

## 4차선급 신형식 방음터널 거더 제안 및 구조적 성능평가

고원희<sup>1</sup>, 김민재<sup>2</sup>, 마천<sup>3</sup>, 강덕만<sup>4</sup>, 지광습<sup>5\*</sup>

### Proposal of a New Type of 4-Lane Soundproof Tunnel Girder and Structural Performance Evaluation

Won-Hui Goh<sup>1</sup>, Min-Jae Kim<sup>2</sup>, Chuan Ma<sup>3</sup>, Duck-Man Kang<sup>4</sup>, Goang-Suep Zi<sup>5\*</sup>

**Abstract:** The soundproof tunnels have been generally designed with H-beam girders, and the high weight of H-beam may cause the excessive design of the substructure. To solve this problem, this paper proposes a new soundproof tunnel girder design composed of pipes and discontinuous plates. First, the structural behavior of the straight girder according to the design parameters was examined through finite element analysis. The arrangement and shape of the plates were determined as the design parameter, to obtain the optimal design of girder. After then, the structural behavior and buckling stability of the arched girder were subsequently evaluated. As a result of the parameter analysis, it was confirmed that the axial force acting on the girder increased and the moment decreased as the ratio of unsupported sections decreased or the number of supporting plates increased. The stress concentration on the pipe member was relieved by increasing the long axis length of the elliptical plate. Arched girder analysis showed that the structural efficiency increase as the long axis of elliptical plate increase. As a result of the buckling evaluation, the buckling threshold load of the three connected girders was about 3.7 times higher than the design load. Consequently, it was confirmed that the proposed soundproof tunnel structure design satisfies both light weight and structural safety.

**Keywords:** Soundproof tunnel, Structure analysis, Girder analysis, Porosity, New type girder

## 1. 서론

대한민국 현행법상 교통 소음 저감을 필요로 하는 주택, 학교, 병원 등의 보호대상지역은 적정 방음 시설이 설치되어 교통 소음 저감이 필수적으로 이루어져야 한다. 하지만 아파트 고층화 또는 주거 인근 지역에 고속도로 설치 등으로 인해 교통 소음이 기존 방음 시설의 소음 감쇠 범위를 초과하는 현상이 발생하였다. 이를 해결하기 위해 2010년부터 방음터널 설치량이 증가하여, 2020년 기준 수도권에만 약 10개 이상의 방음터널이 설치되었다. 그러나 현재까지는 방음터널의 구조적 특징을 고려한 설계가 수행되고 있지 않다. 특히 방음터널 형식의 대부분을 차지하는 H형강 트러스 방음터널의 경우 높은 중량으로 하부구조에 많은 부담을 주기 때문에 경량화된 구

조와 안정성을 모두 갖춘 신형식 거더 개발이 필요하다(Yoon et al., 2018).

최근 10년간 국내외에서 수행된 방음터널 구조에 대한 연구 사례를 보면, 연구 동향은 크게 1) 방음터널 구조 경량화, 2) 진출입부 작용 풍하중 저감, 3) 방음터널/방음벽 혼합 구조를 활용한 설계 효율 극대화 및 4) 구조 수명 예측으로 분류 가능하다. 구조 경량화 연구에서는 기존 H형강 대신에 파이프 트러스 빔을 적용하여 경량 방음터널을 설계하고 안전성을 평가한 사례가 있다(Ahn et al., 2016; Noh et al., 2016). 또한, 플랜지 접합부, 강관 파일의 두께와 직경을 변화하여 최대 응력을 분석하여 최적 설계를 도출하였다(Noh and Lee, 2017; Yoon et al., 2018). 그러나 부재의 직경과 두께만으로는 경량화와 안전성을 모두 만족하는 설계가 어렵기 때문에 고강도 소재의 사용이 불가피하고 시공 친화적인 설계 검토가 부족하였다. 터널형식에 개구부를 적용하는 구조 경량화 및 풍하중 감소 설계의 경우, 방음터널의 풍하중을 저감하기 위해 벽면 일부를 개방하여 풍하중 저감 효과를 분석하고 이를 실험으로 검증하는 연구를 진행하였다(Son et al., 2014; Kim et al., 2015; Kim and Kim, 2017). 개구율에 따른 풍하중 저감효과를 분석하여 최적 설계변수를 도출하였으나, 개구부로 인한 소음을 완전히 차단하지 못하여 추가적인 소음기를 설치해야하

<sup>1</sup>학생회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 석박사통합과정

<sup>2</sup>정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 연구교수

<sup>3</sup>정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정

<sup>4</sup>중신회원, 동아이엔지(주) 대표이사

<sup>5</sup>정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 교수

\*Corresponding author: g-zi@korea.ac.kr

School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea

University, 145 Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul, 02841, Republic of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2021년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2021년 12월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

는 등 시공성 및 사용성에 대한 불편함을 야기하였다. 방음터널과 방음벽을 혼합적용한 효율적 설계에 대한 연구의 경우 기존 H형강 프레임공법과 강관 트러스 적용 설계에 대한 구조 경량화, 공사비, 유지보수비에 대한 비교분석을 제시했으나, 설계 요소에 대한 매개변수에 대한 분석이 없어 최적 설계에 대한 검증이 부족하였다(Lee et al., 2017). 또한, 방음터널 구조의 설계 수명 요소를 분석하였으나, 이에 기반한 설계 개선 방안 연구로 이어지지 못하였다(Kim and Kim, 2020; Wu et al., 2021). 최근 연구 사례를 검토한 결과 일부 방음터널 구조에 대한 설계변수 분석을 통해 개선된 방음터널 설계안이 도출되었으나, 방음터널 자체의 구조적 특성을 분석하고 이를 기반으로 한 개선안을 도출하지 못하였다고 판단된다.

방음터널의 거더 구조를 살펴보면 휨모멘트가 지배적인 구조이며, 일반적으로 휨 거더 단면은 플랜지와 복부로 구성된다. 따라서 휨저항 능력을 극대화하기 위해 플랜지의 단면적이 복부 단면적보다 더 크게 배치되는 것이 일반적이다. Fig. 1에는 플랜지의 단면적이 복부의 단면적에 비해 크게 배치된 H형 단면과 플랜지의 역할만을 극한적으로 강조한 샌드위치 단면을 도시하였다. 샌드위치 단면에서는 복부의 강성이 너무 낮아 전단변형으로 인해 추가적인 변형이 불가피하게 발생한다. H형 거더에서 복부판에 공동단면을 적용하여 경량화 및 구조적 효율성을 증대할 수 있지만, 기성 제품인 H형 거더는 현장 여건에 따라 유연하게 제작하기 위한 추가적인 비용이 소요된다. 따라서, 본 신형식 방음터널 거더는 기존 H형강 플랜지를 기성 강관 파이프로 상/하현재로 적용하고 복부판에 나비형 공동 단면을 일정 간격으로 불연속하게 배치하여 신형식 거더를 설계하고자 한다.

신형식 방음터널 거더의 복부판 물량을 감소시키면 중량은 감소하는 반면, 전단변형이 증가한다. 전체적으로 강성이 감소하면 횡좌굴에 대한 위험성도 증가하며, 반대의 경우에는 중량이 증가하는 반면 단면의 안정성이 개선된다. 따라서 안정성과 중량을 모두 만족하는 최적 단면 배치를 파악하기 위

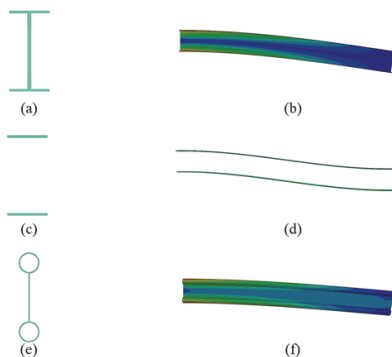


Fig. 1 (a,b) I-type girder, (c,d) Sandwich girder, (e,f) New type soundproof tunnel girder

해서는 설계 요소에 대한 매개변수 연구가 필요하다. Dogan and Ozyuksel(2020)은 공동단면의 크기를 매개변수로 설정하고 방정식을 사용한 최적화를 적용하여 빔의 중량을 줄인 사례가 있다. 그러나, 방음터널의 시공성 및 방음판의 규격을 고려한 매개변수 도출이 필요하여 Dogan and Ozyuksel과 동일한 방법의 적용은 부적합한 것으로 판단된다. 따라서 불연속적인 거더 시스템 및 다양한 설계조건을 고려해야하는 방음터널 설계 특성상 매개변수별 성능평가를 이용한 변수도출이 바람직하다.

본 연구에서는 설계 요소에 대한 매개변수 분석으로 방음터널에 대한 구조적인 특징을 분석하여 경량화와 안전성을 동시에 만족하는 방음터널 최적 설계를 제시하고자 한다. 먼저 거더의 복부판에 공동 단면 부재를 적용하여 구조 효율성을 극대화한 신형식 방음터널 거더 형상을 제안하고자 한다. 최적 형상을 개발하기 위해, 단순화된 직선형 단면 거더의 매개변수를 분석하고, 매개변수 중 성능이 좋은 변수들을 선별하여 아치형 거더에 적용하고 거동을 분석하였다. 마지막으로 인접한 세 거더를 연결한 방음터널의 거동을 분석하여 신형식 방음터널 거더 안전성을 검증하였다.

## 2. 연구 개요 및 분석 방법

### 2.1 방음터널 제원

국토교통부의 도로구조규칙(MOLIT, 2015)에 따라 4.5m 높이와 적정 모서리폭의 시설 한계 벗어나도록 방음터널이 설계 되어야한다. 이를 준수하여 본 신형식 방음터널은 4차선 도로를 대상으로 Fig. 2와 같이 아치형으로 설계되었다. 방음터널의 횡단면은 기둥 역할을 하는 두 지주와 지붕재를 지지하는 거더로 구성되어 있으며, 거더는 상/하현재 및 복부판으로 구성되어 있다.

기존 방음터널의 거더는 H형강으로 구성되어 있으나, 새롭게 제안하는 거더는 파이프로 구성된 상/하현재와 공동단면이 적용된 복부판으로 구성되어 있다. 신형식 방음터널의 길이는 4차선 도로의 폭을 고려하여 전체 평면 길이 23.9m로 설계하였고, 지주는 4.885m 중앙부는 3.004m의 솟음이 있다. 구

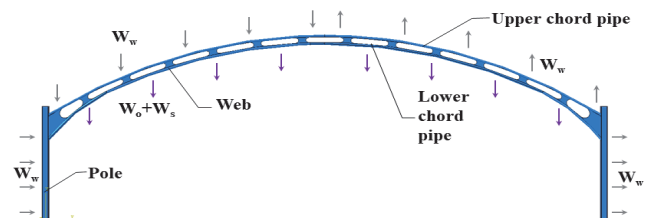


Fig. 2 Schematic diagram and loading conditions of the new type soundproof tunnel girder

**Table 1** Design specification and load of the new type soundproof girder

Member	Steel type	Load type	Notation	Load [N/mm]		
Upper chord	SNT355	Wind load	$W_w$	0.4840		
		Snow load	$W_s$	1.008		
		Self-weight	$W_0$	0.0642		
Lower chord	SNT355	Self-weight	$W_0$	0.0642		
		Web	SS275	Self-weight	$W_0$	-
		Pole	SS400	Wind load	$W_w$	0.6000

조물의 재료는 SNT355(구 STK490)과 SS275(구 SS400) 사용하였고, 각 재료의 허용응력은 일반 허용응력에 하중 조합을 고려하여 1.2의 허용응력증가계수를 곱한 258MPa(STK 490)과 168MPa(SS275)이다. 방음터널의 설계하중은 건축구조기준과 도로설계편람을 참고하여 하중을 산정하여 Table 1에 정리하였고 하중 방향은 Fig. 1을 참고할 수 있다(AIK, 2016; MOLIT, 2009). 여기서 복부판의 자중은 상/하현 부재의 자중(0.0642N/mm×2)에 포함하여 해석을 진행하였다.

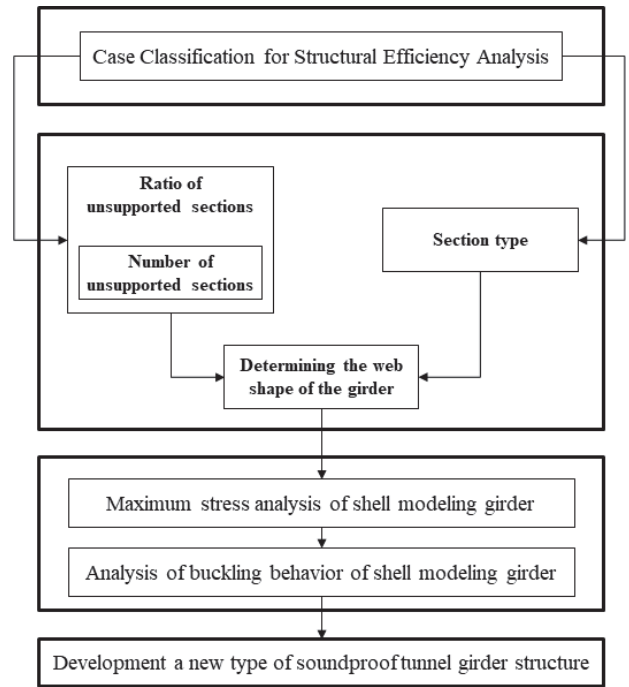
## 2.2 매개변수 분석

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 매개변수에 따른 구조 효율성 분석을 수행하고, 거더의 안전성을 분석한 뒤 최종적으로 신형식 거더 구조를 개발하였다. 먼저 직선형 거더를 통해 신형식 방음터널의 구조적 효율성을 파악하고 효율적인 거더 형상을 결정하였다. 다음으로 결정된 거더 형상을 포함한 전체 거더 분석을 통해 응력 집중을 고려한 해석을 수행하여 세부 구조를 확정하였다. 최종적으로 인접한 세 거더를 연결하여 좌굴 거동에 대한 안정성을 평가하였다. 각 단계에서 유한요소 해석프로그램인 Abaqus를 사용하여 구조적 거동을 평가하였다(ABAQUS, 2015).

구조 효율성은 거더 복부판의 공극률에 따른 최대 응력으로 평가될 수 있다. 거더 복부판의 비지지구간 비율  $\rho$ 는 식 (1)과 같이, 단위 비지지 길이  $L_h$ 와 전체 거더 길이  $L_0$  및 비지지구간의 개수  $N$ 으로 구성된다. 본 매개변수 분석에서는 비지지구간 비율  $\rho$ 를 0.4 / 0.6 / 0.8로 하고, 각 비지지구간 비율에서 비지지구간 개수  $N$ 을 8 / 12 / 16으로 나누었고, 각 케이스에 대한 안전성 분석을 수행하여 구조 효율성을 분석하였다.

$$\rho = N \frac{L_h}{L_0} \quad (1)$$

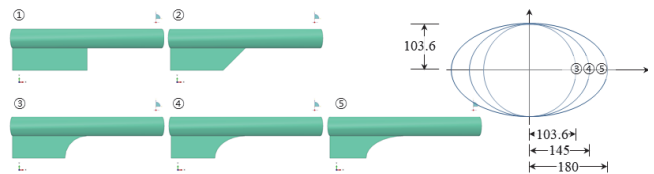
전체 구조에 대한 구조거동 분석을 위한 모델은 Fig. 4와 같으며, 전체 구조의 구조적 효율성을 가장 간단한 형태로 분석하기 위해 직선형 거더로 모델링 하였다. 즉, 상/하현재는 직



**Fig. 3** The procedure of parametric analysis for new type soundproof girder



**Fig. 4** Cross section of straight new type girder



**Fig. 5** Illustration of analyzed webs of girder

선형 Beam과 복부판 shell로 구성되었다. 상/하현재 파이프의 단면 제원은 외경  $D_o=89.1\text{mm}$ , 내경  $D_i=81.1\text{mm}$ 이고, 복부판의 단면 제원은 두께가 8mm이다. 거더의 양 끝은 지지대로 지지되므로 본 매개변수 해석에서는 완전 고정조건으로 단순화 하였다. 복부판 끝단의 형상에 따라 응력의 집중도가 상이하지만, 본 매개변수 분석 모델에서는 단면력을 계산하는 것이 목적이므로 응력집중 계수를 계산하기 위해 별도의 모델을 사용하였다. 매개변수 분석을 위한 기준 상재하중으로는  $\omega_0=1\text{N/mm}$ 의 선하중을 재하하였다. 단위하중이 재하된 모델의 처짐량과 최대응력이 발생하는 지점의 축력, 모멘트를 비교하여 구조 효율성을 평가하였다.

복부판의 끝단에서 응력이 집중되므로 이 응력 집중계수를 고려해야 실제 플랜지의 응력을 계산할 수 있다. 응력집중계수를 계산하기 위해 Fig. 5와 같이 복부판의 형상에 따라 사각

형, 45도 각형 그리고 서로 다른 타원형 3가지로 총 다섯 가지 모델의 해석 결과를 비교해보았다. 응력 집중은 국부적으로 발생하므로 쉘 모델을 이용하여 Fig. 5와 같이 복부판 절반과 플랜지만을 고려하였다. 응력집중계수 분석 모델에서는 단위 축력  $N_0=1N$ 과 단위 모멘트  $M_0=1Nmm$ 을 단부에 가력하였다. 축력에 대한 응력집중계수  $\chi_N$ 과 휨모멘트에 대한 응력집중계수  $\chi_M$ 는 식 (2)와 (3)으로 계산한다. 여기서  $\sigma_{max}$ 는 Fig. 5의 유한요소 모델에서 취득한 최대 응력을 의미한다. 또한,  $\sigma_{N_0}$ 와  $\sigma_{M_0}$ 는 복부판이 없는 플랜지에 각각 단위 축력과 단위모멘트를 가하여 도출되는 응력 값이다. 탄성모델에서 불연속 구간이 있을 경우, 응력이 수렴이 어려우므로 DNVGL-RP-C208 등 국외 강구조 설계기준에서는 최대 응력을 응력 집중 발생 위치의 강재 두께 50%와 150% 위치에서 읽은 후 선형 보간하도록 되어 있다(DNV, 2016). 즉 최대 응력  $\sigma_{max}$ 은 식 (4)로 선형 보간하여 값을 도출하였다.

$$\chi_N = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{N_0}} \quad (2)$$

$$\chi_M = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{M_0}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{max} &= \frac{\sigma_{0.5t} - \sigma_{1.5t}}{t} 1.5t + \sigma_{1.5t} \\ &= 1.5\sigma_{0.5t} - 0.5\sigma_{1.5t} \end{aligned} \quad (4)$$

직선형 거더에서 도출된 단면력으로 응력을 다시 산정한 후 단면별 응력집중계수를 적용하여 단면 형상이 적용된 최대응력을 도출하였다. 그 결과를 통해 매개변수에 대한 신행식 거더의 거동에 대한 경향성을 파악하였다.

쉘 모델링 거더 분석에서는 설계 하중을 재하하고 각 구조물의 최대 응력을 확인하여 안전성을 분석하였다. 강구조물은 전체 길이에 비해 두께가 얇기 때문에 유한요소 프로그램에서 모델링할 때 쉘 요소 사용이 권장되고 있다. 실제 신행식 방음터널은 강구조로 구성되기 때문에, 전체 구조물 해석에는 신행식 거더의 횡단면 구성요소 모두를 쉘로 구성하여 실제 거동에 더 가까운 결과를 도출하도록 하였다. 또한, Table 1에 정리된 하중을 선하중으로 재하하였으며, 각 하중의 방향은 부재 및 하중의 종류에 따라 상이하기 때문에, 이를 고려하여 하중을 재하하였다.

마지막 좌굴에 대한 안전성 평가에는 유한요소 프로그램을 통한 좌굴 평가를 진행하였다. 좌굴 해석에 사용된 모델은 방음판 규격을 고려하여, 거더간 2m 간격으로 연결하였고, 거더의 상현제에 약 2m 간격으로 H 경간을 설치하여 인접한 거더를 연결하였다. 최종 단면을 적용하여 최대 처짐, 최대응력과 임계좌굴하중을 평가하여, 최종설계에 대한 안전성을 검증하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 구조 효율성 분석

비지지 비율  $\rho$ 가 0.4, 0.6, 0.8일 때 거더 설계를 대상으로 구조 효율성 분석을 진행하였다. 중앙점의 처짐  $\delta$ 와 최대축응력 지점의 단면력  $N_{max}$ 와 휨모멘트  $M_{max}$  계산하였다. 결과값은 Fig. 6와 같이 그래프로 나타내었다. 분석 결과, 동일한  $\rho$ 에

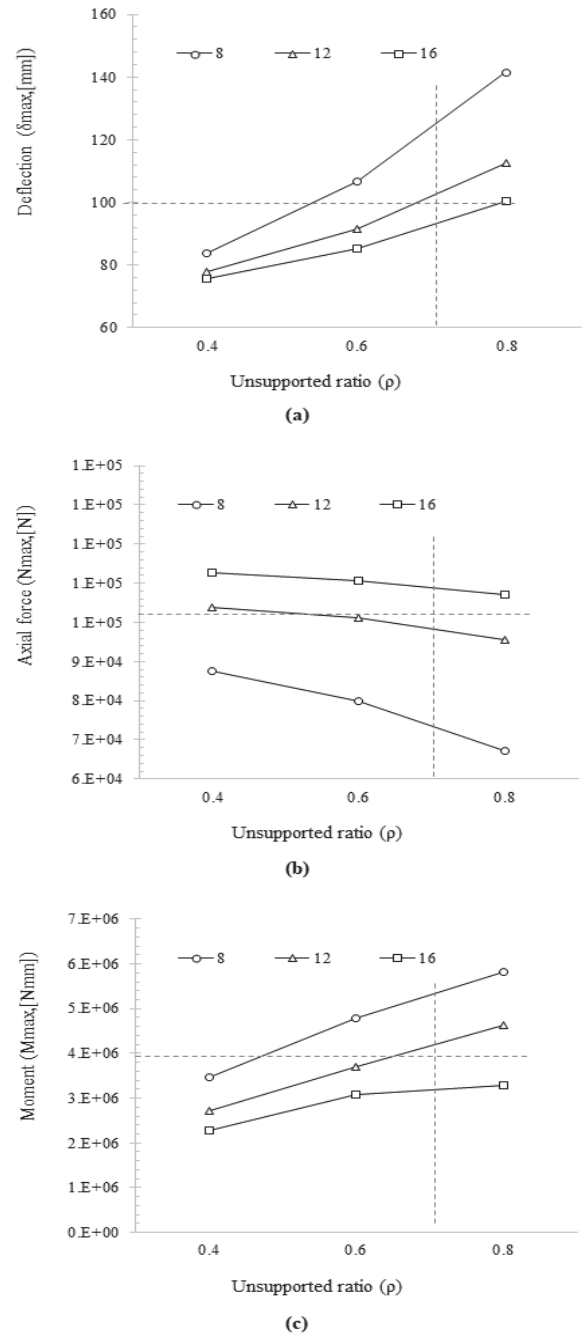


Fig. 6 Results of structural performance of straight girder; (a) deflection, (b) axial force and (c) moment

대하여 N의 값이 증가할수록 또는 동일한 N에 대하여  $\rho$ 가 감소할수록 처짐량과 축력이 증가하고 모멘트는 감소하였다. 즉 두 변수에 대해 서로 상반되는 결과가 도출되었다.

최대 축응력은 N과  $\rho$ 에 관계없이 경계조건으로부터 첫 번째 비지지구간이 끝나는 점에서 발생하였다. 최대 축응력 지점은 전체거더에서 비지지 구간이 분산될수록 혹은 비지지 비율이 증가할수록 경계조건에 가깝다. 즉, 양 끝이 고정된 거더에서 N이 증가하거나  $\rho$ 가 감소하면 최대 응력 지점이 중심에서 멀어지므로 그 지점의 단면력이 증가한 것으로 보인다. 휨모멘트의 경우, 상/하현재가 복부판에 지지되는 구간에서는 모멘트의 크기가 일정하고, 비지지구간에서 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, N이 감소하거나  $\rho$ 가 증가할수록 비지지구간 길이가 증가하기 때문에 휨모멘트가 증가하게 된다.

4차 선급 방음터널에 비지지구간 개수와 비율을 적용하면 다음과 같이 계산된다. 전체 거더의 길이는 약 24m이며, 비지지구간 개수가 16일 경우, 복부판 중심 간격을 계산하면 약 1.5m로 설계된다. 그러나, 고속도로 건설재료를 참고하여 생

산 방음판 규격을 고려할 시(Korea Expressway Corporation, 2019) 시공성을 위해 복부판 중심 간격을 2m로 설계하는 것이 바람직하다.

2m는 비지지구간 개수 12~13 범위 사이에 해당된다. 비지지구간 비율이 감소할수록 최대 처짐과 최대 응력의 크기는 작아지나, 축력의 크기는 증가한다. 따라서, 비지지구간 개수가 13일 때 세 성능 결과가 상충하는 지점을 찾고자 한다. 먼저, 비지지구간 개수 12와 16일 때 구조물의 성능 결과를 선형 보간하여 13일 때의 구조물 성능 결과를 도출하였다. 성능 결과를 무차원화 하기 위해, 각 성능 결과에서 비지지구간 비율이 0.4이고 비지지 개수가 8인 결과를 기준으로 모든 결과를 비율로 나타내고, 이 중 비지지구간 개수가 13인 결과를 그래프에 도식화하면 Fig. 7과 같다. 그래프의 교점은 비지지구간 비율 0.7에 해당하는 것을 알 수 있으며, 0.7부분이 세 성능 결과가 상충하는 지점임을 알 수 있다.

각 단면에 대한 응력집중계수는 이를 Fig. 8과 같이 그래프로 나타내었다. 사각형 단면에서 E180 단면으로 갈수록 두 응력집중계수가 감소하는 것을 볼 수 있으며, E145에서 E180로 갈수록 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 비지지구간 단면 장축의 길이가 E180 단면보다 더 커지더라도 응력에 대한 저항은 더 증가하지 않을 것으로 예상된다. 비지지구간 단면의 장축의 길이가 증가할수록 응력집중계수가 감소한 이유는 단면의 장축의 길이가 길수록 복부판의 끝단에서 복부판과 상현재의 거리가 더욱 더 완만하게 증가하기 때문이라고 고려된다. 또한 축응력보다 휨응력에 대한 응력집중계수가 큰 경향을 보인다.

비지지비율 분석 결과와 단면 분석 결과를 모두 적용하여 Table 2와 같이 정리하였다. 축력으로 인한 응력보다 모멘트 힘으로 인한 응력이 더 큰 경향을 보였다. 또한, 축응력보다 휨응력에 대한 응력집중계수가 크기 때문에 전체 응력의 크기는 모멘트의 크기에 비례하였다. 즉, N이 증가할수록 혹은  $\rho$ 가 감소할수록 응력의 크기가 감소하였다.

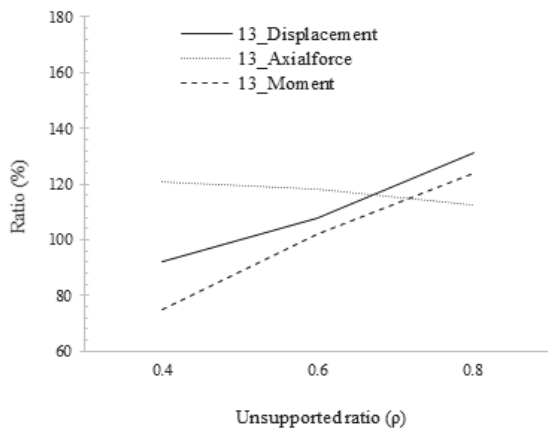


Fig. 7 Structure performance of girder according to the unsupported ratio when N is 13

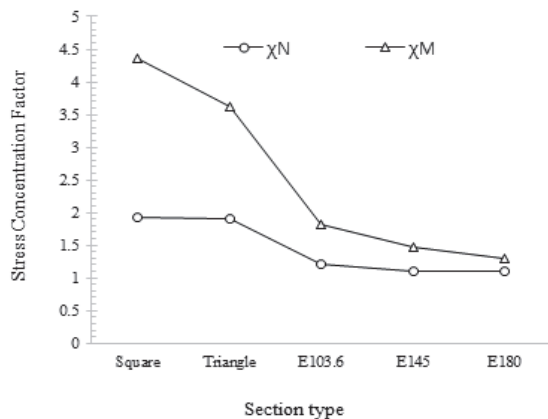


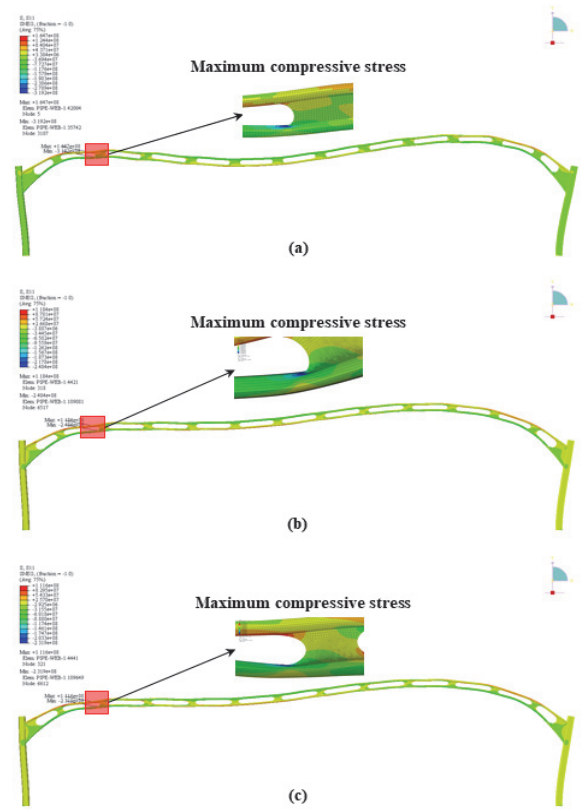
Fig. 8 Stress concentration factor according to the web design

### 3.2 쉘 거더 거동 분석

아치형 거더 분석에서는 비지지구간 비율 0.7, 비지지구간 개수는 13을 적용하여 복부판 단면의 형상에 따른 거동을 분석하였다. 각 구조물에 재하한 하중의 크기와 방향은 앞서 언급한 Fig. 1과 Table 1에 요약된 설계하중을 적용하였다. 이에 따라, 복부판 단면에 따른 거더 거동을 해석한 결과는 Fig. 9와 Table 3와 같다. 신형식 방음터널 거더의 허용 처짐은 KDS 14 00 00(KSSC, 2009)에 따라 130.2mm이며, 복부판 형상에 관계 없이 허용 처짐을 만족하였다. E103.6 단면을 적용한 거더를 제외하고, 두 구조 모두 허용응력을 만족하였으며 E180 단면의 최대 응력이 가장 작았다. E180 단면에서 가장 작은 최대

**Table 2** Result of parameter analysis of new type soundproof tunnel girder with different web shape under 1N/mm load

Notation	$\rho$	N	$\sigma_N$ [MPa]	$\chi_N$	$\sigma_M$ [MPa]	$\chi_M$	$\sigma$ [MPa]
Square	0.4	8	81.97	1.93	159.38	4.37	854.02
		12	97.07	1.93	124.74	4.37	731.91
		16	105.32	1.93	104.30	4.37	658.58
	0.6	8	74.84	1.93	200.21	4.37	1018.5
		12	94.49	1.93	170.09	4.37	924.94
		16	103.46	1.93	141.10	4.37	815.66
Triangle	0.8	8	62.88	1.93	267.68	4.37	1290.1
		12	89.40	1.93	212.76	4.37	1101.4
		16	100.02	1.93	150.89	4.37	851.77
	0.4	8	81.97	1.90	159.38	3.63	734.61
		12	97.07	1.90	124.74	3.63	637.51
		16	105.32	1.90	104.30	3.63	578.96
E103.6	0.6	8	74.84	1.90	200.21	3.63	869.34
		12	94.49	1.90	170.09	3.63	797.30
		16	103.46	1.90	141.10	3.63	709.07
	0.8	8	62.88	1.90	267.68	3.63	1091.6
		12	89.40	1.90	212.76	3.63	942.59
		16	100.02	1.90	150.89	3.63	738.08
E145	0.4	8	81.97	1.21	159.38	1.82	388.83
		12	97.07	1.21	124.74	1.82	344.01
		16	105.32	1.21	104.30	1.82	316.77
	0.6	8	74.84	1.21	200.21	1.82	454.51
		12	94.49	1.21	170.09	1.82	423.41
		16	103.46	1.21	141.10	1.82	381.48
E180	0.8	8	62.88	1.21	267.68	1.82	562.85
		12	89.40	1.21	212.76	1.82	494.91
		16	100.02	1.21	150.89	1.82	395.15
	0.4	8	81.97	1.11	159.38	1.47	325.14
		12	97.07	1.11	124.74	1.47	290.86
		16	105.32	1.11	104.30	1.47	269.90
E145	0.6	8	74.84	1.11	200.21	1.47	377.34
		12	94.49	1.11	170.09	1.47	354.74
		16	103.46	1.11	141.10	1.47	322.00
	0.8	8	62.88	1.11	267.68	1.47	463.41
		12	89.40	1.11	212.76	1.47	411.91
		16	100.02	1.11	150.89	1.47	332.60
E180	0.4	8	81.97	1.11	159.38	1.30	297.61
		12	97.07	1.11	124.74	1.30	269.32
		16	105.32	1.11	104.30	1.30	251.90
	0.6	8	74.84	1.11	200.21	1.30	342.74
		12	94.49	1.11	170.09	1.30	325.36
		16	103.46	1.11	141.10	1.30	297.63
0.8	8	62.88	1.11	267.68	1.30	417.13	
	12	89.40	1.11	212.76	1.30	375.14	
	16	100.02	1.11	150.89	1.30	306.54	



**Fig. 9** Result of shell analysis of arc girder (a) E103.6, (b) E145 and (c) E180

**Table 3** Maximum deflection and maximum stress of girder derived by shell analysis

Plate type	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\delta_{max}$ [mm]
E103.6	319.2	50.68
E145	248.4	37.06
E180	231.9	37.67

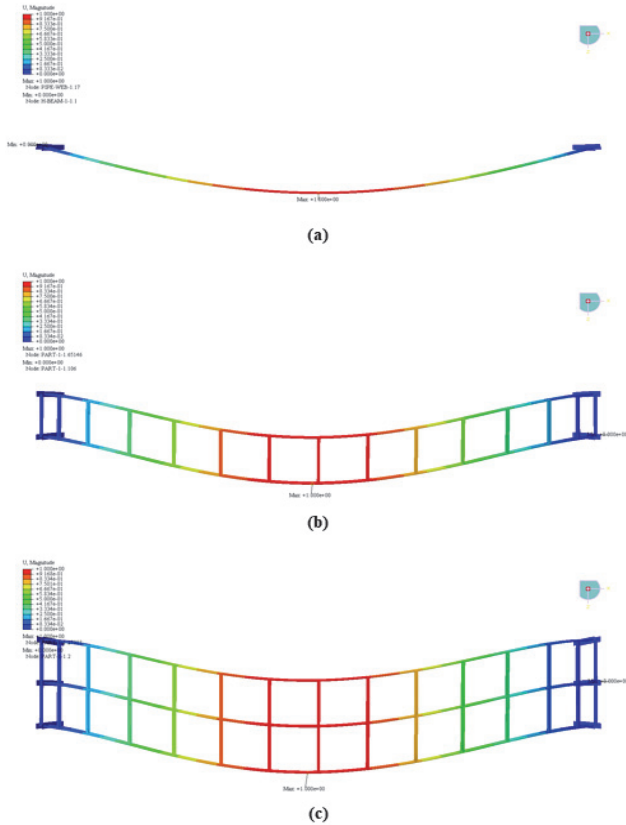
응력이 발생하였으나, E145 단면에서 가장 작은 최대 처짐이 발생하였다. 또한, 모든 단면의 결과에서 아치형 거더 중심부에서는 안정적인 거동을 보였으나, 지점부 근처 부분에서는 높은 변형과 응력을 확인하였다. 특히, 세 단면 유형의 구조 모두에서 최대응력은 지점부 근처에서 발생하였다. 이는 거더의 중심부에서는 휨 모멘트만 지배적으로 작용하지만 지점부에서는 휨 모멘트와 전단력이 동시에 작용하기 때문인 것으로 판단된다.

따라서 아치형 거더의 안전성을 높이기 위해서는 지점부 근처 부분에 대한 보강이 필요하며, 특히 전단력보다 휨모멘트가 휨응력에 더 큰 부분을 차지하기 때문에 휨모멘트를 줄일 수 있는 보강이 필요하다. 본 연구 내용을 바탕으로 아치형 거더의 구조적 성능 개선을 위해 두 가지 방안이 제안될 수 있다. 첫 번째는 지점부 근처의 비지지구간 개수를 높여서 휨 응

력을 분산하는 것이며, 두 번째는 지점부 근처의 비지지구간 비율을 조절하여 지지구간의 비율을 높이는 것이다. 여기서 첫 번째 방법의 경우 거더 전반에 응력 감소 효과를 얻을 수 있으나, 시공 효율이 급격하게 떨어지기 때문에 두 번째 방안이 보다 타당할 것으로 판단된다.

### 3.3 좌굴거동 분석

신형식 거더의 좌굴 거동을 평가하기 위해, 연결 구조물의 개수가 다른 3개의 구조물을 모델링하여 선형좌굴해석을 수행하였다. 연결 구조물 개수에 따른 좌굴 계수를 평가하였고,



**Fig. 10** Linear buckling analysis result of a structure connecting (a) one (b) two (c) three girders in XZ plane

**Table 4** Buckling coefficient according to the number of connecting girders

Number of connecting girders	Main buckling failure mode	Buckling coefficient (Eigenvalue)
1	Lateral buckling failure mode	0.4864
2	Lateral buckling failure mode	2.6065
3	Lateral buckling failure mode	3.6920

Fig. 10과 Table 4에 정리하였다. 해석 결과를 보면 세 구조물 모두 설계하중에 대해 횡좌굴 거동을 보이며, 이는 모멘트에 의한 횡좌굴 거동으로 판단된다. 따라서, 거더가 한 개일 경우 좌굴에 대해 취약한 거동을 보였으나, 연결 거더의 개수가 증가할수록 구조물이 횡방향으로 지지되기 때문에 좌굴 계수가 증가함을 알 수 있다. 연결 거더의 개수가 2개일 때부터는 설계하중에 대해 안정적인 거동을 보였으며 3개부터는 해당 설계 하중에 비해 약 3.7배 이상 구조적 안전성을 확보하고 있는 것을 확인하였다. 따라서, 방음터널이 다수의 거더가 연결된 구조임을 감안하였을 때 신형식 방음 터널 구조는 설계하중에 대해 좌굴에 있어 안정적인 거동을 보임을 알 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 공동 단면 복부판 부재를 활용한 신형식 4차선급 방음터널 설계를 위해 방음터널 거더의 설계 요소에 대한 매개변수 분석이 수행되었다. 매개변수 분석을 통해 경량화와 안전성을 동시에 만족하는 최적 설계를 제시하였고, 이를 적용한 실 규모의 아치형 셸 거더 모델을 대상으로 유한요소해석을 통해 설계 하중에서의 구조적 거동과 좌굴을 평가하였다. 신형식 4차선급 방음터널의 매개변수 분석 및 구조 거동 분석 결과는 다음과 같다.

- 1) 공동 단면 부재를 포함한 방음터널의 설계 요소로 비지지구간 비율과 비지지구간 개수를 선정하였으며, 이에 대한 매개변수 분석 결과 비지지구간 비율이 감소할수록, 비지지구간 개수가 증가할수록 거더에 작용하는 응력이 증가하고 모멘트는 감소하였다.
- 2) 방음터널 거더의 응력 집중 평가는 형상이 서로 다른 5가지 복부판 모델을 비교하였으며, 복부판 공동단면의 타원 장축의 길이가 길수록 응력집중계수가 감소하는 결과를 확인하였다.
- 3) 방음터널 거더의 비지지구간 비율이 0.4, 비지지구간 개수가 16이고 복부판의 형상이 E180 단면일 때의 조합이 가장 유리하지만, 방음판에 대한 시공성을 고려하여 실제 방음터널의 최적 설계로 최대 비지지구간 개수를 13, 비지지구간 비율을 0.7로 채택하였다.
- 4) 최적 설계를 반영한 아치형 거더 분석 결과로 복부판 공동단면의 장축의 길이가 길수록 구조적 효율과 경제성이 증가하지만, 단면부의 공동 단면의 장축 길이가 일정 구간(E145와 E180단면 사이) 이상으로 커지면 최대처짐에 불리함을 확인하였다.
- 5) 3개의 아치형 거더를 포함한 신형식 방음터널의 좌굴 안전성을 평가 결과, 좌굴에 있어 설계 하중에 비해 약 3.7배 이상 구조적 안전성을 확보하고 있는 것을 확인하였다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21CTAP-C152291-03).

## References

1. Yoon, T. I., Noh, M. H., and Lee, S. Y. (2018), Parametric Applicability Assessment of High-Strength Steel Tubes of Noise Tunnel Structures for Weight Reduction, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(7), 299-306.
2. Ahn, D. W., Choi, S. J., and Noh, M. H. (2016), Evaluation of Design Compatibility for Lightweight Soundproof Tunnels Using Pipe Truss Beams, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, 7(1), 9-18.
3. Noh, M. H., Ahn, D. W., and Joo, H. J. (2016), Assessment of Structural Performance for a Lightweight Soundproof Tunnel Composed of Partitioned Pipe Truss Members, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, 7(1), 1-8.
4. Noh, M., and Lee, S. Y. (2017), Finite Element Analysis of Flanged Connections of Steel Tubular Truss-Type Soundproof Tunnels, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, 8(3), 46-52.
5. Son, J. G., Park, G. H., and Ryu, R. E. (2014), A Development of the Light Weight Noise Tunnel on a High Degree of Efficiency and Environmentally Friendly for Railway, In Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference (pp. 487-490). The Korean Society for Noise and Vibration Engineering.
6. Kim, T. M., Kim, J. T., Park, G. H., Son, J. G., Ryu, L. O., and Koh, H. I. (2015), The Study of Noise Reduction by Noise Protection Roof: Design Concept, *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, 16(2), 124-130.
7. Kim, T. M., and Kim, J. T. (2017), The Study of Reduction to Wind-loading Effect for Noise Protection Roof using a Scaled Model, *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, 18(1), 55-62.
8. Lee, N. S., Ju M. K., Koh, H. I., Hong, J. Y., and Oh, Y. K. (2017), A Study on the Efficient Design Alternative of Sound Absorption Facilities, *The Korean Society of Living Environmental System*, 24(6), 824-832.
9. Kim, J., and Kim, S. A. (2020), Lifespan Prediction Technique for Digital Twin-Based Noise Barrier Tunnels, *Sustainability*, 12(7), 2940.
10. Wu, X., Zhu, Y., Xian, L., and Huang, Y. (2021), Fatigue Life Prediction for Semi-Closed Noise Barrier of High-Speed Railway under Wind Load, *Sustainability*, 13(4), 2096.
11. Dogan, E., and Ozyuksel Ciftcioglu, A. (2020), Weight Optimization of Steel Frames with Cellular Beams Through Improved Hunting Search Algorithm, *Advances in Structural Engineering*, 23(5), 1024-1037.
12. Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT). (2015), Road Structure & Facilities Standards.
13. Architectural Institute of Korea (AIK). (2016), Korean Building Code, KBC2016.
14. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). (2009), Highway Design Manual.
15. ABAQUS (2015) Standard User's Manual. 6.12. Johnston, RI: Dassault Systemes Simulia Corp.
16. DNV, G. (2016). Determination of structural capacity by non-linear finite element analysis methods. DNVGL-RP-C208.
17. Korea Expressway Corporation. (2019), Highway Design Manual 19th.
18. Korean Society of Steel Construction (KSSC) (2009). Korean steel structure design code-load and resistance factored design, KDS 14 00 00

Received : 06/12/2021

Revised : 08/30/2021

Accepted : 10/01/2021

**요 지 :** 기존 H형강을 활용한 방음터널의 경우 높은 중량으로 하부구조에 많은 부담을 주기 때문에 경량화된 구조와 안정성을 모두 갖춘 신형식 거더 개발이 필요하다. 본 논문에서는 H 형강 플랜지를 상/하현재로 대체하고, 복부판에 공동단면을 적용하여 새로운 방음 터널 거더 설계를 제안한다. 최적의 형상을 개발하기 위해 비지지 비율과 공극 단면 형상에 따른 구조물의 거동을 분석하였다. 비지지구간 비율이 감소할수록, 비지지구간 개수가 증가할수록 거더에 작용하는 축력이 증가하고 모멘트는 감소하였다. 또한, 복부판 공동 단면의 타원 장축의 길이가 길수록 응력집중계수가 감소하는 결과를 확인하였다. 방음터널 거더의 비지지구간 비율이 0.4, 비지지구간 개수가 16이고 복부판의 형상이 E180 단면일 때의 조합이 가장 유리하지만, 방음판에 대한 시공성을 고려하여 실제 방음터널의 최적 설계로 최대 비지지구간 개수를 13, 비지지구간 비율을 0.7로 채택하였다. 최적 매개변수를 적용한 아치형 거더 분석 결과, 복부판 공동단면의 장축의 길이가 길수록 구조적 효율과 경제성이 증가하지만, 단면부의 공동 단면의 장축 길이가 일정 구간 이상으로 커지면 최대처짐에 불리함을 확인하였다. 3개의 아치형 거더를 연결한 신형식 방음터널의 좌굴 안전성을 평가하여 좌굴에 있어 설계 하중에 비해 약 3.7배 이상 구조적 안전성을 확보하고 있는 것을 확인하였다. 경량화와 안전성을 동시에 만족하는 최적 설계를 제시하였다.

**핵심용어 :** 방음터널, 구조해석, 거더해석, 다공성, 신형식거더