



열차가 터널에 진입할 때 발생하는 압축파에 대한 수치해석

- 열차의 출발방법 및 터널과의 거리에 대한 영향

김 사 량^{*1}

NUMERICAL STUDY ON THE COMPRESSION WAVE GENERATED BY THE TRAIN ENTERING A TUNNEL

S. R. Kim^{*1}

The numerical simulations on the train entering a tunnel were performed by solving unsteady axi-symmetric problems. To reduce the effects of the pressure wave generated by the train starting abruptly, several starting method of the train were also examined.

The pressure rise by the train entering a tunnel was compared with other results, and similar value was obtained compared with those of previous studies.

Key Words: 고속철도(High Speed Train), 압축파(Compression Wave), 터널(Tunnel), 전산유체역학(CFD)

1. 서 론

2. 수치해석

열차가 빠른 속도로 터널에 진입하면 압축파가 생성되어 전파된다. 열차의 속도와 터널의 길이에 따라서, 열차는 터널 끝단에서 반사되는 압축파 또는 팽창파와 여러 번 만나게 된다.

본 연구에서는, 역사에 설치된 터널을 빠른 속도로 열차가 지나가는 경우를 가정하여, 열차와 길이가 같은 짧은 터널에 대하여 수치해석을 통한 압축파의 거동을 살펴보고자 한다. 길이 약 100m의 열차가 350km/h의 속도로 달리는 경우에 열차길이가 같은 길이의 터널 내에서 열차는 열차의 선두부의 진입에 의해 발생하는 압력파의 전파에 의해 발생하는 팽창파-압축파-팽창파와 교차하게 된다[1].

또한, 이에 앞서서 열차의 급출발에 따라 발생하는 압력파의 거동과 이의 영향을 줄이기 위한 출발 방법에 대한 영향에 대하여 고찰하도록 한다.

2.1 계산격자 및 계산방법

본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 열차와 터널의 단면을 원형으로 가정하여 이용하여 2차원 축대칭으로 해석하였다. 열차의 단면적은 동력차 최대단면적인 8.9 m²[2], 터널의 단면적은 107 m²[2,3]를 사용하였다. 계산영역은 열차진행방향으로 총 430 m, 높이 20 m 이다.

계산에는 레드햇 리눅스 8.0을 설치한 Xeon 2.4GHz Dual CPU, RAM 1GB, 2-node cluster에 설치된 STAR-CD v.3.22 프로그램을 사용하였다.

온도변화를 무시한 압축성 유동으로 가정하여 해석하였으며, 난류모델은 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 경계조건으로는, 바닥 및 터널벽면은 벽조건을 사용하였고, 그 밖의 입구, 출구, 상부에는 압력조건(대기압)을 사용하였다.

열차의 모양은 앞뒤가 수직인 길이 100 m의 원통으로 가정하였으며, 열차의 이동은 STAR-CD에서 제공하는 이동격자의 첨가 및 삭제방법을 사용하여 구현하였다.

Fig. 2에 계산에 사용된 격자를 나타내었다. 적절한 격자계를 선택하기 위하여, 열차 진행방향으로 격자 간격이 1 m 인 경우를 기준으로 0.5 m, 0.2 m, 0.1 m 인 경우에 대하여 계산

*1 정희원, 강릉대학교 정밀기계공학과

* Corresponding author E-mail: dearksr@kangnung.ac.kr

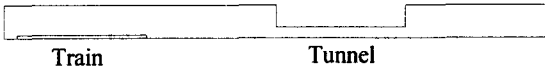


Fig.1 Calculated Domain

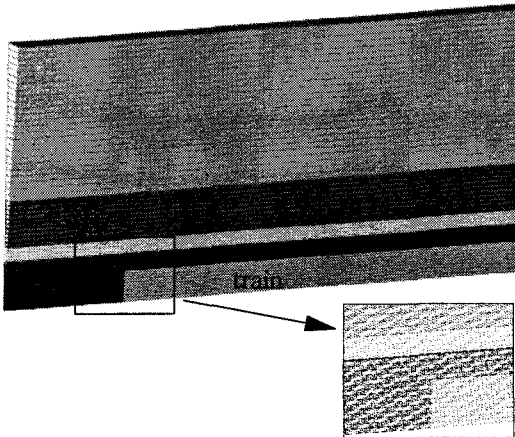


Fig.2 Mesh

하여, 열차 선두부에서의 압력을 비교하여, 크기가 거의 변하지 않는 결과를 보인 0.1m 격자를 사용하였다. 사용된 전체 격자의 수는 276,000개이며, 이중 10,000개는 열차를 구성하는 고체격자에 사용되었다.

2.2 열차의 출발 방법에 대한 고찰

지금까지 많은 연구는 열차를 터널에서 충분히 멀리 떨어진 위치에서 최고속도로 급출발을 하는 경우를 가정하여 수치해석을 하는 경우가 대부분이었다. 이 경우에는 열차 주위의 유동이 정상상태에 도달하고, 급출발한 열차에 의해 발생한 압력파가 영향을 미치지 않을 정도로 충분히 먼 거리에서 열차를 출발시켜야 하므로 계산 영역이 커지고 계산시간이 오래 걸리는 단점이 생기게 된다.

본 논문에서는 급출발, 선형 속도증가, 3차, 5차, 그리고 7차 곡선형 속도증가의 경우에 대하여 열차의 출발방법이 유동장에 미치는 영향을 고찰해 보도록 한다.

2.2.1 급출발

급출발은 출발시부터 열차의 주행속도로 움직이기 시작하는 것이다. 급출발을 하게 되면 출발시 발생하는 압력파가 열차의 진행방향으로 전파되면서 유동을 교란한다. 그러나, 그 강도가 터널 진입시 발생하는 압력파에 비해서는 작다. 따라서 터널에서 충분한 거리를 두고 출발하면 그 영향을 줄일 수 있을 것으로 생각하여, 열차와 터널의 거리에 따른 압력변동에 대하여 고찰하였다.

2.2.2 선형 속도증가

급출발 시의 압력과 발생을 줄이기 위해서 속도가 선형적으로 증가하는 경우에 대하여 계산을 수행하여 다른 경우와 비교하였다.

$$V(0)=0, V(t_1)=V_t$$

$$\frac{V(t)}{V_t} = \frac{t}{t_1}$$

2.2.3 3차 속도증가

속도가 시간에 대하여 다음과 같이 3차식으로 나타낼 수 있는 경우를 가정하였다.

$$V(0)=0, V(t_1)=V_t$$

$$V'(0)=0, V'(t_1)=0$$

$$\frac{V(t)}{V_t} = 3\left(\frac{t}{t_1}\right)^2 - 2\left(\frac{t}{t_1}\right)^3$$

2.2.4 5차 속도증가

권혁빈 등[4]의 경우와 마찬가지로, 속도가 시간에 대하여 5차식으로 나타낼 수 있는 경우를 가정하였다.

$$V(0)=0, V(t_1)=V_t$$

$$V'(0)=0, V'(t_1)=0$$

$$V''(0)=0, V''(t_1)=0$$

$$\frac{V(t)}{V_t} = 10\left(\frac{t}{t_1}\right)^3 - 15\left(\frac{t}{t_1}\right)^4 + 6\left(\frac{t}{t_1}\right)^5$$

2.2.5 7차 속도증가

속도가 시간에 대하여 7차식으로 나타낼 수 있는 경우를 가정하였다.

$$V(0)=0, V(t_1)=V_t$$

$$V'(0)=0, V'(t_1)=0$$

$$V''(0)=0, V''(t_1)=0$$

$$V'''(0)=0, V'''(t_1)=0$$

$$\frac{V(t)}{V_t} = 35\left(\frac{t}{t_1}\right)^4 - 84\left(\frac{t}{t_1}\right)^5 + 70\left(\frac{t}{t_1}\right)^6 - 20\left(\frac{t}{t_1}\right)^7$$

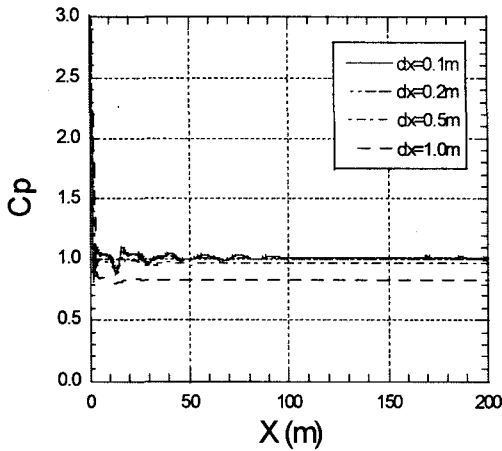


Fig. 3 Pressure variations on the train head for various grid size

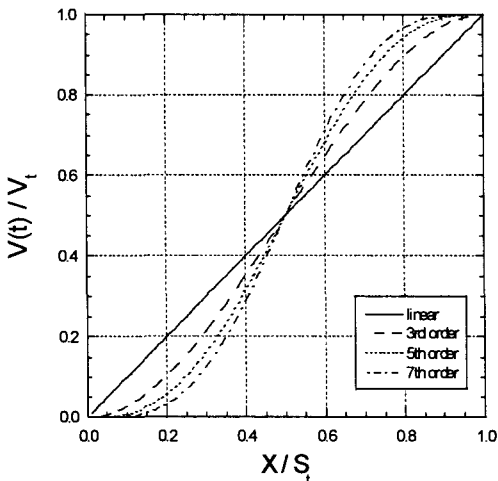


Fig. 4 Velocity-distance relation for various method for increasing velocity

3. 결과 및 검토

3.1 격자의 영향

격자수 또는 격자의 간격에 대한 영향을 알아보기 위하여 개활지에서 정지되어 있던 열차가 급출발하여 주행을 시작하는 경우에 대하여 계산을 수행하였다.

Fig. 3에 열차 앞부분에서의 압력변동을 진행거리에 대하여 나타내었다. 열차가 출발하면 급격한 압력의 상승이 발생하며, 열차가 출발해서 100 m 정도를 주행할 때까지 진동이 생기는 것을 볼 수 있다. 격자가 작을수록 진동은 진폭이 크고, 감쇄되어 없어질 때까지의 시간이 오래 걸리는 것을 볼 수 있다. 굵은 점선은 열차속도에 의한 동압을 나타낸 것이

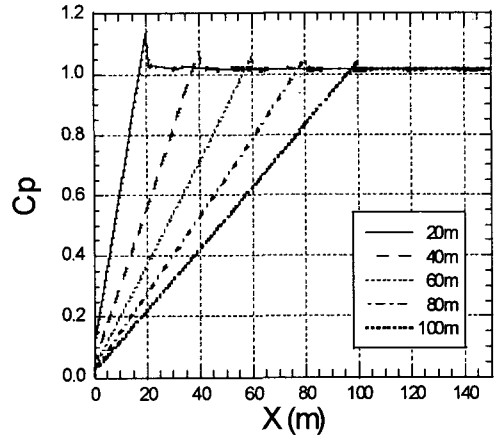


Fig. 5 Cp curves for linear velocity increase

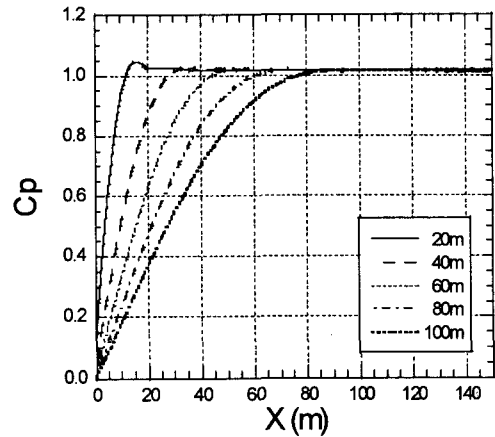


Fig. 6 Cp curves for 5th order velocity increase

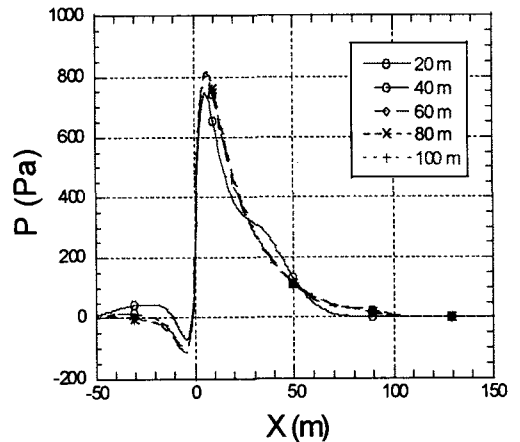


Fig. 7 Pressure distributions just before the train enter the tunnel



다. 격자 간격이 0.2 m이하에서의 수치계산 결과가 비슷한 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서, 본 연구에서 사용한 격자의 간격을 0.1 m로 정하였다. 이 결과로부터, 급출발을 하는 경우에는, 열차와 터널의 거리는 100 m 이상은 되어야 할 것으로 생각한다.

3.2 열차의 출발방법에 따른 영향

Fig. 4에는 속도를 서서히 증가시키는 여러 가지 방법에 대하여 거리-속도관계를 나타낸 것이다.

개활지에서는 열차의 전후로 전파되는 압력파의 영향은 크지 않은 것으로 보인다. 출발 방법에 따른 열차 선두부에서의 압력을 Fig. 5와 6에 나타내었다.

선형속도증가의 경우에는 최고속도에 도달하는 거리가 짧을 수록 압력의 급격한 변화가 동반되는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서, 터널까지의 거리가 길어질 것으로 생각되므로 바람직하지 않다.

5차 곡선으로 속도가 증가하는 경우는 최고속도에 이르는 거리가 약 60 m 정도인 경우로부터 오버슈트가 생기지 않는 것을 알 수 있다. 따라서, 최소 60 m 이상 터널과의 거리가 떨어져야 할 것으로 생각한다.

3.3 터널에 열차 진입 시 발생하는 압력파

3.3.1 열차와 터널간의 거리

Fig. 7에는 1 m 격자의 경우 열차와 터널의 거리에 따라서 열차가 터널에 진입시 터널벽면에서의 압력 분포를 나타내었다. 열차와 터널의 거리가 60 m이상인 경우의 분포는 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 거리가 80 m인 경우와 100 m인 경우를 비교해 보면 피크위치에서 압력분포가 약 0.2%이내의 차이로 거의 일치하는 결과를 보인다.

4. 결 론

고속으로 터널에 진입하는 열차에 의해 발생하는 압축파에 대하여 수치해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열차가 급출발을 하게 되면 급출발에 의한 압력파가 발생하는데, 권 등이 제안한 매끈한 출발방법이 가장 영향이 적다고 할 수 있다.
- (2) 격자의 크기가 작을수록 압축파의 강도가 커지며, 정상상태로 될 때까지의 시간이 많이 걸리는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2004년도 강릉대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 남성원, 권혁빈, 2004, "터널에서의 고속철도 압력파에 관한 x-t선도 이론 해석," *한국철도학회논문집*, 제7권, 제3호, p.200-207.(A-14)
- [2] 권혁빈 등, 2002, "G7 시제 차량의 터널내부 압력파에 대한 수치 해석," *한국철도학회논문집*, 제5권, 제4호, p.260-266.(A-13)
- [3] Hur, N. et al., 2004, "Wind Pressure Transients in the Tunnel inside a Station Caused by a Passing High Speed Train," *KSME International Journal*, Vol.18, No.9, p.1614-1622.(A-11)
- [4] Kwon, H.-B. et al., 2001, "Nose Shape Optimization of High-speed Train for Minimization of Tunnel Sonic Boom," *JSME International Journal*, Series C, Vol.44, No.3, p.890-899.(A-15)