

고속열차가 터널내에서 받는 압력변동 특성 분석

Analysis on the Characteristics of Pressure Fluctuation for High Speed Train passing through Tunnels

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

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, the fluctuation and frequency of pressure is measured when KHST(Korean High Speed Train) passes through tunnels in the Kyung-Bu high-speed line. And the characteristics of pressure fluctuation is analysed and formulated. The results of analysis are as follows. The train entering speed and fluctuation value are related. The pressure increasing is generated in proportion to train velocity at leading car. When two train is passing through the tunnel, the pressure value is 1.5~2 times higher than one train is passing. The damping ratio of pressure fluctuation is about 92%. The number of pressure fluctuation in a tunnel is 4 to 6 times. The result in this study would be a good guidance to calculate the fatigue life and the reliability index of body structure.

1. 서론

열차가 고속으로 터널에 진입하면 터널내에 압력파가 발생하고 이는 터널 입·출구를 오가며 압축·팽창을 반복하게 된다. 압력파에 의한 급격한 압력변동은 객실내 승객에게 이명현상을 초래하고 터널 주변에 환경공해를 유발하게 되므로 이를 줄이기 위한 노력과 객실내 압력변동을 줄이기 위한 밀폐 및 압력조절시스템이 고속열차에 채택되고 있다. Kanta Nihei 등은 신간선 열차가 터널을 통과할 때 차체가 받게되는 압력변동을 실차시험을 통하여 차체에서 계측하였으며, 이로 차체의 피로신뢰성을 평가하였다. 권혁빈 등은 한국형 고속전철이 터널을 통과할 때 발생하는 압력파에 대해 수치적인 해석을 수행하였으며, 남성원은 KTX 차량을 이용하여 객실내 압력 변동이 기준을 만족하는지와 터널 길이에 따른 차체가 받는 압력파의 패턴을 연구하였다.[1]~[4]

본 연구에서는 한국형 고속전철 시제열차가 경부고속철도 터널을 통과할 때 차체가 받는 압력을 계측하였으며, 차체가 받는 압력의 특성별로 이를 수식화하였다. 또한, 전두부 형상이 약간 다른 KTX와 한국형 고속전철의 속도별 변화를 비교하였다. 차체가 받는 압력변동 특성식은 고속열차의 차체 설계시에 압력변동 하중에 의한 피로신뢰성을 계산할 수 있도록 크기와 빈도를 예측할 수 있도록 하였다.

* 한국철도기술연구원 고속철도기술개발사업단, 정회원

2. 터널통과시의 압력과 전파 특성

2.1 열차가 터널을 단독으로 통과하는 경우

고속으로 운행하는 열차가 터널을 통과할 때에는 압력 변동이 발생하며, 압력 변동의 원인은 “열차의 선두부가 터널 진입 시에 발생하는 압력파의 전파”, “열차의 후미부가 터널 진입 시에 발생하는 압력파의 전파”, “열차가 터널 진입 시에 받는 압력상승 ”으로 분류된다.

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.

3. 시험 방법 및 계측시스템

고속으로 주행하는 열차가 터널에서 받게되는 압력현상 분석을 위해 한국형 고속전철 시제열차 및 KTX가 경부고속철도 신선구간을 주행시에 받는 압력을 열차 내·외부에서 계측하였다. 압력 계측을 위한 계측시스템의 구성을 간략하게 살펴보면 한국형 고속전철에서는 객차(TT3) 좌우 차체 표면과 객실내 및 동력차의 하부 대차부위 등에 압력계를 설치하고 객차(TT3) 내부에 설치된 계측시스템에 연결하여 열차의 속도, 운행거리 등과 함께 계측된 압력값이 저장되도록 하였다. KTX에서는 객차의 대차와 객실내에 압력계를 설치하였으며, 전기장치 특성 등을 계측하는 시스템에 연결하여 속도와 동시에 저장되도록 하였다.

4. 시험 결과 및 고찰

4.1 단독 주행시의 속도와 압력변동의 관계

열차가 단독으로 주행할 때 터널에 진입하는 속도와 최대 압력변동값과의 상관관계를 살펴보기 위해 진입속도와 최대압력변동값의 관계를 그래프로 그리면 Fig. 1과 2와 같다. 이 그래프에서 열차 진입속도와 압력변동 최대값간에는 일정한 상관관계가 있음을 알 수 있으며, 속도의 제곱에 비례한다는 것이 알려져 있다. 따라서, 계측된 값들의 관계를 이용하여 다항회귀분석법(Polynomial Regression Analysis)으로 계수를 구하면 다음과 같이 속도의 2차식으로 표현할 수 있다.

$$\text{KHST} : \Delta P_1 = 0.2684 V^2 \times (A/A_t) \quad (1)$$

$$\text{KTX} : \Delta P_1 = 0.2916 V^2 \times (A/A_t) \quad (2)$$

(여기서, V : 열차 진입속도(Km/h), A : 열차 단면적(m^2), A_t : 터널 단면적(m^2))

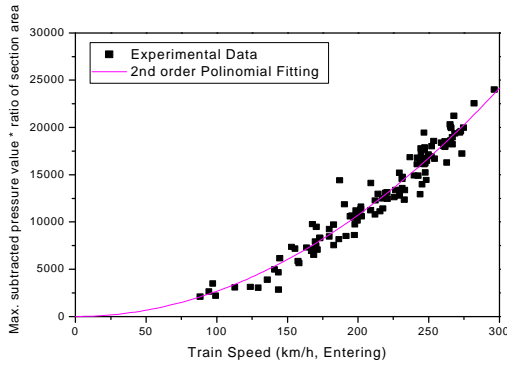


Fig. 1 The Polynomial fitting between train velocity and max. fluctuation of pressure (KHST)

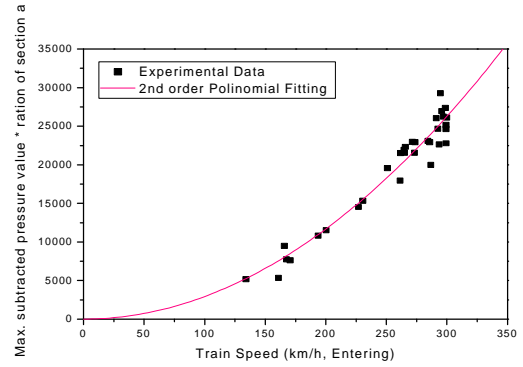


Fig. 2 The Polynomial fitting between train velocity and max. fluctuation of pressure (KTX)

4.2 열차가 터널 진입시에 받는 압력 상승

열차가 터널을 진입시에는 전두차로부터 압력 상승이 급격하게 일어나며, 후미차는 압력상승이 미미한 현상을 보인다. Fig 3에서 볼 수 있듯이 전두차는 초기에 압력상승이 발생하지만 후두차는 압력 상승이 미미하며, 압력과 및 팽창과의 전파에 따른 압력 변동만을 보이고 있다.

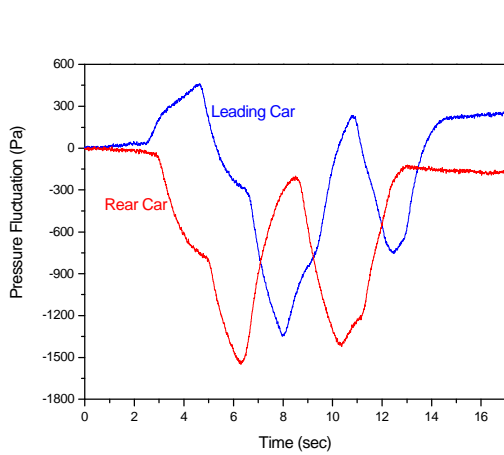


Fig. 3 The increasing pressure in the leading and rear car

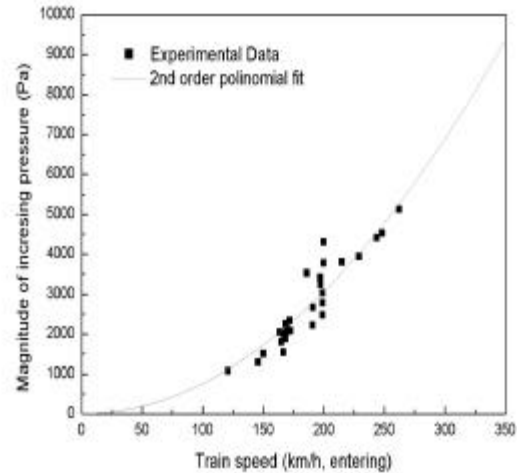


Fig. 4 The relationship between entering velocity and pressure increase of the leading car

4.3 교행시의 압력변동의 관계

열차가 터널을 주행 중 반대편에서 열차가 터널을 진입하면, 두 개의 열차에 의해 발생하는 압력파에 의해 차체가 받는 압력변동값은 단독주행시 보다 증가하는 것으로 알려져 있으며, 본 시험에서도 증가하는 경향을 알 수 있었다. 그러나, 열차가 터널내에서 교행하는 경우, 차체에 작용하는 압력변동값을 계측하기는 매우 어려운 것이 현실이다. 또한, 터널내 교행의 시점과 위치에 따라 압력 변동값이 다를 수 있기 때문에, 많은 계측결과를 갖고 지속적인 분석이 필요하다. 계측된 결과를 토대로 교행시의 압력변동값이 단독 주행시에 비해 증가 정도를 살펴보면 Table 1과 같다.

Table 1. The pressure increasing rate by two trains passing through in tunnels

(Unit : km/h, Pa)

터널명	용와터널(1760)		고등터널(1470)		운주터널(4088)		황학터널(9975)	
	진입 속도	압력 변동	진입 속도	압력 변동	진입 속도	압력 변동	진입 속도	압력 변동
단독주행시	261.2	1779.8	299.2	2494.1	293.4	2242.7	287.2	2667.5
교행시	274.6	2066	297.5	3788.9	298.9	3745.4	293.3	3451.1
증가율	1.16		1.52		1.67		1.29	

4.4 터널내 압력 전파시 변동값의 감쇠

열차가 터널을 주행중 발생한 압력파는 터널 양단에서 외부로 방사되어 손실되는 것을 제외하고 터널 진출구에서 반사되는데, 차체에서 계측되는 압력변동값을 중심으로 압력하강, 압력상승이 반복될 때 그 반복 횟수별 압력값의 감쇠비를 구하였다. 총 64회의 시험결과를 분석하여 각 횟수별 감쇠비를 구하면 평균(\bar{x})이 0.92이고 표준편차(s)는 0.106으로 계산되었다.

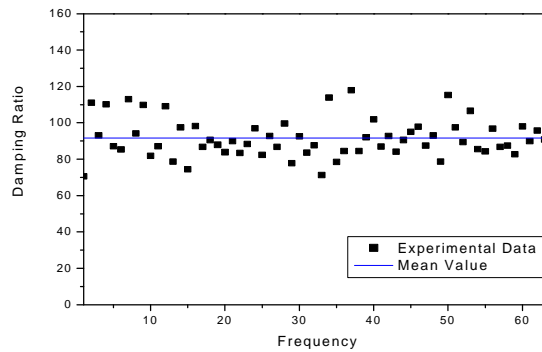


Fig. 5 Distribution of Damping Ratio

4.5 열차가 터널 통과시의 압력변동 횟수

길이가 L인 터널을 길이가 L_{tr} 인 열차가 통과할 때 압력파(압축 및 팽창)와 만나는 횟수는 열차의 속도 대역에 따라 달라진다. 전두부 진입시에 발생한 압력파(압축 및 팽창)는 터널의 길이와 상관없이 압력파의 속도, 즉 음속의 배수로 결정되는 영역별로 압력파와 만나는 횟수가 결정된다. 반면에 열차의 후두부가 진입하면서 발생하는 압력파에 의한 경계속도는 터널 및 열차의 길이에 의해 결정된다.

먼저, 전두부 진입시에 발생한 압력파의 경계속도(V_n)는 아래 식과 같이 압력파의 터널 출구 도달횟수로 결정된다.

$$V_n = \frac{V_b}{n} \times 3.6 \text{ (km/h)} \quad (n=1, 3, 5, 7, \dots) \quad (3)$$

다음으로 후두부 진입시에 발생한 압력파의 경계속도(V_n)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_n = \frac{V_b}{n-1} \left(1 - \frac{L_{tr}}{L}\right) \times 3.6 \quad (n=1, 3, 5, 7, \dots) \quad (4)$$

여기서, V_b 는 음속(m/s), L은 터널길이(m), L_{tr} 은 열차길이(m) 이다.

차체의 피로평가 관점에서는 압력변동의 횟수가 중요하므로 팽창파를 두 번 만나 압력이 하강하고 압축파를 만나 압력이 상승하는 점까지를 1회 변동으로 간주하고(counting), 500Pa 이하의 압력 변동은 고도차 등 주위 여건에 따라 달라질 수 있는 것 등을 감안하면 압력변동의 횟수는 압력파가 5회 전파되는 속도인 244 km/h 이상에서는 4회 그 이하에서는 6회로 간략화 시킬 수 있다.

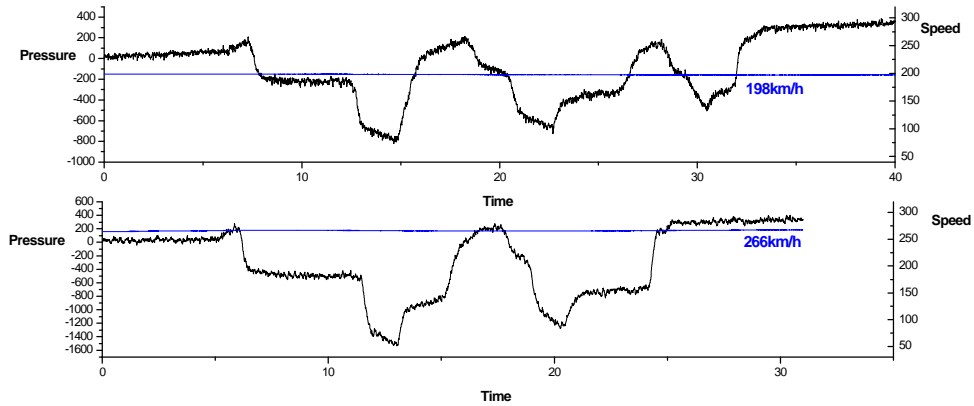
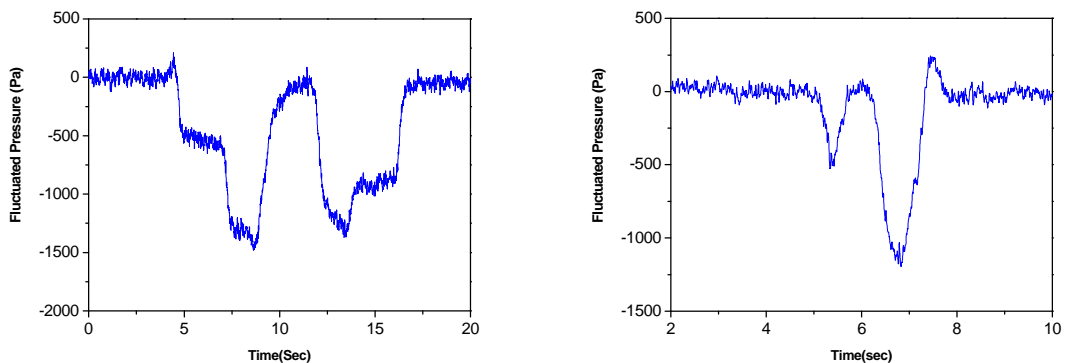


Fig. 5 Pattern of pressure fluctuation according to train speed

4.6 한계터널길이의 영향

열차가 동일한 속도로 터널을 통과할 때 터널의 길이에 따라, 열차 선두부 진입시 발생한 압축파와 열차 후미부 진입시 발생한 팽창파를 정상적으로 받을 수 없는 경우가 발생한다. 이를 수식적으로 표현하여 한계터널길이이라 한다. 이러한 특성 때문에 한계터널길이 이하의 터널을 열차가 통과할 때 받게 되는 압력 변동값은 정상적인 경우보다 작게 나타남을 알 수 있다. Fig. 6은 이를 보여주고 있다. 운주터널은 4088m이고, 노장2터널은 200m로 한국형 고속전철시제 열차의 경우 120Km/h의 속도 이상에서는 한계터널길이가 200m 이상이므로 아래 그림의 진입속도에서는 모두 한계터널길이 이하이다. 한계터널길이 이하에서는 변동횟수가 2회로 되고 변동 압력값도 줄어든다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\Delta P_1 = 0.2062 V^2 \times (A/A_t) \quad (5)$$



(a) at Unju Tunnel (4088m)

(b) at Nojang 2 Tunnel (200m)

Fig. 6 Shape of pressure fluctuation

4. 결 론

고속으로 주행하는 열차가 터널 진입시에는 터널내 공기의 압축 및 팽창과에 의한 압력 변동 하중을 차체가 받게되며, 이는 차체 피로강도에 영향을 미치는 결과를 초래한다. 그러나, 현재까지는 수치적 해석에 의한 터널내 최대 압력변동을 계산하여 확정론적인 방법에 의한 차체의 피로평가를 실시하였다. 그러나, 차체 경량화에 따른 알루미늄 용접 구조물의 특성상 차체의 확률론적인 피로평가가 필요하며, 이를 위해서는 터널 통과시 차체가 받는 압력변동의 값과 빈도를 정확하게 예측할 수 있어야 신뢰성 기반의 피로평가가 가능하다. 따라서, 본 연구에서는 고속열차의 차체가 받는 압력변동값을 통계적으로 처리할 수 있도록 실제 주행시험을 통해 압력변동값의 크기와 빈도를 아래와 같이 일반화 시켰다. 본 연구에서 제시된 터널 통과시의 압력변동값과 빈도는 향후 고속열차 차체의 설계시부터 고속으로 터널 주행시 받는 압력 하중에 의한 피로신뢰성을 해석하는 기초가 될 것이다.

- (1) 열차의 진입속도와 최대 압력변동값과는 일정한 상관 관계를 가지며, 동일한 터널에서 차량의 형상에 따라 계수의 값은 다르다.
- (2) 열차가 터널을 진입시에는 전두차로부터 압력 상승이 급격하게 일어나며, 후미차는 압력상승이 미미한 현상을 보인다. 전두차의 압력 상승은 진입 속도와 일정한 상관관계를 갖는다.
- (3) 터널내에서 열차가 교행시는 단독 주행시의 압력변동값은 1.5~2배까지 증가하는 것으로 알려졌다. 본 시험에서는 평균 1.4배 증가하는 것으로 분석되었다.
- (4) 터널내 압력 전파시 변동값의 감쇠비는 평균 92%이었다.
- (5) 열차가 터널 통과시의 압력변동 횟수는 피로평가의 관점에서 압력파가 5회 전파되는 속도인 244 km/h 이상에서는 4회 그 이하에서는 6회로 계산할 수 있다.

참고문헌

1. Kanta Nihei, Hideo Ono, Shigeki Koe and Fumihide Inamura, (1998) "Fatigue Strength Assessment Method for Shinkansen Aluminum Car Body Structures", Kawasaki Engineering Review, Vol. 138.
2. 박춘수, 서승일 외(2003), "한국형 고속전철 터널 주행시의 압력 변동 및 빈도의 분석", 한국철도학회 추계학술대회 논문집
3. 남성원(2004), "KTX 차량 내외부의 압력변동 특성에 관한 연구", 한국철도학회논문집, 제7권 제1호.
4. 권혁빈, 김태운 외(2002), "G7 시제 차량의 터널내부 압력파에 대한 수치 해석", 한국철도학회논문집, 제5권 제4호.

후 기

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