

고속열차 350km/h 주행시 열차풍이 방음벽 등 궤도에 수직평행한 선로변 구축물에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Effects of the Train Gust induced by High speed train at 350km/h on the Simple Vertical Surfaces Parallel to the Track

김재복*

Kim, Jae-Bok

남성원**

Nam, Sung-Won

고태환***

Ko, Tae-Hwan

ABSTRACT

After rapid running is begun in domestic, problem by the train gust that was not considered at existent train running appeared. If the High-Speed railway business speed rises by 350km/h in the future, is going to become more big problem. This study conducts an experiment that measure in local about KTX train beside Gyeong-Bu High speed railroad track about aerodynamics effect that happen by passage of train and analyzed. In case KTX II runs with the 350km/h speed, forecasted effect that get in the simple vertical surfaces parallel to tracks according to distance from rail center. Compared construction size with structural analysis in case do not consider with case that consider the train gust about sound proof walls representatively. As a result, proposed wind load standard that apply at sound proof walls design.

Keyword : Sound proof wall(방음벽), Train Gust(열차풍), Wind load(풍하중)

I. 서 론

고속철도라 함은 “철도건설법” 제2조에 “열차가 주요구간을 시속 200km 이상으로 주행하는 철도”로 규정하고 있으며, 고속열차를 운행하거나 건설중인 국가는 15개국으로 프랑스, 일본, 독일, 스페인, 이탈리아, 스웨덴 등이 대표적인 국가이다.

고속철도의 역사는 1964. 10월에 개업한 동해도신간선(영업최고속도 210Km/h, 130mph)을 시작으로, 1981. 9월에 프랑스(TGV 파리-리옹), 1988년 이탈리아(ETR), 1991. 5월 독일(ICE), 1992년 스페인(AVE)으로 이어져 현재에는 한국을 비롯하여 벨기에, 영국에서도 고속열차를 운행하고 있으며, 그 중 일본의 신간선(500계), 프랑스의 TGV와 타리스, 유로스타, 독일의 ICE3, 스페인의 AVE, 한국의 KTX가 300Km/h로 영업운전을 하고 있다. 2007. 4. 3일에 TGV-EST(동선)에서 운행속도 574.8km/h(357mph)로 바퀴가 있는 철도의 세계최고속도를 기록하였으며 최근에 TGV-EST(동선)를 영업속도 320km/h로 개통하여 바야흐로 영업속도 350km/h 시대가 얼마 남지 않았음을 실감하게 했다.

최근의 유럽국가 고속철도 개발 동향은 각국이 확보한 경쟁력 우위를 유지하기 위해 기존 시스템 기술 경험을 기반으로 차세대 고속열차인 TGV-POS 또는 AGV나 ICE-3열차 등의 개량 및 개발로 향후 국가간 고속철도 운행시대에 대비하여 속도 향상을 위한 연구개발에 지속적으로 투자하고 있고, JR 동일본은 2005. 6월 FASTECH 360이란 초고속 시험용 고속열차를 개발함으로서 360km/h급 고속열차 기술을 개발 중이다. 한국은 2006. 12월부터 G7 고속전철 기술개발사업을 착수하여 최고속도 350km/h급

* 서울산업대학교 철도전문대학원 석사과정, 정회원

E-mail : luvahn83@paran.com

TEL : (02)509-4884 FAX : (02)509-4827

** 한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부 선임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 기준철도기술개발사업단 선임연구원, 정회원

한국형 고속열차를 개발 완료하였고, 최근에 최고속도 400km/h급 차세대 동력분산식 첨단 고속열차 시제차량 개발사업에 착수하였다. 이렇듯 경쟁적인 열차의 고속화 추세는 기술적인 측면에서는 기존열차 주행시 일반적으로 고려하지 않았던 공기역학적 고려사항에 대하여 열차의 고속운행으로 인하여 큰 관심을 가지게 되었고, 지속적으로 해결해야 할 여러가지 문제가 존재하는 실정이다.

문제점 중 주요사항은 열차주행시 열차 주위 압력변화에 의한 열차풍 문제와 열차가 터널내를 통과할 때 발생하는 압력파 문제 등으로, 열차풍의 문제는 차량에 의한 공기유동장을 교란시켜 선로변의 방음, 방풍벽 등 궤도와 수직평행한 선로변 구축물과 역사 승강장내 대기승객, 인접 선로의 교행열차 또는 정지열차에 큰 영향을 미친다. 주행열차에 의한 공기유동장 교량의 크기는 열차속도의 제곱에 비례하는 것으로 알려져 있으며, 이는 차량속도의 증가량 보다 차량속도의 증가에 따른 공기유동장 교란의 증가량이 훨씬 크다는 의미이다. 열차가 터널 내부에 진출입하면서 발생하는 압력파의 문제는 차량의 객실에 영향을 끼쳐 승객이 귀울림을 느끼게 하는 원인이 된다. 고속철도가 터널통과시 강한 압축파가 생성되어 차량 표면과 내부에 급격한 압력변화를 일으켜 승객에게 불쾌감을 주고, 터널 입출구부에서 미기압파가 발생하여 터널 외부로 발산되면서 터널 주변의 소음으로 문제가 되고 있다.

경부고속철도 상업운전의 성공으로 호남고속철도 건설, 기존선 선로의 고속화 사업이 추진력을 갖게되어, 향후 우리나라는 고속열차 전국망을 갖추는 시기가 급속히 도래할 것이다. 이러한 고속열차 운행은 열차주행시 발생하는 열차풍으로 인한 여러 가지 문제점을 드러내게 되고, 차량 개발로 고속열차 운행속도가 350km/h로 상향되면 더 큰 문제점으로 대두될 것이다. 차량이 고속주행시 열차풍으로 인하여 선로변 작업원의 안전과 선로변 구축물의 안정에 악영향을 끼칠 수 있으므로, 차량속도에 따른 선로변 작업원의 안전작업거리와 선로중심에서 통행로까지 이격거리, 선로변 구축물 설계시 설계풍하중에 대해 설계기준의 재정립이 필요하다. 그 중 방음벽 설계풍하중은 경부고속철도 1·2단계 설계시 3.0KN/m²을 적용하였으나 다소 과다하다는 지적으로 현재 시행중인 호남고속철도 설계지침에는 일반철도 건설 규칙과 동일하게 지역별, 방음판 높이별로 세분하여 0.7~1.5KN/m²을 적용하고 필요시 열차풍을 고려하도록 축소 변경됨에 따라 보다 합리적이고 정밀한 열차풍하중 제시와 고려가 필요한 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 경부고속철도 중 최고속도로 주행하는 구간의 선로변에서 고속열차 운행 시속도와 이격거리에 따라 발생하는 열차풍 크기를 수회 측정하였고, 이를 분석하여 속도와 이격거리의 상관관계를 도표화하였다. 이를 근간으로 고속열차가 시속 350km로 주행시에 궤도에 수직평행한 선로변 구축물(특히 방음벽)에 미치는 공기역학적 영향을 이격거리에 따라 산출하여 정량화하였고, 이에따라 경제적이고 안전하며 효율적인 설계 및 시공에 필요한 설계열차풍 기준을 제안하고자 한다.

2. 방음벽 설계기준 적용 현황

2.1 건설교통부 철도설계기준(노반편) 및 호남고속철도 설계지침

방음벽의 설계는 고속열차 통과전후의 열차풍압, 진동 및 풍하중 등의 영향을 고려하여 방음벽 주판인 플레이트의 고정너트 폴립방지장치를 설계하여야 한다. 풍하중은 방음벽에 수직으로 적용하며 풍하중 강도는 <도표 1>과 같다. 열차풍하중은 필요한 경우 적용할 수 있다.

도표 1. 지역별 설계풍하중(단위 : KN/m²)

지역	지명	토공부			교량부	
		방음판의 높이별 구분				
		H≤3.5m	H≤4.0~8.0m	H>8.0m		
내륙	서울, 대구, 대전, 춘천, 청주, 수원, 충주, 광주, 전주, 익산, 진주, 광주	0.7	0.9	1.0	1.1	
서해안	서산, 인천	0.9	1.2	1.3	1.5	
서남해안, 남해안, 동남해안	군산, 여수, 충무, 부산, 포항, 울산	1.2	1.5	1.5	2.0	
동해안, 제주지역, 특수지역	속초, 강릉, 제주, 서귀포, 목포	1.5	1.5	1.5	2.5	

2. 고속철도 설계기준

- 설계하중은 고정하중, 풍하중을 적용하며 일반적으로 충돌하중은 고려하지 않는다.
- 풍하중은 방음벽에 수직으로 적용하며 풍하중 강도는 3.0 KN/m^2 를 적용하여야 한다. 다만 영업운행 속도 150 km/h 이하로 계획된 도심지역은 1.5 KN/m^2 적용하며, 해안지역은 현지여건을 감안하여 별도 검토하여야 한다.
- 지주의 간격은 토공부는 4.0 m 로 하며, 구조적으로 안정성을 확보하여야 한다.

2.5 UIC (UIC 779-1 code)⁽²⁾ : vertical surfaces parallel to tracks

- 단순한 방음막, 보호벽, 궤도와 근접한 건물 전면부, 궤도와 근접한 임시 구조물에 적용
이 경우에 압력파-흡입파는 $+q_{1k}$, $-q_{1k}$ 의 이동하는 분포 하중으로 대체된다. 이 분포하중은 길이 5m , 높이가 궤도의 레일 상부에서부터 5m 보다 높지 않은 구조물에 작용한다. (만약, 스크린의 높이가 레일 상부에서부터 5m 이하이면 부하는 스크린의 윗부분까지 미치게 된다.)

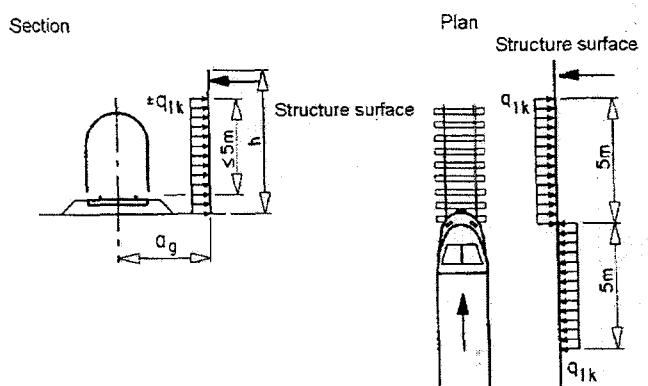


그림 1. 방음벽에 미치는 하중선도

이 분포 하중의 특성 값 q_{1k} 는 (식 1)로부터 결정된다.

$$q_{1k} = \frac{k_1 \times C_p \times \rho}{2} \times V^2 \quad (\text{식 1})$$

여기에서,

C_p : 축으로부터의 길이(a_g)에 따른 공력 계수

ρ : 공기 밀도(일반적으로 1.25 kg/m^3)

V : 열차 속도(m/s)

k_1 : 열차의 형상계수

C_p 는 일반적인 식으로부터 계산과 실험을 통하여 얻어진다.

$$C_p = (q - q_0) / q_d \quad \text{여기에서, } q = \text{국소 정압(local static pressure)}$$

q_0 = 기준 압력

q_d = 동압 ($q_d = 1/2 \cdot \rho \cdot V^2$)

(식 1)은 다음과 같이 바꿔 쓸 수 있다.

$$q_{1k} = k_1 \cdot C_p \cdot \left(\frac{V}{3.6}\right)^2 \cdot \frac{1}{1600} \quad (\text{식 2})$$

여기에서 q_{lk} 의 단위는 kN/m^2 이며, V 는 km/h 이다. C_p 는 다음의 식으로부터 얻어진다.

$$C_p = \frac{1.5}{(a_g + 0.25)^2} + 0.02 \quad (\text{식 } 3)$$

2.6 미국 방음벽 풍하중 기준

도표 2. 미국 방음벽 풍하중 기준

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	$0.00256 \times (1.3V)^2 \times C_d \times C_c$ $= 1/2 \times p \times (1.3V)^2 \times C_d \times C_c$	- V : 50년 빈도의 지역별 풍속 - C_d : 항력계수 - C_c : 높이와 장소에 따른 계수
California Department of Transportation (Caltrans)	- 토공부 : $50\text{kg}/\text{m}^2$ - 교량부 : $100\text{kg}/\text{m}^2$	높이 3.6m이하
	- 토공부 : $75\text{kg}/\text{m}^2$ - 교량부 : $150\text{kg}/\text{m}^2$	높이 3.6m이상
	$(h/30)^{2/7}$ 만큼 풍압강도 할증	높이 9.0m이상

3. 공기역학적 열차풍과 열차풍압

3.1 공기저항

열차주행시 공기저항은 열차속도의 제곱에 비례하고 전체 주행저항 중 공기저항이 차지하는 비율도 속도에 따라 증가하며, 일반적으로 주행속도 시속 100km에서는 50%, 300km에서는 80%, 350km에서는 90% 정도이다.⁽¹⁵⁾ 압력변동의 크기는 풍압이 속도의 제곱에 비례하므로 열차주행속도가 300km/h 이상인 경우에 문제가 되는 것으로 알려져 있다.

풍압의 저감뿐만 아니라 열차의 주행속도 향상을 위해서는 공기저항을 감소시켜야 하며, 이를 위해서는 차량의 전두부와 후미부에서 주로 발생되는 압력저항과 열차표면의 전단력에 의한 마찰저항, 전두부 형상과 차량 단면형상 등 차량의 외관에 의해 결정되는 항력을 감소시켜야 한다.

특히, 전두부 형상은 공기저항에 지배적인 영향을 주므로 고속주행 차량은 공기역학적 설계가 필요하다.

도표 3. 300km/h이상 상업운전용 고속열차의 전두부 형상 비교

국가	고속열차	전두부 형상	전두부 특징	동력차 최대 가로 폭	차량유효단면적
한국	KTX	초유선형	일반형	2.9m	9.77m^2
	KTX II	초유선형	일반형	3.0m	9.64m^2
프랑스	TGV	초유선형	일반형	2.9m	9.77m^2
일본	신칸센 700계	초유선형	오리형	3.4m	11.87m^2
대만	신칸센 700T계	초유선형	오리형	3.4m	11.87m^2
독일	ICE-3	초유선형	일반형	3.1m	10.00m^2
스페인	AVE	초유선형	일반형	2.9m	$(2.9 \times 4.1)\text{m}^2$

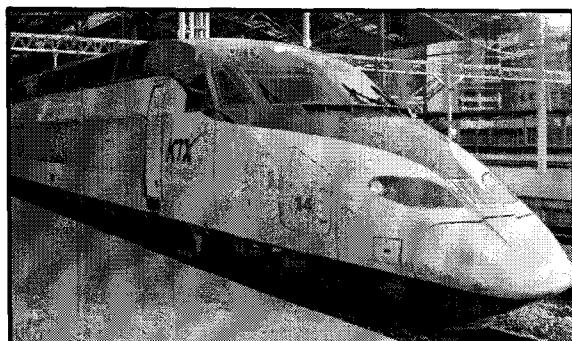


그림 2. 한국 고속철도 - KTX (TGV형)

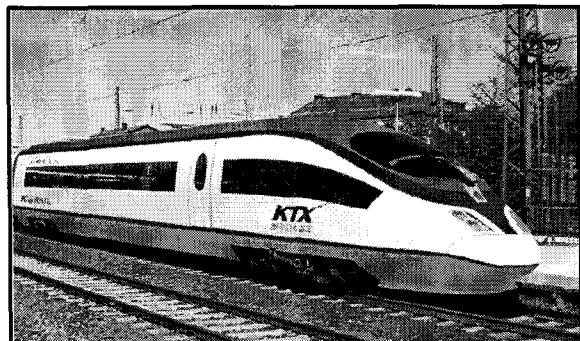


그림 3. 한국 고속철도 - KTX II

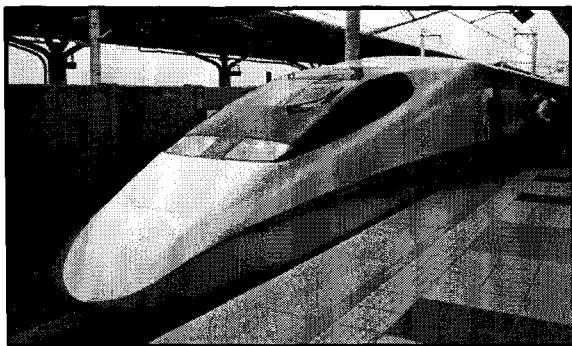


그림 4. 대만 고속철도 - 신간센 700T계

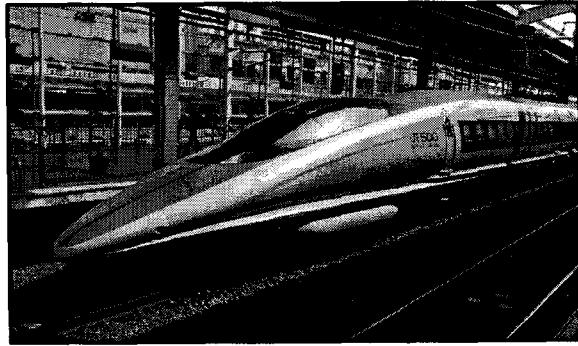


그림 5. 일본 고속철도 - 신간센 500계

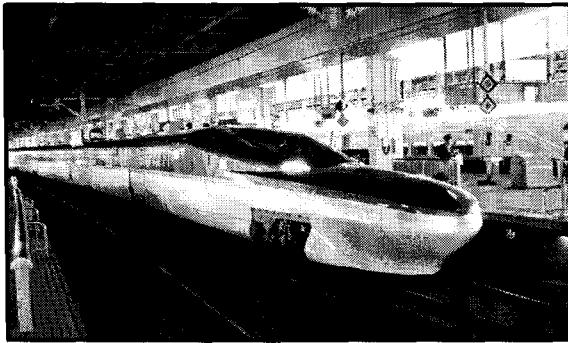


그림 6. 일본 고속철도 - FASTEC 360S

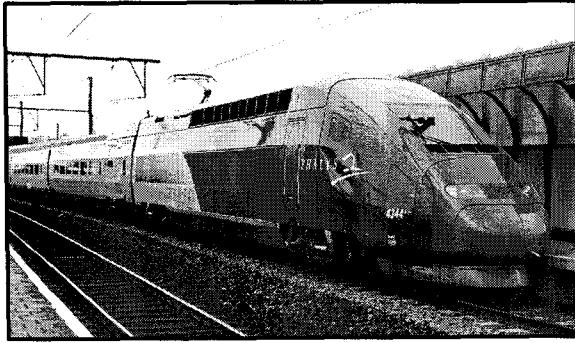


그림 7. 프랑스 고속철도 - 탈리스(TGV형)



그림 8. 독일 고속철도 - ICE3

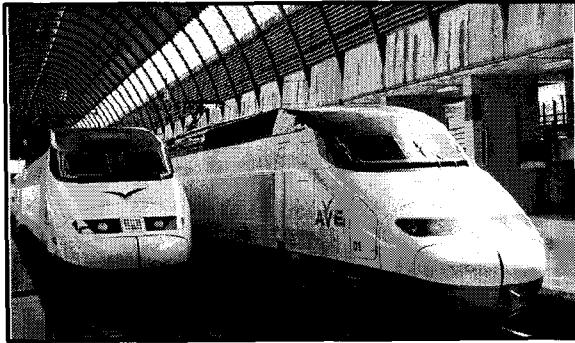


그림 9. 스페인 고속철도 - AVE (TGV형)

3.2 열차통과시 생성되는 공기압력

한 지점에 열차가 진입하는 경우 그 주변의 유동장에 압력분포를 발생시키고 통과열차 주변에서의 압력은 양(+)의 정점까지 상승하였다가 곧 음(-)의 정점까지 변화하는 현상을 보인다.

이 변화는 차량 전두부의 통과로 순간적으로 발생하고 후미부가 도달하여 전체 차량이 지점을 통과하는 순간까지 열차 전장에 걸쳐 그 주변에 분포한다. 최대 양압력과 음압력간의 차이(차압) 및 최대압력(양 또는 음)과 최소압력이 발생하는 시간적 간격은 차체와 주변 구축물에 충격을 주므로 중요한 매개 변수이며, 열차 전두부 통과시 압력파에 영향을 주는 다섯가지 매개변수는 열차의 속도, 차량의 횡단면 면적, 통과열차로 부터의 이격거리, 최저 지상고, 선단 돌출부 길이이다.⁽¹⁴⁾

열차통과 시 측면의 압력 변화를 줄이기 위한 대응기법 중 한가지 접근법은 열차설계시 돌출부의 길이를 길게하여 선단부 요동에 의한 압력 변화도를 줄이고 보다 많은 공기가 측면 대신 위쪽으로 밀려나도록 쇄기모양의 돌출부를 이용하는 것이다. 측면의 압력변화를 줄이기 위한 또 다른 기법은 선로를 따라 벽을 세우는 것이다. 결과에서 벽 근처의 압력이 크게 감소했으나 벽에서 멀어질수록 감소가 적은 것으로 나타났다.⁽³⁾

3.3 공기역학적 열차풍에 의한 압력과 하중

승강장과 선로에 연접하여 건설된 건물 및 구축물은 고속으로 열차통과시 발생하는 공기역학적 열차풍에 의한 압력과 하중을 견딜 수 있어야 한다. 이 열차풍압과 하중은 양하중과 음하중이 교번하므로 구조물 또는 부재의 피로가 안전의 중요한 문제가 될 수 있다.

Gawthoroe⁽¹⁾는 “개방구간의 고속열차 운행에 의한 공기역학 문제 연구”에서 “열차통과 시 발생하는 Peak & Peak 압력변화가 터널의 압력 천이에 비해 작더라도, 발생 횟수가 많기 때문에 구조물의 피로수명 및 승객안전문제, 차량수명 등에 중대한 영향을 미친다”라고 논하였다.

특히 고속열차가 서로 교행하는 경우 차창의 파손, 차 유리의 탈락 등 더 심각한 문제가 발생할 수 있다. 고속열차에 의해 발생하는 열차풍압과 하중은 선로변 구축물에 많은 영향을 미치는 데 특히 궤도와 수직평행한 상태이고, 선로에 가장 근접하며 기초지점만 고정시켜 설치되는 방음벽이 가장 많은 영향을 받는다.

4. 고속선 선로변 열차풍 현장시험 및 평가

4.1 실험개요

본 실험의 목적은 호남고속철도 및 향후 건설될 고속선에서 고속열차가 시속 350km 속도로 운행시 발생하는 열차풍이 선로변의 궤도와 수직평행한 구축물에 미치는 영향을 파악하는데 있다. 실험에 이용된 철도차량은 실제 상업운전 상태의 KTX열차로 하였다. 실험장소는 경부고속철도 선로 중 최고영업속도인 300km/h로 운행하는 지점 중 접근과 실험장치 설치가 용이한 오송기지 인근의 하행선 개활지 교량상에서 실시하였으며, 수차례 반복 실험하고 그 결과값을 분석하여 KTXⅡ차량의 특성 값을 고려한 관계식을 도출하고 외삽하여 최종적으로 KTXⅡ차량이 시속 350km 속도로 주행시에 선로변 이격거리에 따른 각각의 열차풍 압력 크기를 얻었다.

4.2 실험장치

4.2.1 압력측정

열차통과시 발생하는 압력변동을 측정하기 위한 압력계는 80~150kPa의 측정범위와 허용오차 $\pm 50\text{Pa}$ 인 압력계를 사용하였다. 측정일에 바람이 거의 없는 상태이었으므로 자연풍에 의한 풍압과 대기 압의 영향은 무시하였다.

4.2.2 열차속도 측정

화상이 녹화되는 디지털 화상녹화장치를 이용하여 열차 전두부가 지나간 시간과 후미부가 지나간 시간의 차이를 분석하여 평균통과속도를 계산할 수 있다.

윈도우 프리미어 프로그램을 활용한 프레임 분석으로 정밀하게 속도를 산정하였다.

$$V_{train} = l_{train} / t \times 3.6 = 1,396.8 / t (\text{km}/\text{h})$$

여기서, V_{train} : 열차의 속도 (km/h)

l_{train} : 열차의 길이 (388m)

t : 열차 전장부터 후미부 통과까지 소요시간 (sec)

4.2.3 측정 시스템 구성

측정자료를 얻기위한 측정시스템 구성은 <그림10>과 같다.

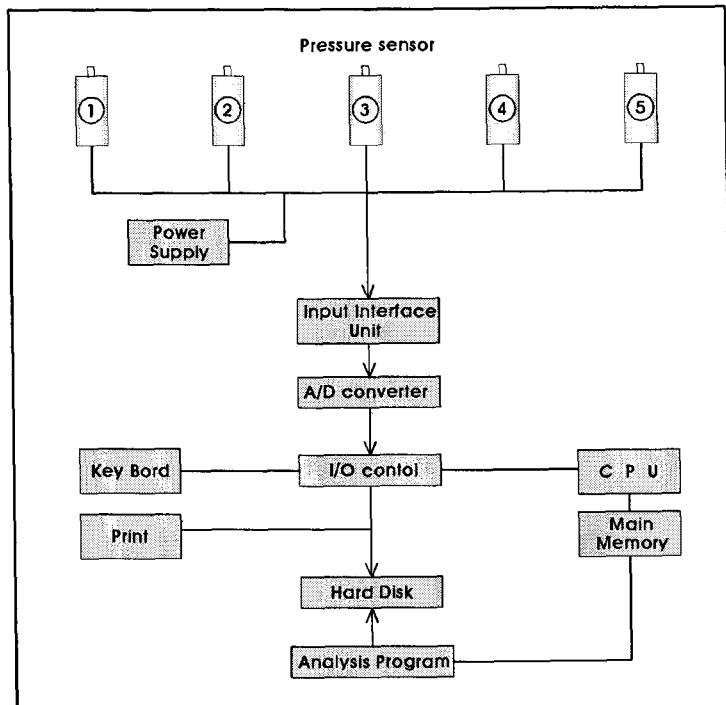


그림 10. 측정장비 구성도

사용된 센서 및 장비들의 제원 및 측정범위, 오차는 <도표 4.>에 정리하였다.

도표 4. 측정장비 및 센서사양

번호	장비명	사양	수량	용도 및 위치
1	Atmospheric Pressure sensor	-Rated operating range : 80~150kPa -Resolution : 10Pa -Tolerance : ±50Pa -Sampling rate : 5kS/s	3	실내외 압력 -내부 : 객실 -외부 : 대차부
2	A/D Converter	-Resolution : 16bits, 16ch -Channel No. : 16ch -Sampling rate : 50kS/s	1	데이터 처리
3	Data processing S/W and H/W	-Data output : RS232 -CPU : 1.2GHz -Memory : 256MB -Channel No. : 16ch -S/W compatible with windows system -Self-recognition of connected sensors	1	데이터 분석

4.3 실험방법

실험방법은 실험시간 동안 측정지점을 통과하는 모든 KTX열차에 대하여 열차풍압 변동을 측정하였다. 열차풍 압력변동 자료를 얻기 위해 <그림 11.>과 같이 센서들을 배치하였다.

압력 측정 개소는 총 10개소이며 레일면상으로부터 1m 높이 지점에 50cm간격으로 설치하였다. 센서①의 위치는 근방축 선로(하선)에 열차가 주행시 주행중인 열차의 차체 측면으로부터 약 50cm 떨어진 위치이다. 자료를 처리하기 위하여 필요한 기준조건인 현장 기상조건과 실험대상인 KTX열차의 구성 및

통과속도는 <도표 5.>와 <도표 6.>에 각각 주어져 있다.

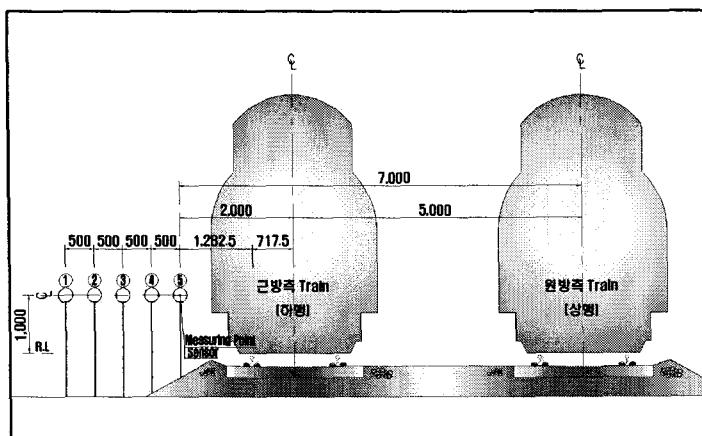


그림 11. 열차풍 현장계측시험 평면 배치도

도표 5. Atmospheric condition

Temperature	Relative humidity	Pressure	Wind speed
21.3~18.5°C	58.5%	101Kpa	1.3m/sec

도표 6. Speed, Direction, Composition of KTX train

Save file name	Running speed (km/h)	Running Direction	The time required (sec)	Note
01	296.271	Busan	4.7146	
02	280.769	Busan	4.9749	
03	300.000	Busan	4.656	
04	291.485	Busan	4.792	
07	295.612	Busan	4.7251	
08	293.852	Busan	4.7534	
09	287.911	Seoul	4.8515	
10	296.271	Busan	4.7146	
11	298.755	Busan	4.6754	
12	291.961	Busan	4.7842	
13	293.7914	Seoul	4.7544	
14	293.574	Busan	4.7579	

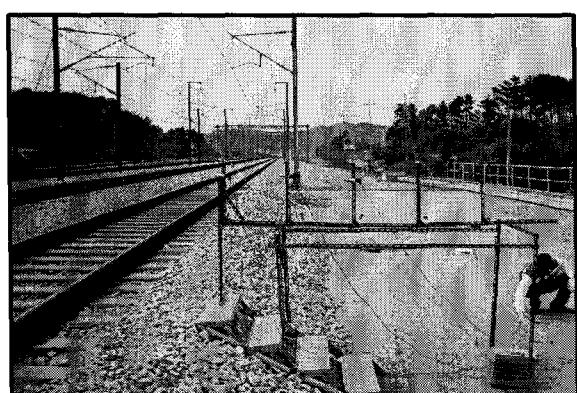


그림 12. 설치중 전경



그림 13. 측정시험 전경(원방측 선로-상선)

5. 고속선 선로변 방음벽에 미치는 열차풍압의 크기 및 방음벽 구조해석 결과

5.1 고속선 선로변 방음벽에 미치는 열차풍압의 크기

<그림 14.>~<그림 17.>에 근방 열차(하행)와 원방 열차(상행)의 열차풍 크기를 각각 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 교행 열차풍의 변화 패턴과 마찬가지로 열차 전두부 통과시에는 큰 반발력이, 후미부 통과시에는 흡인력이 작용하였으며, 주행 열차의 차체로부터 측정점이 멀어질수록 압력이 감소하는 경향을 나타낸다.

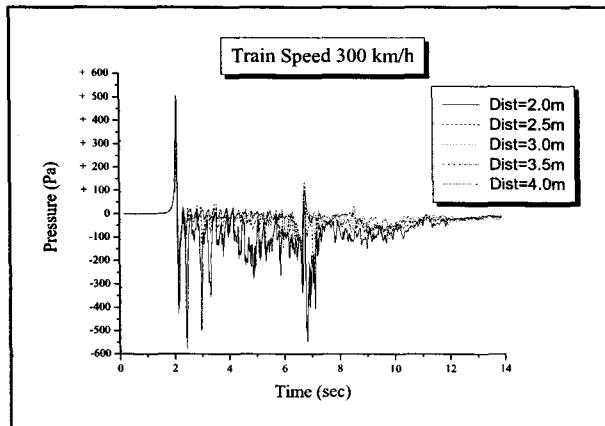


그림 14. 열차풍 크기(근방 열차 300km/h)

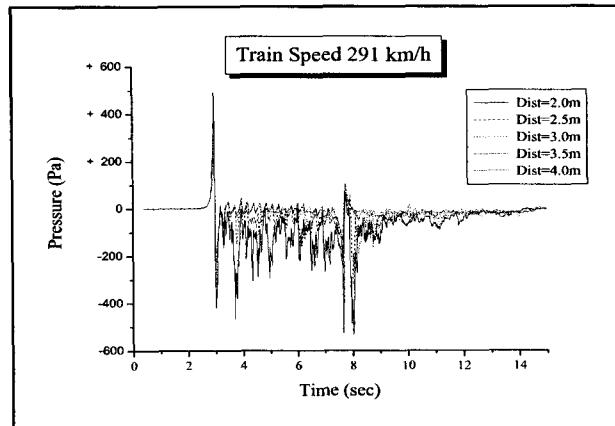


그림 15. 열차풍 크기(근방 열차 291km/h)

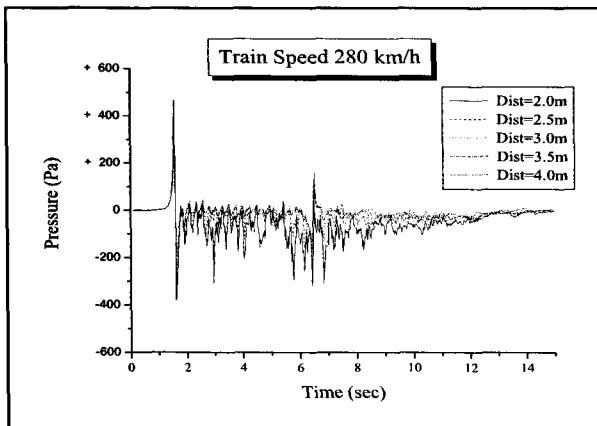


그림 16. 열차풍 크기(근방 열차 280km/h)

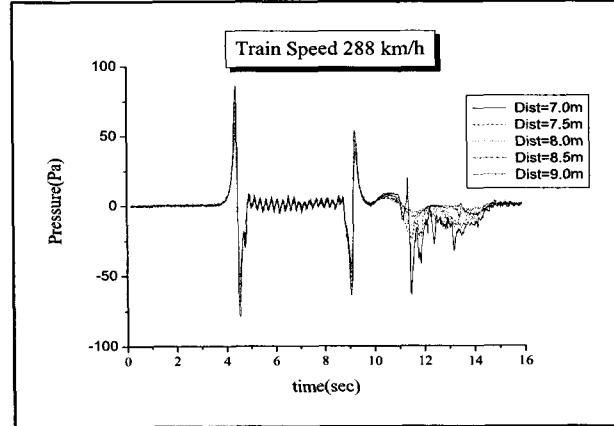


그림 17. 열차풍 크기(원방 열차 288km/h)

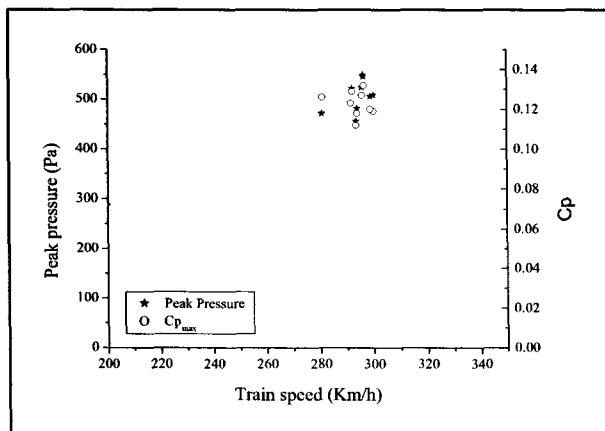


그림 18. 열차풍 크기 (거리별 최대값)

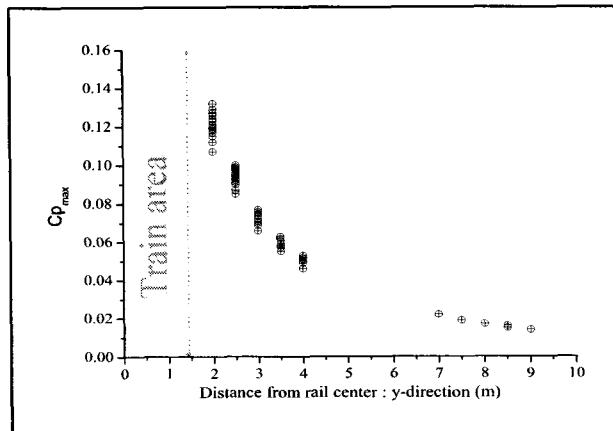


그림 19. 이격거리별 공력계수 크기

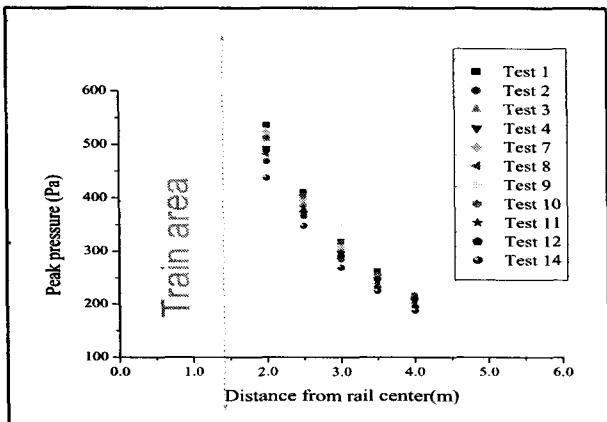


그림 20. 열차속도 및 압력에 따른 공력계수 크기

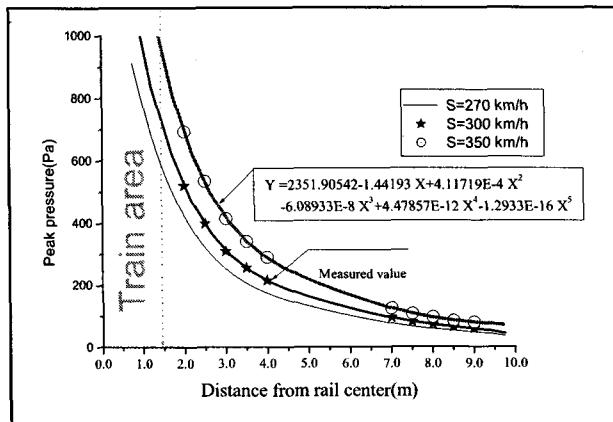


그림 21. 열차풍 현장 실험 결과

실험결과에서 외측 레일중심에서 이격거리에 따라 C_p (레일중심으로 부터 이격거리에 따른 공력계수)의 관계와 속도, 풍압과 C_p 의 관계를 그림으로 표시하면 다음과 같다. 이 그림을 활용하여 열차속도 350km/h 주행시의 이격거리별로 C_p 값을 구하여 최종적으로 열차풍을 구한다.

<그림 21.>에 열차풍 현장 시험 결과 종합을 표시하였다. 근방 선로(하선)를 통과하는 차량별로 통과 속도에 따른 실측치를 300km/h인 경우 ★로 표현했고, 270km/h인 경우는 실선으로 각각 나타내었다.

속도가 350km/h 일 때의 외삽 곡선을 Bernoulli 원리에 따라서 다음 식을 이용하여 구한다.

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho V^2 \quad C_p : \text{축으로부터의 이격거리에 따른 공력 계수}$$

ρ : 공기 밀도(일반적으로 1.25 kg/m^3)

V : 열차 속도(m/s)

고속열차 350km/h로 주행시의 예측값 곡선(○, 적색 실선)을 얻을 수 있다. 이 곡선의 관계식은 $Y = 2351.90542 - 1.44193X + 4.11719E^{-4}X^2 - 6.08933E^{-8}X^3 + 4.47857E^{-12}X^4 - 1.2933E^{-16}X^5$ 으로 나타낼 수 있으며 결과를 표로 나타내면 다음과 같다.

도표 7. 선로중심에서 이격거리에 따른 속도별 열차풍하중 크기

열차속도 270km/h		열차속도 300km/h		열차속도 350km/h	
이격거리(mm)	압력 (Pa)	이격거리(mm)	압력 (Pa)	이격거리(mm)	압력 (Pa)
0.75	911.6719	0.75	1125.58419	1.30	1051.72774
1.22	675.51644	1.22	834.00135	1.74	806.66962
1.70	504.66785	1.70	623.05777	2.18	627.61381
2.17	383.39069	2.17	473.323	2.63	498.60563
2.64	298.71818	2.64	368.78542	3.07	406.50168
3.12	240.19069	3.12	296.52943	3.51	340.70772
3.59	199.59428	3.59	246.41245	3.95	292.9166
4.07	170.69917	4.07	210.74208	4.39	256.84607
4.54	148.99829	4.54	183.95317	4.84	227.97668
5.01	131.44578	5.01	162.28491	5.28	203.28968
5.49	116.19548	5.49	143.45792	5.72	181.00485

5.96	102.3395	5.96	126.35138	6.16	160.3184
6.43	89.64665	6.43	110.68007	6.61	141.14085
6.91	78.30103	6.91	96.67151	7.05	123.83488
7.38	68.64051	7.38	84.74302	7.49	108.95324
7.86	60.89521	7.86	75.17883	7.93	96.97659
8.33	54.92608	8.33	67.80718	8.37	88.0514
8.80	49.96336	8.80	61.6774	8.82	81.7278
9.28	44.34511	9.28	54.73703	9.26	76.6975
9.75	35.25571	9.75	43.50887	9.70	70.53161

고속열차 350km/h로 주행시 선로중심에서 이격거리에 따른 열차풍하중의 크기를 0.5m 단위로 구하면 다음과 같다.

도표 8. 선로중심에서 이격거리에 따른 열차풍하중 크기

선로중심에서 이격거리(a) (m)	차량폭에서 이격거리(b) (m)	열차풍하중 (KN)	비고
4.5	3.0	0.2496	
4.4	2.9	0.2566	
4.2	2.7	0.2718	
4.0	2.5	0.2887	
3.8	2.3	0.3079	
3.5	2.0	0.3421	
3.3	1.8	0.3694	
3.0	1.5	0.4188	
2.8	1.3	0.4587	
2.5	1.0	0.5312	
2.3	0.8	0.5896	
2.0	0.5	0.6953	

5.2 열차풍압을 고려한 방음벽 풍하중

고속철도 노반 설계 시 적용하는 고속철도설계기준에 방음벽 풍하중은 방음벽 설치지역이나 위치, 선로중심에서 이격거리, 방음벽 높이와 상관없이 일률적으로 $3\text{KN}/\text{m}^2$ ($300\text{kgf}/\text{m}^2$)로 규정되어 경부고속 철도는 이 값을 적용하여 방음벽 지주와 기초설계를 하였다. 그러나, 최근에 제정된 호남고속철도 설계 지침(2007. 9)은 방음벽 풍하중 강도에 대하여 철도설계기준(노반편)에 규정된 값과 동일하게 적용하고 열차풍하중은 필요한 경우 적용할 수 있도록 규정하였다.

고속열차가 시속 350km 속도로 주행하는 경우 방음벽 등 선로변 궤도에 수직평행한 구축물은 강풍에 의한 풍하중과 열차풍하중의 영향을 반계되므로 <도표 9.>의 강풍 풍하중에 주행시 열차풍하중(궤도 중심에서 이격거리를 감안하여)을 가산하여 적용해야 한다. 그러나, 선로에 열차가 있는 경우에는 열차로 인하여 강풍의 영향이 감소하고 더욱이 양측에 방음벽이 설치되는 경우에는 반대측 방음벽에 의해 강풍 풍하중이 경감되므로 강풍 풍하중에 열차풍하중 전부를 가산하는 것은 과다하므로 독일 DB는 강풍 풍하중의 60%와 열차풍하중 100%를 가산하여 방음벽 설계 풍하중으로 적용하되 최소 1.0KN을 적용한다,

열차가 위치한 선로 바깥 측에서 선로 방향으로 강풍이 부는 경우에는 열차 및 반대편 방음벽의 영향이 미미하므로 열차풍하중(흡인력)과 강풍 풍하중을 가산한 값을 방음벽 설계풍하중으로 적용하는 것이 합리적이다. 흡인력의 크기는 열차 전두부 진입시 발생하는 초기 (+)압력의 80%~85%정도이다.⁽¹⁴⁾

따라서, 강풍 풍하중 100%와 열차 풍하중 최대값의 85%를 합한 값을 설계풍하중으로 제안한다. 각각의 값을 <도표 9.>에 비교하여 나타냈다.

본 논문에서 가장 합리적이라고 판단한 설계 풍하중은 C1이며 1.0KN이하인 경우 최소 1.0KN을 적용하는 것이 바람직하다. 이는 UIC code에 규정된 산식으로 산정하여 독일DB 등이 적용하는 C3과 큰 차이가 없으며 토공구간의 경우 기존 고속철도설계기준의 풍하중 강도(C3)의 30~43% 정도이다.

도표 9. 방음벽 풍하중(토공부 내륙) 및 외측선로에서 이격거리별 열차풍하중

외측선로 중심에서 이격거리 (m)	주행시 열차풍하중 (a) (KN)	강풍 풍하중 (b) (KN)	제안 풍하중 (C1=a*0.85+b) (KN)	UIC 규정 산식에 의한 열차풍하중 (d)(KN)	UIC 규정 풍하중 계 (C2=b*0.6+d) (KN)	기준 풍하중 차이 (C2-C1) (KN)	기준 고속철 도 설계기준 풍하중(C3) (KN)
4.5	0.2496	0.7	0.9122007	0.3	0.7(1.0)	0.0877993	3.0
4.4	0.2566	0.7	0.9181477	0.3	0.7(1.0)	0.0818523	3.0
4.2	0.2718	0.7	0.9310006	0.3	0.8(1.0)	0.0689994	3.0
4.0	0.2887	0.7	0.9454020	0.4	0.8(1.0)	0.054598	3.0
3.8	0.3079	0.7	0.9617270	0.4	0.8(1.0)	0.038273	3.0
3.5	0.3421	0.7	0.9907946	0.4	0.9(1.0)	0.0092054	3.0
3.3	0.3694	0.7	1.0139849	0.5	0.9(1.0)	-0.0139849	3.0
3.0	0.4188	0.7	1.0560132	0.6	1.0	-0.0560132	3.0
2.8	0.4587	0.7	1.0898906	0.6	1.1	0.0101094	3.0
2.5	0.5312	0.7	1.1515178	0.8	1.2	0.0484822	3.0
2.3	0.5896	0.7	1.2011496	0.9	1.3	0.0988504	3.0
2.0	0.6953	0.7	1.2910053	1.1	1.5	0.2089947	3.0

도표 10. 방음벽 풍하중(교량부 내륙) 및 외측선로에서 이격거리별 열차풍하중

외측선로 중심에서 이격거리 (m)	주행시 열차풍하중 (a) (KN)	강풍 풍하중 (e) (KN)	제안 풍하중 (C1=a*0.85+e) (KN)	UIC 규정 산식에 의한 열차풍하중 (d)(KN)	UIC 규정 풍하중 계 (C2=b*0.6+d) (KN)	기준 풍하중 차이 (C2-C1) (KN)	기준 고속철 도 설계기준 풍하중(C3) (KN)
4.5	0.2496	1.1	1.3122007	0.3	1.0	-0.345660	3.0
4.4	0.2566	1.1	1.3181477	0.3	1.0	-0.341362	3.0
4.2	0.2718	1.1	1.3310006	0.3	1.0	-0.331616	3.0
4.0	0.2887	1.1	1.3454020	0.4	1.0	-0.320152	3.0
3.8	0.3079	1.1	1.3617270	0.4	1.1	-0.306687	3.0
3.5	0.3421	1.1	1.3907946	0.4	1.1	-0.281817	3.0
3.3	0.3694	1.1	1.4139849	0.5	1.2	-0.261205	3.0
3.0	0.4188	1.1	1.4560132	0.6	1.2	-0.221752	3.0
2.8	0.4587	1.1	1.4898906	0.6	1.3	-0.187449	3.0
2.5	0.5312	1.1	1.5515178	0.8	1.4	-0.117573	3.0
2.3	0.5896	1.1	1.6011496	0.9	1.5	-0.052597	3.0
2.0	0.6953	1.1	1.6910053	1.1	1.8	0.090125	3.0

5.3 고속선 선로변 방음벽의 위치 및 높이별 구조해석 결과 비교

고속열차 운행 선로변에 설치된 방음벽이 받는 풍하중 강도는 동일한 방음벽에서도 방음벽 상단과 중간지점, 하단에서 각각 다르게 나타나며 실험에 의하면 방음벽 하단(레일면고 높이)이 가장 크고 중간지점은 하단과 유사하거나 다소 작으며 상단은 하단보다 20%~33% 줄어든 압력값이 나타난다. 고속열차 통과시 발생하는 열차풍하중은 새마을열차 통과시 보다 4~5배 크게 작용하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁴⁾

본 논고에서는 중간지점의 풍하중이 전체에 작용하는 것으로 정하여 제안 풍하중(C1) 적용시, UIC

에 규정된 풍하중 (C2) 적용시, 기존 고속철도 설계기준 풍하중 (C3) 적용시에 대하여 외측 선로중심에서 이격거리와 방음벽의 높이별로 각각 구조계산을 수행하였다. 방음벽 높이는 철도건설규칙이 정한 범위 중 철도에서 설치하는 한계높이를 감안하여 0~3.5m범위는 3.0m를, 4~8m범위는 5.0m를 계산높이로 하여 각각 계산하되 방음벽 지주간격을 토공구간은 2.0m, 교량구간은 4.0m로 설정하였고 계산목적은 ① 지주규격, ② BASE PLATE, ③ RIB PLATE, ④ ANCHOR BOLT를 구하는 것으로 하였다.

구조계산을 수행하여 아래 <도표 11>, <도표 12>에 정리하였다.

도표 11. 내륙지역 토공부에 설치하는 방음벽 구조계산 결과

○ 제안 풍하중 ($C1=a*0.85+b$) 적용시

구 분		선로중심에서 이격거리				
		4.4m	4.2m	3.8m	3.5mm	기타
방음벽 높이	계산 높이	0.918KN/m ² (91.8Kg/m ²)	0.931KN/m ² (93.1Kg/m ²)	0.962KN/m ² (96.2Kg/m ²)	0.991KN/m ² (99.1Kg/m ²)	1.000KN/m ² (100Kg/m ²)
0~3.5m	3.0m	H-Beam : 125×125×6.5×9 Rib Plate : 90×150×6 - 4EA			Base Plate : 325×325×20 Anchor Bolt : 22×500 -4EA	
4~8m	5.0m	H-Beam : 125×125×6.5×9 Rib Plate : 90×150×6 - 4EA			Base Plate : 325×325×20 Anchor Bolt : 22×500 -4EA	

○ UIC 규정 풍하중 ($C2=b*0.6+d$) 적용시

구 분		선로중심에서 이격거리			
		4.4m	4.2m	3.8m	3.5mm
방음벽 높이	계산 높이	0.737KN/m ² (73.7Kg/m ²)	0.759KN/m ² (75.9Kg/m ²)	0.815KN/m ² (81.5Kg/m ²)	0.869KN/m ² (86.9Kg/m ²)
0~3.5m	3.0m	H-Beam : 125×125×6.5×9 Rib Plate : 90×150×6 - 4EA		Base Plate : 325×325×20 Anchor Bolt : 22×500 -4EA	
4~8m	5.0m	H-Beam : 194×150×6×9 Rib Plate : 90×150×6 - 4EA		Base Plate : 350×400×22 Anchor Bolt : 26×600 -4EA	

○ 기존 고속철도 설계기준 풍하중(C3) 적용시

구 분		선로중심에서 이격거리		
		4.4m		
방음벽 높이	계산 높이	3.00KN/m ² (300Kg/m ²)		
0~3.5m	3.0m	H-Beam : 200×200×8×12 Rib Plate : 90×150×8 - 4EA	Base Plate : 400×400×30 Anchor Bolt : 29×700 -4EA	
4~8m	5.0m	H-Beam : 300×300×10×15 Rib Plate : 90×150×12- 4EA	Base Plate : 550×550×40 Anchor Bolt : 34×800 -6EA	

Table 12. 내륙지역 교량부에 설치하는 방음벽 구조계산 결과

○ 제안 풍하중 ($C1=a*0.85+b$) 적용시

구 분		선로중심에서 이격거리				
		4.4m	4.2m	3.8m	3.5mm	기타
방음벽 높이	계산 높이	1.318KN/m ² (131.8Kg/m ²)	1.331KN/m ² (133.1Kg/m ²)	1.362KN/m ² (136.2Kg/m ²)	1.391KN/m ² (139.1Kg/m ²)	1.500KN/m ² (150Kg/m ²)
0~3.5m	3.0m	H-Beam : 125×125×6.5×9 Rib Plate : 90×150×6 - 4EA		Base Plate : 325×325×16 Anchor Bolt : 22×500 -4EA		
4~8m	5.0m	H-Beam : 194×150×6×9 Rib Plate : 90×150×6 - 4EA		Base Plate : 350×400×22 Anchor Bolt : 26×600 -4EA		

○ UIC 규정 풍하중 (C2=b*0.6+d) 적용시

구 분		선로중심에서 이격거리			
		4.4m	4.2m	3.8m	3.5mm
방음벽 높이	계산 높이	0.737KN/m ² (73.7Kg/m ²)	0.759KN/m ² (75.9Kg/m ²)	0.815KN/m ² (81.5Kg/m ²)	0.869KN/m ² (86.9Kg/m ²)
0~3.5m	3.0m	H-Beam : 125×125×6.5×9 Rib Plate : 90×150×6 - 4EA		Base Plate : 325×325×20 Anchor Bolt : 22×500 -4EA	
4~8m	5.0m	H-Beam : 194×150×6×9 Rib Plate : 90×150×6 - 4EA		Base Plate : 350×400×22 Anchor Bolt : 26×600 -4EA	

○ 기존 고속철도 설계기준 풍하중(C3) 적용시

구 분		선로중심에서 이격거리	
		4.4m	3.00KN/m ² (300Kg/m ²)
방음벽 높이	계산 높이	H-Beam : 194×150×6×9 Rib Plate : 90×150×6 - 4EA	Base Plate : 350×400×22 Anchor Bolt : 26×600 -4EA
0~3.5m	3.0m	H-Beam : 250×250×9×14 Rib Plate : 90×150×10- 4EA	Base Plate : 450×450×30 Anchor Bolt : 32×700 -4EA
4~8m	5.0m		

5.4 방음벽 구조계산결과 분석 및 설계기준에 대한 제안

내륙지역 풍하중과 고속열차 350km/h 주행시 발생하는 열차풍하중을 합하여 방음벽 설계풍하중으로 설정하고 구조계산을 시행한 결과 풍하중 강도 1.0KN/m² 이하인 경우는 부재규격이 동일하므로 해외 고속철도의 경우와 같이 1.0KN/m²으로 설정하는 적합하다고 평가할 수 있다.

제안 풍하중 (C1) 적용시의 부재 크기는 UIC 규정 풍하중 (C2) 적용시의 부재 크기와 동일하고 기존 고속철도 설계기준 풍하중 (C3) 적용시 부재크기 보다 상당히 감소하는 것으로 분석되었다.

반면에 고속열차가 운행하는 선로변에 설치되는 구축물 설치시 적용하는 풍하중을 강풍 풍하중만으로 정하는 것은 구조물 안정에 문제가 발생할 수 있으므로 고속열차 주행시에 발생하는 열차풍하중을 고려하여 방음벽 등 선로변 구축물의 구조적 안정을 확보해야 한다. 따라서, 향후 고속철도 선로변에 설치되는 방음벽 설계풍하중은 강풍에 의한 풍하중에 속도별 열차 풍하중의 85%(흡인력)를 가산한 값으로 결정하는 것이 적합하다고 제안한다.

6. 결론

본 논문은 고속열차 350km/h 주행시 열차풍이 방음벽 등 궤도에 수직평행한 선로변 구축물에 미치는 영향에 대한 연구를 수행한 것이다. 선로변 구축물에 대한 열차풍의 영향을 검토하고 합리적인 설계 풍하중을 제안하기 위해 경부고속철도 선로변에 압력계를 설치하여 통과 열차의 압력변동을 조사하였고, 이를 수치화하여 강풍 풍하중과 열차풍하중을 조합하여 UIC 규정 풍하중 및 기존 고속철도 규정 설계풍하중과 비교하였고, 이 값으로 실제 방음벽에 적용하여 구조계산을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 종합적인 결론을 내릴 수 있었다.

(1) 고속철도 선로변에서의 열차풍 압력변동 특성

- 한 지점에 열차가 진입하는 경우 그 주변의 유동장에 압력분포를 발생시키고 통과열차 주변에서의 압력은 양(+)의 정점까지 상승하였다가 곧 음(-)의 정점까지 변화하는 현상을 보인다.

이 변화는 차량 전두부의 통과로 순간적으로 발생하고 후미부가 도달하여 전체 차량이 지점을 통과하는 순간까지 열차 전장에 걸쳐 그 주변에 분포한다. 열차 전두부 통과시 압력파에 영향을 주는 다섯가지 매개변수는 열차의 속도, 차량의 횡단면 면적, 통과열차로 부터의 이격거리, 최저 지상고, 선단 돌출부 길이이다. 열차풍압력의 크기는 열차로부터 이격거리에 비례하고, 열차 속도의 제곱에 비례하며 전두부 형상과 차량 단면형상 등 차량의 외관에 의해 결정된다. 특히, 전두부 형상은 공기저항에 지배적인 영향을 주므로 고속주행 차량은 공기역학적 설계가 필요하다.

(2) 고속철도 선로변에서의 열차풍 크기

- 향후 건설될 고속선에서 고속열차가 350km/h 속도로 운행시 발생하는 열차풍의 크기를 파악하기 위해 경부고속철도 선로변에서 수차례 반복 실험하고, 그 결과값으로 KTXⅡ 차량의 특성 등을 고려한 관계식을 도출하고 외삽하여, 최종적으로 KTXⅡ 차량이 시속 350km 속도로 주행시에 선로변 이격거리에 따른 각각의 열차풍 압력 크기를 얻었다. 열차 전두부 통과시에는 큰 반발력이, 후미부 통과시에는 흡인력이 작용하였으며, 주행 열차의 차체로부터 측정점이 멀어질수록 압력이 감소하는 경향을 나타낸다. 선로중심에서 이격거리는 시공기면폭과 같은 의미이며, 경부고속철도 노반폭인 4.5m 이격된 경우 열차풍은 0.2496KN, 호남고속철도 노반폭인 4.25m 이격된 경우 0.267KN이다. 철도노반에 설치되는 방음벽은 시공기면폭 보다 20~30cm 내측에 위치하므로 위 값보다 다소 크게 작용한다.

(3) 고속철도 선로변의 방음벽 설계기준에 대한 제안

- 열차운행 중에 발생하는 소음을 차단하거나 저감시키기 위하여 철도 선로 연변에 설치하는 방음벽의 지주, 앙카블트, 지지 플레이트 등 구조체나 방음벽 기초의 규격은 풍속에 의해 결정되며, 풍속은 방음벽을 설치할 지역이 내륙지역인지 해안지역인지, 설치할 방음벽의 높이에 따라 각각 다르다.
- 고속열차 운행 선로변에 설치된 방음벽이 받는 풍하중 강도는 동일한 방음벽에서도 방음벽 상단과 중간지점, 하단에서 각각 다르게 나타나며 실험에 의하면 방음벽 하단(레일면고 높이)이 가장 크고 중간지점은 하단과 유사하거나 다소 작으며 상단은 하단보다 20%~33% 줄어든 압력값이 나타난다. 고속열차 통과시는 새마을열차 통과시 보다 4~5배 많은 풍압이 작용하는 것으로 알려져 있다.
- 본 논문에서는 중간지점의 풍하중이 전체에 작용하는 것으로 정하여 제안 풍하중(C1) 적용시, UIC에 규정된 풍하중 (C2) 적용시, 기존 고속철도 설계기준 풍하중 (C3) 적용시에 대하여 외측 선로 중심에서 이격거리와 방음벽의 높이별로 각각 구조계산을 수행하였다. 방음벽 높이는 철도건설규칙이 정한 범위 중 철도에서 설치하는 한계높이를 감안하여 0~3.5m 범위는 3.0m를, 4~8m 범위는 5.0m를 계산높이로 하여 각각 계산하되 방음벽 지주간격을 토공구간은 2.0m, 교량구간은 4.0m로 설정하였고 계산목적은 ① 지주규격, ② BASE PLATE, ③ RIB PLATE, ④ ANCHOR BOLT 규격을 구하는 것으로 하였다.
- 고속철도 노반설계시 적용하는 고속철도설계기준에 규정된 방음벽 풍하중은 방음벽 설치지역이나 위치, 선로중심에서 이격거리, 방음벽 높이와 상관없이 일률적으로 $3\text{KN}/\text{m}^2$ ($=300\text{kgf}/\text{m}^2$)로 규정하고 있고 경부고속철도는 이 값을 적용하여 방음벽 지주와 기초설계를 하였다. 그러나, 최근에 제정된 호남고속철도 설계지침(2007. 9)은 방음벽 풍하중 강도에 대하여 철도설계기준(노반편)에 규정된 값과 동일하게 적용하고 열차풍하중은 필요한 경우 적용할 수 있도록 규정하고 있다.
- 고속열차가 시속 350km 속도로 주행하는 경우 방음벽 등 선로변 궤도에 수직평행한 구축물은 강풍에 의한 풍하중과 열차풍하중의 영향을 동시에 받게 되므로 강풍 풍하중에 열차 풍하중(궤도중심에서 이격거리를 감안하여)을 가산하여 적용해야 한다. 그러나, 선로에 열차가 있는 경우에는 열차로 인하여 강풍의 영향이 감소하고 더욱이 양측에 방음벽이 설치되는 경우에는 반대측 방음벽에 의해 강풍 풍하중이 경감되므로 강풍 풍하중에 열차풍하중 전부를 가산하는 것은 과다하므로 열차가 위치한 선로 바깥 쪽에서 선로 방향으로 강풍이 부는 경우에는 열차 및 반대편 방음벽의 영향이 미미하므로 열차풍하중(흡인력)과 강풍 풍하중을 가산한 값을 방음벽 설계풍하중으로 적용하는 것이 합리적이다. 흡인력의 크기는 열차 전두부 진입시 발생하는 초기 (+)압력의 80%~85%정도이므로 강풍 풍하중 100%와 열차 풍하중 최대값의 85%를 합한 값을 설계풍하중으로 제안한다.
- 본 논문에서 가장 합리적이라고 판단한 설계 풍하중은 C1(자연 풍하중 100%+열차풍하중의 85%)이며 1.0KN이하인 경우 최소 1.0KN을 적용하는 것이 바람직하다. 이는 UIC code에 규정된 산식으로 산정하여 독일DB 등이 적용하는 C3와 큰 차이가 없으며 토공구간의 경우 기존 고속철도설계기준의 풍하중 강도(C3)의 30~43% 정도이다.
- 내륙지역 강풍 풍하중과 고속열차 350km/h 주행시 발생하는 열차풍하중을 합하여 방음벽 설계풍하중으로 설정하고 구조계산을 시행한 결과 풍하중 강도 $1.0\text{KN}/\text{m}^2$ 이하인 경우는 부재규격이 동일

하므로 해외 고속철도의 경우와 같이 $1.0\text{KN}/\text{m}^2$ 으로 설정하는 적합하다고 평가할 수 있다.

- 제안 풍하중 (C1) 적용시의 부재 크기는 UIC 규정 풍하중 (C2) 적용시의 부재 크기와 동일하고 기존 고속철도 설계기준 풍하중 (C3) 적용시 부재크기 보다 상당히 감소하는 것으로 분석되었다.
- 호남고속철도 설계지침을 제정하면서 방음벽 설계풍하중을 철도설계기준(노반편), 도로교설계기준과 같이 지역별, 방음벽 높이별로 설정하는 것은 경제성과 유지관리성 측면에서 합리적인 결정이나 고속열차가 운행하는 선로변에 설치되는 방음벽 등 구축물 설계시 강풍 풍하중만을 고려하는 것은 구조물 안정에 문제가 발생할 수 있다. 향후 고속철도 선로변에 설치되는 방음벽 설계풍하중은 강풍에 의한 풍하중에 속도별 열차 풍하중의 85%(흡인력)를 가산한 값으로 결정하는 것이 적합하다고 제안한다.

참고문헌

- (1) R.G Gawthorpe(1998년), "Aerodynamics of trains in the open air", Aerodynamics in Railway Engineering International," Vol 3, No. 3
- (2) UIC code 779-1, "Effect of the slipstream of passing trains on structures adjacent to the track", International Union of Railways, 1st edition, 1.1.96
- (3) K. Kikuchi, K. Uchida, K. Nakatani, Y. Yoshida, T. Maeda, and M. Yanagizawa(1996년), "Numerical Analysis of Pressure Variation Due to Train Passage Using the Boundary Element Method", Quarterly Report of RTRI, Vol. 37, No. 4
- (4) K. Fujii, T. Ogawa(1995년), "Aerodynamics of High-speed trains passing by Each other", Computers and Fluids, Vol 24, No. 8, pp. 897~908
- (5) 김용환, 전중환(1995년), "고속전철과 벽구조물 상호작용에 관한 연구", 대한기계학회 추계학술대회 논문집(Ⅱ), pp. 120~125
- (6) 김동현 외(2002년), "G7 고속철도 터널 공력설계 및 대책개발, G7 선로구축물 시스템 엔지니어링 기술개발 하위단위과제 보고서", 철도기술연구원
- (7) 허남건, 김사량, 김욱, 이상열(1998년), "Wind pressure transient inside a station caused by a passing high speed trains", Proc. of 4th KSME-JSME Fluid Eng. Conf., pp. 173~176
- (8) 김동현, 권혁빈, 김도훈, 송문석, 김문현(2004년), "철도차량의 승강장 통과시 발생하는 공기역학적 영향에 대한 실험적 연구-기준철도역 현장시험)", 한국철도학회 논문집, 제7권, 제2호
- (9) A. Sanz-Andres, J. Santiago-Prowald(2002년), "Train-induced pressure on Pedestrians", Journal of Wind Engineering and Industrial Aero-dynamics, Vol. 90, pp. 1007~1015
- (10) A. Sanz-Andres, J. Santiago-Prowald, C. Baker, A. Quinn(2003년), "Vehicle induced loads on traffic sign panels", Journal of Wind Engineering and Industrial Aero-dynamics, Vol. 91, pp. 925~942
- (11) F. R. A(2003년), "Aerodynamic Effects of High-speed trains", RR03-07
- (12) "호남고속철도 건설사업 기본설계용역 해외출장보고서(유럽3개국)(2007년)", 한국철도시설공단,
- (13) 김동현 외(2007년), "선로중심간격 및 노반폭 기준(안)에 대한 평가보고서", 한국철도기술연구원
- (14) 김동현 외(2004년), "선로구축물 공력특성 평가 및 대책 기술 개발", 철도기술연구원, KRRI 연구 04-91
- (15) 송문석(2004년), "철도차량 및 주행환경 변화에 따른 열차풍 특성 실험", 박사학위논문, 숭실대학교
- (16) 남성원 외(2007년), "호남고속철도 선로 중심간격 설정을 위한 공기역학적 검토", 한국철도기술연구원
- (17) "호남고속철도 건설공사 선로중심간격 및 시공기면폭 검토(안) 보고서(2007년)", (주)삼안, REV2.1