

# 철도 노반재료의 정·동적특성 연구

## A Study on Anti-Vibration Materials for Roadbed

신민호<sup>1)</sup> 이일화<sup>2)</sup> 이선복<sup>3)</sup> 김수일<sup>4)</sup> 허영<sup>5)</sup> 김수삼<sup>6)</sup>  
Shin,Min-Ho Lee,Il-Wha Lee,Sun-bock Kim,Su-il Huh,Young Kim,Su-Sam

### Abstract

The purpose of this study is to perform development of techniques for reduction of ground vibration caused by highspeed railway. At the first year, we have researched for the statically and dynamically characteristics of materials that could reduce the propagated ground vibration. The tire chip and blast furnace slag had been selected as the reduction material. And we have tested these materials by computer analysis.

### 1. 서론

열차의 고속 주행시 야기된 진동은 흔들림, 균열 등을 야기 시켜 구조물의 내구성 및 안전성에 악영향을 주게 되고 주변의 생활환경에도 큰 문제를 유발시킨다. 전파매개체인 지반을 통해 인근으로 전파되어 발생하는 문제를 해결하는 방법으로는 진동원인 궤도구조나, 수진점인 인근의 구조물에서의 대책과 함께 진동전파매개체인 지반에서의 대책이 있다. 지반을 통한 진동의 전파로 인한 피해를 줄이기 위해서는 그 진동원에서 발생하는 파를 억제하는 차진 및 흡진 기술의 개발이 필요하며, 이를 위해 효율적이고 충분한 진동차단효과를 가지는 방진재료 및 공법을 개발하는 것이 매우 중요한 문제이다. 따라서 고속전철 운행시 발생하는 파를 가장 적절히 차단하기 위한 방진재료의 개발을 위하여 재료의 특성을 분석하기 위한 실험적인 연구를 수행하였으며 그 결과를 수치해석을 통하여 검증하였다.

### 2. 철도진동

고속철도에서 발생하는 진동은 열차와 구조물의 동특성 뿐만 아니라 열차의 속도, 전파경로 및 선로상태 등 여러 가지 원인에 의해 영향을 받고 열차와 선로 또는 선로구조와의 상호작용에 따라서도 크게 달라지므로 이러한 사항들을 모두 고려한 해석시스템이 요구된다.

#### 2.1 속도증가의 영향

고속철도에서의 발생하는 지반진동문제는 발생 및 전파메카니즘이 매우 복잡하여 현상을

- |                    |             |
|--------------------|-------------|
| 1) 한국철도기술연구원 책임연구원 | 4) 연세대학교 교수 |
| 2) 한국철도기술연구원 주임연구원 | 5) 수원대학교 교수 |
| 3) 남호건설기술연구소 주임연구원 | 6) 중앙대학교 교수 |

규명한다는 것은 매우 어렵다. 우선 주행속도가 200km/h 이상으로서 속도증가에 따른 진동치는 상대적으로 크게 증가하게 된다고 예측하였다. 속도증가에 따른 일반적인 진동증가치는 그림 2와 같다. 고속영역에서의 진동레벨은 저역진동의 급격한 속도증가와 중역과 저역의 상대강도에 그 원인이 있다고 말할 수 있다. 또한 이러한 지반진동의 원인은 차량-지반의 각종요인들 중에서 지반측에 주요한 원인이 있다는 것을 나타낸다.

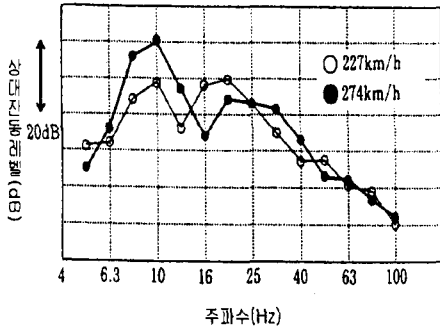


그림 1. 속도향상에 의한 진동증가에

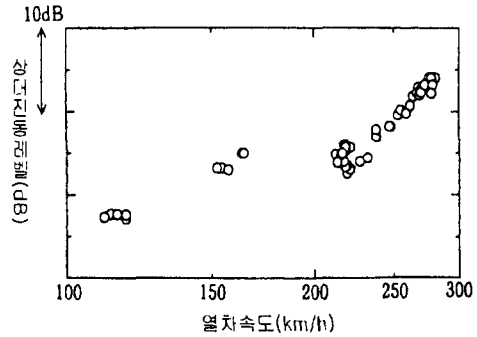


그림 2. 속도증가에 따른 진동레벨의 변화

## 2.2 발생전파경로

열차에 의한 인접지역의 진동은 일반적으로 거리에 따라 감소한다. 감소의 원인으로서는 주로 진동파가 지반을 전파할 때 반사, 굴절되어 진동에너지가 거리에 따라 감소함으로서 인한 기하감쇠와 흙의 내부마찰 등에 의한 내부감쇠로 나누어지는데 진동감쇠의 주원인은 기하감쇠이다. 수평방향의 진동속도파형은 연약한 지반에서는 장주기의 진동이 탁월하고 견고한 지반에서는 단주기의 경우가 주목된다. 따라서 연약한 지반에서는 변위가 크고 견고한 지반에서는 가속도가 크게 되는 경향이 있다.

토공구조는 크게 두가지로 돌기부와 깎기부로 구분할 수 있다. 일반적으로 이 두가지 형식은 지반층의 두께, 지하수위, 보강공법의 적용 등이 다르게 된다. 돌기부의 경우, 성토재로서 다른 성질의 흙이 사용되고 절토부의 경우, 절토부의 원지반이 토사지반인지, 암반인지에 따라 그 진동전파의 성질은 매우 크게 달라진다. 또한 고속철도에서는 강화노반을 채택하고 있으며 절성토부에서의 차이에 의해서도 가진원에서 전파된 진동의 형상에 많은 영향을 미칠것으로 예상되며 진동해석시 충분히 고려되어야 한다.

## 2.3 주파수 특성

진동특성의 해석에는 대상진동의 주파수를 검사하는 것이 중요하다. 고려대상에서는 그림 3.의 주요 진동스펙트럼이 알려지고 있다. 일반적으로 유효주파수는 100Hz이하이며 열차속도 200km/h전후에서의 탁월피크치는 저주파수가 우세한 경우가 많다. 이러한 실태에서 방진대책으로서서는 보통의 조건하에서 저역부근의 방진을 목표로 하는 것이 필요하다.

진동은 궤도·구조물·지반간에 전파하는 동안 탁월주파수의 급격한 저하가 발생되지만 이것은 고주파진동의 진폭이 감쇄하는 것이며 주파수자체가 감소하는 것은 아니다. 즉, 진원 근처에서는 100Hz 근처의 진동이 우세함으로 이것을 저감하여도 20Hz의 진동에는 관계가 없으며 오히려 100Hz근처의 진동은 대부분은 자연감쇠를 하게되어 지반에는 거의 전해지지

않는다. 지반진동의 저감은 무엇보다도 20Hz이하의 저역의 진동을 저감하는데 비중을 두어야 한다.

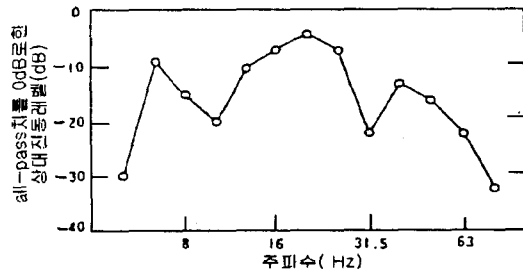


그림 3. 진동레벨의 1/3옥타브스펙트럼(구조물중심에서 12m지점, 라멘고가교)

### 3. 지반진동의 해석

본 장에서 다룬 내용은 진동원과 전파경로에서의 현상으로, 궤도에서 발생한 진동이 노반 구조와 지반을 통해 퍼져나가는 진동전파의 해석이며, 발생된 진동이 강화노반에 의한 흡진과 방진벽에 의한 차진 기능을 해석하였다. 이러한 열차진동의 전파문제를 연구하기 위한 접근 방법은 여러 가지가 있으나, 본 연구에서처럼 노반에서의 진동전파와 원지반에서의 진동전파를 분리한 연구가 주로 수행되고 있다. 이는 발생진동을 보다 정확히 파악하기 위한 것으로, 발생진동의 동적 특성에 미치는 주요 영향인자들을 정확히 구하기 위함이다.

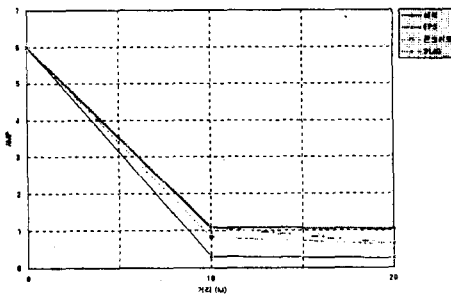


그림 4. Moving load에 따른 강화노반 재료의 거리별 진동흡진 효과

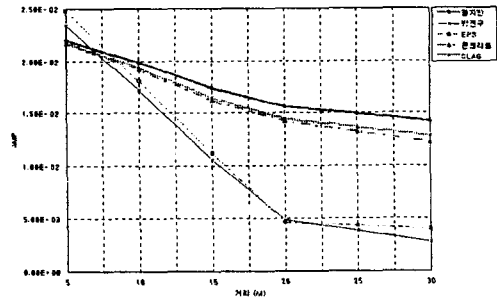


그림 5. 채움재 종류에 따른 진동 차단 효과 비교

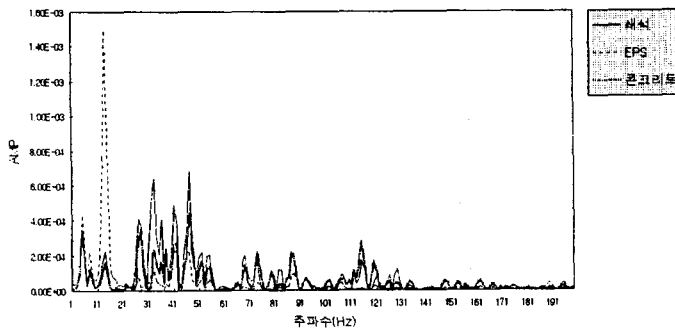


그림 6. Moving load에서의 주파수분석결과(쇠석, EPS, 콘크리트)

그림 4.에 의하면 재료별 흡진효과는 주파수에 따라 약간의 차이를 보인다. 또한 이동하중이 작용할 때, 노반 직하에서의 강화노반 재료별 처짐크기를 보면EPS의 경우, 쇠석층에 비해 두배 이상의 처짐을 나타내어 진동흡진 효과를 위한 검토시, 안전운행을 위한 처짐의 고려하여야 함을 알 수 있다.

#### 4. 방진재료의 선정 및 역학특성 분석

##### 4.1 차진재료의 특성 분석

폐고무를 재활용한 재료를 이용하여 지반진동 차진재료개발을 위해 국내에서 생산된 패드 형태의 시편에 대한 정적 및 동적 물성시험을 수행하여 재료의 정탄성계수, 동탄성계수 및 손실계수를 구하였다. 2차년도에는 자체에서 개발한 폐고무를 재활용한 재료를 이용하여 방진벽 채움재로 적합한 형상설계 및 제작을 추진중에 있으며, 제작된 제품에 대한 물성 및 현장시험을 수행할 예정이다.

표 1. 시편의 단위면적당 정탄성계수

시편	1	2	3	4	5	6	7	8	9
결과									
단위면적당 정탄성계수 ( $10^6\text{N/m}^2$ )	8.9	20.3	7.3	6.9	4.9	5.2	4.6	7.0	2.8

단위면적당 동탄성계수 및 손실계수의 산정은 시편위에 하중판(22.5kg)을 놓고 가속도센서를 설치한 후 Impact Hammer를 사용하여 하중판에 충격하중을 작용시킨다. 충격하중은 신호분석기(Dual Signal Analyzer)의 채널1로 입력되며, 하중판에서 발생한 진동은 가속도센서를 이용하여 측정된 다음 신호분석기의 채널 2에 입력하였다. 채널 1과 채널 2에 입력된 신호간에 계산된 주파수응답함수(Frequency Response Function)를 모드해석프로그램인 SMS Modal Analysis Software를 이용하여 시편의 동탄성계수 및 손실계수를 구하였다. 그림 7.에 동탄성계수 및 손실계수를 구하기 위한 측정/분석시스템을 나타내었다. 시편에 대한 단위면적당의 동탄성계수 및 손실계수는 다음 표 2.에 나타내었다

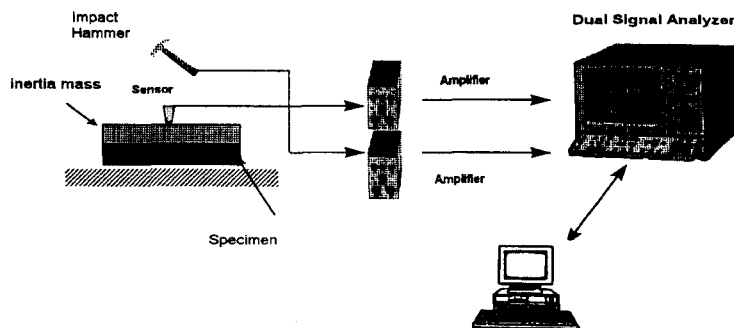


그림 7. 차진재료의 동적 특성치에 대한 측정/분석시스템

표 2. 단위면적당 동탄성계수 및 손실계수

시편	단위면적당 동탄성계수 ( $10^6 \text{ N/m}^2$ )	손실계수 ( $\eta$ )	주파수 (Hz)
1	13.9	0.29	37.3
2	57.7	0.27	75.9
3	17.6	0.31	41.7
4	20.9	0.26	45.7
5	12.5	0.21	35.5
6	36.6	0.45	59.4
7	21.6	0.44	45.2
8	14.2	0.44	36.9
9	13.1	0.38	35.8

#### 4.2 흡진재료의 특성 분석

잠재수경성을 가지고 있는 수재슬래그에 시멘트 및 혼화재를 첨가하여 공학적으로 요구되는 소정의 강도, 투수성 및 내구성을 가진 투수강화노반재료의 개발을 목적으로 하였다. 혼합물에 대한 수화특성 분석 및 실험계획법에 의한 실험을 통하여 이론적인 혼합물의 추정식을 도출한 후 이를 바탕으로 각 재료의 배합비를 변화시키면서 투수시험, 일축압축시험, 동결융해시험 및 주사현미경관찰을 수행하여 개발목적에 부합되는 투수강화노반재료의 최적의 배합비 및 배합조건을 산정하였다.

##### (1) 수재슬래그의 정적 특성분석

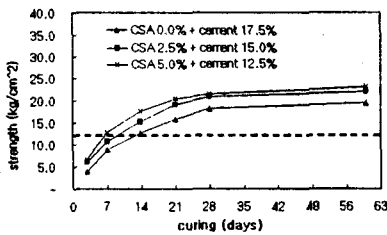


그림 8. 압축강도 변화

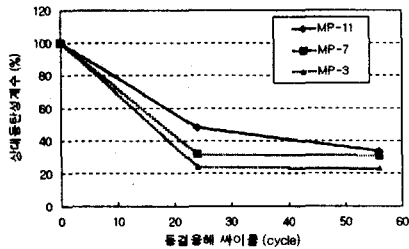


그림 9. 상대동탄성계수값의 변화

##### (2) 추정식의 산정

이 실험결과를 종합하면 흡진강화노반재의 개발을 위해서는 다짐을 실시하지 않은 상태의 재료에 대해서 기준강도를 만족시키는 적절한 배합비를 산출하여야 한다. 이를 위하여 다음과 같이 비다짐 경우의 일축압축시험결과를 이용하여 최소제곱법에 의해 2차 모형을 적합화시켜 추정식을 구하였다.

$$\text{강도}(\hat{y}) = 137x_1 + 27057x_2 + 33010x_3 - 30133x_1x_2 - 34933x_1x_3 - 32267x_2x_3$$

x1=수재슬래그의 배합비    x2=포틀랜드시멘트의 배합비    x3=팽창성시멘트의 배합비

##### (3) 수재슬래그의 동적 특성분석

점탄성재료의 동특성치를 구하는 방법에는 크게 크리프(creep) 측정법, 비틀림 진자를 이

용하는 방법, 공진법, 비공진법 및 파동의 전파를 이용하는 방법 등이 있다.

본 연구의 대상이 되는 고속철도 주행시 발생하는 진동의 흡진에 이용되는 주파수 범위는 100 Hz 이하의 저주파수 범위이다. 따라서 본 연구에서는 비공진법중 저주파수 대역에서 재료의 물성치를 추출하는 방법인 임피던스법을 이용하여 흡진재료의 동특성을 파악하였다. 실험결과와의 비교 검증 및 상호 보완을 위하여 고주파수 대역에서 재료의 물성치를 추출하는 방법인 자유단-자유단 공진주 실험을 병행하여 수행하였다. 공진주 실험은 봉의 파전달 이론을 기초로 하여 파속도와 시편의 밀도 및 주파수 응답곡선의 폭을 이용하여 탄성계수와 감쇠비를 산정하는 방법이다.

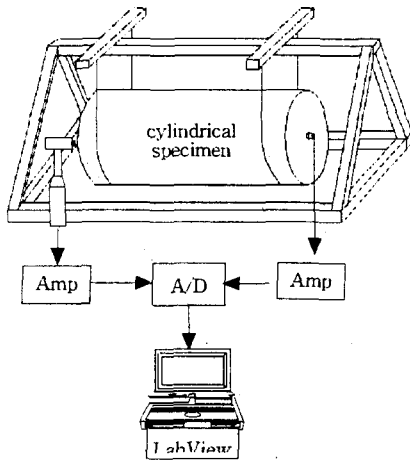


그림 10. 자유단-자유단 공진주법에 의한 실험장치 개요도

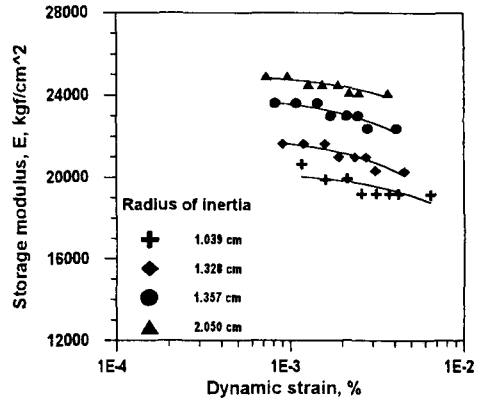


그림 11. 동적변형률에 따른 탄성계수의 변화

그림 11.은 임의의 동적변형률 수준에서 공진주파수와 탄성계수의 관계를 나타낸 것이다. 일반적으로 공진주파수가 커짐에 따라 탄성계수가 완만하게 증가함을 나타내고 있다. 그림에 나타낸 회귀분석 곡선의 기울기는 실제의 경향보다 실험상의 오차와 시편수의 부족으로 인하여 상당히 크게 산정되었다고 판단된다.

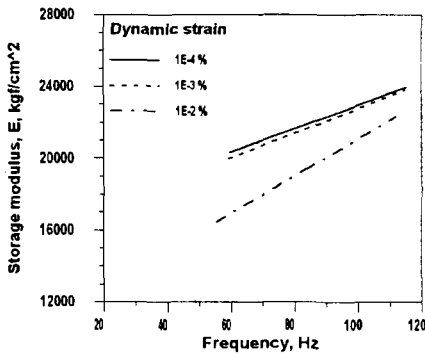


그림 12. 공진주파수에 따른 탄성계수의 변화

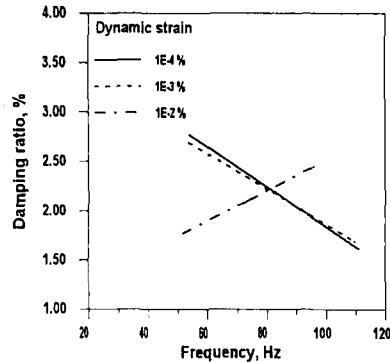


그림 13. 공진주파수에 따른 감쇠비의 변화

그림 13.은 전체 실험결과 중, 임의의 동적변형률 수준에서 공진 주파수와 감쇠비의 관계

의 전형적인 일례이다. 본 연구에서는 지반에서 행해지는 진동차단 대책 중 가장 경제적이  
 며 시공 가능한 대책을 개발하기 위하여 흡진재료의 동적특성을 진동실험을 통하여 규명하  
 였다. 본 연구를 통해 얻어진 수재슬래그 혼합재료의 탄성계수와 감쇠비에 대한 실험결과  
 는 표 3.과 같다.

표 3. 자유단-자유단 공진주법과 임피던스법에 의해 산정된 탄성계수와 감쇠비의 범위

시편	탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )	공진주법의 탄성계수	감쇠비 (%)	공진주법의 감쇠비
No. 1	-	19369	-	1.65
No. 2	14000~16000	22715	2.1~2.8	1.81
No. 3	21000~24000	28025	1.7~3.0	1.02
No. 4	17000~19000	31753	1.9~2.4	1.05
No. 5	15500~17000	17357	1.9~2.5	1.24
No. 6	17500~20000	20117	1.5~2.4	1.26
No. 7	18000~23500	24706	1.5~2.9	1.14
No. 8	19000~25000	25393	1.6~3.2	1.32
No. 9	13000~16000	15870	1.5~2.5	1.45
No. 10	18000~19500	20684	1.6~3.1	1.30
No. 11	16000~20000	22102	2.0~3.4	1.30
No. 12	19000~23000	22262	1.8~2.8	1.25
평균	-	-	2.3	1.32

### 5. 결론 및 향후추진방향

고속전철의 주행으로 발생하는 지반진동을 저감하기 위한 기술개발을 위하여 현재까지 방  
 진재료로서 개발에 사용 가능한 수재슬래그와 합성페타이어재료에 대한 전반적인 이론 및  
 특성을 조사, 정리하였고 재료의 정·동적물성시험을 실시하였다. 또한 이러한 방진재료의  
 효과를 검증하기 위한 수치해석을 실시하였으며 1단계 1차년도 연구종합 결론은 다음과  
 같다.

(1) 차진재료에 대한 성능 평가를 위한 실험장치 및 실험기법을 확립하고 폐고무 재료를  
 재활용한 9 종류의 차진재료 시편에 대한 실험을 수행하였다. 시편의 물성치는 공진주파수  
 35~76 Hz에서 단위 면적당 동적탄성계수는  $13\sim 58 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup>, 손실계수는 0.21~0.45 의 값을  
 보였다.

(2) 시편의 감쇠비는 일반 방진고무의 손실계수보다 약 2배정도 큰 값을 보였으며, 동적  
 탄성계수는 2배정도 작은 값을 보였다. 이들 물성값의 조절은 분쇄고무 입자의 형상 및 성  
 형압축시의 공극비를 조절함으로써 얻을 수 있으며, 이에 대한 실험이 요구된다.

(3) 차진재의 주파수 및 변형률의 변화에 따른 시편의 물성치에 대한 산정을 위해 시편의  
 형상을 재설계할 필요성이 있다.

(4) 수재슬래그는 재령이 7일, 28일, 90일로 늘어남에 따라 활성도가 0.7, 0.78, 0.82로 각  
 증가하는 것을 보아 장기적으로 계속 수화가 진행되는 것을 알 수 있으며, 활성도 값으로  
 보아 경화성 재료로 사용하는데 문제가 없을 것으로 보인다.

(5) 일정한 동적변형률( $10^{-3}$  %)과 공진주파수 대역(2000 Hz 부근)을 갖는 자유단-자유단  
 공진주법의 평균적인 탄성계수 범위는 20000 kgf/cm<sup>2</sup>~25000 kgf/cm<sup>2</sup>, 감쇠비 범위는 1.2  
 %~1.6 %로 산정되었다.

(6) 동적변형을  $10^{-4} \% \sim 10^{-2} \%$  범위와 공진주파수 대역 130 Hz 이하일 때 임피던스법으로 산정된 평균적인 탄성계수 범위는  $15000 \text{ kgf/cm}^2 \sim 20000 \text{ kgf/cm}^2$ , 감쇠비 범위는 2.0 % ~ 3.0 %로 나타났다.

(7) 본 시료의 첨가제 함유량 증가에 따른 탄성계수 변화는 전체적으로 증가하는 경향성을 보이고, 감쇠비는 분석 가능한 뚜렷한 경향성을 나타내지 않았다.

현재 고속주행시 유발되는 진동의 크기를 예측할 수 있는 예측기법 및 해석기술개발과 방진재료의 정·동적 특성에 관한 연구를 시행할 계획이다. 현장에서의 적용성, 방진효과의 검토 및 열차의 주행하중을 고려할 수 있는 해석프로그램을 개발할 계획이다. 또한 고속철도 노반을 강화할 수 있는 요소기술을 개발을 위한 재료의 공학적 특성분석, 노반의 응력해석, 지지력특성 파악 등을 조사할 계획이며 노반보강재로서의 Geocell, Geotextile 및 수재슬래그를 이용한 강화노반의 개발 등을 연구할 계획이다.

## 6. 감사의 글

본 논문은 건설교통부와 통상산업부 및 과학기술처가 시행한 선도기술개발사업인 “고속전철 토공 및 지반진동저감기술개발”과제의 일부에 의해서 작성되었으며 연구비의 지원에 감사의 뜻을 표한다.

### 참고문헌

- 1.Kimitoshi Ashiya外(1994) “高速走行時の地盤振動評價法”, RTRI Report Vol.8 No.6
- 2.Osamu Yoshioka外(1989) “軸重,軸配置が地盤振動に寄せる影響”, RTRI Report Vol.3 No.8
- 3.Osamu Yoshioka外(1994) “新幹線高速化のための地盤振動低減技術”,JREAVol.37 No.7
- 4.Osamu Yoshioka(1996) “新幹線活線の地盤振動の防止対策“, 土の基礎 44-9
- 5.C.J.C.Jones(1994) “Use of numerical models to determine the effectiveness of anti-vibration systems for railway”, Proc.Instn Civ. Engrs Transp.,Feb.,43- 51