

한국형 고속전철 터널 주행시의 압력 변동 및 빈도의 분석

Analysis on the Fluctuation and Frequency of Pressure for Korean High Speed Train passing through Tunnels

박춘수*, 서승일*, 이억재**, 목진용*, 김기환*
Choon-Soo Park, Sung-Il Seo, Uk-Jae Lee, Jin-Yong Mok, Ki-Hwan Kim

ABSTRACT

In order to develop a high speed train, various conditions have been considered. Fatigue strength assessment by the fluctuation of pressure is an important one. In this study, a numerical simulation has been performed to estimate the fluctuation and frequency of pressure when KHST(Korean High Speed Train)passes through tunnels in the Kyung-Bu high-speed railway. The simulation was based on KHST running the Kyung-Bu high-speed line with the speed of 350km/h and the interval of 10 minute headway. And the tunnel entrance speed was estimated by TPS program. Therefore, the fluctuation and frequency of pressure is expressed in Weibull distribution function in the above running situation. The result in this study would be good guidance to calculate the fatigue life and the index of reliability of body structure. We are going to conduct more study to measure the real value of the pressure of the carbody passing through tunnels, to assess the fatigue reliability and to develop method & procedure for the fatigue reliability design.

1. 서론

철도차량의 차체에 대한 피로특성 분석은 정적하중 측면에서 구조해석 및 하중시험을 통하여 설계 시 및 차체 제작후에 수행되는 것이 일반적이며, 한국형 고속전철의 차체 피로특성에 대해서도 이러한 방법에 따라 수행되었다[1]. 그러나, 고속전철은 주어진 선로를 고속으로 주행하기 때문에 정적하중 이외에도 다양한 변동하중을 받고 있으며, 변동하중에 의한 피로강도 특성에 대해서는 운행중에 차체에 작용하는 하중을 분석하는 과정을 거쳐 안정성 및 신뢰성 검증이 필요하다. 특히, 고속으로 터널 주행시에는 터널내 압력파에 의해 경량화된 알루미늄차체에 변동하중이 작용하며, 이로 인한 피로손상이 큰 문제점으로 지적되어, 이에 대한 연구가 추진되었다[2]. 고속전철 차체는 기밀 구조이므로 터널을 고속으로 통과시에 발생하는 압력파에 의해 외압과 실내압의 압력 차이에 의한 압력변동 하중을 반복적으로 받게 되며, 이러한 압력 변동에 의해 차체에 발생하는 응력의 크기 및 빈도 분포는 압력 변동의 크기 및 빈도 분포에 비례하기 때문에 터널 통과 시의 압력 변동을 명확히 파악하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 한국형 고속전철이 영업 운행 계획에 따라 최고 속도 350km/h로 경부고속철도 구간을 주행한다는 가정 하에 터널 주행 시, 차체가 받게 되는 압력 변동과 빈도를 검토하여 이를 바탕으로 차체 피로 신뢰성을 해석하고 평가하는 방법에 대한 자료를 제공하고자 한다. 향후에는 이를 이용한 차체 피로신뢰성 평가를 실시하고, 실제 주행시에 차체에 작용하는 압력변동을 측정하여 차체 피로신뢰성을 평가할 계획이다.

* 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단

** 한국철도기술연구원 신진연구자

2. 터널통과시의 압력과 전파 특성

2.1 열차가 터널을 단독으로 통과하는 경우

고속으로 운행하는 열차가 터널을 통과할 때에는 Fig. 1에서 보는 것과 같은 압력 변동이 발생하며, 압력 변동의 원인은 다음과 같이 3가지로 정리할 수 있다.

- 열차의 선두부가 터널 진입 시에 발생하는 압력파의 전파
- 열차의 후미부가 터널 진입 시에 발생하는 압력파의 전파
- 열차가 터널 진입 시에 받는 압력상승

먼저, 열차의 선두부가 터널 돌입 시에 발생하는 압력파의 전파의 경우를 살펴보면, 열차가 속도 $V(\text{km/h})$ 로 터널로 진입한 후 선두차가 첫 번째의 압력파와 되돌아오는 첫 번째 팽창파에 부딪혔을 때 위치에서(t_1, L_1) 다음의 식이 성립된다.

$$t_1 = \frac{L_1}{V}, \quad t_1 = \frac{L_t + (L_t - L_1)}{V_p} \quad (1)$$

$$\frac{L_1}{L_t} = \frac{2V}{V_p + V} \quad (2)$$

여기서, L_t : 터널길이

V_p : 압력파의 속도 (음속, 340m/sec)

같은 방법으로 2번째 및 3번째 교차점(t_2, L_2 및 t_3, L_3)에서도 같은 식이 성립되어 선두차가 터널 진입시에 발생한 압축파 및 팽창파와 만나는 시간을 아래와 같이 일반화 할 수 있다.

- 전방에서 오는 팽창파

$$L_j/L_t = \{(j+1)V/(V_p + V)\} \quad (3)$$

- 후방에서 오는 압축파

$$L_j/L_t = \{jV/(V_p - V)\} \quad (4)$$

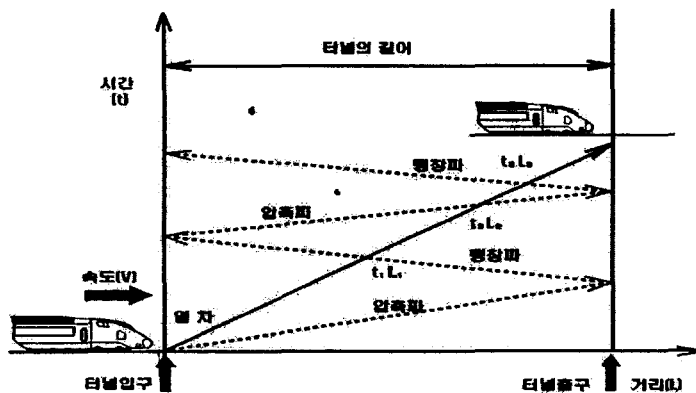


Fig. 1 Pressure Fluctuation mechanism for a train during passing through a tunnel (pressure waves produced by the lead car)

2.2 열차가 터널에서 교행하는 경우

열차가 맞은편에서 오는 열차와 터널 안에서 교행하는 경우에는 다음과 같은 압력들이 발생하게 되는데, 첫 번째로는 단독으로 터널을 통과하는 경우에 받는 압력변동(ΔP_1), 여기에 덧붙여서 대향차의 압축파, 팽창파에 의한 압력변동(ΔP_2), 그리고 열차가 마주오는 열차와 교행하는 순간의 압력변동(ΔP_3) 등이 존재한다. 따라서 열차가 터널내에서 교행하면서 받게 되는 압력변동(차압범위) ΔP 는 위의 압력의 합을 고려하면 된다.

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 \tag{5}$$

2.3 한계 터널길이 및 압력변동값

한계터널 길이는 열차의 선두부가 진입하여 두 번의 압축파를 정상적으로 받을 수 있는 최소 터널 길이를 의미하며, Fig. 2에서 보는바와 같이 열차가 터널 진입후 2번째 압력파에 부딪히는 시간(t_2) 이 열차가 터널을 통과하는 총 시간($t_L = L_t/V$)보다 작아야 한다. 이를 수식으로 표현하면, $L_t > \{V_p/(V_p - 3V)\}L_r$ 이며, 한계터널길이는

$$L_{t,cr} = \{V_p/(V_p - 3V)\}L_r \tag{6}$$

여기서, V_p 는 음속, V 는 차량속도, L_r 은 열차의 길이이다.

한국형 고속전철의 경우, $V_p = 340 \text{ m/sec}$, $V = 97.2 \text{ m/sec}$ (350 km/h), $L_r = 394 \text{ m}$ 이므로 이를 대입하면 $L_{t,cr} = 2771.6 \text{ m}$ 가 된다.

또한, 한계터널길이 이상의 터널에서 압력변동(차압범위) ΔP 는 신간선 300계 차량의 시험결과 아래와 같이 제시되고 있다.[2]

$$\Delta P = 0.035 V^2 \times (A/A_t) \tag{7}$$

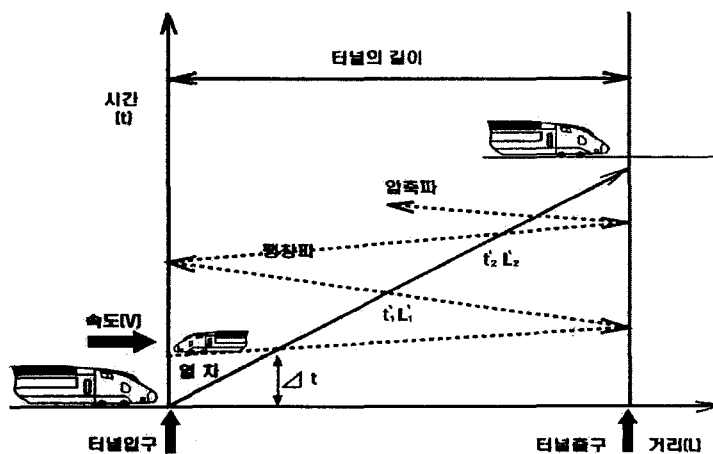


Fig. 2 Pressure Fluctuation mechanism for a train during passing through a tunnel (pressure waves produced by the rear car)

압력의 크기와 빈도수 계산

터널의 진입속도 및 교행 위치

경부고속철도는 430km의 구간에 총 73개의 터널로 계획되어 건설중에 있다. 이 구간을 한국형 고속전철이 최고속도 350Km/h로 주행하는 경우, 각 터널에서의 진입속도를 G7 사업을 통해 개발된 TPS(Train Performance Simulation)[3]를 이용하여 구하였다. 운행 패턴은 서울과 부산을 제외한 중간 5곳에 정차하는 것으로 계산하였다. 서울과 부산을 왕복 운행하였을 경우 교행이 이루어지는 위치와 교행회수 및 터널내 교행 회수를 구하기 위해 TPS를 통해 운전선도를 그리면 Fig.3과 같다. 열차가 서울과 부산 간을 1회 왕복운행을 하였을 경우 총50번의 교행이 이루어지며, 이중 터널 속에서 이루어지는 교행은 10번이다.

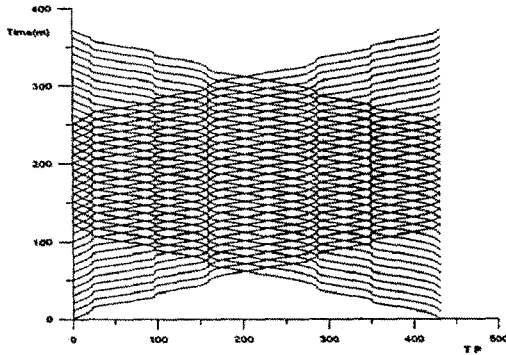


Fig. 3 Diagram of TPS simulation result

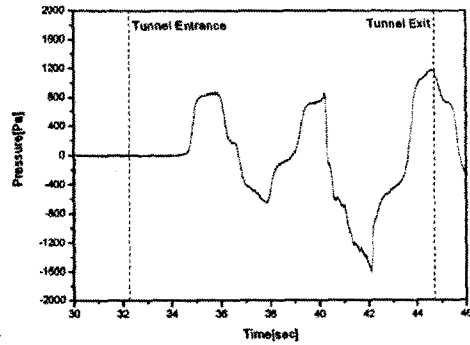


Fig. 4 Fluctuation of pressure in a tunnel

3.2 압력의 크기와 빈도수

전 절에서 살펴본 바와 같이 터널의 진입속도와 터널의 단면적, 그리고 열차의 단면적 등을 이용하여 열차가 터널을 주행했을 경우에 식(7)을 이용하여 열차가 받는 압력의 크기와 빈도를 구할 수 있다. 처음에 발생한 압력파가 터널의 입구에서 반사되어 돌아오는 팽창파와 부딪혀서 생기는 두 번째의 압력값은 처음에 받은 압력값의 80%로 감해서 받는 것으로 알려져 있다. 이것은 한계 터널의 길이와 관계가 있으며, 한계 터널 이상에서는 Fig.4와 같이 그 파형이 일정하기 때문에 받을 수 있는 압력의 횟수는 정해져 있다. 3.1절에서 구한 각 터널별 진입속도 및 운행회수 등을 고려하여 열차가 서울-부산구간을 1회 왕복하였을 때 받는 압력값과 빈도수를 정리하면 Table 1과 같다. 여기서는 한국형 고속전철의 차량단면적은 10m²이며, 터널의 단면적은 현재 건설 중인 경부고속철도 복선터널의 단면적인 107m²로 계산하였다.

Table 1 Pressure Fluctuation range and frequency (Unit: Pa)

압력 범위	횟수(부산행)	횟수(서울행)	합계
0~1000	18	25	43
1000~2000	34	34	68
2000~3000	46	46	92
3000~4000	35	41	76
4000~5000	83	77	160
5000~6000	4	5	9
6000~7000	57	51	108
7000~	4	6	10

3.3 압력값 빈도분포함수

한국형 고속전철이 서울-부산 경부고속철도 구간을 왕복 주행할 때 터널에서 받게 되는 차압의 빈도를 그림으로 나타내면 Fig. 5의 막대 그래프와 같다. 한국형 고속전철이 터널을 통과하면서 받게 되는 압력변동 하중에 의한 차체의 피로 신뢰성을 평가하기 위해서는 차압의 빈도를 수학적 통계함수로 표현하여야 하며, 여기서는 Weibull 분포함수를 고려한다. Weibull 분포함수는 일반적으로 다음 식으로 표현된다.

$$f(p) = \frac{\alpha}{\theta} \left(\frac{p}{\theta} \right)^{\alpha-1} \exp \left\{ - \left(\frac{p}{\theta} \right)^\alpha \right\} \quad (8)$$

여기서, α = 형상 모수(shape parameter)

θ = 척도 모수(scale parameter)

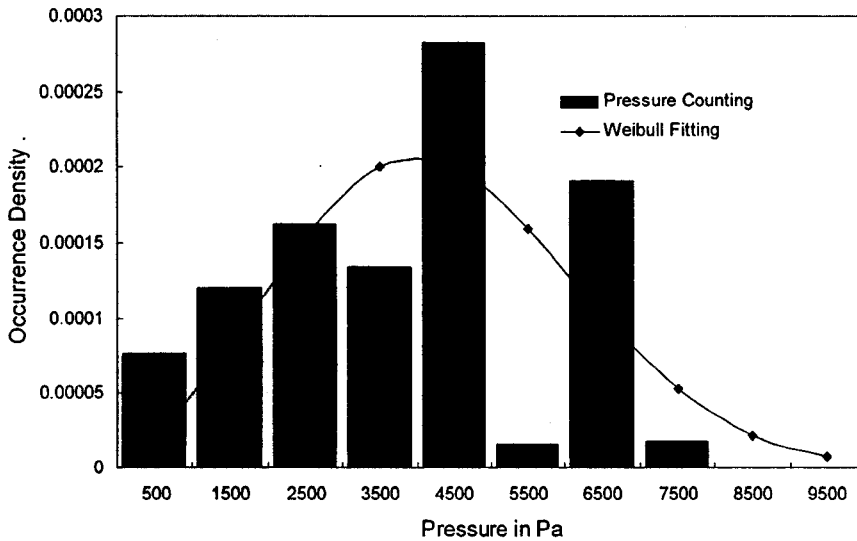


Fig. 5 The Distribution of frequency of pressure fluctuation

압력파에 의한 압력값 빈도의 척도 모수는 다음식으로 표현될 수 있다.

$$\theta = \frac{p_0}{\left[\log \frac{1}{1 - F_c} \right]^{1/\alpha}} \quad (9)$$

여기서, p_0 = 최대 압력값(7500 Pa)

F_c = 최대 압력값까지의 누적 빈도($1 - F_c: 10^{-8}$)

형상 모수 α 를 2.5로 선택하여 척도 모수를 계산하고 Weibull 분포 곡선을 그려보면 Fig.5의 곡선과 같다.

4. 결 론

고속으로 주행하는 열차가 터널 진입시에는 터널내 공기의 압축 및 팽창파에 의한 압력 변동하중을 차체가 받게되며, 이는 차체 피로강도에 영향을 미치는 결과를 초래한다. 본 연구에서는 이를 검증하기 위한 첫 번째 단계로 한국형 고속전철이 경부고속철도구간을 최고속도 350km/h로 주행시 터널내 압력파로 인해 받게되는 압력값의 크기와 빈도를 구하였으며, 이를 Weibull 분포 곡선으로 표현하였다. 이를 이용하면 한국형 고속전철 차체에 대한 신뢰성 지수를 구할 수 있으며, 이는 일정기간의 차량 수명에 대한 피로 신뢰도를 구할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있다.

향후에는 한국형 고속전철 차체의 피로특성 및 차체의 강도특성을 고려하여 피로신뢰도를 구할 예정이며, 개발열차에 차체에 압력계를 설치하여 실제 받는 압력을 계측한 값으로부터도 피로신뢰도를 구하는 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

1. "G7 고속전철 기반기술개발(00-II-1-1)" 연차보고서, 한국기계연구원, 2002
2. Kanta Nihei, Hideo Ono, Shigeki Koe and Fumihide Inamura, "Fatigue Strength Assessment Method for Shinkansen Aluminum Car Body Structures", Kawasaki Engineering Review, Vol. 138, 1998.
3. 이태형, 박춘수, 신중린, "한국형 고속전철 열차성능해석 프로그램", 한국철도학회논문집, 제6권 제2호, 2003

후 기

본 연구는 건교부 고속철기술개발사업으로 지원된 "고속철도시스템 신뢰성 및 운영효율화 기술개발"과제 연구결과의 일부입니다.