

초음파의 전파, 반사, 산란 현상에 대한 수치 시뮬레이션

Numerical study of propagation, reflection, and scattering of ultrasonic waves

임 현 준*
Yim, Hyunjune

ABSTRACT

A numerical model is introduced to simulate propagation, reflection, and scattering of elastic waves in solids. The model consists of mass points and linear springs, interconnected with in a lattice structure; hence, its name, the mass-spring lattice model (MSLM). The MSLM has successfully been applied to the numerical simulation and visualization of various elastic wave phenomena involved in ultrasonic nondestructive testing (NDT). This method is useful to simulate, design, or analyze actual testing. Some representative examples of numerical simulation using the MSLM are presented, and future work necessary for its further development is addressed.

1. 서 론

초음파 비파괴평가법은 균열과 같은 시험체 내부의 결함을 탐지하거나 탄성계수와 같은 재료의 물성을 평가하기 위한 목적으로 널리 사용되고 있는 방법이다. 초음파가 피검사체 내에서 전파되고 회절되는 현상을 정확하게 파악하고 있어야, 초음파 검사를 효과적으로 수행할 수 있고 검사결과를 정확하게 분석할 수 있으며 효과적인 검사법을 개발할 수도 있다. 이런 맥락에서 초음파검사의 물리현상을 수치적으로 시뮬레이션할 수 있는 다양한 방법이 시도되어 왔다[1]. 이러한 수치해석 방법들은 이방성 재료, 비균질 재료 및 형상이 복잡한 검사체에 대해서도 쉽게 적용될 수 있으므로 그 응용 범위가 매우 넓을 뿐 아니라, 계산 결과를 쉽게 가시화할 수 있으므로 초음파의 전파 및 회절 현상에 대한 이해를 증진시킬 수 있는 장점도 가지고 있다. 그러나, 수치해에는 항상 오차가 포함되므로, 수치해석의 알고리즘을 체계적으로 분석하여 그 신뢰성을 확보하는 것이 매우 중요하다.

본 논문에서는 초음파의 물리적 현상을 시뮬레이션 할 수 있는 효과적인 수치적 모델로서 질량-스프링 격자모델(mass-spring lattice model, MSLM)을 소개한다. 이 모델은 원래 산업설비, 기계류의 초음파 비파괴검사를 시뮬레이션 할 목적으로 개발되었으며, 그 외에도 다양한 탄성파 문제에 적용이 가능한 모델이다. 먼저, MSLM을 소개하고, 이 모델을 이용하여 시뮬레이션 한 결과들을 보인다 [1,2]. 이러한 결과들은 대부분 콘크리트 구조물에서도 정성적으로는 거의 동일한 물리적 의미를 갖는다. 이 수치모델은 이방성 재료, 비균질 재료 및 형상이 복잡한 검사체에 대해서도 쉽게 적용될 수 있으므로 그 응용 범위가 매우 넓다. 또한, 이 모델을 사용하면 계산 결과를

* 홍익대학교 기계·시스템디자인공학과

쉽게 가시화할 수 있으므로 탄성파의 전파 및 회절 현상에 대한 이해를 증진시킬 수 있는 장점도 있다.

2. 질량-스프링 격자모델

MSLM은 탄성체의 물리적 거동에 근거하여 매질을 여러 개의 미소영역으로 나눈 후 Fig. 1과 같이 미소영역의 질량을 대변하는 질점(mass point)과 미소영역의 탄성적 성질을 대변하는 탄성 스프링으로 구성되는 모델이다. MSLM의 차분식은 Fig. 1의 가운데 질점에 대해 미분방정식 형태의 운동방정식을 세우고 가속도를 중간차분(central difference)함으로써 구해진다 [1]. 이 차분식은 시간에 대해 외연적(explicit)이므로 초기조건과 경계조건을 적용하여 계산을 수행함으로써, 모든 위치에서 모든 시간에서의 변위를 구해 나갈 수 있다. Fig. 1에 보인 스프링상수는 위에 설명한 차분식을 연속체(continuum)의 지배방정식과 비교함으로써 구할 수 있다. 유도된 차분식으로부터 수치해를 구함에 있어서, 수치계산의 안정성을 고려하여 시간간격과 격자간격을 결정하여야 한다 [1].

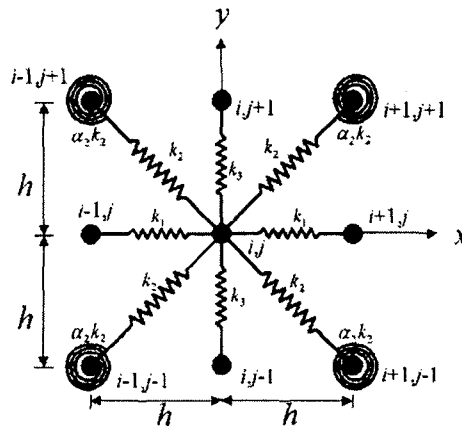


Fig. 1 Mass-spring lattice model (MSLM)

3. 수치해 및 토의

본 절에서는 비파괴검사에서 발생하는 여러 파동현상에 대한 수치 시뮬레이션 결과를 보인다 [1,2]. Fig. 2는 본 논문에서 고려하는 문제들을 도식적으로 보이고 있다. Fig. 2(a), (b)는 여러 개의 자유표면이 만나는 코너(corner)에 평면종파가 입사하는 경우이고, Fig. 2(c), (d)는 강(steel)에 매립되어 있는 사각형 및 원형의 알루미늄 개재물(inclusion)에 평면종파가 입사되는 경우이다. 또, Fig. 2(e)는 표면에 수직인 표면균열에 평면종파가 경사되게 입사하는 경우이며, Fig. 2(f)는 자유표면의 한 점을 수직방향의 힘으로 가진하는 경우이다. Fig. 2의 모든 경우에 있어서 가진력은 시간상으로 두 주기에 걸친 사인파(sine wave) 형태이며, 특별한 언급이 없는 경우의 매질은 강이다.

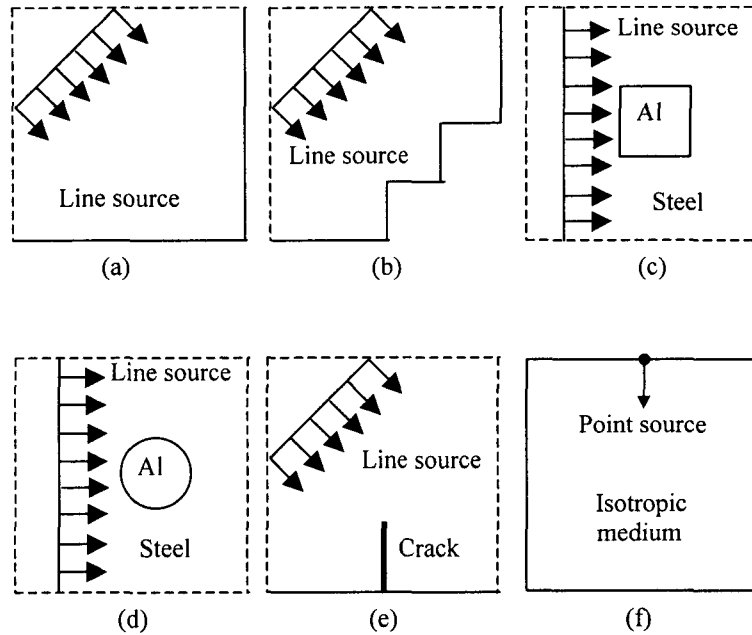


Fig. 2 Schematic diagrams of numerically simulated problems

Fig. 2의 각 경우에 대해 MSLM을 이용하여 수치해를 구한 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. 즉, Fig. 3(a)~(f)는 Fig. 2(a)~(f) 각각에 대한 수치해로서, 입사파가 결함을 지나 어느 정도의 시간이 경과하였을 때이다. Fig. 3에서 검은 부분은 변위가 없는 부분이고 밝을수록 큰 변위가 존재함을 의미한다. Fig. 3(a)에서 두 자유표면으로부터 각각 두 개의 반사파가 발생함을 알 수 있는데, 이 중 하나는 입사파와 같은 모드인 종파이고 다른 하나는 모드변환된 횡파이다. 이들 반사파의 반사각은 해석해의 경우와 매우 잘 일치함을 확인하였다. Fig. 3(a)는 입사파가 아직 코너에 도달하지 않은 순간의 결과인데, 시간이 흘러 입사파가 코너에 도달하면 코너로부터 회절이 발생하며 이 현상 역시 Fig. 4에 보인 수치해로부터 관찰할 수 있다.

Fig. 3(b)는 매우 복잡한 양상을 보이는데, 이는 여섯 개의 자유표면과 다섯 개의 코너로부터 발생하는 반사 및 회절 때문이다. Fig. 3(c)에서는 사각형 개재물의 네 코너에서 발생하는 회절 현상과 개재물의 좌우 경계면에서 발생하는 반사 및 굴절 현상을 관찰할 수 있을 뿐만 아니라, 개재물의 위, 아래 경계면에서 90°로 입사하는 종파에 의해 발생하는 반사 횡파도 확인할 수 있다. Fig. 3(d)는 Fig. 3(c)와 유사하지만 개재물이 원형이므로 크리핑파(creeping waves)가 발생함을 관찰할 수 있다. 균열에 의해 산란이 발생하는 문제에 대한 결과인 Fig. 3(e)에서는 균열의 좌측면에서 반사가 발생하고, 균열 선단을 중심으로 회절파가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 이와 같이 수치해로부터 관찰되는 모든 현상은 해석해 [3]와 잘 일치하는 것이다.

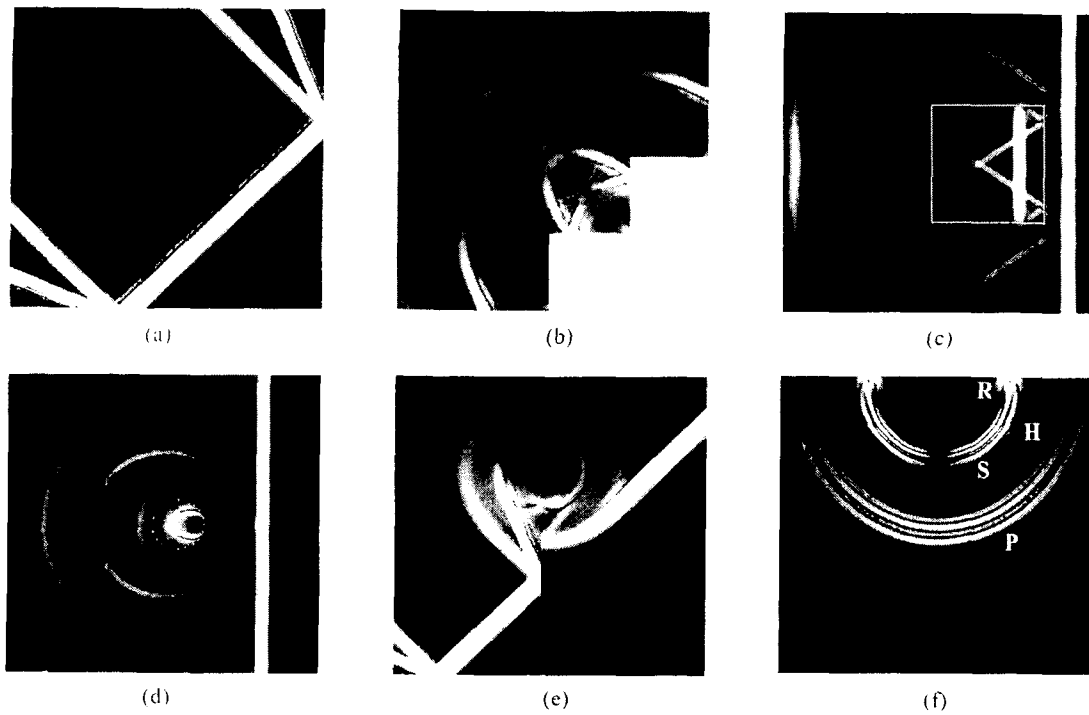


Fig. 3 Numerically simulated wavefields for problems in Fig. 2



Fig. 4 Computed wavefield after corner reflection in problem shown in Fig. 2(a)

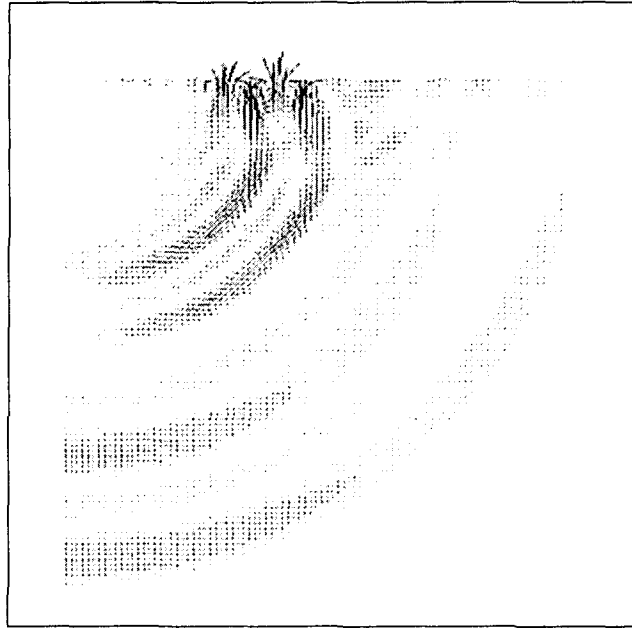


Fig. 5 Expanded vector-represented view of right-hand half of Fig. 3(f)

마지막으로, 자유표면 가진 문제(Fig. 2(f))에 대한 수치해(Fig. 3(f))를 보면, 반원 모양의 종파 및 횡파 뿐 아니라 표면을 따라 전파하는 표면파(R)과 헤드파(head wave, H)도 관찰할 수 있다. 표면파를 보다 잘 관찰하기 위해 Fig. 3(f)의 우측 반을 확대하여, 벡터표현으로 나타낸 것이 Fig. 5에 나타나 있다. 여기서, 벡터표현이라 함은 각 질점의 변위벡터를 선분으로 표현한 것을 의미한다. Fig. 5에서 자유표면 위로 변위가 발생하는 표면파를 명확하게 관찰할 수 있다. 이 표면파의 전파속도를 수치해로부터 구하면 약 3000 m/s로서 해석적으로 구한 값과 매우 잘 일치한다. 또한, Fig. 3(f)에서 관찰할 수 있는 헤드파의 위치도 해석해의 결과와 정확하게 일치한다.

이와 같이, Fig. 3에 보인 수치해는 모두 해석해와 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 물론 Fig. 1에 보인 MSLM이 탄성파의 시뮬레이션에 있어 매우 효과적인 방법임을 나타내는 것이다. 특히, MSLM은 개인용 컴퓨터(personal computer, PC)에서 비교적 짧은 계산시간을 들여 유용한 결과를 얻을 수 있다는 특징이 있다. Fig. 3의 수치해 각각을 최신의 PC로 구하는데 소요되는 시간은 약 10~15분 정도이며, 이는 같은 문제의 해를 구하기 위해 수 시간 또는 수십 시간이 걸리는 유한요소법에 비하면 매우 큰 장점이다.

4. 결론

본 논문에서는 고체 내 탄성파의 전파, 반사, 산란을 시뮬레이션 할 수 있는 질량-스프링 격자 모델(MSLM)을 소개하고, 이를 이용하여 다양한 탄성파 문제에 대해 구한 수치 시뮬레이션 결과

를 보였다. 이러한 수치해가 모두 해석해와 잘 일치함을 설명하였다.

본 논문에서 보인 MSLM이 실제 문제에서 유용하게 활용되기 위해서는 몇 가지의 추가적인 연구가 필요하다. 먼저, 초음파 탐촉자를 모델링하여 초음파 비파괴검사 전체를 시뮬레이션 할 수 있는 패키지 형태를 갖추어야 한다. 탐촉자에는 발신 탐촉자와 수신 탐촉자가 있으므로, 초음파의 방사장만 모델링하면 되는 것이 아니라, 파동을 전기적 신호로 변환하는 수신 작용도 모델링하여야 할 것이다. 또, 대부분의 피검사체가 3차원 형상을 가지고 있으므로, 3차원 시뮬레이션이 가능한 프로그램을 개발하여야 할 것이다. 현재, PC의 성능으로는 3차원 계산이 용이하지 않지만, 머지 않아 가능해 질 것으로 예상된다.

결론적으로, 본 논문에서 소개한 MSLM을 활용하면, 주어진 문제에 대해 효과적인 검사방법을 찾거나, 복잡한 실험결과를 해석하고자 할 때 매우 유용할 것이며, 비파괴 검사방법을 교육, 훈련 시키기 위한 도구로서도 매우 큰 역할을 할 것이다.

참고문헌

1. Yim, H. and Choi, Y., (2000), Simulation of ultrasonic waves in various types of elastic media using the mass spring lattice model, *Materials Evaluation*, Vol. 58, pp. 889-896.
2. Yim, H. and Sohn, Y., (2000), Numerical simulation and visualization of elastic waves using mass-spring lattice model, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 47, No. 3, pp. 549-558.
3. Graff, K.F., (1991), *Wave motion in elastic solids*, Dover.