

초음파 시험에 의한 배관용 Cr-Mo강의 피로손상의 비파괴평가

Fatigue Damage Evaluation of Cr-Mo Steel with In-Situ Ultrasonic Surface Wave Assessment

김상태*, 이희동**, 양현태**, 최영근***

Sang-Tae Kim*, Hei-Dong Lee**, Hyun-Tae Yang** and Young-Geun Choi***

초 록 재료의 손상을 평가하기 위하여 초음파법에 대한 많은 연구가 진행되었고 널리 사용되고 있으나 대부분 균열의 성장 또는 두께의 감소와 같은 문제에 집중되고 있다. 본 연구에서는 2.25Cr-1Mo 강을 이용하여 반복하중에 의해 재료내부에 발생하는 미시균열을 조기에 감지하고, 피로에 의한 파괴를 미연에 방지할 수 있도록 초음파 표면파의 감쇠와 속도변화를 이용하여 균열길이 측정의 정량적인 평가방법을 제시하였다. 중심주파수 5MHz의 탐촉자를 이용하여 파단수명비 약 60%, 균열길이 약 2mm 정도에서 표면파의 속도 및 감쇠 변화를 탐지할 수 있었다. 고주파 탐촉자를 이용함으로써 미시균열의 발생을 조기에 탐지할 수 있으며, 파단수명을 예측하는 기초자료로 활용할 수 있다.

주요용어: 피로손상, 초음파 표면파, 미시균열, 속도비, 감쇠

Abstract Although the ultrasonic method has been developed and used widely in the fields, it has been used only for measuring the defect size and thickness loss. In this study, the relationship between surface wave attenuation through micro-crack growth and variation of velocity under repeated cyclic loading has been investigated. The specimens are adopted from 2.25Cr-1Mo steel, which is used for power plant and pipeline system, and have dimensions of 200×40×4mm. The results of ultrasonic test with a 5MHz transducer show that surface wave velocity gradually decreases from the point of 60% of fatigue life and the crack length of 2mm with the increasing fatigue cycles. From the results of this study, it is found that the technique using the ultrasonic velocity change is one of very useful methods to evaluate the fatigue life nondestructively.

Keywords: fatigue damage, ultrasonic surface wave, micro-crack, velocity ratio, attenuation

1. 서 론

지금까지 국내에 건설되어 거의 20~30년 가동되고 있는 석유화학 플랜트, 발전설비 등과 같은 기계구조물들은 그 사용기간이 길어짐과 더불어 수명상의 문제가 제기되고 있다. 이에 따라, 기계구조물에 대한 검사, 보수, 교환, 사용정지, 운전조건의 제한, 재건설, 안정성 및 신뢰성의 검토 등이 요구되고 있는 반면, 설계수명에 임박했거나, 경제성을 향상시키기 위한 가혹 운전이 행하여지고 있는

발전 플랜트와 화학공장 등과 같은 고온 설비들의 수가 증가 추세에 있다.

각종 설비에서의 파괴는 피로에 의한 파괴가 많은 부분을 차지하고 있으며, 이에 대한 연구는 급속히 진전되고 있다. 피로에 의한 미소결합의 발생은 주로 표면, 내부의 개재물 또는 용접부 등에서 발생하며, 이러한 미소결합이 성장 합체하여 결국 파괴에 이르는 경우가 많다. 비교적 큰 균열에서의 성장속도에 대한 연구는 많이 이루어지는 반면, 미소균열에 대한 연구는 아직도 미흡한

(접수: 2000. 1. 18) * 영남대학교 기계공학부(Dept. of Mechanical Eng., Yeungnam University, Kyongsan 712-749),

** 영남대학교 기계공학과 대학원, *** 구미 1대학 차량기계과

실정이다.

그러므로, 설비의 안전성 및 신뢰성 확보와 잔여 수명 예측을 위한 미소균열의 크기 및 위치를 감지할 수 있는 고감도, 고정도의 정량적인 비파괴 평가기법의 확립이 현안과제가 되고 있다.

각종 구조물들의 안전성 확보를 위하여 비교적 다양한 비파괴 검사방법들이 이용되고 있으며, 최근 국내에서도 설비의 안전성평가를 위한 비파괴 검사와 관련된 연구가 다방면에서 이루어지고 있다. 비파괴 평가법 중, 초음파 탐상검사는 교량, 발전설비 및 석유화학 플랜트 등 다양한 분야에 걸쳐 가장 일반적으로 널리 사용되고 있는 대표적인 검사방법이다. 이 방법은 on-line monitoring이 가능하다는 장점이 있다.

1953년 Ishibasi 등[1]에 의하여 처음 연구가 시작된 미소균열에 대한 연구는 피로과정을 쉽게 이해하는데, 그리고 피로에 대해 더 오래 견딜 수 있는 재료를 개발하는데 매우 중요하다. 이러한 비행기 구조물의 미소균열을 초음파를 이용하여 측정하기 위한 연구가 Wanhill[2]에 의하여 행해졌다.

Birring 등[3]의 연구는 cavity의 크기에 따라 감쇠의 변화를 각 주파수 별로 초음파 분산이론에 의한 해석을 하였으며, Matsumoto 등[4]은 탄성체내의 cavity, 미소균열의 분포 등에 의해 초음파의 속도가 변하는 것을 이론적으로 해석함과 동시에 실험적으로 이를 확인하였다. 초음파 표면파를 이용한 지금까지의 연구내용은 그 특성으로 인해 표면균열의 검출, 표면잔류응력의 측정, 표면탄성물성치의 측정에 이용되었다.

표면균열의 검출은 파괴 역학적 측면에서 큰 의미를 가지게 되는데 이는 표면의 미소결합이 재료의 수명예측에 필수적이기 때문이다. Date 등[5]은 탄소성 파괴인성 시험중의 균열진전량의 측정에 표면파의 전파시간이 균열깊이와 비례함을 보여 그 유용함을 입증하였다. Hirao 등[6]은 굽힘 피로를 준 상태에서 반사되는 파의 크기를 스펙트럼 분석을 하여 균열의 크기를 평가하였고 Karpur 등[7]은 인장-인장 형태의 피로하중을 준 상태에서 스펙트럼으로 최소균열을 예측하였다.

Green[8]은 Al 6061과 Steel 1015재료를 사용하여 굽힘 피로를 주고 이때의 초음파의 변화특성을 관찰하였다. 하지만 이런 많은 연구들에는 실험의 어려움과 초음파의 특징 때문에 정량적인 미소균열의 분포와 파의 관계를 나타내지는 못하였다.

2.25Cr-1Mo강재에 대한 Creep변형시의 초음파 측정 연구에서 초음파 속도, 감쇠율, Noise분석, 에너지 감쇠

율, 주파수 스펙트럼 등이 측정되어 보고[9-10]되었지만 피로손상결과는 아직 체계적인 연구가 없다. 한편 국내에서는 아직 체계적인 초음파법을 이용한 재료의 피로손상 연구가 초보단계에 있다.

본 연구의 목적은 배관 및 압력용기용 강으로 사용하고 있는 2.25Cr-1Mo강을 이용하여 미소균열의 발생, 성장 및 합체거동을 분석한다. 이를 초음파 표면파를 이용하여 미소균열에 의한 감쇠 및 속도 변화의 특성을 비교·분석하여, 구조물의 안전성 평가와 초음파 표면파의 적용가능성을 검증하는 것이다. 또한 실험결과를 통계적 해석을 이용하여 균열의 성장을 예측하며 실구조물에 적용함으로써 수명평가를 하는 자료로 이용하는 것이다.

2. 실험방법 및 내용

2.1. 시 편

본 연구에 사용된 재료는 고온, 고압의 발전 설비 및 배관계통에 많이 사용되고 있는 2.25Cr-1Mo강이며, 기계적 성질 및 화학적 조성은 Table 1, 2에 나타내었다.

미소균열의 발생을 시험편의 중앙부에 생기게 하기 위하여 시험편을 Fig. 1과 같이 가공하였다.

또한, 표면의 조도는 균열의 발생 및 초음파의 속도와 감쇠에 큰 영향을 미치므로, 시험편 표면을 연마지로 연마한 후, 0.5 micron 알루미나 파우더와 버퍼를 사용하여 마무리하였다.

Table 1 Mechanical properties of 2.25Cr-1Mo Steel

인 장 강 도	575.9 MPa
항 복 강 도	517.2 MPa
탄 성 계 수	210.5 GPa
연 신 률	25 %
단 면 수 축 률	70 %

Table 2 Chemical Composition (wt%) of 2.25 Cr-1Mo Steel

C	Si	Mn	S	Ni	Mo	Cr
0.09	0.08	0.57	0.01	0.02	0.95	2.28

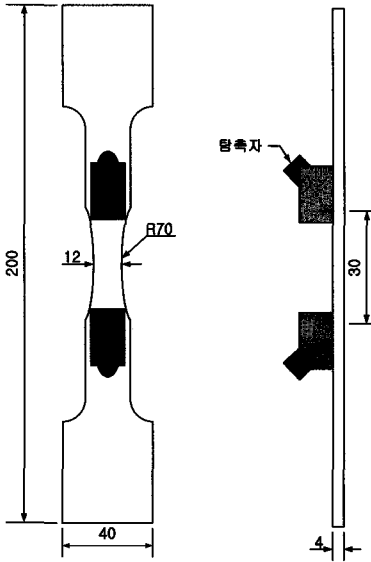


Fig. 1 Geometry of specimen

2.2. 시험방법

피로에 의하여 발생되는 미소균열의 초음파 특성을 분석하기 위하여, 피로시험은 Table 3과 같은 조건으로 하였으며, 최대용량 10ton인 유압식 피로시험기를 이용하였다.

피로시험 동안 임의의 사이클에서 초음파 탐상기(Krautkramer사의 USD15) 및 오실로스코프(LeCroy Digital Oscilloscope-9300)를 이용하였다. 2.25Cr-1Mo강에서의 초음파 속도를 Table 4에 나타내었다.

피로시험 시, 표면파의 속도와 echo의 높이를 측정하고, 임의의 cycle에서 속도와 echo 높이를 측정하므로 cycle의 증가에 따른 감속 및 감쇠를 측정하였다.

본 시험에는 2.25와 5MHz의 탐촉자를 이용하여 각 주파수에 따른 표면미소균열의 변화를 관찰하였다. 시험 방

법은 Fig. 2와 같이 직접 접촉법인 pitch-catch법을 이용하였으며, 시험이 수행되는 동안 치구를 이용하여 탐촉자를 고정시킴으로써, 입사점의 위치 및 누르는 압력을 일정하게 하였다.

A조건은 2.25MHz 탐촉자를 이용하였으며, B조건은 5MHz 탐촉자를 이용하여 초음파 변화 특성을 분석하였다.

피로에 의하여 표면에 발생한 미소균열을 관찰하기 위하여 레프리카를 이용하였다. 임의의 cycle에서 레프리카를 이용하여 얻어진 표면의 형상을 광학현미경으로 50배의 배율로 확대 촬영한 사진을 연결하여 미소균열의 숫자와 길이를 측정하여 임의의 cycle에서의 미소균열의 거동 및 표면파 거동을 분석하였다.

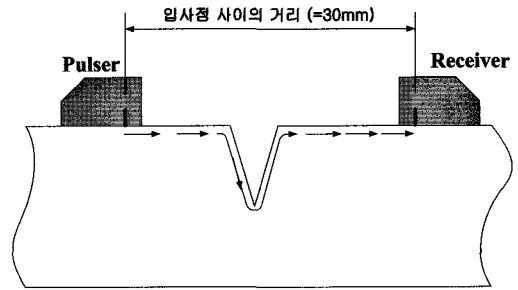


Fig. 2 Schematic of the pitch-catch method

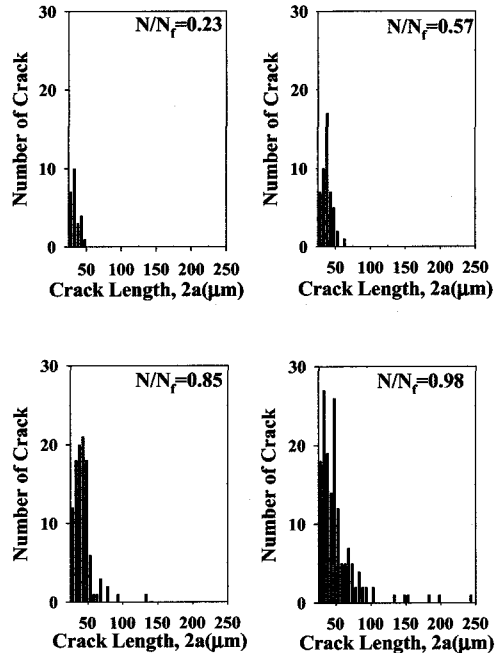


Fig. 3 Histogram of small crack length

Table 3 Condition of fatigue test

최대응력 (MPa)	응력비 (R)	주파수 (Hz)	제어방식	파 형
254	0.05	10	하중제어	Sine파형

Table 4 Velocities of ultrasonic wave in 2.25Cr-1Mo steel (m/sec)

종 파	횡 파	표면파
5480	2930	2710

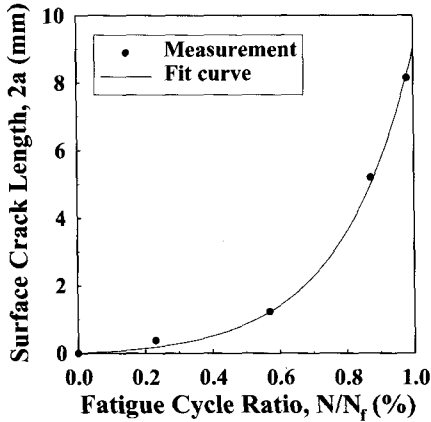


Fig. 4 Relationship between the surface crack length and cycle ratio

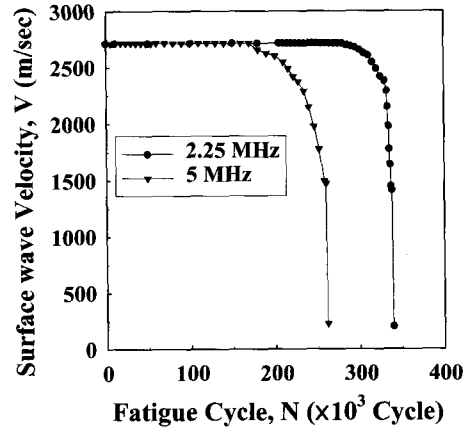


Fig. 5 Change of the surface wave velocity with the fatigue cycles

3. 시험결과 및 고찰

A, B 두 조건 모두 같은 하중조건에서 시험을 수행하였지만, 파단수명에 차이를 보이므로, 파단수명비로써 평가하였다.

피로시험 중 임의의 cycle에서 레프리카를 이용하여 표면에 발생한 미소균열의 크기를 측정하여, 파단수명에 따른 균열의 수를 Fig. 3에 나타내었다. 레프리카를 이용한 균열관찰은 상당한 시간과 노력이 필요한 관계로 0.23, 0.57, 0.85, 0.98의 파단수명비에서 미시균열을 관찰하여 나타내었다.

레프리카에서 구해진 미시균열의 길이를 모두 더하여 총균열길이(2a)로 간주하여, 총균열길이와 파단수명에 대하여 Fig. 4에 나타내었다. 초음파 속도 측정시의 균열길이를 추정하기 위하여 Fig. 4에서 근사곡선을 구하여 임의의 cycle에서의 균열길이를 추정하였다. Fig. 3, 4는 B 조건에서 측정된 균열길이를 평균한 값이며, 같은 피로하중 조건에서는 파단수명비에 대한 균열길이는 한 곡선 위에 존재한다는 연구보고가 있으므로, 위의 결과는 파단수명비에 대한 균열길이 추정에 이용이 가능하다.

Fig. 5, 6에서는 cycle에 대한 속도의 변화를 측정하여 나타내었으며, Fig. 5에서, A조건은 285,000, B조건에는 180,000 cycle에서 속도변화를 감지할 수 있었으며, Fig. 6에서 보듯이, A조건의 시편에서는 파단수명의 84% 정도에서, B조건은 69%정도에서 미시균열의 생성이 탐지되었다.

표면과 에코높이의 건지에서 보면 Fig. 7, 8에 나타난 것처럼, A조건의 시편은 285,000 cycle에서 감쇠를 측정

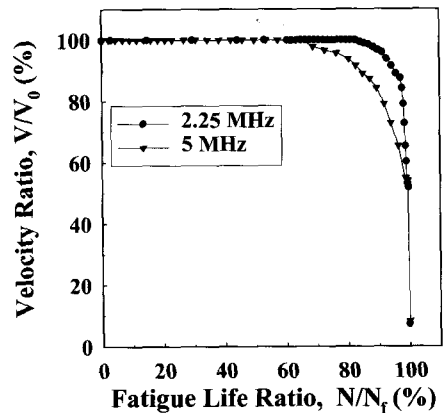


Fig. 6 Change of the surface wave velocity ratio with fatigue life ratio

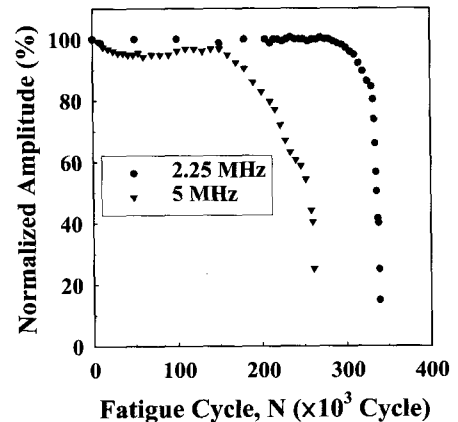


Fig. 7 Change of the amplitude with the fatigue cycling

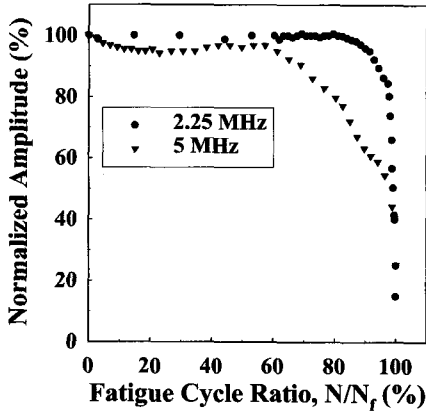


Fig. 8 Change of the amplitude ratio with the fatigue cycles at 2.25 and 5MHz

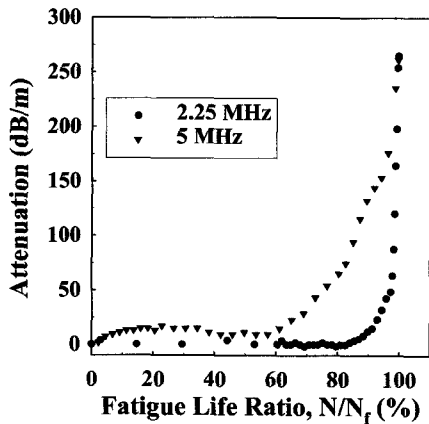


Fig. 9 Relationship between the attenuation and the fatigue life ratio

할 수 있었으며, B조건 시편은 160,000 cycle에서 균열의 발생을 탐지할 수 있었다. 이것은 미시균열의 발생은 속도보다 에코의 감쇠가 더 빨리 감지할 수 있다 것을 의미한다.

최종파단수명에 따른 비로써 해석을 하면 A조건 경우는 약 84%, B조건 경우는 61%정도에서 감지가 가능하다. 타 연구보고에서와 같이 탐촉자의 주파수가 높을 수록 미시균열의 탐지가 쉽다는 결론을 내릴 수 있다. 감쇠의 평가에는 주로 에코의 높이비로서 평가하는데, 감쇠계수는 다음 식으로 구한다.

$$\alpha = \frac{20 \log \left(\frac{H_0}{H} \right)}{d} \quad (\text{dB/m}) \quad (1)$$

여기서 H_0 : $d = 0$ 에서 에코높이

H : 시험에서 측정된 에코높이

d : 탐촉자의 입사점 거리(=30mm)

윗 식에서 H_0 를 입사점의 거리가 0인 경우의 에코의 높이를 취하지만, 본 연구에서는 미시균열이 없는 초기상태에서 입사점의 거리가 30mm일 때의 에코높이를 취하였다. 식 (1)을 이용하여 파단수명비에 따른 감쇠계수를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서도, A조건은 약 84%, B조건은 약 61%에서 감쇠계수의 증가를 보였다. 이러한 결과에서 감쇠계수, 속도변화를 이용함으로써, 실구조물의 균열발생여부를 관찰하며, 수명예측을 통하여 유지 및 보수에 이용할 수 있다고 본다.

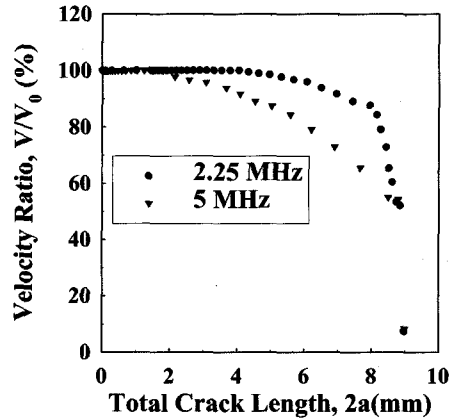


Fig. 10 Relationship between the velocity ratio and the crack length at 2.25 and 5MHz

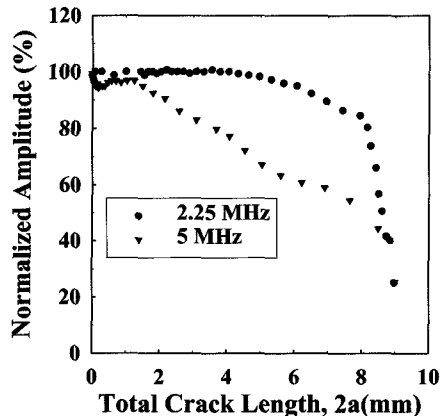


Fig. 11 Relationship between the Amplitude and the crack length

속도저하 및 감쇠를 측정함으로써, 실시간으로 미시균열의 발생과 성장에 대한 모니터링이 가능하다. 하지만, 균열크기에 따른 초음파의 특성 변화에 대한 좀더 명확한 정량적인 평가가 이루어져야한다.

임의의 cycle에 따른 균열크기를 Fig. 4에서 구한 근사식을 이용하여 추정하였다. 균열크기에 따른 표면파의 속도 및 감쇠를 Fig. 10, 11에 나타내었다.

Fig. 10에서 A조건에서는 4.3mm이상의 균열길이에서 속도의 변화를 탐지할 수 있었으며, 그 이상의 균열크기에서는 선형적인 감소를 보였으며, 8mm이상 균열크기에서는 급격한 감소를 보였다. B조건의 경우, 총 균열길이가 1.8mm가 되었을 때, 균열의 발생을 탐지할 수 있었으며, 균열길이의 증가에 따라 선형적으로 감소하다가, 8.5mm

이상에서 급격히 줄어들었다.

균열길이에 대한 예코의 감쇠를 Fig. 11에 나타내었다. A조건의 경우, 속도변화를 보인 시점인 4.3mm이상의 균열길이에서 감쇠를 탐지할 수 있었으며, 그 이상의 균열길이에서는 선형적으로 감소하였으며, 8mm이상에서는 급격한 감소를 보여 속도변화와 같은 양상을 보였다. B조건의 경우는, Fig. 10에 나타낸 속도의 변화와는 달리 균열길이가 1.5mm가 되었을 때, 균열의 발생을 탐지할 수 있었으며, 균열길이의 증가에 따라 선형적으로 감소하다가, 8.5mm이상에서 급격히 줄어들었다.

균열길이의 변화에 따른 속도 및 감쇠의 변화에서도, 속도의 변화 폭보다 예코의 감쇠 폭이 훨씬 민감하게 반응하였다. 하지만, 1.5mm 보다 작은 균열길이에서도 echo의 높이 변화는 크게 나타났다. 이러한 오편을 줄이기 위하여 다음과 같은 추정을 하였다.

속도와 감쇠는 균열길이의 증가에 따라 감소함을 보이므로, 서로 반비례한다고 할 수 있다. 따라서, 다음 식을 이용하여 초음파를 이용한 균열 탐지능을 높일 수 있다고 본다.

$$a \propto \frac{1}{\frac{V}{V_0} \times \frac{H}{H_0}} \quad (2)$$

이 식에서 V_0 , H_0 는 결함이 없을 경우, $d=30\text{mm}$ 에서 표면파 속도 및 예코높이 이다.

식 (2)를 이용하여 균열길이에 대한 표면파의 분해능(탐지능)을 Fig. 12에 나타내었다.

A조건의 경우 균열길이가 약 4.0~4.5mm사이에서 증가를 보이고 있으며, 8mm에서는 급격한 증가를 보인다. 하지만, B조건의 경우 균열길이가 1.3~1.8mm에서 A시편 보다는 빠른 증가를 보이며, 7mm정도에서는 급격한 증가를 보였다. 이것은 속도 및 감쇠에 대한 각각의 분석보다 좋은 결과를 보이고 있으므로 유용하게 이용될 수 있다.

분해능(탐지능)을 파단수명비에 대하여 보면 Fig. 13과 같다. A조건의 경우, 파단수명비 80~85%정도에서 균열이 탐지되며, B조건의 경우, 파단수명비 58~62%정도에서 균열을 탐지할 수 있다.

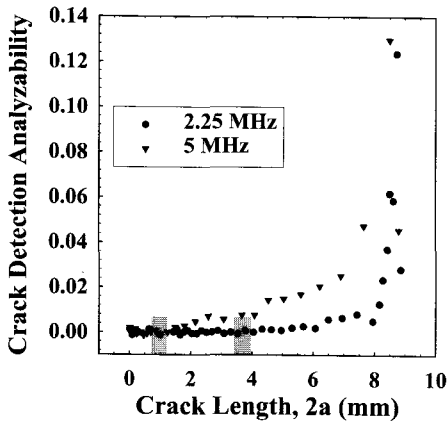


Fig. 12 Relationship between the analyzability and the crack length at 2.25 and 5MHz

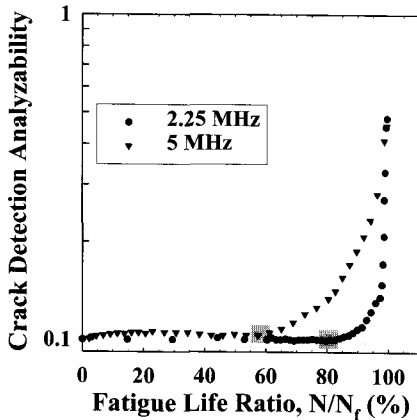


Fig. 13 Relationship between the analyzability and the fatigue life ratio

4. 결 론

2.25Cr-1Mo강을 이용한 피로미소균열의 발생 및 성장에 따른 초음파 특성에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 표면파를 이용하여 반복하중수 증가에 따른 속도와

감쇠의 변화로 미소균열의 발생 및 성장을 탐지할 수 있었다.

2. 2.25MHz 탐촉자를 이용한 경우 파단수명의 80~85% 정도에서 균열 발생을 탐지할 수 있었으며, 5MHz 탐촉자를 이용하여 파단수명의 58~62% 정도에서 미소균열의 발생을 탐지할 수 있었다. 주파수가 높을수록 탐지능이 뛰어나도록 확인할 수 있었으며, 표면파의 변화를 측정하여 균열길이를 정량적으로 평가할 수 있음을 확인하였다.

3. 속도비와 감쇠비의 곱을 이용하여 더욱 민감하고 정확한 균열길이의 변화를 관찰할 수 있었다.

4. 실구조물의 표면미시결합을 초음파분석으로 조기 진단하여 유지, 보수 및 수명예측의 기초적 자료로 이용함으로써 현장에서 전체적인 정비에 따르는 시간, 경비를 절약하는 것이 가능하다.

후 기

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 97년도 전력기술 기초연구(과제번호 97-061)의 지원과 BK21 지역대학육성사업 영남대학교 사업단의 일부지원을 받아 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] T. Ishibasi, T. Uryu, and T. Sato, "Fatigue Strength of Carbon Steel Bars with Round-Crack," *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 19, No. 87, pp. 34-37, (1953)
- [2] R. J. Wanhill, "Short Cracks in Aerospace Structures," *Proceeding of the Behaviour of Short Fatigue Crack*, Mechanical Engineering Publications, London, pp. 27-36, (1986)
- [3] A. S. Bring, *EPRI Conference on Boiler Tube Failure in Fossil Plants*, Atlanta, Nov. (1987)
- [4] 山下 ほか 3名, 非破壊検査, 第34卷, 第1號, pp. 125-135, (1985)
- [5] 伊達和傳, 島田平八, 伊東義壽, "超音波の表面波お利用したき裂進展のモニタリング法", 日本非破壊検査 第31卷, 第4號, pp. 247-252, (1982)
- [6] M. Hirao, K. Tojo and H. Fukuoka, "Small Fatigue Crack Behavior in 7075-T651 Aluminum as Monitored with Rayleigh Wave Reflection," *Metallurgical Trans.* Vol. 24A, pp. 1773-1783, (1993)
- [7] P. Kapur and M. T. Resch, "Improved Detectability of Fatigue Microcracks by Split Spectrum Processing of Backscattered Rayleigh Wave," *Nondestructive Evaluation*, Vol. 10A, pp.757-764, (1991)
- [8] R. E. Green, Jr., "Effect of Metallic Microstructure on Ultrasonic Attenuation," *Nondestructive Evaluation*, pp. 115-132, (1981)
- [9] D. J. Buchanan, J. Reji, and D. A. Stubbs, "Ultrasonic longitudinal and surface wave methods for in situ monitoring of damage in metal matrix and ceramic matrix composites," *ASTM STP 1318*, pp. 173-186, (1997)
- [10] T. B. Gur, C. H. Ankara and O. Alpay, "Investigation of fatigue and creep damage in steam boiler pipes by ultrasonic testing," *Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. 39, No. 9, pp. 626-629, (1997)
- [11] 정민화, 조용상, 이상국, 박익근, "초음파 비파괴 평가기법에 의한 재료의 열화·손상식별", 한국비파괴 검사학회, pp. 149-162, (1996)
- [12] 김호철, "UCAR를 이용한 재료표면 및 Subsurface의 검사 및 평가", 한국과학기술원, (1986)
- [13] Li-Shin Chang & Tung-Han Chuang,, "Ultrasonic Testing of Artificial Defects in Alumina Ceramic," *Ceramics International*, Vol. 23, pp. 367-373, (1997)
- [14] G. T. Fei, Z. G. Zhu, P. Cui,, "Ultrasonic attenuation study of defects in aluminium under the action of constant stress," *Journal of Material Science*. Vol. 31, pp. 2725-2728, (1996)
- [15] I. Mostafa, S. Hailu, G. Welsch, D. Hazony and G. R. Halford, "Detection and measurement of fatigue crack in HSLA steel with a dedicated ultrasonic transmission method," *International Journal of Fracture*. Vol. 85, pp. 99-109, (1997)
- [16] D. M. Suh and W. W. Kim,, "A New Ultrasonic Technique for Detection and Sizing of Small Cracks in Studes and Bolts," *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 14. No. 4, (1995)