

# 스크린도어가 설치된 지하철에서 열차운행에 의한 비정상유동의 실험 및 수치적 해석

김 정 업<sup>†</sup>, 김 광 용<sup>\*</sup>

한국건설기술연구원 화재 및 설비연구부, <sup>\*</sup>인하대학교 기계공학과

## Experimental and Numerical Analyses of Unsteady Tunnel Flow in Subway Equipped with Platform Screen Door System

Jung-Yup Kim<sup>†</sup>, Kwang-Yong Kim<sup>\*</sup>

Fire & Engineering Services Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, Koyang 411-712, Korea

<sup>\*</sup>Department of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received June 10, 2005; revision received December 22, 2005)

**ABSTRACT:** To optimize the ventilation and smoke control systems in subway equipped with platform screen door, the technology to analyze the unsteady tunnel flow caused by running of train should be developed. The development of model experiment and numerical analysis technique with relation to unsteady flow of subway were presented. The pressure and air velocity changes in 1/20-scaling experiment unit were measured and results were compared to those of 3-D unsteady numerical analysis applied with sharp interface method. The experimental and numerical results were quantitatively similar and it would be reasonable to apply sharp interface method to analyze the unsteady flow in subway equipped with platform screen door.

**Key words:** Subway(지하철), Platform screen door(스크린도어), Unsteady tunnel flow(비정상 터널유동), Model experiment(축소모형실험), Numerical analysis(수치해석), Moving boundary(이동경계), Sharp interface method(예면경계기법)

### 1. 서 론

세계적으로 산업화와 도시화에 따라 교통량이 급속히 증가하면서 도시철도가 우수한 정시성과 쾌속성 등을 바탕으로 주요 대도시의 핵심교통수단으로 정착되고 있다. 이는 단순한 교통수단의 개념을 넘어서 시민의 생활공간으로 거듭나고 있으며 이에 따라 승객의 안전성 확보와 쾌적한 이

용환경에 대한 요구가 점차 증가되고 있다. 그러나 도시철도의 지하구간은 반밀폐적 터널공간으로 화재발생시 안전확보에 취약하고 빈번한 열차운행으로 인한 열차풍과 분진, 고온의 기류에 의해 이용환경의 악화가 초래되고 있으며, Fig. 1과 같이 승강장에서의 추락사고가 지속적으로 발생하는 등 승객의 안전과 편의 도모에 취약한 시설로 평가되고 있어, 도시철도의 환경개선을 위한 기술개발이 절실히 요청되고 있다.

선진국의 경우 이러한 문제를 해결하기 위하여 능동적 개념의 설비시스템으로 플랫폼 스크린도어(Platform Screen Door, 이하 스크린도어) 시스템

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-31-910-0389; fax: +82-31-910-0381

E-mail address: jykim1@kict.re.kr

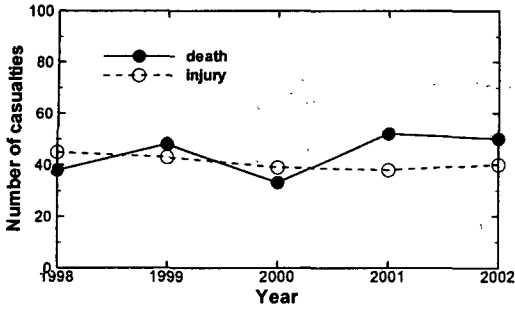


Fig. 1 Casualties of passenger in subway platform in Korea.

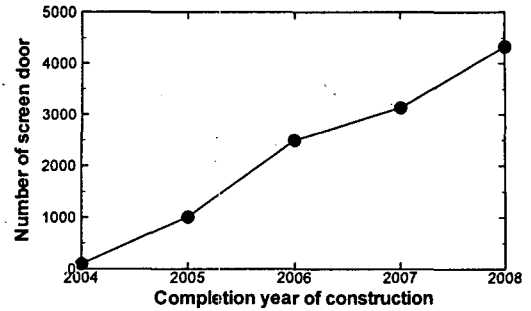


Fig. 2 Plan of construction state of screen door in Korea.

을 설치, 운영하고 있으며, Fig. 2와 같이 국내에서도 최근에 건설되는 도시철도를 중심으로 도입이 활발히 진행 중에 있다. 스크린도어는 승강장과 정거장 선로부를 격리하는 고정벽 및 열차출입문과 연동하여 개폐되는 승객출입문으로 이루어지며, 열차풍에 의한 승강장 쾌적성 저하와 열차정차시의 발생열 침투를 효과적으로 방지하고 승강장 승객의 안전과 쾌적환경을 확보할 수 있으며, 또한 승강장 냉방부하 감소로 경제적인 공조설비의 운영이 가능하다는 점에서 그 중요성이 부각되고 있다.

이러한 스크린도어의 설치는 도시철도 내의 제반 열유동현상과 화재와 같은 비상시 제연 및 피난 등의 안전시스템 운용에 커다란 영향을 미치기 때문에 열차풍에 따른 스크린도어의 안전구조 해석과 더불어 환기 및 방재시스템과 연계된 최적의 설치방안과 설치 후의 운영기준의 확립이 절실히 요구된다. 그러나 현재 국내에는 스크린도어가 도입되는 도시철도의 환기 및 배연시스템에 대한 설계기준이 정립되어 있지 않아 기존의 설계방식을 그대로 적용하거나 도시철도 전체구간에 대한 종합적인 검토 없이 시공시 구간별로 설계사의 개별적 의도에 따라 환기 및 배연시스템이 계획되고 있는 실정이다. 또한 화재시 배연시스템 설계를 위한 화재규모와 연기유동에 대한 지침이 부족하며 스크린도어의 폐쇄 또는 개방에 따른 배연효과분석 및 대피시나리오에 대한 검토가 이루어지지 않고 있고 유사시 대형 인명피해의 가능성이 다분히 존재하므로 도시철도특성과 화재연소현상, 스크린도어 설치환경 등을 종합적으로 고려한 화재대응방안의 도출이 필요하다.

이와 같이 스크린도어가 도입되는 지하철의 환

기 및 방재시스템 최적설계에 관한 연구를 수행하기 위해서는 터널 내에서 열차의 운행에 의해 생성되는 비정상 기류에 대한 해석기술이 기본요소기술로서 개발되어야 한다.

열차제원, 운행속도, 터널·정거장 형상, 환기구 환경 등의 다양한 해석조건이 존재하는 지하철유동 분석은 3차원 수치적 해석방법에 의해 효과적으로 수행될 수 있으며, 실험결과와의 비교·검토를 통해 수치기법의 정확성과 타당성을 확보할 수 있다.

지하철 유동에 대한 3차원 수치해석은 유동장에서 이동하는 고체경계(Moving boundary of immersed solid)의 해석방안개발이 핵심사항으로서, 경제성과 정확성 면에서 해석대상인 지하철 환경에 효과적으로 적용할 수 있는 기법의 개발이 필요하다.

이동하는 고체경계에 대한 수치해석방안으로서 는 크게 고체를 포함하는 격자를 전체 격자계에서 이동시키는 이동격자(Moving grid)기법과 격자의 이동이나 변형이 없이 고체영역 격자의 성질을 변화시켜 고체이동효과를 반영하는 고정격자(Fixed grid)기법이 개발되었다.

이동격자기법은 이동하는 고체경계에 대한 Body-fitted 격자를 통해 복잡한 고체형상을 효과적으로 반영할 수 있으며, 열차의 전두부 형상에 따라 유동특성이 크게 달라지는 고속열차와 관계된 연구에 많이 적용되었다. 이동격자기법은 실제 구체적 기법개발과 적용에 있어서 격자계의 형성방법과 밀접한 관련성을 가지고 있으며, 터널 내 열차이동의 해석을 위한 격자계로서 정렬 격자계(Structured Grid) 형태인 Chimera 격자계(또는 Overlapping 격자계)<sup>(1-2)</sup>와 Patched 격자계<sup>(3)</sup>가 제

안되었고, 비정렬격자계(Unstructured Grid) 형태인 Adaptive Remeshing 격자계<sup>(4)</sup>가 사용되었다.

Chimera 격자계는 열차를 포함하는 서브격자계가 주격자계에서 이동하는 방식으로 두 격자계가 겹치며, 열차이동에 따라 매 Time Step마다 두 격자계 간의 정보교환과 내삽(Interpolation)이 필요하다. 따라서 내삽방식에 따라 해석결과가 영향을 받으며, 정보교환과 내삽을 위한 추가적인 계산시간과 시스템용량이 소요되는 단점이 있다. Ogawa and Fujii<sup>(6-7)</sup>은 Chimera 격자계를 바탕으로 신칸센 터널유동과 관련된 여러 해석을 수행하였다.

Patched 격자계는 열차를 포함하는 격자계와 주변 격자계가 이동경계면(Sliding Boundary)을 공통경계로 하여 상대운동을 하는 방식으로 이동경계면에서의 Patch를 통하여 격자계간 정보교환이 수행된다. Patched 격자계 역시 매 Time Step마다 정보교환작업이 필요하며, 열차가 이동하면서 열차 전후방 영역에 대하여 동적인 격자소거와 생성작업이 요구된다. Park et al.,<sup>(8)</sup> Shin et al.<sup>(9)</sup>이 고속열차와 관련된 연구수행에서 Patched 격자계를 적용하였다.

Adaptive Remeshing 격자계는 비정렬격자계로서 복잡한 물체 주위의 격자를 비교적 쉽게 형성할 수 있는 장점이 있는 반면, 적용할 수 있는 수치해법에 제한이 있으며, 한번 형성된 격자계는 Time Step이 경과할수록 점차 찌그러지므로 적절한 계산단계마다 주기적으로 격자계를 재생성시켜 주어야 한다. Mestreau et al.<sup>(10)</sup>이 프랑스의 TGV 개발과 관련한 연구에서 주로 적용하였다.

이와 같이 현재까지 터널 내 열차이동을 구현하기 위해 개발된 이동격자기법은 격자계간 정보교환이나 격자계의 재생성을 위하여 해석시간이 추가로 소요되며, 터널과 열차의 형상 및 열차속도 변화에 따른 격자계 구성에 많은 노력이 요구된다.

한편 고정격자기법에서는 Cartesian 격자계가 주로 사용되며, 한번 생성된 격자계가 전 Time Step에 사용되기 때문에 격자계의 재생성과 격자계 간 정보교환을 위한 추가계산시간이 필요 없고, 격자계 형성과 결과처리가 간단하다. 반면, 고체의 형상이 복잡할 경우 이를 반영하기 위해 고체경계처리용 내삽기법의 도입이 필요하며, 이로 인해 계산시간의 추가소요가 요구된다. 고정격자

기법은 DIM(Diffuse Interface Method)<sup>(11)</sup> 기법과 SIM(Sharp Interface Method)<sup>(12-13)</sup> 기법으로 구분된다. DIM은 고체영역격자에 momentum source나 mass source를 생성시켜 고체이동효과를 반영하는 방법이고 SIM은 고체의 이동경로에 따라 격자의 성질을 유체에서 고체, 다시 유체로 변화시킴으로써 고체의 이동을 반영하는 방법이다.

스크린도어가 설치된 지하철의 경우 터널과 열차의 형상이 단순하고, 다양한 조건의 해석에 따른 계산량 증가가 예상되므로 격자계 형성의 용이함과 계산시간 단축의 이점이 있는 고정격자기법을 지하철 내 열차의 이동해석 기법으로 채택하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 스크린도어가 설치된 지하철에서 열차의 운행에 의해 생성되는 비정상 기류유동해석을 위한 축소모형실험과 수치해석기법 개발을 수행하였다. 실제 지하철 형상에 대한 축소모형 실험장치를 제작하여 열차운행에 따라 생성되는 터널 내 압력과 기류속도를 측정하였으며, 열차이동 수치기법으로 고정격자기법 중 SIM 기법을 적용한 3차원 비정상 비압축성 수치해석기법을 개발하여 축소모형실험과 동일한 환경에서 해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 축소모형실험

Fig. 3은 축소모형 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 축소모형 실험장치는 실제의 모델이 되는 터널에 대하여 1/20 scale로 축소하여 제작하였다. 아크릴로 제작한 터널의 총길이는 39m이고 터널과 열차의 Blockage Ratio는 0.67이다. 열차는 전단과 후단에 강선으로 연결되어서 가이드 레일을 따라 전후로 이동하게 되며, 모터의 회전수를 제어하여 열차의 운행속도를 변경한다. 열차의 운행거리는 33m이다. 그림에서와 같이 터널 입출구에 속도센서를 설치하였고 터널 중간부에 열차의 운행시 시간에 따른 압력변화를 측정하고자 총 4개의 압력센서를 설치하였다. 속도와 압력 모두 0.1초 간격으로 변화량을 측정하였다. Fig. 4는 실험을 수행한 열차운행조건을 도시하고 있으며, Fig. 5는 축소모형 실험장치의 실제모습을 보여주고 있다.

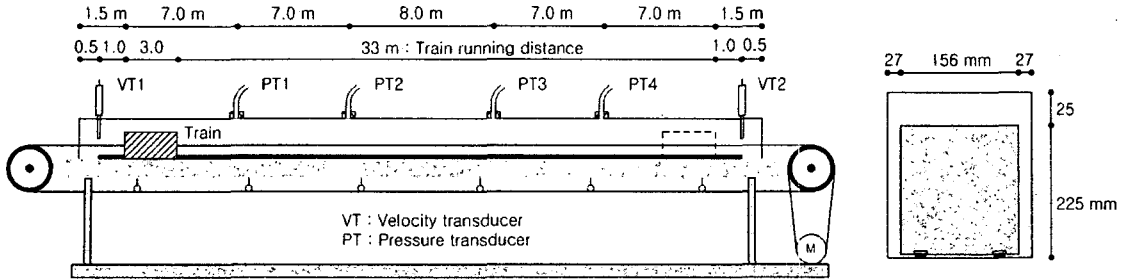


Fig. 3 Schematic diagram of experimental unit.

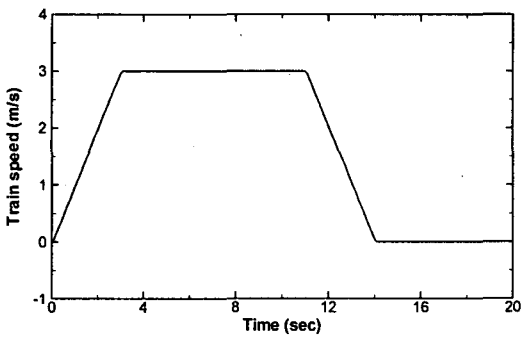


Fig. 4 Schedule of train run.

2.2 수치해석

본 연구에서는 격자계의 이동이나 변형이 없이 열차의 이동을 모델링할 수 있는 SIM 기법을 도입하였다. SIM 기법에서는 전체계산영역이 Sharp Interface를 경계로 열차영역과 유동영역으로 나뉘지며 열차영역은 SOLID 3D-Boundary로 설정된다. Fig.6에서와 같이 열차영역인 SOLID 3D-Boundary를 Time Step에 따라 이동시키고, 열차 전단부에 No-Slip 조건을 적용하여 열차속도를 경계조건으로 설정한다.

수치해석은 축소모형실험과 동일한 기하학적 형상과 열차운행조건을 대상으로 수행하여 각각의 결과를 비교·검토할 수 있도록 하였다. 비정상 유동해석의 Time Step은 0.1초로 하였으며, Grid Independency Test를 위하여 종방향(X축방향) 격자간격을 0.02 m, 0.04 m 및 0.06 m로 변화시켜 가며 수치해석을 수행하였다. Fig.7에 열차를 포함하는 격자계를 나타내었다. Y-Z축 단면에서 열차경계에 격자를 집중시켰으며 종방향 격자간격이 0.04 m일 경우 전체 유동장은 총 298,350개의 격자로 구성되었다.

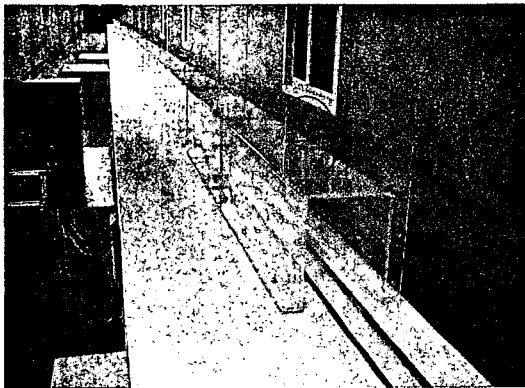


Fig. 5 Picture of experimental unit.

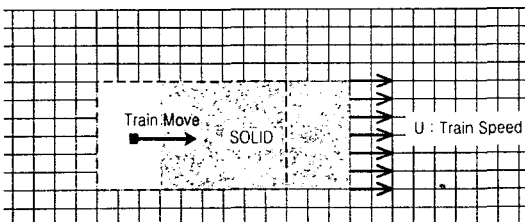


Fig. 6 Numerical model for train moving.

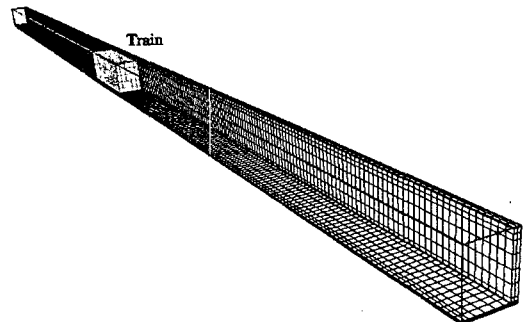


Fig. 7 Grid system for numerical analysis.

### 3. 결과 및 검토

Fig. 8과 Fig. 9는 축소모형실험의 결과를 보여주고 있다. Fig. 8은 시간에 따른 터널에서의 압력변화를 나타내고 있는데, 각 압력센서에 의해 측정된 결과는 열차가 출발하여 가속되면서 터널 내부의 압력이 상승하여 가속에서 등속으로 변화하는 시기에 최고압력이 발생됨을 공통적으로 보여준다. 그후의 등속운전 구간에서는 압력이 서서히 감소하며, 열차가 각 압력센서설치 지점을 통과하면서 해당 위치의 터널압력이 급격히 하강한다. 그리고 열차가 감속구간에 들어서면서 터널 내부 압력이 다시 증가하는 현상을 보이고 있다.

Fig. 9는 시간에 따른 터널 입구와 출구에서의 종방향 기류속도변화를 도시한 것으로서, 열차가 출발하면서 정지해 있던 공기가 서서히 움직이기 시작한 후 변곡점을 지나 급격히 속도가 증가한

다. 열차가 등속운동을 하면서 터널 내 기류속도 역시 약 2.3 m/s의 일정한 수준을 유지하다가 열차가 감속되면서 기류속도도 빠르게 줄어들게 되고, 열차가 정차한 후에 서서히 감소함을 알 수 있다.

축소모형실험은 10회를 수행하였고, 실험오차를 분석하기 위하여 표준편차(Standard Deviation)를 산출하였으며, PT1 위치에서의 압력측정값과 VT1 위치에서의 속도측정값에 대한 표준편차를 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. 실험평균값에 의해 표준편차의 크기를 나타내는 변동계수(Coefficient of Variation)는 주요 지점에서 5% 미만의 값을 보이고 있다.

Fig. 12와 Fig. 13은 수치해석의 결과로서 터널 중앙위치에서 종방향길이에 따른 압력분포를 보여주고 있다. Fig. 12는 열차가 출발한 후 1.0초에서 5.0초까지의 해석결과이다. 열차가 출발하여 가

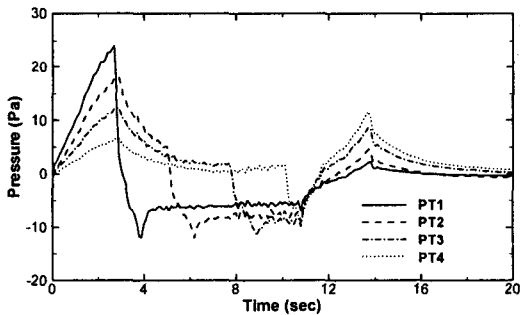


Fig. 8 Pressure changes with respect to time.

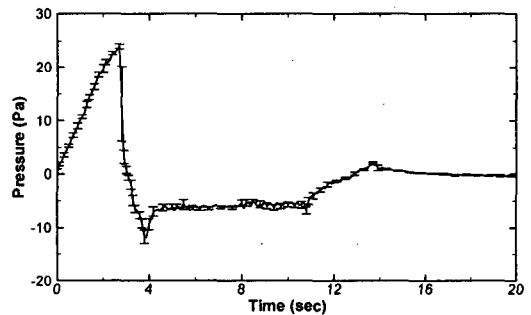


Fig. 10 Standard deviations of measured pressure datas from mean values at location PT1.

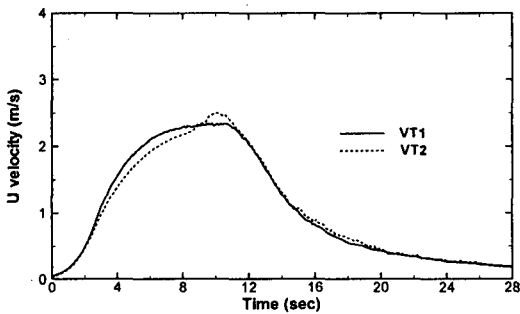


Fig. 9 U velocity changes with respect to time.

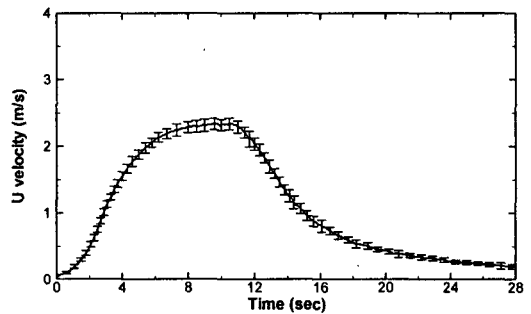


Fig. 11 Standard deviations of measured U velocity datas from mean values at location VT1.

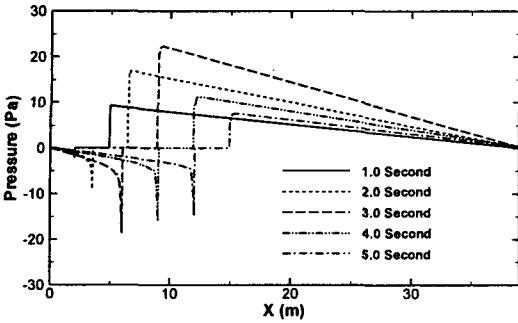


Fig. 12 Pressure distribution along the center of tunnel from 1.0 second to 5.0 second.

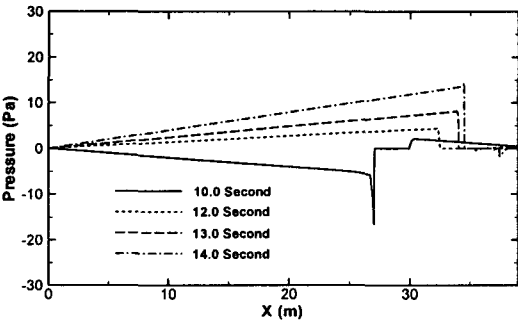


Fig. 13 Pressure distribution along the center of tunnel from 10.0 second to 14.0 second.

속된 후 3.0초에서 최고운행속도인 3m/s에 이르게 되는데, 열차가 가속되면서 열차전방에서의 압력상승폭과 열차후방에서의 압력하강폭이 점점 증가하여 3.0초에서 열차전방압력이 22.3 Pa, 열차후방압력이 -18.6 Pa이 된다. 그후 열차가 정속으로 주행하면서 터널 내 생성되는 압력수치가 차차 낮아지게 되는데, 이는 열차가 출발하여 가속될 때에는 터널 내 공기가 정지상태에서 기류가 형성되기 시작하는 단계이기 때문에 열차의 이동에 대한 공기저항이 크게 발생하여 터널 내 압력상승이 높았으며, 열차의 이동으로 터널 내 기류가 형성되면서 공기저항이 줄어들게 되어 터널 내 압력이 낮아지기 때문이다.

Fig. 13은 열차가 출발한 후 10.0초에서 14.0초까지의 해석결과이다. 열차가 출발한 후 11.0초부터 감속이 시작되는데, 이 시점부터 열차 후단의 터널 내 압력이 부압에서 양압으로 변하고, 감속

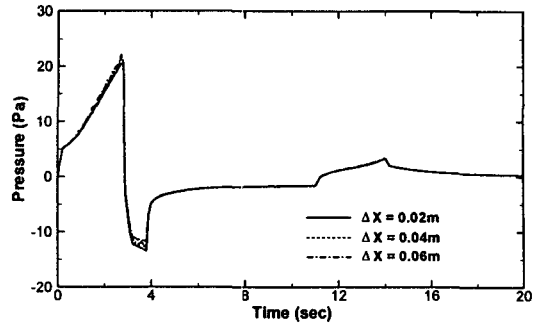


Fig. 14 Comparison of pressure changes for various  $\Delta X$  at location of PT1.

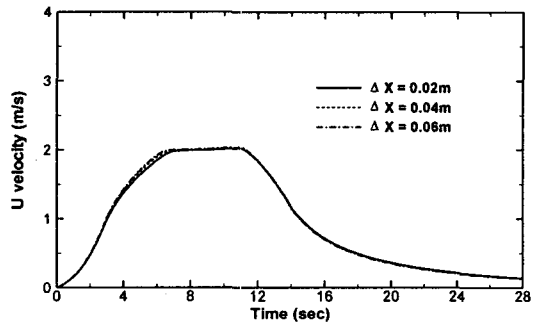


Fig. 15 Comparison of U velocity changes for various  $\Delta X$  at location of VT1.

이 더 진행되면서 열차 후단의 압력이 점점 증가하다가 열차가 정차하면서 급격히 줄어들음을 알 수 있다.

본 연구에서는 수치해석의 Grid Independency를 고찰하기 위해서 X축방향 격자간격을 0.02 m, 0.04 m 및 0.06 m로 변화시켜 가며 수치해석을 수행하였다. Fig. 14와 Fig. 15는 PT1 위치에서의 압력변화와 VT1 위치에서의 속도변화에 대한 계산 결과를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 수치해석의 결과는 격자간격의 변화에 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

Fig. 16에서 Fig. 19는 축소모형실험의 압력센서 설치 위치에서의 시간에 따른 압력변화에 대한 수치해석과 실험결과를 비교하여 나타낸다. 그림에서와 같이 수치해석결과가 실험결과와 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 특히 열차가 접근하면서 열차 전방에 생성되는 압력상승과 열

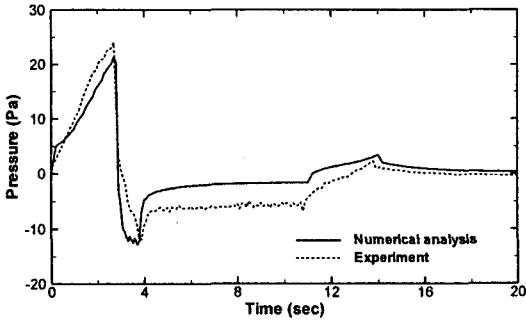


Fig. 16 Comparison of pressure changes between experimental and numerical results at location of PT1.

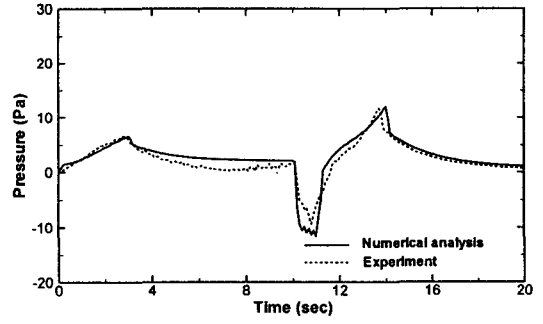


Fig. 19 Comparison of pressure changes between experimental and numerical results at location of PT4.

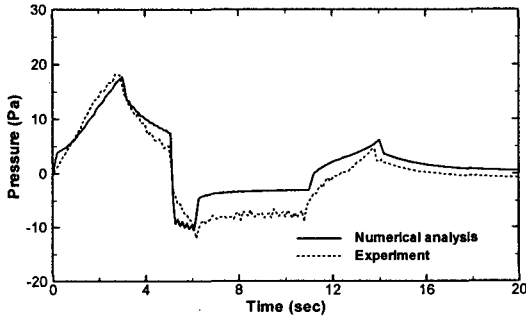


Fig. 17 Comparison of pressure changes between experimental and numerical results at location of PT2.

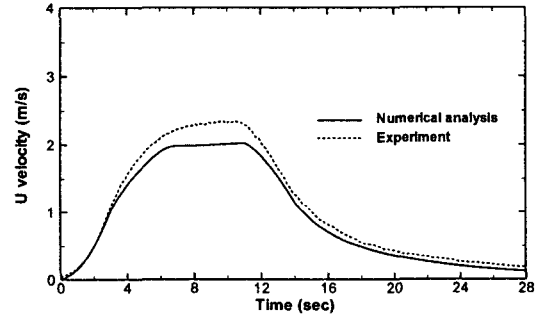


Fig. 20 Comparison of U velocity changes between experimental and numerical results at location of VT1.

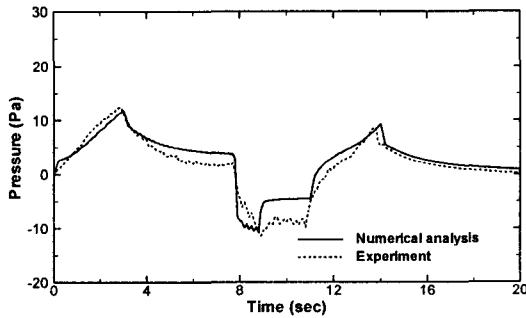


Fig. 18 Comparison of pressure changes between experimental and numerical results at location of PT3.

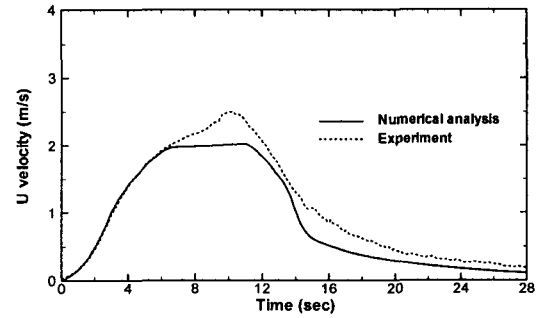


Fig. 21 Comparison of U velocity changes between experimental and numerical results at location of VT2.

차가 통과한 후 급격히 발생하는 압력하강 및 열차속도감속에 따른 압력 재상승에 있어서는 실험 결과를 청량적으로 잘 재현하고 있다. 반면 열차가 센서위치를 통과한 후 급격히 하강한 압력이

시간이 경과하면서 일정량 상승하게 되는데, 이 부분에 있어서 수치해석에 의한 결과가 실험결과보다 더 큰 상승폭을 보이고 있으며, 각 센서위치에서의 최대압력차와의 비교를 통해 수치해석과

실험의 차이를 나타내면, PT1 위치에서는 12.3%, PT2와 PT3 위치에서는 각각 17.1%와 17.2%의 차이를 보이고 있다.

Fig. 20과 Fig. 21은 속도센서위치에서의 수치해석과 실험결과를 비교하여 보여주고 있다. 수치해석에 의한 기류속도의 변화추이가 실험값과 정성적으로 유사한 경향을 보이고 있으며, 터널입구지점인 VT1 위치에서 열차가속과 감속구간의 결과는 실험결과와 차이가 거의 없는 범위로 수치해석결과가 제시되고 있다. 한편 VT1 위치에서의 최고속도의 경우 수치해석결과와 실험결과의 차이가 실험결과값을 기준으로 13.7% 정도 발생하고 있으며, VT2 위치에서는 15.9%가 발생한다. 즉, 수치해석에서는 4초 정도의 등속운행 후 터널유동이 완전발달되어 터널단면 중앙부에서의 속도가 일정하게 유지되는 반면, 실험에서는 완만한 속도증가가 지속되는 것으로 예측되고 있다. 터널출구지점인 VT2 위치에서 열차가 정차한 후 수치해석과 실험에 의한 기류속도의 변화추이를 살펴보면, 수치해석에 의한 속도감소가 실험치보다 급격하게 발생함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 스크린도어가 도입되는 지하철에서 열차운행에 의해 생성되는 비정상 기류유동의 해석을 위하여 축소모형실험과 SIM 기법을 적용한 3차원 수치해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 열차가 출발하여 가속되면서 열차전방의 압력은 점차 상승하고 열차후방의 압력은 점차 하강하여, 최고운행속도에 도달할 때 터널 내 최고압력과 최저압력이 형성된다. 그후 정속으로 주행하면서 압력값이 차차 낮아지게 되고, 감속되면서 열차 후방 터널에서 압력 재상승이 발생한다.

(2) 압력센서가 설치된 위치에서 수치해석과 실험에 의한 압력변화를 비교하면, 열차가 접근하면서 열차 전방에 생성되는 압력상승과 열차가 통과한 후 급격한 압력하강 및 열차속도감속에 따른 압력 재상승에 있어서 두 결과가 잘 일치하고 있다. 반면 열차통과 후 일정량의 압력상승현상에 대해서는 실험과 수치해석결과가 12.3%에서 17.2%의 차이를 보이고 있다.

(3) 터널입구와 터널출구에서의 기류속도 예측

결과를 살펴보면, 열차가속과 감속구간에서는 실험결과와 수치해석결과가 잘 일치하고 있으나, 최고속도의 경우 터널입구에서는 13.7%, 터널출구에서는 15.9%의 차이가 발생하고 있으며 열차정차 후 터널출구에서의 수치해석에 의한 기류속도 감소가 실험치보다 급격하게 일어난다.

본 연구결과는 향후 후속연구를 통하여 스크린도어가 도입되는 지하철에서 열차풍에 의한 스크린도어 수평하중 산출, 스크린도어 환경에서의 최적 환기시스템 설계 및 방재계획 수립 등에 활용될 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 2004년 산학연 공동연구개발사업-지하공간 환경개선 및 방재기술 중점연구사업의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Steger, J. L., Dougherty, F. C. and Benek, J. A., 1983, A chimera grid scheme, advances in grid generation, FED (Fluids Engineering Division), Vol. 5, ASME, pp. 59-69.
2. Kao, K. H. and Liou, M. S., 1995, Advance in overset grid scheme: From chimera to DRAGON grids, AIAA Journal, Vol. 33, No. 10, Oct. 1995, pp. 1809-1815.
3. Rai, M. M., 1986, A relaxation approach patched-grid calculations with the euler equations, Journal of Computational Physics, Vol. 66, Issue 1, September, pp. 99-131.
4. Lohner, R., 1989, Adaptive remeshing for transient problems, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 75, pp. 195-214.
5. Ogawa, T. and Fujii, K., 1997, Numerical investigation of three-dimensional compressible flows induced by a train moving into a tunnel, Computers & Fluids, Vol. 26, No. 6, pp. 565-585.
6. Ogawa, T. and Fujii, K., 1993, Numerical simulation of compressible flow induced by a train moving in a tunnel, AIAA 24th



- Fluid Dynamics Conference, No. 93-2951.
7. Fujii, K. and Ogawa, T., 1995, Aerodynamics of high speed trains passing by each other, *Computers & Fluids*, Vol. 24, No. 8, pp. 897-908.
  8. Park, W.-G. and Park, Y.-J., 1997, Numerical study of compression wave produced by high-speed train entering a tunnel, *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting FEDSM'97*.
  9. Shin, C.-H. and Park, W.-G., 2003, Numerical study of flow characteristics of the high speed train entering into a tunnel, *Mechanics Research Communications*, Vol. 30, pp. 287-296.
  10. Mestreau, E., Lohner, R. and Aita, S., 1993, TGV Tunnel Entry Simulations using a Finite Element Code with Automatic Remeshing, *AIAA-93-0890*.
  11. Anderson, D. M., McFadden, G. B. and Wheeler, A. A., 1998, Diffuse interface methods in fluid mechanics, *Ann. Rev. Fluid Mech.* 30, 139.
  12. Ye, T., Mittal, R., Udaykumar, H. S. and Shyy, W., 1999, An accurate cartesian grid method for viscous incompressible flows with complex immersed boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 156, pp. 209-240.
  13. Udaykumar, H. S., Mittal, R., Rampunggoon, P. and Khanna, A., 2001, A sharp interface cartesian grid method for simulating flows with complex moving boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 174, pp. 345-380.