

# SH(shear horizontal) 초음파를 이용한 압력용기용 재료의 피로손상에 측

## The Prediction of Fatigue Damage for Pressure Vessel Materials using Shear Horizontal Ultrasonic Wave

강용호<sup>1,✉</sup>, 정용근<sup>1</sup>, 송정일<sup>2</sup>  
Yong Ho Kang<sup>1,✉</sup>, Yong Keun Chung<sup>1</sup> and Jung Il Song<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 두산중공업 (Doosan Heavey Industries & Constructuon Co., Ltd.)

<sup>2</sup> 창원대학교 메카트로닉스공학부 기계공학전공 (Department of Mechanical Engineering, Changwon Univ.)

✉ Corresponding author: yongho.kang@doosan.com, Tel: 055-278-3693

Manuscript received: 2008.9.1 / Revised: 2008.12.3 / Accepted: 2009.1.28

*Ultrasonic method using SH(shear horizontal) wave has been developed to determine the surface damage in fatigued material. Fatigue damages based on propagation energy were analyzed by multi-regression analysis in interrupted fatigue test specimen including CrMoV and 12Cr alloy steel. From the test results, as the fatigue damage increased the propagation time of the launched waves increased and amplitude of wavelet decreased. Also, analysis for the waveform modulation showed a reliable estimation, with confidence limit of 97% for 12Cr steel and 95% for CrMoV steel, respectively. Therefore, It is thought that SH ultrasonic wave technique can be applied to determine fatigue damage of in-service component nondestructively.*

Key Words: Fatigue Damage (피로손상), SH Ultrasonic Wave (전단/수평 초음파), Multi-regression (다중회귀) Wavelet Analysis (파형분석), 12Cr Alloy Steel (12Cr 합금강), CrMoV Steel (CrMoV 합금강)

### 기호설명

- $\Phi$  = amplitude of received SH wave
- $\mu$  = Lamé Elastic Constants
- $k$  = wave number
- $\omega$  = angular frequency
- $A$  = amplitude of the disturbance
- $u_y, u_z$  = displacement of y and x axis
- $f$  = time function of launched wavelet
- $\beta$  = correlation coefficient of multi regression

### 1. 서론

피로에 의한 손상은 산업설비에서 가장 대표적인 손상으로 높은 응력이 부과되는 설비에서 광범위하게 발생한다. 이러한 재료내의 피로손상을 정확하게 평가하기 위하여 여러 기술들이 개발되고, 또한 현재까지 연구되고 있다. 그 중에서 재료내의 피로 손상을 비파괴적으로 평가하는 기술은 운전 중인 설비의 진단 및 수명평가에 유용하게 적용할 수 있기 때문에 현재까지 많은 기술들이 연구 중이다. 비파괴적으로 피로 손상을 평가하는 방법 중에는 초음파를 이용한 기술이 현장 적용이 가능하고, 비교적 신뢰성이 높은 기술로 평가 되고 있다. 다양한 종류의 초음파 중에서 특히 재료의 표면을 횡파의 속도로 전파 할 수 있고, 접촉면 반

사에서 유용한 특성을 가지고 있는 SH(shear horizontal) 초음파가 재료의 피로 손상을 예측하는데 적합한 도구로 평가 받고 있다.<sup>1</sup> 초음파를 이용하여 재료의 피로 손상을 평가하는 기술은 피로에 의한 재료의 미세조직 변화를 초음파의 전파 에너지 변화로 예측하는 것이다. 재질이 피로 손상을 받게 될 경우 대부분의 재료는 표면으로부터 피로 손상이 축적되고 손상 부위는 미세조직의 전위(dislocation)으로 인하여 초음파 전파 속도에 영향을 미치게 된다.<sup>1</sup> 따라서 표면파인 SH 초음파의 전파 속도 변화와 피로 손상과의 상호 관계를 분석하면 정량적인 피로 손상 평가가 가능하다.

본 연구에서는 SH 초음파 전파 이론의 분석을 통해 SH 초음파 평가 기술을 개발하였고, 12Cr 합금강 와 CrMoV 강을 대상으로 고주기 피로와 저주기 피로에 대한 중단피로 시험을 실시하여 피로 손상과 SH 초음파의 상관관계를 규명하였다.

**2. SH(Shear Wave) 초음파 전파 이론**

SH 초음파는 표면파에서 Y 축으로의 입자 움직임만을 허락하면 생성할 수 있다. 이를 식으로 표현하면 식(1)과 같다.

$$u_x = u_z = 0, u_y = A_2 e^{-\alpha z} \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

위 식에서  $k$  는 변위 전파비(propagation ratio)이며, 이때 발생하는 y-z 방향의 응력 성분은 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_{yz} = \mu \left( \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \quad (2)$$

위 식에서  $\mu$  는 Lamé 탄성 상수이고,  $u_y, u_z$  는 각각 y 방향과 z 방향의 변형량이다. 식(2)에서 알 수 있듯이, SH 초음파는 고체의 표면을 횡파의 속도로 전파 할 수 있고, 표면에 수직한 방향의 변형이 발생하지 않는다. 위와 같은 전파 특성을 지닌 SH 초음파는 반사된 파의 모드 변환과 위상의 이동이 발생하지 않고, 등방재질에서 뛰어난 전파 효율을 보여준다. Fig. 1 은 등방재질에서 SH 초음파의 전파 형상을 보여준다.

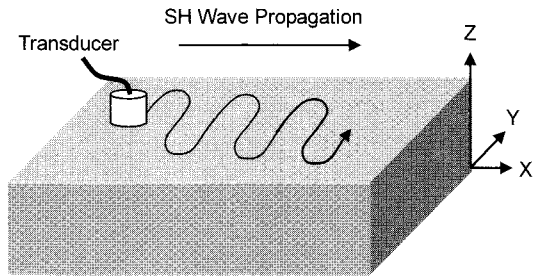


Fig. 1 The propagation shape of SH Wave

SH 초음파는 재료에 입사 될 때 통과하는 폴리메트리 메타크레이레이트 웨지(poly-methyl methacrylate wedge)에 의하여 회절되며, 입사각이 임계각도를 가질 때 자유표면의 한 파장(=0.55mm) 아래 사이를 전파할 수 있다고 연구되었다.<sup>2</sup> SH 초음파의 평균 전파 깊이는 2 차원의 파형 진행에 대한 회절 적분 방정식의 형태로 표현된다.

$$\Phi = \int \frac{\cos \theta_2 + \cos \theta_3}{2\sqrt{r_1 r_2}} f\left(t - \frac{r_1 + r_2}{c}\right) ds \quad (3)$$

위 식에서  $\Phi$  는 수신파의 진폭이고,  $t$  는 시간,  $c$  는 전파속도,  $f$  는 발사된 파장의 시간 함수 이다. 또한  $ds$  는 2 차 파동이 방출되는 면(intermediate)에서의 미소 면적이다. Fig. 2 와 같이  $r_1 = r_2$  이고  $\theta_2 = \theta_3$  조건을 만족하는 전파 모델을 가정하면 식 (3)은 식(4)와 같이 표시된다.<sup>2</sup>

$$\Phi = \int \frac{\cos \theta_2}{r_1} f\left(t - \frac{2r_1}{c}\right) ds \quad (4)$$

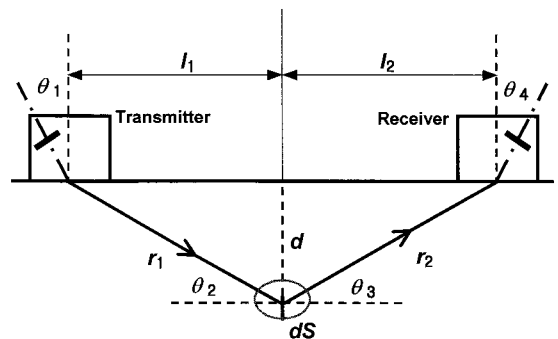


Fig. 2 Propagation model of SH wave

Fig. 2 에서 전파 깊이  $d = r_1 \sin \theta_2$  가 되기 때 문에, 식(4)로부터 전파 깊이가 증가할수록 진폭은 감소하고, 전파시간이 늘어나는 사실을 알 수 있다.<sup>3</sup>

### 3. 피로손상 평가 절차

주파수와 위상차는 재료의 특성 저하를 평가하 는데 민감한 변수이다.<sup>4</sup> 금속 재료에 발생하는 피 로 현상은 미세조직의 전위와 연관되어 있으며, 결정 입계 주변에 발생하는 소성 변형율의 국부적 축적에서 발생하는 것으로 예상된다. 따라서 피로 를 받은 강재의 미세조직은 결정 입자 사이에 단 계적인 방향변화(progressive disorientation)을 보여주 는 경향이 있다.<sup>1</sup> 이러한 미세조직의 변화는 초음 파 전파에 대한 수신 파형(wavelets)의 전파 시간 편차로 표현된다. 따라서 피로손상을 받은 재질을 통과해온 파형을 분석하면 재료의 피로 손상을 예 측할 수 있다.

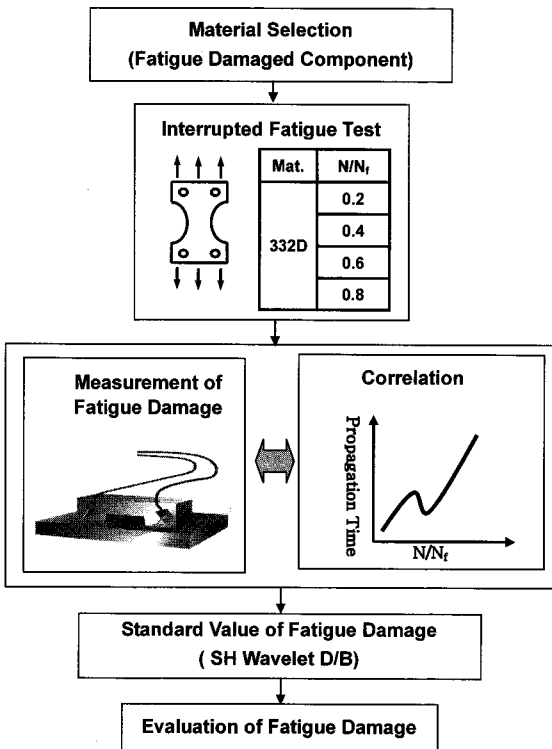
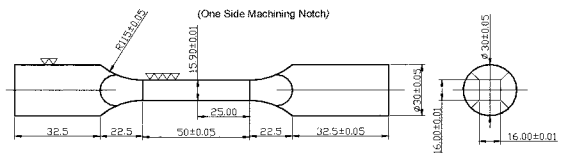


Fig. 3 The evaluation procedure for fatigue damage using SH ultrasonic wave

파형의 전파 특성 분석으로부터 피로 손상을 예측하기 위해서는 평가 대상 재질에 대한 피로 손상의 기준 값을 확보하여야 한다. 피로손상 기준 값은 재질에 대한 중단피로시험(interrupted fatigue test)를 실시하여 얻을 수 있다. 중단피로시험은 특정 재질에 대한 피로 시험을 수명 %별로 실시하는 것으로, 최초의 파단 시험을 통하여 재 질의 피로 수명을 확보하고 이 값으로부터 각 수 명에 해당하는 피로 시험 사이클을 계산한다. 중 단피로시험으로 확보된 표준 수명 시편을 이용하 여 피로 손상과 SH 초음파의 전파 특성과의 상관 관계를 도출하면 임의의 피로 손상을 받은 재질에 대한 피로 손상을 정량적으로 측정할 수 있게 된 다. SH 초음파를 이용한 운전중인 설비의 피로 손 상도 평가 과정을 요약하면 Fig. 3 과 같다.

### 4. 중단 피로시험(interrupted fatigue test)

중단피로시험의 시험 조건은 설비의 손상 특성 과 재료의 기계적 성질을 고려하여 설정하였다. 시험편은 CrMoV 와 12Cr 합금강 재료에 대하여 준비 하였으며, 각 재료에 대한 성분 분석 결과를 Table 1 에 제시하였다. 피로 시험은 재료시험기를 이용한 단축 인장 피로 시험을 실시하였으며, CrMoV 재료는 저주기 피로 시험을 12Cr 합금강 재료는 고주기 피로 시험을 실시하였다. 시험편은 초음파 탐상이 용이하고, 탐상부에 피로 손상이 집중되도록 사각바(bar) 형식으로 제작하였고, 시편 한쪽 면에 0.25mm x 0.25mm 의 기계가공 노치를 삽입하여 피로 균열이 일정한 방향으로 진전 하도 록 가공하였다.



Notch : Width & Depth = 0.25mm

Fig. 4 The specimen for interrupted fatigue test

Table 1 Chemical composition of test specimen

Mat.	Composition (%)						
	C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Mo
12Cr	0.14	0.38	0.64	0.023	0.49	11.45	0.09
CrMoV	0.21	0.05	0.27	0.004	3.69	0.85	0.4

사용한 재질은 각각 형강(plat bar)에서 채취하였으며, 각각의 재질에서 채취한 시편의 제조공정과 기계적 물성치는 동일하다. 재질의 미세조직은 12Cr 합금강의 경우 마르텐사이트 조직을 가지고 있으며, CrMoV 합금강은 베이나이트 조직을 가지고 있다. 각각의 재질은 증기터빈용 부품에 사용되는 재질로서, CrMoV 합금강의 경우 운전 중 저주기 피로 손상을 받고 있으며, 반면 12Cr 합금강의 경우 운전 중 고주기피로 손상을 받고 있다. 따라서, 시편에 피로 시험 역시 이를 고려하여 재질 별로 다른 시험을 실시하였다.

재질의 피로 수명은 피로 파단 시험으로 산출하였으며, 파단 시험 결과를 바탕으로 수명 단계에 해당하는 중단피로시험을  $N/N_f=0.25, 0.5, 0.75$ 에 대하여 수행하였다. 고주기 피로 시험의 경우 탄성 영역내에서 변형이 발생하도록 시험 조건을 설정하였으며 저주기 피로의 경우  $-0.5 \sim +0.5$ 의 총변형율범위(total strain range)에서 시험을 실시하였다. 고주기 피로 시험의 경우 시편이 완전히 파단 되었을 때를 파단 수명으로 설정 하였고, 저주기 피로 시험의 경우 시편에 균열이 발생하는 시점을 파단 수명 설정하였다. 고주기 피로 시험 결과와 저주기 피로 시험 결과를 Table 2와 Table 3, Fig. 5와 Fig. 6에 각각 표시하였다.

Table 2 Test results of high cycle fatigue(12Cr Alloy)

No	Area (mm <sup>2</sup> )	Stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Freq.	Cycle	Life (%)
1	16x15.75	35.15	15 Hz	18,783	25
2				18,783	25
1	16x15.75	35.15	15 Hz	37,567	50
2				37,567	50
1	16x15.75	35.15	15 Hz	56,351	75
2				56,351	75
1	16x15.75	35.15	15 Hz	76,537	100
2				73,734	100

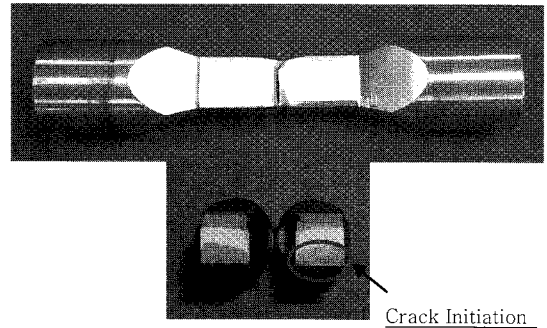


Fig. 5 The shape of fatigue failure(12Cr alloy)

Table 3 Test results of low cycle fatigue(CrMoV)

No	Area (mm <sup>2</sup> )	Total Strain		Freq.	Cycle	Life (%)
		Max.	Min.			
1	16x15.75	+0.5	-0.5	0.2 Hz	61	25
2					61	25
1	16x15.75	+0.5	-0.5	0.2 Hz	121	50
2					121	50
1	16x15.75	+0.5	-0.5	0.2 Hz	182	75
2					182	75
1	16x15.75	+0.5	-0.5	0.2 Hz	241	100
2					253	100
3					237	100

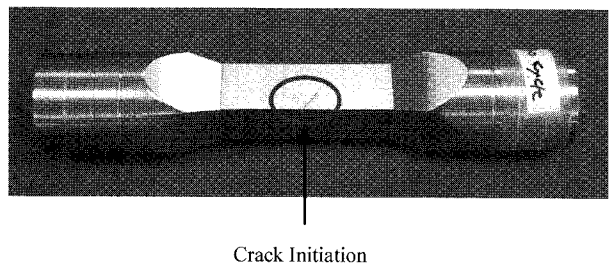


Fig. 6 The shape of fatigue failure(CrMoV)

## 5. SH 초음파 전파 특성 분석

### 5.1 SH 초음파 탐상 시스템

탐상 장비는 초음파 신호 발생기와 해석기(analyzer), 탐촉자로 구성되어 있다. 모든 장치는 컴퓨터에서 제어가 가능하며, 측정 및 분석 역시 컴퓨터에서 수행한다. 초음파 발생 장치는 펄스(pulse) 형태의 초음파를 발생하고 발생된 초음파는 송신탐촉자(transmitter) 탐촉자를 통하여 재질에 전파된다. 이때 트랜스미터에서 적절한 주파수와

입사각을 만들어 주면 SH 초음파가 만들어 진다. 본 실험에서 사용한 탐촉자의 입사각은 45° 이다. 이렇게 만들어진 SH 초음파는 효과적인 전파와 신호 분석을 위하여 일정한 거리로 유지되는 수신기(receiver)에 의하여 수신된다. 수신된 신호는 디지털/아날로그변환기 및 분석기를 통하여 컴퓨터에 표시된다. 탐상 장치의 개략도를 Fig. 7 에서 보여주고 있다. 탐상은 피로 손상이 집중된 노치 부위에서 수동으로 수행되었으며, 탐상 시 고정장치를 사용하여 접촉압력을 200kPa 로 일정하게 유지하였다. 결합제는 도시바 Tungaloy 사에서 개발한 L-type 결합제를 사용하였으며, 결합제의 특성을 고려하여 안정화 시간을 300 sec 로 적용하였다.

두 개의 상용 협대역(narrow-bandwidth) SH 초음파 탐촉자가 펄서(Pulser)와 수신기로 사용되었으며, 탐촉자의 면적은 5x5mm<sup>2</sup> 이다. SH 초음파는 탐촉자에 연결되어 있는 웨지(wedge)의 굴절에 의하여 생성되며, 고주파에 의한 전파 손실과 저주파에 의한 신호 광폭화를 방지하기 위하여 5.6MHz 의 주파수를 선택하였다.

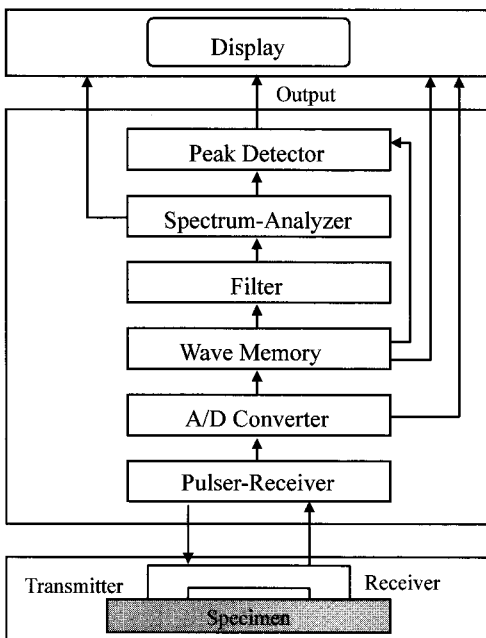


Fig. 7 Schematic diagram of test system

### 5.2 SH 초음파 신호분석

피로 손상에 따른 SH 초음파의 변화를 분석하기 위하여 중단피로시험으로 생성된 피로손상 시

험편과 피로손상이 발생하지 않은 시험편에서 측정된 SH 초음파 신호를 비교하였다. Fig. 8 에는 피로 손상도  $N/N_f=0$  과 0.75 에서 측정된 대표적인 파형이 보여진다. Fig. 8 에서 첫번째와 네번째의 파형은 피로 손상도 증가에 따라 상대적으로 진폭은 줄어들고 전파 시간은 길어진다. 이것은 SH 초음파가 탐촉자로부터 시편으로 입사될 때 피로손상의 증가에 따라 안쪽으로 곡선을 그리며 진행하기 때문에 발생한 것으로 추측된다. 따라서, 피로손상과 각각 파형이 독립적으로 연관되어 있기 때문에 각각의 파형을 평가하여야만, 피로손상과 전파 특성의 상관관계를 정확히 평가할 수 있다. 평가는 중단피로시험에서 얻어진 총 4 개의 피로수명 시험편에서 각각 파(wave)를 획득한 후 이를 진폭에 따라 분류하여 진폭이 큰 순서로 총 4 개의 파형을 선택하여 측정하였다.

피로손상 Fig. 8 의 결과처럼 각 파형이 피로 손상과 독립적인 상관관계를 보여줄 경우 두가지 방법을 적용하여 전파 특성을 평가할 수 있다. 첫번째는 다중회귀분석(multiple regression analysis) 방법으로, 2 개 이상의 독립 변수가 종속변수에 영향을 미칠 때 적용하는 기술로서, 각 Wavelet 의 전파 시간 편차를 선형적으로 연관하여 피로 손상을 예측한다.

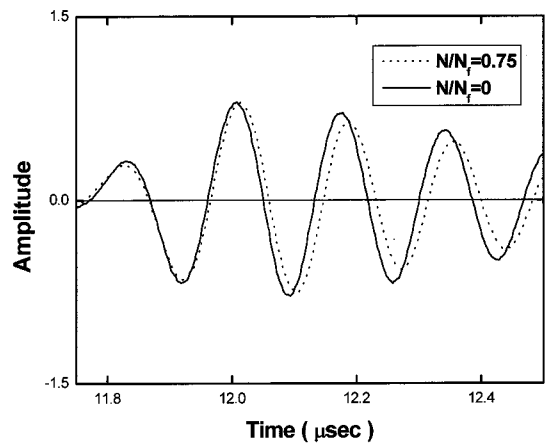


Fig. 8 Wavelet change corresponding fatigue damage

식(5)는 독립 변수가 총  $p$  개 존재할 경우 각각에 대한 정보는  $n$  개 존재할 경우의 선형 다중회귀 모형이다.

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{i1} + \dots + \beta_p \cdot x_{ip} + \epsilon_i \quad i = 1 \text{ to } n \quad (5)$$

식(5)에서 회귀 분석을 통하여 얻고자 하는 값은  $Y_i$  로서 이 값을 예측하기 위해서는 상관계수  $\beta$  를 산출하여야 한다. 다중회귀분석을 피로 손상도 평가에 적용할 경우 각각의 파형 도달 시간은  $x_i$  가 되고 예측된 피로 손상은  $Y_i$  가 된다. 식(5)에서 알 수 있듯이 상관계수를 산출하기 위해서는 독립변수  $x$  에 대한 정수  $n$  은 상관계수의 총 개수인  $p$  보다 커야만 한다. 따라서 실제 측정에서도 상관 상수를 도출하기 위하여 측정되는 파형의 수와 피로손상도 단계 등이 적절히 결정 되어야 한다. 본 실험에서는 예측 변수  $(N/N_f)_i$  가 파형의 전파 시간  $x_i$  각각에 선형적으로 연관되었다는 가정하에 모델을 채택하였다. 채택한 회귀모델은 다음과 같이 각각의 파형에 대하여 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_i \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{18} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ i & x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{i8} \end{bmatrix} \text{ and } \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \vdots \\ \beta_8 \end{bmatrix} \quad (6)$$

측정된 SH 초음파에서 총 4 개의 파형을 선택하였으며, 측정 위치는 각 파형의 봉우리(peak)와 계곡(valley)이다. 측정 위치의 정의는 Fig. 9 와 같다.

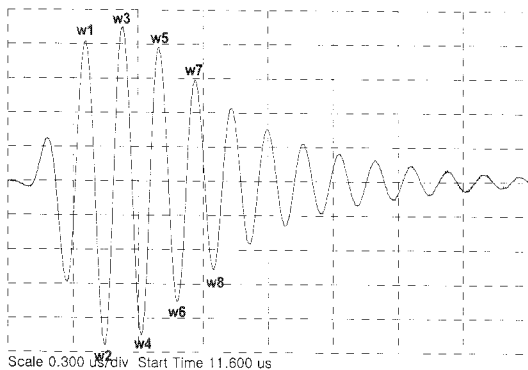


Fig. 9 Measurement point of received wave

### 6. 피로손상도 평가 결과

중단피로시험에서 0%, 25%, 50%, 75% 수명 단계의 시험편 각각 2 개에 대하여 SH 초음파 전파를 측정하였다. 측정된 신호는 다중회귀분석을 통하여 재질의 피로수명과 SH 초음파 전파특성과의 상관관계를 분석하였다. 먼저 고주기피로 손상과

SH 초음파 전파 특성과의 상관 관계를 분석한 결과 실험으로 얻어진 피로수명과 SH 초음파로 예측한 피로수명이 약 97.35%의 신뢰도를 가지는 것으로 평가 되었다. Table 4 에는 12Cr 합금강의 고주기피로에 대한 다중회귀분석 결과를 제시하였으며, Fig. 10 에는 피로수명 상관관계 분석 결과를 제시하였다.

Table 4 The results of multi-regression analysis for high cycle fatigue(12Cr Alloy)

Material	Method	Correlation Coefficient	
		$\beta_0$	876120
12Cr Alloy	8 Wavelet Multi-Regression (Liner Model) $y=\beta x$	$\beta_1$	-187550
		$\beta_2$	-13155
		$\beta_3$	-874440
		$\beta_4$	709640
		$\beta_5$	-302890
		$\beta_6$	643740
		$\beta_7$	908800
		$\beta_8$	-831220

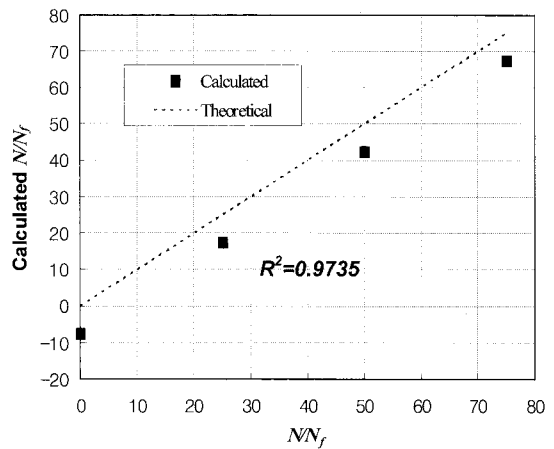


Fig. 10 Correlation between measured and calculated fatigue damage(HCF, 12Cr alloy)

저주기 피로 손상과 SH 초음파 전파 특성과의 상관관계를 분석한 결과 실험으로 얻어진 피로수명과 SH 초음파로 예측한 피로수명이 약 87.03%의 신뢰도를 가지는 것으로 평가되었다. Table 5 에는 CrMoV 강 of 저주기피로에 대한 다중회귀분석 결과를 제시하였으며, Fig. 11 에는 피로수명 상관관계 분석 결과를 제시하였다. 평가 결과 고주기피

로의 상관관계가 저주기피로 보다 신뢰도가 높은 것으로 나타났다. 이는 고주기피로가 탄성영역 내에서 미세조직의 전위손상을 유발하는 반면 저주기피로는 소성 영역에서 변형율에너지 변화가 주된 손상이기 때문에 고주기 피로가 SH 초음파에 보다 민감하게 영향을 받기 때문에 얻어진 결과로 추정된다.

Table 5 The results of multi-regression analysis for low cycle fatigue(CrMoV Steel)

Material	Method	Correlation Coefficient	
CrMoV Steel	8 Wavelet Multi-Regression (Liner Model $y=\beta x$ )	$\beta_0$	-64.1855
		$\beta_1$	62.4339
		$\beta_2$	-77.7724
		$\beta_3$	93.8636
		$\beta_4$	40.7496
		$\beta_5$	79.4305
		$\beta_6$	27.6269
		$\beta_7$	37.7207
		$\beta_8$	-199.0146

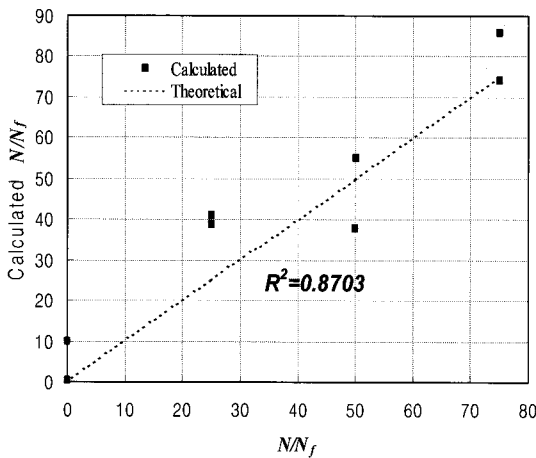


Fig. 11 Correlation between measured and calculated fatigue damage(LCF, CrMoV steel)

### 7. 결론

SH 초음파를 이용한 비파괴적 피로손상평가 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 중단피로시험을 통하여 재료의 피로 손상을 표준화 할 수 있고, 표준화된 피로 손상과 SH 파와의 상관관계는 다중회귀 분석을 통하여 정량

화 할 수 있다.

(2) SH 초음파를 이용한 피로 손상 평가 결과 고주기 피로를 받은 12Cr 합금강 강 경우 약 97.35%의 평가 신뢰도를 얻었고, 저주기 피로를 받은 CrMoV 강 경우 약 87%의 평가 신뢰도를 얻었다.

(3) 이상의 연구 결과로부터 재료의 표면을 횡파의 속도로 전파하고, 표면에 수직인 방향의 변형이 발생하지 않는 SH 초음파가 재료의 피로손상을 정량적으로 평가할 수 있는 유용한 도구로 사료된다.

### 참고문헌

1. Fukuhara, M., Kuwano, Y. and Saito, K., "Performance of non-destructive evaluation by diffracted SH ultrasonic waves in predicting degree of fatigue in cyclic bending of ferritic steel," NDT&E International, Vol. 31, pp. 211-216, 1998.
2. Fukuhara, M. and Kuwano, Y., "Propagation characteristics of SH ultrasonic waves through the surface depth of an isotropic medium," NDT&E International, Vol. 31, pp. 201-210, 1998.
3. Kino, G. S. and Stanke, E., "A unified theory for elastic wave propagation in polycrystalline materials," J. Acoust. Soc. Am., Vol. 75, No. 3, pp. 665-681, 1984.
4. Shyne, J. C., Grayeli, N. and Kino, G. S., "Acoustic properties as microstructure dependent materials properties," Nondestructive Evaluation: Microstructural Characterization and Reliability Strategies, p. 133, 1981.