의한 누적손상법을 적용한 결과가 두 금속복합재료의 실험데이터와 가장 잘 일치되는 결과를 얻을 수 있었다.

**4.4 AE를 이용한 균열 발생 예측**

AE 센서에서 자체 잡음이 발생하므로 이들 값을 제거 하기 위해 문턱 값(threshold) 35dB을 넘는 데이터만 실험데이터로 이용하였다. Fig. 14-16의 그래프는 각 시험재료별로 랜덤하중을 부과시 블록수의 변화에 대해서 누적 AE 카운트를 나타낸 것이다. 본 누적 AE 카운트의 기울기변화는 균열 발생시점(기울기의 변곡점) 및 전과등을 예측하는데 매우 유용한 자료로 사용될 수 있다.

Fig. 13은 AC8A 기지재의 AE 발생 누적신호를 나타낸 것으로, 작용 응력이 48MPa인 경우를 보면 블록수 60까지는 누적AE 카운트가 2000 정도로 완만하게 증가하는 균열의 발생과정을, 이후에는 블록수 60을 초과하면서 누적AE 카운트가 급증하면서 서서히 균열이 전파하는 과정임을 관찰할 수 있다. 즉 알루미늄 기지재의 AE 신호를 분석한 결과 초기 노치 선단에서 소성영역의 발생으로 카운트가 서서히 증가하다, 이 후 소성영역의 확대 및 재료 내부에서의 전위의 발생 등에 의해 카운트의 급격한 증가가 발생하는 기존의 연구결과와 유사하였다[12].

Fig. 14와 Fig. 15은 금속복합재료에 대한 결과를 나타낸 것인데, 작용응력이 증가할수록 AE 신호가 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 복합재료의 경우 AE 거동은 기지재와 보강섬유와의 분리, 뿔힘과 끊김등에 의해 AE 신호의 급격한 방출이 이루어지는 것으로 알려져 있는데, 본 연구결과에서도 비슷한 결과를 보였다. 특히 노치재에서 하이브리드 금속복합재료의 경우 인장강도 및 피로시험 결과에서와 마찬가지로 AE 거동의 누적카운트도 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료에 비해 다소 감소하였다.

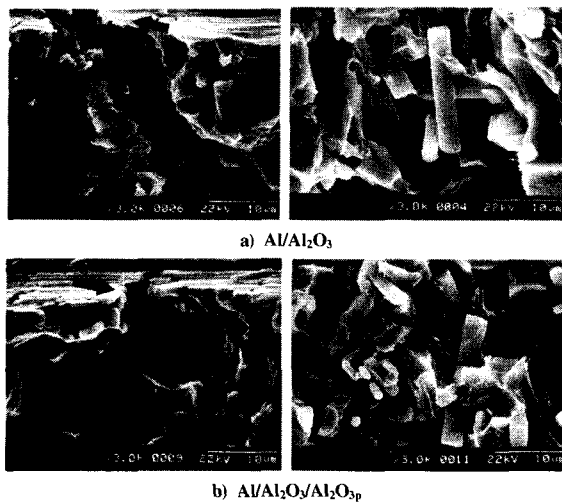


Fig. 16 SEM photos of crack initiation(left) and final fracture site (right) for each MMCs.

이와같은 AE 결과를 분석할때 노치 선단에서 균열이 발생하기 이전에 누적 AE 카운트 그래프 기울기의 증가로 균열 발생 시점을 사전에 감지 할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 4.5 파면 분석

파면 분석은 파단면의 미세조직을 관찰함으로써 재료의 파괴기구를 설명할 때 유용한 증거가 되는 것으로, 랜덤피로시험 후 균열발생 초기 하중 위치의 최종 파단면을 SEM으로 확인한 것이다.

Fig. 16은 랜덤하중에 의한 피로시험 후 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 금속복합재료와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub> 하이브리드 금속복합재료의 파면을 초기 균열개시위치(왼쪽)와 최종 파단위치(오른쪽)에서 각각 관찰한 것이다. Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 금속복합재료의 경우 초기 랜덤하중이 가해지는 노치의 균열개시 근방(화살표)에서는 보강재의 뽑힘(pull out)과 끊김(break)이 관찰되며 파면의 dimple(패임)도 최종파단면에 비해서는 전체적으로 작게 관찰되었다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub> 하이브리드 금속복합재료의 노치근방에서는 단섬유의 끊김현상은 보이지 않았으며, 오히려 단섬유의 뽑힘 현상이 두드러지게 나타났다. 이것은 피로 거동과 AE 누적카운트의 결과에서도 이미 잘 나타난 바와 같이, 노치를 갖고 있는 하이브리드 금속복합재료의 경우 기계가공된 노치 부근에서 직경이 단섬유의 직경이나 길이에 비해 비교적 큰 구형의 입자 보강에 따른 미세 동공(cavity), 또는 결함(flaw)등이 쉽게 노출되어 균열개시가 촉진되게 한 것으로 생각된다. 특히 일정피로하중시 전형적으로 발생하는 기지재에서의 줄무늬(striation) 현상은 관찰되지 않는데, 이것은 불규칙하중의 영향으로 인해 보강재

와 기지재 사이에서 높은 파괴변형을 유도할 수 있는 에너지 흡수기구가 없이 빠른 파단을 초래한 것이다.

이상과 같은 결과를 볼때 인공노치가 없는 금속복합재료의 피로발생수명은 기지재에 비하여 향상되나, 노치가 발생되었을 때에는 균열개시가 촉진되므로, 금속복합재료의 피로수명을 규명시 특히 하이브리드 금속복합재료의 랜덤하중하에서 피로수명 평가시 더욱 유의해야 한다. 또한 금속복합재료의 연성저하는 고탄성계수와 낮은 파괴변형으로 인한 저개시에너지, 저전파에너지의 경향을 보이는 특성을 갖고 있어 높은 파괴변형을 유도할 수 있는 보강재 및 기지재를 사용하여 보강재의 pull out과 debonding과 같은 에너지흡수기구를 유도함으로써 피로물성치를 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

#### 5. 결론

알루미늄 기지재의 금속복합재료를 제조하여 평활 시험편과 노치 시험편에 대하여 일정진폭 및 랜덤하중 하에서 피로시험을 한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

일정진폭하중 평활시험편의 경우는 하이브리드 금속복합재료의 경우 단섬유만으로 보강된 금속복합재료보다 더욱 미세화된 조직으로 인해 피로발생수명은 기지재에 비해 더욱 향상된 결과를 보였다. 노치재의 경우, 즉 균열이 형성된 상태에서는 오히려 기지금속을 미세화시킨 보강재가 저항성이 떨어져 파단을 가속시켰으며, 특히 랜덤하중시 하이브리드 금속복합재료가 단일 보강 금속복합재료 보다 피로수명이 저하되었다.

누적 손상법에 의한 피로수명을 실험과 비교한 결과, 수정된 Miner 법과 Marin에 의한 누적손상법을 적용한 결과가 두 금속복합재료의 실험데이터와 가장 잘 일치되었다. AE 신호를 분석한 결과 노치재에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3p</sub> 하이브리드 금속복합재료의 AE 거동 누적카운트도 Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합재료에 비해 다소 감소하였으며, 노치 선단에서 균열이 발생하기 이전에 누적 카운트 그래프 기울기의 증가로 균열 발생 시점을 확인할 수 있었다.

#### 후기

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2000-E00053).

#### 참고문헌

- 1) S. Towata, S. Yamada, and T. Ohwaki, "Strength and interfacial reaction of high modulus carbon fiber

- reinforced aluminum matrix," *Transactions of the Japan Institute of Methods*, Vol. 29, No.4, 1988, pp. 314-321.
- 2) J. I. Song, K. S. Han, "Mechanical property and solid lubricant wear behavior of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C hybrid composites fabricated by squeeze casting method," *J. of Composite Materials* Vol. 13, No. 4, 1997, pp. 316-344.
  - 3) J. I. Song, K. S. Han, "Effects of volume fraction of carbon fiber on wear behavior of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/C hybrid metal matrix composites," *Composite Structures*, Vol. 39, 1997, pp. 309-318.
  - 4) M.S.Han and J.I.Song, "Characterization of fracture toughness of the short fiber reinforced metal matrix composites," *International Journal of Modern Physics B*, Vol. 17 Nos. 8&9, 2003, pp. 1827-1832.
  - 5) J.I.Song, T.W.Lim, K.S.Han, "Mechanical properties and fatigue crack propagation behavior of hybrid metal matrix composites," SAE Technical paper series, 960870, 1996, pp. 1-12.
  - 6) 남현욱, 송정일, 한정섭, "단섬유 보강 금속복합재료의 피로수명예측," 한국복합재료학회지, 9(3), 1997, pp. 40-48.
  - 7) 송정일, "기지금속과 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 금속복합재료의 피로 및 주기적 변형거동," 한국복합재료학회지, 12(5), 1999, pp. 1-11.
  - 8) 정성욱, 이종해, 정창규, 송정일, 한정섭, "섬유/입자 혼합 금속복합재료의 강화기구," 한국복합재료학회지, 13(1), 2000, pp. 50-60.
  - 9) 김성훈, 함경춘, 배성인, 송정일, "랜덤하중이 알루미늄 합금의 피로수명에 미치는 영향," 대한기계학회 추계학술대회, 2001, pp. 18-23.
  - 10) 배성인, "직류전위차법을 이용한 랜덤하중하의 피로균열 진전율에 대한 신뢰성 공학적 연구," 대한기계학회 논문집(A), 제20권, 제2호, 1996, pp. 473-480.
  - 11) 하재선, 송지호, 이시중, "변동하중하의 피로수명예측 제1보: 피로균열발생까지의 수명," 대한기계학회 논문집, 제12권, 제4호, 1988, pp. 760-780.
  - 12) R. G. Liptai, D. O. Harris and C. A. Tatro, "An Introduction to acoustic emission," *ASTM STP 505*, 1971, pp. 3-8.
  - 13) ASTM Designation : E1049-85, Standard Practice for Cycle Counting in Fatigue Analysis, 1985
  - 14) Peterson, R. E., *Stress Concentration Factors*, John & Sons, Inc., 1974, pp. 9-11.
  - 15) Manson, S. S., Frecke, J. C., and Ensign, C. R., "Applications of a Double Linear Damage Rule to Cumulative Fatigue," STP-415, ASTM, Philadelphia, 1967, pp. 384.
  - 16) Miner, M. A, "Cumulative Damage in Fatigue," *Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME, E.*, Vol. 12, September, 1945, pp. A159-A164.
  - 17) Corten, H.T., Dolan, T.J., "Cumulative Fatigue Damage," *Proceedings of International Conference on Fatigue of Metals*, 1956, pp. 235-246.
  - 18) Marin, J., *Mechanical Behavior of Engineering Materials*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1962