

# 압력용기 고온 고압부의 피로손상 예측을 위한 SH 초음파 평가 기법 개발

강용호<sup>†</sup> · 정용근\* · 박종진\* · 박익민\*\*

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

Yong Ho Kang<sup>†</sup>, Yong Keun Chung\*, Jong Jin Park\*, Ik Min Park\*\*

**Key Words :** Fatigue(피로), SH Ultrasonic Wave(전단/수평 초음파), Multi-Regression(다중회귀)

### Abstract

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 and phase measurement 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.

### 1. 서 론

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 운전중인 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. 다

양한 종류의 초음파 중에서 특히 재료의 표면을 횡파의 속도로 전파 할 수 있고, 접촉면 반사에서 유용한 특성을 가지고 있는 SH(shear horizontal) Wave 가 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 Dislocation 으로 인하여 초음파 전파 속도에 영향을 미치게 된다<sup>(1)</sup>. 따라서 SH Wave 의 전파 속도 변화와 피로 손상과의 상호 관계를 분석하면 정량적인 피로 손상 평가가 가능하다.

본 연구에서는 SH Wave 전파 이론의 분석을 통해 SH Wave 평가 기술을 개발하였고, CrMoV 와 12Cr Alloy Steel 을 대상으로 고주기 피로와 저주기 피로에 대한 Interrupted Fatigue Test 를 실시하여 피로 손상과 SH Wave 의 상관관계를 규명 하였다.

<sup>†</sup> 두산중공업(주) 기술연구원

E-mail : gohkang@doosanheavy.com

TEL : (055)278-3693 FAX : (055)278-8593

\* 두산중공업(주) 기술연구원

\*\* 부산대학교 금속공학과

## 2. SH Wave 전파 이론

Shear Horizontal(SH) Wave 는 표면파에서 Y 축으로의 입자 움직임 만을 허락하면 생성할 수 있다. 이를 식으로 표현하면 식(1)과 같다.

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

이때 발생하는 y-z 방향의 응력 성분은 다음과 같이 표현 된다.

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

위식에서  $\mu$ 는 Lamé Elastic Constants 이고,  $u_y, u_z$ 는 각각 y 방향과 z 방향의 변형량이다. 식(2)에서 알 수 있듯이, SH Wave 는 고체의 표면을 횡파의 속도로 전파 할 수 있고, 표면에 수직인 방향의 변형이 발생하지 않는다. 위와 같은 전파 특성을 지닌 SH Wave 는 반사된 파의 모드 변환과 위상의 Shift 가 발생하지 않고, 등방 재질에서 뛰어난 전파 효율을 보여준다. Fig.1 은 등방재질에서 SH Wave 의 전파 형상을 보여준다.

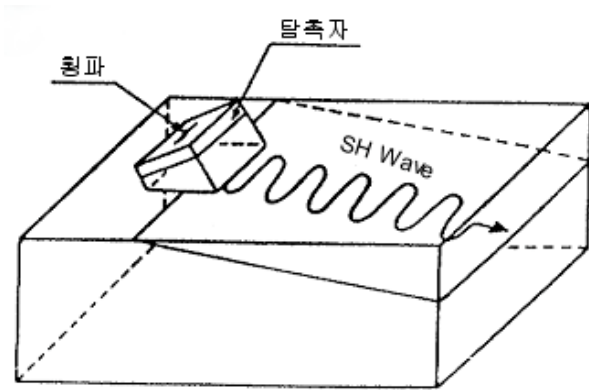


Fig.1 SH Wave 전파 형상

SH Wave 는 재료에 입사 될때 통과하는 Polymethyl Methacrylate Wedge 에 의하여 회절되며, 입사각이 Critical Angle 을 가질 때 자유표면의 한 파장(=0.55mm) 아래 사이를 전파할 수 있다고 연구 되었다<sup>(2)</sup>. SH Wave 의 평균 전파 깊이는 2 차원의 Pulse Wave 진행에 대한 회절 적분 방정식의 형태로 표현 된다

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

위 식에서  $\Phi$  는 Receiving Wave 의 진폭이고,  $t$  는 시간,  $f$  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.

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

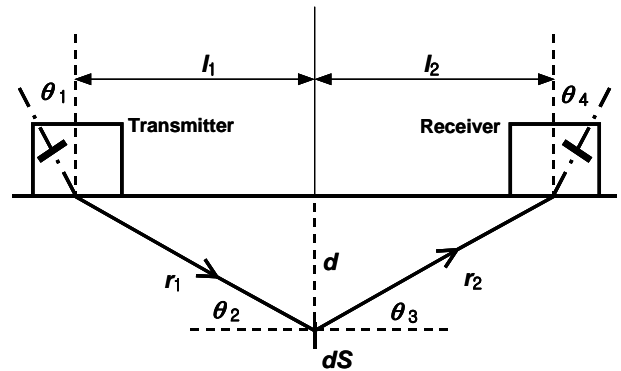


Fig.2 SH Wave 전파 모델

Fig.2 에서 전파 깊이  $d = r_1 \sin \theta_2$  가 되기 때문에, 식(4)로부터 전파 깊이가 증가할수록 진폭은 감소하고, 파장이 늘어난다는 사실을 알 수 있다.

## 3. 피로손상 평가절차

주파수와 위상차는 재료의 저하를 평가하는데 민감한 변수이다. 금속 재질에 발생하는 피로 현상은 미세조직의 전위(dislocation)와 연관된 결정 입계 주변의 소성 변형율의 국부적 축적에서 발생하는 것으로 예상된다. 따라서 피로를 받은 강재의 미세조직은 결정 입자 사이에 Progressive Disorientation 을 보여주는 경향이 있다<sup>(1)</sup>. 이러한 미세조직의 변화는 초음파 전파에 대한 Receiving Wavelets 의 전파 시간 편차로 표현된다. 따라서 수신된 Wavelet 분석하면 재료의 피로 손상을 예측할 수 있다.

Wavelet 의 전파 특성 분석으로부터 피로 손상을 예측하기 위해서는 평가 대상 재료에 대한 피로 손상의 기준 값을 확보하여야 한다. 피로손상 기준 값은 재료에 대한 Interrupted Fatigue Test 를 실시하여 얻을 수 있다. Interrupted Fatigue Test 는 특정 재료에 대한 피로 시험을 수명 %별로 실시하는 것으로, 최초의 파단 시험을 통하여 재료의 피로 수명을 확보하고 이 값으로부터 각 수명에

해당하는 피로 시험 Cycle 을 계산한다. Interrupted Fatigue Test 로 확보된 표준 수명 시편을 이용하여 피로 손상과 SH 의 전파 특성과의 상관관계를 도출하면 운전 중인 설비의 피로 손상을 측정할 수 있게 된다. SH Wave 를 이용한 운전 중인 설비의 피로 손상도 평가 과정을 요약하면 Fig.3 과 같다.

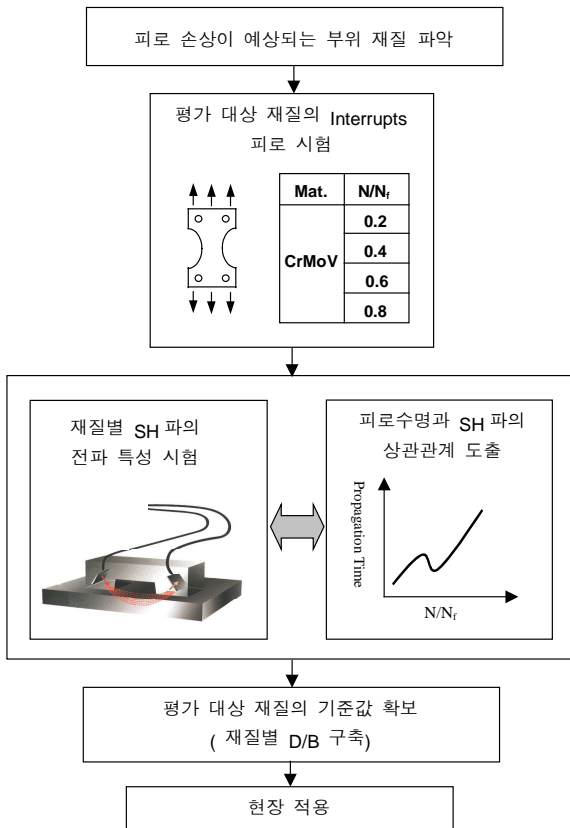


Fig. 3 SH Wave 를 이용한 피로손상 평가 절차

#### 4. Interrupted Fatigue Test

Interrupted Fatigue Test 의 시험 조건은 설비의 손상 특성과 재질의 기계적 성질을 고려하여 설정하였다. 시험편은 CrMoV 와 12Cr Alloy 재질에 대하여 준비 하였으며, 각 재질에 대한 성분 분석 결과를 Table 1 에 제시 하였다. 피로 시험은 Fig.4 과 같이 MTS 재료시험기를 이용한 단축 인장 피로 시험을 실시하였으며, CrMoV 재질은 저주기 피로 시험을 12Cr Alloy 재질은 고주기 피로 시험을 실시하였다. 시험편은 초음파 탐상이 용이하고, 탐상부에 피로 손상이 집중 되도록 사각바(bar) 형식으로 제작하였고, 시편 한쪽 면에 0.25mm x 0.25mm 의 기계가공 노치를 삽입하여 피로 균열이 일정한 방향으로 진전 하도록 가공 하였다.

Table 1 피로 시험편 성분분석 결과

재질	성분(%)							
	C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Mo	V
12Cr	0.14	0.38	0.64	0.023	0.49	11.45	0.09	0.03
CrMoV	0.21	0.05	0.27	0.004	3.69	0.85	0.4	0.12



Fig.4 단축인장 피로 시험 과정

각 재질의 피로 수명은 피로 파단 시험으로 산출 하였으며, 파단 시험 결과를 바탕으로 수명 단계에 해당하는 Interrupted Fatigue Test 를  $N/N_r=0.25, 0.5, 0.75$  에 대하여 수행 하였다. 고주기 피로 시험의 경우 탄성 영역내에서 변형이 발생하도록 시험 조건을 설정하였으며 저주기 피로의 경우  $-0.5 \sim +0.5$  의 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 2 와 Table3, Fig.5 와 Fig.6 에 각각 표시하였다.

Table 2 고주기 피로 시험 결과 (12Cr Alloy)

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

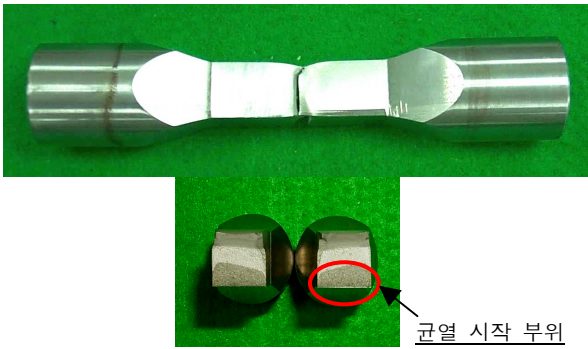


Fig.5 고주기 피로에 의한 파단

Table 3 저주기 피로 시험 결과 (CrMoV 강)

No	단면적	Total Strain		응력 주기	중단 Cycle	수명%
		Max.	Min.			
1	16x15.75 mm <sup>2</sup>	+0.5	-0.5	0.2 Hz	61	25
2						
1	16x15.75 mm <sup>2</sup>	+0.5	-0.5	0.2 Hz	121	50
2						
1	16x15.75 mm <sup>2</sup>	+0.5	-0.5	0.2 Hz	182	75
2						
1	16x15.75 mm <sup>2</sup>	+0.5	-0.5	0.2 Hz	241	100
2						
3						

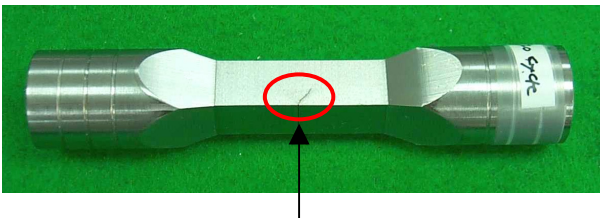


Fig.6 저주기 피로에 의한 파단

## 5. SH Wave 전파 특성 분석

### 5.1 SH Wave 탐상 장비

탐상 장비는 초음파 신호 발생기와 Analyzer, 탐촉자로 구성되어 있다. 모든 장치는 컴퓨터에서 제어가 가능하며, 측정 및 분석 역시 컴퓨터에서 수행한다. 초음파 발생 장치는 Pulse Type의 초음파를 발생하고 발생된 초음파는 Transmitter 탐촉자를 통하여 재질에 전파 된다. 이때 Transmitter에서 적절한 주파수와 입사각을 만들어 주면 SH Wave가 만들어 진다. 이렇게 만들어진 SH Wave는 효과적인 전파와 신호 분석을 위하여 일정한

거리로 유지되는 Receiver에 의하여 수신된다. 수신된 신호는 A/D Converter 및 Analyzer를 통하여 컴퓨터에 표시된다. 탐상 장치의 개략도를 Fig.7에서 보여주고 있다.

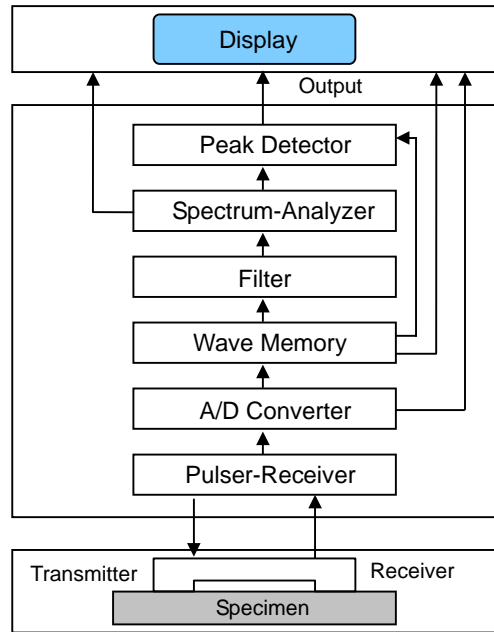


Fig.7 SH Wave 탐상장치

탐상은 피로 손상이 집중된 노치 부위에서 수동으로 수행되었으며, 탐상시 고정장치를 사용하여 접촉압력을 일정하게 유지하였다. 두개의 상용 Narrow-Bandwidth SH Wave 탐촉자가 Pulser와 Receiver로 사용되었으며, 탐촉자의 면적은 5x5 mm<sup>2</sup>이다. SH Wave는 PZT 탐촉자에 연결되어 있는 Polymethyl Methacrylate Wedge의 굴절에 의하여 생성되며, 고주파에 의한 전파 손실과 저주파에 의한 신호 광폭화를 방지하기 위하여 5.6MHz의 주파수를 선택하였다.

### 5.2 SH Wave 신호분석 기술

피로 손상에 따른 SH Wave의 변화를 분석하기 위하여 Interrupted Fatigue Test로 생성된 피로손상 시험편과 피로손상이 발생하지 않은 시험편에서 측정된 SH Wave Signal을 비교하였다. Fig.8에는 피로 손상도  $N/N_f=0$ 과 0.75에서 측정된 대표적인 Waveform이 보여진다. Fig.8에서 첫번째와 네번째의 Wavelet은 피로 손상도 증가에 따라 상대적으로 진폭은 줄어들고 전파 시간은 길어진다. 이것은 SH Wave가 탐촉자로부터 시편으로 입사될 때 피로손상의 증가에 따라 안쪽으로 곡선을 그리며 진행하기 때문에 발생한 것으로 추측된다.

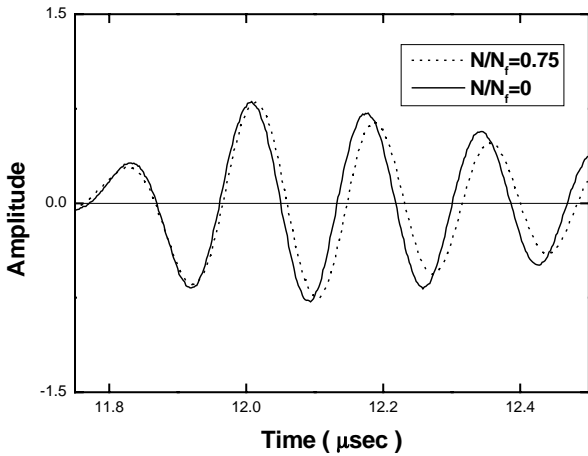


Fig.8 피로손상도에 따른 Wavelet 변화

Fig.8의 결과처럼 각 Wavelet이 피로 손상과 독립적인 상관관계를 보여줄 경우 두가지 방법을 적용하여 전파 특성을 평가할 수 있다. 첫번째는 다중회귀분석(multiple regression analysis) 방법으로, 2개 이상의 독립 변수가 종속변수에 영향을 미칠 때 적용하는 기술로서, 각 Wavelet의 전파 시간 편차를 선형적으로 연관하여 피로 손상을 예측한다. 피로 손상평가에서 다중회귀분석 기술의 적용 절차를 Fig.9에 제시하였다. 두번째 분석 방법은 Phase Measurement Method로서, 전파 에너지의 변화를 상대적으로 측정할 수 있기 때문에 Wavelet의 독립적인 변화와 상관없이 피로 손상을 평가할 수 있다.

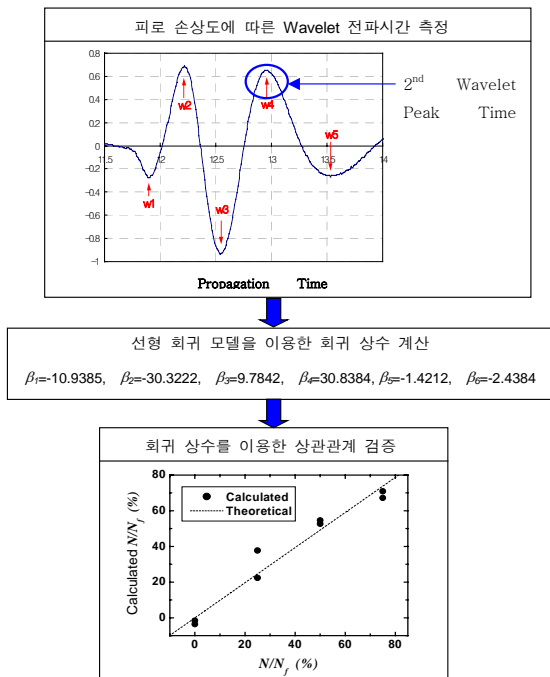


Fig.9 다중회귀분석 적용 절차

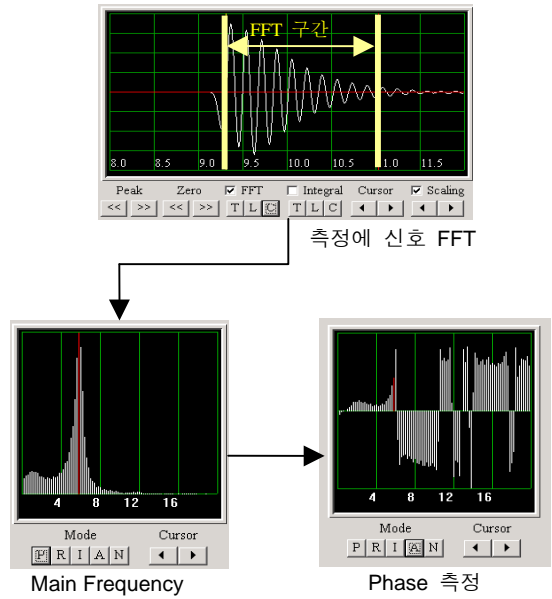


Fig.10 측정신호의 Phase 측정 절차

Phase Measurement Method는 측정된 Signal을 FFT(Fast Fourier Transformation)하여 Main Frequency의 Phase 변화를 측정하는 기술로서 다중회귀분석 기술과 동일하게 재질의 피로 손상을 정량적으로 평가할 수 있다. Phase 측정 절차를 Fig.10에서 보여주고 있다.

## 6. 피로손상도 평가 결과

Interrupted Fatigue Test에서 제작된 0%, 25%, 50%, 75% 수명 단계의 시험편 각각 2개에 대하여 SH Wave를 측정하였다. 측정된 신호는 다중회귀분석과 Phase Measurement 기술을 적용하여 평가하였다. 평가 결과 고주기 피로 손상의 경우 다중회귀분석으로 상관관계 도출이 가능하였고, 저주기 피로의 경우 다중회귀분석 보다 Phase Measurement 평가에서 보다 정밀한 상관관계를 도출할 수 있었다.

고주기 피로 손상과 SH Wave의 전파 특성과의 상관 관계를 분석한 결과 Fig.11과 같은 결과를 얻었으며, 평가의 신뢰도는 97.35%이었다. 측정 결과 2개의 시험편에서 거의 동일한 결과를 얻었기 때문에 Fig.11의 데이터는 1개의 점으로 표시된다. 저주기 피로 손상의 경우 분석 결과를 Fig.12와 Fig.13에 나타내었다. Fig.12의 경우 다중회귀분석 기술을 적용하였으며, 평가 신뢰도는 87.03%이었다. 반면 Fig.13의 경우 동일한 저주기 피로 손상을 Phase Measurement 기술로 평가한 결과로서, 평가 신뢰도는 95.2%이다. 이 값은 다중회귀분석의 신뢰도 87.03%에 비하여 높은 값으로,



저주기 피로 손상의 경우 Phase Measurement 기술을 적용할 경우 보다 정밀한 평가가 가능할 것으로 판단된다.

고주기 피로의 경우 탄성영역 내에서 작용하는 반복 하중으로 인한 미세조직의 Dislocation 이 주된 손상 원인인 반면, 저주기 피로의 경우 소성 영역에서 Strain Energy 변화가 주된 손상 원인이 된다. 따라서 이러한 손상기구의 차이가 평가 결과에 영향을 미친 것으로 사료된다.

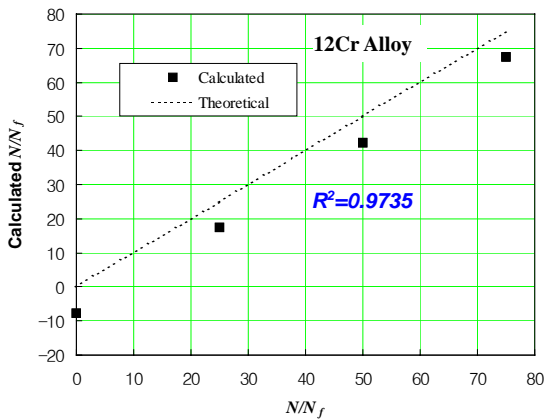


Fig.10 고주기피로 손상의 다중회귀분석 결과

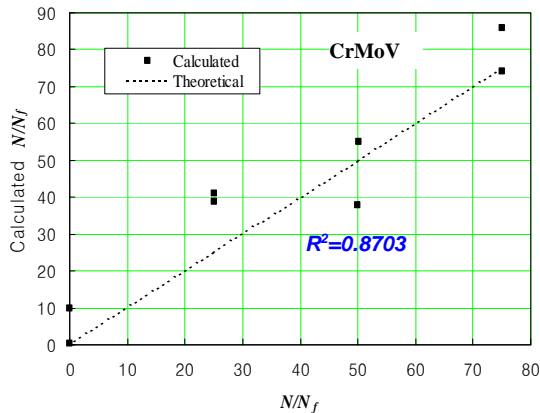


Fig.11 저주기 피로 손상의 다중회귀분석 결과

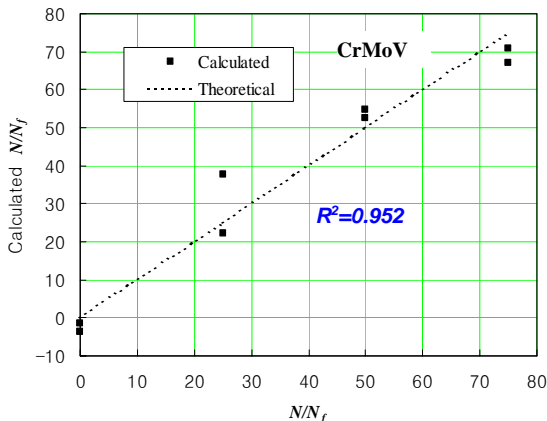


Fig.12 저주기 피로 손상의 Phase 분석 결과

## 7. 결론

SH Wave 를 이용한 비파괴 피로손상평가 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 재료의 표면을 횡파의 속도로 전파하고, 표면에 수직인 방향의 변형이 발생하지 않는 SH Wave 가 재료의 피로손상을 평가할 수 있는 도구로 사료된다.
- (2) 피로 손상 증가에 따른 SH Wave 의 변화는 다중회귀분석과 Phase Measurement 로 측정이 가능하며, 저주기 피로 손상의 경우 Phase 평가에서 보다 좋은 신뢰도를 얻을 수 있었다.
- (3) 12Cr Alloy Steel 의 고주기 피로 손상에 대한 다중회귀분석 결과 97.35%의 평가 신뢰도를 얻었고, CrMoV Steel 의 저주기 피로 손상에 대한 Phase 분석 결과 95.2%의 평가 신뢰도를 얻었다.

## 참고문헌

- (1) Mikio Fukuhara, Yoshiyuki Kuwano, Kiyoshi Saito, 1998, "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.
- (2) Mikio Fukuhara, Yoshiyuki Kuwano, 1998 "Propagation characteristics of SH ultrasonic waves through the surface depth of an isotropic medium", NDT&E International, Vol. 31, pp 201-210.
- (3) G. S. Kino, E. Stanke, 1984, "A unified theory for elastic wave propagation in polycrystalline materials," J. Acoust. Soc. Am., 75, 3.
- (4) J. C. Shyne, N. Grayeli, G. S. Kino, 1981, "Acoustic properties as microstructure dependent materials properties," The Met. Soc. of Am., p. 133.