Journal of KOSHAM
Vol. 13, No. 4 (Aug. 2013), pp. 083~090
ISSN 1738-2424(Print), ISSN 2287-6723(Online)
http://dx.doi.org/10.9798/KOSHAM.2013.13.4.083

다양한 곡률을 갖는 터널에서의 연속주행 차량에 따른 풍하중으로 인한 강재터널라이닝의 동적거동분석

Dynamic Behaviors of a Curved Steel Tunnel Lining with Various Curvatures under Wind Loads due to Consecutive Passing Vehicles

마호성* · 조광일**
Mha, Ho-Seong · Cho, Kwang Il

Abstract

Dynamic behaviors of the steel lining of curved tunnels with various curvatures are throughly examined to see the effect of wind loads due to consecutively passing vehicles. The wind pressure upon the lining is simplified into the pressure and suction while the vehicles are passing the specific positions. Results from cases of sole driving and consecutive driving conditions for both curved and straight tunnels are compared. It is found that the maximum displacements occur at middle location of the tunnel, and that the responses from consecutive passing vehicles increase compared to those from the single vehicle conditions for all tunnels. It is also found that the responses increase at the higher speed of passing vehicles while the responses decrease as the curvatures increase. In the case when the consecutive vehicles go at the high speeds, the increments of the responses become hardly noticeable compared to those from single passing vehicle conditions since the safety distance are getting long enough to eliminate the effect of wind load from the following vehicles.

Key words : Dynamic Behaviors, Curved Tunnel, Curvature, Tunnel Lining, Wind loads, Consecutive Driving

요 지

본 논문에서는 연속주행으로 인한 풍하중에 대하여 곡률이 다른 곡선터널에서의 강재터널라이닝의 동적거동에 대하여 분석하였다. 차량의 주행으로 인한 풍하중은 하중작용지점에서의 차량의 통과위치에 따라서 압축 및 팽창력으로 표현되는 시간함수를 이용하여 단순화시켜 모형화하였다. 곡선터널에서의 곡률의 변화에 따른 영향은 단독 및 연속주행시의 직선터널과의 해석결과를 비교하여 분석하였다. 결과로부터 고려한 모든 터널에서의 변위는 터널의 중앙 부분에서 가장 큰 값을 보이며 연속주행 시에 더 큰 값을 나타냈다. 응답변위는 곡률이 커질수록 적어지는 반면 속도의 증가에 따라서는 증가함을 알 수 있었다. 고속주행 시에는 차량 간의 안전거리 증가로 인하여 따라오는 차량에 의해 터널에 미치는 영향이 줄어, 연속주행으로 인한 변위 증가는 단독주행의 경우와 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 동적거동, 곡선터널, 곡률, 터널라이닝, 풍하중, 연속주행

1. 서 론

국내에서 터널의 역사는 대략 100여 년이며 1960년대부터 이루어진 급격한 산업 발전에 따른 교통량의 증가로 인해 도로터널의 건설은 빠른 속도로 증가하고 있다. 터널 및 지하공간 개발의 필요성은 이미 유럽, 미주 등의 선진국에서 제기되어 여러 기술들이 개발되어 왔으며, 국토가 좁고 산악지역이 많은 극동 아시아의 한국, 일본 등은 기술 개발에 박차를 가하고 있는 실정이다(Kim *et al*., 2002). 이러한 연구동향에 맞춰 열악한 환경을 갖춘 국내 지형 여건상 고속도로 및 국도에는 다수의 터널이 건설되어 있고, 환경에 대한 사회적 관심 증가로 인해 터널 건설은 계속해서 증가하고 있는 추세이다. 이렇듯 터널은 환경피해를 최소화하면서, 이동시간을 단축할 수 있으며, 대량물류의 신속한 수송 및 전 국토의 효율적인 이용을 통한 지역 간의 균형 있는 발전 등 교통수단으로서의 역할을 담당하는 효과적인 도로시설이라 할 수 있다(Park *et al*., 2007; Jeon *et al*., 2006). 터널의 평면형상은 가능한 한 직선으로 계획하되 경제성 및 시공성을 고려

*정회원. 호서대학교 토목공학과 교수(E-mail : mhah@hoseo.edu)
Member. Professor, Department of Civil Engineering, Hoseo University
**교신저자. 정회원. 포항산업과학연구원 강구조연구소 책임연구원(Tel : +82-32-200-2462, Fax : +82-32-200-2479, E-mail : kicho@rist.re.kr)
Corresponding Author. Member. Senior Researcher, Research Institute of Industrial Science & Technology Steel Structure Research Division

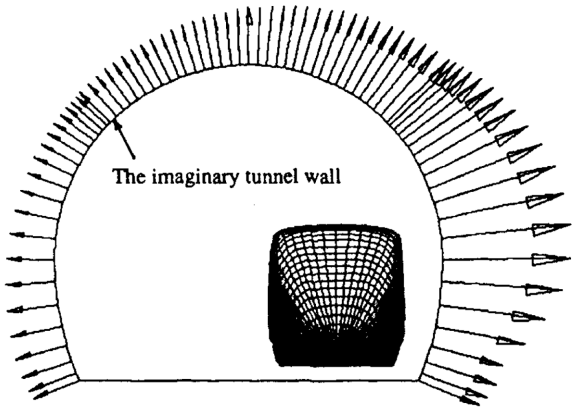
하여야 하며 종단선형과 상호 연계하여 조화되도록 계획하여야 한다. 장대터널의 경우 주행차량의 과속 및 졸음운전의 방지와 터널의 출구부에서 역광으로 인한 시거 장애요인이 발생하지 않도록 적정한 곡선을 삽입하는 것이 바람직하여 대부분의 장대 화 된 터널은 곡선을 가지고 있다(Highway Design Manual, 2010). 한편, 터널 시공에 있어 중요한 역할을 하는 터널라이닝은 기존의 기능적 그리고 미관적 의미와 더불어 최근에 들어서는 구조적 기능 및 유지관리 기능이 추가적으로 대두되고 있다. 터널라이닝에는 여러 가지 공법이 있는데 수압작용, 균열억제 등을 고려하여야 할 때 철근 콘크리트라이닝이 적용되고 있으며(Oh *et al*., 2004), 암반이 견고할 때는 판넬식라이닝의 적용이 가능하며 이러한 경우 통과차량으로 인한 풍하중의 영향을 분석할 필요가 있다.

따라서, 본 논문에서는 곡률반경과 주행 차량의 속도 변화에 따른 곡선터널에서 터널라이닝에 미치는 영향을 분석하기 위해 뒤채움이 없는 독립된 일반 강판 터널라이닝이 적용된 직선 및 곡선터널의 동적거동을 분석하고자 한다.

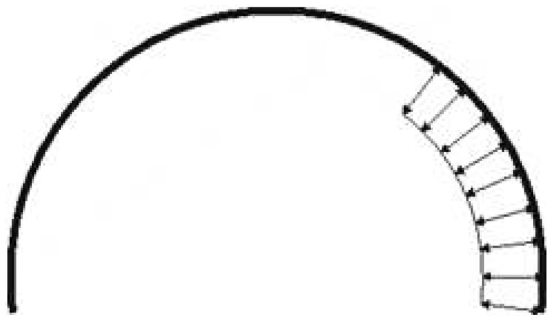
2. 차량의 주행에 의해 발생되는 터널내의 풍하중

본 연구에서 동적거동을 유발하는 하중은 구조물의 표면에 풍압으로 작용(Mha *et al*., 2012b)하게 된다.

터널 내부에서 차량의 주행에 따라 발생하는 실제 풍하중의 분포는 다음 Fig. 1-(a)(Takanobu *et al*., 1997)와 같이 복잡한 형태로 나타나는 것으로 알려져 있다. 하지만 이러한 형태의 풍하중은 시간이력해석에 적용하기에는 무리가 따르므로 본 논문에서는 이를 좀 더 단순화하여 주행차량의 전반부에는 압축력이 발생하고 후반부에는 흡입력이 발생하는 것으로 시간에 대한 풍하중의 시간이력을 수행하였다.



(a) Distribution of the actual wind pressure acting on the tunnel lining(Takanobu.O et al., 1997)



(b) Idealized distribution of the wind pressure acting on the tunnel lining(Mha, H.S et al., 2012a)

Fig. 1. Distribution of the Wind Pressure Acting on the Tunnel Lining

Fig. 1-(b)와 같이 차량의 주행방향 우측 1/3부분에 풍하중을 재하하였고 그 이외의 터널벽면은 영향을 받지 않는다고 가정하였다.

Fig. 2에는 차량 통과 시에 터널에 작용하는 하중을 나타낸 것이다. 차량의 앞부분이 통과할 때는 맞바람에 의해 터널 벽면에 압축력이 가해지고 차량의 중앙지점이 통과할 때부터는 흡인력이 가해진다.

터널 안 작용하는 하중은 차량이 통과할 때 생기는 풍하중과 차량의 주행하는 반대방향으로 부는 바람인 맞바람이 터널 내부에서 일정하게 불고 있다. 맞바람 풍속에 대한 국내 기준은 현재 존재하지 않으며, 터널설계기준(Ministry of Construction and Transportation, 2007)중 환기설계기준에서 터널 내 풍속은 일방향 터널시 표준 10 m/s이고, 양방향 터널인 경우 8 m/s를 표준으로 규정하고 있다. 따라서 본 논문에서는 환기설계기준보다 악조건의 맞바람 풍속에 대해 검토하기 위하여 맞바람 풍속을 환기설계기준에서 제시한 풍속보다 50% 증가시켜 15 m/s를 적용하였다. 자세한 기준은 Table 1에 나타내었다.

통과하는 차량에 의해 발생하는 풍하중이 일반 강판 터널라이닝에 미치는 영향을 판단하기 위하여 노르웨이 시방기준(The Norwegian Public Roads Administration 1995)에 제시된 풍하중 계산식을 사용하였다. 식 (1)을 사용하여 터널을

Fig. 2. Wind Load by Passing Vehicle(Mha, *et al*., 2012a)

Table 1. Wind Speeds in the Tunnel from the Domestic and International Standards

Country	Domestic and International Design Standards (m/s)		Applied Wind Load (m/s)
	One-Way	Bi-Way	Maximum
Japan	12	8	15
WRA (PLARC)	12	8	
Germany	10	8	
Norway	10	7	
Korea	10	8	

Table 2. Comparison of Wind Loads in Accordance with the Speed

Speed of the Vehicle (km/h)	Wind Load (km/h)	Pressure (km/h)	Suction (km/h)
60	15	250.7	-501.4
80	15	346.4	-692.8
100	15	457.5	-915
120	15	584	-1168.1

통과하는 차량으로 인한 풍하중을 계산하였으며, 결과를 Table 2와 같이 산출하였다.

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

여기서,

q = 압축력(Pressure) (N/m^2)
흡입력(Suction) (N/m^2)
μ = 0.4 : Pressure
-0.8 : Suction
V_b = 설계차량속도(Speed) (km/h)
V_l = 맞바람풍속(wind load) (m/s)

속도별 풍하중은 60 km/h일 때 Pressure가 250.7 N/m^2, Suction은 -501.4 N/m^{2}으로 속도별 하중에서 가장 작은 값을 나타냈으며, 가장 큰 값은 Pressure가 584 N/m^2, Suction이 -1168.1 N/m^{2}으로 120 km/h일 때 나타났다. 이를 통해 차량의 주행 속도와 풍하중이 정비례한다는 것을 알 수 있다.

3. 터널라이닝의 제원, 모델링 및 하중조건 선정방법

3.1 구조물의 제원

본 연구에서는 선행연구(Mha *et al.*, 2012a)와 같은 형태의 구조물을 사용하였는데 대상구조물은 Fig. 3과 같이 2개의 곡률반경을 갖는 3개의 구간으로 구성된 아치 형태의 단면을 가지고 있으며, 대상구조물의 길이는 400 m로 하였다. 통과차량이 일방향인 경우에 편도 2차선 또는 양방향인 경우

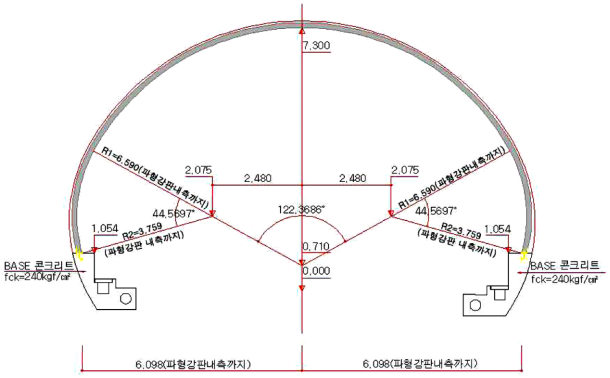


Fig. 3. Standard Tunnel Section(Mha, *et al.*, 2012b)

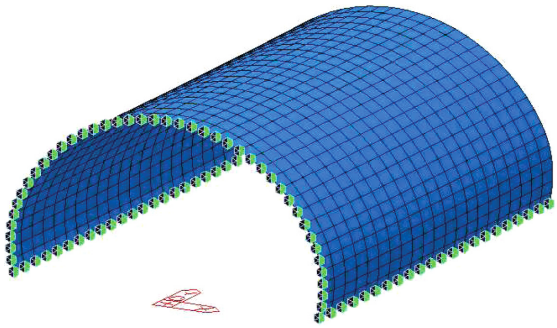
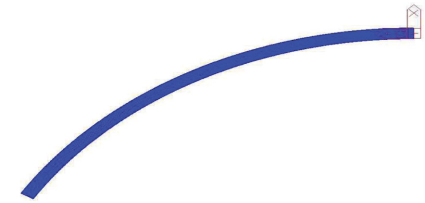


Fig. 4. The Geometry and Boundary Conditions of Tunnel Entrance and Exit

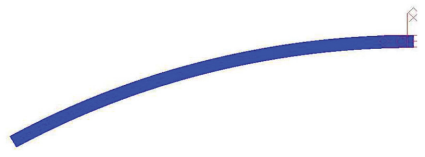
에 왕복 1차선의 교통터널을 구축할 수 있도록 하였다. 본 논문은 구조해석 프로그램인 Midas-Civil 2012를 이용하여 강재 터널라이닝을 모형화하였으며, 터널의 지점 부 및 입·출구부를 일반적으로 옹벽과 같은 벽체구조로 고정되므로 고정단으로 경계조건을 설정하였다. 프로그램에서 터널 입·출구부를 모형화한 형상 및 경계조건을 Fig. 4에 나타내었다.

3.2 구조물의 모델링

본 논문에서 해석에 이용한 구조물은 Fig. 5에 나타낸 길이 400 m의 직선 및 곡선터널라이닝 모형이다. 곡선터널의 곡률은 도로설계 편람 제6편의 터널 편을 근거로 설계 속도 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h일 때 각각 최소 곡률반경 392 m, 768 m와 1,415 m로 하였다. 곡률반경은 폭원 구성을 3.19 m, 설계속도 별로 정지시거를 100 m, 140 m, 190 m로 계산하였다(Highway Design Manual 2010). 선행연구(Mha *et al.*, 2012a)를 참고하여 곡률반경의 길이는 중심점에서 터널 폭의 중심 지점까지의 직선거리로 계산하였다.



(a) Curve Tunnel (R=392m)



(b) Curve Tunnel (R=768m)

(c) Curve Tunnel (R=1415m)

(d) Straight tunnel

Fig. 5. Plan View of Considered Tunnels

터널라이닝의 동적거동은 직선터널과 곡률반경이 다른 3가지 형상의 곡선터널에 연속 주행을 실시하여 실제 터널에 작용하는 풍하중을 고려할 수 있도록 하였으며, 차량이 지나가는 방향의 우측면 1/3부분에만 하중을 재하함으로써 단순화 하였다.

3.3 하중조건 선정

터널 내 작용하는 맞바람풍속을 국내·외 설계기준에서 최대 12 m/s까지 허용하고 있으나, 기준보다 악조건의 맞바람 풍속에 대해 검토하기 위하여 맞바람 풍속을 15 m/s로 하였다(Mha *et al*., 2012a). 곡선터널에서는 곡률반경에 따라서 최고설계속도가 정해져 있으나 본 연구에서는 통과차량의 주행속도 변화에 따른 터널라이닝의 거동분석을 위하여 곡률반경 392 m, 768 m, 1415 m인 곡선터널과 직선터널, 총 4가지의 터널에 대해 통과차량 주행속도를 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h으로 수행하였다.

Fig. 6은 차량이 60 km/h로 연속주행 할 때 풍하중의 함수에 대한 예시를 나타낸 것이다. 차량의 진행에 따라 변화하는 풍하중을 적용시키기 위하여 차량의 길이(Fig. 7)와 속도, 쉘의 길이를 고려하여 계산하였으며, 직선터널의 경우 양쪽 차선 모두 차량의 속도와 쉘의 길이를 주행 속도와 주행 거리로 계산하였으나 곡률반경이 있는 곡선터널의 경우 곡선이기 때문에 바깥 쉘의 길이와 안쪽 쉘의 길이가 다르므로 터널 폭의 중심 지점에서의 거리에 비례하게 변화시켰으며, 통과 차량은 연속 3대로 하였으며 차량 간의 안전거리는 Table 3과 같이 고유주기를 고려하지 않고 주행속도에 따른 차량 간의 안전거리를 이용하였다. 연속 주행하는 차량의 대수가 증가하여도 최대변위는 변화가 없으며, 고유주기를 고려해도 변화가 없기 때문에 연속 주행 차량의 대수는 3대로 하였고 고유주기도 고려하지 않았다(Mha *et al*., 2012b).

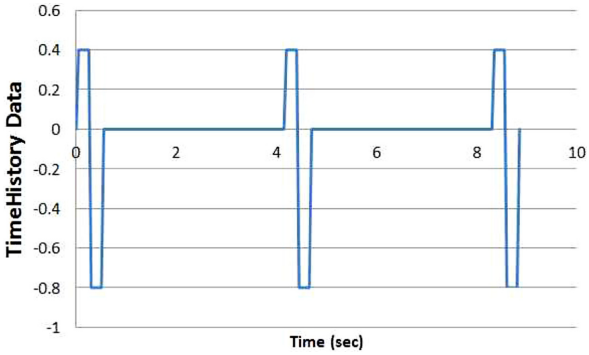


Fig. 6. A wind Load Function of Consecutive Passing Vehicles with Speed of 60 km/h

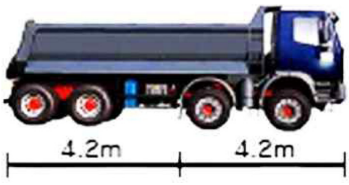


Fig. 7. Specification of the Transit Vehicle

Table 3. Distances between Vehicles According to Speeds

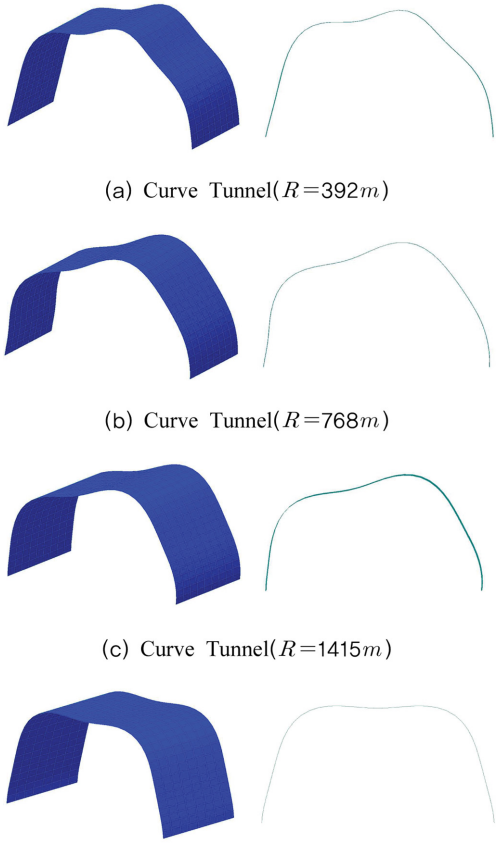
Speed of Vehicles	60 km/h	80 km/h	100 km/h	120 km/h
Distance between Vehicles	60 m	80 m	100 m	120 m

풍하중의 경우 Midas-Civil 2012에서 시간이력함수를 이용하여 시간이 지남에 따라 터널에 작용하는 풍하중이 점차 변화할 수 있도록 하여 압축력은 차량 앞부분이 쉘의 입구 부분을 통과하는 시점부터 서서히 증가하여 차량 앞부분이 쉘 전체를 통과하는 시점에 최대가 되도록 하였다. 흡입력은 차량의 중앙부분이 쉘의 입구부분을 통과하면서부터 압축력이 흡입력과 상쇄되어 압축력은 감소하고 흡입력은 서서히 증가하여 차량의 중앙부분이 쉘을 모두 지나가면서 흡입력이 최대가 되도록 하였으며, 차량의 뒷부분이 쉘의 초입 부분을 통과하는 시점부터 흡입력을 감소시킨 뒤 각 속도별 안전거리를 계산하여 하중간의 시간 차이를 두었다. 연속된 차량이 터널을 완전히 통과한 후에 구조물의 진동이 거의 없어질 때까지 시간을 고려하여 충분한 시간으로 수행하였다.

4. 풍하중에 의한 구조물의 동적 거동 분석

4.1 강재 터널라이닝 모드해석

강재 터널라이닝의 동적거동을 분석하기 위하여 모드해석을 수행하였다. 곡선터널은 3차원적으로 복잡한 형상을 가지



(a) Curve Tunnel($R=392m$)

(b) Curve Tunnel($R=768m$)

(c) Curve Tunnel($R=1415m$)

(d) Straight tunnel

Fig. 8. Main Mode Shapes of Steel Tunnel Lining in Z-Directions at the Middle Positions of Tunnels

Table 4. Natural Frequencies of Tunnel Linings with Different Curvatures

Type of Tunnels	Frequency (Hz)
Curved Tunnel (R=392 m)	0.78
Curved Tunnel (R=768 m)	0.76
Curved Tunnel (R=1415 m)	0.56
Straight Tunnel	0.42

므로 연직방향 질량기여도가 가장 높은 모드에서의 고유진동수와 모드형상을 관찰하였다. 그 결과 Table 4와 같이 곡률반경 392 m, 768 m, 1415 m인 곡선터널과 직선터널의 각각 고유진동수는 0.78 Hz, 0.76 Hz, 0.56 Hz, 0.42 Hz로 나타났다. 곡선터널의 고유진동수는 곡률반경이 작아질수록 높아지는 경향을 나타냈고, 구조물의 강성이 높아지는 것으로 나타났으며, 모드형상 또한 차이를 보였다(Mha *et al*., 2012a).

4.2 터널라이닝의 동적거동 분석

4.2.1 평가 위치 선정

대상 구조물의 분석에 사용 될 평가위치는 입·출구부에서는 경계조건을 고정단으로 하여 변위가 발생하지 않으므로 Fig. 9에 나타난 바와 같이 최대 변위가 나타난 100 m, 200 m, 300 m구간의 중앙 상부로 선정(Mha *et al*., 2012a) 하고 강재 터널라이닝의 시간 이력 해석을 수행하였다.

4.2.2 연속적인 차량 통과하중에 의한 터널라이닝의 변위 응답

연속 주행이 강재터널라이닝에 미치는 영향을 분석하기 위해 100 m, 200 m, 300 m의 평가위치에서 변위를 측정 하였다. displacement ratio는 직선터널에서 60 km/h로 차량이 주행할 때 발생하는 강재터널라이닝의 각 평가위치에 대한 최대 변위 응답을 1로 정하고 이에 대한 각각의 곡률을 가진 곡선터널들과 다양한 차량의 주행 속도에서의 최대 변위를 상대적인 비율 값으로 나타낸 것이다.

곡률반경의 변화에 따른 응답의 변화를 관찰하기 위해 Fig. 10과 같이 차량의 주행 속도는 60 km/h로 동일하고 곡률반경을 변화 시켰을 때 처짐 비를 분석하였다. 분석결과 곡선터널의 변위는 곡률반경이 392 m, 768 m, 1415 m로 변화 할

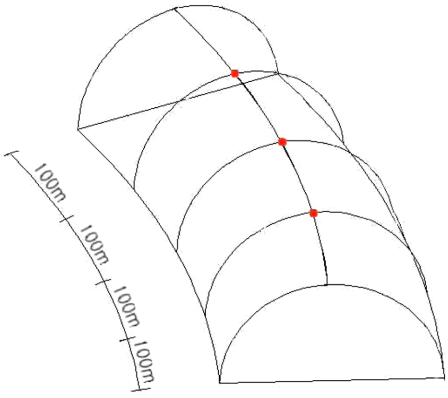


Fig. 9. Evaluating Locations(Mha, et al., 2012a)

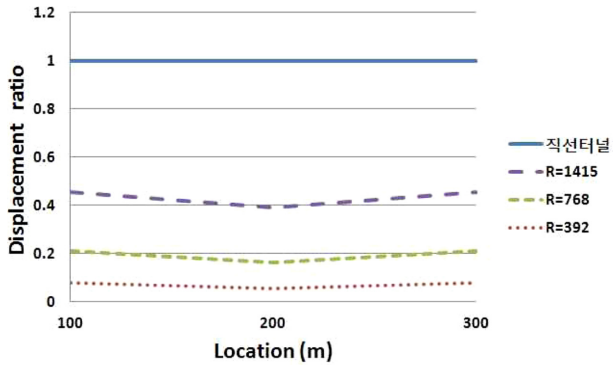


Fig. 10. Displacement Ratios of Curved Tunnels Relative to the Straight Tunnel with Speed of 60 km/h

때 직선터널의 변위 응답에 비해 각각 1/20~1/13, 1/7~1/4, 1/3~1/2 만큼 작게 나타나 곡률반경이 감소할수록 처짐 비와 감소비율이 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 곡률반경이 감소할수록 강재터널라이닝의 강성이 커지기 때문이라고 판단된다. 또한 터널의 200 m지점이 100 m, 300 m지점 보다 처짐 비가 작은 것으로 나타나는데, 200 m 중앙 상부 지점의 최대 변위의 감소율에 비해 100 m, 300 m 중앙 상부 지점의 감소율이 크기 때문에 200 중앙 상부 지점의 처짐 비가 가장 작게 나타났다.

Fig. 11은 각 터널 별로 연속주행 시 차량의 속도 위치에 따른 최대 변위 응답을 나타낸 것이다.

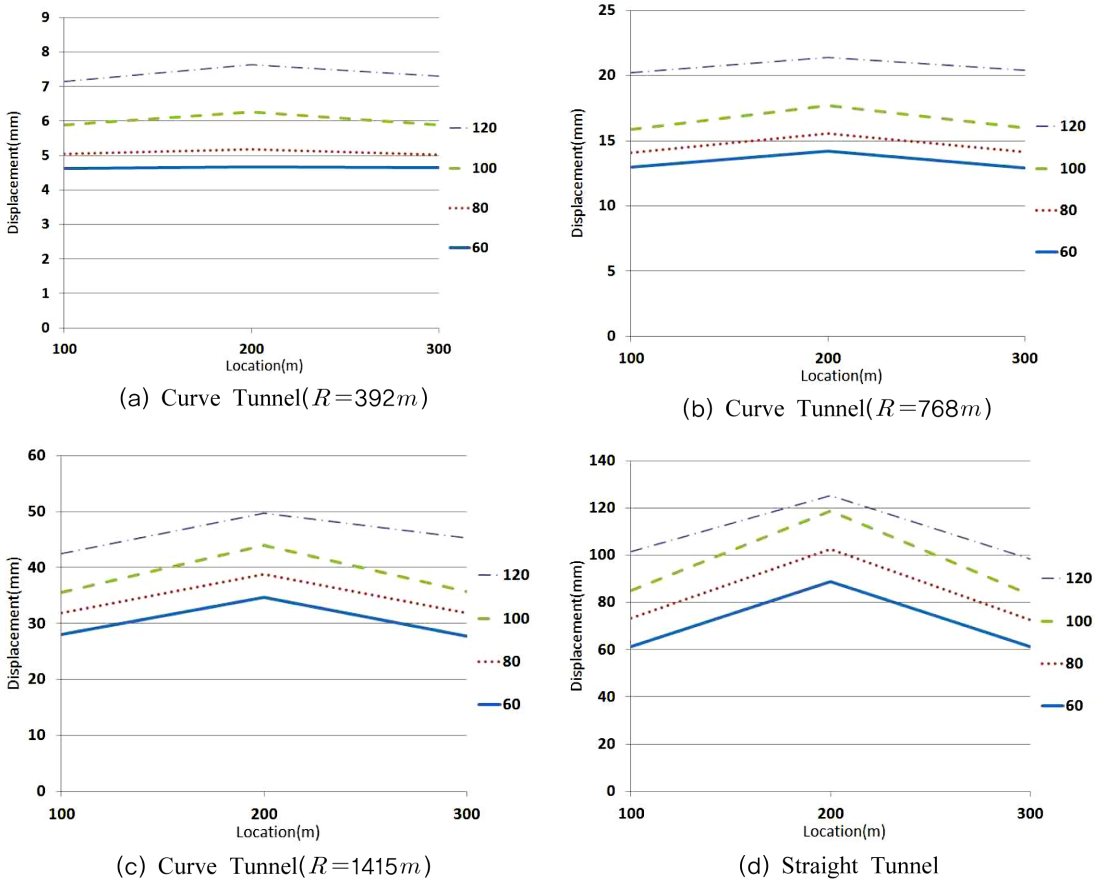
직선터널에서는 60 km/h일 때 최대 변위가 88.7 mm이며 곡률반경이 1415 m인 터널에서는 34.6 mm, 곡률반경 768 m인 터널은 14.23 mm, 곡률반경 392 m인 터널은 4.67 mm로 곡률반경이 작아질수록, 즉 곡률이 커질수록 터널의 상부지점 변위는 급격히 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 터널의 최대 변위는 모든 곡선 및 직선터널에서 200 m지점의 변위가 가장 크게 나타났다. 차량의 주행속도가 증가할수록 변위도 증가하였으나 200 m지점에서 최대변위가 발생하는 것은 변하지 않았다. 이는 입·출구부가 고정단이기 때문에 경계조건의 영향으로 입·출구부에 가까운 100 m, 300 m 지점의 변위는 작게 나타나는 것이라고 판단된다. 따라서 앞으로는 터널의 200 m지점의 변위만을 사용하여 결과분석을 실시하도록 한다.

200 m 중앙 상부 지점의 변위를 이용하여 강재터널라이닝 최대 변위 추세를 관찰하여 Fig. 12에 나타내었다.

곡률반경이 392 m인 곡선터널 200 m지점에서 차량의 주행속도가 60 km/h에서 80 km/h으로 증가하였을 때 변위는 1.11배 증가하였으며, 8 km/h에서 100 km/h로 증가하였을 때는 1.21배, 100 km/h에서 120 km/h는 1.22배로 증가하였다. 768 m인 곡선터널은 속도가 증가할 때 마다 1.09배, 1.14배, 1.21배 증가하였고, 곡률반경 1415 m인 곡선터널은 1.12배 1.14배 1.15배 증가하였다.

모든 곡선터널에서 차량의 통과 속도가 20 km/h씩 증가 할 때 마다 최대변위가 약 1.09~1.22배 증가하는 것으로 보아 차량의 주행 속도가 증가할수록 풍하중이 터널에 미치는 영향 또한 증가하며 증가율 또한 커지는 것을 알 수 있다.

곡선터널에서의 처짐 비는 직선터널과 비교하였을 때 곡률



(a) Curve Tunnel(R=392m)　(b) Curve Tunnel(R=768m)

(c) Curve Tunnel(R=1415m)　(d) Straight Tunnel

Fig 11. The Maximum Displacements of Curved Tunnels with Various Passing Speeds at Different Evaluating Positions

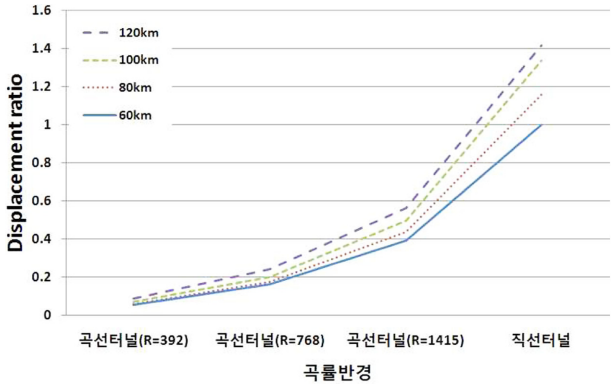


Fig. 12. Displacement Ratio via Curvature Radii with Different Vehicle Speeds

반경이 392 m인 터널에서는 0.05~0.12를 나타냈고, 곡률반경이 768 m인 터널에서는 0.16~0.33, 곡률반경 1415 m인 터널은 0.39~0.74의 처짐 비를 나타내 곡률반경이 커질수록 곡선터널과 직선터널간의 변위차이가 작다는 것을 알 수 있다.

변위비와 곡률의 관계를 보다 일반화하기 위해 일차회귀분석(linear regression)으로부터 식 (2)에 보이는 바와 같은 추세식(trend formula)을 얻을 수 있었다.

$$\delta_{\max} = (0.0002V + 0.0173)R - 8.70403 \qquad (2)$$

여기서,

V = 차량의 주행속도 (km/h)

R = 곡선터널의 곡률반경 (m)

식 (2)를 이용하여 Fig. 13에 곡률반경에 따른 최대 변위의 그래프를 나타내었다.

본 논문에서 해석한 연속주행 터널의 최대 변위와 식 (2)를 통해 도출한 최대 변위, 두 가지 값을 비교하여 최대변위의 실제 오차와 백분율 차를 Table 5에 나타내었다. 두 결과값의 비교를 통하여 일정범위 안에서 터널의 최대 변위를 예측 할 수 있었으며, 곡선터널라이닝의 변위가 차량의 주행속도 및 터널라이닝의 곡률반경과 비례관계가 있음을 확인 할 수 있다. 향후 다양한 제원을 가진 터널라이닝의 분석을 통해 터널라이닝의 변위를 예측할 수 있는 수식을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

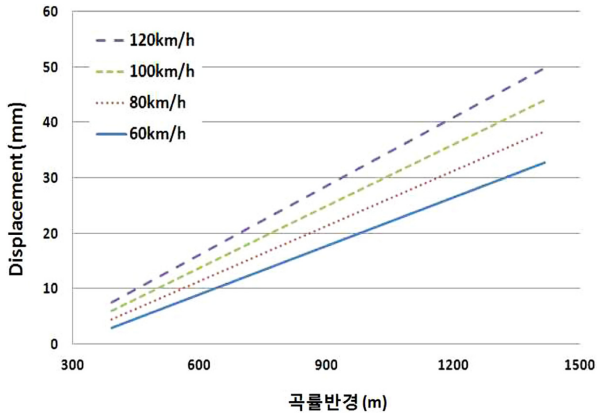


Fig. 13. Linear Regression Lines of Displacement Ratio and Tunnel Curvature with Different Vehicle Speeds

Table 5. Comparison of Values from the Suggested Formula and Simulations

Speed of the Vehicle (km/h)	Type of Tunnel					
	Curve Tunnel (R=392m)		Curve Tunnel (R=768m)		Curve Tunnel (R=1415m)	
	Displacement Difference (mm)	Error (%)	Displacement Difference (mm)	Error (%)	Displacement Difference (mm)	Error (%)
60	1.89	40.4	0.43	3	1.88	5.4
80	0.84	16.1	1.3	8.4	0.31	0.8
100	0.35	5.7	2.25	12.7	0.05	0.1
120	0.15	2	1.61	7.5	0.04	0.1

4.2.3 단독주행과 연속 주행에 의한 터널라이닝의 동적거동 비교

본 절에서는 연속주행이 곡선강재터널라이닝에 주는 영향을 알아보기 위하여 곡률반경이 각각 392 m, 768 m, 1415 m인 곡선터널 및 직선터널에서 주행속도가 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h일 때 단독주행 시와 연속주행 시의 변위 응답을 비교하였다. 비교 값은 200 m중앙 상부지점의 변위 응답을 이용하였고, 동일한 주행속도와 곡률반경에 대한 단독주행 결과의 비례 값으로 나타내었다(Table 6).

곡률반경이 392 m인 곡선터널에서 주행속도가 60 km/h일 때 연속주행 시의 변위가 단독주행 시의 변위보다 56% 증가하였으며, 80 km/h일 때는 26%, 100 km/h일 때는 14%, 120 km/h는 7% 연속 주행 시의 변위가 더 크게 나타났다. 곡률반경 768 m일 때도 차량속도 60 km/h일 때의 연속주행 시의 변위가 단독주행 시에 비해 67%로 다른 속도들보다 큰 증가 값을 나타냈으며, 곡률반경 1415 m 역시 차량속도 60 km/h일 때 82%의 증가를 보여 가장 크게 나타났다. 모든 터널에서 단독주행보다 연속주행의 변위가 크게 나타났으나 속도가 증가할수록 그 차이가 작아졌다.

Table 6. Displacement Ratio of Consecutive Vehicle Driving Case to Single Vehicle Driving Case at the Same Tunnel Conditions

Speed of the Vehicle (km/h)	Type of Tunnel			
	Curve Tunnel (R=392 m)	Curve Tunnel (R=768 m)	Curve Tunnel (R=1415 m)	Straight Tunnel
60	1.56	1.67	1.82	2
80	1.26	1.31	1.47	1.68
100	1.14	1.12	1.23	1.4
120	1.07	1.03	1.09	1.17

5. 결 론

본 연구에서는 직선 및 곡선터널에서 차량의 연속주행을 시간이력 함수로 모형화하여 풍하중이 강재터널라이닝에 미치는 동적거동 분석 및 단독주행과 비교 분석을 하였다. 이상의 연구로부터 얻어진 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 다양한 속도의 연속주행을 통하여 강재터널라이닝의 동적응답의 변화를 분석한 결과 주행속도가 20 km/h 증가할수록 최대 변위 응답은 1.09~1.22배 크게 나타났으며, 모든 형태의 터널에서 200 m지점의 처짐 비 감소율이 100 m, 300 m지점의 감소율보다 크다는 것을 알 수 있었다. 이를 통하여 차량의 주행속도가 증가할수록 풍하중이 터널에 미치는 영향이 크게 일어난다는 것을 알 수 있었다.
2) 차량 주행에 의한 곡선강재터널라이닝의 변위는 차량의 주행속도 및 터널라이닝의 곡률 반경과 비례관계가 있음을 확인하였으며, 향후 다양한 제원을 가진 터널라이닝의 분석을 통해 터널라이닝의 변위를 예측할 수 있는 수식을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.
3) 단독주행과 연속주행에 대한 강재터널라이닝의 동적응답 변화를 비교한 결과 연속주행 시에 단독주행 시보다 변위가 더 크게 나타났으나 주행속도가 20 km/h씩 증가할수록 변위의 증가량이 작아지는 결과를 보였다.

본 연구에서는 풍하중과 시간이력함수를 단순화하여 직선 및 곡선터널에서 연속주행을 통한 동적거동을 분석하였고, 차량의 주행속도 및 터널라이닝의 곡선 반경의 변화가 터널라이닝의 변위에 비례관계가 있다는 것을 확인 하였으며, 단독주행과 연속주행의 비교를 통하여 주행속도가 높아질 경우에는 차량 간의 거리가 증가함으로 인하여 터널라이닝에 미치는 영향이 큰 차이가 없다는 것을 알 수 있었다. 또한, 향후 해석 방법의 개선과 응용을 통하여 터널 내에서 다양한 형태의 차량의 주행으로 인해 발생할 수 있는 다양한 동적거동의 분석을 수행 할 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(313-2008-2-D01094)이며, 이에 감사드립니다.

References

Jeon, J.K., Jeon, C.K., Kim, N.Y., Kim, S.M. and Lee, J.E. (2006) A Study on Controlling of Cracks Occurred at Crown of Tunnel Concrete Lining using Model Test, *Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association*, Vol. 8, No. 3, pp. 227-235, 1229-2338 KCI.

Kim, J.S., Ahn, C.H., Kang, S.H. and Lee, J.H. (2002) Ventilation

Characteristics of Curved Long Tunnel using Jet Fan, *proceedings of the '02 annual conference on the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of korea,* pp.1273-1278.

Ministry of Construction and Transportation (2007) Tunnel Design Criteria, Chapter 14 Ventilation Equipment

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010) Highway Design Manual Part 6, the Tunnel.

Mha, H.S., Cho, K.I. and Park, I.J. (2012a) Dynamic Behaviors of the Curved Steel Tunnel Lining due to Wind Loads by Passing Vehicles, *Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association*, Vol. 14, No. 4, pp. 309~320, 1229-2338 KCI.

Mha, H.S., Cho, K.I. and Yoo, S.H. (2012b) Dynamic Behaviors of a Corrugated Steel Tunnel Lining System due to Wind Loads by Passing Vehicles according to the Boundary Conditions, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol. 24, No. 1, pp. 47-58, 1226-363X KCI.

Oh, Y.C., Kim, S.J., Shin, Y.S. and Ahn, S.R. (2004) An Analysis of Reflection Signal Pattern of tunnel Lining using GPR, *proceedings of the '04 annual conference on Korean Society of Civil Engineers,* pp. 3617-3622.

Park, H.J., Hwang, K.J. and Shin, H.J. (2007) A Study on Diver's Characteristics in Long Tunnel Using Driving Simulator, *Journal of Ergonomics Society of Korea,* Vol.24, No.2, pp. 89-102.

Takanobu, O., Kozo.Fujii (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 Norwagian Public Roads Administration (1995) Water and frost protection in tunnels Structures for shielding functional requirements and design rules.

◎ Received May 23, 2013
◎ Revised May 24, 2013
◎ Accepted July 25, 2013