

<論 文>

퍼스널 컴퓨터에 의한 疲勞試驗自動化 및 疲勞舉動 測定の 精密化

朴准奭* · 宋智浩** · 嚴潤鎔** · 金正燁*** · 姜基洲***

(1987年 9月 12日 接受)

Personal Computer-Based Fatigue Testing Automation and Improvements in Fatigue Behavior Monitoring

Jun Hyub Park, Ji Ho Song, Youn Young Earmme,
Chung Youb Kim and Ki Joo Kang

Key Words: 16-bit Personal Computer (16bit 퍼스널 컴퓨터), Fatigue Testing(피로시험)
Fatigue Behavior Monitoring(피로거동측), Signal Noise Reduction(신호잡음감소), Crack Closure(균열닫힘), Unloading Elastic Compliance Technique (除荷彈性 컴플라이언스 法)

Abstract

Two kinds of 16bit-personal computer-based fatigue testing automation and monitoring system were constructed; one is Single-System utilizing a personal computer, the other is Dual-System consisting of two personal computers. The system developed in this study permits to perform multi-step programmed loading and pseudo-random loading fatigue tests, and three parameters such as load, total displacement and subtracted displacement can be measured simultaneously.

For improvements in measurements of fatigue behavior, two kinds of signal noise reduction software was developed. In addition, a software was also designed to automatically measure the crack opening point and crack length using the unloading elastic compliance technique.

1. 序 論

機器 및 構造物의 破壞나 健全성과 밀접한 관계가 있는 재료의 피로문제에 관한 연구에 있어서는, 실제

*원대건설 해외플랜트 사업부

**정회원, 한국과학기술원 기계공학과

***한국과학기술원 기계공학과

피로시험의 수행과 피로를 지배하는 因子의 검출 및 피로거동에 관한 관찰이 필수적인 경우가 많다. 그러나 실제 피로시험의 수행에는 많은 시간과 人的勞力을 필요로 하며, 피로에 대한 지배적 인자의 검출 및 피로거동 관찰에는 정밀한 측정이 요구되는 것이 일반적이다.

이러한 피로연구에 있어서의 효율화, 정밀화 및 경제성을 높이기 위하여, 근래 컴퓨터가 많이 이용되고

있으며^(1,2), 특히 소형컴퓨터를 이용한 피로시험 자동화 및 계측시스템이 재료시험기 제조회사들에 의해 개발, 시판되고 있다. 또한 컴퓨터사용의 利點을 적극적으로 이용하여, 피로거동을 高精度로 검출측정하는 事例도 보고되고 있다^(3,4).

그러나 시판되고 있는 피로시험 자동화 시스템은 가격면에서는 물론, 그의 소프트웨어면에서도 대체로는 이용자가 쉽게 변경, 확장하기가 곤란하다는 등의 결점이 있으며, 한편 현재까지 보고되고 있는 피로거동의 고정밀도 측정의 경우^(3,4)에도 미니컴퓨터를 이용하는 경우가 많아, 현재도 가격면에서는 문제가 있다.

그러나 최근에는 퍼스널 컴퓨터가 기억용량, 처리속도, 가격등에서 많이 개선되어, 피로연구에 이를 이용하는 경우가 증가하고 있으며⁽²⁾, 국내에서도 피로시험기와 퍼스널 컴퓨터의 인터페이스(interface)를 시도한 예가 보고되고 있다⁽⁵⁾.

본 연구에서는 비교적 데이터 처리속도가 빠른 80286 系의 CPU를 사용한 16bit 퍼스널 컴퓨터를 이용하여, 일반 시판되고 있는 시스템이나 미니컴퓨터를 이용하는 경우보다, 가격면에서는 훨씬 유리하면서도, 성능은 거의 뒤지지 않는 피로시험 자동화 및 피로거동 고정밀 측정을 위한 시스템을 완성하였다.

본 연구에서 사용한 방법 및 작성한 소프트웨어등은 사용시험기, 피로연구 대상등에 거의 관계없이 이용이 가능하나, 여기서는 便宜上, 시험기로서는 閉루우프(closed-loop)유압서어보 피로시험기를 사용하였으며, 피로거동의 측정에 대해서는 주로 피로균열진전을 대상으로 하였다.

2. 피로시험 및 동시 계측 시스템

본 연구에서는 경제적 사정 및 시험내용에 따라 퍼스널컴퓨터 한대만을 이용하는 單一시스템(Single-System)과 두대를 동시에 이용하는 二重시스템(Dual-System) 두가지를 구축하고 있다.

2.1 單一시스템(Single-System)

한대의 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 피로시험 및 동시 계측을 하는 單一시스템의 블록선도가 Fig.1이다.

Fig.1의 블록선도중의 減算회로(subtraction circuit)는 피로균열진전문제에 있어서 균열닫힘(crack closure) 현상⁽⁶⁾ 등을 除荷彈性점플라이언스法(Kikukawa's unloading elastic compliance technique)^(7,8)(뒤 4章에서 개략 설명함)에 의해 측정할 필요가 있을 경우 또는

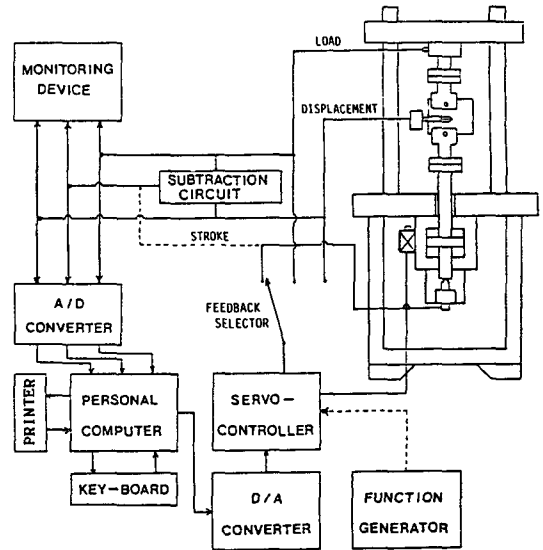


Fig. 1 Single-System block diagram

평활시험편(smooth specimen)의 피로시험등에서 塑性 변형을 직접 검출하고자 할 경우에, 시험편의 주변위에서 탄성변위성분을 감산하는 회로로서, 본 연구의 시스템에서는, 하중, 주변위 및 이 감산회로에 의해 얻어지는 감산변위도 동시에 컴퓨터에 입력되도록 되어 있다.

시험기 제어신호의 基本單位波형으로서는 三角波형 또는 正弦波형을 1 사이클(cycle) 당 200 점으로 구성하도록 하여, 거의 오차가 없는 파형을 출력하도록 하고 있으며, 하중등의 측정신호는, 이 시험기 제어 출력신호와 同期하여 A/D 변환기(converter)에서 받아드려도 록 되어 있다.

본 시스템과 같이 피로시험 및 계측을 동시에 하기 위해서는 사용하는 퍼스널컴퓨터의 시계속도(clock rate) 및 A/D, D/A 변환기의 변환속도가 비교적 빠른 필요가 있다. 본 시스템에 사용한 퍼스널컴퓨터 및 A/D, D/A 변환기의 특성은 Table 1 과 같으며, 여기서는 보유하고 있는 便宜上 NEC(日本電氣) 제품등을 사용하고 있으나, 표준적인 반복 속도(40Hz 정도)의 高 반복數疲勞(high-cycle fatigue) 시험을 수행하기 위해서는 이 정도의 특성이 있는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 인터페이스(interface) 관련 이외의 프로그램은 사용이 간편한 포트란(Fortran) 77에 의해 작성하고 인터페이스 관련프로그램에는 처리속도가 빠른 어셈블러(Assembler)를 사용하고 있다.

Table 1 Characteristics of personal computer and converters used in Single-System

| | |
|---------------------------------------|---|
| Personal computer (NEC PC-9801 F2) | <ul style="list-style-type: none"> • CPU; μPD 8086-2 • 16 bit microprocessor • Clock; 8 MHz • ROM; 96KB • RAM; 640KB |
| A/D converter (Contec Co.) | <ul style="list-style-type: none"> • Channels; 16CH. • Resolution; 12bit • Converting time; 12μs • Throw rate; 17μs |
| D/A converter (Contec Co.) | <ul style="list-style-type: none"> • Channels; 4ch. • Resolution; 12bit • Converting time; 600ns |

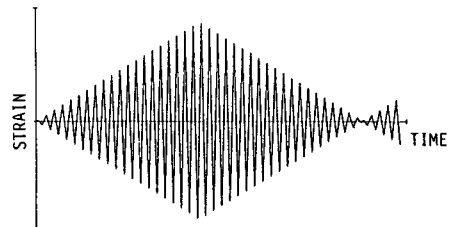
통상적인 일정 반복하중, 多段프로그램 변동하중 또는 유사랜덤(pseudo-random)하중과 같은 任意의 하중을 부과하며, 하중, 전변위 및 위에서 설명한 감산변위를 동시에 측정하는 소프트웨어가 완성되어 있다. 또한 시험기 제어신호를 波形發生器(function generator) 등 외부장치를 이용하여 출력하는 경우에, 하중등의 측정신호를, 측정할 때마다 사이클의 位相(phase)을 맞추어 측정하여 위의 3節에서 설명하는 측정의 高精度를 期할 수 있는 프로그램도 작성되어 있다.

紙面 관계상 각종 소프트웨어의 내용에 관해서는 여기서는 言及하지 않으나, 참고문헌(9)에 상세히 記述되어 있다.

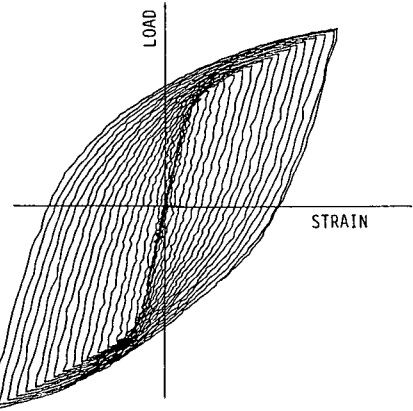
Fig. 2는 본 시스템을 이용하여, 반복 응력-변형률 곡선(cyclic stress-strain curve)를 얻는등에 많이 사용되는 점증-점감(incremental-decremental)변형률 제어 시험을 수행한 一例로, a)는 시험기 제어용 컴퓨터출력 신호이며, b)는 컴퓨터에 의해 측정된 하중-전변위 히스테리시스이다.

본 單一시스템은 통상적인 피로시험 또는 日常(routine)화된 시험일 경우 매우 편리하며, 無人化도 가능하여 경제적이나, 측정된 결과를 즉시 그 자리에서 해석하여 관찰할 수 없으며, 따라서 측정결과에 따라 시험기를 임의로 제어하는 방식은 곤란하며 또한 컴퓨터의 기억용량에 따라 측정할 수 있는 총데이터량에도 제한을 받는다는 등의 문제가 있다.

이러한 문제들에 대비하여 다음과 같은 二重시스템도 구성했다.



(a) Strain control signal



(b) Measured load-strain hysteresis loops

Fig. 2 Example of incremental-decremental loading test performed using Single-System

2.2 二重시스템(Dual-System)

二重시스템은 두대의 컴퓨터를 이용하여, 시험기 제어와 측정을 분리한 시스템으로, 그 블록선도가 Fig.3이다. 본 연구에서는 또 한대의 컴퓨터로서 국산 IBM-AT를 사용하고 있으며, 이에 부착하는 A/D, D/A 변환기도 국내에서 제작된 것이다. 그 특성들은 Table 2와 같다.

Table 2 Characteristics of personal computer and converters used in Dual-System

| | |
|----------------------------------|---|
| Personal computer (IBM PC-AT) | <ul style="list-style-type: none"> • CPU; Intel 80286 • Clock; 8 MHz • ROM; 64 KB • RAM; 1 MB • Hard disk; 30 MB |
| A/D converter (KS ENG.) | <ul style="list-style-type: none"> • Channels; 8 ch. • Resolution; 12 bit • Converting time; 25 μs |
| D/A converter (KS ENG.) | <ul style="list-style-type: none"> • Channels; 2 ch. • Resolution; 12 bit • Output setting time; 10 μs |

본 이중시스템에서는 초기역용량이 크며, 30 MB 하드디스크(hard disk)가 있는 IBM PC-AT를 측정전용으로 사용하여, 시험기 제어용 컴퓨터로부터 同期信號(Timing Signal)를 받아 하중제어신호와 同期하여 각종 신호를 받게 되어 있어, 다음 3節에서 기술하는 피로거동 측정의 고정밀화를 더욱 효율적으로 수행할 수 있도록 되어 있다. 또한 기억용량이 큰 컴퓨터를 측정용으로 이용하므로써, 사용하는 DOS(Disk Operating System)가 허용하는 범위(예컨대 통상 많이 사용되는 MS-DOS의 경우, 사용가능한 최대 초기역용량은 640 KB)내에서 최대한으로 데이터를 연속적으로 받아 드릴 수 있어, 비교적 긴 프로그램변동하중 또는 유사랜덤하중 블록(block)全體에 걸친 피로거동 측정이 가능한 뿐만 아니라, 본 시스템에서의 같이 큰補助기억용량이 있는 경우에는 측정하는 총데이터량에

거의 제한을 받지 않게 된다.

본 이중시스템에 있어서는 측정용 컴퓨터로부터 制御信號(Controlling Signal)를 시험기 제어용 컴퓨터에 보낼 수 있도록 하여, 측정결과에 따라 시험기 제어도 변화시킬 수 있는 구조가 되어 있다.

Fig. 4는 본 이중시스템을 이용하여 유사랜덤하중하에서의 피로균열의 단립현상을 2.1節에서 言及한 除荷彈性컴플라이언스法으로 측정한 예로서, (a)는 시험기 제어용 컴퓨터 출력신호, (b)는 로드셀(load cell) 출력하중 측정신호, (c) 및 (d)는 각각 소변위 및 감산변위 측정신호이며, (e)는 하중과 감산변위 히스테리시스로서, 이 히스테리시스곡선의 屈曲點으로부터 균열열림하중(crack opening load)⁽⁶⁻⁸⁾(뒤 4章에서 설명)을 알 수가 있다.

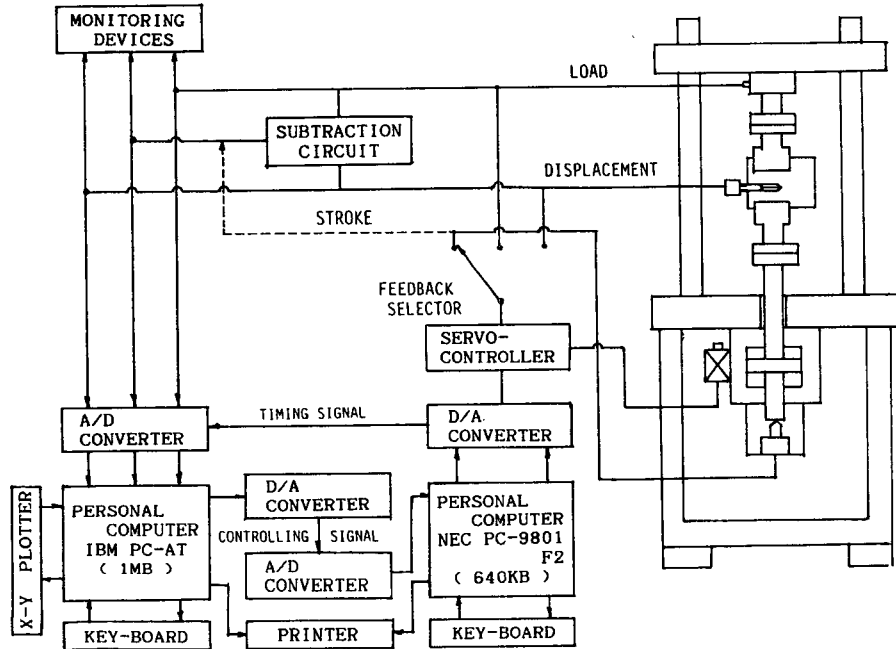


Fig. 3 Dual-System block diagram

3. 피로거동 측정의 정밀화

재료의 피로거동, 예컨대 하중되풀이에 따르는 변형거동 또는 피로균열진전에 있어서의 균열단립현상등은, 이에 관련된, 비교적 抽出이 容易한 역학적 인자, 구체적으로는 변위등의 변화를 전기적 신호로 바꾸어 검출, 측정하는 경우가 많다. 전기적 신호에는 원천적으

로 잡음(noise)이 混入되어 있게 마련이므로, 이잡음의 신호에 대한 相對의 大小, 즉 S/N비가 측정의 정밀도를 좌우하게 된다. 피로거동 측정에 있어서 컴퓨터를 사용하는 경우에는, 퍼스널컴퓨터 수준에서도 다음과 같이 소프트웨어에 의해 잡음을 현저하게 감소시킬 수 있어, 통상적인 애널로그(analogue) 방법으로는 불가능한 정도로 측정의 정밀도를 높일 수가 있다.

피로연구에서 측정하는 신호에 혼입하는 잡음으로서

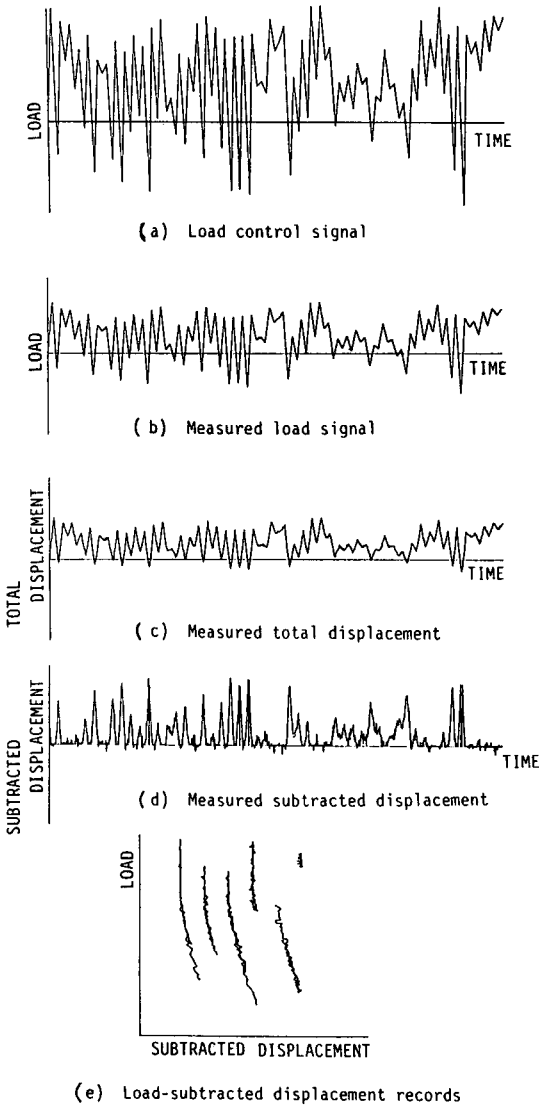


Fig. 4 Example of pseudo-random loading test performed using Dual-System

는 크게로는, 통상적인 전기적 定常高周波랜덤잡음과 시험기등 기계적 원인에 의한 비교적 低周波數의, 피로시험주파수와 同期하는 同期잡음(synchronous noise)을 들 수가 있을 것이다. 이러한 잡음들은 다음과 같은 방법에 의해 크게 감소시킬 수가 있다.

3.1 定常高周波랜덤잡음 감소법

전기적 신호에 원천적으로 존재하는 정상고주파랜덤잡음은, 일반적으로 측정되는 신호자체의 크기가 작아, 높은 S/N 비를 기대하기 어려운 경우가 많은 高반복

數피로에서 문제가 된다. 이 정상랜덤잡음은 평균이 0, 分散이 σ^2 인 Gauss 分布(또는 誤差分布) 특성을 지니며, 지금 말한 바와 같이, 대체로 피로거동의 변화가 반복數에 관하여 완만한 高반복數피로 영역에서 문제가 되므로, 측정하는 신호를 同期하여, 즉 각 사이클의 位相을 맞추어 n 사이클 연속하여 컴퓨터에 받아들여, 主기억(main memory) 위에서 평균을 하면, 평균된 잡음은 統計學上 평균이 0, 分散이 σ^2/n 인 Gauss 分布에 따르게 된다. 즉, 잡음수준이 $1/\sqrt{n}$ 배 만큼 감소하게 되어 측정 精밀도가 그 만큼 높아지게 된다.

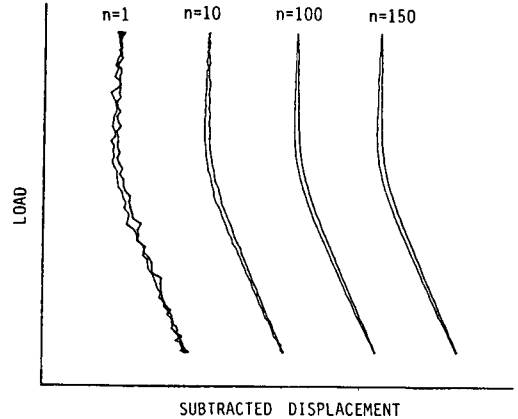


Fig. 5 Reduction of stationary random noise by computer software

Fig. 5는 除荷彈性컴플라이언스法으로 피로균열의 단형현상을 측정하는 경우에 이 방법을 적용한 예로서, 10 사이클 정도만 연속 加算하여 평균하더라도 1사이클만의 경우에 비해 잡음 수준은 현저하게 감소되며, $n=100$ 사이클 정도 연속 加算하여 평균하면 고주파수 랜덤잡음은 거의 제거되어 측정이 매우 容易하게 됨을 알 수가 있다.

이러한 방법은 근래 마이크로프로세서(microprocessor)를 부착한 超高級型 오실로스코프(osilloscope)에서도 사용되는 모양으로, 잡음감소법으로 매우 유효한 방법이나, 하중진폭변동이 연속적으로 일어나는 변동 하중 또는 피로거동의 변화가 비교적 빠른 低반복數피로(low-cycle fatigue)인 경우에는 본질적으로는 적용이 안된다. 다만 低반복數피로인 경우에는 측정되는 신호의 S/N 비가 충분히 큰것이 보통이어서, 여기서 문제가 되고 있는 고주파랜덤잡음은 거의 고려하지 않아도 좋은 것이 일반적이다.

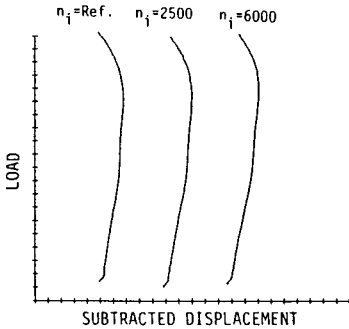
따라서 본 방법은 근래 많은 주목을 받고 있는 微小 피로균열의 진전 문제 또는 피로균열진전 下限界(threshold) ΔK_{th} 부근에서의 균열진전문제등에 관하여 기본

적 특성을 연구하는 경우에 특히 有力한 방법이 되리라 기대된다.

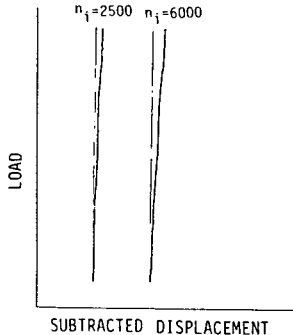
3.2 同期잡음 감소법

피로시험주파수와 관련되어 크기 및 位相이 사이클마다 변하지 않는 잡음, 또는 재료등의 비선형거동에 기인하여 발생하는 불필요한 신호는 다음과 같이 하여 제거할 수가 있다.

Fig. 6은 복합재료의 CT 시험편의 반복수에 따르는 컴플라이언스의 미소한 변화를 측정하는 예로서, (a)는 시험시작 직후 및 반복수 n_i 가 각각 2500 사이클 및 6000 사이클 경과한 후의 하중과 감산변위 히스테리시스의 측정결과이다. 특히 이 경우는 큰 비선형성분 때문에, 히스테리시스 간의 차이를 거의 感知할 수가 없다. 그러나 소프트웨어에 의해 시험시작 직후의 히스테리시스를 주기억(main memory)에 기억시킨 후, 이것을 그 이후에 측정되는 히스테리시스로 부터 감산하면, 반복수에 따르는 히스테리시스의 미소한 변화만이 (b)와 같이 검출되게 된다. 이 경우 一點鎖線으로 나타낸 수직선으로 부터의 경사량이 컴플라이언스의 변화량에 대응하게 된다.



(a) Original load-subtracted displacement records



(b) Load-subtracted displacement records after elimination of synchronous noise

Fig. 6 Elimination of synchronous noise by computer software

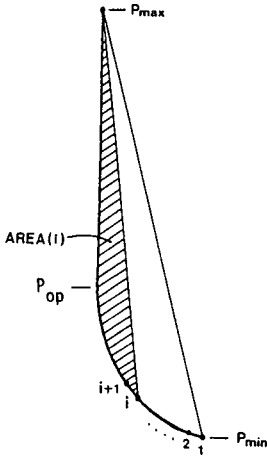
이상과 같은 동기잡음 감소법은, 특히 반복소성변형이 크게 일어나는 低반복數피로 영역에서, 균열진전에 따르는 균열단합현상등의 피로거동의 미소한 변화가 반복소성변형에 埋沒되어 통상적인 방법으로는 검출하기 어려운 경우에도 매우 유효하며, 그 적용예가 필자의 한사람에 의해 이미 발표되고 있다⁽¹⁰⁾. 다만 그 경우에는 미니컴퓨터를 사용하고 있으나, 본 연구에서 구성한 퍼스널컴퓨터 시스템으로도 충분한 것은 물론이다.

4. 피로균열 열림점의 자동측정

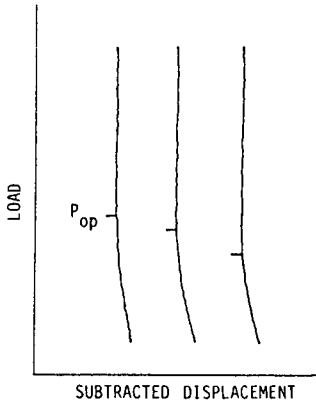
피로균열의 단합현상⁽⁶⁾은 피로균열진전을 지배하는 가장 중요한 인자의 하나로, 이에 관한 연구가 활발하여, 그 측정방법도 다수 제안되어 있다⁽⁸⁾. 그 중, 2.1節에서 언급한 除荷彈性컴플라이언스법은 경제성, 사용상의 간편함 및 측정정밀도 그리고 연속적인 측정등에 많은 利點이 있어, 著者들을 비롯하여 많은 연구자에 의해 널리 이용되고 있다.

除荷彈性컴플라이언스법에서의 균열단합 현상의 측정은 균열의 열림단합과 관련하여 변화하는 컴플라이언스의 변화를 이용하는 것으로, 특히 측정정밀도 개선과 균열진이의 동시측정을 위하여 앞의 Fig. 4(e) 및 Fig. 5에서 보는 바와 같이 하중-감산변위 히스테리시스를 사용하는 것이 특징이다. 균열단합현상의 측정은 구체적으로는 Fig. 7(a)에서 굵은 實線으로 표시된 하중-감산변위 히스테리시스에서 균열열림점(crack opening point)에 대응하는 히스테리시스의 屈曲點을 검출하는 것으로, 보통은 目測에 의하는 경우가 많아, 특히 初心者의 경우 誤差가 많게 되는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 이 균열열림점에 대응하는 히스테리시스의 굴곡점을 컴퓨터 소프트웨어에 의하여 검출하는 방법을 講究하였다. 그 알고리즘은 Fig. 7(a)에 보이는 바와 같이, 히스테리시스의 頂點과 히스테리시스의 任意的 點를 직선으로 이어 얻어지는 빗금친 부분의 면적이 0이 되는 하중점을 균열열림점으로 하는 것이다. 이 방법에 의해 측정된 균열열림점이 Fig. 7(b)의 짧은 수평직선으로 나타낸 점들이다. 실제 히스테리시스의 굴곡점과 잘 일치함을 알 수가 있다.

이상과 같은 피로균열 열림점의 자동측정외에, 얻어진 균열열림점의 결과를 이용하여, 균열이 완전히 열려있는 하중부분에 대한 하중-소변위곡선의 기울기로부터 컴플라이언스를 계산하여 시험편의 균열길이를 측정하는 소프트웨어도 작성되어 있다.



(a) Algorithm of finding crack opening point



(b) Measured crack opening point

Fig. 7 Measurement of crack opening point by computer software

이와 같은 소프트웨어를 이용하면 측정에 대한 人力을 대폭 절감할 수가 있으며 또한 個人差에 의한 측정 誤差도 크게 줄일 수가 있다.

여기서 위의 소프트웨어들의 특성과 관련하여 몇가지 지적해 두면, 먼저 균열열립점 자동측정에 사용한 위의 알고리즘은 Fig. 7 또는 Fig. 4(e)에서 보는 바와 같이 하중-감산변위 히스테리시스에 소성성분이 없어, 負荷線과 除荷線이 거의 일치하는 경우에 有用한 것이며, Fig. 5와 같이 히스테리시스에 소성성분이 존재하여, 히스테리시스가 루프(loop)를 그리는 경우에는 다른 알고리즘을 사용할 필요가 있다. 이에 관해서도 현재 연구중으로 가까운 장래에 발표할 예정이다.

한편, 균열이 완전히 열려 있는 하중부분에 대한 하중-소변위곡선의 컴플라이언스로 부터 균열길이를 측

정하는 경우의 측정정밀도는, 컴플라이언스와 균열길이의 보정(calibration)관계식의 정확도에 全的으로 의존하므로, 필수록 정확한 공표된 관계식을 이용하거나 또는 이를 실험적으로 구해 둘 필요가 있다. 현재까지의 결과에 의하면, 이 방법에 의한 균열길이 측정의 오차는 2%내외이다.

5. 결 론

16bit 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 피로시험 및 동시계측을 하는 시스템을 구축하였다. 특히 본 연구에서는 컴퓨터 한대 만을 이용하는 Single-System(單一시스템)과, 측정 데이터량 및 시험기의 途中 제어등에 유리한 컴퓨터 두대를 동시에 사용하는 Dual-System(二重시스템)도 구축하고 있다.

또한 구축한 시스템을 이용하여 측정신호에 혼입하는 각종 잡음을 컴퓨터 소프트웨어에 의해 감소시키는 방법을 강구하여, 피로거동측정의 정밀도를 높이고 있다.

이와 함께 除荷彈性컴플라이언스법을 이용하여 피로 균열달림현상 및 균열길이를 자동적으로 측정하는 소프트웨어도 작성하여, 피로균열진전시험 수행시의 인력 절감과 측정오차 감소도 期할 수 있도록 하였다.

후 기

본 연구는 1986년도 한국과학재단의 목적기초연구의 일환으로 이루어진 것으로, 관계자 여러분께 감사드리는 바이다.

참 고 문 헌

- (1) ASTM STP613, 1976, "Use of Computers in the Fatigue Laboratory".
- (2) ASTM STP877, 1985, "Automated Test Methods for Fracture and Fatigue Crack Growth".
- (3) 菊川眞, 城野政弘, 田中健一, 近藤良之, 田畑文夫, 村田洋一, 1980, "ミニコンピュータの利用による疲勞試驗における計測の高精度自動化", 材料, Vol.29, No.327. pp.1240~1246.
- (4) Jono, M. and Song, J., 1985, "Growth and Closure of Short Fatigue Cracks", Current Research on Fatigue Cracks, Material Research Series 1, The

- Society of Material Science, Japan, pp.35~55.
- (5) 문한규, 방건웅, 김엄기, 1986, “피로시험을 위한 MTS 와 Micro Computer 의 Interface”, 대한기계학회 1986 년도 추계 학술대회 초록집, pp.29~33.
- (6) Elber, W., 1971, “The Significance of Fatigue Crack Closure”, ASTM STP 486, pp.230~242.
- (7) 菊川眞, 城野政弘, 田中健一, 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労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.
- (8) 宋智浩, 朴榮祖, 1978, “Notch 材疲勞와 Kikukawa-Compliance 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.
- (9) 朴准夾, 1987, “퍼스널컴퓨터를 이용한 피로시험 및 동시계측의 자동화”, 한국과학기술원 석사학위논문.
- (10) 城野政弘, 宋智浩, 江口直紀, 1985, “荷重制御下の彈塑性疲労き裂進展(線形破壊力學パラメータの有効範圍と塑性變形の影響)”, 材料, Vol. 34, No.380, pp.561~567.