

광선추적법을 이용한 비파괴 내부 결함 모델 및 해석

Modeling and Analysis of a Ray Tracing Method for Non-Destructive Testing for Internal Defects

김택구¹, 김주한^{2,✉}
Teak Gu Kim¹ and Joohan Kim^{2,✉}

¹ 서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원 (Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology)

² 서울과학기술대학교 기계·자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology)

✉ Corresponding author: joo Hankim@seoultech.ac.kr, Tel: +82-2-970-6314

Manuscript received: 2014.10.10 / Revised: 2014.12.2 / Accepted: 2014.12.2

Modeling and analysis using a ray tracing method for internal defects were described. Reflection and refraction of rays on the interface of defects were modeled using the Harvey model and the Lambertian model. The diffraction on the interface of defects affected the incoming signals and it could evaluate any defects in the matter and its signal would be analyzed with the ray tracing simulation. The simulation results were compared with actual detecting signals and the ray tracing model was shown in good agreement with experimental data. This method has a possibility to be used as wave propagation modeling in non-destructive testing.

Key Words: Ray tracing (광선추적법), Non-destructive testing (비파괴검사), Simulation (전산모사)

기호설명

H = ray intensity function

σ = surface roughness

A = specula reflection coefficient

B = diffusive reflection coefficient

f = autocovariance function

Q = transfer function

x = x coordinate

y = y coordinate

1. 서론

구조물의 건전성을 평가하기 위하여 재료 내부의 결함을 검출하는 것은 중요하다. 이러한 평가 방법 중 초음파를 이용한 방법이 비파괴 평가 방법으로써 많이 사용되어지고 있다.¹ 이러한 기법 중 A-scan법은 음파 소스로부터 발생한 초음파를 재료 내부에서 반사되어 돌아온 전기적 신호로 나타낸 것이다.² A-scan법은 초음파 검사의 기초 정보를 제공함으로써 복잡한 형상을 탐상하기 위한 기초자료로도 사용된다. 그러나 재료의 형상과 내부에 존재하는 결함의 위치에 따른 복잡한 초음파의 거동 때문에 정확한 신호를 해석하는 것은 어려운 일이다.³ 특히, 특정한 경계면의 초음파 반사의 경

우 파동의 모드변환을 동반하며, 반사면의 형상이 불규칙한 경우에 신호 해석은 더욱 복잡하다. 이러한 모드변환 등의 영향으로 초음파의 전달 거동은 검사체 내부에서 매우 복잡한 양상을 가진다. 또한, 검사체의 형상이 곡면이나 불규칙적인 면을 가질 때, 결함과 상관 없이 방해 에코가 발생하여 초음파의 신호분석에 어려움을 줄 수 있다.^{3,4}

방해 에코 등이 포함된 결함 재료의 초음파 신호분석을 용이하게 하기 위해 수치적 모델링을 통해 초음파 거동을 시뮬레이션 하는 연구가 진행되어 왔다. 예를 들어 내부의 결함의 위치에 따른 신호의 변화를 분석하기 위하여 유한요소법 (finite element method, FEM)을 적용한 시뮬레이션이 그 한가지 방법이다.⁵ 유한요소법을 이용한 시뮬레이션에서는 계면에서의 산란 형태가 중요하며 이는 정확한 신호 분석 모델에 필수적이다.^{6,7} 신호 분석과 관련된 수치해석 모델링 중 기하광학모델을 적용한 광선추적법(ray-tracing model)이 계면에서의 파의 산란분석을 위해 사용될 수 있다.^{8,9} 광선추적법의 최대 장점은 그 모델이 단순하며 해석 속도가 빠르다는 것이다. 그러나, 광선추적법을 이용하여 탐상 초음파 거동을 시뮬레이션 하는 경우, 결함 또는 주요 반사면에 적절한 산란모델의 적용 연구가 미진한 실정이다.

본 연구에서는 동공결함의 경우에 광선추적법이 적용 가능한 지 살펴보았으며 결함 또는 불규칙한 계면에 있어서의 광선 반사에 대해 하비 모델 (Harvey model)과 램버시안 모델(Lambertian model)의 산란 이론을 적용하여 시뮬레이션 및 해석을 수행하였다. 하비 모델은 광학적 산란모델의 하나로, 광선의 산란에 관하여 산란표면에서의 전달함수와 확산함수로 표현된다. 또한, 램버시안 모델은 모든 관찰방향에서 같은 강도를 나타내며 균일하게 방사하는 산란 모델이다. 각각의 산란 모델이 적용된 경우의 시뮬레이션 결과와 실험데이터를 비교하여 파의 거동을 예측하고 내부 결함 탐상의 정밀도를 높이는 연구를 수행하였다.

2. 배경이론

비파괴검사에서 고체 내부의 결함을 검출하기 위하여 사용하는 초음파는 파장이 수 mm 가량으로 지향성이 예리하고 빛과 유사한 직진성을 갖는다. 초음파는 진행하는 매질과 각각의 계면에서의 음향성이 현저하게 다르기 때문에, 결함과 같은

불연속부의 반사가 결함 검출을 가능하게 한다. 일반적으로, 비파괴 검사를 수행하는 경우 압전소자(PZT)에 주기적인 전압을 인가하여 특정한 주파수를 가진 초음파를 발생시킨다. 진동자는 일정한 방향으로 초음파를 강하게 방사하는 성질이 있는데, 이와 같은 방사 성질을 지향성이라 한다. 원거리에서는 중심축에서 초음파의 강도가 가장 높고, 중심축에서 멀어질수록 초음파의 강도가 급격히 낮아지게 된다. 그 강도가 낮아지는 경향은 진동자의 크기가 클수록, 주파수가 높을수록 강한 경향을 보인다. 이러한 초음파 거동의 전파 및 반사 등은 균질한 매질과 계면에서의 광선의 거동과 유사성을 가진다. 그렇기 때문에 이러한 광선의 매질 및 계면에서의 거동을 예측하면 실제 내부에서의 초음파의 거동을 간접적으로 해석 가능하다. 재료 내부에서의 결함 등은 광선모델에 있어서 상이한 매질 계면에서의 산란 및 굴절로 모델링할 수 있다. 또한, 광선이 계면에서 산란 및 굴절되는 거동에 대한 모델 정의가 필요하다. 본 연구에서 하비 모델과 램버시안 모델을 적용한 기법이 사용되었다.

2.1 하비모델

하비 모델은 하비(J. E. Harvey)등이 광학적으로 매끈한 표면에서의 레일리 산란(Rayleigh scattering)을 적용한 광학 모델이다.¹⁰ Fig. 1은 하비 모델을 도식적으로 나타낸 것으로 광학적으로 거친 표면에서의 입사된 빔과 직접 반사된 빔, 그리고 산란 빔과의 관계를 나타내고 있다.

Fig. 1과 같은 반사 형태에서 산란 강도에 대해 하비 모델은 표면 거칠기(σ)와 관계된 다음과 같은 관계로 나타낼 수 있다.¹⁰

$$H(x, y) = A + BQ(x, y) \tag{1}$$

여기서,

$$A = \exp[-(4\pi\sigma)^2] \tag{2}$$

$$B = 1 - \exp[-(4\pi\sigma)^2] \tag{3}$$

$$Q = \frac{\{\exp[(4\pi\sigma)^2 f(x, y)] - 1\}}{\exp(4\pi\sigma)^2 - 1} \tag{4}$$

Fig. 1에서도 나타나 있듯이 반사된 빔은 하비 모델에서 정반사(Specular reflection, part A)와 산란

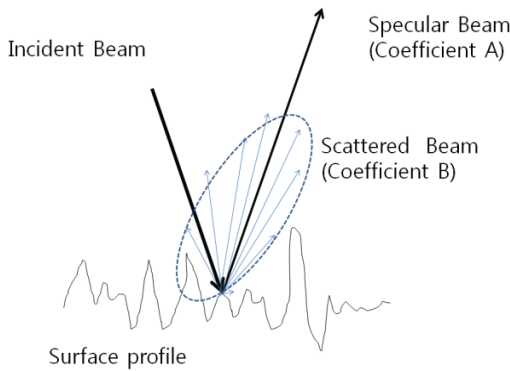


Fig. 1 Reflected radiation from a rough surface

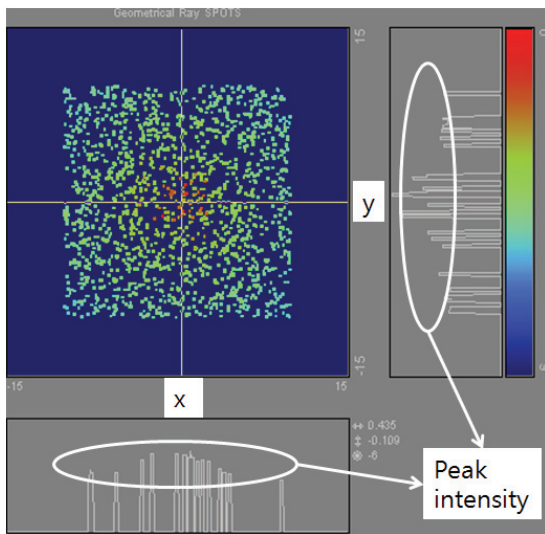


Fig. 2 Amplitude of scattered light in a detector (Harvey model)

반사(Diffusive reflection, part B) 로 구분해서 나타낼 수 있다. 이 모델은 정반사의 영향과 산란반사의 중첩으로 전체 광선의 산란성을 모델링화 할 수 있다. 하비 모델은 광선추적 시뮬레이션에 적용되어 불특정한 계면의 반사 모사에 적용하였다.

Fig. 2는 하비 모델을 적용한 계면(실체에 있어서는 재료내 결함 계면)을 투과하는 산란에 관한 시뮬레이션 적용예이다. 실제로 보여지는 광파의 개수는 20개 이지만, 실제 시뮬레이션을 위해 사용된 광파의 개수는 400개 이다. Fig. 2에서 산란되지 않은 광선과 산란 광선의 분포를 확인할 수 있으며 그 중심에 정반사된 광밀도가 산란반사와 중첩되어 나타내는 것을 확인할 수 있다.

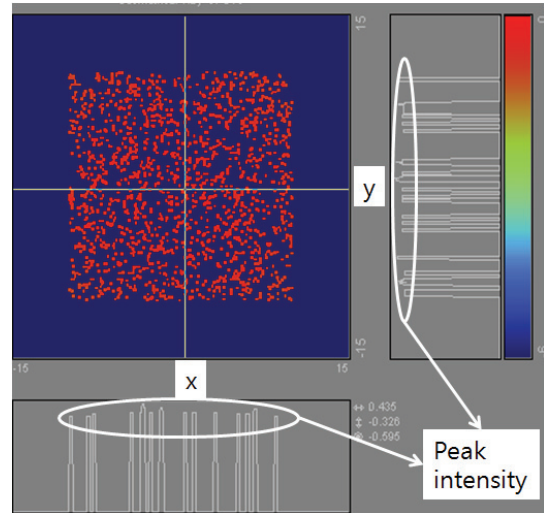


Fig. 3 Amplitude of scattered light in a detector (Lambertian model)

2.2 램버시안 모델

광학적으로 매끈한 표면에서의 이상적인 확산 모델인 램버시안 모델(Lambertian Model)은 광파가 특정한 계면에 입사하면, 산란되는 광파의 각도는 균일하며 확산되는 광파의 세기는 일정한 것으로 가정하는 모델이다. 램버시안 모델이 적용될 수 있는 표면을 램버시안 표면(Lambertian surface)이라 하며, 광학적으로 램버트 코사인 법칙으로 통칭할 수 있다.¹¹ 그러나, 실제 시스템에서의 산란은 입사각과 동일한 반사각의 광파의 세기가 가장 강하고 이 램버시안 모델은 이상적인 방사현상을 모사하는 경우에 유용하게 적용 가능하다. 램버시안 모델은 산란되는 표면에서 입사각이 크지 않다면, 사실에 매우 가깝게 표현할 수 있는 모델이다. Fig. 3는 램버시안 모델을 적용한 계면에서의 산란분포를 보여주고 있다.

3. 실험방법

결함 계면에서의 산란 모델을 검증하기 위하여 초음파를 이용한 탐상을 실험적으로 수행하였다. 초음파의 실험은 투과법을 기초하여 구성하였다. 이러한 투과법은 송신용 탐촉자(Ultrasonic source)와 수신용 탐촉자(PZT)를 이용하여 탐상하는 방법으로, 시험체 내의 결함으로부터 초음파의 산란과 감쇠의 신호를 얻고 이를 통해 내부의 결함을 알아내는 방법이다. 초음파 탐상을 위하여 탐상기

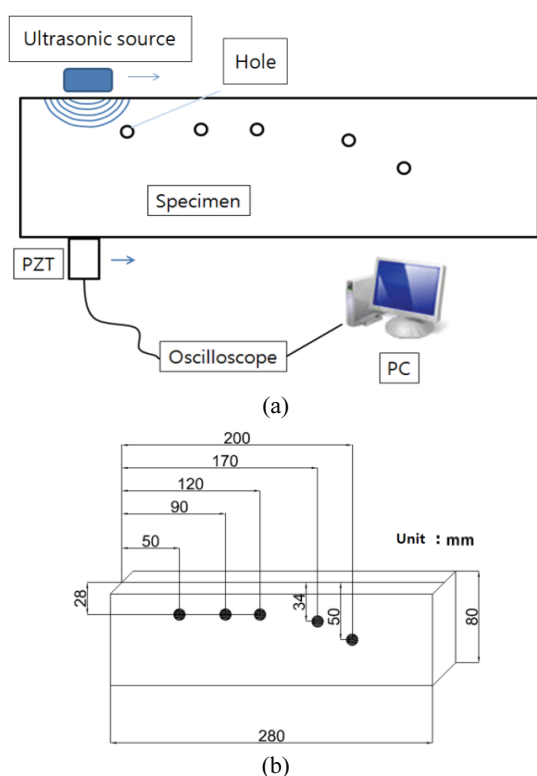


Fig. 4 Schematic of the experiment (a) and the design of the specimen (b)

(USD15)와 탐촉자(N4Z10N)를 이용하여 실험장치를 구성하였다. 탐상기에서 검출된 신호는 오실로스코프 (Tektronix, TDS 784D)에 연결하여 신호 처리를 수행하였다. 초음파 측정은 철강 시편의 좌측 30 mm 지점부터 5 mm 간격으로 우측으로 탐촉자를 이동시키며 측정하였다. 시편의 내부는 결함 동공이 가공되어 있어 결함동공의 계면으로부터 결함신호를 얻을 수 있었다. 실험을 수행한 장치와 결함 시편의 구조는 Fig. 4와 같다.

4. 시뮬레이션 및 실험결과

시뮬레이션을 수행하기 위하여 광선추적법 적용한 상용 소프트웨어(ASAP)를 이용하였다.¹³ 시뮬레이션에서는 내부에서의 모델링된 산란 효과를 적용 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 기하학적 구조는 실제 실험 시편과 같이 설정하였다. 각각의 결함동공의 크기는 직경 4 mm 인 것으로 가정하였다. 송신용 탐촉자로 설정한 기하학적 구조에서

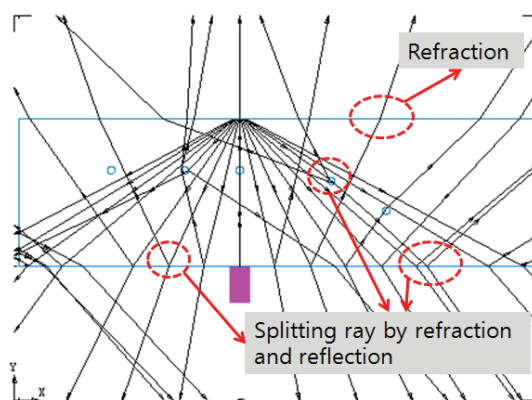
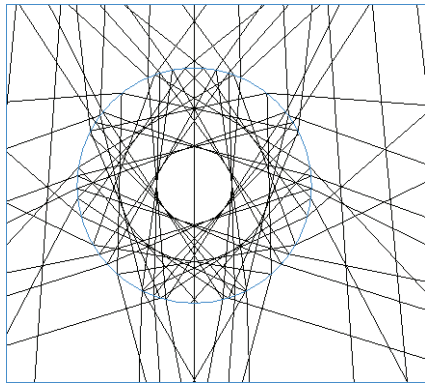


Fig. 5 Ultrasonic behavior simulation in specimen simulated by ASAP

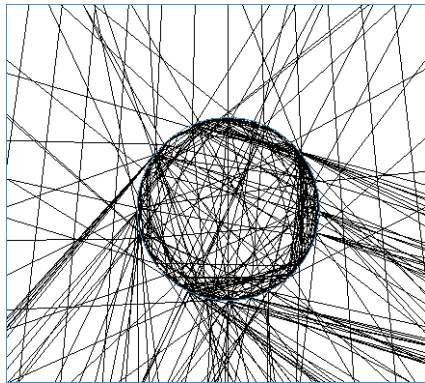
광파가 방사되는 것으로 설정하였고, 수신용 탐촉자로 설정한 기하학적 구조물에서 수신된 광파의 세기를 계산하도록 하여 각각의 위치에서 광파의 강도를 측정하였다. 시뮬레이션을 수행하기 전에 적은 갯수의 광선을 가지고 실제 광파의 진행을 확인할 수 있었으며 그 결과가 Fig. 5과 같이 얻어질 수 있었다. 광선추적을 보면 동공에서 광선이 분할하여, 굴절 및 반사하는 것을 개략적으로 확인할 수 있다. 방사되는 탐상광선의 갯수는 201×501개로 설정하였다. 수신용 탐촉자는 실제 탐촉자와 마찬가지로 10 mm 의 직경 크기를 가진 것으로 설정하였다.

추적광선이 결함동공에서 산란되는 모델의 경우가 Fig 6에 나타나 있으며 산란모델이 적용되지 않은 이상적인 모델(Fig. 6(a))과 산란모델 (하비모델, Fig. 6(b))이다. 이상적 모델의 경우 산란모델이 적용되지 않은 상태이기에 계면에 있어서 산란에 의한 광선의 갯수 증가나 신호 강도의 분산이 발생하지 않는다. 램버시안 모델의 경우 그 산란 형태는 하비 모델과 동일하므로 그림으로 따로 나타내는 것을 생략하였다. 두개의 산란모델의 차이는 내부 강도함수이며 디텍터에서 그 값을 다르게 시뮬레이션되어 전체 강도함수를 계산하는데 사용되었다. 실제 한개의 모델 시뮬레이션에 걸린 시간은 100,701개의 추적 광선에 있어 340초 정도가 소요되었으며 이러한 결과는 비슷한 유형의 해석에 있어 매우 빠른 해석 속도로 여겨질 수 있다.¹²

각각의 모델들을 적용하여 수신용 탐촉자에 입사되는 탐상광선의 총량 밀도를 그래프로 표현할 수 있으며 이는 실제 실험에서의 초음파의 수신값



(a) Ideal model



(b) Diffuse model (Harvey model)

Fig. 6 Ray tracing 2D view on a bore hole

과 유사성을 가진다. 산란 모델이 적용된 부분은 결함동공부분이다. 본 시뮬레이션을 검증하기 위하여 수행한 실제 실험에서는 수신용 탐촉자에 가장 먼저 입사된 초음파의 세기만을 측정하여 실험하였기 때문에 시뮬레이션에 있어 외곽 검사체 경계면에서 산란된 효과는 고려하지 않았다. 초음파가 진행하여 동공에서 산란하는 경우, 램버시안 모델 또는 하비 모델에 의하여 산란되며 주 산란면은 수신용 탐촉자가 존재하는 위치로 설정하였다. 이와 같은 설정을 수행하는 경우 수신용 탐촉자로 설정한 기하학적 구조에서 측정되는 신호의 세기가 더 커질 것으로 예측하였으며, 경계 및 기타 다른 영역에서 반사되어 입사하는 산란광선의 출력을 줄어들어 결론적으로 SNR이 커질 것으로 판단하였다.

결함동공의 표면이 반사 및 굴절에 대해 이상적인 경우 탐상광파는 동공에서 입사한 각도와 동일한 각도로 반사된다. 이에 따라 동공의 표면을

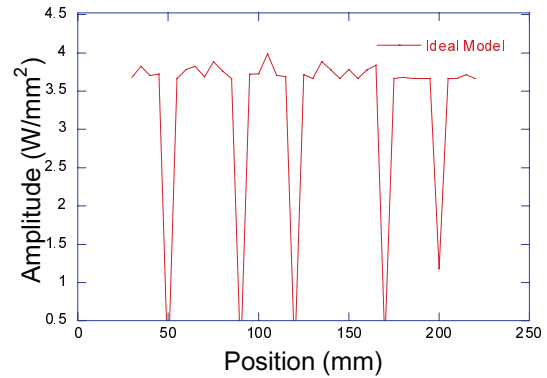


Fig. 7 Ray amplitude vs. position (Ideal model)

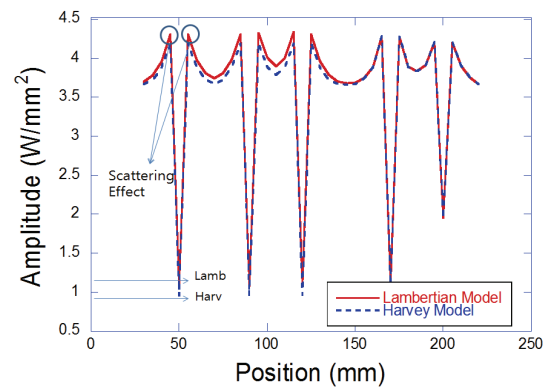


Fig. 8 Simulation results of Harvey model and Lambertian model

거쳐 반사되어 수신용 탐촉자에 도달하는 탐상광파는 제한적이다. 이 경우 결함동공은 수신용 탐촉자에 도달하는 탐상광파의 대부분을 차단하는 역할을 하며, 이상적인 측정이 이루어진다면, 결함동공이 존재하지 않는 모든 부분에서는 거의 동일한 출력이 도출된다. 본 예측은 시뮬레이션을 통한 결과와 일치하며 이는 Fig. 7과 같이 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 결함동공 계면에 산란 모델인 하비 모델과 램버시안 모델을 적용하여 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 두 모델이 적용된 계면은 내부 결함 동공의 표면이며, 구조물의 다른 부분은 이상적인 모델인 것으로 가정하였다. 동공의 표면에서 반사된 탐상광파는 하비 모델과 램버시안 모델의 산란되는 성질을 따라 수신용 탐촉자에서 측정되는 광파 신호의 세기가 강하게 얻어지는 결과를 가져온다. 예를 들어 결함동공으로 설정된 부분

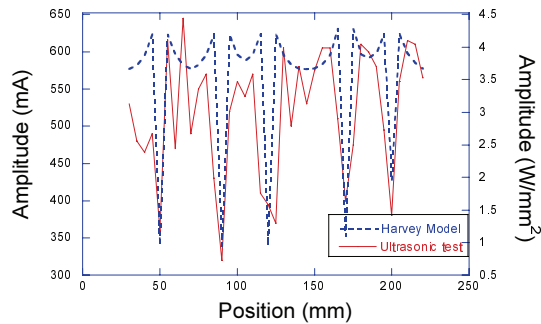


Fig. 9 Comparison of the experimental and the simulation results

(50 mm, 90 mm, 120 mm, 170 mm)에서 Fig. 7의 이상적인 모델은 신호의 강도가 0 W/mm²에 가까운 크기를 보인데 반하여 보정 모델인 하비모델과 램버시안 모델은 강도가 1 W/mm² 정도로 증가되어 나타났다. 이러한 증가 현상은 실제 측정에서 결함동공 및 경계에서의 음파 산란 등에 의한 노이즈 시그널에 대한 효과를 시뮬레이션에 반영한다고 볼 수 있다. 또한 이러한 현상은 결함동공의 경계에서 더욱 뚜렷하게 나타날 수 있으며 이와 같은 해석이 Fig. 8의 산란효과(Scattering effect)와 같이 분석될 수 있다.

두 산란모델의 비교에 있어서는 두 가지 현상을 확인할 수 있었다. 첫째, 램버시안 모델의 신호가 하비 모델의 신호보다 증가하였다. 램버시안 모델에서는 탐상광파의 산란되는 각도가 입사각에 무관하게 광폭적으로 퍼지게 된다. 이와 같은 방식은 반사파의 증가로 탐촉자로 입사되는 광파의 양이 방향성 산란이 있는 하비 모델에 비하여 증가됨으로 해석되어질 수 있다. 둘째, 결함동공 위치의 신호에 있어서는 하비 모델이 램버시안 모델보다 조금 이상적 모델에 가깝게 계산되었다. (Ideal: 0.1 W/mm², Harvey: 0.95 W/mm², Lambertian: 1.08 W/mm², Position: 50 mm) 본 결과는 실제 모델링에 있어서 하비 모델의 결과가 주변 산란파에 의한 노이즈의 영향을 보다 적절히 나타낸다고 분석할 수 있다.

Fig. 9는 실제 시편을 초음파 탐상한 결과로, 결함동공 부분 (50 mm, 90 mm, 120 mm, 170 mm)에서는 시뮬레이션과 거의 동일한 결과를 보였으며 경계부분의 고차 반사파에 의해 노이즈가 측정되었다. 결함동공부근에서의 시뮬레이션과의 오차는 최대 4%로 확인되었다. 결함동공에서는 반사 초음

파의 상대적 크기는 결함동공이 있는 곳에서 낮게 측정되었으며 일반적인 경향은 산란에 의한 노이즈 신호가 포함된 산란모델과 유사한 경향을 보인다고 볼 수 있다. 본 광선추적의 신뢰성의 향상은 다수의 광선파를 적용하여 각각의 경계면에 실제와 유사한 반사조건을 적용시킴으로써 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 결함이 있는 검사체 내부에서의 초음파 거동을 기하광학 이론에 기초하여 시뮬레이션 하였으며, 투과법을 적용한 접촉식 초음파 탐상을 수행하여 실험하고 시뮬레이션과 비교 분석하였다. 시뮬레이션과 실험에서 각각의 결함동공 위치에 대한 탐상광파와 초음파의 신호 세기 결과는 비슷한 경향을 확인할 수 있었다. 산란의 효과가 계면에서 적용된 하비 모델이나 램버시안 모델 모두 실제 실험 결과와 유사한 시뮬레이션 경향을 보여주었으나 초음파의 고차원 노이즈 시그널을 유사하게 모사하지는 못하였다. 다양한 조건의 결함 경계면에 있어서 탐상광선의 전파성질을 반영하도록 적절히 모델링을 수행한다면 본 시뮬레이션의 신뢰성은 높아질 것으로 판단된다. 또한 그 해석 속도가 수 분 정도로 빠르다는 장점이 있어 다양한 시도가 신속히 가능하므로 단순한 탐상광파의 거동 예측을 통해 초음파 이용 비파괴검사의 비교 분석에 적용될 수 있는 잠재성을 가진다고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Kwon, S. J., Lee, D. H., Seo, J. W., and Kim, J. C., "Evaluation of Non Destructive Inspection Interval for Running Safety of Railway Axle," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 31, No. 9, pp. 777-782, 2014.
2. Mouritz, A. P., Townsend, C., and Shah Khan, M. Z., "Non-destructive Detection of Fatigue Damage in Thick Composites by Pulse-Echo Ultrasonics," Composites Science and Technology, Vol. 60, No. 1,

- pp. 23-32, 2000.
3. Lee, J. S., Park, I. K., and Lee, H. M., "Wavelet Analysis of Ultrasonic Echo Waveform and its Application for Nondestructive Evaluation," Proc. of Korean Society for Non-destructive Testing, pp. 39-47, 1998.
 4. Achenbach, J. D. and Gautesen, A. K., "Geometrical Theory of Diffraction for Three-D Elastodynamics," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 61, No. 2, pp. 413-421, 1977.
 5. Kishore, N. N., Sridhar, I., and Iyengar, N. G. R., "Finite Element Modeling of the Scattering of Ultrasonic Waves by Isolated Flaw," NDT & E International, Vol. 33, No. 5, pp. 297-305, 2000.
 6. Boström, A. and Bövik, P., "Ultrasonic Scattering by a Side-drilled Hole," International Journal of Solids and Structures, Vol. 40, No. 13, pp. 3493-3505, 2003.
 7. Rodriguez, M. A., San Emeterio, J. L., Lazaro, J. C., and Ramos, A., "Ultrasonic Flaw Detection in NDE of Highly Scattering Materials using Wavelet and Wigner-Ville Transform Processing," Ultrasonics, Vol. 42, No. 1, pp. 847-851, 2004.
 8. Yamada, H., Fukutomi, H., Lin, S., and Ogata, T., "Prediction of B Scope Images for Ultrasonic Testing by Geometrical Theory of Diffraction," Proc. of the 35th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP Publishing, pp. 65-72, 2009.
 9. Lin, S., Tamata, H., Fukutomi, H., and Ogata, T., "Prediction of Received Signals in Ultrasonic Testing by Finite Element Method Combined with Geometrical Optics Theory," Proc. of the 35th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP Publishing, pp. 57-64, 2009.
 10. Kotha, A. and Harvey, J. E., "Scattering Effects of Machined Optical Surfaces," Proc. of SPIE, Vol. 2541, pp. 54-65, 1995.
 11. Bubb, D. M., Yi, S., Kuchmek, J., Corgan, J., and Papantonakis, M., "Laser Processing of Poly (methyl methacrylate) Lambertian Diffusers," Applied Surface Science, Vol. 257, No. 1, pp. 22-24, 2010.
 12. Kishore, N., Sridhar, I., and Iyengar, N., "Finite Element Modelling of the Scattering of Ultrasonic Waves by Isolated Flaws," NDT & E International, Vol. 33, No. 5, pp. 297-305, 2000.
 13. Li, C.-J., Fang, Y.-C., and Cheng, M.-C., "Prism-Pattern Design of an LCD Light Guide Plate using a Neural-Network Optical Model," Optik-International Journal for Light and Electron Optics, Vol. 121, No. 24, pp. 2245-2249, 2010.