

지하철 열차풍의 거동

Train wind in the subway tunnel

이 재 현

J. H. Lee

한양대학교 기계공학과

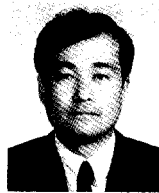


- 1949년생
- 공기조화 냉동공학회
공조부문위원회 위원장

오 명 도

M. D. Oh

서울시립대학교 정밀기계공학과



- 1956년생
- 공기조화 냉동공학회
공조부문위원회 간사

1. 머리말

지하철은 이용의 편리성과 시설의 안전성뿐만 아니라, 이동시간을 절약할 수 있다는 점에서 전 세계적으로 수요가 급증하고 있다. 1996년 현재 우리나라 서울 지하철의 수송분담율은 34.1%에 불과하다. 이는 선진국 대도시인 동경의 76%, 뉴욕 75%, 런던 72%와 비교하면 매우 낮은 수치이며 제2기 지하철이 완전개통되는 2000년 이후에는 수송분담율이 44%에 이를 것으로 전망된다. 따라서 우리나라에서 도심 지하철 건설은 앞으로 계속적으로 추진될 것이다.

지하철 터널은 반밀폐된 공간으로서 열차운행으로 생기는 열차풍은 터널내에서 발생한 분진과 열량을 정거장쪽으로 이동시키므로 열차이용 승객에게 많은 불편을 주고 있다. 최근 도심 지하철 승강장에서의 열차풍 조사연구⁽¹⁾에 의하면 국내 지하철 5호선 정거장에서 열차풍의 최대풍

속이 7.2~10m/s에 이르고 있는 것으로 보고되고 있다. 열차풍에 의한 이와같은 문제점을 해결하기 위해서는 발생한 열차풍을 외부로 배출시킬 필요가 있으며 대부분의 지하철에서는 터널과 지상을 연결하는 환기구를 설치하고 있다. 환기구를 이용한 환기방식에는 자연환기, 기계환기, 자연-기계환기의 세가지 방식이 있다. 첫째, 자연환기 방식은 열차풍에만 의존하는 환기방식으로 초기 지하철에 주로 이용되었다. 이 방식은 환기량 부족으로 인한 터널내 온도상승 등의 문제점이 있다. 둘째, 기계환기 방식은 환기구에 송풍기를 설치하여 터널내의 공기를 강제로 유출입시키는 방식이다. 이 방식은 자연환기 방식의 부족 환기량을 보완하지만 초기 설비투자비와 전력 사용량이 과도하게 될 수 있는 단점이 가진다. 셋째, 자연-기계환기 방식은 자연 및 기계환기의 장점을 혼용한 방식으로서 근래의 지하철 건설에서 대부분 채용되는 방식이다.

어떠한 환기방식의 경우라도 어느정도의 열차풍은 정거장에 침입하여 승객의 불편감 및 여름철 냉방부하 증가 등을 유발하여 부가적인 문제점을 발생시킨다. 이를위한 근본적인 해결책으로서 최근 선진국에서는 정거장에 스크린 도어를 설치하는 방식을 도입하고 있다.

본 글에서는 정거장에 스크린 도어가 설치되고 환기구가 있는 지하철구간을 대상으로 터널내에서 열차의 진행으로 발생한 열차풍의 거동을 서술하고자 한다.

2. 열차풍과 스크린 도어 시스템

지하철은 승객의 승·하차에 이용되는 정거장 구간과 열차가 통과하는 선로구간으로 구분할 수 있다. 선로구간에서 발생한 열차풍은 환기구에 의해 감소되며 일부의 열차풍은 정거장의 스크린 도어에 영향을 미친다.

2.1 열차풍

열차가 터널내를 운행할 때 열차에 의해 열차풍이 발생한다. 열차풍(train wind)이란 열차에 의해 발생하는 피스톤 효과(piston effect)로서, 열차가 진행하는 방향으로의 공기흐름을 말한다. 환기구가 설치된 터널내의 열차풍에 의한 환기특성을 그림 1에 나타내었다. 열차의 진행으로 전면에서 발생되는 열차풍은 터널내의 오염된 공기를 환기구를 통하여 외부로 배출하며, 후면의 부압(負壓)에 의해 발생된 열차풍은 신선한 외기를 터널내로 유입하는 작용을 한다.⁽¹⁾

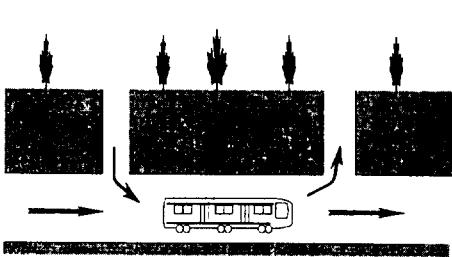


그림 1 열차풍에 의한 터널내 환기 특성

2.2 스크린 도어 시스템

스크린 도어(screen door)는 그림 2에 나타난 바와같이 정거장 구간과 선로구간을 격리하는 고정벽으로서 열차문과 연동하여 자동으로 개폐되는 기구를 말한다. 스크린 도어를 설치하는 주된 목적은 승객의 안전성 확보와 정거장의 쾌적성 향상에 있다. 최근 정거장 유동인구의 증가로, 정신이상자나 술에 취한 승객 또는 승차를 준비하던 승객이 밀려서 선로구간에 떨어지는 등의 사고소식이 언론에 보도되기도 하였다. 스크린 도어는 이러한 안전사고와 예방뿐만 아니라 열차풍에 의한 불편감 및 여름철 냉방부하의 증가를 막을 수 있다는 점에서 그 필요성이 증대되고 있다. 그러나 스크린 도어 설치시 대두되는 문제점도 있다. 그 중 가장 큰 문제점은 건설비와 유지비의 증가이다. 연중 냉방이 필요한 국가(예: 싱가포르 등)에서는 냉방부하의 경감으로 건설비 및 유지비의 충당이 가능하지만 6~9월 밖에 냉동기를 가동시키지 않는 국내의 실정에서는 운영비의 절감폭이 줄어든다. 이밖에도 승객의 증가로 정거장이 혼잡하게 될 때 이중 도어에 의한 열차 운행간격의 지연과 안전성을 위한 스크린 도어의 적정 강도설계의 요구 등이 있다. 스크린 도어 시스템이 이러한 문제점을 가지고 있긴 하지만 승객의 안전과 쾌적성을 중요시한다는 점에서는 향후 보편화될 전망이다.

스크린 도어를 설치할 경우, 선로구간에서의 환기방식도 일반적인 경우와 차이를 나타낸다. 일반적인 정거장 환기는 열차 하부의 열량이 정거장으로 유입되는 것을 막기 위하여 정거장 선로

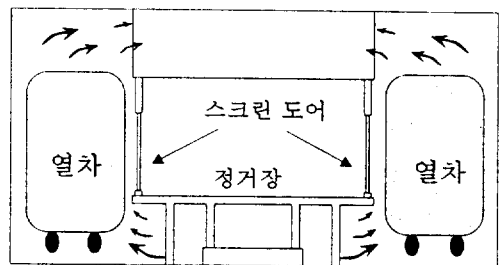


그림 2 스크린 도어와 선로구간 환기

의 하부에서 흡기하고 상부에서 급기하는 방식을 많이 채용하지만 스크린 도어가 설치되면 선로부에서 발생한 열량이 정거장 선로부의 상부에 축적되게 되므로 상부에서 흡기하고 하부에서 급기하는 방식이 요구된다.

3. 열차풍 거동

지하철에서의 열차풍 거동을 예측하기 위해서는 지하철 터널의 형상과 환기특성을 이해하여야 한다. 단순히 환기특성을 우수하게 하려면 터널의 단면과 환기구의 크기가 클수록 좋다. 그러나 터널의 형상은 토목적인 구조(시공 및 안전성 등)에 의해 제약을 받으며, 환기구의 출구는 지상으로 연결되므로 환기구의 위치 및 크기 선정에 많은 어려움이 따른다. 이러한 제약요소들을 고려하면서 적합한 터널설계를 위해서는 열차풍 거동을 상세히 살펴보는 것이 필요하다. 본 장에서는 스크린 도어가 설치된 터널을 예로 들기로 한다.

3.1 터널의 형상 및 열차운행 곡선

그림 3은 국내 D사에 건설 예정인 지하철의 일부로서 2개의 섬식 정거장(200정거장, 300정거장), 본선터널(main tunnel), 4개의 환기구(ventilation shaft), 그리고 그 끝과 연결된 4개의 수직환기타워(vertical ventilation tower)를 갖는 단선터널을 보여준다. 여기서 '섬식 정거장'은 정거장의 양쪽에 단선터널 선로가 있는 정거장을 뜻한다.

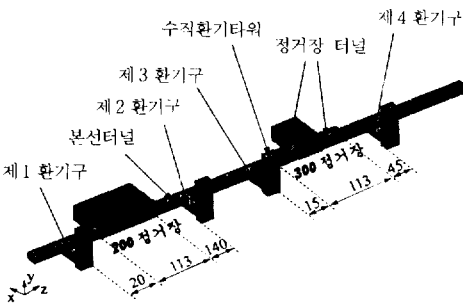


그림 3 지하철 터널의 형상

그림 3에 나타난 바와같이 200정거장과 300정거장의 폭은 113m이며 제1환기구는 200정거장으로부터 이전 정거장쪽으로 20m, 제2환기구는 200정거장으로부터 300정거장쪽으로 140m 떨어져 있다. 또한 제3환기구는 300정거장으로부터 200정거장쪽으로 15m, 제4환기구는 이후 정거장쪽으로 45m 떨어져 있다. 200정거장의 형상은 직육면체 형상인데 반하여 300정거장의 형상은 직육면체의 양쪽에 본선터널보다 큰 2개의 정거장터널(station tunnel)이 연결된 형태이다. 그림 3에서 z방향은 터널의 종방향, 즉 열차의 진행 방향을 나타내고, y방향은 지표면쪽의 방향

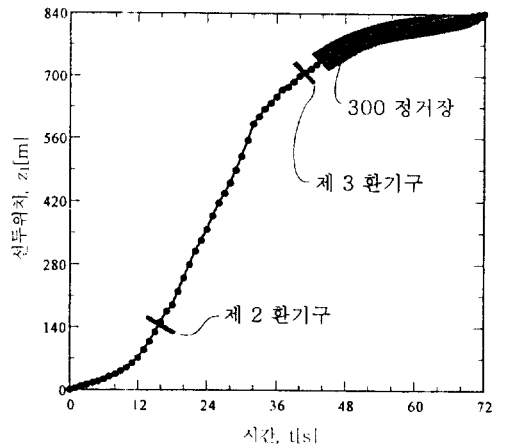


그림 4 시간에 따른 열차 선두의 위치

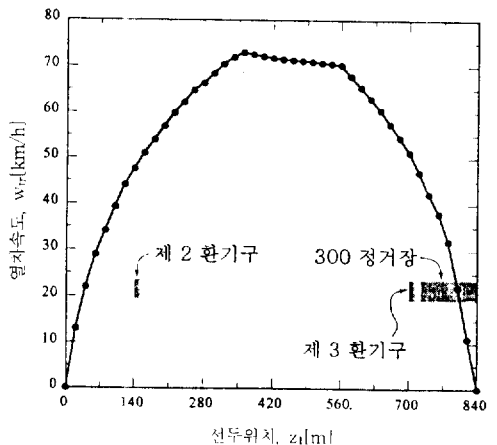


그림 5 열차선두 위치에 따른 열차의 속도

을 뜻하며 나머지 방향을 x방향으로 표시하였다. 그림에서 본선터널 측면에 연결된 4개의 환기구는 자연-기계환기 방식으로 구성되며 각종 댐퍼와 송풍기 및 부대장치 때문에 복잡한 구조를 갖는다.

한편 열차는 200정거장을 출발 후 24초간 가속운전, 7초간 타행운전, 그리고 41초간 감속운전하여 총 72초 후 300정거장에 도착하여 총 이동거리는 840m이다. 그림 4와 그림 5를 열차운행 곡선이라 하며 각각 시간에 따라 열차 선두 이동거리(z), 열차 선두 이동거리에 따른 열차 속도(w_{tr})를 나타낸다. 그림에는 200정거장을 출발하는 열차선두의 z위치를 새로운 z_1 조표계의 기준으로 하였고 제2 및 제3환기구와 300정거장의 위치를 함께 도시하였다.

3.2 환기구 출입 유량⁽³⁾

그림 6은 200정거장과 300정거장 사이를 운행하는 열차의 속도가 최고속도인 200m/s(72km/h)에 도달한 때($t=24s$)의 터널단면의 속도분포를 나타낸다. 터널단면에 비하여 터널 길이가 매우 커서 그림에 상세한 속도분포를 설명하기 힘들기 때문에 실제 크기를 z방향만 1/5로 축소하여 속도분포를 나타내었고 실선의 직육면체는 열차를 뜻한다. 그림에 나타난 속도분포를 보면, $z=0$ 인 지점에서부터 제1환기구 이전 여역까지에서는 유속이 1m/s이하로서 거의 유동이 없다. 그러나 열차 후미의 부압에 의해 제1환기구로부

터 약 6.5m/s의 공기가 유입된다. 공기의 유속은 정거장에서 유로 단면적이 축소되기 때문이다. 또한 정거장을 통과한 공기의 유속은 유로 단면적이 확대되면서 감소한다. 7m/s의 유속으로 제2환기구로부터 본선터널로 유입되던 공기는 본선터널에서 유속의 증가를 보이는데 이는 제1환기구로부터 유입된 공기와 혼합되면서 유량이 증가하기 때문이다. 열차주의의 유동은 열차의 후미 부근에서 16m/s의 큰 유속을 나타낸다. 열차의 후미는 제1환기구와 제2환기구로부터 공기의 유입을 초래하는 부압이 최대로 작용하는 곳이므로 유속이 커진다. 또한 열차와 접하는 면에서의 유속은 19m/s로서 열차의 속도와 비슷하지만 터널벽으로 갈수록 급격히 유속이 줄어듦을 알 수 있다. 따라서 이 영역에서는 압력 손실이 예상된다. 열차의 선두에서 발생한 열차풍은 열차앞 본선터널의 유속을 증가시킬뿐만 아니라 제3환기구와 제4환기구에서 공기의 유출을 초래한다. 그림에서 열차풍의 영향으로 인해 열차의 선두로부터 50m 지점에서는 12m/s의 유속을, 정거장에서는 4m/s의 유속을 나타낸다. 또한 제4환기구로 유출되는 유속은 약 5m/s를 나타내는데 이는 열차풍이 제4환기구보다 제3환기구에 큰 영향을 미친다는 사실을 뜻한다. 제4환기구 이후의 본선터널에서의 유속은 1m/s 이하로서 열차풍의 영향이 거의 미치지 않음을 알 수 있다.

시간에 따라 4개의 환기구에서 유·출입되는 유량을 그림 7에 나타내었다. 그림에서 횡축은 열차가 200정거장 출발시를 기점으로한 시간(t)을 표시하며, 좌측 종축은 시간에 따른 각 환기구에서의 환기량(Q)을 나타낸다. 또한 우측 종축은 시간에 따른 열차 출발후 열차 선두가 진행한 거리(z_1)를 나타낸다. 여기서 환기량의 양수 값은 터널내의 공기가 환기구를 통해 외부로 유출되는 것을, 음수 값은 외기가 환기구를 통해 터널내로 유입되는 것을 의미한다.

터널내의 지하철 열차풍 거동은 열차가 터널내의 어떤 위치에 존재하는가에 의해 크게 좌우될 것이다. 즉, 열차운행으로 인하여 열차 선두에서는 대기압보다 높은 양압(positive pre-

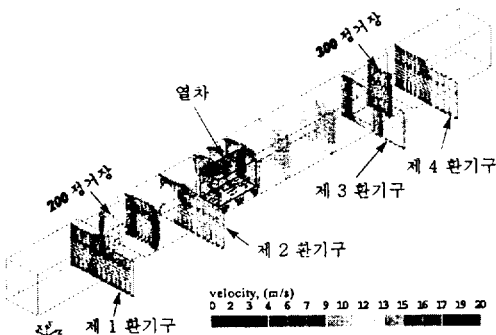


그림 6 x-y단면에서의 속도분포($t=24s$)

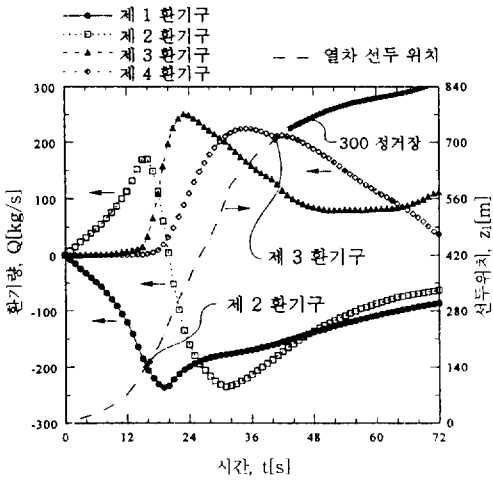


그림 7 환기구에서의 시간에 따른 유량

ssure)이 발생하고, 열차 후미에서는 대기압보다 낮은 음압(negative pressure)이 발생한다. 따라서 열차가 환기구로 접근할 때에는 터널내의 공기가 환기구를 통해 외부로 유출되고, 환기구를 통과한 후에는 외기가 환기구를 통해 터널내로 유입될 것이다. 그림 7은 이러한 경향을 열차 진행에 따라 환기구에서의 시간에 따른 환기량으로 정량화하여 나타내고 있다.

3.3 스크린 도어에 작용하는 압력⁽²⁾

열차풍이 출발역인 200정거장 스크린 도어의 전체에 미치는 평균압력을 시간에 따라 열차 선두의 위치와 함께 그림 8에 나타내었다. 그림에서 음수는 대기압보다 낮은 음압을 나타내며 양수는 대기압보다 높은 양압을 나타낸다. 열차가 출발하면서 정지하고 있던 공기를 스크린 도어 쪽으로 밀기 때문에 잠시 동안만 양압을 나타내다가 그 이후부터는 음압을 나타내고 있다.

열차의 후미가 200정거장을 빠져나가는 시점에서 열차 후미의 음압이 스크린 도어에 크게 작용하므로 이때 최대 평균음압을 나타낸다. 이때의 200정거장 스크린 도어에 미치는 국소압력 분포를 그림 9에 나타내었다. 그림에 나타난 바와같이 열차 전체 방향쪽의 스크린 도어에서 -300[Pa]을, 반대쪽의 스크린 도어에서 -130[Pa]

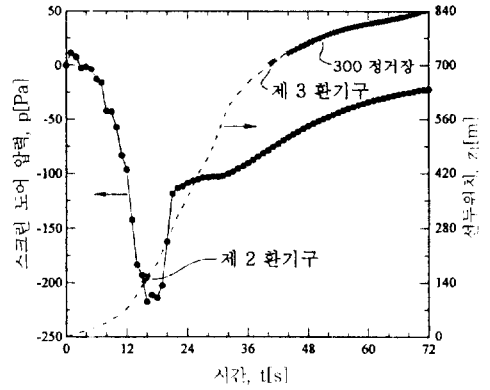


그림 8 200정거장 스크린 도어에서의 평균압력

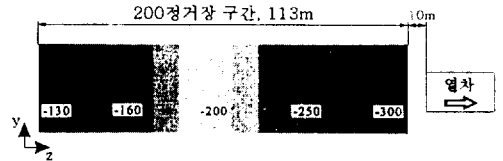


그림 9 200정거장 스크린 도어에 최대 평균 음압이 발생할 때의 국소압력 분포 (t=16s, (unit:Pa))

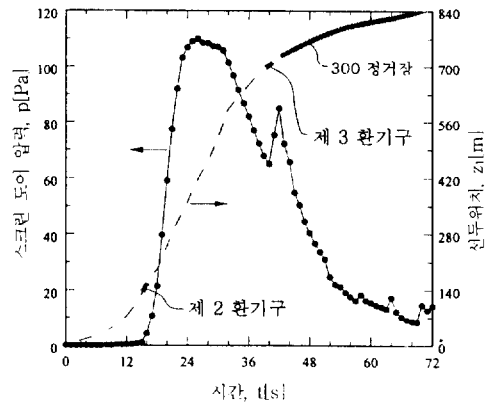


그림 10 300정거장 스크린 도어에서의 평균압력

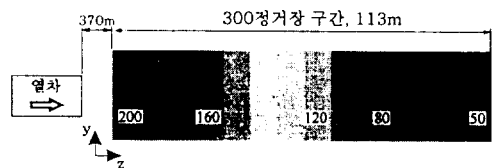


그림 11 300정거장 스크린 도어에 최대 평균 양압이 발생할 때의 국소압력 분포 (t=24s, (unit:Pa))

을 나타내고 있다.

열차풍이 도착역인 300정거장 스크린 도어와 전체에 미치는 평균압력을 시간에 따라 열차 선두의 위치와 함께 그림 10에 나타내었다. 열차 출발 후 $t=15$ 초까지는 스크린 도어에 미치는 열차풍의 영향이 거의 없다가, 이후 평균압력이 증가하기 시작하여 열차의 속도가 최고에 도달하는 $t=24$ 초에서 최대 양압을 나타낸다. 이는 열차의 최고 속도때 발생한 열차풍이 스크린 도어에 크게 작용하기 때문이다. 이때의 300정거장 스크린 도어에 미치는 국소압력 분포를 그림 11에 나타내었다. 그림에 나타난 바와같이 열차 진행 방향쪽 스크린 도어에서 50[Pa]을 나타내며 반대쪽 스크린 도어에서 200[Pa]을 나타내고 있다.

4. 맺음말

본 고에서는 정거장에 스크린 도어가 설치된 지하철 터널 일부에서의 열차풍 거동을 설명하고자 하였다. 이러한 열차풍 거동의 이해는 지하철에서 발생하는 먼지 및 유해가스 문제를 감

소시킬 수 있는 승객의 안전성과 쾌적성을 고려한 설계를 실시할 때 중요한 지표로 사용될 수 있다.

지하철 열차풍 거동과 터널 환기구에서의 환기량 및 스크린 도어에서의 압력에 대한 보다 정확한 정보를 위해서는 환기구의 구체적 형태와 기계적인 환기장치의 경우는 시간별 운영계획 등에 대해서도 고려하여야 하며 이는 추후 연구과제라 하겠다.

참 고 문 헌

1. 오명도 외, 1998.1.15, “도심 지하철 승강장에서의 열차풍 조사연구”, (주)대우엔지니어링 연구보고서.
2. 조율연, 1996.11.7, “지하철의 환기현황과 연구방향”, 공기조화 냉동공학회 공조부문 강연회.
3. 김경환, 이재현, 오명도, 차철현, 1997, “지하철 열차풍의 비정상 환기 특성”, 공기조화 냉동공학회 '97 동계학술대회, 공기조화 냉동공학회, pp. 431~438.