

## 초음파 시뮬레이션을 이용한 최적의 탐상조건

허 선 철\* · 박 영 철\*\* · 부 명 환\* · 강 정 호\*\*\*  
(99년 6월 23일 접수)

### Optimal Test Condition by Ultrasonic Simulation

Sun-Chul Huh\* · Young-Chul Park\*\* · Myung-Hwan Boo\* · Jung-Ho Kang\*\*\*

**Key Words :** Ultrasonic Test(UT, 초음파 탐상시험), Simulation(시뮬레이션), Oblique Transducer(사각탐촉자), CRT Display(탐상도형), Non Destructive Test(비파괴시험)

#### Abstract

Non destructive test is applied to revise mechanical strength and assume material strength or defect of material, equipment and structure, instead of fracture test. Especially, ultrasonic test has the characteristics such as an excellent permeability, high-sensitiveness to fine defect and an almost exact measurement for position, size and direction of inner defect, which differ from other non destructive tests. In this study, the program is developed to evaluate optimal testing condition, to distinguish obstacle echo and defect position. This program on the basic of Ray-Tracing model shows generation and processing of ultrasonic pulse. The simulation is compared with testing in the 3 cases of an oblique angle transducer like 45°, 60° and 70°. The test result for all conditions is well compared with simulation result when relative error is within 0.1~7.2%. And the course of several echos is simply assumed through simulation.

#### 1. 서 론

최근 급격한 산업의 발달로 인해 항공기, 인공 위성, 원자로, 해양구조물등과 같은 열악한 환경 속의 대형구조물들에 대한 사용이 증가하고 있으

나, 이러한 대형구조물들의 증가는 유사시 예측하지 못한 파괴로 인하여 대형참사의 발생가능성이 높아졌다. 따라서, 대형참사를 미연에 방지하기 위해서는 구조물이 파괴에 이르기전 구조물의 내 부결함을 검출하여 사전에 보수 및 수리를 한다면

\* 동아대학교 기계공학과 대학원  
\*\* 종신회원, 동아대학교 기계공학과  
\*\*\* 東北大學 大學院

안전성 측면에서 대단히 유용하다. 이러한 내부결함 검출은 비파괴시험을 통한 실구조물의 균열여부를 파악하여 구조물의 안전성 여부를 진단해왔다. 이러한, 비파괴시험의 하나인 초음파 탐상시험은 다른 비파괴 시험과 달리 투과능력이 탁월하며, 미세한 결함에 대하여 감도가 높고, 내부결함의 위치, 크기 및 방향성을 정확히 측정하는 것이 가능하다.<sup>1,2)</sup>

현재, 이러한 초음파에 대한 연구로서 저면산란 초음파 신호등의 파형을 분석하여 균열길이를 결정하거나, 초음파 자동탐상을 이용하여 용접부 균열의 크기, 측정정도를 검토하는 등의 결함에 대한 정보를 얻기 위한 연구와 터빈 로터 디스크에 대한 초음파 빔의 지향성 및 탐상범위를 유한요소 해석한 연구등이 발표되어 있는 실정이다.<sup>3~5)</sup>

한편, 고체내를 진행하는 초음파 펄스의 거동은 빛과 달리 복잡한 거동을 나타내는 것으로 알려져 있다. 즉, 반사시 모드변환(mode conversion)을 수반하며, 이러한 모드변환은 반사면이 곡면의 형상을 가지는 경우에 더욱 복잡하게 반복되고, 이 영향으로 초음파의 전달거동은 대단히 복잡하다. 따라서, 곡면을 가지는 시험체를 초음파 탐상하는 경우에 결함과 상관없이 방해에코가 발생하여 탐상에 있어 탐상도형을 해석하는데 큰 장애가 된다.<sup>6,7)</sup>

따라서, 임의의 형상을 가진 시험체에 대하여 초음파탐상도형을 예측하고 분석하기 위한 시뮬레이션은 최적탐상조건의 검토와 결함에코 및 방해에코(obstacle echo)의 식별, 결함위치등의 평가를 위해서 대단히 중요하다.<sup>8,9)</sup>

현재, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 해석은 유한요소모델과 기하학적인 레이-트레이싱 모델등이 제안되고 있지만, 초음파의 기본적인 전달거동과 결함에서의 산란파 해석, 그리고 음향이방성을 지니는 재료내를 통과하는 초음파의 거동등에 적용하고 있는 유한요소모델의 경우 대부분의 연구가 탐촉자에서 나오는 초음파를 단지 평면파인 원통면파 등에 관하여 모델화하고 있기 때문에 탐촉자에서 나오는 음장의 모델화 및 수신음압의 전기신호 변환, 그리고 반사곡면형상을 어느 정도 모델화하여 요소분할하는가에 관한 연구<sup>10)</sup>들이기 때문에, 실제의 탐상도형을 정확하게 시뮬레이션을 하는

것은 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 열악한 환경하에서 탐상이 곤란한 구조물에 대하여 탐상을 하기전 짧은 시간내에 간단한 조작으로 실제의 탐상도형을 예측하고, 탐상후 탐상도형을 분석하기 위해서 레이-트레이싱 모델(ray-tracing model)을 기초로 초음파펄스의 발생, 반사와 굴절 및 모드변환이라는 초음파의 진행을 모델화하고, 탐촉자에서 나오는 초음파 펄스의 지향성과 시험편의 형상 데이터를 입력하는 것으로 초음파 펄스의 전달거동과 탐상도형을 예측 및 분석하는 것이 가능한 프로그램을 개발하여 실제 초음파 탐상도형과 비교 검토하였다.

## 2. 초음파탐상의 모델화

Fig. 1은 초음파 사각탐상의 원리를 나타내는 것으로서 탐촉자에 펄스전압을 가하여 초음파 펄스를 발생시켜, 시험체의 내부에 초음파 펄스를 방사하여 경계면에서 되돌아 온 초음파 펄스를 수신하고, 다시 탐촉자에서 전기신호로 변환한 결과를 CRT(cathode ray tube)화면에 표시한다.<sup>11,12)</sup>

초음파의 주파수는 시험체 및 검출 가능한 결함의 치수에 대응하여 결정하기 때문에 보통의 초음파 탐상시험에서는 1MHz~10MHz의 주파수가 이용되며, Table 1에서 알루미늄과 강에 대한 음속과 주파수 5MHz 일때의 파장을 나타내었다.

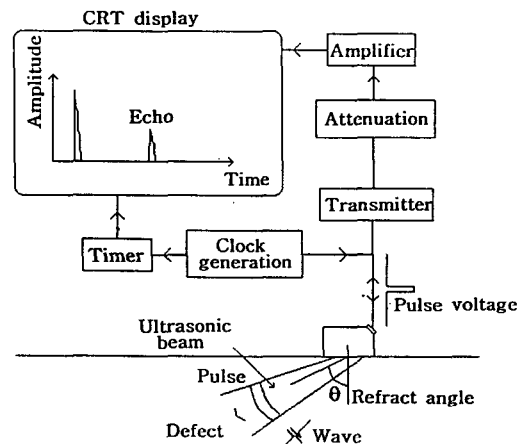


Fig. 1 Principles of ultrasonic testing

Table 1 A speed of sound and wave length for oscillator of 5MHz frequency

Medium	Density (g/mm <sup>3</sup> )	Longitude wave		Transverse wave	
		C <sub>L</sub> (m/s)	λ (mm)	C <sub>S</sub> (m/s)	λ (mm)
Aluminium	270	6260	1.25	3080	0.62
Steel	780	5900	1.18	3230	0.65

또한, 초음파탐상을 시뮬레이션하기 위해서는 초음파펄스의 발생 및 진행의 모델화가 필요하며, 이를 위해서 레이-트레이싱 모델에 역선의 개념을 도입한 역선 모델을 사용하였다. 즉, 초음파의 반사와 굴절 및 모드변환에 대하여 기본적으로 레이-트레이싱 모델을 검토하였지만 레이-트레이싱 모델은 모드변환을 고려하지 않기 때문에 역선의 개념을 도입하고, 트리(tree)구조를 이용하여 모드변환을 고려하였다.

2.1 반사, 굴절의 모델화

모델은 초음파를 하나의 직선 또는 직선속으로 표현하여, 각 직선이 신장하는 것으로 초음파의 진행을 표시한다. 또한, 직선이 시험편의 계면에서 부딪히는 점에서 연장하여 반사파 혹은 굴절파를 나타내며, 반사각과 굴절각은 스넬의 법칙을 이용하여 계산한다.

초음파에 대응되는 선들은 직선의 방정식으로 주어지고, 시험편을 함수로서 표현하는 것이 가능하므로 반사점은 초음파에 해당되는 직선과 시험편을 나타내는 함수와의 관계식을 통해서 산출한다. 여기서, 시험편의 형상은 직교좌표계에 관하여 함수로서 모델화할 수 있으며, 특히 복잡한 형상을 가진 시험편에 대하여 전체 형상을 하나의 함수로서 표현하는 것이 곤란하므로 몇개의 함수를 이론적으로 결합하여 복잡한 형상을 표현할 수 있다. 그리고, 반사점은 출발점에서 가장 가까운 점 즉, 모서리나 인공결합에서 가장 먼저 초음파를 만나는 점을 반사점으로 하여 이 반사점에 의해 스넬의 법칙을 사용하여 계면에서의 반사파와 굴절파를 계산하였다.

Fig. 2는 초음파의 발생과 진행에 대한 흐름도를 나타낸다. 초기에 입력된 탐상조건들과 시험편의 형상 데이터 및 변수를 사용하여 출발점의 좌표와 진행각도로부터 발생하는 방정식을 세우고, 시험편 계면에 부딪힐때까지의 경로와 전달시간을 계산한다. 여기서 수신되는 파를 결정 한 후, 수신되지 않는 파에 대하여 스넬의 법칙(Snell's law)을 사용하여 반사파 및 굴절파를 계산하고 다시 수신되는 파에 대해서는 탈출조건을 부여하고 수신되지 않는 파에 대해서는 데이터를 보존하여 반복적으로 계산하며, 시뮬레이션 결과는 그래픽화면과 텍스트(text)로 출력한다.

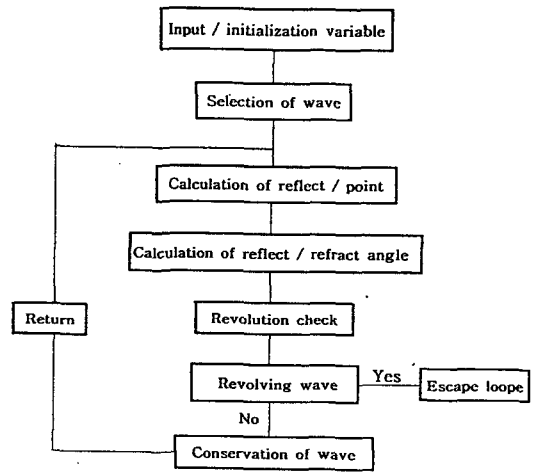


Fig. 2 Flow chart generation and advance of ultrasonics

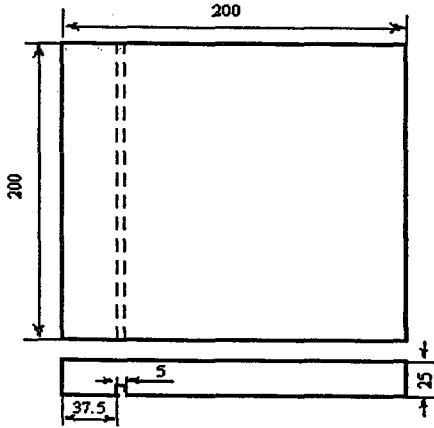
3. 실험장치 및 방법

3.1 시험편 및 실험방법

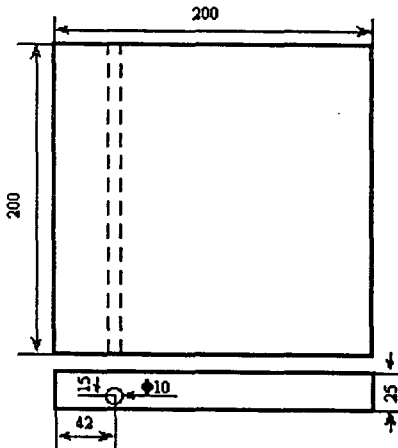
시험편은 SM45C를 사용하였으며 형상 및 치수는 Fig. 3과 같다. 그림에서 보는 것 처럼 슬릿(slot) 및 황공의 인공결합을 삽입하였으며, 표면 거칠기는 탐상에 지장을 주지 않는 거친면으로 가공하여 탐상시험을 행하였다. 또한, 비교를 위해 사용한 표준시험편으로는 KS B 0829에 규정된 STB-A1 표준시험편<sup>13)</sup>을 사용하였다.

초음파 탐상기는 Krautkrämer사의 USN52R 디지털 초음파 탐상기를 사용하였고, 탐촉자는 수직

및 사각 탐촉자로서 수직탐촉자는 4Q10N이고, 사각 탐촉자는 MSW-QC style angle beam으로 45°, 60°, 75°의 쉐기형으로 규격은 5Q10N이다.



(a) Slit defect



(b) Holl defect

Fig. 3 Geometry and dimension of UT specimen (unit : mm)

### 3.2 음속 및 굴절각의 측정

두께 25mm의 STB-A1 표준시험편으로 에코를 시간축 상에 25mm가 되도록 설정한 후, 사용시험편의 시간축 상의 눈금을 읽고 다음 식으로 시험편의 종파음속을 계산하여 보정한다.

$$\frac{2T}{C_2} = \frac{2x}{C_1} \quad (1)$$

여기서,  $x$  : STB-A1에 의한 시간축상의 에코위치  
 $T$  : 시편에 의한 시간축상의 에코위치  
 $C_1$  : STB-A1의 음속  
 $C_2$  : 시편의 음속

횡파의 음속도 STB-A1 표준시험편을 사용하여 에코를 시간축 상에 100mm로 설정하고, 다시 표준시험편의 모서리에 직사법으로 최대에코를 생성시킨다. 그 때의 시간축상의 눈금을 읽고 시편 두께 부분의 모서리에 같은 방법으로 초음파 빔을 입사한 후, 시간축상의 눈금을 읽고 식 (1)을 이용하여 횡파의 음속을 측정하여 보정한다. Table 2는 STB-A1 표준시험편과 SM45C시편의 종파 및 횡파의 음속을 나타내었다.

Table 2 A speed of longitudinal and transverse wave in STB-A1 and UT specimen

Wave Specimen	Longitudinal wave (m/s)	Transverse wave (m/s)
STB-A1	5920.0	3230.0
SM45C	5943.8	3255.4
Aluminium	6351.0	3010.4

굴절각을 보정하는 경우, STB-A1 표준시험편은 SM45C의 경우에 규격 KS B 0817<sup>14)</sup>에 준하여 굴절각을 측정하고, 보정은 식(1)을 이용하여 얻은 횡파의 음속을 가지고 다음식을 사용하여 횡파의 굴절각을 보정한다.

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left( \frac{C_2}{C_1} \sin \theta_1 \right) \quad (2)$$

여기서,  $\theta_1$  : STB-A1의 굴절각  
 $\theta_2$  : 시편의 굴절각  
 $C_1$  : STB-A1의 음속  
 $C_2$  : 시편의 음속

각각의 공칭굴절각에 대하여 SM45C 시험편의 보정한 굴절각을 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Refract angle of specimen by calibration

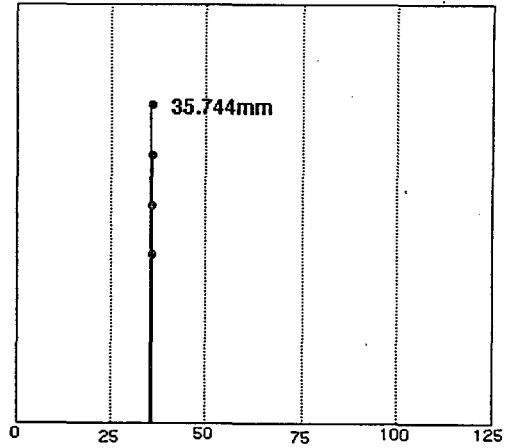
Specimen Nominal refract angle	SM45C	Aluminium
45°	45°	41°
60°	61°	54.6°
70°	71°	61.8°

#### 4. 실험결과 및 고찰

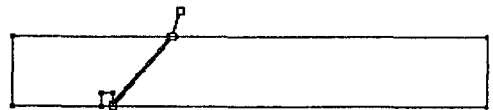
##### 4.1 인공결함의 사각탐상

Fig. 4와 Fig. 5는 시험편의 슬릿결함에 대하여 45°, 60°의 탐촉자를 사용하여 직사법으로 사각탐상한 결과를 실험과 시뮬레이션에 대하여 비교 검토한 것이다. Fig. 4의 (a)에서 최대에코의 위치는 35.7mm이고, (b)의 에코위치는 35.744mm로 측정결과와 해석결과는 0.044mm의 차이를 나타내고 있으며, (c)의 결과 초음파 진행경로는 대부분이 결함을 향하여 진행하고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 60°의 결과로서 (a)에서는 45.5mm에서 최대에코가 발생하고, 42.3mm와 58.75mm에서도 에코가 나타나는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과는 (b)에서 최대에코가 44.036mm, 기타에코는 42.125mm와 58.423mm에서 나타난다. (a)와 (b)의 탐상도형만으로는 결함에코와 방해에코를 구별하는 것은 어렵기 때문에 시뮬레이션을 이용하여 초음파 진행경로를 도식화시킨 (c)의 결과에서 (a)의 45.5mm, 42.3mm 위치의 에코는 결함에서 반사한



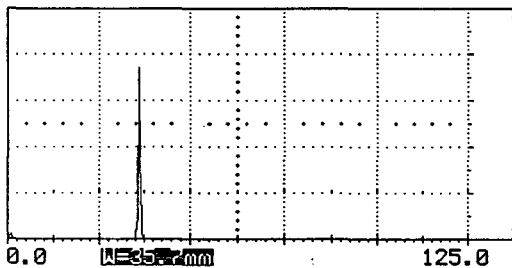
(b) CRT display of the simulation program



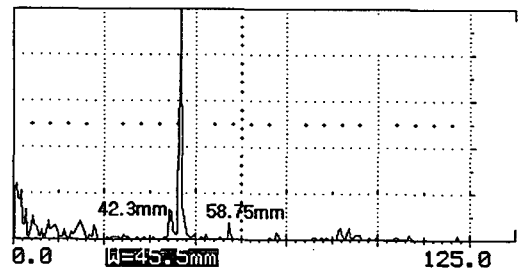
(c) Ultrasonic process used the simulation program

Fig. 4 Results of UT by 45° transducer for slit defect in SM45C specimen

것이며, 58.75mm의 에코는 모서리에서 반사한 방해에코임을 알 수 있다. 특히 42.3mm의 에코는 횡파가 결함의 측면에서 시험편의 저면으로 반사한 후 돌아온 에코라는 것을 알 수 있으며, 45.5mm의 에코는 저면과 결함사이의 모서리에서 반사한 에코임을 알 수 있다.

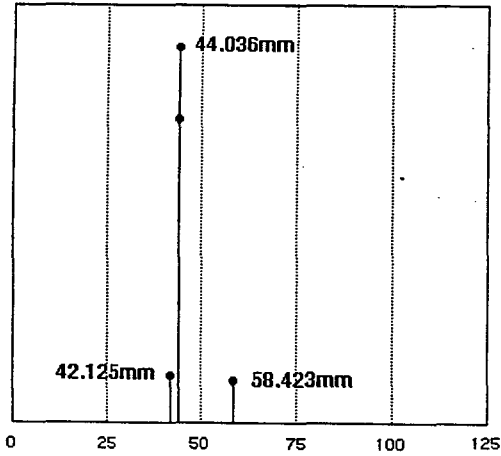


(a) CRT display of UT

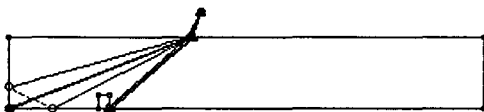


(a) CRT display of UT

나타내었다. 여기서 알 수 있듯이 결함에코는 크게 결함에서 반사되는 것과 결함에서 저면으로 반사한 것으로 구별할 수 있다.



(b) CRT display of the simulation program

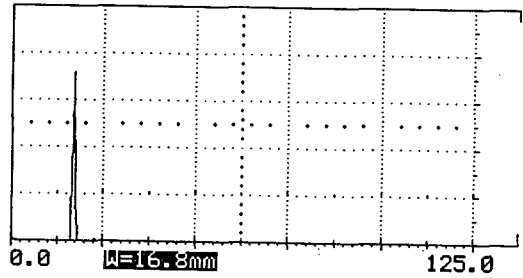


(c) Ultrasonic process used the simulation program

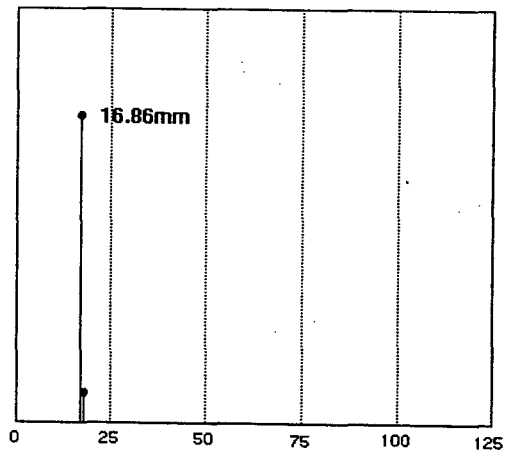
Fig. 5 Results of UT by 60° transducer for slit defect in SM45C specimen

한편, 반사면이 곡면일 경우에는 수직면과는 달리 모드변환이 복잡하게 일어나게 되어 방해에코가 발생할 가능성이 높아지기 때문에 시뮬레이션의 반사횟수를 2회 내지는 3회로 제한하여 방해에코의 발생을 억제하였다.

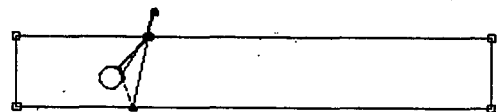
Fig. 6과 Fig. 7은 시험편의 횡공 결함을 각각 45°, 60°의 탐촉자를 사용하여 직사법으로 사각탐상한 결과를 비교 검토한 것이다. Fig. 6의 (a)에서 최대에코는 16.8mm이며 (b)의 에코위치는 16.86mm로서 0.06mm의 차이를 보인다. 또한, 반사체가 곡면의 형상을 가지는 경우에 초음파가 산란되기 때문에 시뮬레이션의 입력조건인  $\Delta\theta$ 를  $0.1^\circ \sim 0.05^\circ$ 로 제한하여도 결함에서 반사하여 돌아오는 역선은 많지가 않다. 따라서,  $0.01^\circ$ 까지  $\Delta\theta$ 를 줄였으며 반사에코중 대표적인 에코의 빔 경로를 (c)에



(a) CRT display of UT



(b) CRT display of the simulation program



(c) Ultrasonic process used the simulation program

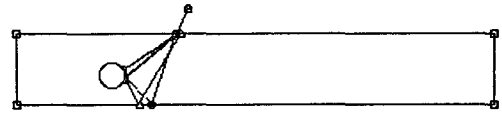
Fig. 6 Results of UT by 45° transducer for hole defect in SM45C specimen

Fig. 7의 (a)는 32.5mm에서 낮은 음압강도의 에

코가 나타나고 있는 것을 알 수 있으며, 이 결과를 (c)에서 분석한다면 횡파가 입사하여, 저면에서 종파로 모드변환하여 결함으로 진행한 에코임을 알 수 있다. 또한, (b)의 탐상도형에서 방해에코가 나타나지 않는 것을 알 수 있으며, 이 이유는 반사횟수를 3회로 제한한 것과 실제의 초음파를 역선으로 단순화시킴으로써 비롯되는 것이라 생각된다.

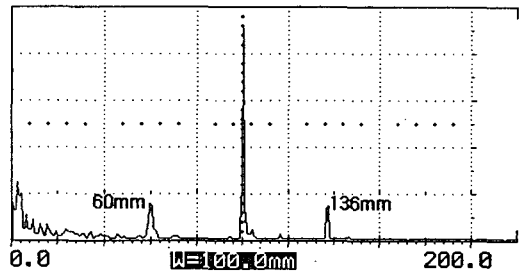
#### 4.2 임의의 위치에서의 사각탐상

공칭굴절각 45°와 60°의 사각탐촉자와는 달리 70°의 사각탐촉자는 초음파 빔의 경로가 길어짐에 따라 복잡한 모드변환을 일으키며, 다양한 에코가 발생한다. 이러한 결함에코와 방해에코의 구분을 위해서 공칭굴절각 70°의 사각탐촉자를 이용하여 슬릿 및 횡공 결함에서 얻을 수 있는 탐상도형과 시뮬레이션 결과를 서로 비교 검토하였다.

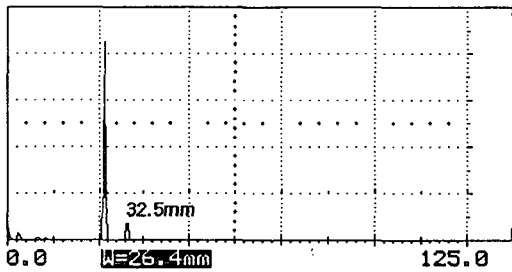


(c) Ultrasonic process used the simulation program

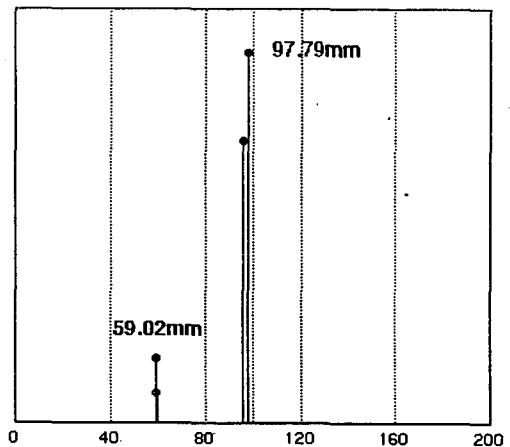
Fig. 7 Results of UT by 60° transducer for hole defect in SM45C specimen



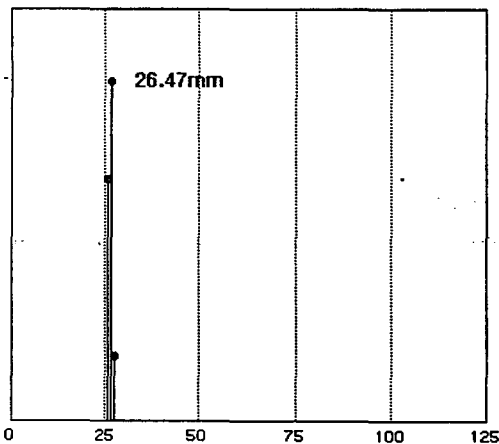
(a) CRT display of UT



(a) CRT display of UT



(b) CRT display of the simulation program



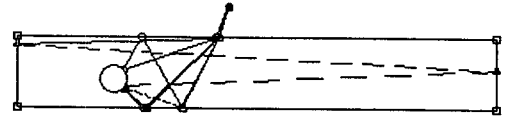
(b) CRT display of the simulation program



(c) Ultrasonic process used the simulation program

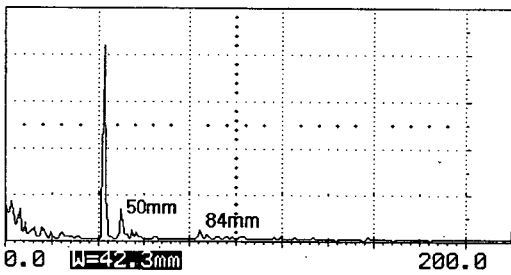
Fig. 8 Results of UT by 70° transducer for slit defect in SM45C specimen

Fig. 8의 (a)에서는 60mm, 100mm, 136mm에서 에코가 발생하는데 반하여 (b)는 59.02mm와 97.79mm에서 에코가 발생한다. (b)의 시뮬레이션 결과에서 2개의 에코만이 생성되는 것은 방해에코를 적절히 제거하기 위해서 반사횟수를 5회로 제한하였기 때문이다. 에코위치의 차이는 1~2.2mm 정도가 되는데 이것은 시뮬레이션에 입력되는 이론적인 음속과 굴절각이 실제 재료의 음속과 굴절각과는 차이가 나며 이로 인하여 빔의 경로가 길어짐에 따라 그 차이가 크게 되는 것으로 생각된다. 한편, (c)의 결과를 보면 (a)의 결과에서 60mm의 에코는 직사법에 의하여 결함에서 반사한 것이고, 100mm는 시험편의 모서리에서, 그리고 136mm는 횡파가 입사할 때 결함에 대하여 총 8회 반사하면서 모드변환한 파로 생각된다.

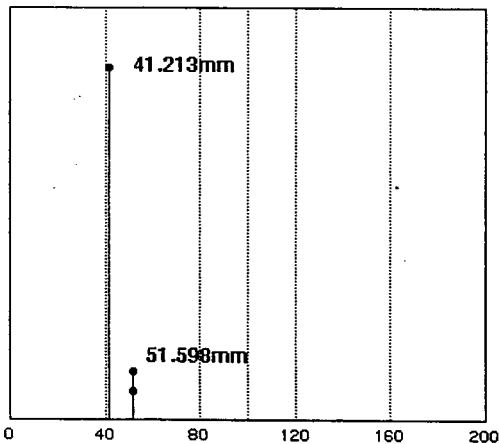


(c) Ultrasonic process used the simulation program  
 Fig. 9 Results of UT by 70° transducer for hole defect in SM45C specimen

Fig. 9는 횡공 결함에서 동일한 방법으로 탐상한 결과로서, (a)와 (b)의 탐상도형은 각각 42.3mm, 50mm, 84mm와 41.213mm, 51.598mm의 위치에 에코가 나타나며, 1.6mm의 차이를 보인다. 또한, 시뮬레이션의 반사횟수를 제한하였기 때문에 (b)의 탐상도형에서는 84mm의 에코가 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다. (c)의 결과에서는 50mm에서의 에코와 84mm에서의 에코들은 총 3~4회의 반사동안 저면에서 모드변환한 후 결함에서 다시 반사하여 되돌아 온 방해에코임을 알 수 있다.



(a) CRT display of UT



(b) CRT display of the simulation program

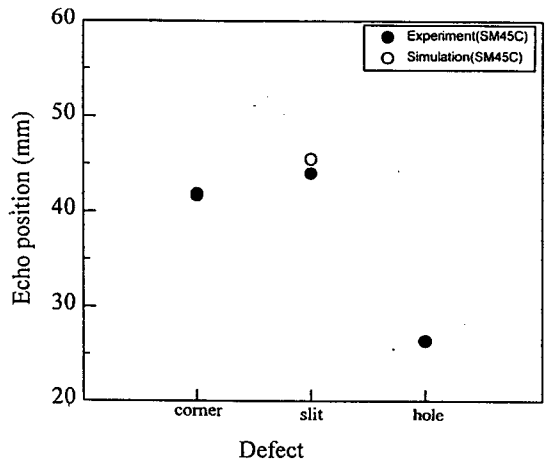


Fig. 10 Comparison of echo positions for 60° transducer in SM45C specimen

이상에서 초음파 탐상시험 결과와 시뮬레이션 결과를 공칭굴절각 60°의 사각탐촉자에 대한 탐상 거리를 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서



알 수 있듯이 탐상결과와 시뮬레이션 결과사이에는 일정한 상대오차를 가지고 있으며, 모서리나 슬릿결함보다는 오히려 복잡한 모드변환이 일어나기 쉬운 드릴횡공 결함의 경우에는 상대오차가 작다는 것을 알 수 있다.

Table 4 Comparison of echo positions for SM45C specimen

Defect	Refract angle	Experiment	Simulation	Relative error(%)
Corner	45°	35.5	34.348	3.245
	60°	49.7	48.918	1.573
Slit	45°	35.6	34.348	3.517
	60°	50.3	49.490	1.610
	70°	85.4	82.394	3.520
		46	44.854	2.491
Hole	45°	17.3	16.05	7.225
	60°	28.1	27.42	0.680
		45.4	44.644	1.665
	87.5	85.916	1.810	

따라서, 단순한 결함을 포함하여 초음파의 모드변환이 복잡하게 일어나는 곡면의 반사체를 가지는 구조물에 대해서도 시뮬레이션을 통해서 정도가 높은 결과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

또한, 모든 조건에서의 탐상결과와 시뮬레이션 결과에 대한 비교 및 상대오차를 Table 4에 나타내었다. 각각의 조건에 대하여 0.1 ~ 3.5% 정도까지 근소한 오차를 나타내는 것으로서 모든 측정치와 해석결과 모두 신뢰성을 가지고 있는 것을 알 수 있다.

### 5. 결 론

- 1) 인공결함이 모서리, 슬릿 및 횡공의 3가지 조건에서 공칭굴절각 45°, 60°의 사각탐촉자를 이용하여 직사법으로 탐상한 결과와 시뮬레이션 결과는 최대 3.3 %의 상대오차내에서 잘 일치하고 있으므로 시뮬레이션을 이용한다면 간단히 결함에코와 방해에코를 식별할 수 있다.
- 2) 공칭굴절각 70°의 사각탐촉자를 이용하여 임의의 위치에서 탐상한 결과는 공칭굴절각 45°, 60°와 달리 다양한 결함 및 방해에코가 나타나지

만, 최대 3.2 %의 상대오차내에서 시뮬레이션에 의한 결과와 잘 일치하고 있으므로 복잡한 모드변환에 의해서 생기는 방해에코를 식별할 수 있었다.

- 3) 실제 탐상시 판별하기 곤란한 방해에코등을 구분하기 위해서 시뮬레이션을 이용하여 초음파빔의 경로를 도식화시키면 검사자의 경험에 의존하지 않더라도 쉽게 결함에코를 추정하는 것이 가능하며, 탐상시험전 구조물에 대한 최적의 탐상조건도 확보할 수 있다.
- 4) 사용 시험편에 대하여 이론적으로 음속과 굴절각을 보정하였지만, 유사한 재질들의 음속은 많은 차이가 나지 않기 때문에, 결함을 검사하고자 하는 구조물에 대하여 현장에서 간편하게 결함에코와 최적의 탐상조건을 확보 할 수 있다.

### 후 기

본 논문은 97년도 동아대학교 부설 연구소 공모 과제에 의하여 지원되어진 연구임으로 이에 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌

- 1) 김학현, "초음파 탐상 검사법", 기계저널, 제 38권, 제 3호, pp. 49~54, 1998
- 2) 원승환, 이용, 이의중 공저, "비파괴 검사사 수험서", 한국 비파괴 검사 교육원, pp. 9~20, 1993
- 3) Kang, Jeong-Ho and Tsuyoshi Mihara, "非破壊的強度保証のための超音波自動探傷システムを用いた容接試験体のき裂寸法測定精度の検討", 在日科協會報, 第 13卷, 第 1号, pp. 58~62, 1998
- 4) Park, Ik Keun, Lee, Jung Sun and Lee, Hae Moo, "Wavelet Analysis of Ultrasonic Echo Wavelet and its Application for the Nondestructive Evaluation", 대한기계학회 '98년도 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, pp. 98~105, 1998
- 5) 원순호, 장홍근, 조정식, 이종오, 이종규, "터빈

- 로타 디스크의 초음파탐상을 위한 초음파탐촉자의 지향성 및 탐상범위”, Journal of the Korea Society for Nondestructive Testing, Vol. 18, No. 3, pp. 163~171, 1998
- 6) Nam, Young Hyun, Kazuhiro Date and Hideaki Takahashi, “Directly Evaluation of Ultrasonic Wave by Visualization Method”, 非破壞檢査, 第 42卷, 第 1号, pp. 17~22, 1993
- 7) 谷 哲士, “超音波の力線のシミュレーション法にける缺陷のモデル化について”, 東北大學 大學院 碩士論文, pp. 1~49, 1996
- 8) Furukawa, Takashi, Gouki Yotsuya and Kazuhiro Date, “水浸法における超音波ビーム入射の簡易的シミュレーション”, 非破壞檢査, 第 44卷, 第 3号, pp. 156~162, 1995
- 9) Furukawa, Takashi and Kazuhiro Date, “超音波探傷試験の簡易的シミュレーション”, 非破壞檢査, 第 43卷, 第 4号, pp. 223~229, 1994
- 10) Aitor, Galdos, Hiroshi Okuda and Genki Yagawa, “Finite Element Simulation of Ultrasonic Wave Propagation in Pipe and Pressure Vessel Walls”, Finite Elements in Analysis and Design 7, pp. 1~13, 1990
- 11) 日本非破壞檢査會, “超音波 探傷試験 II”, pp. 1~26, 1989
- 12) 日本非破壞檢査會, “超音波 探傷試験 III”, pp. 1~10, 1989
- 13) KS-B-0829-1981, “Calibration Block Type A1 Used in Ultrasonic Testing”, 1991
- 14) KS-B-0817-1991, “General Rule of Ultrasonic Testing of Metals by the Pulse Echo Technique”, 1991