

통과차량으로 인한 풍하중에 대한 곡선 강재 터널라이닝의 동적 거동 분석

마호성¹, 조광일^{2*}, 박인준³

Dynamic Behaviors of the Curved Steel Tunnel Lining due to Wind Loads by Passing Vehicles

Ho-Seong Mha, Kwang-Il Cho, Inn-Joon Park

ABSTRACT Dynamic behaviors of the tunnel linings of curved tunnels with various curvatures are investigated to examine the effect of wind loads due to passing vehicles. In the case without backfill, the responses of the tunnel lining should be considered to examine the clearance of the lining. A steel tunnel lining is selected to see the influence of the wind load upon the tunnel lining more clearly. The wind pressure upon the lining is simplified into the pressure and suction while the vehicle passing the loading positions. As the radius of curvature decreases, the response decreases, showing that the strength against the deformation is found to increase since the asymmetry of the deformation shape is reduced. It is found that the responses increase as the passing vehicle speed increases.

Keywords: Dynamic behaviors, tunnel lining, curved tunnel, wind load, passing vehicle

요약 본 논문에서는 곡률이 각기 다른 곡선터널 내 단독주행 통과차량에 의하여 발생하는 풍하중으로 인한 강재터널 라이닝의 동적거동에 대하여 분석하였다. 뒷채움이 없는 경우, 라이닝의 여유 공간에 대한 검토를 위하여 터널라이닝의 동적거동은 우선적으로 이루어 져야 한다. 풍하중의 영향을 보다 쉽게 파악하기 위하여 강재라이닝을 대상으로 하였으며 풍하중은 압축 및 흡인력으로 단순화시켜 모형화 하였다. 직선터널에 비해 곡선터널의 변위는 곡률반경이 작아질수록 작게 나타나며, 이는 곡률반경이 작을수록 변형형태의 비대칭성이 작아져 터널라이닝에 작용하는 변형에 대한 강성이 높아지는 것으로 판단된다. 또한, 주행속도가 증가할수록 응답변위도 증가하는 것으로 나타났다.

주요어: 동적거동, 터널라이닝, 곡선터널, 풍하중, 통과차량

접수일(2012.06.21), 수정일(2012.06.29), 게재확정일(2012.07.02)

¹정회원, 호서대학교 토목공학과 교수

²정회원, 포항산업과학연구원 강구조연구소 책임연구원

³정회원, 한서대학교 토목공학과 교수

*교신저자: 조광일 (E-mail: kicho@rist.re.kr)

1. 서론

국가경제의 급성장과 경제활동인구의 증가로 인하여 도로의 중요성이 강조되고 있고 빠르고 안전한 도로건설에 역점을 두고 있는 시점이다. 우리나라의 경우 국토의 70%가 산악지로 구성되어 있는 지형적인 특성을 가지고 있어 도로건설에 따른 주변 자연환경훼손 최소화를 위한 환경 친화적 고속도로 건설정책 추진으로 자연훼손을 최소화 할 수 있는 터널 건설이 급격히 증가하고 있다. 또한 도로의 고급화와 차량 성능개선으로 인한 양호한 차량 주행성을 확보하기 위하여 1 km 이상 되는 장대터널 건설도 급증하고 있다(김낙영, 최태희, 2003). 터널의 평면형상은 가능한 한 직선으로 계획하되 경제성 및 시공성을 고려하여야 하며 종단선형과 상호 연계하여 조화되도록 계획하여야 한다. 장대터널의 경우 주행차량의 과속 및 졸음운전의 방지와 터널의 출구부에서 역광으로 인한 시거장애요인이 발생하지 않도록 적정한 곡선을 삽입하는 것이 바람직하여 대부분의 장대화 된 터널은 곡선을 가지고 있다(도로설계편람, 2010). 터널의 설계 시 국내에서 사용되고 있는 터널라이닝의 주를 이루는 콘크리트 라이닝은 주변 환경 등 여러 가지 요인을 고려하여 재료 및 규모 등이 결정된다(김정엽 등, 2007). 콘크리트 라이닝은 시공, 유지관리 측면에서 긴 공사기간, 고비용 등의 문제점이 발생할 수 있으나 강재 터널라이닝은 재료가 강재로 이루어진 연성구조물로서 부등침하 등에 유연하게 대처할 수 있어 콘크리트 라이닝의 단점을 극복할 수 있다(황민오, 1999). 암반이 견고한 경우 판넬식 라이닝의 적용이 가능할 수 있으며 이러한 경우 통과차량으로 인한 풍하중의 영향을 분석할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 곡선터널의 곡률과 통과차량의 속도가 터널라이닝에 작용하는 특성을 분석하기 위해 뒤채움이 없는 독립된 일반강판터널라이닝으로 만들어진 직선터널과 곡선터널에 속도별 단독주행 시켜 통과차량으로 인한 동적거동을 분석하고자 한다.

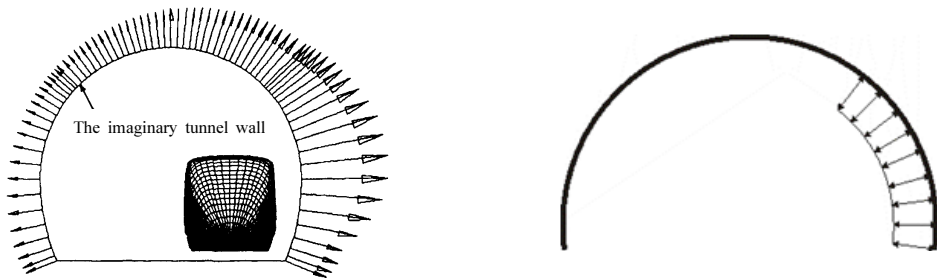
2. 통과차량에 의한 터널 내의 풍하중

본 연구에서 고려하고자 하는 동적거동을 유발하는 하중은 풍하중으로써 구조물의 표면에 풍압으로 작용하게 되며 터널 내 차량이 통과함에 따라 발생하는 실제 풍하중의 분포는 그림 1 (Takanobu O et al., 1997)과 같이 통과차량이 위치하는 벽면에 크게 작용하고 터널상부와 반대쪽으로 적게 작용한다. 본 연구에서는 이러한 풍하중의 영향을 고려하기 위하여 차량이 지나가는 방향의 우측면 1/3부분에 풍하중을 재하였고 그 이외의 벽면은 영향을 받지 않는다고 가정하였으며 이는 선행연구(마호성 등, 2008; 2012)에서 터널라이닝의 전체에 최대풍하중을 재하한 경우와 터널라이닝의

차량위치에 최대풍하중을 재하하고 나머지 부분에는 최대풍하중의 1/3크기에 해당하는 하중을 재하한 경우, 터널라이닝의 차량위치에만 최대풍하중을 재하하고 나머지부분에는 하중을 재하하지 않은 경우를 비교한 결과 가장 불리한 하중조건으로 나타난 것이다.

터널라이닝에 통행차량의 진행에 따라 변화하는 동적하중을 재하하는 경우, 실제 주행차량에 의해 발생하는 풍하중은 매우 복잡한 양상을 나타내지만 그림 2와 같이 이를 단순화하여 주행차량의 전반부에는 압축력이 발생하고 후반부에는 흡입력이 발생하는 것으로 시간에 대한 풍하중의 시간이력을 수행하였다.

터널 내에는 차량이 통과할 때 생기는 풍하중 이외에 항상 터널 안에 일정 풍속의 바람이 불고 있는데, 이 풍속을 맞바람 풍속이라고 한다. 맞바람 풍속에 대한 국내 기준은 현재 존재하지 않으며, 터널설계기준(한국터널공학회, 2007; 이호석 등, 2012)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 표 1에 나타내었다.



(a) 실제 터널라이닝에 작용하는 풍압 분포도 (Takanobu O et al., 1997) (b) 단순화한 터널라이닝에 작용하는 풍압분포도

그림 1. 터널라이닝에 작용하는 풍압분포도



그림 2. 통과차량에 의한 풍하중 형상

표 1. 국내외 터널 내 풍속 적용기준

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

통과하는 차량에 의해 발생하는 풍하중이 일반강판터널라이닝에 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.

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

여기서, q = 압축력(Pressure) (N/m^2) 흡입력(Suction) (N/m^2)

$\mu = 0.4$: Pressure -0.8 : Suction

V_b = 설계차량속도(km/h)

V_l = 통과방향과 반대 방향의 풍속(맞바람풍속) (m/s)

속도별 풍하중의 결과 값은 그림 2에서 나타나는 것과 같이 Pressure의 최대값은 $584 N/m^2$ 은 $250.7 N/m^2$ 이며 Suction의 최대값은 $-1168.1 N/m^2$, 최소값은 $-501.4 N/m^2$ 로 차량의 속도와 풍하중이 정비례한다는 것을 알 수 있다.

표 2. 속도별 풍하중 비교

속도(km/h)	맞바람 풍속(km/h)	Pressure(N/m^2)	Suction(N/m^2)
60	15	250.7	-501.4
80	15	346.4	-692.8
100	15	457.5	-915
120	15	584	-1168.1

3. 대상 구조물 및 해석 방법

3.1 대상 구조물 제원

대상구조물은 그림 3과 같이 2개의 곡선반경을 가지는 3개의 구간으로 나누어져 아치 형태의 단면을 가지고 있으며, 대상구조물의 길이는 400 m로 하였다. 통과차량이 일방향인 경우에 편도 2 차선 또는 양방향인 경우에 왕복 1차선의 교통터널을 구축할 수 있도록 하였다. 본 논문은 구조 해석 프로그램인 Midas-Civil 2009를 이용하여 일반강판터널라이닝을 모형화 하였고 프로그램에서 터널 입출구부를 모델링한 형상을 그림 4에 나타내었다.

3.2 대상구조물의 모형화

대상구조물의 전체모형은 21,543개의 절점과 21,000개의 쉘 요소로 이루어져있으며, 그림 5와 같이 400 m길이의 터널라이닝 모형을 직선 터널과 도로설계편람 제6편의 터널편을 근거로 설계 속도 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h일 때 각각 최소 곡률반경 392 m, 768 m와 1,415 m를 갖는 곡선 터널로 구현하여 동적거동을 분석하였으며 곡선터널의 곡률반경은 폭원구성을 3.19 m, 설계 속도 별로 정지시거를 100 m, 140 m, 190 m로 계산하였다(국토해양부, 2010). 곡률반경의 길이는 중심점에서 터널 폭의 중심 지점까지의 직선거리로 계산하였다. 터널라이닝의 동적거동은 직선 터널과 곡률반경이 다른 3가지 형상의 곡선터널에 단독 주행함으로써 실제 터널에 작용하는 풍하중을 고려할 수 있도록 하였다. 터널의 지점부와 입·출구부는 일반적으로 옹벽과 같은 벽체 구조로 고정되므로 고정단으로 경계조건을 설정하였으며 풍하중은 차량이 지나가는 방향의 우측면 1/3부분에만 하중을 재하 함으로써 단순화 하였다.

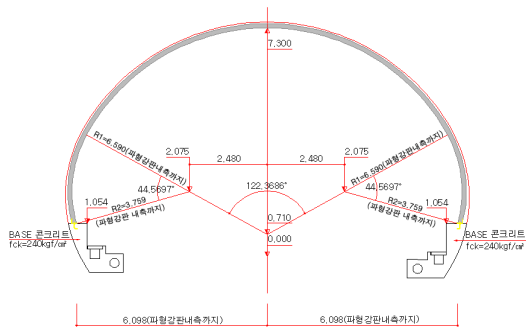


그림 3. 터널 표준 단면도

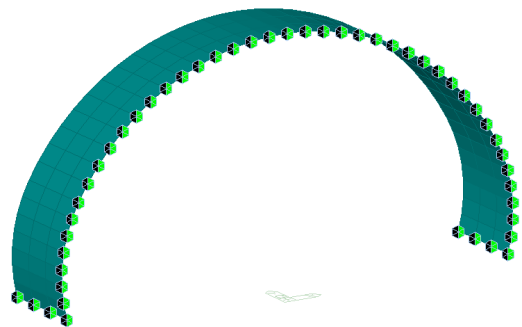


그림 4. 터널의 입출구부 형상

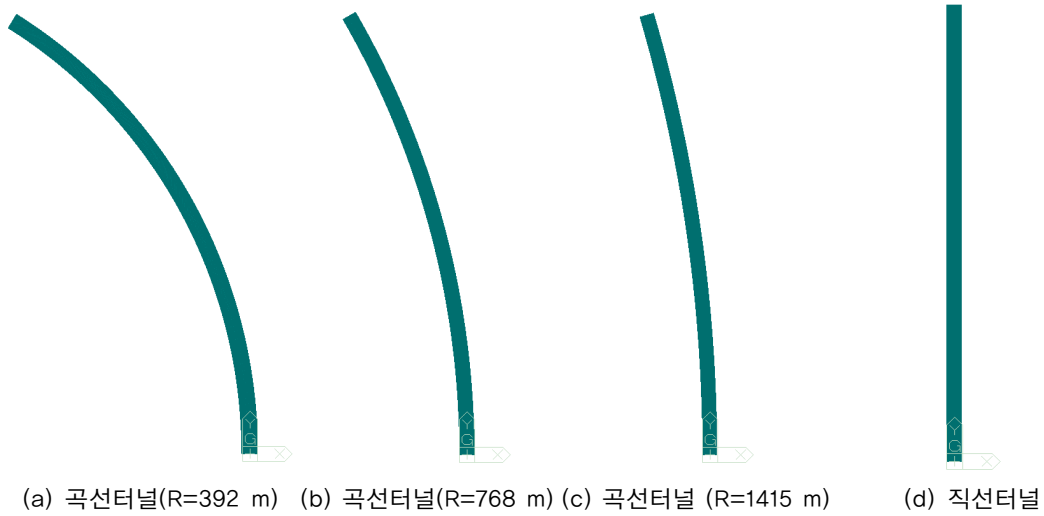


그림 5. 대상구조물의 평면도

3.3 하중조건 선정

터널 내 작용하는 맞바람풍속을 국내·외 설계기준에서 최대 12 m/s까지 허용하고 있다. 그러나 본 연구에는 기준보다 악조건인 맞바람 풍속에 대해 검토하기 위하여 맞바람 풍속을 15 m/s로 하였다. 곡선터널에서 곡률반경에 따라서 최고설계속도가 정해져 있으나 본 연구에서는 통과차량의 주행속도 변화에 따른 터널라이닝의 거동분석을 위하여 통과차량 주행속도 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h인 조건에 대하여 수치해석을 수행하였다. 이상의 내용을 표 3과 같이 정리하였다.

하중조건은 곡률반경이 392 m인 곡선터널을 차량통과속도 60 km/h, 80 km/h, 100 km/h, 120 km/h일 때 각각 LC1-1, LC1-2, LC1-3, LC1-4라고 하였으며, 곡률반경이 768 m, 1,415 m의 곡선 터널 역시 속도에 따라 LC2-1부터 LC3-4로 하였다. 직선 터널은 속도별로 LC4-1부터 LC4-4로 하였다.

표 3. 곡선반경과 차량주행속도에 따른 하중조건

터널 형태 차량속도 (km/h)	곡선 터널 (R=392 m)	곡선 터널 (R=768 m)	곡선 터널 (R=1,415 m)	직선 터널
60	LC1-1	LC2-1	LC3-1	LC4-1
80	LC1-2	LC2-2	LC3-2	LC4-2
100	LC1-3	LC2-3	LC3-3	LC4-3
120	LC1-4	LC2-4	LC3-4	LC4-4

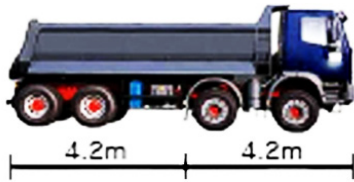


그림 6. 통과차량의 제원

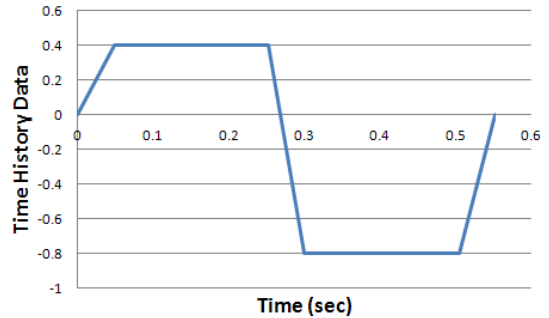


그림 7. 속도 60 km/h일 때 단독주행의 풍하중 함수

각 셀에 작용하는 시간이력하중은 다음과 같이 모사하였다. 우선, 차량의 진행에 따라 변화하는 풍하중을 적용시키기 위하여 차량의 길이와 속도, 셀의 길이를 고려하여 계산하며 직선터널의 경우 양쪽 차선 모두가 차량의 속도와 셀의 길이가 주행 속도와 주행 거리로 계산하였으나 곡률반경이 있는 곡선터널의 경우 곡선이기 때문에 바깥 셀의 길이와 안쪽 셀의 길이가 달라 터널 폭의 중심 지점에서의 거리에 비례하게 변화시켜 계산하였다.

풍하중의 경우 Midas-Civil 2009에서 시간이력함수를 이용하여 시간이 지남에 따라 터널에 작용하는 풍하중이 점차 변화할 수 있도록 하여 압축력은 차량 앞부분이 셀의 입구 부분을 통과하는 시점부터 서서히 증가하여 차량 앞부분이 셀을 통과하는 시점에 최대가 되도록 하였다. 흡입력은 차량의 중앙부분이 셀의 입구부분을 통과하면서부터 압축력이 흡입력과 상쇄되어 압축력은 감소하며 흡입력은 서서히 증가하여 차량의 중앙부분이 셀을 모두 지나가면서 흡입력이 최대가 되도록 하였으며, 차량의 뒷부분이 셀의 초입 부분을 통과하는 시점부터 흡입력을 감소시켰다. 차량이 터널을 완전히 통과한 후에 구조물의 진동이 거의 없어질 때까지 시간을 고려하여 충분한 시간으로 수행하였다. 그림 6은 터널을 통과하는 차량의 제원이며 그림 7은 풍하중에 대한 함수의 예로 차량의 속도가 60 km/h일 때 단독주행에 대한 풍하중 함수를 나타낸 것이다.

4. 대상 구조물의 동적 거동 분석

4.1 일반강판터널라이닝 모드분석

우선 일반강판터널라이닝의 동적거동을 분석하기 위하여 모드분석을 수행하였다. 곡선 터널은 3차원적으로 복잡한 형상을 가지므로 연직방향 질량기여도가 가장 높은 모드를 찾아 고유진동수와 모드형상을 관찰하였다. Midas-Civil 2009 프로그램은 구조물의 질량행렬과 강성행렬로 구성되는

특성방정식을 풀어 구조물의 동적특성을 분석하여 산출하는 해석메뉴가 있어 이를 이용하여 고유진동수를 나타내었다. 그 결과 곡률반경 392 m, 768 m, 1415 m인 곡선터널과 직선터널의 각각 고유진동수는 0.88 Hz, 0.76 Hz, 0.56 Hz, 0.42 Hz로 나타났다(표 4). 또한, 표 4 및 그림 8에 나타난 바와 같이, 곡선터널의 고유진동수는 곡선반경이 작아질수록 직선터널의 고유진동수에 비해 높아지는 경향을 보여 대상구조의 강성이 높아지는 것으로 판단되며, 모드형상도 차이를 나타내었다.

표 4. 터널 별 고유주기 분석 결과

터널 형상	연직방향의 주 모드 차수	진동수(Hz)
곡선터널(R=392 m)	24	0.88
곡선터널(R=768 m)	11	0.76
곡선터널(R=1415 m)	8	0.56
직선터널	5	0.42

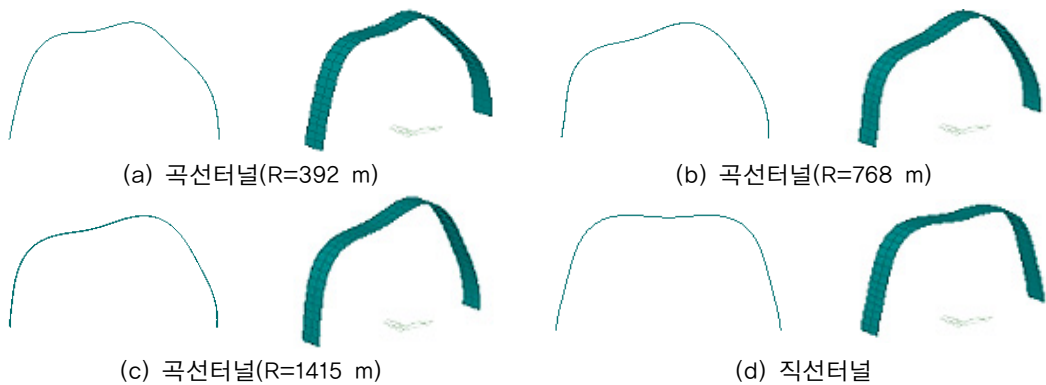


그림 8. 일반강판터널라이닝 z축 방향의 주 모드 형상 (200 m지점)

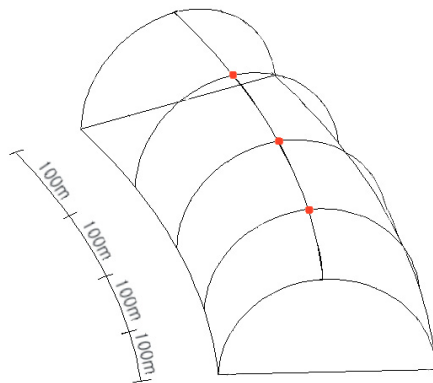


그림 9. 터널 단면에서의 변위 평가위치

4.2 터널라이닝의 동적거동 분석

4.2.1 평가 위치 선정

대상구조물의 전체의 시간이력해석의 결과를 나타내기 위해 평가지점은 최대변위 지점인 단면 상부 중앙노드로 지정하였다. 그림 9에 나타난 바와 입구부에서부터 100 m간격인 100 m, 200 m, 300 m지점으로 평가 위치를 정하여 시간이력 해석법을 이용하여 분석하였다.

4.2.2 통과차량에 의한 곡선 터널 라이닝의 처짐

본 절에서는 단독주행 차량의 통과 속도와 각각 터널의 형태가 일반강판터널라이닝에 주는 영향을 분석하기위해 각각의 지점에서 최대 변위를 측정하였다. displacement ratio는 직선터널에 60 km/h 속도로 차량이 통과할 때 생기는 최대 변위 응답을 1로 정하고 이에 대한 다른 터널의 차량 속도에 따른 최대 변위 응답값을 상대적인 비율로 비교한 것이다.

200 m지점에 차량속도가 60 km/h일 때 터널의 변형 형상을 그림 10에 나타내었다. 직선터널은 통과차량하중에 의해 비대칭의 변형 형상을 보였으며 곡률반경이 작아질수록 비대칭성이 작아지는 것으로 나타나, 곡선반경이 작을수록 터널라이닝의 강성이 높아질 것으로 판단된다.

곡선반경의 변화에 따른 처짐 변화의 경향을 분석하기 위해 그림 11과 같이 통과차량 속도 60 km/h인 경우에 대해 각 터널 라이닝의 처짐 비를 분석한 결과, 곡선반경이 작아질수록 처짐이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 곡률반경이 각각 392 m, 768 m, 1,415 m인 곡선터널의 최대 변위 응답이 직선터널의 응답에 비해 각각 1/14~1/11, 1/5~1/4, 1/3~1/2의 값으로 작게 나타난 것으로 보아 곡선 반경이 2배정도 커질 때 마다 변위도 2~3배 커지는 것으로 나타났다.

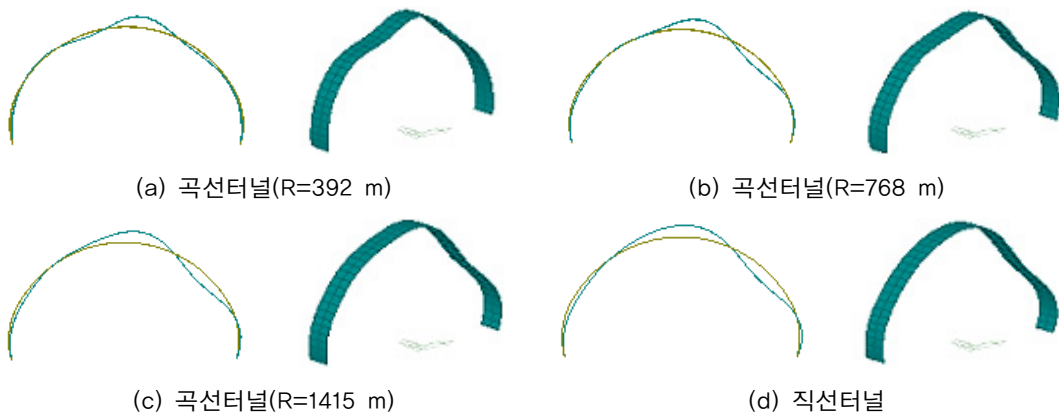


그림 10. 차량통과 시 200 m지점의 변형 형상 (차량속도 60 km/h)

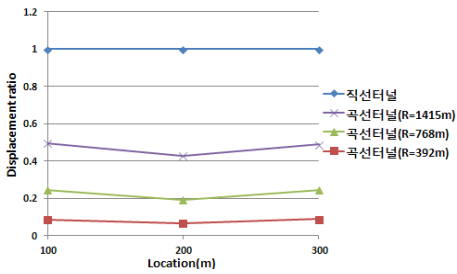


그림 11. 차량속도 60 km/h일 때 최대 변위 응답

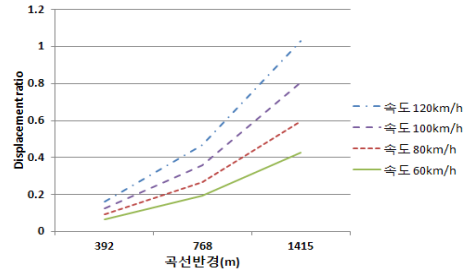
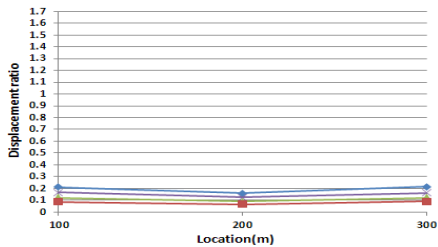


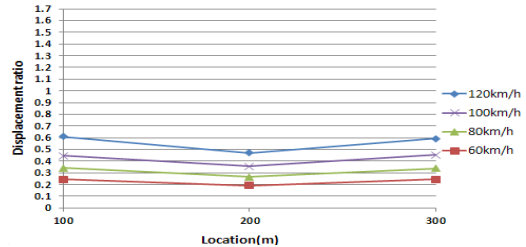
그림 12. 차량속도 별 200 m지점에서의 변위 응답

곡률반경의 변화에 따른 응답의 변화를 수치적으로 관찰하기 위해 그림 12와 같이 곡선반경의 변화에 따른 처짐 비를 분석한 결과, 곡선반경이 감소할수록 처짐 비와 감소비율이 낮아지는 것으로 나타났다.

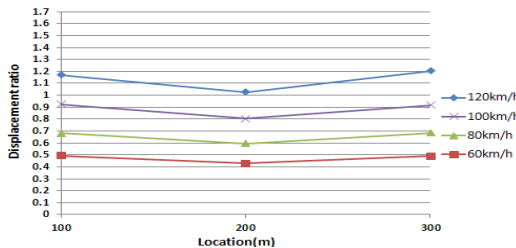
통과차량의 속도에 따른 동적응답의 변화를 분석하기 위해 4가지 형태의 터널 중에 각각 같은 형태의 터널에서 터널의 바깥 쪽 차선으로 차량의 통과하는 속도 별로 각 지점의 최대 변위 응답을 그림 13에 나타내었다. 모든 터널에서 차량의 통과 속도가 120 km/h, 100 km/h, 80 km/h, 60 km/h 일 때 최대 변위 응답은 속도가 60 km/h에서 80 km/h으로 증가할 경우, 모든 곡선터널의 변위가 약 1.3~1.4배 증가하였으며 주행속도가 그 이상으로 증가할 경우 유사한 크기의 증가폭을 나타내었다.



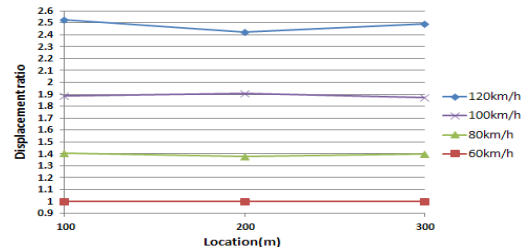
(a) 곡선터널(R=392 m)



(b) 곡선터널(R=768 m)



(c) 곡선터널(R=1415 m)



(d) 직선터널

그림 13. 터널 형태에 따른 차량 속도 별 최대 변위 응답

5. 결 론

본 연구에서는 직선터널과 각기 다른 곡률반경을 갖는 곡선터널에 차량이 통과할 때 시간이력 함수를 모형화하여 풍하중이 일반강판라이닝에 미치는 동적거동을 분석하였다. 이상의 연구로부터 얻어진 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 곡률반경이 다른 터널의 200 m지점에서 변형 형상을 비교한 결과 직선터널은 비대칭의 형상이 나타났으며, 곡률반경이 작아질수록 비대칭성이 작아지는 것으로 나타났다.
2. 직선터널에 비해 곡선터널의 변위는 곡률반경이 392, 768, 1415 m일 때 각각 1/14~1/11, 1/5~1/4, 1/3~1/2의 값으로 작게 나타난 것으로 보아 곡률반경이 작을수록 터널라이닝에 작용하는 변형에 대한 강성이 높아질 것으로 판단된다. 또한 곡률반경이 작아질수록 처짐 비와 감소비율이 낮아지는 것으로 나타났다.
3. 단독주행 상태에서의 다양한 속도로 통과하는 일반강판터널라이닝의 동적응답의 변화를 분석한 결과 주행속도가 20 km/h만큼 증가할수록 최대 변위 응답은 1.3~1.4배 정도 큰 것으로 나타난 것으로 보아 차량의 주행속도가 증가할수록 풍하중이 터널에 미치는 영향이 크게 일어난다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 곡선터널에 대한 전체적인 경향을 보기위해 단독주행으로 변위를 분석하였고 풍하중과 시간이력함수를 단순화 하여 나타내었으며 향후 본 논문의 해석 방법을 보다 개선하고 이를 활용하여 터널 내에 단독주행 뿐만 아니라 교차주행, 연속주행 등 다양한 통과차량이 터널라이닝에 작용하는 동적거동을 분석 할 수 있을 것이라고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 국토해양부 (2010) 도로설계편람 제6편 터널편,
2. 김낙영, 최태희 (2003), “도로터널 화재시 연기 거동에 대한 고찰”, 대한토목학회 정기학술대회, pp. 4839-4848.
3. 김정엽, 신현준, 임광수 (2007), “국내 도로터널 안전관리 연구동향”, 한국터널공학회 정기총회 및 학술발표회, pp. 180-186.
4. 마호성, 이충관, 이태환, 정건아 (2008), “통과차량으로 인한 풍하중에 대한 파형강판 터널라이닝의 동적 거동분석”, 한국강구조학회 학술대회발표집, 제19권, 제1호, pp. 84-87.

-
5. 마호성, 조광일, 유성흠 (2012), “구조물 경계조건에 따른 파형강관 터널라이닝의 풍하중에 대한 동적 거동분석”, 한국강구조학회 논문집, 제24권, 제1호, pp. 47-58.
 6. 이호석, 홍기혁, 최창림, 강명구, 임재범, 문홍표 (2012), “네트워크형 지하 도로터널 분기부에서의 환기효율 향상방안에 대한 실험적 연구”, 한국터널지하공간학회, 제14권, 제2호, pp. 107-116.
 7. 한국터널공학회 (2007), 건설교통부 제정 터널설계기준.
 8. 황민오 (1999), “파형강관 구조물에 관한 설계요령 및 적용사례”, 파형강관 및 파형강관 구조물 세미나, pp. 125-142.
 9. 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.
 10. The Norwegian Public Roads Administration (1995), Water and frost protection in tunnels Structures for shielding functional requirements and design rules.