

서울시 9호선 터널환기 및 방재시스템 설계사례

9호선 지하철역사에 스크린도어설치로 인하여 승강장과 터널이 차단되므로 최적의 터널환기 및 방재시스템을 시뮬레이션 검증하여 설계에 반영하였다. 그 설계사례를 소개하고자 한다.

공 상 권

(주)대우엔지니어링 철도써시스템사업부(skkgong@dweng.co.kr)

서울시도시철도 9호선은 2009년 상반기 상업운전을 목표로 총연장 39.7 km에 37개역을 가진 복선터널(급행 및 완행운행) 구조로 1, 2단계로 나누어 공사 중에 있다. 1단계구간은 김포기지역에서 강남역까지로 노선 연장은 25.5 km의 구간에 25개역으로 되어 있으며, 2단계구간은 12개역으로 설계 중에 있다. 환경유지와 안전을 최우선목표로 설계하였다.

도시철도 터널 환기시스템

도시철도 터널은 철도터널과 달리 대부분 지하에 승강장이 있으며 열차운행회수 및 편성수가 많고 교통이용객 수요가 많아 혼잡성이 큰 것이 특징이다. 지하역사는 오염농도가 높고 화재발생시 대형사고의 위험요소가 크므로 가장 효과적이고 안전한 환기

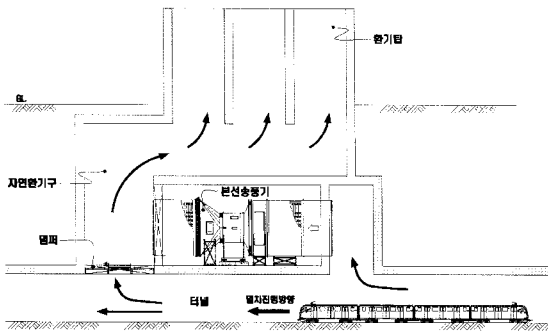
방식을 선정하여야 한다. 배출방식과 터널형태에 따른 구분을 하면 다음과 같다.

기계 및 자연환기 혼용방식

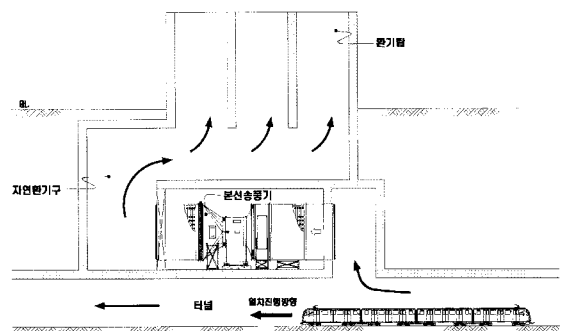
터널내 부유분진 및 발생 열을 그림 1과 같이 강제로 환기하는 방식과 열차풍압을 이용하여 배출하는 자연환기방식을 말한다. 환기량 조절이 가능하며, 집중 환기가 가능하므로 환기효과가 좋다. 또한, 화재발생시 터널내 연기배출효과가 우수하여 화재진압 및 피난에 효과적이다. 대부분 국내도시철도에 많이 적용하고 있다.

기계환기 방식

터널내 발생된 부유분진 및 열을 그림 2와 같이 강제로 환기하는 방식으로 송풍기 제어로 환기량 조



[그림 1] 기계 및 자연환기 혼용방식

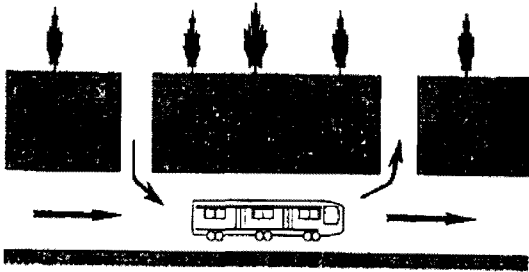


[그림 2] 기계환기 방식

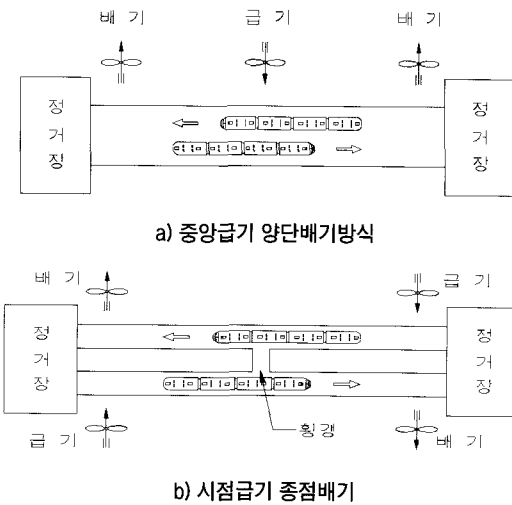
정이 가능하고 환기효과가 좋다. 집중 환기가 가능하나 송풍기 운전에 따른 동력비 및 유지관리비용이 많이 들고 소음에 대한 대책 필요하다. 화재발생시 피난 및 제연설비로 겸할 수 있다.

자연환기 방식

그림 3과 같이 열차진행시 발생하는 열차풍압의 유동에 의해 환기하는 방식으로 운행속도, 터널구조 및 구배에 따라 환기가 불규칙하며 환기량 조절 및 제연기능이 불가하다. 환기구가 다수 구축되어 초기 구조물 공사비가 증가되며, 보도상의 통행인에게 돌풍, 소음, 냄새 등의 영향이 발생할 수 있다. 그러나 장비에 대한 유지관리는 불필요하다. 초기 서울지하



[그림 3] 자연환기 방식



[그림 4] 복선(중양급기 양단배기방식)과 단선(시점급기 종점배기)방식

철 1호선에 적용하였으나 신설하는 도시철도에는 제연설비 때문에 적용하지 않고 있다.

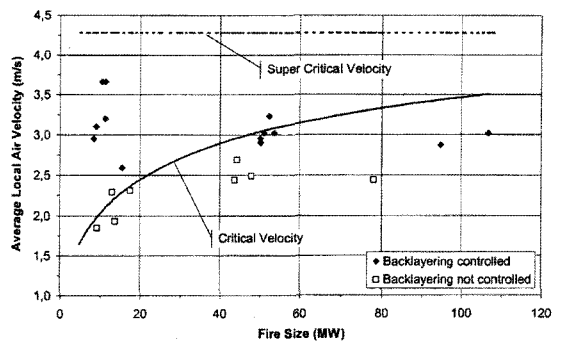
터널형식에 따른 구분

선로설치 형태에 따라 복선 또는 단선으로 나눈다. 동일 터널내에서 상하행선이 양방향으로 주행하는 경우의 환기방식을 복선이라 하고, 열차가 한개 터널에서 한 쪽 방향으로만 주행하는 경우의 환기방식을 단선이라 말한다. 그림 4는 복선과 단선의 송풍기배치를 표시하고 있다.

도시철도 터널 화재발생시 제연설비의 중요성

터널 안에서의 화재 발생시 열에 의한 손상 이외에 연기 등(연기, 연소생성가스, 산소부족 공기)에 의해 사고가 확대되고 피해가 커진다. 이는 밀폐된 공간의 특수성(폐쇄감, 위기감, 정서불안, 시야불명, 방향감 상실 등)으로 인해 신속한 피난과 대처가 곤란하기 때문이다. 이때 피해 승객들은 자칫 패닉(Panic)상태에 빠질 수 있으므로, 화재에 따른 연속적인 피해를 유발시킬 가능성이 크다.

터널 제연설비의 종합적인 검토가 더욱 중요한 것이다. 제연설비 설계기준은 터널의 형태(배출구 및 유입구의 수량, 터널단면형상, 단면적크기, 경사각, 종방향 기류속도 등)와 화재강도, 화염크기 등의 규모와 역학관계가 성립되며, 대피방향으로 역류현상(Back Layering)이 발생하지 않도록 그림 5와 같이



[그림 5] 화재강도에 따른 임계속도



화재강도에 따른 임계속도(Critical Velocity) 이상이 되도록 제연풍속 및 풍량을 산출하여야 한다. 이는 산출이 복잡해 복합요소를 컴퓨터를 통한 시뮬레이션을 통해 최적의 환기량, 환기구위치 수량, 피난로 등 위치를 검토할 필요가 있다.

터널의 제연설비 설계

터널 내에서 제연설계는 화재발생시 승객의 안전한 대피로 확보와 신속한 연기배출을 하는데 있다. 그러기 위해서는 제연구획 설정, 급기 및 배출량확보, 제연풍속 유지 등이 매우 중요하다.

제연구획

관련법규 및 규정은 없으나 일반적으로 도시철도 터널의 경우 1개의 예상제연구역을 정거장과 정거장사이를 많이 선정하고 있다. 이는 승객의 피난거리와 연기의 확산방지 및 신속한 배출, 송풍기의 경제적인 운전 등을 고려하기 때문이다. **그림 6** 및 **표 1**은 9호선에 설계에 적용했던 터널 제연개념도와

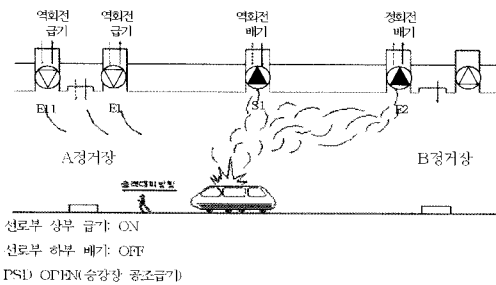
장비운전 모드를 보여주고 있다.

제연풍속

도시철도건설규칙 제67조(제연설비)에 따르면 터널 안에 설치하는 제연설비는 승객이 대피하는 반대 방향으로 연기가 배출될 수 있도록 연기의 배출방향을 조절할 수 있는 성능을 갖추어야 하며, 비상시 연기역류를 방지하는 임계기류 면풍속은 2.5 m/sec 이상이 되도록 규정되어 있다.

서울시도시철도 9호선 터널제연성능 검토

터널내 발생된 열 제거산출 풍량 과 제연풍속기준으로 산출된 풍량 중 큰 풍량으로 송풍기를 선정하였다. 터널상태가 가장 열악한 구간을 해석구간으로 설정하여 화재발생지점에 따라 피난방향에서 급기운전, 연기배출지역을 배기운전이 되도록 장비운전 모드를 설정하였다. 화재규모(열량)가 20 MW크기로 시뮬레이션을 실시 검토하여 해석한 대표적인 결과를 소개하면 다음과 같다. **그림 7**은 해석구간의 개념도이다.

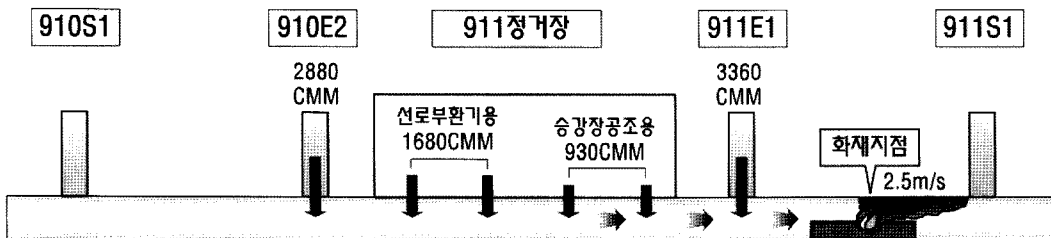


[그림 6] 터널 제연운전 개념도

<표 1> 화재발생시 장비운전모드

배기운전	급기운전
본선송풍기: • E2 배기(정회전) • S1 급기(역회전) • 선로하부배기 중지 • 송강장 공조기 가동 • 스크린도어 Close • 선로상부급기 중지	본선송풍기: • E1 배기(역회전) • E11 배기(역회전) • 송강장 공조기 가동 • 스크린도어 Open • 선로상부급기운전

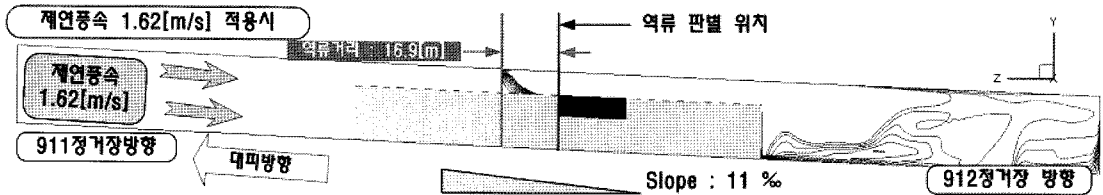
※ 필요시 인접 송풍기까지 활용



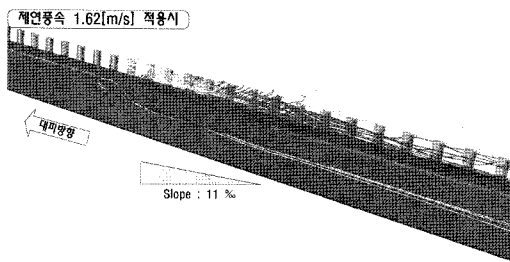
[그림 7] 제연설비 해석구간

터널 단면내의 급기속도가 1.62 m/sec의 경우
 연기 역류 발생 길이는 16.9 m가 발생하였으며, 911 정거장으로 대피하는 승객이 연기에 의한 피해를 볼 수 있으며, 대피방향으로 역류현상(back layering)이 발생하여 연기의 제압이 불가능함을 시뮬레이션을 통하여 결과를 그림 8 ~ 그림 10에 표시하였다.

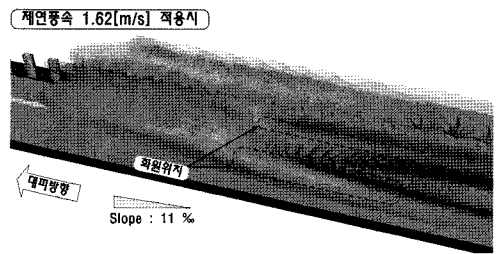
터널 단면내의 급기속도가 1.84 m/sec의 경우
 연기 역류 발생 길이는 3.5 m로 발생하였으며, 911 정거장으로 대피하는 승객이 연기에 의한 피해를 다소 볼 수 있으나 반대편 선로부에는 역류현상이 거의 없음을 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과를 그림 11 ~ 그림 13에 표시하였다.



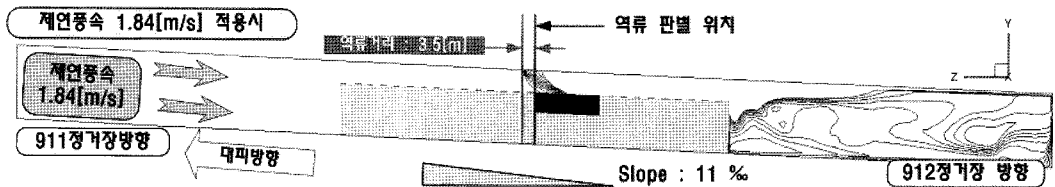
[그림 8] 단면표시



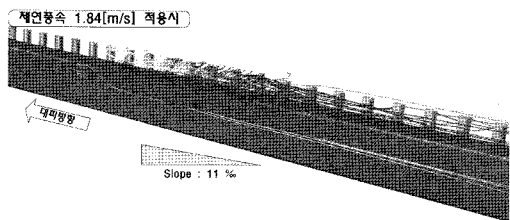
[그림 9] 기류거동



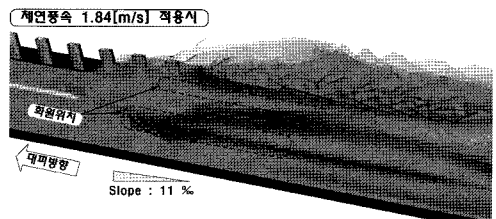
[그림 10] 연기거동



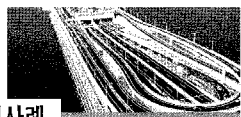
[그림 11] 단면표시



[그림 12] 기류거동



[그림 13] 연기거동

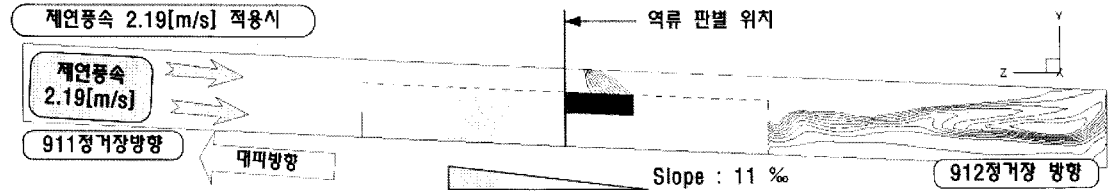


터널 단면내의 급기속도가 2.19m/sec의 경우
 연기역류 제압이 가능하고, 911정거장으로 대피하는 승객에게 안전한 시야 제공이 가능하다. 시뮬레이션 결과를 그림 14 ~ 그림 16에 표시하였다.

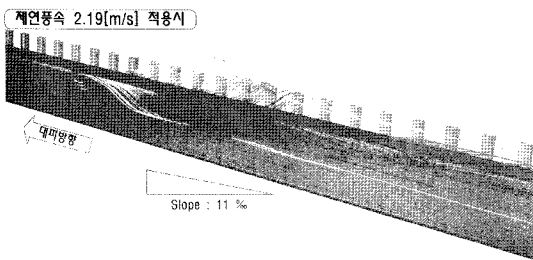
연기역류 제압이 가능하며, 법적요구 풍속을 적용할 경우 터널내 단면이 다소 넓거나 보다 높은 화재강도에서도 연기제압 가능한 것으로 검토되었다.

시뮬레이션 결과를 그림 17 ~ 그림 19에 표시하였다.

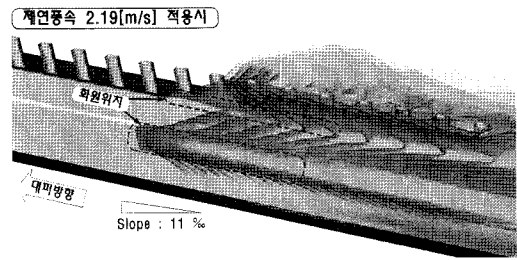
따라서 터널내 기류속도는 2.5 m/sec 이상이 되도록



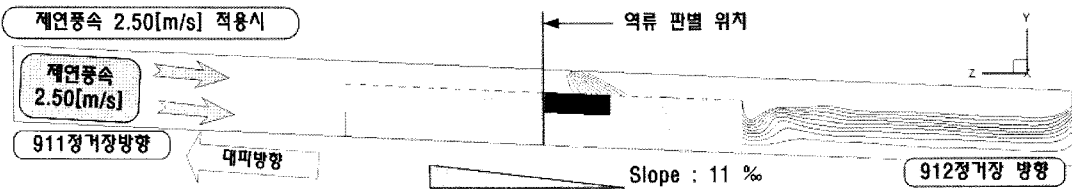
[그림 14] 단면표시



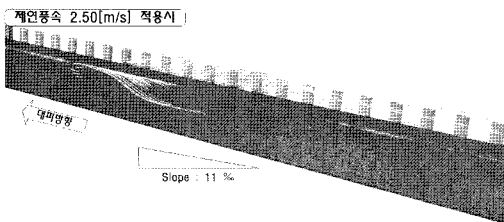
[그림 15] 기류거동



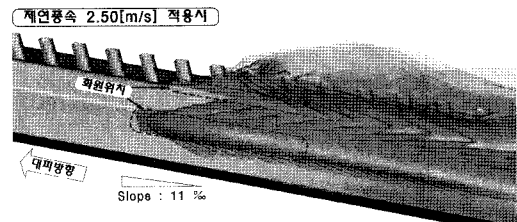
[그림 16] 연기거동



[그림 17] 단면표시



[그림 18] 기류거동



[그림 19] 연기거동

록 송풍기용량을 선정하여 화재발생시 연기역류가 방지되도록 반영하였다.

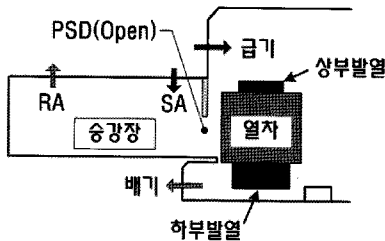
승강장의 선로부 환기시스템

승강장과 선로부에 스크린도어를 설치하므로 열차에서 발생한 제동발열열, 차량의 냉각열 등과 부유분진을 원활히 배출하도록 선로부 환기방식을 시뮬레이션을 통하여 최적의 검토하여 반영하였다.

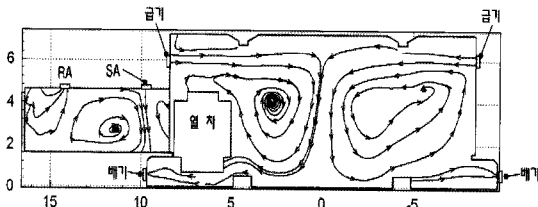
선로부 상부급기 + 하부배기 방식

열차정차시 선로부에서 발생하는 열 및 분진제거를 위해 환기할 경우 본선송풍기와 별개로 운전이 가능하다. 열, 부유분진 등이 승강장으로 침투가 낮게 분석되었다. 그림 20은 개념도를 나타낸다.

승강장 환기운전은 스크린도어 Open시 급기풍량의 30% 정도를 가압하여 분진침입 차단하고 70%는 순환시켜 재사용하여 경제적인 시스템이 되도록 하였다. 열차상부의 에어컨 냉각발열을 회색시키고 하부배기로 제동 및 보조기기발열, 부유분진 등이 확산되지 않도록 제거시킨다. 그림 21에서 보는 바와 같이 분석결과 상부급기로 인하여 열기가 선로부 상



[그림 20] 상부급기 + 하부배기 개념도



[그림 21] 상부급기 + 하부배기 기류분포도

부에서 하향방향으로 회전하면서 2개 Zone으로 구획되는 현상을 보인다.

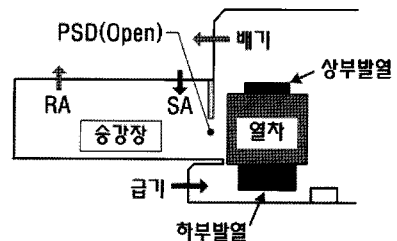
선로부 상부배기 + 하부급기 방식

선로부 상부급기 + 하부배기방식과 특징이 같으며 환기운전은 방식이 같다.

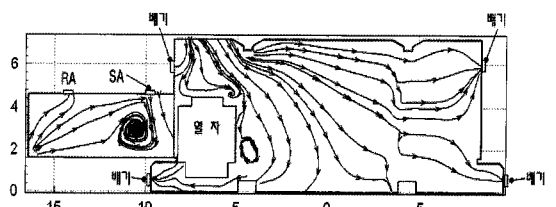
그림 22는 개념도를 나타낸다. 그림 23에서와 보는바와 같이 분석결과 상대지역에 열차가 없으므로 기류가 반대편에서 회전하는 현상이며 부유분진이 승강장으로 일부구간으로 침투된 것으로 분석되었다.

선로부 상부배기 + 하부배기시스템

평상시 환기운전 할 경우 본선송풍기와 같이 운전하여야 환기기능이 가능하므로 비경제적인 시스템이다. 그림 24는 개념도를 나타낸다. 화재발생시 오직 연기만 배출기능만 가능하다. 선로부의 상, 하부배기로 에어컨냉각부하, 제동발열 및 보조기기 발열 등 제거할 경우 터널용 송풍기 가동하여야 효과가 크다. 그림 25에서는 본선급배기 송풍기를 동시에 운전하는 경우 기류분포를 나타내는데 상당히 양호한 기류흐름으로 분석되었다.



[그림 22] 상부배기 + 하부급기 개념도



[그림 23] 상부배기 + 하부급기 기류분포도



선로부 하부배기시스템

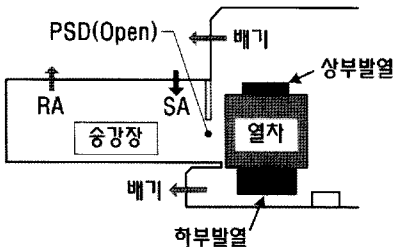
선로부 상부배기 + 하부배기방식과 특징이 같으며 승강장 환기운전은 같다.

그림 26은 개념도를 나타낸다. 그림 27에서와 같이 분석결과 상부의 발생열이기류에 의해 하부로 이동하는 기류분포를 형성하고 있다. 본선 급배기 송풍기를 동시에 운전할 경우 기류분포를 나타내는

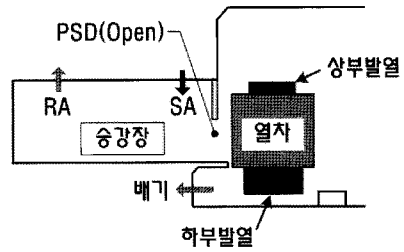
데 대체로 양호한 기류흐름으로 분석되었다. 터널용 송풍기가 운전되지 않을 경우 배출이 원활하지 않았다.

선로부 환기방식 분석결과

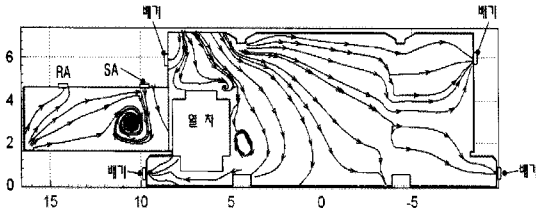
선로부 환기방식에 따른 열량 분석한 결과를 그림 28의 그래프로 표시하였다.



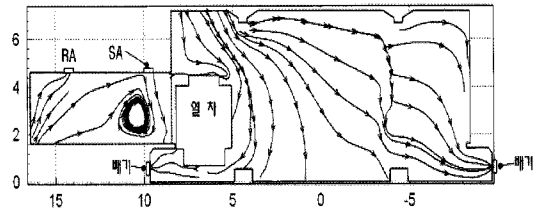
[그림 24] 상부배기 + 하부배기 개념도



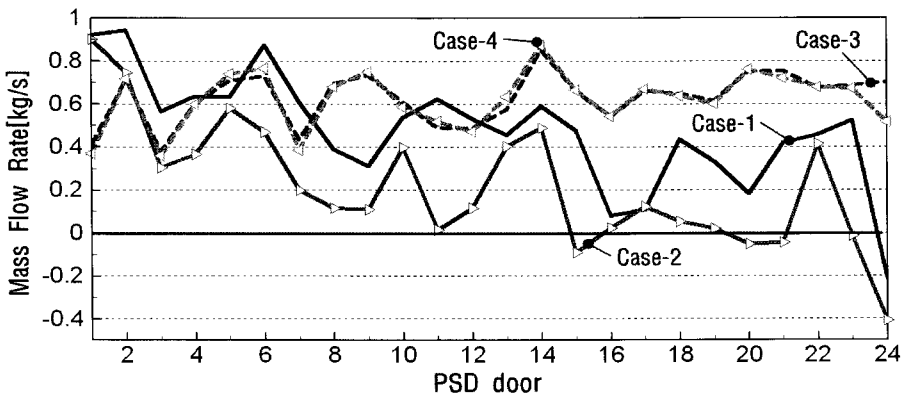
[그림 26] 하부배기 개념도



[그림 25] 상부배기 + 하부배기 기류분포도

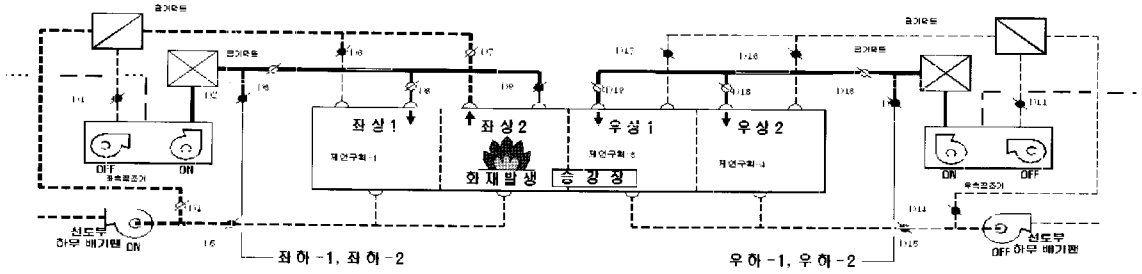


[그림 27] 하부배기 기류분포도



Case-1: 선로부 상부급기+하부배기방식 Case-2: 선로부 상부배기+하부급기방식
Case-3: 선로부 상부배기+하부배기방식 Case-4: 선로부 하부배기방식

[그림 28] 선로부 환기방식에 따른 열량분석 그래프



[그림 29] 화재발생시 제연구역 운전개념도

<표 2> 장비 및 댐퍼조작 운전모드

구분	장비운전	댐퍼 열림	댐퍼 닫힘	비고
연기 배출	좌측공조기(리턴송풍기) 좌측선로부 배기송풍기	D1, D3, D4, D7	D2, D5, D6, D9,	나머지 장비는 중지
외기 공급	좌측공조기(급기송풍기) 우측공조기(급기송풍기)	D3, D8, D13, D18, D19	D11, D12, D14, D15, D16, D17	

정거장부분의 방재시스템

요즘 시공된 지하역사는 내화구조로 시공되어 화재발생의 위험성은 낮아지나 일단 화재가 발생할 경우에는 밀폐된 지하공간에서의 인명피해와 재산피해가 크게 된다. 따라서 화재발생시 연기로부터 승객들을 원활히 대피할 수 있도록 환기 및 제연설비를 설치반영 하였다.

제연구역 및 제연풍량

국가화재안전기준(NFSC)에 따라 1개의 예상제연구역의 면적은 1,000 m² 이내 직선거리 60 m 이내가 되도록 하였고 제연구역을 초과하지 않도록 제연경계벽(제연경계벽은 0.6 m 이상)을 설치하였다. 대합실, 승강장 제연경계 수직거리를 고려하여 설계하였다.

제연방식

환기겸용 제연시스템을 구성하였고 공조풍량이 제연풍량에 미달 할 경우에는 선로부 상부 급기송풍기

와 선로부 하부송풍기를 이용하도록 구성하였다.

승강장 제연구역-2에서 화재발생시 제연운전

관련법규에 따라 그림 29와 같이 승강장 제연구역을 설정하고 제연구역에서 화재발생시 제연운전에 따른 장비 및 댐퍼조작에 대하여 표 2에 운전모드를 작성하였다.

결 언

대구지하철 화재교훈으로 신설된 지하역사 및 차량내부에는 불연재로 설치되고 있으며, 안전에 대한 시민인식 향상으로 화재발생빈도는 점점 낮아지고 있다. 그러나 도시철도터널에서의 피난에 관련하여 아직 법적인 규제나 기준이 없어 아쉬움이 있다. 터널내 환기 및 제연시스템은 많은 구조물설치로 인하여 공사비 및 유지관리비가 많이 든다. 스크린도어 설치를 함으로써 안전을 최우선으로 환기 및 제연시스템을 개선하여 최상의 시스템으로 운영이 되도록 노력하여야 한다. (2)