

## 초음파탐상시험 모델링과 그 응용

### Modeling of Ultrasonic Testing and Its Application

송 성 진\*  
 Sung-Jin Song\*

#### 1. 서 론

현재 산업 현장에서 널리 사용되고 있는 초음파 탐상 시험에서는 Fig. 1에 보인 바와 같이 작업자가 이동식 초음파 탐상기를 수작업으로 조작하면서 검사를 수행한다. 이 때, 초음파 탐상기에서 발진된 초음파는 초음파 탐촉자를 통해 피검체 내로 전파하여 결함에 이르고, 결함으로부터 반사되어 다시 초음파 탐촉자로 수신된다. 그러면, 초음파 탐상기의 CRT 화면상에 나타난 결함 신호를 작업자가 육안으로 확인하여 이 신호로부터 결함의 위치, 종류 그리고 크기 등의 특성을 판단하는 결함평가를 수행한다. 즉, 초음파 탐상 시험이란 초음파 탐상기에 나타난 신호를 보고 결함의 특성을 결정하는 역방향 문제(inverse problem)인데, 이 문제에 대한 답을 작업자가 도출한다. 따라서 그 해답의 정확도가 작업자의 경험과 지식에 따라 크게 달라질 수밖에 없기 때문에, 초음파 탐상 시험에서 작업자는 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 그래서 초음파 탐상 시험을 비롯한 모든 비파괴 검사에서는 작업자의 기량을 향

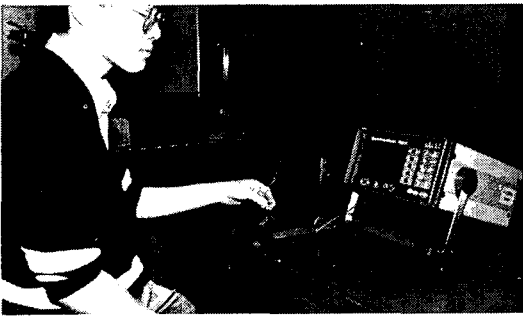
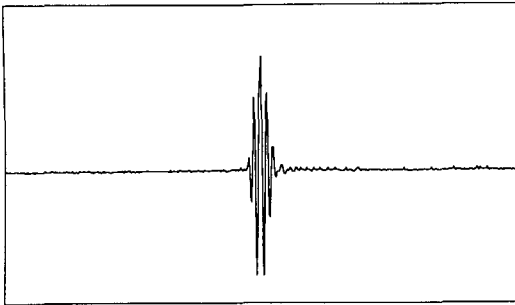


Fig. 1 Ultrasonic testing

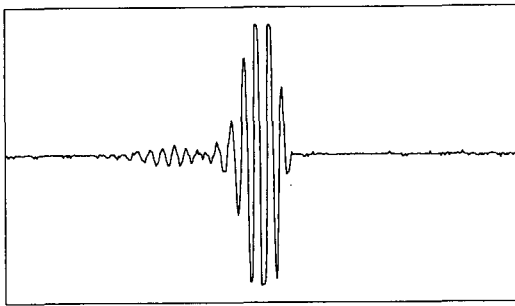
상시키기 위한 교육과 훈련, 그리고 엄정한 자격 관리가 매우 중요한 과제가 되고 있으며, 이를 위해 막대한 재원이 투입되고 있다.

그러나, 이러한 노력에도 불구하고, 실제 산업 현장에서 이루어지는 작업자에 의한 초음파 탐상 시험의 결과 해석은 아직도 그 객관적 신뢰성이 만족할 만한 수준에 이르지 못하고 있는데, 이것을 단순히 작업자 탓으로만 들릴 수는 없다. 왜냐하면, 초음파 탐상 신호는 탐상기, 탐촉자, 시편, 접촉매질, 결함 등 여러 가지 인자의 변화에 따라 민감하게 반응하기 때문에, 이러한 제반 인자가 초음파 탐상 신호에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수 있을 때에만 비로소 결과 해석의 신뢰성을 확보할 수 있다. 그런데, 작업자에 의한 결과 해석에서는 이러한 분석이 현실적으로 매우 어려운 실정이기 때문이다.

이러한 어려움을 우선 간단한 예를 들어 생각해 보자. Fig. 2는 2개의 초음파 신호를 보여주고 있는데, 이들 신호는 똑 같은 결함에서 공칭 주파수가 서로 다른 두 개의 탐촉자를 사용하여 획득한 것이다. Fig. 2(a)는 4MHz 탐촉자를 사용하여 획득한 것이고, Fig. 2(b)는 2MHz 탐촉자를 사용하여 얻은 것이다. 여기에서 이런 상상을 해보자. Fig. 2(a)의 신호를 보고, 이것이 어떤 주파수를 중심 주파수로 갖는 탐촉자를 가지고 획득한 신호인지 알아맞힐 수 있겠는가? 아마 가능할 것이다. 그렇다면, 이 신호를 획득한 초음파 탐상기의 개인 값을 6dB 증가시킬 때 어떤 신호를 얻게 되는지 알 수 있겠는가? 물론 알 수 있을 것이다. 그렇다면, 이제 여타 탐상 조건은 변화시키지 않고 탐촉자만 중심 주파수가 2MHz인 것으로 바꾼다면, 어떤



(a) A signal captured by a 4 MHz transducer



(b) A signal captured by a 2 MHz transducer

Fig. 2 Ultrasonic testing signals

신호가 나오지 예측할 수 있겠는가? 지금 독자의 머릿속에 그려보는 신호가 Fig. 2(b)의 신호와 같은가? 아마도 숙련된 작업자라면 비슷한 신호를 그려낼 수 있을 것이다. 자, 이제 평면 탐촉자 대신 집속 초음파 탐촉자를 사용한다면, 신호의 모양이 어떻게 될까? 혹은, 집속 거리를 바꾼다면? 이번에는 결함의 위치와 형상은 그대로 두고 결함의 크기만 바꾼다면? 또 결함의 형상을 바꾼다면, 등등...

매우 경험이 풍부하고 실력이 탁월한 작업자라면 아마도 이러한 범주의 문제에 대한 나름대로의 해답을 가지고 있을 것임에 틀림없다. 왜냐하면, 이것이 바로 작업자가 주어진 피검체를 어떻게 검사할지를 결정할 때 반드시 생각해야 하는 문제이기 때문이다. 그렇다면, 그다지 경험이 풍부하지 못한 초심자들은 어떻게 이러한 의문을 해결할 수 있을까? 혹은 이런 초심자를 어떻게 하면 빠른 시간 내에 전문가로 양성할 수 있겠는가? 물론, 실험을 통해 직접 확인하는 방법이 가장 확실할 것이다. 그러나, 이 경우 엄청난 비용이 소요될 것임은 주지의 사실이다. 초음파 탐상 시험 모델링은 바로 이

러한 문제에 대한 매우 효율적인 대안으로 인식되고 있는 기술로서, 초음파 탐상 시험의 물리적 현상에 대한 모델을 설정하고 그 이론적 해를 구함으로써, 최종적으로는 초음파 탐상 신호를 이론적으로 예측하는 것을 말한다.

모델링을 통해 초음파 탐상 신호를 예측하기 위해서는, 초음파 탐상 시험에 관련된 물리적 현상에 대한 모델을 설정하여야 하는데, 이것을 크게 1) 초음파 탐촉자로부터 발진되어 피검체를 전파하는 방식 음장의 모델링, 2) 결함에 의해 산란되는 산란 음장의 모델링, 그리고 3) 산란된 음장을 수신 탐촉자로 수신하는 과정에 대한 모델링의 세 단계로 나누어 생각할 수 있다. 그리고, 이 세 단계를 하나로 묶으면 초음파 탐상 신호를 예측할 수 있는, 이른 바 "초음파 탐상 시험 모델 (ultrasonic testing model)"이 된다. 초음파 탐상 시험 모델에 대한 연구는 비교적 오랜 역사를 가지고 있다. 약 40년 전 Freedman[1-3]은 탐촉자의 원거리 음장에 존재하는 산란체에 의한 펄스-에코 반응을 고주파 근사해를 이용하여 구함으로써 이 분야 연구의 개척자가 되었다. 그 이후 McLauren과 Weight[4], 그리고 그 밖의 여러 연구자들[5-8]은 Freedman과 비슷한 방법을 이용하여 펄스-에코 반응을 구하였으며, Thompson과 Gray[9]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. 1990년대에 들어, Iowa State University의 Schmerr와 그 동료들[10-14]에 의해 이러한 제약이 대폭 완화된 모델들이 지속적으로 개발되어, 지금은 임의의 형상을 갖는 결함이 탐촉자에 대해 임의의 위치에 있는 경우에도 적용할 수 있는 매우 일반화된 모델이 알려져 있다. 최근 Schmerr는 그의 저서인 "Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation - A Modeling Approach"[15]"에서 지금까지의 연구 결과를 집대성하고, 초음파 탐상 시험 모델 구축을 위한 기법들을 자세히 소개하고 있다. 이러한 선진국의 활발한 연구 활동과는 대조적으로, 국내에서는 필자에 의해 부분 손상을 입은 초음파 탐촉자의

펄스-에코 모델[16]이 발표된 것을 제외하고는 관련 연구 수행이 극히 미흡한 실정이었다. 그러나, 다행히 1999년 우리 학회의 학술 제 2 분과 내에 모델링소분과가 발족되면서 관련 연구가 점차 활발해 지고 있다.

본 해설은 가장 간단한 초음파 탐상 시험 모델의 구축 방법 그리고 그 응용 분야에 대해 소개함으로써, 한국비파괴검사학회 회원 및 학회지 독자들의 초음파 탐상 시험 모델링에 대한 이해를 돕고자 한다.

2. 초음파 탐상 시험 모델

2.1. 단일 매질의 원거리 음장 초음파 탐상 시험 모델

Fig. 3에 단일 유체 매질 내의 원거리 음장에 있는 산란체(결함)를 pitch-catch 수침 시험으로 탐상한 경우를 도식적으로 나타내었다. 이것은 매우 간단한 경우의 예이기는 하지만, 실제적으로 초음파 탐상 시험에서 가장 많이 사용되는 배치 중의 하나이다. 따라서 여기에서는 이 시험에 대한 초음파 탐상 시험 모델을 구축하는 과정을 살펴봄으로써 초음파 탐상 시험 모델에 대한 이해를 돕고자 한다.

평면 혹은 구면 집속 피스톤 탐촉자에 의해 시간간좌적으로 가진되는 경우, 음속  $c$ 인 유체 내의 한 점  $\mathbf{x}$ 에 발생한 음장  $p(\mathbf{x}, \omega)$ 는 Rayleigh-Sommerfeld 적분 [17]에 의해 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$p(\mathbf{x}, \omega) = - \left( \omega \rho v_0 / 2\pi \right) \int_S \frac{\exp(i k r)}{r} dS(\mathbf{y}') \dots\dots (1)$$

여기에서,  $\omega$ 는 각 속도,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $v_0$ 는 송신 탐촉자 표면  $S_s$ 의 운동 속도,  $k$ 는 파수,  $r$ 은 송신 탐촉

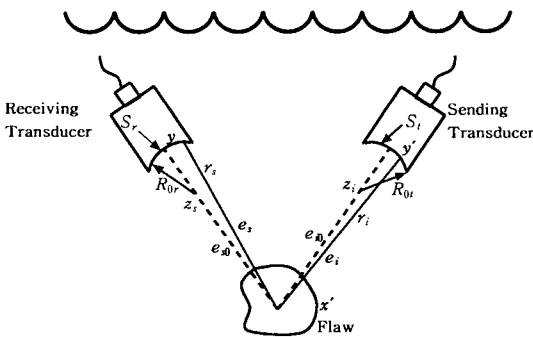


Fig. 3 Pitch-catch immersion testing

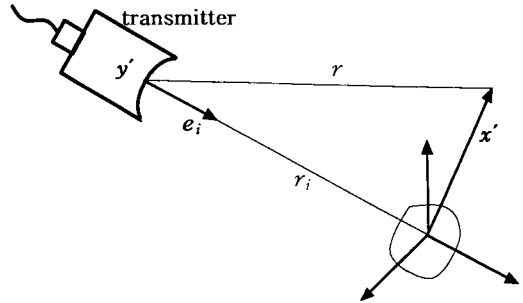


Fig. 4 Geometry for relating the distances  $r$  and  $r_i$  in the vicinity of flaw

자 표면의 한점  $\mathbf{y}'$ 와  $\mathbf{x}'$  사이의 거리이다. 이때 산란체가 송신 탐촉자의 원거리 음장에 있다면(즉  $r \gg d$ , 여기서  $d$ 는 산란체의 크기를 나타냄),  $r$ 은 식 (2)로 나타낼 수 있다. (Fig. 4 참조)

$$r = \sqrt{(r_i + \mathbf{x}') \cdot (r_i + \mathbf{x}')} \cong r_i + \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{x}' \dots\dots\dots (2)$$

여기에서,  $r_i$ 는 결함중심에 대한  $r$ 이며,  $\mathbf{e}_i$ 는  $r_i$  방향의 단위벡터이다. 식 (2)을 식 (1)의 구면파 항에 대입하면, 이 구면파는 산란체 부근에서 식 (3)과 같은 평면파의 거동으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\exp(i k r)}{r} \cong \frac{\exp(i k r_i)}{r_i} \exp(i \mathbf{k} \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{x}') \dots\dots\dots (3)$$

여기에서  $A(\mathbf{e}_i; \mathbf{e}_s)$ 를  $\mathbf{e}_i$  방향으로 입사한 단위 세기 평면파가 결함에 의해  $\mathbf{e}_s$  방향으로 산란된 산란파의 "평면파 원거리 음장 산란 세기(plane-wave far-field scattering amplitude)"라 하면, 송신 탐촉자로부터 발진된 초음파가 결함에 의해 산란된 산란파의  $\mathbf{y}$ 점에서의 산란 음압은 식 (4)로 쓸 수 있다.

$$p(\mathbf{y}, \omega) = \left\{ - \left( i \omega \rho v_0 / 2\pi \right) \int_{S_s} \frac{\exp(i k r_i)}{r_i} \cdot A(\mathbf{e}_i; \mathbf{e}_s) dS(\mathbf{y}') \right\} \frac{\exp(i k r_s)}{r_s} \dots\dots\dots (4)$$

이제, 식 (4)로 나타낸 산란파가 Fig. 3에 보인 수신 탐촉자(평면 혹은 구면 집속 피스톤 탐촉자로 가정)에 의해 수신되는 과정을 고려하자. 수신 탐촉자의 출력에 탐촉자 표면의 평균 음압,  $P_{ave}$ 에 비례한다고 가정하면, 이때  $P_{ave}$ 는 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$P_{ave}(\omega) = \frac{1}{S_r} \int_{S_r} p(\mathbf{y}, \omega) dS(\mathbf{y}) \dots\dots\dots (5)$$

여기에서  $S_r$ 은 수신 탐촉자의 면적을 나타낸다. 이제 식 (4)를 식 (5)에 대입하면  $P_{ave}$ 는 식 (6)이 된다.

$$P_{ave}(\omega) = - \left( i \omega p v_0 / 2\pi S_r \right) \int_{S_i} \int_{S_s} \frac{\exp(ikr_i)}{r_i} \frac{\exp(ikr_s)}{r_s} A(\mathbf{e}_i; \mathbf{e}_s) dS(\mathbf{y}') dS(\mathbf{y}) \dots\dots\dots (6)$$

만약 송신 탐촉자와 산란체 사이의 파속(wave bundle)의 각과, 수신 탐촉자와 산란체 사이의 파속의 각이 둘다 매우 작다면(이 가정은 원거리 음장에서는 자연스럽게 성립함), 식 (6)에 있는 산란 세기는 거의 일정하므로, 이를 적분 밖으로 끄집어 낼 수 있다. 그렇게 하면 식 (6)은 식 (7)이 된다.

$$P_{ave}(\omega) = \frac{-i \omega p v_0}{2\pi S_r} A(\mathbf{e}_{i0}; \mathbf{e}_{s0}) \int_{S_i} \frac{\exp(ikr_i)}{r_i} dS(\mathbf{y}') \cdot \int_{S_s} \frac{\exp(ikr_s)}{r_s} dS(\mathbf{y}) \dots\dots\dots (7)$$

여기에서,  $\mathbf{e}_{i0}$ 와  $\mathbf{e}_{s0}$ 는 각각 결합에서부터 송신 탐촉자와 수신 탐촉자 방향으로의 단위벡터(일정한 방향을 갖음)를 나타낸다(Fig. 3참조).

이제 식 (7)의 적분항을 평면 혹은 구면집속 피스톤 탐촉자에 대해 계산하면 식 (8)과 같이 됨을 알 수 있다.

$$\int_{S_i} \frac{\exp(ikr_i)}{r_i} dS(\mathbf{y}') = \frac{2\pi \exp(ikz_i)}{-ik} C_1(a_i, R_{0i}, \omega, z_i) \dots\dots\dots (8)$$

$$\int_{S_s} \frac{\exp(ikr_s)}{r_s} dS(\mathbf{y}) = \frac{2\pi \exp(ikz_s)}{-ik} C_1(a_s, R_{0s}, \omega, z_s)$$

여기에서,  $C_1(a, R_0, \omega, z)$ 는 반지름  $a$ , 초점 거리  $R_0$ 인 초음파 탐촉자에서 발진된 각 주파수  $\omega$ , 파수  $k(k = \omega/c)$ 의 초음파빔이 거리  $z$ 를 진행할 때 발생하는 회절현상을 보정해 주는 회절 보정 적분으로서 식 (9)

로 주어진다[15].

$$C_1(a, R_0, \omega, z) = \frac{1}{1-z/R_0} \left[ 1 - \exp\left(ika^2 \frac{1-z/R_0}{2z}\right) \right] \dots\dots\dots (9)$$

식 (8)과 식 (9)를 이용하면 식 (7)의 평균 음압은 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{ave}(\omega) = \rho c v_0 \exp[ik(z_i+z_s)] C_1(a_i, R_{0i}, \omega, z_i) \cdot A(\mathbf{e}_{i0}; \mathbf{e}_{s0}) C_1(a_s, R_{0s}, \omega, z_s) \left[ \frac{2\pi}{-ikS_r} \right] \dots\dots\dots (10)$$

만약 유체 매질의 감쇠를 고려한다면, 식 (10)에 적당한 감쇠항을 첨가하여 식 (11)과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{ave}(\omega) = \rho c v_0 \exp[ik(z_i+z_s)] \exp[-\alpha(z_i+z_s)] C_1(a_i, R_{0i}, \omega, z_i) A(\mathbf{e}_{i0}; \mathbf{e}_{s0}) \cdot C_1(a_s, R_{0s}, \omega, z_s) \left[ \frac{2\pi}{-ikS_r} \right] \dots\dots\dots (11)$$

여기에서  $\alpha = \alpha(\omega)$ 는 주파수의 함수인 감쇠계수이다. 그리고, 송신 탐촉자의 속도가 펄서에 의해 인가된 입력 전압  $V_i(\omega)$ 에 비례한다고 가정하면, 그 관계는 식 (12)로 나타낼 수 있다.

$$\rho c v_0(\omega) = \beta_i(\omega) V_i(\omega) \dots\dots\dots (12)$$

여기에서  $\beta_i(\omega)$ 는 펄서와 탐촉자로 이루어진 시스템의 입력 비례 계수이다. 마찬가지로 수신 탐촉자의 출력전압  $V_o(\omega)$ 가 평균 수신 음압에 비례한다고 가정하면, 이 관계는 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$V_o(\omega) = \beta_r(\omega) P_{ave}(\omega) \dots\dots\dots (13)$$

여기에서  $\beta_r(\omega)$ 는 시스템의 출력 비례 계수이다. 식 (11), 식 (12) 그리고 식 (13)을 결합하면, 최종적으로 식 (14)를 얻을 수 있다.

$$V_o(\omega) = \beta(\omega) \exp[ik(z_i+z_s)] \exp[-\alpha(z_i+z_s)] \cdot$$

$$C_1(a_r, R_{0r}, \omega z_s) \cdot A(e_{i0}; e_{s0}) C_1(a_r, R_{0r}, \omega z_s) \left[ \frac{2\pi}{-ik_s r} \right] \dots (14)$$

여기에서  $\beta(\omega)$ 는 "시스템효율인자(system efficiency factor)"로서 식 (15)로 나타낼 수 있다.

$$\beta(\omega) = \beta_i(\omega) \beta_r(\omega) V_i(\omega) \dots (15)$$

식 (14)가 단일 유체 매질 속에 결함이 들어 있을 때 얻게 되는 초음파 신호의 어떤 특정 주파수 성분에 대한 값이다. 이 값이 물론 시간 영역의 초음파 신호를 표현하는 것은 아니다. 그러나, 초음파 탐촉자가 포함하고 있는 주파수 성분을 모두 계산한 후 역푸리에변환(inverse Fourier transformation)을 수행하면, 우리가 탐상기 화면에서 볼 수 있는 시간 영역에서의 결합 신호를 쉽게 얻을 수 있다.

2.2. 유체 매질 내 피검체의 원거리 음장 초음파 탐상 시험 모델

단일 유체 매질 내에 있는 산란체 뿐만 아니라 Fig. 5에 보인 바와 같이 유체 매질에 잠겨 있는 피검체 내의 결함에 대한 검사 모델도 단일 유체 매질의 경우와 동일한 방법에 의해 유도할 수 있다.

송신 초음파 탐촉자에서 발진된 초음파가 유체 매질(매질1)을 지나, 고체 피검체(매질2)안에서  $\beta$ 파( $\beta=P, SV$ )의 형태로 결합에 전파된 후, 결함에서  $\alpha$ 파( $\alpha=P, SV$ )의 형태로 산란되어 다시 고체 피검체와 유체 매질을 지나 수신된 탐촉자에 의해 수신된 출력 신호

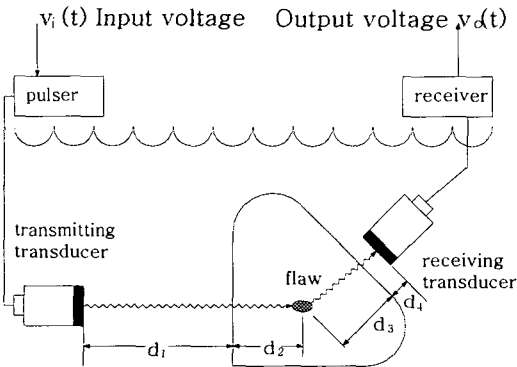


Fig. 5 Pitch-catch immersion testing

호  $V_0(\omega)$ 는 식 (16)과 같이 주어진다[15]. (이 식 유도에 대한 자세한 과정은 여기에서는 생략하였으나, 그 원리는 앞 절에서 언급한 단일 매질의 경우와 같다.)

$$V_0(\omega) = \beta(\omega) T_{12}^{\beta P}(\cos \theta_{10}^{\beta}) \exp[i(k_{p1} D_{10}^{\beta} + k_{\beta 2} D_{20}^{\beta} + k_{p1} D_{40}^{\alpha} + k_{\alpha 2} D_{30}^{\alpha})] \cdot \exp[-(\alpha_1 D_{10}^{\beta} + \alpha_{\beta 2} D_{20}^{\beta} + \alpha_1 D_{40}^{\alpha} + \alpha_{\alpha 2} D_{30}^{\alpha})] [A^{\alpha \beta}(e_{i0}^{\beta}; e_{s0}^{\alpha}) \cdot (-I_{i0}^{\alpha})] T_{21}^{\alpha}(\cos \theta_{30}^{\alpha}) C_1^{\beta}(a_r, R_{0r}, \omega, \theta_{10}^{\beta}, \theta_{20}^{\beta}, D_{10}^{\beta}, D_{20}^{\beta}) C_1^{\alpha}(a_r, R_{0r}, \omega, \theta_{40}^{\alpha}, \theta_{30}^{\alpha}, D_{40}^{\alpha}, D_{30}^{\alpha}) \cdot \left[ \frac{2\pi}{-ik_{\alpha 2} S_r} \frac{\rho_2 c_{\alpha 2} \cos \theta_{40}^{\alpha}}{\rho_2 c_{\beta 2} \cos \theta_{30}^{\alpha}} \right] \dots (16)$$

식 (16)에 나타난 변수들은 Fig. 6와 Fig. 7에 정의되어 있으며, 이 그림들에 나타나 있지 않은 값들은 다음과 같이 정의된다.

- $T_{12}^{\beta P}(\cos \theta_{10}^{\beta})$ : 매질1에서 입사각  $\theta_{10}$ 로 입사한 종파가 매질2에서  $\beta$ 파로 투과될 때의 투과계수
  - $k_{p1}$ : 매질1에서 종파의 파수
  - $k_{\beta 2}$ : 매질2에서  $\beta$ 파의 파수
  - $k_{\alpha 2}$ : 매질2에서  $\alpha$ 파의 파수
  - $\alpha_1$ : 매질1의 감쇠계수
  - $\alpha_{\beta 2}$ : 매질2에서  $\beta$ 파의 감쇠계수
  - $\alpha_{\alpha 2}$ : 매질2에서  $\alpha$ 파의 감쇠계수
  - $A^{\alpha \beta}(e_{i0}^{\beta}; e_{s0}^{\alpha})$ : 매질2에서  $e_{i0}$  방향으로 결합으로 입사한  $\beta$ 평면파가  $e_{s0}$  방향으로  $\alpha$ 파의 형태로 산란될 때 이 산란파에 대한 평면파 원거리 음장 산란세기
  - $I_{i0}^{\alpha}$ :  $\alpha$ 산란파의 편광방향의 단위벡터
  - $T_{21}^{\alpha}(\cos \theta_{30}^{\alpha})$ : 매질2에서 입사각  $\theta_{30}$ 로 입사한  $\alpha$ 파가 매질1에 종파로 투과될 때의 투과계수
  - $C_1^{\beta}(a_r, R_{0r}, \omega, \theta_{10}^{\beta}, \theta_{20}^{\beta}, D_{10}^{\beta}, D_{20}^{\beta})$ : 초음파가 송신 탐촉자로부터 결함에까지 도달하는 동안에 발생하는 회절 보정 적분
  - $C_1^{\alpha}(a_r, R_{0r}, \omega, \theta_{40}^{\alpha}, \theta_{30}^{\alpha}, D_{40}^{\alpha}, D_{30}^{\alpha})$ : 초음파가 결함으로부터 수신탐촉자에 도달하는 동안에 발생하는 회절 보정 적분
- 그리고,  $C_1^{\beta}$ 와  $C_1^{\alpha}$ 는 식 (17)로 정의된다.

$$C_1^\alpha(a, R_0, \omega, x) = \left[ \Theta^\alpha \frac{\epsilon_\alpha}{\sqrt{|q_{x0}^\alpha|} \sqrt{|q_{y0}^\alpha|}} - \frac{1}{2\pi \sqrt{\Delta_{x0}^\alpha} \sqrt{\Delta_{y0}^\alpha}} \int_0^{2\pi} \frac{\exp\{ik_1 \rho_2^2 f_\alpha(\Phi)/2\}}{f_\alpha(\Phi)} d\Phi \right] \quad (17)$$

여기에서,

$$\Theta^\alpha = \begin{cases} 1 & x \text{ in the main(conical) beam of} \\ & \text{refracted } \alpha\text{-waves } (\alpha = P, S) \\ 1/2 & x \text{ on the beam edge} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

$$\epsilon_\alpha = \begin{cases} 1 & \text{if both } q_{x0}^\alpha, q_{y0}^\alpha > 0 \\ -i & \text{if } q_{x0}^\alpha \cdot q_{y0}^\alpha < 0 \\ -1 & \text{if both } q_{x0}^\alpha, q_{y0}^\alpha < 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$f_\alpha(\Phi) = \frac{q_{x0}^\alpha \cos^2 \Phi}{\Delta_{x0}^\alpha} + \frac{q_{y0}^\alpha \sin^2 \Phi}{\Delta_{y0}^\alpha} \quad (20)$$

$$\Delta_{x0}^\alpha = D_{10} + \frac{c_2^\alpha \cos^2 \theta_{10}}{c_1 \cos^2 \theta_{20}} D_{20} \quad (21)$$

$$\Delta_{y0}^\alpha = D_{10} + \frac{c_2^\alpha}{c_1} D_{20}$$

$$q_{x0}^\alpha = 1 - \Delta_{x0}^\alpha / R_0 \quad (22)$$

$$q_{y0}^\alpha = 1 - \Delta_{y0}^\alpha / R_0$$

식 (16)은 식 (14)와 마찬가지로 유체 매질 속에 잠긴 피검체 내에 존재하는 결함으로부터 얻게 되는 초음파 신호의 특정 주파수 성분에 대한 값이다. 따라서 우리가 시간 영역의 초음파 신호를 얻고자 한다면, 초음파 탐촉자가 포함하고 있는 주파수 성분을 모두 계산한 후 역푸리에변환을 수행하여 얻을 수 있다.

### 2.3. 초음파 탐상 시험 모형의 해석

식 (14)와 식 (16)으로 표현되는 초음파 탐상 시험 모형은 Fig. 5에 나타난 초음파 탐상 시험 시스템을 선형 시간천이 불변계(linear time-shift invariant system: 이하 LTI system)로 가정할 때, 그 시스템을 구성하는 각 요소들의 조합으로 해석할 수 있다. 이 사실을 보이기 위해, Fig. 8에 Fig. 5의 시스템을 구성하는 각 요소를 하나의 사각형으로 표시하고, 각 사각형의 좌측에 각 요소의 시간 영역 impulse response를 그리고 우측에는 이에 대응하는 주파수 응답을 나타내었다. (이렇게 하면, Fig. 3의 각 요소는 Fig. 8에 표시한 요소 중 일부 해당 부분만으로 표현이 가능하다.)

이렇게 나타난 초음파 탐상 시스템에서는, 펄서(pulser)에  $v_i(t)$ 의 입력전압이 인가되면, 펄서는 송신 탐촉자( $b(t)$ )를 구동시키고, 이에 따라 송신 탐촉자는 전기적 신호를 탐촉자 표면의 기계적 운동( $x_s(t)$ )으로 변환시킨다. 이 운동은 물 속에 초음파를 발생시키는데 이 초음파가 물과 시편을 통과하여 결함에서 산란되어 다시 시편과 물을 지나 수신 탐촉자에 도달한다. 이때 초음파는 전파지연( $p(t)$ )을 경험한다. 송신 탐촉자로부터 수신 탐촉자에 이르는 동안 초음파는 시간적인 지연 외에도 매질에 의한 감쇠( $m(t)$ )가 발생하며, 또한 송신 탐촉자에서 출발한 초음파가 결함에 이르는 동안 회절( $c_i(t)$ )에 의한 파형의 변화가 발생한다. 그리고 물과 피

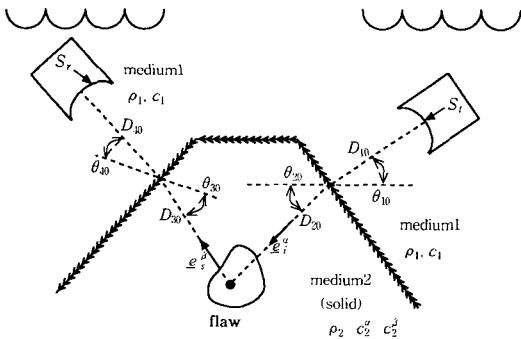


Fig. 6 Geometry of a pitch-catch setup showing fixed rays and directions

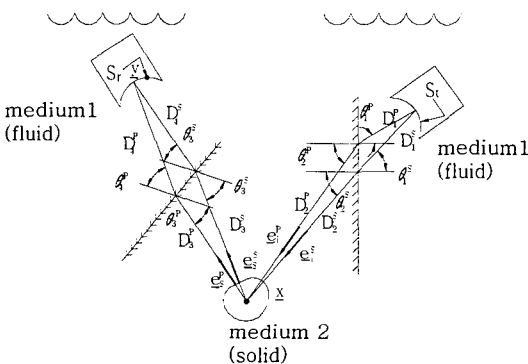


Fig. 7 Ray paths for a pitch-catch immersion setup

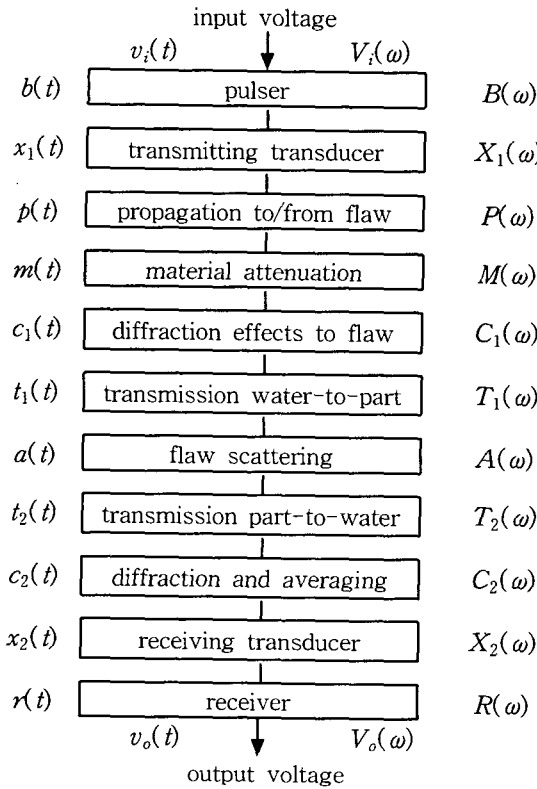


Fig. 8 Ultrasonic testing system considered as a LTI system

검체 사이의 경계를 통과할 때 투과에 따른 변화( $t_1(t)$ )도 경험한다. 이러한 과정을 거쳐 결합에 도달한 초음파는 결합에 의해 모든 방향으로 산란이 일어나는데, 이 산란파는 결합의 특성( $a(t)$ )에 따라 변화한다. 이 산란파 중 물과 피검체의 경계를 지나 수신 탐촉자에 도달하는데, 이때 이 초음파에 다시 경계면의 투과 효과( $t_2(t)$ )와 이산란파가 결합으로부터 수신 탐촉자까지 도달하는 동안 발생하는 회절에 의한 파형 변화( $c_2(t)$ )를 경험하게 된다. 수신 탐촉자( $x_2(t)$ )는 수신 신호를 전기적 신호로 변환시켜 이를 수신기(receiver)로 보내면 수신기( $r(t)$ )는 이를 다시 변조, 증폭, 여파등의 신호 처리 과정을 거쳐 최종적인 출력 신호  $v_o(t)$ 를 출력시킨다. 이때 Fig. 8의 시스템이 LTI system이므로 최종 출력의 주파수 성분  $V_o(\omega)$ 는 식 (23)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_o(\omega) = R(\omega) X_2(\omega) C_2(\omega) T_2(\omega) A(\omega) T_1(\omega) C_1(\omega) M(\omega) P(\omega) X_1(\omega) B(\omega) V_i(\omega) \dots (23)$$

식 (23)에는 모두 12개의 주파수 영역 함수가 존재한다. 따라서 이 12개의 함수에 대한 이론적 모형을 구하면 결합 신호에 대한 예측치를 구할 수 있다. 그러나 초음파 탐상기(pulsar/receiver)와 관련된 항은 장비 설정 조건에 따라 달라지기 때문에, 각 요소별 모형을 각각 설정하기 보다는 이를 하나로 묶어 식 (24)와 같이 정의되는 "system efficiency factor"  $\beta(\omega)$ 를 보통 사용한다.

$$\beta(\omega) = R(\omega) X_2(\omega) X_1(\omega) B(\omega) V_i(\omega) \dots (24)$$

식 (24)를 이용하면, 출력  $V_o(\omega)$ 는 식 (25)로 나타낼 수 있다.

$$V_o(\omega) = \beta(\omega) P(\omega) M(\omega) C_1(\omega) T_1(\omega) A(\omega) T_2(\omega) \cdot C_2(\omega) \dots (25)$$

식 (25)는 초음파 탐상 시험에 대한 매우 일반적인 LTI 모델이라 할 수 있다.

이제, 단일 매질의 원거리 음장에서 초음파 탐상 시험 모델인 식 (14)를 식 (25)과 비교하면, 식 (25)에 나타난 각 요소에 대한 주파수 응답은 식 (26)과 같음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \beta(\omega) &\leftrightarrow \beta(\omega) \\ P(\omega) &\leftrightarrow \exp[ik(z_i + z_s)] \\ M(\omega) &\leftrightarrow \exp[-\alpha(\omega)(z_i + z_s)] \\ C_1(\omega) &\leftrightarrow C_1(a_r, R_{0r}, \omega, z_i) \dots (26) \\ T_1(\omega) &\leftrightarrow 1 \\ A(\omega) &\leftrightarrow A(e_{i0}; e_{s0}) \\ T_2(\omega) &\leftrightarrow 1 \\ C_2(\omega) &\leftrightarrow C_1(a_r, R_{0r}, \omega, z_s) \left[ \frac{2\pi}{-ikS_r} \right] \end{aligned}$$

즉, 식 (14)는 식 (26)에서 보인 바와 같이 초음파 탐상 시험의 출력  $V_o(\omega)$ 를 Fig. 8에 나타난 각 LTI system의 주파수 응답들의 곱으로 나타낼 수 있음을 보여주고 있다.

뿐만 아니라, 유체 매질 속에 잠겨 있는 피검체 내의 결합에 대한 원거리 음장 초음파 탐상 시험 모델인 식 (16)을 식 (25)와 비교하면, 이 경우에는 식 (25)에 나

타낸 각 요소에 대한 주파수 응답이 식 (27)와 같음을 알 수 있다.

$$\beta(\omega) \leftrightarrow \beta(\omega)$$

$$P(\omega) \leftrightarrow \exp[i(k_{p1}D_{10}^\beta + k_{\beta 2}D_{20}^\beta + k_{p1}D_{40}^\alpha + k_{\alpha 2}D_{30}^\alpha)]$$

$$M(\omega) \leftrightarrow \exp[-(\alpha_1 D_{10}^\beta + \alpha_{\beta 2} D_{20}^\beta + \alpha_1 D_{40}^\alpha + \alpha_{\alpha 2} D_{30}^\alpha)]$$

$$C_1(\omega) \leftrightarrow C_1^\beta(a_i, R_{\alpha}, \omega, \theta_{10}^\beta, \theta_{20}^\beta, D_{10}^\beta, D_{20}^\beta)$$

$$T_1(\omega) \leftrightarrow T_{12}^{\beta P}(\cos\theta_{10}^\beta)$$

$$A(\omega) \leftrightarrow [A^{\alpha\beta}(e_{i0}^\beta; e_{s0}^\alpha) \cdot (-I_{i0}^\alpha)]$$

$$T_2(\omega) \leftrightarrow T_{21}^{\alpha P}(\cos\theta_{30}^\alpha)$$

$$C_2(\omega) \leftrightarrow C_1^\alpha(a_r, R_{0r}, \omega, \theta_{40}^\alpha, \theta_{30}^\alpha, D_{40}^\alpha, D_{30}^\alpha) \cdot$$

$$\left[ \begin{array}{cc} 2\pi & \rho_2 c_{\alpha 2} \cos\theta_{40}^\alpha \\ -ik_{\alpha 2} S_r & \rho_2 c_{\beta 2} \cos\theta_{30}^\alpha \end{array} \right]$$

식 (27)을 보면, 식 (16) 또한 식 (14)와 마찬가지로 초음파 탐상 시험의 출력  $V_o(\omega)$ 가 Fig. 8에 나타낸 각 LTI system의 주파수 응답들의 곱으로 표시할 수 있음을 보여주고 있다. 그러나 여기에서 유의해야 할 점은 식 (14)와 식 (16)을 도출하는 과정에서 다음과 같은 4가지 매우 중요한 가정들이 설정되었다는 점이다.

- 1) 송신 탐촉자와 수신 탐촉자는 모두 피스톤 발진자로 간주하였는데, 이들은 압력이나 법선속도와 같은 field variable의 평균값(탐촉자 표면에서의)에 비례한다.
- 2) 물과 피검체의 경계면은 평활하다.
- 3) 송신 탐촉자에서 발진된 초음파 빔을 결합 주변에서, 그리고 수신된 초음파 빔을 탐촉자 주변에서 모두 의사 평면파(quasi-plane wave)로 취급할 수 있다.
- 4) 결합에 의해 생성된 산란세기(scattering amplitude)가 결합에서 매우 서서히 변화하기 때문에, 수신방향에서의 원거리 산란세기로 기술할 수 있다.

만약, 이러한 가정이 성립되지 않으면, 초음파 탐상 시험의 출력  $V_o(\omega)$ 는 더 이상 각 LTI system의 주파수 응답들의 단순곱으로 표현할 수 없으며, 상호간에 매우 복잡한 교호작용이 존재하게 된다. 그러나, 다행히 실제적인 초음파 탐상 시험의 많은 경우에 이상의 가정이 성립되기 때문에 식 (14)과 식 (16)을 적용할 수 있다. 이 식들을 적용할 때 얻을 수 있는 매우 중대한 이점중의 하나는 초음파 탐상시의 출력신호  $V_o(\omega)$ 로부터 "결합신호"를 분리할 수 있다는 것이다. 이들 식에서 결합신호는 "평면파 원거리 산란세기"  $A(e_{i0}^\beta; e_{s0}^\alpha)$ 의 형태로 표현되어 있다. 만약 출력신호  $V_o(\omega)$ 에 영향을 미치는

여러 가지 요인 중에서 결합신호를 제외한 다른 요소(시스템 효율, 전파 지연, 회절 보정, 감쇠)의 주파수 응답을 별도의 실험이나 이론적 모형을 통해 결정할 수 있다면, 이러한 값들을 식 (14)와 식 (16)에 대입하여 "결합신호"  $A$ 를 구할 수 있다. 이렇게 구한 결합신호는 전적으로 결합의 특성에 의해 결정되기 때문에, 결합 평가의 객관적 신뢰성을 획기적으로 제고시킬 수 있는 토대를 제공한다.

### 3. 초음파 탐상 시험 모델의 응용

앞장에서 설명한 초음파 탐상 시험 모델을 이용하면 우리는 초음파 탐상 시험의 출력 신호를 이론적으로 매우 정확히 예측할 수 있는데, Fig. 9에 그 예[18]를 나타내었다. Fig. 9는 중심 주파수 5MHz, 집속 거리 10cm, 반경 6.4mm 인 수침형 집속 탐촉자를 이용하여, 탐촉자로부터 6.9cm 떨어져 물 속에 잠긴 직경 0.25inch 강구에 대한 펄스-에코 초음파 탐상 신호를 보여주고 있는데, 실선은 모델에 의한 예측 결과를 그리고 점선은 실제 획득한 신호를 나타낸다. (여기에서는 비교를 위해 두 신호를 적당한 간격으로 떼어놓은 것이다.) 이 결과를 보면 모델에 의해 예측된 신호와 실제로 예측한 신호가 매우 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 실제로 현재까지 제안된 많은 모델들이 이러한 정확성을 보여주고 있어, 매우 다양한 목적으로 훌륭히 응용될 수 있다. 최근에는, 컴퓨터와 통신 기술의 급속한 발전과 함께 그 적용 가능 분야가 날로 확대되고 있어, 현재

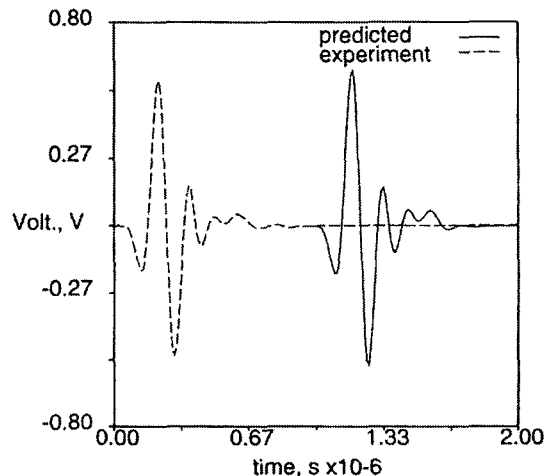


Fig. 9 Comparison of a model-based ultrasonic signal to the experiment



로서 활용 분야 모두에 대해 이야기한다는 것이 매우 어려운 일이나, 여기서는 필자의 제한된 지식의 범위 안에서 예견되는 적용 분야에 대해 이야기하고자 한다.

초음파 탐상 시험 모델은 우선 초음파 탐상 시험의 최적 조건을 설정하는데 이용될 수 있다. 앞에서 보인 바와 같이, 초음파 탐상 시험 모델은 탐상기, 탐촉자, 시편 그리고 그 속의 결함 등에 대한 정보가 주어지면, 이로부터 얻을 수 있는 탐상 신호를 예측하는 기술이다. 따라서, 검사 대상 결함이 주어졌을 때, 이를 검사하기 위한 다양한 탐상 조건을 설정하고 그 조건으로 얻을 수 있는 출력 신호를 Fig. 9에 보인 바와 같이 예측해 봄으로써, 탐상 신호 세기를 극대화할 수 있는 최적 조건을 자연스럽게 도출 할 수 있다. 모델링 기술의 진보로 이러한 작업을 실제 검사 현장에서 활용하는 것이 가능해 진다면, 작업자의 숙련도에 따른 검사 결과의 변화를 저감시킬으로써, 초음파 탐상 검사의 신뢰성을 제고시킬 수 있을 것이다.

둘째로, 초음파 탐상 시험 모델은 정량적 결함 평가를 위한 핵심 도구로 활용될 수 있다. 제 2 장에서 언급한 바와 같이, 초음파 탐상 시험 모델 안에는 "결함신호" A가 포함되어 있는데, 이 값은 오직 결함의 특성(크기, 형상, 물성 등)만을 나타낼 뿐, 초음파 탐상기의 설정 조건이나 탐촉자의 주파수 등 결함과는 무관한 어떤 인자의 영향도 받지 않는다. 반면, 지금까지 산업 현장에서 사용되는 재래식 초음파 탐상 시험에서는 초음파 탐상기의 출력 신호(예를 들어, Fig. 2에 나타낸 신호)를 이용하여 결함 평가를 수행하기 때문에, 작업자는 눈에 보이는 신호 속에서 탐상기나 탐촉자의 영향을 (머리 속에서) 배제하는 작업을 해야 하는데, 이것이 쉽지 않을뿐더러 지속적인 일관성을 유지하기는 더욱 힘들다. 초음파 탐상 시험 모델을 이용한다면, 결함 평가에 있어 외란에 속하는 이러한 영향을 출력 신호로부터 제거하고 순수한 결함신호만을 제공할 수 있기 때문에, 정량적 결함평가(결함의 종류판정 및 크기산정)의 신뢰성을 획기적으로 제고시킬 수 있다. 이러한 결함평가 작업을 소위 "모델 근거 결함평가(model-based flaw characterization)"라 부르고 있는데, 미국의 Iowa State University의 Center for Non-destructive Evaluation이 관련 연구를 선도하고 있으며, 필자도 이러한 연구에 참여한 바 있다[19-21].

셋째로, 초음파 탐상 시험 모델은 주어진 탐상 조건에서 얻을 수 있는 출력 신호를 실시간 혹은 준 실시간으로 모사하는 소프트웨어인 "초음파 탐상 시험 시뮬레이터(ultrasonic testing simulator)" 개발의 토대가 된다.

(실제로, UT 시뮬레이터가 초음파 탐상 시험 모델을 컴퓨터 프로그램으로 구현한 것이라는 점에서는 같은 것이라고 볼 수도 있으나, 모델링은 수학적 접근 방법을 강조하고, 시뮬레이터는 실제 적용성을 강조한다는 점에서 구별하여 부르기도 한다.) Fig. 10에는 UT 시뮬레이터를 이용하여 복잡한 피검체에 초음파 빔을 입사시킬 때 나타나는 빔의 변화를 보여주는 예 [22]를 나타내었다. Fig. 10에 나타낸 것처럼, UT 시뮬레이터는 초음파 빔의 전파 경로를 가시화하여 보여 줄 수 있기 때문에, 앞에서 언급한 초음파 탐상 시험의 최적 조건을 설정하는데 사용되는 것은 물론이며, 그 보다는 더 넓게 사용될 수 있다. 그 한 예는 UT 시뮬레이터를 설계 과정에서 활용하는 것이다. UT 시뮬레이터를 이용하여 제품 설계 당시에(이 단계에서는 실제 제품이 존재하지 않음.) 초음파 탐상 시험을 실시하면서, 이 제품의 검사가능성(inspectability)을 점검해 볼 수 있다. 최근 기술의 발달과 함께 형상이 복잡한 기계 부품이 늘어나고 있는데, 기능을 강화시키기 위해 형상을 복잡하게 하면 제작 후 품질 측정이나 유지·보수를 위한 검사가 불가능한 경우가 발생할 가능성이 그

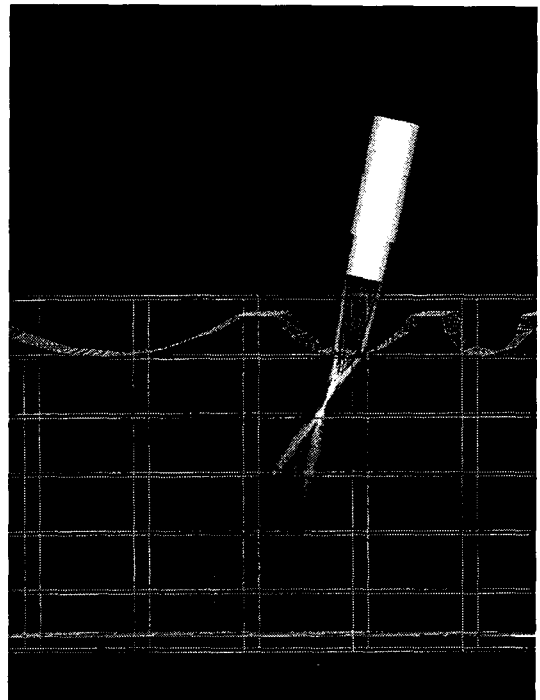


Fig. 10 Tracing of ultrasonic beam path by UT simulator

만큼 커지게 된다. 이 경우, UT 시뮬레이터는 설계 단계에서 제품에 대한 정보를 도면 형태로 제공받아 초음파 탐상 시험을 가상 공간에서 실시하기 때문에, 초음파 탐상 검사가 다른 설계 기준들과 마찬가지로 제품 설계의 한 기준이 됨으로써, 제품의 품질과 신뢰성을 획기적으로 제고시킬 수 있을 것이다.

넷째로 초음파 탐상 시험 모델은 작업자, 기술자, 연구자 혹은 학생들의 교육·훈련의 도구로 사용될 수 있다. 초음파 탐상 시험 모델 뿐 아니라 그 구성 요소인 초음파 탐촉자 방사 음장 모델이나 결함에 의한 산란 음장 모델은, 육안으로 직접 확인할 수 없는 초음파 빔의 방사, 전파, 산란 그리고 수신에 대한 과정을 생생하게 묘사해 주기 때문에, 초음파 탐상 시험 관련 인력들이 초음파 탐상 시험을 이해하는데 있어 매우 귀중한 자료가 될 수 있다.

이밖에도, 초음파 탐상 시험 모델은 여러 가지 용도로 응용될 수 있다. 예를 들어, 초음파 탐상 시험 모델을 이용하면, 초음파 탐상 시험에서 결함의 크기 산정에 사용되는 DGS 선도를 이론적으로 예측할 수도 있다. Fig. 11에 필자의 이전 연구 [12]에서 구한 결과를 나타내었는데, 여기에서 보는 바와 같이, 모델에 의해 예측된 DGS 선도(실선)가 실험적으로 결정된 값(원)과 매우 잘 일치하고 있다. DGS 선도를 실험적으로 결정하기 위해서는 시편 제작과 시험 수행에 막대한 비용과 시간이 소요된다는 것은 주지의 사실인데, 초음파 탐상 시험 모델은 이러한 비용을 대폭 절감할 수 있다. 이 뿐 아니라, 초음파 탐상 시험 모델은 작업자의 기량 검증에 사용되는 시편 설계에도 활용할 수 있다. 즉, 초음파 탐상 시험 모델을 적절히 이용한다면, 기량 검증

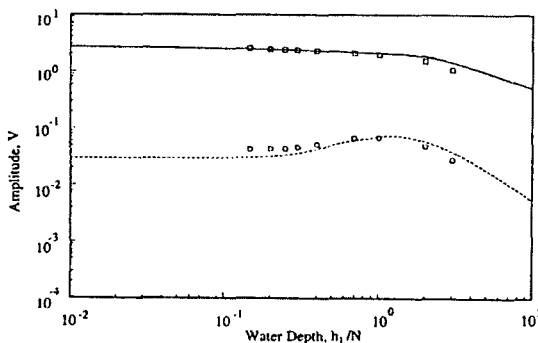


Fig. 11 A DGS diagram constructed by ultrasonic testing models (line: model-based prediction, point: experiment)

시편을 어떤 형태로 만들며, 어디에 얼마나 큰 결함을 어떤 각도로 삽입해야 하느냐 하는 결정을 가상 공간에서 수행할 수 있기 때문에, 실제 시편 제작 비용을 대폭 줄일 수 있다.

이상에서 언급한 것 이외에도, 초음파 탐상 시험 모델의 적용 가능성은 대단히 넓으며, 오늘날 그 적용 분야가 넓어지고 있다. 그리고, 이러한 적용 범위의 확대와 함께, 초음파 탐상 시험 모델은 지금까지 작업자의 경험과 지식에만 의존하여 수행되던 재래식 초음파 탐상 시험의 많은 문제를 해결할 수 있는 매우 강력한 돌파 기술이며 차세대 핵심 기술로서 자리 매김되어 가고 있다.

#### 4. 맺는 말

본 해설에서는 초음파 탐상 시험 모델의 필요성, 구성 요소, 구축 방법 그리고 그 응용 분야 등에 대하여 간략히 설명하였다. 초음파 탐상 시험 모델은 초음파 탐상 시험을 수행할 때 일어나는 물리적 현상, 즉 초음파 탐촉자로부터 발진된 음장의 시편 내부로의 방사, 결함에 의한 산란, 그리고 수신 탐촉자에 의한 산란 음장의 수신이라는 세 가지 현상을 수학적으로 표현하고, 이를 바탕으로 궁극적으로는 초음파 탐상 시험에서 얻게 되는 출력 신호를 예측하는 기법이다. 따라서, 초음파 탐상 시험 모델은 지금까지 작업자의 경험과 지식에 의존하여 수행되던 재래식 초음파 탐상 시험의 한계를 극복하기 위한 매우 효율적인 대안일 뿐 아니라, 디지털 시대에 적합한 차세대 핵심 기술로 인식되어 선진국에서는 활발한 연구가 수행되고 있다. 이러한 선진국과는 대조적으로 국내에서는 모델링에 대한 충분한 이해가 부족하여 관련 연구 수행이 매우 미흡한 것이 지금까지의 현실이었다. 그러나, 최근 국내에서도 관련 기술의 중요성에 대한 인식이 확산되면서, 우리 학회의 학술 제 2 분과 모델링소분과를 중심으로 관련 연구 수행 활성화를 위한 부단한 노력이 경주되고 있는데, 이것은 매우 시의적절하며 바람직한 일이라 판단된다. 이러한 활동을 통해 국내의 초음파 탐상 시험 모델링 기술 수준이 획기적으로 향상되어, 국내 초음파 탐상 검사의 경쟁력을 강화하는데 견인차 역할을 담당할 것으로 기대한다.

## 참고문헌

- [1] A. Freedman, "A Mechanism of Acoustic Echo Formation," *Acoustica*, Vol. 12 pp. 10-21, (1962)
- [2] A. Freedman, "The High Frequency Echo Structure of Some Simple Body Shapes," *Acoustica*, Vol. 12, pp. 61-70, (1962)
- [3] A. Freedman, "The Use of Linear System Theory in Acoustic Radiation and Scattering Analysis," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 52, pp. 256-276, (1977)
- [4] S. McLaren and J. P. Weight, "Transmit-Receive Mode Responses from Finite Sized Targets in Fluid Media," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 82, pp. 2102-2112, (1987)
- [5] A. Lhemery and R. Raillon, "Theoretical and Experimental Measurements of Echo-Responses from Angled Targets," in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, NY, Vol. 11A, pp. 81-88, (1992)
- [6] D. De Vadder, R. Raillon and A. Lhemery, "A Geometrical Interpretation of the Echo Formation of Short Pulses on Simple-Shaped Targets," in *Review of Progress in Quantitative Evaluation*, Eds. D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, NY, Vol. 11A, pp. 1067-1074, (1992)
- [7] M. Ueda and E. Morimatsu, "Analysis of Echo from a Sphere Which Includes the Directivity of a Transmitter and a Receiver," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 87, pp. 1903-1910, (1990)
- [8] T. Li and M. Ueda, "Analysis of Echo from a Cylinder That Includes the Directivity of a Transmitter and a Receiver," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 87, pp. 1880-1884, (1990)
- [9] R. B. Thompson and T. A. Gray, "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, (1983)
- [10] L. W. Schmerr and A. Sedov, "The Flat-Bottom Hole: and Ultrasonic Scattering Model" *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 1, pp. 181-196, (1989)
- [11] A. Sedov, L. W. Schmerr and S. J. Song, "Ultrasonic Scattering of a Flat-Bottom Hole in Immersion Testing: an Analytical Model," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 92, pp. 478-486, (1992)
- [12] S. J. Song, L. W. Schmerr and A. Sedov, "DGS Diagram and Frequency Response Curves for a Flat-Bottom Hole: a Model Based Approach," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 1, pp. 181-196, (1989)
- [13] A. Sedov, L. W. Schmerr and S. J. Song, "A Bounded Beam Solution for the Pulse-Echo Transducer Response of an Arbitrary on-axis Scatterer in a Fluid," *Wave Motion*, Vol. 19, pp. 159-169, (1994)
- [14] S. J. Song, L. W. Schmerr and A. Sedov, "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, (1993)
- [15] L. W. Schmerr, *Fundamentals of Ultrasonic Nondestructive Evaluation - A Modeling Approach*, Plenum Press, New York, (1998)
- [16] 송성진, "부분손상을 입은 초음파 탐촉자의 펄스-에코 시험 모델," *한국비파괴검사학회지*, 제16권 2호, pp. 95-108, (1996)

- 
- [17] J. W. S. Rayleigh, *The Theory of Sound*, Vol. 2, Dover, New York, (1945)
- [18] T. Lerch, L. W. Schmerr and A. Sedov, "Characterization of Spherically Focused Transducers Using an Ultrasonic Measurement Model Approach," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 8, pp. 1-21, (1996)
- [19] S. J. Song and L. W. Schmerr, "An Ultrasonic Time-of-Flight Equivalent Flaw Sizing Method," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 4, pp. 1-18, (1992)
- [20] S. J. Song and L. W. Schmerr, "New Approaches to Ultrasonic Equivalent Sizing for Small Flaws," *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 10, pp. 97-125, (1992)
- [21] L. W. Schmerr, S. J. Song and H. Zhang, "Model-Based Calibration of Ultrasonic System Responses for quantitative Measurements," in *Nondestructive Characterization of Materials VI*, Eds., R. E. Green and et. al. New York: Plenum, pp. 111-118, (1994)
- [22] <http://www.cnde.iastate.edu/staff/mgarton/mgarton.html>.