

# 열차가 터널에 진입할 때 발생하는 압축파에 대한 수치해석

김사랑\*

## A Numerical Study on the Compression Wave Generated by the Train Entering a Tunnel

Sa Ryang Kim\*

*KeyWords* : High speed train(고속철도), Compression wave(압축파), Tunnel(터널), CFD(전산유체역학), Initial condition(초기조건)

### ABSTRACT

The numerical simulations on the train entering a tunnel were performed by solving unsteady axi-symmetric problems. In the case that 5th order velocity profile is used to reduce the effects of the pressure wave generated by the train starting abruptly, the effect of the initial distance between the train and the tunnel were examined. The impulsive start gives undesired pressure disturbances to the flow field including inside the tunnel. But 5th order velocity profile with initial distance more than 80 m gives much stable pressure variance in time, and pressure distribution inside the tunnel in space. The distance to the train reaches the highest running velocity from the start should be more than 80 m when the train speed is 350 km/h.

### 1. 서론

열차, 비행기, 고속유체기계 등 빠른 속도로 움직이는 물체에 대하여 비정상 해석을 하는 경우에, 초기조건을 모르면 정지 상태에서부터 해석을 시작하는 경우가 많이 있다. 물체가 정지 상태에서 정상운전속도까지 가속을 하는 경우에 어떤 과도기적 현상이 일어나는지에 대한 연구는 많지 않다. 효과에 비하여 비정상 해석에 드는 시간과 비용이 크다고 생각되기 때문이다.

최근 컴퓨터의 비약적인 발달과 함께 전산유체역학도 많은 발전을 이루고 있으며 수치해석을 사용한 많은

비정상해석 연구가 수행되고 있다. 터널에 진입하는 고속전철 문제를 수치해석 하는데 있어서 고려해야 할 문제의 하나는 초기조건을 어떻게 주는가에 대한 것이다. 이러한 초기조건은 계산에 사용할 영역의 크기, 격자의 수, 사용하는 컴퓨터의 메모리 용량, 소요되는 CPU Time, 그리고 결과로써 얻는 해의 정확성 등에 영향을 준다. 권혁빈과 이동호<sup>(1)</sup>는 이러한 초기조건에 대하여 열차의 속도를 5차의 다항식으로 점진적으로 증가시키는 방법을 통한 출발조건을 제시하였다. 그러나, 고속전철이 터널에 진입하면 터널 내에서는 열차의 피스톤 효과에 의하여 열차와 터널의 단면적비 크게 지배를 받는 압력상승효과가 유동을 지배하기 때문에 이러한 초기조건에 대한 고려가 많은 경우에 무시되었고, 대부분의 경우 적당히 먼 거리에서 열차를 최대 주행속도로

\* 강릉대학교 정밀기계공학과, 정회원  
책임저자 E-mail : dearksr@kangnung.ac.kr

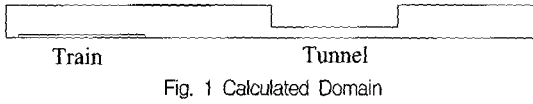


Fig. 1 Calculated Domain

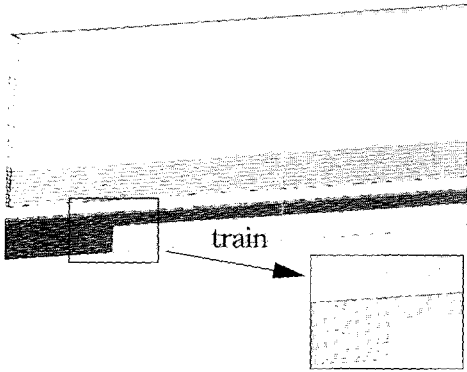


Fig. 2 Mesh

출발시키는 초기조건을 주고 문제를 풀고 있다<sup>(2)~(5)</sup>.

고속철도에 관한 연구는 고속전철의 개발과 함께 많은 연구가 수행되어 왔으며, 전반적인 내용에 대한 review는 김희동<sup>(6)</sup>, Raghunathan 등<sup>(7)</sup>에 잘 정리되어 있으므로 여기에서는 자세한 내용은 생략하도록 한다.

본 연구에서는 정지된 열차가 터널로부터 일정 거리에 위치하여 터널에 진입시 최고 주행속도로 진입하는 경우에 대하여 STAR-CD를 이용하여 격자의 첨가 및 삭제방법을 사용하여 수치계산을 하는 경우, 열차와 터널과의 거리에 대한 적절한 초기조건에 대하여 검토를 하여, 권혁빈과 이동호<sup>(1)</sup>가 제시한 최적 거리에 대한 범위와 비교, 검토해 보고자 한다.

## 2. 수치해석

### 2.1. 계산격자 및 계산방법

본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 열차와 터널의 단면을 원형으로 가정하여 2차원 축대칭으로 해석하였다. 열차는 앞뒤가 수직인 길이 100m의 원통으로 가정하였고, 주행속도는 현재 우리나라 고속전철의 최고 설계속도인 350 km/h로 설정하였다<sup>(4),(5)</sup>. 터널의 길이도 열차의 길이와 같은 100m로 설정하였다. 열차의 단면적은 동력차 최대단면적인 8.9m<sup>(8)</sup>, 터널의 단면적은 107m<sup>(4),(8)</sup>를 사용하였다. 계산영역은 열차진행방향으로 총 430m, 높이 20m이다.

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 터널벽면은 벽조건을 사용하였고, 그 밖의 입구, 출구, 상부에는 압력조건(대기압)을 사용하였다. 시간에 대해서는 Implicit 알고리즘과, 압력보정에는 PISO 알고리즘을 사용하였고, 대류항의 차분은 상류차분도식을 사용하였다. 열차의 이동은 STAR-CD에서 제공하는 이동격자의 첨가 및 삭제방법을 사용하여 구현하였으며, 열차는 가변시간격에 대하여 항상 일정한 격자 거리만큼 이동한다.

Figure 2에 계산에 사용된 격자를 나타내었다. 적절한 격자크기를 선택하기 위하여, 열차 진행방향으로 격자간격이 1m인 경우를 기준으로 0.5, 0.2, 0.1m 인 경우에 대하여 계산하여, 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 출발거리에 대한 고찰

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. 권혁빈과 이동호<sup>(1)</sup>는 최적의 가속거리는 터널수력직경의 5~10배 정도, 최적의 출발지점은 터널수력직경의 5~10배의 구간에 존재한다고 제시하였다. 최적의 가속거리에 대하여 김사량<sup>(9)</sup>이 얻은 결과인 수력직경의 약 6배의 거리는 권혁빈과 이동호<sup>(1)</sup>의 결과와 잘 일치한다.

본 연구에서는 급출발의 경우와 5차 다항식을 이용한 속도증가 방법의 경우에 대하여 초기조건 중 가속거리 (S1)는 김사량<sup>(9)</sup>의 결과로부터 적절하다고 판단되는 60m로 고정시킨 경우에, 정속주행거리 (S2)의 최적값을 구해보도록 한다.

#### 2.2.1 급출발

급출발은 출발시부터 열차의 주행속도 ( $V_1$ )로 움직이기 시작하는 것이다. 따라서 가속거리 (S1)는 0이며 초기의

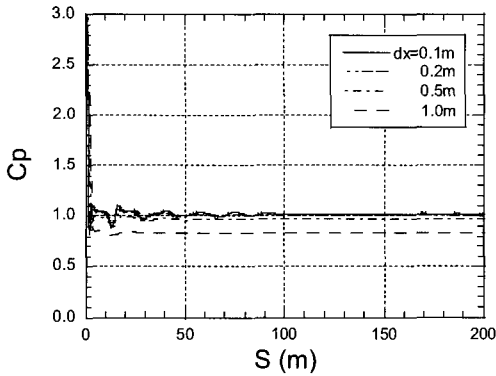


Fig. 3 Pressure variations on the train head for various grid size

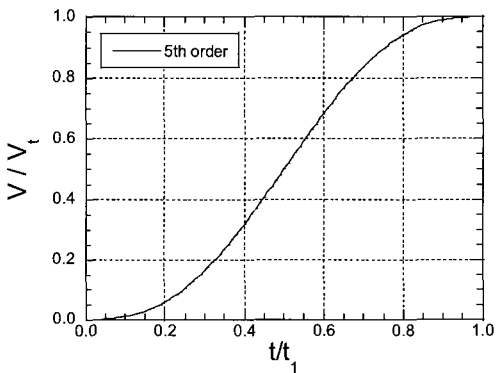


Fig. 4 Velocity-time relation for 5th order velocity increase method

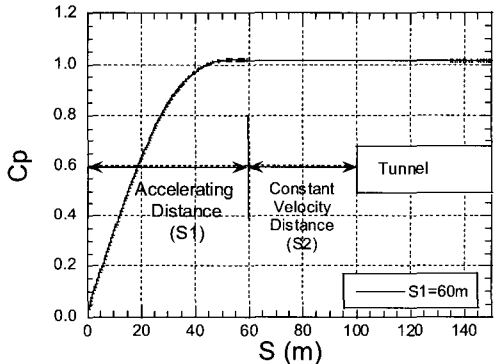


Fig. 5 Cp variation for the 5th order velocity increase

열차와 터널간의 거리가 정속주행거리 (S2)가 된다. 급출발을 하는 경우에 정속주행거리를 20m에서 시작하여 20m 간격으로 증가시키면서 터널 입구의 압력변동과 터널 진입시 터널 내부의 압력 분포를 비교하였다.

### 2.2.2 5차 속도증가

권혁빈과 이동호<sup>(1)</sup>에서 제시한 경우와 같은, 속도 ( $V$ )가 시간 ( $t$ )에 대하여 5차식으로 나타낼 수 있는 경우를 가정하였다. 여기서  $t_1$ 은 열차가 주행속도 ( $V_t$ )까지 가속하는데 걸리는 시간이다.

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

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

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

$$\frac{V(t)}{V_t} = 10\left(\frac{t}{t_1}\right)^3 - 15\left(\frac{t}{t_1}\right)^4 + 6\left(\frac{t}{t_1}\right)^5 \quad (1)$$

## 3. 결과 및 검토

### 3.1. 격자크기의 선정

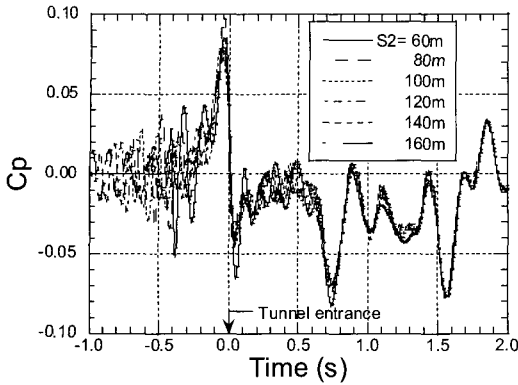
격자수 또는 격자의 간격에 대한 영향을 알아보기 위하여 개활지에서 정지되어 있던 열차가 급출발하여 주행을 시작하는 경우에 대하여 계산을 수행하였다.

Figure 3에 열차 앞부분에서의 압력계수의 변동을 진행거리에 대하여 나타내었다. 열차가 출발하면 급격한 압력의 상승이 발생하며, 열차가 출발해서 100m 정도를 주행할 때까지 진동이 생기는 것을 볼 수 있다. 격자가 작을수록 초기의 압력파가 커지며, 열차 선두부에서의 진동은 진폭이 크고, 감쇄되어 없어질 때까지의 시간이 오래 걸리는 것을 볼 수 있다. 격자 간격이 0.2m 이하에서의 수치계산 결과가 격자간격이 0.1m에서와 거의 같은 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 사용한 격자의 간격을 0.1m로 정하였다.

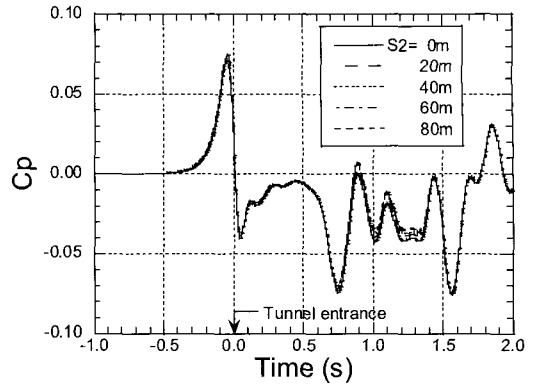
### 3.2 열차의 출발거리에 따른 영향

Figure 4에는 속도를 식 (1)에 나타낸 것과 같은 5차 다항식을 사용하여 서서히 증가시키는 방법에 대하여 가속거리 (S1)에 도달할 때까지의 속도-시간 관계를 나타낸 것이다. 여기서  $t_1$ 은 열차의 속도가 주행속도 ( $V_t$ )에 이르는 시간을 나타낸다. 가속거리 내에서 속도가 0에서 최고속도까지 매끈하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

Figure 5에는 가속거리가 60 m인 경우에 열차 선두부에서의 압력계수 ( $C_p = (P - P_\infty) / (1/2\rho V_t^2)$ )의 변동을 열차진행거리 (S)에 대하여 나타내었다. 가속거리 (S1=

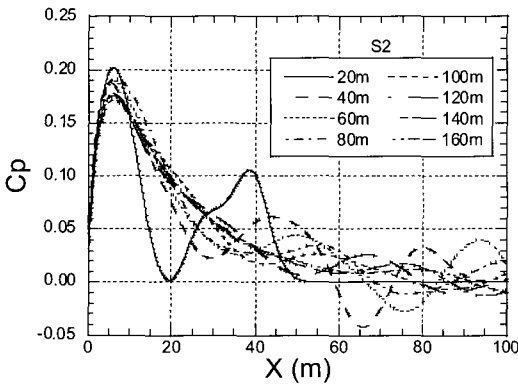


(a) Impulsive start

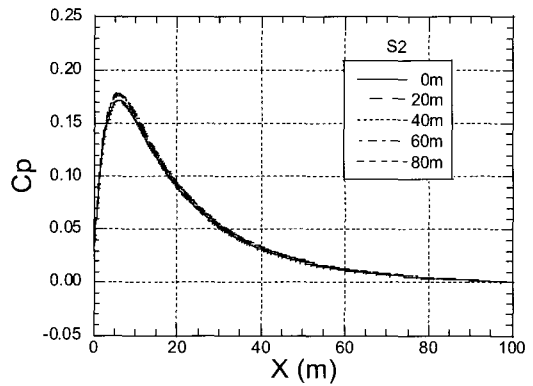


(b) 5th order velocity increase

Fig. 6  $C_p$  variations at the tunnel entrance with various constant velocity distance ( $S_2$ )



(a) Impulsive start



(b) 5th order velocity increase

Fig. 7  $C_p$  distributions along the tunnel when the train enters the tunnel (train head is at 0m from entrance)

60m) 내에서 속도가 증가함에 따라 열차 선두부에서 압력이 매끈하게 증가하고, 그 이후는 정속주행하는 것을 알 수 있다.

Figure 6(a)에는 급출발을 하는 경우에 터널과의 출발거리에 따른 터널 입구의 천정에서의 압력변동을 나타내었다. 급출발의 경우는 가속거리가 없으므로 출발거리와 정속주행거리 ( $S_2$ )는 같고, 거리는 시간과 비례한다. 출발거리가 길어지더라도 압력의 변동이 큰 피크가 발생하는 시간은 일치하나 크기는 약간 차이가 있고, 피크 사이의 압력변동은 각 경우마다 많이 다른 것을 볼 수 있다. 따라서 급출발의 경우는 출발거리가 길어지더라도 출발 시에 발생한 압력파가 열차 전방의 유동장에 교란을 많이 줌을 알 수 있다.

Figure 6(b)에는 5차 다항식으로 완전한 출발을 하는 경우에 터널과의 출발거리에 따른 터널 입구의 천정에서의 압력변동을 나타내었다. 열차가 출구에 다가가면서 약

간의 차이를 보이는 것 이외에는 열차의 진행에 따른 압력변동이 각 경우에 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 5차 다항식으로 완만하게 속도가 증가하는 경우에는 정속주행거리 ( $S_2$ )의 영향이 크지 않다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 터널에 열차 진입 시 발생하는 압력파

Figure 7(a)에는 급출발을 하는 경우에 터널과의 출발거리에 따라서 열차가 터널에 진입하는 순간에 천정 높이에서의 터널 내부의 압력 분포를 나타낸 것이다. 열차가 터널에 진입하면 피스톤 효과에 의하여 압력이 지배를 받으므로 출발거리가 어느 정도 길어지면 비슷한 분포를 얻을 수 있다고 예상하였으나, 충분히 길다고 생각되는 160m의 경우에 까지 변동이 심한 것을 볼 수 있다. 따라서 수치계산 시 초기조건을 급출발로 하는 것은 좋지 않은 결과를 줄 수 있다.

Figure 7(b)에는 5차 다항식으로 완만한 출발을 하는 경우에 터널과의 출발거리에 따라서 열차가 터널에 진입하는 순간에 터널 천정 높이에서의 터널 내부의 압력 분포를 나타낸 것이다. 이 경우에도 가속거리 (S1)는 60 m로 고정하였으며, 정속주행거리 (S2)를 0에서 80 m까지 20 m 간격으로 변화시켜 계산을 수행하였다. 정속주행거리가 20 m인 경우부터는 거의 같은 값을 나타내는 것을 볼 수 있다. 따라서 정속주행거리는 20 m 정도면 충분하다고 할 수 있겠다.

이와 같은 결과로부터, 가속거리 (S1)는 약 60 m, 정속주행거리 (S2)는 약 20 m일 때, 총 출발거리가 약 80 m 정도면 출발로 인한 수치적인 교란이 적은 유동장을 얻을 수 있다고 하겠다. 이는 터널의 수력직경의 약 8배로서 권혁빈과 이동호<sup>(1)</sup>가 제안한 범위내에 들어간다. 그러나 열차의 출발시 나타나는 수치적 압력파는 터널의 수력직경보다는 열차의 높이와 열차의 선두부의 형상, 열차의 속도 및 가속도에 더 큰 영향을 받을 것으로 생각되므로, 터널의 수력직경 이외의 적절한 변수로 무차원화를 시도해야 할 것으로 생각하며, 이에 대한 계속적인 연구가 필요할 것이다.

#### 4. 결론

주행속도 350 km/h의 열차가 정지상태로부터 급출발하는 경우와 서서히 가속하여 출발하는 경우에 열차의 초기 위치와 터널과의 거리에 대하여 STAR-CD를 이용한 수치해석을 통한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열차가 급출발을 하게 되면 급출발에 의한 압력파가 발생하며, 터널이 상당히 먼 거리 (160 m)에 있는 경우에도 터널내의 유동장에 영향을 준다.
- 2) 열차의 속도를 5차 다항식을 이용하여 완만히 출발하는 경우에는, 가속거리를 60 m 정도, 정속주행거리를 20 m 정도만 고려하면 안정된 유동장의 해를 얻을 수 있다. 즉, 열차와 터널사이의 출발거리는 약 80 m 정도면 충분하다고 하겠다.
- 3) 열차의 속도나 가속도, 형상의 영향, 그리고 적절한 무차원화에 의한 일반화 등에 대한 계속적인 연구가 필요하다.
- 4) 본 연구의 결과는 고속으로 작동하는 유체기계의 비정상 해석을 하는 경우에도 초기조건을 고려할 때 응용할 수 있을 것으로 기대한다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- (1) 권혁빈, 이동호, 1996, "터널에 진입하는 고속전철의 수치해석을 위한 초기조건 연구," 한국항공우주학회 1996년 추계학술발표논문집, pp. 250~254.
- (2) 신창훈, 박원규, 2000, "터널에 진입하는 고속전철 주위의 3차원 점성유동과 압축파 특성에 관한 수치해석적 연구," 한국전산유체공학회지, 제5권, 제3호, pp. 23~31.
- (3) 신창훈, 박원규, 2000, "썰기형 전두부를 가진 고속전철의 터널진입에 의한 유동변화 해석," 한국항공우주학회지, 제28권, 제5호, pp. 99~105.
- (4) 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.
- (5) 허남건, 2006, 경부고속철도 신경주역사 신축설계 풍압연구 보고서, 서강대학교 산업기술연구소 보고서, 한국철도시설공단.
- (6) 김희동, 1994, "고속철도 터널에서 발생하는 유체역학적 파동현상," 대한기계학회지, 제34권, 제10호, pp. 796~807.
- (7) 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.
- (8) 권혁빈, 이동호, 김문상, 2000, "터널을 통과하는 고속철도차량에 의해 형성되는 비정상 유동장의 수치해석," 한국철도학회논문집, 제3권, 제4호, pp. 229~236.
- (9) 김사량, 2006, "열차가 터널에 진입할 때 발생하는 압축파에 대한 수치해석 - 열차의 출발방법에 따른 영향에 대한 고찰," 2006년도 한국전산유체공학회 추계학술대회, pp. 189~192.