

탐상조건 예측을 위한 초음파 시뮬레이션

허선철*, 박영철**, 이광영*, 박원조*

Ultrasonic Simulation for Test Condition Estimate

Sun Chul Huh*, Young Chul Park**, Kwang Young Lee*, Won Jo Park*

ABSTRACT

Ultrasonic testing has a characteristics such as excellent permeability, high-sensitivity to find defect and an almost exact measurement for position, size and direction of inner defect, which differ from other non-destructive testing. In the study, we developed program into optimal testing condition, to distinguish obstacle echo and defect position. This program shows generation and processing of ultrasonic pulse. We compared simulation with ultrasonic test in 45°, 60° and 70° transducer. Test results were in accordance with simulation within 0.1~7.2%.

Key Words : Ultrasonic test(초음파 탐상시험), Ray tracing model(레이 트레이싱 모델), Oblique transducer(사각탐촉자), Non destructive test(비파괴시험), Obstacle echo(결함 에코)

1. 서론

항공기, 인공위성, 원자로, 해양구조물등과 같은 대형구조물들은 유사시 예측하지 못한 파괴가 일어난다면 대형참사로 이어지므로 구조물이 파괴에 이르기전 구조물의 내부결함을 검출하여 사전에 보수 및 수리를 해야한다. 현재 내부 결함 검출은 비파괴 실험으로 가능하며 비파괴시험 중에서 초음파 탐상시험은 다른 비파괴 시험과 달리 투과능력이 탁월하며, 미세한 결함에 대하여 감도가 높고, 내부 결함의 위치, 크기 및 방향성을 정확히 측정하는 것이 가능하다.^{1), 2)}

현재 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 해석은 유한요소모델과 기하학적인 레이-트레이싱 모델등이 제안되고 있다. 그러나, 초음파의 기본적인 전달거동

과 결함에서의 산란과 해석, 음향이방성을 지니는 재료를 통과하는 초음파의 거동등에 대한 연구가 대부분이다. 또한 해석시 탐촉자에서 나오는 초음파를 단지 평면파인 원통형파등에 관하여 모델화하고 있기 때문에 실제의 탐상 도형을 정확하게 시뮬레이션하는 것은 미흡한 실정이다.^{3), 4)}

따라서, 임의의 형상을 가진 시험체에 대하여 초음파탐상도형을 예측하고 분석하기 위한 해석방법의 도입은 최적탐상조건인 검토투과도와 결함에코 및 방해에코의 식별, 결함위치등의 평가를 위해서 대단히 중요하다.^{5)~8)}

본 연구에서는 SM45C와 AI시험편에 대하여 탐상도형을 예측하고, 탐상후 탐상도형을 분석하기 위해서 레이-트레이싱 모델(ray-tracing model)을 기초로 초음파펄스의 발생, 반사와 굴절 및 모드변환이라는 초음파의 진행을 모델화하고, 탐촉자에서

Ⓜ 2000년 4월 17일 접수

* 경상대학교 수송기계공학부

** 동아대학교 기계공학과

나오는 초음파 펄스의 지향성과 시험편의 형상 데이터를 입력하는 것으로 초음파 펄스의 전달거동을 C-언어로서 예측 프로그램을 개발하여 실제 초음파 탐상도형과 비교 검토하였다.

2. 초음파 탐상 모델

초음파 탐상조건 예측을 위한 파의 전파모델에 관한 연구들이 많이 수행되고 있으나 본 연구에서는 간편한 C-언어를 사용하여 초음파 발생 및 진행을 모델화 하였다. 그리고 초음파 펄스의 반사와 굴절 및 모드변환에 대하여 기본적으로 레이-트레이싱 모델을 검토하였지만 레이-트레이싱 모델은 모드 변환을 고려하지 않기 때문에 역선의 개념을 도입하고, 트리(tree)구조를 이용하여 모드변환을 고려하였다.

2.1 초음파 펄스발생의 모델화

Fig. 1은 초음파펄스의 발생에 관한 모식도로서 선의 방향이 초음파의 진행방향이고, 선의 각도 증가량($\Delta\theta$)이 초음파의 음압에 대응된다. 음압이 최대인 빔 중앙에서의 음압을 기준으로 역선의 각도 증가량이 작은 선의 음압은 높고, 각도가 큰 선의 음압은 상대적으로 낮게 하여 직선의 방정식으로 표현하였다.

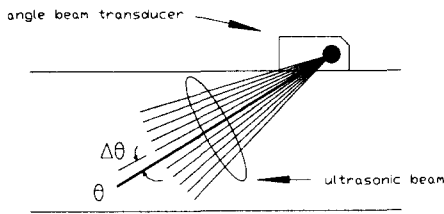


Fig. 1 Beam spreading diagram of ultrasonic wave

2.2 초음파 펄스발생의 모델화

초음파를 하나의 직선속으로 표현하고, 각 직선이 신장하는 것으로 초음파의 진행을 표시하며, 직선이 시험편의 계면에서 부딪히는 점에서 연장하여 반사파 혹은 굴절파를 나타내며, 반사파와 굴절각은 스넬의 법칙을 이용하여 계산한다.

Fig. 2는 초음파의 반사 및 굴절에 대한 모드변환을 나타내는 것으로 초음파는 반드시 모드변환이 일어나는 것은 아니고, 입사각의 조건에 의해서 모

드변환이 생길수도 있고, 생기지 않을수도 있으므로 이에 대한 것은 모드변환을 트리구조로 나타낸다. 그리고 트리구조에서 입사파가 전달되면 횡파와 종파로 전달되고, 또다시 분기된 파에서 종파와 횡파로 분기하나 임계각과 횡파의 임계각 사이에서 모드변환하는 경우는 횡파만이 존재하며, 이러한 트리구조의 경우는 시뮬레이션에서 배열을 사용하여 해석을 하였다.

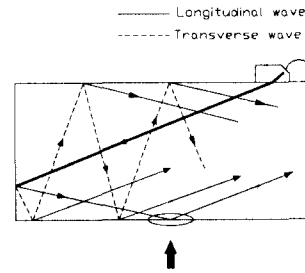


Fig. 2 Mode converse diagram of ultrasonic propagation

Fig. 3은 시험편의 형상함수와 직선의 방정식을 사용하여 반사점을 구한 것으로 입사점 A0에서 입사한 직선은 시험편의 형상함수와 관계식에 의해 3가지 교점을 얻게 되지만 출발점에서 가장 가까운 B0점을 선택하여 이 반사점에서 스넬의 법칙을 사용하여 계면에서의 반사파와 굴절파를 계산한다. 그러나 곡면에서의 반사는 수직면과는 달리 반사가 복잡하므로 반사점에서 곡면의 접선 및 법선을 산출한 후 스넬의 법칙을 사용하여 반사파 및 굴절파를 나타내었다.

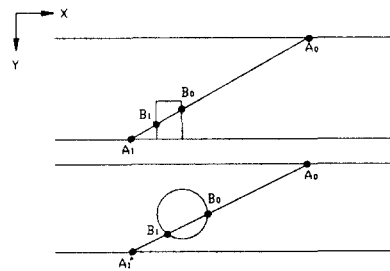


Fig. 3 Calculation of reflect point in specimen

Fig. 4는 초음파의 발생과 진행에 대한 흐름도를 나타낸다. 초기에 입력된 탐상조건들과 시험편

의 형상 데이터 및 변수를 사용하여 출발점의 좌표와 진행각도로부터 발생하는 방정식을 세우고, 시험편 계면에 부딪힐때까지의 경로와 전달시간을 계산한다. 여기서 수신되는 파를 결정한 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.

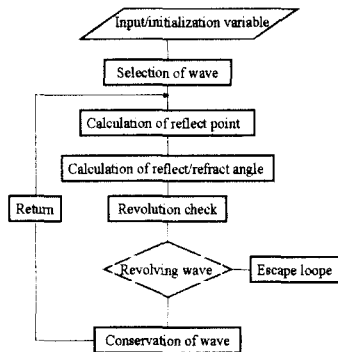


Fig. 4 Flow chart of ultrasonic simulation

3. 실험장치 및 방법

Fig. 5는 시험체의 내부에 초음파 펄스를 방사한 후 경계면에서 되돌아 온 초음파 펄스를 수신하여 탐촉자에서 전기신호로 변환한 결과를 CRT(cathode ray tube)화면에 표시하고, 컴퓨터에 저장하는 초음파 사각탐상의 원리를 나타내는 것이다. 초음파 탐상시험에서는 1MHz~10MHz의 주파수가 이용되며, Table 1에서 각각의 물질에 대한 음속과 주파수 5MHz 일때의 파장을 나타내었다.

Table 1 Acoustic velocity and wave length in 5MHz frequency

Medium	Density (g/mm ³)	Longitude wave		Transverse wave	
		C _L (m/s)	λ (mm)	C _S (m/s)	λ (mm)
Aluminium	270	6260	1.25	3080	0.62
Steel	780	5900	1.18	3230	0.65

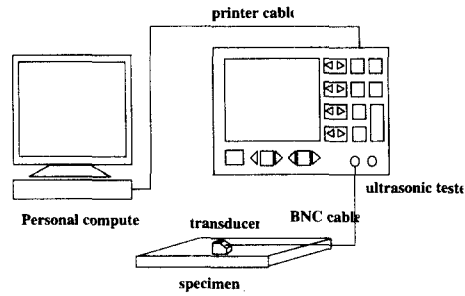


Fig. 5 Principles of ultrasonic testing

시험편은 SM45C와 A1을 사용하였으며 형상 및 치수는 Fig. 6과 같고, 비교를 위해 사용한 표준시험편은 KS B 0829에 규정된 STB-A1 표준시험편을 사용하였다. 초음파 탐상기는 Krautkrämer사의 USN52R 디지털 초음파 탐상기를 사용하였고, 탐촉자는 수직 및 사각 탐촉자로서 수직탐촉자는 4Q10N이고, 사각 탐촉자는 MSW-QC style angle beam으로 45o, 60o, 75o의 쉐기형으로 규격은 5Q10N이다.

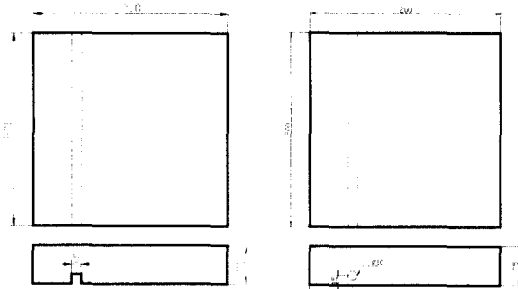
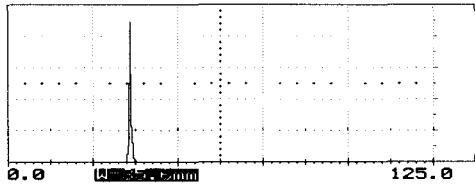


Fig. 6 Shape and dimension of specimen (unit:mm)

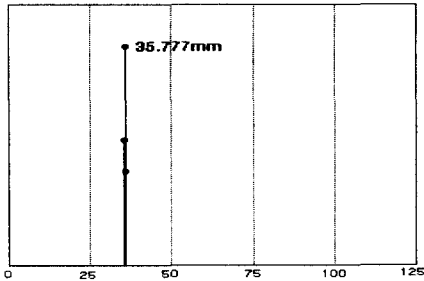
4. 실험결과 및 고찰

Fig. 7은 공칭굴절각 45°의 탐촉자를 사용하여 SM45C 시험편의 모서리에서 반사하여 되돌아 온 초음파의 특성을 나타낸다. (a)는 탐상시험을 통하여 CRT상에 나타난 탐상도형을 나타내며, 에코의 최대위치는 35.6mm이다. (b)는 시뮬레이션을 이용하여 탐상한 결과를 나타내며 35.777mm가 최대에코의 위치이다. 음압의 강도는 최대에코의 강도를

1로 하여 에코를 상대적으로 표현한 것이다. 또한, (c)는 시뮬레이션을 통한 시험편내의 초음파빔 경로를 모식적으로 나타낸 것이다. (a), (b)에서 보는 것처럼 최대에코 위치에서의 차이가 대략 0.1~0.2mm의 차이를 보이는 것은 시뮬레이션에 입력되는 입력데이터의 음속이 실제 시험편의 국부적인 음속과 차이가 나기 때문으로 생각한다.



(a) result of ultrasonic test



(b) result of simulation

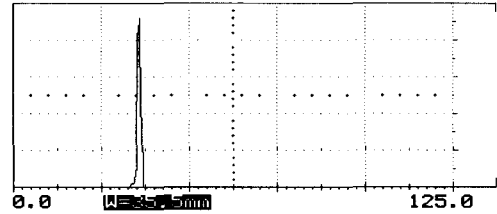


(c) ultrasonic progress process of simulation

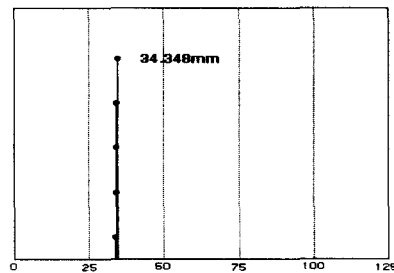
Fig. 7 Relation of simulation and test (45° transducer, SM45C)

Fig. 8은 공칭굴절각 45°의 탐촉자를 사용하여 AI시험편의 모서리에서 사각탐사한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 (a)와 (b)에서 에코의 최대위치는 각각 35.5mm와 34.348mm로 1.2mm의 차이를 나타내며, (c)에서 초음파의 대부분이 결함을 향하여 진행하고 있다는 것을 알 수 있다. SM45C의 경우 1mm내의 차이를 보이는데 비하여 순 AI시험편의 경우 강의 표준시험편을 기준으로 AI재질의 음속을 이론적으로 계산하여 보정했기 때문에 AI시험편의

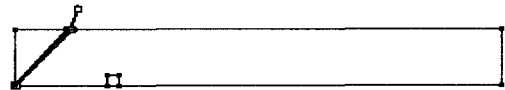
굴절각 측정에 오차가 생긴 것과 수동탐상시 발생한 오차라 생각되지만 상대오차는 3%이내이므로 일치한다고 볼 수 있다.



(a) result of ultrasonic test



(b) result of simulation



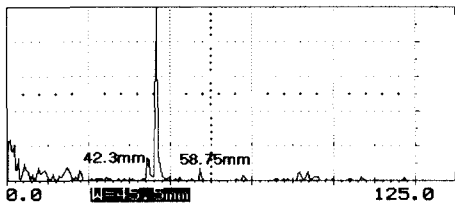
(c) ultrasonic progress process of simulation

Fig. 8 Relation of simulation and test (45° transducer, AI)

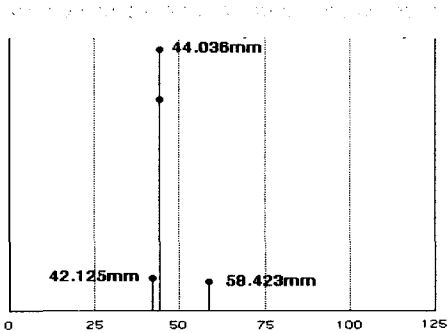
Fig. 9는 공칭굴절각 60°의 탐촉자를 사용하여 SM45C 시험편의 슬릿결함에 대한 탐상결과를 나타내고 있다. (a)인 탐상도형의 경우 45.5mm에서 최대에코가 발생하고, 42.3mm와 58.75mm에서 방해에코가 나타나는 것을 알 수 있으며, 해석결과인 (b)에서 최대에코는 44.036mm, 방해에코는 42.125mm와 58.423mm에서 나타난다. (c)의 결과를 보면 (a)의 45.5mm, 42.3mm 위치의 에코는 결함에서 반사한 것이며, 58.75mm의 에코는 모서리에서 반사한 방해에코임을 알 수 있다. 특히 42.3mm의 에코는 결함의 상단부에서 저면으로 반사한 후 돌아온 에

코라고 생각되며, 45.5mm의 에코는 저면과 결합사이의 모서리에서 반사한 에코로 음압의 강도는 다른 두 에코보다 높다.

Fig. 10은 공칭굴절각 60°의 탐촉자를 사용하여 AI 시험편의 슬릿결함에 대한 탐상결과를 나타내고 있다. 각각의 그림에서 (a)와 (b)를 비교하면 1mm의 차이를 보이고 있으며, 특히, 아주 미미한 강도의 방해에코가 나타나는데, 이것은 (c)를 통해서 모드변환하여 저면과 측면에서 반사한 에코임을 알수있지만, 시뮬레이션의 반복횟수를 2~3회로 제한하였기 때문에 (b)의 결과에는 나타나지 않는다.



(a) result of ultrasonic test

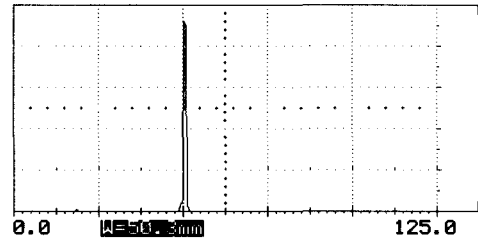


(b) result of simulation

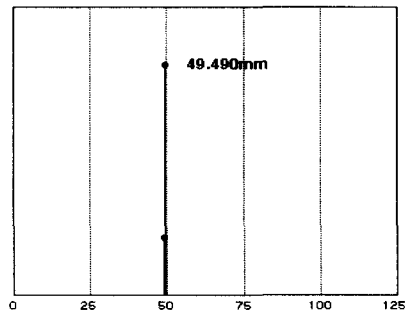


(c) ultrasonic progress process of simulation

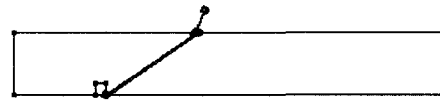
Fig. 9 Relation of simulation and test (60° transducer, SM45C)



(a) result of ultrasonic test



(b) result of simulation

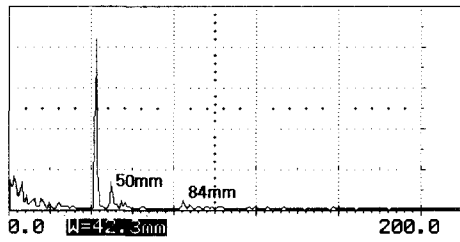


(c) ultrasonic progress process of simulation

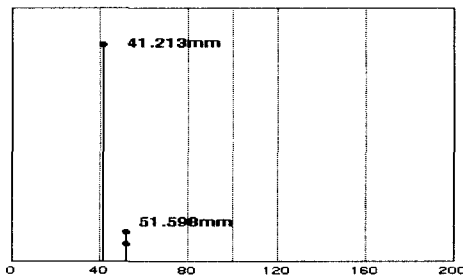
Fig. 10 Relation of simulation and test (60° transducer, AI)

공칭굴절각 45°와 60°의 사각탐촉자와는 달리 70°의 사각탐촉자는 초음파빔의 경로가 길어짐에 따라 좀 더 복잡한 모드변환을 일으키며 다양한 에코가 발생한다. 이러한 복잡한 모드변환에 의해서 생기는 결함에코와 방해에코의 구분을 위해서 공칭굴절각 70°의 사각탐촉자를 이용하여 SM45C 및 순 AI 시험편에 대하여 드릴링공 결함에서 얻을 수 있는 탐상도형과 시뮬레이션에서 해석한 결과를 서로 비교 검토하였다. 특히, 반사면이 곡면인 경우 수직면과는 달리 모드변환이 복잡하게 일어나게 되어 방해에코가 발생할 가능성이 높아지게 되므로 반사횟수를 2~3회로 제한하였다. Fig. 11은 SM45C에 대하여 드릴링공 결함에서의 공칭굴절각 70°

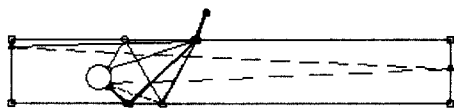
의 사각탐촉자를 사용한 탐상결과를 나타내고 있다. (a)와 (b)의 탐상도형이 각각 42.3mm, 50mm, 84mm와 41.213mm, 51.598mm의 위치에 에코가 나타나며, 1mm 안팎의 차이를 보인다. 또한, 시뮬레이션의 반사횟수를 제어했기 때문에 84mm에서의 에코가 (b)에서 나타나지 않으며 (c)를 통해서 50mm에서의 에코와 84mm에서의 에코들은 총 3~4회의 반사동안 저면에서 반사한 후 결함에서 다시 반사하여 되돌아 온 방해에코라고 생각된다



(a) results of ultrasonic test



(b) result of simulation

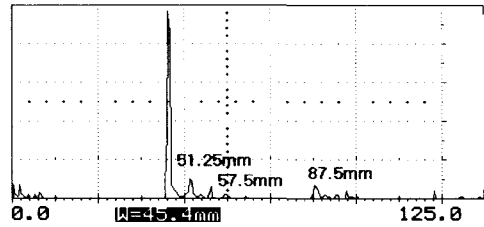


(c) ultrasonic progress process of simulation

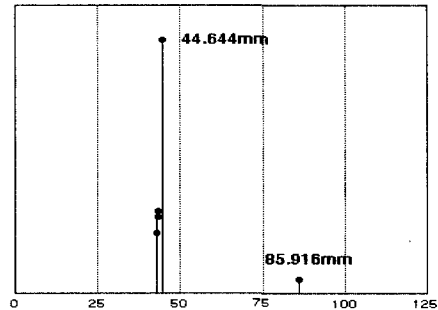
Fig. 11 Relation of simulation and test (70° transducer, SM45C)

Fig. 12는 순 A1에 대하여 드릴링공결함에서의 공칭굴절각 70°의 사각탐촉자를 사용한 결과를 나타내고 있다. (a)에서 에코의 위치는 45.4mm, 51.25mm, 57.5mm, 87.5mm이고, (b)는 44.644mm와 85.916mm이다. 여기서, (c)를 통하여 51.25mm와

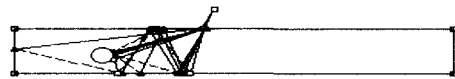
57.5mm에서의 에코는 저면에서 반사하여 결함에 부딪힌 후 수신되는 에코임을 알 수 있으며 87.5mm의 에코는 1.5 스킵거리로 결함에서 반사되어 온 에코이다.



(a) result of ultrasonic test



(b) result of simulation



(c) ultrasonic progress process of simulation

Fig. 12 Relation of simulation and test (70° transducer, A1)

Table 2와 Table 3은 각각 SM45C와 순 A1 시험편에 대하여 공칭굴절각 45o, 60o, 70°에서 사각탐촉자를 사용하여 탐상한 결과를 오차와 함께 도표화한 것이다. 표의 결과 공칭굴절각 45o, 60o, 70° 모두 측정결과와 해석결과가 모두 0.5~3%정도로 잘 일치하고 있으나, 순 A1인 경우 드릴링공에 있어서 45°인 경우 오차가 7%정도로 크게 나타났으며 이러한 결과는 다시 검토해 볼 필요가 있다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 이론적으로 측정된 음속 및 굴절각을 사용할 경우에 결과들이 잘 일치하고

있으며 더욱 더 정확한 결과를 얻고자 한다면 검사하고자하는 구조물등의 정확한 음속과 굴절각을 알아야 하지만, 보편적으로 알려져 있는 강 및 AI에 대한 음속과 굴절각만으로도 탐상도형의 예측 및 해석이 가능하다는 것을 알았다. 또한, 모드변환에 의해 생기는 탐상도형의 방해에코나 지연에코등도 시뮬레이션을 통해서 해석 가능하다는 것을 알았다.

Table 2 Comparison of echo position in SM45C specimen

Defect	Refracting angle	Experiment	Simulation	Relative error(%)
Corner	45°	35.6	35.777	0.497
	60°	41.7	41.897	0.472
Slit	45°	35.7	35.744	0.123
	60°	45.5	44.036	3.218
	70°	60	59.02	1.633
Holl	45°	16.8	16.86	0.357
	60°	26.4	26.47	0.265
	70°	42.3	41.213	2.57

Table 3 Comparison of echo position in AI specimen

Defect	Refracting 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	3.52
Holl	45°	17.3	16.05	7.225
	60°	28.1	27.42	0.680
	70°	45.4	44.644	1.665

5. 결론

초음파 탐상을 이용한 SM45C와 AI 시험편에 대하여 실측한 결과와 C언어를 사용한 초음파펄스의 전달거동과 탐상도형을 예측 및 분석한 결과는 다음과 같다.

1. SM45C 및 AI 시험편에 대하여 공칭굴절각 45o, 60o의 사각탐촉자를 이용하여 탐상한 실험결

과와 시뮬레이션 결과는 잘 일치하고 있으며, 반사횟수의 제어를 통해서 모드변환에 의한 방해에코를 제거할 수 있다.

2. 공칭굴절각 70o의 사각탐촉자를 이용하여 임의의 위치에서 탐상한 결과, 다양한 결함 및 방해에코가 나타나지만, 최대 3.5%의 상대오차내에서 시뮬레이션에 의한 결과와 잘 일치하고 있다.

3. 실제 탐상시 관별하기 곤란한 방해에코등을 구분하기 위해서 시뮬레이션하여 초음파 빔의 경로를 도식화시키면 검사자의 경험에 그다지 의존하지 않더라도 쉽게 결함에코를 추정하는 것이 가능하다.

4. 각각의 재질에 대하여 음속과 굴절각을 보정하여 사용하였지만, 유사한 재질들의 음속은 많은 차이가 나지 않기 때문에, 결함을 검사하고자 하는 구조물에 재질에 대하여 보편적인 음속과 굴절각을 사용하여 현장에 적용하는 것이 가능하다.

후기

본 논문은 경상대학교 부설 해양산업연구소 학술연구조성비의 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

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. 姜廷浩, 剛山三原, "非破壞的強度保証のための超音波自動探傷システムを用いた溶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. 박익권, 이정선, 이해무, "비파괴평가를 위한 초음파 에코 파형과 응용," 대한기계학회 '98년도 재료 및 파괴부분 학술대회 논문집, pp. 98~105, 1998.
5. 원순호, 장홍근, 조경식, 이종오, 이종규, "터빈 로타 디스크의 초음파탐상을 위한 초음파탐촉자의 지향성 및 탐상범위," 한국 비파괴검사 학회지, Vol. 18, No. 3, pp. 163~171, 1998.
6. 高志吉川, 和廣建, "超音波探傷試験の簡易的シ

- ミュレーション,” 非破壊検査, 第43卷, 第4号, pp. 223~229, 1994.
7. 谷哲士, “超音波の力線のシミュレーション法における缺陷のモデル化について,” 東北大学 大学院碩士論文, pp. 1~49.
 8. 高志古川, 和廣建, “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,” 非破壊検査, 第44卷, 第 3号, pp. 156~162, 1995.
 9. Takashi FURUKAWA and Kazuhiro DATE, “超音波探傷試験の簡易的シミュレーション,” 非破壊検査, 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 Element in Analysis and Design 7, pp. 1~13, 1990.