

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.8.793>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

액체-고체 경계면이 존재하는 구조물에서의 파동 전파 해석 및 실험

박상진* · 이희남**† · 윤두병*** · 박진호***

* 과학기술연합대학원 신형원자로시스템공학과, ** 순천대학교 기계우주항공공학부,
*** 한국원자력연구원 원자력융복합개발본부

Computational and Experimental Analyses of the Wave Propagation Through a Bar Structure Including Liquid-Solid Interface

Sangjin Park*, Huinam Rhee**†, Doo Byung Yoon*** and Jin Ho Park***

* UST Graduate School

** Division of Mechanical & Aerospace Engineering, Sunchon National University

*** Korea Atomic Energy Research Institute

(Received September 17, 2014 ; Revised June 4, 2015 ; Accepted June 9, 2015)

Key Words: Wave Propagation(파동 전파), Longitudinal Wave(종파), Shear Wave(횡파), Wave Speed(파동 속도)

초록: 막대형 금속 구조물을 통하여 전파되는 종파와 횡파의 전달 현상을 전산구조해석 모델을 이용하여 시뮬레이션 하였으며 실험 결과와 비교 분석하였다. 실험 및 해석은 막대 구조물 전체가 알루미늄인 경우 및 파동 전파 경로인 알루미늄 막대 중간 부분에 액체층을 포함한 경우 등 두 가지 조건에 대해 수행되었다. 연구 결과 해석 및 실험을 통해 구한 종파 및 횡파 전파 특성과 전파 속도가 이론치와 잘 일치하는 것을 확인하였으며, 본 연구에서 이루어진 고체-유체 경계면을 가지는 구조물을 통과하는 파동 전파 해석을 위한 전산해석 모델링 기법은 고체-유체 상호작용을 고려해야 하는 보다 복잡한 시스템에 대해서도 확장 가능하다.

Abstract: In this research, we study the propagation of longitudinal and transverse waves through a metal rod including a liquid layer using computational and experimental analyses. The propagation characteristics of longitudinal and transverse waves obtained by the computational and experimental analyses were consistent with the wave propagation theory for both cases, that is, the homogeneous metal rod and the metal rod including a liquid layer. The fluid-structure interaction modeling technique developed for the computational wave propagation analysis in this research can be applied to the more complex structures including solid - liquid interfaces.

- 기호설명 -

c : 파동전파속도 (m/s)
 E : 영율 (N/m^2)(N/m^2)
 G : 전단율 (N/m^2)
 ρ : 밀도 (kg/m^3)
 ν : 푸아송 비
 σ : 응력 (N/m^2)

ϵ : 변형률
 λ : 파장 (m)
 f : 고유진동수 (sec^{-1})

하첨자

p : 1차(Primary)
 s : 2차(Secondary)

1. 서론

탄성파는 매질을 따라 전파되는 중심파(Body

† Corresponding Author, hnrhee@sunchon.ac.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

Wave)와 매질의 경계면을 따라 전파되는 표면파(Surface Wave)로 크게 구분된다. 또한 중심파는 파동의 진행방향에 따라 종파(Longitudinal Wave, Primary Wave)와 횡파(Transverse Wave, Secondary Wave, Shear Wave)로 나뉘며, 표면파는 L파(Love Wave)와 R파(Rayleigh Wave)로 나뉜다.⁽¹⁾

본 논문에서는 탄성체와 액체를 통해 종파 및 횡파가 전파되는 특성을 해석과 실험을 통해 확인하는 연구를 수행하였다. 특히 파동 전파 경로에 고체와 액체의 경계면이 존재할 때 종파와 횡파가 액체와 고체 경계면에서 반사 또는 투과되는 현상을 유한요소 전산구조해석을 통해 모사할 수 있는 모델을 개발하고자 하였으며 전산구조해석의 결과로 구해지는 종파와 횡파의 전파속도가 이론치와 비교 분석하였다. 한편, 중간에 액체층을 포함하는 금속 막대형 구조물과 가속도 센서를 이용한 파동 전파 실험장치를 제작하여 파동 전파 실험을 수행하였으며 측정된 파동 전파 속도를 전산구조해석 결과 및 이론치와 비교 분석하였다.

본 연구는 경수로형 원자로 압력용기를 포함한 일차계통 내부에 존재하는 금속 파편이 냉각수 흐름에 의해 이동 중에 구조물에 부딪칠 때 발생하는 파동을 감지하여 파편의 위치와 크기를 알아내기 위한 금속파편 감시시스템(LPMS; Loose Parts Monitoring System)연구⁽²⁾를 위한 기초 자료로 활용할 수 있다.

2. 파동 전파 전산해석 모델링 및 해석

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 형태의 구조물에 대한 파동 전파 해석모델을 개발하였고 상용화된 explicit dynamic code인 LS-DYNA를 이용한 파동 전파 시뮬레이션을 수행하였다. 한편, implicit 방법을 사용할 수도 있지만 전산구조해석을 통해 예측하는 고체와 액체에서의 파동전파 속도가 이론치와 잘 일치하는지 여부와, 액체-고체 경계면에서 반사와 투과 현상이 물리적으로 맞게 모사되는지를 확인하고자 하는 본 연구의 목적은 explicit 방법 적용으로 충분히 이를 수 있다. Fig. 1은 해석 모델의 개략도이며 전체 길이가 2 m 이고 직경이 0.1 m 인 알루미늄 환봉(Fig. 1(a))

및 중간 200 mm 영역을 알루미늄 대신 물로 채운 경우(Fig. 1(b)) 등 두 가지로 모델링하였다. 상세한 해석모델은 Fig. 2에 제시하였다. 해석모델의 모든 고체 영역 요소들은 8-노드 hexagonal Solid 이며 노드 수는 128,139 개이고 요소수는 127,424 개다. 경계조건은 Fig. 2에 표시된 바와 같이 고체 구조물과 액체층을 포함한 구조물 모두 구조물의 네 곳의 하단부 및 우측단의 원주방향 가장자리 부분을 고정 지지하였다.

액체 영역의 요소는 LS-DYNA의 탄성 유체(ELASTIC FLUID) 옵션을 사용하였으며 물의 체적탄성계수 $2.2 \times 10^9 \text{ Pa}$ 을 적용하였다. tensor viscosity 0.1 을 적용하였으며 이 값은 본 연구의 관심 대상인 파동 전파 속도 및 경계면에서의 반사와 투과 현상을 관찰하는 것에 대해서는 영향이 미미하다. 고체 영역에 대해서는 일반적인 알루미늄 물성치(영률 $E = 7.1 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 밀도 $\rho = 2770 \text{ kg/m}^3$, 푸아송비 $\nu = 0.33$)를 적용하였다. 액체층과 고체층은 서로 접촉 조건(CONTACT AUTOMATIC SINGLE SURFACE)으로서 연결하여 경계면에서 변위가 일치하도록 모델링 하였다.

이와 같이 작성된 유한요소 모델을 이용한 파동 전파 해석이 물리적으로 타당하게 이루어지는지 확인하기 위하여 0.2 msec 의 duration 을 가지는 반사인과 형태의 변위 조건을 막대 좌측단의 단면 중심영역에 비스듬한 각도로 가하여 종파와 횡파를 동시에 발생시켰다. 적분 시간 간격은 0.001 msec 으로서 압력 가진 파형을 고려할 때 충분히 작게 결정하였으며 해석 시간의 제약 상 가진 후 총 0.7 msec 까지의 해석을 수행하였다.

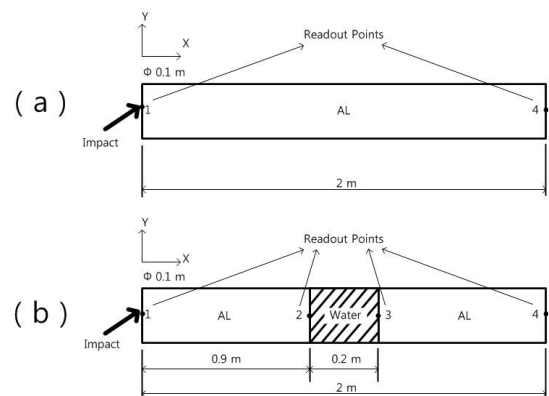


Fig. 1 Schematic of wave propagation analysis model : (a) solid bar, (b) solid bar including liquid layer

Fig. 3은 액체층이 없는 알루미늄 막대 구조물에 대해서 Fig. 1에 표기한 좌측(position 1) 및 우측단(position 4)의 중심 위치에서 측정된 종방향 변위의 시간 이력이다. 구조물의 우측단에 파동이 전달된 시각은 가진 후 0.395 msec이다. 따라서 계산된 종파의 속도는 5,063 m/s이다. 종파 전파속도의 이론값은 $c_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 5,047 \text{ m/s}$ 이므로 이론값과 비교하여 약 0.32 % 오차를 가지므로 개발된 전산해석모델과 해석절차를 통해 종파 전파 속도를 매우 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 앞에서와 동일한 해석을 통해 분석한 횡파의 전달 정보이다. 우측 끝단까지 횡파가 도달하는 데 걸린 시간은 0.644 msec 이므로 횡파의 전파속도가 3,106 m/s으로 계산된다. 이론적인 횡파 전파속도 값은 $c_s = \frac{c_p}{\sqrt{2(1+\nu)}} = 3,078 \text{ m/s}$

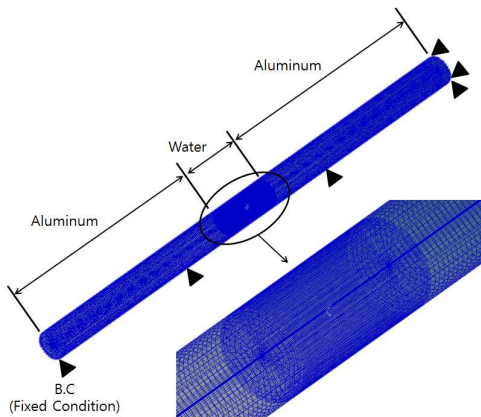


Fig. 2 Analysis model of solid bar including liquid layer

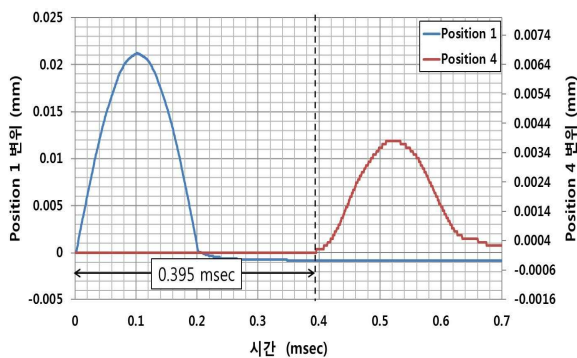


Fig. 3 Analysis of the longitudinal wave propagation through the solid bar

이므로 해석값은 이론값에 비하여 0.91 %의 오차가 보이고, 따라서 횡파의 전파 시물레이션도 매우 정확하게 수행됨을 알 수 있다.

따라서 본 연구를 통해 개발된 모델링 및 해석 방법을 이용하면 보다 복잡한 형태의 고체 구조물을 통해 전파되는 종파와 횡파의 전파 속도를 정확하게 예측할 수 있을 것으로 예상된다.

Fig. 5는 전체가 알루미늄 막대 구조물인 경우에 대한 시간에 따른 파동 전파 시물레이션 결과이다. 시간이 지남에 따라 파동이 좌측단에서부터 우측으로 전파되고 우측단에 도착한 후 종파가 반사되는 모습을 동적으로 확인할 수 있다.

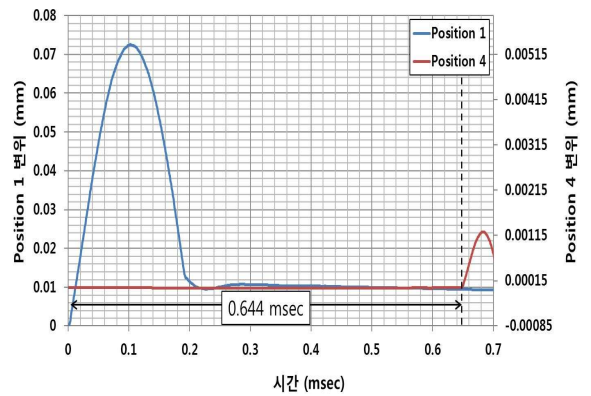


Fig. 4 Analysis of the transverse wave propagation through the solid bar

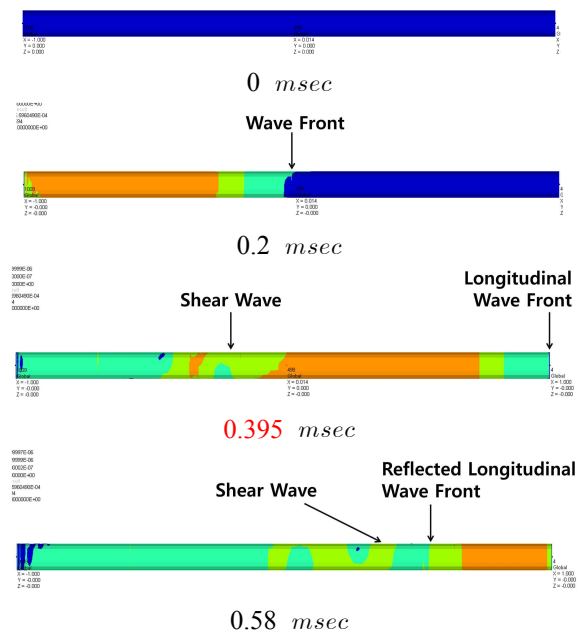


Fig. 5 Simulation of the wave propagation through the solid bar

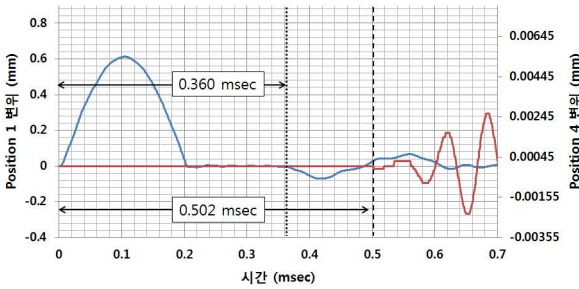


Fig. 6 Analysis of the longitudinal wave propagation through the solid bar including liquid layer

Fig. 6은 파동 전달 경로에 액체층을 포함하는 알루미늄 막대에서의 종파 전파 해석 결과이다.

Fig. 6에서 종파가 고체 및 액체층을 통과하여 우측단에 도착할 때까지 걸리는 시간은 0.502 msec이다. 한편, 이론적인 파동 도달 소요 시간은 알루미늄 영역 및 물 영역(종파 전파 속도 = 1,478 m/s⁽³⁾) 각각에서 소요되는 전파 시간을 합하여 구할 수 있으므로, 간단한 계산을 통해 구해보면 액체층을 포함한 구조물의 우측단에 종파가 도착해야 하는 시간은 이론적으로 0.492 msec 이다. 따라서 해석을 통한 예측값과 이론값의 차이는 0.01 msec 로서 종파의 전달 시간 관점에서 약 2%의 오차를 보이며, 앞의 고체 모델 경우와 비교하여 오차가 약간 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이의 원인은 다음과 같이 분석된다. 즉, 고체-액체 경계면 및 액체-고체 경계면에서는 종파에너지의 일부가 반사되고 나머지만 투과되기 때문에, 종파가 두 번의 경계면을 통과한 후 우측단에 도달했을 때는 상대적으로 신호가 작아져서 전산해석 수치오차 영향이 더욱 증가하고 수치적으로 신호 도달의 감지가 어려워지기 때문이다. Fig. 7은 액체층 바로 전후 경계면 위치에서 관찰한 종파 전달시각을 보여주고 있다.

좌측 끝단에서 부터 고체-액체 경계면에 도달하기까지 걸린 시간은 0.178 msec이고, 투과한 종파가 액체층을 통과하는데 걸리는 시간은 0.139 msec 이다. 따라서 알루미늄 영역에서의 종파속도는 5,056 m/s로 계산되며 이론값과의 오차는 0.18%이다. 이 값은 앞서 고체모델에서 계산된 종파 전파속도 5,063 m/s 와 매우 유사하여 전산해석 수치오차 범위 내의 차이라고 판단된다. 또한 해석을 통해 구한 액체에서의 종파속도는 1,439 m/s이며 이론 값 1,478

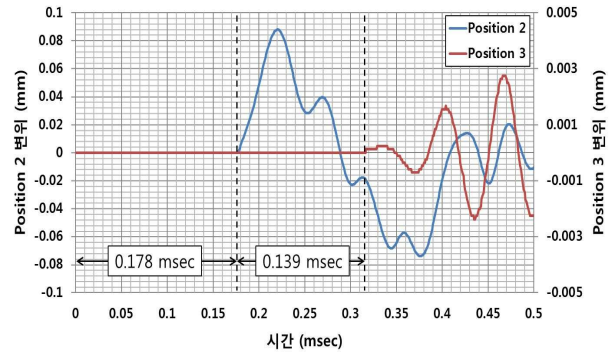


Fig. 7 Observation of the longitudinal wave propagation at the left (position 2) and right position(position 3) of the liquid layer

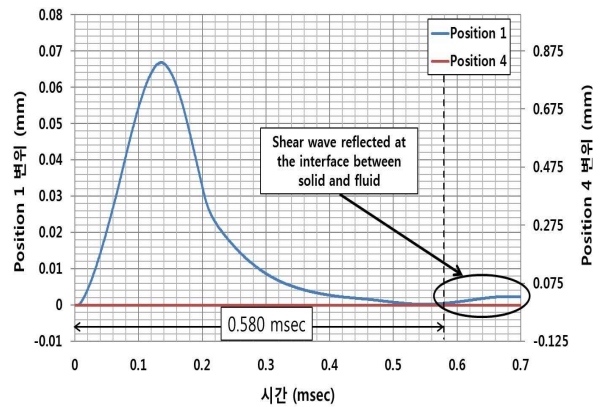


Fig. 8 Analysis of the transverse wave propagation through the solid bar including liquid layer

m/s 에 비하여 약 -2.6 %의 차이를 보인다. 마지막으로, 액체층을 통과한 후 오른쪽 고체층에서의 종파 전달시간은 액체층 왼쪽단에서의 전달시간보다 늦어진 0.185 msec 이며 따라서 오른쪽 고체영역에서의 종파 전파속도는 4,865 m/s 이고 이론값에 대한 오차는 약 -3.6% 이다. 이러한 해석 결과를 분석해 보면 종파가 고체를 통과하다가 액체층을 만나기 전까지는 전파 속도가 이론값과 상대적으로 잘 일치하지만 고체-액체 경계면 및 액체-고체 경계면을 통과하면서 오차가 다소 증가하는 경향을 보인다. 이는 앞에서 이미 언급한 바와 같이 경계면에서 종파 에너지의 반사와 투과가 동시에 발생하면서 전달되는 파동 에너지가 약화됨과 동시에 전산 해석 상 수치에러의 영향이 증가하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8은 앞에서 논의한 파동 전달 경로에 액체층을 포함하는 알루미늄 막대의 경우에 대해서 횡파 전파를 보여주는 그림이다.

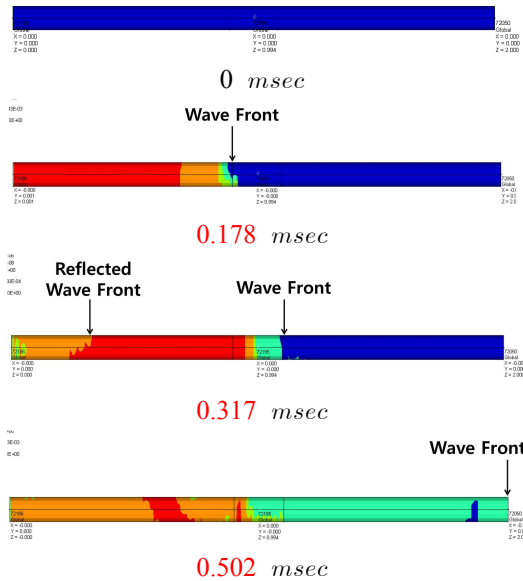


Fig. 9 Simulation of the wave propagation through the solid bar including liquid layer

Fig. 8에서 오른쪽 끝단에는 횡파가 전혀 전달되지 않음을 확인할 수 있고, 따라서 전산해석을 통한 시뮬레이션에서 액체층이 횡파의 전파를 차단하는 것을 잘 예측한다는 것을 알 수 있다. 한편, 고체-액체 경계면에서 반사되어 돌아온 횡파가 탐지될 때까지 소요된 시간은 0.580 msec 로서 이를 이용해 계산한 횡파의 속도는 $3,103\text{ m/s}$ 로서 이론적인 횡파속도에 비하여 0.81% 의 작은 오차를 보인다. 따라서 본 연구에서 유체-구조 경계면을 고려하여 수행한 파동전파 해석 모델링과 해석결과의 정확성을 재확인할 수 있다.

Fig. 9는 액체층을 포함하는 알루미늄 막대 구조물에 대한 시간에 따른 파동 전파 시뮬레이션 결과이다. 파동이 전파되고 액체층을 만나면서 대부분의 파동이 반사되고 일부의 파동이 액체층으로 투과되는 모습을 동적으로 확인할 수 있으며 액체층에서는 종파만이 통과되고 다시 고체영역에서 우측단까지 파동이 전파되는 모습을 볼 수 있다.

3. 파동 전파 실험

본 절에서는 앞에서 논의한 전산 해석과 별도로 실제로 알루미늄 구조물을 이용하여 파동전파 실험을 수행하였다. 파동전파 속도가 이론적으로

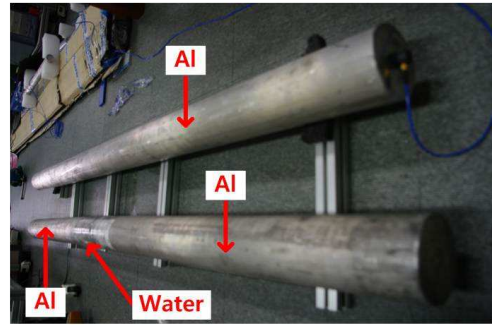


Fig. 10 Experimental set-up of the wave propagation

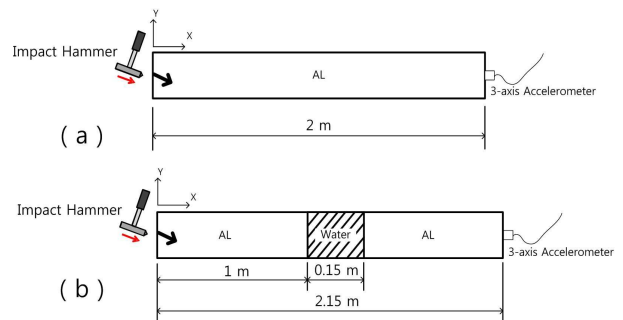


Fig. 11 Schematic of the wave propagation experiment : (a) solid bar (b) solid bar including liquid layer

$5,047\text{ m/s}$ 로 매우 빠르므로 무게를 고려하여 길이가 가능한 긴 시편을 사용하였다. Fig. 10은 실험에 사용된 지름 0.1 m , 길이 2 m 의 알루미늄 구조물과 액체층을 포함한 구조물을 보여준다. 길이 2 m 알루미늄 환봉 구조물의 무게는 123 kg 이다. 중간에 액체층이 추가된 알루미늄 환봉 구조물을 제작하기 위하여 알루미늄과 알루미늄 사이를 부드러운 램프로 감싸고 물을 채웠다.

Fig. 11은 본 실험의 개략도로서 구조물의 왼쪽 끝단에 충격 해머를 사용하여 임펄스 형태의 가진을 주고, 우측 끝단에서 3축 가속도센서를 설치하여 종파와 횡파를 동시에 측정하였다.

Fig. 12는 액체층이 없는 알루미늄 환봉을 이용한 실험에서 측정된 3축 방향 변위 데이터이다. 3축 방향 가속도 신호 중에서 측방향은 종파, 나머지 두방향의 신호는 횡파와 관련이 있다. 좌측단에서의 임펄스 가진 이후 우측단에서 종파 변위가 전달되기까지 걸린 시간은 0.4 msec 이고 따라서 종파속도는 $5,000\text{ m/s}$ 이며, 횡파가 전달되기까지 걸린 시간은 0.74 msec 이므로 횡파속도는 $2,703\text{ m/s}$ 이다. 이론값과의 오차로서 종파는 0.94% 이

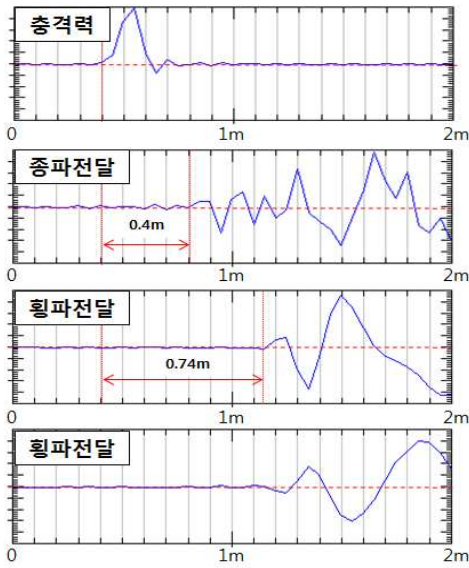


Fig. 12 Experimental result for the wave propagation through solid bar

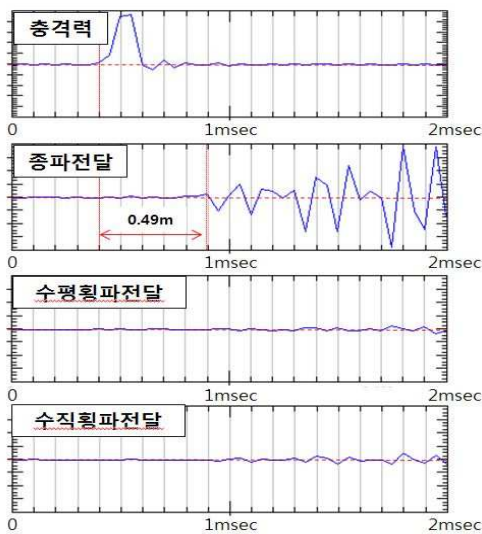


Fig. 13 Experimental result for the wave propagation through solid bar including liquid layer

고, 횡파는 -12.18 %이다. 실험오차가 해석보다 큰 이유로는 충분히 정밀하지 못한 가속도를 이용한 신호 측정 방법 및 실제 실험에 사용된 알루미늄 물성, 즉 밀도, 영률, 푸아송비, 등방성 등이 참고문헌의 값들과 다르기 때문 일 것으로 판단된다.

Fig. 13은 액체층을 포함하는 구조물을 이용하여 수행한 실험 결과이다.

해석 모델과는 달리 2개의 1 m 길이 알루미늄 환봉을 사용하였고 액체층의 길이는 15 cm이다. Fig. 13과 Fig. 12를 비교하여 보면 액체층에 의해

서 종파 전달시간이 증가한 것을 알 수 있다. 이론적으로는, 15 cm 길이 물층에서의 종파 전파 속도를 고려할 때 Fig. 12에 비하여 0.101 msec가 지연되어야 하지만 실험결과는 0.09 msec가 지연되었다. 이러한 오차는 실험에서 사용한 물과 알루미늄의 물성치 및 실험실 환경 온도 등의 차이로 인한 것으로 판단된다. 한편, Fig. 13에서 우측 끝단에서는 전체가 고체인 막대인 경우와 달리 횡파가 측정되지 않았다. 즉 액체층이 횡파의 전달을 차단한 것이다.

4. 결론

고체와 액체 경계면을 가지는 구조물에서의 종파와 횡파의 전파 현상을 구현할 수 있는 유효요소 전산 해석 모델을 개발하였고, 해석을 통해 구한 종파와 횡파의 전파 속도를 이론적인 파동전파 속도와 비교한 결과 잘 일치하는 것을 확인하였다. 본 연구에서 개발한 모델과 해석 방법을 이용하면 종파와 횡파가 고체와 액체 경계면에서 반사 또는 투과되는 기본적인 현상을 잘 구현함을 확인하였다.

한편, 알루미늄과 물 및 가속도 센서를 이용하여 간단한 파동 전파 실험장치를 구축하였고 실험을 통해 측정된 파동전파 특성의 타당성을 확인하였다. 실험을 통해 구한 파동 전파 속도는 비교적 이론 및 해석값과 잘 일치하지만 특히 횡파의 전파 속도는 12% 정도의 다소 큰 오차를 보였으며 이러한 오차는 실제 구조물의 물성치가 정확하게 알려져 있지 않기 때문인 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 구축한 전산해석 방법론을 이용하면 고체-액체 경계면이 존재하는 구조물에 대해 파동 전파해석을 충분히 구현할 수 있는 것으로 판단된다. 본 연구의 내용은 액체인 냉각수가 채워져 있는 원자로 시스템 내부의 금속 이물질 파편의 충돌로 인한 파동 신호의 전파 시간 차이를 이용해서 삼각법을 통하여 금속 파편의 위치를 추정하는 시뮬레이션 등 다양한 분야 연구의 기본 자료로 사용가능하다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부의 원자력연구개발사업

(NRF-2015M2A8A4022076)의 지원으로 진행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌
(References)

- (1) Rayleigh, L., 1885, "On Waves Propagated Along the Plane Surface of an Elastic Solid," *Proceedings of the London Mathematical Society*, Vol. 17, pp. 4~11,
- (2) Choi, Y.-C., Park, J.-H., Yoon, D.-B. and Park, K.-B., 2006, "Loose-part Mass Estimation Using Time-frequency Analysis," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 16, No. 8, pp. 872~878
- (3) Young, H. and Freedman, R., 2003, "University Physics with Modern Physics," 10th Edition, PEARSON, Inc., ASIA, p. 547.