

초음파 Spectrum 해석에 의한 Creep 손상재의 비파괴평가

김 창 일* 이 원** 임 영 호**

Nondestructive Evaluation of Creep Damage Materials by using Ultrasonic Spectrum Analysis

C. I. Kim, W. Yi and Y. H. Lim

Abstract Nondestructive evaluation study was made on creep damage materials by ultrasonic spectrum analysis. The evaluation methods was developed in order to predict the change of ultrasonic attenuation with increasing creep damage. A new algorithm for the improvement of measuring accuracy of ultrasonic attenuation using a spectrum analysis has been developed. Normally, the ultrasonic attenuation is evaluated from 1st and 2nd peak values of the pulse - echo ultrasonic wave. The algorithm developed is incorporated in a measuring system which consists of a personal computer with ultrasonic apparatus and a digital storage oscilloscope. .

By the spectrum analysis method, it become possible to describe approximately the attenuation change with increasing creep damage in Cr - Mo - V forging.

1. 서 론

Turbine Rotor 등의 고온기기에서의 구조재료는 경년열화손상이 문제가 되므로 구조재료의 잔여수명을 평가하기 위한 비파괴적인 내부손상 검출법의 확립이 강력히 요구되고 있다. 지금까지 고온구조 재료의 경년열화 손상을 검출하는 방법으로 레프리카법, 전기저항법, 초음파법, 와전류법, X-선법 등이

제안되고 있으나 결정적인 방법은 아직 확립되어 있지 않다. 특히 초음파법은 비파괴적 검출의 적용성이 높을 뿐만 아니라 그 가능성이 유력함에도 불구하고 현재까지 이에 대한 연구보고는 크게 눈에 띄지 않는다. 초음파 펄스를 이용한 재료평가, 결함탐상 등에 대한 연구는 지금까지 많이 연구가 되고 있다.^{1~3)} 이와같은 것은 대부분 재료종을 전파하는 초음파 펄스 파형을 시간영역에 따른 초음파의 전파시간 또

* 숭실대학교 대학원 기계공학과

** 숭실대학교 기계공학과

접수 : 1991년 9월 23일

는 수신된 펄스정도를 측정하는 기술에 의하여 전파 속도, 감쇠계수 등을 평가하는 것이다. 최근에는 광역밴드(Wide Band)의 초음파 Sensor 출현, 측정기기의 Digital화, 고정밀도의 연산처리 기술등이 발전된 결과 초음파 Pulse-Echo 파형중에서 필요한 정보만 선택, 추출하여 주파수 영역의 정보로서 이용하는 것이 많다.⁴⁻⁶⁾ 본 연구에서는 초음파 Pulse-Echo파의 제1 Echo와 제2 Echo의 Spectrum의 비에서 초음파 감쇠계수를 구하여 평가하는 새로운 방법에 대하여 논하고자 한다. 새로 개발된 Algorithm을 Personal Computer에 접목시켜 초음파 측정장치와 연결하여 금속재료 중을 전파하는 파형을 시간영역에서 추출하여 고속 Fourier 변환(이하 FFT라 함)에 의한 파형을 해석하여 고온기기 손상의 대표라 생각되는 Creep 손상재에 적용함으로써 초음파 Spectrum법에 의한 Creep 손상의 비파괴적 검출의 가능성에 대하여 검토하고자 한다.

2. 이 론

Fig.1과 같은 Pulse-Echo 파형이 얻어졌을 때 초음파 Pulse-Echo파의 감쇠계수(Attenuation)를 이용하여 재료를 평가할 때 가장 일반적인 방법은 파형의 제1 Echo 강도 L_1 과 제2 echo 강도 L_2 와 이 비를 Digital 값으로 나타낸 것을 이용하여 감쇠계수는 통상 다음과 같이 나타낸다.

$$\alpha = \frac{1}{2T} \ln \frac{1}{2} \dots\dots\dots (1)$$

단, T : 판두께

L_1, L_2 : 제1, 제2 Echo의 peak 출력 값

식(1)에서 평가되는 감쇠계수 α 값은 L_1 과 L_2 의 Pulse-Amplitude 강도비에서 계산된 양으로 Fig.1에서 측정되는 L_1, L_2 값의 미소변화에도 영향을 받기 쉬우므로 L_1, L_2 의 정확한 평가가 요구된다.

미소균열(Crack) 이전의 열화단계에서 감쇠계수는 재료손상에 따라 받는 영향이 매우 적으므로 더욱 정확한 평가가 요구되고 있다.

그러나 외관상 Echo의 Peak 값에서 L_1, L_2 를 평가

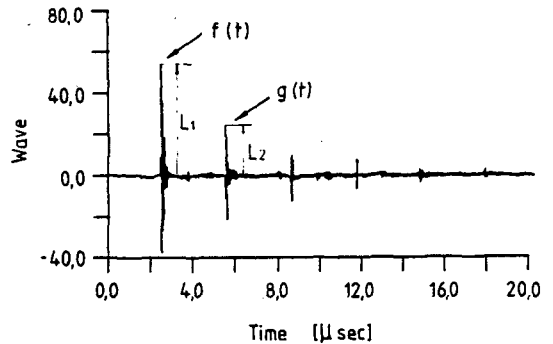


Fig.1 Typical type of pulse - echo wave

하면 Pulse의 성질이나 파형에 첨착된 미소 Noise 등 여러가지 Parameter에 의하여 오차가 생길 수가 있다.⁷⁾

따라서 본 연구에서는 이와같은 오차요인에 의한 영향을 최소화하여 줄이기 위하여 종래의 시간영역에서 평가하고 있는 감쇠계수를 Spectrum 해석을 이용하여 평가하는 방법을 제안한다. 이 방법은 Pulse-Echo법의 원리에 근거를 둔 것으로 제1 Echo 및 제2 Echo 사이의 변화는 피측정 재료 내부조직에 의한 것으로 생각되어 이것을 Spectrum 해석을 이용하여 정량적으로 평가하는 것을 시도한다. Spectrum 해석의 순서는 Fig.2와 같다.

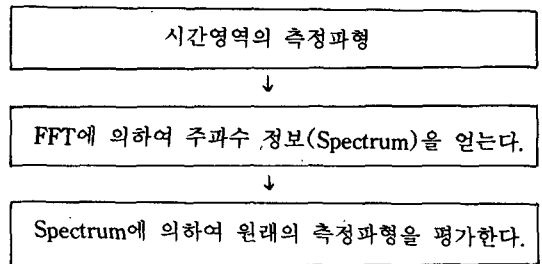


Fig.2 Evaluation of pulse - echo wave by spectrum

Fig.1과 같은 실제측정된 Pulse-Echo 파형에서 제1 Echo 만을 추출한 것을 $f(t)$, 제2 Echo만을 추

출하여 $g(t)$ 로 하여 그 비를 취하면 Fig.3과 같이 된다.

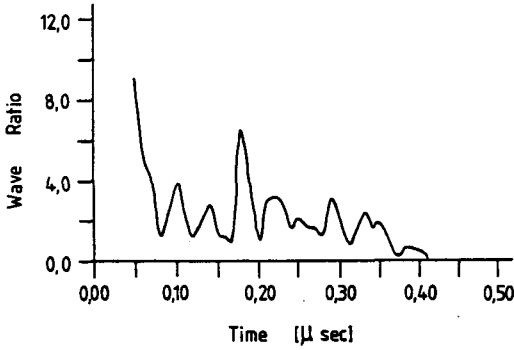


Fig. 3 Ratio of pulse - echo waves

그림에서 알 수 있는 바와 같이 $f(t)$ 와 $g(t)$ 의 비는 일정하지 않으며 또한 Echo파형의 전후 부분에서 "0"이 아닌 어떤 값을 갖고 있다. 이러한 것은 실제파형에 중첩되는 미소한 Noise에 의한 것으로 생각된다. 이와같이 파형이 어느 범위에서 전체적인 파형의 형상 변화(제1 Echo에서 제2 Echo로)는 일정한 강도비로 되지 않지만 이 변화 방식에 따라 초음파 물성량을 유도하여 피검사 재료의 내부조직을 평가할 수 있을 것으로 생각된다. $f(t)$ 와 $g(t)$ 의 Pulse 부분이 시간축 상에서 일치하게 Fig. 4와 같이 Overlap하면 다음과 같은 관계가 성립한다.

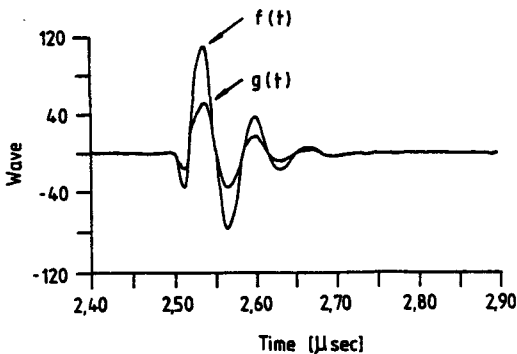


Fig. 4 Overlap of pulse - echo waves

$$\beta = \frac{f(t)}{g(t)} \quad f(t) = \frac{g(t)}{\beta} \dots\dots\dots (2)$$

그리고 이 관계를 Spectrum 영역까지 확장한다. $f(t)$ 및 $g(t)$ 의 Fourier 변환을 각각 $F(\omega)$, $G(\omega)$ 로 하면 Fourier 변환은 선형성이므로 다음식이 성립한다.

$$G(\omega) = F\{g(t)\} = F\{f(t) \beta\} \\ = \beta \cdot F\{f(t)\} = \beta \cdot F(\omega) \dots\dots\dots (3)$$

실제로 얻어진 Pulse - Echo파형에 대하여 $F(\omega)$ 와 $G(\omega)$ 를 구하여 보면 Fig. 5 및 6과 같이 되는데 대략 $F(\omega) \propto G(\omega)$ 가 됨을 알 수 있다.

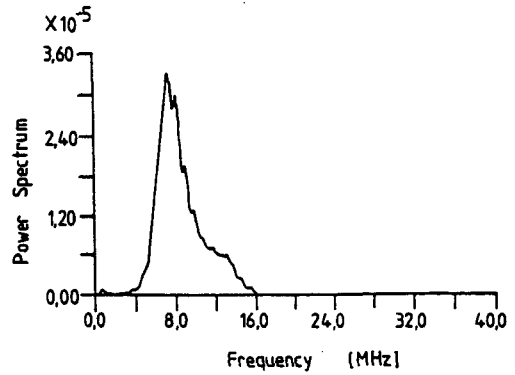


Fig. 5 Spectrum of first echo wave

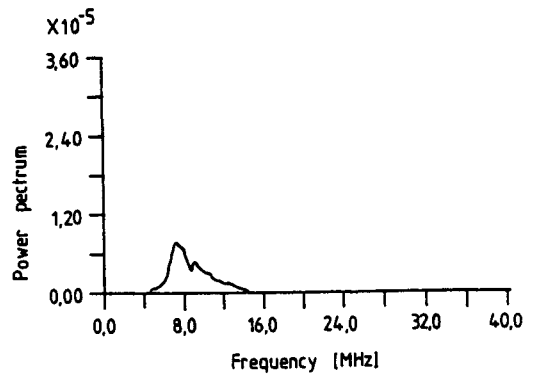


Fig. 6 Spectrum of second echo wave

제1 Echo의 Spectrum과 제2 Echo Spectrum의 비 즉 $F(\omega)/G(\omega)$ 를 각 주파수 마다 구하여 Plot 한 것이 Fig. 7과 같다.

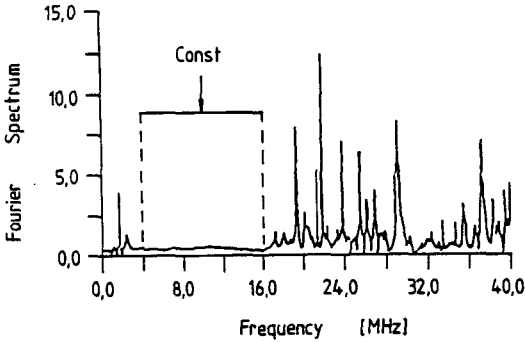


Fig. 7 Ratio of the first and the second echo wave

Fig. 7에서 알 수 있는 바와같이 탐촉자(Probe)의 중심 주파수(이 경우 4MHz~16MHz)에서는 거의 일정한 값이 된다. 이 부분의 값이 β 가 된다. β 는 원래 시간영역의 파형 즉 제1 Echo $f(t)$ 와 제2 Echo $g(t)$ 의 비이므로 이 값에서 감쇠를 평가할 수 있다. 따라서 β 를 산출할 때 탐촉자의 중심 주파수 부근을 중심으로 한 탐촉자의 고감도 Band 구간 즉 Fig. 7의 "일정부분"만의 값을 평균하여 고주파수 역의 Noise 등의 영향을 제거시켜 주므로 신뢰도가 높은 감쇠계수를 구한다. β 가 구해지면 식(1)은

$$\alpha = \frac{1}{2T} \ln \beta \dots\dots\dots (4)$$

가 되어, dB/m 단위를 갖는 감쇠계수의 값을 환산할 수 있다.

3. 실험방법 및 고찰

3-1 실험장치 및 방법

본 연구에서 제안하는 초음파 파형평가 방법을 검토하기 위하여 고온구조 부재의 경년열화손상을 모의한 Cr-Mo-V 강의 시험재에 대하여 초음파 Pu-

lse-Echo법에 의한 측정 실험을 실시했다. 초음파 파형측정을 위하여 Pulsar Receiver(주파수 band폭 1~50MHz) 및 중심 주파수 약 4~16MHz의 종파용 수직형 탐촉자를 이용하여 Pulse-Echo파형을 측정했다. Fig. 8에 측정장치를 나타냈다.

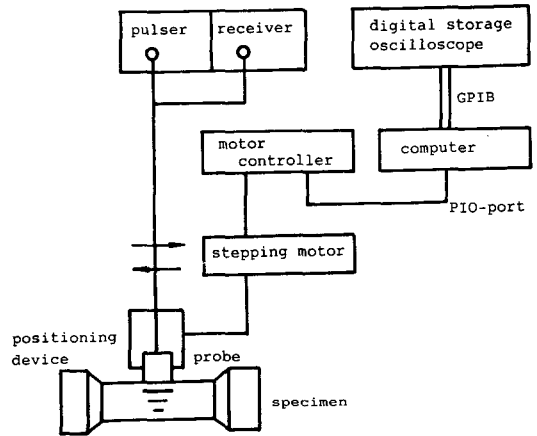


Fig. 8 Block diagram of experimental apparatus

Pulse-Echo파는 Digital Oscilloscope상에서 A/D 변환(분해능 8bit)된 후 GPIB(General Purpose Interface Bus)를 거쳐 Host Computer에 전송되어 Digital 처리된다. Fourier 및 역 Fourier 변환하기 위하여 퍼스널 컴퓨터 상에서 FFT Program(Sampling 점 4100점)을 실시한다. 탐촉자와 시험편의 접촉은 직접 접촉식(접촉 매질: Silicone Oil)으로 했다. 접촉자의 위치는 Stepping Motor를 이용하여 제어할 수 있게 하였고, 접촉력을 일정하게 하기 위하여 접촉자를 Spring에 의하여 시험편에 눌러 지는 구조로 했다. 그리고 하나의 시험편에서 어느 범위에 대하여 일정한 간격으로 여러부분을 측정할 수 있는 초음파 파형측정의 자동화를 가능하게 하여 시험편 내의 손상분포를 정확하게 추출할 수 있게 하였다.

증기 Turbine의 Rotor재의 경년열화손상을 모의하기 위하여 Cr-Mo-V 강에 대하여 Creep 시험을 실시하여 수명소비율과 초음파 감쇠계수와와의 관계를 구하여 손상열화의 비파괴 검출의 가능성을 조사했

다. Fig. 9에 실험에 이용된 Creep 시험편의 형상 및 치수를 나타냈다.

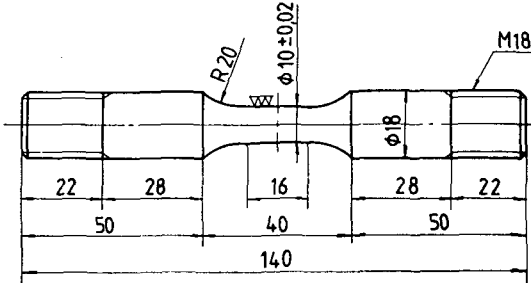


Fig. 9 Dimension of specimen

실험조건은 온도 600°C (800 K), 응력 18.0Kgf/mm^2 이다. 그리고 시험시간 210.0, 450, 550, 800, 930 시간에서 중단한 후 5개의 시험편을 이용하여 (930 시간에서 파단), 시험종료 후에 초음파 측정을 가능하게 하기 위하여 시험편을 길이방향으로 평행한 양쪽 면이 생기도록 가공하여 사용했다.

3-2 결과와 고찰

일반적으로 creep 손상은 재현성이 있는 확정적 개념보다는 확률적·통계적인 개념으로 취급하고 있는 것이 보통이다.⁸⁾ 본 실험에서는 각각의 시험편을 측정함으로써 동일 조건의 시험편 사이에서도 손상이 반드시 같지 않아 통계적인 평균값을 취하는 것을 고려했다. 따라서 재료의 조직 변화의 정보를 파악하는 수단으로써 유효한 경도시험을 초음파 측정 후에 실시하여 Creep 시험시간과 실제의 손상이 대응하고 있는 가를 검토한 후 초음파 감쇠계수와 손상과의 관련을 검토하였다.

Fig. 10에 경도 시험의 결과를 나타냈다. 종축에 Vickers 경도 Hv, 횡축에 시험시간을 취하여 하나의 시험편에서 시험편 중앙부를 중심으로 하여 축 방향으로 1mm 씩 10점을 측정된 결과를 나타냈다. Cr-Mo-V 강에서는 손상과 함께 열화 경향이 나타나는 것이 보통이다.⁹⁾ Fig. 10에서도 시험시간이 증가함에 따라 열화경향이 나타났다. 그러므로 Creep 시험시간과 실제 손상은 거의 대응 관계가 있음을 알 수

있다. 또한 초음파 측정은 시험편 중앙부를 중심으로 축방향으로 탐촉자를 이동시키면서 1mm씩 한 시험편에 10점을 측정했다. Fig. 11에 감쇠계수의 해석 결과를 나타냈다. 횡축에 시험시간, 종축에 감쇠계수를 취했다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 초음파 감쇠계수는 시험시간과 대응된 양호한 결과를 얻었다. 특히 파단 시험편(시험시간 930시간)은 파단부 부근에서 감쇠계수가 크게 나타났다. 따라서 초음파 감쇠계수에 의하여 Creep 손상을 비파괴적으로 검출이 가능하다고 생각된다.

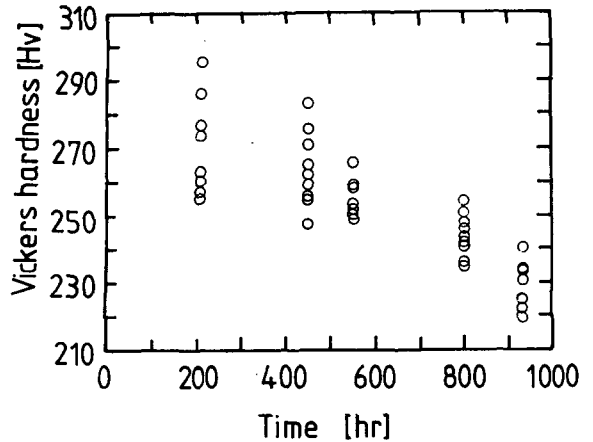


Fig. 10 Results of hardness test

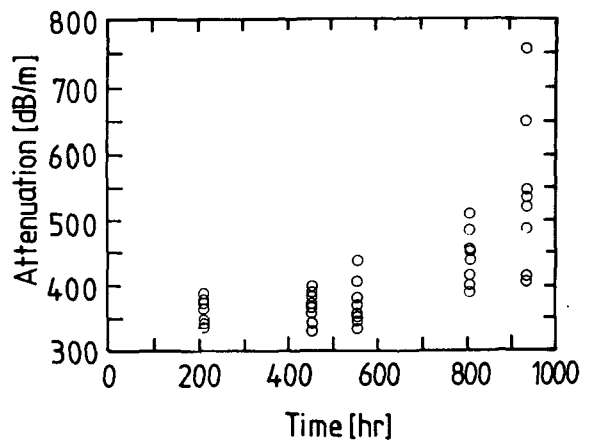


Fig. 11 Evaluation values of attenuation coefficient

4. 결 론

초음파의 감쇠계수를 정밀도 높게 평가하기 위한 방법으로 퍼스널컴퓨터와 초음파 측정장치를 연결하여 초음파 측정 System을 구성하고 초음파 Pulse-Echo의 제1 Echo와 제2 Echo의 Spectrum을 구하여 그의 비로 부터 초음파 감쇠계수를 구하여 평가하는 방법을 제안하고 고온기기손상의 대표적 형태인 Cr-Mo-V 강의 Creep 손상재에 본 방법을 적용한 결과 초음파 감쇠계수는 재료의 손상에 대응하여 변화하고 있는 것으로 생각되며, 이와같은 초음파법을 이용하여 Creep 손상을 비파괴적으로 검출할 수 있는 가능성을 제시하였다.

끝으로 국내의 화력발전 설비등의 고온기기에서 가동년수 증가에 따른 Void, Cavity, 및 Micro-Crack 등의 결함발생이 예상되므로 이들 경년열화 손상재에 대한 잔여수명 평가에 대한 비파괴적인 내부손상 검출법의 확립이 필요하다고 본다. 그러므로 재료에 거시적 결함이 발생하기 이전의 열화단계에서 결함의 검출 및 평가에 필요한 검사기기의 개발 및 자동화에 많은 연구가 있어야 할 것으로 생각된다.

References

1. W. Sachse : Materials Evaluation, Vol. 37, Oct., (1977) pp. 83~89
2. M. G. Silk : Ultrasonics, pp. 113~121 May, (1979)
3. S. Golan : Materials Evaluation, Vol. 39, Feb., (1981) pp. 166~169
4. O. R. Gerike : The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 35, #3, (1963) pp. 364~368
5. 杉山 : 非破壊検査, 29(5), (1980) pp. 324~328
6. 三原, 小幡, 山下 : 非破壊検査, 38(10), (1989) pp. 989~903
7. 酒井信介 外 5名 : 日本機械學會論文集 A-55, (1989) 1640
8. 岡村弘之, 板垣 浩 : “強度의 統計的 取扱い” 培風館(1979), pp. 1
9. 祐川正之 : 壓力技術, 26, pp. 361, (1988)