

## 방진구에 의한 표면파 산란해석

### A Study on Screening of Surface Waves by Trenches

김희석 \*      이상진 \*\*      이종세 \*\*\*  
Kim, Hee-Seok    Lee, Sang-Jin    Lee, Jong-Seh

---

#### ABSTRACT

In this study numerical and experimental studies are conducted to examine the wave screening effectiveness of trenches. 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 trench is studied for different trench dimensions and distance from source and receiver to trench. The results of the numerical modeling are compared with the results of the ultrasonic experiment which is performed on a acrylic block with a drilled rectangular cut. These results show that the screening effectiveness of the trench is nearly equal if the depth of trench is larger than 60 % of the surface wave length. It is also shown that if the distance between the trench and the source is larger than twice the surface wave length, the thickness of the trench does not affect the screening effectiveness.

---

#### 1. 서 론

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<sup>(1)</sup> 그리고 Its-Lee<sup>(2),(3),(4),(5)</sup> 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 경

---

\* 정희원, 한양대학교 토목·환경공학과 박사과정

\*\* 현대건설, 사원

\*\*\* 정희원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수

계요소법을 조합하는 방법이 있으나 이러한 방법은 요소의 복잡성을 피할 수 없는 단점이 있다. 본 연구에서는 유한요소법의 투명성이라는 장점을 살리기 위해 유한요소법을 직접 사용하였으며, 이에 따른 전산적 부담을 해결하기 위해 2차원 영역으로 대상문제를 제한하고 흡수경계(Absorbing boundary)<sup>(6)</sup>를 사용하였다. 또한 수치해석결과의 타당성 검증을 위해 등방성 재료인 아크릴시편을 이용하여 초음파 실험을 수행하였다.

## 2. 반무한 지반의 모델링

### 2.1. 흡수경계요소

무한 영역을 유한의 요소영역으로 모형화하는 경우에 파가 유한 경계에 도달한 후 반사 현상이 발생하게 되며 이로 인해 구조계 전체의 응답에 큰 영향을 미친다. 이러한 반사파의 영향을 상쇄 시키기 위하여 인공적인 흡수경계요소가 제안되어 파전달의 문제에 사용되고 있다. 지금까지는 Lysmer-Kuhlemeyer<sup>(6)</sup>, Engquist-Majda<sup>(7)</sup>, Liao-Wong<sup>(8)</sup>등이 제안한 경계요소들이 있으며, 이중 일반적인 수치해석 모델에 가장 효과적으로 적용 되는 모델은 Lysmer-Kuhlemeyer<sup>(6)</sup>가 제안한 방법으로써 요소의 경계에 점성감쇠기를 부착하여 흡수효과를 구현하므로 일반적인 FEM프로그램에 응용이 용이하다. 그림 1은 본 연구에 사용된 흡수경계<sup>(6)</sup>의 성능을 알아보기 위해 수행된 수치모형이며, 표 1은 이에 대한 흡수율을 나타낸다.

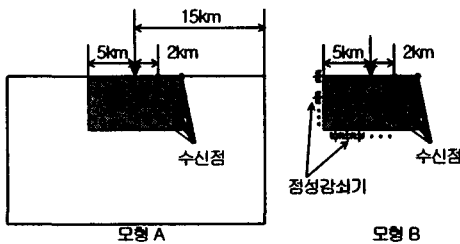


그림 1. 흡수경계 모형

표 1. 수신점 위치에 따른 흡수율

z(km)	내부점(2km)		경계점(5km)	
	x방향(%)	y방향(%)	x방향(%)	y방향(%)
0.0	97.13	92.41	65.83	63.69
1.5	92.90	95.16	57.60	88.13
3.0	95.46	92.56	75.41	83.88
4.5	97.53	86.48	51.97	49.86

### 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.<sup>(9)</sup> 해석시간 간격은 가진하중 시간의 1/10로 하였는데, 이는 가진하중의 재해시간에 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 표면파의 감쇠곡선으로서 실험 결과와 재료감쇠가 고려되지 않은 수치해석 결과를 나타낸다. 그림 2의 수치해석 결과에서 기하감쇠에 의해 거리의 증가에 따라 표면파의 최대변위가 작아지는 것을 볼 수 있으나 실험결과와는 일치하지 않음을 볼 수 있다. 그림 3은 재료감쇠가 반영된 것으로서 실험에서의 감쇠특성이 수치해석시 잘 반영된 것을 볼 수 있다.

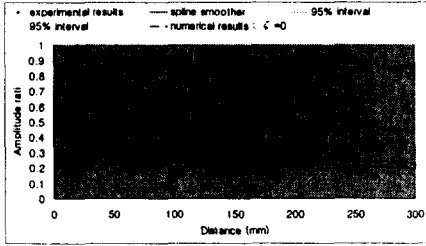


그림 2. 감쇠곡선 ( $\zeta=0$ )

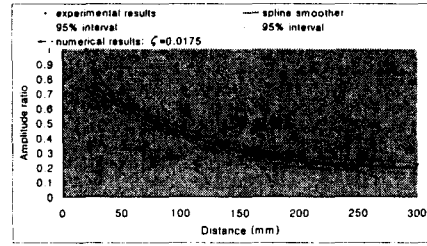


그림 3. 감쇠곡선 ( $\zeta=0.0175$ )

### 3. 수치예제

#### 3.1. 해석변수 산정

그림 4는 해석변수를 나타내며, 표 3은 해석변수의 범위를 나타낸다. 이 때 사용된 모든 변수들은 표면파의 파장( $\lambda_R$ )으로 나누어 줌으로서 무차원화 시켰으며, 모든 해석 결과들의 상대적인 비교를 위해 진동 차단효과를 식 (3.1)에서의 진폭감쇠비로 정의하였다.

$$A_r = \frac{A(\text{With Trench})}{A(\text{Without Trench})} \quad (3.1)$$

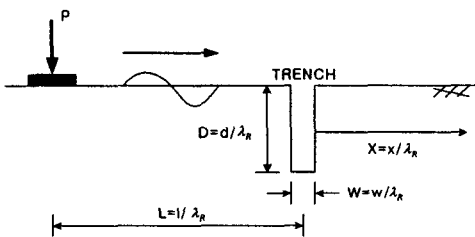


그림 4. 해석변수 개요도

표 3. 해석변수 범위

구분	크기
source~trench	$0.4 \leq L \leq 4.0$
trench~receiver	$1.0 \leq X \leq 8.0$
trench depth	$0.2 \leq D \leq 0.8$
trench width	$0.2 \leq W \leq 0.8$

#### 3.2. 해석모형 및 하중

그림 5는 본 연구에서 수행한 수치모형으로 2차원 평면변형률 요소를 사용하였으며 매질은 등방성 탄성영역으로 가정하였다. 또한 하부 경계면에 흡수경계<sup>(6)</sup>를 부착시켜 진산적 부담을 감소시켰다. 하중은 그림 6의 충격하중을 사용하였으며 매질의 물성은 표 4와 같다. 그림 7은 방진구에 의한 표면파 감쇠비를 거리에 따라 나타낸 것으로서, 경계요소법을 사용한 Ahmad<sup>(10)</sup>에 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.



그림 5. 수치해석 모형 (With Trench)

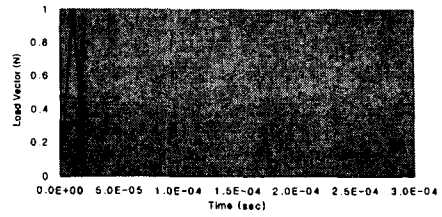


그림 6. 사용하중

표 4. 해석대상 매질의 물성(아크릴)

탄성계수 ( $N/m^2$ )	포이송비	밀도 ( $kg/m^3$ )
6.3 E9	0.325	1180

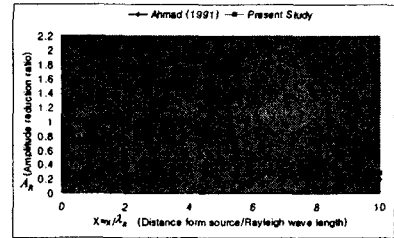
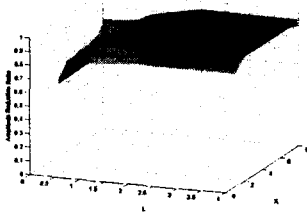


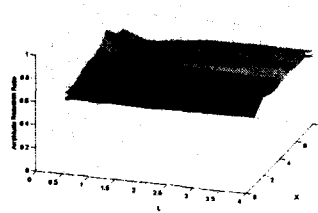
그림 7. 감쇠비(L=5.0,D=1.0,W=0.1)

### 3.3. 해석변수에 따른 산란효과

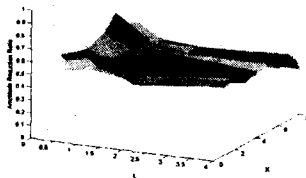
그림 8은 그림 4에서의 모든 해석변수가 고려된 수치해석 결과를 나타낸다. L축과 X축은 각각 가진원과 수신원으로부터의 방진구까지의 거리를 나타내며, 수직축은 식 (3.1)에서 정의한 진폭감쇠비를 나타낸다.



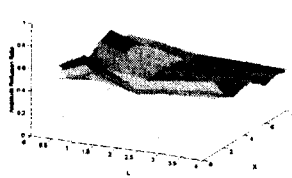
(a)  $D=0.2$



(b)  $D=0.4$



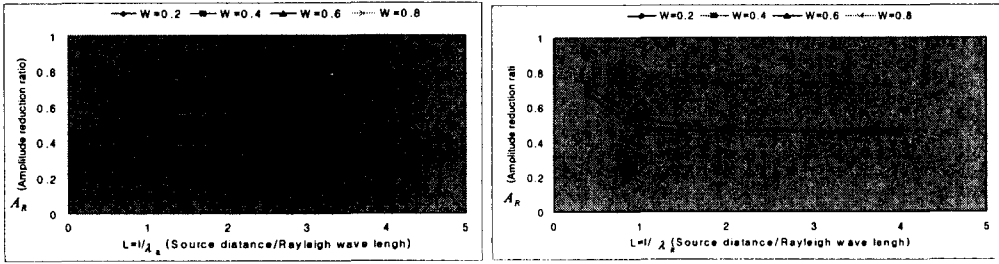
(c)  $D=0.6$



(d)  $D=0.8$

그림 8. 방진구 설치조건에 따른 진동 차단효과

그림 9는 그림 8에서  $D=0.6$ ,  $X=2.0$ ,  $6.0$ 인 경우를 나타내는 그림으로서, 가진원과 방진구의 거리가  $L=2.0$ 이 상인 경우 방진구의 두께 영향은 없음을 보여준다. 또한  $D=0.2, 0.4, X=4.0, 8.0$ 인 경우에도 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

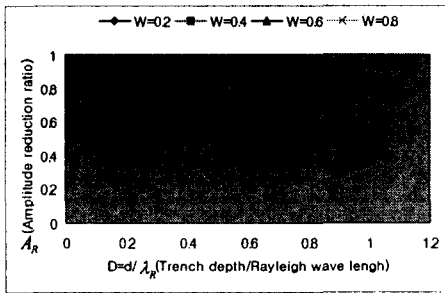


(a)  $X=2.0$  (수치해석)

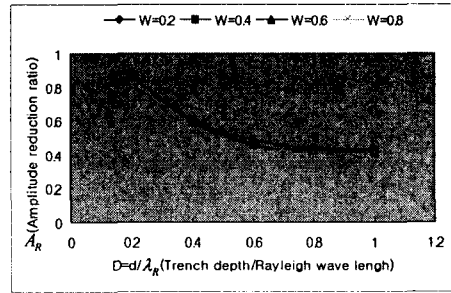
(b)  $X=6.0$  (수치해석)

그림 9. 가진원 거리변화에 따른 표면파의 차단효과

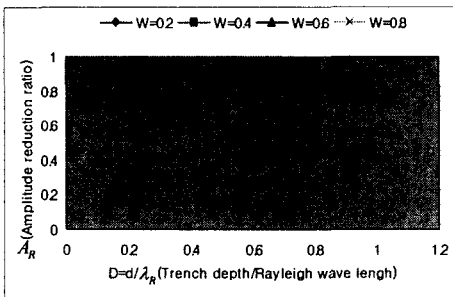
그림 10은 그림 8에서  $L=0.4\sim 4.0$ ,  $X=3.0$ 인 경우, 방진구 깊이( $D$ )에 따른 감쇠비를 나타낸다. 그림 10(a)에서는 방진구 깊이 증가에 따라 감쇠비가 계속 작아짐을 볼 수 있는 반면 그림 10(b)~(d)에서는  $D=0.5$ 부근에서 변곡점이 발생하여  $D=0.6$  이후 완만하게 감쇠비가 감소함을 알 수 있다. 이는  $L=0.4$ 인 경우 가진원과 방진구의 거리가 가까워 상당부분의 표면파 에너지가 방진구 저면을 통과하기 때문으로, 가진원과 방진구 위치가 가까울 경우(본 실험에서  $L < 1.0$ 인 경우)와 그렇지 않은 경우에는 서로 다른 양상을 보임을 알 수 있다.



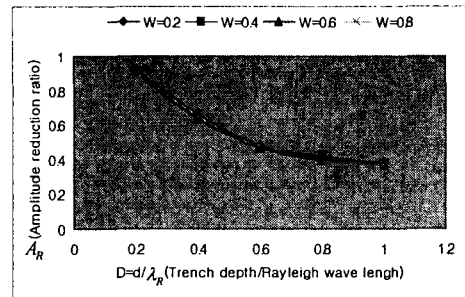
(a)  $L=0.4, X=3.0$



(b)  $L=1.0, X=3.0$



(c)  $L=2.0, X=3.0$



(d)  $L=4.0, X=3.0$

그림 10. 방진구의 제원 변화에 따른 표면파의 차단효과(수치해석)

#### 4. 실험결과와의 비교

수치해석결과의 타당성을 확인하기 위해 등방성재료로 가정할 수 있는 아크릴시편을 이용하여 초음파 실험을 수행하였다. 그림 11은 실험 전경을 보여주고 있으며 표 5는 이에따른 실험장비 사양을 나타낸다. 아크릴시편의 물성은 표 4와 같다.

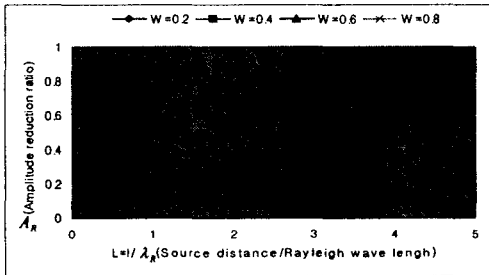


그림 11. 초음파 실험 전경

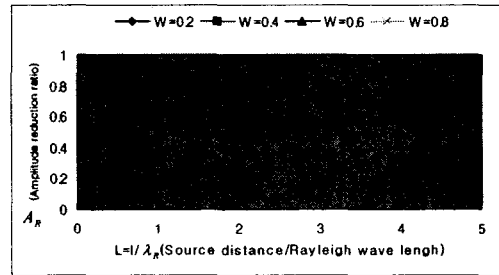
표 5. 실험장비 사양

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	K1SC	Frequency : 1MHz

그림 12는 그림 9의 수치해석 결과에 대한 실험결과이다. 그림 9와 마찬가지로  $L=2.0$  이상에서 방진구 두께의 영향이 무관함을 볼 수 있으며, 다른 경우( $D=0.2, 0.4, 0.8; X=4.0, 8.0$ )에도 동일한 결과를 얻을 수 있었다.



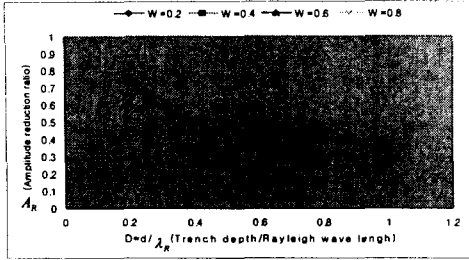
(a)  $X=2.0$  (초음파 실험)



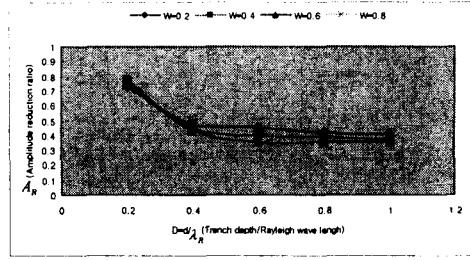
(b)  $X=6.0$  (초음파 실험)

그림 12. 가진원 거리변화에 따른 표면파의 차단효과

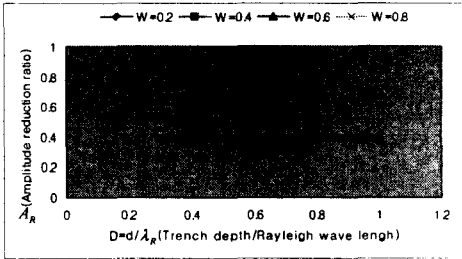
그림 13은 그림 10의 수치해석 결과에 대한 실험 결과이다. 그림 10과 유사하게  $L < 1.0$ 인 경우 방진구 깊이가 증가에 따라 계속적으로 감쇠비가 감소하나  $L \geq 1.0$ 인 경우  $D \geq 0.6$ 에서 일정한 감쇠비를 나타냄을 볼 수 있다. 그림 10의 수치해석 결과는  $D=0.6$  이상에서 완만하기는 하나 감쇠비가 계속적으로 감소됨을 볼 수 있는 반면, 그림 13의 실험결과는 거의 일정함을 볼 수 있다. 이는 2차원 수치해석과 3차원 실험에서 오는 차이 및 감쇠메커니즘의 차이에서 발생되는 결과로 판단된다. 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.



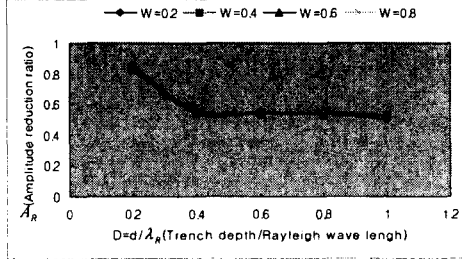
(a) L=0.4



(b) L=1.0



(c) L=2.0



(d) L=4.0

그림 13. 방진구의 제원 변화에 따른 표면파의 차단효과 (초음파 실험)

## 5. 결론

본 연구에서는 방진구의 형상 및 방진구의 설치위치에 따른 표면파의 산란거동을 조사하였다. 흡수경계를 이용한 유한요소 모델을 이용하여 방진구의 산란거동을 조사하였으며, 이에 따른 타당성 검증을 위해 등방성 재료인 아크릴 시편을 이용한 초음파 실험을 수행하였다. 제시된 수치모형은 표면파의 산란거동을 잘 묘사하였으며, 이로부터 방진구의 산란거동은 방진구의 형상과 설치위치에 따라 상당한 차이를 보임을 확인할 수 있었다. 또한 수치해석과 실험결과가 유사한 경향을 보임을 알 수 있었다.

본 연구에서 수행한 수치해석 및 실험을 통해 얻은 결론을 요약하면 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) 본 연구에서 제시한 흡수경계요소를 이용한 유한요소 해석기법은 과도한 전산적 부담없이 시간영역에서 시뮬레이션을 수행함으로써 궁극적으로 보다 효과적인 방진구조물의 설계에 유용한 해석도구를 제공할 수 있음을 보였다.
- (5) 본 연구에서 가진원으로부터 방진구의 위치가 표면파 파장의 1배 이하인 경우(near field)에 대해서는 그렇지 않은 경우와 상이한 거동을 보이므로 이에 대해서는 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국과학기술부 국가지정연구실 사업에 의해 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. Its, E.N. and Yanovskaya, T.B., "Propagation of Surface Waves in Half-Space with Vertical, Inclined or Curved Interface," *Wave Motion*, Vol.7, 1985, pp.79-94
2. Its, E.N. and Lee, J.S., "Propagation of Surface Waves across a Vertical Layer with Non-rigid Contacts," *International Journal of Engineering Science*, Vol.31, No.8, 1993, pp. 1151-1163
3. Its, E.N. and Lee, J.S., "Reflection and Transmission of Surface Waves at a Vertical Interface in Anisotropic Elastic Media," *Bulletin of the Seismological of America*, Vol.83, No.5, 1993, pp.1355-1372
4. Its, E.N. and Lee, J.S., "Propagation of Surface Waves accross a Narrow Vertical Anisotropic Layer," *Journal of Applied Mechanics*, Vol.61, 1994, pp.596-604
5. Its, E.N. and Lee, J.S., "Scattering of Surface Elastic Waves at a Vertical Layer," *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*, Vol.51, No.3. 1998, pp.439-459
6. Lysmer. J. and Kuhlemeyer, R.L., "Finite Dynamic Model for Infinite Media," *J. Eng. Mech*, (EM4), 1969, pp.859-877
7. Engquist, B. and Majda, A., "Absorbing Boundery Conditions for the Numerical Simulation of Waves," *Math. Comp*, Vol.31, No.139, 1977, pp.629-651
8. Liao, Z.P. and Wong, H.L. "A Transmitting Boundery for the Numerical Simulation of Elastic Wave Propagation," *Soil Dynamics and Earthquake Engrg.*, Vol.3, No.4, 1984, pp.174-183
9. Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer. J., "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems," *Journal of the Soil Dynamics Division, ASCE*, 99(EM5), 1973, pp.421-427
10. Ahmad, S. and Al-Hussaini, T.M., "Simplified Design for Vibration Screening by Open and In-filled Trenches," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.117, 1991, pp.67-88