

〈論 文〉

# 유사랜덤하중파형 작성과 이를 이용한 랜덤하중하의 표면피로 균열진전에 관한 기초적 검토

송지호\* · 김종한\*\* · 김정엽\*

(1988년 9월 27일 접수)

## Generation of Pseudo-Random Load Waves and Preliminary Study on Surface Fatigue Crack Growth under Random Loading

Ji Ho Song, Jong Han Kim and Chung Youb Kim

**Key Words :** Pseudo-Random Load Wave(유사랜덤하중파형), Computer Simulation(컴퓨터 시뮬레이션), Surface Fatigue Crack(표면피로균열), Crack Closure(균열닫힘), Effective Stress Intensity Factor(유효응력 강도계수)

### Abstract

Pseudo-random load waves for fatigue testing were generated by personal computer simulation and preliminary study was performed on the growth behavior of surface fatigue crack under random loadings. The closure behavior and growth rates of surface fatigue crack were significantly influenced by the characteristics of random waves. It was also found that the growth rates of surface fatigue crack under random loadings could not be always described by the effective stress intensity factor based on the concept of crack closure.

### 1. 序 論

실제 機器나 구조물에 작용하는 하중은 振幅등이 不規則하게 변화하는 이른바 랜덤변동 하중으로, 기기나 구조물의 強度설계에 있어서는 이러한 랜덤변동하중하의 재료의 거동, 특히 피로거동에 관하여 상세히 검토할 필요가 있다. 따라서 현재까지 랜덤변동하중하의 피로거동에 관해서는 적지 않은 연구가 이루어져<sup>(1~4)</sup> 유익한 결과도 얻어지고 있으나, 하중의 복잡성, 負荷中の 피로거동 측정의 곤란성 등에 의해 아직도 미지의 부분이 많다.

최근 컴퓨터 이용이 일반화됨에 따라 랜덤하중과

형의 발생, 하중제어, 피로거동측정 및 해석 등이 비교적 容易하게 되어, 랜덤하중하의 피로균열진전에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으나,<sup>(5~8)</sup> 현재도 국내에서는 실험상의 어려움 때문에 랜덤하중에 의한 피로시험연구는 거의 찾아볼 수가 없다. 또한 실제 기기 및 구조물에 많이 발생하는 표면균열의 랜덤변동하중하의 진전거동에 관해서는 특히 측정상의 곤란 등으로 국외에서도 기초적인 정보 및 연구가 매우 적은 상황에 있다.

본 연구에서는, 이러한 상황을 감안하여 피로시험을 위한 類似랜덤(pseudorandom)하중 파형을 퍼스널컴퓨터 시뮬레이션에 의해 작성하는 소프트웨어를 개발함과 동시에 이를 이용하여 표면피로균열진전시험도 약간 수행하여, 변동하중하의 표면균열 진전거동에 관하여 대체적인 특성을 검토하여 보기로 하였다.

\* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 한국과학기술원 기계공학과

## 2. 피로시험용 類似랜덤하중파형 발생법

### 2.1 定常 Gauss 랜덤파형 작성법

피로시험용 랜덤하중파형을 작성하는 방법에는, 실제 기기나 구조물에 작용하는 하중파형을 기록하여 그대로, 또는 적당히 처리하여 사용하는 방법, 또는 백색잡음 발생기(white noise generator)의 출력을 전기적으로 필터링(filtering)하여 원하는 파워스펙트럼(power spectrum)을 가진 파형을 얻는 방법, 혹은 컴퓨터 시뮬레이션(simulation)에 의해 작성하는 방법등이 있을 것이다. 각 방법에 고유의 장단점이 있으나, 근래에는 실험목적에 따라 파워스펙트럼 형태와 파형길이를 쉽게 변경할 수 있고, 경제적인 면에서도 유리한 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 방법이 널리 사용되는 경향이 있다.

본 연구에서도 이러한 利點을 감안하여, 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션에 의해 랜덤하중파형을 작성하기로 하였다. 任意의 파워스펙트럼을 가진 定常 Gauss 랜덤파형을 발생하는 방법은 여러가지가 있을 것이나, 여기서는 便宜上 Kondo(近藤)등이 피로연구에 사용한 예가<sup>(9)</sup> 있는 余弦波의 級數합을 이용하는 방법을<sup>(10)</sup> 사용하기로 하였다. 이 방법은 平均值가 0인 定常 Gauss 랜덤 과정  $x(t)$ 를 다음식으로 나타내는 방법이다. 즉,

$$x(t) = \sum_{n=1}^N C_n \cos(2\pi f_n t + \phi_n) \quad (1)$$

여기서  $C_n$  및  $f_n$ 은,  $x(t)$ 의 파워스펙트럼 밀도함수를  $W(f_n)$ , 上限 周波數를  $f_u$ , 下限 周波數를  $f_l$ 이라 할때,

$$\left. \begin{aligned} C_n &= [2W(f_n) \cdot \Delta f]^{1/2} \\ f_n &= f_l + (n - \frac{1}{2})\Delta f, \\ \Delta f &= \frac{f_u - f_l}{N} \quad (n=1, 2, \dots, N) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

와 같이 나타내어 지는 값이며,  $N$ 은 주파수 영역 分割數이다. 또한 식 (1) 중의  $\phi_n$ 은  $[0, 2\pi]$ 에서 균일하게 분포하는 랜덤位相이다.

파워스펙트럼 밀도함수  $W(f_n)$ 의 형태가 주어지면, 식 (1)에 의해 랜덤파형을 작성할 수가 있다. 본 연구에서는 실제 피로시험 수행 및 결과 分析上的 便宜를 생각하여, 하중 되풀이속도(反復周波數)가 피로강도에 거의 영향을 미치지 않는 주파수 영역을 대상으로, Fig. 1에 보이는 바와 같은 세가지

종류의 파워스펙트럼 밀도함수 형태를 가진 랜덤파형을 작성하기로 하였다.

Fig. 1(a)는 2~20Hz에 걸쳐 균일한 파워를 갖는 비교적 廣帶域(broad band)파형이며, Fig. 1(b)는 1자유도 진동계를 假想한 狹帶域(narrow band) 파형(尖銳度  $Q=9.5$ ), Fig. 1(c)는 2자유도 진동계를 가상한 파형이다. 식(2)중의 주파수영역 분할수  $N$ 에 관해서는 Kondo 등의 결과<sup>(9)</sup>를 일단 참고로 하여 다음과 같이 결정하였다.

식 (1)에 의해 작성되는 랜덤파형은 길이가 길어지면 周期性이 나타나는 경향이 있으며, 그 周期  $T_p$ 는

$$T_p = \frac{2}{\Delta f} = \frac{2N}{f_u - f_l} \quad (3)$$

과 같이 주어진다고 알려져 있다<sup>(9)</sup>. 한편 랜덤하중파형에 의한 피로시험을 실제 수행할 경우를 생각하면, 時時刻刻 랜덤하중파형을 작성, 출력하며 시험하는 것은 파형작성 및 출력에 高價의 특수장비 또는 대형 컴퓨터 級의 계산속도를 가진 컴퓨터를 필요로 하는 어려움이 있을 뿐더러, 하중치 제어를 위해서 시시각각 하중을 측정할 필요가 있는 등의 실험상의 문제점 외에, 변동하중하의 피로에서 중

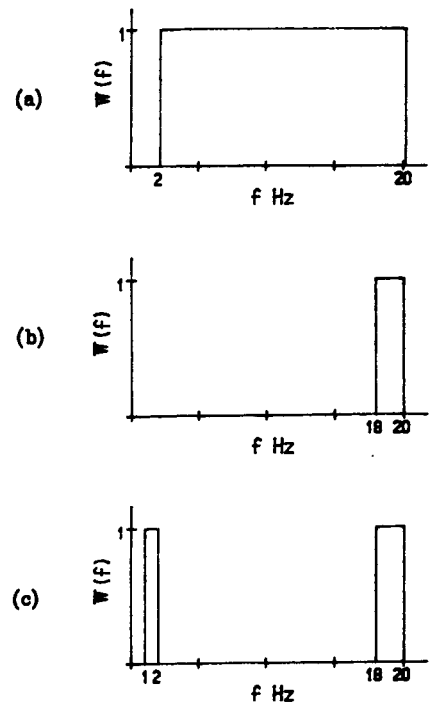


Fig. 1 Power spectral density functions

요한 파형사이클셈(cycle counting) 및 결과분석과도 관련하여 여러가지 어려운 문제가 있다. 따라서 쥘 피로수명 자체만을 대상으로 하는 특수한 경우를 제외하고, 일반적으로는 충분히 랜덤성을 유지할 수 있는 적당한 길이의 랜덤파형을 작성하여, 그것을 단위 블록(unit block)으로 하여 되풀이 사용하는 一種의 유사랜덤파형에 의해 피로시험을 수행하는 것이 보통이다. 이 경우 랜덤파형 단위 블록의 길이를 식(3)의 주기와 일치시키면 여러모로 편리할 것이다. Kondo<sup>(9)</sup> 등은 이상과 같은 점을 고려하여, 랜덤파형 단위 블록에  $3\sigma_{rms}$  정도의 성분까지 포함되도록 랜덤파형 단위 블록의 極值(peak and valley) 數를 1000으로 하여 식(3)을 이용, 랜덤파형을 작성하고 있다.

본 연구의 Fig. 1과 같은 특성을 가진 랜덤파형의 경우에도 같은 방법을 사용하기로 하고, 랜덤파형 단위 블록의 극치수를 1000으로 하면, 극치는 上限 周波數에 의해 결정되므로, 랜덤파형 단위 블록의 주기는  $\frac{1000}{2 \times 20} = 25$ 초가 된다. 이 주기를 식(3)의 주기  $T_p$ 와 일치시키면, Fig. 1(a)의 廣帶域 파형 및 Fig. 1(c)의 2자유도 진동계파형의 경우,  $N=225$ , Fig. 1(b)의 狹帶域 파형의 경우  $N=25$ 가 얻어진다. 그러나 이와 같이 얻어진  $N$ 값을 사용하여 실제 랜덤파형을 작성한 결과는, 단위 블록의 중간에서 극치의 부호가 逆轉된 형식의 주기가 나타나는 결점이 있었다. 따라서 본 연구에서는 위의  $N$ 값을 2배로 하여, 즉 Fig. 1(a)와 (c)의 경우  $N=450$ , Fig. 1(b)의 경우  $N=50$ 으로 하여 극치 2000개까지 시뮬레이션하여 파형을 얻은 후, 그 1/2만을 사용하여 랜덤파형 단위 블록내에서는 거의 周期性이 없도록 하였다.

한편 식(1)중의  $\phi_n$ 에 대해서는 均일亂數 발생법으로 定評이 나 있는 곱셈형합동법(multiplicative congruential method)<sup>(11)</sup>에 의해 亂數를 발생시킨 후,  $[0, 2\pi]$ 사이의 값으로 변환하여 사용하였다. 곱셈형합동법은

$$x_{n+1} = \lambda \cdot x_n \pmod{P} \tag{4}$$

에 의해 난수를 발생하는 방법으로, mod  $P$ 는  $P$ 의 整數倍는 버린다는 의미이다.  $\lambda$  및  $P$ 의 값으로는 관련연구결과<sup>(11)</sup>를 참조하여

$$\lambda = 5^{13}, \quad P = 2^{42}$$

를 사용했다. 또한  $x$ 의 初期值로는 예비계산결과,  $x_1 = 566387$ 을 사용했다. 식(1)중의 시간간격  $t$ 는

랜덤파형의 극치의 誤差를 결정하는 중요한 변수로, 본 연구에서 대상으로 하는 Fig. 1의 특성을

```

C
C
C      This program is for generating random signal.
C      << Compile & link by RM-Fortran >>
C
C      IMPLICIT REAL*(A-H, O-Z)
C      DOUBLE PRECISION LL,KN,XX,RR,RANDM
C      COMMON /GSM/NOB, FRBQ(1100),PHI(1100),A(1100),FL(2),PH(2)
C
C      * Variable
C      INPT.DAT ; Input data file name
C      RAND.DAT ; Output file name (random signal)
C      PRAK.DAT ; Output file name (peak)
C
C      NC ; Characteristic of power spectral density fn
C           1. Narrow band or Wide band P.S.D.
C           2. Two peaks P.S.D.
C      NP ; No. of peaks to be generated
C      FL ; Low limit frequency
C      FH ; High limit frequency
C      I/TI ; Tide interval
C      N ; No. of grids
C      RANDM ; Random number
C
C      * Format of input data file 'INPT.DAT'
C      NP, NC, TI, FL(1), PH(1), [FL(2), PH(2)]
C
C      OPEN(4, FILE = 'INPT.DAT', STATUS = 'OLD')
C      OPEN(5, FILE = 'RAND.DAT', STATUS = 'NEW')
C      OPEN(6, FILE = 'PRAK.DAT', STATUS = 'NEW')
C
C      READ(4,*) NP
C      READ(4,*) NC
C      READ(4,*) TI
C
C      DO 10 M=1,NC
C      READ(4,*) FL(M)
C      READ(4,*) FH(M)
C 10  CONTINUE
C
C      NE=50*NP
C      PI=3.141592
C      M=M-1
C      XN=566387.
C      IM=2.**42
C      AA=5.**13
C
C      N=INT(NP*(FH(M)-FL(1)))/(4.*FH(M))
C      DELF=(FH(M)-FL(1))/FLOAT(N)
C
C      DO 20 I=1,N
C      FRBQ(I)=FL(1)+(FLOAT(I)-0.5)*DELF
C
C      This routine generates random numbers having uniform
C      distribution by the multiplicative congruential method.
C
C      LL=IDINT(AA*XN/RM)
C      XX=XN-LL
C      RR=RR/XX
C      XN=AA-RR*LL
C      RANDM=XN/RR
C      XN=XN*XX
C
C      PHI(1)=2.*PI*RANDM
C      A(1)=(2.*DELF)*#0.05
C 20  CONTINUE
C
C      IF(NC.EQ.1) GOTO 40
C      DO 30 I=1,N
C      IF(FRBQ(I).LT.FH(1)) GOTO 30
C      IF(FRBQ(I).GT.FL(2)) GOTO 30
C      A(1)=0.
C      CONTINUE
C
C 40  CONTINUE
C      L=L
C      SUMO=0.
C
C      DO 100 I=1,NE
C      SUM=0.
C      DO 50 J=1,N
C      SUM=SUM+A(J)*COS(2.*PI*FRBQ(J)+FLOAT(I)/TI+PHI(J))
C 50  CONTINUE
C      WRITE(5,*) I,SUM
C      IF(1.NE.I) GOTO 60
C      SIGN=SUM
C 60  CONTINUE
C      DELX=SUM-SUMO
C      IF(SIGN.LT.0) GOTO 70
C      IF(DELX.LT.0) GOTO 80
C      GOTO 90
C 70  IF(DELX.GT.0) GOTO 80
C      GOTO 90
C 80  CONTINUE
C      WRITE(6,*) L,SUMO
C      IF(L.GE.NP) GOTO 110
C      SIGN=-1.*SIGN
C      L=L+1
C 90  CONTINUE
C      SUMO=SUM
C 100 CONTINUE
C 110 CLOSE(4)
C      CLOSE(5)
C      CLOSE(6)
C
C
C      STOP
C      END

```

Fig. 2 Computer program for random wave generation

가진 파형인 경우, 상한 주파수 1 사이클(cycle)을 16등분 하도록 시간간격을 1/320 초로 잡아, 극치의 오차가 2% 이내<sup>(12)</sup>가 되도록 하였다.

이상 설명한 방법에 따라 퍼스널 컴퓨터시뮬레이션에 의해 랜덤파형을 발생시키는 프로그램이 Fig. 2이다. 본 프로그램에서는 以後의 便宜를 위하여 극치값도 동시에 구하여 별도 파일(file)에 저장하도록 되어 있다. Fig. 2로부터 알수 있듯이, 본 프로그램은 매우 간단하여 누구나 쉽게 이용할 수가 있으며, 입력 데이터(data)를 적당히 변경함으로써 임의의 길이의 랜덤파형을 자유로이 만들 수가 있다.

## 2.2 피로시험을 위한 유사랜덤하중파형

앞의 2.1節에서 작성한 프로그램에 의해 발생되는 랜덤파형을 그대로 컴퓨터 또는 적당한 장치에 기억시킨 후, 되풀이 출력하며 피로시험을 수행할 수도 있을 것이나, 이 경우 사용하는 피로시험장치가 비교적 넓은 영역에 걸쳐 주파수 특성이 일정하지 않으면, 실제 시험편에 작용하는 하중파형은, 특히 Fig. 1(a)와 같은 廣帶域파형일때에는 주어진 하중신호 파형과는 크게 달라질 가능성이 있어, 피로시험 결과분석등에 附加의 어려움이 뒤따를 우려가 있다. 현재 많이 사용되는 폐회로 서어보유압(closed-loop servo-hydraulic) 피로시험기만 하더라도, 주파수 특성은 통상 사용하는 비교적 좁은 영역(0~20Hz)에서도 일정하지 않은 것이 일반적이다.

따라서 주파수 특성이 일정하지 않은 일반적인 시험장치를 사용하여 랜덤하중하의 피로 특성을 검토하고자 할 경우, 하중되풀이(反復)속도의 영향이 현저하지 않은 범위내에서는 2.1節에서 발생되는 정상랜덤파형을 다음과 같이 퍼스널 컴퓨터등을 이용하여 주파수 일정의 유사랜덤파형으로 바꿔 하중신호로 이용하는 것이 사용상 매우 편리하다.

즉, Fig. 2의 프로그램에 의해 발생되는 랜덤파형의 극치(peak and valley)만을 순서대로 퍼스널 컴퓨터의 主記憶(main memory)에 기억시킨 후, 연속되는 극치(peak 또는 valley)와 극치(valley 또는 peak) 사이를, 사용하는 피로시험 되풀이 속도(주파수)의 余弦(cosine) 半波로 연결하여 출력하는 방법이다. 특히 본 연구에서는 처음부터 모든 극치사이를 여현반파로 연결하여 전체랜덤파형을 작성한 후 출력하는 것이 아니라, 미리 약간의 前

處理(pre-processing)를 하여 實時間(real time)으로 극치와 극치사이를 여현반파로 연결해 가면서 하중신호를 출력하는 방식을 채택하여, 피로 시험 시 랜덤하중신호출력에 필요한 컴퓨터 기억용량을 대폭 줄이고 있다. 이 방식은 피로시험 되풀이속도를 변경하고자 할 때에도 매우 편리하다. 실제 사용한 방법을 좀더 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

(1) 前處理로서 먼저 여현반파의 극소치(valley)와 극대치(peak)사이를  $n$ 分割하여 각 분할점의 높이  $h(i)$ 를 다음식에 의해 계산하여, 기억장치에 저장해 둔다.

$$h(i) = \frac{1 - \cos \frac{\pi}{n} \cdot i}{2}, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

(2) 다음 Fig. 2의 프로그램으로부터 얻어진 극치값으로부터 연속되는 극치  $P_i$ 와  $P_{i+1}$ 의 差, 즉 幅(range, 레인지)  $k_i (= |P_{i+1} - P_i|)$ 를 계산하여, 극치와 함께 기억장치에 저장해 둔다.

(3) 실제 피로시험시의 하중파형출력은, 사용할 하중되풀이속도  $f$ (Hz)가 결정되면, 다음과 같이 하여 얻는다. 즉 극소치(valley)  $P_i$ 로부터 극대치(peak)  $P_{i+1}$  사이에서는  $1/2nf$ 초 시간간격으로  $P_i, P_i + k_i h(1), P_i + k_i h(2), \dots, P_i + k_i h(n)$ 의 값을 순서대로 출력하도록 하고, 극대치  $P_{i+1}$ 로부터 극소치  $P_{i+2}$  사이에서는  $P_{i+1}, P_{i+1} - K_{i+1} h(1), P_{i+1} - K_{i+1} h(2), \dots, P_{i+1} - k_{i+1} h(n)$ 의 값을 순서로 출력하는 것이다. 특히 여기서는 각 극치값은 Fig. 2에서 얻어진 극치값을 그대로 사용하도록 하여, 경우에 따라 발생할 가능성이 있는 계산 誤差의 累積을 방지하고 있다.

이 방법은 필요로 하는 기억량이 매우 적어, 數+KB(킬로바이트) 정도의 주기억 용량을 가진 저렴한 퍼스널 컴퓨터로도 충분히 사용이 가능하며, 하중 1사이클의 분할수( $2n$ )도 임의로 바꿀 수 있어, 피로시험 하중신호로서 더욱 정밀도 높은 파형을 출력할 수가 있다.

이상과 같은 방법을 사용하여 Fig. 1의 파워스펙트럼 특성에 대해 유사랜덤하중파형을 출력한 예가 Fig. 3이다. 廣帶域파형 A의 경우 하중변동이 매우 不規則, 急激한데 비하여, 狹帶域파형 B의 하중변동은 비트(beat)형태로 비교적 완만하다 할 수가 있다. 2자유도 진동계파형 C의 경우는 파형 A와 B의 중간적인 하중변동 특성을 보이고 있다.

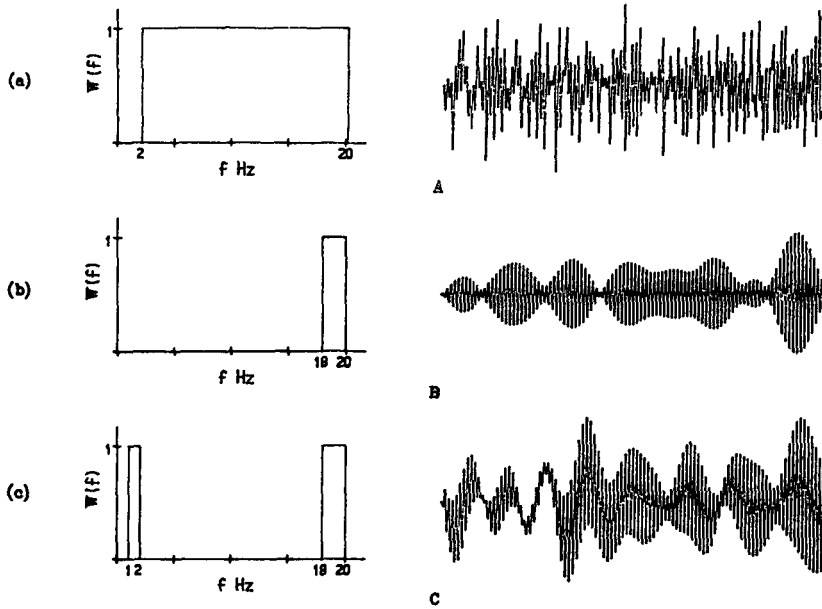


Fig. 3 Pseudo-random waves generated by computer simulation

### 3. 표면피로균열 진전시험

#### 3.1 재료, 시험편 및 시험방법

본 연구에서 사용한 재료는 국산 2024-T4 알루미늄합금으로서, 그 화학적성분 및 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다. 시험편은 Fig. 4와 같은 시험斷面이 직사각형인 시험편으로서, 시험편 중앙에 지름이 1.8mm인 半円形의 초기노치를 방전가공한 것이다. 피로시험기로서는 MTS사 5톤용 유압서어보 시험장치를 사용하였으며, 모든 피로시험 및 측정은 著者들이 개발한 Fig. 5와 같은 2개의 퍼스널 컴퓨터로 구성된 시험시스템<sup>(13)</sup>을 이용하였다. 피로균열길이 및 균열달림현상은 위의 시스템을 이용

하여 除荷彈性컴플라이언스법(unloading elastic compliance technique)<sup>(14,15)</sup>에 의하여 측정하였으며, 이 때 필요한 변위신호는 Fig. 4 시험편의 옆

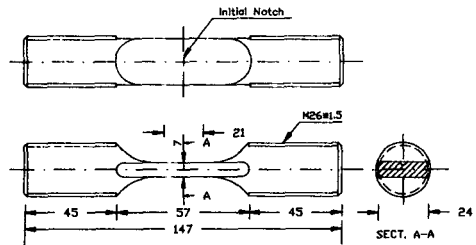


Fig. 4 Test specimen configuration, mm

Table 1 Chemical composition (wt. %)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Al
2024-T4	0.02	0.12	4.71	0.57	1.65	0.004	0.03	Rest

Table 2 Mechanical properties

	0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Tensile strength $\sigma_B$ (MPa)	Elongation (%)
2024-T4	372.8	522.9	16.5

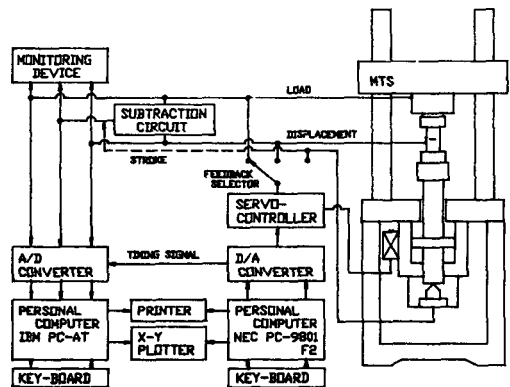


Fig. 5 Block diagram of fatigue testing and monitoring system

면에 부착한 스트레인게이지 출력을 사용하였다. 피로시험은 하중되풀이속도 13Hz로 수행하였다. 표면균열에 대한 應力強度係數(stress intensity factor)는 Newman-Raju의 식<sup>(16)</sup>을 수정한 Fett의 식<sup>(17)</sup>을 사용하여 평가하였다.

3.2 실험결과 및 검토

(1) 균열진전에 따르는 표면피로균열의 형상변화  
표면균열의 형상은 균열진전에 따라 변하는 것이 일반적이며, 표면균열에 대해 쉽게 측정할 수 있는량은 표면에 노출되고 있는 균열길이  $c$ (Fig. 6 참조), 또는 본 연구에서와 같이 컴플라이언스의 변화를 검출하는 경우에는 균열면적이므로, 실제로 중요한 표면균열의 깊이  $a$ 를 알기 위해서는 표면

균열의 형상변화를 미리 알아 둘 필요가 있다.

본 연구에서는 균열진전에 따르는 표면균열 형상의 변화를 2단 블록(block) 변동하중에 의해 破面에 비치마크(beach mark)를 형성시키는 방법으로 구하였다. 그 결과가 Fig. 6으로, (a)는 균열길이  $c$ 와 균열깊이  $a$ 의 관계, (b)는 균열형상비(crack aspect ratio)  $a/c$ 의 균열진전에 따르는 변화를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 균열길이  $c$ 와 균열깊이  $a$ 는 시험편 및 응력비에 관계없이 거의 하나의 관계식으로 표현되어, 균열형상은 지금까지의 여러결과<sup>(15,18,19)</sup>와 마찬가지로, 하나의 파라미터, 즉 균열길이  $a$  또는 균열길이  $c$ 로서 나타낼 수 있다는 것을 알 수가 있다. 또한 본 연구와 같이 하중이 축하중(axial load)일 경우에는 Fig. 6(b)로부터 알 수 있듯이 표면피로균열은 대체로 형상비가  $a/c > 1$ 인 형태로 진전하며, 특히 균열이 작은 경우에  $a/c$ 가 크며, 균열이 길어지면 점차  $a/c$ 는 감소하여 시험 마지막 단계인  $a$ 가 6 mm( $\frac{a}{t} = \frac{6}{7}$ ) 정도가 되어  $a/c=1$ 에 접근하는 양상을 보인다. 초기 노치의 형상비가  $a/c=1$ 인 점을 고려하면, 표면균열은 균열이 작을 경우 균열길이 방향으로 보다 빨리 진전한다는 것을 나타내는 것으로, 이와같은 현상은 다른 연구<sup>(19,20)</sup>에서도 보고되고 있다. 현재 그 원인으로서의 시험편내부와 표면의 응력상태의 차이, 즉 내부의 평면변형률 상태와 표면의 평면응력 상태에 기인하는 진전거동의 차이, 구체적으로는 균열단합현상의 차이를 생각할 수 있을 것이다<sup>(21)</sup>.

본 연구에서는 Fig. 6(a)의 결과를 바탕으로, 시험편의 컴플라이언스와 표면균열의 크기 즉 균열면적과의 관계 보정곡선(calibration curve)을 미리 구하여 둔 후, 실제 피로 시험시에는 컴플라이언스의 변화만을 3.1節에서 언급한 除荷彈性컴플라이언스법으로 검출하여, 이 보정곡선과 Fig. 6(a)의  $a$ 와  $c$ 의 관계식을 이용하여 균열깊이를 평가하는 방법을 사용하였다. 그 구체적 방법은 참고문헌(15)의 경우와 거의 동일하므로 여기서는 생략하기로 한다.

(2) 일정진폭하중하의 표면피로균열 진전거동

표면피로균열 진전거동에 관한 기초데이터를 얻기 위해 먼저 일정진폭하중하에서 응력비를  $R=0$ 과  $-1$ 로 하여 약간의 시험을 수행하였다. Fig. 7(a), (b)는 각각 일정진폭 하중하의 표면피로균

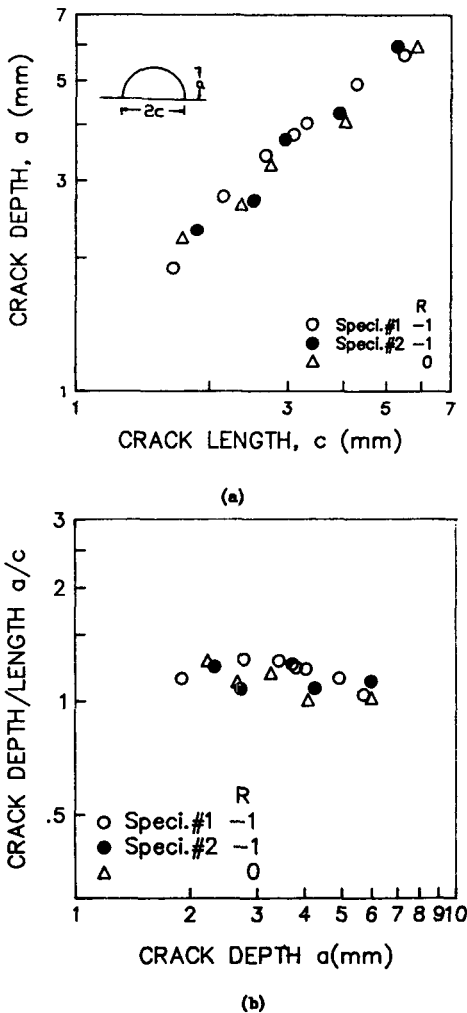


Fig. 6 Variation of surface crack shape

열의 진전속도와 균열단합 거동을 나타낸 것으로, Fig. 7(a)의 白기호는 응력강도계수幅  $\Delta K$ 에 의해 정리한 결과이며, 黑기호는 Fig. 7(b)의 균열열림점 (crack opening point)  $K_{op}$ 를 고려하여 有效응력 강도계수幅  $\Delta K_{eff} (=K_{max} - K_{op})$ 로 정리한 결과이다. 여기서  $K_{max}$ 는 最大응력강도계수이다. 진전속도를  $\Delta K$ 로 정리했을 경우 비교적 크게 나타나는 응력비  $R$ 의 영향은 균열단합을 고려한  $\Delta K_{eff}$ 의 정리에서는 거의 없어져, 표면피로균열에 있어서도 그 진전속도를 지배하는 일차적인 인자는 균열단합 현상이라 생각 할수 있다.

최대응력강도계수  $K_{max}$ 에 대한 균열열림점  $K_{op}$ 는, 본 연구의 범위내에서는  $R=-1$ 의 경우가  $R=0$ 의 경우에 비해 약간 낮은 경향은 있으나 거의 차이가 없다하여도 좋을 정도이다. 이러한 경향은  $K_{max}$  값이 낮은 경우 관통균열에서도 나타나는 현상<sup>(7)</sup>이나, 현재로는  $R=-1$ 에 대한 결과가 적어 명확한 결론을 얻기 힘들다. 좀더 넓은 범위의 데이터를 얻을 필요가 있다.

(3) 랜덤하중하의 표면피로균열 진전거동

랜덤하중하의 피로표면균열 진전거동에 관하여 먼저 대체적인 특성을 파악하기 위하여, 본 연구에서는 2.2節에서 작성한 랜덤하중 특성인 현저하게 다른 廣帶域 파형 A와 狹帶域 파형 B의 두가지 파형에 대하여서만 표면피로균열 진전시험을 수행하였다.

시험조건으로서 각 랜덤파형 단위블록 中の 最大 레인지페어 (以下에서는 레인지페어에 대해  $\Delta r_p$  라는 記號를 사용하기로 한다)의 응력비 (以下에서  $R\{(\Delta r_p)_{max}\}$ 으로 表記)를 0으로 하여 시험을 수행하였다. Fig. 8는 랜덤파형 1블록중의 균열열림점  $K_{op}$ 의 변화를 概略적으로 나타낸 것으로, (a)는 廣帶域파형 A의 경우이며, (b)는 狹帶域파형 B의 경우이다. 하중변동이 不規則, 急激한 파형 A의 균열열림점  $K_{op}$ 는 하중변동에 따라 랜덤파형 1블록내에서 비교적 크게 변동하는데 비하여, 하중변동이 완만한 파형 B의 경우는  $K_{op}$ 의 변동도 비교적 완만하여 변화폭도 파형 A에 비해서는 작으나, 무시할 수 있는 정도는 아니다. 이러한  $K_{op}$ 의 거동은, 500사이클 정도를 1블록으로 하는 유사랜덤 파형하에서의  $K_{op}$ 는 1블록내에서 거의 변하지 않는다는 관통균열에 대한 연구보고<sup>(7,8)</sup>와는 달라, 매우 흥미로운 현상이다. Fig. 9는 랜덤파형 1블록중의 최대 응력강도계수레인지페어  $(\Delta r_p K)_{max}$ 에 대한

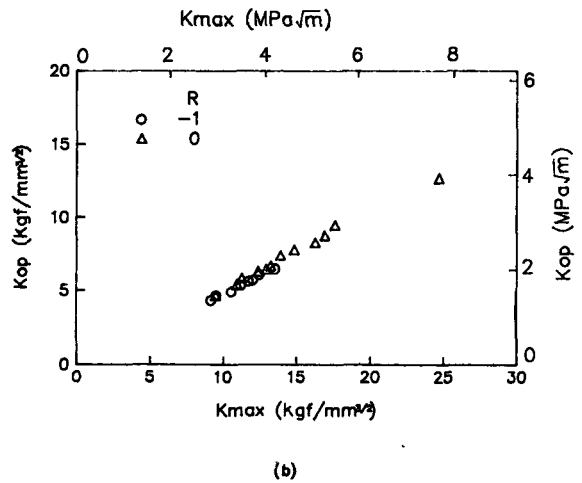
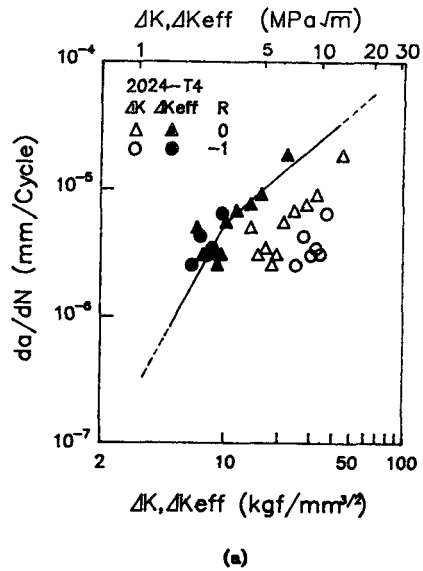
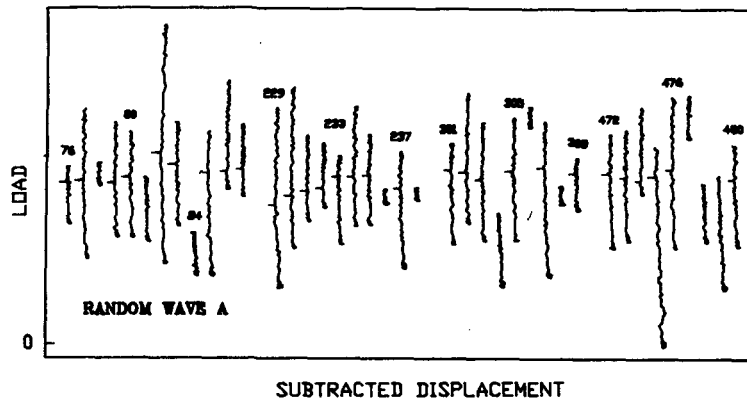


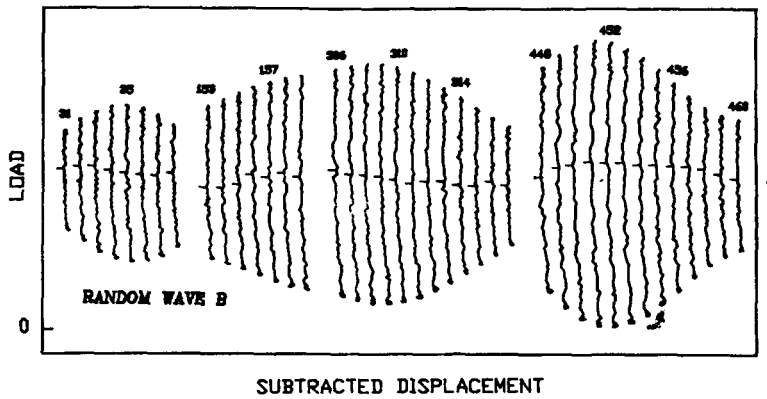
Fig. 7 Growth rates and opening points of surface fatigue crack

$K_{op}$ 를 일정진폭하중하의 결과와 비교한 것으로, 랜덤파형특성에는 거의 관계없이  $(\Delta r_p K)_{max}$ 에 대한  $K_{op}$ 와는 일정진폭하중하의 같은 크기의  $\Delta K$ 에 대한  $K_{op}$ 와 잘 일치하고 있다. 이러한  $(\Delta r_p K)_{max}$ 에 대한  $K_{op}$ 의 거동은 랜덤하중하의 관통균열의 거동<sup>(7,8)</sup>과 비슷하다.

Fig. 10은 랜덤하중하에서 측정된 有效응력강도 계수레인지페어  $(\Delta r_p K)_{eff}$ 에 대해, Fig. 7(a)에 實線으로 나타낸 일정진폭하중하의  $da/dN - \Delta K_{eff}$  관계, 즉  $da/dN = C(\Delta K_{eff})^m$  형식의 식을 적용하여, 되풀이 數  $N$  또는 균열진전량  $\Delta a$ 에 관한 단



(a)



(b)

Fig. 8 Variation of crack opening point  $K_{op}$  during one block of random loading

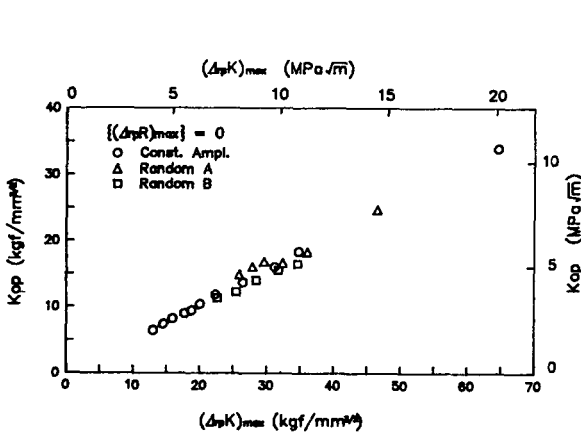


Fig. 9 Comparison of crack opening point  $K_{op}$  between constant amplitude and random loadings

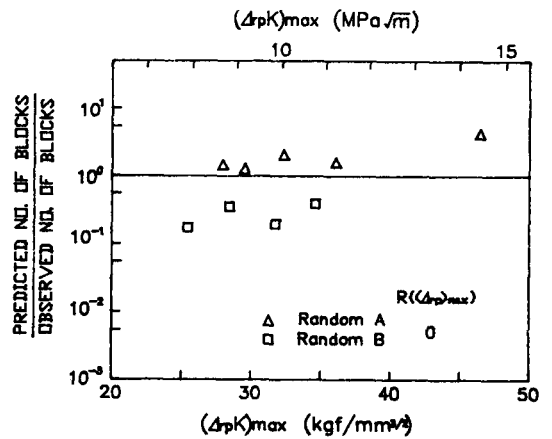


Fig. 10 Predictions of surface fatigue crack growth under random loadings based on the measured effective stress intensity range-pair



순 線形加算에 의해 랜덤하중하의 균열진전을 예측한 결과이다. 그림의 세로축에는 균열이 일정거리 (약 0.2mm) 진전하는데 소요되는 랜덤블록數의 예상치와 실제 실험결과와의 비를, 가로축에는 랜덤파형블록중의 최대 응력강도계수레인지페어 ( $\Delta_{rp}K$ )<sub>max</sub>를 잡고 있다. 예측결과는 랜덤파형의 특성에 따라 달라, 廣帶域파형 A의 경우에는 예상치는 실제 실험결과와 거의 일치하거나, ( $\Delta_{rp}K$ )<sub>max</sub>가 큰 경우에 예상블록수가 실제 블록수보다 커,  $\Delta K_{eff}$ 에 관해 위협측 예상이 되는 加速현상을 나타내는 反面, 狹帶域파형 B의 경우는 대체로 예상치는 실제 실험결과보다 작아  $\Delta K_{eff}$ 에 관해 遲延 현상을 나타낸다. 以上과 같이  $\Delta K_{eff}$ 에 관한 랜덤하중하의 표면 균열진전거동이 랜덤파형특성에 따라 현저하게 다른 현상은,  $\Delta K_{eff}$ 에 관한 랜덤하중하의 표면 균열진전거동이 랜덤파형특성에 따라 현저하게 다른 현상은,  $\Delta K_{eff}$ 에 관한 한 랜덤파형특성에 거의 영향을 받지 않는다는 관통균열에 관한 연구보고<sup>(6)</sup>와는 매우 다른 결과이다.

Fig. 11은 便宜上 랜덤파형 1블록내에서의 균열 열림점은 거의 一定하며 또한 그 균열 열림점은 블록내의 最大 응력강도계수레인지페어 ( $\Delta_{rp}K$ )<sub>max</sub>에 대한  $K_{op}$ 와 同一하다고 假定하여, 앞의 Fig. 10의 경우와 마찬가지로  $\Delta K_{eff}$ 에 관해 균열진전을 예측한 결과이다. 이 방법은 매우 간편하며, 실제 관통균열의 진전예측에 적용하여 좋은 결과를 얻고 있는<sup>(8,22)</sup> 방법이다. 그러나 그림에서 보는 바와 같이, 이 방법을 표면균열에 적용한 경우에는 예측치

는 모두 실험치보다 크며, 특히 廣帶域파형 A의 경우에는 실험치의 數十倍가 되어 매우 危險쪽의 예상이 되고 있다.

以上과 같이 랜덤하중하의 표면피로균열의 진전 거동은 랜덤파형특성에 크게 영향을 받는다, 파형특성에 따라 유사랜덤파형 1블록내의 균열열림점의 변화 樣相도 다르며, 균열단함을 고려하여 유효응력강도계수에 의해 균열진전을 평가했을 경우도 차이가 발생하여, 특히 이 현상은 유효응력강도계수만으로는 표면피로균열의 진전을 충분히 평가할 수 없다는 것을 의미한다. 이와 같은 결과는 관통균열에 대한 연구보고<sup>(7,8)</sup>와는 크게 달라, 변동하중하의 관통균열진전에 관해 현재까지 제안되고 있는 여러 평가방법이 표면균열진전평가에는 경우에 따라서는 반드시 충분하지 않다는 것을 의미하여 매우 중요하다.

본 연구에서 얻어진 以上과 같은 변동하중하의 표면피로균열진전에 관한 기초적 결과를 바탕으로, 표면균열과 관통균열 진전거동의 기본적 차이를 비롯하여, 표면균열진전에 미치는 하중변동의 영향 및 랜덤파형특성의 영향에 관하여 더욱 상세한 연구를 현재 추진중이다.

#### 4. 結 論

피로시험용 類似랜덤하중 파형을 퍼스널컴퓨터에 의해 작성하고, 이를 이용하여 표면피로균열진전시험을 수행하여 랜덤하중하의 표면피로균열의 진전 거동에 관하여 검토하였다. 얻어진 主要결과는 다음과 같다.

(1) 기억용량이 크지 않은 퍼스널 컴퓨터로 충분히 사용이 가능한, 피로시험용 類似랜덤하중파형을 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 발생하는 소프트웨어를 개발하였다.

(2) 표면피로균열은 균열이 작은 경우, 길이(c)방향보다 깊이(a) 방향으로 빨리 진전하며, 본 연구와 같이 軸荷重일 경우에는 대체로 형상비가  $a/c \geq 1$ 인 형태로 진전한다.

(3) 랜덤하중하의 표면피로균열의 열림점은, 500사이클 정도의 랜덤파형 1블록내에서도 비교적 크게 변동하며, 그 변동 樣相은 랜덤파형특성에 영향을 받는다.

(4) 랜덤하중하의 표면피로균열진전속도를 균열단함을 고려하여 有效응력강도계수폭  $\Delta K_{eff}$ 로 정리

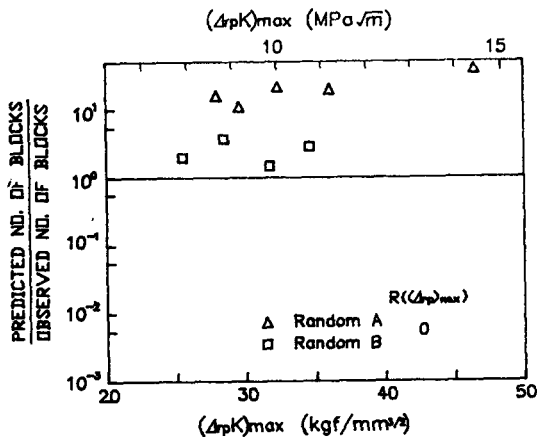


Fig. 11 Predictions of surface fatigue crack growth under random loadings based on the predicted effective stress intensity range-pair

하였을 경우, 랜덤파형특성에 따라 차이가 난다. 이 결과는 변동하중하의 표면균열의 진전속도는 유효응력강도계수만으로는 평가할 수 없다는 것을 의미한다.

(5) 위의 (3)과 (4)의 결과는, 현재 보고되고 있는 랜덤하중하의 관통균열의 진전거동과는 매우 다른 현상으로, 더욱 상세한 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

- (1) Smith, S.H., 1966, "Random-Loading Fatigue Crack Growth Behavior of Some Aluminum and Titanium Alloys", ASTM STP 404, pp. 74~100.
- (2) 菊川眞, 大路清嗣, 城野政弘, 清口孝遠, 1969, "引張壓縮正常ランダム荷重による疲れについて", 日本機械學會論文集, Vol. 35, No. 278, pp. 2020~2031.
- (3) ASTM STP595, 1976, "Fatigue Crack Growth under Spectrum Loads".
- (4) The Society of Automotive Engineers (SAE), 1977, "Fatigue under Complex Loading".
- (5) ASTM STP714, 1980, "Effect of Load Spectrum Variables on Fatigue Crack Initiation and Propagation".
- (6) ASTM STP748, 1981, "Methods and Models for Predicting Fatigue Crack Growth under Random Loading".
- (7) 菊川眞, 城野政弘, 近藤良之, 三上省二, 1982, "ランダムを含む正常變動荷重下の疲労き裂開閉口舉動の推定法", 日本機械學會論文集(A編), Vol. 48, No. 436, pp. 1496~1504.
- (8) Jono, M., Song, J. and Kikukawa, M., 1984, "Fatigue Crack Growth and Crack Closure of Structural Materials under Random Loading", Advances in Fracture Research, Proceedings of the 6th International Conference on Fracture, pp. 1735~1742.
- (9) 近藤良之, 1980, "實働荷重下の疲労き裂進展とき裂開閉口舉動に關する 研究", 大阪大學學位論文.
- (10) 竹内 信, 山本善之, 1972, "正規不規則過程における相繼ぐ極値の近似確率分布とシミュレーションについて", 日本造船學會論文集, Vol. 131, pp. 97~113.
- (11) 津田孝夫, 1977, "モンテカルロ法とシミュレーション", 倍風館, pp. 11~13.
- (12) 山川新二, 1970, "不規則波の處理と累積ひん度", 日本機械學會誌, Vol. 73, No. 621, pp. 1401~1410.
- (13) 朴准夾, 宋智浩, 嚴潤鎔, 金正燁, 姜基洲, 1988, "퍼스널 컴퓨터에 의한 疲勞試驗自動化 및 疲勞舉動測定の精密化," 大韓機械學會論文集, 第12卷, 第1號, pp. 123~130.
- (14) 菊川眞, 城野政弘, 田中建一, 高谷勝, 1976, "除荷彈性コンプライアンス法による低進展速度領域における疲勞き裂進展速度とき裂開閉口舉動の測定", 材料, Vol. 25, No. 276, pp. 899~903.
- (15) 宋智浩, 朴榮祖, 1978, "Notch 材疲勞와 Kikukawa-Complicance 法(第1報 基礎的 檢討)", 大韓機械學會論文集, 第2卷, 第1號, pp. 10~18.
- (16) Raju, I.S. and Newman, J.C., 1979, "Stress Intensity Factors for a Wide Range of Semi-Elliptical Surface Cracks in Finite-Thickness Plates", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 817~829.
- (17) Fett, T., 1987, "An Extension of the Newman-Raju Formula", International Journal of Fracture, Vol. 33, R47~R50.
- (18) Maddox, S.J., 1975, "An Analysis of Fatigue Cracks in Fillet Welded Joints", International Journal of Fracture, Vol. 11, pp. 221~243.
- (19) 朴榮祖, 金楨圭, 辛龍承, 金永運, 1987, "5083-H113 알루미늄合金의 表面균열 進展舉動과 균열단립 現象", 大韓機械學會論文集, 第11卷, 第2號, pp. 243~252.
- (20) Cruse, T.A. and Meyers, G.J., 1977, "Fatigue Growth of Surface Cracks", ASTM STP 631, pp. 174~189.
- (21) Fleck, N.A., Smith, I.F.C. and Smith, R.A., 1983, "Closure Behaviour of Surface Cracks", Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol. 6, pp. 225~239.
- (22) 城野政弘, 宋智浩, 菅田淳, 1984, "ランダム荷重下の疲労き裂進展とき裂開閉口舉動", 材料, Vol. 33, No. 372, pp. 1179~1185.