

웨이브렛 평면 AR 모델을 이용한 초음파 비파괴 검사의 스펙클 잡음 감소 및 결함 검출

이영석* · 임래묵** · 김덕영** · 신동환** · 김성환**

* 청운대학교 전자공학과

**서울시립대학교 전자전기공학부

Speckle Noise Reduction and Flaw Detection of Ultrasonic Non-destructive Testing Based on Wavelet Domain AR Model

Y. S. Lee*, R. M. Lim**, D. Y. Kim**, D. H. Shin** and S. H. Kim

* Dept. of Electronics Engineering, Chungwoon University, Chungnam 350-800, Korea

** School of Electronics and Electrical Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

Abstract

In this paper, we deal with the speckle noise reduction and parameter estimation of ultrasonic NDT(non-destructive test) signals obtained during weld inspection of piping. The overall approach consists of three major steps, namely, speckle noise analysis, proposition of wavelet domain AR(auto-regressive) model and flaw detection by proposed model parameter. The data are first processed whereby signals obtained using vertical and angle beam transducer. Correlation properties of speckle noise are then analyzed using multiresolution analysis in wavelet domain. The parameter estimation curve obtained using the proposed model is classified a flaw in weld region where is contaminated by severe speckle noise and also clear flaw signal is obtained through CA-CFAR threshold estimator that is a nonlinear post-processing method for removing the noise from reconstructed ultrasonic signal.

(Received October 8, 1999)

Key Words : Wavelet transform, AR model, Speckle noise, Non-destructive test

1. 서 론

현재까지 매질의 내부에 존재하는 결함을 검출하기 위한 방법으로 적외선, X-선 및 초음파 신호, 음향 신호, 와전류 탐상 등 다양한 방법들이 제시되어 왔다. 특히 최근 들어 초음파 신호를 이용한 결함 검출 방법은 그 편리성과 경제성으로 인하여 다양한 산업분야의 비파괴 검사 기술로서 각광을 받고 있다. 결함 검출을 위하여 사용하는 초음파 신호는 약 100KHz~50MHz의 주파수 영역을 갖는 신호로서 매질 내로 입사한 초음파 신호는 매질을 구성하고 있는 미세 구조

의 반사에 의해 발생하는 반향파를 이용하여 매질 내부의 구조를 알 수 있으며 특히 결함이 있는 부위에는 높은 크기의 반향파를 반사하기 때문에 결함의 존재를 파악할 수 있다.

특히 발전 설비 및 시설물의 비파괴 평가에서 초음파를 이용한 비파괴 검사는 높은 온도 및 압력을 동반한 유체를 이동시키는 핵발전소의 핵반응기와 연결된 각종 파이프라인과 이를 연결하는 볼트 및 용접을 이용한 접속 부위에서 발생하는 결함을 검출하기 위하여 널리 사용하고 있는 기술이다. 그러나, 스테인레스 재질의 고강도 금속 파이프가 용접되는 경우, 용접열의 영향을 받아 HAZ(heat affected zone)이 발생하며,

이 부분은 시간이 경과하면서 파이프라인을 통과하는 고온, 고압의 유체에 의한 부식, 파이프의 내벽으로부터 받는 장력(tensile) 스트레스 및 용접 시 발생하는 열에 의해 크랙(crack)이나 그 밖의 결함이 발생할 가능성이 높은 취약한 부분으로 집중적인 검사가 이루어지는 부분이다¹⁻⁴⁾.

지금까지 HAZ에서 결함을 검출하는 초음파 비파괴 검사 기법으로는 숙련된 검사자가 초음파 센서로부터 일정한 각도를 가지고 초음파 신호를 입사시켜 결함 부위의 미세 구조로부터 반사된 반향 신호(echo signal)를 관측하여 결함을 검사하는 방법이 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 방법은 검사를 수행하는 검사자의 경험(skill) 및 감정적인 상태(emotional status), 피로(fatigue) 정도와 같은 주관적인 상태에 의해 지배를 받기 때문에 정량적인 검사 기법이라고 할 수 없다.

그리고 용접 부위는 이미 다양한 스트레스에 의해 파이프라인을 구성하고 있는 금속의 미세 구조가 변화하고 불규칙한 그레인(grain)의 성장으로 발생하는 난반사된 스펙클 잡음(speckle noise)의 영향으로 인하여 결함으로부터 반사된 신호 성분이 스펙클 잡음 속에 묻혀 있어 육안으로 확인 불가능하거나, 또는 HAZ와 용접부 그리고 파이프라인의 경계면에서 서로 다른 금속 구조에 의해 발생하는 반향 신호는 결함으로부터 반사된 신호와의 구분을 더욱 어렵게 하는 요소로서 작용한다.

현재까지 검사자의 육안 관찰에 의존하지 않고 용접 부위의 결함을 정량적으로 검출하기 위한 다양한 신호 처리 기술들이 연구되어져 왔으며 특히 Y. zhu⁵⁾는 LMS(least mean square)를 이용한 적응 신호 처리 기법을 이용하여 결함을 검출하기 위한 연구를 수행하였으며 R. Murthy⁶⁾는 대역 분할 필터링(band pass filtering) 기법을 이용하였고, L. Newhouse⁷⁾는 대역 분할 필터링 기법을 더욱 발전시켜 SSP(split spectrum processing)을 통하여 결함 검출을 위한 연구를 수행하였다. 또한 A. Abbate⁸⁾는 웨이브렛 평면에서의 초음파 스펙클 잡음을 해석하고, 그 결과를 시평면에서 정합 필터(matched filter)에 적용하여 잡음을 억제한 후 잡음 전력에 대한 신호 전력의 임계 레벨을 설정하는 비선형 추정법을 이용하여 결함을 검출하는 방법을 제안하였으나, 이 방법에서 결함을 검출하기 위하여 제안한 초음파 신호 모델은 반사된 초음파 신호는 결함부위에서 반사된 반향 신호와 스펙클 잡음으로 이루어져 있다고 가정하였으며 이때, 스펙클 잡음은 결함으로부터 반사된 반향 신호와는 독립적

로 존재하고 전력은 전체 관측 신호에 균일하게 분포한다는 가정 하에 이루어진 것이다.

그러나 실제 파이프라인의 용접 부위에서 반사된 초음파 신호는 Abbate에 의해 제안된 모델의 신호 성분 외에도 HAZ와 용접부 그리고 파이프라인의 경계면에서 발생하는 반향 신호의 영향으로 더욱 복잡한 신호 형태를 띠고 있으며, 특히 결함에서 반사된 반향 신호와 금속 구조의 경계면에서 반사된 반향 신호는 높은 상호상관성(crosscorrelation)을 가지고 있기 때문에 Abbate의 방법은 용접 부위의 결함 검출에는 적합한 모델이 아니다.

따라서 본 연구에서는 스펙클 잡음 및 금속 구조의 경계면에서 발생한 반향 신호로부터 스펙클 잡음을 억제하고 용접 부위의 결함을 검출하기 위하여 초음파 신호를 다중 분해능 해석(multiresolution analysis) 방법의 하나인 웨이브렛 평면에서 분석하고 이로부터 파라미터를 이용하여 결함을 검출할 수 있는 웨이브렛 평면 AR(autoregressive) 모델을 제안하였다. 또한 제안한 모델은 실제로 결함이 발생한 파이프라인으로부터 수집한 초음파 반향 신호에 적용하여 결함 부위에서 명백한 파라미터 변화가 있음을 확인하였으며 획득한 파라미터로부터 재구성한 초음파 신호에 CA-CFAR(cell average-constant false alarm rate) 임계 추정기(threshold estimator)를 적용하여 잡음을 제거함으로써 결함으로부터 반사된 초음파 신호를 확인 할 수 있었다.

2. 웨이브렛 평면에서의 초음파 신호 해석과 웨이브렛 평면 AR 모델

웨이브렛 변환은 $L^2(R)$ 의 힐버트 공간(Hilbert space)에서 존재하는 시평면 신호를 모 웨이브렛(mother wavelet) $\Psi(t)$ 를 기본 커널(basic kernel)로 하는 식(1)을 통하여 서로 직교하는 웨이브렛 커널(wavelet kernel) $\Psi_{a,b}(t)$ 를 구성한 다음 스케일링 변수(scaling parameter) a 와 병진 변수(translation parameter) b 로 구성된 2차원 웨이브렛 평면으로 변환시키는 것으로 식(2)와 같이 정의할 수 있다⁹⁾.

$$\Psi_{a,b}(t) = a^{-1/2} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a > 0 \quad (1)$$

$$(Wf)(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt = \langle f, \Psi_{a,b}^* \rangle \quad (2)$$

여기서 *는 공액 복소쌍을 $\langle \cdot \rangle$ 는 내적 연산자(inner product operator)

식(2)에서 웨이브렛 변환은 시평면 신호 $f(t)$ 에 대하여 임펄스 응답(impulse response)으로 $a^{-1/2}\Psi(-t/a)$ 를 갖는 시스템의 출력으로 해석할 수 있으며, 주파수 성분을 갖는 스케일링 변수 a 에 의해 이때의 임펄스 응답 $a^{-1/2}\Psi(-t/a)$ 는 웨이브렛 변환의 성질에 의해서 서로 직교하는 대역 통과 필터의 특성을 갖는다.

웨이브렛 변환이 제안되기 전까지 시간-주파수 평면에서 신호를 해석하려는 시도가 다양하게 있어왔다. 이들 중 식(3)과 같이 정의되는 STFT(short time Fourier transform)는 웨이브렛 변환과 유사하게 주파수에 의해 변조(modulation)되는 윈도우를 이용하여 시간-주파수 평면 신호 해석을 수행하였지만 윈도우의 분해능이 고정되어 있어 특정 주파수 성분을 제외하고 나머지 주파수 성분은 시간 축에 대하여 넓게 퍼지는 단점이 있다¹⁰⁾.

$$(STFT)(\omega, b) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t-b)e^{i\omega t} dt \quad (3)$$

이산 시간(discrete time)의 시평면 신호에 대한 웨이브렛 변환은 그림 1과 같은 완전 재구성 필터 뱅크(perfect reconstruction filter bank)를 이용하여 적은 연산량으로 구현할 수 있으며 웨이브렛 변환된 신호들은 역 웨이브렛 변환을 이용하여 시평면 신호로 복원할 수 있다¹¹⁾.

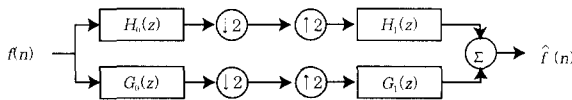


Fig. 1 QMF structure

위 그림으로부터 웨이브렛 변환은 이산 신호 $f(n)$ 이 고역 통과 필터의 전달 함수 $H_0(z)$ 와 저역 통과 필터의 전달 함수 $G_0(z)$ 를 거쳐 ↓2에 의해 2의 외삽(extrapolation)을 통하여 저역 통과 신호와 고역 통과 신호로 나누어지며 다시 저역 통과 신호에 대하여 동일한 QMF 구조를 적용하여 다시 고역 신호 성분과 저역 신호 성분으로 나누는 과정을 반복함으로써 각 신호 성분간에 서로 직교하는 대역 통과 필터의 출력을 얻을 수 있다. 그리고 웨이브렛 변환된 신호는 ↑2에 의해 2의 보간(interpolation)이 이루어진 후 $G_1(z)$ 와 $H_1(z)$ 를 거쳐 본래의 신호 $f(n)$ 으로 복원할 수 있다.

QMF 구조를 이용한 웨이브렛 변환의 입력으로서 스펙클 잡음 $w(n)$ 이 인가되는 경우 고역 통과 필터 $H_0(z)$ 와 저역 통과 필터 $G_0(z)$ 를 거친 출력은 각각 다

음과 같이 나타낼 수 있다¹²⁾.

$$w_{high}(k) = \sum^n w(n) h_0(2k-n)$$

$$w_{low}(k) = \sum^n w(n) g_0(2k-n) \quad (3)$$

이때 고역 신호 성분 $w_{high}(k)$ 와 저역 신호 성분 $w_{low}(k)$ 간의 상관 계수는 $h_0(n)$ 과 $g_0(n)$ 의 직교성에 의해 자기 상관성을 높이는 동시에 인접한 신호와의 상관성은 줄일 수 있으며 이에 대한 예로서 그림 2는 전형적인 스펙클 잡음에 대하여 시평면에서의 자기 상관 함수를 이용하여 얻은 상관 계수와 Daubechies⁹⁾에 의해 제안된 완전 지지(compactly supported) 웨이브렛의 일종인 D_2 를 이용하여 웨이브렛 변환을 수행한 후 얻은 상관 계수를 나타낸 것이다.

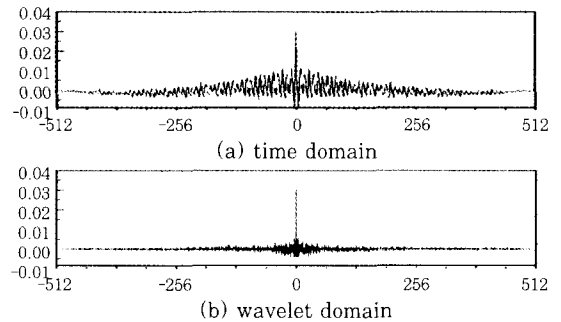


Fig. 2 Correlation coefficients of speckle noise

위의 그림으로부터 웨이브렛 평면에서의 자기상관성(autocorrelation)이 시평면에서의 자기 상관성을 높이는 동시에 인접한 신호와의 상관성은 감소하는 것을 관측할 수 있으며 이는 초음파 신호의 스펙클 잡음 및 HAZ와 용접부위간의 경계 면에서 발생하는 반향 신호가 웨이브렛 변환에 의해 결함으로부터 반사된 반향 신호와 상호상관이 없는 독립적인 신호들로서 존재한다는 것을 나타내므로 시평면보다 웨이브렛 평면에서 초음파 신호를 처리하는 것이 결함 검출에 더 유리하다는 것을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 웨이브렛 변환 평면에서 초음파 신호의 상관 특성을 이용하여 웨이브렛 평면 AR 모델을 식(4)와 같이 제안하였다

$$\hat{x}_i(j) = \sum_{k=1}^p [\hat{a}_{ik} x_i(j-k) + w_i(j)] \quad (4)$$

위 식에서 \hat{a}_{ik} 는 그림 3의 QMF 구조를 i 번 연속적으로 적용하여 얻어지는 시계열 j 에서 i 번째 웨이브렛 대역의 출력에 대한 추정치 $\hat{x}_i(j)$ 를 추정하기 위한 추정 AR 계수로서, $\hat{x}_i(j)$ 는 k 및 모델의 차수 p 에 의해

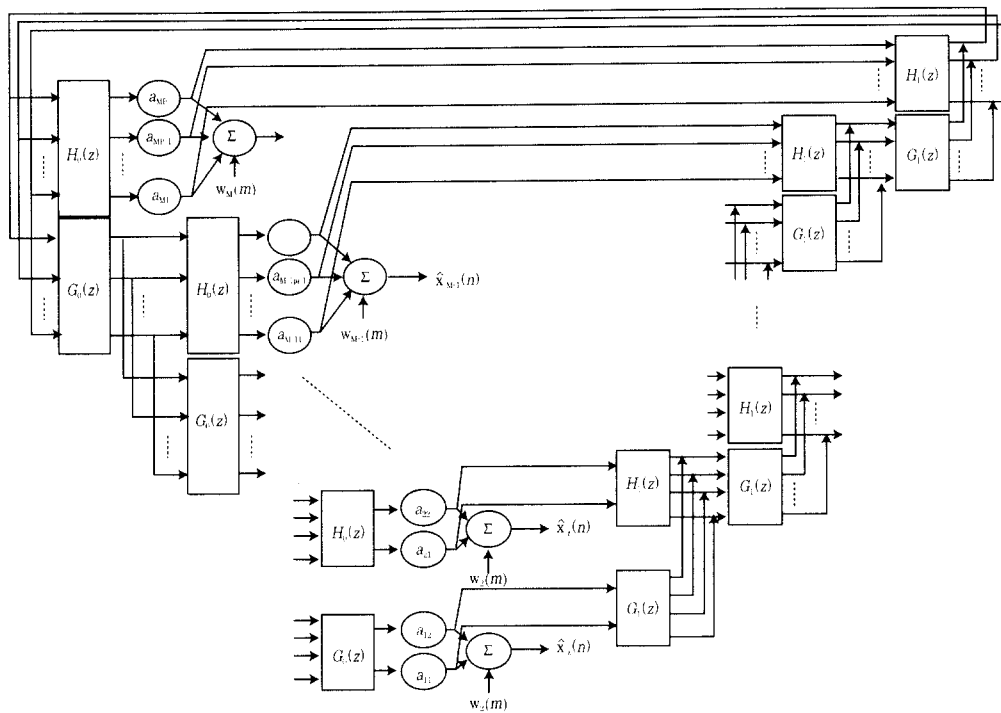


Fig. 3 Proposed wavelet domain AR model

시계열 $\hat{x}_i(j-k)$ 들의 선형적 결합으로 나타낼 수 있음을 의미한다.

또한 모델의 차수 p_i 는 i 번째 웨이브렛 대역에서 QMF의 구조의 외삽에 의해 2^i 의 값을 갖는다. 그러므로 각 웨이브렛 대역을 고려한 전체 웨이브렛 평면 AR 모델은 그림 3과 같이 QMF 출력에 대한 독립적인 AR 모델로 나타낼 수 있으며 제안한 모델의 효율성은 모델의 CRLB(Cramer-Rao lower bound)를 이용하여 검증할 수 있다.

CRLB는 임의의 모델이 얼마나 효율적인지를 나타내기 위한 성능 지표(performance index)로서 식 (5)에 의해 정의되는 Fisher 정보 행렬의 역행렬로서 나타낼 수 있으며, CRLB가 작을 수록 모델의 효율성이 높다는 것을 의미한다¹³⁾.

$$J = E\left\{ \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \ln p_\theta(X) \right] \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \ln p_\theta(X) \right]^T \right\} \quad (5)$$

여기서 $E[\cdot]$ 는 기대치 연산자, 위 첨자 T 는 전치 행렬을 나타낸다.

이때 p_θ 는 AR 모델의 계수 벡터에 의해 특징지어지는 확률밀도함수이며 만약 제안한 모델로부터 스펙클 잡음을 평균이 0인 가우시안 분포(Gaussian distribution)를 갖는 백색 잡음(white noise)으로 가정한다면 이에 대한 CRLB는 식(6)과 같이 나타낼

수 있다¹⁴⁾.

$$J^{-1} \approx \frac{1}{N} \begin{pmatrix} 2\sigma^2 & 0 \\ 0 & \sigma^2 C^{-1} \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서 N 은 데이터량, σ^2 는 분산, C 는 상관 행렬을 나타낸다.

따라서 CRLB는 데이터량 N 과 분산 σ^2 이 동일한 조건하에서 상관 행렬의 역행렬에 의해 특징지어 지는 것을 알 수 있다. 그리고 시평면 및 웨이브렛 평면에서의 상관 행렬의 성분은 각각 식(7)에 의해 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} C(m, n) &= \gamma(lm-nl) \\ C_w(m, n) &= u_i(k)u_i(k')\gamma(2^{m-m} \times 2^{-k+k'}) \end{aligned} \quad (7)$$

위 식에서 $u_i(k)$ 는 웨이브렛 변환을 위하여 i 번의 QMF 구조를 나타내기 위한 웨이브렛 대역의 전달 함수로서 $u_0(z) = h_0(z)$, $u_i(z) = \left[\prod_{j=0}^{i-1} u_0(z) \right] \times g_0(z)$ 이며, γ 는 자기 상관 함수로서 $E[x(m)x(n)]$ 을 나타낸다. 그리고 시평면 및 웨이브렛 평면 상관 행렬 C , 및 C_w 는 행렬의 특성에 의하여 다음과 같은 부등식이 성립한다¹⁵⁾.

$$\det(C_i^{-1}) = \prod_{i=1}^p \frac{1}{\lambda_i} \geq \det(C_w^{-1}) = \prod_{i=1}^p \frac{1}{\lambda_w} \quad (8)$$

위 식으로부터 시평면 및 웨이브렛 평면에서의 상관 행렬의 역행렬에 대한 determinant는 상관 행렬의 고유치 λ_{wi} 및 λ_{wi} 에 의해 특징지어 지는 것을 알 수 있으며 이로부터 $C_w^{-1} \leq C_i^{-1}$ 의 유도도 다음과 같은 CRLB에 의해 시평면의 모델에 비하여 제안한 모델이 더 효율적이라는 것을 증명할 수 있다.

$$J_w^{-1} \leq J_i^{-1} \quad (9)$$

3. 실험 및 결과 고찰

본 논문에서는 제안한 모델을 이용하여 용접 부위의 결함을 검출하기 위하여 다음과 같은 초음파 신호 획득 장치를 이용하였다.

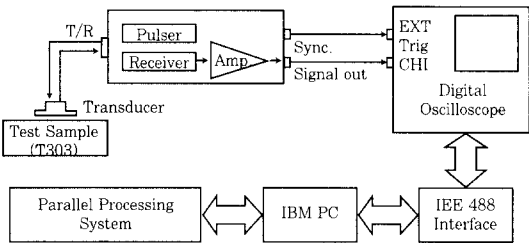


Fig. 4 Block diagram of experimental equipment for ultrasonic signal acquisition and parameter estimation

위의 실험 장치로부터 초음파 신호를 얻기 위하여 사용된 탐촉자의 발진 주파수는 매질 내부로 초음파 입사하여 진행하는 방향에 대하여 매질의 두께 및 산란되는 정도에 의해 결정되며 특히 미세한 결함을 검출하기 위해서는 더욱 높은 발진 주파수를 갖는 탐촉자를 사용해야 한다. 그러나 미세한 결함을 검출하기 위한 높은 발진 주파수를 갖는 탐촉자를 사용하는 경우 매질 내부로 입사한 초음파 신호는 용접열에 의해 발생한 불규칙한 그레인에 의한 산란으로 인하여 결함에 도달하기 전에 산란되거나, 일부 초음파 신호가 결함에 도달한다 할지라도 반사된 초음파 신호는 탐촉자의 수신단에 도착하기 전에 다시 그레인에 의해 산란되므로 결함에 대한 정보를 얻을 수 없다. 그러므로 결함까지 초음파가 진행하기 위해서는 매질의 두께를 고려한 낮은 발진 주파수의 탐촉자가 유리하며 미세한 결함을 찾기 위해서는 높은 발진 주파수를 갖는 탐촉자가 유리한 관계가 성립된다.

따라서 본 연구에서는 제작한 시편의 두께 및 산란되

는 정도를 고려하여 매질 내부로 입사한 초음파 신호가 충분히 결함에 도달할 수 있도록 파나메트릭 (Panametric)사의 5MHz, A109 모델의 무초점 (unfocused) 탐촉자를 사용하였으며 또한, 탐상기는 동일 회사의 펄스-에코 방식의 500PR 탐상기를 이용하였다. 그리고 획득된 데이터는 디지털 오실로스코프 (HP 54505B)내의 ADC(analog to digital converter)를 통하여 디지털 데이터로 변환된 다음 다시 디지털 오실로스코프와 개인용 컴퓨터를 연결하는 IEEE 488 버스에 의해 개인용 컴퓨터의 슬롯에 장착된 Inmos사의 병렬 처리 마이크로 프로세서 시스템(T805)에 의해 제안한 모델의 연산이 수행되도록 하였다.

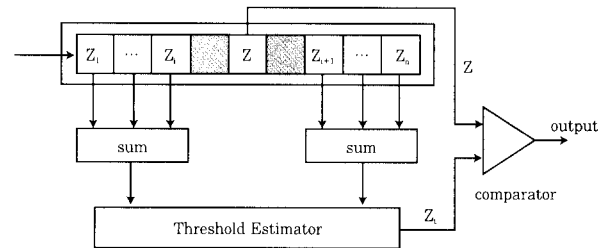


Fig. 5 Block diagram of CA-CFAR threshold estimator

그리고 제안한 모델을 이용하여 잡음이 감소된 초음파 신호는 결함으로부터 반사된 반향 신호를 얻기 위한 후처리 (post-processing) 방법으로 CA-CFAR(cell average-constant false alarm rate)를 이용한 임계 추정기(threshold estimator)를 이용하였다. CA-CFAR을 이용한 임계 추정 방법은 제안한 모델로부터 출력된 초음파 신호를 일정한 크기를 갖는 셀로 나눈 다음 각 셀의 평균 전력 z_i 를 다른 셀의 평균

$$\text{전력과 비교하여 임계값 } z_t = \frac{T}{N} \sum_{i=1}^N z_i \text{를 구한 후,}$$

그 임계값 이하의 신호 성분은 0으로 고정하고, 임계값 이상의 신호 성분만 출력하는 비선형 추정기의 일종으로 그림 5와 같은 블록선도로서 나타낼 수 있으며 이때 N 은 전체 셀의 수이고, T 는 임계 스케일링 상수로서 $T = N(P_f^{2/N} - 1)$ 이며 P_f 는 오경보율(false alarm rate)이다.

용접 부위의 결함을 가정한 시편(test sample) TS1은 그림 6(a)와 같이 직경이 90mm 높이가 50mm인 원통모양의 303형 스테인레스 스틸의 중앙에 각각 직경이 1mm, 깊이가 25mm, 20mm인 FBH(flat bottom hole)을 5mm 간격으로 뚫어 결함이라고 가정하였으며 열변성에 의한 불규칙한 그레

인을 성장시키기 위하여 열처리로 (S30AU, Carbolite furnace)에서 1시간 동안 1200℃의 열을 가한 다음 급속 냉각하였다.

그림 6(b)의 두번째 시편 TS2는 원자력 발전소의 냉각수 파이프라인에서 전형적으로 발생하는 notch를 고려하여 원자력 연구소에서 제작한 시편으로 동일 재질의 두께가 70mm이고 바깥둘레가 200mm이며 용접부의 HAZ에 폭 5mm, 깊이 5mm의 notch를 형성하여 결함으로 가정하였다. 데이터를 획득하는 방법으로는 결함이 존재하는 부위 주변으로 탐촉자를 이동시키면서 시편 TS1은 수직, 시편 TS2는 45°의 경사각 탐상을 실시하여 결함의 발생한 부위의 초음파 신호를 획득하였다. 그림 7은 시편 TS1에서 얻은 스펙클 잡음과 결함에서 얻은 초음파 반향 신호를 나타내고 있다. 그림 7(a)로부터 스펙클 잡음은 불규칙한 크기를 갖는 그레인에서 난반사된 신호에 의해 일정한 패턴이 없는 불규칙 신호의 형태를 가지고 있으며 그림 7(b)에서 시편 TS1의 결함으로 가정한 두개의 FBH에서 반사된 초음파 신호는 두개의 높은 크기를 갖고 진동하는 신호로 쉽게 구분할 수 있으며 주변의 발진 성분들은 결함 주변에 위치하는 그레인들에 의한 스펙클 잡음을 나타낸다.

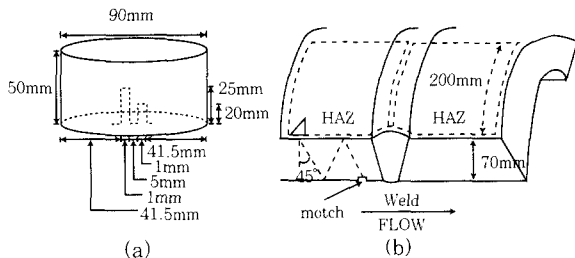


Fig. 6 Test samples, TS1(a) and TS2(b) for experiment

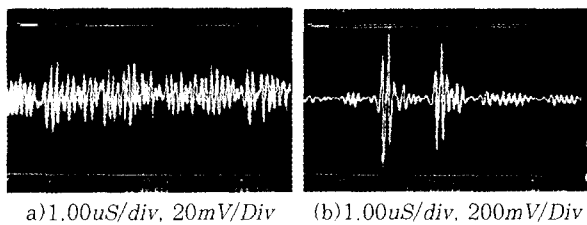


Fig. 7 Photographs of speckle noise(a) and flaw signal obtained from test sample TS1(b)

본 연구에서는 제안한 모델이 결함 부위에서 반사된 초음파 신호에 대하여 AR 계수의 변화가 관측하기 위하여 그림 6의 시편 TS1에서 획득한 그림 8(a)와 같이 비교적 약한 스펙클 잡음에 오염되어 있는 초음파 신호에 제안한 모델을 적용하여 그림 8(b)와 같은 AR 계수의 변화를 관측할 수 있다.

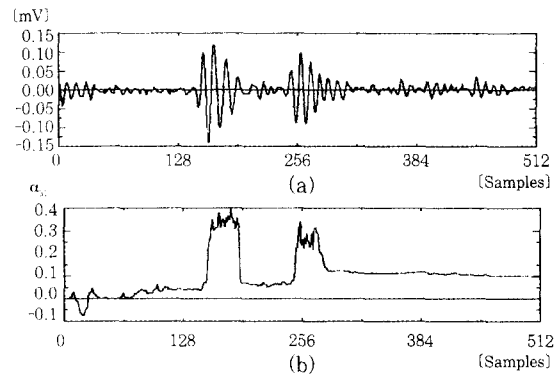


Fig. 8 Ultrasonic signal obtained from test sample TS1(a) and AR coefficient estimation curve of proposed model(b)

위의 그림으로부터 비교적 약한 스펙클에 오염되어 있으며 균일하게 열처리된 시편에 대해서는 결함 부위에서 수집한 초음파 반향 신호를 통하여 직접 결함이 있는 부위를 확인 할 수 있으며 또한 제안한 모델의 AR 계수 추정으로부터 계수의 변화를 관측할 수 있다. 동일한 실험을 그림 9(a)와 같이 신호 대 잡음비가 약 -14dB인 시편 TS2로부터 얻은 초음파 신호에 적용하여 그림 9(b)와 같은 AR 계수의 변화를 관측할 수 있다.

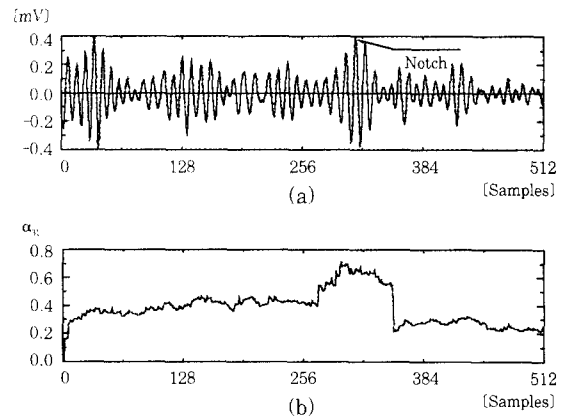


Fig. 9 Ultrasonic signal obtained from test sample TS2(a) and AR coefficient estimation curve of proposed model(b)

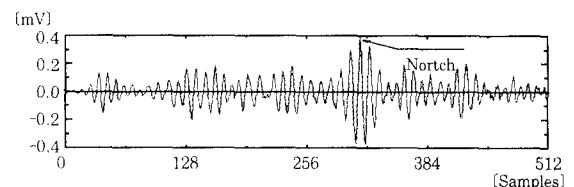


Fig. 10 Reconstructed ultrasonic signal by estimated AR coefficients of proposed model

그림 9(b)의 제안한 모델의 AR 계수 추정 곡선으로부터 notch가 존재하는 부분에서 AR 계수의 변화가

있음을 확인할 수 있으며 그림 10은 그림 9(a)에 대하여 추정된 AR 계수들을 이용하여 재구성한 신호로서 신호 대 잡음비가 -1.3dB 로 원신호의 신호 대 잡음비 -14.6dB 에 비하여 약 10dBd 이상의 신호 대 잡음비 개선이 이루어 졌다.

그림 10으로부터 본 연구에서 제안한 웨이브렛 평면 AR 모델을 통하여 재구성된 신호로부터 notch가 발생한 부위에서 높은 진폭을 갖는 신호가 발생하는 것을 관측할 수 있으나, notch 주위에 스펙클 잡음 및 용접부의 경계 면에서 발생하는 반향 신호의 일부가 존재하는 것을 알 수 있다. 또한 본 연구에서는 명확하게 notch로부터 반사된 반향 신호를 얻기 위하여 후처리로서 하나의 셀이 16개의 데이터로 구성되어 있으며 오경보율 P 가 0.1인 CA-CFAR를 이용한 임계 추정기의 입력으로 그림 10의 재구성된 초음파 신호를 인가하여 그림 11과 같이 notch에서의 초음파 반향 신호를 명확히 보여주는 CA-CFAR 임계 추정기의 출력을 얻었다.

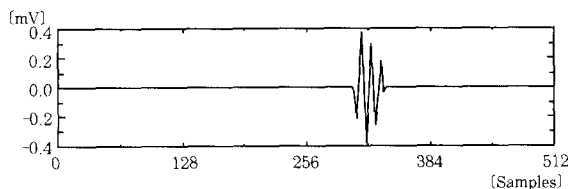


Fig. 11 Output of CA-CFAR threshold estimator for reconstructed ultrasonic signal

4. 결 론

각종 생산 및 발전설비에 필수적인 구성 요소인 파이프라인은 용접 시에 발생하는 열에 의해 금속의 미세한 구조가 변화한다. 이때 불균일하게 변화한 그레인에 의해 발생하는 스펙클 잡음 및 인접한 금속과의 경계 면에서 반사된 초음파 신호는 초음파 비파괴 검사에서 결함에서 반사된 초음파 신호를 검출하는데 어려움이 따른다.

본 논문에서는 초음파 비파괴 검사를 통하여 스펙클 잡음에 오염된 용접부 주변의 결함을 검출하기 위하여 웨이브렛 평면에서 스펙클 잡음을 해석하고 이를 토대로 하여 웨이브렛 평면 AR 모델을 제안하였다. 제안한 모델은 열처리를 통하여 그레인의 크기를 성장시킨 후 얻어진 금속 시편과 파이프라인의 용접 부위에 notch가 형성된 금속 시편에 적용하고, 각각의 금속 시편에 대하여 초음파 탐상을 실시하여 얻어진 초음파 신호로부터 제안한 모델과 시평면 AR 모델에 대하여 AR 계수의 추정 곡선을 구하였다.

추정된 AR 계수 곡선으로부터 본 연구에서 제안한 모델이 시평면 AR 모델에 비하여 결함이 존재하는 부위에서 AR 계수의 변화가 나타났으며, 추정된 AR 계수로부터 재구성된 초음파 신호는 시평면 AR 모델의 AR 계수에 의해 재구성된 초음파 신호 보다 스펙클 잡음이 10dB 이상 감소하였고, 재구성된 초음파 신호로부터 명확한 결함 신호를 출력하기 위하여 후처리로서 CA-CFAR 임계 추정기를 이용함으로써 결함에서 반사된 초음파 신호가 명확히 나타나는 것을 관측할 수 있었다.

따라서 본 연구는 발전소의 열 교환용 파이프라인이나 반응기와 같이 고온 고압의 환경에 노출되어 있어 미세 구조의 변화, 피로 및 스트레스 등으로 결함이 발생한 가능성이 있는 설비들의 보전 및 결함 검사 분야 등에 초음파를 이용한 비파괴 검사 기술로서 다양하게 응용될 수 있으리라 사료된다.

참 고 문 헌

1. J. G. Abbott and F. L. Thustone, Acoustic Speckle : Theory and Experimental, Academic Press(1979) pp. 303-324
2. P. Daponte and R. S. Olivito, "Crack Detection Measurements in Concrete," in Proc. of Microcomputer Application Conf., LA, Dec. 14-16 (1989) pp. 123-127
3. M. G. Duncan "Real-Time Analytic Signal Processor for Ultrasonic Non-destructive Testing," IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 39, No. 6(1991) pp. 1024-1029, Dec.
4. L. Landri and L. Verrazzan, "Spectral Characterization of Tissue Microstructure by Ultrasounds : A Stochastic Approach," IEEE Trans. on UFFC, Vol. 37, No. 5(1990) pp. 448-456, Sep.
5. Y. Zhu, P. Weight, "Ultrasonic Nondestructive Evaluation of High Scattering Materials using Adaptive Filtering and Detection," IEEE Trans. on UFFC, Vol. 41, No. 1(1994) pp. 26-33, January
6. R. Murthy, M. Bilgutay, "Application of Band Pass Filtering in Ultrasonic Nondestructive Testing," Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation of Materials, Vol.

- 8(1989) pp. 759-767
7. L. Newhouse, M. Bilgutay, "Flaw to Grain Echo Enhancement by Split-Spectrum Processing," *Ultrasonics*, Vol. 20(1982) pp. 59-68, March
 8. A. Abbate, J. Koay, J. Frankel, S. C. Schroeder, P. das, "Signal Detection and Noise Suppression Using a Wavelet Transform Signal Processor : Application to Ultrasonic Flaw Detection," *IEEE Trans. on UFFC*, Vol. 44, No. 1(1997) pp. 14-26, Jan.
 9. I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*, Philadelphia, PA : SIAM(1992)
 10. M. R. Ponnoff, "Time-Frequency Representation of Digital Signals and Systems Based on Short-Time Fourier Analysis," *IEEE Trans. on ASSP*, Vol. 28, No. 1(1980) pp. 55-69, Feb.
 11. G. Beylkin, "On the Representation of Operators in Bases of Compactly Supported Wavelets," *SIAM Journal on Numerical Analysis*, Vol. 29(1992) pp. 1716-1740, December
 12. Stamatis Cambanis, Elias Masry, "Wavelet Approximation of Deterministic and Random Signals : Convergence Properties and Rates," *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol. 140(1994) No. 4, July
 13. M. Kay, *Fundamental of Statistical Signal Processing*, Prentice-Hall Inc., Chap. 6, 1993.
 14. R. H. Shumway, *Applied Statistical Time Series Analysis*, Prentice Hall, Chap. 3(1988)
 15. G. Strang, *Linear Algebra and its Applications*, 3rd Ed., Florida, Harcourt Brace Jvanovich Inc., Chap. 7(1988)