

# 지반내 그라우팅공법에 의한 지반진동감소 연구

허 영\*, 조 준 상\*\*, 구 용 우\*\*

(A Study on the Vibration Reduction Effect of a Soil Grouting)

(Young Huh, Jun-Sang Cho, Yong-Woo Koo)

## 1. 서론

지반과 구조물의 동적 상호작용은 건설분야에서의 중요한 현상으로, 특히 지반을 통해 인근구조물로 전달되는 진동은 구조물 자체의 구조적인 문제 뿐 아니라 그 속에 거주하는 사람이나 설비에 대한 안전성 또는 사용성에 나쁜 영향을 야기할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 진동을 저감시키기 위해, 지반내에 정상적인 진동전파를 방해하는 구조물을 시공하여 진동 저감효과를 만들어 내는 방법을 연구하였다. 이러한 연구의 발상은 다음과 같다. 충진지반에서의 지반진동의 진폭을 해석하면서 진동의 크기가 기저압의 위치에 따라 큰 영향을 받는 것을 알았고 이로부터 지반내에 인위적인 층을 만들수 있다면 지반진동의 크기를 변화시킬수 있지 않을까라는 생각에서 본 연구를 시작하였다. 또한 지반 내에서의 정상적인 진동의 전파를 방해하기 위한 차진 구조물을 만드는 방법은 연약지반의 강도증대 또는 차수의 목적으로 주로 사용하고 있는 그라우팅공법의 사용이 가능할 것이므로, 기존의 그라우팅현장에서 만들어진 지반의 물성치들을 사용하여 경계요소법에 의한 수치해석적 방법을 택하였다.

본 연구에서는 그라우팅공법의 시공성에 관한 것은 포함되지 않는다. 본 논문에서는 지반의 구조를 경사구조와 수평지반구조라는 두가지 특징적인 경우에 대해 검토하였다. 이중 경사진 기저압층을 가진 지반의 경우에는 기저압에서 진동의 비대칭적인 반사에 의해 수평기저압에서와는 달리 기저압의 한쪽에서 다른쪽에 비해 큰 진동이 발생한다.

그라우팅층의 효과를 검토하기 위한 연구의 순서는 일정주파수의 조화진동에 대해 먼저 여러 가지 크기의

그라우팅층과 함께 블록으로 볼 수 있는 크기의 그라우팅층에 대해 진동저감효과를 해석하였고, 이를 통해 보강층의 소요크기 및 최적위치를 구하였다. 사용된 물성치는 실제 지하철 건설현장에서 나타난 지반물성치 및 그라우팅후의 지반강도 및 전단파전파속도를 이용하였다. 또한 마지막에서 검토된 기차하중에 대한 효과를 알아보기 위해 사용된 기차운행에 의한 지반가속도도 역시 측정된 값을 사용하였다. 그러나 당시의 기차운행속도가 낮아 정상적인 운행에서는 더 큰 값이 나올 것으로 판단되었으나 측정된 값을 그대로 사용하였다.

## 2. 경계요소법

수치해석을 위해 사용된 방법은 직접구성(direct formulation)에 의한 경계요소법으로, 이는 무한영역 뿐 아니라 임의의 경사진 지반의 기하학적인 형태를 모델링 할 때 나타나는 경계요소법의 장점과 함께 계산결과로부터 물리적인미가 있는 값을 직접 얻기 위함이다. 물론 유한요소와의 접합에 의한 방법이 가능하나 본 논문에서는 경계요소만에 의한 모델링을 사용하였고, 경계요소법의 이론에 대해서는 본 논문에서는 참고문헌[1,2,3,4,5]으로 대신하였다. 본 논문에서 사용된 입력값은 지반의 포아송비, 감쇠비와 함께 전단파속도를 사용하였다. 이때 함수비, 비선형성 등의 고려도 가능하겠으나 그라우팅층의 사용가능 범위를 기차등과 같이 지반내에 선형범위의 변형율을 발생시키는 하중으로 보아 선형의 범위만을 고려하였고, 본 논문에서는 2차

\* 수원대학교 토목공학과 조교수  
 \*\* 수원대학교 토목공학과 석사과정

원해석만을 수행하였다.

### 3. 경계요소프로그램(SSi2D)

본 논문에서 사용된 전산프로그램인 SSI2D는 강성체인 2차원 기초의 동적 강성 또는 유연도행렬을 주파수영역에서 구하고 이를 이용하여 진폭의 크기계산에 사용될 수 있다. <그림1>은 SSI2D의 구조를 나타내며 검은색으로 된 부분은 단위프로그램으로 각각의 역할은 다음과 같다.

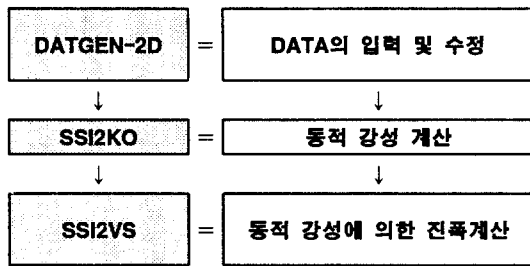


그림1 SSI2D 프로그램 구조

- DATGEN-2D : 대화방식에 의해 자료입력이 가능하며, 해석모델의 검토를 위한 그림의 출력이 가능하다. 또한 직교좌표축에 따른 화면의 회전도 가능하다.
- SSI2KO : constant요소에 의해 동적강성계수 행렬을 구하는 해석모델이다.
- SSI2VS : 지반의 진동크기를 계산하는 단위 프로그램으로, 복소수 또는 진폭으로의 표현이 가능하다.

### 4. 수치해석 및 결과분석

#### 4.1 전산해석모델

사용된 전산해석모델은 수평지반과 경사지반에 대한 전산해석모델이 각기 <그림2>와 <그림3>에 나타나 있으며, <표1>의 입력물성치와 함께 그림에서 사용된 기호의 설명은 다음과 같다.

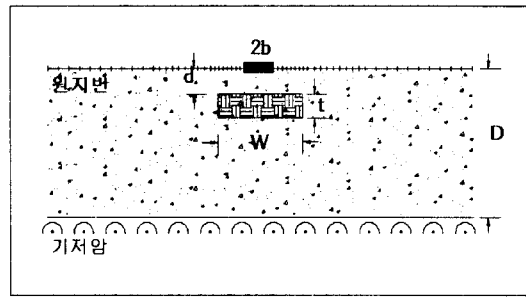


그림 2. 수평지반의 모델링 형상

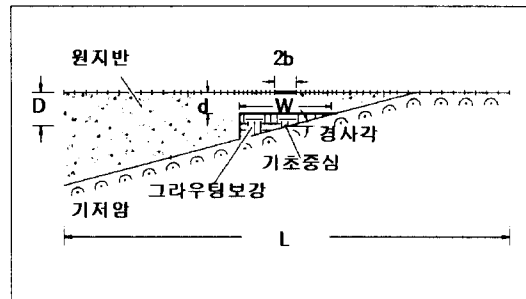


그림 3. 경사지반의 모델링 형상

- D : 충전지반의 경우 지표면에서부터 기저암까지의 깊이
- d : 지표면에서부터 보강층까지의 깊이
- t : 보강층의 두께
- b : 진동원폭의 반
- l : 보강층의 폭

경사기저암의 경우, 진동원의 중심에서부터 연직으로 선을 내려 만나는 기저암상의 점을 기준점으로하여, 지표면에서부터 기준점까지의 거리를 기저암의 깊이로 표현하였다. 또한 기저암의 경사는 45°를 사용하였고 기저암의 효과를 강조하기 위해 기저암이 지표면까지 도달되어 있는 극한적인 경우를 사용하였다.

#### 4.2 수평기저암

##### 4.2.1 보강깊이에 따른 진동저감효과

수평기저암 지반의 경우 본 논문에는 포함되어 있지 않은 선행된 여러 해석결과에 의해 최적의 크기로 선정된 보강층의 규모를 가지고 위치에 따른 진동크기의

변화를 나타내었다. 보강층은 수평으로 하였고, 보강층의 위치는 지표면에서부터 보강층 상부까지의 깊이인  $d$ 로 표현하였다. 해석을 위해 사용된 진동은 30 Hz과 50Hz의 조화진동으로 기저암까지의 표토가 20m인 지반에서  $d=1/3/5/10/15m$ 의 보강층에 대해 해석하였다. 여기서  $d=1m$ 란 지표면으로부터 보강층까지의 깊이가 1m인 것을 의미한다.

<그림4>와 <그림5>에 나타난 해석결과를 보면 보강층이 지표면에 가깝게 존재하는 것이 진동저감효과가 탁월했으나, 보강을 진동원 바로 밑에 부쳐서 하는 경우에는 좋지 않은 결과를 보여 여기에는 나타내지 아니하였다.

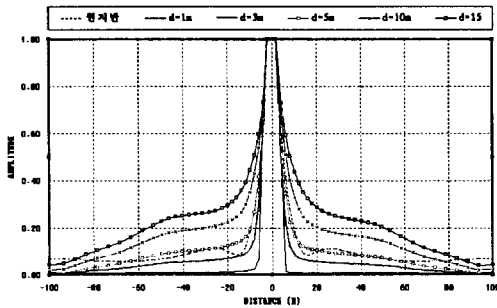


그림 4. 보강깊이에 따른 진폭변화 : 30Hz

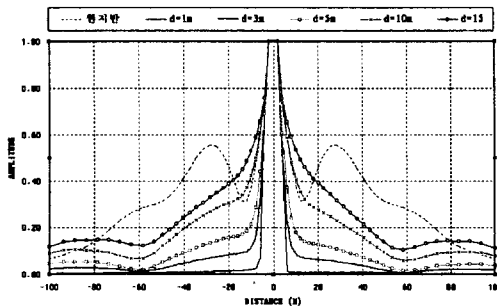


그림 5. 보강깊이에 따른 진폭변화 : 50Hz

#### 4.2.2 수진부에 설치된 경우의 진동 저감효과

현장여건에 따라서는 그라우팅에 의한 보강층을 진동원보다는 수진부에 설치하는 것이 더 용이 할 수 있으므로, 그러한 경우의 진동저감효과를 알아보기 위해 수진부로 가정된 거리인 진동원으로부터 5m와 10m의

거리에 보강층을 설치하였다. 보강층의 크기는 폭  $l=9m$ , 두께  $t=3m$ 로 진동원 및 수진부의 하부 1m의 깊이에 설치하는 것으로 하였다.

수진부가 진동원으로부터 5m 떨어져 있는 경우( $L=5m$ )와 10m 떨어져 있는 경우( $L=10m$ )의 결과가 30Hz와 50Hz에 대해 각각 <그림6>과 <그림7>에 나타나 있다. 보강이 되지 않은 원지반에서의 결과 및 진동원의 직하부에 설치된 경우의 결과가 각각 가는 실선과 굵은 실선으로 비교되어 있다. 보강층은 각 그림에서 진동원의 위치인 "DISTANCE 0"의 오른쪽에 설치되어 있다. 결과에 의하면, 30Hz의 조화진동의 경우에는 수진부에서 진동저감효과가 전혀 나타나지 않으며, 더욱이 반대편인 진동원의 왼쪽에서는 커다란 증폭현상이 나타나고 있다.

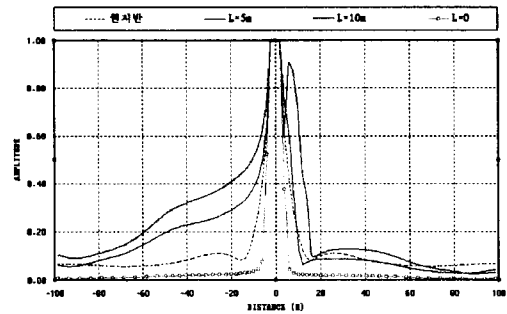


그림 6. 수진부까지의 거리에 따른 진폭변화 : 30Hz

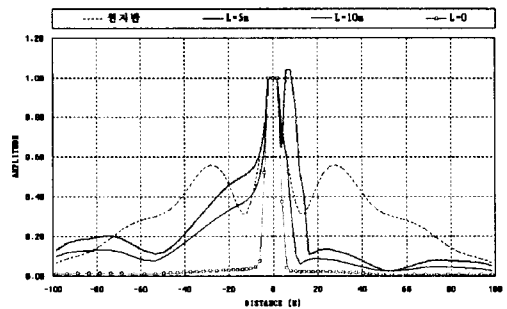


그림 7. 수진부까지의 거리에 따른 진폭변화 : 50Hz

50Hz의 조화진동의 경우에는 진동저감효과가 상당히 있으나 반대편인 진동원의 왼쪽에서는 수진부쪽인 오른쪽에 비해 큰 진동이 발생되고 있다. 결과적으로 진동원의 하부에 설치하는 경우가 제일 좋은 진동저감

효과를 보인다.

### 4.3 경사기저암

#### 4.3.1 보강깊이(d)에 따른 진동저감효과

본 절에서는 수평기저암의 경우와 마찬가지로 보강 깊이와의 다른 변수를 고정시키고 보강깊이 d를 d=1/3/5/10/15m로 변화시켜 해석하여 보강깊이에 의한 진동저감효과의 변화를 알아보았다. 이때 기저암까지의 깊이는 D=15 m이며, 보강폭은 기준점의 왼쪽을 모두 수평보강하는 것으로 가정하였다.

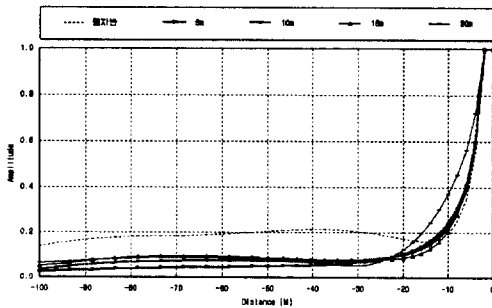


그림 8. 보강깊이에 따른 진폭변화 : 20Hz

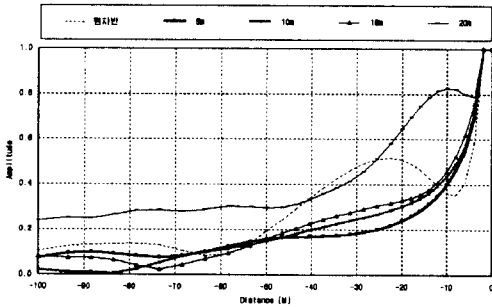


그림 9. 보강깊이에 따른 진폭변화 : 50Hz

진동원의 왼쪽에서의 진동크기만을 표현한 해석결과인 <그림8>과 <그림9>을 보면, 20Hz 조화진동의 경우에는 보강깊이에 큰 영향을 받지 않으나, 50Hz 조화진동의 경우에는 비교적 큰 영향을 나타내며 수평기저암에서의 경우와 마찬가지로 지표면에 가까이 설치한 경우가 가장 좋은 감쇠효과를 나타내고 있다.

여기에서는 위에서 언급한 것과 같이 보강폭의 길이

가 크므로 지반의 동적 특성을 크게 변화시켜, 50Hz의 경우 원지반과는 달리 진동원에서 아주 가까운 곳에서 피크치가 나타나고 있다.

#### 4.3.2 보강폭(l)에 따른 진동저감효과

본 절에서는 D=15m, d=5m로 고정하고, 보강폭 l을 l=15/20/30/60/110m로 변화시켜 해석하였다. 또한 여기에서 진동원에서의 조화진동의 진폭을 단위크기로 한 경우와 하중을 단위크기로 한 경우와를 나누어 해석하여 보았다.

##### (1) 단위변위

<그림10>에 표시된 20Hz의 조화진동에서는 보강폭에 따른 진동저감효과가 정확히 나타나지 않으므로 <그림11>에서와 같이 진폭저감계수(ARF: Amplitude Reduction Factor)에 의해 진동저감효과를 표시하였다.

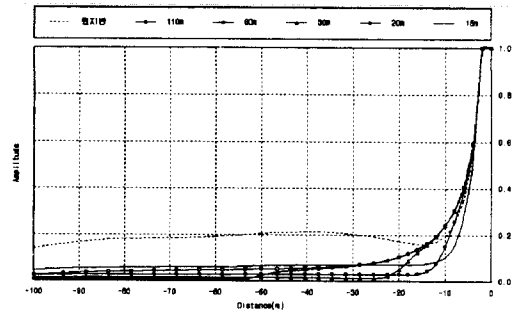


그림 10. 보강폭에 따른 진폭변화 : 20Hz

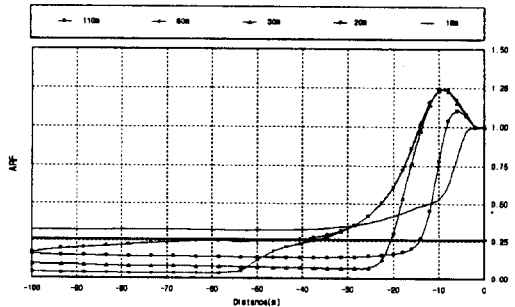


그림 11. 보강폭에 따른 진폭감소계수의 변화 : 20Hz

진동저감계수란 원래의 진폭에 대한 저감대책후의 진폭의 비로 “진동저감계수 = 1”은 저감대책전후의 결과가 같은 것을 의미하며, 이 수치가 작을수록 좋은 진동저감효과를 의미한다. 이 결과에 의하면 50m 이상의 원거리에서는 보강폭 60m의 경우가 가장 좋은 결과를 보이나, 근거리에서는 오히려 20m 보강의 경우가 더 좋은 결과를 보이고 있다. <그림12>에 표시된 50Hz의 조화진동의 경우에는 20Hz의 경우보다 보강폭의 길이에 더 민감한 변화를 보이고 있다. 이를 20Hz의 경우와 같이 진동저감계수로 나타낸 <그림13>에서는 보강폭의 영향이 더욱 뚜렷이 보이며, 특히 가장 긴 110m 보강의 경우 가장 좋지 않은 효과를 나타내며 보강폭에 따라 진동저감효과가 좋은 거리가 구분되어 나타나고 있다. 이는 진동저감을 하려는 수진점의 위치에 따라 보강폭의 크기를 달리해야 하는 것을 의미한다.

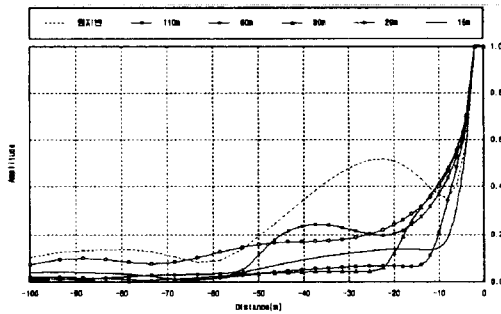


그림 12. 보강폭에 따른 진폭변화 : 50Hz

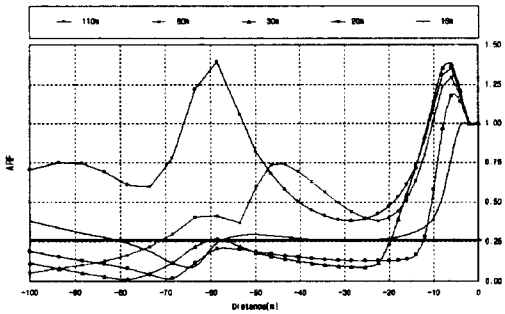


그림 13. 보강폭에 따른 진폭감소계수의 변화 : 50Hz

## (2) 단위하중

여기에서는 앞에서와 달리 단위하중이 작용할 때의 그라우팅보강층에 의한 진동저감효과를 나타내었다.

보강폭은 20m와 60m이고, 두 경우에 대해 각각 조화진동 20Hz와 50Hz에 대해 해석하였고, 단위변위의 경우와 같이 해석결과를 진폭의 변화와 함께 진동저감계수로 표시하였다.

먼저 20Hz의 경우에는 <그림14>의 거리에 따른 진폭의 표시에서 나타나 있듯이 보강폭에 대해 덜 민감한 결과를 나타내었고 이는 <그림15>의 진동저감계수로 표시된 결과에서 더욱 잘 표시되어 있다. 이는 단위변위 작용시와 같은 결과이다.

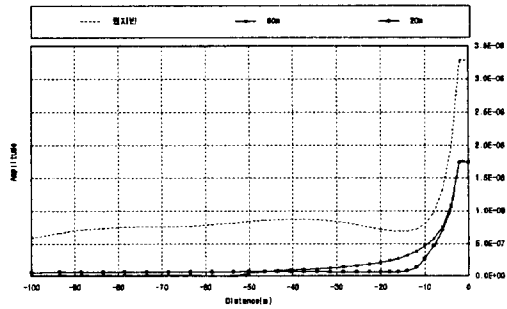


그림 14. 보강폭에 따른 진폭변화 : 20Hz

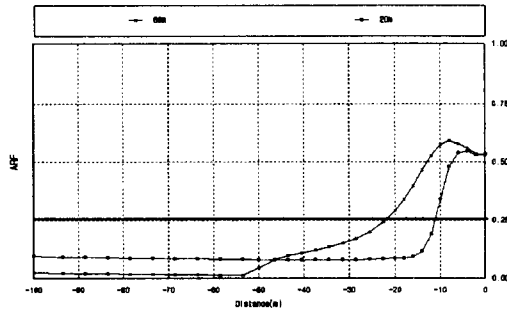


그림 15. 보강폭에 따른 진폭감소계수의 변화 : 20Hz

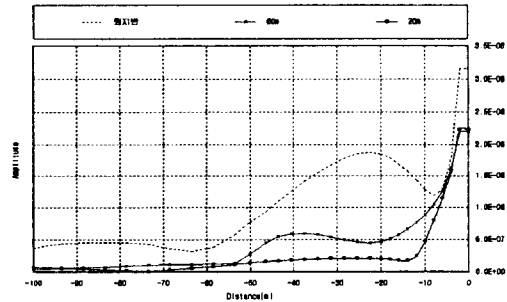


그림 16. 보강폭에 따른 진폭변화 : 50Hz

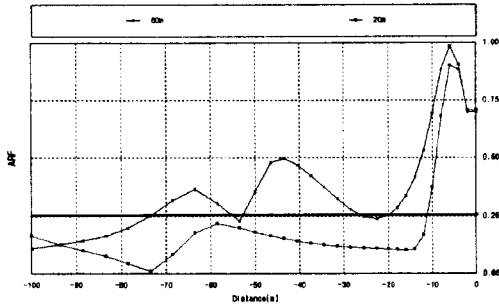


그림 17. 보강폭에 따른 진동저감계수의 변화 : 50Hz

또한 50Hz의 경우인 <그림16>과 <그림17>의 경우에도 역시 단위변위 작용시와 같은 결과를 보이고 있다. 즉 짧은 보강폭에서 더 좋은 진동저감효과를 나타내고 있어 보강폭 20m의 경우 진동원으로 부터의 거리 10m 이후에는 대부분 진동저감계수가 0.25 이하로 나타나고 있다.

#### 4.4 기차하중

본 절에서는 조화진동에 의해 구한 결과를 토대로 기차하중이 작용하는 경우, 그라우팅공법에 의해 만들어진 보강층의 진동저감효과를 구하였다. 사용된 기차하중은 실제 측정된 것이며, 지반 물성치는 그라우팅공법이 사용된 지하철헌장에서 측정된 값이다. 해석된 지반은 4.3.2절에서 사용된 지반으로, 보강폭은 15m를 사용하였다. 측정된 기차하중은 <그림18>과 <그림19>에 가속도의 시간이력곡선과 스펙트럼이 각각 나타나 있으며, 이로부터 해석된 가속도스펙트럼이 철로로부터 25m, 50m, 75m, 100m 떨어진 점에 대해 각기 <그림20>, <그림21>, <그림22> 및 <그림23>에 나타나 있다. 또한 이 결과를 VAL의 O.A 값으로 <표2>에 나타내어 이 표로부터 보강층의 진동저감효과를 뚜렷이 볼 수 있다.

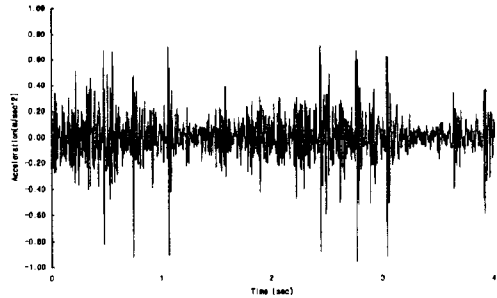


그림 18. 기차하중에 대한 시간이력곡선

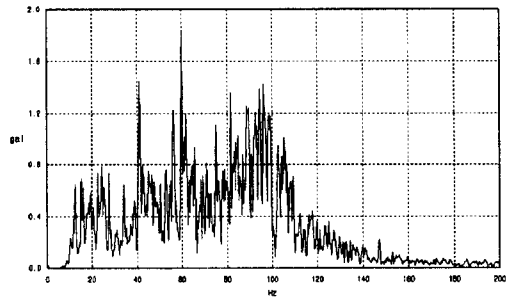


그림 19. 기차하중에 대한 가속도스펙트럼

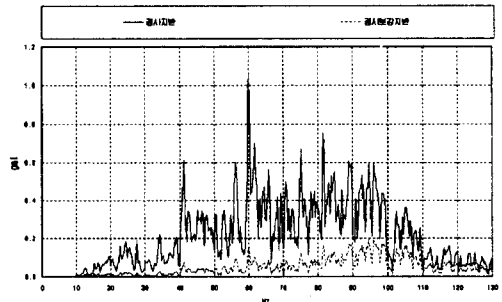


그림 20. 기차하중이 작용할때 25m지점의 가속도스펙트럼

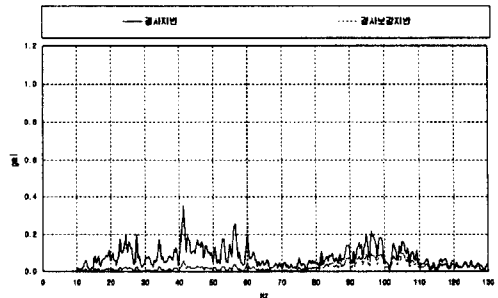


그림 21. 기차하중이 작용할때 50m지점의 가속도스펙트럼

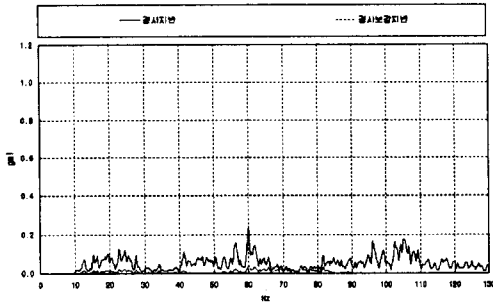


그림 22. 기차하중이 작용할때 75m지점의 가속도스펙트럼

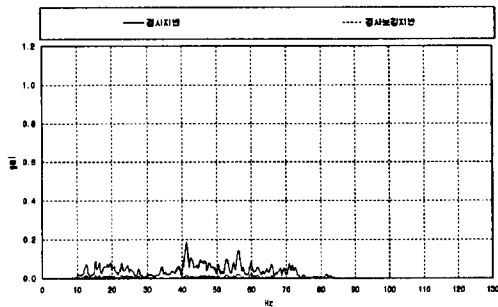


그림 23. 기차하중이 작용할때 100m지점의 가속도스펙트럼

표2. 기차하중이 작용시 Overall치

거리 (m)	VAL (dB)	
	원지반	보강지반
25	74	59
50	65	51
75	61	47
100	59	42

## 5. 결론

본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 진동저감을 위한 보강층이 일정 크기이상이면 진동 저감효과는 오히려 떨어지며, 이의 결정을 위한 수치해석이 수행되어야 한다.

2. 보강층의 위치는 지표면에 가까운 것이 좋으나 진동원에 붙여서 시공하는 것은 안된다.
3. 보강층을 수진부의 하부에 설치하는 것 보다는 진동원의 하부에 설치하는 것이 좋다.

이와 함께 본 연구의 보완을 위한 계속연구의 필요성은 다음과 같다.

본 연구의 결과는 수치해석적인 방법에 의한 것으로 이의 입증을 위한 실험연구가 필요하다. 또한 해석 결과에서 보듯이 본 논문에서의 방법으로는 진동원의 인접부분에서의 진동저감효과가 적으므로 다른 저감방법과의 병행이 필요하며, 이를 위한 여러 진동저감방법들의 최적조합을 위한 연구가 수행되어야 한다.

## 참고문헌

1. W.S.Venturini , 'Boundary Element Method in Geomechanics', Springer-Verlag , 1983.
2. .C.A. Brebbia, J.C.F. Telles, L.C. Wrobel, 'Boundary Element Techniques', Springer-Verlag, 1984.
3. T.A.Cruse , 'Advanced Boundary Element Methods', Springer-Verlag , 1987.
4. G.D.Manolis , D.E.Beskos , 'Boundary Element Methods in Elastodynamics', Unwin Hyman, 1988.
5. A.A.Becker , 'The Boundary Element Method in Engineering', McGraw-Hill ,1992.
6. 오 재용 , 천 병식 , '지반진동 영향과 대책', 건설 연구사, 1993.
7. 홍 원표 , '주입공법', 중앙대학교 출판부 , 1995.