

# 建築物에 影響을 미치는 列車荷重에 대한 防振工事に 관한 研究

## A Study on the Construction Work to Reduce Vibration Effect to the Structure

김 상 용\*      윤 지 언\*\*      박 태 하\*\*\*      강 경 인\*\*\*\*  
 Kim, Sang-Yong      Yoon, Jie-Eon      Park, Tae-Ha      Kang, Kyung-In

### Abstract

Recently, the expansion of social infrastructures and urban redevelopment, the construction works have been a rapidly increase. The subway's noise and vibration are on a continuously increasing status in its importance as by the industrial and cultural development process. Nevertheless, in our country, adequate alternative idea for the construction noise and vibration are not yet established. In this point, the purpose of this study is to know the vibration effect to the structure. This study was used to determine the standard of vibration and the way of losing vibration. The case of construction site is a good example. The data of this study was obtained by a construction company in Korea. Vibration effect could cause structural problems and affect human mental state. The results of this study are as follows; check the vibrating point, determine the suitable limit of vibration, make a good plan and construction.

키워드 : 건설진동, 철도진동, 열차하중

Keywords : Construction Vibration, Railway Vibration, Subway Load

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적

최근 사회기반 시설의 확충 및 도심지 재개발, 물류 수송 수단의 확장 등으로 인하여 아파트, 초고층건물, 지하철, 고속철도 등과 같은 대규모 토목 및 건설공사가 급증하고 있는 실정이다. 그러나 이러한 순기능에도 불구하고 대형 건설장비의 사용 등으로 인하여 최근 심각한 철도소음 및 진동공해가 유발되었다. 또한 지하철은 대중교통수단으로서 사회적 공익성 및 경제적 장점을 지니는 반면 시공 및 운행과정에서의 각종 소음 및 진동의 발생으로 주위 건축물뿐만 아니라 인근 지역 주민들에게 많은 피해를 미치고 있다.

이러한 심각성에 기인해 최근 환경 문제의 중요성이 부각되면서 건축물의 소음 및 진동 등의 공해요소가 인간의 주거 환경에 미치는 영향에 대한 인식이 변하고 있다. 따라서 건축 구조물의 안정성뿐만 아니라 소음과 진동에 대한 사용성이 건축물의 질을 평가하는 주요 요인이 되었다. 이에 따라 지진이나 풍하중에 의해 발생하는 횡방향 진동에 대한 사용성을 향상시키려는 노력이 다각적으로 이루어지고 있다. 또한 교통수단이 야기하는 수직방향의 진동에 대해서도 인접건물에서 발생하는 소음 및 진동에 대한 평가와 대책이 연구되어 왔다.

소음과 진동의 문제는 건물의 효율적인 사용과 거주환경의 개선, 컴퓨터와 같은 정밀 유틸리티(utility)에 치명적인 영향

을 미치기 때문에 이러한 문제를 야기하는 소지를 애초에 제거하는 것이 바람직하다. 이러한 차원에서 지하철 박스 상부와 인접한 위치에 설치되는 건물의 지하철에 의한 소음·진동의 영향성을 초기 설계단계에서 검토 및 평가하고 이에 대한 대책을 강구하는 것이 바람직하다. 즉, 지하철의 운행으로 인하여 인접건물에 유발되는 진동을 효율적으로 저감시키기 위하여 복합적으로 진동저감 대책을 고려하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 실효성 및 경제성을 고려한 방진공사의 일반적 사항과 국내 건설사가 시공한 현장의 결과를 바탕으로 방진공사의 실효성에 대해 알아보도록 한다. 또한, 이러한 연구 결과는 향후 지하철 및 기타 진동피해 발생시 효율적인 안전대책마련을 위한 지침서로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

### 1.2 연구의 방법 및 절차

본 연구는 실효성 및 경제성을 고려한 방진공사의 일반적 사항을 바탕으로 방진공사의 실효성에 대해 알아보는 것을 연구의 주 목적으로 한다.

사례적용에 사용할 사례는 국내 건설업체가 시공한 현장을 바탕으로 그 결과를 평가한다.

연구의 흐름은 그림1과 같이 기존연구와 관련된 문헌들을 고찰하고 또한 지하철에 의해 유발되는 진동의 특성과 유발되는 피해 및 기준을 소개한다. 그리고 이를 효과적으로 차단할 수 있는 조치들에 대해 분석하고, 그 중에서 국내 시공현장에서 적용한 방진공사 내용을 알아본다.

\* 고려대학교 대학원 석사 과정

\*\* 고려대학교 대학원 박사 과정수료

\*\*\* 삼성 중공업

\*\*\*\* 고려대학교 건축공학과 교수, 공학박사

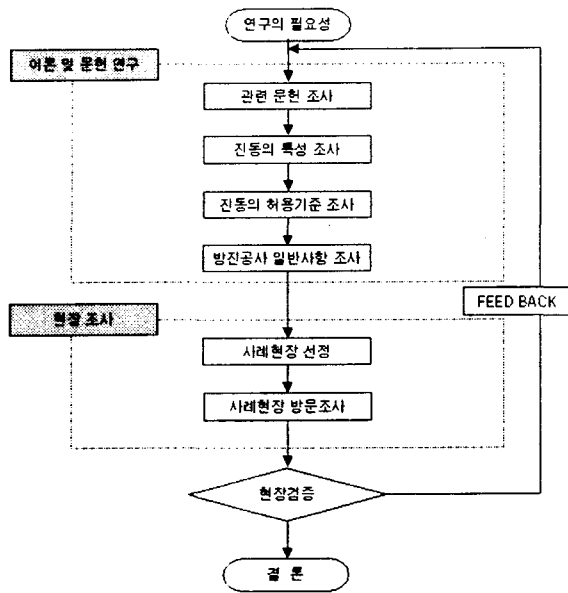


그림 1. 연구의 흐름도

### 1.3 기존연구 고찰

열차 및 건설현장에서 발생하는 소음 및 진동에 관하여 그동안 많은 연구들이 수행되어져왔다.

김병주(1998)는 연구는 건설현장 직원들을 중심으로 건설현장에서 발생하기 위한 건설진동의 실태 및 영향을 설문조사를 통해 파악해 건설진동에 관한 세부적인 기준을 설정하였으며, 광광수(2001)의 연구에서는 철도구간에 따른 지반진동 및 감쇠특성을 파악하였다. 또한 고광필(2002)은 철도소음에 노출되어 있는 주민들을 대상으로 조사·분석하여 현 실정에 적합한 철도소음 기준을 제시하였다. 이성수(2002)의 연구에서는 방진시스템을 구성하는 방진슬래브의 두께, 레일패드와 방진패드의 물성 변화에 따라 철도진동의 변화를 분석하여 효율적인 설계방향을 제시하였다.

기존의 연구들은 소음 및 진동에 관한 효율적인 기준을 제시하여 대책마련을 위한 기초적인 자료로 활용될 수 있다는 점에서 연구의 의의가 있다고 하겠으나, 주로 철도 및 기타 인접 주민들을 대상으로 하였기 때문에 도심지내 지하철연구와는 상이한 결과를 나타낼 것으로 사료된다. 따라서 본 연구는 그동안 많은 연구가 이루어지지 않았던 지하철 진동을 대상으로 하며, 실제 시공 현장의 결과적 특성을 바탕으로 한 방진공사의 실효성에 관하여 알아본다.

## 2. 진동 저감에 대한 이론적 배경

### 2.1 진동의 특성

진동이란 어떤 양의 크기가 시간이 경과함에 따라 어떤 기준의 값보다 커지거나 작아져서 주기적으로 변하는 현상을 말한다. 따라서 물체가 정위치에서 상·하 또는 전·후 등으로

반복하여 움직이면 이를 진동이라 한다. 열차가 주행하면 차륜과 레일의 상호작용에 의해 수평방향 및 수직방향의 동적 하중이 발생된다. 이 하중은 차륜과 접촉하는 지점의 레일 최상부에서 작용하기 시작하여 진동파를 발생시키며 인접한 모질을 통하여 다른 곳으로 전파된다. 일정한 속도로 주행하는 열차에 대해서는 하중의 수직성분이 지배적이며 이를 철도진동이라 한다.

특히 열차가 주행하면 차륜과 레일의 상호작용에 의해 수평방향 및 수직방향의 동적 하중이 발생된다. 이 하중은 진동파를 발생시키며 인접한 모질을 통하여 다른 곳으로 전파된다. 이렇게 발생된 진동과 전파를 구성하는 각각의 부재들이 공진하여 구조물에 손상을 입힐 수 있다. 또한, 사람에게 불안감, 불편감 등을 유발하여 생활에 막대한 피해를 줄 뿐만 아니라 주변에 설치된 정밀 장비 및 센서 등의 오작동을 유발하여 예상치 못한 피해가 발생할 수 있다.

### 2.2 진동의 단위

진동의 크기를 나타내는데 사용되는 단위인 변위(cm), 속도(cm/sec), 가속도(cm/sec<sup>2</sup>) 등의 단위는 시간의 변화에 따른 값이므로 진동 그 자체를 평가하는 데는 사용될 수 있으나, 진동에 영향을 받는 인간의 입장에서는 비고기준으로서의 가치가 없다. 그 이유는 인간의 감각이 진동의 대수척도에 따라 대응하기 때문이다. 그래서 음향분야에서는 일찍부터 대수척도인 dB(Decibel)이 사용되어 왔고, 공해진동의 분야에서도 최근 dB의 사용이 공식화되고 있다.

### 2.3 진동기준

ISO(International Standards Organization)에서는 진동에 대한 노출 기준을 ISO 2631에 규정하고 있다. 이 규정은 진동수 1~80Hz의 범위에서 주기적 또는 일시적인 진동이 인체에 미치는 영향은 안락·감퇴경계, 피로·능률감퇴 경계, 노출한계로 나누고 있으며 다음과 같다.

#### 1) 안락·감퇴경계(reduced comfort boundary)

식사나 독서 같은 활동 시 견딜 수 있는 소란(불안)에 대한 한계.

#### 2) 피로·능률감퇴 경계

(fatigue decreased proficiency boundary)

현저한 능률저하와 함께 피로를 유발하는 반복적인 진동에 대한 한계이며 안락·감퇴경계의 3.15배 정도.

#### 3) 노출한계(exposure limits)

인체의 건강과 안전에 대한 최대진동을 나타내며 안락·감퇴 경계의 6배 정도.

### 2.4 지하철 소음, 진동의 특성

진동 문제는 직접적인 건물의 피해뿐만 아니라 2차적인 소음 문제를 야기 시키는 고체음(groundborne noise)의 원인이 되고 있기 때문에 이에 대한 현상 파악과 예측 및 방지 기술의 확보는 민원을 최소화하고 경제적인 효과를 극대화 할 수 있다.

객차에서의 저소음, 저진동을 위한 방진 및 내진설계는 객차의 안정성 뿐 아니라 궤도를 통한 진동 전파의 특성과도 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 진동원, 전달 경로, 수신점에 대한 총체적인 진동제어를 위한 절차를 확보할 필요가 있다. 특히, 철도진동은 궤도와 구조물의 응답이 진동원에 영향을 주는 대표적인 역학적 불안정성 문제를 다루는 것이기 때문에 진동원과 구조의 상호 관계가 포함되는 절차서가 필요하다.

### 3. 건물 진동 허용 기준치

#### 3.1 건물 및 용도별 진동허용 규제치

지하철 진동하중에 의한 수신구조물의 손상을 고려한 허용진동기준은 구조적으로 진동에 매우 취약한 건물(낮은 가속도)이나, 문화재같이 장기적인 진동피로 효과를 감안하여 극단적인 진동피해 방지를 고려해야하는 경우가 아니라면 별도의 허용진동 기준을 적용하지 않는 것이 보통이다.

그러나 이러한 범위 내에 주거시설이 있을 경우 인접한 주민들에게 많은 영향을 미칠 것으로 사료된다. 그리고 국내의 경우 진동이 구조물에 미치는 영향에 대한 통상허용기준은 구체적인 규제조항이 아직 규정되어 있지 않은 상태이므로 일반적으로 서울시 지하철공사 및 주택공사에서 통상 원용하고 있는 발파 진동 시 진동기준을 대상으로 한다(곽광수, 2001). 특히 현대적인 설계, 시공기법으로 축조된 건물의 경우 철도진동에 의한 구조적 손상피해 발생 가능성은 극히 희박하다고 볼 수 있다.

표 1. 국내 지하철공사(서울, 부산) 및 주택공사등에서의 원용기준

건물형태	문화재, 컴퓨터 시설물 주변	주택, 아파트	상가	R.C건물 및 공장
허용속도치 (cm/sec)	0.2	0.5	1.0	1.0~4.0

· 환경분쟁조정위원회 조정사례에서는 주택-건물을 0.3cm/sec로 조정한 사례도 있다.

#### 3.2 소음 및 진동허용 규제치의 결정 및 평가

지하철의 소음문제는 그림 2와 같은 3가지 관점에서 분석할 수 있다.

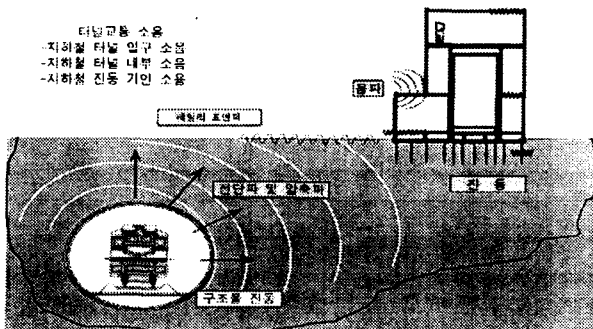


그림 2. 지하철의 소음 및 진동의 전파

지하철의 경우 소음원인 지하철의 궤도부분에서 100dB이상의 소음이 발생하더라도 역사 내개층을 경유하여 출입구로 전달되기 때문에 개구부의 소음이 문제가 되는 경우는 거의 없다.

인용된 현장과 같은 구조에서는 지하철의 공기음은 문제가 되지 않으며, 단지 지하철 운행시 구조물과 지반을 통한 구조음이 문제가 된다. 이런 구조음은 전적으로 진동으로 전달되기 때문에 건물의 구조와 지반의 특성에 의하여 방사소음이 결정된다. 즉, 진동의 설계기준치를 초과하더라도 소음 문제는 발생하지 않을 수 있다는 것을 의미하고 있다.

#### 3.3 진동허용 규제치 결정 및 평가

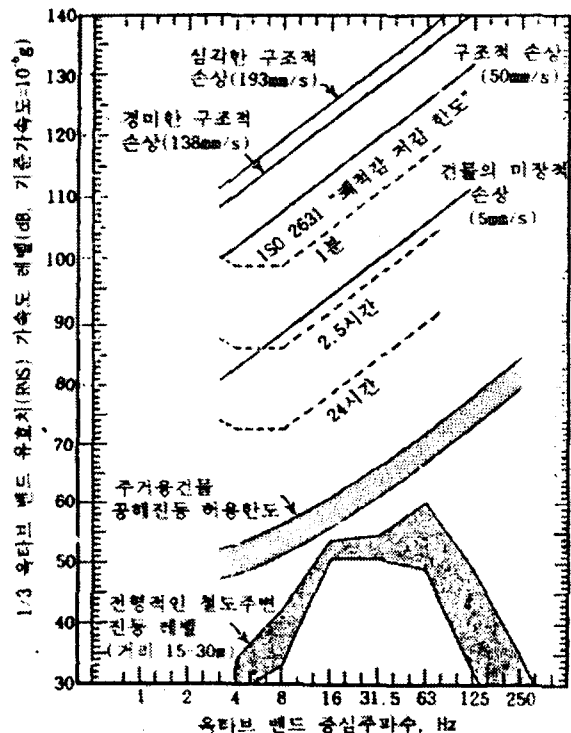


그림 3. 철도주변 진동의 주파수 분포 특성과 각종 허용진동기준

건물에서 발생하는 진동은 건물 구조물 자체의 손상을 야기시키지 않아야 할 뿐 아니라 각 건물의 용도를 만족시켜야 한다. 예시된 현장의 경우 진동허용 규제치를 인간의 감각으로 느낄 수 없는 0.8gal[peak]이하의 진동상태로 할 경우 건물 손상 기준의 약 1/10에 해당한다. 인간 감각 특성은 주관적이고 정성적이기 때문에 이에 대한 기준이 여러 가지 형태로 제시하고 있다.

어떠한 진동 수준을 선택할 것인가라는 문제는 전적으로 건물 사용자의 요구에 따라 수밖에 없다. 그러나 진동허용 규제치는 건물의 사용용도와 피해 특성에 의하여 결정하는 것이 좋다. 즉, 무조건 진동을 느끼지 못하는 상태를 요구하는 것이 아니라 용도에 적합한 진동 수준을 합리적으로 결정하는 것이 바람직하다.

### 3.4 진동억제를 위한 방법

지하차량에서 발생하는 진동문제는 건물 기초에 직접 또는 지반을 매개체로 전파하여 주변의 건물, 정밀기계류, 인체 등에 영향을 미치는 것이다.

이에 따른 진동대책은 진동원의 특성, 진동에측 및 진동허용 규제치를 통해 진동 저감량을 산정하고, 필요한 진동저감 대책을 마련하게 된다. 진동저감의 기본대책으로는 진동원 자체의 발생을 억제하는 방법(진동원 대책), 진동원의 발생을 제어하기 어려운 경우 수신점에서 진동유입을 차단하는 방법(수신점 대책), 전파경로에서 진동을 차단하는 방법(전파경로 대책) 등으로 분류할 수 있다. 이러한 진동문제의 해결방법 중 어떤 방법을 선택하느냐하는 것은 진동원이나 수신점의 종류, 발생된 진동의 특성, 진동 규제치, 시공성, 경제성 등 여러 가지 요인에 대한 분석을 통해 가장 합리적인 저감방안을 강구해야 한다.

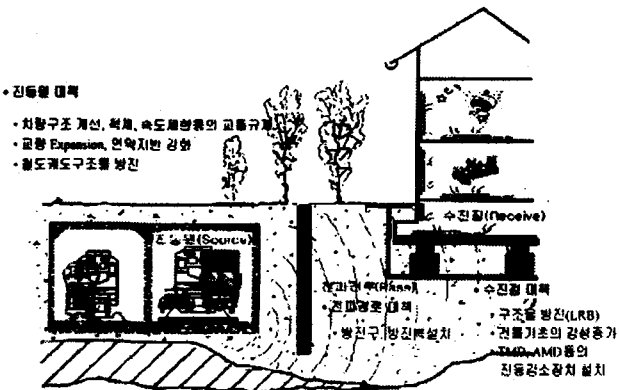


그림 4. 방진대책의 종류

## 4. 방진공사 일반사항

### 4.1 지하철 진동제어 절차

지하철 진동을 제어하기 위한 모든 절차는 진동원·전파경로·수신점으로 분리하여 수행된다.

#### 1) 진동원에 대한 고려

진동원의 특성과 진동문제 사이의 관계성과 효율적인 대책 안에서 진동원이 고려된다. 진동원의 문제점을 확인하기 위해서는 신뢰성 있는 측정데이터와 예측기술이 필요하다.

#### 2) 합리적인 진동허용 규제치 결정

다양한 환경에 적용할 수 있는 진동허용 규제치 데이터의 확보가 필요하다. 합리적이고 경제적인 방진대책과 평가를 위한 기본 데이터가 되지 않기 때문에 명확한 정리가 필요하다.

#### 3) 진동허용 규제치를 성취하기 위한 진동대책 설계

대책가능성과 경제성이 가장 필요한 부분이다. 다양한 내진 및 방진기술과 방진시스템, 방진소자의 평가 기술이 요구된다.

## 5. 사례분석

### 5.1 진동의 해석결과

표2, 그림5와 같은 진동의 해석결과 예시된 건물은 진동허용치를 과도하게 넘는 것으로 나타났다.

### 5.2 궤도 방진후의 진동에측

본 건물에서는 지하철 방진공사와 같이 열차의 주행에 의해 발생하는 진동이 외부로 전달(열차 바퀴→궤도→지하철 구조물→지반→진동대책 건물)되는 것을 절연하기 위해서는 진동원·전파경로·수신점 각각에서의 대책을 고려해야 한다.

표 2. 최초 진동해석결과

건물명	측정 가속도, gal(dB)	허용 규제치
인접한 건물	9.28(79.4)	1gal(cm/s <sup>2</sup> )
예시된 현장	7.39(77.4)	

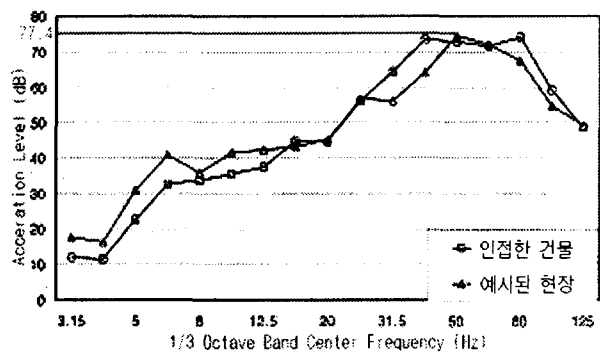


그림 5. 최초 진동해석결과

그중 예시된 현장에서 수행한 방진공사는 수신점 대책인 구조물의 방진이였다. 단계적인 방진 효과를 알아본 후 전체 방진의 효과를 알아보도록 한다.

표 3. 궤도방진후 진동해석 결과

건물명	측정 가속도, gal(dB)	허용 규제치
인접한 건물	3.10(69.4)	1gal(cm/s <sup>2</sup> )
예시된 현장	2.32(67.3)	

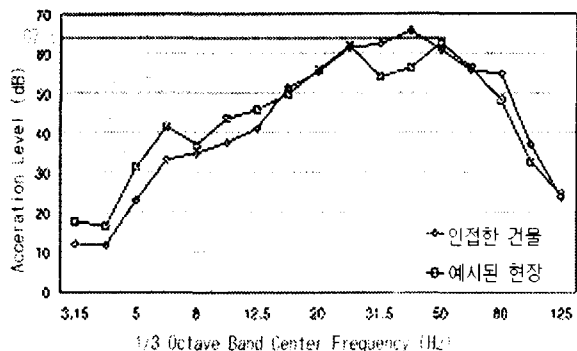


그림 6. 궤도 방진후 진동해석결과

### 5.3 궤도방진 및 전파매체 방진(채움재)후의 진동에측

지반이나 콘크리트 벽 사이의 진동 전달을 차단하기 위해서는 지반과 구조물 사이, 구조물과 구조물 사이를 빈 공간을 두어 진동 전달을 차단하는 것이 바람직하다. 그러나 시공상의 문제나 고체음에 의한 동공부의 잔향에 따른 2차 소음 문제를 야기시킬 수 있으므로, impedance가 작은 재료를 사용하여 동공부를 충전시키는 것이 일반적이다.

#### 1) 진동차단을 위한 차단재료가 갖추어야 할 조건

- ① 파동저항(밀도×전파속도)이 접촉 구조물에 비하여 대단히 작을 것.
- ② 시공이 간편하고 안전성이 있을 것.
- ③ 시공후 품질의 안정성이 보장될 것.
- ④ 재료의 강도가 일정하게 유지될 것.

#### 2) 궤도방진 및 채움재 설치 후 OO현장의 진동에측

표 4. 궤도방진 및 채움재 설치 후 진동해석 결과

진 물 명	측정 가속도, gal(dB)	허용 규제치
예시된 현장	0.80(58.1)	1gal(cm/s <sup>2</sup> )

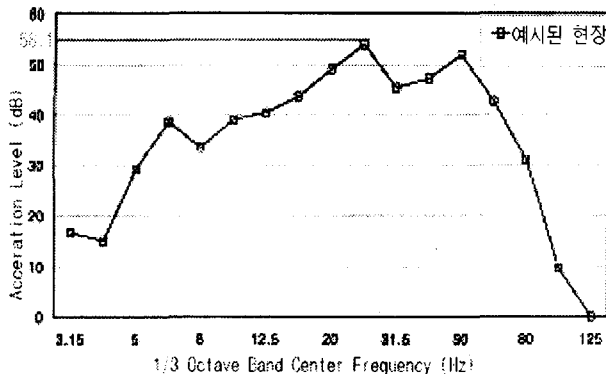


그림 7. 궤도방진 및 채움재 설치 후 진동해석결과

## 6. 사례적용(수진점 탄성받침 공사)

### 6.1 적용범위 및 성능

구조물의 기초하부에 설치되어 상부 구조를 지지하고 소음과 진동이 구조물에 전달되는 것을 흡수 또는 차단하기 위해 적용한다. 또한 그 성능은 구조계산에 의한 설계하중 및 모멘트가 한쪽 구조물로부터 다른 쪽 구조물로 올바르게 전달되도록 하기 위해 탄성변형에 따라 어떤 방향에서의 수평변형이나 축에 대한 회전 변형도 수용할 수 있도록 설계, 제작되었다.

### 6.2 구성자재

#### 1) 고무재료

탄성받침의 제작에 사용되는 탄성중합체는 신생 천연고무

나 합성고무로서 다른 중합체를 5%이상 혼합해서는 안 되며 재료의 물성은 표5에 따른다.

표 5. 방진용 고무재료의 요구성능

항 목	전단 탄성계수의 중량구성비	고무함량
천연고무	9.18kgf/cm <sup>2</sup>	55%이상
합성고무	9.18kgf/cm <sup>2</sup>	55%이상

#### 2) 스티드 볼트

KS B1037에 규정한 것으로서 규격은 도면에 따른다.

#### 3) 보강 강판

탄성받침 내, 외부 보강강판으로 KS D 3501로 제작한 강판을 사용한다.

#### 4) 그라우팅

공장 조합품으로 무수축, 비금속성 그라우트 최소 600kg/cm<sup>2</sup>의 28일 강도를 보유하여야 한다.

## 6.3 제작

- 1) 사용 한계상태에서 탄성받침은 기능에 영향을 미치는 손상이 없어야 하고, 사용기간 중에 유지관리 비용의 부담이 크지 않아야 하며 극한 한계상태에서 탄성받침의 강도와 안정성이 구조물의 극한 설계하중과 변위에 적절하게 견딜 수 있어야 한다.
- 2) 탄성받침은 탄성층의 고무와 강판을 금형을 사용하여 열과 압력을 가해서 제작해야 한다.
- 3) 내부 보강판은 고무와의 접촉을 증대시키기 위하여 강판을 특수표면처리 하여야 한다.
- 4) 부재의 절단은 자동 가스 절단기에 의해 정확히 절단하여야 하며 절단에 의한 열변형은 교정하여야 한다. 내부보강 철판은 변형을 방지하기 위해 레이저 절단기로 가공한다.

## 7. 결 론

신축 건물의 안정성과 쾌적한 연구 및 교육환경을 위해서는 최적의 외적 환경을 구성하여야 한다. 물론, 이러한 외적 환경의 하나가 소음과 진동 문제이다.

소음과 진동의 문제는 건물의 효율적인 사용과 거주환경의 개선, 컴퓨터와 같은 정밀 유틸리티에 치명적인 영향을 미치기 때문에 이러한 문제를 야기하는 소지를 애초에 제거하는 것이 바람직하다. 이러한 차원에서 지하철 박스 상부와 인접한 위치에 설치되는 건물의 지하철에 의한 소음/진동의 영향성을 초기 설계단계에서 검토 및 평가하고 이에 대한 대책을 강구하는 것이 바람직하다.

예시된 현장의 경우 궤도방진과 채움재 시공을 병행하였을 경우 거의 완벽한 수준의 방진효과를 볼 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 수진점 대책만으로도 충분한 성능을 얻을 수 있었기 때문에 기초에 채움재 시공을 하는 방법을 택하였다.

생활수준의 향상에 의한 기대치의 향상과 고속전철 및 지

하철의 확산으로 방진문제는 반드시 고려해야 할 사항이 될 것이다. 앞으로 방진설계 및 시공에 대한 연구가 활발히 이루어져야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 고광필, 김명재, 김선우, 철도소음 기준에 대한 주민반응 연구, 대한건축학회 논문집(계획계), 18(4), p.p. 243-248, 2002.
2. 박광수, 도심에서 발생하는 철도소음진동의 주관적 반응에 대한 연구, 석사학위논문, 원광대학교, 1999.
3. 박광수, 김계수, 도심지를 통과하는 철도진동의 전달특성 및 영향에 관한 연구, 대한건축학회 논문집(계획계), 17(10), p.p. 233-240, 2001.
4. 김문성, 철도진동에 대한 바닥구조의 진동응답 특성 및 방진설계에 의한 진동저감 효과에 관한 연구, 석사학위논문, 연세대학교, 2001.
5. 김병주 외 7인, 건설현장에서 발생하는 건설진동의 영향에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회논문, 18(1), p.p. 1063-1068, 1998.
6. 김영찬, 지하철 진동에 의한 구조물의 반응에 관한 연구, 석사학위논문, 고려대학교, 1993.
7. 김정훈, 방진계획에 관한 연구, P 건설, 2003.
8. 김종흠, OO현장 방진공사, P 건설, 2003.
9. 유승도 외 5인, 경부선 철도진동의 특성과 영향범위, 한국소음진동공학회지, 7(4), p.p. 597-604, 1997.
10. 이나영, 구조물을 관통하는 열차하중에 대한 플로팅 슬래브의 방진효과에 관한 연구, 석사학위논문, 연세대학교, 2001.
11. 이성수, 정병주, 황민영, 방진슬래브의 구성요소에 따른 철도진동의 저감효과, 대한건축학회 논문집(구조계), 18(9), p.p. 69-76, 2002.
12. 전호민, 철도 인접구조물의 진동에측모형에 관한 연구, 박사학위논문, 연세대학교, 1997.
13. 정대업 외 3인, 지하철 옥외통과구간 주변거주지역의 음환경에 관한 연구, 대한건축학회 논문집(계획계), 18(6), p.p. 135-142, 2002.
14. 정선호, 최형일, 철도 주변에 위치한 주거지역의 진동에 관한 연구, 한국소음진동공학회지, 7(1), p.p. 117-125, 1997.
15. 홍갑표 외 3인, 콘크리트 구조물에서 이중상 구조의 탄성지지에 따른 수직진동의 방진효과에 관한 연구, 대한건축학회 논문집(구조계), 13(7), p.p. 175-184, 1997.