

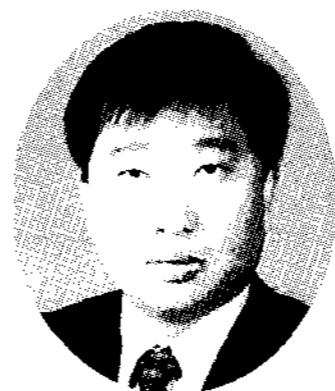
## 신개념의 도심지 장대 지하차도 설계



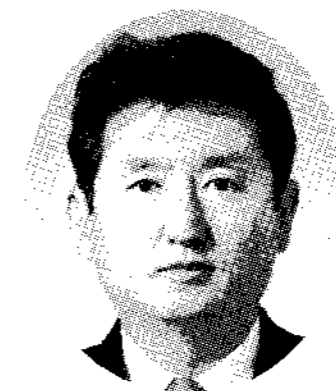
박해균  
삼성물산 차장



조형제  
범창종합기술 이사



심성현  
삼성물산 차장



심재범  
삼성물산 상무

### 1. 서론

경제의 발달과 함께 도시의 팽창이 가속화되고 있으며, 대도시를 중심으로 신도시의 건설과 도시 외곽의 대규모 택지개발이 이루어지고 있다. 이러한 도시 확장은 기존 도심과 외곽을 연결하는 새로운 도로의 건설, 즉 도시를 관통하는 지하도로와 도심외곽의 순환도로의 건설을 필요로 한다.

도심지의 경우 주변에 많은 건물들이 위치하는 등 많은 제약조건으로 인하여 기존도로를 확장하기 보다는 기존 도로 하부에 새로운 도로를 건설하는 방안이 적용되고 있으며, 도심지에서 외곽까지 신속하게 이동할 수 있도록 지하차도의 연장이 장대화 되고 있다.

도시지역의 기존 지하차도는 대개 500m 미만으로 짧은 경우가 대부분으로 자연환기가 가능하고, 특별한 방재 시설도 필요하지 않았다. 그러나 장대 지하차도의 경우

기계환기 시스템이 필요할 뿐만 아니라 국도 및 고속도로의 산악터널과는 달리 상시 정체가능성이 높으므로 화재시 화재위치 전후로 차량이용자가 존재하여 심각한 위험을 초래할 가능성이 높다. 따라서 도심지 장대 지하차도는 화재시 차량이용자의 안전성 확보가 가능하며 경제적인 환기·방재시스템이 요구된다.

본 고에서는 2007년 한국토지공사에서 턴키공사로 발주한 행정중심복합도시내 국도1호선 우회도로 건설공사 2공구에 위치하는 연장 2.4km의 세종지하차도 설계에서 경제성과 안전성을 모두 만족하는 환기·방재시스템을 적용한 신개념의 도심지 장대 지하차도 설계내용을 소개하고자 한다.

### 2. 세종지하차도 기본계획 현황

세종지하차도는 행정중심복합도시내 국도1호선 우회도로 건설공사 2공구에 위치하는 장대 지하차도로 한국토지공사에서 턴키로 발주하기 위한 기본계획 현황은 표 1과 같다.

일반적으로 지하차도는 상부토피고에 따라 박스형 또는 아치형을 적용하고 있으며, 세종지하차도의 경우 상부토피고가 높아 기본계획시 2-아치형으로 계획하였다.

기본계획 환기시스템은 젯트팬 종류식으로 각 방향별로  $\varnothing 1530 \times 10$ 대가 계획되었다. 평상시 환기용으로 4대, 화재시 제연용으로 10대가 필요하여 제연용을 기준으로 젯트팬이 설계되었다.

### 3. 신개념의 세종지하차도 설계

#### 3.1 도심지 장대 지하차도의 특성

젯트팬 종류식 환기방식은 가장 경제적인 환기시스템으로 대부분의 터널에 적용되고 있으나, 세종지하차도와 같이 도심지를 관통하는 경우 지하차도 입출구로 차도내 오염물질이 모두 배출되므로 주변지역의 환경을 악화시켜 민원이 발생할 가능성이 높다. 또한 피크시 지하차도 내에서 차량이 정체될 가능성이 높고, 화재가 발생할 경우 화재차량 전방에도 차량이 존재하여 제연운전을 할 수 없으므로 인명피해가 확산될 가능성이 있다. 이러한 환기·방재상의 문제점을 해결하는 방안으로 많은 도심지

터널에서 횡류식 또는 반횡류식 환기방식을 적용하고 있다. 횡류식 및 반횡류식 환기방식은 차도 상부에 설치된 덕트를 통해 화재연기를 외부로 배출하므로 화재차량 전후방의 모든 차량 이용객이 화재연기에 의한 영향 없이 터널 외부로 탈출할 수 있는 안전한 대피환경을 제공하며, 특히 횡류식의 경우 평상시 지하차도 내부의 오염물질을 처리하여 외부로 배출함으로써 터널 입출구 주변의 환경문제도 해결할 수 있는 장점이 있으나, 덕트를 만들기 위한 단면확대 및 슬라브 설치와 고가의 축류팬 및 필터설비가 요구되어 공사비가 증가하는 문제점이 있다.

따라서 공사비의 증가 및 주변 환경문제를 예방하고, 동시에 안전성을 확보할 수 있는 환기·방재시스템이 요구된다.

#### 3.2 경제성 및 안전성을 고려한 단면설계

기본계획의 세종지하차도는 일반적인 박스형 단면이 아닌 2-아치 형태로 계획되었다. 국내에서 박스형 단면 구조로 경제성과 안전성을 모두 확보한 사례로는 부산-거제간의 침매터널이 있다. 그림 1은 침매터널의 단면도로서 양방향 차도 중앙부에 갤러리를 설치하고 갤러리 상부에 배연덕트를 구성하여 평상시에는 제트팬을 이용한 환기운전으로 경제성을 확보하고, 화재시에는 제트팬과 배연덕트를 이용하여 화재연기를 배출함으로써 안전성을 확보할 수 있도록 계획되어 있다.

일반적인 횡류식 환기방식은 아치형 단면 상부에 슬라

표 1. 세종지하차도 기본계획 현황

설계제원		단면도
통행방식	일방향	
차로수	3차로	
설계속도	80 km/h	
연장	2,467 m	
환기방식	젯트팬 종류식	

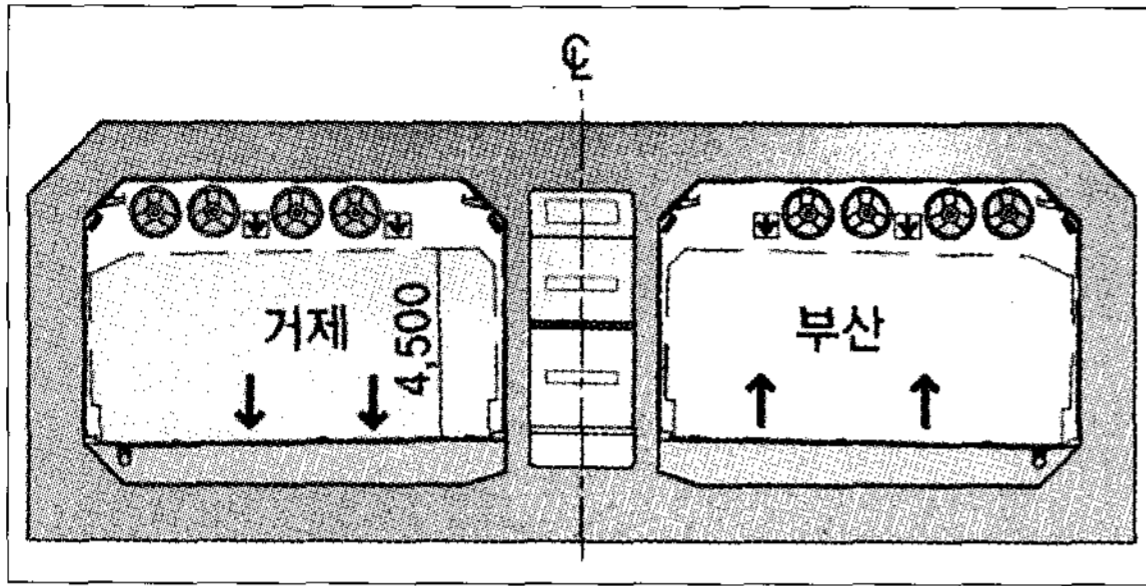


그림 1. 부산-거제간 침매터널 횡단면도

브를 설치하여 덕트공간을 확보한다. 그러나 이러한 슬라브 설치공사는 시공이 복잡하고 많은 공사비가 요구되는 문제점이 있다. 슬라브를 설치하는 목적이 지하차도 상부에 연기를 배출할 수 있는 덕트공간을 확보하는 것이므로 침매터널의 단면구조와 유사한 형태로 2-아치 단면 중앙상부의 오목한 부분을 덕트공간으로 활용할 경우 일반적인 횡류식 단면의 덕트공간을 배제하고 새로운 덕트공간을 확보할 수 있다. 세종지하차도에서는 기본계획 단면을 그림 2와 같이 변경하여 경제적이면서 시공성이 양호한 새로운 개념의 덕트아치 단면으로 계획하였다.

기존 횡류식 형태의 단면은 각 방향터널에 각각 덕트가 설치되어 있으나, 새롭게 제시된 방안은 하나의 덕트를 양방향 터널에서 동시에 사용하는 형태로 구성하였다. 이러한 덕트아치형 단면은 개착식 단면구조에서 덕트공간을 확보하기 위한 슬라브 설치가 용이하고 하나의 덕트만

설치하므로 공사비 측면에서 경제적인 이점을 확보할 수 있으며, 부가적으로 단면 중앙상부의 오목한 부분에서의 방·배수 문제도 자연스럽게 해결할 수 있는 장점이 있다. 또한, 침매터널의 배연덕트는 부분배연의 개념으로써 화재 초기단계에서 화재연기의 확산을 억제하는 용도로 설계되었으나, 세종지하차도의 배연덕트는 “도로터널 방재시설 설치지침(건설교통부, 2004)”에서 정하고 있는 횡류식 배연덕트 용량으로 선정하여 피난완료시간까지 화재연기가 피난연락갱 위치까지 확산되지 않도록 배연 성능을 강화하였다.

새로운 단면에 적용한 제트팬+집중배연덕트식은 경제성이 우수한 제트팬 종류식과 안전성이 우수한 횡류식을 조합하여 각각의 장점을 모두 갖춘 새로운 환기방식으로써 경제성 및 안전성 측면에서 타 환기방식에 비해 매우 우수한 것으로 분석되었다.

### 3.3 환기 및 배연성능 검증

#### 3.3.1 환기 및 제연설비 운전계획

환기 및 제연설비는 평상시 환기운전을 위하여 지하차도 상부에 최소의 제트팬을 설치하고, 화재시 제연운전을 위하여 중앙부 덕트에 50m 간격으로 원격제어가 가능한 대형 배연댐퍼를 설치하였으며, 덕트가 연결된 중앙 환기소에 배연을 위한 축류팬을 설치하였다. 또한 환기소에는

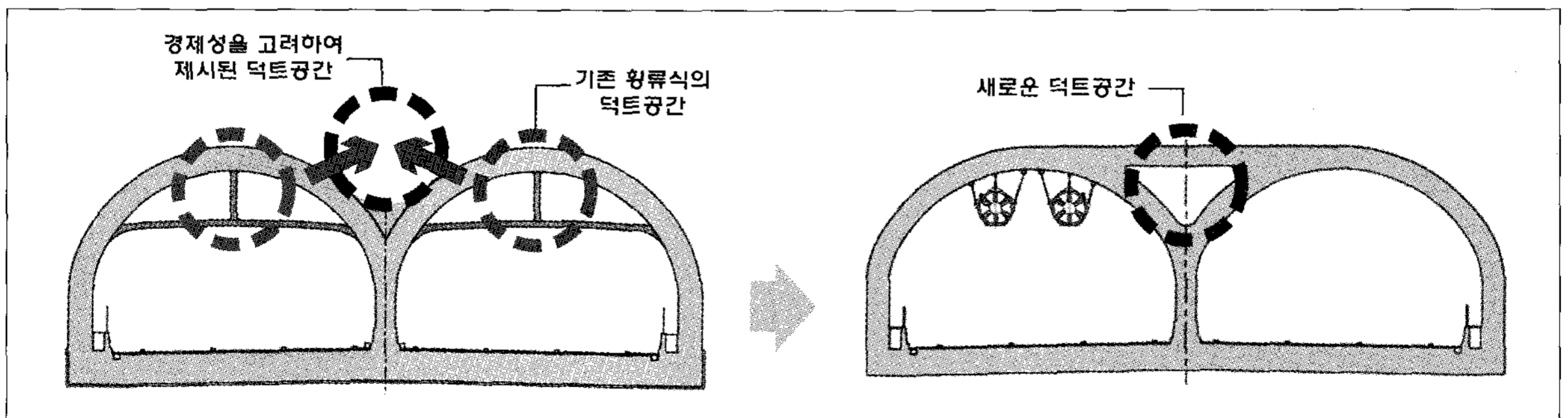


그림 2. 새로운 덕트공간 확보 개념

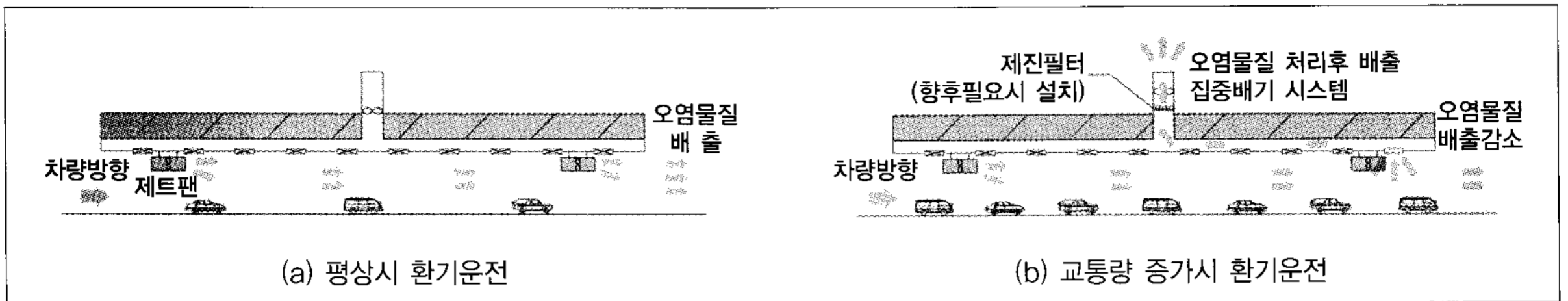


그림 3. 환기운전 개요도

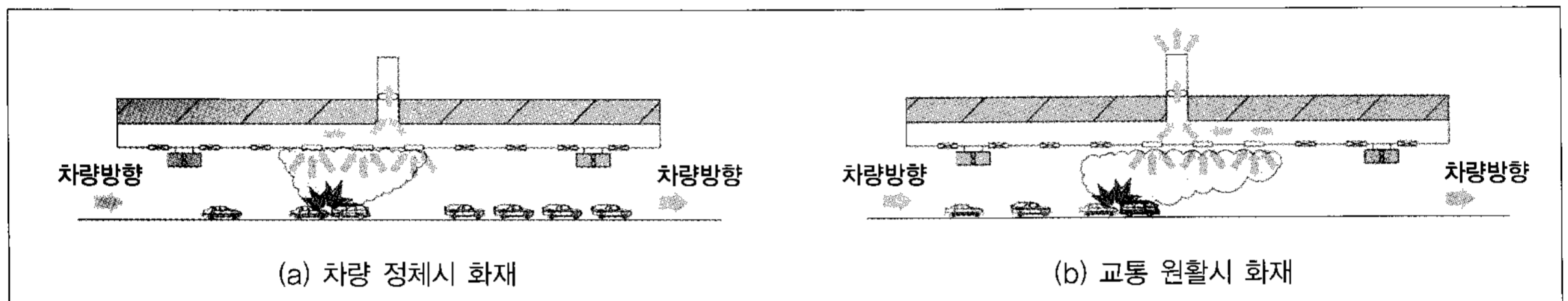


그림 4. 제연운전 개요도

집진필터 설치공간을 확보하여 향후 교통량이 증가하는 경우 출구부 집중배기운전을 통해 지하차도 출구로 배출되는 오염물질의 일정 부분을 처리하여 배출함으로써 주변지역의 환경문제를 해소할 수 있도록 계획하였다.

그림 3과 4는 교통량 조건에 따른 환기운전 및 화재시의 제연운전 개요를 나타낸 것이다.

### 3.3.2 환기 및 배연성능의 검증

평상시 제트팬 종류식 환기방식은 많은 터널에 적용하고 있는 일반적인 환기시스템이므로 성능에 대한 문제는 없을 것으로 판단되나, 설계용량의 적정성 검증을 위하여 환기성능에 대한 수치해석을 수행하였다. 또한 집중배연덕트의 배연성능은 일반적인 횡류식 배연덕트와 구조가 상이하여 성능에 대한 검증이 필요하였다. 특히 배연성능에 대해서는 모형실험을 병행함으로써 검증수준을 강화하였다.

#### (1) 환기성능 수치해석적 검증

환기성능은 지하차도의 오염물질 농도분포를 해석하

는 방법으로 수행하였다. 수계산에 의해 선정된 제트팬 용량으로 환기운전을 수행하였을 때 지하차도의 오염물질 농도분포가 허용기준치 이내로 유지되는 지를 분석함으로써 환기성능의 적정성 여부를 검증하였다.

해석프로그램은 도로터널 환기전용 해석프로그램인 TVSDM(Tunnel Ventilation System Design Master)을 사용하였으며, 각 방향 지하차도에 대하여 차량속도가 10~80km/h로 변동되는 조건으로 매연, 일산화탄소(CO) 및 질소산화물(NOx)의 농도분포를 해석하였다.

해석결과는 그림 5와 같으며, 대전방향은 매연 0.006m<sup>-1</sup>, 일산화탄소 68.1ppm, 질소산화물 9.8ppm 이고, 조치원방향은 매연 0.007m<sup>-1</sup>, 일산화탄소 69.6ppm, 질소산화물 10.5 ppm으로 나타나 오염물질별 차도내 허용기준을 모두 만족하는 것으로 나타나 환기성능은 적정한 것으로 검증되었다.

#### (2) 배연성능 수치해석적 검증

배연성능 해석은 화재연기의 확산분포를 해석하는 방법으로 수행하였다. 화재연기는 지하차도 이용객의 인명

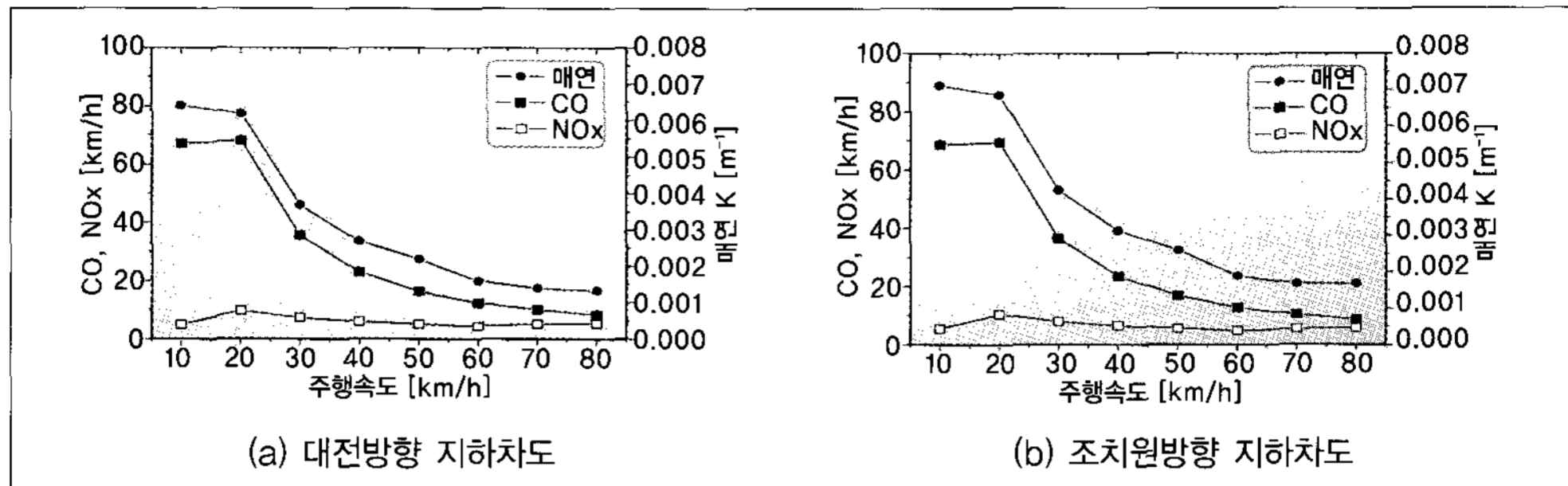


그림 5. 지하차도 내 오염물질별 농도분포

안전을 위협하는 가장 위험한 요소이므로 화재상황에서 차량 이용객이 안전장소까지 대피하는 시간동안 화재연기에 의한 피해가 없도록 제어되어야 한다. 따라서 차량 이용객의 피난대피 완료시간까지 화재연기가 바닥으로 하강하여 대피장소까지 확산되는지의 여부를 분석함으로써 배연성능의 적정성 여부를 검증하였다.

해석프로그램은 열·유체 분야에서 가장 많이 사용하는 프로그램인 FLUENT를 사용하였다. FLUENT에서는 k-ε 모델을 사용하여 난류모델을 해석하였으며 solver는 Segregated Solver Simple Method를 이용하였다. 해석구간은 화재위치를 중심으로 총 500m이며, 터널 내 격자수는 약 45만개이다.

화재규모는 버스 1대가 전소하는 규모로써 20MW를 적용하였으며, 지하차도의 초기 풍속은 정체시 교통조건

으로 0m/s인 경우와 원활한 교통조건으로 2.5m/s인 경우로 구분하여 화재연기의 확산분포를 해석하였다. 이때 화재연기의 배출을 위하여 화재위치를 기준으로 총 300m 구간에서 7개의 배연댐퍼를 개방하는 것으로 설정하였다. 차량 정체시에는 초기 풍속이 없으므로 화재연기가 양방향으로 확산되는 점을 고려하여 화재위치를 중심으로 대칭적으로 배연댐퍼를 개방하였고, 교통 원활시에는 차량 진행방향으로 화재연기가 확산되는 점을 고려하여 화재위치를 중심으로 차량진행방향 전방의 배연댐퍼를 개방하였다.

해석결과는 그림 6과 같으며, 차량 이용객이 대피 완료하는 시간 4분57초에 여유치를 고려하여 6분의 시간동안 화재연기의 확산분포를 보여주고 있다.

차량 정체시에는 화재연기가 양방향으로 거의 균등하

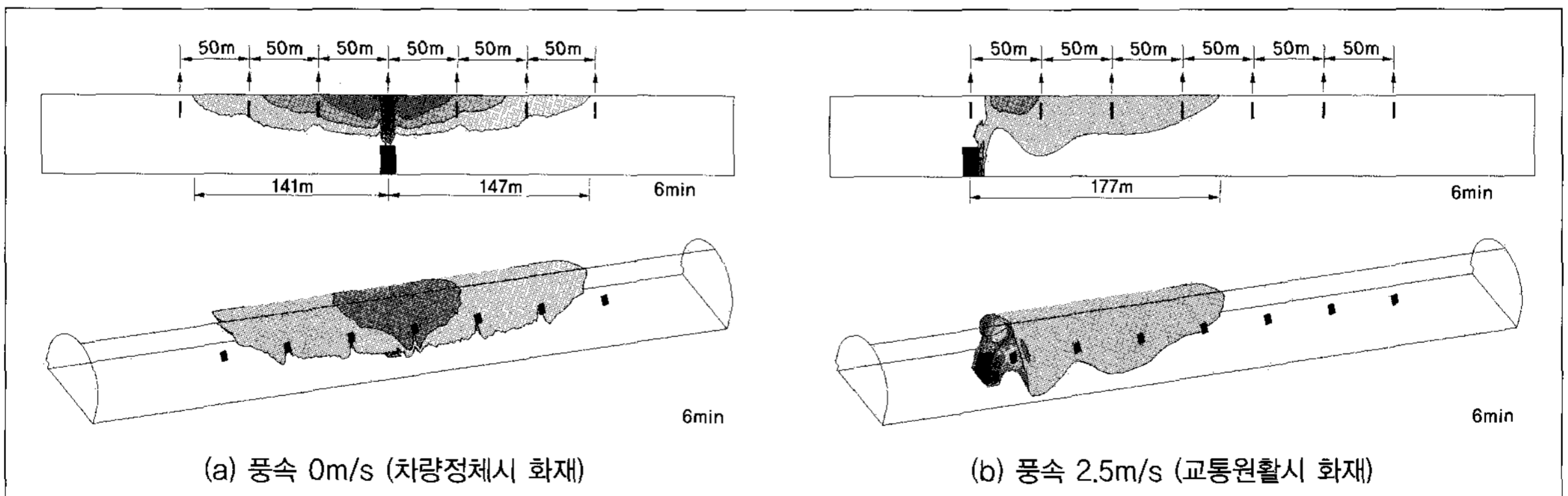


그림 6. 지하차도 내 화재연기 확산분포

게 확산되고 있으며, 6분 동안 화재연기는 성층화를 유지하면서 최대 147m 정도 이동하여 배연구역 내에서 화재연기가 배출되는 것으로 나타났다. 교통 원활시에는 차량 진행방향으로 화재연기가 확산되고 있으며, 6분 동안 화재연기는 최대 177m 정도 이동하였다. 초기 풍속의 영향으로 연기의 성층화 현상이 다소 깨어지는 것으로 나타났으나, 배연구역 내에서 화재연기가 배출되는 것으로 나타나 배연성능은 적절한 것으로 검증되었다.

그러나 초기풍속이 낮은 경우 화재연기는 성층화를 이루면서 대피자의 이동영역까지 하강하지 않았지만, 초기 풍속이 높은 경우에는 화재연기가 일부 대피자의 이동영역 근처까지 하강하는 모습을 보여주고 있다. 따라서 차량 정체시라도 외부자연풍의 영향으로 초기 풍속이 빠른 경우에는 제트팬을 역회전 운전하여 초기풍속을 낮춤

으로써 화재연기의 배출성능을 극대화할 수 있는 운전계획 수립이 필요한 것으로 분석되었다.

### (3) 모형실험에 의한 검증

집중배연덕트를 이용한 배연운전은 횡류식과는 단면 형태가 상이하므로 그 성능에 대한 확실한 검증이 필요하며, 지하차도내 화재상황에 따라 적절한 운전계획을 찾아야 한다. 따라서 수치해석과 함께 모형실험을 통해 지하차도내의 초기풍속 조건에 따라 화재연기의 확산분포가 어떻게 변화하는 지를 검토함으로써 적절한 배연운전계획을 수립하고, 집중배연덕트의 성능을 검증하였다.

실험장치는 1/50 축척으로 500m 구간에 대하여 모형을 제작하였다. 표 2는 실험장치의 제원을 나타낸 것이고, 그림 7은 실험장치의 사진이다.

표 2. 실험장치의 제원

제원	모형	실험
축척		50 : 1
지하차도 연장	10m	500m
지하차도 높이	175mm	8.75m
지하차도 폭	280mm	14m
배연덕트 높이	108mm	5.4m
배연포트 크기	35×40mm	1.75×2m

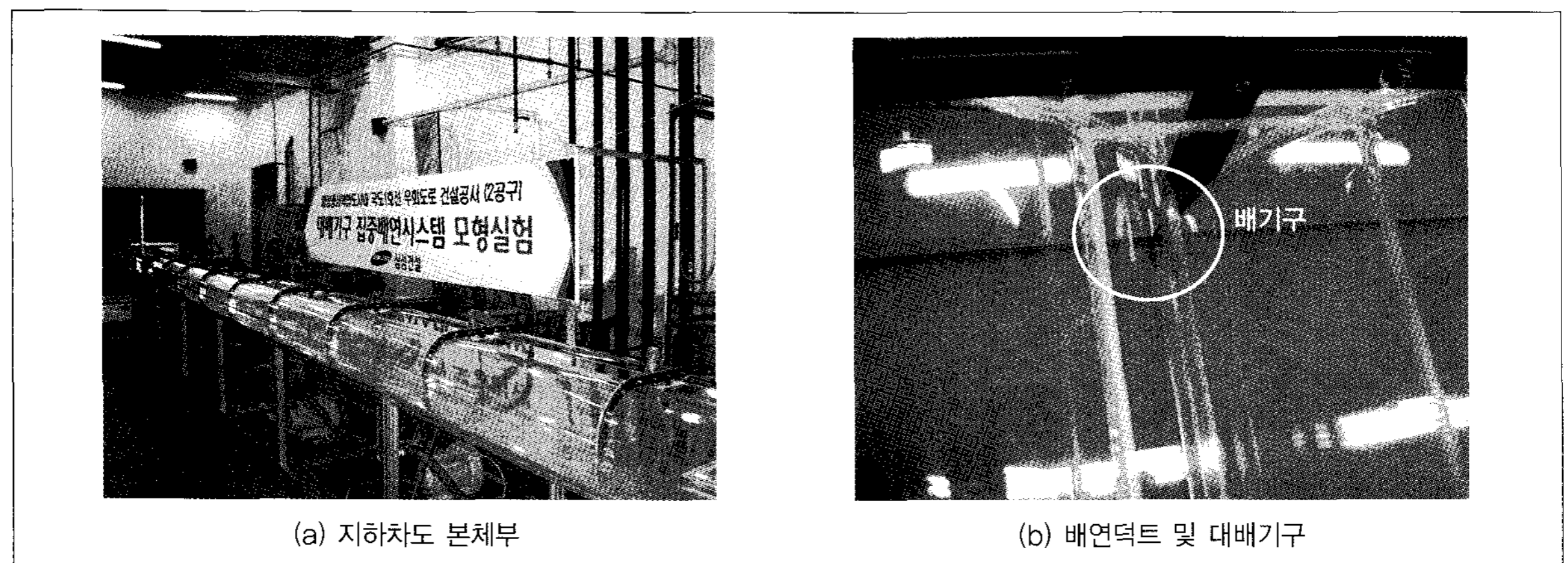


그림 7. 실험장치 사진

실험조건은 표 3과 같으며, 지하차도의 풍속을 변화시키면서 화재연기의 확산분포를 분석하였다.

지하차도의 풍속은 0, 1.25, 2.5m/s이며, 각 풍속에 대해 배연풍량을 변화시키면서 화재연기의 확산분포를 실

험하였다. 실험결과는 다음과 같으며, 확산분포에 대한 결과사진은 표 4~6과 같다.

(1) 차도내 풍속 0m/s

- 연기의 이동이 양방향으로 발생함.
- 배연량이 증가하면 연기의 이동거리가 감소하며, 배연량  $V_r=1.5\text{m/s}$ 일 때 화재지점을 기준으로 연기의 이동거리는 250m 이내로 제한할 수 있는 것으로 나타남.

(2) 차도내 풍속 1.25m/s

- 배연량  $V_r=0$ 에서 연기의 성층화가 이루어지지 않고 확산거리도 400m이상으로 나타나고 있으며,

표 3. 실험조건

항목	실험조건
화재강도	20MW
연기발생량	80m <sup>3</sup> /s (270 l/min)
차도내풍속	0m/s, 1.25m/s, 2.5m/s
배연방식	지하차도 천정 측면 대배기구 방식
배연풍량	80 + $V_r \times A_r$ ( $V_r = 0 \sim 2.5\text{m/s}$ )

표 4. 화재연기 확산분포 (차도내 풍속 0m/s)

$V_r$	가시화 결과
0.5	
1.5	
2.5	

표 5. 화재연기 확산분포 (차도내 풍속 1.25m/s)

$V_r$	가시화 결과
0.5	
1.5	
2.5	

표 6. 화재연기 확산분포 (차도내 풍속 2.5m/s)

Vr	가시화 결과
0.5	
1.5	
2.5	

배연량 Vr=1.0이상에서는 연기의 성층화가 확연히 나타나고 있음.

- 배연량 Vr=1.5까지 연기의 이동거리는 400m이상으로 본 실험장치의 출구를 통해 연기가 배출됨.
- 배연량 Vr=2.0에서 연기의 이동거리는 400m로 제한되며, 배연량 Vr=2.5이상에서는 350m정도로 연기의 이동거리가 제한됨.

(3) 차도내 풍속 2.5 m/s

- 배연량 Vr=0에서 연기의 성층화가 이루어지지 않고 확산거리 또한 400m이상으로 나타남.
- 배연량 Vr=2.0일 때 250m부근에서 성층화가 확연히 나타나고 있으며,
- 배연량 Vr=2.5로 하는 경우 연기의 전파거리가

400m 정도로 제한되는 것으로 나타났으나, 250m이후에는 연기의 성층화로 호흡선 높이에 연기농도는 아주 작은 것으로 평가됨.

#### 4. 고성능 콘크리트(HPC)를 이용한 지하차도 포장 설계

화재시 도로면 바닥 포장재의 변형은 사용자에게 직접적인 피해를 유발시키지는 않으나, 화재이후 신속한 차량 통행을 방해하는 요인이 된다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 고성능 콘크리트 포장을 적용함으로써 화재시 대응능력을 향상시켰다. 그림 8은 고성능 콘크리트 포장의

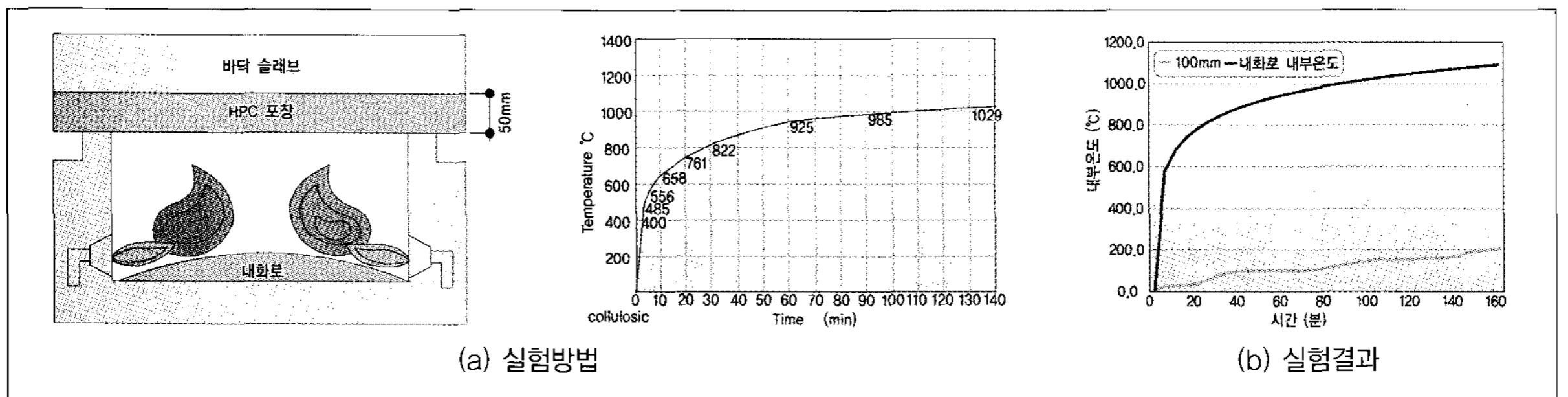


그림 8. 내화성능 실험결과



내화특성에 대한 실험적 평가내용을 나타낸 것이다.

3시간 가열의 ISO 곡선을 이용한 고성능 콘크리트 포장 내화실험결과 포장체에 폭열이 발생하지 않았으며 하부 슬래브 주철근 위치의 온도는 200℃ 미만으로 화재시 구조적 안전성을 확보하는 것으로 나타났다.

## 5. 결론

도심지 장대 지하차도는 기존의 소규모 지하차도와는 달리 기계환기와 교통정체시 화재를 대비한 배연대책이 요구된다. 도심지 터널에 주로 적용하는 횡류식 또는 반 횡류식 환기방식은 화재대응측면에서는 유리하나, 공사비가 고가인 단점이 있다. 행정중심복합도시내 국도1호선 우회도로 건설공사 2공구의 세종지하차도는 이러한 문제를 해결하기 위하여 평상시에는 종류식 환기시스템으로 경제성을 도모하고, 화재시에는 횡류식 배연시스템으로 안전성을 확보할 수 있는 신개념의 덕트아치형 단면으로 계획하였다.

덕트아치형 단면을 이용한 제트팬+집중배연덕트식 환

기방안은 수치해석 결과 평상시 제트팬 환기방식으로 환경기준을 만족시키고, 화재시에는 차량 이용객의 대피시간 동안 일정한 구역내에서 화재연기의 확산을 억제하여 안전한 대피환경을 확보할 수 있는 것으로 나타났으며, 모형실험 결과에서도 정체시 화재상황에서 화재연기의 확산을 억제하여 안전한 대피환경을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

연기의 이동거리는 차도내 풍속이 증가할수록 증가하였으나, 배연량이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 차량정체시의 화재상황에서도 외부자연풍의 영향으로 차도내 풍속이 1~2.5 m/s로 증가한 경우에는 배연성능의 극대화를 위해 차도내 풍속이 가능한 한 0 m/s에 근접하도록 제트팬을 역회전 운전하는 것이 바람직할 것으로 분석되었다. 이와 같이 제트팬과 대배기구 집중배연덕트를 조합한 환기방식은 지금까지 적용사례가 없는 신개념 환기방식으로 도심지 장대 지하차도에서 경제성과 안전성을 모두 갖춘 최상의 환기방안으로 검증되었으며, 향후 도심지 장대 지하차도의 바람직한 설계방안이 될 것으로 예상된다.