

다중-가우시안 빔 모델을 이용한 초음파 탐상 시험 시뮬레이션에 관한 연구

송성진*·김학준**

A Study on Ultrasonic Testing Simulation using the Multi-Gaussian Beam Model

Sung-Jin Song, Hak-Joon Kim

Key Words: ultrasonic testing(초음파 시험), simulation(모사), multi-gaussian beam model(다중-가우시안 빔 모델)

Abstract

Recently, ultrasonic testing simulation has become very important in the field of nondestructive evaluation due to its unique capability of providing testing signals without real inspection. The ultrasonic testing simulation requires three elementary models including the transducer beam radiation model, the flaw scattering model, and the reception model. In the present work, we briefly describe an approach to develop the ultrasonic testing model together with its elementary models with the multi-gaussian beam model. Based on this approach, we developed ultrasonic testing simulation program with MATLAB. The performance of the developed program is demonstrated by the predicting of ultrasonic signals from two types of flaws, circular crack and spheres.

1. 서론

최근 기계 구조물 등의 피검체에 내재하는 여러 가지 결함의 검출 확률(Probability of Detection: POD) 향상과 결함의 정량적 평가를 위해 초음파 탐상 시험 시뮬레이션 기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 초음파 탐상 시험 시뮬레이션은 초음파 탐상 시험 수행 시 발생하는 물리적 현상에 대한 수식적 표현인 초음파 측정 모델(Ultrasonic Measurement Model)을 이용하여 초음파 결함 신호를 예측하는 기법을 말하

는데, 초음파 탐상 시험을 수행하지 않고도 검사 대상체의 형상 및 재질에 관한 정보를 가지고 임의의 위치에 존재하는 결함으로부터 반사되는 초음파 결함 신호를 미리 예측할 수 있을 뿐만 아니라, 더 나아가서는 이를 토대로 주어진 피검체 검사를 위한 초음파 탐상 시험의 최적 조건을 설정할 수 있기 때문에 국내·외적으로 다양한 연구가 부단히 수행되고 있다(1-3).

초음파 탐상 시험 시뮬레이션 기법 개발을 위해서는, 초음파 탐상 시험에 관련된 물리적 현상에 대한 모델을 설정해야 하는데, 이는 크게 1) 초음파 탐촉자로부터 발진되어 피검체를 전파하는 방사 음장의 모델링, 2) 결함에 의해 산란되는 산란 음장의 모델링, 그리고 3) 산란된 음장을 수신 탐촉자로 수신하는 과정에 대한 모델링의 세 단계로 나누어 생각할 수 있으며, 보다 실

* 성균관대학교 기계공학부

** 성균관대학교 대학원

제적인 초음파 탐상 시험 환경을 표현하기 위해서 탐촉자와 시험체 경계면에서 굴절 및 반사, 감쇠와 회절에 의한 손실, 전기적 노이즈 등도 포함되어야 한다.

초음파 탐상 시험 시뮬레이션 기법에 관한 연구로는 약 40년 전 Freedman(4)은 탐촉자의 원거리 음장에 존재하는 산란체에 의한 펄스-에코 반응을 고주파 근사해를 이용하여 구함으로써 이 분야 연구의 개척자가 되었다. 그 이후 McLaren과 Weight(5), 그리고 그 밖의 여러 연구자들은 Freedman과 비슷한 방법을 이용하여 펄스-에코 반응을 구하였으며, Thompson과 Gray(6)는 초음파 탐상 시험 모델링 분야에서 기념비적 업적인 초음파 측정 모델(ultrasonic measurement model)을 제안하였는데, 이 모델이 초음파 탐상 시험에서 획득한 실제 신호를 이론적으로 예측할 수 있는 실질적 토대를 제공한 것으로 평가되고 있다. 그러나, 이들 연구에서 제안된 모든 모델은 결함의 형상이 점 산란체(point scatterer)라든지 결함의 위치가 초음파 빔의 중심축에 위치해야 한다는 등의 여러 가지 제약을 가지고 있다. 그러나, Schmerr와 그 동료들에 의해 이러한 제약이 대폭 완화된 모델들이 지속적으로 개발되어, 지금은 임의의 형상을 갖는 결함이 초음파 탐촉자에 대해 임의의 위치에 있을 경우에도 적용할 수 있는 매우 일반화된 모델들이 개발되었다(7,8). 또한, Schmerr는 다중-가우시안 빔 모델을 이용하여 기존의 모델의 단점인 방대한 계산시간을 단축시킨 초음파 탐상 시험 시뮬레이션 기법을 개발한 바 있다(8).

본 연구에서는 다중-가우시안 빔 모델을 이용한 초음파 탐상 시뮬레이션 기법과 이를 이용하여 수직 탐상 시험과 사각 탐상 시험시 연계되는 초음파 탐상 신호를 예측하고자 한다.

2. 초음파 탐상 시험 모델링

2.1 초음파 탐상 시험 모델링

초음파 탐상 시험 모델링은 초음파 탐상 시험 전과정(초음파 빔의 전파, 결함으로부터 산란, 산란된 신호의 수신)을 수학적으로 기술하고 그

해를 이론적으로 도출하는 것이다. 초음파 탐상 시험의 과정을 살펴보면 초음파 탐상 시스템과 초음파 탐촉자에 의해 발진된 초음파 신호가 재질내을 전파하고, 전파된 초음파 신호가 결함에서 산란되어 수신용 초음파 탐촉자를 통해 수신되고, 이를 다시 전기적 신호로 변화하여 CRT 상에 나타나게 된다. 따라서, 서론에서도 언급한바와 같이 초음파 탐상 시험 모델은 초음파 탐상 시스템 모델, 초음파 탐촉자 방사 음장 모델, 산란 음장 모델, 산란과 수신모델로 구성되어져 있으며, 이들 모델을 하나로 통합함으로써, 초음파 결함 신호를 예측 할 수 있다. 본 논문에서 초음파 탐상 시뮬레이션 위해 사용한 각 요소 모델들은 다음과 같다.

2.2 초음파 탐촉자 방사 음장 모델

초음파 탐촉자 방사 모델은 초음파 빔이 초음파 탐촉자에서 발진하여 결함에 도달하기까지의 과정을 모델링 한 것으로서, 초음파 탐촉자 방사 음장 모델링 기법으로는 Rayleigh-Sommerfeld 적분모델, 경계회절파모델, 가장자리 요소모델, 가우시안모델, Gauss-Hermite 모델, 다중-가우시안 빔 모델등이 있다. 본 논문에서는 이들 모델 중에서도 기존 연구를(9) 통해 계산 시간 및 정확성 면에서 가장 효과적인 다중-가우시안 빔 모델을 사용하였다. 다중-가우시안 빔 모델은 가우시안 형상을 갖는 빔의 중첩을 통해 피스톤 소스를 갖는 원형 초음파 탐촉자의 방사 음장을 구하는 모델로서, 다중-가우시안 빔 모델을 이용하여 Fig. 1과 같은 경계를 지나는 초음파 방사음장은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

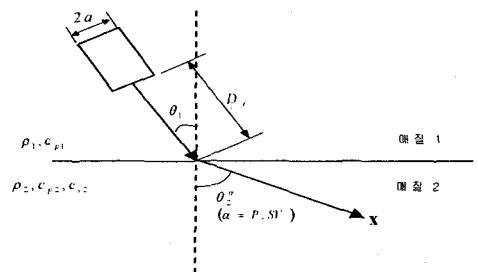


Fig. 1 Propagation of a Gaussian wave through a fluid-steel interface

$$p(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{n=1}^N d^n \frac{A_n}{1 + \left(\frac{iB_n D_f}{x_r} \right)} T_{12}^{\alpha\beta} \frac{\sqrt{\det G_2^\alpha(0)}}{\sqrt{\det G_2^\alpha(x_3)}} \exp(ik_1 D_f) \exp\left(\frac{ik_1 \mathbf{X}_2^T [G_2^\alpha(x_3)]^{-1} \mathbf{X}_2}{2} \right) \quad (1)$$

여기서,

$$[G_2^\alpha(0)]_{11} = \frac{\frac{\cos \theta_2^\alpha}{\cos \theta_1} [G_1^\alpha]_{11}}{\frac{\cos \theta_1^\alpha}{\cos \theta_2^\alpha} + \frac{h_{11}(\cos \theta_1 - (c_1/c_2^\alpha) \cos \theta_2^\alpha)}{\cos \theta_1 \cos \theta_2^\alpha} [G_1^\alpha(z_1)]_{11}}$$

$$[G_2^\alpha(0)]_{22} = \frac{[G_1^\alpha]_{22}}{1 + h_{22}(\cos \theta_1 - (c_1/c_2^\alpha) \cos \theta_2^\alpha) [G_1^\alpha(z_1)]_{22}}$$

$$[G_2^\alpha(0)]_{12} = [G_2^\alpha(0)]_{21} = 0$$

이며,

$$[G_2^\alpha(z_2)] = [G_2^\alpha(0)] + \frac{c_2^\alpha}{c_1} z_2,$$

$$(G_1^\alpha(D_f))_n = \left(D_f - \frac{ik_1 a^2}{2B_n} \right) I,$$

$$(G_1^\alpha(0))_n = \left(\frac{ik_1 a^2}{2B_n} \right) I \text{ 이다.}$$

여기서, n 은 중첩한 가우시안 빔의 수이며, A_n 과 B_n 은 중첩하고자하는 각각의 가우시안 빔의 폭을 결정하는 계수이고, a 를 탐촉자의 반경, ρ 를 매질의 밀도라 하면, $\xi = \rho/a$ 이고, z_R 은 Rayleigh 거리인 $1/2ka^2$ 이고, D_f 는 탐촉자 면에서부터 경계까지의 초음파 빔의 이동 거리, $d^\alpha (\alpha = P, SV)$ 는 분리벡터, ($P =$ 종파, $SV =$ 횡파), $T_{12}^{\alpha\beta}$ 는 매질 1에서 2로의 초음파 빔의 투과 계수, c_1 은 매질1에서의 속도, c_2^α 는 매질 2에서의 속도, h_{11}, h_{22} 는 경계면의 곡률반경, \mathbf{X} 는 매질 2의 임의의 점이다.

2.3 산란 음장 모델

산란 음장 모델은 초음파 탐촉자 방사 음장 모델을 통해 결함에 도달한 음압이 결함에 의해 산란되는 과정을 모델링 한 것으로서, 산란 음장

모델로는 Kirchhoff 근사법, MOTT(Method of Optimal Truncation), Born 근사법, GTD등이 있다. 본 논문에서는 이들 산란 음장 모델 중에서 Kirchhoff 근사법을 사용하였다. Kirchhoff 근사법을 이용하여, 방사음압 p_0 가 \mathbf{e}_i 방향에서 입사되어 \mathbf{e}_s 방향으로 산란될때의 음압 $p^{scat}(\mathbf{x}, \omega)$ 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$p^{scat}(\mathbf{x}, \omega) = p_0 A(\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_s) \frac{\exp(ikr_s)}{r_s} \quad (2)$$

$$A(\mathbf{e}_i, \mathbf{e}_s) = -\frac{1}{4\pi} \int_S \left[\frac{\partial \bar{p}}{\partial n} + ik(\mathbf{e}_s \cdot \mathbf{n}) \bar{p} \right] \exp(-ik\mathbf{x}_s \cdot \mathbf{e}_s) dS \quad (3)$$

이다. 여기서, $\bar{p} = \frac{p}{p_0}$. S 는 결함 표면이다.

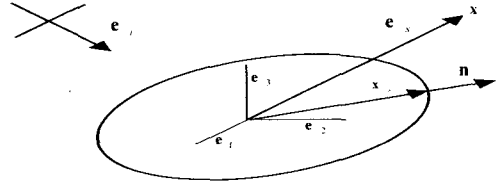


Fig. 2 Scattering geometry for defining the far-field scattering amplitude

식 (3)에서 보인바와 같이 Kirchhoff 근사법은 결함 표면을 미소면적 dS 로 분할하고, 각 분할 요소에서의 산란 음압 구하고, 결함 표면에 대하여 적분으로써, 구하는 기법이다. 그러나, 만약 결함의 형태가 수학적으로 표현이 가능한 결함 형태(타원체, 타원 등)에 대하여는 간단한 식으로 산란 음장을 구할 수 있다. 대표적인 결함 형태인 체적성 결함(타원체)과 원형 결함에 대한 산란 음장은 다음 식과 같이 간략히 쓸 수 있다. 우선, 체적성 결함인 타원체를 펄스-에코법으로 산란파를 수신할 때의 산란음장에 대한 Kirchhoff 근사법은 식 (4)을 나타낼 수 있다.

$$A(\mathbf{e}_i - \mathbf{e}_i) = -\frac{a_{1s} a_{2s} a_{3s}}{2j_e^2} \exp(-ikr_e) \left[\exp(-ikr_e) - \frac{\sin(kr_e)}{kr_e} \right] \quad (4)$$

$$r_e = \sqrt{a_{1s}^2(e_i \cdot e_1)^2 + a_{2s}^2(e_i \cdot e_2)^2 + a_{3s}^2(e_i \cdot e_3)^2}$$

여기서, a_1, a_2, a_3 는 타원체의 각 축의 길이이며, e_1, e_2, e_3 은 각 축방향의 단위벡터이다.

또한, 원형 결합에 대한 산란 음장은 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$A(e_i, e_s) = \frac{ika_{1s}a_{2s}(e_i \cdot n)}{|e_i - e_s| r_e} J_1(k|e_i - e_s| r_e) \quad (5)$$

여기서,

$$r_e = \sqrt{a_{1s}^2(e_q \cdot e_1)^2 + a_{2s}^2(e_q \cdot e_2)^2}$$

$$e_q = \frac{e_i - e_s}{|e_i - e_s|} \text{ 이다.}$$

2.4 산란파 수신 모델

산란파 수신 모델링 기법은 2.2에서 언급한 초음파 탐촉자 방사 음장의 역방향 모델로써, 본 논문에서는 탐촉자 면까지의 산란파 전파 모델은 Multi-Gaussian 빔 모델을 사용하였으며, 탐촉자 면에 도달한 산란파의 수신은 다음과 같은 식을 통하여 구할 수 있다.

$$p_{ave}(\omega) = \frac{1}{S_r} \int_{S_r} p^{scatt}(y, \omega) dS(y) \quad (6)$$

여기서, p^{scatt} 는 결합으로부터의 산란음장이며, S_r 은 수신 탐촉자의 면적이다.

3. 초음파 탐상 시험 시뮬레이션

3.1 초음파 탐촉자 방사음장 시뮬레이션

앞 장에서 언급한 다중 가우시안빔 모델을 이용하여 초음파 탐촉자로부터 방사된 초음파 빔이 재료내를 전파되는 초음파 탐촉자 방사 음장에 대한 시뮬레이션을 Mat lab을 이용하여 다음과 같이 수행하였다. 초음파 탐촉자에서 발진한 초음파 빔이 단일 재료 내를 전파하는 경우에 대하여는 선행 연구를 통해 수행하였으며(9). 본 논문에서는 경계를 갖는 재료 내를 전파하는 과정에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 3은 초음파 빔이 물에서 철로 10°로 평

판형 계면에 경사 입사한 경우에 대한 결과이며, Fig. 4는 물에서 철로 10°로 곡률반경이 50 mm인 곡면에 경사 입사한 경우이며, Fig. 5는 Fig. 4와 반대 방향의 곡률반경(-50 mm)를 갖는 곡면에 경사입사 되었을 때의 초음파 빔의 진행을 시뮬레이션 한 결과이다.

그리고, Fig. 6은 사각 탐상 시 수행하게되는 1 skip법의 적용을 위해 바닥 면에서의 반사를 고려한 초음파 탐촉자 방사음장을 구하였다. Fig. 3-6의 결과는 초음파 빔의 전파 과정의 가시화를 위해 투과계수($T_{12}^{\alpha p}$)를 적용하지 않은 결과이다. 실제로 투과계수를 적용하게 되면 철로 투과된 음압이 매우 작아서 거의 보이지 않게 되는데, 그 이유는 Fig. 7에 보이는 보와 같이 투과계수가 매우 낮기 때문이다.

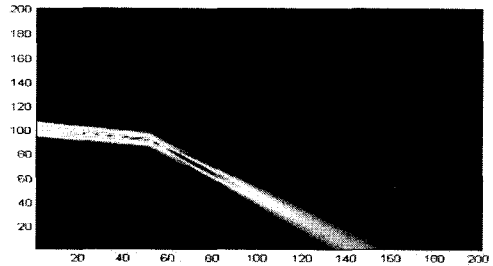


Fig. 3 Radiation beam from a 5 MHz, 6 mm radius planar transducer incident at 10 degree to a planar water-steel interface

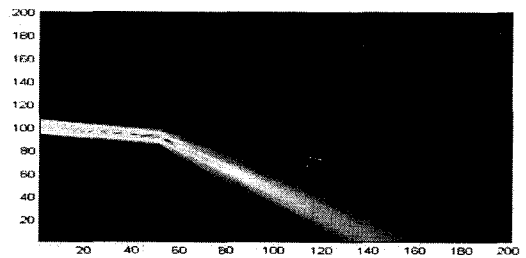


Fig. 4 Radiation beam from a 5 MHz 6 mm radius planar transducer incident at 10 degree to a curved water-steel interface (h = 50)

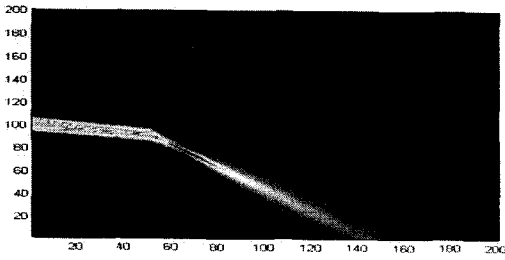


Fig. 5 Radiation beam from a 5 MHz 6 mm radius planar transducer incident at 10 degree to a curved water-steel interface ($h = -50$)

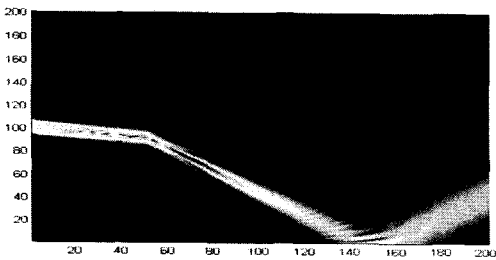


Fig. 6 Reflection of the refracted beam (shown in Fig. 3) from a planar water-steel interface

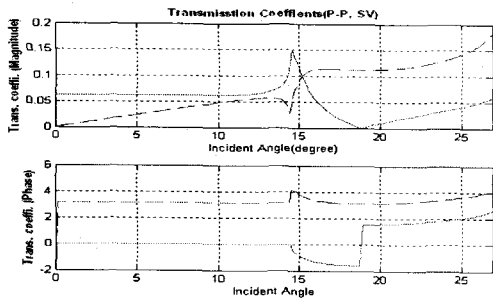


Fig. 7 The P-wave(solid line) and SV (dotted line) transmission coefficients for a water-steel interface

3.2 산란 음장 시뮬레이션

결함으로부터 산란되는 산란음장을 2장에서 언급한 바 있는 Kirchhoff 근사법을 이용하여 구하였다. 산란음장은 주파수 변화에 따라 산란 음장의 크기가 변화하기 때문에, 본 논문에서는 대

표적인 결함 형태인 구형 결함(체적성 결함)과 원형 결함(균열성 결함)에 대하여 주파수 변화에 따른 산란음장의 크기를 구와 원형 균열에 대하여 다음 같이 구하였다. 그림 8은 지름이 1 mm인 결함으로부터 산란되는 음장을 0.1 MHz부터 30 MHz까지 구한 결과이며, 그림 9는 지름이 1 mm인 원형 결함에 20° 각도로 입사한 경우에 대한 산란 음장의 크기를 0.1 MHz부터 30 MHz까지 구한 결과이다.



Fig. 8 Pulse-echo scattering amplitude from a 1 mm radius sphere

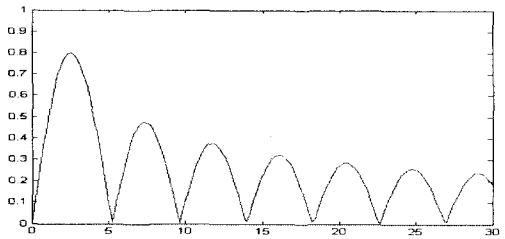


Fig. 9 Pulse-echo scattering amplitude from a 1 mm radius crack of 20 degree

3.3 초음파 탐상 시험 시뮬레이션

3.3.1 수직탐상 시험 시뮬레이션

Fig. 10과 같이 수직 초음파 시험을 수행시 예상되는 초음파 신호를 위에서 언급한 초음파 탐촉자 방사음장 모델, 산란음장 모델, 산란파 수신모델을 이용하여 구하였다. 좀더 정확한 초음파 신호 예측을 위하여 초음파 탐상 시스템 모델을 시스템 효율인자 $\beta(\omega)$ 를 도입하여 적용하였다. 본 논문에서 시뮬레이를 위해 초음파 탐촉자의 반지름은 6 mm이며, 중심 주파수는 5 MHz 이고, 주파수 대역폭은 2 MHz로 설정하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 11은 초음파 빔이 물에서 전파하여 시험편 경계면에서 반사되어 발신탐

축자에 수신된 초음파 신호를 예측한 결과이다. 경계면에서 반사되는 신호를 예측한 이유는 보통 수직 탐상을 수행시 얻게되는 초음파 신호는 크게, 경계면 반사 신호, 결함 신호, 저면 에코를 얻게되는데, 본 논문에서는 경계면 반사 신호와 결함신호만을 구하였다. Fig. 12는 시험편내에 반지름 2 mm인 원형 결함이 경계면으로부터 20 mm 떨어진곳에 위치하고 있을 때 얻게되는 초음파 신호를 시뮬레이션 한 결과이다.

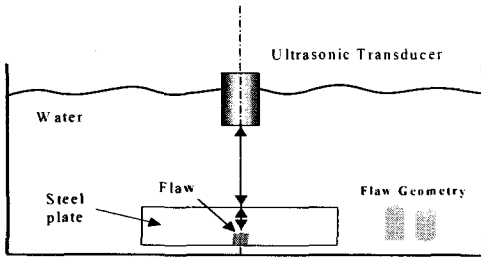


Fig. 10 An ultrasonic immersion testing setup for the ultrasonic testing simulation

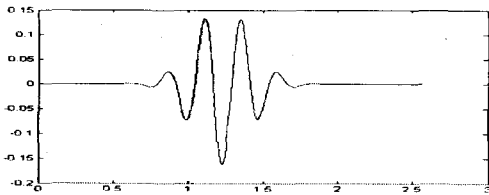


Fig. 11 Reflected Signal from a water-steel interface (with the water path length of 20 mm) captured by the transducer with 5 MHz center frequency and 2 MHz bandwidth.

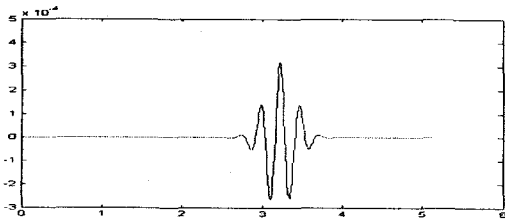


Fig. 12 The on-axis response from 2 mm radius circular crack (located from 20 mm under the surface)

Fig. 13은 시험편내에 반지름 3 mm인 원형 결함이 경계면으로부터 5 mm 떨어진 곳에 위치하고 있을 때 얻게 되는 초음파 신호를 시뮬레이션 한 결과로써, 이 결과를 보면 경계면에서의 반사 신호가 매우 크며, 결함신호가 경계면에서의 반사 신호에 묻혀 있기 때문에 결함 신호에 대한 정확한 판독이 매우 어렵게 된다. 그러나, Fig. 14보면 Fig. 13의 경계면 신호 속에 묻혀있는 결함신호를 확인할 수 있다. 따라서, 초음파 탐상 시험 시뮬레이션을 통해 경계면 신호를 얻은 후, 이를 분리함으로써, Fig. 13과 같은 경우에도 결함 신호만을 정확하게 검출해 낼 수 있을 것이다.

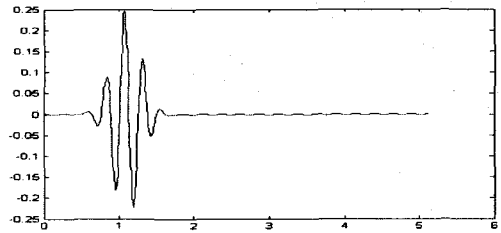


Fig. 13 The on-axis response from 3 mm radius circular crack (located from 5 mm under the surface) together with the front surface reflection.

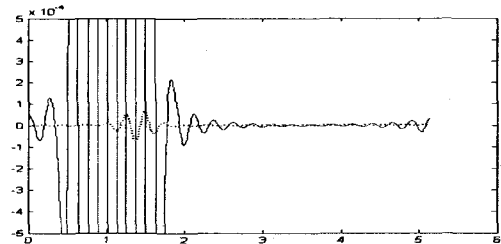


Fig. 14 The on-axis response of 3 mm radius circular crack which locate the 5 mm from the surface, where a 5 MHz center frequency and 2 MHz bandwidth and 20 mm water path length (solid line : reflected signal, dotted line: flaw signal)

Fig. 15는 반지름이 5 mm인 구가 경계면에서

50 mm 떨어진 곳에 위치할 때 얻게 되는 초음파 신호의 시뮬레이션 결과이다.

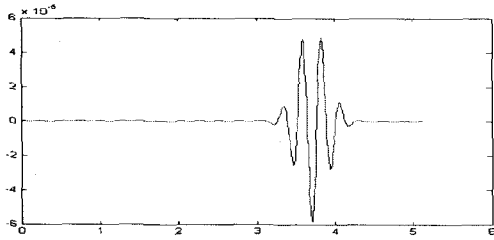


Fig. 15 The on-axis response from 5 mm radius sphere (located from 20 mm under the surface)

3.3.2 사각탐상 시험 시뮬레이션

사각탐상 시험 시뮬레이션을 위하여 fig. 16 과 같은 검사 조건을 설정하고, 결함에 입사되는 입사각의 변화에 따른 결함 신호의 변화를 예측하는 시뮬레이션을 수행하였다. fig. 17은 반지름이 5 mm 인 균열에 수직 입사한 경우에 얻게되는 신호를 시뮬레이션 한 결과이며, fig. 18은 20° 로 경사 입사된 경우이며, fig. 19는 45° 로 경사 입사되었을 때 얻게되는 결함 신호의 시뮬레이션 결과이다. Fig. 16과 17에 보인바와 같이 각도가 커짐에 따라, 결함의 양끝 단에서 산란되는 신호가 분리됨을 알 수 있다. 이를 이용하면, 검출 결함의 크기를 산정 할 수 있을 것이다.

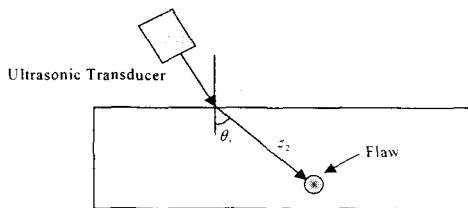


Fig. 16 An angle beam ultrasonic immersion testing setup for the ultrasonic testing simulation

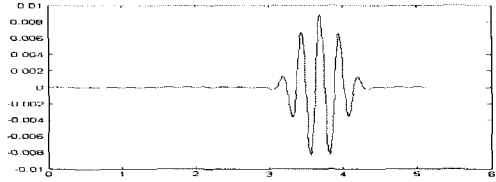


Fig. 17 The on-axis response from 5 mm radius circular crack at normal incidence (captured by the transducer with 5 MHz center frequency and 2 MHz bandwidth, with the 20 mm water path length and 20 mm steel path length).

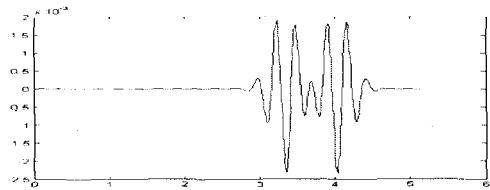


Fig. 18 The on-axis response from 5 mm radius circular crack at 20 degree oblique incidence (captured by the transducer with 5 MHz center frequency and 2 MHz bandwidth, with the 20 mm water path length and 20 mm steel path length).

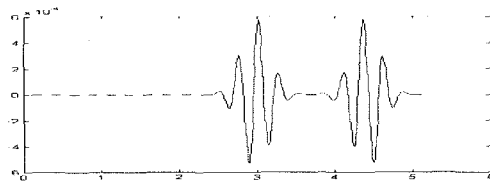


Fig. 19 The on-axis response from 5 mm radius circular crack at 45 degree oblique incidence (captured by the transducer with 5 MHz center frequency and 2 MHz bandwidth, with the 20 mm water path length and 20 mm steel path length).

4. 결론

본 논문에서는 초음파 탐상 시험 시뮬레이터 개발에 필수적인 초음파 탐촉자 방사음장 모델, 산란 음장 모델, 산란파 수신 모델에 대하여 논의 하였으며, 이를 이용하여 초음파 탐상 시험 시뮬레이션을 수행하여 초음파 탐상 시험 시 얻게 되는 초음파 신호를 예측하여 보았다. 초음파 탐상 시험 시뮬레이션을 이용함으로써, 정성적으로 이해하고 있는 초음파 빔의 전파 과정 및 결합으로부터의 산란 신호들을 가시화 할 수 있으며, 결합 신호와 피검체 형상에 의한 신호를 모두 예측함으로써, 수신한 초음파 신호로부터 결합 신호만을 분리 할 수 있으며, 또한, 균열성 결합 신호를 예측함으로써, 균열 크기 산정에 활용할 수 있을 것으로 생각된다. 그리고, 초음파 탐상 시험 시뮬레이션을 통해 다양한 형태의 결합에 대한 초음파 탐상 시험 신호를 예측 할 수 있기 때문에, 작업자의 교육 및 탐상 조건 변화에 따른 결합 신호를 예측함으로써 초음파 탐상 시험 수행 시 필요한 최적 탐상조건을 객관적으로 설정할 수 있을 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-30400-013-3) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) J. D. Achenbach, 1992, "Mathematical Modeling for Quantitative Ultrasonics," *Nondestr. Test. Eval.*, Vol. 8-9, pp. 363-377.
- (2) D. A Hutchins and G. Hayward, 1990, "Radiated fields of ultrasonic transducers," *Physical Acoustics: Ultrasonic measurement methods*, eds. R. N. Thurston and A. D. Pierce, Academic press, New York, Vol. 19, pp. 1-80.
- (3) L. W. Schmerr, 1998, *Fundamentals of*

ultrasonic nondestructive evaluation: A modeling approach, Pleum, NewYork, USA.

- (4) A. Freedman, 1962, "The High Frequency Echo Structure of Some Simple Body Shapes," *Acoustica*, Vol. 12, pp. 61-70.
- (5) S. McLaren and J. P. Weight, 1987, "Transmit-Receive Mode Responses from Finite Sized Targets in Fluid Media," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 82, pp. 2102-2112.
- (6) R. B. Thompson and T. A. Gray, 1983, "A Model Relating Ultrasonic Scattering Measurements Through Liquid-Solid Interfaces to Medium Scattering Amplitudes," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 74, pp. 1279-1290.
- (7) S. J. Song, L. W. Schmerr and A. Sedov, 1993, "A Frequency Domain Ultrasonic Model for the Pulse-Echo Transducer Response of an Arbitrary Scatterer in a Fluid," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 5, pp. 111-122.
- (8) L. W. Schmerr, 2000, "A multigaussian ultrasonic beam model for high performance simulations on a personal computer," *Material evaluation*, Vol. 58, No.7, pp. 882-888
- (9) 송성진, 김학준, 2000, "단일 매체에서의 평면 초음파 탐촉자의 방사 음장 모델링 기법," *한국비파괴검사학회지*, Vol. 20, No. 2, pp. 91-101.