

방진구조물에 의한 표면파 산란해석

A Study on Screening of Surface Waves by Wave Barriers

이종세* · 김희석**

Lee, Jong Seh and Kim, Hee-Seok

Key Word : Wave Barrier, Absorbing Boundary, Ultrasonic Experiment, Ground Vibration

ABSTRACT

In this paper numerical and experimental studies are conducted to examine the wave screening effectiveness of wave barriers. The numerical study is based on a finite element model of a "sandbox" with Lysmer-Kuhlemeyer-type absorbing boundaries. Using the model, the screening effectiveness of wave barriers is studied for different barrier dimensions and distances between the source/receiver and the wave barrier. The results of the numerical modeling are compared with those of the ultrasonic experiment which is performed on an acrylic block with a drilled rectangular cut. Finally, the problem of ground transmitting vibration from a traveling train is numerically treated as a real-world application and the results are discussed in some detail.

1. 서론

최근 우리사회는 급속한 산업발달로 인한 대규모 건설공사 및 첨단 생산시설의 증가로 인하여 진동공해의 심각성이 점차 증대되고 있으며, 특히 선진국화에 따른 진동허용치의 감소추세는 진동공해의 해결을 필수적으로 요구하고 있다. 이러한 진동을 저감시키기 위한 방법으로는 진동원에서 진동의 발생 자체를 막는 방법과 진동전파 경로상에서 진동을 차단하는 방법, 그리고 수신점에서 진동을 저감시키는 방법 등이 있을 수 있다. 이중 전파경로 상에서 진동을 차단하는 방법으로는 방진구조물이 제안되고 있으며, 진동전파는 대부분 표면파를 통해 이루어지므로 방진구조물에 의한 진동차단은 주로 표면파를 대상으로 하고 있다. 이러한 표면파 산란효과를 조사하기 위한 해석적인 연구는 Its-Yanovskaya 그리고 Its-Lee 등이 그린함수기법을 사용하여 수행하였다. 그러나 이러한 해석적기법은 방진구조물의 복잡한 형상이나 계면에서의 표면파의 체적파로의 변환을 고려하지 못하는 등 제약사항을 가지고 있다. 따라서 방진구조물의 산란효과를 조사하는데 있어서 해석적인 기법과 함께 실험 및 수치해석을 통한 연구가 필수적이다.

지금까지 파전달의 규명을 위해 널리 쓰이던 수치해석 방법은 경계요소법이다. 이외에도 유한요소법과 경계요소법을 조합하는 방법이 있으나 이러한 방법은 요소의 복잡성

을 피할 수 없는 단점이 있다. 본 연구에서는 유한요소법의 투명성이라는 장점을 살리기 위해 유한요소법을 직접 사용하였으며, 이에따른 전산적 부담을 해결하기 위해 2차원 영역으로 대상문제를 제한하고 흡수경계(Absorbing boundary)를 사용하였다. 본 연구에서는 FEM프로그램에 응용이 용이한 점성감쇠기를 이용하는 흡수경계의 성능을 평가하였으며, 이를 적용하여 방진구조물에 의한 표면파 산란의 수치해석을 수행하였다.

이론해 및 수치해석결과의 타당성 검증을 위해 초음파 실험을 수행하였으며, 이때 사용된 재료는 등방성을 가지는 아크릴 시편을 사용하였다. 시편에서의 방진구 형상 및 가진점과 수신점의 위치를 변화시키며 실험을 수행하였고, 실험 및 이론해와 수치해석결과의 비교를 통해 방진구조물의 표면파 산란효과를 규명하였다. 이상의 해석결과를 확인하기 위한 예제로서 열차주행시의 지반진동 문제를 수치적으로 구현하였으며, 이때 철도궤도 연변에 방진구조물을 설치하여 진동저감효과를 분석함으로써 연구결과의 타당성을 확인하였다.

2. 반무한 지반의 모델링

2.1. 흡수경계요소

흡수경계는 수치해석시 무한영역을 유한의 요소영역으로 모형화하는데 있어서 문제가 되는 경계면에서의 반사파를 상쇄시키기 위한 인공적인 경계요소로서 파전달의 수치해석시 널리 쓰이고 있다. 일반적인 수치해석 모델

* 한양대학교 토목·환경공학과 교수
E-mail : jonglee@hanyang.ac.kr
Tel : 031-400-5146, Fax : 031-407-8706
** 한양대학교 토목·환경공학과 박사과정

에 가장 효과적으로 적용 되는 모델은 Lysmer-Kuhlemeyer가 제안한 방법으로써 요소의 경계에 점성감쇠기를 부착하여 흡수효과를 구현하므로 일반적인 FEM프로그램에 응용이 용이하다. 본 연구에서는 이러한 흡수경계의 성능을 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 그림 1은 기존의 연구결과와 본 연구결과를 비교한 그림으로서, 본 연구 결과에서 보다 향상된 성능을 보임을 알 수 있다.

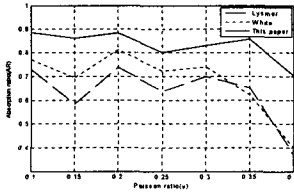


그림 1. 포아송비에 따른 흡수율

2.2. 반무한 지반의 모델링

파의 전파문제를 정확히 구현하기 위해서는 파장(wave length)에 대한 최적의 요소크기 및 해석시간 간격을 결정하여야 한다. 일반적으로 요소크기와 해석시간 간격은 정밀도에 반비례하지만 지나치게 많은 요소의 사용 및 작은 해석시간 간격은 전산적 부담을 가중시킨다. 따라서 본 연구에서는 정밀도를 확보하면서도 파의 전파문제에 적당하다고 알려져 있는 최소파장의 약 1/12 크기의 요소를 사용하였다. 해석시간 간격은 가진하중 시간의 1/10로 하였는데, 이는 가진하중의 재하시간에 따라 달라지는 표면파의 파장을 정확히 표현하기 위함이며 이 시간간격은 안정조건(stability condition)을 충분히 만족시키는 값이다. 또한 시간이력해석을 위해 음해법(implicit method)을 사용하였다. 이는 양해법(explicit method)에 비해 보다 안정성(stability)이 보장되며, 음해법으로도 본 연구에서 사용할 요소개수가 확보되기 때문이다.

2.3. 감쇠특성의 반영

매질을 통하여 전파되는 응력파는 기하학적 감쇠 및 재료적 감쇠를 하게 되므로 수치해석시 이러한 감쇠효과를 반드시 반영해 주어야 한다. 이중 기하감쇠는 응력파의 전파 특성에 따른 것으로서 지배방정식을 계산하는 과정에 자연적으로 반영된다. 그러나 재료감쇠는 반영되지 않으므로 본 연구에서는 Rayleigh 감쇠($\zeta = 0.0175$)를 이용하여 표면파에 대한 재료감쇠 특성을 반영하였다. 이때 감쇠값은 실험결과를 기준으로 산정하였다. 그림 2는 실험과 수치해석에 의한 표면파의 감쇠곡선을 나타낸 것으로서, 실험에서의 감쇠특성이 수치해석시 잘 반영된 것을 볼 수 있다.

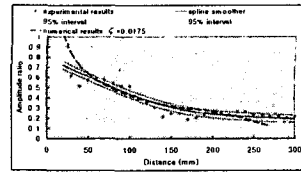


그림 2. 감쇠곡선($\zeta = 0.0175$)

3. 수치예제

3.1. 해석변수 선정

그림 3은 방진구에 의한 표면파 산란해석시의 해석변수를 나타낸다. 이 때 사용된 모든 변수들은 표면파의 파장(λ_R)으로 나누어 줌으로서 무차원화 시켰으며, 모든 해석 결과들의 상대적인 비교를 위해 진동 차단효과를 식 (1)에서의 진폭감쇠비로 정의하였다.

$$A_r = \frac{A(\text{With Trench})}{A(\text{Without Trench})} \quad (1)$$

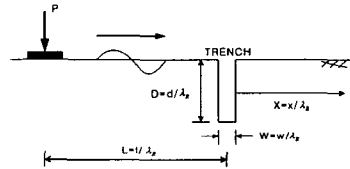


그림 3. 해석변수 개요도

3.2. 해석모형 및 하중

해석대상을 등방성 탄성매질로 가정하였고 등매개 평면변형률 요소를 사용하여 수치해석을 수행하였으며, 이때 2절에서의 흡수경계 및 재료감쇠를 반영하였다. 그림 4는 방진구에 의한 표면파 감쇠비를 거리에 따라 나타낸 것으로서, 경계요소법을 사용한 Ahmad에 의한 해석결과와 본 연구에서의 결과를 나타낸 것이다. 두 해석결과에서 방진구 이후 급격히 감쇠비가 감소함을 볼 수 있으며 약간의 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 표면파 파장 및 감쇠값 적용의 차이로 인해 발생하는 것으로서 일반적 경향은 유사함을 알 수 있다.

표 1. 해석대상 매질의 물성(아크릴)

| 탄성계수 (N/m^2) | 포아송비 | 밀도 (kg/m^3) |
|---------------------|-------|--------------------|
| 6.3 E9 | 0.325 | 1180 |

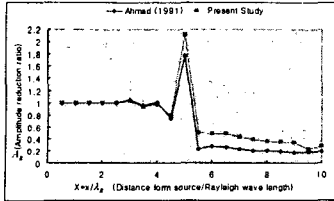


그림 4. 감쇠비(L=5.0,D=1.0,W=0.1)

3.3. 해석변수에 따른 산란효과

그림 5는 그림 3에서 D=0.6, X=2.0인 경우를 나타내는 그림으로서, 가진원과 방진구의 거리가 L=2.0이상인 경우 방진구의 두께 영향은 없음을 보여준다.

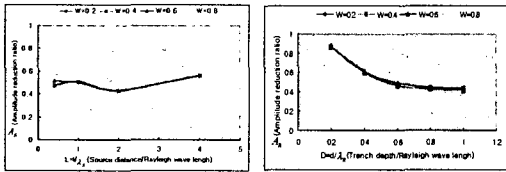


그림 5. 가진원 거리변화에 따른 표면파의 차단효과 (D=0.6, X=2.0) 그림 6. 방진구의 제원 변화에 따른 표면파의 차단효과 (L=1.0, X=3.0)

그림 6은 그림 3에서 L=1.0, X=3.0인 경우, 방진구 깊이(D)에 따른 감쇠비를 나타낸다. 여기서 D=0.5부근에서 변곡점이 발생하여 D=0.6 이후 완만하게 감쇠비가 감소함을 알 수 있다.

4. 실험결과와의 비교

수치해석결과의 타당성을 확인하기 위해 등방성재료로 가정할 수 있는 아크릴시편을 이용하여 초음파 실험을 수행하였다. 그림 7은 실험 전경을 보여주고 있으며 표 2는 이에 따른 실험장비 사양을 나타낸다.

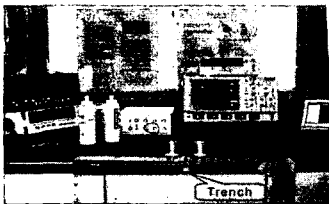


그림 7. 초음파 실험 전경

표 2. 실험장비 사양

| 실험 장비 | 모델 | 사 양 |
|----------------------------|---------------|---|
| Ultrasonic Pulsar/Receiver | DPR 300 | Repetition Time : 5KHz Pulse Bandwidth : 10MHz |
| Oscilloscope | wave runner 2 | Bandwidth : 350MHz Sample Ratio : 1Gs/s |
| Ultrasonic Transducer | KISC | Frequency : 1MHz |

그림 8은 그림 5의 수치해석 결과에 대한 실험결과이다. 그림 5와 마찬가지로 L=2.0 이상에서 방진구 두께의 영향이 무관함을 볼 수 있다.

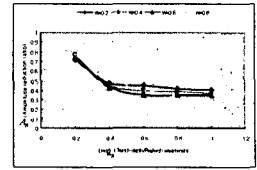
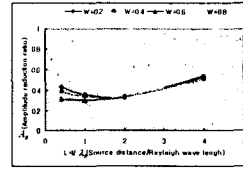


그림 8. 가진원 거리변화에 따른 표면파의 차단효과 (D=0.6, X=2.0) 그림 9. 방진구의 제원 변화에 따른 표면파의 차단효과 (D=0.6, X=3.0)

그림 9는 그림 6의 수치해석 결과에 대한 실험 결과이다. 그림 6의 수치해석 결과는 D=0.6이상에서 완만하기는 하나 감쇠비가 계속적으로 감소됨을 볼 수 있는 반면, 그림 9의 실험결과는 거의 일정함을 볼 수 있다. 이는 2차원 수치해석과 3차원 실험에서 오는 차이 및 감쇠비커너즘의 차이에서 발생하는 결과로 판단된다. 그러나 $L \geq 2$ 인 경우 진폭감쇠비가 방진구 두께에 무관하게 되며, $L \geq 1.0$, $D \geq 0.6$ 인 경우 대체로 일정한 진폭감쇠비를 보인다는 점에서 실험 및 수치해석 결과가 일치한다고 할 수 있다.

이상의 방진구에 의한 수치해석 및 실험결과를 이용하여 방진구의 형상이 D=0.8, W=0.6인 경우에 대해 채움재를 사용함으로써 방진벽에 대한 표면파의 산란해석을 수행하였다. 표 3은 방진벽의 재질에 따른 표면파의 산란율을 나타내며, 여기서 이론해 및 수치해석과 실험의 결과가 유사한 값을 나타냄을 알 수 있다. 이로부터 수직으로 입사하는 표면파에 대해서는 연성방진벽에 의한 산란효과가 더 우수함을 알 수 있다.

표 3. 방진벽의 재질에 따른 산란율

| 채움재 종류 | | 방진구 | 연성 방진벽 | 경성 방진벽 |
|---------|----------------------------|------|--------|--------|
| 산란율 (%) | 기존연구-해석해 (Lee & Its, 1993) | - | 0.45 | 0.24 |
| | 기존연구-수치해 (손윤기, 1997) | 0.69 | 0.55 | 0.31 |
| | 수치해석 결과 | 0.60 | 0.59 | 0.35 |
| | 실험 결과 | 0.59 | 0.56 | 0.29 |

5. 방진구조물에 의한 열차주행시의 지반진동 저감

3절과 4절에서의 결과를 확인하기 위한 해석예제로서 열차주행에 의한 철도궤도 연변에서의 지반진동 문제를 수치적으로 구현하였다. 차량은 그림 10과 같이 2질량으로 모형화 하였으며, 궤도는 100Hz 미만의 지반진동 해석에 용이한 그림 11의 2중 연속보로 모형화 하였다.

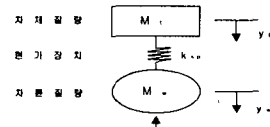


그림 10. 2중질량 차량모형

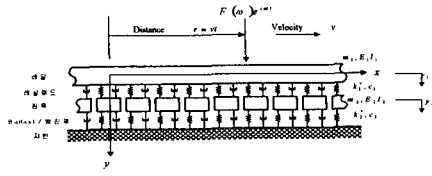


그림 11. 2중보 모형을 사용한 궤도의 모형

그림 12는 그림 10과 11의 모형에 의한 침목으로의 전달하중의 파워스펙트럼밀도(PSD)를 나타낸다. 여기서 여러 차륜의 통과주기에 의해 여러 주파수 값에서 극대 값들이 나타나며, 최대하중 주파수 성분은 약 20Hz 미만의 저주파 영역에서 형성됨을 알 수 있다.

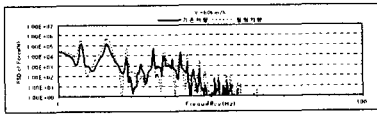


그림 12. 전달하중

그림 12의 전달하중을 이용하여 철도궤도 연변에서의 지반진동에 대한 방진벽의 표면과 산란해석을 수행하였다. 그림 13과 14는 방진구조물에 의한 변위 및 가속도 감쇠비를 방진구조물의 설치위치에 따라 나타난 것으로서, 변위는 약 30~50%, 가속도는 약 70~80%의 감쇠효과가 있음을 볼 수 있다. 이는 변위의 최대진폭 발생 주파수가 가속도의 최대진폭 발생 주파수보다 상대적으로 작기 때문이다. 그리고 연성방진벽(펜토나이트)이 경성방진벽(콘크리트)보다 더 높은 진폭감쇠를 보임을 볼 수 있는데, 이는 표 3의 결과와 일치한다고 할 수 있다.

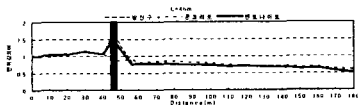


그림 13. 변위 진폭감쇠비

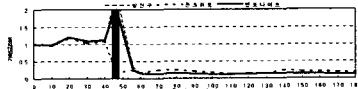


그림 14. 가속도 진폭감쇠비

6. 결론

본 연구에서는 방진구조물에 의한 표면파의 산란거동을 조사하기위해 수치해석 및 초음파 실험을 수행하였으며, 이를 통한 결론은 다음과 같다.

(1) 흡수경계요소를 사용하여 반무한 영역을 유한한 Soilbox로 모델링하여 전산적 부담을 줄일 수 있으며,

실험을 통한 감쇠비를 수치해석에 반영함으로써 표면파 감쇠특성을 반영할 수 있다.

(2) 가진원으로부터 방진구의 위치가 표면파 파장의 2배 이상인 경우 진폭감쇠비는 방진구 두께에 무관함을 알 수 있다.

(3) 가진원으로부터 방진구의 위치가 표면파 파장의 1배 이상이며 방진구 깊이가 표면파 파장의 0.6배 이상인 경우, 일정한 진폭감쇠비를 보임을 알 수 있다.

(4) 표면파가 방진벽에 수직으로 입사하는 경우 연성방진벽의 진동차단효과가 경성방진벽에 비해 우수함을 알 수 있다.

(5) 본 연구에서 제시한 흡수경계요소를 이용한 유한요소 해석기법은 과도한 전산적 부담없이 시간영역에서 시뮬레이션을 수행함으로써 궁극적으로 보다 효과적인 방진구조물의 설계에 유용한 해석도구를 제공할 수 있음을 보였다.

후기

본 연구는 한국과학기술부 국가지정연구실 사업에 의해 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

- (1)Its, E. N., and Yanovskaya, T. B., 1985, Propagation of Surface Waves in Half-Space with Vertical, Inclined or Curved Interface, *Wave Motion*, Vol. 7, pp. 79~94.
- (2)Its, E. N., and Lee, J. S., 1993, Propagation of Surface Waves across a Vertical Layer with Non-rigid Contacts, *Int. J. of Eng. Science*, Vol. 31, No. 8, pp. 1151~1163.
- (3)Its, E. N., and Lee, J. S., 1993, Reflection and Transmission of Surface Waves at a Vertical Interface in Anisotropic Elastic Media, *Bull. of the Seis. of America*, Vol. 83, pp. 1355~1372.
- (4)Its, E. N., and Lee, J. S., 1994, Propagation of Surface Waves across a Narrow Vertical Anisotropic Layer, *J. of Appl. Mech.*, Vol. 61, pp. 596~604.
- (5)Its, E. N., and Lee, J. S., 1998, Scattering of Surface Elastic Waves at a Vertical Layer, *Quarterly J. of Mech. and Appl. Mathematics*, Vol. 51, No. 3. pp. 439~459.
- (6)Lysmer. J., and Kuhlemeyer, R. L., 1969, Finite Dynamic Model for Infinite Media, *J. Eng. Mech.*, (EM4), pp. 859~877.
- (7)Ahmad, S., and Al-Hussaini, T. M., 1991, Simplified Design for Vibration Screening by Open and In-filled Trenches, *J. of Geotech. Eng.*, Vol. 117, pp. 67-88.