



파이프 트러스 빔을 이용한 경량방음터널의 설계적합성 평가

안동욱¹ · 최성준² · 노명현¹

포스코 철강솔루션마케팅실 구조연구그룹 책임연구원¹
 테크스타코리아(주) 이사²

Evaluation of Design Compatibility for Lightweight Soundproof Tunnels using Pipe Truss Beams

Ahn, Dong-Wook¹ · Choi, Sung-Joon² · Noh, Myung-Hyun¹

¹Senior Researcher, Structure Research Group, Steel Solution Marketing Dept., POSCO, Incheon, Korea
²Director, TechStar Korean Inc., Seoul, Korea

Abstract: In this paper, the structural characteristics of a lightweight soundproof tunnel to reduce the dead load imposed on the bridge are investigated. Subsequently, the design procedure of soundproof tunnel structures is reviewed and a design practice for the lightweight soundproof tunnel is carried out according to the reviewed procedure. Next, design compatibility for the lightweight soundproof tunnel is verified through a detailed finite element analysis. The result for evaluation of design compatibility shows that the lightweight soundproof tunnel has structural safety in structural members, welding zones and foundation parts. It is also confirmed that serviceability and buckling safety is excellent.

Key Words: lightweight soundproof tunnel, lateral sound-absorbing panels, pipe truss beam, design compatibility

1. 서 론

현대 사회는 산업화 이후 지속적으로 발전하고 있으며, 교통수단 및 토목기술의 발전에 따라 인력 및 물자의 이동 또한 가속화되고 있다. 물류의 가속화는 산업 전반의 발전에 지대한 영향을 미치며, 특히 국내의 경우 경부고속도로 등의 고속화도로 및 간선도로의 발전으로 인해 빠른 경제성장을 이룰 수 있었다고 해도 과언이 아니다. 그러나 이러한 현상에 따라 유발되는 교통소음은 도로 주변에 위치한 주택, 상업시설 등에 영향을 미치며, 환경권 등의 생존권적 기본권에 대한 인식이 날로 증가하고 있는 현대 사회에서 그 심각성 또한 날로 대두되고 있기 때문에 이에 대한 다양한 대책이 요구되고 있다. 교통소음에 대한 제어 대책은 크게 차량에 소음 제어 장치를 부착하는 차음설계법과 도로에 방음벽, 방음터널 등을

설치하는 방법이 있다. 그 중 방음터널은 기존의 방음벽에서 발생하는 회절음을 최소화하고, 소음원으로 부터 가시선을 직접 차단할 수 있기 때문에 도심지 교통시설에 대한 소음저감효과를 극대화 할 수 있는 대표적인 기술로 각광받고 있다.

그러나 방음터널을 교량에 적용할 경우, 방음터널의 자중은 교량에 추가적인 고정하중으로 작용하기 때문에, 교량에 대한 구조 안전성을 확보하기 위하여 방음터널의 무게를 설계단계에서 고려하여야 한다. 또한 방음터널은 기타 건축 및 토목 구조물에 비해 시공 조건이 불리한 편이기 때문에, 시공성을 확보하기 위해서는 구조재를 경량화할 필요성이 있다.

따라서, 본 논문에서는 구조재 경량화를 구현하기 위해 파이프 트러스 빔을 이용한 방음터널 구조를 제안하고 각 방음터널 요소별 특징을 간략히 기술하였다. 다음 장에서는 경량 방음터널의 설계 절차를

주요어: 경량방음터널, 직각 흡음체, 파이프 트러스 빔, 설계 적합성

Corresponding author: Noh, Myung-Hyun
 POSCO Global R&D Center, Songdogwahak-ro, Yeonsu-gu, Incheon 406-840, Republic of Korea.
 Tel: +82-32-200-2460, E-mail: mnoh@posco.com

Received February 5, 2016 / Revised February 29, 2016 / Accepted March 3, 2016

검토한 후, 유한요소해석을 통해 경량 방음터널 구조 설계의 적합성을 검증하였다. 마지막으로, 일반적인 설계절차에서는 요구하지 않는 좌굴 안정성을 추가적으로 검토하여 제시하였다.

2. 경량 방음터널의 개요

2.1 경량 방음터널의 구성

교통소음을 감소시키기 위한 경량 방음터널은 파이프 트러스 형태의 빔을 적용하여 경량화하였고, 구조물 자체의 강성을 증대시켜 구조적 안전성, 경제성, 시공성, 유지관리 등이 개선된 기술이다. 경량 방음터널의 구성은 Fig. 1과 같다.

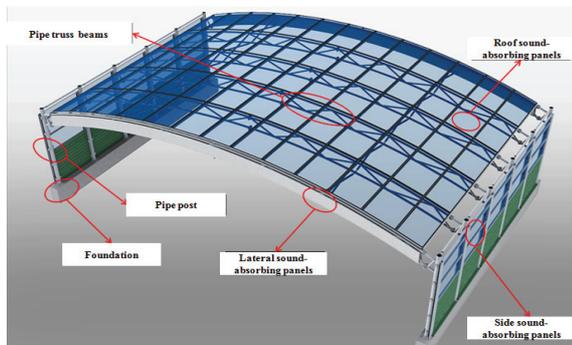


Fig. 1 Configuration of lightweight sound proof tunnels

2.2 경량 방음터널의 각 요소의 특징

경량 방음터널 상부는 파이프를 활용한 트러스 형태의 프레임 휨부재로 중력방향에 대한 강성증대와 길이방향 간격 증대로 물량 절감이 가능한 특징을 가지고 있다. 또한 방음판은 파이프 지주와 2점에서 접합되므로 방음터널 우각부의 강성 및 강도가 증대되어, 횡방향 하중에 대한 하중저항 성능이 향상되는 특징을 지닌다. 특히, 대부분 H형 플랜지 사이에 슬라이딩 방식으로 삽입하여 시공하는 기존 방음판 연결방식은 진동 및 과도한 변위가 발생할 경우 탈락할 가능성이 있는 반면 경량 방음터널의 방음판은 방음판과 구조재가 볼트로 결합하는 지압방식으로 설치되기 때문에 탈락을 방지할 수 있다. Fig. 2는 운용 중 탈부착이 가능하도록 지압방식으로 구성된 방음판 설치방법을 나타내고 있다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 파이프 지주는 방음판이 탈부착될 수 있고, 볼트 지압연결이 가능하도록 구성된다. 파이프 지주는 우각부 상단에서 파이프 트러스 빔과 2점지지로 횡방향 하중성능이 향상되는 특징이 있다. 특히, Fig. 3에서 보이는 바와 같이 파이프 트러스 빔 토출부에 터널 길이방향의 직각 방향으로 흡음체를 설치함으로써 토출부의 소음을 감소시키는 특징을 지니고 있다.

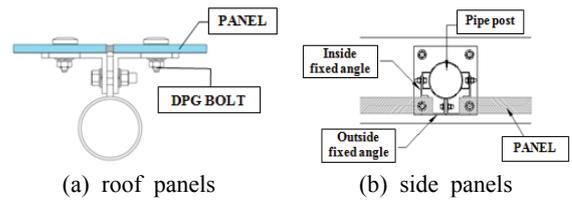


Fig. 2 Installation method for sound-absorbing panels

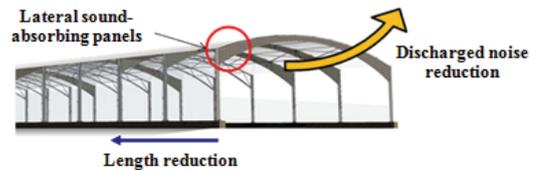


Fig. 3 Function of lateral sound-absorbing panels

3. 경량 방음터널의 설계

3.1 방음터널의 구조설계

방음터널은 현재 명확한 구조설계 기준이 마련되어 있지 않기 때문에, 건축구조기준(2009), 도로교설계기준(2015)을 참조하여 설계를 수행한다. 방음터널의 설계에서 고려되는 하중은 고정하중과 풍하중, 적설하중 등이 있으며, 방음터널의 설계방법은 방음터널의 지주 및 지붕부재, 연결부에 대하여 허용응력설계법에 따라 설계를 수행한다(MOLIT, 2012). 방음터널의 구조설계 흐름도는 Fig. 4에 제시된다.

Fig. 4에서 STEP 1인 설계조건 및 표준단면 결정은 방음터널의 제원검토, 재료선정, 설계하중 선정, 표준단면 가정이 포함되어 있다. 방음터널의 제원은 방음터널이 필요한 지역의 주민들의 의견을 수렴하고, 관계법에서 규정하고 있는 대상지역의 기준 소음레벨 또는 요구되는 소음레벨 및 현재의 소음레벨에 따른 감쇠목표에 따라 방음터널의 구조적 조건을 결정한다. 사용재료 및 설계하중은 도로설계기준에 따라 결정하고, 표준단면은 방음터널의 횡단 조건에 따른 규모, 소음 감쇠목표에 따른 설치 높이 등을 고려하여 지주 및 지붕부재 단면을 가정하고, 지주와 지주기초부의 상세 등에 적합한 경계조건을 가정해야 한다. STEP 2인 방음터널 해석은 수치해석적인 방법을 기본으로 하여 하중과 단면계수를 산정한다. 모델은 2차원 또는 3차원 모델링을 적용하며, 하중조합은 도로교설계기준에서 제시하고 있는 하중의 조합 및 증가계수를 고려하여 방음터널의 해석을 수행한다. STEP 3인 방음터널 부재설계에서는 지주 및 지붕부재, 접합부, 앵커에 대해 허용응력설계법에 따라 각각에 대해 응력을 검토한다. 이 모든 단계를 거쳐 기준에 만족 하면 구조적 안정성을 만족하는 방음터널

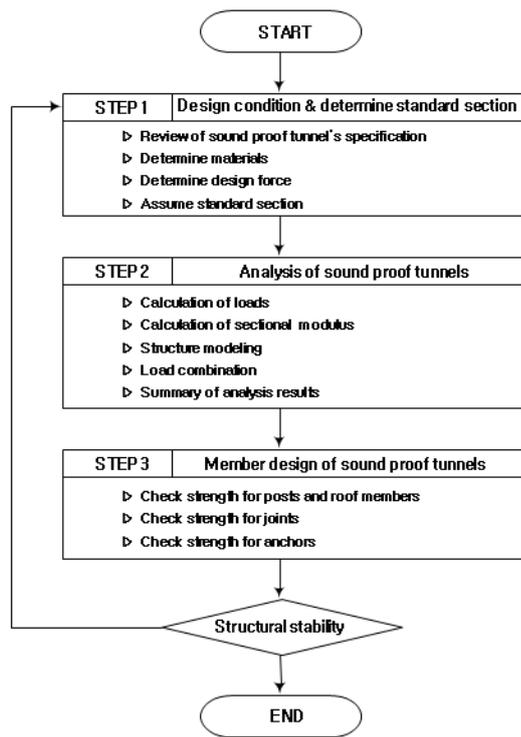


Fig. 4 Design flow for sound proof tunnels (MOLIT, 2012)

설계안이 도출되고 기준에 만족 하지 않을 경우에는 STEP1로 되돌아가 처음부터 설계를 재수행해야 한다.

3.2 경량 방음터널의 구조설계

본 절에서는 Fig. 4의 구조설계 절차에 따른 설계 예제 수행을 통해 경량 방음터널의 구조설계과정을 체계적으로 제시하도록 한다. 경량 방음터널의 구조설계는 유한요소해석을 통해 부재력을 구한 후, 강구조설계기준(2011)에서 제시하고 있는 설계식을 통해 도출한 강도와 비교검토하여 수행하였다. 유한요소해석 프로그램은 MIDAS Civil (MIDAS IT, 2012) 프로그램을 사용하여 수행하며, 방음터널의 구조검토는 자중과 풍하중, 적설하중 및 온도하중 등의 하중을 적용한다.

(1) 하중산정

자중은 구조재 및 지붕판, 측면 방음판, 직각 흡음체에 대하여 고려하며, 각 자재에 대한 무게를 별도로 고려하여 해당 위치에 적용한다. 구조재의 자중은 구조물 및 부재 단면의 형상에 따라 차이를 나타내며, 방음요소의 자중은 Table 1에 정리하였다.

풍하중은 도로교설계기준에서 제시하고 있는 풍하중 산정 방법을 적용하였다. 도로교설계기준에서는 재현기간 100년에 해당하는 개활지에서의 지상 10m

Table 1. Self-weight of sound-absorbing panels

Element	Unit weight (N/m ²)	Working loads (kN/m)
Roof panels	343.23	0.86
Side panels	294.20	0.74
Lateral panels	98.07	0.12

Table 2. Basic design wind speed (KRA, 2015)

Category	Area	Name of place	Basic wind speed (m/s)
I	Inland	Seoul, Daegu, Daejeon, Chuncheon, Cheongju, Suwon, Chupungnyeong, Jeonju, Iksan, Jinju, Gwangju	30
II	West coast	Seosan, Incheon	35
III	Southwest coast	Gunsan	40
	Southern coast	Yeosu, Tongyeong, Busan	
IV	Southeast coast	Pohang, Ulsan	45
	Eastern coast	Sokcho, Gangneung	
	Juju Special region	Jeju, Seogwipo, Mokpo	
V		Ulleungdo	50

의 10분 평균풍속을 기본풍속으로 제시하고 있다. 도로교설계기준에서 제시하고 있는 기본풍속은 Table 2에 나타내었다.

설계 풍속은 구조물의 특성을 반영하여 식 (1)과 같이 구하며, 단위 면적당 풍하중은 도로교설계기준 내에 태풍이나 돌풍에 취약한 지역(해안 인접지역 등)에 위치한 중대지간 교량으로 가정하여 식 (2)와 같이 구한다.

$$V_d = 1.925 \times \left(\frac{Z_b}{Z_g} \right)^\alpha \times V_{10} \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho V_d^2 C_d G K \quad (2)$$

여기서, V_d 는 설계풍속, Z_b 는 지표면으로부터의 높이, Z_g 는 기준경도풍 높이, α 는 풍속고도분포지수, V_{10} 은 기본풍속, P 는 풍하중, ρ 는 공기의 밀도 ($=0.125 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2 / \text{m}^4$), C_d 는 항력계수, G 는 거스트계수, K 는 활중($=1.28$)를 의미한다.

식 (1)과 (2)에서 사용한 계수들은 지표조도구분에 따라 다른 값을 적용하며, 지표조도구분에 따른 각 계수는 Table 3에 나타내었다. 또한 풍하중은 도로교설계기준에서 제시하고 있는 풍하중 계산법과 별개로 AASHTO에서 제안하고 있는 활중계수(K)를 추가로 도입하여 안전측 설계를 유도하였다.

한편, 적설하중은 건축구조기준 및 해설(2009)에서 제시하고 있는 방법을 적용하여 구한다. 즉, 지붕형으로 구성되는 방음터널의 특성을 반영하여 경사지붕의 적설하중 산정식을 적용하여 식 (3)과 같이 구한다.

$$S_f = C_b \cdot C_e \cdot C_t \cdot C_s \cdot I_s \cdot S_g \quad (3)$$

여기서, S_f 는 적설하중, C_b 는 지붕적설하중계수(=0.7), C_e 는 노출계수, C_t 는 온도계수, I_s 는 중요도계수, S_g 는 기본지상적설하중을 나타낸다.

적설하중은 구조물 시공지역에 따라 기본지상적설하중을 설정하며, 구조물의 형태, 특성, 지형 특성에 따라 여러 변수를 고려한다. 적설하중을 결정하기 위한 기본지상적설하중을 Table 4에 나타내었다.

일반적으로 지붕의 적설하중은 주변 여건에 의하여 국부적으로 적설하중이 증가하는 부분을 제외하고 기본지상적설하중보다 작은 값을 갖는다. 평지붕 중 장애물이 없는 부분에 작용하는 적설하중은 평균적으로 기본적설하중의 50%보다 작다(AIK, 2009). 따라서 설계기준에서는 적설하중에 의한 피해의 위험을 허용될 수 있는 범위 내에서 감소시키기 위하여 기본지붕적설하중계수를 도입하고 있으며, 이는 평균보다 큰 0.7을 적용한다. 노출계수는 구조물의 주변환경의 영향을 고려한 계수이다. 즉, 노출계수는 주변 환경에 의한 바람의 영향을 고려하여 적설의 정도를 반영할 수 있도록 설정한 계수이다. 노출계수는 주변 환경에 따라 Table 5와 같이 결정한다. 온도계수는 생애주기동안 적설하중에 노출되는 구조물의 상태를 고려한 계수로서, 난방구조물과 비난방구조물로 구분하며, 일반적으로 건축물은 난방구조물로 구분한다. 따라서 경량 방음터널은 도로 상에 설치하는 구조물임을 감안할 때, 비난방구조물로 구분하는 것이 합리적이다. 온도계수의 결정방법은 Table 6에 나타내었다. 중요도계수는 구조물의 특성상 부여되는 중요도에 따라 구분하여 적용한다. 중요도계수는 Table 7에 나타내었다. 경사도계수는 지붕의 경사도에 따라 구분하는 계수로서 지붕의 장애물 유무, 온도의 고저, 경사도에 따라 다르게 반영한다. 방음터널은 교량 또는 도로 위에 설치되기 때문에 장애물의 유무는 고려하지 않아도 되며, Table 6에서 온도계수를 비난방구조물로 고려하기 때문에 차가운 지붕으로 고려한다. 지붕의 경사도는 차가운 지붕의 경우 $0^\circ \sim 15^\circ$, $15^\circ \sim 70^\circ$, 70° 이상으로 구분하여 고려한다. 본 논문에서 검토한 경량 방음터널의 경사도는 매우 낮기 때문에(최대 약 13°), 경사도계수는 1.0($0^\circ \sim 15^\circ$)을 적용한다. 지붕의 경사에 따른 경사도계수는 Fig. 5에 나타내었다.

온도하중은 정확한 근거자료가 없을 경우 도로교

설계기준(2015)에서 제시하고 있는 온도범위를 적용한다. 도로교설계기준에서 제시하고 있는 온도범위는 Table 8에 나타내었다. Table 8에서 방음터널의 온도 범위는 별도로 제시되어 있지 않기 때문에 보통 기 후에 대한 강교의 온도 범위를 적용한다.

경량 방음터널의 구조 안정성 검토는 위에서 제시한 자중, 풍하중, 적설하중, 온도하중에 대한 조합하중에 대하여 검토한다. 경량 방음터널의 구조 안정성 검토에 사용된 하중조합은 식 (4)~(9)와 같다.

$$LC_1 = D + S \quad (4)$$

$$LC_2 = \frac{D + S + T}{1.15} \quad (5)$$

$$LC_{31} = \frac{D + W}{1.25} \quad (6)$$

$$LC_{32} = \frac{D + W + T}{1.35} \quad (7)$$

$$LC_{33} = \frac{D + W + S}{1.25} \quad (8)$$

$$LC_4 = \frac{D + W + S + T}{1.35} \quad (9)$$

여기서, LC_i 는 조합하중, D 는 자중, W 는 풍하중, S 는 적설하중, T 는 온도하중을 의미한다.

(2) 구조해석

경량 방음터널의 구조검토를 위한 유한요소해석 모델이 Fig. 6에 나타내었다. 경량 방음터널의 유한요소해석 모델은 지점을 고정단으로 가정하며, 구조재 외의 자재(지붕판, 측면 방음판, 직각 흡음체)는 하중으로 치환하여 적용한다. 해석결과, 반력은 Table 9, 부재력은 Table 10에 나타내었다.

(3) 구조설계

방음터널을 구성하는 각 구조재는 STK400 강종의 원형단면 부재로 구성되어 있으며, 기둥부재, 파이프 트러스 빔의 상·하연재 및 파이프 트러스 빔의 사재로 구분하여 설계한다. 또한 허용응력설계법에 의한 강구조설계기준(2003)을 참고로 하여 각 부재를 설계한다 (KSSC, 2004). 강구조설계기준에서, 원형관은 세장비가 200을 초과하지 않아야 하고, 축방향력, 전단력, 휨모멘트 및 전단력과 휨모멘트에 대한 조합하중을 검토하도록 규정하고 있다. 강구조설계기준에 근거한 각 부재의 설계결과, 경량 방음터널의 각 구조 부재는 모두 충분한 설계 안전도를 확보하고 있는 것으로 나타났으며, 그 결과가 Table 11에 정리되어 있다. 또한, 기둥부재는 콘크리트 벽체에 베이스플레이트와 앵커볼트를 이용하여 고정하게 되며 Table 9에서 도출된 설계하중 값을 적용하여 앵커볼트의

Table 3. Criteria for surface roughness selection (KRA, 2010)

Surface roughness category	Surface condition	α	Z_b (m)	Z_g (m)
I	▪ coast, on the sea	0.12	2	200
II	▪ areas dotted with open terrains, farmlands, rural trees and low-rise buildings	0.16	5	300
III	▪ areas of dense trees and low-rise buildings ▪ areas dotted with middle and high-rise buildings ▪ gentle hill areas	0.22	10	400
IV	▪ areas of dense middle and high-rise buildings ▪ rugged hill areas	0.29	20	500

Table 4. Basic ground snow load (AIK, 2009)

Area	Ground snow loads (kN/m ²)
Seoul, Suwon, Chuncheon, Seosan, Chungju, Daejeon, Chupungnyeong, Pohang, Gusan, Daegu, Jeonju, Ulsan, Gwangju, Busan, Tongyeong, Mokpo, Yeosu, Jeju, Seogwipo, Jinju, Icheon	0.50
Jeongeup, Uljin	0.65
Incheon	0.80
Sokcho	2.00
Gangneung	3.00
Ulleungdo, Daegwallyeong	7.00

Table 5. Snow exposure factor (AIK, 2009)

Terrain category	Exposure coefficient (C_e)
A. strong windy areas with open roofs of no windbreak in every direction by surrounding environment such as terrains, high-rise structures, trees, etc.	0.8
B. strong windy areas with some windbreaks	0.9
C. locations where a reduction of the roof loads can not be expected by the removal of snows with wind due to terrains, high-rise structures or some surrounding trees.	1.0
D. areas that not affected a lot by wind or exist some windbreak on roofs with terrains, high-rise structures or some trees.	1.1
E. dense forest areas to have little effect on the wind as roofs located among dense neeleaf trees	1.2

Table 6. Thermal factor (AIK, 2009)

Thermal condition	Thermal factor (C_t)
Heated structures (controlled structures with snow load)	1.0
Unheated structures (uncontrolled structures with snow load)	1.2

Table 7. Important factor (AIK, 2009)

Important category	Special	1	2	3
Important factor (I_s)	1.2	1.1	1.0	0.8

Table 8. Temperature range (KRA, 2015)

Climate	Steel bridge (steel deck plates)	Composite bridge (steel girders and concrete deck plates)	Concrete bridge
Normal	-10°C ~ 50°C	-10°C ~ 40°C	-5°C ~ 35°C
Cold	-30°C ~ 50°C	-20°C ~ 40°C	-15°C ~ 35°C

Table 9. Reaction by supporting point

Classification	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kNm)	M_y (kNm)	M_z (kNm)
Reaction	27.16	0.13	16.50	0.53	42.84	0.02

Table 10. Member forces

Classification	(+) Temperature	(-) Temperature
Tensile force (kN)	54.64	-
Compressive force(kN)	-	54.64
Shear force (kN)	41.99	41.99
Flexural moment (kNm)	42.87	42.87

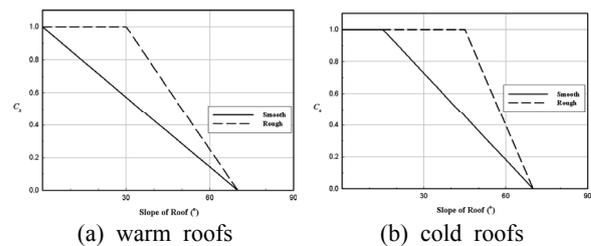
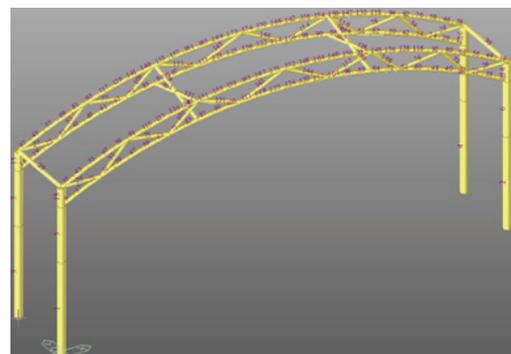

Fig. 5 Roof slope factor (AIK, 2009)

Fig. 6 Finite element analysis model for lightweight sound proof tunnels

Table 11. Design results for structural members of lightweight sound proof tunnels

Examination item	Element			Criteria
	Column members	Upper & Lower chords	Diagonal members	
Sectional shape	P-216.3×8	P-114.3×4	P-89.1×4	-
Slender ratio	33.9	51.3	43.1	200.0
Axial (f_a/F_a)	0.007	0.285	0.145	1.000
Shear (f_v/F_v)	0.040	0.003	0.002	1.000
Flexural (f_b/F_b)	0.768	0.197	0.045	1.000
Combined stress	0.775	0.483	0.190	1.000
Check	OK	OK	OK	-

Table 12. Deflections review of the sound proof tunnel

Deflection			Review			Check
Vertical δ_v (mm)	Horizontal δ_h (m)	Combined δ_c (mm)	Span L (mm)	$L/300$	$L/300$ δ_v	
12.01	0.66	12.03	12,000	40.00	3.33	OK

인장 및 전단 강도와 매입길이 그리고 베이스플레이트의 두께를 설계해야 한다. 앵커와 베이스플레이트 관련 설계과정과 결과는 본 논문에서 다루고 있는 경량 방음터널 구조설계 적합성 평가를 위한 핵심사항이 아니므로 생략하기로 한다.

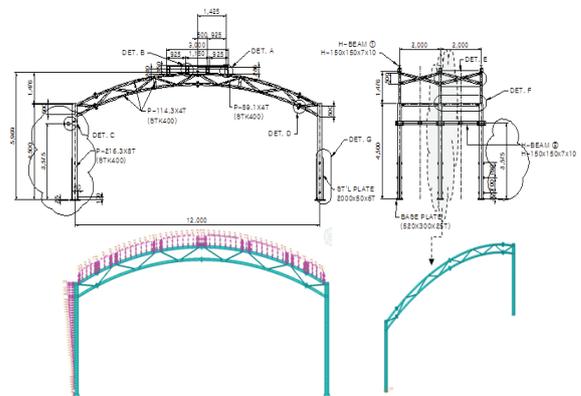
마지막으로 외부하중에 대한 경량 방음터널의 처짐은 식 (10)에 따라 검토할 수 있다. 검토 결과, 경량 방음터널의 최대 수직처짐은 12.01mm로 도출되었으며, 약 3.33 정도의 안전율을 확보하고 있어 경량 방음터널은 충분한 사용성을 확보하고 있는 것으로 판단된다. 경량 방음터널의 처짐 검토 결과는 Table 12에 나타내었다.

$$\delta_h \leq L/300 \quad (10)$$

여기서, δ_h 는 수직처짐을 L 은 경량 방음터널의 경간을 나타낸다.

4. 경량 방음터널의 설계 적합성 평가

본 장에서는 경량 방음터널의 설계의 적합성을 평가하기 위하여 상세 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 MIDAS Civil 2012를 사용하였으며, 해석모델은 3D 판요소 (plate element)를 적용하여 구성하였다.

**Fig. 7 Finite element analysis model for a unit structure**

4.1 유한요소해석

유한요소해석모델은 3장에서 검토한 경량 방음터널 중 1개의 파이프 트러스 빔과 2개의 파이프 지주로 구성된 단위 구조물에 대하여 구성하였다. 해석모델의 재료는 STK400을 적용하였으며, 파이프 트러스 빔과 파이프 지주간의 연결은 볼트(M20-L60)를 프레임 요소로 모델링하여 연결부(disk plate) 사이를 연결하였다. 단위 구조물의 유한요소해석모델을 Fig. 7에 나타내었다.

유한요소해석모델의 경계조건은 기초와의 연결부에 힌지로 가정하였으며, 하중은 풍하중과 적설하중을 설계기준(대한건축학회, 2009)에서 제시한 것과 같이 분포시켜 각각 해당 재하면에 재하하였다. 또한 풍하중은 파이프 지주의 높이가 증가할수록 증가하는 삼각형 분포, 적설하중은 파이프 트러스 빔 상부에 등분포로 작용하는 것으로 가정하였다. 단위 구조물에 대한 유한요소해석시 작용하는 하중의 총합은 자중의 경우는 16.21kN이며, 풍하중과 적설하중은 각각 42.00kN과 22.50kN으로 계산되었다.

Table 13. Results for detailed FE analysis

Maximum effective stress (MPa)		Maximum shear stress (MPa)		B/A	D/C	Check
Maximum stress (A)	Allowable stress (B)	Maximum stress (C)	Allowable stress (D)			
75.94	140.00	43.63	80.00	1.84	1.83	OK

Table 14. Deflection results from detailed FE analysis

Deflection			Review			Check
Vertical δ_v (mm)	Horizontal δ_h (m)	Combined δ_c (mm)	Span L (mm)	$L/300$	$L/300$ δ_v	
2.26	0.79	2.26	12,000	40.00	17.70	OK

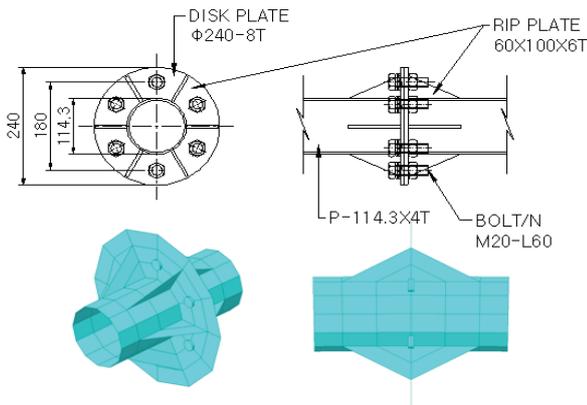


Fig. 10 FE analysis models for connection parts between structural members

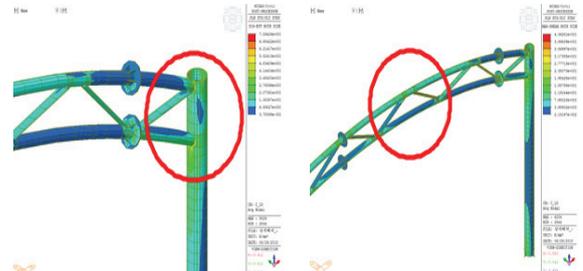


Fig. 8 Maximum stresses and their locations

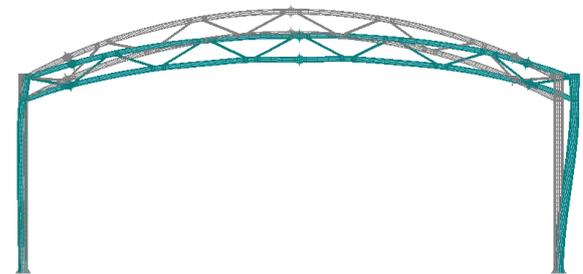


Fig. 9 Deflection shape

4.2 구조적 거동 평가

본 절에서는 유한요소해석결과를 통해 최대유효응력과 최대전단응력의 발생위치를 검토하고 그에 대한 구조적 거동 특성을 분석한다. 또한 변형형상을 통해 경량 방음터널의 구조적 성능을 평가한다.

유한요소해석결과, 경량 방음터널의 최대유효응력은 파이프 트러스 빔과 파이프 지주의 접합부 중 우각부에서 발생하였다. 이와 같은 현상은 파이프 트러스 빔이 외부하중을 지지하기에 충분한 강성과 강도를 확보하고 있기 때문에 우각부에 발생하는 휨모멘트가 상대적으로 증가하는 것으로 판단된다. 또한 우각부에 발생한 최대유효응력은 75.94MPa로 STK400의 허용응력(140MPa)의 약 54%에 해당하며, 구조적으로 안전한 것으로 도출되었다.

경량방음터널의 최대전단응력은 파이프 트러스 빔 내의 상하연재와 사재의 접합부에서 발생된다. 이와 같은 현상은 큰 수직하중이 작용하는 파이프 트러스 빔 내의 중앙부에서 상대적으로 강성이 가장 작은 사재의 변형에 의한 것으로 판단된다. 또한 최대전단응력은 43.63MPa로 STK400의 허용응력(80MPa)의 55%에 해당하며, 구조적으로 안전한 것으로 도출되었다. 경량 방음터널의 구조해석 결과가 Table 13에

제시되며, 최대유효응력과 최대전단응력 발생부위가 Fig. 8에 제시된다.

경량 방음터널의 처짐은 수평처짐에 비해 수직처짐이 더 크게 발생하였으며, 수직처짐량은 4.31mm로 나타났다. 이와 같은 현상은 상부에서 재하되는 적설 하중에 대한 수직 변위와 측면에서 재하되는 풍하중에 의한 휨모멘트의 영향이 복합적으로 작용하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 경량 방음터널의 경간(12m)에 대한 수평변위의 비는 약 1/2,784로 경량 방음터널의 처짐 기준값(L/300)보다 약 17.70배 작게 발생하여 사용성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 유한요소해석을 통해 도출된 경량 방음터널의 처짐형상은 Fig. 9에 나타내었으며, 처짐 및 검토 결과는 표 Table 14에 나타내었다.

4.3 연결부 안정성 평가

경량 방음터널의 파이프 트러스 빔간의 연결과 파이프 트러스 빔-파이프 지주의 연결부는 Fig 10과 같이 같이 모델링하였으며, 이 절에서는 경량 방음터널의 연결부에 발생한 내하력 또는 응력을 통해 연결부의 안전성을 평가하였다. 즉, 경량 방음터널의 연결부는 볼트와 연결판(disk plate)에 대한 검토를 별

Table 15. Safety review for connection parts between structural members

FE analysis results (kN)				Safety review		
Tensile force (A)	Shear force			Nominal tensile force (kN)	Nominal shear force (kN)	check
	F_y	F_z	combined (B)			
1.12	0.054	0.864	0.87	847.80	452.16	OK

Table 16. Safety review for buckling according to load cases

Load case	Design loads (A, kN)		Buckling loads (B, kN)		Safety (B/A)	Check
	wind loads	snow loads	wind loads	snow loads		
LC2	84.00	-	10,945.2	-	130.30	OK
LC3	-	45.00	-	1,073.3	23.85	OK
LC4	84.00	45.00	1,948.0	1,043.6	23.19	OK

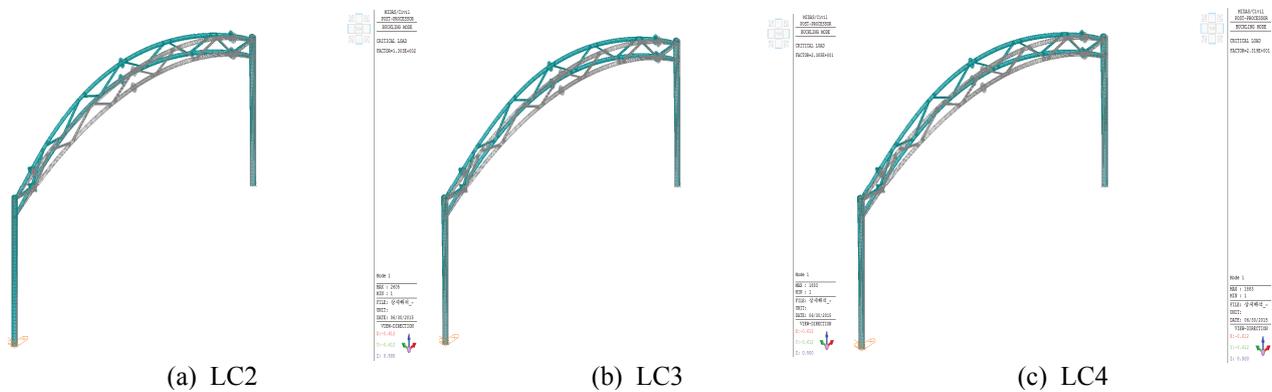


Fig. 11 Buckling mode shapes for each load case

도로 수행하였다. 강구조설계기준해설(2011)에서 볼트 연결부는 인장강도와 전단강도를 검토하도록 규정하고 있으며, 인장 및 전단에 대한 공칭강도는 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$R_n = F_n A_b \tag{11}$$

여기서, R_n 은 공칭하중, F_n 은 공칭강도, A_b 는 볼트의 공칭 단면적을 의미한다. 또한 연결부는 전단 영향을 고려한 인장강도를 고려하도록 규정하고 있으며, 전단 영향을 고려한 설계인장강도는 식 (12)를 통해 구할 수 있다.

$$F_{nt}' = 1.3F_{nt} - \frac{F_{nt}}{\phi F_{nv}} f_v \leq F_{nt} \tag{12}$$

여기서, F_{nt}' 는 전단 영향을 고려한 인장응력, F_{nt} 와 F_{nv} 는 공칭인장강도와 공칭전단강도, ϕ 는 강도감소계수(=0.75), f_v 는 소요전단응력을 나타낸다. 식 (12)에서 전단 영향을 고려한 인장강도는 소요인장응

력 또는 소요전단응력이 설계응력의 20% 이하인 경우 무시할 수 있다. 경량 방음터널의 연결부의 볼트는 F8T를 적용하였으며, 볼트의 공칭 단면적은 314mm²이고, 사용 볼트 개수는 6개이다. 연결부의 유한요소해석 및 검토 결과가 Table 15에 제시된다. 검토 결과, 연결부는 인장 및 전단에 대하여 충분한 안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 경량 방음터널의 각 구조재는 일체거동에 가까운 구조적 거동을 나타낼 것으로 판단된다. 또한 소요응력은 설계응력의 20% 이하로 나타났기 때문에 식 (12)에 대한 검토는 생략하였다.

4.4 좌굴 안정성 평가

본 절에서는 경량 방음터널의 유한요소해석을 통해 풍하중(LC2)과 적설하중(LC3) 및 그에 대한 조합하중(LC4)에 대한 좌굴 안정성(buckling stability)을 검토하였다. 좌굴해석 결과, 경량 방음터널의 좌굴 형상(mode shape)은 모든 하중에 대하여 면외방향에 대한 전체좌굴(global buckling)이 발생하였으며, 지주 파이프보다 파이프 트러스 빔의 변위가 더 크게 나타났

Table 17. Comparison of safety between design and FE analysis

Review	Working stress (A)	Allowable stress (B)	B/A	Check
Design	0.78	1.000	1.29	OK
FE analysis (MPa)	75.94	140.00	1.84	OK

다. 이러한 현상은 지주 파이프보다 상대적으로 파이프 트러스 빔의 강성이 작기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 파이프 트러스 빔은 정적하중에 대하여 상하 현재 및 사재가 복합적으로 거동하여 저항하지만, 좌굴이 발생할 경우, 각 부재가 별도로 저항하기 때문에 강성이 큰 지주파이프에 비해 상대적으로 강성이 작은 파이프 트러스 빔의 각 부재들이 큰 변위를 일으키는 것으로 판단된다.

경량 방음터널은 좌굴하중은 LC2에 대하여 10,945kN, LC3에 대하여 1,073kN, LC4에 대하여 풍하중 1,948kN, 적설하중 1,044kN으로 나타났다. 따라서 경량 방음터널은 설계하중 내에서 좌굴이 발생하지 않아 안정성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 또한 풍하중에 대한 좌굴강도가 적설하중에 비해 약 10.2배 크기 때문에, 경량 방음터널의 좌굴은 적설하중에 의해 지배되는 것으로 도출되었다.

실제 시공되는 경량 방음터널은 유한요소해석 모델과는 달리 차량 진행방향에 대하여 각 단위 구조물이 브레이싱으로 연결되어 있기 때문에 실제 좌굴강도는 해석결과에 비해 클 것으로 판단된다. 따라서 경량 방음터널은 좌굴에 대하여 매우 안전한 구조인 것으로 판단된다. 좌굴 안정성 평가 결과는 Table 16에 나타내었으며, 각 하중에 대한 좌굴형상은 Fig. 11에 나타내었다.

4.5 설계와 해석 결과 비교 검토

유한요소해석은 판요소를 이용한 상세해석을 수행하였기 때문에 설계에 적용한 프레임해석 결과보다 정밀한 결과를 얻을 수 있다. 따라서 본 절에서는 상세해석을 통해 얻은 해석결과와 설계결과를 비교하여 설계 적절성을 평가하였다.

Table 11에서 설계를 통해 구한 조합응력은 기둥부재에서 가장 크게 나타났으며, 약 1.29배(조합응력비=0.775)의 안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 또한 Table 13의 유한요소해석을 통해 구한 최대유효응력은 허용응력에 비해 약 1.84배의 안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 즉, 설계에 대한 안전율은 유한요소해석을 통해 얻은 안전율을 비해 약 1.43배 작기 때문에, 설계 결과는 추가적인 안전율을 확보하고 있는 것으로 판단된다. 설계 및 유한요소해석

Table 18. Comparison of serviceability between design and FE analysis

Review	Deflection δ (mm)	$L/300$ A (mm)	A/δ	Check
Design	12.01	40.00	3.33	OK
FE analysis (MPa)	2.26		17.70	OK

을 통한 경량 방음터널의 안전성 비교 평가 결과를 Table 17에 제시되어 있다. Table 17에서 설계는 축방향응력-휨응력에 대한 조합응력을 통해 검토한 결과이다.

설계하중(LC4) 재하시 구조물의 처짐은 설계시 12.01mm, 유한요소해석시 2.26mm로 나타났다. 즉, 설계에서 고려한 처짐은 유한요소해석에서 발생한 처짐에 비해 약 5.31배 크게 나타났으며, 충분한 안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 경량 방음터널은 설계과정에서 사용성에 대한 충분한 안전율을 확보하고 있는 것으로 판단된다. 설계 및 유한요소해석을 통한 경량 방음터널의 안전성 비교 평가 결과는 Table 18에 제시된다.

5. 결 론

본 논문에서는 경량화를 통해 교량에 추가적인 하중을 최소화하고, 시공성을 향상시키기 위한 경량 방음터널 구조의 특징을 검토하고, 경량 방음터널 구조 설계 절차에 따른 설계 예제를 수행하고, 설계의 적합성을 상세 유한요소해석을 통해 검증하였다. 본 논문에서 수행한 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 경량 방음터널의 구조설계는 도로교설계기준(2015), 건축구조기준 및 해설(2009) 및 강구조설계기준(2003) 등을 참고로 하여 수행하며, 자중, 적설하중, 풍하중, 온도하중을 고려하여 허용응력설계법에 의해 설계한다. 설계결과, 경량 방음터널의 구조재 및 기초부와 용접부는 구조적 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났으며, 사용성 또한 만족하는 것으로 나타났다.

(2) 경량 방음터널의 상세해석 결과, 유효응력 및 전단응력에 대하여 허용응력을 만족하는 것으로 나타났으며, 처짐 또한 기준보다 작게 나타났다. 따라서 경량 방음터널은 안전성 및 사용성을 만족하는 것으로 나타났다.

(3) 상세해석 결과, 구조재의 연결부에 발생하는 하중은 매우 작게 나타났다. 따라서 경량 방음터널을

구성하는 구조재는 일체거동하는 것으로 나타났다. 또한 좌굴 형상은 모든 하중에 대하여 파이프 트러스 빔이 면외방향으로 전체좌굴하는 것으로 나타났으며, 좌굴강도는 설계하중에 비해 23.19배 이상 크게 나타나 안전한 것으로 나타났다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 (주)포스코, 테크스타코리아(주), (주)대한건설이엔지, (주)한진중공업, (주)포스코건설의 공동연구로 수행되었습니다. 참여 연구진들과 관계자분들 노고에 감사드립니다.

REFERENCES

- Architectural Institute of Korea (AIK) (2009). "*Korean building code and commentary*." Architectural Institute of Korea.
- Korean Society of Steel Construction (KSSC) (2003). "*Korean steel structure design - allowable stress design method*." Korean Society of Steel Construction.
- Korean Society of Steel Construction (KSSC) (2004). "*Engineering of Steel Structures*." Goomibook (in Korean).
- Korean Society of Steel Construction (KSSC) (2011). "*Korean steel structure design code and commentary*." Korean Society of Steel Construction.
- Korea Road Association (KRA) (2015). "*Korean highway bridge design code*." Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- MIDAS Information Technology Co., Ltd. (2012). Analysis Reference, MIDAS Civil.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2009). "*Korean building code*." Architectural Institute of Korea.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2012). "*Road design manual*." Ministry of Land, Infrastructure and Transport.