

열화된 SUS 316강의 시간-주파수 해석에 의한 비파괴평가 Nondestructive Evaluation by Joint Time-Frequency Analysis of Degraded SUS 316 Steel

이건찬*, 오정환**, 남기우***, 이주석****

Kun-Chan Lee*, Jeong-Hwan Oh**, Ki-Woo Nam*** and Joo-Suk Lee****

초 록 지금까지 푸리에 변환이 신호 처리법으로 가장 널리 사용되고 있다. 그러나, 이 방법은 신호의 주파수 성분이 시간에 대하여 어떻게 변화하는지를 표현하지 못한다. 따라서, 최근 이와같이 비정상신호를 표현하지 못하는 푸리에 변환의 단점을 보완하여, 신호의 시간과 주파수에 대한 정보를 동시에 표현할 수 있는 시간-주파수 해석법들이 개발되기 시작하였다. 본 연구에서는 인공열화된 SUS 316강의 초음파 신호를 시간-주파수 해석법으로 분석하였다. 특히, 단시간 푸리에 변환법과 위그너 빌 분포법을 이용하여 초음파 신호의 주파수 성분과 특성을 분석하였다.

주요용어 : 초음파, 시간-주파수 해석법, 단시간 푸리에 변환법, 위그너 빌 분포

Abstract Fourier transform has been one of the most commonly used tools in study of frequency characteristics of signal. However, based on the Fourier transform, it is hard to tell whether a signal's frequency contents evolve in time or not. Recently, to overcome Fourier transform fault, not to represent non-stationary signal, time-frequency analysis methods are developed and those can represent informations of signal's time and frequency at the same time. In this study, we analysed ultrasonic signal for degraded SUS 316 with time-frequency analysis method. In particular, the methods such as short time Fourier(STFT) and Wigner-Ville distribution(WVD) were used to extract frequency contents and characteristics from ultrasonic signals.

Keywords: ultrasonic wave, joint time-frequency analysis method, short time Fourier transform(STFT), Wigner-Ville distribution(WVD)

1. 서 론

신호 처리 방법에 있어서 고전적인 푸리에 변환 방식이 가장 일반적으로 널리 사용되고 있다. 그러나, 일반적인 신호의 주파수 성분들은 시간에 대하여 변화하는 시간함수이기 때문에, 고전적 푸리에 변환에서는 시간 영역과 주파수 영역의 신호를 동시에 해석할 수 없다.

따라서 최근 고전적인 푸리에 변환이 가지는 단점을 보완하여, 신호가 가지는 시간 영역과 주파수 영역의 정보를 시간과 주파수의 2차원 평면상에 동시에 표현할

수 있는 시간-주파수 해석법이 이용되고 있다. 레이더 신호, X선 회절, 수중 음파탐지, 음성 신호처리, 영상 처리 등 여러 신호 처리 분야에서 시간-주파수 해석법이 적용되고 있다. 이와 같은 시간-주파수 표현은 푸리에 변환과 같은 선형표현과 에너지 분포로 정의되는 2차 표현인 파워 스펙트럼으로 분류할 수 있다. 선형표현은 단시간 푸리에 변환(short time Fourier transform), Gabor expansion, wavelet 등이 있으며, 에너지의 개념으로 사용되는 2차 표현은 위그너 빌 분포(Wigner-Ville distribution : WVD)와

Choi-Williams distribution (CWD) 등이 있다.

최근 몇년 사이에 비파괴 평가에서 시간-주파수 해석법을 이용한 연구가 여러 연구자들에 의해 연구된 적이 있다[2-13]. 그러나, 아직 이론적인 접근에만 국한되어 있을 뿐, 초음파 신호에 대한 실제 적용이 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 신호 해석 분야에서 최근 주목 받고 있는 시간-주파수 해석법중에서 단시간 푸리에 변환법과 위그너-빌 분포법을 이용하여 인공열화된 SUS 316강의 초음파 특성을 분석하고, 비파괴평가 기법으로서의 시간-주파수 해석법의 적용 가능성을 검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 단시간 푸리에 변환법

단시간 푸리에 변환법(short time Fourier transform : STFT)은 푸리에 변환이 시간변화에 대하여 주파수 표현을 하지 못하는 단점을 보완하여, 짧은 시간 단위로 신호를 분리하고 푸리에 변환을 하는 방법이다. 즉, 시간과 주파수 영역에서 동시에 존재하는 창 함수(window function)를 이용하여 각 시간에서의 주파수를 구하는 방법으로 식 (1)과 (2)같이 표현된다[3].

$$STFT(t, \omega) = \int s(\tau) \gamma_{\omega}^*(\tau) d\tau = \int s(\tau) \gamma(\tau-t) e^{-j\omega(\tau-t)} d\tau \dots\dots\dots (1)$$

$$FS(t, \omega) = |STFT(t, \omega)|^2 \dots\dots\dots (2)$$

식 (1)은 일반적인 내적(inner product)을 이용한 표현으로서, signal $s(t)$ 와 기본 함수(elementary function) $\gamma(\tau-t)e^{j\omega(\tau-t)}$ 사이의 유사성을 나타낸다. 식 (2)는 STFT spectrogram으로 시간-주파수 평면상에 주파수 성분의 에너지 분포를 나타내는 것으로서, STFT의 자승으로 표현된다. 창 함수의 크기에 따라 시간 또는 주파수 분해능이 달라지게 되는데, 시간 영역의 분해능을 높이기 위해서는 주파수 분해능이 떨어지게 되고, 주파수 분해능을 높이기 위해서는 시간 영역의 분해능이 떨어지는 창 효과(window effect)가 발생하는 단점을 가지고 있다.

2.2. 위그너-빌 분포법

위그너-빌 분포(Wigner-Ville distribution: WVD)는 1932년 양자 역학을 연구하던 미국의 물리학자 Eugene P. Wigner에 의하여 제안되었으며, 비정상 신호에 대한 확장된 순간적인 파워 스펙트럼이라고 말할 수 있다. 위그너-빌 분포는 신호 $s(t)$ 에 대한 시간 의존 자기상관 함수의 푸리에 변환으로 식 (3)과 (4)로 표현된다. 식 (3)은 자기상관 함수(auto-correlation function)에 의한 auto-WVD를 나타내며, 식 (4)는 상호상관 함수(cross-correlation)에 의한 cross-WVD를 나타낸다[3-12].

$$WVD_{auto}(t, \omega) = \int s(t + \frac{\tau}{2}) s^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j\omega\tau} d\tau \dots\dots\dots (3)$$

$$WVD_{cross}(t, \omega) = \int s(t + \frac{\tau}{2}) g^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j\omega\tau} d\tau \dots\dots\dots (4)$$

여기서, t 는 시간, ω 는 주파수, *는 공액 복소 성분을 나타낸다. 일반적으로 위그너-빌 분포는 두가지 이상의 주파수 성분을 가지는 임의의 신호 $s(t) = s_1(t) + s_2(t)$ 에 대하여 식 (5)와 같이 정의된다.

$$WVD(t, \omega) = WVD_{s_1}(t, \omega) + WVD_{s_2}(t, \omega) + 2ReWVD_{s_1, s_2}(t, \omega) \dots\dots\dots (5)$$

위 식으로부터 위그너-빌 분포는 각각의 신호 s_1 과 s_2 의 auto-WVD와 cross-WVD의 합으로써 표현된다. 그리고, auto-WVD에 의해 표현된 항을 auto-term, cross-WVD에 의해 표현된 항을 cross-term이라 한다. auto-term은 실제 신호 성분이며, cross-term은 간섭현상에 의해 나타나는 허위 성분으로, 두 개의 auto-term 사이에서 발생한다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

본 실험에 사용된 시험재료는 원자력 배관과 반응로 등에 사용되는 오스테나이트계 스테인리스강인 SUS 316이다. 시험재의 화학성분은 Table 1에 나타낸다.

SUS 316강의 열화특성을 초음파법으로 조사하기 위하여 시험편은 Table 2에서와 같은 조건으로 인공 열화시켰다. 또한 인공 열화재에서 초음파 검사시 노이즈와 결함 에코를 분류하기 위하여, 직경 1mm 드릴

홀을 가공한 시험재를 1000℃에서 24시간 인공열화시켜 사용하였다. 시험편의 두께는 17mm(±0.5mm)이며, 탐상면은 표면 거칠기에 의한 초음파의 산란을 방지하기 위하여 경면 연마하였다. 또한 탐촉자의 접촉 압력이나 접촉상태에 따른 영향을 제거하기 위하여 클램프를 사용하여 탐촉자를 일정한 힘으로 고정시켰다. 접촉 매질은 점성, 음향임피던스 등을 고려하여 독일 Krautkrämer사의 ZG-F 접촉 매질을 사용하였다.

초음파 신호는 Krautkrämer사의 USD15 디지털 초음파 탐상기와 GaGe사의 CSLITE 고속 A/D 변환기를 이용하여 실시간적으로 검출하였다. 그리고, 주파수 특성은 Panametrics사의 5MHz (0.5inch) 광대역 센서를 사용하여 파악하였다. Fig. 1은 본 실험에서 사용된 장비의 block diagram이다.

Table 1 Chemical composition(wt%) of materials

Material	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
SUS 316	0.06	1.8	1.00	18.4	12.1	2.2

Table 2 Chemical composition(wt%) of materials

Specimen	Heat treatment	Cooling condition
S1	0hr	
S2	1000℃/1hr(holding)	Air quenching
S3	1000℃/2hrs(holding)	Air quenching
S4	1000℃/3hrs(holding)	Air quenching
S5	1000℃/5hrs(holding)	Air quenching
S6	1000℃/24hrs(holding)	Air quenching

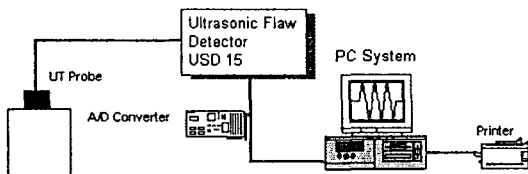


Fig. 1 Block diagram of experiment setup

4. 결과 및 고찰

4.1. 초음파 신호의 음속 변화

일반적으로 열화 손상된 재질은 결정립의 조대화, 석출물, 미소 void에 의하여 초음파의 산란, 빔의 분산 등의 영향으로 음속이 달라지게 된다.

시간-주파수 해석법과 펄스-에코법으로 측정된 SUS 316강의 열화 손상에 따른 음속 변화량을 Fig. 2에 나타낸다. 펄스-에코법의 음속측정은 제1저면 에코와 제2저면 에코의 시간 간격을 이용하였으며, 시간-주파수 해석법은 각 에코의 가장 높은 에너지를 나타내는 부분 즉, 중심주파수의 시간 간격을 다음식에 적용하여 구하였다.

$$V = \frac{2T}{\Delta t} \dots\dots\dots (6)$$

(V : 음속, T : 시험편의 두께, Δt : 시간 간격)

이 그림에서 펄스-에코법과 시간-주파수 해석법이 거의 비슷한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 열화 시간이 길어질수록 음속이 점차 감소하고 있다. 이것은 Fig. 3에서도 알 수 있듯이 열화시간이 길수록 결정립이 조대화되며, 결정립의 조대화가 음속의 감소에 큰 영향을 미친 것으로 생각된다[14].

4.2. 감쇠 측정

인공 열화 시간에 따른 초음파 감쇠계수를 시간-주파수 해석법으로 측정하고, 열화 손상을 평가하였다.

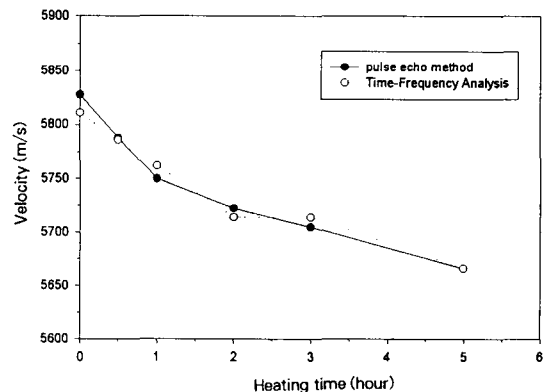
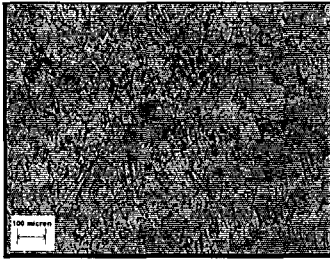
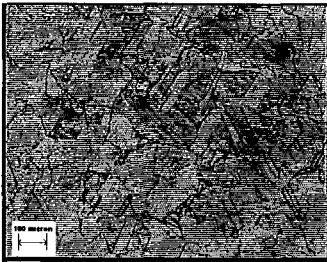


Fig. 2 Relationship between heating time and sound velocity



(a) 0 hour



(b) 1 hour



(c) 5 hours

Fig. 3 Micrographs of degraded specimens

열화 시간에 따른 단시간 푸리에 변환법과 위그너 빌 분포법으로 측정된 감쇠계수, 그리고 저면 에코(back echo)의 높이비로 측정된 감쇠계수를 Fig. 4에 나타낸다. 감쇠계수의 측정은 음속 측정과 같은 방법으로 제1저면 에코와 제2저면 에코의 높이비 및 중심주파수의 에너지비를 이용하여 다음식으로 측정하였다.

$$\alpha = \frac{20 \log_{10}(B_1/B_2)}{2T} \dots\dots\dots (7)$$

(α : 감쇠계수, B_1 : 제1저면 에코, B_2 : 제2저면 에코)

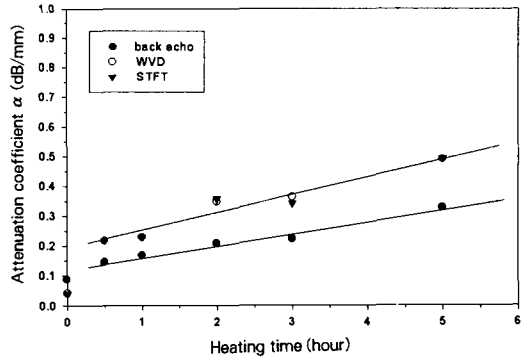


Fig. 4 Comparison of attenuation coefficients

Fig.4에서 단시간 푸리에 변환법과 위그너 빌 분포법의 감쇠계수는 거의 비슷한 값을 나타내고 있다. 또한, 모재의 감쇠계수를 제외하고는 저면 에코 높이 비에 의한 감쇠계수와 시간-주파수 해석법에 의한 감쇠계수의 증가가 거의 비슷한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

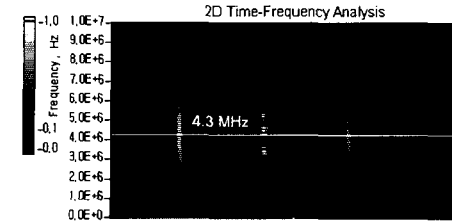
4.3. 열화재의 저면 에코 주파수 분석

시간-주파수 해석법을 이용할 경우 재료의 조직 변화 및 물성변화에 따라 그 특성이 변화하는 비정상 신호인 초음파 신호의 파형중 각 주파수 성분의 측정이 용이하다. 특히, 이들 각 주파수 성분들은 조직적 영향을 받기 쉬우며, 특히 열화 손상에 따른 초음파 파형속의 각 주파수 성분의 변화를 분석할 경우 열화 손상 정도를 용이하게 분석할 수 있을 것으로 생각되어진다.

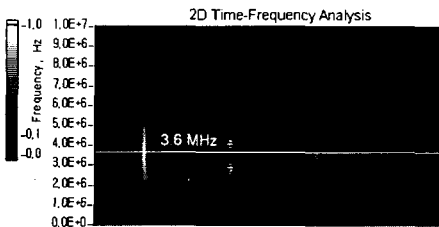
따라서, 본 실험에서는 cross-term이 발생하지만, 분해능이 높은 위그너 빌 분포법을 이용하여 저면 에코의 각 주파수 성분의 특성을 분석하였다. 우선 각 시험편에의 제1저면 에코의 주파수 성분의 특성을 비교하기 위하여, 제1저면 에코의 높이를 탐상기의 CRT 화면의 80%로 일정하게 조정 한 후, 제1저면 에코의 주파수 변화를 위그너 빌 분포법을 이용하여 분석하여, Fig. 5에 나타낸다. 이 그림에서 저면 에코의 주파수는 열처리 시간이 길수록, 고영역의 주파수들이 감소하고 중심 주파수가 낮아짐을 알 수 있다. 그리고 이 그림에서 제1저면 에코와 제2저면 에코 사이에 cross-term이 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig.5에서 중심 주파수를 측정하여 열화 시간에 따른 변화를 Fig.6에 나타내고 있다. 열화 시간이 길어질수록 중심 주파수가 지속적으로

감소하고 있음을 알 수 있다. 주파수가 높을수록 열화 손상에 따른 결정립의 조대화와 석출물 등에 의한 산란 및 감쇠의 영향을 받기 쉽기 때문에, 고주파수 성분은 열화 시간의 증가에 따라 급속히 감소되고, 중심 주파수도 저하되는 것을 알 수 있다. 또한, 고체 내부를 전

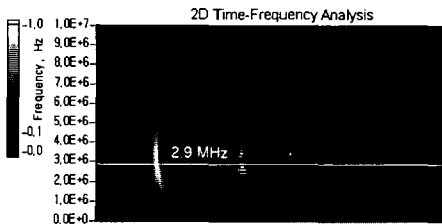
파하는 초음파는 일반적으로 분산성을 가지며, 재료의 점탄성 특성과 미세적인 구조에 의하여 분산성은 현저하게 달라질 수 있다. 보통 초음파 펄스는 어느 유한의 대역폭을 가지며, 그 대역에 포함된 여러 종류의 주파수 성분으로부터 구성되기 때문에, 재료의 조직 변화에 따른 에코 파형에 포함된 각 주파수 성분은 영향을 받기 쉽다. 따라서, 에코 파형에 포함된 각 주파수 성분의 조직 변화에 따른 영향을 조사하기 위하여, 모재와 1시간, 3시간, 5시간 동안 인공 열화시킨 시험편의 제1 저면 에코에서 2MHz에서 7MHz까지의 각 주파수 성분의 변화를 측정하여 Fig. 7에 나타낸다. (a)의 모재는 중심 주파수가 4.3MHz이므로 4MHz와 5MHz의 주파수 성분의 진폭이 크게 나타나고 있다. 그리고, (b)의 1시간 열화재는 중심 주파수가 3.6MHz로 4MHz 성분이 크게 나타나고 있으며, 모재와 달리 3MHz가 5MHz보다 더 크게 나타나고 있다. (c)와 (d)는 각각 3시간과 5시간 열화시킨 시험편으로서 2MHz와 3MHz 성분이 크게 나타나고 있으며, 5MHz 이상의 주파수 성분의 진폭은 낮게 나타나고 있다. 이것은 열화에 따른 조직의 조대화와 결정립계의 석출물 등에 의하여 고주파수 성분이 저주파수 성분에 비하여 더 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다.



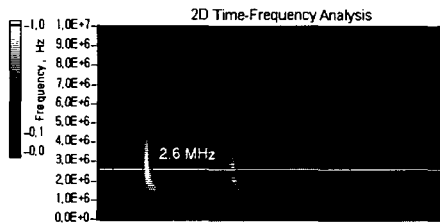
(a) 0 hour



(b) 1 hour



(c) 3 hours



(d) 5 hours

Fig. 5 Degradation evaluation of ultrasonic signals by WVD

4. 4. 열화재의 결함 검출

고온 환경하에서 장시간 사용된 구조물이나 오스테나이트계 스테인리스강의 용접부에 대한 초음파탐상검사의 가장 큰 애로점은 조직의 조대화와 석출물 등에 따른 초음파 빔의 산란과 감쇠로 인한 노이즈로 결함의 검출

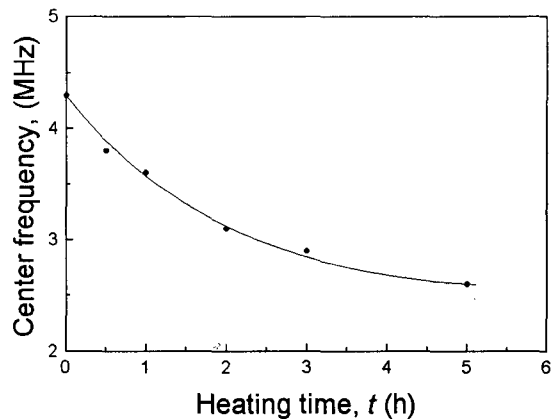


Fig. 6 Center frequency of degraded specimens

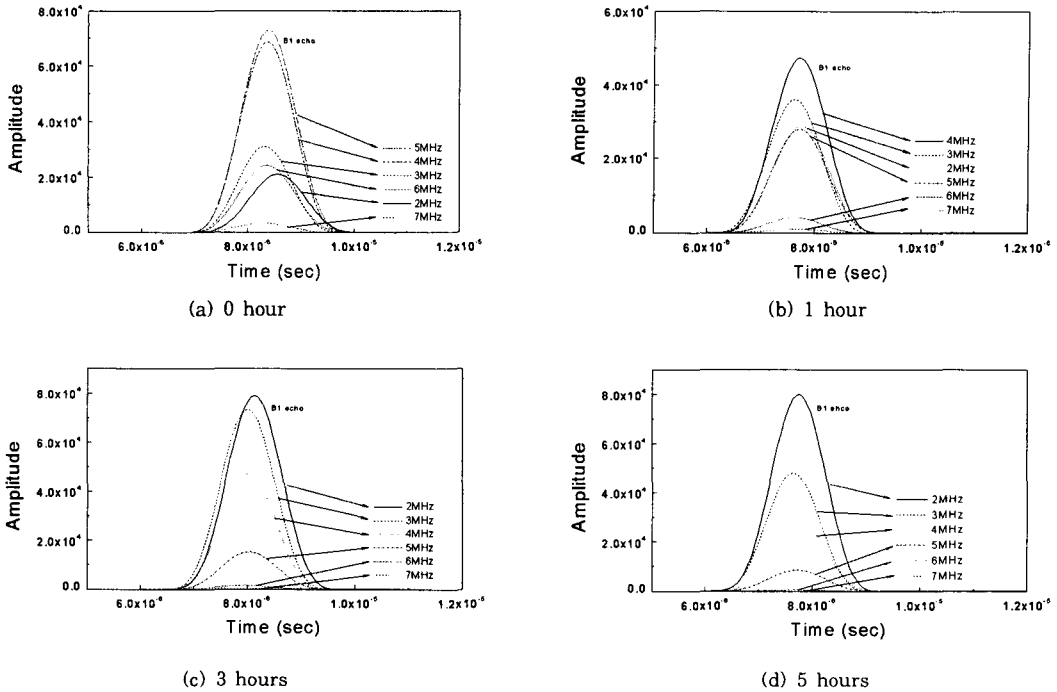


Fig. 7 Full frequency components of back echo by degradation time with WVD

이 상당히 어렵다는 것이다. 이와같이 결함의 검출이 어려운 오스테나이트 스테인리스 강의 1mm 드릴 홀을 갖는 열화재를 사용하여, 분해능은 위그너 빌 분포법 보다 다소 떨어지지만, cross-term이 발생하지 않는 단시간 푸리에 변환법을 이용하여 결함을 검출하여 신

호를 분석하였다. Fig. 8은 결함을 갖는 인공 열화된 시험편의 파형과 시간-주파수 분석법을 나타내고 있다. 이 그림에서 제1저면 에코와 제2저면 에코 사이에 노이즈와 결함 에코가 함께 존재하고 있다. 일반적으로 노이즈는 분산하는 성질을 가지고 있으며, 저면 및 결함에 반사된 초음파 신호는 집중하는 성질을 가지고 있다. 따라서, 노이즈 성분은 저면 및 결함에 반사된 초음파 보다도 국부적으로 약한 에너지를 가지게 되며, 시간-주파수 평면상에서 약한 에너지를 가지는 노이즈는 거의 나타나지 않게 된다. 또한, 결함 에코의 중심 주파수는 1.5MHz로서 저면 에코의 중심 주파수 2.5MHz에 비해 훨씬 낮은 주파수를 나타내고 있다. 이와 같이 시간-주파수 해석법을 이용하여 특별한 필터링 처리없이 노이즈와 에코의 분류가 가능하였다.

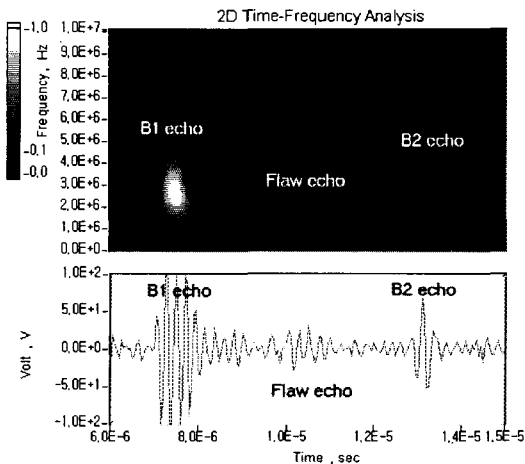


Fig. 8 Classification of ultrasonic flaw echo embedded in noise by STFT

5. 결 론

본 연구에서는 신호 해석 분야에서 최근 주목받고 있는 시간-주파수 해석법 중에서 단시간 푸리에 변환법과 위그너-빌 분포법을 이용하여 인공열화된 SUS 316강의 초음파 특성을 분석하고, 비파괴평가 기법으로서의

시간-주파수 해석법의 적용 가능성을 검토하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시간-주파수 해석법을 이용하여 비정상 신호인 초음파 신호를 분석한 결과 기존의 방법보다 신호의 정보를 용이하게 분석할 수 있었다.
- 2) 초음파법을 이용한 열화재의 열화 손상 평가를 시간-주파수 해석법(단시간 푸리에 변환법과 위그너 빌 분포법)으로 음속 및 감쇠계수를 분석할 수 있었다.
- 3) 열화재의 열화도는 분해능이 뛰어난 위그너 빌 분포법을 사용하여 중심 주파수와 각 주파수 성분의 감쇠 변화를 측정하여 분석할 수 있었다.
- 4) 결함을 갖는 열화재의 결함 검출에는 분해능은 다소 떨어지지만, cross-term이 발생하지 않는 단시간 푸리에 변환법으로 결함 검출이 용이하였다.
- 5) 위와 같이 시간-주파수 해석법을 초음파 신호의 비파괴적 특성 평가에 적용한다면, 이들 신호에 대한 새로운 비파괴평가 기법으로 적용이 가능할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] 川嶋紘一郎, 藤井 他 "固體中の超音波パルス 傳波時間を求める各種デジタル測定法の比較", 日本機械學會論文集(A集) 59卷 567號, pp. 286-291, (1993)
- [2] J. Koay, J. Frankel, Stephan C. Schroeder and Pankaj, "Signal detection and noise suppression using a wavelet transform signal processor: Application to ultrasonic flaw detection", IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 44, 1, (1997)
- [3] M. A. Malik, X. M. Jin and J. San Ie, "Joint time-frequency processing of ultrasonic signals", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 15, (1996)
- [4] B. Boashash, "Note on the use of the Wigner distribution for time-frequency signal analysis", IEEE Trans. Acoustics, Speech, Signal Processing, Vol. 36, No. 9, pp. 1518-1521, (1988)
- [5] A. McCray and S. Kramer, "The time-frequency analysis of ultrasonic signals", Review of Progress Quantitative Non-destructive Evaluation, Vol. 10A, (1991)
- [6] C. H. Chen and J. C. Guey, "On the use of Wigner distribution in ultrasonic NDE", Review of Progress in Quantitative Evaluation, Vol. 11A, (1992)
- [7] X. M. Jin, M. A. Malik and J. Saniie, "Singular value decomposition of Wigner distribution for time-frequency representation of ultrasonic echoes", Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 15, (1996)
- [8] 武捨 貴昭, 川 浦淳一, "ウィグナ 分布とその超音波非破壊評價への應用" 日本非破壊検査協會 第4卷 第9號, pp. 587-591, (1991)
- [9] 石光俊介, 北川 孟, "周波數領域適應フィルタを用いたWigner分布の干渉項除去", 日本機械學會論文集(c編) 61港 584號, pp. 226-231, (1995)
- [10] 石光俊介, 北川 孟, "Wigner分布の補正と非正常信號解析への適用", 日本機械學會論文集(C編) 57港 535號, pp. 141-148, (1991)
- [11] 福田義徳, 北川 孟, "時間-周波數分析にとる超音波信號の弁別", 日本機械學會論文集(C編) 63港 609號, pp. 145-152, (1997)
- [12] 杵築 兼史, 宇野 裕喜, 北川孟, 石光 俊介, "Auto-Wigner分布による時系列解析", 日本機械學會論文集(C編) 58港 552號, pp. 107-113, (1992)
- [13] 太田博光, 瀬戸邦聰, "短時間FFTとWigner分布による ジェトスクリチの時間-周波數解析", 日本機械學會論文集(C編) 63港 612號, pp. 171-175, (1997)
- [14] P. Palanichamy, A. Joseph, T. Jayakumar and Baldev Raj, "Ultrasonic velocity measurements for estimation of grain size in austenitic stainless steel", NDT & E International, Vol. 28, No. 3, pp. 179-185, (1995)