

# 열차가 터널에 진입할 때 발생하는 압축파에 대한 수치해석 - 열차의 출발방법에 따른 영향에 대한 고찰 -

김 사 량<sup>†</sup>

강릉대학교 정밀기계공학과

## A Numerical Study on the Compression Wave Generated by the Train Entering a Tunnel - Effects of the Start Method of a Train -

Sa Ryang Kim<sup>†</sup>

Department of Precision Mechanical Engineering, Kangnung National University, Gangneung 210-702, Korea

(Received November 15, 2006; revision received November 22, 2006)

**ABSTRACT:** The numerical simulations on the train entering a tunnel are performed by solving unsteady axi-symmetric problems. To reduce the effects of the pressure wave generated by the train starting abruptly, several starting methods of the train are examined. The high order velocity increase gives better results than those for the linear velocity increase. The high order velocity increase gives good results for the pressure rise by the train entering a tunnel, too. The distance to the train reaches the highest running velocity from the start should be more than 60 m when the train speed is 350 km/h.

**Key words:** High speed train(고속철도), Compression wave(압축파), Tunnel(터널), CFD(전산 유체역학)

### 1. 서 론

열차가 빠른 속도로 터널에 진입하면 피스톤 효과에 의하여 압축파가 생성되어 전파된다. 열차의 속도와 터널의 길이에 따라서, 열차는 터널 끝단에서 반사되는 압축파 또는 팽창파와 여러 번 만나게 된다. 이 압력파는 터널 벽면과 터널을 지나는 열차 내부의 승객들에게, 그리고 터널 출구에서 떨어져 있는 외부에도 소음, 진동 등의 영향을 준다.

이러한 연구는 고속전철의 개발과 함께 열차의

공력해석에 대한 연구,<sup>(1-4)</sup> 열차의 터널 진입시 생성, 전파되는 압축파에 대한 연구,<sup>(5-8)</sup> 이러한 압축파의 강도를 줄이기 위한 터널 입구 형상 또는 열차 선두부의 형상에 대한 연구,<sup>(9-11)</sup> 터널 출구에서 방출되는 미기압파에 의한 영향을 줄이기 위한 연구,<sup>(12,13)</sup> 고속철도 역사를 통과하는 통과열차의 영향에 대한 연구<sup>(14)</sup> 등 많은 연구가 수행되어 왔다. 고속철도와 관련된 전반적인 연구내용에 대하여는 Raghunathan et al.<sup>(15)</sup>의 문헌에 잘 정리되어 있다.

본 연구에서는 터널에서 일정거리만큼 떨어져 정지해 있던 열차가 주행속도까지 가속하여 터널에 진입할 때 터널 입구부에서 생기는 압력파에 대하여, 수치계산시의 초기조건의 영향에 관점을 두고 알아보도록 한다.<sup>(16)</sup> 일반적으로 많이 사용

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-33-640-2395; fax: +82-33-640-2244

E-mail address: dearksr@kangnung.ac.kr

하는 급출발의 경우에는 열차가 정지상태에서 주행속도로 급가속을 하게 되므로 열차 출발시에 수치적인 압력파가 생성되어 유동장을 교란하게 된다.<sup>(16)</sup>

본 연구에서는 열차의 급출발에 따라 발생하는 압력파의 영향을 줄이기 위한 여러 가지 출발방법이 터널입구에서의 압력변동에 미치는 영향에 대하여 고찰하여, 터널입구에서의 압력변동에 영향을 주지 않는 수치계산시의 초기조건으로서의 적절한 열차의 출발방법에 대하여 알아보려고 한다.

## 2. 수치해석

### 2.1 계산격자 및 계산방법

본 연구에서는 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 100 m 길이의 열차와 100 m 길이의 터널의 단면을 원형으로 가정하여 2차원 축대칭으로 해석하였다. 열차의 단면적은 동력차 최대단면적인  $8.9 \text{ m}^2$ ,<sup>(6)</sup> 터널의 단면적은  $107 \text{ m}^2$ 를<sup>(6, 14)</sup> 사용하였다. 계산 영역은 열차진행방향으로 총 430 m, 높이 20 m이다. 열차의 주행속도는 설계최대속도인  $350 \text{ km/h}$ 를 사용하였다.

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 비정상상태 점성 압축성 유동으로 가정하여 해석하였으며, 난류모델은 표준  $k-\epsilon$  모델을 사용하였다. 경계조건으로는 바닥 및 터널 벽면은 벽조건을 사용하였고, 그밖의 입구, 출구, 상부에는 압력조건(대기압)을 사용하였다. 시간에 대해서는 Implicit 알고리즘과 압력 보정에는 PISO 알고리즘을 사용하였다. 대류항의 차분에는 상류차분식을 사용하였다.

열차의 이동은 STAR-CD에서 제공하는 이동격자의 첨가 및 삭제방법을 사용하여 구현하였다. 따라서 열차는 시간간격에 대하여 항상 일정한 격자간격만큼 움직이며, Courant 수가 항상 1이 되도록 시간간격을 정하였다. 가속을 하는 경우에는 초기 시간간격이 가장 크고, 정속주행시의 시간간격이 가장 작게 된다.

Fig. 2에 계산에 사용된 격자를 나타내었다. 열차진행방향으로 격자간격이 1 m인 경우를 기준으로 0.5 m, 0.2 m, 0.1 m인 경우에 대하여 계산하여,



Fig. 1. Calculated domain.

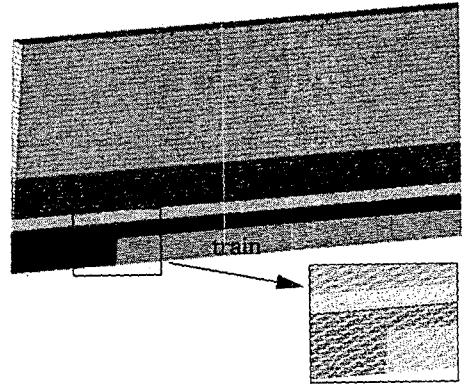


Fig. 2. Mesh.

열차 선두부에서의 압력을 비교하여 크기가 거의 변하지 않는 결과를 보인 0.1 m 격자를 사용하였다. 높이방향은 열차높이의 10배 높이로 해석을 하여 비교하였을 때 결과가 거의 차이가 없었던, 열차높이의 약 5배의 높이를 사용하였다. 사용된 전체 격자의 수는 276,000개이며, 이 중 10,000개는 열차를 구성하는 고체격자에 사용되었다.

### 2.2 열차의 출발방법에 대한 고찰

지금까지 많은 연구는 열차를 터널에서 충분히 멀리 떨어진 위치에서 최고속도로 급출발을 하는 경우를 가정하여 수치해석을 하는 경우가 대부분이었다.<sup>(7,11,14)</sup> 이 경우에는 열차 주위의 유동이 정상상태에 도달하고, 급출발한 열차에 의해 발생한 압력파가 영향을 미치지 않을 정도로 충분히 먼 거리에서 열차를 출발시켜야 하므로 계산영역이 커지고 계산시간이 오래 걸리는 단점이 생기게 된다. Kwon and Lee<sup>(16)</sup>는 이러한 단점을 피하기 위하여 속도를 5차곡선으로 증가시키는 출발방법에 대하여 연구하여 좋은 결과를 얻었다.

본 논문에서는 급출발, 선형 속도증가, 3차, 5차, 그리고 7차 곡선형 속도증가의 경우에 대하여 열차의 출발방법이 유동장 및 터널입구에서 생성되는 압력파에 미치는 영향을 고찰하여 적절한 출발방법을 살펴보고 Kwon and Lee<sup>(16)</sup>의 결

과와 비교 검토해 보도록 한다. 특히 가속도의 영향을 알아보기 위해, 열차가 가속에 걸리는 거리(가속거리, S1)를 변화시켜 가며 그 영향을 살펴보고 적절한 가속거리를 찾아보도록 한다.

### 2.2.1 급출발

급출발은 출발시부터 열차의 주행속도( $V_i$ )로 움직이기 시작하는 것이다. 급출발을 하게 되면 출발시 발생하는 압력파가 열차의 진행방향으로 전파되면서 유동을 교란한다.<sup>(16)</sup> 그러나, 그 강도가 터널 진입시 발생하는 압력파에 비해서는 작다. 따라서 터널에서 충분한 거리를 두고 출발하면 그 영향을 줄일 수 있을 것으로 생각하여 지금까지 많이 사용되어 왔다.<sup>(7,11,14)</sup>

### 2.2.2 선형 속도증가

급출발시의 압력과 발생을 줄이기 위해서는 천천히 가속하는 방법을 사용해야 한다. 가장 간단한 가속방법은 선형 가속이다. 가속도를 변화시켜 가면서 속도가 선형적으로 증가하는 경우에 대하여 계산을 수행하여 다른 경우와 비교하였다. 이 경우에 속도는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $t_1$ 은 출발시부터 열차가 주행속도( $V_i$ )에 이르기까지의 시간이다.

$$V(0)=0, \quad V(t_1)=V_i, \quad \frac{V(t)}{V_i} = \frac{t}{t_1} \quad (1)$$

### 2.2.3 3차 속도증가

속도가 시간에 대하여 3차식으로 나타낼 수 있는 경우를 가정하였다. 이 경우는 Fig. 3에서 볼

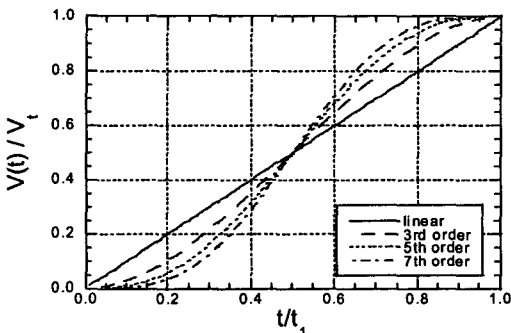


Fig. 3 Velocity-time relation for various method for increasing velocity.

수 있듯이 5차식에 비하여 출발시 및 주행속도에 도달할 때의 속도변화는 크지만 중간부분에서의 가속도는 5차식을 사용할 때보다 작아지게 된다. 이 경우 적용된 경계조건과 이를 이용하여 구한 속도는 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} V(0) &= 0, & V(t_1) &= V_i \\ V'(0) &= 0, & V'(t_1) &= 0 \\ \frac{V(t)}{V_i} &= 3\left(\frac{t}{t_1}\right)^2 - 2\left(\frac{t}{t_1}\right)^3 \end{aligned} \quad (2)$$

### 2.2.4 5차 속도증가

식(3)과 같이 Kwon and Lee<sup>(16)</sup>가 제안하였던, 속도가 시간에 대하여 5차식으로 나타낼 수 있는 경우에 대하여 계산을 수행하여 비교해 보았다.

$$\begin{aligned} V(0) &= 0, & V(t_1) &= V_i \\ V'(0) &= 0, & V'(t_1) &= 0 \\ V''(0) &= 0, & V''(t_1) &= 0 \\ \frac{V(t)}{V_i} &= 10\left(\frac{t}{t_1}\right)^3 - 15\left(\frac{t}{t_1}\right)^4 + 6\left(\frac{t}{t_1}\right)^5 \end{aligned} \quad (3)$$

### 2.2.5 7차 속도증가

식(4)에 나타난 것과 같이 속도가 시간에 대하여 7차식으로 나타낼 수 있는 경우를 가정하였다. 이 경우는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 출발시와 주행속도에 도달할 때 속도변화가 적은 대신에 중간 부분에서의 가속도가 다른 경우보다 크다는 차이가 있다.

$$\begin{aligned} V(0) &= 0, & V(t_1) &= V_i \\ V'(0) &= 0, & V'(t_1) &= 0 \\ V''(0) &= 0, & V''(t_1) &= 0 \\ V'''(0) &= 0, & V'''(t_1) &= 0 \\ \frac{V(t)}{V_i} &= 35\left(\frac{t}{t_1}\right)^4 - 84\left(\frac{t}{t_1}\right)^5 + 70\left(\frac{t}{t_1}\right)^6 - 20\left(\frac{t}{t_1}\right)^7 \end{aligned} \quad (4)$$

## 3. 결과 및 검토

### 3.1 격자의 영향

격자수 또는 격자의 간격에 대한 영향을 알아보기 위하여 개활지에서 정지되어 있던 열차가 급

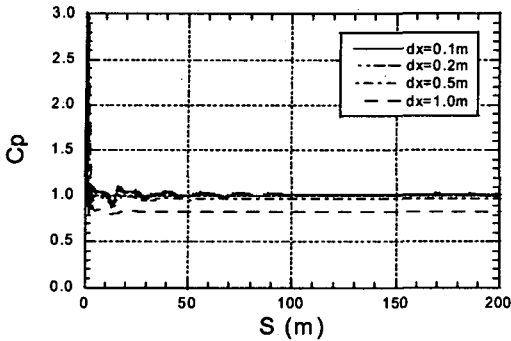


Fig. 4 Pressure variations on the train head for various grid size.

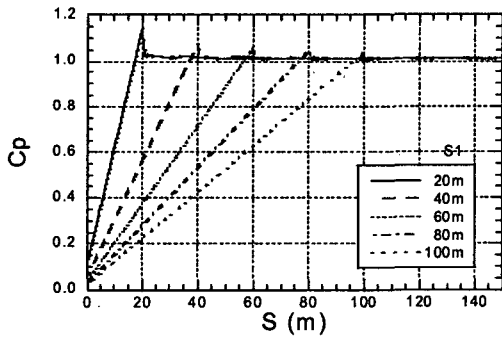
출발하여 주행을 시작하는 경우에 대하여 계산을 수행하였다.

Fig. 4에 열차 앞부분에서의 압력계수의 변동을 열차의 진행거리(S)에 대하여 나타내었다. 열차가 출발하면 급격한 압력의 상승이 발생하며, 열차가 출발해서 100m 정도를 주행할 때까지 진동이 계속되는 것을 볼 수 있다. 격자가 작을수록 진

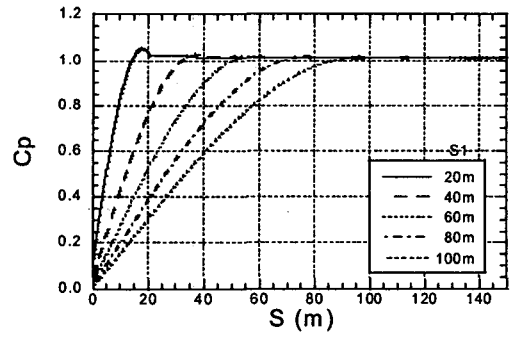
동은 진폭이 크고, 감쇄되어 없어질 때까지의 시간이 오래 걸리는 것을 볼 수 있다. 격자 간격이 0.2m 이하에서의 수치계산 결과가 비슷한 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 격자의 간격을 0.1m로 정하였다.

### 3.2 열차의 출발방법에 따른 영향

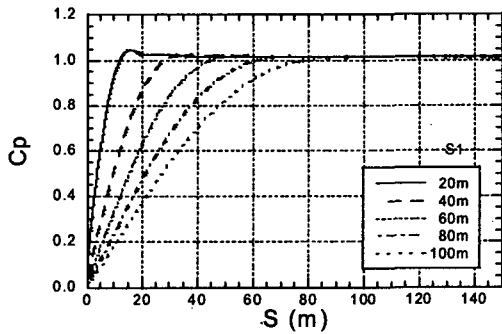
Fig. 3에는 나타낸 속도를 증가시키는 여러 가지 방법에 대하여, Fig. 5에는 출발방법에 따른 열차 선두부에서의 압력을 열차의 진행거리(S)에 대하여 나타내었다. 선형속도증가의 경우에는 최고주행속도에 도달하는 가속거리가 짧을수록(가속도가 클수록) 가속거리가 끝나는 순간에, 압력의 급격한 변화가 동반되는 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 5(a)). 따라서 압력변화로 인한 영향이 없게 되는 터널까지의 거리는 100m보다 더 길어야 것으로 생각되므로 사용하지 않는 것이 좋다고 생각한다. 특히, 가속거리가 끝나는 지점에서의 가속도의 불연속이 압력의 급격한 변화를 일으키는



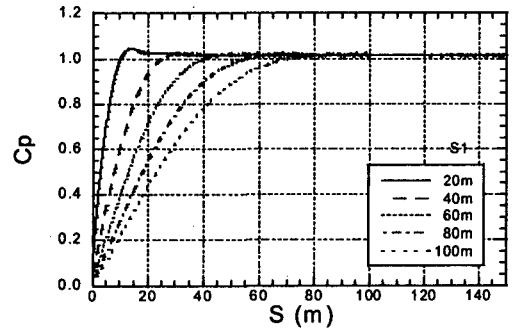
(a) Linear velocity increase



(b) 3rd order velocity increase



(c) 5th order velocity increase



(d) 7th order velocity increase

Fig. 5 Cp variations on the train head for the running distance of the train.

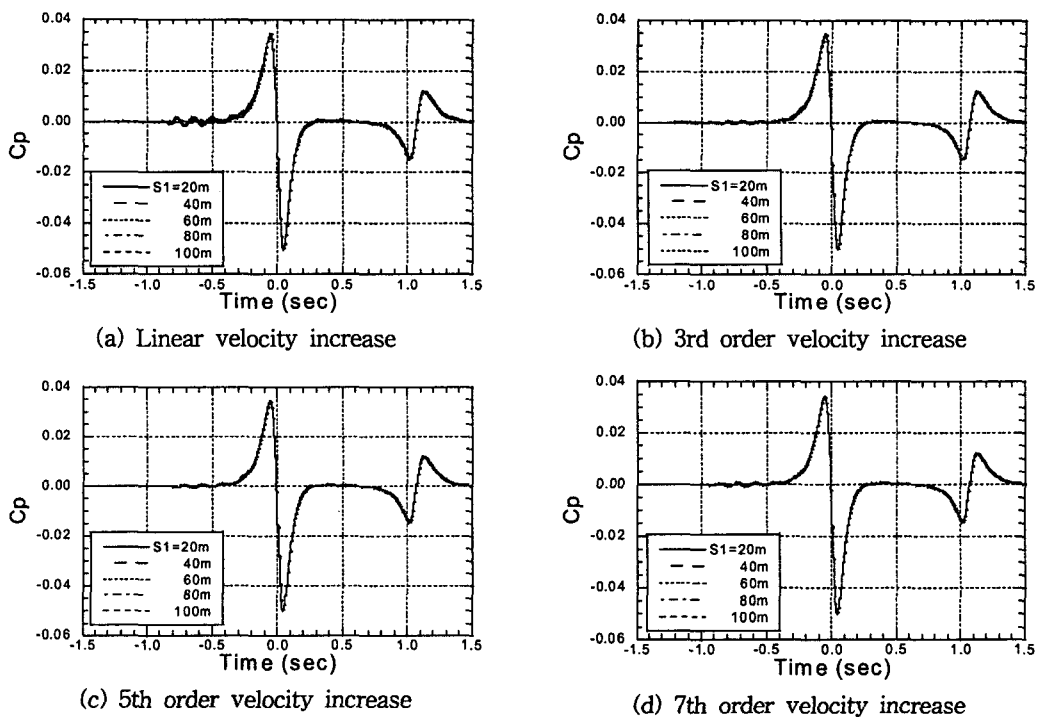


Fig. 6  $C_p$  variations at the location 150 m ahead of the start position.

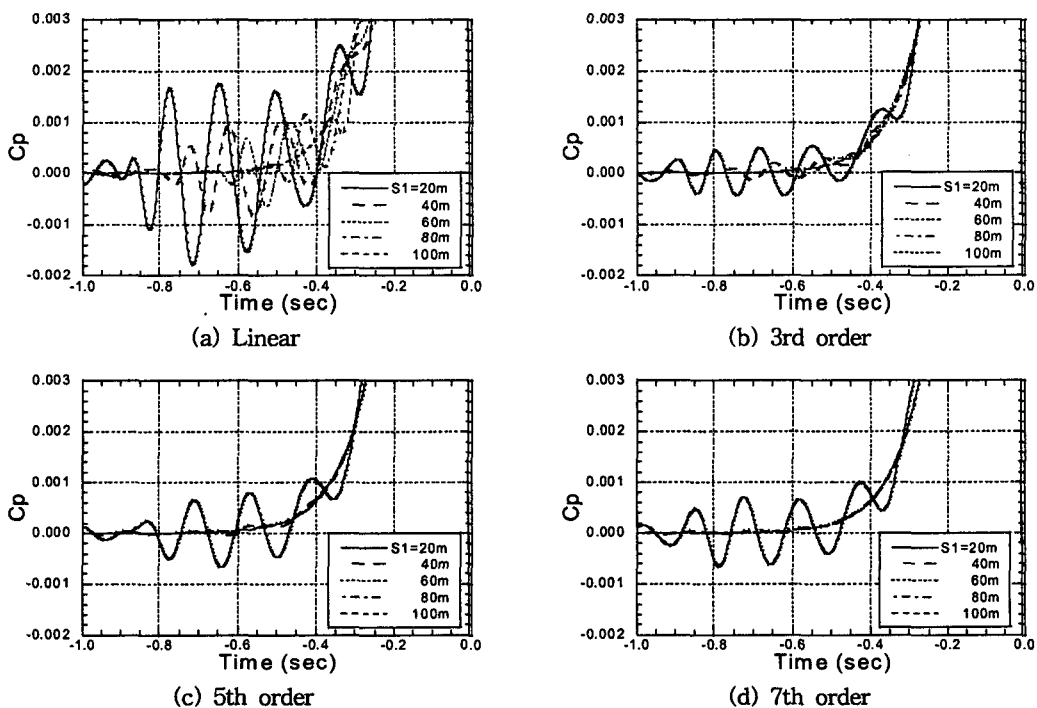


Fig. 7  $C_p$  variations at the location 150 m ahead of the start position (Magnified plots).

것으로 생각되며, 가속도의 불연속이 없는 매끈한 곡선형태가 좋을 것으로 생각한다.

3차, 5차, 7차 곡선으로 속도가 점차 증가하는 경우는 모두 거의 비슷한 경향을 나타내고 있으며 가속거리가 20m, 40m의 경우에는 선형속도 증가의 경우보다는 약하지만 압력의 오버슈트가 생기는 것을 관찰할 수 있다(Fig.5의 (b)~(d)). 가속거리가 약 60m인 경우에서부터 압력의 오버슈트가 생기지 않는 것을 알 수 있다. 속도증가 곡선의 차수가 높을수록 오버슈트가 작아지는 것을 볼 수 있다. 따라서 열차와 터널과의 초기 출발거리가 최소 60m 이상은 떨어져야 좋을 것으로 생각한다.

Fig.6의 (a)~(d)에는 개활지에서 열차가 주행하는 경우에 열차 출발지점에서 150m 떨어져, 지면에서 터널 천정높이의 위치에서의 압력변동을 나타내었다. 열차가 측정지점에 도달할 때의 시간을 기준(0)으로 하였다. 가속거리가 20, 40m의 경우에는 열차가 측정지점에 도달하기 이전에 작은 양이기는 하지만 압력변동이 생기는 것을 볼 수 있다. Fig.7은 압력변동이 생기는 부분을 확대해서 그린 것이다. 선형속도증가의 경우에는 모

든 경우에 상당한 압력변동을 보여주고 있다. 3차 곡선증가의 경우는 출발거리가 60m인 경우까지 변동이 보이며, 그밖의 경우에는 출발거리가 60m 이상이 되면, 영향이 거의 없는 것을 볼 수 있다. 따라서 가속도가 큰 경우에는 열차가 가속하면서 생기는 압력의 변동이 전파되어 먼 곳까지 영향을 주는 것을 알 수 있다.

### 3.3 터널에 열차 진입시 발생하는 압력파

Fig.8의 (a)-(d)는 열차의 출발위치에서 100m 떨어진 지점에 터널이 있는 경우에 대하여, 각각의 출발방법에 따른 터널입구 천정에서의 압력의 변동을 나타낸 것이다. 역시 터널입구에 도달했을 때의 시간을 기준(0)으로 하였다. 선형속도증가의 경우에는 모든 경우에 가속거리가 끝나는 위치에서 생긴 압력변동이 유동장에 전파되어 터널입구에까지 영향을 준다. 그밖의 경우에는 20, 40m의 짧은 가속거리의 경우에만 영향을 주며, 60m 이상의 가속거리에서는 거의 영향이 없는 것을 관찰할 수 있다.

Fig.9에는 각각의 출발방법에 대하여 열차와 터

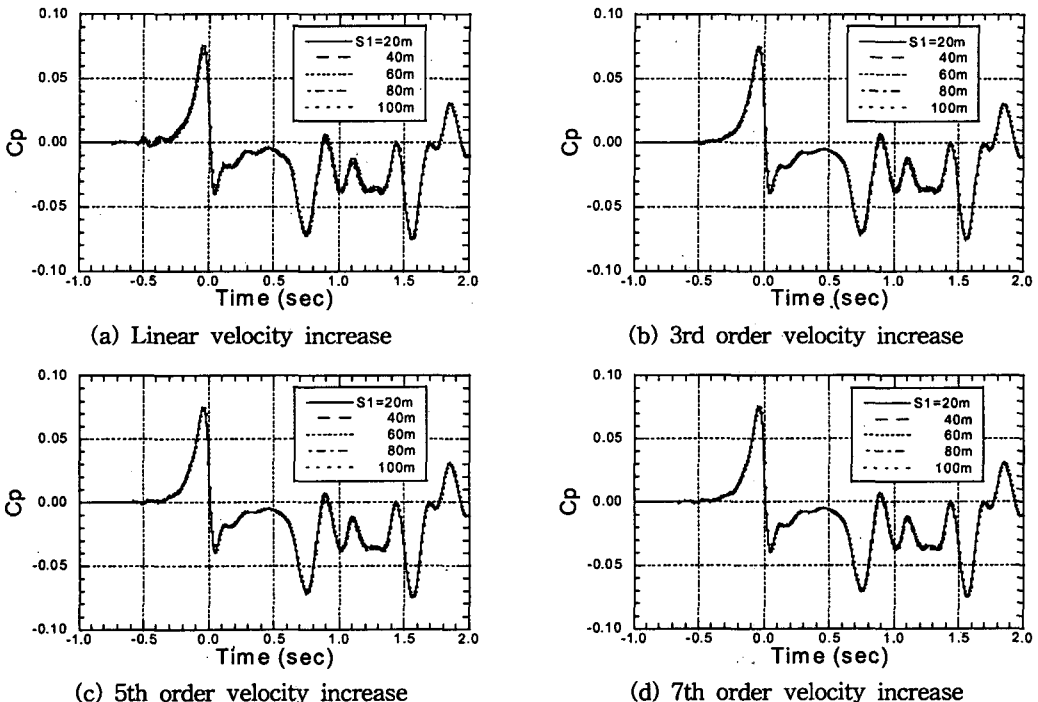
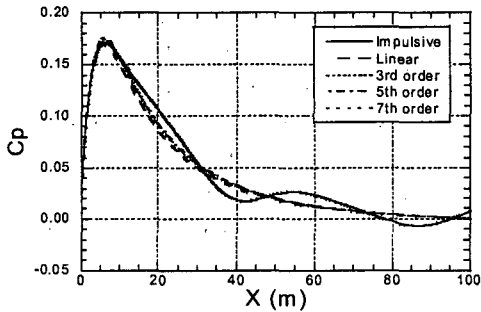
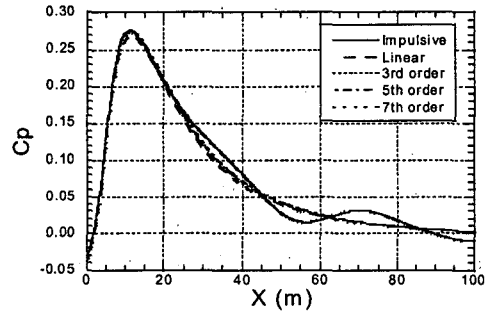


Fig. 8 Cp variations at the tunnel entrance.



(a) Train enters 0 m from entrance



(b) Train enters 5 m from entrance

Fig. 9 Cp distributions along the tunnel when the train enters the tunnel.

널과의 거리가 100 m인 경우에 열차가 터널에 진입할 때 터널 내부의 압력분포를 터널입구로부터의 거리(X)에 대하여 나타내었다. Fig. 9의 (a)는 열차가 터널입구에 도달한 경우이며, Fig. 9의 (b)는 열차가 터널 속으로 5 m 진입한 경우이다. 두 그림에서 모두 급출발의 경우는 다른 경우와 전혀 다른 압력분포를 보이고 있으며, 선형속도증가의 경우는 약간의 차이만을 보이고 있다. 나머지 3차, 5차, 7차 곡선을 이용한 매끈한 출발방법의 경우는 거의 동일한 압력분포를 보인다. 따라서 출발시 발생하는 압력파의 영향을 줄이기 위해서는 저속에서 출발하여 최고주행속도까지 매끈한 곡선형태로 속도를 증가시켜야 할 것이며, 가속거리도 충분히 길게 고려해야 할 것이다.

열차의 속도를 점진적으로 증가시키는 출발방법을 사용하는 경우에는 열차가 정지위치에서부터 최고 주행속도에 이를 때까지의 가속거리(S1)와 일정한 주행속도를 유지하며 터널에 진입하는 정속주행거리(S2)의 두 인자를 고려해야 한다.<sup>(16)</sup> Kwon and Lee<sup>(16)</sup>는 최적의 가속거리는 터널수력직경의 5~10배 정도, 최적의 출발지점은 터널수력직경의 5~10배의 구간에 존재한다고 제시하였다. 최적의 가속거리에 대하여 현재의 결과인 수력직경의 약 6배의 거리는 Kwon and Lee<sup>(16)</sup>의 결과와 잘 일치한다고 하겠다.

#### 4. 결 론

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

(1) 열차가 급출발을 하게 되면 급출발에 의한 압력파가 발생하며, 전방의 유동장에 영향을 주는 것을 확인하였으며, 이러한 출발방법을 사용하지 않는 것이 좋다.

(2) 선형속도변화의 경우에도 급출발보다는 작은 크기이지만 최고속도가 되는 곳에서 압력파를 발생시키며, 이 압력파는 전방에 영향을 준다. 열차의 가속도가 급격히 변하는 것을 피해야 유동장에 주는 영향을 줄일 수 있다.

(3) 속도변화가 5차, 7차 곡선형태로 변하는 경우는 거의 비슷한 결과를 보여주며 출발시 압력파의 영향이 가장 적은 방법이라고 할 수 있다. 이는 Kwon and Lee<sup>(16)</sup>의 결과와 잘 일치한다고 하겠다.

(4) 속도변화곡선의 차수가 높을수록 좀더 좋은 결과를 보여준다. 그러나 출발거리가 60 m 이상이 되면 차수에 관계없이 전방에 영향을 주지 않는다.

(5) 열차의 가속도가 클수록 터널입구에서 압력증가가 시작되는 위치에서 작은 압력변동이 많이 생긴다.

(6) 향후 본 연구에 추가하여 열차와 터널과의 거리에 대한 영향, 열차와 터널의 길이에 대한 영향, 열차의 속도와 출발거리에 대한 영향, 관련 파라미터의 무차원화 등에 대한 연구가 좀더 필요할 것으로 생각한다.

#### 후 기

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

## 참고문헌

1. Mackrodt, P. A., Steinheuer, J. and Stoffers, G., 1980, Aerodynamisch Optimal Kopfformen für Triebzüge, DFVLR.
2. Aita, S., Tabbal, A., Mestreau, E., Montmayeur, N., Masbernat, F., Wolfhugel, Y. F. and Dumas, J. C., 1992, CFD Aerodynamics of the French High-Speed Train, SAE 920343.
3. Maeng, J. S. and Yang, S. Y., 1993, Numerical analysis of aerodynamic characteristics of the magnetically levitated train configurations, Journal of KSAS, Vol. 21, No. 6, pp. 107-122.
4. Kim, Y. G., Kwon, H. B., Kim, S. W. and Park, T. W., 2005, Evaluation on the train resistances for Korean high speed train, Journal of KSR, Vol. 8, No. 5, pp. 405-410.
5. Kim, H. D., 1994, Wave phenomenon in high-speed railway tunnel, Journal of the KSME, Vol. 34, No. 10, pp. 796-807.
6. Kwon, H. B., Lee, D. H. and Kim, M. S., 2000, Numerical simulation of the unsteady flow field induced by a high-speed train passing through a tunnel, Journal of KSR, Vol. 3, No. 4, pp. 229-236.
7. Shin, C. H. and Park, W. G., 2000, Numerical study of three-dimensional viscous flow and compression wave induced by the high speed train entering into a tunnel, Journal of the KSCFE, Vol. 5, No. 3, pp. 23-31.
8. Nam, S. W. and Kwon, H. B., 2004, Theoretical study on the characteristics of pressure change of high speed train in tunnels, Transaction of the KSME(B), Vol. 28, No. 9, pp. 1042-1050.
9. Kim, H. D., Kim, T. H. and Kim, D. H., 1999, Effect of tunnel entrance hood on entry compression wave, Transaction of the KSME (B), Vol. 23, No. 1, pp. 58-68.
10. Howe, M. S., Iida, M., Fukuda, T. and Maeda, T., 2000, Theoretical and experimental investigation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a flared portal, J. Fluid Mech., Vol. 425, pp. 111-132.
11. Shin, C. H. and Park, W. G., 2000, Tunnel entry flow analysis of high speed train with wedge shaped nose, Journal of KSAS, Vol. 28, No. 5, pp. 99-105.
12. Kwon, H. B., Jang, K. H., Kim, Y. H., Yee, K. J. and Lee, D. H., 2001, Nose shape optimization of high-speed train for minimization of tunnel sonic boom, JSME International Journal, Series C, Vol. 44, No. 3, pp. 890-899.
13. Kim, B. Y., Kwon, H. B., Yun, S. H., Ku, Y. C., Ko, T. H. and Lee, D. H., 2005, Numerical study of tunnel hood to reduce micro-pressure wave on conventional railways, Journal of KSR, Vol. 8, No. 6, pp. 513-519.
14. Hur, N., Kim, S. R., Kim, W. and Lee, S., 2004, Wind pressure transients in the tunnel inside a station caused by a passing high speed train, KSME International Journal, Vol. 18, No. 9, pp. 1614-1622.
15. Raghunathan, R. S., Kim, H. D. and Setoguchi, T., 2002, Aerodynamics of high-speed railway train, Progress in Aerospace Sciences, Vol. 38, pp. 469-514.
16. Kwon, H. B. and Lee, D. H., 1996, A study on the initial condition for the numerical analysis of the high speed train moving into a tunnel, Proceeding of the KSAS 1996, Autumn Annual Conference, pp. 250-254.