

유럽에서의 진동문제 평가방법 및 철도시설의 진동매핑



서사범

(주)서현기술단 부사장
공학박사·철도기술사
T.010.6219.1369
suh7484@hanmail.net

I. 머리말

철도는 음·진동과 불가분의 관계가 있으므로 소음이나 불쾌한 진동 등이 골칫거리로 되는 경우가 많다. 따라서 이들을 저감하는 연구는 물론이고, 역으로 음과 진동을 여러 가지 예측이나 측정수단으로서 이용하는 연구나 에너지 변환에 활용하는 연구도 이루어지고 있다.

유럽연합(EU)의 환경소음 지령(Environmental Noise Directive) 2002/49/EC (END)는 EU 회원국들(member states)에게 공통의 평가방법을 사용하여 집합체(agglomeration), 도로, 철도 및 공항에 대한 소음매핑(noise mapping)을 통해 환경소음에 대한 노출을 밝히도록 요구하고 있다. 이들의 매핑은 일반인이 이용할 수 있도록 만들어질 것이며, 특히 노출레벨이 해로운 영향을 야기할 수 있는 곳에서 환경소음을 방지하거나 줄이기 위한 조치계획(action plans)을 채택할 수 있게 할 것이다.

그러나 END는 철도시설이 일으키는 진동의 영향을 어떻게 평가하고 어떻게 줄이는가를 설정하지는 않고 있다. 또한, 이 지령 범위 내에서는 철도유발 진동에 대한 주민 노출의 평가나 영향평가의 일반적인 방법도 규정되지 않고 있다.

본고에서는 음과 진동의 상호관계를 설명하고, 유럽의 각국에서 적용하고 있는 진동문제의 평가방법을 소개한 후에, 진동의 입력데이터, 진동불쾌 평가, 정량화 및 조치 계획에 대한 논의를 포함하여 철도시설에 대한 전략적 진동매핑의 개념을 소개한다.

II. 음과 진동의 상호관계

‘음(音)’은 쉽게 말하여 ‘진동’이다. 진동의 발생원은 여러 가지가 있다. 바이올린처럼 현을 문지르거나 인간의 성대에 의한 발성, 북 등을 두드리는 등 다양하다. 이렇게 발생된 진동이 물질에 전해져, 그것이 우리의 귀에 닿아 뇌가 음으로 인식하게 된다. 진동을 전달하는 물질에는 기체, 액체, 고체가 있다. 진동이 발생되면 그에 따라 공기분자가 움직인다. 즉, 기압의 변화로서 공기 중에서 전달된다.

음과 진동은 상기처럼 밀접한 관계가 있으며 물체가 진동함에 따라 음이 발생되고 또한 음이 물체에 전해짐에 따라 진동이 발생된다. 이와 같이 한쪽이 다른 쪽을 여기하여 서로 에너지를 주고받는 것을 ‘연성(連成, coupling)’이라고 한다. 이 연성에는 여러 가지의 정도가 있어 양자의 관계를 조사하는 것은 현상을 파악하기 위하여 불가결하다. 예를 들어, 기계의 저소음화를 고려할 때에 이 연성의 메커니즘을 이해하여두는 것은 대단히 중요하다.

물체의 진동으로 음이 발생하는 것은 물체표면이 진동함에 따라 공기의 입자가 어느 방향으로 속도를 유지하여 운동하고 이것이 조밀파로 되어 공간으로 전해져 ‘음’으로 되기 때문이다. 이와 같이 진동은 음의 원인으로 되는 외란이며, 진동에 의한 공간의 배제체적을 외력으로 볼 수가 있다.

한편, 진동의 원인은 물체에 작용하는 힘이다. 음에 의한 입자의 진동은 압력변화(음압)로 되어 전달되기 때문에 물체표면에는 음압에 의한 가진력이 작용한다. 즉, 음은 진동의 원인으로도 될 수 있는 것이다.

구조물이나 닫힌 음향공간(폐공간)은 각각의 특성으로서 고유진동수나 고유진동모드¹⁾라고 하는 고유특성을 갖고 있다.

예를 들어, 5개의 면이 강(剛)하고 딱딱한 벽으로 되어 있고 1면만이 비교적 부드러운 탄성패널에 접하고 있는 직육면체의 폐공간을 고려해보자. 이때, 패널과 공간은 연성특성을 나타낸다. 즉, 폐공간은 그 자체로 공명특성을 갖고 있고, 구조물은 그 자체로 공진특성을 갖고 있지만, 이 모델에서는 각각이 상호로 영향을 주면서 고유의 특성을 갖고 있다.

연성 계(系, system)에서는 구조 또는 음향이 주체로 되면서 계 전체로서의 특성을 나타낸다. 이 관계는 차량과 그 실내 사이에도 성립되며, 차량실내의 음은 공간의 공명과 차량의 공진에 의하여 각각의 고유진동수의 영향을 받고 있다.

이러한 공간 내에서의 소음을 저감하기 위해서는 가진점(加振點)을 단위 힘으로 가진시킬 때에 소음평가 지점에서 음이 어떻게 발생하는가를 알 수 있도록 주파수응답 함수²⁾를 파악할 필요가 있다. 이 함수를 이용하여 고유모드의 분석결과로부터 패널의 공진이 주체로 되는 피크(구조주체 모드)와 폐공간의 공명이 주체로 되는 피크(음향주체 피크)를 알 수 있다. 소음의 저감 시에 구체적으로는 이와 같은 피크의 진폭을 작게 하는 것이 유효하다.

평가지점의 음을 저감하기 위해서는 다음과 같은 방법을 고려한다. ① 패널의 진동을 작게 한다(구조특성의 개선). ② 패널의 진동이 음으로서 전해지기 어렵게 한다(연성특성의 개선). ③ 패널로부터의 방사 음이 평가지점(수음점)에 전해지기 어렵게 한다(음향특성의 개선).

①은 패널자체의 진동을 작게 하여 달성할 수 있으며, 정공법이라고 하는 방법이다. 통상은 이 방법으로 소음을 작게 하지만, 진동을 제로로 하는 것은 현실적으로 불가능하므로 이것만으로는 불충분한 경우도 많다.

③은 공간의 형상이나 특성을 바꾸는 것이 필요하고 차량에서는 큰 변경이 곤란하지만, 흡음재 등으로 음을 감쇠

시키는 것이 가능하다.

②는 음으로 되기 쉬운 진동을 억제하는 방법이며 진동성분에 착안한 대책으로 된다. 이 과정에서 대책을 잘못하면 진동은 내려가더라도 음은 내려가지 않는다고 하는 사태가 생긴다. 이것은 소음대책 중에서도 어렵고 중요한 기술이라고 한다.

패널공진에 의한 고유진동수에서는 ①의 구조대책이 주된 대책으로 되지만, 공명에 의한 고유진동수에서는 ②의 연성특성의 대책이 중요하게 된다.

한편, “진동하는 구조물에서는 음이 발생하며, 진동이 줄어들면 음도 줄어든다.”고 생각되기 십상이다. 물론, 높은 주파수에서는 진동과 음과의 관계는 비교적 단순하고 진동을 억제함으로써 소음의 발생을 억제할 수 있다.

그러나 낮은 주파수에서는 음과 진동이 반드시 등가인 관계에 있지 않고, 여기에는 일견 복잡한 변환 메커니즘이 존재한다. 그 때문에 진동하여도 음이 나지 않는(내기 어려운) 경우도 있고, 전체의 진동은 내려가도 음은 오히려 커진다고 하는 경우도 발생된다. 따라서 소음을 저감하려고 할 때에 진동의 억제만을 생각하고 있어서는 소음이 줄어들지 않고 증가해버리는 경우도 있는 것이다.

기기의 설계 시에 진동을 유한 요소법으로 해석하여 진동이 저하되도록 설계변경을 했다고 하더라도 그로 인해 발생하는 소음이 억제되는 것은 아니다. 이 때문에 진동으로 발생하는 소음을 저감하려고 할 때는 음과 진동의 관계를 고려한 검토가 필요하다.

Ⅲ. 유럽 각국에서의 진동평가

1. 개요

근년의 글로벌화된 도시·지역 환경은 24시간 라이프스타일의 변화에 큰 영향을 주고 있다. 그 중에서 진동이 인체에 느껴지지 않도록 어떻게 실현하는가가 일상생활에서 중요하게 된다.

1) 구조물은 특정한 주파수의 외력에 대하여 공진하여 큰 진동응답을 나타낸다. 이 주파수를 공진주파수 또는 고유진동수라고 부르며, 이때의 진동파형을 진동모드라고 부른다. 또한, 폐공간에도 구조물과 마찬가지로 공명주파수가 있어 특정한 주파수의 음이 전해지면 음이 크게 성장한다. 즉, 폐공간에도 마찬가지로 고유진동수, 고유진동모드가 존재한다. 이들을 총칭하여 고유특성이라고 부른다.

2) 대상물을 가진시킬 때에 가진력과 응답의 비를 가진하는 주파수의 함수로서 나타낸 것을 주파수응답함수(Frequency Response Function; 통칭 FRF)라고 한다. 응답량은 진동의 경우는 가속도를 계측하고, 음향의 경우는 음압을 계측하면 가속도/힘, 또는 음압/힘의 특성을 얻을 수가 있다.

〈표 1〉 유럽 각국의 규격·지침의 명칭

	약칭	정식명칭	협회	국가규격
1	AFNOR	Association Francaiso do Nomalisation	프랑스규격협회	NF
2	BSI	British Standards Institution	영국규격협회	BS
3	DIN	Deutsches Institut fur Nomung	독일규격협회	DN
4	DS	Dansk Standards	덴마크규격협회	DS
5	SIS	Swedish Standards Institute	스웨덴규격협회	SS
6	NEN	Nederlands Normalidatio-Instituut	네덜란드규격협회	NNI
7	NSI	Norges Standards Instituut	노르웨이규격협회	NS
8	AENOR	Association Espanola de Nomalization Certification	스페인규격협회	UNE
9	VDI	Verein Deutschcher Ingenieure	독일기술자연합	

〈표 2〉 유럽 각국의 전신진동의 규격·지침의 비교

년	국명	번호	개요	비고
1987	영국	BS 6841	기계적 진동 및 반복충격에서 인체의 진신 진동폭로의 측정과 평가에 대한 영국표준가이드	
1990	영국	BS 7385-1	건물진동에 대한 평가와 측정 : 그1 건물진동의 평가 및 진동측정의 지침	
1992	영국	BS 6472	건물진동(1Hz~80Hz)에 의한 인체폭로의 평가에 대한 가이드	ISO 2631-2/1989와 동일 : 건물에서 연속적 충격으로 발생하는 진동
1993	영국	BS 7385-2	건물진동에 대한 평가와 측정 : 그2 지반진동으로부터의 장해레벨에 대한 가이드	ISO 4356/1977과 동일
1997	덴마크		저주파 음, 진동에 관한 환경 어세스먼트의 가이드라인 No. 9/1997, ISO/DIS 2631-2가 근거	1983년에 환경진동 어세스먼트의 가이드라인으로 공개
1997	스웨덴	SS4604861	진동의 판단기준 : 건물에서 쾌적성 평가를 위한 측정과 가이드라인. ISO/DIS 2631-2가 근거	평가단위 : 보정진동속도 진폭(mm/s), 기준 : 5nm/s
2002	독일	VDI 2057-1	인체의 전신진동에서 어세스먼트를 위한 통일기법 및 그 평가 : 건강, 쾌적성 및 진동지각. ISO 2631-1/1997이 근거	VDI 2057은 1983년부터 발행
1999	노르웨이	NS 6176E	건물진동의 측정방법 및 주택에서의 전신진동을 평가. ISO 2631-1/1985, 2/1994가 근거	측정기기 : ISO 4866/1990의 타입 2
2002	프랑스		건물진동에 의한 인체의 어세스먼트에 대한 척도를 정의하고 법규나 제어방법을 책정하며 불만자의 평가를 한다.	1986년부터 건물진동에 대한 법규를 편집
2002	유럽연합	EC-Directive	건물에서 발생하는 작업자 폭로에 대한 리스크에 관하여 최소한의 건강과 안전 요구	지령 89/391/EC
1994	ISO	ISO Amendment 2-4866	건물진동-건물로의 영향평가와 진동측정의 가이드라인	BS 7385-1과 동일
2001	ISO	ISO 2631-4	전신진동의 평가-고정유도수송시스템의 승객 및 승무원의 쾌적도에서 진동과 회전운동의 영향평가를 위한 가이드라인	
1887	ISO	ISO 2631-1	전신진동의 평가-기본적 요구	
2003	ISO	ISO/DIS 8041	진동에 대한 인체반응-측정기구	
2003	ISO	ISO 2631-2	기계진동과 충격-전신진동에 대한 인체폭로의 평가-그 2 건물에서의 진동(1Hz~80Hz)	자세의 방향이 명확하다면 ISO 2631-1을 이용

공장·사업장, 건설작업 및 도로교통에 따른 진동은 소음과 마찬가지로 규제되어오고 있다. 진동의 불만은 소음에 비해 적지만 도로교통 관계에서는 요구기준치 이하에

서의 불만도 있다. 진동발생원의 방지·제어기술, 전파방지 기술로서의 방진흙, 방진벽 또는 건축구조물에의 면진 기술 도입실험 등이 진행되어오고 있지만 불만건수가 줄

<표 3> 강제력을 갖고 있는 용어

용어	의미	한국어
act		법률, 조례
assessment		영향평가
criteria	환경의 질과 환경의 량이 개인이나 단체에 미치는 영향에 대한 정성적·정량적 정보의 총체	판단기준
directive		지령, 명령
estimation		평가, 판단, 의견
evaluation		평가
guide	바람직한 환경의 장려목표	지침
guideline	장려치를 실현하기 위한 기술적인 값	지침 값
law		법률, 법규, 법령
legislation		법률
order		법률, 규칙, 관행
recommendation	장려치 : 지침에 안전계수를 과한 것	장려, 권고
regulation	규제기준 : 행정적인 규제, 지도를 위한 기준	규칙, 규정, 법규
requirement	요청기준 : 행정상의 바람직한 기준	필요조건
rule		규칙, 규약, 명령
standard	기준 : 기본으로 되는 표준	기준, 표준, 규격

어 들지 않고 있다. 진동규제는 최신의 과학적 식견이 반영 되도록 요구되고 있는 상황이다. 이와 같은 상황에서 약간 오래된 문헌이기는 하지만 국제표준화기구의 정보나 주요 국가에서의 정보 중에서 진동평가의 동향을 조사해 정리한 것을 소개한다. 특히 유럽은 EU지령의 발신으로 EU 가맹국의 환경보전에 공헌하도록 하고 있고, 유럽 각국도 상황에 응하여 진동평가의 준비에 나서고 있다.

진동에 폭로된 인간의 전신에 의한 진동감각은 일반적으로 진동의 물리량에 대응하는 점에서 이와 같은 관계를 확인하는 실험적인 연구가 이루어져 지금까지 진동감각에 의한 등감각곡선 등의 성과를 얻고 있다. 그렇지만 ‘미미한 진동’ 등의 낮은 레벨에서의 생리적 영향에 대한 평가방법에 관하여 상세한 연구가 필요하며, 아직 밝혀지지 않고 있는 것도 있다. 이와 같은 상황에서 각국의 연구자들은 각자의 연구성과를 수렴하고 논의를 계속하여 ISO/TC104/SC4 ‘인체에 대한 기계진동과 충격의 영향’을 중심으로 심의가 이루어지고 있다. 한편, 유럽 각국에서 ISO의 의논을 베이스로 각국의 사정을 감안하면서 먼저 규격, 지침 또는 법규로서 발행, 시행하여오고 있는 경우도 있다. 이 장에서는 <표 1>에 나타난 유럽 각국의 규격·지침의 명칭과 <표 2>에 나타난 유럽 각국의 전신진동의 규격·지침을 중심으로 소개한다. 또한, 각국의 ‘어떤 용어가 강제력을 갖고

있는가, 그 의미는 무엇인가’를 <표 3>에 나타낸다.

2. 영국의 규격·지침

영국표준화기구(the British Standards Institution)는 영국표준(British Standard)을 발행하고 있다. 진동에 관한 규격/규칙 등에는 하기와 같은 것이 있다. 하기에서는 ③을 소개한다.

- ① BS 6841-1987
- ② BS 7385-1-1990
- ③ BS 6472-1992
- ④ BS 7386-2-1993

BS 6472-1992 : Evaluation of human exposure to vibration in building(1 Hz~80 Hz) 규격은 ISO/TC108/4/2 N180과 링크하고 있다. 내용적으로는 ISO 2631-2-1989와 마찬가지로 ISO 2631-1-1985를 적용하기 위한 지침이다. 또한, 이 시점에서는 콤바인 커브(combine curve, 결합곡선)가 도입되어 있지 않다. 이 평가기준치는 장소(사회시설, 주택, 사무소, 작업장), 시간(주간, 야간) 및 진동성상으로부터 인체 진동응답에 관한 건물진동의 만족하여야 할 크기의 팩터(factor)로 정하였다. 평가는 진동가속도 실효치를 측정하여 계산으로 진동 폭로치(VDV, Vibration Dose Value)를 산출한다.

3. 독일의 규격·지침

가이드라인 VDI 12057은 1963년에 처음으로 발행되었다. 그 이후 ISO 2631 시리즈가 계속 심의되고 있어 2002년에 최신판 VDI 12057-1-2002 : Human exposure to mechanical vibrations whole-body vibration)이 발행되었다.

이 가이드라인 VDI 12057-1-2002는 ISO 2631-1-1997에 거의 링크되어 있다. 이 가이드라인의 목적은 '인체의 진동'에 관한 어세스먼트(assessment)를 위한 통일기법을 준비하는 것, 더욱이 어세스먼트 변수를 결정하기 위한 일반적인 지식을 주는 것이다. 하기에 그 특성을 나타낸다.

- ① 대상 : 진동 3방향의 주파수보정가속도 진폭, 지속시간을 고려
- ② 주파수 : 인체 응답주파수
- ③ 측정치 : 주파수보정가속도 실효치
- ④ 평가치 : 이동 실효치의 최대치

4. 스웨덴의 규격·지침

가이드라인 SS460 48 01은 ISO 2631-2가 근거로 되어 측정되어 적용되고 있다. 하기와 같은 적용범위가 있다.

- ① 주파수범위 : 1 Hz~80 Hz
- ② 평가 : 보정진동속도 진폭의 최대치(mm/s). 다만, 기준치는 5 nm/s ($1 n = 10^{-9}$)
- ③ 가이드라인 : 건물에서 쾌적성 평가
 - ※ 진동이 대단히 적다 0.4~1.0 (mm/s)
 - ※ 진동이 발생할 가능성이 있다 > 1.0 (mm/s)
- ④ 감각 역치 : 거의 0.1 (mm/s)

5. 덴마크의 규격·지침

'덴마크 환경보호부 No. 9-1997로부터의 통지'로서 1997년에 환경에서의 저주파 음, 초저주파 음 및 진동에 관한 측정과 어세스먼트를 위한 일련의 가이드라인이 공표되었다. 환경진동 어세스먼트의 가이드라인은 이미 1989년에 공표되어 있다. 하기와 같은 적용범위가 있다.

- ① 근거 : ISO/DIS 2631-2-1989
- ② 평가 : 보정가속도 레벨 (dB), 보정가속도 진폭 (mm/s²), 보정진동속도 진폭 (mm/s)
- ③ 시정수 : slow
- ④ 기준치 : 10⁻⁶ (m/s²)
- ⑤ 감각 역치에서 장려 진동한계치 : 72 (dB), 4 (m/s²)

6. 노르웨이의 규격·지침

이 기준은 NS-ISO 2631-1-1985 및 ISO 2631-2-1994에 따라서 '진동평가를 위한 일반적인 판단기준의 확장'과 적응'을 행하는 것이다. 이것은 도로교통과 다양한 노면전차로 인해 발생하는 건물진동의 구체적인 측정방법이나 건물 내에 거주하는 사람들의 전신진동을 평가하기 위한 판단기준도 규정하고 있다. 이 기준은 12장으로 구성되어 있으며, 대표적인 장에 대하여 하기에 소개한다.

(1) 제7장 측정기기에 대한 요구에 관하여

- ① 측정기기 : ISO 4081-1990의 타입 2와 일치
- ② 시정수 : 1초 (IEC 60651-1979의 slow와 일치)
- ③ 주파수 범위 : 1 Hz~80 Hz (1/3 옥타브밴드)
- ④ 필터 : 결합보정곡선의 필터

(2) 제9장 측정결과에 대하여

- ① 측정결과 : 통계적인 최대치, 최대보정속도 진폭 및 최대보정가속도 진폭
- ② 계산치 : 스텝 1 ... 최대보정속도 진폭의 평균치
스텝 2 ... 최대보정속도 진폭 평균치의 표준편차
스텝 3 ... 통계적인 최대치

(3) 제12장 부록 B 주택 내의 진동등급의 가이드라인

- ① 등급 A : 거의 진동을 느끼지 않는다.
- ② 등급 B : 어느 정도 진동을 느낀다.
- ③ 등급 C : 15 %의 사람이 진동을 느낀다.
- ④ 등급 D : 약 25 %의 사람이 진동을 느낀다.

7. 프랑스의 규격·지침

프랑스 환경부는 '진동에 대한 건물보호에 관한 법규'를 1989년부터 편찬하여 왔다. 충격진동과 연속진동에 대하여 건물에 적용하는 한계치로서 하기와 같이 분류하고 있다.

- ① 대단히 진동을 느낀다.
- ② 어느 정도 진동을 느낀다.
- ③ 거의 진동을 느끼지 않는다.
- ④ 주파수 범위 : 4 Hz~100 Hz
- ⑤ 계산치 : 진동속도 진폭 (mm/s)

8. EC 지령

2002년 6월 25일부로 유럽의회 및 심의회 지령 2002/44/EC가 발령되었다. 진동으로 발생하는 리스크로서 작업자에 대한 진동폭로에 관하여 최저한의 건강과 안전에 대한 요구가 나타내어졌다. 이 지령의 요구는 작업자가 작업을 통하여 기계적인 진동에 폭로되거나 폭로될지도 모르는 활동에 대하여 적용된다고 하고 있다. 전신진동에 대한 폭로한계치를 하기와 같이 나타내고 있다.

- ① 8시간 기준에 대하여 표준화된 1일의 폭로한계치가 1.15 m/s^2 로 되어 있지만, 관계 각국의 선택에서는 폭로한계치를 $21 \text{ m/s}^{1.75}$ 로 하여야 한다고 하고 있다.
- ② 8시간 기준에 대하여 표준화된 1일의 폭로한계치가 0.5 m/s^2 로 되어 있지만, 관계 각국의 선택에서는 폭로한계치를 $9.1 \text{ m/s}^{1.75}$ 로 하여야 한다고 하고 있다.

IV. 유럽에서 철도시설에 대한 전략적 진동매핑

1. 개요

유럽연합(EU) 회원국들(member states)에게 적용되는 환경소음 지령 2002/49/EC (END)는 환경소음에 대한 노출에 기인하는 유해한 영향을 피하거나, 방지하고, 줄이기 위한 일반적인 방법을 규정한다. END는 회원국들에 대해 공통의 평가방법을 사용하여 모든 주요 공항, 집합체(agglomeration), 철도 및 도로에 대한 소음매핑(noise mapping)을 통해 환경소음에 대한 노출의 영향을 평가하도록, 또한 이들 음원에 기인하는 소음충격을 줄이기 위한 조치계획(action plans)을 개발하고 적용하도록, 그리고 소음레벨에 관한 모든 공공의 정보를 작성하도록 요구한다.

또한, END는 수행하기로 되어있는 모든 과업에 대하여 권한 있는 당국과 기관을 지정하도록 유럽연합 회원국들을 강제한다. 모든 회원국들은 END를 이행하는데 필요한 법률, 규정 및 행정규정을 발효시켜야 한다. 데이터 수집, 소음매핑 및 조치계획 개발을 위한 전체일정은 2014까지 END 내에 규정될 것이다.

이전에 기술된 법적의무는 보다 중요하며, END는 소음지표, 소음예측 스탠더드 및 소음 영향평가 조건의 일반적인 프레임워크를 규정한다. 따라서 유럽의 모든 인구가 소

음공해로부터 동등하게 보호되도록 보장하는 일관된 세트의 법규를 모든 회원국이 따를 수 있다. END는 24h 가중 L_{den} 지표를 도입하고 향후의 의무적인 소음지표로서 L_{den} 과 L_{night} 를 설정하였다. 또한, 산업, 항공기, 도로 및 철도 소음예측을 위한 표준계산방법이 설정되었다. 측정에 관련된 스탠더드도 마련된다.

5년마다 업데이트되어야 하는 표준화된 전략적 소음매핑은 소음충격 영향평가 및 조치계획의 개발을 위한 강력한 틀로서 주목된다. 계획 내의 측정은 권한 있는 당국의 재량이지만 값은 관련한계 이하로 줄이도록 지향해야 한다. 그럼에도 불구하고, END에는 소음제한치가 주어지지 않으며, 따라서 어떤 한계치의 구체적인 수치는 회원국들이 결정하도록 되어 있다.

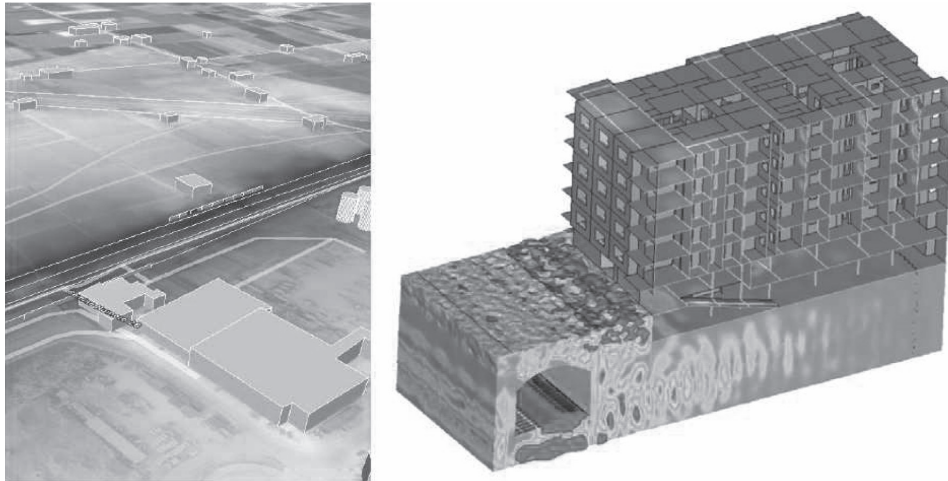
철도소음 영향모델은 네덜란드 국가계산방법(SRM II)에 근거하고 있다. 이 방법은 다른 나라의 전형적인 차량의 모델링용으로 조정할 수 있는 네덜란드 철도차량용의 소스모델로 구성되어 있다.

전파모델은 지반 흡수(吸收, absorption) 및 기하학적 특성을 포함한다. 또한, 대부분의 상용 소프트웨어는 영향을 받는 인구를 정량화할 수 있으며, 이것은 전략적 소음매핑(strategic noise mapping)에서 가장 적절한 출력 파라미터이다.

진동은 어떠한가? 철도에서 발생하는 진동은 현재 지방, 지역 및 국가 행정부에 대한 우려의 원천이다. 그러나 공통의 접근법(common approach)은 존재하지 않으며 각 양각색의 국가 및 지역 법규는 각양각색의 진동레벨지표와 각양각색의 진동한계로 이어진다. END는 철도로 인한 진동에 대한 권고 진동지표, 영향평가의 방법, 또는 주민 노출의 평가에 관한 어떠한 지표도 설정하지 않고 있다. 전략적 진동 맵(strategic vibration maps)도 언급하지 않고 있고, 조치계획도 언급하지 않고 있다. 철도진동에 대한 문제는 무엇인가?

2. 철도진동문제

철도진동의 발생, 지반을 통한 진동의 전파 및 건물로의 진동전달에 관련된 메커니즘의 대부분은 다량의 복잡한 현상을 포함하며, 접근하거나 특징짓기가 복잡하다. 이에 비하여 소음 발생, 전달 및 도달현상은 매우 단순하게 고려할 수 있다 : 네덜란드 차량소음모델은 일련의 수직분



〈그림 1〉 소음계산 상용 툴(왼쪽) 및 SENER이 개발한 터널-지형-건물 진동전파 FEM모델(오른쪽)에서 얻은 결과

산 등가소음원을 포함한다; 음향전파매체는 균질하며 반사와 흡수법칙은 잘 알려져 있다. 더욱이, 소음영향은 일반적으로 건물벽 안쪽에 대해 계산되며, 따라서 건물 음향 절연특성과 인간반응 영향은 완전히 무시된다. 예측된 소음이 소음한계를 초과한 경우에는 음향스크린을 사용하여 값싸고 효율적인 방법으로 영향을 감소시킬 수 있다. 철도소음영향의 예측에 사용할 수 있는 고품질의 상용 툴은 몇 개가 있다(<그림 1> 참조).

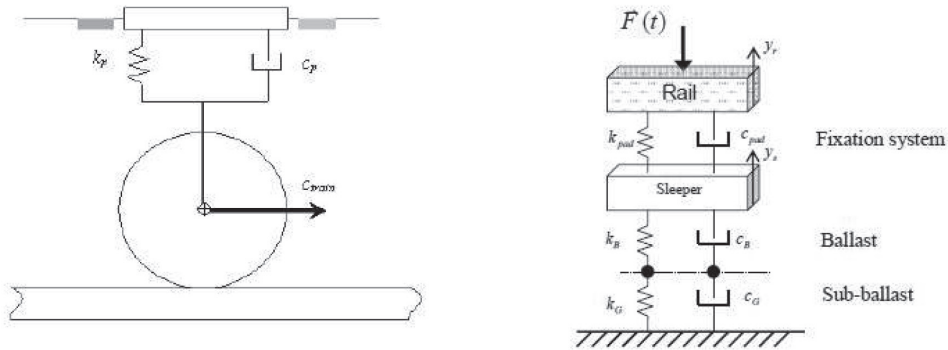
한편, 철도진동의 발생은 철도차량, 차륜과 레일 거칠기 프로파일, 레일, 패드, 침목, 침목하부패드, 체결시스템, 도상 및 지반진동이 결합된 거동에 좌우된다. 또한 지반진동 메커니즘은 통계적 및 확률적인 진동전파특성에 크게 좌우된다. 대부분의 진동법규 제정은 건물내부의 한계를 설정하며, 따라서 그것은 기초-건물 커플링 현상과 건물 진동 거동을 고려하는 것이 필요하게 된다. 이와 관련하여 철도차량 통과에 기인하는 진동레벨을 예측하기 위한 몇 개의 방법론이 제안되어 왔다. 경험적 방법(그들의 일부는 스위스, 북유럽 국가 및 미국에처럼 국가참조 계산방법으로서 사용된다)은 일반적으로 참조치의 수집에 기초하며, 그것은 가장 대표적인 파라미터(열차속도, 중량, 길이 등)를 이용해 수정된다. 이들의 진동값은 일반적으로 측정활동의 통계분석으로부터 얻어진다.

분석방법은 일반적으로 많은 양의 데이터를 필요로 하며, 따라서 그들은 첫 번째 계획단계에서는 유용하지 않

다. 한편, 이러한 종류의 모델은 파라미터의 변경에 따른 변화를 평가할 수 있게 하며, 따라서 진동거동을 이해하고, 가장 기여하는 요인을 평가하는 데에 매우 가치가 있다. 유한요소법(FEM, <그림 1> 참조), 경계요소법(BEM), 또는 FE/BE결합방법에 기초한 수치해석적 방법은 기하구조적·기계적 데이터, 긴 모델링 기간 및 대규모 컴퓨팅 자원을 필요로 한다. 따라서 그들의 방법은 비 전형적이거나 매우 민감한 상황에 적용되어야 한다. 필요한 입력 데이터와 모델링 방법의 이질성 및 다양각색의 정확성 레벨 때문에 이들의 모든 방법으로 얻어진 결과를 비교하는 것은 매우 곤란해진다.

한편, (END에 명시된 L_{den} 로서) 폭로치와 (새로운 철도 노선에 대한 환경영향 평가 내에 일반적으로 명시된 L_{max} 로서) 순간값에 대한 소음지표(noise indicators)는 합의(consensus)에 의해 규정되어 왔다. 그러나 법률에 규정된 진동지표(vibration indicators)의 대부분은 (L_{aw} 와 K 계수로서) 순간적인 값만을 포함하며, 큰 일련의 후보들이 존재할지라도, 진동 폭로기반 지표에 관한 유럽레벨에서의 합의에는 도달되지 않고 있다.

마지막으로, 진동대책의 효율성에 관해서는 지식이 결여되어 있다. 방진솔루션의 거동은 주로 철도차량, 레일, 체결시스템 및 토질 간에 결합된 상호작용에 좌우된다. 철도차량과 토질의 조합에 대해 높은 진동절연 특성을 보여주는 솔루션은 크리티컬한 몇 가지 파라미터의 변경 시에



〈그림 2〉 입력으로서 레일과 차륜 거칠기 프로파일을 사용하는 전형적인 차륜-레일 접촉모델(왼쪽)과 3 자유도 상부구조 진동모델(오른쪽)

잠재적으로 나쁘게 작용할 수 있다. 소음의 경우와 달리, 진동전달 임피던스를 변경하는 것은 매우 비싸며, 획득된 효과는 주파수에 강하게 의존한다. 이러한 모든 사실을 고려하여 철도진동에 대한 문제에 대처하고 솔루션을 다루는 것이 필요해진다.

3. 전략적 진동 맵

소음의 경우와 마찬가지로, 전략적 진동 맵(Strategic Vibration Maps)은 영향평가, 예측 및 조치계획 수립에서 강력한 툴로 될 것이다. 상기에서 언급한 것처럼 철도시설에 대한 전략적 진동매핑(strategic vibration mapping)을 위한 합의 방법론의 개발에서는 많은 장애물을 만날 것이

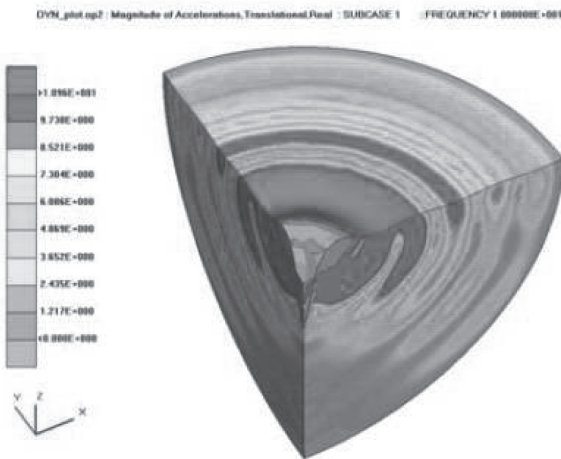
다. 예측 접근법들 간의 강한 차이는 각양각색의 입력데이터를 사용하도록 이끌며, 따라서 결과는 거의 비교할 수 없다. 게다가, 유럽표준 진동지표에 대한 합의가 없다. 조치계획은 효율을 정확하게 예측할 수 있는 어떤 종류의 방진 툴박스를 필요로 할 것이다.

(1) 입력데이터

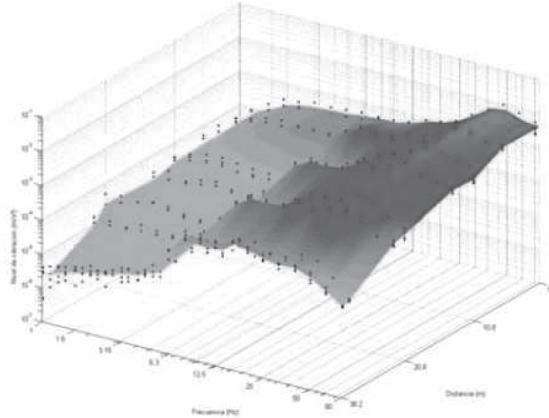
입력데이터는 예측모델의 유형에 강하게 의존한다. 표준화된 소음예측 모델은 몇 개의 파라미터만을 필요로 한다. 이들은 소음원 정의를 위하여 각 기간에 대한 내부 라이브러리(internal library)와 제한된 라이브러리 및 교통량(traffic)에서 선택된 열차유형이다. 전파와 도달에 대하여는 대기과 흡수 파라미터만 필요로 한다.

가장 단순한 진동발생원 모델조차 많은 양의 입력 데이터를 필요로 한다. 대부분의 이론적 모델은 (<그림 2>에서 보는 것처럼) 스프링 하 질량 및 레일, 레일패드, 침목 및 침목패드에 대한 등가질량 및 강성(stiffness)에 관한 데이터, 경우에 따라서는 레일과 차륜에 대한 거칠기 프로파일에 관한 데이터를 필요로 한다.

(<그림 3>에서 보는 것처럼) 복잡한 전파 분석과 수치 모델의 조합은 시험굴착으로부터, 또는 프로젝트 초기단계에서 참고문헌으로부터 일반적으로 사용할 수 있는 지질층의 기계적 특성(밀도, 탄성계수, 포아송 비, 손실감쇠 계수)에 관한 정보를 필요로 한다. 대안으로, 경험적 모델은 SAWS처럼 시험현장(test field)에서 구한 데이터로부터 수집할 수 있다(<그림 4> 참조). 마지막으로, 도달현상의 재현(reproduction)은 지반-기초-건물 결합 모델링의



〈그림 3〉 FEM 진동전파 모델



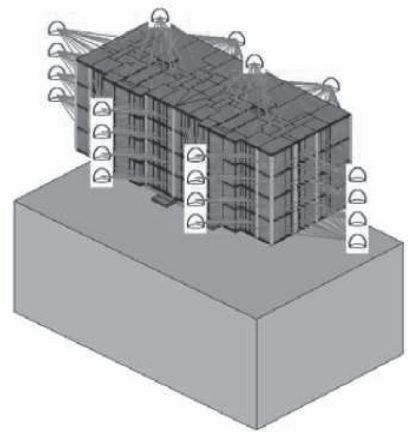
〈그림 4〉 SENER에서 개발한 충격기(왼쪽) 및 SASW로부터의 지반진동 전파 결과(오른쪽)

수행을 필요로 한다. 이들의 모델은 기초, 구조 및 바닥에 대한 치수 및 기계적 특성에 관한 정보와 함께 제공된다 (<그림 5> 참조).

소음의 경우처럼, 약간 간소화된 표준 계산방법을 개발하는 것이 가능해야 하며, 평균적 정확도 예측으로 제공할 수 있는 어떤 종류의 등가 열차 소스의 라이브러리와 일련의 표준화된 지반 유형분류체계를 정의해야 한다. 이를 종류의 결과는 전략적 진동매핑과 조치계획(action plans) 수립을 모두 수행할 수 있게 할 것이며 새로운 철도노선에 대한 영향지역의 평가에서 매우 유용한 첫 번째 반복을 구성할 수 있다.

(2) 진동 평가

상기에서 언급한 바와 같이, 주된 소음영향지표와 해당 법규는 폭로영향을 고려한다. 진동영향지표는 일반적으로 최대치에만 초점을 맞추며 따라서 교통영향은 무시된다. 제곱평균 가속도(root-mean-square acceleration), 진동 폭로치(Vibration Dose Value, VDV) 및 최대 순간진동값(maximum transient vibration value, MTVV)과 같은 많은 진동지표는 ‘측정기간(duration of the measurement)’으로 정의되는 노출시간을 고려한다. 게다가, 건강에 대한 진동 영향은 노동보호 목적을 위해 강도 높은 장기(근무 시간) 진동노출에 대해서만 일반적으로 분석된다. 소음의 경우와 마찬가지로, 그것은 장기간(전체 년) 영향을 받은 사람



〈그림 5〉 FEM-SEA 하이브리드 진동 모델(왼쪽) 및 SEA의 예측 모델(오른쪽)

들의 정량화를 위한 영향평가 진동 맵(assessment vibration map)을 정의하는 데 도움을 줄 수 있는 몇 가지 등가 주간-저녁-야간 폭로치 지표를 정의하는 것이 필요하다. 기간 가중을 포함하는 등가 $L_{aw,den}$ 은 역할을 할 것이지만 정의를 얻기 전에 큰 합의에 도달되어야 한다.

더욱이, 진동은 소음보다 훨씬 덜 확산되기 때문에 건물의 모든 층에 살고 있는 모든 주민이 동일한 진동충격 레벨로부터 영향을 받는다고 생각하는 것은 아마도 타당하지 않을 것이다. 따라서 진동레벨 할당에 대한 기준을 정의하는 것이 필요할 것이다. 표준화된 바닥 진동감쇠는 간단하지만 현실적인 방법으로 계산을 수행하는 방식이 될 수 있다.

(3) 조치 계획

진동저감 솔루션은 일반적으로 비용이 매우 많이 든다. 소스를 통한 가장 일반적인 작동(actuation)은 차륜과 레일 유지보수 절차를 포함하지만 실제 진동발생 저감은 열차-허가장치가 완전히 결합된 거동을 고려할 것을 필요로 한다. 도달소음은 스크린으로 저감할 수 있다. 진동전달의 저감은 방음벽 거동이 주파수에 강하게 의존하므로 쉽지가 않다. 현실적인 조치계획은 국가·지역당국과 철도관리자 간의 강력한 협력을 필요로 할 것이다.

4. CATdBtren 프로젝트

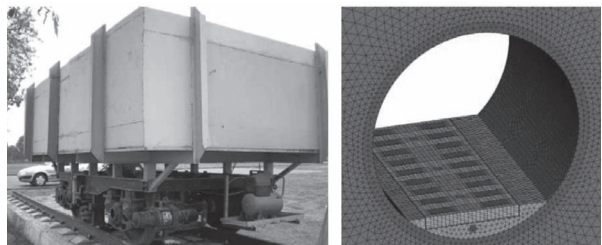
CATdBtren 컨소시엄³⁾이 2008-2010년의 기간에 실시한 CATdBtren 프로젝트는 철도시설에서 발생되어 그 주변에 영향을 미치는 진동에 관련된 문제를 다루었다. 이 프로젝트는 최근의 노하우를 확장함으로써 열차의 통과에 따른 진동의 영향을 줄이는 것을 목표로 하였으며, 특히 측정활동, 예측모델의 개발 및 새로운 방진체결시스템의 설계를 수행하는 것을 포함하였다. CATdBtren 컨소시엄의 회원은 시설, 실험실, 테스트 벤치, 철도궤도 및 R+D 부서 연구원의 높은 자격을 갖춘 그룹을 포함하는 프로젝트를 수행하는 데에 필요한 인프라를 제공하였다.

프로젝트의 첫 번째 단계는 철도궤도에서의 진동발생, 지반을 통한 진동전달 및 건물에서의 진동전파 등 진동현

상의 세 단계를 재현하는 모델의 창출로 이루어졌다. 분석·반 경험적·수치 모델(<그림 6> 참조)은 각각의 개별 요소에 대한 진동거동의 이해를 증진시키기 위해서 수행되었다. 마지막으로, 이들 서브모델은 최종 진동영향에 관련된 모든 파라미터(철도차량, 레일과 차륜 거칠기, 체결 시스템, 하부구조, 토질의 전파특성 및 건물특성)의 영향을 평가하기 위해 완전한 모델을 구성할 수 있게 하였다.

제어된 환경(시험장비) 및 실제 현장시험(철도시설, <그림 7> 참조)에서의 실증시험은 이론적인 결과를 검증하기 위해 수행되었다. 데이터의 넓은 범위는 지하철, 기존선 및 고속선로를 포함하는 위치의 큰 집합에서 레일, 지반 및 건물의 측정으로 달성되었다. 마지막으로, 예측 소프트웨어가 달성되었다. 이 툴은 공공 관리자와 회사가 프로젝트 초기단계에서 모든 유형의 철도건설공사로 생긴 진동이 미치는 영향을 예측할 수 있게 하고, 이미 존재하는 것을 변경할 때에 예상되는 결과를 분석할 수 있게 한다.

CATdBtren 프로젝트는 새로운 철도시설에 대한 진동



<그림 6> 테스트 장비(왼쪽) 및 플로팅 슬래브 시스템 FEM 모델(오른쪽)



<그림 7> 현장 가속도 측정(왼손), 레일 거칠기 측정(오른쪽)

3) 단어 CATdBtren는 카탈로니아어(Catalan language)의 '카탈로니아(Catalonia)', 'dB의 진동' 및 '열차'의 세 가지 개념으로 구성되었다. CATdBtren 컨소시엄은 SENER, Railtech 및 Quantech 등의 세 회사와 스페인 철도 클러스터(Spanish railway cluster)로 구성하였다.

영향의 평가를 허용하는 예측 툴을 개발하는 것이 목적이었다. 이 소프트웨어는 고속철도, 기존선 및 지하철 철도 차량에 기인하는 접촉력의 모델이 포함되었으며, 또한 시설물 진동전달 거동, 지반진동전파, 지형-기초 커플링 및 건물진동 거동을 재현할 수 있게 하였다. 따라서 CATdBren 예측 툴은 철도차량, 레일과 차량 거칠기, 체결시스템, 하부구조, 토질의 전파특성 및 건물특성의 영향과 모든 최종 진동영향을 평가할 수 있다. 이 툴은 사용자 친화적이고 평균정확도를 가진 결과를 창출하기 위한 것이며, 문제영역의 상세한 연구가 여전히 필요할 것이다.

V. 맺음말

ISO/TC 43과 TC 108의 활동은 향후에도 '진동평가의 글로벌 스탠더드'로서 큰 영향을 미치게 될 것이다. 진동 측정기법은 종래의 방법, 계산방법도 도입된 기법으로 크게 변화하여 온 것이라고 생각된다. 진동평가와의 정합에서도 'ISO 8041-2002 : 전진진동측정 장치'와의 링크가 기대된다. 특히, 진동평가에서의 단위는 mm/s, mm/s², m/s², dB로 다양하다. 또한, 근거로 되어 있는 국제규격도 오래된 것으로부터 최근의 것까지 착종(錯綜)되어 있다.

유럽에서 철도진동의 문제는 지금까지 일련의 각양각색의 보완적 접근법으로 제기되어 왔다. 공통 프레임워크(common framework)의 부족과 다양한 솔루션 개발방법론은 표준화를 어렵게 하며, 이 시점에서는 그들 사이의 명확한 수렴을 예측하는 것이 여전히 불가능하다. 일부의 합의는 철도진동오염에 대한 일반적인 보호프레임을 보장하는 어떤 종류의 유럽 진동지령(European Vibration Directive)에 대해 모든 유럽회원국이 클레임(claim)할 수 있기 전에 도달해야 한다고 한다.

우리나라도 향후에 철도진동을 과학적으로 저감하기 위해서는 철도에서 발생하는 진동에 대해 과학적 근거에 의거한 권고 진동지표, 영향평가의 방법 및 주민노출의 평가에 관한 지표가 필요하게 될 것이며, 그러한 과제

행에서는 전략적 진동 맵(Strategic Vibration Maps)이 매우 효율적으로 이용될 것이다. ☺

♣ 참고문헌

- [1] Fuyin Ma, Jiu Hui Wu, Weiwei Wu : Vibration and noise analysis of multi-physical coupling systems, Journal of Mechanical Science and Technology, 2014.8.
- [2] C. H. Hodges and J. Woodhouse : Theories of noise and vibration transmission in complex structures, Rep. Prog. Phys. 49. 1986.
- [3] ISO 2631-1:1997 : Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1 : General requirements.
- [4] ISO 2631-2:2003 : Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2 : Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz).
- [5] J. Jakobsen : Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration, Journal of low frequency noise, vibration and active control, 2001.3.
- [6] European Commission : Green Paper. Future Noise Policy. 1996.11.
- [7] Hood, R. D., Greer, R. J., Breslin, M. The calculation and assessment of ground-borne noise and perceptible vibration from trains in tunnels. Journal of Sound and Vibration, 1996.5.
- [8] H. Kuppelwieser, A. Ziegler. A tool for predicting vibration and structure-borne noise immissions caused by railways. Journal of Sound and Vibration, 1996.5.
- [9] Hanson, C.E., Towers, D. A., Meister, L. D. Transit Noise and Vibration Impact Assessment, 2006.5.
- [10] X. Sheng, C. J. C. Jones, D. J. Thompson, Prediction of ground vibration from trains using the wavenumber finite and boundary element methods. Journal of Sound and Vibration, 2006.6
- [11] J. I. Palacios, R. Arcos, M. Prat, A. Balastegui, Development of frequency-domain source models for railway vibration impact assessment. Euronoise 2009.
- [12] L. Auersch, Dynamic Stiffness of Foundations on Inhomogeneous Soils for a Realistic Prediction of Vertical Building Resonance. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008.3
- [13] Chatterjee, P., Degrandea, G., Clouteaub, D., Al-Ussaint, T., Amst, M., and Othman, R., Numerical model for ground-borne vibrations from underground railway traffic. 2003.5.
- [14] G. Alarcón, J. I. Palacios, J. Romeu, A. Balastegui, R. Arcos, A. Sánchez, ICATdBren project: A complete model for the assessment of vibration impact from new railway infrastructure. Euro-noise 2009.