

T
97-M88876

T
697.93
1527

第 87 回 碩士學位論文
指導教授 李 彥 求

地下鐵 昇降場의 氣流分布
特性에 關한 研究

A Study on the Air Flow Distribution
Characteristics in Subway Platforms

中央大學校 大學院
建築工學科 建築計劃 및 環境 專攻
權 度 壤
1997年 6年

地下鐵 昇降場의 氣流分布
特性에 關한 研究

A Study on the Air Flow Distribution
Characteristics in Subway Platforms

이 論文을 碩士學位 論文으로 提出함.

1997年 6年

中央大學校 大學院
建築工學科 建築計劃 및 環境 專攻
權 度 壞

權度壞의 碩士學位 論文을 認定함.

審查委員長 李明浩

審查委員 雷潤京

審查委員 李彥求

中央大學校 大學院
建築工學科 建築計劃 및 環境 專攻
權 度 壞
1997年 6年

국 문 초 록

지하철 승강장의 환경은 여름철 대부분의 승강장 온도가 지상의 온도보다 높게 나타나고 있으며 기압차, 소음, 오염물질 등이 문제가 되고 있다. 특히 열차가 유입시 발생하는 기류는 승강장의 먼지를 확산시키고 머리를 날리며 치마나 코트를 날리게 하는 등 열차를 기다리는 승객들에게 불쾌감을 줄 뿐만 아니라 지하철 승강장의 열 환경 제어에도 영향을 미친다. 그러나 이에 대한 대책은 아직까지 심각하게 고려되어지지 않고 있다.

또한 지하철 승강장의 기류제어에 대한 설계는 기존 지하철 승강장의 실측치를 비교하여 유사한 수치를 적용하거나 기류제어가 잘 되어 있는 사례를 그대로 모방하는 등 체계적인 연구가 이루어지지 않고 있다.

최근에는 컴퓨터의 하드웨어와 소프트웨어의 발달로 지하철, 고속전철 등에 대한 수치 해석이 이루어지고 있지만 해석방법 자체의 어려움으로 인해 비정상 수치해석은 2차원 유동에 국한되었고, 3차원 유동에 대해서는 기차의 실제 움직임을 고려하지 않는 정상상태의 유동해석만 해오고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 지하철 승강장의 기류분포 특성에 대해 알아보기 위하여 문헌고찰을 통하여 지하철 승강장의 기류환경과 승강장의 기류속도 설계방법에 대하여 살펴보고, 3차원 비정상상태의 수치해석 시뮬레이션을 통하여 기존 역사의 기류분포 특성을 파악한 후, 이를 바탕으로 승강장의 궤적한 기류환경을 위한 적정 개선안을 선택하여 기류분포 시뮬레이션을 하고, 기존 역사의 승강장과 비교 검토하여 개선된 기류분포상태를 정량적으로 확인함으로써 지하철 승강장의 기류제어설계를 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 기존역사 승강장의 기류분포 시뮬레이션 결과를 보면 열차가 승강장에 진입하기 전에는 승강장이 시작되는 일부 지점 2곳에서 기준 기류속도 5m/s를 초과하는 것으로 나타났으며, 열차가 승강장에 도착한 후에는 열차 전면부와 열차 측면부 일부 지점 7곳에서 기준 기류속도를 초과하는 것으로 나타났다.
2. 기존역사 승강장에 릴리프 패시지를 설치한 개선안의 기류분포를 보면 결과를 보면 열차가 승강장에 진입하기 전에는 승강장의 모든 지점에서 매우 양호한 것을 나타났으며, 열차가 승강장에 진입한 후에는 열차 전면부와 열차 측면부 일부 지점 4곳에 기준 기류속도를 초과하는 것으로 나타났다.
3. 기존역사 승강장과 승강장에 릴리프 패시지를 설치한 개선안을 비교해 보면 열차가 승강장에 진입하기 전에는 기존역사의 일부 지역에서 기준 기류속도를 초과하는 것으로 나타났으나 릴리프 패시지를 설치한 경우 모든 지역에서 0.9m/s 이하의 기류속도로 매우 양호한 기류속도를 보였다. 열차가 승강장에 진입한 후에는 기존역사의 열차 전면부와 열차 측면부 일부 지점 7곳에서 기준 기류속도를 초과하는 것으로 나타났으나 릴리프 패시지를 설치한 경우 4곳에서 초과하는 것으로 나타나 43%가 적정 기준 5m/s 이하로 감소된 것으로 나타났다. 그리고 릴리프 패시지를 설치한 후 평균 기류속도는 0.4m/s가 감소하였으며, 기준 기류속도 5m/s가 초과된 지역도 전체 9곳에서 4곳으로 5곳이 기준 기류속도 이하로 감소되어 56%가 감소된 것으로 나타났다.

이상의 연구결과를 종합하면 현재 지하철 승강장에 열차가 유입시 기류제어에 대한 많은 고려가 필요한 것으로 나타났다. 기류환경을 휘적하게 하기 위한 여러 개선안중 운전비가 들지않고 관리가 필요없는 릴리프 패시지를 설치하였을 경우 많은 기류속도를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

목 차

제 1 장 서 론 1

1.1 연구의 배경 및 목적 1

1.2 연구의 범위 및 방법 3

제 2 장 지하철 승강장의 기류환경 및 기류속도 설계방법 5

2.1 지하철 승강장의 기류환경 5

2.1.1 기류속도에 따른 인체의 반응 5

2.1.2 지하철 승강장에 미치는 열차풍의 영향 6

2.1.3 지하철 승강장의 기류속도 기준 9

2.1.4 외국 지하철 승강장의 기류제어 현황 11

2.1.5 우리나라 지하철 승강장의 기류제어 현황 15

2.2 승강장의 기류속도 설계방법을 위한 문헌고찰 20

2.2.1 승강장내 기류속도의 기초 이론식 20

2.2.2 터널 환기 샤프트에 의한 기류의 제어 24

2.2.3 승강장의 형태 변화에 따른 기류의 제어 28

2.2.4 터널내 기류속도 변화에 의한 승강장 기류의 제어 29

제 3 장 사례를 통한 승강장의 기류분포

특성에 관한 시뮬레이션 31

3.1 시뮬레이션의 개요	31
3.1.1 시뮬레이션 프로그램의 개요	31
3.1.2 평가대상 지하철 역사의 개요	32
3.1.3 시뮬레이션 결과의 평가기준	32
3.1.4 시뮬레이션 방법 및 조건	35
3.2 시뮬레이션 결과 및 분석	39

제 4 장 승강장의 기류분포 개선사례 시뮬레이션 46

4.1 승강장의 기류분포 개선사례에 대한 개요	46
4.2 릴리프 패시지(Relief Passage) 설치에 따른 기류분포 시뮬레이션 ...	47
4.3 시뮬레이션 결과	49
4.4 비교 평가	55

제 5 장 결 론 59

연구의 한계 및 추후 연구 제안

참 고 문 헌

ABSTRACT

표 목 차

<표 2.1> 기류속도에 따른 인체의 일반적인 반응	6
<표 2.2> 열차풍이 승객에게 미치는 영향	7
<표 2.3> 열차풍이 설비시설에 미치는 영향	7
<표 2.4> 외국 지하철의 기류속도	8
<표 2.5> 서울 지하철의 기류속도	8
<표 2.6> 온도 40℃일 때 신진대사율과 습도에 따른 최적 기류속도	9
<표 2.7> 뷔포트 스케일(Beaufort Scale)	10
<표 2.8> 개선 전과 개선 후 각 단면에 따른 최대기류속도의 비교	13
<표 2.9> 서울 지하철 6호선의 구간에 따른 예상 최대기류속도	16
<표 2.10> 폐쇄율과 속도비간의 관계	30
<표 3.1> 단선병렬 터널의 특성 및 적용환기방식(N역사)	33
<표 3.2> N역 승강장의 설계기준 및 조건	37
<표 3.2> N역 승강장의 설계기준 및 조건	37
<표 3.3> 열차가 터널에서 승강장으로 이동할 때 A-H 지점에 발생하는 기류속도	44
<표 4.1> 열차가 터널에서 승강장으로 이동할 때 A-H 지점에 발생하는 기류속도	54
<표 4.2> N역사에 릴리프 패시지를 설치하였을 경우 지하철 승강장의 기류속도 감소량	55

그 림 목 차

(그림 1.1) 연구의 흐름도	4
(그림 2.1) 아틀랜타 지하철(MARTA)의 기류제어 시스템 평면도	11
(그림 2.2) 일본 경왕신선 초대역의 표준 단면도	12
(그림 2.3) 터널 환기 샤프트	15
(그림 2.4) 순환구간 승강장의 열차풍 완화구 평면도	16
(그림 2.5) 복층 승강장의 열차풍 완화구 평면도 및 단면도	17
(그림 2.6) 섬식 승강장의 열차풍 완화구 평면도 및 단면도	18
(그림 2.7) 열차풍 완화구 평면도 및 단면도	19
(그림 2.8) 터널 환기 샤프트의 기류분리	23
(그림 2.9) 기차속도, 터널 환기 샤프트의 위치, 환기량의 관계	26
(그림 3.1) 대상 시뮬레이션 승강장의 평면 및 단면	34
(그림 3.2) 터널과 승강장의 계산 격자	36
(그림 3.3) 승강장의 공조·배기 개념도	37
(그림 3.4) 열차 운행 거리-속도 변화표	38
(그림 3.5) 시뮬레이션에 사용된 열차운행 거리-속도 변화표	38
(그림 3.6) 시뮬레이션 비교평가 지점의 위치	39
(그림 3.7) 열차가 승강장에 들어올때 발생하는 기류속도	40
(그림 3.8) 열차가 승강장 진입전 24m위치에 있을때의 기류속도 분포	41
(그림 3.9) 열차가 승강장 진입전 3m위치에 있을때의 기류속도 분포	41
(그림 3.10) 열차가 승강장에 진입하여 18m지점에 도달했을 때의 기류속도 분포	42
(그림 3.11) 열차가 승강장에 진입하여 39m지점에 도달했을 때의 기류속도 분포	42
(그림 3.12) 열차가 승강장에 진입하여 60m지점에 도달했을 때의 기류속도 분포	43
(그림 3.13) 열차가 승강장에 진입하여 60m지점에 도달했을 때의 기류속도 분포	43
(그림 4.1) 릴리프 패시지(Relief Passage)의 설치	48
(그림 4.2) 릴리프 패시지를 설치하였을 때 발생하는 기류속도	50
(그림 4.3) 열차가 승강장 진입전 24m위치에 있을때의 기류속도 분포	51

(그림 4.4) 열차가 승강장 진입전 3m위치에 있을때의 기류속도 분포	51
(그림 4.5) 열차가 승강장에 진입하여 18m지점에 도달했을 때의 기류속도 분포	52
(그림 4.6) 열차가 승강장에 진입하여 39m지점에 도달했을 때의 기류속도 분포	52
(그림 4.7) 열차가 승강장에 진입하여 60m지점에 도달했을 때의 기류속도 분포	53
(그림 4.8) 열차가 승강장에 진입하여 81m지점에 도달했을 때의 기류속도 분포	53
(그림 4.9) 릴리프 패시지 구간에서 열차통의 팽창	56

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

세계의 현대 도시들은 인구 및 산업의 도시 집중화로 인하여 교통, 문화, 환경, 주거생활 등 여러 방면에서 많은 변화가 나타났다. 그 중 가장 심각하게 대두되고 있는 문제는 많은 차량의 증가로 인한 교통문제이다. 이러한 교통문제를 해결하기 위하여 세계 여러 나라들은 지하철을 건설하게 되었으며 근래에는 도시교통의 중요한 부분을 차지하고 있다.

우리나라의 경우 1974년 서울 지하철 1호선 개통을 시작으로 하여 2, 3, 4호선, 2기 지하철의 일부 구간과 부산의 1호선이 준공되어 운행되고 있으며 98년에 2기 지하철 공사가 끝나게 되면 3기 지하철 건설에 들어갈 예정이다. 또한 부산, 대구, 인천, 광주, 대전 등에서도 건설 또는 계획중에 있다. 이처럼 우리의 지하철은 시민의 교통수요를 충족시켜 주는 빠르고 중요한 교통수단이 되었다.

운행 초기 수송수단 만으로서의 역할을 하던 지하철은 생활수준이 향상되고 사용자가 편안성과 안전성에 대한 지각이 높아짐에 따라 지하철의 양적 증가와 더불어 환경에 대한 요구도 증가하고 있다. 현재 일부구간에서 운행되는 2기 지하철의 경우 이러한 요구에 의하여 질적 환경은 점차 나아지고 있으나 아직까지 우리의 지하철은 양적 증가에 비하여 질적 환경은 뒤떨어지고 있는 실정이다.

지하철 승강장의 환경은 최근 개통된 2기 지하철과 기존의 일부 역사에서 냉방을 하는 곳이 있으나 여름철 대부분의 승강장 온도가 지상의 온도보다 높게 나타나고 있으며 기압차, 소음, 오염물질 등이 문제가 되고 있다. 특히 열차가 유입시 발생하는 기류는 승강장의 먼지를 확산시키고 머리를 날리며 치마나 코트를 날리게 하는 등 열차를 기다리는 승객들에게 불쾌감을 줄 뿐만 아니라 지하철 승강장의 열 환경 제어에도 영향을 미친다. 그러나 이에 대한 대책은 아

직까지 고려되어지지 않고 있다.¹⁾

또한 지하철 승강장의 기류제어에 대한 설계는 기존 지하철 승강장의 실측치를 비교하여 유사한 수치를 적용하거나 기류제어가 잘 되어 있는 사례를 그대로 모방하는 등 체계적인 연구가 이루어지지 않고 있다.

최근에는 컴퓨터의 하드웨어와 소프트웨어의 발달로 지하철, 고속전철 등에 대한 수치 해석이 이루어지고 있지만 해석방법 자체의 어려움으로 인해 비정상 수치해석은 2차원 유동에 국한되었고, 3차원 유동에 대해서는 기차의 실제 움직임을 고려하지 않는 정상상태의 유동해석만 해오고 있는 실정이다.²⁾

따라서, 본 연구에서는 지하철 승강장의 기류분포 특성에 대해 알아보기 위하여 문헌고찰을 통하여 지하철 승강장의 기류환경과 승강장의 기류속도 설계방법에 대하여 살펴보고, 3차원 비정상상태의 수치해석 시뮬레이션을 통하여 기존 역사의 기류분포 특성을 파악한 후, 이를 바탕으로 승강장의 폐적한 기류환경을 위한 적정 개선안을 선택하여 기류분포 시뮬레이션을 하고, 기존 역사의 승강장과 비교 검토하여 개선된 기류분포상태를 정량적으로 확인함으로써 지하철 승강장의 기류제어설계를 위한 기초자료를 제시하고자 하였다.

1) 한 상태. *지하철의 환경 계획*. 대한건축학회지 Vol.38, No.184, 1994, 9, p.45
2) 서울특별시지하철건설본부. 제3기 서울지하철 10, 11호선 기계설비 기본설계
공기오염방지 개선방안 연구. 1996. 6, p. 33.

1.2 연구의 범위 및 방법

각 단계별 연구의 범위 및 방법을 진행순서에 따라 정리하면 다음과 같다.

1. 지하철 승강장의 기류 환경과 기류속도 제어를 위한 문헌고찰

지하철 승강장의 기류환경에 대한 기초 자료로서 문헌고찰을 통하여 기류속도에 따른 인체의 반응을 알아보고, 열차가 진입시 발생하는 열차풍이 승강장에 미치는 영향을 알아본다. 또한 지하철 승강장의 기류환경 기준을 고찰하고, 외국과 우리나라의 지하철 승강장 기류제어 현황에 대하여 고찰하였다.

그리고 기류제어 대안을 설정하기 위한 기초 자료로서 승강장의 기류속도 설계방법을 위한 문헌고찰로 승강장 기류속도 기초 이론식을 정리하고, 승강장의 기류제어를 위한 방식에 대하여 고찰하였다.

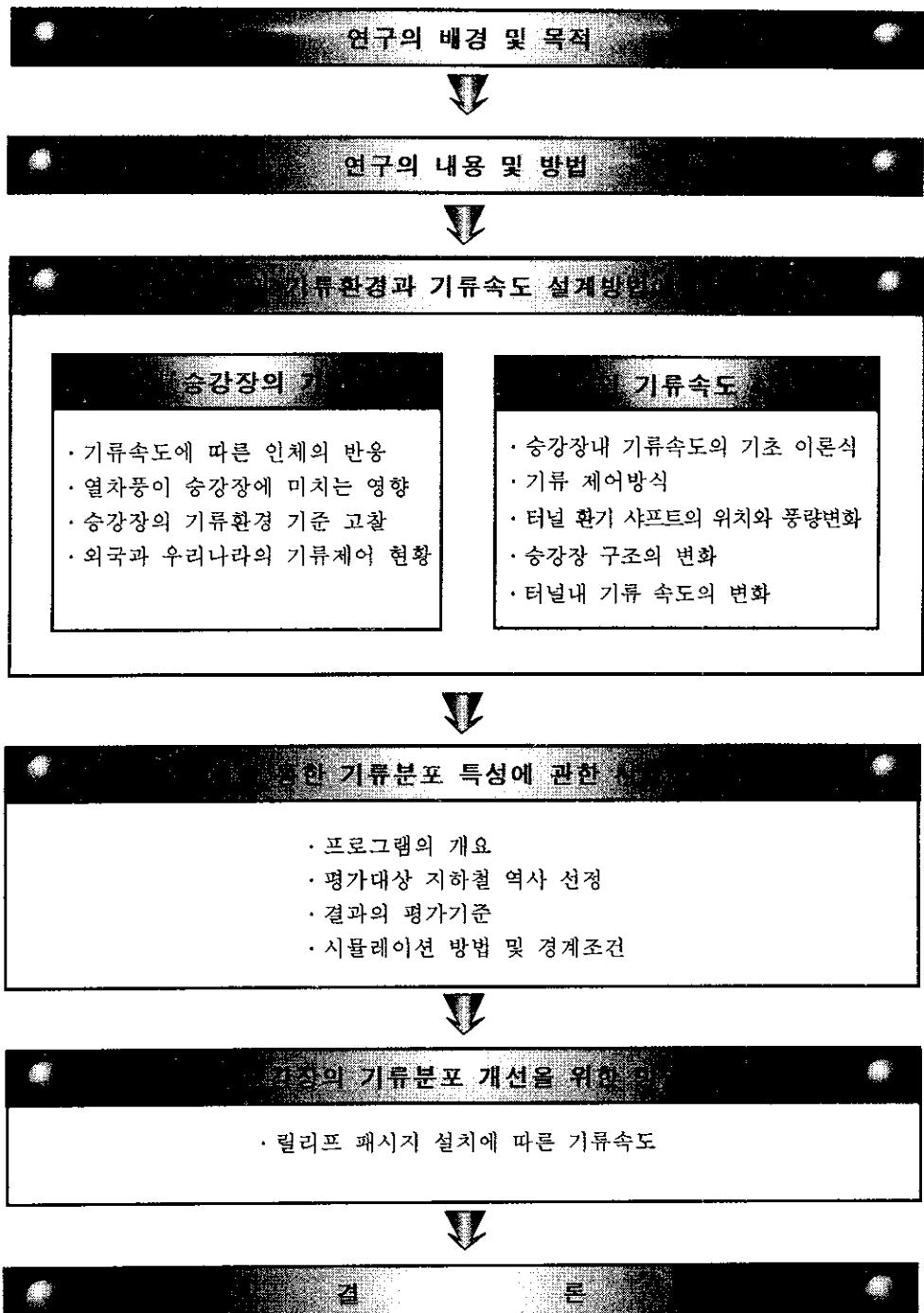
2. 사례를 통한 승강장의 기류분포 특성에 관한 시뮬레이션

본 연구에서는 기존역사의 기류분포 특성을 알아보기 위해 이미 개통된 2기 지하철 7호선 N역사를 사례로 하여 3차원 공간내의 난류유동 현상을 수치해석하는 프로그램인 STAR CD V-2.3을 사용하여 시뮬레이션 하였다.

3. 승강장의 적정 기류분포를 위한 개선안 시뮬레이션

지하철 승강장의 적정 기류분포를 위한 개선안으로 문헌에서 제시된 방법 중 기존 역사에 릴리프 패시지 설치하여 기류분포 시뮬레이션을 실시하였고 그 결과를 기존역사와 비교 검토하였다.

이상의 연구방법 및 범위에 대한 흐름도는 (그림 1.1)과 같다.



제 2 장 지하철 승강장의 기류환경 및 기류속도 설계방법

2.1 지하철 승강장의 기류환경

열차 주행시 피스톤 작용에 의한 열차풍은 터널에서는 환기작용의 증대로 열차발열을 제거하는 장점을 지니고 있으나, 승강장으로 침입하는 열차풍은 승강장의 냉방부하를 증가시키며 승객들에게 불쾌감을 주는 요인이 된다. 본 장에서는 문현 고찰을 통하여 지하철 승강장의 기류환경과 기류속도 설계방법에 대하여 고찰하였다.

우선 지하철 승강장의 기류환경에 대한 기초 자료로서 기류속도에 따른 인체의 반응, 열차가 진입시 열차풍이 승강장에 미치는 영향, 지하철 승강장의 기류환경 기준 고찰, 외국과 우리나라의 지하철 승강장 기류제어 현황에 대하여 고찰하였다.

그리고 기류제어 대안을 설정하기 위한 기초 자료로서 승강장의 기류속도 설계방법을 위하여 'Subway Environmental Design Handbook'에서 제시한 승강장의 기류속도 기초 이론식과 승강장의 기류제어 방식인 터널 환기 샤프트에 의한 기류의 제어, 승강장 구조의 변화에 의한 고속 기류의 제어, 터널내 기류속도 변화에 의한 승강장의 기류속도 제어에 대하여 고찰하였다.

2.1.1 기류속도에 따른 인체의 반응

기류는 인체의 반응에 영향을 미치는 온열환경 요소인 기온, 평균복사온도, 습도와 함께 중요한 요소로 인체에서 대류 및 증발에 의한 열 발산을 촉진시키고 냉각작용에 의하여 체감을 돋는다.³⁾

3) 임만택. 건축환경계획. 보문당, 1991. 3, p. 73.

실내에 공기의 흐름이 전혀 없고 천장부분의 공기와 바닥부분의 공기 사이에 온도차가 클 때 기류는 대류에 의하여 온도차를 줄여주며, 더운 날 습도가 적당하고 주위의 공기온도가 인체의 표면온도보다 낮을 경우 기류는 증발을 촉진하여 생리학적으로 인체를 냉각시켜서 열 스트레스를 최소화한다. 그러나 추운 날에는 이와 반대로 기류속도가 0.2~0.25 m/s 이상이 되면 열 손실로 인한 불쾌감을 느끼게 된다. 기류속도에 따른 인체의 일반적인 반응은 <표 2.1>과 같다.

<표 2.1> 기류속도에 따른 인체의 일반적인 반응⁴⁾

기류 속도	인체의 반응
0.25 m/s 이하	느끼지 못함
0.25 ~ 0.50 m/s	쾌적함
0.50 ~ 1.00 m/s	공기의 움직임을 느낌
1.00 ~ 1.50 m/s	냉각효과를 느낌
1.50 m/s 이상	불쾌감을 느낌

실내기류를 설계할 때는 우선 그 목표치를 명확하게 해야 한다. 우리나라에서는 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙 제 12조 3호 별표 2에 실내의 습도와 기류속도를 각각 40~70%, 0.5m/s 이하로 정하고 있지만, 거주의 쾌적성을 확보한다는 관점에서 보면 설계 목표치로서 바람직하다고 하기는 곤란하다.⁵⁾ 또한 주거용도 이외의 다른 용도로 사용하는 공간의 경우 특별한 기준이 제시되어 있지 않다.

2.1.2 지하철 승강장에 미치는 열차풍의 영향

과거 우리나라 지하철 승강장에서는 여름철 더위로 인한 불쾌감 정도만이 큰 문제가 되었으나 최근 사용자의 생활수준이 향상되고 쾌적성에 대한 지각이 높아짐에 따라 그다지 문제시되지 않았던 열차풍도 온도환경과 같은 정도로 문제시 되고 있다.

4) 이경희. *건축환경계획*. 문운당, 1994. 1, p. 65.

5) 대한건축학회. *건축설계자료집 : 환경계획편*. 태림문화사, 1994. 4, p. 184.

열차가 승강장에 고속으로 유입할 때 생기는 피스톤 작용은 터널에서 15~45m정도 위치의 승강장에 횡단면으로 부는 열차풍을 발생시킨다. 이 열차풍은 다음 요소들에 의해 기류속도에 영향을 미친다.

1. 본선 터널의 구조, 단면적, 구간거리, 벽면의 저항계수, 승강장의 구조
2. 열차의 단면적, 길이 저항계수의 크기, 열차의 속도패턴
3. 대형열차 및 후속 열차의 유무
4. 본선 터널의 환기방식(자연환기 혹은 기계환기)

승강장에 최대기류속도가 발생하는 곳은 정차역이 시작되는 지점으로 제트 기류가 분산되기 전에 발생한다. 환기 측면에서 피스톤 작용은 매우 유효하지만 고속 기류로 인한 불쾌감을 유발한다. 열차풍이 승객에게 미치는 영향과 설비 시설에 미치는 영향으로 분류해 보면 <표 2.2>, <표 2.3>과 같다.⁶⁾

<표 2.2> 열차풍이 승객에게 미치는 영향

기류속도(m/s)		영향
7.0-7.5		머리가 날리는 것을 막기 위해 손을 올립 치마나 코트를 잡아서 날리는 것을 막으려 함 자기 방어 반응을 보임
8.8		바람이 부는 방향에서 반대로 얼굴을 돌림 복장이 날리는 것을 막기 위해 손으로 잡거나 몸을 움추림 자기 방어 반응을 보임

<표 2.3> 열차풍이 설비시설에 미치는 영향

장소	영향
승강장	승강장 냉방부하의 증가 천정부에 설치된 안내판이 흔들림
본선 터널	본선 터널의 환기효율을 높임 환기용 송풍기의 효율을 감소시킴

6) 서울특별시자하철건설본부. 서울지하철 5호선 5-6공구 실시설계보고서(기계설계). 1992. 6.

일반적으로 우리나라 지하철의 경우 열차당 1,500 - 2,000m³의 풍량이 발생되며, 고속 지하철의 경우에는 2,500 - 4,000m³의 풍량이 발생된다. 외국 지하철의 기류속도는 <표 2.4>와 같으며 우리나라 기존 지하철(1, 2, 3, 4호선)의 기류속도에 대한 실측치는 <표 2.5>와 같다.⁷⁾

<표 2.4> 외국 지하철의 기류속도

구분 지하철명	열차운전 속도 (km/h)	설계온도 승강장/ 본선터널	평균역간 거리 (m)	열차운전 간격 (min)	터널내 풍속 (m/s)	비고
샌프란시스코 (BART)	128	24°C/ 24°C	3700	10	5.6	터널내 의 평균구 배는 30%로 계산한 다.
워싱턴 (WMATA)	120	29°C/ 35°C	1500	3	7.0-7.2	
뉴욕 (NYCTA)	80	27°C/ 35°C	800	3	5.2-5.6	
캐나다 (CTCUM)	80	29°C/ 29°C	900	3	5.6	
아틀란타 (MARTA)	-	29°C	2000	10	-	
홍콩 (MTR)	60	28°C/ 40°C	1000	3	5.2-5.5	
일본 동경도영 12호	-	-	-	-	9.2	폐색율 53.2%

<표 2.5> 서울 지하철의 기류속도

(단위 : m/s)

위치	단선(설식 승강장)	복선(상대식 승강장)
승강장(열차 진입시)	±0.5~±9.5	±0.5~±9.5
승강장(열차 출발시)	±6.9~±10.5	±7.2~±5.6
외부 출입 계단	±0.5~±2.5	±0.5~±3.0
내부 출입 계단	±0.5~±4.2	±0.5~±2.1

92. 2. 28 ~ 3. 7 측정치

7) 서울특별시지하철건설본부. 서울지하철 6호선 기본설계보고서(기계설비). 1993. 6, p. 102.

2.1.3 지하철 승강장의 기류속도 기준

지금까지 외국에서는 지하철 공간에서 최적 기류속도를 위한 실험이 실시된 바 없으며 우리나라의 경우는 기존 지하철 승강장 부분의 환경 측정은 기류속도에 대한 단순 측정에 불과하며 승객 또는 역무원을 고려한 최적 기류속도에 대한 연구 역시 미미한 상태이다.

지하철과 유사한 공간에서 실험이 실시된 연구결과를 살펴보면 <표 2.6>과 같다. 이 실험은 온도가 40°C일 때 clo(의복의 단열)값이 작은 하절기 복장을 전제로 하였으며 각 신진대사율과 습도에 따른 최적 기류속도를 나타내고 있다.

<표 2.6> 온도 40°C일 때 신진대사율과 습도에 따른 최적 기류속도

신진대사율 (kcal/h)	활동	상대습도에 따른 기류속도(m/s)		
		18%	26%	54%
402	짐나르기	4.0	-	-
350	보행(4m/h)	2.5	4.0	4.0
265	보행(3m/h)	0.76	1.25	2.5
95	사무작업	0.15	0.25	0.5

뷰포트 스케일(Beaufort Scale)<표 2.7>은 미국 기상청에서 기류속도에 따라 발생되는 영향을 기술한 것으로 지하철 승강장의 기류속도 기준으로 적용될 수 있을 것으로 예상된다. 예를 들어 먼지날림 등을 발생시키는 뷔포트 3의 경우 가벼운 깃발을 펼럭이게 할 정도의 기류속도이며 뷔포트 4는 큰 깃발을 움직일 수 있는 정도가 된다.

이 뷔포트 4 정도의 기류속도는 지하철 승강장 승객들의 몸가짐에 영향을 줄 수 있는 풍속이므로 평상시 지하철 승강장의 기류속도는 뷔포트 4이하 또는 5m/s 이하를 유지하는 것이 적당하다.⁸⁾

8) Prepared by Associatated Engineers, a Joint Venture of Parsons, Brinckhoff, Quade, & Douglas, Inc., DeLeuw, Cather & Company, and Kaiser

<표 2.7> 뷰포트 스케일(Beaufort Scale)⁹⁾

풍력급수	명 칭	기류속도(m/s)	영 화
0	靜 穏 : Calm	0.46이하	고요함, 연기가 수직으로 상승
1	至 經 風 : Light air	0.47~1.52	연기로 기류방향을 알 수 있으나 풍향계는 움직이지 않음
2	經 風 : Slight breeze	1.53~3.30	안면에 바람을 느낄 수 있고 낙엽이 일어나고 풍향기가 움직임
3	軟 風 : Gentle breeze	3.31~5.33	낙엽과 작은 나뭇가지가 계속 날리고 가벼운 깃발이 펄럭임 (정상시 권장 최고 풍속 5 m/s)
4	和 風 : Moderate breeze	5.34~8.13	먼지와 종이 조각이 움직이고 나뭇가지가 흔들림
5	疾 風 : Fresh breeze	8.14~11.18	낙엽수가 흔들리기 시작하고 호수에 파장이 일어남(비상시 권장 최고 풍속 12.7 m/s)
6	雄 風 : Strong breeze	11.19~13.72	큰 나뭇가지와 전선이 흔들리고 우산 사용이 어려움
7	强 風 : Moderate gale	13.73~17.27	나무 전체가 흔들리고 바람을 향해 걸기가 어려움
8	疾强風: Fresh gale	17.28~20.83	나뭇가지가 부러지고 보행이 어려움
9	大 强 風 : Strong gale	20.84~24.38	가벼운 구조물 피해, 굴뚝과 슬레이트가 부서짐
10	全强風: Whole gale	24.34~28.45	나무가 뽑히고 건물 구조 피해
11	暴 風 : Storm	28.46~32.26	큰 재해

또 ASHRAE(American Society Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) 기준을 보면 승객들은 단시간 동안 지하철 환경에 노출되어 있기 때문에 장시간 거주하는 장소와는 다르게 폐적 기준을 설정하고 있고 일반적으로 지하철 승강장에서는 불쾌적도를 기준으로 하여 최대 기류속도를 5m/s로 제한하는 것이 바람직하다고 제시하고 있다.¹⁰⁾

Engineers. *Subway Environmental Design Handbook, Volume I : Principles and Applications, Second Edition.* U.S Transit Development Corporation, 1976. 3, p. II-22.

9) 임만택. *건축환경계획*. 보문당, 1991. 3, p. 41.

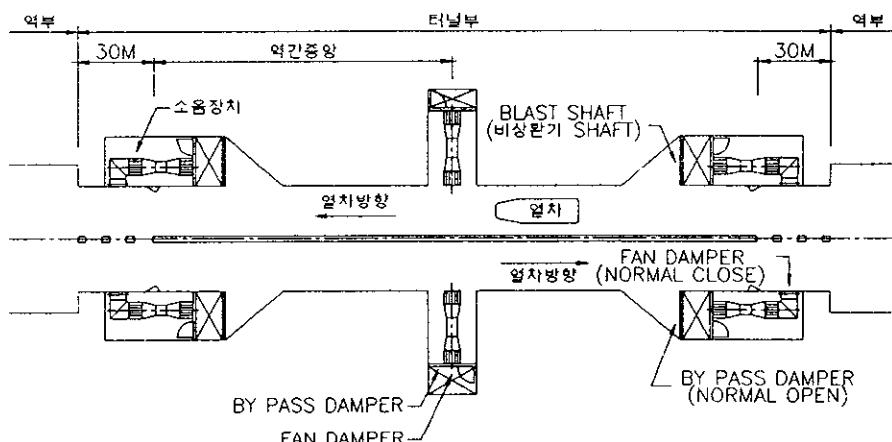
10) ASHRAE HANDBOOK. Heating, Ventilating, and Air-Conditioning APPLICATIONS. 1995, P. 12.10.

2.1.4 외국 지하철 승강장의 기류제어 현황

(1) 미국

미국 토론토 지하철은 초기 계획설계시부터 환경 제어에 대한 배려가 고려된 시카고 지하철을 바탕으로 설계되어 1954년 개통하게 되었다. 그러나 계단실과 승강장에 승객을 위협할만한 기압 및 고속기류로 인한 환경문제를 놓게 되었다. 그 원인은 시카고 지하철의 경우 터널 환기 샤프트 간격이 137m인데 비하여 토론토 지하철의 경우 공사비용과 환기구 부지 할당 등의 문제로 샤프트 간격을 456m로 확장할 수밖에 없었다. 이 샤프트의 배치 간격과 67%(시카고 지하철의 경우 50%)를 육박하는 열차 폐쇄율(터널 면적에 대한 열차의 면적비)은 고압력 및 고속 기류를 형성하는 원인이 되었다.

이와 같은 문제점은 2가지 방법으로 해결되었다. 하나는 역사 진입구로부터 30m지점에서 두 터널을 구획하는 벽체를 하나로 통합하는 것이었다. 이는 터널 단면적을 넓혀 압력을 감소시키고 터널 입구에서 배출 공기가 터널 환기 샤프트로 통할 수 있도록 하는 역할을 하였다. 또 하나는 승강장 진입 부분의 터널 지붕을 차츰 줍게 처리하여 기류 분산 효과로 환기 샤프트를 통하는 기류를 부드럽게 하였다.

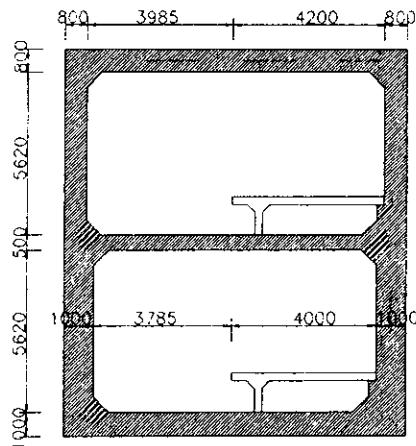


(그림 2.1) 아틀랜타 지하철(MARTA)의 기류제어 시스템 평면도

아틀랜타 지하철(MARTA)의 경우 강한 돌풍이 일어나는 홈 단의 최대 기류 속도를 5m/s 이하, 계단·에스컬레이터 부분에서 3m/s 이하를 기준으로 하여 (그림 2.1)과 같은 역과 터널 접속부 약 30m 정도의 터널 칸막이벽의 다공(porous)화와 홈 단의 환기 샤프트를 병용하여 기류를 제어하고 있다. 이 결과 승강장에 유입되는 열차풍을 절반 이하로 억제할 수 있게 되었다.

(2) 일본 본¹¹⁾

일본 경왕신선의 초대역은 1978년 (그림 2.2)와 같이 상·하형 복층 정거장으로 건설되었다. 환기방식은 승강장에 기계환기 방식과 자연환기방식을 조합하여 설계하였으나 지상의 조건이 나빠서 자연 통풍구는 설치하지 않았다. 개통 후 열차의 유입시 기류속도가 8-11m/s로 과대해져 승객에게 불쾌감을 주었다.



(그림 2.2) 일본 경왕신선 초대역의 표준 단면도

이와같은 문제점을 해결하기 위하여 2가지 안이 제시되었다. 승강장 양끝에 자연 통풍구를 설치하여 열차풍을 감소시키는 제1안과 승강장하부 양끝에 상하 개구부를 내고 열차풍을 우회(bypass)시켜서 기류속도를 완화하는 제2안이 있었으나 용지 취득 문제로 제1안 대신 제2안이 결정되었다. 개선 전과 개선 후 각

11) 서울특별시지하철건설본부. 서울지하철 6호선 기본설계보고서(기계설비). 1993. 6, pp. 104-105.

단면에 따른 최대기류속도를 비교하면 <표 2.8>와 같다.

<표 2.8> 개선 전과 개선 후 각 단면에 따른 최대기류속도의 비교 (단위 : m/s)

측정 위치		개선전	개선후
상행선	진입시	대합실 계단	9.5
		지하 1층 승강장	9.9
		지하 2층 승강장	5.0
주행	출발시	대합실 계단	4.8
		지하 1층 승강장	7.8
		지하 2층 승강장	7.2
하행선	진입시	대합실 계단	7.5
		지하 1층 승강장	6.2
		지하 2층 승강장	8.5
주행	출발시	대합실 계단	4.5
		지하 1층 승강장	5.5
		지하 2층 승강장	11.5
실측일		1978년 11월	1980년 2월

(3) 싱가포르

민영기업인 매스 래피드 트랜싯(SMRT)이 운영을 하고 있는 싱가포르 지하철의 경우 승강장과 선로 사이를 유리벽으로 막고 있는 스크린 도어 시스템을 설치하고 있다. 이 스크린 도어 시스템은 기류속도의 상승으로 인해 승객에게 주는 불쾌감을 방지할 뿐 아니라 냉방 효과를 높이고 소음을 차단하며 터널의 먼지 유입을 억제하여 쾌적한 공기환경을 제공하는 등 지하철 설비 시스템 중에서 가장 큰 안전성을 가지고 있다.

(4) 기타국가

승객에게 영향을 미치는 기류속도를 감소시키기 위한 요소는 여러 가지가 있다. 열차의 최대속도와 가속·감속 성능을 변경하고 터널경의 크기를 변경하게 되면 기류속도를 줄일 수 있다. 그러나 이 요소들은 막대한 비용이 들게 되며 이 요소들만으로는 최적의 기류속도를 유지하기가 힘들기 때문에 현실적으로는 적용하기 힘들다. 현재까지 미국·영국 등이 수없이 많은 시뮬레이션 및 실측 검증 등으로 열차 주행시 승객에게 영향을 미치는 기류가 다음과 같은 경우에 발생되는 것으로 나타났다.

일반적으로 상·하행선 2열차가 같은 시각에 역에서 동시에 출발하는 경우 계단·에스컬레이터 부분은 최고의 기류속도가 나타나며, 승강장 및 연결통로에는 열차가 진입시 반대쪽 선로에서 열차가 출발하는 경우에 최대의 기류속도가 발생하고 있다. 계단·에스컬레이터 부분의 경우 역에 환기 샤프트를 설치하거나 계단 부분의 단면적을 크게 확보함으로써 상당히 완화시킬 수 있다. 그러나 승강장 및 연결 통로에서 기류속도를 줄이기 위하여 환기 샤프트와 터널간 연결공간이나 역 구내 완화 연결공간을 사용하는 방법이 사용되기는 하지만 큰 영향을 주지는 못하고 있다.

영국의 D. A. Henson은 환기 샤프트의 위치와 면적에 따른 기류속도의 영향에 관한 조사를 하였다. 이 조사는 1,100m 터널 중간에 있는 길이 100m의 역에 열차가 속도 18m/s로 진입하고 1m/s의 속도로 감속하여 10초 후 정지할 때 각각 다른 위치에 있는 9개 역의 기류속도를 비교하였다. 이 조사 결과를 요약하면 환기 샤프트 개구부 면적을 크게 하는 것이 기류속도를 줄이는 데 가장 좋은 방법이지만, 수직 환기공간의 적절한 위치 설정에 따라 기류속도에 차이가 있는 것으로 나타났다.¹²⁾

12) 中川 肇. 지하철의 환경. 서울 : 월간 설비기술, 1995. 5, pp. 56-57.

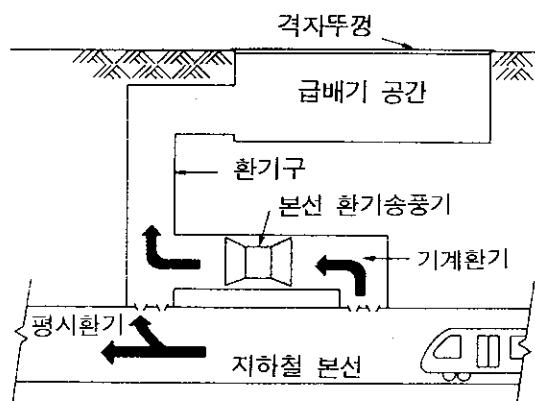
2.1.5 우리나라 지하철 승강장의 기류제어 현황

우리나라의 경우 열차 유입시 발생하는 기류를 줄이기 위하여 현재 사용되고 있는 방법은 터널 환기 샤프트가 있으며 승강장의 계단실과 복도도 환기 샤프트의 역할을 한다.

터널 환기 샤프트란 승강장 진입 전 터널내에 설치하는 것으로 다음과 같은 기능을 한다.

1. 열차가 승강장에 진입하기 전에 승강장 지역으로 유입되는 열차풍을 최소화
2. 터널 내에서 열차 주행과 제동시 발생하는 발열부하를 제거
3. 화재시 배연기능 유지 및 피난로 확보를 위하여 터널의 공기를 최대한 많이 배출시켜 승강장으로 유입되는 송풍량을 줄임

터널 환기 샤프트의 환기방식은 대부분 환기성능을 향상시키기 위하여 기계환기방식을 사용하지만 송풍기의 고장시를 대비하여 자연환기도 할 수 있도록 고려하고 있다. 다음 (그림 2.3)은 전형적인 환기샤프트의 그림이다.



(그림 2.3) 터널 환기 샤프트¹³⁾

13) ASHRAE HANDBOOK. Heating, Ventilating, and Air-Conditioning

2기) 지하철 중 '서울 지하철 6호선 설계기준 보고서'에서 서울 지하철 6호선의 구간에 따른 예상 최대기류속도 <표 2.9>에 관한 대안을 제시하고 있는데 각 구간별로 적용할 수 있는 기류속도의 감소대안은 다음과 같다.

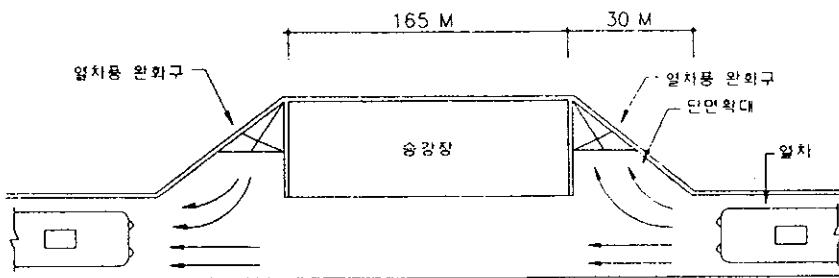
<표 2.9> 서울 지하철 6호선의 구간에 따른 예상 최대기류속도¹⁴⁾

구간	최대기류속도(m/s)		폐쇄율 (%)	승강장형태	비고
	승강장	본선			
단선	순환구간	11.5 ^{*1}	9.2-8.3 ^{*2}	10/23=43	편측상대식
	복층구간	11.5 ^{*1}	9.2-8.3 ^{*2}	10/23=43	편측상대식
	단선병렬구간	11.5 ^{*1}	9.2-8.3 ^{*2}	10/23=43	상대식, 섬식
복선	7.7 ^{*3}	7.2 ^{*4}	10/42=23	상대식	^{*1} : 일본 경왕신선 (초대역) ^{*2} : 일본 동경 12호선 ^{*3} : 서울 1-4호선 ^{*4} : 미국 워싱턴

- 열차에 의한 예상 최대기류속도는 국내의 자료가 충분치 않기 때문에 기존 1-4호선의 실측치와 외국의 자료를 비교하여 유사한 수치를 적용하였다.

1. 순환구간

- 승강장 양단 30m 구간에 열차풍 풍속을 줄일 수 있도록 단면을 확대한다.
- 승강장 양단에 열차풍 완화구를 설치하여 열차풍을 완화시킨다.
- 승강장 지역 공조 환기에 의해서 정압이 유지되도록 한다.



(그림 2.4) 순환구간 승강장의 열차풍 완화구 평면도

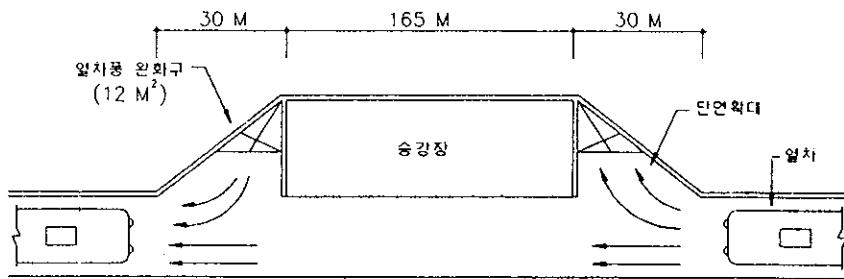
APPLICATIONS. 1995, P. 12.8.

14) 서울특별시지하철건설본부. 서울지하철 6호선 기본설계보고서(기계설비). 1993. 6, pp. 108-110.

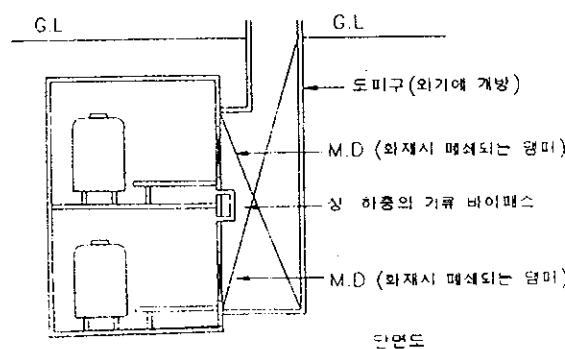
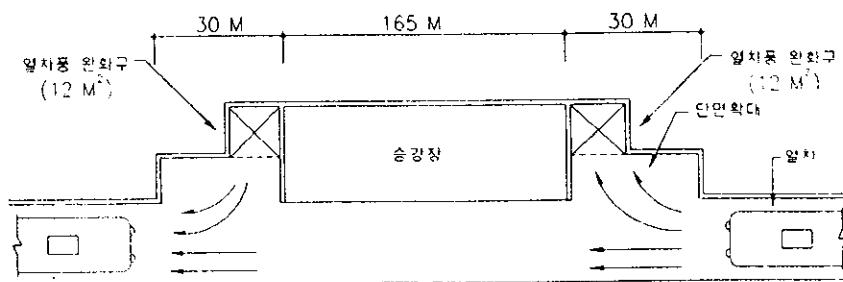
2. 복층구간

- 승강장 양단부 상·하층을 연결하는 완화구를 설치한다.
- 각 층의 완화구 입구에 텁퍼를 설치하여 비상시 폐쇄한다.
- 승강장 양단 30m 구간에 단면을 확대 설치한다.
- 승강장 지역 공조 환기기에 의해서 정압이 유지되도록 한다.

1인 평면도



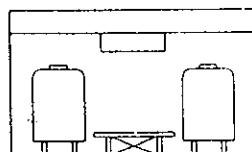
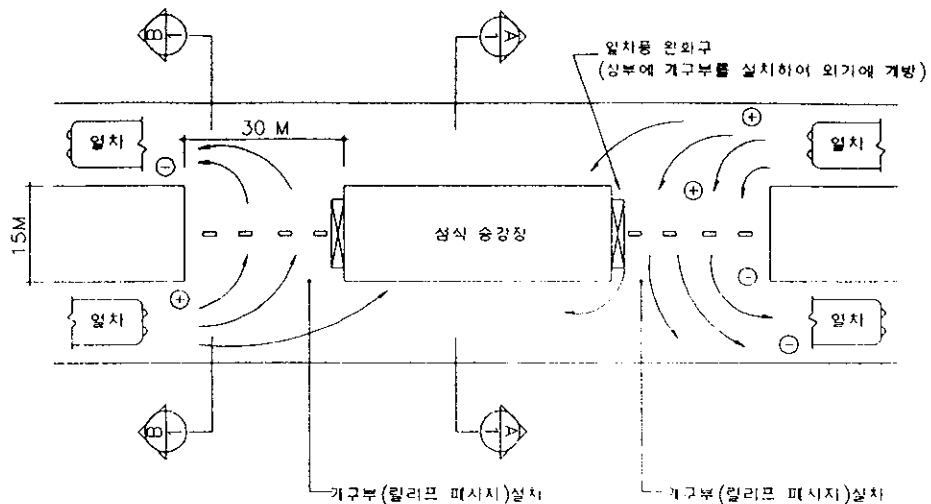
2인 평면도



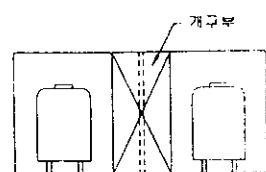
(그림 2.5) 복층 승강장의 열차통 완화구 평면도 및 단면도

3. 단선병렬(섬식)구간

- 승강장 유입전 30m지점에서부터 승강장 양단까지 렐리프 패시지를 설치하여 열차가 승강장에 진입시 압력과 풍속이 확산되도록 한다.
- 승강장 끝단 중앙에 완화구를 설치하여 열차풍을 완화시킨다.



단면 A - A

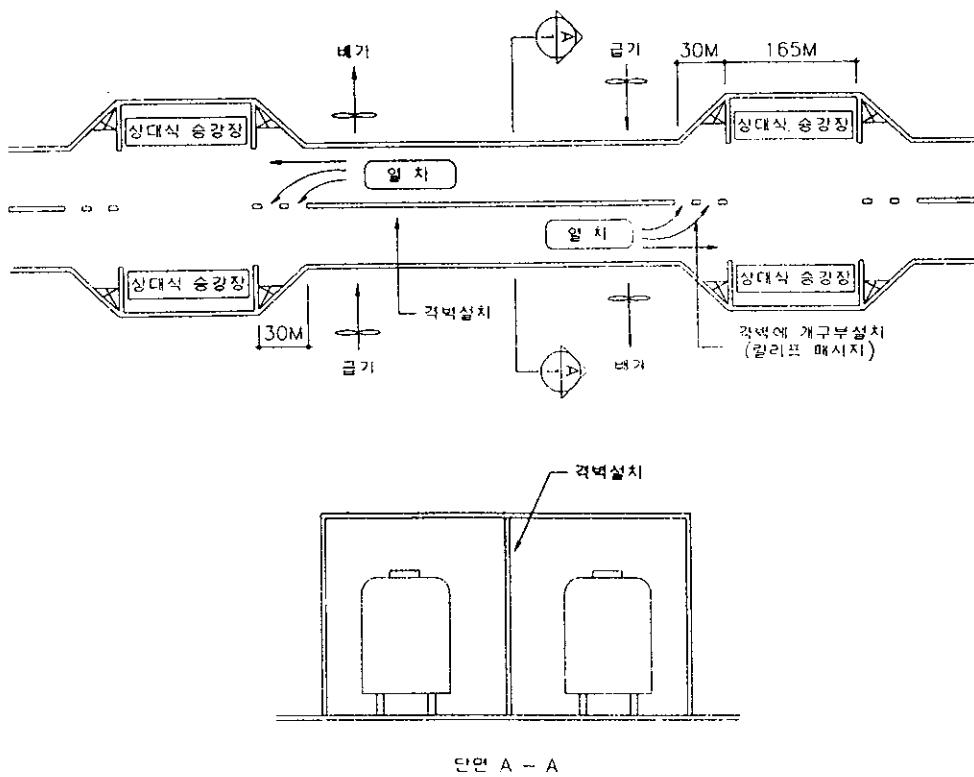


단면 B - B

(그림 2.6) 섬식 승강장의 열차풍 완화구 평면도 및 단면도

4. 복선내 격벽시공 구간

- 승강장 양단 30m에 릴리프 패시지(Relief Passage)를 설치한다.
- 열차가 승강장에 진입하기 전의 위치에 본선 터널의 단면을 확대한다.
- 승강장 양단부에 완화구를 설치하여 외기에 개방한다.



(그림 2.7) 복선 격벽 시공구간 릴리프 패시지(Relief Passage)와
열차풍 완화구 평면도 및 단면도

열차 유입시 발생하는 기류 문제를 가장 완벽하게 해결할 수 있는 스크린 도어 방식은 우리나라에서는 처음으로 대전 지하철 일부 역사에서 사용될 예정이다. 이 스크린 도어 방식은 현재 쾌적성과 안전성 측면에서 가장 이상적인 방식으로 이에 대한 많은 연구가 필요하며 차후 많이 사용될 것으로 예상된다.

2.2 승강장의 기류속도 설계방법을 위한 문헌고찰¹⁵⁾

본 장에서는 기류제어 대안을 설정하기 위한 기초 자료로서 'Subway Environmental Design Handbook'의 내용을 제시하였다. 우선 승강장내 기류속도의 기초 이론식을 정리하고 이를 바탕으로 승강장 기류제어 방식인 터널 환기 샤프트에 의한 기류의 제어, 승강장 구조의 변화에 의한 고속 기류의 제어, 터널내 기류속도 변화에 의한 승강장의 기류속도 제어에 대하여 살펴 보고자 한다.

2.2.1 승강장내 기류속도의 기초 이론식

승강장내 기류속도를 제어하는 방식을 결정하기 위하여 우선 피스톤 운동에 의하여 발생하는 승강장과 본선 터널의 기류속도에 관한 지식들을 숙지하는 것이 필요하다.

승강장내 최대 기류속도는 열차의 속도와 열차 속도에 대한 터널 기류속도비에 의해 좌우되며 터널의 기류저항, 터널 환기 샤프트 내의 저항 및 승강장 내의 저항에 의해 영향을 받는다. 또한 열차와 선로 혹은 근접 선로간의 상호 작용도 기류속도에 영향을 준다. 그러나 여기서 언급하는 계산식은 단일 혹은 복합 선로 시스템에서 한쪽 선로만을 고려한 것이다.

승강장 내의 제트 기류속도(V_{jet})는 다음과 같다.

$$V_{jet} = \beta U(1 - C_m) \quad \dots \dots \dots \quad (2.1)$$

그리고 $\beta = \frac{V}{U}$

15) Prepared by Associated Engineers, a Joint Venture of Parsons, Brinckerhoff, Quade, & Douglas, Inc., DeLeuw, Cather & Company, and Kaiser Engineers. *Subway Environmental Design Handbook, Volume I : Principles and Applications, Second Edition*. U.S Transit Development Corporation, 1976. 3, pp. III-66~III-74.

$$\text{그리고 } C_m = \frac{A_\nu V_\nu}{AV}$$

여기서,

A : 터널의 횡단면 면적(m^2)

A_ν : 터널 환기 샤프트의 기준 면적(m^2)

V : 터널의 기류속도(m/s)

V_ν : 터널 환기 샤프트 내 기준 면적의 기류속도(m/s)

U : 터널 내 열차의 속도(m/s)

β : 열차 속도에 대한 터널 기류속도비

C_m : 터널 환기 샤프트의 단위 부피당 기류속도비

승강장의 저항

승강장의 저항을 계산하기 위하여 C_m 값이나 β 값은 필수적인 변수이다. 승강장의 저항 Z 값은 부피 보존에 관한 계산식과 에너지 계산식을 연속적으로 대입하여 계산할 수 있다. 승강장의 저항(Z)은 다음과 같다.

$$Z = \frac{P_s - P}{\frac{\delta V_{jet}^2}{2g}} = \frac{A^2}{\left(\sum_{k=1}^N \frac{A_k}{\sqrt{C_k}} \right)^2} = \frac{A_2}{\left(\frac{A_1}{\sqrt{C_1}} + \frac{A_2}{\sqrt{C_2}} + \dots \right)^2} \quad \dots \dots \dots \quad (2.2)$$

여기서,

P_s : 승강장내의 정압

P : 승강장으로 흐르는 상행 터널의 정압

δ : 중량비중(kg/m^3)

V_{jet} : 터널 내에서 열차 전면의 기류속도(m/s)

g : 중력가속도(m/s^2)

A : 진입터널의 면적(m^2)

A_k : k 지점의 터널 환기 샤프트, 터널, 계단의 면적(m^2)

C_k : A_k 공간의 기준이 되는 k 지점의 터널 환기 샤프트의 저항 계수(속도수두)

터널의 저항계수를 계산하는 식(C_T)을 위한 요소들은 터널 입구의 급격한 축소에 의한 손실, 승강장과 터널 환기 샤프트 간의 마찰 손실, 터널 환기 시스템의 저항이 있다.

그러므로,

$$C_T = C_C + f \frac{L}{D} + C_{\Delta PO} \quad \dots \dots \dots \quad (2.3)$$

그리고

$$C_{\Delta PO} = \frac{\frac{P_1 - P_\infty}{\delta}}{\frac{2g}{V^2}}$$

여기서,

C_C : 출구 터널의 축소에 의한 저항 계수(속도수두)

$f \frac{L}{D}$: 승강장과 둘출 샤프트 간의 터널 마찰 손실(속도수두)

$C_{\Delta PO}$: 터널 환기 시스템의 저항계수(속도수두)

f : Darcy-Weisbach 마찰 저항 계수

L : 터널길이(m)

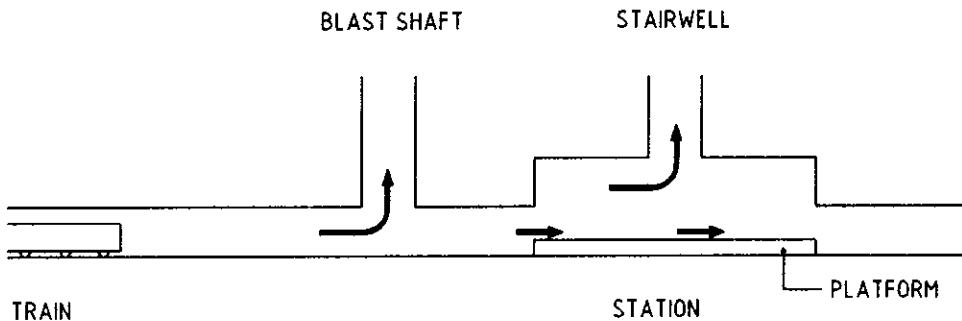
D : 터널지름(m)

P : 승강장으로 흐르는 터널의 정압

V : 터널의 기류속도(m/s)

송풍 기류 분리의 계산

승강장의 저항이 결정되면 피스톤 운동으로 인하여 열차 전면부가 유입시키는 터널 공기를 터널 환기 샤프트로 유입되는 기류와 승강장으로 유입되는 기류로 분리하여 계산할 수 있다(그림 2.8). 터널 환기 샤프트의 기류 분리(C_m)는 다음과 같다.



(그림 2.8) 터널 환기 샤프트의 기류분리

$$C_m = \frac{1}{1 + \frac{A}{A_v \sqrt{\frac{C_{\Delta P}}{Z}}}} \quad \dots \dots \dots \quad (2.4)$$

그리고

$$Z = f \frac{L}{D} + C_e + Z \quad \dots \dots \dots \quad (2.5)$$

여기서,

$f \frac{L}{D}$: 승강장과 터널 환기 샤프트 간의 마찰손실

C_e : 기류가 승강장 공간으로 팽창할 때의 터널 팽창 손실

Z : 승강장의 저항

A : 터널의 횡단면 면적(m^2)

A_v : 터널 환기 샤프트의 기준 면적(m^2)

C_{APS} : 터널 환기 샤프트의 수두손실

승강장 팽창 속도 계산

제트기류가 팽창하면서 속도는 감소하게 된다. 승강장 전체의 팽창 속도(V_s)를 구하는 식은 다음과 같다.

$$V_s = \beta U(1 - C_m)^\alpha \quad \dots \dots \dots \quad (2.6)$$

여기서,

β : 열차 속도에 대한 터널 기류속도비

U : 터널내 열차의 속도(m/s)

α : 승강장 면적에 대한 터널의 면적비

C_m : 터널 환기 샤프트의 단위 부피당 기류속도비

2.2.2 터널 환기 샤프트에 의한 기류의 제어

터널 환기 샤프트는 승강장 가까이에 배치하여 터널의 기류를 배출시켜 승강장으로 송풍되는 기류의 양을 감소시켜야 하며, 저항을 최소화하여 터널 환기 샤프트를 따라 외기로 송풍되도록 해야 한다. 또한 터널 환기 샤프트의 저항이 승강장의 저항보다 낮을 때 그만큼 효율이 높아지게 된다. 일반적으로 터널 환기 샤프트에 대규모 배출 팬이 설치되지 않을 경우 승강장으로 송풍량 제어에 별다른 영향을 미치지 못하게 된다.

터널 환기 샤프트의 위치가 미치는 영향

터널 환기 샤프트와 승강장 사이의 터널 기류 저항을 증가시키기 위하여 터널의 길이를 길게 만들면 된다. 하지만 터널의 길이가 너무 길어지게 되면 제동하는 열차가 터널 환기 샤프트를 통과한 후 발생한 열차풍이 승강장으로 유입된다.

터널 환기 샤프트와 열차 속도를 제어하게 되면 승강장으로 유입되는 기류의 최대속도를 감소시킬 수 있다. 다음 식들은 승강장과 터널 환기 샤프트의 거리 (L_v)를 산정하기 위하여 필요하다.

터널 환기 샤프트를 통과하기 전 지점에 열차가 위치해 있을 때 승강장 내의 기류속도(V_{max})는 다음과 같다.

$$V_{max} = U_{max} (1 - C_m) \beta \quad \dots \quad (2.7)$$

여기서,

U : 터널 내 열차의 속도(m/s)

C_m : 터널 환기 샤프트의 단위 부피당 기류속도비

β : 열차 속도에 대한 터널 기류속도비

그리고 열차가 터널 환기 샤프트를 통과했을 때 승강장 내의 기류속도(V_{max})는 다음과 같다.

$$V_{max} = U \beta \quad \dots \quad (2.8)$$

터널 환기 샤프트에서 전체 제동거리까지 기차가 움직이는 거리 L_b 에 의하여 2. 13의 V_{max} 와 2. 14의 V_{max} 는 같게 된다.

따라서,

$$L_b = \frac{2C_m - C_m^2}{S} \quad \dots \dots \dots \quad (2.9)$$

여기서,

C_m : 터널 환기 샤프트의 단위 부피당 기류속도비

S : 기차가 제동하기 시작한 거리부터 터널 환기 샤프트까지의 거리(m)

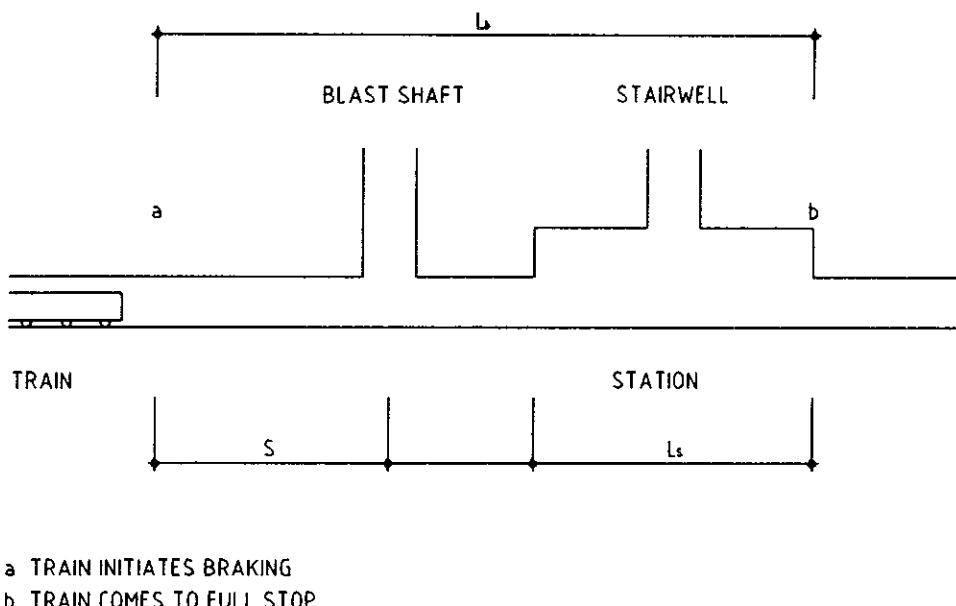
그리고 승강장과 터널 환기 샤프트 간의 거리(L_v)는 다음과 같다.

$$L_v = L_b(1 - 2C_m + C_m^2) - L_s \quad \dots \dots \dots \quad (2.10)$$

여기서,

C_m : 터널 환기 샤프트의 단위 부피당 기류속도비

L_s : 승강장 길이(m)



(그림 2.9) 기차속도, 터널 환기 샤프트의 위치, 환기량의 관계

위의 식을 통해 L_v 값이 실제 거리보다 클 때 최대 기류속도는 열차가 터널 환기 샤프트에 도달하기 전에 발생함을 알 수 있다. 만일 L_v 값이 실제 거리보다 작을 때 최대 기류속도는 열차가 승강장과 터널 환기 샤프트 사이에 있을 때 발생한다. 기류 분리가 크고, 터널 환기 샤프트가 승강장에서 너무 멀리 떨어져 있을 경우 C_m 값(터널 환기 샤프트의 단위 부피당 기류속도비)은 별다른 영향을 주지 못한다. 만일 터널 환기 샤프트가 열차가 제동하기 전의 지점에 있을 때는 승강장으로 유입되는 기류의 최대 속도를 줄이는 효과를 기대할 수 없다.

팬 설비가 있는 터널 환기 샤프트

터널 환기 샤프트 팬의 유무에 상관없이 터널에서 환기 샤프트로 흐르는 기류의 계산은 위에서 언급한 방법으로 계산된다. 기류는 공기가 흐르는 방향의 상대 저항에 의해 분리되지 않는다. 대신 팬에 의해 일정한 비율로 기류가 배출된다. 이 경우 팬의 능력이 커질수록 승강장으로 송풍되는 기류속도의 크기가 작아지게 된다.

예를 들어 96km/h의 속도로 운행하는 열차는 본선 터널 내에 12.7m/s의 기류를 발생시키며, 기류량이 약 $14,160\text{m}^3/\text{min}$ 이라고 가정한다. 기류가 단면적 18.6m^2 의 터널을 통과하고 단면적 46.5m^2 인 승강장에 유입하게 되면, 제트 기류 속도는 12.7m/s 에서 팽창하여 5m/s 로 감소하게 된다. 또한 제트 기류속도가 수동 터널 환기 샤프트에 의해 5m/s 로 감소할 때 C_m 값(터널 환기 샤프트의 단위 부피당 기류속도비)은 0.6이 된다. 이와 같이 높은 C_m 값을 가진 수동 터널 환기 샤프트는 실제로 존재하기 어렵다. 그러므로 터널 환기 샤프트로 배출되는 공기량을 증가시키기 위해서 팬을 설치할 수 있다. 터널 환기 샤프트 내에 팬을 설치할 경우 터널 환기 샤프트는 $14,160\text{m}^3/\text{min}$ 중 60%를 배출해야 송풍량을 줄일 수 있으며 따라서 $8,500\text{m}^3/\text{min}$ 용량의 팬이 필요하다.

2.2.3 승강장의 형태 변화에 따른 기류의 제어

승강장의 형태는 승강장 내의 고속 기류에 영향을 미친다. 이를 3가지로 분류해 보면 다음과 같다.

- 승강장의 저항은 터널 환기 샤프트를 통과하여 승강장으로 송풍되는 기류에 상당한 영향을 미친다.
- 승강장의 횡단면은 승강장 내의 기류 팽창에 영향을 줄 뿐만 아니라 승강장의 체적 속도에도 영향을 미친다.
- 계단실과 복도의 횡단면 면적과 저항은 계단실과 복도의 기류속도에 영향을 준다.

승강장의 저항

터널 환기 샤프트의 기류 분리에 변화를 주게 되면 승강장의 저항에 변화가 생기게 되며 승강장의 저항을 증가시켜 주면 유입되는 기류를 다소 줄일 수 있다. 승강장의 저항은 일반적으로 터널 환기 샤프트와 다른 터널을 통해 기류가 외기로 배출될 때 발생하는 소규모 저항에 의해 좌우된다. 터널 환기 샤프트에서부터 승강장의 저항을 높임으로써 승강장으로 유입되는 공기량을 줄일 수 있다.

승강장 횡단면의 변화

빠른 속도로 승강장으로 유입되는 기류는 승강장 횡단면의 크기에 따라 팽창하여 감소하게 되며 보통 열차가 진입하는 승강장의 15m~45m의 위치에서 감소하게 된다. 승강장 중에 최대 속도가 발생하는 곳은 터널 입구이다. 승강장의 횡단면을 크게 한다고 해서 제트 속도가 큰 규모로 변하는 것은 아니다. 따라서 기류를 제어하는 방법으로 기류가 승강장에 유입하기 전에 전이 구역을 만들어 그곳에서 1차적으로 제트 기류를 팽창시키는 렐리프 패시지를 사용할 수 있다.'

계단실과 복도의 기류속도

승강장은 밀폐공간의 역할을 하기 때문에 계단실의 기류속도는 승강장의 전체 저항과 계단실의 저항에 의해서 영향을 받는다.

출구 터널과 계단실의 기류속도(V_k)는 다음 식에 의해서 결정된다.

$$V_k = V_{jet} \sqrt{\frac{Z}{C_k}} \quad \dots \dots \dots \quad (2.11)$$

V_{jet} : 승강장의 제트 기류속도(m/s)

Z : 승강장의 저항

C_k : k지역 터널 환기 샤프트의 저항 계수

2.2.4 터널내 기류속도 변화에 의한 승강장 기류의 제어

터널의 기류속도를 감소시켜 승강장의 고속 기류를 제어하는 방법에는 두 가지 방법이 있다. 첫 번째는 열차의 속도를 제한하는 방법이며 두 번째는 열차 속도와 터널 기류속도간의 비를 줄일 수 있는 터널과 환기 구조를 설계하는 방법, 즉 낮은 β 값을 갖도록 설계하는 것이다.

열차의 속도 제한

지하철 승강장 내에 흐르는 기류는 열차의 속도에 비례한다. 따라서 열차의 속도를 감소시키면 터널 내의 기류속도가 감소하게 된다. 열차의 속도를 제한하는 것은 기류속도를 제어하는 가장 좋은 방법이다. 그러나 현실적으로 열차 운행시 불가능하다.

터널과 환기 구조를 낮은 β (열차 속도와 터널 기류속도간의 비)값을 갖도록 변형

기류속도를 줄이는 다른 방법은 기류가 승강장으로 유입되기 전에 속도를 감소시키는 것이다. 따라서 지하철 시스템의 β 값을 낮은 값으로 설계해야 한다. β 값을 낮게 설정하는 데 영향을 주는 변수는 폐쇄율¹⁶⁾과 다공성이다.

폐쇄율(δ)을 낮게 하면 터널을 통과하는 기류의 체적 속도가 분산되는 것을 돋는다. <표 2.10>은 폐쇄율과 속도비간의 관계를 나타낸 것이다. 이 때 열차의 길이는 ($l/d=60$)이며 터널의 표면은 돌출이 없고 터널 환기 샤프트가 일정한 크기를 갖는다는 가정하에 얻어진 값이다.

<표 2.10> 폐쇄율과 속도비간의 관계

폐쇄율(δ)	속도비(β)
0.50	0.60
0.25	0.37
0.125	0.25

칸막이 벽의 개구부 면적비를 다공성이라 한다. 만일 중앙 분리벽이 없으면 다공성은 100%가 되며 칸막이 벽에 개구부가 없으면 다공성은 0%가 된다. 축척 모델 실험을 통해 다공성이 5% 이하일 경우 터널은 원거리 기류 현상으로 인하여 공기 역학적으로 개방 터널의 특성을 갖게 된다. 그러나 근거리 기류 현상의 경우 개방 터널과 다공성이 낮은 터널간의 특성은 다르다. 승강장 근처에서 중앙분리 칸막이 벽에 개구부를 뚫는 것은 승강장의 송풍 기류를 감소시킬 수 있는 효과적인 방법이다.

16) 폐쇄율 : 터널 면적에 대한 열차의 면적비

제 3 장 사례를 통한 승강장의 기류분포 특성에 관한 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션의 개요

본 장에서는 서울 지하철 7호선 N역을 대상으로 하여 열차 유입시 승강장에 발생하는 기류분포 특성을 파악하기 위해 여러 가지 유동문제를 해석하는 상용 프로그램인 STAR-CD를 이용하여 시뮬레이션을 하였다.

3.1.1 시뮬레이션 프로그램의 개요¹⁷⁾

본 연구의 시뮬레이션에서 사용된 프로그램은 형상 모델링이 쉽고 복잡한 공간에서 유동해석 능력이 뛰어난 STAR-CD를 사용하였다. 난류현상을 예측하기 위하여 $k-\varepsilon$ 모델을 사용하였으며, 유한 체적법(finite volume method)을 사용하였다. 또한 시뮬레이션 프로그램인 PHOENICS, FLUENT, FLOW3D 등과 같이 비조직격자를 사용하는 이 프로그램은 복잡한 형상의 공간에서 격자생성을 용이하게 하고 국부적으로 계산격자를 밀집시킬 수 있어 효율적인 계산격자를 생성하여 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그리고 무엇보다도 물체를 이동시킬 수 있는 특징을 가지고 있기 때문에 열차가 움직여서 열차풍을 형성하는 실제의 상황과 거의 유사한 결과를 얻을 수 있다.

STAR-CD 프로그램은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

1. Finite Volume Method
2. Body-fitted Non-orthogonal Coordinate System
3. Unstructured Grid, Including Local Mesh Refinement Capability
4. Range of Cell Shape(Prick, Prism, Pyramid, Tetrahedron)

17) *STAR-CD V2.3 Manual, Computational Dynamics.* 1995.

5. Rotating & Distorting Mesh Capability
6. Dynamic cell Insertion / Deletion
7. Collocated Mesh

또한 본 시뮬레이션에서는 많은 시간을 필요로 하는 격자 생성(Grid Generation)을 보다 쉽게 하기 위하여 ICEM 프로그램이 사용되었으며, 계산용 컴퓨터는 대덕 연구단지 시스템 공학 연구센터의 CRAY-C90 Super Computer를 사용하여 계산을 수행하였다.

3.1.2 평가대상 지하철 역사의 개요

본 연구에서는 서울 지하철 7호선 N역을 평가 대상으로 시뮬레이션을 하였다. 역사의 규모는 지하 1층~지하 3층의 구조로 승강장 부분이 지하 3층에 위치하고 있다. 승강장의 길이는 165m이고 총고는 5.8m이며 천정고는 2.8m~3.3m이다. 승강장 형식은 섬식¹⁸⁾이고 터널은 단선병렬 형태이다. 단선병렬 터널의 특성 및 적용환기방식은 <표 3.1>과 같으며 승강장의 평면 및 단면은 (그림 3.1)과 같다.

3.1.3 시뮬레이션 결과의 평가기준

2.1.3절 '지하철 승강장의 기류환경 기준 고찰'에서 검토 분석한 결과 지하철 승강장의 기류속도 기준으로 적용될 수 있는 것은 뷔포트 스케일(Beaufort Scale)과 ASHRAE 기준이다. 뷔포트 4(5m/s)의 기류속도는 승객들의 몸가짐에 영향을 줄 수 있는 정도이므로 시뮬레이션 결과의 평가기준으로 이 기준 이하의 기류속도를 적절한 값으로 선정하였으며 ASHRAE도 최대 기류속도를 5m/s로 제한하는 것이 바람직하다고 제시하고 있다.

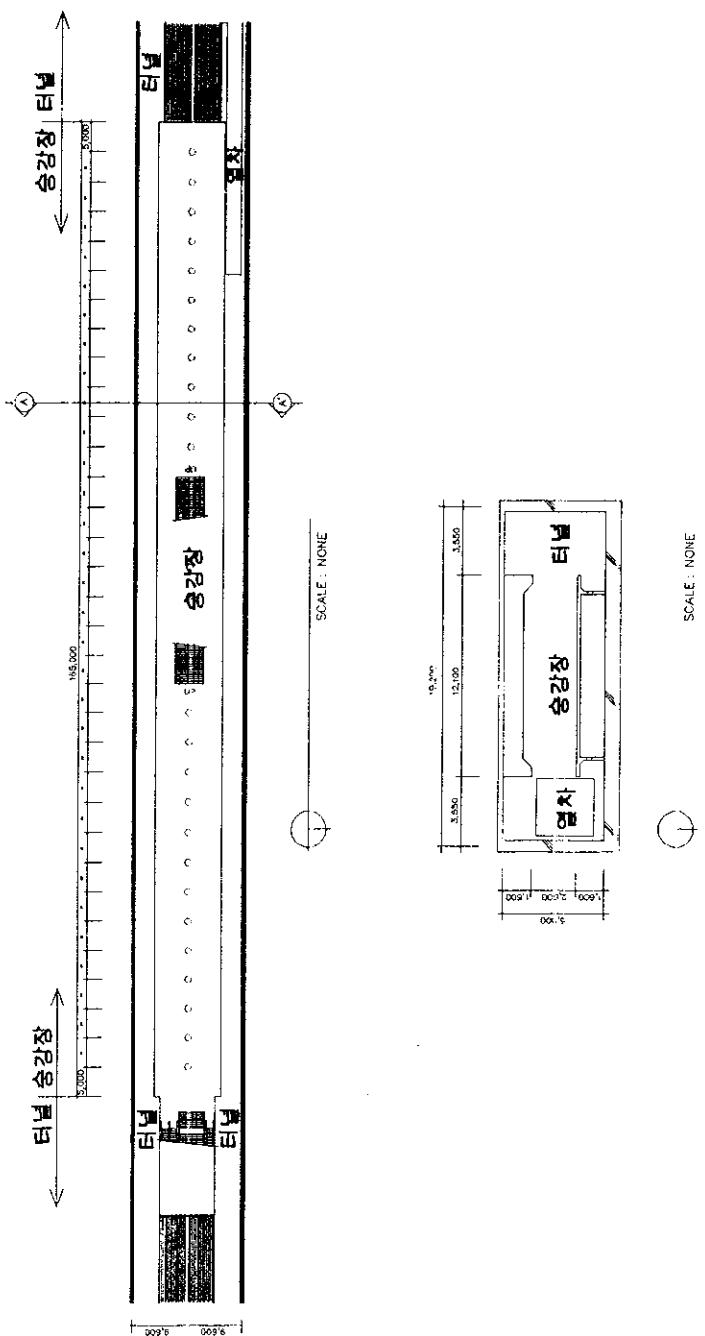
평가기준 : 기류속도 5m/s 이하

18) 섬식 : 중간에 승강장이 위치하고 양쪽으로 터널이 배치되어 있는 형식

<표 3.1> 단선병렬 터널의 특성 및 적용환기방식(N역사)¹⁹⁾

항 목	내 용
개념도	
열차주행방향	한 방향
특성 및 적용 환기방식	<ol style="list-style-type: none"> 열차의 주행방향이 한방향으로 진행되며 주행방향 전면에 정압이 발생하고 후면에 부압이 발생 열차의 주행방향에 따라서 피스톤 효과에 의한 기류발생 열차가 승강장 진입시에 발생하는 열차풍을 제어할 수 있도록 진입측 역사인접 터널내에 배기용 환기 샤프트 설치 승강장에서 열차가 출발시 발생하는 부압에 의한 영향을 최소화 하기 위하여 출발측 역사인접 터널내에 급기용 샤프트 설치

19) 서울특별시지하철건설본부. 서울지하철 6호선 기본설계 요약 보고서(기계 설비). 1993. 6.



(그림 3.1) 대상 시뮬레이션 승강장의 평면 및 단면

3.1.4 시뮬레이션 방법 및 조건

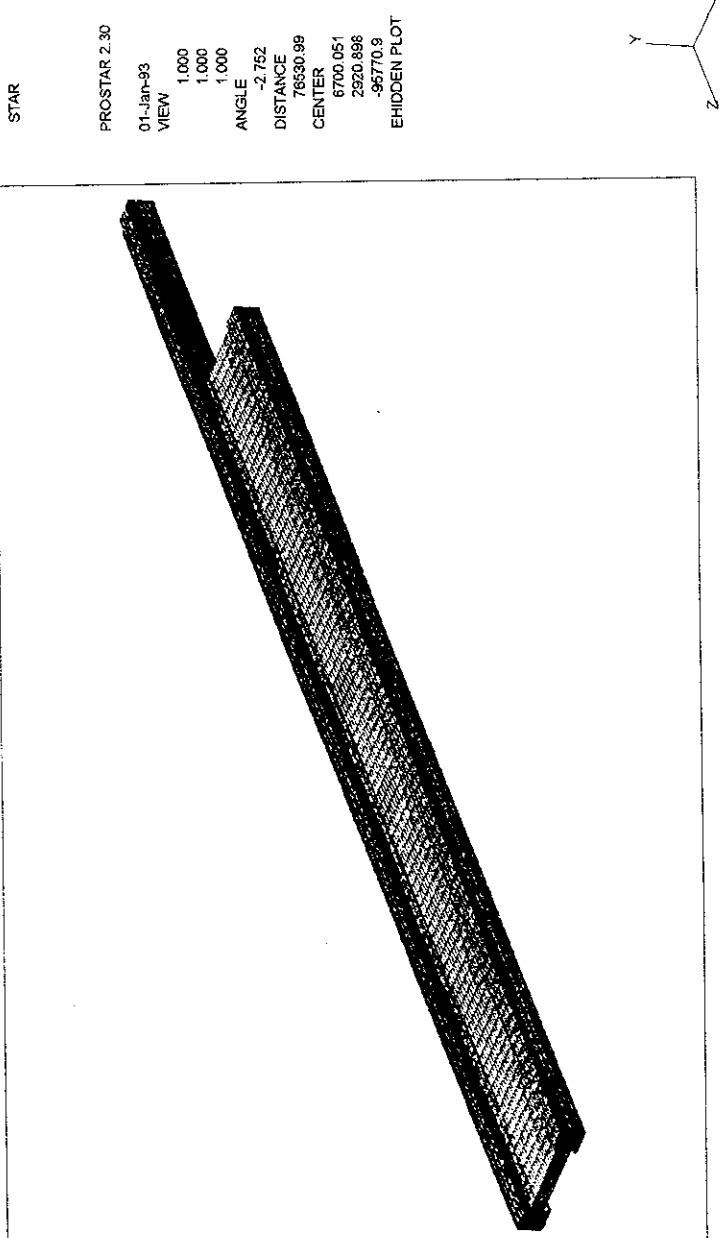
본 연구에서는 승강장의 기류분포 특성을 파악하기 위해 3.1.2절 '평가대상 지하철 역사의 개요'에서 선정한 공간을 대상으로 시뮬레이션을 하였다.

시뮬레이션 범위는 N역 승강장(164m)을 기준으로 하여 좌측 터널길이 10m, 우측 터널길이 150m로 전체 길이는 324m이다. 그리고 승강장 우측 끝 지점에서 60m지점에 본선 터널의 환기 샤프트(소요환기량 : 3,620CMM)가 설치되어 있다. 이 터널 환기 샤프트는 열차 유입시 발생하는 열차풍을 외기로 배출시키는 역할을 한다. 승강장에는 4호선과 환승하기 위한 계단실이 원쪽에 있으며 중심부에는 2개의 출구용 계단이 배치되어 있다.

본 연구에서 사용한 격자계는 (그림 3.2)에 나타나 있으며, 계산에는 약 35만 개의 계산 격자가 사용되었다. 그리드 간격은 길이 방향은 시뮬레이션 특성상 열차의 이동을 위하여 등분포로 나누어야 하기 때문에 1m간격으로 하였으며 단면 방향은 승강장 구조체의 형상에 따라 부등분포로 적절하게 나누었다. 계산에는 314 time step에 약 96시간이 소요되었다.

시뮬레이션에 필요한 기준 및 조건은 '지하철 7호선 정거장 및 본선 실시설계 기계설비 설계 보고서'를 참조하여 실제 설계 기준과 동일한 입력값으로 하였다. N역 승강장의 설계 기준 및 조건은 <표 3.1>과 같다.

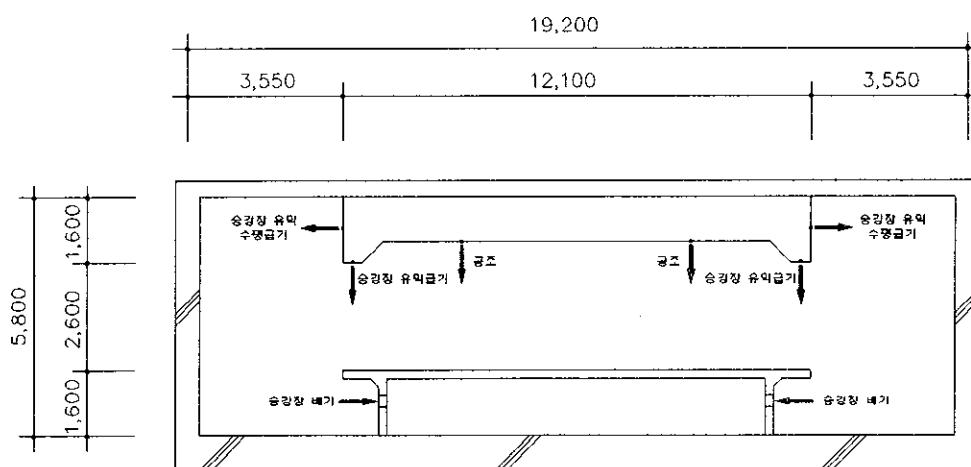
본선 터널의 단면적은 $27m^2$ 이고 터널 천장의 형상은 타원으로 되어 있으나 시뮬레이션에서 사용된 단면 형상은 폭 4.5m, 높이 6m, 단면적 $27m^2$ 인 직사각형으로 하였다. 또한 공조 취출구, 승강장 유막 수평 급기구, 승강장 하부 배기구의 형태는 직사각형으로 등분포 배치되어 있으나 (그림 3.3)과 같이 시뮬레이션 특성상 동일 면적의 라인 디퓨저 형태와 라인 배기구 형태로 변경하여 시뮬레이션하였다. 그러나 소요풍량은 실제로 본 역에서 취출되는 일정한 값을 사용하였다.



(그림 3.2) 터널과 송강장의 계산 격자

<표 3.2> N역 승강장의 설계기준 및 조건²⁰⁾

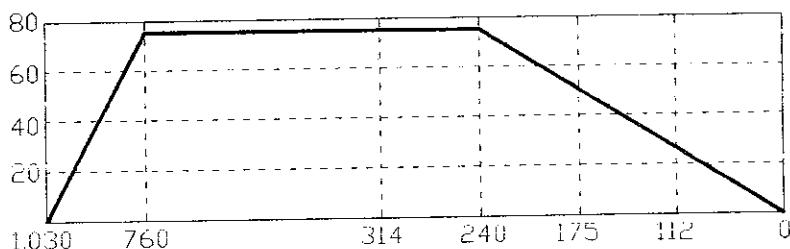
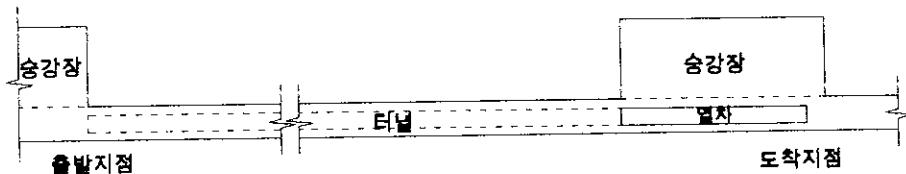
설계조건		입력값
승강장의 온습도 설계조건	건구온도	28°C
	상대습도	70% 이하
차량조건	차량 단면적	10m ²
	차량 길이	160m
	주행속도	75km/h
	감속도	3.5km/h/s
	소요 냉방풍량	96,600CMH
공조조건	승강장 유막 수평급기	115,500CMH
	승강장 유막 수직급기	49,500CMH
	승강장 하부 배기	261,600CMH
	터널 단면적(단선터널)	27m ²
본선터널	환기 샤프트의 소요 환기량	3,620CMM
	환기 샤프트의 기류속도	2.24m/s
	환기 샤프트의 단면적	27m ²



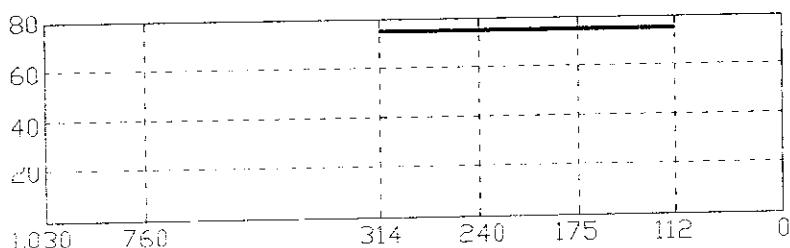
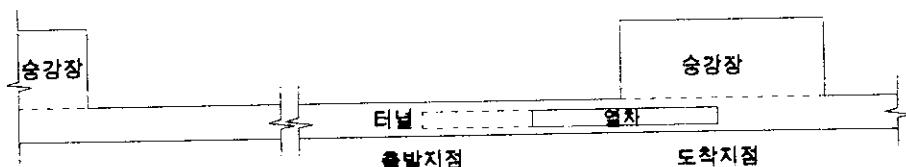
(그림 3.3) 승강장의 공조·배기 개념도

20) 종합건축사사무소 시공, 삼신 설계 주식회사. 지하철 7호선 3공구 정거장 및 본선 실시설계 기계 설비 설계 계산서. 1992. 8.

또한 열차의 이동은 실제로는 (그림 3.4)와 같이 도착지점에서 1,030m 떨어진 이전 승강장에서 출발하여 가속(3km/h/s), 등속도 운전(75km/h), 감속(3.5km/h/s), 및 정지로 이어지나 본 시뮬레이션에서는 실제의 열차이동 조건을 그대로 입력하는 것이 불가능하기 때문에 (그림 3.5)와 같이 1,044m 떨어진 터널 위치에서 75km/h의 정속도로 출발하여 터널과 승강장의 경계지점에서 58m를 이동하는 것으로 계산했다.



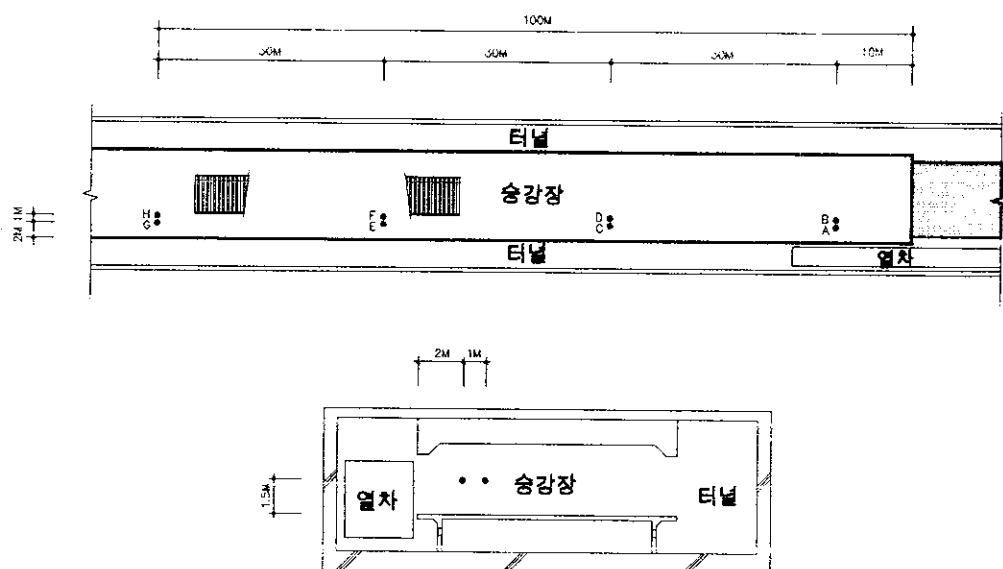
(그림 3.4) 열차 운행 거리-속도 변화표



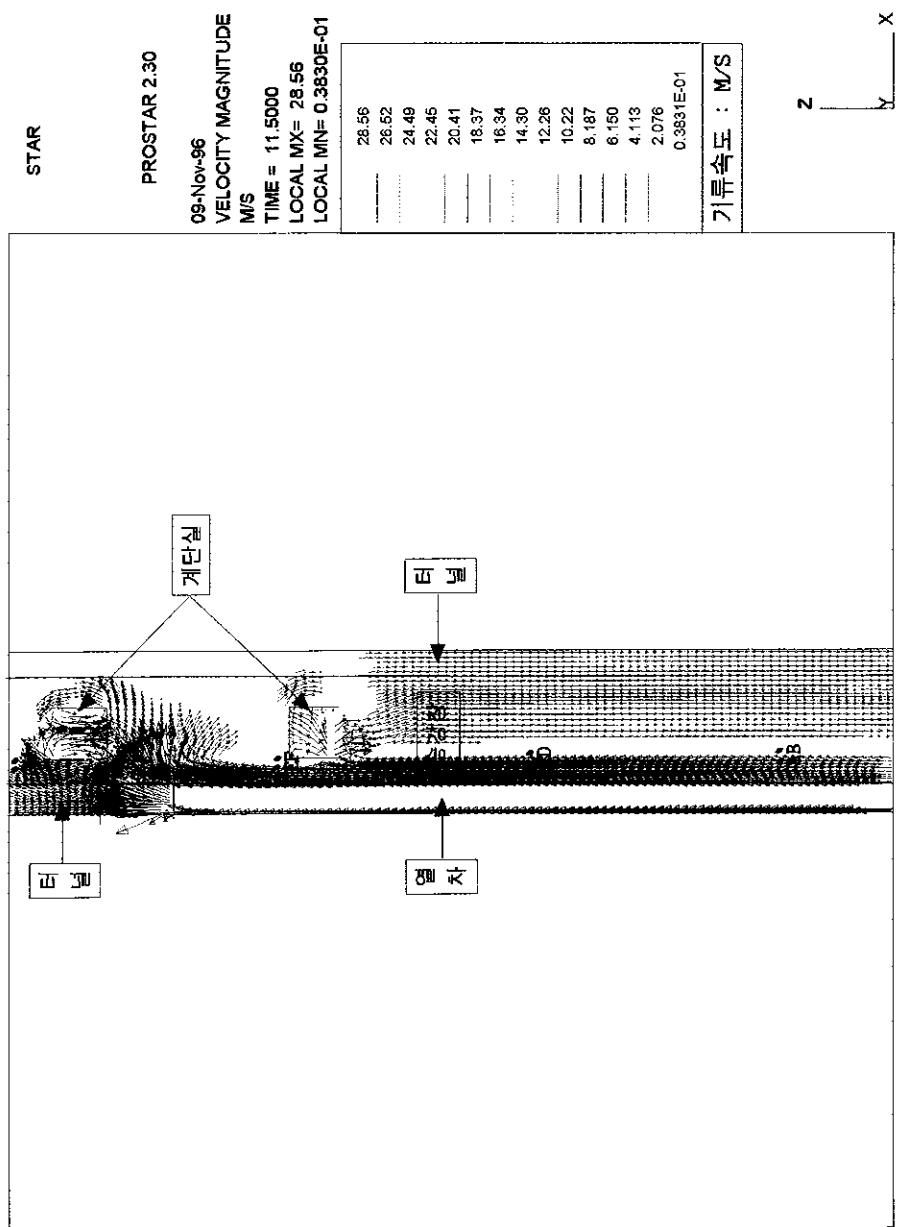
(그림 3.5) 시뮬레이션에 사용된 열차운행 거리-속도 변화표

3.2 시뮬레이션 결과 및 분석

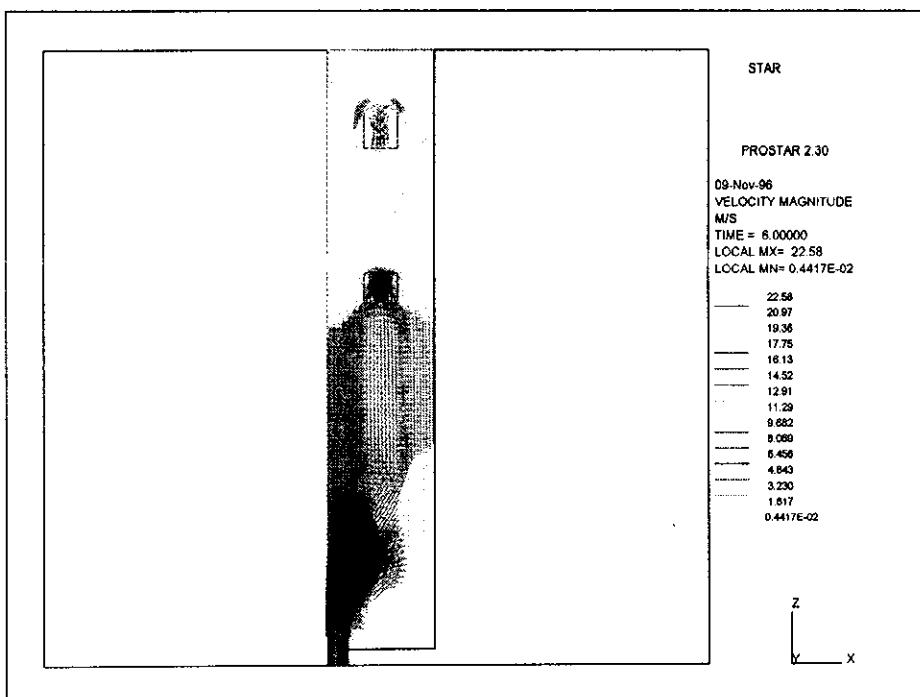
본 시뮬레이션에서는 승강장에서 높이 1.5m 지점(승객의 얼굴높이)에서 승강장 길이방향으로 열차 유입시 열차풍의 영향을 가장 많이 받는 승강장이 시작되는 곳(열차가 승강장에 진입하는 지점)에서 10m 떨어진 지점(A, B)부터 열차가 유입하는 방향으로 30m 간격마다(C, D), (E, F), (G, H)를 설정하였으며, 승강장 단면방향으로는 열차에서 2m 떨어진 부분(열차가 들어올 때 승객들이 대기하는 안전선에서 1~1.5m 정도 떨어진 곳)(A, C, E, G)와 3m 떨어진 부분(B, D, F, H)을 설정하여 시뮬레이션 결과를 평가하였다(그림 3.6). 열차가 터널에서 승강장으로 이동할 때 각 지점에 발생하는 기류속도는 (그림 3.8)~(그림 3.13)과 같다.



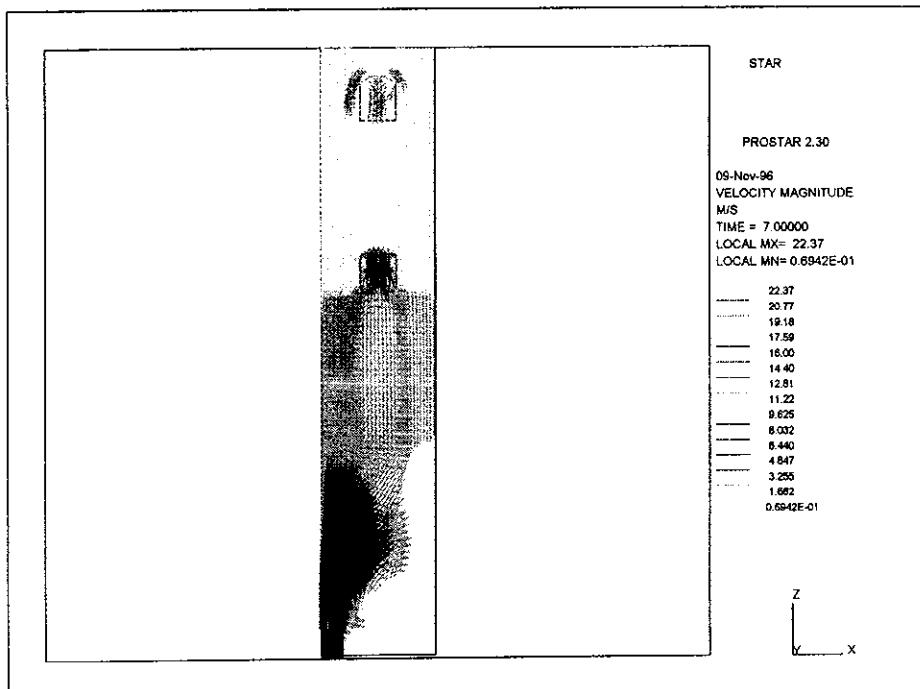
(그림 3.6) 시뮬레이션 비교평가 지점의 위치



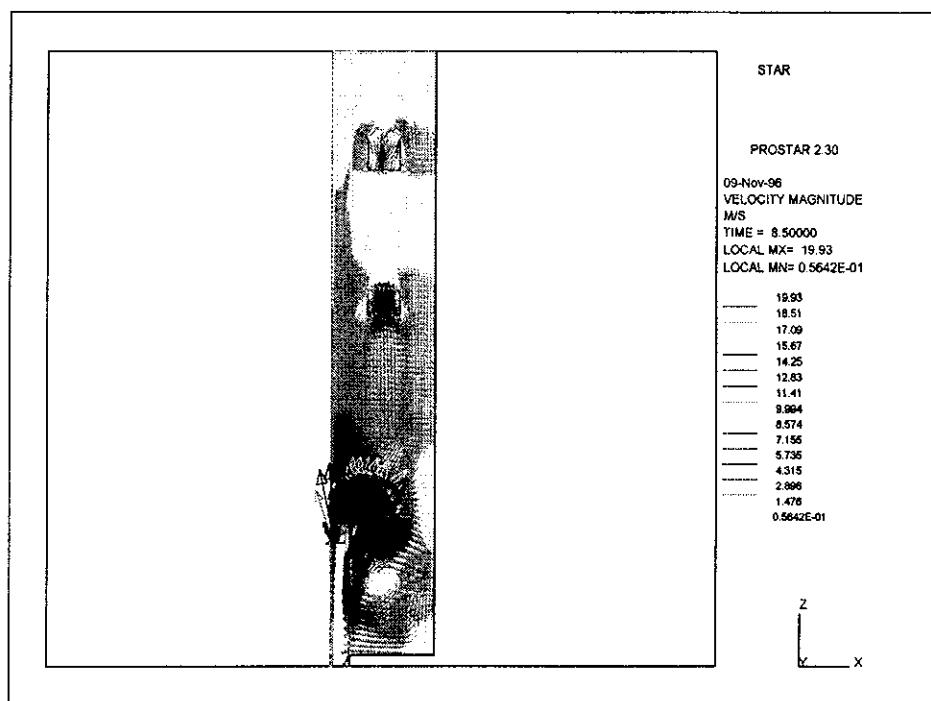
(그림 3.7) 열차가 승강장에 들어올 때 발생하는 기류속도



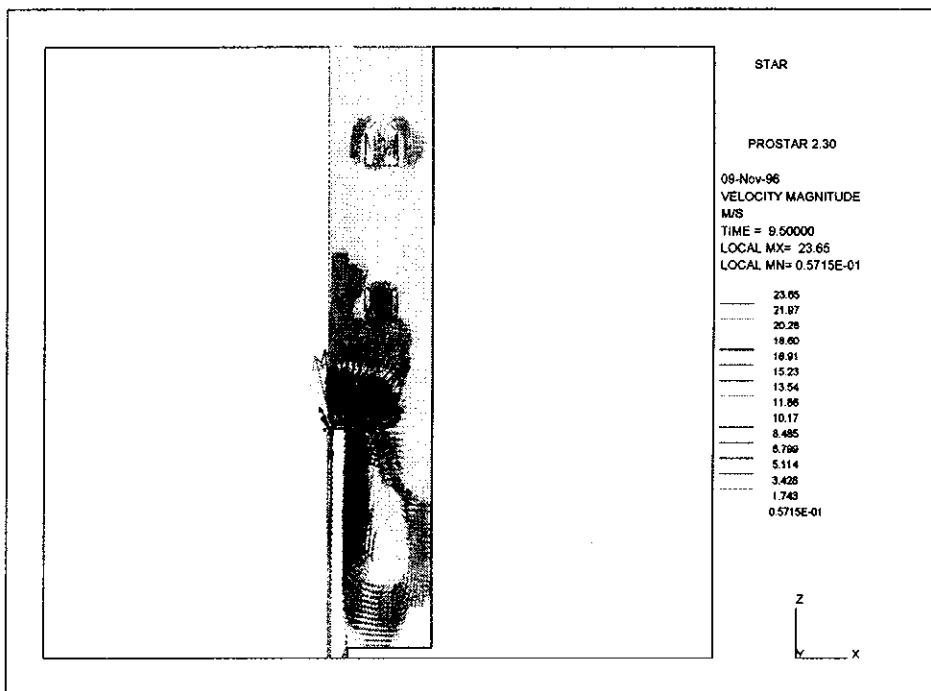
(그림 3.8) 열차가 승강장 진입전 24m위치에 있을때의 기류속도 분포



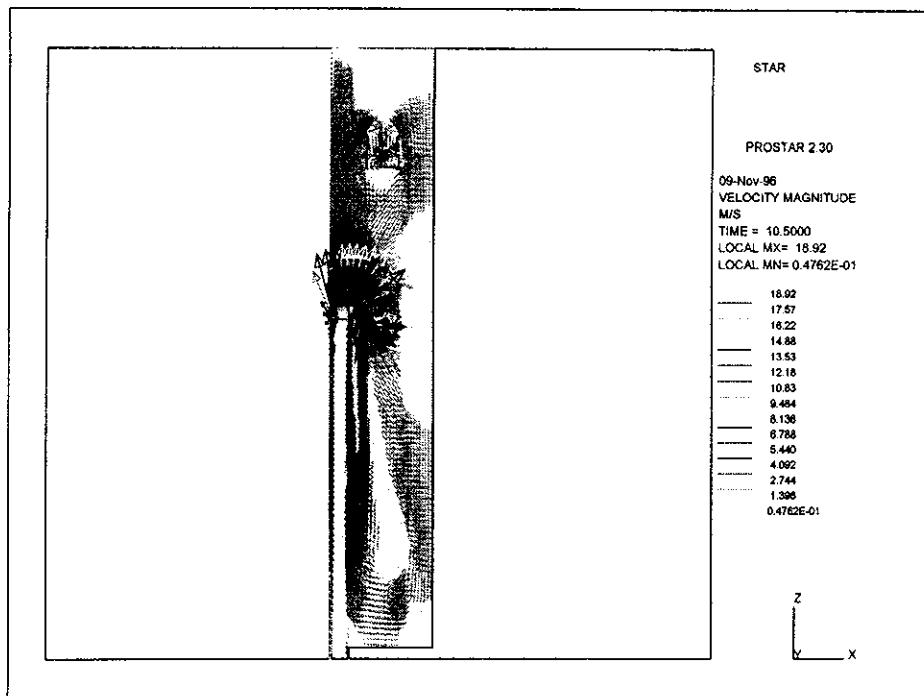
(그림 3.9) 열차가 승강장 진입전 3m위치에 있을때의 기류속도 분포



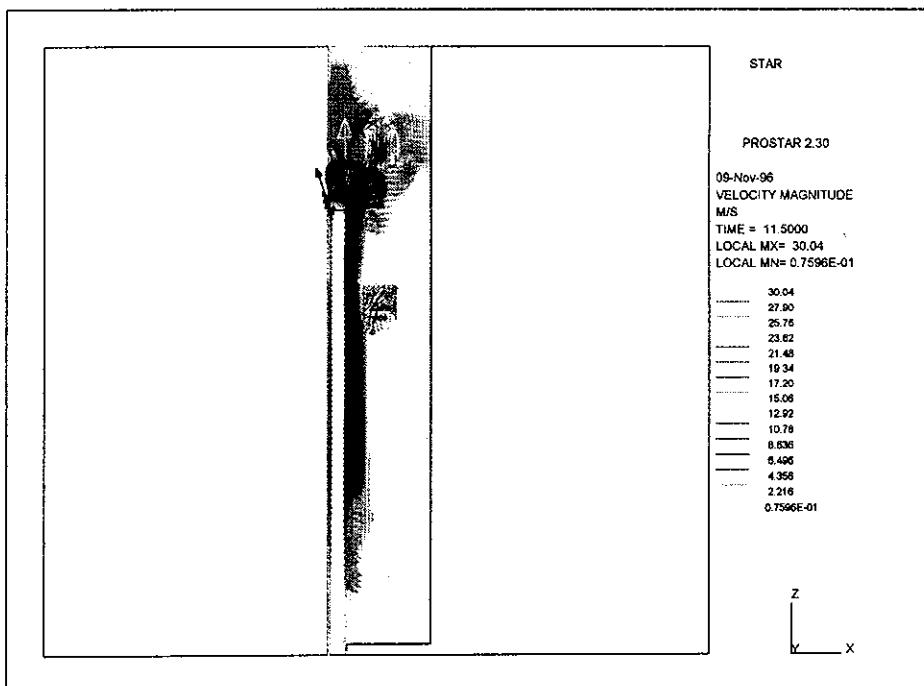
(그림 3.10) 열차가 승강장에 진입하여 18m지점에 도달했을 때의 기류속도 분포



(그림 3.11) 열차가 승강장에 진입하여 39m지점에 도달했을 때의 기류속도 분포



(그림 3.12) 열차가 승강장에 진입하여 60m지점에 도달했을 때의 기류속도 분포



(그림 3.13) 열차가 승강장에 진입하여 81m지점에 도달했을 때의 기류속도 분포

<표 3.3> 열차가 터널에서 승강장으로 이동할 때

A-H 지점에 발생하는 기류속도 (m/s)

지점 열차 위치	A	B	C	D	E	F	G	H
열차가 승강장 진입전 24m 위치에 도달했을 때	5.6	4	2.4	2.4	2.1	2.1	1.1	1.1
열차가 승강장 진입전 3m 위치에 도달했을 때	7.2	4	2.4	2.4	1.2	1.2	1.2	1.2
열차가 승강장에 진입하여 18m지점에 도달했을 때	3.6	2.1	3.6	2.1	2.1	1	1	1
열차가 승강장에 진입하여 39m지점에 도달했을 때	2.6	2.6	9.3	8.5	2.6	1.2	1.2	1.2
열차가 승강장에 진입하여 60m지점에 도달했을 때	2	2	7.4	7.4	4.8	4.8	0.9	0.9
열차가 승강장에 진입하여 81m지점에 도달했을 때	1.5	1.5	7.5	5.4	9.7	1.5	2.2	2.2

: 승강장 폐적기준인 5m/s를 초과한 지점

본 결과는 사용 난류유동 프로그램의 한계에 의하여 실제로 열차가 이동하여 감속하는 조건을 적용하지 못하고 열차가 등속도로 이동하는 것으로 시뮬레이션 하였기 때문에 실제보다 조금 높은 기류속도가 발생한 것으로 예상되나 승강장의 기류분포 특성을 거의 유사하게 파악할 수 있다.

<표 3.3>은 열차가 터널에서부터 승강장으로 이동할 때 A-H 지점에 발생하는 기류속도를 나타내고 있다.

열차가 승강장에 들어오기 전 24m, 3m의 터널부분에 있을 때 (그림 3.8), (그림 3.9), <표 3.3>에서 보면 승강장의 끝지점(열차가 승강장에 진입하는 지점)에서 10m 떨어진 A지점에서 기준 기류속도보다 각각 0.4m/s, 2.2m/s가 초과되는 것으로 나타났다.

(그림 3.9)와 같이 열차가 승강장에 진입하여 18m지점에 도달했을 때 승강장의 모든 지점에서 양호한 기류속도가 나타났으며, (그림 3.10)과 같이 열차가 승강장에 진입하여 39m지점에 도달했을 때 열차전면 20~30m앞 C, D 지점에서 기준 기류속도보다 각각 4.3m/s, 3.5m/s가 초과되는 것으로 나타났으며, (그림 3.11)과 같이 열차가 승강장에 진입하여 60m지점에 도달했을 때 열차측면 C, D 지점에서 기준 기류속도보다 각각 2.4m/s가 초과되는 것으로 나타났으며, (그림 3.12)와 같이 열차가 승강장에 진입하여 81m지점에 도달했을 때 열차측면 C, D, E 지점에서 기준 기류속도보다 2.5m/s, 0.4m/s, 4.7m/s가 초과되는 것으로 나타났다.

따라서 열차가 승강장에 진입하기 전에는 승강장이 시작되는 일부 지점 2곳에서 기준 기류속도 5m/s를 초과하는 것으로 나타났으며, 열차가 승강장에 도착한 후에는 열차 전면부와 열차 측면부 일부 지점 7곳에서 기준 기류속도를 초과하는 것으로 나타났다. (<표 3.3>의 □ :승강장 폐적기준인 5m/s를 초과한 지점 참고).

제 4 장 승강장의 기류분포 개선사례 시뮬레이션

4.1 승강장의 기류분포 개선사례에 대한 개요

본 연구에서는 3장의 기존역사 승강장 시뮬레이션을 통하여 제시된 기류분포의 문제점을 개선하기 위하여 2.2절 '승강장의 기류속도 제어를 위한 문현고찰'에서 제시하고 있는 기류제어 방법과 2.1.4와 2.1.5절 '외국과 우리나라의 지하철 승강장의 기류제어 현황'에서 제시한 내용중 적정사례를 설정하여 시뮬레이션하고 그 결과를 비교, 분석하고자 한다.

이 때 기류분포 개선을 위한 사례로 승강장 기류속도에 주된 영향을 미치는 터널 환기 샤프트의 소요 환기량의 변화, 터널 환기 샤프트의 위치 변경, 릴리프 패시지의 설치등이 있다. 터널 환기 샤프트의 소요 환기량을 변화시켜 열차풍을 Beaufort Scale 4(5.34~8.13m/s)와 ASHRAE 기준인 5m/s 이하로 유지하기 위해서는 3장 시뮬레이션 결과 기차가 유입시 환기 샤프트 위치의 터널에 발생하는 기류속도가 약 10m/s이기 때문에 N역사의 약 2.5배 정도의 환기량이 필요하므로 초기 투자비와 운전비가 클 것으로 예상되며(식 4.1~4.3) 기계실의 소요면적이 훨씬 증가할 것으로 예상된다. 그리고 샤프트의 위치를 변경하여 열차풍을 제어시키는 방법도 기존의 환기량보다 훨씬 많은 양이 만족되어야 위의 기준을 만족할 것으로 예상된다. 따라서 본 장에서는 위의 인공조절 방식이 아닌 자연조절 방식으로 릴리프 패시지를 설치(릴리프 패시지의 길이 : 50m)한 터널의 기류분포 시뮬레이션을 실시하였다.

터널 환기 샤프트의 소요 환기량을 산출하는 방법으로 진행과정은 다음과 같다.

열차가 터널 환기 샤프트 지점에 지나갈 때 터널에 발생하는 기류량(Q_T)

$$Q_T = A \times v \times 60(\text{min}) \dots \quad (4.1)$$
$$= 27(\text{m}^2) \times 10(\text{m/s}) \times 60(\text{sec}) = 16,200\text{CMM}$$

그리고,

A : 터널의 단면적(m^2)

v : 터널의 기류속도 (m/s)

승강장의 열차풍 기준을 맞추기 위한 최대 허용 기류량(Q_M)

$$Q_M = A \times v \times 60(\text{min}) \quad \dots \dots \dots \quad (4.2)$$

$$= 27(m^2) \times 5(m/s) \times 60(\text{sec}) = 8,100\text{CMM}$$

그리고,

A : 터널의 단면적(m^2)

v : 승강장의 열차풍 기준을 맞추기 위한 최대 허용 기류속도(m/s)

터널 환기 샤프트의 소요 환기량(Q_S)

$$Q_S = Q_T - Q_M \quad \dots \dots \dots \quad (4.3)$$

$$= 8,100\text{CMM}$$

그리고,

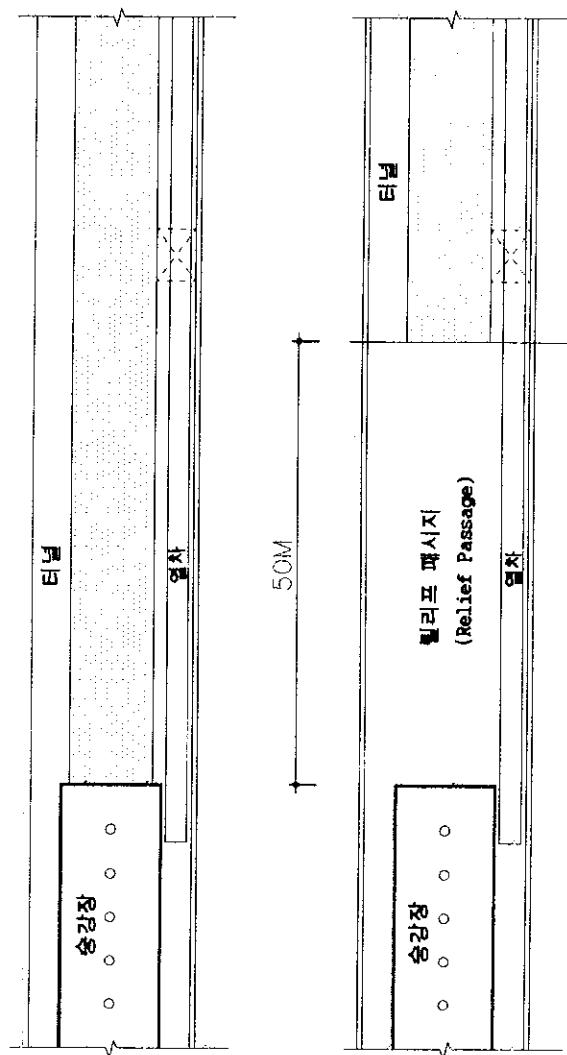
Q_T : 터널의 기류량(CMM)

Q_M : 터널내 최대 허용 기류량(CMM)

4.2 릴리프 패시지(Relief Passage) 설치에 따른 기류분포 시뮬레이션

우리나라 지하철 6호선의 단선병렬(섬식) 구간에서는 열차풍의 영향을 최소화하기 위하여 승강장과 터널의 경계 지점에 릴리프 패시지를 설치할 계획이다(그림 2.6 참조). 릴리프 패시지의 거리는 승강장과 가까울수록 열차가 유입할 때 효과적으로 기류를 제거할 수 있지만 너무 가까운 경우에는 유출되어야 하는 기류가 승강장으로 유입될 수 있다.

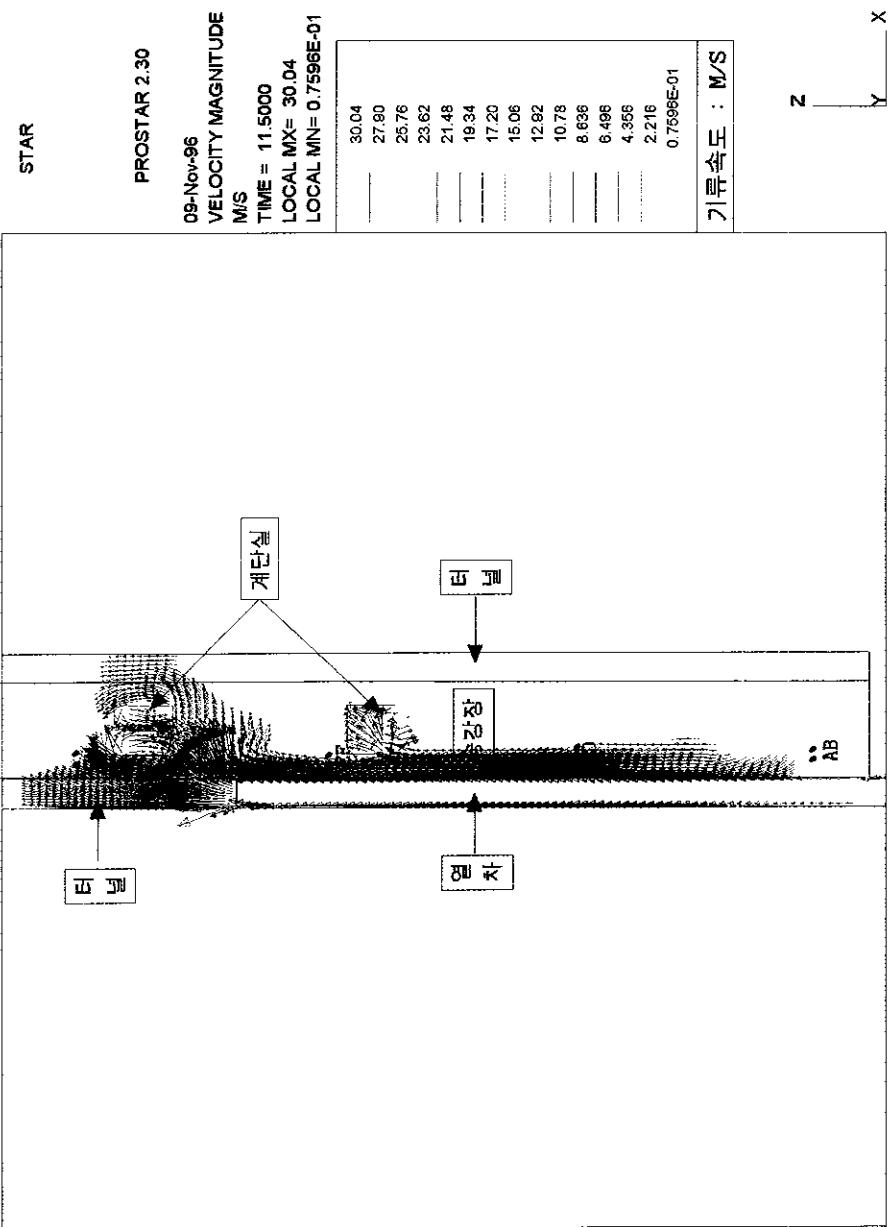
본 단원에서는 열차가 승강장에 진입시 압력과 풍속이 확산되어 열차풍을 감소시키는 릴리프 패시지 설치에 대한 시뮬레이션을 실시하였다. 릴리프 패시지의 변수를 길이 50m로 설정하여 N역사 승강장의 결과와 비교하였다.



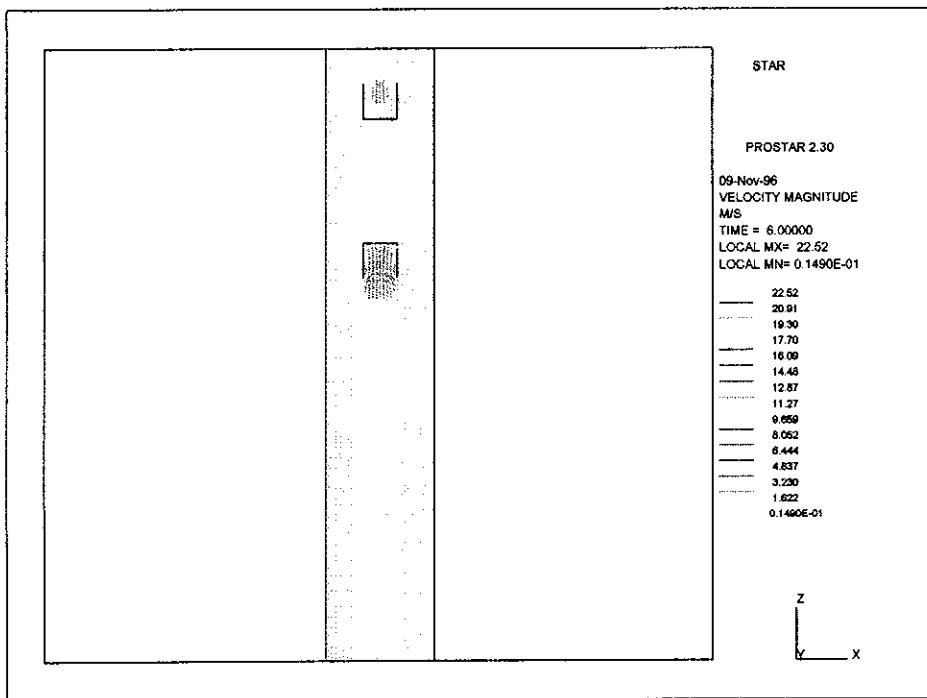
(그림 4.1) 릴리프 패시지(Relief Passage)의 설치

4.3 시뮬레이션 결과

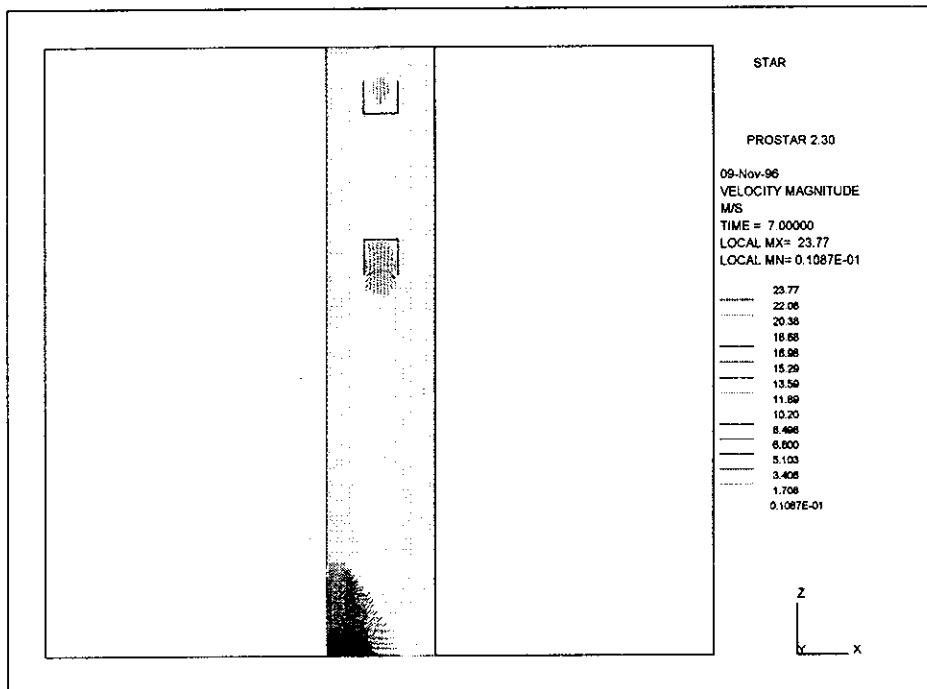
본 시뮬레이션에서는 3장 시뮬레이션 결과와 동일한 조건으로 승강장에서 높이 1.5m지점(승객의 얼굴높이)에서 승강장 길이방향으로 열차 유입시 열차풍의 영향을 가장 많이 받는 승강장이 시작되는 곳(열차가 승강장에 진입하는 지점)에서 10m 떨어진 지점(A, B)부터 열차가 유입하는 방향으로 30m 간격마다(C, D), (E, F), (G, H)를 설정하였으며, 승강장 단면방향으로는 열차에서 2m 떨어진 부분(열차가 들어올 때 승객들이 대기하는 안전선에서 1~1.5m 정도 떨어진 곳)(A, C, E, G)와 3m 떨어진 부분(B, D, F, H)을 설정하여 시뮬레이션 결과를 평가하였다.(그림 4.2) 열차가 터널에서 승강장으로 이동할 때 각 지점에 발생하는 기류속도는 (그림 4.3)~(그림 4.8)과 같다.



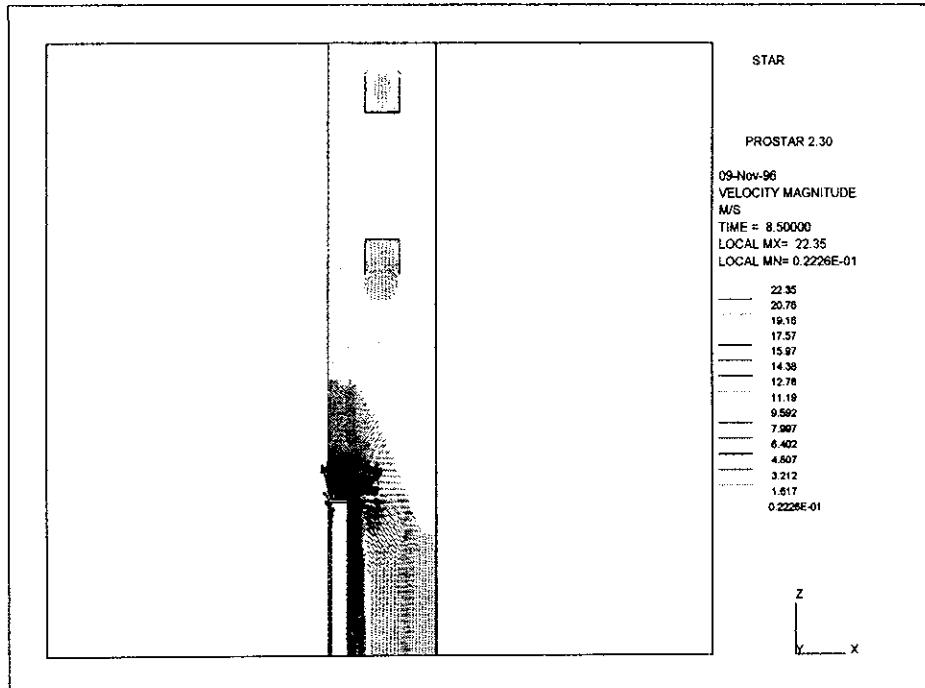
(그림 4.2) 레일프 페시지지를 설치하였을 때 발생하는 기류속도



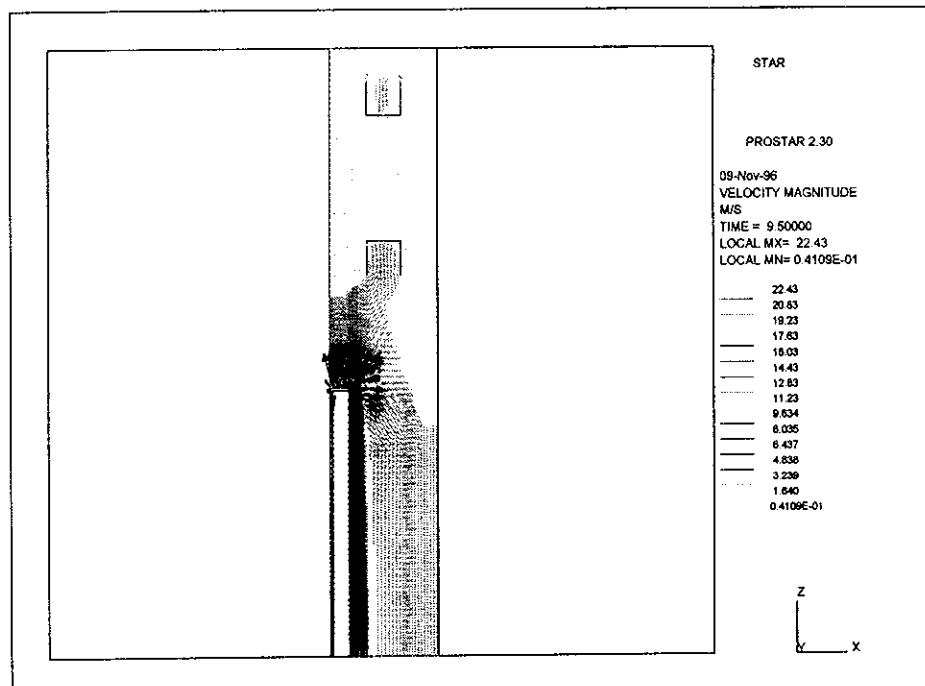
(그림 4.3) 열차가 승강장 진입전 24m위치에 있을때의 기류속도 분포



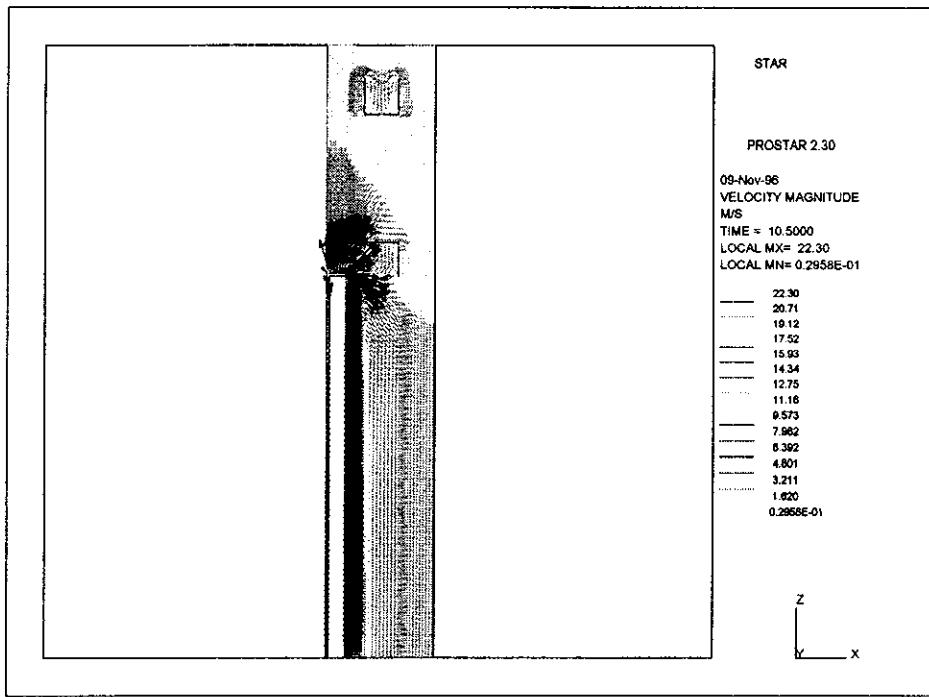
(그림 4.4) 열차가 승강장 진입전 3m위치에 있을때의 기류속도 분포



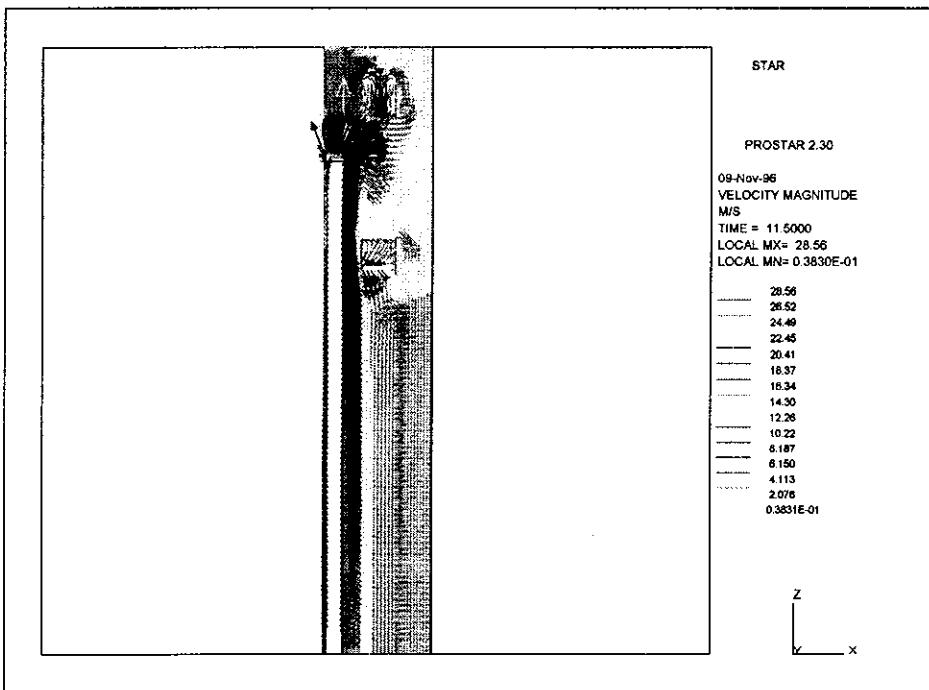
(그림 4.5) 열차가 승강장에 진입하여 18m지점에 도달했을때의 기류속도 분포



(그림 4.6) 열차가 승강장에 진입하여 39m지점에 도달했을때의 기류속도 분포



(그림 4.7) 열차가 승강장에 진입하여 60m지점에 도달했을때의 기류속도 분포



(그림 4.8) 열차가 승강장에 진입하여 81m지점에 도달했을때의 기류속도 분포

<표 4.1> 열차가 터널에서 승강장으로 이동할 때

A-H 지점에 발생하는 기류속도 (m/s)

지점 열차 위치	A	B	C	D	E	F	G	H
열차가 승강장 진입전 24m 위치에 도달했을 때	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
열차가 승강장 진입전 3m 위치에 도달했을 때	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
열차가 승강장에 진입하여 18m지점에 도달했을 때	2.4	2.4	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
열차가 승강장에 진입하여 39m지점에 도달했을 때	2.6	4.9	8.8	8.8	1	1	1	1
열차가 승강장에 진입하여 60m지점에 도달했을 때	5.6	0.9	5.6	2.4	4	4	0.9	0.9
열차가 승강장에 진입하여 81m지점에 도달했을 때	3	3	4.9	3	3	1.2	3	3

:승강장 폐적기준인 5m/s를 초과한 지점

본 결과는 3장에서 시뮬레이션한 N역사 승강장에 길이 50m의 릴리프 패시지를 설치하여 시뮬레이션을 실시한 것으로 다른 입력 조건은 동일하게 하였다.

<표 4.1>은 열차가 터널에서부터 승강장으로 이동할 때 A-H 지점에 발생하는 기류속도를 나타내고 있다.

열차가 승강장에 들어오기 전 24m, 3m의 터널부분에 있을 때 (그림 4.3), (그림 4.4), <표 4.1>에서 보면 승강장의 모든 지점에서 0.9m/s 이하의 기류속도가 나타났다.

(그림 4.5)와 같이 열차가 승강장에 진입하여 18m지점에 도달했을 때 승강장의 모든 지역에서 양호한 기류속도가 나타났으며, (그림 4.6)과 같이 열차가 승강장에 진입하여 39m지점에 도달했을 때 열차 20~30m앞 C, D 지점에서 기준

기류속도보다 각각 3.8m/s가 초과되는 것으로 나타났으며, (그림 4.7)과 같이 열차가 승강장에 진입하여 60m지점에 도달했을 때 열차측면 A, C 지점에서 기준 기류속도보다 각각 0.6m/s가 초과되는 것으로 나타났으며, (그림 4.8)과 같이 열차가 승강장에 진입하여 81m지점에 도달했을 때 승강장의 모든 지역에서 모두 양호한 기류속도가 나타났다.

따라서 열차가 승강장에 진입하기 전에는 승강장의 모든 지점에서 아주 양호한 것으로 나타났으며, 열차가 승강장에 진입한 후에는 열차 전면부와 열차 측면부 일부 지점 4곳에 기준 기류속도를 초과하는 것으로 나타났다. (<표 4.1>의 □ : 승강장 폐적기준인 5m/s를 초과한 지점 참고)

4.4 비교 평가

<표 4.2> N역사에 릴리프 패시지를 설치하였을 경우

지하철 승강장의 기류속도 감소량 (m/s)

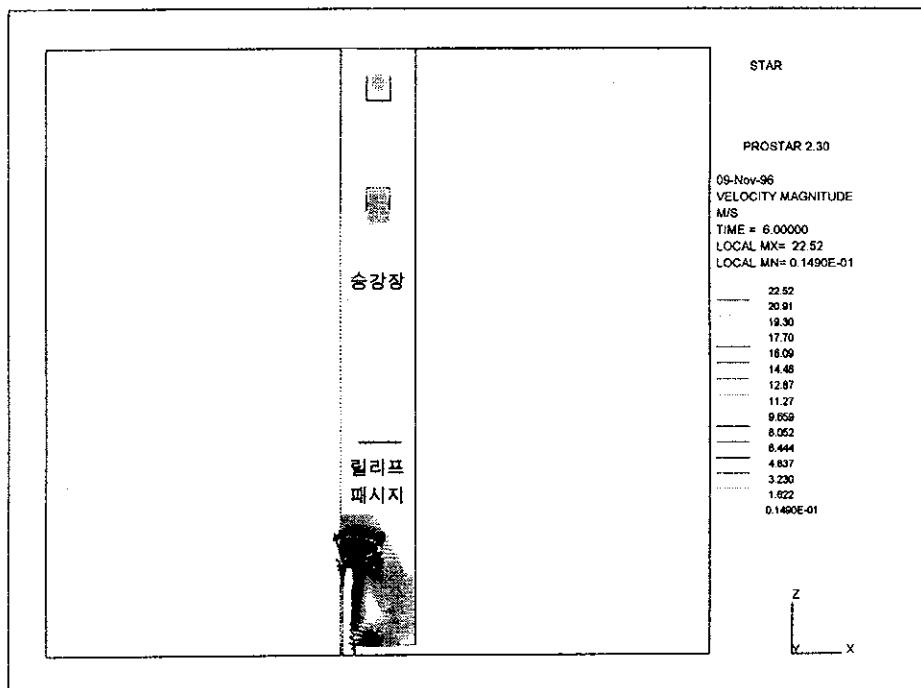
지 점 열 차 위 치	A	B	C	D	E	F	G	H
열차가 승강장 진입전 24m 위치에 도달했을 때	4.7	3.1	1.5	1.5	1.2	1.2	0.1	0.1
열차가 승강장 진입전 3m 위치에 도달했을 때	6.3	3.1	1.5	1.5	0.3	0.3	0.3	0.3
열차가 승강장에 진입하여 18m지점에 도달했을 때	1.2	-0.3	2.7	1.2	1.2	0.1	0.1	0.1
열차가 승강장에 진입하여 39m지점에 도달했을 때	-3	-2.3	0.5	-0.3	1.6	0.2	0.2	0.2
열차가 승강장에 진입하여 60m지점에 도달했을 때	-3.6	1.1	1.8	5	0.8	0.8	.	.
열차가 승강장에 진입하여 81m지점에 도달했을 때	-1.5	-1.5	2.6	2.4	6.7	0.3	-0.8	-0.8

* 3장 N역사 승강장에 발생하는 기류속도 - 4장 길이 50m의 릴리프 패시지를
설치하였을 때 승강장에 발생하는 기류속도

릴리프 패시지를 설치하지 않은 N역사 승강장과 릴리프 패시지를 설치한 경우의 기류속도 감소량을 시간별, 위치별로 비교하면 <표 4.2>과 같다.

일부지점에서 릴리프 패시지를 설치하였을 때 기류속도가 증가하는 현상을 볼 수 있지만 대부분의 지역에서 0.3~6.3m/s가 감소하는 것으로 나타났다.

(그림 3.8), (그림 3.9), <표 3.3>과 같이 열차가 승강장에 진입하기 전의 경우 N역사에는 기류속도가 1.1~7.6m/s로 다양한 분포를 보이고 있지만 (그림 4.3), (그림 4.4), <표 4.1>과 같이 릴리프 패시지를 설치한 경우 모든 지역에서 0.9m/s 이하의 기류속도가 나타났다. 이는 열차 유입시 승강장에 밀려 들어오는 열차풍이 릴리프 패시지에서 팽창하여 기류가 감소되기 때문이다.



(그림 4.9) 릴리프 패시지 구간에서 열차풍의 팽창

(그림 4.9)는 릴리프 패시지 구간에서 기류가 팽창하여 승강장에 열차풍의 유입을 감소시키는 기류속도 분포를 나타낸다.

열차가 승강장에 진입하여 18m지점에 도달했을 때 N역사에는 (그림 3.10), <표 3.3>과 같이 승강장의 모든 지점에서 양호한 기류속도가 나타났고, 릴리프 패시지를 설치한 경우에는 (그림 4.5), <표 4.1>과 같이 승강장의 모든 지점에서 양호한 기류속도가 나타났으며 릴리프 패시지를 설치한 후 평균 0.8m/s의 기류속도가 감소되었다.

열차가 승강장에 진입하여 39m지점에 도달했을 때 N역사에는 (그림 3.11), <표 3.3>과 같이 열차 20~30m앞 C, D 지점에서 기준 기류속도보다 각각 4.3m/s, 3.5m/s가 초과되는 것으로 나타났으며, 릴리프 패시지를 설치한 경우에는 (그림 4.6), <표 4.1>과 같이 열차 20~30m앞 C, D 지점에서 기준 기류속도보다 각각 3.8m/s가 초과되는 것으로 나타나 기류분포가 거의 비슷한 것으로 나타났다.

열차가 승강장에 진입하여 60m지점에 도달했을 때 N역사에는 (그림 3.12), <표 3.3>과 같이 열차측면 A, C 지점에서 기준 기류속도보다 각각 2.4m/s가 초과되는 것으로 나타났고, 릴리프 패시지를 설치한 경우에는 (그림 4.7) <표 4.1>과 같이 열차측면 A, C 지점에서 기준 기류속도보다 각각 0.6m/s가 나타나 A 지점에는 오히려 기준 기류속도보다 0.6m/s가 초과되었으며, C 지점에는 1.8m/s가 감소되었고, D 지역에는 기준 기류속도 이하로 감소된 것으로 나타났다.

열차가 승강장에 진입하여 81m지점에 도달했을 때 N역사에는 (그림 3.13), <표 3.3>과 같이 열차측면 A, C 지점에서 기준 기류속도보다 각각 2.5m/s, 0.4m/s, 4.7m/s가 초과되는 것으로 나타났으며 릴리프 패시지를 설치한 경우에는 (그림 4.13), <표 4.1>과 같이 승강장의 모든 지역에서 양호한 기류분포가 나타났다.

따라서 열차가 승강장에 진입하기 전에는 <표 3.3>과 같이 N역사의 일부 지역에서 기준 기류속도를 초과하는 것으로 나타났으나 렐리프 패시지를 설치한 경우 <표 4.1>과 같이 모든 지역에서 0.9m/s 이하의 기류속도로 아주 양호한 기류속도를 보였으며, 열차가 승강장에 진입한 후에는 <표 3.3>과 같이 N역사의 열차 전면부와 열차 측면부 일부 지점 7곳에서 기준 기류속도를 초과하는 것으로 나타났으나 렐리프 패시지를 설치한 경우 <표 4.1>과 같이 4곳에서 기준 기류속도를 초과하는 것으로 나타나 43%가 적정 기준 5m/s 이하로 감소된 것으로 나타났다. 그리고 렐리프 패시지를 설치한 후 평균 기류속도는 0.4m/s가 감소하였으며, 기준 기류속도 5m/s가 초과된 지역도 전체 9곳에서 4곳으로 5곳이 기준 기류속도 이하로 감소되어 56%가 감소된 것으로 나타났다.

제 5 장 결 론

지하철 승강장에서 온도, 진동, 소음등과 함께 열차 유입시 승객에게 불쾌감을 주고 오염물질을 확산시키며 열환경 제어에 어려움을 주는 등 큰 문제가 되고 있는 열차풍을 감소시키기 위하여 본 연구에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 기존역사의 기류분포 특성을 파악하여 문제점을 제시하고 열차풍을 감소시키기 위하여 문헌에서 제시된 승강장의 기류속도 제어를 위한 설계방법을 토대로 릴리프 패시지 설치에 관한 대안을 제시하여 시뮬레이션 하였다.

연구를 통해 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

본 결과는 상용 난류유동 컴퓨터 프로그램의 제약에 의하여 실제로 열차가 이동하여 감속하는 조건을 동일하게 적용하지 못하고 열차가 등속도로 이동하는 것으로 시뮬레이션하였기 때문에 실제보다 조금 높은 기류속도가 발생한 것으로 예상되나 승강장의 기류분포 특성을 거의 유사하게 파악할 수 있다.

1. 기존역사 승강장의 기류분포 시뮬레이션 결과를 보면 열차가 승강장에 진입하기 전에는 승강장이 시작되는 일부 지점 2곳에서 기준 기류속도 5m/s를 초과하는 것으로 나타났으며, 열차가 승강장에 도착한 후에는 열차 전면부와 열차 측면부 일부 지점 7곳에서 기준 기류속도를 초과하는 것으로 나타났다.
2. 기존역사 승강장에 릴리프 패시지를 설치한 개선안의 기류분포를 보면 결과를 보면 열차가 승강장에 진입하기 전에는 승강장의 모든 지점에서 매우 양호한 것을 나타났으며, 열차가 승강장에 진입한 후에는 열차 전면부와 열차 측면부 일부 지점 4곳에 기준 기류속도를 초과하는 것으로 나타났다.

3. 기존역사 승강장과 승강장에 렐리프 패시지를 설치한 개선안을 비교해 보면 열차가 승강장에 진입하기 전에는 기존역사의 일부 지역에서 기준 기류속도를 초과하는 것으로 나타났으나 렐리프 패시지를 설치한 경우 모든 지역에서 0.9m/s 이하의 기류속도로 매우 양호한 기류속도를 보였다. 열차가 승강장에 진입한 후에는 기존역사의 열차 전면부와 열차 측면부 일부 지점 7곳에서 기준 기류속도를 초과하는 것으로 나타났으나 렐리프 패시지를 설치한 경우 4곳에서 초과하는 것으로 나타나 43%가 적정 기준 5m/s 이하로 감소된 것으로 나타났다. 그리고 렐리프 패시지를 설치한 후 평균 기류속도는 0.4m/s가 감소하였으며, 기준 기류속도 5m/s가 초과된 지역도 전체 9곳에서 4곳으로 5곳이 기준 기류속도 이하로 감소되어 56%가 감소된 것으로 나타났다.

이상의 연구결과를 종합하면 현재 지하철 승강장에 열차가 유입시 기류제어에 대한 많은 고려가 필요한 것으로 나타났다.

기류환경을 쾌적하게 하기 위한 여러 대안중 운전비가 들지않고 관리가 필요 없는 렐리프 패시지를 설치하였을 경우 많은 기류속도를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

연구의 한계 및 추후 연구 제안

시뮬레이션에 사용된 상용 난류유동 프로그램은 물체가 이동할 때 발생하는 기류유동 현상을 파악할 수 있는 특징을 가지고 있지만 프로그램의 한계로 인하여 실제로 출발하여 가속, 등속도 이동, 감속, 정지로 이어지는 열차의 움직임을 시뮬레이션에서는 그대로 적용할 수 없기 때문에 열차를 등속도로 움직이는 것으로 입력하였다. 따라서 실제로 발생하는 열차풍의 기류속도와 시뮬레이션 결과로 제시하는 열차풍의 기류속도는 다소 차이가 있을 것으로 예상된다.

본 연구는 열차를 이동하는 시뮬레이션이기 때문에 다른 유체 시뮬레이션보다 훨씬 많은 시간과 메모리 용량, 빠른 CPU가 필요하다. 시뮬레이션을 수행하기 위하여 계산에 사용된 컴퓨터는 대덕연구단지 시스템 공학 연구소의 CRAY-90 Super Computer로 사용하기 위하여 상당히 많은 비용이 들어가기 때문에 여러 개선안 중에 릴리프 패시지를 설치하여 열차풍을 제어하는 대안만을 시뮬레이션하였다. 앞으로 터널 환기 샤프트의 환기량 변화, 터널 환기 샤프트의 위치 변화 등의 후속 시뮬레이션의 요구가 필요하다.

또한 본 연구에서 사용된 승강장 형태는 단선병렬(섬 : Island)식으로 단선식, 상대식, 복층식 등 여러 승강장 형태에 따른 열차풍에 대한 연구가 이루어져야 하겠다.

참 고 문 헌

1. 이 연구, 김 광우 공역. **건축환경과학**. 태림문화사, 1989.
2. 이 연구 외. **건축환경계획론**. 태림문화사, 1994.
3. 임만택. **건축환경계획**. 보문당, 1991.
4. 이경희. **건축환경계획**. 문운당, 1994.
5. 김영호. **건축설비**. 보문당, 1994.
6. 대한건축학회. **건축설계자료집 : 환경계획편**. 태림문화사, 1994.
7. 한 상태. **지하철의 환경 계획**. 대한건축학회지 Vol.38, No.184, 1994.
8. 전경배, 최찬환. **건축법규해설**. 세진사, 1996.
9. 서울특별시지하철건설본부. 제3기 서울지하철 10, 11호선 기계설비
기본설계 공기오염방지 개선방안 연구. 1996.
10. 서울특별시지하철건설본부. **서울지하철 5호선 5-6공구 실시설계보고서
(기계설계)**. 1992.
11. 서울특별시지하철건설본부. **서울지하철 6호선 기본설계보고서
(기계설비)**. 1993.
12. 서울특별시지하철건설본부. **서울지하철 6호선 기본설계 요약 보고서
(기계설비)**. 1993.
13. 서울특별시지하철건설본부. **서울지하철 6호선 기본설계도(기계분야)**. 1993.
14. 서울특별시지하철건설본부. **지하철7호선건설사업 7-21공구
기본설계보고서(분야II)**.
15. 종합건축사사무소 시공, 삼신 설계 주식회사. **지하철 7호선 3공구 정거장
및 본선 실시설계 기계 설비 설계 계산서**. 1992.
16. 서울특별시지하철공사교육원. **지하철설비일반**. 1994.
17. 中川 肇. **지하철의 환경**. 서울 : 월간 설비기술, 1995. 5.
18. 조율연. **지하철의 환기설비**. 서울 : 월간 설비기술 1992. 9.
19. 村上 周三, 近本 智行. **기류·온열 환경**. 서울 : 월간 설비기술, 1995. 12.

20. 차철현. 지하철의 열차풍이 정차장내 기류환경에 미치는 영향에 관한 연구. 한양대학교 산업대학원 1995.
21. 정근호. 지하철 승강장내의 난류기류 유동에 관한 수치적 연구. 고려대학교 대학원 석사학위논문. 1995.
22. 송승영. 실내 온도분포와 기류속도를 고려한 적정 외주부 깊이에 관한 연구. 서울대 석사학위논문 1994.
23. 박종수. 창선반높이에 따른 실내의 온도와 기류분포에 관한 수치해석. 한양대학교 대학원 석사학위논문. 1987.
24. NORBERT LECHNER. *HEATING, COOLING, LIGHTING, Design Methods for Architects*. 1991.
25. Prepared by Associatated Engineers, a Joint Venture of Parsons, Brinckhoff, Quade, & Douglas, Inc., DeLeuw, Cather & Company, and Kaiser Engineers. *Subway Environmental Design Handbook, Volume I : Principles and Applications, Second Edition*. U.S Transit Development Corporation, 1976.
26. ASHRAE. *ASHRAE HANDBOOK. Heating, Ventilating, and Air-Conditioning APPLICATIONS*. 1995.
27. *STAR-CD V2.3 Manual, Computational Dynamics*. 1995.
28. *ICEM Design/Drafting Tutorial*. 1992.

ABSTRACT

A Study on the Air Flow Distribution Characteristics in Subway Platforms

Kwon, Do Hwan

Dept. of Architectural Engineering

The Graduate School

Chung-Ang University

Advised by prof. Rhee, Eon Ku, Ph. D.

The problems of subway platform environment are temperature that in summer most platform to be higher than outside, high atmospheric pressure, noise, and contaminants. Especially the air flow caused by incoming trains creates discomfort to the passengers waiting for train such as spreading of dust and blowing hairs, skirt or coat. This air flow also makes environmental control of subway platforms hard. However, countermeasures to solve these problems have not been properly implemented.

Also, in subway platforms design air flow control is not considered as systematic ways. The current practice is only to adapt the existing platform designs which are considered to be satisfactory in terms of air flow control.

Recently the development of computer hardwares and softwares makes it possible to carry out numerical analysis of air flow for subway and high speed train. However, it is still very hard to analyze the non-static flow in three-dimensional method, which considers the movement of train. So far only the two-dimensional method of analysis has been performed in this area.

The research aims to study the Air Flow distribution characteristics in subway platforms. Firstly, environmental characteristics in subway platforms was investigated and design methods of subway platforms were surveyed through literature search. Secondly, the air flow distribution in an existing station platform was estimated through simulation using three-dimensional unsteady numerical analysis. Finally in order to propose basic data for design of air flow control, an alternative design employing relief passage was chosen and a simulation was conducted using the same method. The result was compared with the existing platform conditions.

The results of the study can be summarized as follows.

1. The result of air flow simulation in existing station, indicates that before train enters the platform air flow velocity at two points near platform entrance the design criteria(5m/s). After a train enters the platform, air flow velocity in seven points near train front and side of platform exceeds the criteria.
2. From the results of air flow simulation in installing the relief passage to existing station, before train enter the platform air flow velocity of all areas of platform to be comfort, after train enter the platform air flow velocity of four areas exceed from criterion(5m/s) at train side of platform.
3. It can be concluded that when designing subway platforms the air flow caused by incoming trains should be controlled in order to ensure human comfort as well as effective environmental control. The implementation of relief passage is expected to decrease air velocity satisfying the design criteria with minimal operation and maintenance cost.

감사의 글

부족함이 너무나도 많은 논문이지만 대학원 생활의 결실을 잘 마무리 할 수 있도록 도움을 주신 여러분들에게 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

자상하고 인자하신 성품으로 연구실 원생들의 생활에 모범이 되어 주시고 바른길로 나아갈 수 있도록 인도해 주신 이언구 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 그리고 논문심사위원장님으로서 항상 웃음으로 따뜻하게 대해주신 이명호 교수님, 논문심사를 맡아주시고 세심한 조언을 아끼시지 않으셨던 최윤경 교수님, 언제나 열성적으로 건축학도의 꿈을 키워주시는 김덕재 교수님, 이현호 교수님, 정현수 교수님, 박찬식 교수님, 도시계획론 수업시간과 3주간의 CAD조교 때 편안히 대해 주셨던 양우현 교수님께 진심으로 감사드립니다.

무엇보다도 2년동안 함께 연구해온 전축환경연구실 선배들께 감사드립니다. 많은 관심을 보여 주시는 전봉구 교수님, 항상 연구실의 큰 형님처럼 후배들에게 사랑과 질책을 아끼시지 않으시는 송국섭 교수님, 실무에 대한 많은 지식을 주시고 현재 연구실의 말령 역할을 하시는 김남규 교수님, 전화로 항상 따뜻하게 안부를 물어주시는 황정하 교수님, 후배들에게 늘 많은 격려를 주시는 안태영 박사님, 학교 강의에 바쁘시지만 연구실에 가장 많이 오셔서 후배들을 보살펴주시고 열심히 연구 활동하시는 박진철 교수님, 연구실의 모든 일을 도맡아 하시다가 지금은 후학양성에 힘쓰시고 계시는 천영철 교수님, 대전 고속철도 프로젝트를 통하여 더욱 친해진 이관호 선배님, 전축환경연구실에 인연을 맺게 해 주시고 세 학교를 다니는 동안 선배님이 되어 주신 윤기만 선배님, 현재 연구실을 이끌어 가시는 전성원 선배님, 학교 후배들에게 남다른 애정을 보이시는 강일경 선배님, 이동주 선배님, 전주영 선배님, 이호준 선배님께 그동안의 많은 관심과 사랑에 감사드립니다.

후배들에게 연구하는 자세의 모범이 되어준 박사과정 나수연 선배님, 후배에게 자신감을 키워주시고 항상 멋있는 모습 보여주시는 김기훈 선배님, 가장 원만한 대인관계 소유자이신 이상형 선배님, 항상 크리스천의 향기를 풍기시는 흥찬 선 선배님, 졸업 후에도 논문에 대한 많은 관심과 걱정을 해 주셨던 김기원 선배님, 대학원 동기로 끌어 논문을 쓰며 서로가 칠집이가 되어준 흥민호님, 연구실의 꽃으로 항상 선후배의 어려운 일을 도와주며 열심히 공부하던 모습이 아름다웠던 이은희님, 특히 컴퓨터에 많은 도움을 준 컴퓨터박사 최장원님, 연구실의 멋쟁이로 항상 밝은 모습 보여 주시는 이종경님, 그리고 연구실의 새로운 불위기를 이끌어가시는 방정현님, 김완기님, 유형규님께 진심으로 감사드립니다.

대학원 생활동안 함께 한 동기인 구조연구실의 흥상균님, 이형교님, 김희동님, 계획연구실의 이재영님, 이성육님, 김주석님, 시공연구실의 유호신님, 전용석님과 대학원 선후배님의 무한한 발전을 기원합니다.

논문의 기초가 된 PHOENICS라는 프로그램을 익힐 수 있도록 어려운 시간 할애하여 주신 용인전문대 원양구 교수님, 대림기술정보 이재명 대리님, 논문의 기초자료에 많은 도움을 주신 김세훈 교수님 한학기 일찍 회사생활을 하면서 논문을 쓸 수 있도록 많은 배려를 해 주신 황원택 사장님, 정하영 이사님, 삼신설비 연구소를 항상 편한 분위기로 이끌어 가시는 조충식 부장님, 많은 관심을 보여주시는 김경현 대리님, 조동만 대리님, 이상육님, 오수미님, 이경훈님, 논문을 살찌우고 보다 실무에 접근할 수 있도록 많은 자료와 조언을 해 주신 대양설비 차철현 이사님에게 진심으로 감사드립니다.

고속철도 기류분석 프로젝트의 인연으로 만나 밤을 세워가며 논문의 시뮬레이션을 도와주신 박사과정 정연태님에게 진심으로 감사드립니다. 그리고 약 1년 동안 동고동락한 전산유체 연구실의 박사과정 이성혁님, 유수열님, 석사과정 정진용님, 노재성님, 강관구님, 정남조님, 최원록님, 논문을 작성해 주시던 유홍선 교수님에게 감사드립니다.

나의 부족한 곳을 항상 채워주고 나에게 힘이 되어주는 가장 멋진 사랑하는 녀석들! 시연, 성원, 주현에게 감사의 마음을 전합니다. 학부시절 건축과 동기로 만나 건축이라는 길을 함께 걸고 있는 성식, 원식, 혁우, 영미, 김성수님, 강은영님, 바쁜 사회 생활속에 자주 만나기 힘들지만 열심히 생활하고 있는 병천, 창래, 은수, 성재, 대학원시험 준비를 하는동안 도서관파라고 불리우는 멋진 선후배 동기들, 서클 CDG의 선배, 동기, 귀여운 후배들, 건축학부 동기들, 그리고 많은 위로와 격려를 해주신 김은영님에게 지금까지 쏟아주신 관심과 정성에 감사를 드립니다.

항상 바쁘다는 평체로 가족들에게 제대로 신경 쓰지 못한 저에게 끊없는 사랑과 정성으로 보살펴 주신 부모님과 나를 사랑해주는 가족에게 이 논문을 바치고자 합니다.

1997年 6月
권 도 환