

Centrifuge Simulation of Wave Propagation and Isolation Method

¹⁾, Kang-II Lee, 日下部治²⁾, O. Kusakabe, ³⁾, Chan-Kee, Kim, ⁴⁾, Tae-Hoon, Kim,
⁵⁾, Jin-Sung, Sul

¹⁾ , Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University

²⁾ Professor, Department of Civil Engineering, Tokyo Institute of Technology, Japan

³⁾ , Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University

⁴⁾ , Parttime Instructor, Dept. of Civil Eng. Choonam National University

⁵⁾ () , President, Ezi Engineering Consultants Co., LTD

SYNOPSIS : There are a number of ways to reduce the ground vibrations, one of which is by installing underground walls. Model tests for ground vibration have been conducted in recent years, but limited attention has been paid to underground wall which can reduce high vibrations. Up to date, only barriers have been actually installed in dry sand because of many unknown factors subsisting on the behavior of the ground. The characteristics of vibration sources, ground conditions and wall barriers have not been well understood yet, therefore centrifugal modeling was adopted to examine all these characteristics. This paper describes a ball dropping system, which can generate a pulse wave propagation through soil mass, and the test results show the effectiveness of underground wall barrier in reducing mechanical vibration.

Key words : the ground vibrations, centrifugal modeling, ball dropping system, underground wall barrier

1. 서 론

근년 고속화에 수반된 진동의 증대나 도시의 근접시공에 의해서 차량주행, 기계진동 및 건설현장 등에서 인위적으로 진동이 많이 발생되고 있다. 이러한 진동은 지반을 통해서 주변구조물에 진동장해나 인접주민에게 피해를 미치는 등 환경문제를 야기 시키고 있어 이에 대한 대책이 절실히 요구된다. 일반적으로 환경진동문제는 ① 가진원, ② 지반내전달, ③ 수신부의 3개 발생경로를 통해서 전달된다. 이 3가지 경로의 대책으로는 가진원에서 발생하는 진동을 방진재로 경감하는 방법이나 구조물의 기초중량을 증가시킨 가진부, 수신부에서의 개선방법을 가미해서 지반내의 파동의 전파과정을 인위적으로 차단시키는 방법이 있다. 이 진동 전달을 차단하는 공법으로는 공구(방진구)나 방진벽공법이 있고 최근에는 벽재로 여러 가지 재료를 사용한 공법이 제안되고, 현장시공도 다수 행해지고 있다. 그러나 이들 공법은 가진원의 특성, 지반조건, 방진벽의 각종 매개변수 등이 복잡하고 일반화된 합리적 저감방법이 확립되어 있지 않는 것이 현상이다.

이와 같은 많은 조건을 검증할 경우 ① FEM 등의 수치해석으로 매개변수 변화를 통한 해석을 수행하고, ② 경계조건을 명확하게 한 모형실험을 실시하는 2가지 종류의 방법이 있다. 환경진동 문제에 관해서 실시된 기존의 연구에 있어서 모형실험을 이용한 검증은 수치해석에 비해서 적다. 또한 모형실험을 실시한 사례에서도 그 의 대부분은 실제 지반상의 크기의 1/2-1/10 정도의 축척모형으로 실시된 실험이 많고, 모형토조를 사용한 예는 대단히 적다. 이들의 중력장에서의 모형실험에서는 상사축의 통일성

이 문제가 되어 왔다. 이것을 해소하기 위해 Luong(1994)은 원심모형장치를 사용해서 원심가속도 100G 장에서 질량 500g의 철구를 높이 10cm에서 떨어뜨리고 철구가 지표면에 충돌할 때 발생하는 진동을 측정해서 거리감쇄와 방진벽의 진동저감효과에 대해서 조사했다. 본 연구도 그들과 동일하게 원심모형장치를 사용해서 환경진동을 대상으로 한 지반내 전달특성 및 차단효과에 대하여 실험을 행하고 이들의 차이가 방진효과에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 또한 본 연구에서는 새롭게 개발된 진동발생장치(철구낙하장치)와 그 것을 이용한 결과의 타당성을 검토하였다.

2. 실험장치

실험은 일본의 동경공업대학 토목공학과 지반공학연구실 소유의 원심모형실험장치(TIT MarkIII Centrifuge)를 사용해서 실시하였다. 그림 1은 실험장치의 외관을 나타낸 것이며 실험 토조는 내경 450mm, 높이 420mm의 강제원형 토조이고 토조의 측면과 저면에는 파동의 반사를 억제할 목적으로 두께 10mm의 스폰지를 설치했다. 본 연구에서 새롭게 개발한 철구낙하장치(Multiple Ball Dropping System)의 상세도 및 계측기배치도는 그림 2 및 그림 3에 나타내었다. 본 장치는 구동부의 모터(Oriental Moter Co.,Ltd GVH5G50), 지반에 진동을 전달하는 철구(직경 19.8mm, 질량 28g), 철구를 낙하시키는 슬릿드가 부착된 슬라이드판, 쿠우리 힘의 영향을 제어하는 가이드 등으로 구성되어 있다. 낙하기구는 모터의 회전운동을 크랭크기구를 통해서 직선운동으로 변화시키고 10mm 간격으로 20mm×20mm의 슬릿드가 열려있는 슬라이드 판이 이동하기 때문에 보통 슬릿드 위에 있는 철구가 낙하하게 된다.

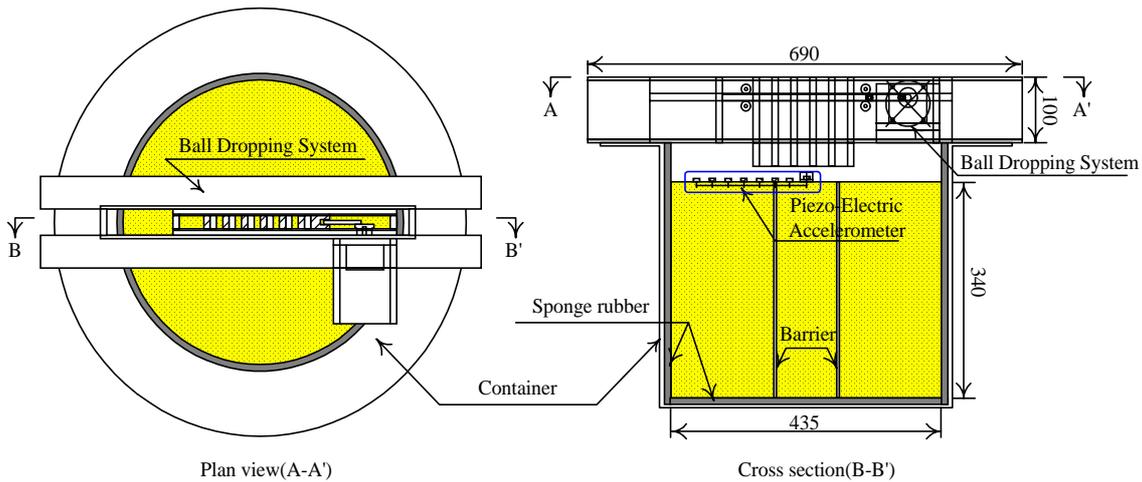


그림 1. 실험장치 외관(평면도 및 측면도)

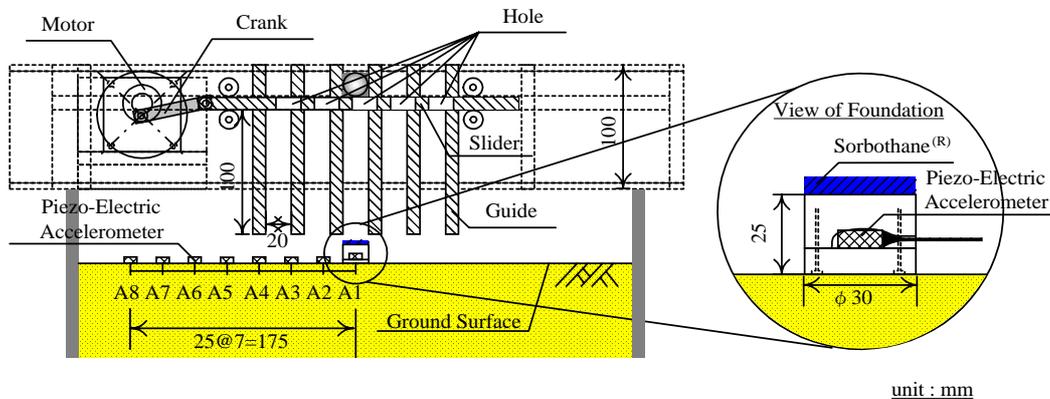


그림 2. 철구낙하장치 상세도(Multiple Ball Dropping System)

실험은 원심가속도 50G의 일정가속도장에서 실시하였다. 지반은 기건상태의 Toyoura Sand($G_s=2.63$, $e_{max}=0.961$, $e_{min}=0.593$)를 공중낙하법으로 쌓고 상대밀도 $D_r=80\%$, 두께 340mm가 되도록 만들었다. 계측은 압전형 가속도계(山一電機(株) yamco111bw)를 그림 2 및 그림 3에 나타난 위치에 설치하고, 낙하시킨 철구에 의해 기초에 입력한 충격 가진으로 지반내의 파동전달을 계측했다. 계측은 상,하 방향의 가속도를 압전형 가속도계에 의해 진원으로부터 25mm 간격으로 총 8개 지점에 대하여 계측을 하였다. 기초는 직경 30mm의 알루미늄재로 내부에 가속도계가 매설되어 있다. 또한 철구의 낙하부에는 충격을 흡수할 목적으로 충격흡수재를 부착했다.(그림 2 확대 참조)

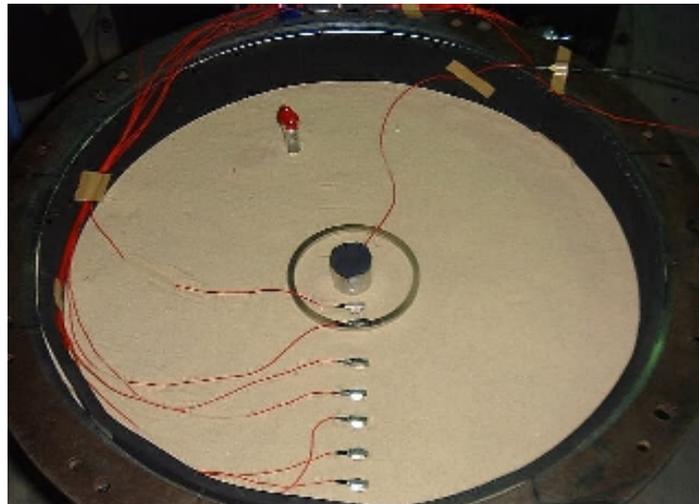


그림 3. 모형지반의 계측기 배치 예

3. 매개변수 및 실험종류

원심모형실험에서는 실험의 효율성 등을 고려해서 어느 정도 매개변수를 통일해서 실험할 필요가 있다. 본 연구에서는 FEM에 의한 매개변수 연구결과(이강일외, 2003) 및 기존의 연구 결과등 으로부터 진동차단과 관련된 매개변수를 그림 4 및 다음과 같이 ① 타설심도(D), ② 진원까지의 거리(L), ③ 벽과 지반과의 강성비(α), ④ 입력하중(F), ⑤ 벽재와 지반과의 마찰 등 5가지를 선정하였다.

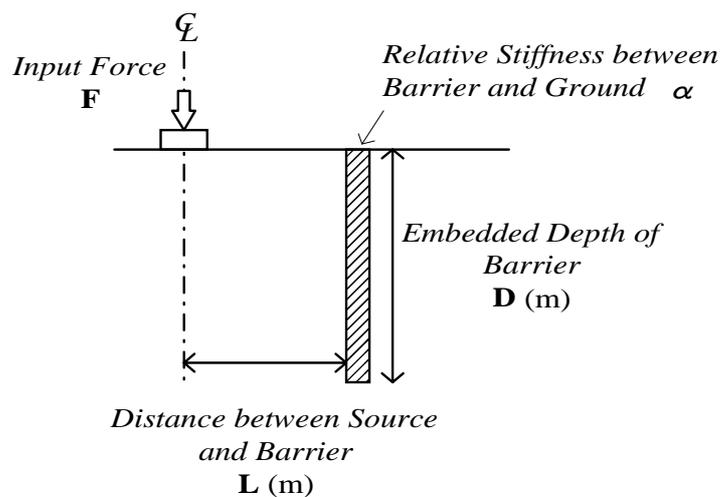


그림 4. 진동차단과 연관성이 있는 매개변수

본 연구와 관련하여 실시한 원심모형실험 케이스는 표 1과 같으며 실험에 사용된 각종 재료의 상수 값은 표 2와 같다. 실험은 기본적으로 무대책 지반 및 차단벽을 설치한 경우로 나누어 실시했는데 차단벽은 지반과의 강성비(α)의 차이에 따라서 다음과 같이 알루미늄, 아크릴, EPS(Expanded Polystyrene)의 재료를 선택하였다.

표 1. 실험종류(Ball Dropping System Shock Wave)

				Embedded depth of barrier, D(m)			
				17.0	10.0	5.0	2.5
Distance between source and barrier L(m)	2.5	Relative stiffness between barrier and ground α	>1 (EPS)	○	○	○	○
			<1 (Acryl)	○	○	○	
			<<1 (Aluminum)	○	○	○	

또한 본 연구에서 실시한 입력하중은 충격파이기 때문에 정확한 파장은 알 수 없지만 $D_r=80\%$ 시의 파장 λ 는 대략적으로 10m정도로 추정된다. 따라서 그림 4와 같은 매개변수 중에서 진원까지의 거리(L)가 파장 λ 보다도 크게 되지 않는 한 이 저감효과는 그다지 변화하지 않기 때문에 진원까지의 거리는 시판되고 있는 재질의 규격 사이즈에 의존하여 2.5m(모형실험장치에서는 5cm)로 결정하였다.

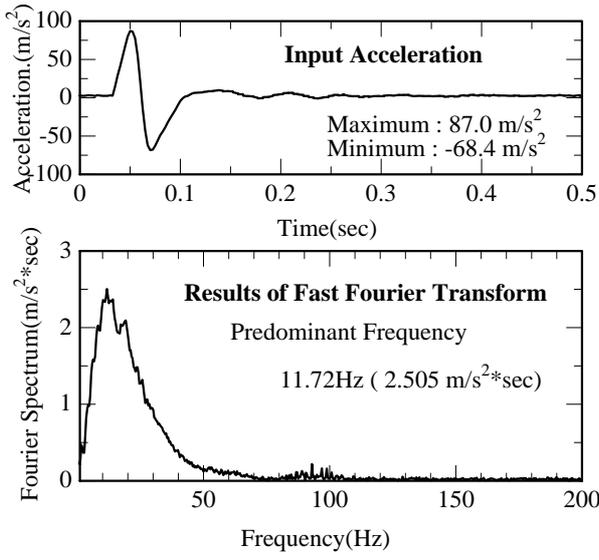
표 2. 차단벽재 및 모래의 역학적 특성

	dry unit weight, $\gamma_d(\text{kN/m}^3)$	shear modulus, $G(\text{GN/m}^2)$	relative shear modulus between barrier and soil, α
Aluminum	26.5	25.6×10^3	about 2000
Acryl	11.8	1.21×10^3	about 100
EPS	1.1	1.77	about 0.15
Toyoura Sand ($D_r=80\%$)	15.4	12.25	--

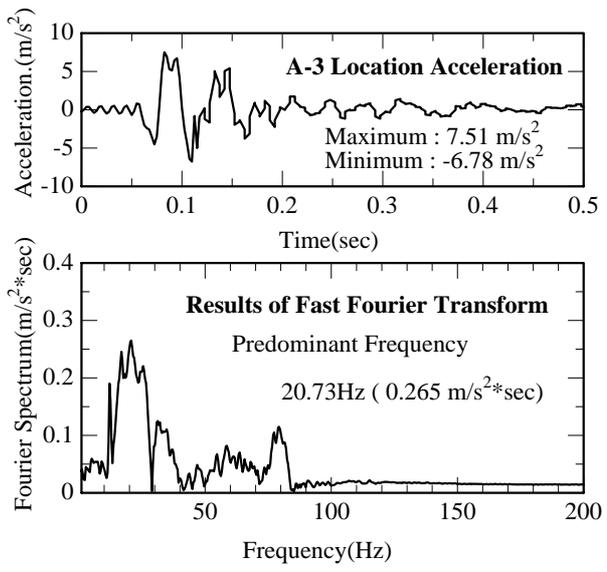
4. 실험 결과 및 고찰

이하의 모든 실험결과는 실 지반으로 환산하여 나타낸 것이다(즉, 모형지반이 10cm이면 실 지반은 $50G \times 10\text{cm} = 5\text{m}$ 를 의미함).

그림 5는 그림 2의 계측기 배치 예 에서와 같이 A1지점(기초부)과 A3지점(2.5m)에서 시간에 따른 가속도 관계와 주파수에 따른 FFT(Fast Fourier Transform)의 관계를 나타낸 것이다. (a)의 결과에 의하면 최대 가속도는 87.0m/sec^2 이고 탁월 주파수는 약 12Hz이다. 이 주파수는 고속열차나 트럭에 의해 발생하는 교통진동의 탁월 주파수와 비슷하다(Kobayashi, 1975). 또한 (b)의 결과에 의하면 1차 탁월 주파수는 약 20Hz이지만 2차주파수는 약 80Hz이다. 그러나 본 연구에서 사용한 A1(기초부)지점 이외의 압전형 가속도계의 공진이 4kHz이기 때문에 2차 탁월 주파수는 가속도계의 공진에 의한 결과라고 생각했다($80\text{Hz} \times 50G = 4\text{kHz}$). 따라서 50Hz 이후의 계측 데이터 결과는 모두 파형처리(low pass)를 실시하고 그 영향을 제거하였다.

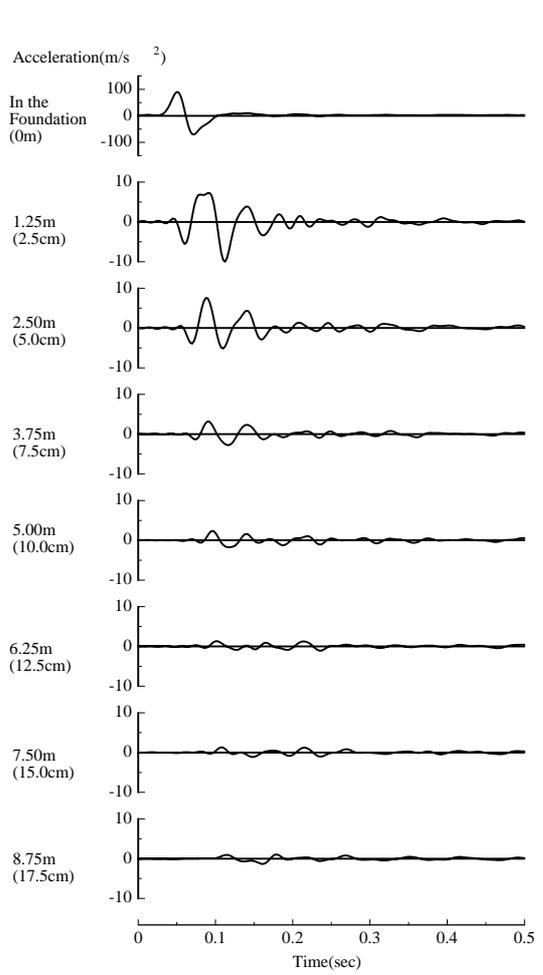


(a) A1지점

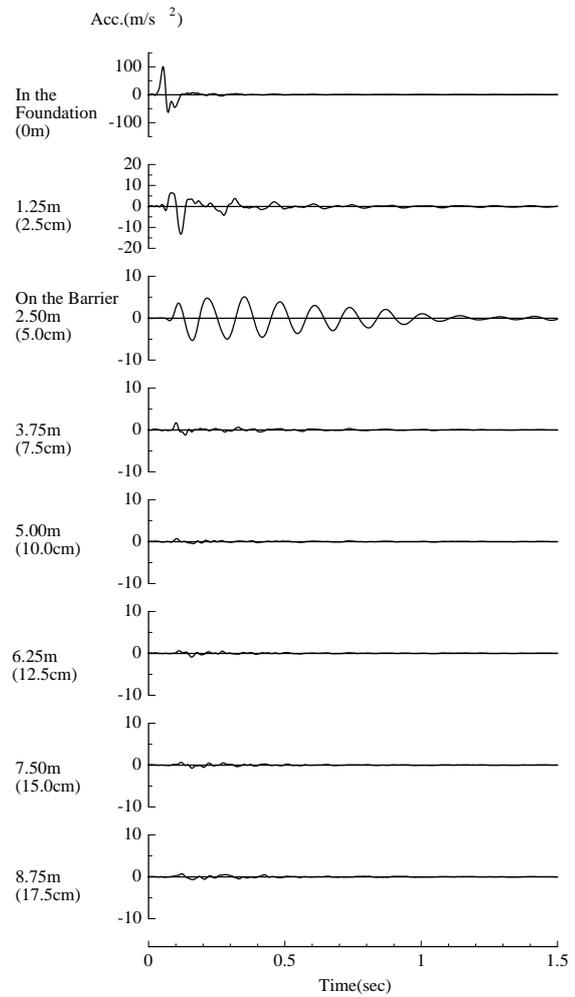


(b) A3지점

그림 5. 무대책 지반의 경우 A1, A3 지점의 가속도 시간이력 및 FFT 결과



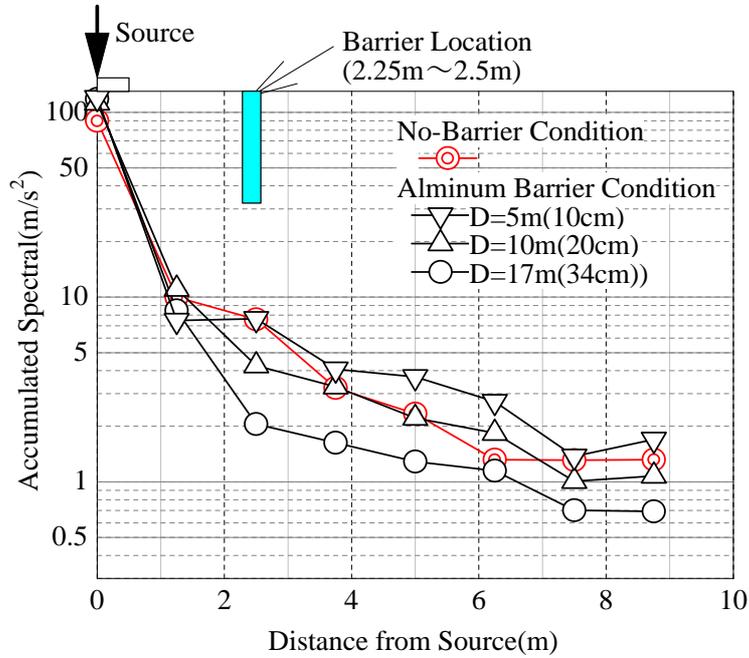
(a) 무대책지반



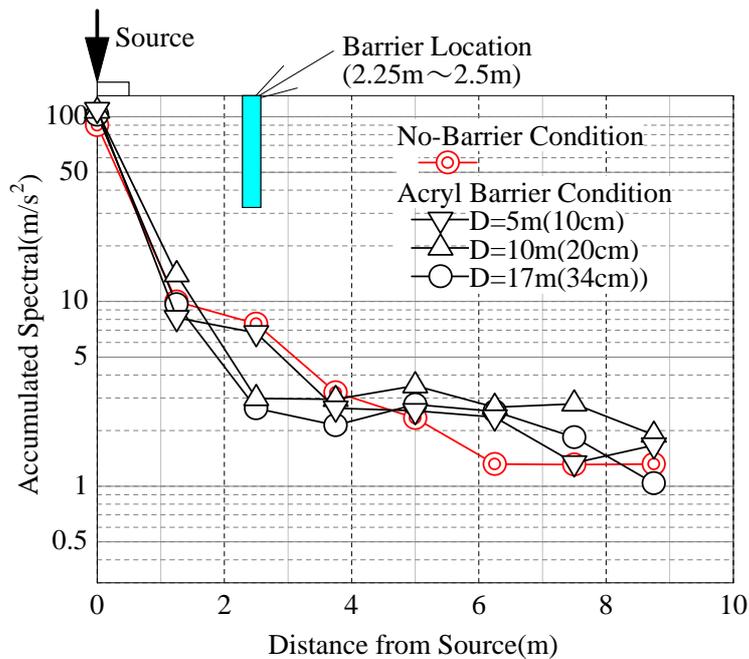
(b) EPS차단벽이 설치된 지반(D=17m)

그림 6. 지표면 파동전파 상황의 예

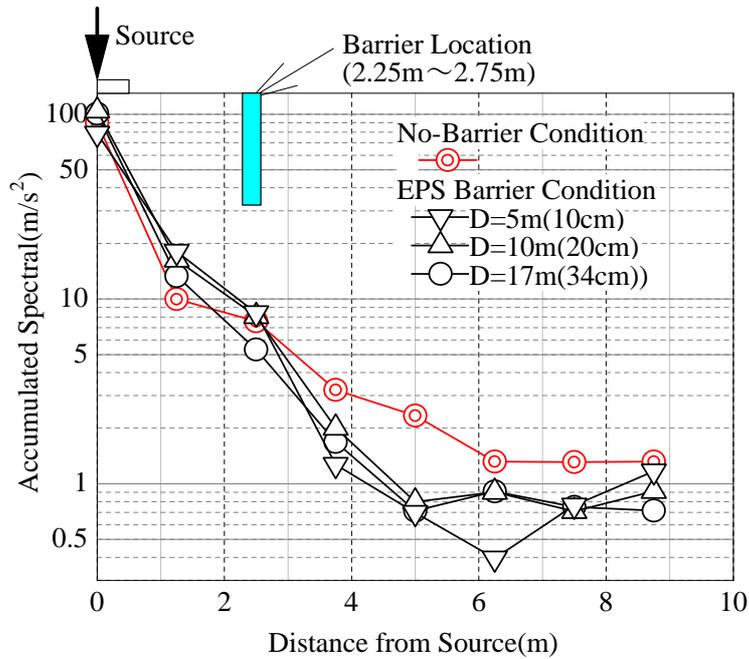
그림 6은 과동전파상황의 대표 예((a) 무대책지반, (b) EPS 17m차단벽 설치 지반)를 각각의 계측기 위치별로 시간에 따른 가속도관계를 나타낸 것이다. 본 결과에 의하면 무대책 지반의 경우는 진원(기초부)에서 멀어질수록 점진적으로 진동의 감쇄현상이 발생하는 전형적인 현상을 보이지만, EPS를 전체지반에 타설(D=17m)한 대책지반의 경우는 차단벽이 설치된 지점(2.5m)인 차단벽에서 진동의 흡수현상이 발생된 이후의 계측지점에서는 진동의 감쇄현상이 확연히 나타나고 있다. 한편 무대책 지반의 각 지점에서의 과동전달시간으로부터 과동전파 속도는 $V=178.6\text{m/sec}$ 였고 가속도 파형의 푸리에 해석으로부터 탁월 주파수는 20Hz였기 때문에 본 실험에서의 파장 $\lambda=8.9\text{m}$ 를 도입했다.



(a) 알루미늄 차단벽



(b) 아크릴 차단벽



(c) EPS 차단벽

그림 7. 각 차단벽재별 최대가속도-거리관계

그림 7은 각각의 차단벽재 별로 심도에 따라 기초에 충격하중을 가했을 경우 거리별 최대가속도의 결과를 나타낸 것이다. 먼저 그림 7(a)는 알루미늄으로 차단벽을 설치한 결과로서 그 결과를 보면 타설심도 즉 근입심도가 17m에서는 차단벽이후 진동의 저감이 계속 나타나지만 그 외의 경우 즉 D=10m인 경우는 무대책 지반의 경우와 거의 동일하며 타설심도가 얇은 D=5m인 경우는 무대책 지반보다 더 큰 진동이 발생되는 결과가 얻어졌다.

그림 7(b)는 아크릴로 차단벽을 설치한 결과를 나타낸 것으로 D=17m, 10m인 경우 차단벽 위에서는 진동이 저감되고 있지만 차단벽 이후에서는 무대책 지반의 결과와 동일한 정도의 값이 나타나고 있다. 또한 D=5m에서는 차단벽 위에서도 무대책 지반의 결과와 비슷하고 차단벽 이후에는 거꾸로 무대책 지반보다 진동이 증가하는 결과가 얻어졌다. 이와 같이 차단벽의 강성의 차이에 의한 진동저감 효과가 나타나고 있는데 이 결과는 현재까지 행해진 해석결과와 일치한다.

그림 7(c)는 차단벽을 EPS를 설치하여 얻은 실험결과를 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 차단벽을 설치한 지점 까지는 무대책 지반과 동일한 실험 결과가 얻어졌지만, 차단벽 이후부터는 진동저감효과가 명확히 나타나고 있다. 또한 알루미늄 차단벽과 같이 타설심도에 의한 효과의 거동과는 달리 $D/\lambda \approx 0.5$ 라고 생각되는 D=5m에서도 전층을 차단벽으로 설치한 D=17m(EPS)의 결과와 동등의 저감효과가 나타나고 있다는 점은 대단히 주목된다. 즉, 차단벽이 부드러운 경우(EPS)에는 파장 λ 의 영향이 없지는 않으나 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 환경진동문제 대한 원심모형 실험을 실시하고 실험 결과로부터 얻은 지반내 전달 특성 및 방진벽을 설치한 경우의 진동저감효과에 대해서 검토했다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 원심모형 실험장치를 환경진동 문제에 대해서 적용하고 파동의 지반내 전달현상을 충분히 포착하고 전달하는 것을 확인했다.
2. 본 연구에서 개발한 충격 재하장치(ball dropping system)의 적용성을 확인했다.

3. 강성이 지반보다 높은 방진벽을 모의한 케이스(알루미늄 차단벽재)에서는 진동저감효과가 차단벽의 타설심도에 영향을 받지만, 강성이 지반과 거의 비슷한 아크릴 차단벽재의 경우는 타설심도와 관계없이 진동의 차단효과가 거의 없었다.
4. EPS와 같은 부드러운 차단벽재는 차단벽의 심도가 과장 λ 의 50%이상 일 때는 진동차단에 매우 효과적이다.

참고문헌

1. 이강일외(2003), "지반진동의 저감효과에 영향을 미치는 매개변수연구", **대한토목학회논문집**, 제23권, 제5C호, pp.299~307.
2. 竹宮宏和(2002), "環境振動における地盤内の波動傳播と振動對策", **基礎工**, Vol. 30, No. 1, pp.8-11.
3. Itoh, K., Koda, M., Lee, K. I., Murata, O., and Kusakabe, O.(2002), "Centrifugal simulation of wave propagation using multiple ball dropping system", **International Journal of Physical Modelling in Geotechnics**, Vol. 2, No. 2, pp. 33~51.
4. Kobayashi. Y. (1975), "Influence of ground vibration cause by construction and its isolation methods", **Kajima Institute Publishing**, pp. 65~68.
5. Luong, M. P. (1994), "Efficiency of a stress wave mitigation barrier", **Proc. Int. Conf. on Centrifuge Modelling-Centrifuge 94**, Balkema, Singapore Paris, pp. 283~288.
6. Woods, R. D. (1968), "Screening of surface waves in soils", **J. Soil Mechanics and Foundation Engineering**, ASCE, 94(4), pp. 951~979.