

Tunnelling Technology

지하철터널의 환기설비



차철현

대상설비기술(주) 대표이사

1. 설비 개요

지하철은 기능상 본선터널과 정거장으로 구분되며 터널은 환기설비가 주설비이며 정거장은 각 기능별로 공기 조화설비를 행한다.

본 강좌에서는 지하철 터널환기의 개념, 적용방식, 환기량계산등 일반사항들을 서술하여 지하철터널의 환기설비에 대한 이해를 돕고자 한다.

2. 터널환기 설비

열차의 운행에 따라 다량의 열들이 발생하므로 터널내의 환경을 적절한 수준으로 유지하기 위하여 다음과 같은 기능을 수행할 수 있도록 환기시설을 한다.

- 터널내에 발생하는 열부하의 제거
- 터널내의 열평형 유지와 열축척 방지
- 승강장 지역으로 유입되는 열차풍의 최소화

- 화재시 제연기능 유지 및 피난로 확보

2.1 터널 환기방식

2.1.1 환기방식 선정시 검토사항

터널의 환기방식은 여러가지 요소를 고려하여 적합한 방식으로 선정되어야 하며 토목분야의 검토사항은 표1.에 나타내었다.

표 1. 토목분야의 검토사항

항목	고려사항
본선구간의 배선	<ul style="list-style-type: none"> • 토목중평면도에 의한 본선의 구배조건 • 단선, 복선, 유치선, 순환선의 선형조건
토목구조의 건설공법	<ul style="list-style-type: none"> • 본선구조와 관련한 개착식, 굴착식의 공법 • 본선의 심도
환기구의 설치장소	<ul style="list-style-type: none"> • 지상의 차도의 양측 보도조건과 이용가능한 위치 • 신선외기 도입을 위한 주변조건 • 정거장으로 침입하는 열차풍을 최소화 하기 위한 위치선정
환기실의 관리성	<ul style="list-style-type: none"> • 환기실내 송풍기의 관리를 위한 환기실 접근성 • 장비반입구 위치

2.1.2 터널 환기방식

터널의 환기방식은 열차풍에 의한 자연환기방식과 송풍기의 가동에 의한 기계환기 방식으로 대별한다.

지하철 건설의 초기에는 자연환기방식을 사용하였으나 최근에는 기계환기 방식을 채용하는 경향이 크다. 그림 1에 자연환기 방식의 개념을 보여주며 표 2는 장·단점을 나타낸다.

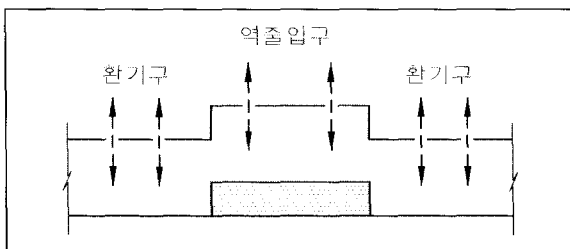


그림 1. 자연 환기방식 개념도

터널의 자연환기는 열차 운행시의 피스톤효과(Piston Effect)에 의해서 열차 운전방향으로 발생하는 기류에 의한 것이다.

표 2. 자연 환기방식의 장·단점

개요	열차주행시 터널내 발생하는 열차풍을 이용하여 환기하는 방식
환기량 조절	• 환기량 조절 불가 • 환기량 불규칙
제연 기능	• 적용 불가
장점	• 시설비 및 유지관리비 불필요
단점	• 환기 효과 불확실 • 외기의 자연 유입으로 계내의 온도 상승 또는 급감하 요인이 됨 • 환기구 다수로 초기 토목공사비 증가 • 본선 구간내 환경 조절 불가 • 비상시 제연대처 불가

열차의 전면에는 정압이 발생하여 터널내의 공기를 외부로 배출시키고 열차의 후면에는 부압이 발생되므로 외부공기가 터널내로 유입하는 작용이 이루어진다.

이러한 공기의 배출과 공기의 유입은 자연 환기구를 통하여 이루어지는데 정거장 인근에 환기구를 설치하며 터널의 중앙부에도 환기구를 설치한다.

서울지하철의 경우 1호선은 자연환기 방식으로 건설되었으며 그외의 1기 지하철 노선과 제2기 지하철에서는 기계환기 방식을 채용하였다.

기계환기 방식의 개념도는 그림 2와 같으며 그에 대한 장·단점을 표 3에 나타내었다.

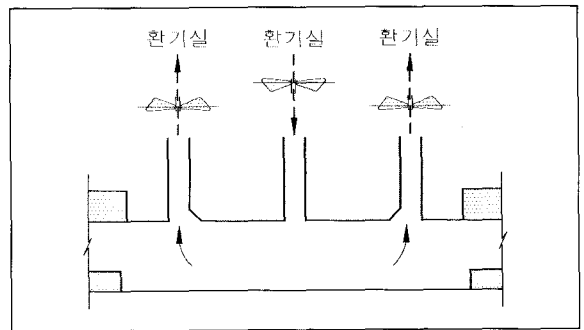


그림 2. 기계 환기방식 개념도

최근의 환기방식이 기계환기 방식이라고 해서 자연환기 방식을 배제하는 것은 아니며 기계환기 방식에 자연환기의 기능을 결합시켜서 상호 기능을 보완토록 하는 것이다.

표 3. 기계환기 방식의 장·단점

개요	열차주행시 터널내 발생하는 열을 급·배기 송풍기를 이용하여 환기하는 방식
환기량 조절	• 자동제어에 의한 대수 제어 및 일정한 환기량 조절 가능
배연설비 가능	• 축류송풍기 이용으로 역회전이 가능하므로 효과적인 제연기능 달성
장점	• 안정된 환기로 환경 조절 가능 • 열차 비운행시 집중환기로 열의 축적 방지 및 흡열능력 회복 • 초기 토목공사 투자비 절약 • 비상시 제연기능 확보
단점	• 장비의 초기 투자비 증가 • 송풍기 운전에 따른 동력비 소요

2.2 지하철 선형에 따른 환기방식

지하철의 본선터널은 단선구간과 복선구간으로 구분되며 선형의 특성에 적합한 환기방식을 적용하므로써 효율적인 환기시스템이 이루어진다.

2.2.1 단선 구간

단선구간의 터널은 열차의 주행방향이 한 방향으로 진행되므로 열차의 피스톤효과에 의한 기류와 환기방식을 일치시킨 전형적인 종류환기(Longitudinal Ventilation) 방식이다.

정거장에서 열차가 출발시 발생하는 부압에 의한 영향을 최소화하기 위하여 출발측 정거장의 인접 터널에 배기용 송풍기를 설치한다. 그림 3은 단선구간의 환기개념도를 나타낸다.

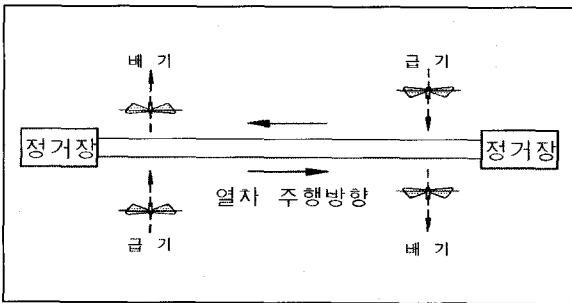


그림 3. 단선구간의 환기개념도

급기와 배기송풍기를 설치하는 환기실과 환기구의 위치는 정거장의 시점과 종점에서 40m~70m를 이격시키는데 송풍기에서 발생하는 소음이 승강장에 도달여부에 따라 이격거리를 달리하며, 승강장에 스크린도어(Platform Screen Door)시스템을 설치할 경우에는 거리를 두지 않는다.

2.2.2 복선 구간

복선구간의 터널은 열차가 양방향으로 주행하므로 피스톤효과에 의한 기류는 수시로 교차되므로 단선구간에

비해서 피스톤효과에 의한 환기량이 감소된다.

그림 4는 복선구간에서 중앙에 급기송풍기를 설치하고 정거장측의 양단에 배기송풍기를 설치하여 열차가 승강장 진입시 열차풍의 침입을 최소화할 수 있는 방식으로 터널내 열차 화재시 Push-Pull에 의한 배연환기로 피난로를 유효하게 확보할 수 있는 방식이다.

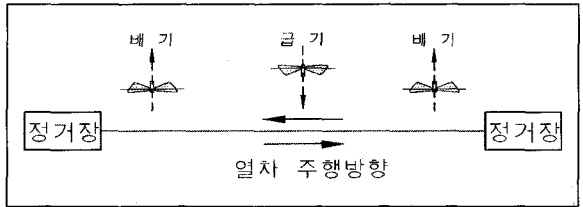


그림 4. 복선구간의 환기개념도(중앙급기, 양단배기)

이러한 환기방식은 대다수의 국내 지하철에 적용되었다.

그림 5의 환기개념도는 중앙에 배기송풍기를 설치하고 정거장 인근에 자연환기구와 비상용 송풍기를 설치하여 평상시에는 배기송풍기만 운전하여 터널내를 제3종 환기 방식으로 운용하며 비상시에는 배기송풍기와 비상송풍기를 가동하여 Push-Pull 방식으로 운용할 수 있는 방식이다.

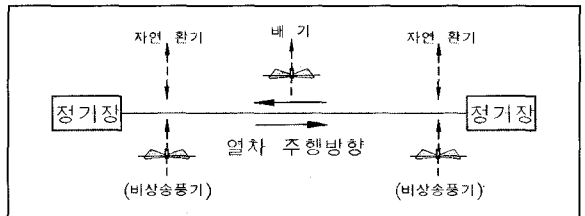


그림 5. 복선구간의 환기개념도(중앙급기, 양단자연 환기)

터널내에서 비상시는 화재시와 터널내의 온도가 설계 기준온도(40℃) 이상으로 상승할때를 말하며 송풍기를 비상운전(Emergency Operation Mode)한다.

그림 5의 중앙배기 및 양단 자연환기 방식은 미국의 애틀랜타 지하철(MATRA)에 적용 되었으며, 국내 지하철

에서는 적용예가 없으나, 승강장에 스크린도어(Platform Screen Door) 설비를 하는 경우에는 중앙배기 및 양단 자연환기 방식을 적용하여 에너지 절약을 할 수 있는 방식이다.

2.3 환기실 계획

터널내에 송풍기를 설치하기 위해 환기실을 건설하며 터널의 구간별로 적합한 규모의 형식과 면적으로 계획되어야 한다.

2.3.1 환기실의 배치계획

터널의 노선이 확정되면 다음 사항을 고려하여 환기실 위치를 결정한다.

가. 환기실의 위치

단선 터널구간의 급기와 배기 환기실은 승강장의 시점과 종점부로부터 40m~70m를 이격시키는 것을 기준으로 하고 복선터널 구간에서는 중앙의 급기용 환기실은 구간의 중앙부에, 양단의 환기실은 단선 터널구간의 경우와 동일하게 이격시키는 것이 일반적인 기준이다.

표 4. 지하철 노선별 환기실 위치

노선	중간 환기실	양단환기실 위치
서울 5호선	구간의 중앙	70m~80m 이격
서울 6호선	구간의 중앙	40m~70m 이격
부산 2호선	구간의 중앙	50m~100m 이격
대구 1호선	구간의 중앙	40m 전후이격
대구 2호선	구간의 중앙	40m~80m 이격
인천 1호선	구간의 중앙	80m~100m 이격
대전 1호선	구간의 중앙	30m~45m 이격
광주 1호선	구간의 중앙	60m~100m 이격

나. 입지조건 검토

선정된 위치에서의 용지확보의 가능여부, 지하 매설물에 의한 지장 여부를 노선측량도와 현장조사를 통하여 검

토한다. 또한 선정된 위치가 환기의 효율적인 위치라 하더라도 터널 공사의 공법과 일치하지 않으면 환기실을 터널과 연결하여 건설할 수가 없으므로 터널공법에 맞도록 환기실의 구조를 일치시킨다.

2.3.2 환기실의 구성

환기실의 구조는 송풍기실과 자연환기를 이용할 수 있는 자연환기용 풍도로 구성된다.

그림 6에 환기실의 표준도를 나타내었다.

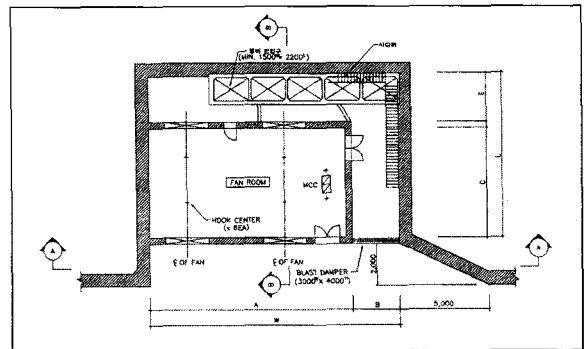


그림 6. 환기실 평면도(측부형)

가. 송풍기실 (Fan Room)

송풍기실은 송풍기와 부속기기를 설치할 수 있도록 다음의 시설물을 고려하여 공간을 확보한다.

- 송풍기 및 전동기
- 송풍기용 댐퍼(Damper)
- 덕트연결형 소음기(Sound Attenuator)
- 전원 공급 및 제어반(MCC Panel)

나. 자연환기용 풍도

자연환기용 풍도는 환기구와 터널을 연결하여 송풍기의 가동에 의한 기계환기와 자연환기의 병용으로 이용할 수 있는 구조로 하며 터널과의 연결부에 댐퍼(Blast Damper)를 설치하여 자연환기에 의한 기류가 송풍기실을 통하지 않는 분리된 구조로 계획한다.

2.4 환기구 계획

터널의 환기실과 연결되어 지상에 설치되는 환기구는 신선외기를 도입하고 터널내 오염된 공기를 외부로 배출하는 기능을 하지만 위치선정에 따른 민원 발생이 많아서 계획시 현장을 정밀조사하여 신중한 결정이 요구된다.

2.4.1 환기구의 기능

가. 자연환기 방식에서의 기능

터널내의 피스톤효과(Piston Effect)에 의해서 열차 진행하는 방향으로 터널내의 공기를 외부로 배출하고 열차 후면에는 부압이 발생되어 외부공기를 터널내로 유입시키는 작용이 원활하도록 강구되어야 하고, 환기구와 그 경로는 공기 저항이 최소가 되는 구조이며 급격한 단면 변화는 배제되어야 한다.

나. 기계환기 방식에서의 기능

터널내의 열을 외부로 배출하고 신선한 외기를 유입하여 환기하므로써 지중의 열 축적을 방지하고 흡열기능이 원활히 되도록 하며, 화재시 터널내의 승객 대피와 진화를 원활히 할 수 있도록 외기 유입과 연기 배출구로서의 역할을 수행한다.

다. 장비반입 및 유지관리시 역할

환기구는 송풍기, 소음기등 환기실에 관련된 설비 장비의 반입과 작업시 출입통로로 사용될 수 있어야 하며, 준공후의 유지 관리시에도 환기구를 통해 유지 보수가 가능한 구조가 되어야한다.

2.4.2 환기구의 위치선정

환기구의 위치는 환기실과 연결되므로 환기실의 위치에 따라 결정되지만 지상의 제한적인 요소가 있으므로 다음 사항을 고려한다.

- 신선공기의 도입가능 여부와 본선의 배출공기가 주위

에 미치는 영향을 고려한다.

- 장래의 도시계획과 주변의 구조물과 조화를 이루며 조형미를 가지도록 고려한다.
- 분진발생 요소가 많은 장소를 배제한다.
- 자동차에서 발생하는 가스의 유입을 피하기 위해 신호대기선, 버스정류장 등의 위치를 배제한다.
- 냄새가 나는 시설물의 배기장치가 있는 제과점 등의 위치를 배제한다.
- 침수가 되는 지역은 주위보다 높은 지역에 위치하도록 한다.
- 보도내 점유면적을 최소화하여 교통 장애가 되지 않도록 한다.
- 지면에 환기구를 위치시 행인에 지장을 주지않도록 과도한 풍속을 피하며 차량하중에 견디도록 충분한 강도를 고려한다.
- 급·배기구의 위치선정시 일정거리를 이격시켜 배출공기가 재흡입되지 않도록 한다.

2.4.3 환기구의 형식

지상의 환기구는 대기환경을 고려하여 일정한 높이로 설치하는것이 원칙이지만 설치위치의 제한조건 때문에 1.2m~2m 높이의 탑형과 지표면에서 0.3m 높이의 바닥형으로 구분되며 그에 대한 형식별 건설현황을 표 5에 나타내었다. 표 6은 높이에 따른 환기구의 비교를 보여준다.

표 5. 환기구의 형식별 건설현황(1999년 12월기준)

구분		계	탑형	바닥형
서울 2기	개소	1,223	909	314
	%	100	74	26
부산 2호선	개소	54	34	20
	%	100	63	37
대전 1호선	개소	70	68	2
	%	100	97	3
계		1,347	1,011	336
비율 (%)		100	75	25

표 6. 높이에 따른 환기구의 비교

구분	탑형	비타형
개요	• 지면에서 1.2m~2m 정도 높이에 개구부를 설치한것	• 지면에서 0.3m 정도의 높이에 개구부를 설치한것
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 오물 유입방지 감소 • 자동차 배기가스 등의 액상 부유분진의 유입 감소 • 관리요원 및 운영비 감소(유지관리 용이) • 지하철 구조물내 환기 개선 • 우수기의 침수방지 • 지상부 소요면적의 감소 • 토목 공사비의 절감 	<ul style="list-style-type: none"> • 상가 등의 차폐의 우려가 없음. • 보도폭이 협소할 경우 적용유리
단점	<ul style="list-style-type: none"> • 상가등의 차폐로 인한 민원 발생 • 보도에 설치시 보도폭의 감소로 통행시 불편초래 	<ul style="list-style-type: none"> • 오물 유입으로 환기구, 환기실 오염 초래 • 지하철 구내 공기 오염 심각 • 우수기의 침수 가능성이 높음 • 지상개구부의 소요면적이 크다.(탑형의 200~250%) • 면적증가로 토목공사비 증대

2.4.4 환기구의 설치면적 산정

환기구의 면적은 자연환기시에는 터널의 단면적과 동일한 면적으로 하는것이 원칙이지만 공사비가 증가되므로, 환기구의 토출측 풍속에 의해서 단면적을 산정한다. 기계환기 방식에서도 풍속에 의해서 설치면적을 산정한다.

표 7은 환기구의 풍속별 소요단면적을 보여 준다.

표 7. 풍량과 풍속에 따른 환기구의 면적산정 [단위:㎡]

풍량 (CMM)	탑형			비타형	
	5m/s	7m/s	10m/s	2.5m/s	3.5m/s
5,000	17	12	9	33	24
6,000	20	14	10	40	29
7,000	23	17	12	47	33
8,000	27	19	14	53	38
9,000	30	21	15	60	43
10,000	33	24	17	67	48
12,000	40	29	20	80	57
14,000	47	33	24	93	67
16,000	53	38	27	107	76
18,000	60	43	30	120	86
20,000	67	48	34	133	95

3. 터널 환기부하 계산법

터널내를 운행하는 열차는 전원을 공급받으면서 많은 열들이 발생하는데 차량의 기계적인 마찰저항과 공기저항 등 주행시의 발생열, 제동시의 발생하는열 그리고 기타

표 8. 운전구간별 계산법의 개요

항목	운전 구간별 계산법
개요도	
계산개요	<ul style="list-style-type: none"> • 터널내를 주행하는 열차의 소비에너지를 역행, 주행, 제동 등의 구간별로 나누어서 계산하는 방식
특성	<ul style="list-style-type: none"> • 간단한 운전 곡선과 터널내의 표고만 있으면 구할 수 있다.
적용	<ul style="list-style-type: none"> • 서울5, 6호선, 대구1호선, 대전1호선

보조기기에 의한 발생열등으로 이루어진다.

지하철의 터널내 환기부하계산 방법으로는 터널내의 운전구간별로 계산하는법, 주행시간의 비율에 의한 계산법, 열차주행시 소비전력에서 주행저항부하를 계산하는법, 터널내 열차주행중 가속과 제동구간의 회생전력 부하를 경감하는법 등으로 분류할 수 있으나 본장에서는 터널내의 운전구간별로 계산하는법과 주행시간의 비율에 의한 계산법을 소개하기로 한다.

3.1 운전구간별 계산법

표 8의 내용 참고

3.1.1 열차 주행에 의한 발열

가. 주행저항(Rr)

$$Rr = (1.65 + 0.0247V)Wm + (0.78 + 0.0028V)Wt + \{(0.028 + 0.0078(n-1)\} \cdot V^2$$

Rr : 주행저항(kgf)

Wm : 동력 전동차 총중량 (승객포함) (Ton)

Wt : 부수 전동차 총중량 (승객포함) (Ton)

n : 편성수량

V : 주행 평균속도 (km/h)

나. 상구배에서의 열차발열(Q_{Trs1})

$$Q_{Trs1} = (860 \cdot \frac{Rr + Se \cdot W}{367}) \cdot 1.2 \cdot N_1 \cdot L_1$$

Q_{Trs1} : 상 구배에서의 발열량 [kcal/h]

L₁ : 터널의 길이 [km]

Rr : 주행저항 [kgf]

Se : 선로 구배 [%]

W : 열차 총중량 [Ton]

N₁ : 시간당 열차 통과수 [열차/h]

다. 하구배에서의 열차발열(Q_{Trs2})

$$Q_{Trs2} = (860 \cdot \frac{Rr}{367}) \cdot 1.2 \cdot N_2 \cdot L_2$$

Q_{Trs2} : 하 구배에서의 발열량 [kcal/h]

Rr : 주행저항 [kgf]

N₂ : 시간당 열차 통과수 [열차/h]

L₂ : 터널의 길이 [km]

라. 열차 주행에 의한 총 발생열량 (Q_{Tr})

$$Q_{Tr} = Q_{Trs1} + Q_{Trs2}$$

Q_{Tr} : 열차 구배에 의한 총발열량 [kcal/h]

Q_{Trs1} : 상구배에서의 발열량 [kcal/h]

Q_{Trs2} : 하구배에서의 발열량 [kcal/h]

마. 열차 제동에 의한 발열 (Q_{Trs})

$$Q_{Tr} = Q_{Tr1} + Q_{Trs2}$$

$$Q_{Trs1} = (1-fq) \cdot \left(\frac{1}{J} \cdot \frac{We_1}{2g} \cdot V_1^2 \cdot N_1 \right) \cdot \alpha_{s1}$$

$$Q_{Trs2} = (1-fq) \cdot \left(\frac{1}{J} \cdot \frac{We_2}{2g} \cdot V_2^2 \cdot N_2 \right) \cdot \alpha_{s2}$$

Q_{Trs} : 승강장부에서 열차제동에 의한 발열량 [kcal/h]

Q_{Trs1} : 상행열차의 제동에 의한 발열량[kcal/h]

Q_{Trs2} : 하행열차의 제동에 의한발열량[kcal/h]

We₁ : 상행열차의 상당 총 중량 [Ton]

$$= (\text{상행열차의 공차중량} + \text{승객중량}) \times 1.1$$

We₂ : 하행열차의 제동에 의한 발열량[Ton]

$$= (\text{하행열차의 공차중량} + \text{승객중량}) \times 1.1 \rightarrow$$

10%는 중량의 회전관성열차 공차중량[kg],

승객 1인당 중량[kg]

- V_1 : 상행열차의 제동 초속도 [m/s]
- V_2 : 하행열차의 제동 초속도 [m/s]
- J : 열의 일당량 ; 427 [kg · m/kcal]
- g : 중력 가속도 ; 9.8 [m/s²]
- f_q : 열차의 회생율 ; 0.4
- α_{s_1} : 상행열차의 제동 발열중 본선에서 발생하는 비율 ; 0.5
- α_{s_2} : 하행열차의 제동 발열중 본선에서 발생하는 비율 ; 0.5
- N_1, N_2 : 상행, 하행열차의 통과수 [열차/h]

- Q_{AC_1}, Q_{AC_2} : 상 · 하행열차 냉방기기의 발열량 [kcal/h]
- AC_1, AC_2 : 상 · 하행열차의 차량당 냉방기용량 [kcal/h]
- M_1, M_2 : 차량당 압축기 모터의 정격 출력 [kw]
- n_1, n_2 : 상 · 하행열차의 열차당 차량수
- Tt_1, Tt_2 : 상 · 하행열차의 터널부 통과시간 [s]
- N_1, N_2 : 상행, 하행열차의 통과수[열차/h]

3.1.2 열차 보조기기에 의한 발열 (Q_{AX})

$$Q_{AX} = Q_{AX_1} + Q_{AX_2}$$

$$Q_{AX_1} = \frac{860 \cdot K_1 \cdot Tt_1}{3,600} \cdot N_1$$

$$Q_{AX_2} = \frac{860 \cdot K_2 \cdot Tt_2}{3,600} \cdot N_2$$

- Q_{AX} : 열차 보조기기의 발열량 [kcal/h]
- Q_{AX_1}, Q_{AX_2} : 상 · 하행열차 보조기기의 발열 [kcal/h]
- K_1, K_2 : 보조기기의 사용전력 [kw]
- Tt_1 : 상행열차의 터널부 통과시간 [s]
- Tt_2 : 하행열차의 터널부 통과시간 [s]
- N_1, N_2 : 상 · 하행열차의 통과수 [열차/h]

3.1.3 열차 냉방기기에 의한 발열(Q_{AC})

$$Q_{AC} = Q_{AC_1} + Q_{AC_2}$$

$$Q_{AC_1} = \frac{AC_1 + M_1 \times 860}{3,600} \cdot n_1 \cdot N_1 \cdot Tt_1$$

$$Q_{AC_2} = \frac{AC_2 + M_2 \times 860}{3,600} \cdot n_2 \cdot N_2 \cdot Tt_2$$

Q_{AC} : 열차 냉방기기의 발열량 [kcal/h]

3.2 주행시간의 비율에 의한 계산법

3.2.1 열차주행 및 제동부하 발생열량

$$Q_{tr} = \left\{ \frac{(We+W \cdot n)}{J} \times \frac{V^2}{2g} + \frac{We \cdot \Delta h}{J} \right\}$$

$$\times (1 - \beta) \times (1 + \alpha_s) (1 + \alpha_s) \times N$$

- Q_{tr} : 열차주행 총 발열 [kcal/h]
- We : 승객포함 열차 총 중량 [Kg]
승객수는 구간 통과 인원
- W : 열차의 공차 중량 [Kg]
- n : 관성 계수 : 0.08
- J : 열의 일당량 : 427 Kg.m/Kcal
- V : 최종 제동 지점에서의 속도 (m/s)
- Δh : 최종 제동지점과 정거장 중심의 표고차 (m)
- g : 중력가속도 : 9.8m/s²
- β : 재발전율 : 0.3
- α_s : 열차 가속에 의한 발열 부가계수 : 0.25
- α_s : 보조 기기에 의한 발열 부가계수 : 0.05
- N : 시간당 통과 차량수

주행 시간의 비율에 의한 계산법은 열차의 운동에너지의 합계로 표현할 수 있으므로 터널내의 주행시 발생열량을 하나의 식으로 정리한다.

표 9. 주행시간의 비율에 의한 계산법 개요

항목	주행시간의 비율에 의한 계산법
개요도	
계산개요	<ul style="list-style-type: none"> 터널내 주행하는 열차 발생열을 최종 제동 시점에서 운동 및 위치에너지로 구하고 열차의 주행시간 비율에 의해서 구하는 방식
특성	<ul style="list-style-type: none"> 정확한 운전 곡선과 그에 따른 많은 자료가 필요하다.
적용	<ul style="list-style-type: none"> 서울7,8호선, 인천1호선

그외의 열차 보조기와의 냉방기기에 의한 발열의 계산식은 전술한 운전구간별 계산법과 동일하다.

4. 비상시의 환기설비

지하철의 터널내에서 비상시란 화재발생, 홍수의 발생, 열차의 탈선, 터널내 온도의 상승시 등의 상황을 말하며 본장에서는 화재발생시의 환기대책에 대하여 서술한다.

터널내의 화재에 대한 규정은 소방법에 명시되어있지 않지만 터널의 구조상 대피로가 극히제한되어 화재시에는 인명피해가 우려되므로 대책이 요구된다.

지하철의 화재는 차량과 시설물의 노후화와 운행의 증가에 따른 전력의 과부하에 의해서 대다수 발생한다.

표 10은 1997년도에 서울지하철에서 발생한 개요를 나타내었다.

4.1 역기류 (Backlayering)와 임계속도(Critical Velocity)

터널에서 화재가 발생하면 그림 7과 같이 화재에 의하여 생성된 연기가 부력에 의하여 상승하고 터널의 천장을 만나면 터널의 길이 방향으로 전파된다. 화재방향으로 기류를 불러주게 되는데 이 기류를 이기고 피난방향으로 연기가 전파되는 현상을 역기류라고 한다. 역기류가 형성되면 피난하던 사람들이 연기의 독성가스에 의하여 질식하게 되므로 인명피해가 발생하게 된다. 이러한 역기류가 발생하지 않도록 불어주는 최소한의 유속을 임계속도(Critical Velocity)라고 하며, 화재하중, 터널의 단면, 터널구배에 의하여 결정된다.

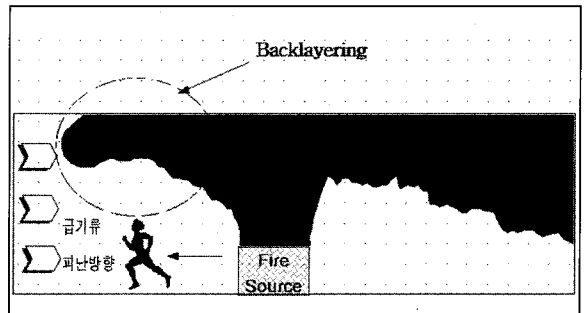


그림 7. 터널에서의 화재와 역기류

표 10. 서울지하철의 화재사고(1997년)

노선명	일시	화재 장소	화재 내용	사상자
2 호선	1997. 4	시청역 지하3층	배수펌프 전소	없음
5 호선	1997. 5	천호역-광니루역 사이의 하저터널	배수펌프 전소	없음
2 호선	1997. 5	삼성역 구내	차량제동 장치 손상	없음
2 호선	1997. 6	신도림역 구내	에스컬레이터 소손	없음
1 호선	1997. 5	시청역 구내	변전실 기기 손상	없음

임계속도는 아래식에 의해서 계산할 수 있는데 화재 위치의 온도와 터널의 구배와 연계되어 있어 반복계산(Iteration)에 의하여 수렴시켜야 한다. 임계속도식의 항목을 보면 동일한 화재하중에 대하여 터널의 높이가 클수록, 터널면적이 작을수록 큰 임계속도가 요구되며, 동일한 터널의 단면구조에 대하여 화재하중이 클수록 큰 임계속도가 요구됨을 알수 있다. 지하터널의 경우 터널의 높이가 유사하므로, 단선의 경우보다 복선의 경우가 단면적이 크므로 동일한 화재하중에 대하여 더 작은 임계속도가 요구됨을 예측할 수 있다.

- 임계속도

$$V_c = K_g \left[\frac{gHQ}{Fr_c \rho C_p A T_f} \right]^{1/3}$$

- 구배의 보정계수

$$K_g = 1 + 0.0374 (\text{grade})^{0.8}$$

- 화재위치의 가스 평균온도

$$T_f = \frac{Q}{\rho C_p A V_c} + T$$

V_c : 임계 속도 (m/s)

g : 중력 가속도 9.8 (m/s²)

H : 터널 높이 (m)

Q : 화재 강도 (MW)

ρ : 공기의 밀도 1.25 (kg/m³)

C_p : 공기의 정압 비열 0.24(kcal/(kg · °C))

A : 터널 단면적(m²)

grade : 터널 구배(%)

T_f : 화재 지역의 평균온도

T : 터널공기온도(15 °C)

Fr_c : 임계 Froude수 $4.5 \times \text{grade}^3$ ($Fr_c = 3.596$)

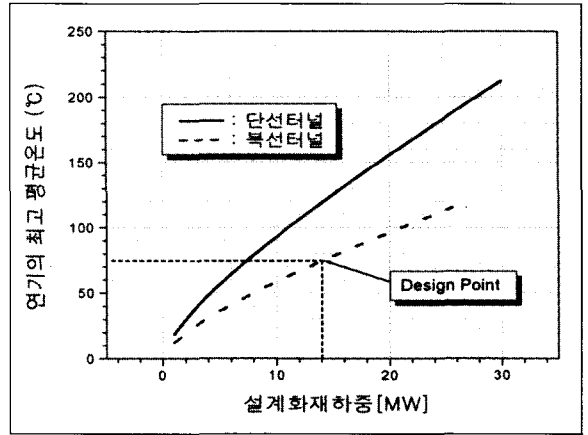


그림 8. 단선터널과 복선터널에서의 화재하중과 임계속도의 관계

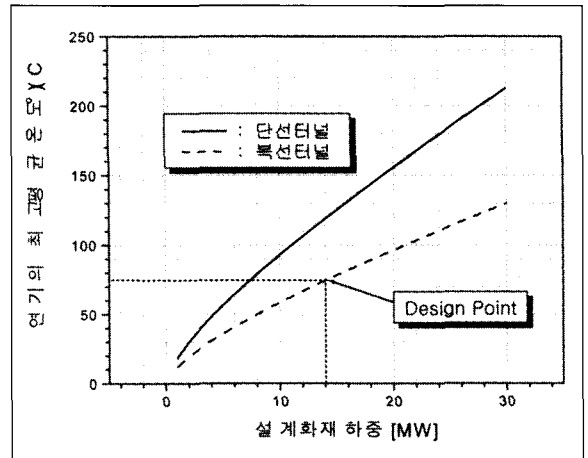


그림 9. 단선터널과 복선터널에서의 화재하중에 따른 연기의 평균온도

4.2 터널의 제연방식

화재시 발생하는 연기를 제어하는 방식에 의해서 제연방식을 분류하는데 근래에는 급기 및 배기 방식을 국내와 해외에서 많이 채용하고 있다.

화재지역에 급기를 하면 화재는 더욱 성장하지만 승객들의 피난로를 확보하므로써 인명구조의 측면에서는 우수한 방법이다.

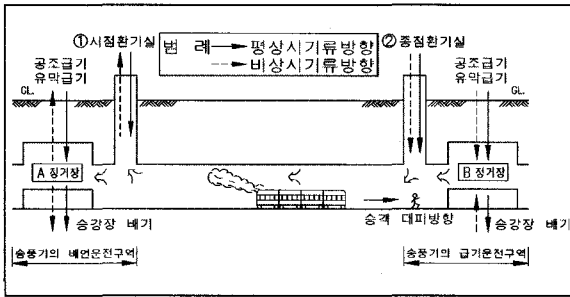


그림 10. 단선터널구간의 제연 개념도

급기를 하지않고 배기만 하는 방식은 급기를 중단하므로써 산소의 부족으로 화재의 성장은 확대되지 않지만 피난로가 확보되지 않으므로 인명의 피해가 우려된다.

터널에서 전배기방식은 1970년대에 동경에서 특수한 몇개 구간에서 채용한 사례가 있다.

그림 10은 단선 터널구간의 제연환기 개념을 보여준다. 그림 10에서와 같이 터널구간의 중간에서 차량 화재가 발생하여 차량의 운전이 불가능한 경우에 정상시의 송풍기 운전은 비상시로 전환되어 A정거장과 인접한 환기실은 배연온전 구간이되고 B정거장과 인접한 환기실은 급기운전을 하여 승객들이 B정거장의 안전지역으로 피난할 수 있도록 피난로를 확보한다.

4.3 비상시의 피난계획

4.3.1 화재시의 군중심리

일반적으로 인간이 폐쇄된 지하공간에 있을때에는 지상으로 올라가려는 본능적인 욕구가 있는데, 이러한 욕구는 지하공간에서 비상 사태가 발생할 경우, 지상건물에서 발생한 비상사태 보다 심각한 심리적 불안감을 나타낸다.

화재시 인간이 느끼는 공포감에는 크게 두가지로 나누어진다.

가. 공포의 전염성

한 사람이 특이한 행동(예를 들면, 뛰거나 소리치는)을

시작하고, 이 행동과 분위기는 그들이 더이상 어쩔 수 없는 상황에 놓이게 되었다고 생각될 때, 그곳에 모여 있는 모든 사람들에게 확대된다. 이는 한 개인이 군중 속에 있게 되면, 감정적으로 그리고 비 이성적으로 행동 할 가능성이 훨씬 많다는 가정에 있다.

나. 경쟁 심리

사람들은 탈출을 위하여 경쟁을 벌인다. 이런 경우는 사람들은 안전을 위해 이기적으로 행동하게 된다. 결국 다른 사람들을 해치기가 쉽고 집단 전체탈출의 효율을 떨어뜨린다.

그러나 모든 비상사태에서 이러한 이론을 뒷받침 할 만한 결과가 나오는 것은 아니다. 경우에 따라서는 합리적이고 논리적으로 행동 경로를 좇는다. 이는 사람을 군중 조직체의 일원으로 간주하는 것보다는 사회적인 정황속에서, 그리고 다른 사람들과의 관계 속에서 살아가는 사람들이라고 간주할 때, 행동을 훨씬 쉽게 이해할 수 있다.

4.3.2 위급사태에서 전형적인 행동 유형

1970년대 이후로 Surrey대학 및 Canter박사에 의해 수행되어온 연구에 따르면 다른 대형사고에서 두드러지게 나타난 행동 특징들이 화재에 있어서도 예상되는 행동 특징으로 밝혀졌다. 여기서는 사람들이 비상사태에서 취하는 행동을 3가지 단계로 명시하였다.

가. 해석단계

이 단계에서 사람들은 어떤 위협이나 위험을 암시하는 정보를 얻게된다. 화재에서의 연기, 물체가 부서지는 소리, 또는 다른 사람의 행동이 증거가 될 수 있다.

복잡한 지역의 경우, 화재가 급속히 성장하거나 이와 비슷한 유형의 사고가 확산되고 있다는 것을 파악하는데는 어느 정도의 시간이 필요하다.

사실 초기단계에서 이미 대형사고로의 발전 가능성을 가능하기는 어렵지만 평소의 경험과 습관에 의지하여 자

신의 증거들을 무시하거나, 또는 오해하는 경우가 일어난다. 하지만 결국에는 그 증거가 목격되고, 두번째 단계인 준비단계로 넘어간다.

나. 준비단계

준비단계는 비상 사태에서의 행동을 결정하는 단계로 간주한다.

사람들은 이제 어떻게 행동할 것인가를 결정한다. 생존을 위해 이 단계에서 사람들이 하는 일은 매우 중요하다. 사람들이 입수하는 정보는 모호할 수도 있고, 자신이 결정을 내리는데 어떤 제한적인 도움만 될 수도 있다. 결과적으로 자신의 행동을 결정하는데 도움이 되는 추가적인 정보는 훨씬 더 효과적인 행동을 취하도록 도움을 준다.

다. 위기사태에 대처하는 행동을 취하는 단계

이 단계에서 한 가지 중요한 측면은 정상시에 하지 않던 행동은 비상 사태에서도 할 가능성이 없다는 것이다.

4.3.3 모의 대피훈련

비정상적인 상황에서 승객들은 판단능력이 떨어져 이성 상실이 되면서 극심한 공포감을 느끼지만 과거의 경험대로 행동하게 된다. 그러한 경험을 할 수 있도록 정상시에 터널내의 화재모의 시험과 대피훈련이 필요하다고 사

료된다.

그림 11은 일본의 지하철에서 화재에 대비한 모의 훈련을 보여준다.

5. 지하철 환경 시뮬레이션

지하철시스템에서 기류의 움직임은 복잡한 형성에 따라서 외부의 기상조건 변화, 터널내부의 열차에 의한 발생 열, 지중의 히트싱크 (Heat Sink) 현상, 지하수위의 변화에 의한 열성능의 영향, 공조시스템에 의한 온·습도의 변화 등 많은 요소들을 파악해야 한다.

지하철 터널의 환경시뮬레이션은 지하철 시스템의 동적인 기류, 온도와 습도의 동적인 환경상황을 파악하기 위하여 컴퓨터에 의한 수치해석 방법으로 설계시에 많은 요소들을 예측한다.

본장에서는 미국에서 개발한 지하철 환경시뮬레이션 (Subway Environmental Simulation) 프로그램의 개요를 간략하게 설명한다.

5.1 SES 개요

SES 프로그램은 복선의 지하철에서 여러 양방향 운행을 동력학적으로 수치해석 할 수 있게 해주며, 임의의 역과 터널, 환기갱과 웬 샤프트의 배치에 대하여 연속적인 공기의 속도, 온도, 습도 등을 출력할 수 있다. 또한 미리 정해진 시간간격에 대하여 시스템의 공기 속도, 온도, 습도에 대한 최대, 최소, 평균값들을 제공하도록 설계되었다.

이 프로그램은 주어진 환경기준을 초과하는 시간의 비율뿐만 아니라 환경기준을 만족하기 위해 필요한 역의 냉난방 부하를 계산한다. 어떠한 지하철 운행 기간 동안이라도 시뮬레이션 할 수 있지만, SES의 주된 관심은 환경 제어 시스템에 요구되는 부하가 최대가 되는 러시아워와



그림 11. 터널내의 화재에 대비한 모의훈련(일본)

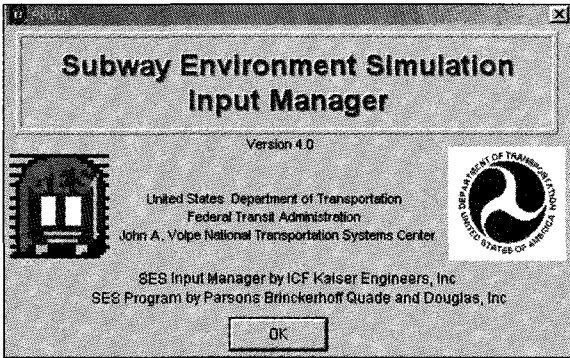


그림 12. SES 프로그램

같은 단기간의 시뮬레이션에 있다. 프로그램에 의해 요구되는 입력정보와 계산되는 출력은 실제 환경문제를 다루는 설계 공학자의 용도에 맞도록 되어있다.

5.2 계산 절차

SES 프로그램은 4개의 상호의존적인 계산 순서로 구성된다.

: 열차성능 프로그램(Train Performance Subprogram)과 공기역학 부프로그램(Aerodynamic Subprogram), 온도/습도 부프로그램(Temperature/Humidity Subprogram), 열소멸/환경제어 부프로그램(Hestsink/Environmental Control Subprogram)

또한 프로그램의 특별선택 항목에서는 화재의 공기역학적, 열역학적 영향을 모사할 수 있게 해준다. 부프로그램들은 시스템을 모사하는 파라미터들을 상호간 공유하며 지하철 환경의 질을 지배하는 동적 현상의 연속적인 수치해석을 수행한다. 열차 성능 부프로그램은 열차의 속도, 가속도, 위치와 시스템 내의 모든 열차의 열 방출을 연속적으로 결정한다. 공기역학 부프로그램은 시스템의 기하학적 배치와 연관(Coupled)되어 이들 계산된 열차의 매개 변수들과 모든 역, 터널, 갱도에서의 공기 속도에 대한 연속적인 값들을 계산하기 위한 환기성능 자료를 사용한다.

다음에 온도/습도 부프로그램은 전체 시스템을 통한 현열과 잠열의 대류 분산을 계산하는 열차 성능 부프로그램에서 생성된 열차의 열 배출 데이터들과 함께 이들 계산된 공기유동의 파라미터를 사용한다. 이것으로 모든 위치에서의 온도와 습도를 연속적으로 결정할 수 있다. 마지막으로 공기역학 부프로그램에서 계산된 공기의 속도는 차량의 공기역학적 항력을 계산하도록 열차 성능 부프로그램에서 열차에 인접한 공기유동을 결정하는데 사용된다.

이들 부프로그램으로 부터의 지하철 환기와 열부하는 지하철의 특정 영역에서의 설계조건을 만족 시키기 위해 필요한 냉난방 용량뿐만 아니라 외부조건의 연간 변화, 일간 변화와 함께 열 소멸/환경제어 부프로그램에 의해 지하철의 공기와 구조물, 주변의 토양 사이의 장기적 열전도를 계산하기 위해 사용된다. 이러한 통합적인 계산과정은 지하철 시스템의 동적 운전 현상 중에서 복잡한 상호작용들의 연속적인 모사를 가능하게 한다.

6. 결론

초기에 건설된 국내 지하철의 환경은 터널 환기시설의 용량 부족으로 인해서 터널내의 고온화 현상이 급속하게 진행되며, 터널의 고온화는 열차풍에 의해서 정거장으로 전달되어 실내 환경의 악화를 유발시킨다. 환경회복을 위하여 냉방장치를 추가로 설치하여 하절기에는 많은 에너지를 사용하고 있으나 문제를 풀기위한 근본적인 대책으로는 미흡한 실정이다.

지하철을 쾌적한 환경으로 조성하기 위해서는 개통초기부터 터널 환기시설의 적극적인 도입과 효율적인 시설의 운영관리가 이루어져야 한다.

서울지하철 9호선은 승강장에 스크린도어시스템의 도입으로 추락사고 방지와 쾌적한 실내환경을 조성할 수 있으며 변화된 시스템에 적합한 터널 환기시스템의 개발이 요구된다.

참고문헌

1. 서울시, 서울지하철 5호선 기본설계보고서(기계설비)1990.
2. 서울시, 서울지하철 6호선 기본설계보고서(기계설비)1993.
3. 대전광역시, 대전도시철도 1호선 T-1공구의 정거장내 기류, 온도분포 예측 및 승강장 제연 설비의 최적화를 위한 시뮬레이션 연구, 1997.
4. 대전광역시, 대전도시철도 1호선 T-1공구의 터널환기설비 최적화에 관한연구,1996.
5. 서울특별시, 제3기 서울지하철 (기계설비) 기본설계, 공기오염방지 개선방안 연구, 1996.
6. 조율연, 지하철의 환기 현황과 연구방향, 공기조화·냉동공학회 강연회 1996.
7. 차철현, 스크린도어적용에 따른 지하승강장의 환기설비, 공기조화·냉동공학회, 97하계 발표회 논문집, 1997.
8. Department Of Transportation, Subway Environmental Design Hand Book, 1976.
9. Marshall E. Greenspon, Environmental Control Of Washington Metro, ASHRAE Journal. 1978.2
10. Kafsuteru Goman., 地下鐵の換氣·冷房の現状と問題點, 空氣調和·衛生工學 55-3, 1981.3.
11. Hajime Nakagawa : 地下鐵冷房の設計法, 空氣調和·衛生工學 55-3, 1981.3.