

# 도시철도 환경개선 및 방재를 위한 스크린도어시스템 최적설계기술 개발

김 정 업

한국건설기술연구원 화재 및 설비연구센터

## Development of Optimum Design Technology of Platform Screen Door Systems for the Environment Improvement and Disaster Prevention of Urban Railway

Jung-Yup Kim

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

**ABSTRACT:** In order to maximize the effect of installing screen door system while to minimize the problems in an initial stage of introduction, it is strongly required to research an optimum installation solution in connection with ventilation and disaster prevention system alongside with safety structure analysis of screen door in respect to train-induced wind, as well as to develop the criteria for the operation after the installation. This paper presents the results of study to develop the optimum design technology in urban railway equipped with platform screen door systems.

**Key words:** Platform screen door system(스크린도어시스템), Urban railway(도시철도), Ventilation system(환기시스템), Disaster Prevention(방재안전)

### 1. 서 론

도시철도는 승객의 안전과 편의도모에 취약한 시설로 평가되고 있어 도시철도 환경개선을 위한 기술개발이 절실히 요청되고 있으며, 이러한 배경에서 승강장 스크린도어시스템이 신규 및 기존 도시철도에 활발히 도입되고 있다. 승강장 스크린도어시스템의 도입 초기 주요 설계기준과 핵심장치를 선진외국에 의존하여 왔으며, 이로인해 발생한 국내현실과의 괴리와 외국기술에 대한 종속이 국내 승강장 스크린도어시스템의 발전에 큰 장애가 되어 왔다.

이에 본 연구에서는 스크린도어시스템의 설치효과를 극대화하고 도입초기의 문제점을 최소화하기 위해

서 열차풍에 따른 스크린도어의 안전구조해석과 더불어 환기 및 방재시스템과 연계된 최적의 설치방안에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구를 통해서 확립된 핵심기술로는 도시철도 지하터널에서 열차의 운행에 의해 발생하는 비정상 기류유동에 대한 해석기술과 본선터널 환기시스템의 최적화 기술, 스크린도어에 가해지는 열차풍압의 평가 기술, 스크린도어 수평하중 시험기술 및 스크린도어 환경에서 정거장 제연시스템 설계기술 등이 있다. 이와 같은 핵심기술을 활용하여 본 연구에서는 최종성과물로서 스크린도어 안전분야 종합설계지침을 제시하고, 참여기업을 통한 핵심기술의 실용화 및 실증시험 기술의 확산을 도모하며 연구결과를 지자체 도시철도공사의 스크린도어시스템 설치사업에 적용하고 관련 국가고시의 개정을 추진하고 있다.

† Corresponding author

Tel.: +82-31-369-0506; fax: +82-31-369-0540

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

### 2. 연구내용

## 2.1 환기시스템 요소기술 및 설계기법 개발

### 2.1.1 지하철 비정상 기류유동 해석기술

#### 1) 축소모형실험기술

스크린도어가 설치된 지하철을 대상으로 1/20 scale의 축소모형실험장치를 제작하여 열차운행조건에 따라 생성되는 지하철 터널내 비정상 기류유동을 분석하였다. 터널본선구간에 총 4개의 압력센서를 설치하여 시간에 따른 압력변화를 측정하였고, 실험결과 열차가 출발하면서 터널내부에 압력이 상승하여 가속에서 등속으로 변화하는 시간주위에서 최고압력이 형성되며 그후 등속운전을 하면서 압력이 서서히 감소됨을 알 수 있었다. 각 열차운행조건에 따라 압력변화는 정성적으로 유사한 경향을 보이고 있으며, 열차의 속도가 클수록 압력상승과 하강폭이 증가한다. 이러한 연구결과는 수치모사해석의 해석결과와 비교,검토를 통해 수치해석기술의 타당성 검증에 사용되고 있다. Fig.1은 축소모형실험장치 전경을 보여주고 있다.

#### 2) 수치해석기술

지하철내 발생하는 기류와 열차풍을 해석하기 위하여 1차원 비정상 Tunnel-Train 유동해석 프로그램을 작성하여 조건별로 분석하였고, 환기방식과 열차운행조건에 따른 정밀분석을 위해 3차원 상용 수치해석 프로그램을 이용한 지하철 기류분석기술을 개발하였다. 1차원 유동방정식의 적분식과 터널압력관계식을 유동해석모델에 적용하여 지하철 터널에서의 1차원 비정상 Tunnel-Train 유동방정식 유도하였고, 도출한 유동방정식은 터널풍속  $U$ 에 대한 1차 상미분방정식으로 Time-Marching기법의 수치해석적 방법으로 해를 구하였다. 한편 3차원 수치해석에서는 이동물체 주위의 유동해석기법으로 Moving Boundaries를 경계로 고체와 유체의 두 영역으로 나누어 격자의 성질을 시간에 따라 변화시키는 Sharp Interface Method를 채택하여 적용하였다. 해석결과 1차원과 3차원 수치해석결과가 축소모형실험결과와 정량적으로 유사한 결과를 보이고 있으며, 이로부터 수치해석이 터널내 유동현상을 잘 모사하고 있다고 판단된다.

### 2.1.2 환기시스템 설계기법 제시

열차이동에 의한 비정상 터널 유동장의 3차원 수치해석기술을 적용하여 스크린도어가 도입되는 지하철에서의 환기시스템 최적설계를 효과적으로 수행할 수 있으며 본 연구에서는 1/20 scale의 모델터널에 대하여 환기구의 위치와 형태에 따른 환기성능을 검토하였다.

우선 본선터널의 환기구 위치를 변화시켜가며 열차의 운행에 의한 터널과 환기구에서의 유동장을 분석하였으며, 이 때 열차의 운행은 열차의 최고운행속도가 3m/s인 조건을 적용하였다. 해석결과 열차가 출발하여 열차선두부가 환기구에 진입하기 전까지는 환기구가 정거장에 최근접하여 설치된 조건에서 환기구로의 배출유량이 가장 적고 반면 정거장쪽으로의 유량은 가장 커졌다. 반면 열차가 환기구에 진입한 후 정거장쪽으로 흐르는 유량이 급격히 증가하는데 이 경우 위의 환기구설치 조건에서 증가폭이 가장 적었다. 분석에서 도출된 최적의 환기구 조건에서 약 7.3% 정도의 환기효율 증가가 예상되었다. Fig. 3은 열차이동에 의한 환기구 주위에서의 유동장 변화를 보여주고 있다.



Fig. 1 Experimental apparatus

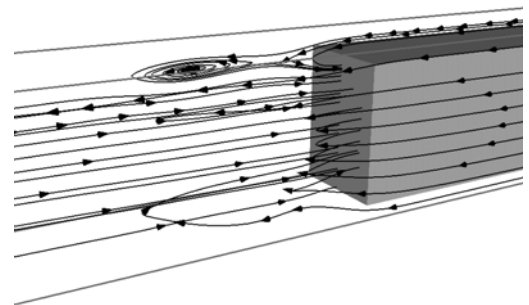


Fig. 2 Streamlines by numerical analysis

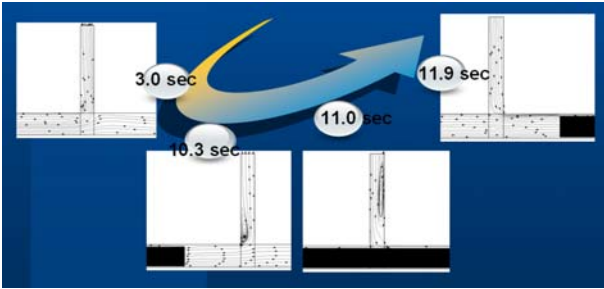


Fig. 3 Flowfield around vent shaft by train move

지하철에서 환기구의 설계는 크게 정거장으로 유입되는 열차풍을 감소시키고, 터널의 환기성능을 높이는 방향으로 이루어져 왔다. 순간적으로 열차풍이 증가하여 승강장에서 기다리고 있는 승객에게 불쾌감을 주는 점을 개선하기 위해서는 환기구의 위치가 역사에 최대한 근접하여 설계되어야 한다. 그러나 전체적인 환기성능측면에서 본선터널의 오염된 공기를 외부로 최대한 배출시키고 정거장쪽에서의 유입을 최소화시키기 위해서는 환기구의 위치에 대한 최적화가 이루어져야 한다. 특히 스크린도어가 설치된 지하철의 경우는 열차풍에 의한 불쾌감의 저감보다는 전체적인 환기성능의 개선에 중점을 두어 환기구의 설계가 수행되어야 할 것이다.

## 2.2 스크린도어 수평하중 산정방안 제시 및 시험장치 제작

### 2.2.1 스크린도어 수평하중 산정방안 제시

국내의 현행 스크린도어 수평하중 설계기준은 지하역사에 적용할 열차풍압의 산정방식을 제시하지 않고 있으며, 지하역사의 열차풍압은 열차속도와 터널구조에 따라 크게 달라지므로 실제 실측실험이나 시뮬레이션에 의해 설계값을 산정하여 적용하여야 한다. 본 연구에서는 서울2호선 사당역사와 서울5호선 김포공항 역사를 대상으로 열차운행에 의해 스크린도어에 가해지는 열차풍압을 실측하였고, 스크린도어가 설치되지 않아 실험이 어려운 역사에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 화재 발생과 같은 비상시 열차가 규정속도 이상으로 역사를 통과할 수 있으므로, 비상시 열차통과와 같은 악조건을 설계에서 고려하여 설계열차풍압을 제시할 필요가 있으며, 본 연구에서 도출한 열차풍압자료와 국외 적용현황을 바탕으로 열차운행속도와 설계 열차풍압의 관계를 일차함수로 나타내었으며 국내 도시철도에 운행열차가 80 km/h의 비상통

과시 85 kg/m<sup>2</sup>의 설계 열차풍압을 적용할 것을 권고하였다. 이러한 연구결과를 바탕으로 스크린도어에 가해지는 수평하중을 명확히 정의하고, 이를 수평하중의 적용조건을 제시하며 국내 도시철도에 대한 설계값을 도출함으로써 기존 도시철도의 승강장 스크린도어 수평하중 설계기준(안)을 제시하였다. Fig. 4는 스크린도어의 열차풍압 측정실험 장면을 보여주고 있다.

### 2.2.2 스크린도어 수평하중 시험장치 제작 및 시험

실제 승강장스크린도어 시스템에 작용하는 수평하중과 동일하게 하중을 가해줄 수 있는 시험장치와 이의 시험방법 및 시험결과에 따라 구조적 안전성을 판별할 수 있는 시험기준을 구축함으로써, 철도시설을 이용하는 승객에게 안전한 환경을 제공하고 승강장스크린도어 시스템에 대한 구조적 안전성능 평가방안의 도출이 필요하다. 현재 승강장스크린도어 시스템의 수평하중과 관련하여 구조적인 안전성 평가시험이 수행되고 있으나, 시험방법이 수평하중을 적절하게 모사하지 못하고 있고 또한 판정기준에 타당성이 결여되어, 승강장스크린도어 시스템이 수평하중에 대하여 안전하게 제작된 것인지 또는 너무 과대하게 설계된 것은 아닌지에 대해 실무자를 중심으로 문제가 제기되고 있다. 따라서 본 연구에서는 분포하중인 열차풍압하중과 풍압하중, 선형하중인 집단하중을 실제와 동일하게 구현할 수 있는 승강장스크린도어 시스템 수평하중 시험장치의 개념과 설계를 수행하였으며, 이러한 설계내용을 기반으로 시험장치를 제작하여 시운전을 수행하였다. 또한 국내외 창호의 구조적 성능시험방법 및 스크린도어 제작업체 시험기준을 바탕으로 스크린도어 수평하중 시험규격을 제시하였다. Fig. 5는 스크린도어 수평하중 시험장치의 전경을 보여주고 있다.



Fig. 4 Measurement of train pressure on PSD



Fig. 5 Test apparatus of structural safety

### 2.3 화재 안전 확보 요소기술 개발 및 최적설계 기술 개발

도시철도의 지하구간은 반밀폐적 터널공간으로서 화재발생시 연기와 고온의 기류가 외부로 유출되지 못하고 터널을 통해 빠르게 확산되기 때문에 매우 위험한 상황에 직면할 수 있으며, 스크린도어가 설치되면 정거장 및 터널에서의 열유동현상에 큰 영향을 미치기 때문에 스크린도어의 도입을 고려한 제연시스템의 최적설치방안 및 설치후의 운영기준 확립에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 화재 수치해석 기법과 축소모형 실험기술 등의 화재안전 확보 요소기술을 개발하여 신뢰성을 평가하였으며, 이러한 요소기술을 활용하여 스크린도어가 설치된 도시철도 지하구간에서의 제연시스템 최적설계, 운영방안과 화재시 안전한 대피를 위한 스크린도어 운전제어방안을 도출하였다.

스크린도어가 설치된 지하철 정거장에서의 제연시스템 연구를 위하여 국내 도시철도의 일반적인 상대식 지하역사 모델을 설정하였다. 정거장 제연시스템의 최적운영방안 검토는 본 연구에서 적용성 평가를 수행한 FDS 프로그램을 사용하였으며 화재발생조건으로 역사에 정차중인 10량 편성 열차의 5번째 객차에서 화재가 발생한 것으로 하였으며, 화재강도는 20MW로 설정하였다. 해석결과 스크린도어가 설치되는 것만으로도 승강장에서의 온도분포가 크게 하강하며, 승강장과 선로부의 제연시스템 가동으로 더 좋은 결과를 얻을 수 있다. 승강장에서 제연시스템 가동시 화재지점 근처 존에서의 급기가 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 그리고 터널부에서 선로부로 급배기를 수행할 경우 급기수행은 승강장쪽에서의 열기류 확산을 가속시키므로 피해야 할 것으로 판단되

며 해석결과로부터 양단에서 배기를 수행하는 것이 정거장에서의 안전성 확보에 가장 유리할 것으로 판단된다.

한편 승강장에서 화재가 발생할 경우는 스크린도어의 개폐여부에 따라 연기확산과 제연시스템 가동조건이 달라질 수 있으므로 본 연구에서는 승강장에 화재 발생시 스크린도어의 운전제어방안에 대하여 검토하였다. 화재발생은 계단과 승강장 끝 사이 중간지점에서 10MW의 화재강도를 가지는 것으로 가정하였으며, 해석결과 승강장에서 화재가 발생할 경우 스크린도어를 개방하는 것이 승강장에서의 온도상승을 낮출 수 있어 승객대피에 유리한 환경을 조성할 수 있다고 판단된다. 한편 이경우에도 화재근접 존에서의 급기는 제연성능에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

### 4. 결론

본 연구의 결과로 주목할만한 가시적인 최종성과물로는 서울시도시철도공사 승강장 스크린도어 설치사업에 대한 적용결과라 할 수 있다. 열차풍압측정 현장실험과 축소모형실험 및 컴퓨터시뮬레이션을 통해 국내 도시철도 지하역사에서의 열차풍압을 분석하였으며 승강장 스크린도어시스템의 열차풍압 설계기준을  $270\text{kgf/m}^2 \rightarrow 85\text{kgf/m}^2$  으로 개선하였으며, 이러한 연구결과가 서울시도시철도공사 관할 서울 5,6,7,8호선 143개역사의 승강장 스크린도어시스템 설치공사에 반영되어 총769억원의 사업비 절감에 크게 기여했으며 스크린도어의 구조체 경량화에 따른 직접적 사업비 절감효과는 57.5억원으로 분석되었다.

도시철도의 안전과 이용환경의 개선을 위해 국내에서 능동적 설비로 승강장 스크린도어시스템의 도입이 활발히 추진되고 있는 상황에서 본 연구를 통해 주요 설계기준과 핵심장치에서 국내 독자적인 스크린도어 기술개발을 위한 기반을 마련하였고 스크린도어시스템의 설치효과를 극대화하고 도입초기의 문제점을 최소화하였으며 향후 국내 승강장 스크린도어시스템의 발전과 국산화에 큰 파급효과가 기대된다.

### 후 기

본 연구는 국토해양부의 2003 건설핵심기술연구개발사업인 “지하공간 환경개선 및 방재기술 연구개발-지하생활공간 방재기술 개발(과제번호:C03-02)” 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.