구조물 경계조건에 따른 파형강판 터널라이닝의 풍하중에 대한 동적 거동분석

Dynamic Behaviors of a Corrugated Steel Tunnel Lining System due to Wind Loads by Passing Vehicles according to the Boundary Conditions

마 호 성¹⁾ · 조 광 일²⁾ · 유 성 흠³⁾
Mha, Ho Seong · Cho, Kwang Il · Yoo, Sung Heum

요약: 본 연구에서는 터널 내 통과차량에 의하여 발생하는 풍하중으로 인한 터널라이닝의 동적거동에 대하여 분석하였다. 차량으로 인한 풍하중은 목표지점을 지나가는 차량에 대하여 압력과 팽창을 나타내는 시간함수를 이용하여 모형화 하였으며, 파형강판으로 이루어진 터널 라이닝은 3차원 쉘 요소를 사용하였다. 쉘 요소로 모델링된 3차원 터널라이닝의 동적해석은 많은 양의 메모리와 시간이 요구되지만 파형강판의 동적특성을 반영하는 한편 최대한 단순화된 모형을 제시하여 해석에 이용하였다. 터널라이닝의 변위를 분석하기 위해 다양한 차량 주행 조건 및 맞바람 풍속이 고려되었다. 차량과 풍속이 증가하면 응답 또한 증가하였으며, 최대변위는 차량이 120km/h로 교차주행 시 25mm로 나타났다. 연속주행 시 응답에 미치는 영향은 단독주행 응답보다 2.5% 이내로 크지 않게 나타났다. 따라서 슛크리트가 적용되지 않는 독립구조체 터널라이닝의 경우동적거동은 반드시 고려해야하는 것으로 판단된다.

ABSTRACT: Dynamic behaviors of a corrugated steel plate tunnel lining system are examined under wind loads due to passing vehicles. Applied wind loads are simulated by applying the time functions as a vehicle moves through the tunnel. Wind loads are described by the pressure and suction as a vehicle arrives and leaves target positions in the tunnel. The tunnel lining is modeled using the simplified shell elements that retain the characteristics of the corrugated shapes. The displacements of the tunnel lining are evaluated under various conditions regarding wind velocity and the passing vehicles. The responses are found to increase as the vehicle velocity and wind velocity increase. A maximum displacement of 25mm occurs when two vehicles are crossing at the speed of 120km/h. A row of vehicles running consecutively minimally affects the dynamic responses with less than 2.5% of the dynamic responses enlarged and attributed to one running vehicle. It should be noted that the dynamic responses of the tunnel lining should be considered when there is no shotcrete applied.

핵심용어: 파형강판 터널라이닝, 풍하중, 주행차량, 시간이력해석

KEYWORDS: corrugated steel plate tunnel lining, wind load, running vehicle, time history analysis

1. 서론

산악지형이 많은 국내의 지형여건 및 시공기술의 발달로 인하여 새로운 도로 개발 시 터널의 활용도가 높아지고 있는 것이 최근의 추세이다. 국내에서 사용되고 있는 터널라이닝의 주를 이루는 콘크리트 라이닝은 주변 환경 등 여러 가지 요인을 고려하여 재료 및 규모 등이 결정된다. 콘크리트 라이닝

은 시공, 유지관리 측면에서 긴 공사기간, 고비용 등의 문제점이 발생할 수 있다.

이에 반해 강재 터널라이닝은 재료가 강재로 이루어진 연성 구조물로서 부등침하 등에 유연하게 대처할 수 있어 콘크리트 라이닝의 단점을 극복할 수 있다(황민오, 1999). 강재 터널라이닝에는 파형강판이 적용될 수 있으나 파형강판은 2방향 거동이 불분명하여 이에 대한 많은 연구가 수행되어 왔다.

1) 호서대학교 토목공학과 교수, 공학박사(mhah@hoseo.edu)
2) 교신저자, 포항산업과학연구원 강구조연구소 책임연구원, 공학박사
(Tel: 032-200-2462, Fax: 032-200-2479, E-mail: kicho@rist.re.kr)
3) 호서대학교 토목공학과, 석사과정(sanggam8897@naver.com)

본 논문에 대한 토의를 2012년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

Duncan 등(1985)은 지간이 2.7m~7.7m인 알루미늄 박스 구조물에 대한 설계식을 제안하였고, 이후 Boulanger 등(1989)은 현장계측과 유한요소 해석을 통해 Duncan이 제안한 설계식에 대한 검토를 수행하였고, 최동호 등(2006)은 지간이 12m까지 확장된 설계식을 제안하였다. McCavour 등(1998)은 두 개의 구조물에 대하여 구조물의 계측값과 수치해석을 비교하여 Rib 보강과 EC-Rib 보강재를 평가하였다. 이러한 파형강판을 적용한 지중구조물은 기존의 철근콘크리트 구조물에 비해 20~30% 정도 저렴하여(나호성 등, 2011) 많은 연구가 진행되고 있으며, 구조물의 3차원 거동은 파형강판의 형상 모사문제와 활하중에 의한 영향을 중심으로 여러 연구가 진행되고 있다(최동호 등, 2010).

STLiM(Steel Tunnel Lining Method)에 의한 파형강판 터널라이닝은 기존의 주재료인 콘크리트를 대체하여 일반 강판에 파형을 성형하여 단면계수를 증가시킨 후, 볼트로 조립하여 라이닝을 형성하는 방법이다. 이는 일반 강판에 비해 단면계수가 10~30배 정도가 크며, 경량 구조물로서 재료의 운반이 용이하고 현장에서 단순 조립으로 시공되므로 기존의 콘크리트 라이닝에 비해 공기단축과 공비를 절감할 수 있는 경제적인 구조물이다.

파형강판을 이용한 터널라이닝 구조물은 북미 선진국 등에서 사용되어 보편화 되고 시공성과 경제성을 동시에 갖춘 구조체로 휨 강성과 내력 및 내구성을 향상시킨 구조물로서 국내에서는 지난 1997년 서해안 고속도로, 천안 논산 간 고속도로, 경의선 철도 및 남북연결도로, 군사 시설물에 이르기까지 중요 사회기반시설물에 적용되었고 환경성, 안정성, 시공성, 경제성이 입증되었다. 최근 연구기관에서는 기존의 라이닝 대체 재료의 필요성을 인식하여 파형강판의 터널 적용성에 관한 관심이 커지고 있으나 기존 콘크리트 터널라이닝의 단점을 보완한 파형강판 터널라이닝 구조물의 연구는 현재 전무한 상태이며, 국내의 경우 도로설계편람(건설교통부, 2010)에 파형강판을 이용한 강판의 기본 구조설계에 관해서만 거론되고 있는 실정이며 기타 관련 연구도 기초적인 실정이다(최동호 등, 2001).

따라서 본 연구에서는 뒤채움이 없는 독립된 파형강판터널라이닝에 통과차량으로 인한 동적거동을 분석하고자 한다. 또한 다양한 풍하중, 차량통과상태, 경계조건 등의 매개변수의 변화에 따른 파형강판터널라이닝의 거동 변화를 파악하고자 한다.

2. 차량이 통과함에 따른 터널 내에 발생하는 풍하중

터널 내 차량이 통과함에 따라 발생하는 실제 풍하중의 분

포는 그림 1(a)(Takanobu O, Kozo Fujii, 2007)와 같이 다소 복잡한 형태로 작용한다. 따라서 이를 단순화시키기 위하여 그림 1(b)와 같이 차량이 터널 내 주행하는 방향의 우측 1/3부분에 풍하중을 재하 하였으며 이는 선행연구(마호성 등, 2008)에서 가장 불리한 하중조건으로 나타난 것이다. 통행차량의 진행에 따라 변화하는 동적하중을 재하 하는 경우 주행 차량의 전반부에는 압축력이 발생하고 후반부에는 흡입력이 발생됨으로 그림 2와 같이 터널라이닝의 1/3부분에 하중을 적용하여 시간에 대한 풍하중의 시간이력해석을 수행하였다.

(a) 실제 터널라이닝에 작용하는 풍압 분포도 (b) 단순화된 터널라이닝에 작용하는 풍압분포도
그림 1. 터널라이닝에 작용하는 풍압분포도

그림 2. 통과차량에 의한 풍하중 형상

터널 내에는 차량이 통과할 때 생기는 풍하중 이외에 항상 터널 안에는 일정 풍속의 바람이 불고 있는데, 이 풍속을 맞바람 풍속이라고 한다. 맞바람 풍속에 대한 국내 설계기준은 현재 존재하지 않으며, 환기설계기준에서 터널 차도 내 풍속은 일 방향 터널시 표준 10m/s이고, 양방향 터널인 경우 8m/s를 표준으로 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 맞바람 최저 풍속을 8m/s로 설정하고, 최고 풍속은 환기설계기준에서 제시한 풍속보다 50% 높은 15m/s를 적용하였다. 자세한 기준은 표 1과 같다.

표 1. 국내외 터널 내 풍속 적용기준

국가	국내 설계기준		현 연구 적용풍속	
	일방	양방	최저	·최고
일본	12 m/s	8 m/s	8 m/s	15 m/s
WRA (PLARC)	12 m/s	8 m/s		
독일	10 m/s	8 m/s		
노르웨이	10 m/s	7 m/s		
한국	10 m/s	8 m/s		

통과하는 차량에 의해 발생하는 풍하중이 파형강판 터널과 이닝에 미치는 영향을 판단하기 위하여 노르웨이 시방기준 (The Norwegian Public Roads Administration, 1995)에 제시된 풍하중 계산식을 사용하였다. 식(1)을 사용하여 터널을 통과하는 차량으로 인한 풍하중을 계산하여 표 2와 같이 산출하였다.

$$q = \mu \cdot \left(\frac{V_b}{3.6} + V_1 \right)^2 \cdot \frac{1}{1.6} \quad (1)$$

여기에서,

$$q = \text{압축력(Pressure)} \quad (N/m^2)$$

흡입력(Suction) (N/m^2)

$\mu = 0.4$: Pressure

-0.8 : Suction

$$V_b = \text{설계차량속도} \quad (km/h)$$
$$V_I = \text{통과방향과 반대 방향의 풍속(맞바람풍속)} (m/s)$$

표 2. 속도별 풍하중 비교

속도 (<i>km/h</i>)	맞바람풍속 (<i>km/h</i>)	Pressure (<i>N/m²</i>)	Suction (<i>N/m²</i>)
60	8	152.1	-304.2
	15	250.7	-501.4
80	8	228.3	-456.7
	15	346.4	-692.7
100	8	320.0	-640.0
	15	457.5	-915.0
120	8	427.1	-854.2
	15	584.0	-1168.0

3. 대상구조물의 모형화 및 하중조건 선정

3.1 파형강판 재료특성 및 제원

파형강판 터일라이닝에 사용되는 파형강판 재료는 1.6mm~7.0mm의 일반 강판에 강성을 높이기 위하여 파형을 적용함으로써 일반 강판에 비해 강성이 크게 증진된 구조체이다. 본 연구에서 사용되는 파형강판 구조체는 일반 구조재에 사용되는 파형강판에 비해 얇은 두께를 가지고 있다. 강판의 두께는 1mm이며 산과 산사이의 거리는 381mm이고, 굽힘 반지름은 76mm이다. 파형강판에 용융 아연도금으로 인한 두께와 강도는 매우 미세한 영향만을 미치므로 이는 고려하지 않았으며 순수하게 파형강판에 사용되는 스테인리스 400 시리즈의

두께와 강도를 고려하였다. 이와 같은 파형강판의 기본형상과 자세한 제원(Corrugated Steel Pipe Institute, 2007)을 그림 3과 표 3에 나타내었다.

그림 3. 파형강판 기본형상

표 3. 파형강판 제원

두께, t (mm)	1.0
골의 피치, P (mm)	381
골의 깊이, d (mm)	140
굽힘 반지름, r (mm)	76
단면적, A (m^2/m)	1.368E-03
I_{xx} (m^4)	3.3748E-06
중립축 (mm)	75.486
인장강도 (Mpa)	366.77
항복강도 (Mpa)	151.63

3.2 대상 구조물 제원

본 연구에서 고려하는 대상구조물은 그림 4와 같이 2개의 곡선반경을 가지는 3개의 구간으로 나누어져 아치 형태의 단면을 가지고 있으며, 대상구조물의 길이는 본 연구에서 사용한 프로그램의 최대 허용치인 47m로 하였다. 통과차량이 일방향 경우에 편도 2차선 또는 양방향인 경우에 왕복 1차선의 교통터널을 구축할 수 있도록 하였다.

그림 4. 터널 표준 단면도

파형강판 터널라이닝의 파형표면이 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 셀 요소를 적용할 때 파형강판의 곡선 형태를 유지하기 위해서는 많은 양의 요소를 필요로 한다. 그림 5와 같이 20개의 평면 셀을 기본적으로 사용할 경우 실제에 가장 가까운 파형을 낼 수 있으나, 구조물의 해석에 있어 상당한 시간이 소모되어 다양한 분석이 어렵다. 따라서 이를 단순화하기 위하여 4개의 평면 셀로 이루어진 모형과 20개의 평면 셀로 이루어진 모형을 각각 10m 모형의 결과에 대한 비교분석을 한 결과 4개의 평면 셀을 사용하여도 20개의 해석모형의 특성의 차이가 거의 없다는 것이 밝혀졌다. 따라서 본 연구에서는 4개의 평면 셀을 사용하여 MIDAS-Civil 2009를 이용하여 파형강판 터널라이닝을 모형화 하였다.

3.3 대상구조물의 모형화

대상구조물인 파형강판 터널라이닝은 단위모형의 파형 1개를 모형화한 후 이를 2개의 곡률을 가지는 아치 형태에 각각 배열시키고 터널 길이방향으로 적용시켜 대상구조물을 모형화 하였다. 하나의 파형강판을 4개의 평면 셀을 이용한 모형은 구조체의 필요한 특성을 잘 표현할 수 있으며, 동시에 적절한 유한요소 모형의 크기를 가질 수 있다. 전체모형은 21,457개의 절점과 20,916개의 셀 요소로 이루어져있으며, 허용하는 한도 내에서 최대길이($L=47m$)의 터널라이닝 모형을 구현하여 동적거동을 분석하였다. 터널라이닝의 동적거동은 통과차량에 의해 발생하는 풍하중을 단독주행, 연속주행 그리고 교차주행에 따라 변화시켜 실제 터널에 작용하는 풍하중을 고려할 수 있도록 하였다. 풍하중은 그림 6과 같이 원의 접선에 수직방향으로 작용한다고 가정하여 각각 수직, 수평분력으로 나누어 적용하였다.

그림 6. 대상구조물 및 셀의 풍하중 재하 방향

3.4 입구부와 출구부의 경계조건 선정

기존연구에서는 입·출구부의 경계조건이 자유단으로 적용되어 모든 하중조건에서의 최대 변위가 입·출구부에서 일어났다. 하지만 그림 7과 같이 입구부에서의 변위가 터널 내부에 비해 상대적으로 크며, 실제 터널 시공 시 입구부의 보강상태를 가정하여 본 연구에서는 입·출구부의 경계조건을 고정단과 자유단으로 비교 분석하였다.

그림 7. 차량의 입구부 통과에 따른 경계조건별 거동형상

3.5 하중조건 선정

실제 파형강판 터널라이닝에 적용되는 하중을 최대한 유사하게 적용하기 위하여 각 통과하중에 따른 맞바람 풍속을 적용하여 시간이력 해석을 수행하였으며, 연속주행 상태에서의 차량간 간격은 터널의 고유진동주기를 분석하여 차량 속도에 따라 각각 적용하였다. 그 결과는 표 4와 같이 정리하였다.

표 4. 하중조건

(a) 단독주행

Case	차량속도 (km/h)	맞바람 풍속	Case	차량속도 (km/h)	맞바람 풍속
LC1-1	60	15m/s	LC2-1	120	8
LC1-2	80		LC2-2		10
LC1-3	100		LC2-3		12
LC1-4	120		LC2-4		15

(b) 연속주행

Case	차량속도 (km/h)	맞바람 풍속	차량수 (대)
LC3-1	120	15m/s	2
LC3-2			3
LC3-3			4

(c) 교차주행

Case	차량속도 (km/h)	맞바람 풍속	교행지점
LC4-1	60	15m/s	0m 23m 34m
LC4-2	80		
LC4-3	100		
LC4-4	120		

통행차량의 진행에 따라 변화하는 풍하중을 적용시키기 위하여 각 셀에 순차적으로 시간에 대한 풍하중의 함수를 적용시켰으며, 구조물 잔여진동의 형태를 파악하기 위하여 주행차량이 터널을 완전히 통과한 후에 구조물의 진동이 거의 없어질 때까지 시간이력해석을 수행하였다. 시간에 대한 풍하중 함수의 예를 그림 8에 나타내었다.

그림 8. 속도 120km/h일 때 차량 1대의 풍하중 함수

4. 풍하중에 의한 파형강판 터널라이닝의 거동 분석

4.1 파형강판 터널라이닝 모드분석

파형강판 터널라이닝의 동적거동을 분석하기 위하여 우선적으로 모드분석을 수행하여 대상 구조물의 진동수 및 모드 형상을 분석하였다. 그 결과 입구부 경계조건이 자유단 상태의 1차 고유 진동수는 3.77Hz로 나타났다. 터널 입구부를 고정했을 경우의 1차 고유 진동수는 6.31Hz로 나타났다. 모드형상은 그림 9에 나타내었으며, 분석결과는 표 5와 같다.

그림 9. 파형강판 터널라이닝 주 모드 형상

표 5. 터널의 고유주기 분석 결과

모드	입출구부 고정	입출구부 자유
	진동수(Hz)	진동수(Hz)
1	6.31	3.78
2	6.32	4.88
3	6.53	4.88
4	6.56	6.29

그림 10. 정적하중에 의한 속도별 변위 그래프

4.2 파형강판 터널라이닝의 정적하중에 대한 거동분석

파형강판 터널라이닝의 동적거동 분석에 앞서 정적하중에 의한 파형강판 터널라이닝의 변위 및 형상을 검토하였다. 대상 구조물에 적용시킨 하중조건은 단독주행 상태에서의 하중 조건과 동일하게 적용하였으며, 풍하중은 파형강판 터널라이닝 전체에 적용하였고, 식 1에서 제시한 풍하중 계산식을 이용하여 하중크기를 계산하였다. 대상구조물에 사용한 하중조건은 표 6과 같다.

표 6. 정적해석 하중조건

속도 (km/h)	Pressure (N/m ²)	Suction (N/m ²)	경계조건	풍압분포
60	250.7	-501.4	입·출구부 고정	라이닝 전체
80	346.4	-692.7		
100	457.5	-915.0		
120	584.0	-1168.1

그림 11. 정적 풍하중에 의한 터널라이닝 거동

4.3 동적거동 분석을 위한 평가위치 선정

대상구조물의 동적거동 분석을 위해 그림 12에 나타난 바와 같이 동일한 위치의 터널라이닝 단면에서 최대 변위위치를 분석하였다. 변위방향은 터널라이닝 단면 접선에서의 수직 방향을 기준으로 변위를 산출하였다. 평가지점은 최대변위 지점인 단면 상부 중앙노드와 측면의 변위를 살펴보기 위해 2개의 추가 평가위치를 더하여 총 3개의 평가위치를 정하였다. 그림 13과 같이 변위를 산출하기 위한 라이닝 단면은 차량 진행방향으로 총 3개 단면과 9개 절점에서 시간이력 해석법을 이용하여 분석하였다.

그림 12. 터널 단면에서의 변위 평가위치

정적하중에 대한 파형강판 터널라이닝의 거동을 분석한 결과 최대변위는 Pressure인 경우 3.7mm, Suction인 경우 4.9mm로 나타났다. 그림 10에서와 같이 Pressure 하중보다 Suction 하중이 터널에 작용할 때 변위가 크게 나타났다. 또한, 속도가 증가함에 따라 변위가 증가하였으며, 최대변위는 속도 120km/h일 때의 정하중을 적용하였을 때 3.7mm로 허용변위인 50mm를 초과하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 적용한 모든 차량 속도에 대하여 허용변위 내에 있는 것으로 판단된다.

그림 11과 같이 Pressure 하중이 작용할 때는 수직방향의 변위가 크게 나타나면서 측면 터널형상이 터널 안쪽으로 변위가 나타났다. Suction 하중이 작용할 때는 수평방향의 변위가 터널 안쪽방향으로 생기면서 터널 측면 변위가 밖으로 밀려났다.

그림 13. 대상 구조물 전체의 변위평가 단면 위치

4.4 단독주행

본 절에서는 차량이 터널을 단독으로 통과할 때 생기는 풍하중과 맞바람 하중으로 인한 파형강판 터널라이닝의 동적거동을 분석하였다. 표 7과 같이 단독주행 상태에서 차량 속도에 대한 터널라이닝의 변위를 다양한 위치별로 측정하였다. 그 결과 최대변위는 속도 120km/h, 맞바람 풍속 15m/s에서 나타났으며, 최대변위는 12.6mm로 나타났다. 최대변위가 일어난 단면구간은 길이가 대칭관계인 13m와 34m 구간으로 나타났다. 따라서 단독주행에 대한 터널라이닝의 변위크기는 본 연구에서 제시한 허용변위 50mm를 초과하지 않았다.

표 7. 단독주행 시 속도별 응답 변위

Case	차량속도 (km/h)	평가단면 위치(m)	응답변위(mm)		
			1	2	3
LC1-1	60	13	0.3	4.7	0.8
		23	0.4	4.2	0.8
		34	0.2	4.8	0.8
LC1-2	80	13	0.4	6.6	1.1
		23	0.6	5.8	1.1
		34	0.3	6.7	1.1
LC1-3	100	13	0.5	8.9	1.5
		23	0.9	8.0	1.5
		34	0.4	9.3	1.6
LC1-4	120	13	0.7	12.5	2.1
		23	1.2	11.0	2.0
		34	0.5	12.6	2.1

그림 14. 평가위치 비교 그래프

표 7의 결과를 바탕으로 터널 단면에서 평가위치에 따른 변위결과를 분석하였다. 그림 14에서와 같이 터널 상층 중앙부의 변위가 터널 측면부의 변위와 비교했을 때 크게 나타났다. 그림 15는 단독주행 상태에서의 파형강판 터널라이닝의 최대변위 지점 시간이력도이며, 그림 16은 단독주행 시 시간에 따른 터널 거동을 나타낸 것이다.

그림 15. 하중조건인 최대변위 지점(L=34m)의 시간이력

그림 16. 단독주행 상태의 터널 거동(120km/h)

표 8. 단독주행 시 맞바람 풍속별 응답 변위

Case	차량속도 (km/h)	맞바람 풍속	평가단면 위치(m)	응답변위(mm)		
				1	2	3
LC2-1	120	8	13	0.5	9.1	1.5
			23	0.8	8.0	1.4
			34	0.4	9.2	1.5
LC2-2		10	13	0.6	10.0	1.7
			23	0.9	8.8	1.6
			34	0.4	10.1	1.7
LC2-3		12	13	0.6	11.0	1.8
			23	1.0	9.7	1.7
			34	0.5	11.1	1.9
LC2-4		15	13	0.7	12.5	2.1
			23	1.2	11.0	2.0
			34	0.5	12.6	2.1

맞바람 풍속이 파형강판 터널라이닝에 주는 영향을 분석하기 위하여 차량속도를 120km/h로 고정된 후 맞바람 풍속을 8m/s ~ 15m/s로 증가시켜서 변위를 측정하였다. 그 결과 맞바람 풍속이 증가할수록 터널의 변위가 증가 하였으며, 최대변위는 맞바람풍속 15m/s일 때 터널 상층 중앙부에서 12.6mm로 나타났다(표 8).

지금까지 단독주행 상태에서의 차량속도와 맞바람 풍속에 따른 파형강판 터널라이닝의 거동을 분석하여, 차량속도와 맞바람 풍속이 증가함에 따라 터널라이닝의 변위가 증가한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 차량의 속도와 맞바람 풍속이 파형강판 터널라이닝의 거동에 어떠한 인자가 더 많은 영향을 주는지 알아보기 위해 그림 17, 18과 같이 그래프로 나타내었다.

그림 17. 단독주행 시 속도-변위 그래프(120km/h)

그림 18. 맞바람 풍속 변위 그래프

그림 17, 18을 비교한 결과 맞바람 풍속에 대한 터널의 변위 증가량 보다 속도에 대한 터널 변위 증가량이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 터널 내에 부는 바람의 영향 즉, 맞바람 풍속 보다 통행차량의 속도에 의해 발생하는 풍하중이 터널라이닝의 거동양상에 더 큰 영향을 주는 것으로 판단된다.

입·출구부 경계조건에 따른 단독주행 상태에서의 변위 차이를 알아보기 위해 자유단에서의 변위와 고정단에서의 변위를 산출하여 표 9와 같이 나타내었다. 차량속도는 최대 속도인 120km/h로 적용하였고, 평가지점은 0m, 13m, 23m, 34m, 47m지점으로 5개 단면에서 측정하였다.

표 9. 단독주행 시 경계조건에 대한 최대 응답 변위

Case	차량속도 (km/h)	입·출구부 경계조건	평가지점 (m)	응답변위 (mm)
LC1-4	120	고정	0	0
			13	12.5
			23	11.0
			34	12.6
			47	0
		자유	0	27.3
			13	11.5
			23	10.8
			34	12.4
			47	30.3

그림 19는 터널 단면 중앙위치 노드에서의 변위를 입·출구부 경계조건에 따라 비교하였다. 고정단 경계조건에서는 차량이 처음 진입 후 13m지점까지 변위가 증가하다가, 터널 중간지점인 23.5m 지점까지 변위가 점차 감소하였다. 그리고 중간지점을 지나면서 변위가 다시 증가하다 최대변위 위치인 34m지점까지 변위가 증가하였다. 자유단일 경우 입구부에서 큰 변위를 보이다가 13m지점까지 변위가 감소하여 34m지점까지 유지되다 다시 출구부로 갈수록 크게 증가하였다.

그림 19. 하중조건에 최대변위 지점(L=34m)의 시간이력

4.5 연속주행

본 절에서는 차량 여러 대가 터널을 연속으로 통과할 때 생기는 풍하중으로 인한 터널의 거동을 분석하였다. 분석에 앞서 터널 고유주기를 이용하여 터널의 진동주기를 산출하고, 그림 20과 같이 차량과 차량사이의 간격을 계산하여 연속주행 차량의 출발시간을 산출하여 적용하였다.

차량이 단독으로 주행할 때와 연속으로 터널을 통과할 때 생기는 풍하중으로 인한 파형강판 터널라이닝의 변위를 비교 분석하였다. 또한, 입구부 경계조건에 따른 연속주행 상태에서의 영향을 알아보기 위해 두 경계조건을 두고 병행으로 해석하였다. 연속주행 차량에 대한 파형강판 터널라이닝의 동적 거동은 차량속도를 120km/h, 맞바람 풍속을 15m/s로 고정 한 후 차량의 연속 통과수를 2~4대로 증가시켜 동적거동을 분석하였다. 차량 간의 간격은 선형연구결과 파형강판 터널라이닝의 고유진동주기를 고려하여 표 10과 같이 적용하였다.

표 10. 고유주기를 이용한 연속차량간의 거리

경계 조건	차간 거리(m)				연행 출발 시간
	60 (km)	80 (km)	100 (km)	120 (km)	
고정	5.3	7.0	8.8	10.6	0.3
자유	4.4	5.9	7.4	8.8	0.3

그림 20. 연속주행 시 차량 사이 거리

표 11에서와 같이 연속주행 시 파형강판 터널라이닝에 변위를 분석 한 결과 단독주행과 동일한 34m지점에서 최대변위가 나타났으며, 연속주행에서의 속도별 최대변위를 분석할 결과 같은 속도의 단독주행 최대변위와의 차이가 0.3mm정도 증가하였다.

표 11. 연속주행 시 응답 변위

Case	차량속도 (km/h)	맞바람 풍속	차량 수 (대)	응답변위 (mm)	단독주행 최대변위 (mm)
LC3-1	120	15m/s	2	12.7	12.6
LC3-2			3	12.9	
LC3-3			4	12.9	

연속주행 상태에서의 경계조건 변화에 따른 파형강판 터널라이닝의 변위를 측정하기 위해 단독주행과 같이 평가지점에 대한 변위를 측정하여 비교하였다. 그 결과 표 12와 같이 고정단 입구부에서의 13m지점 변위는 12.47mm로 차량이 증가하여도 일정하게 유지가 되었으며, 최대 변위 지점인 34m 지점에서는 3번째 차량이 진입 시 2번째 차량시의 변위보다 0.26mm 증가하였다. 그림 21은 경계조건에 따른 차량 연속주행 시 시간이력도이다.

표 12. 연속주행 시 입구부 경계조건에 따른 응답변위

Case	차량속도 (<i>km/h</i>)	평가지점 (<i>m</i>)	차량 수 (대)	경계조건	응답변위 (<i>mm</i>)
LC3-1	120	13	2	고정	12.5
자유				11.6	
LC3-2			3	고정	12.5
				자유	11.8
LC3-1		34	2	고정	12.7
				자유	12.5
LC3-2			3	고정	12.9
				자유	13.4

입출구부 고정

입출구부 자유

(a) LC3-1(120km_2대)

(b) LC3-2(120km_3대)

(c) LC3-3(120km_4대)

그림 21. 연속주행 차량에 속도별 응답변위

4.6 교차주행

본 절에서는 터널 내에서 차량이 서로 교차할 때 생기는 풍하중과 단독주행 시 생기는 풍하중을 비교 분석하였다. 교차지점은 단독주행 시 평가지점과 같은 13m, 23m, 34m지점으로 하였으며, 하중조건은 차량속도 60~120km/h, 맞바람 풍속은 가장 불리한 풍속인 15m/s로 설정 하였다. 입구부 경계조건에 따른 교차주행 비교분석도 병행하여 진행하였다.

표 13. 교차주행 시 속도별 응답 변위

Case	차량속도 (km/h)	맞바람 풍속(m/s)	평가단면 위치(m)	응답변위 (mm)
LC4-1	120	8	13	18.3
			23	16.1
LC4-2		10	13	20.1
			23	17.6
LC4-3		12	13	21.8
			23	19.3
LC4-4		15	13	25.0
			23	22.0

다양한 속도로 교차주행하는 파형강판 터널라이닝의 동적거동 분석 결과 표 13과 같이 속도가 증가함에 따라 변위가 증가하였다. 최대 응답변위는 속도 120km/h일 때 나타났으며, 단독주행, 연속주행과 동일한 위치인 34m지점에서 나타났다. 최대 변위가 25.0mm 로 나타났으며, 본 연구에서 제시한 허용변위인 50mm 를 초과하지 않았다. 그림 22는 차량이 34m지점에서 교차주행 시 시간이력도이다.

(a) LC4-1(60km)

(b) LC4-2(80km)

(c) LC4-3(100km)

(d) LC4-4(120km)

그림 22. 교차주행 차량에 속도별 응답변위

입·출구부의 경계조건에 따라 교차지점에 대한 거동을 알아보기 위하여 속도와 맞바람 풍속을 고정시킨 후 교차지점을 각각 13m와 23m로 선정하여 그림 23과 같이 비교하였다. 34m지점은 단독주행 분석결과에서 알 수 있듯이 13m지점과 대칭으로써 거동상태가 동일하다고 판단되어 생략하였다.

그림 23. 경계조건에 따른 교차지점 변위(120km)

그 결과 단독주행과 마찬가지로 자유단 보다 고정단 경계조건인 경우의 터널라이닝 변위가 크게 나타났으며, 13m지점에서 교차할 때 25.0mm로 가장 큰 변위를 나타내었고, 터널 중간 지점인 23m지점에서는 21.9mm로 나타났다.

지금까지 여러 차량 주행상태에 대하여 파형강판 터널라이닝의 동적 거동을 분석하였다. 따라서 그림 24와 같이 다양한 차량 주행상태에 따른 최대변위를 비교하여 터널을 통과할 때 가장 불리한 차량 주행상태를 알아보았다.

그림 24. 다양한 차량 주행상태에 따른 최대변위(120km)

비교 결과 연속주행과 단독주행 상태보다 교차주행상태에서 가장 큰 변위가 일어난다는 것을 알 수 있으며, 속도가 증가할수록 단독과 연속주행 차량과의 변위차가 커졌다.

5. 결 론

본 연구는 다양한 차량 통행상태에 따른 풍하중이 파형강판 터널라이닝에 미치는 동적거동을 분석하였다. 다음은 그 연구 결과로부터 얻은 결론이다.

- (1) 통과차량의 속도변화에 따른 풍하중 적용의 경우 본 연구에서의 최대속도인 120km/h(LC1-4)인 경우 변위가 12.6mm로 나타났다. 이는 60km/h(LC1-1)인 경우의 변위 4.8mm와 비교하여 차량의 속도가 증가할수록 터널라이닝의 변형이 크게 일어난다는 것을 알 수 있다.
- (2) 터널 내에 부는 풍속인 맞바람 풍속에 대한 분석 결과 맞바람 풍속이 15m/s일 때(LC2-4) 변위가 가장 크게 나타났다. 이는 맞바람 풍속 8m/s(LC2-1) 일 때의 변위와 비교하여 약 1.5배 큰 값이며, 맞바람 풍속이 증가할수록 터널이 받는 풍하중이 커지는 것을 알 수 있다.
- (3) 입·출구부 경계조건 상태에 따른 차량 주행상태의 파형강판 터널라이닝의 응답변위를 분석해본 결과 입구부가 고정단일 경우 13m지점 변위는 9.7mm이며, 같은 위치에서의 자유단 입구부에서의 변위는 11.7mm로 약 17%정도 추가변위가 발생하였다. 또한 단독주행 최대 응답변위 지점인 34m 지점에서의 변위 비교 결과 고정단 12.6mm, 자유단 12.4mm로 변위차가 2% 이내로 나타났다. 이 결과를 통하여 입구부가 자유단일 경우 최대 변위가 입구부에서 일어나기 때문에 고정단 경계조건 터널의 변위와 비교하여 차이가 크게 나타났다.
- (4) 연속주행 상태에서의 동적 거동을 분석한 결과 2대가 연속주행 시 12.7mm 변위가 발생하였고, 3대로 주행 시 12.9mm 변위가 생겼다. 단독주행과 비교했을 때 변위 증가폭이 0.3% ~ 2.5% 이내였으며, 입구부에서 멀어질수록 변위 폭 또한 감소하였다. 이 결과로 보아 차량이 연속으로 주행 시 터널에 작용하는 풍하중은 차량이 단독주행 시 터널이 받는 풍하중과 큰 차이가 없다고 판단된다.
- (5) 교차주행 상태에서의 다양한 속도로 통과하는 파형강판 터널라이닝의 거동을 분석한 결과 차량속도 120km/h로 교차한 경우(LC4-4) 25.0mm의 변위를 보였으며,

이는 차량속도 60km/h로 교차할 때(LC4-1)의 변위인 9.4mm와 비교하여 교차주행 차량의 속도가 증가할수록 터널라이닝의 변형이 크게 일어났으며, 이때의 변위는 본 연구에서 최대변위로 나타나, 파형강판 터널라이닝 설계 시 터널 내 차량의 교차주행을 고려하여 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한, 허용변위인 50mm를 초과하지 않았다.

본 연구에서는 풍하중산정식 단순식을 이용하여 구했으며, 선형거동만을 분석하였다. 향후 CFD분석 및 자체프로그램의 개발 등을 통하여 보다 실질적인 거동분석을 이루고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임(2007-0186).

참 고 문 헌

- 건설교통부(1997) 도로설계편람(I) 터널편, pp. 408-57~408-61.
- 나호성, 최동호, 유훈(2011) 파형강판의 최적단면 결정, 한국지반환경공학회논문집, 제12권, 제3호, pp. 5-12.
- 대한터널협회 (2007) 건설교통부 제정 터널설계기준.
- 마호성, 이충관, 이태환, 정건아 (2008) 통과차량으로 인한 풍하중에 대한 파형강판 터널라이닝의 동적거동분석, 한국강구조학회학술대회발표집, 한국강구조학회, 제19권, 제1호, pp. 84-87.
- 최동호, 김기남, 유호연(2001) 낮은 아치형 파형강판 압거의 간략한 단면력식 제안, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제21권, 제6-A호, pp. 937-946.
- 최동호, 이종선, 나호성(2010) 지중강판 박스 구조물을 위한 파형강판 해석 모델, 한국지반환경공학회논문집, 한국지반환경공학회, 제11권, 제11호, pp. 5-18.
- 황민오(1999) 파형강판 구조물에 관한 설계요령 및 적용사례, 파형강판 및 파형강판 구조물 세미나 자료집, pp. 125-142.
- Clough, R.W. and Penzien, J. (1975) *Dynamics of Structures*, Macgraw-Hill Book Company.
- Corrugated Steel Pipe Institute(CSPI) (2007) *Handbook of Steel Drainage & Highway Construction Canadian Edition*.
- Takanobu, O. and Kozo, F. (1997) Numerical Investigation of Three-dimensional Compressible Flows Induced by a Train Moving into a Tunnel, *Computers & Fluids*, Vol, 26, No. 6, pp. 565-585.

The Norwegian Public Roads Administration (1995)
*Water and frost protection in tunnels structures
for shielding functional requirements and design
rules.*

(접수일자 : 2011. 10. 7 / 심사일 2011. 10. 13 /
심사완료일 2012. 2. 10)