

## 전산유체역학을 이용한 디젤엔진 부하시험장의 환기 개선에 관한 연구

### A Study on the Ventilation Improvement of Diesel Locomotive Engine Load Test Building using Computational Fluid Dynamics

박덕신\* · 정병철<sup>1)</sup> · 조영민 · 박병현

한국철도기술연구원 환경·화재연구팀

<sup>1)</sup>(주) 로템 기술연구소 제품개발팀

(2005년 2월 4일 접수, 2005년 3월 24일 채택)

Duckshin Park\*, Byungcheol Jeong<sup>1)</sup>, Youngmin Cho and Byunghyun Park  
*Environment and Fire Control Research Team, Korea Railroad Research Institute*  
<sup>1)</sup>*Rolling Stock Development Team, R&D Center, ROTEM Company*

(Received 4 February 2005, accepted 24 March 2005)

#### Abstract

The aim of this study is to relieve the poor ventilation problem of the diesel locomotive engine load test building, located in an urban area. This paper evaluates the ventilation performances of the studied load test building based on the temperature measurement experiment and the computational fluid dynamics (CFD) during the engine load test. The temperature rise caused by the radiator blower of the building was turned out to be the main cause of disturbing the thermal conditions of the building. The indoor temperature distributions simulated by Fluent were validated with the temperature measurement results obtained from the studied building. The simulation results indicated that the comfort condition of this building was poor. We suggested several remedial changes in the duct structure of this building for the improvement of the comfort conditions. In addition, a prototype drawing combining several improved design options was proposed, and then the simulation of the temperature distribution in the proposed prototype was performed. The result indicated that the indoor thermal condition of this proposed building was improved when compared with that of the current building.

**Key words** : Computational fluid dynamics, Building design, Load test, Diesel locomotive engine

#### 1. 서 론

최근 성능이 향상된 상용 전산유체역학 (computa-

tional fluid dynamics; CFD) 프로그램이 유체의 흐름, 열전달과 수치기법을 통한 현상의 시뮬레이션에 이용되고 있다. CFD 시뮬레이션은 항공우주와 자동차 분야에서 많이 응용되지만 수년전부터는 건물의 설계에도 이용되고 있다 (Sreshthaputra *et al.*, 2004). 자료조사를 통해 Awolesi *et al.* (1991), Awbi (1991),

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)31-460-5367, E-mail : dspark@krri.re.kr

Srebric (2000), Tantasawadi (2001), Graca (2002) 등의 논문에서 CFD를 응용하여 작업장의 환경을 개선하거나 건물 내·외부의 유동을 파악한 사례를 확인하였으며, 본 논문의 목적도 CFD를 이용하여 건물의 환기 성능을 향상시키고자 하는 것이다. 건물을 설계하기 전 환기설비의 효율을 높이기 위해 내부의 유동이나 열 확산현상에 관한 유동·현상을 파악해야 한다. CFD는 물리적 현상을 시뮬레이션 하는데 있어 제한요인이 있기는 하지만 컴퓨터의 성능이 향상되면서 계산시간과 정확도가 향상되어 적용 분야가 점차 확대되고 있는 추세이다(Gosdam, 1999).

철도차량에 디젤기관을 사용하는 이유는 가솔린기관의 동력효율이 23%인 것에 비하여 디젤기관은 33%로 높고, 연료가격이 싸며, 인화점(flash point)이 170°C(가솔린은 100°C)로 높아 안전성이 우수하기 때문이다. 그러나, 가솔린기관의 압축력과 폭발압력이 각각 10 kgf/cm<sup>2</sup>, 50 kgf/cm<sup>2</sup>인 것에 비하여 디젤기관의 압축력과 폭발압력은 각각 50 kgf/cm<sup>2</sup>, 80 kgf/cm<sup>2</sup>으로 높으므로 기관의 소음과 진동이 다소 높은 단점이 있다(윤세택, 1984).

철도 디젤차량은 차량 정비를 마친 후 성능 확인을 위해서 전기 동력계(electric dynamometer)를 이용하여 엔진을 점검한다. 전기 동력계의 전압과 전류 측정기 값을 읽어서 식 1을 이용하여 엔진의 제동마력을 구한다. 제동마력은 엔진의 정상작동 여부를 판정하는 기준이 되며, 동력계를 이용하여 제동마력을 구하는 일련의 과정을 철도 디젤차량 부하시험(load test; 이하 부하시험)이라고 하며, 부하시험을 실시하는 곳을 부하시험장(load test building; 이하 부하시험장)이라고 한다. 부하시험은 차량이 입고되면 전기 동력계를 기관차에 연결하고, 엔진의 시동을 걸어 예열(warming-up)을 한 후 일정한 시간 간격을 두고

유전에서부터 노치를 8노치(notch)까지 증가하여 노치별로 변화하는 출력을 기록한 후 엔진에 이상이 없으면 시험을 완료한다. 엔진에 이상이 없을 경우 통상 부하시험은 철도 디젤차량 1량 당 100~120분이 소요된다.

$$\frac{\text{전압} \times \text{전류}}{746(W) \times \text{주발전기효율}} \quad (\text{식 1})$$

부하시험장은 그림 1에 나타낸 것과 같이 길이가 20m인 디젤기관차 7,000호대 2대를 동시에 시험할 수 있도록 건축되었다. 건물 높이는 총 10.35m인데, 이 중 지표면에서 7.5m까지는 벽체이고, 그 위의 2.85m는 슬라브 지붕으로 되어 있으며, 기둥이 5m 간격으로 총 9개가 설치되어 있다. 현장조사 결과, 부하시험장은 실내용적이 좁고 배기가스 배출시설이 부족하였다. 그리고 환기시설이 노후화되어 있었으며, 환기용량 역시 충분하지 못한 상태였다.

환기시설의 문제점을 파악하기 위해 환기설비를 가동하지 않고 부하시험을 했을 때 주요 지점에서의 실내온도가 70°C 이상까지 상승하였으며, 디젤기관차 엔진의 출력이 떨어지면서 7노치에서 엔진이 정지하였다. 배기 팬(exhaust fan)과 흡기(intake fan) 등 환기설비를 정상적으로 가동한 상태에서 부하시험을 실시한 경우에도 주요 지점에서의 실내온도가 57°C 이상으로 상승하였다.

부하시험장의 또 다른 문제점은 디젤기관차에서 배출되는 고농도의 배기가스(CO의 최대농도가 1,229 ppm)로서 부하시험을 할 때 배출된 배기가스가 제대로 배기되지 않고 일부가 누출되어 실내 작업자의 정상적인 활동을 방해하였다. 소음도 해결해야 할 문제 중 하나였는데, 디젤기관차에서 발생하는 높은 음향 파워로 인해 일차적으로 부하시험장 내부에서 110

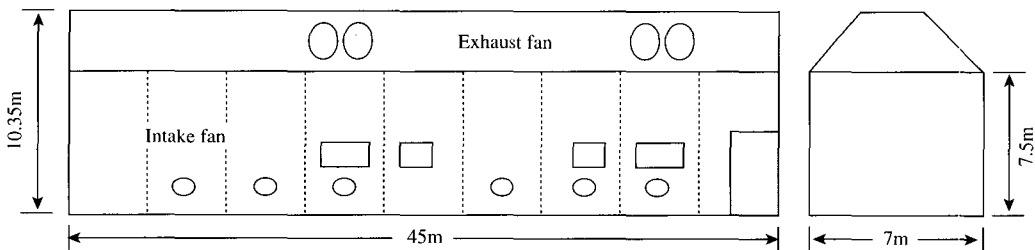


Fig. 1. Schematic diagram of the studied building.

dB(A) 이상의 소음이 발생하였으며, 이러한 소음도는 개구부, 환기설비와 벽체 등을 통과하여 주변 지역으로 전파되어 나갔다. 부하시험장이 도심에 위치해 있으므로 발생한 소음이 인근 지역으로 전파되어 인근 지역 주민의 정온한 환경을 해칠 우려가 있었다.

본 연구에서는 먼저 부하시험장에서 온도상승의 원인을 규명하기 위해 6지점 온도 측정장치를 사용하여 부하시험 중 실내 주요지점에서의 온도상승을 확인하였으며, 상용 CFD 프로그램인 Fluent 5.3(미국, Fluent사)과 Gambit 1.3(미국, Fluent사)을 이용하여 실내에서의 유동을 가시화하고, 부하시험장에서 유동의 문제점을 파악하였다. 그리고 유동해석 결과를 근거로 환기시설을 개선하기 위해 시나리오를 설정하고, 각 시나리오를 적용했을 때의 효과를 분석하였다. 마지막으로 CAD 프로그램을 이용하여 부하시험장 환기설비의 개선사항에 대해 설계를 하여 시설물 개선시 사용할 수 있게 하였다.

## 2. 연구 및 방법

### 2.1 해석모델

Fluent는 유한체적법 (finite volume method)을 이용하여 열전달, 유체유동, 연소현상 등을 해석하는 범용 코드로서 본 연구에서는 Fluent를 이용하여 부하시험장에서의 유동을 파악하였다. 형상이 복잡한 부하시험장은 Gambit 1.3을 사용하여 tetrahedral 계산격자를 구성했으며, 난류모델로는 표준 K-ε 모델을 적용하였다. 벽면 근처의 처리에는 standard wall function을 사용했으며, 운동량 계산에는 quick 기법, 압력-속도 동시해석에는 simplec, 난류에너지 (turbulence kinetic energy), 소산율 (turbulence dissipation rate)의 계산에는 2차 상향차분법을 각각 사용하였다. 완화계수 (under relaxation factor)는 압력의 경우 0.3, 운동량은 0.7, 난류에너지 및 소산율은 0.8로 정하여 계산을 수행했다. 연속방정식 X, Y, Z 방향 속도, 난류에너지 및 소산율의 수렴판정조건은  $10^{-3}$ 이며, 에너지 방정식은  $10^{-6}$ 을 수렴조건으로 하였다. Fluent 5.3 solve를 사용하여 약 560회의 반복계산 (iteration)을 통해 수렴된 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서의 해석대상은 환기시설을 가동한 상태에서 부하시험을 할 때의 내부유동이다. 이 유동은

표 1에서와 같이 3차원 정상상태 난류유동이고, 배기가스의 온도가 300°C 정도이기 때문에 에너지 평형을 고려하여 계산을 수행하였다. 부하시험장의 외관은 그림 1에서와 같이 45 m × 7 m × 10.35 m (W × D × H)이다. 표 2에 유동해석에 사용된 경계조건을 나타내었으며, 부하시험장의 형상은 17~19만개의 사면체 계산격자 (tetrahedral mesh)를 만들어 모델링하였다. 축류 팬은 경계조건에서 velocity-inlet으로 주었으며, 속도는 급기용량을 단면적으로 나누어 구한 값인 11.06 m/sec를 입력 값으로 하였다. 자연환기구의 압력은 대기압 상태인 101,325 Pa로, 급기 팬의 경우 여름철을 가정하여 유입온도를 35°C로 하였다. 나머지 경계조건도 이런 방법으로 값을 구하여 입력하였다.

**Table 1. Principal features of the analysis used in this study.**

Items	Contents
Coordinate system	Right-hand Cartesian coordinate system Vertically upward Y-axis
Problem type	3D steady state incompressible
Solver type	Segregated explicit
Turbulence model	k-ε model with standard wall function
Operating condition	Gravitational acceleration (9.81 m/s <sup>2</sup> ) in-Y direction 35
Discretion	Standard for pressure Second order upwind for all other variables

**Table 2. Boundary conditions of the cases studied.**

Classification	Boundary condition	Value
Intake	Axial fan (velocity-inlet)	130CMM <sup>1)</sup>
	Ventilation open window (inlet-vent)	101,325 Pa
Exhaust	Axial fan (pressure-outlet)	695CMM
Wall	Wall (wall)	27.0°C
	RBL <sup>2)</sup> intake grill (pressure-outlet)	101,299.6 Pa, 52.3°C
Diesel locomotive	RBL exhaust grill (velocity-inlet)	5.78 m/s, 65.5°C
	Engine air intake (pressure-outlet)	101,322.5 Pa, 35°C
	Engine room (wall)	63.7°C
	RBL room (wall)	40.7°C

<sup>1)</sup> CMM : cubic meter per minute (m<sup>3</sup>/min).

<sup>2)</sup> RBL : radiator blower.

**Table 3. Characteristics of engine tested in the study.**

Maker	EMD, GM
Model	16-645E3
Cylinder (mm) (bore × stroke)	230 × 254
Cycle	2
Compression ratio	14.5 : 1
Pulling capacity (HP)	3,000
RPM	Idle 315 8 notch 900

**Table 4. Power of the diesel locomotive engine during load tests.**

Notch	Power (bhp)	Rated power (%)
Idle	-	-
1	114.0	3.7
2	420.7	13.6
3	700.8	22.6
4	1034.6	33.4
5	1512.9	48.8
6	1957.1	63.2
7	2750.9	88.8
8	3097.5	100

## 2.2 디젤기관차 엔진

본 실험에서는 현재 국내에서 여객용으로 운영하고 있는 철도 디젤차량 중 주력 차종인 7000호대 디젤기관차를 사용하였다. 표 3에 7000호대 디젤기관차 엔진의 특징을 나타내었다. 7000호대 디젤기관차 엔진은 2사이클, 16밸브기관으로 아이들(idle) 모드에서 8노치까지 출력을 조절할 수 있고, 실린더의 크기는 230 mm × 253 mm (bore × stroke)로서 실린더 하나의 체적은 10,553 cm<sup>3</sup>, 압축비(compression ratio)는 14.5 : 1이다. 또한 견인동력은 엔진마다 다소 차이가 있지만 3,000 ± 200 bhp (brake horse power)의 범위이다. 표 4는 실험에 사용된 디젤기관차의 부하시험시 엔진출력을 나타낸 것이며, 8노치 최대 출력(100%)을 기준으로 2노치에서는 13.6%, 4노치에서는 33.4%, 6노치에서는 63.2%로 측정되었다.

## 2.3 부하시험장의 환기시설

부하시험장에는 배기와 급기시설이 있어서 발생하는 열과 배기가스를 외부로 배출하며, 디젤기관차 엔진의 작동에 필요한 신선한 외부 공기를 공급한다.

그리고 라디에이터에 외부공기의 흐름을 형성하여 열을 배출시켜서 냉각수 온도를 낮춰주는 기능을 한다. 디젤기관차의 엔진냉각수는 라디에이터에서 냉각되며, 엔진의 과열을 방지하기 위해서 냉각수의 온도는 75~85°C로 유지해야 한다. 급기시설로는 그림 1과 그림 2에 나타난 것과 같은 지름 50 cm의 축류팬(axial fan)이 양쪽으로 6개씩 총 12개가 설치되어 있으며, 축류 팬은 130 CMM × 30 mmAq × 2 hp × 12기로서 전체 급기용량은 1,560 CMM이다. 또 다른 급기시설은 자연환기구로서 엔진 공기유입구(engine room intake)와 냉각장치 공기유입구(radiator blower intake)에 외부공기를 공급할 목적으로 대기압 상태로 열려져 있다. 자연환기구는 부하시험장 바닥에서 2.1 m 가량 높이에 위치하며, 4.4 m × 0.8 m 크기의 환기구가 양쪽에 2곳씩 총 4곳, 2.0 × 0.8 m 크기의 환기구가 양쪽에 2곳씩 총 4곳에 있다. 배기시설로는 배기용 팬이 4기씩 양쪽에 총 8기가 설치되어 있다. 배기 팬은 695 CMM × 30 mmAq × 7.5 hp × 8기로서 총 배기용량은 5,560 CMM이다. 그리고 배기용 터보팬이 1기(532 CMM × 132 mmAq × 40 hp)가 추가로 설치되어 있다. 건물의 원활한 환기를 위해서는 급기와 배기용량이 균형을 이루어야 하지만 부하시험장의 경우 배기용량이 급기용량보다 많은 것으로 조사되었다.

## 2.4 실험방법

부하시험은 정비가 끝난 디젤기관차의 엔진출력을 확인하는 것이 주목적이며, 본 실험에서는 전기 동력계를 사용하여 부하시험을 하였다. 부하시험장에서 현재 철도청 디젤기관차 중 주력 차종인 7,000호대의 디젤기관차에 대한 부하시험을 총 3차례 실시하였다. 부하시험의 순서는 먼저 10~15분간 디젤기관차를 예열하고, 각 노치에서 10분간 엔진을 작동하였다. 각 항목에 대한 측정은 각 노치에서 5분이 경과한 시점에서 하여 엔진부하 변화에 따른 측정치의 변동을 최소화하였다. 실험절차는 무부하(idle) 상태에서 10~15분 엔진 작동, 1노치에서 10분간 엔진작동, 2~8노치에서 10분간 엔진작동의 순서로 측정을 하고, 측정이 완료되면 노치를 천천히 낮추어 엔진에 무리가 가지 않게 하였다. 철도 디젤기관차를 이용한 실험방법에 관한 보다 상세한 내용은 박덕신 등(2004, 2003)을 참고할 수 있다.

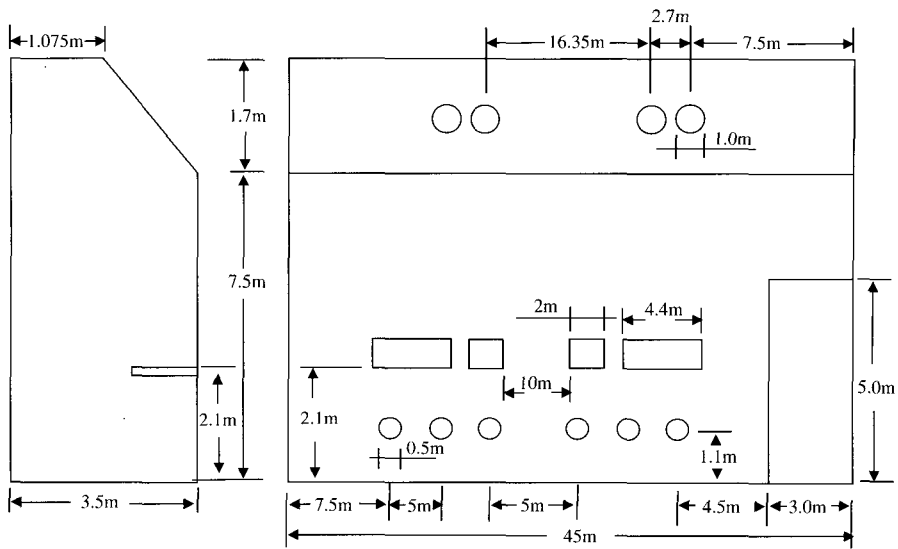


Fig. 2. Location of intake and exhaust fans in the studied building.

측정항목은 부하시험의 지시인자라고 판단되는 각 단계에서의 디젤기관차 엔진출력, 6지점 및 주요 지점에서의 실내온도 상승, 디젤기관차의 표면 온도, 배기가스 온도 등을 측정하였다. 이 측정 자료는 실내 유동의 문제점을 파악하고, 유동해석을 할 때 검증자료로 활용하였다. 측정에 사용된 장비는 표 5에 나타내었다.

2.5 온도 측정지점

부하시험장의 실내온도 상승은 온도 측정장치 ( $\mu 1000$  recorder & 6 channel temperature sensor)를 사용하여 측정하였다. 이 시스템은 원하는 곳에 온도센서를 장착하고, 레코드에 센서를 연결하고 실시간으로 기록하여 부하시험장 내부 6곳에서의 온도변화를 파악할 수 있다.

실내온도는 부하시험장 환기의 문제점을 파악하는데 가장 중요한 요소이다. 그림 3에 온도센서의 설치 위치를 나타냈으며, 온도센서를 다음과 같이 6곳에 설치하여 부하시험을 하는 동안 부하시험장 내부의 실내온도 상승을 확인하였다. i) Engine room intake (엔진룸 공기 유입구): 엔진에 공급되는 공기의 온도는 엔진출력에 많은 영향을 미친다. 공기는 압축성 유체로서 온도가 높을수록 밀도가 떨어지기 때문에 단위 시간당 더 많은 공기를 공급해 줘야 한다. ii)

Table 5. Measuring items and devices of this study.

Measuring items	Measuring devices
Temperature	$\mu 1000$ recorder and 6 channel temperature sensor
Engine output	Tachometer
Wind velocity, wind direction	Portable anemometer
Surface temperature	Surface thermometer

RBL intake (RBL 유입구): RBL은 엔진에 공급되는 냉각수의 온도를 낮춰주는 역할을 한다. 유입되는 공기의 온도가 높을수록 냉각수의 온도가 상승한다. 냉각수의 온도상승은 디젤기관차 엔진의 과열로 이어져 자동 차단장치에 의해 엔진이 정지하게 된다. iii) Funnel side (디젤기관차 배기구 옆): 부하시험장에는 배기가스 배출을 위한 닥트가 있으나 부하시험시 디젤기관차의 출력이 올라갈수록 배기가스의 누출이 증가하여 배기가스에 의해 주변 공기의 온도가 상승하는 것으로 추정되었다. iv) Engine room above (엔진룸 위): 디젤기관차 엔진에서는 부하시험시 열이 다량으로 발생된다. 이 열이 주변으로 전달되어 주변의 온도를 상승시킨다. 물론 이런 현상을 유동해석으로 규명했으며, 유동해석에는 디젤기관차의 표면온도가 입력 값으로 사용되었다. v) RBL above (RBL 위):

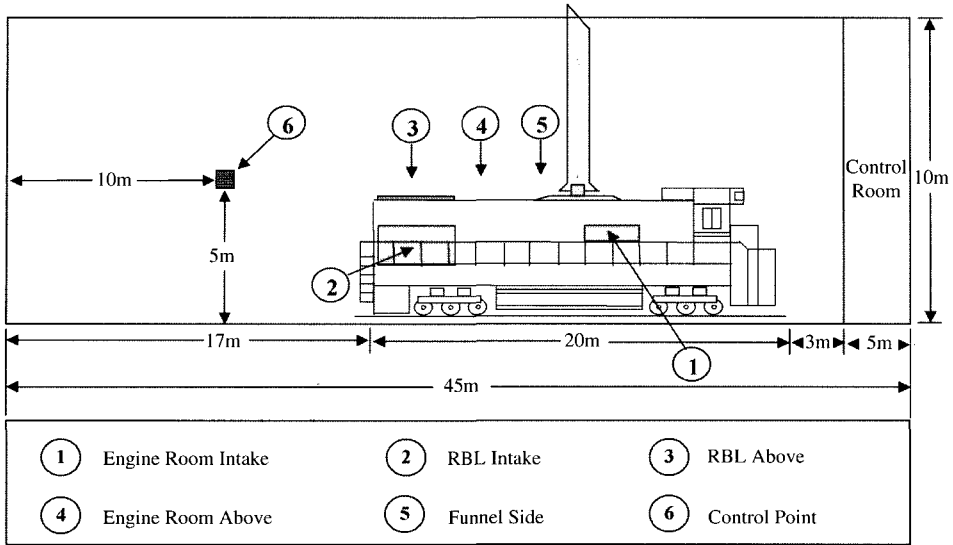


Fig. 3. Measuring points of temperature in the studied building.

RBL은 두 개의 대형 팬으로 구성되어 있다. 냉각수 온도에 따라 두 개의 팬 중 하나가 작동하거나 두 개가 동시에 작동을 한다. 풍속과 온도를 측정하고, 직접 관찰해본 결과, 통상 3노치까지는 한 개의 팬만, 4노치 이상에서는 두 개의 팬이 동시에 작동되는 것으로 조사되었다. vi) Control point (대조지점) : 대조지점은 다른 5개의 온도센서와 달리 유동의 영향이 제일 적은 곳으로서 부하시험장 내부에서의 평균 온도 값을 알기 위해 설치하였다. 실내온도 상승 측정 이외에 주요 부분에서의 유속도 파악하였다. 유속은 엔진룸 공기 유입구, RBL 유입구, RBL 위 등 3곳에서 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 실내온도 상승

디젤기관차 7000호를 대상으로 부하시험장에서 환기시스템을 가동한 상태에서 온도변화를 측정하였다. 측정은 2001년 10월 5일 이루어졌으며, 측정당시 실내온도는 24.0°C, 습도는 45.4%였다. 측정결과, 그림 3의 ①번 지점에서는 유전에서 22.7°C, 8노치에서 26.6°C로 변화가 거의 없었다. ②번 지점에서는 3

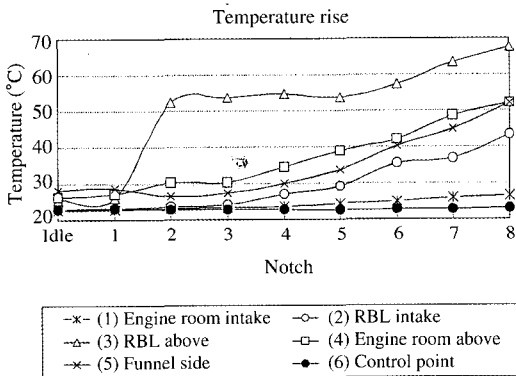
노치까지는 ①번 지점과 거의 유사했지만 4노치부터 온도가 약간 상승하여 8노치에서 43.5°C까지 상승하였다. 수차례에 걸친 측정결과 ③번 지점에서 온도변화는 유전에서 25.4°C, 1노치에서 26.1°C로 다른 지점과 별다른 차이를 보이지 않았지만 2노치부터 급격히 상승하여 8노치에서 67.6°C로 다른 지점에서의 온도보다 많게는 40°C 이상 적게는 15°C 이상의 온도 차이를 보이는 것으로 나타났다. ④번과 ⑤번 지점에서의 온도도 각각 52.0°C와 52.1°C까지 상승하였다. 그림 4에서 보여주듯이 ③번 지점에서의 온도 변화가 가장 심했다. 2노치부터 라디에이터 팬이 작동하여 냉각수를 식히면서 배출되는 5.78 m/s의 고속, 67.6°C의 고온의 공기가 부하시험장 내부의 온도 상승의 주요 원인인 것으로 보이며, 이에 따라 라디에이터 부분에 대한 환기대책이 가장 시급한 것으로 판단되었다.

#### 3.2 현재 시설물에 대한 유동해석

그림 5에 부하시험장에서 디젤기관차를 부하시험할 때 발생하는 내부공기의 유동을 개략적으로 표현하였다. 디젤기관차는 엔진작동과 동시에 엔진룸 공기유입구를 통해서 8노치일 경우, 엔진의 출력은 최대 904 RPM으로 이 때 276.7 CMM의 공기가 유입

**Table 6. Indoor temperature rise during the load tests.**

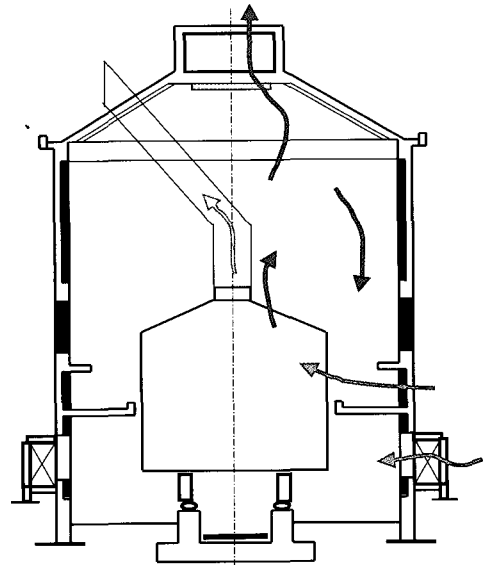
Measuring points	Temperature sensors (°C)					
	① Engine room intake	② RBL intake	③ RBL above	④ Engine room above	⑤ Funnel side	⑥ Control point
Idle	22.7	23.0	25.4	26.3	28.2	23.0
1	22.8	23.1	26.1	27.1	28.6	23.1
2	23.2	23.7	52.4	30.2	26.5	22.9
3	23.3	24.1	53.6	30.3	27.4	22.8
4	23.7	27.2	54.7	34.6	30.0	22.9
5	24.4	29.3	53.6	39.0	33.7	22.7
6	25.1	35.5	57.4	42.1	40.2	22.8
7	26.0	36.8	63.3	48.6	44.9	23.0
8	26.6	43.5	67.6	52.0	52.1	23.2



**Fig. 4. Temperature rise in the building during the load tests.**

된다. 유입된 공기는 엔진에서 연료와 혼합되어 압축 착화된 후 디젤기관차 배기구를 통해 배출된다. 디젤 기관차 엔진은 수냉식으로서 엔진 냉각수는 라디에이터에서 냉각된다. 냉각수는 75~85°C의 온도범위를 유지해야 한다. 냉각수는 RBL 상부에 설치된 48" 대형 팬에 의해 유도되는 공기에 의해 냉각되며, 공기는 냉각수의 열을 흡수한 후 디젤기관차 외부로 배출된다.

그림 6의 a)와 b)에 Fluent로 해석한 부하시험장의 측면과 단면에서의 온도분포를 나타내었다. 유동해석 결과, 부하시험장은 35~66°C의 온도범위를 나타냈으며, 온도가 가장 높은 지점은 RBL 상부로서 60~66°C의 온도범위를 보였다. 건물내부의 전체적인 기류는 RBL에 의해 형성된 더운 공기의 흐름이 제어실 쪽으로 이동하여 엔진에 공급되는 공기의 온도를 상승



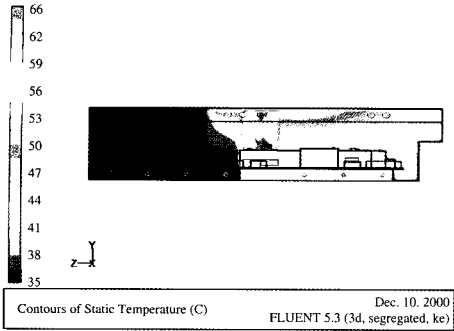
**Fig. 5. Characteristics of ventilation patterns in the studied building.**

시키고, 부하시험장 하부에 설치된 축류 팬에서 유입되는 신선한 외부공기의 유입을 방해하여 실내온도 분포의 불균형을 초래하는 것으로 판단된다. 또한, 부하시험을 할 때 부하시험장 천장에 설치된 배기 팬의 위치가 디젤기관차 RBL의 위치와 일치하지 않아서 배기 기능이 현저히 떨어지는 것으로 나타났으므로 이에 대한 대책도 필요한 것으로 사료된다.

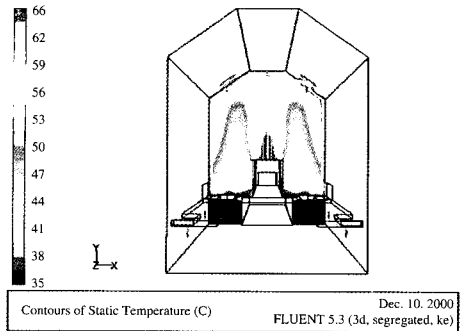
그림 6의 a)와 b)의 온도분포도를 동일한 위치에서 속도벡터로 표현하여 그림 6의 c)와 d)에 나타내었다. 유동해석 결과 부하시험장 내부의 기류는 상당

히 복잡한 양상을 보였다. 부하시험장에서 가장 큰 기류의 흐름은 그림에서와 같이 RBL 위로 배기된 기류가 천장을 타고 순환하여 RBL 유입구로 재유입 되는 것이며, RBL 상부의 유속은 최대 5.8 m/s로서

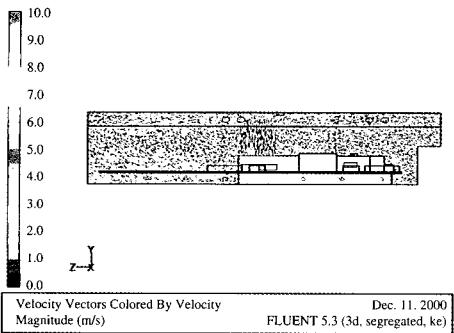
하부에 위치한 축류 팬이나 천장에 설치된 배기 팬의 성능을 저하시키고 있는 것으로 나타났다. 부하시험장의 실내온도를 낮추기 위해서는 RBL에서 배기된 고온의 공기를 직접 외부로 배기해야 할 것으로



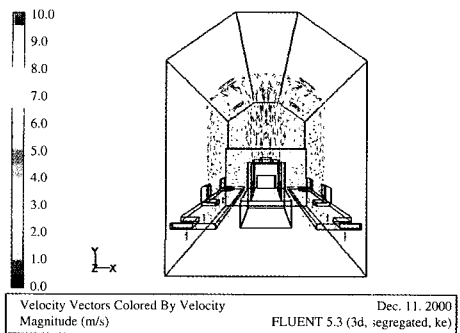
a) Temperature (side view)



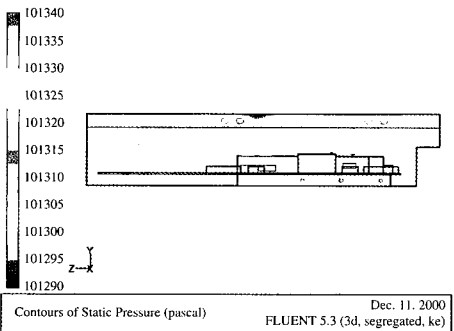
b) Temperature (section view)



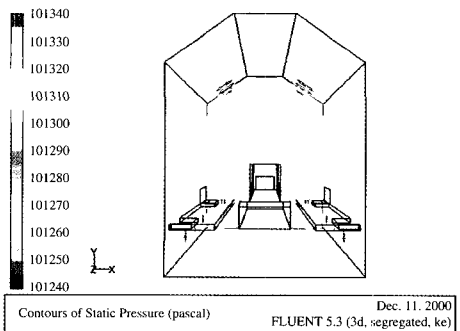
c) Velocity vector (side view)



d) Velocity vector (section view)



e) Pressure (side view)



f) Pressure (section view)

Fig. 6. Temperature distributions, velocity vectors and pressure distributions of the studied building described by Fluent.



판단된다.

그림 6의 e)와 f)에 부하시험장에서의 압력분포를 제시하였다. 그림에서와 같이 RBL 상부의 압력은 101,335 Pa로서 대기압보다 10 Pa 가량 높은 것으로 나타났으며, 부하시험장에서 압력이 가장 낮은 곳은 출입문으로서 대기압보다 10 Pa 가량 낮았다. 그리고 단면도에서 볼 수 있듯이 엔진룸 유입구와 RBL 유입구 쪽의 압력이 낮았으며, 이것은 엔진룸과 RBL에서의 공기 유입으로 형성된 기류에 의한 것으로 사료된다.

유동해석결과, 부하시험장 환기문제를 해결하기 위해서 가장 시급한 것은 디젤기관차 RBL에서 배기되는 고온의 공기를 직접 외부로 배출시키고, 배기용량에 비해서 부족한 급기용량을 증가시켜 부하시험장

에서 전체적인 급·배기의 균형을 유지해야 할 것으로 판단된다. 급기용량을 늘리기 위해서는 급기용 축류 팬의 용량을 증가시키고, 자연환기구를 추가로 설치하여 신선한 외부공기가 원활하게 유입될 수 있도록 해야 할 것으로 사료된다.

### 3.3 환기 개선

유동해석 결과와 다음의 다섯 가지 기본지침을 근거로 환기 개선안을 작성하였다. i) 내부 난기류를 최대한 줄이고자 하였다. ii) 급기와 배기의 균형을 맞추고자 하였다. iii) 실내에서 발생하는 열 부하를 최대한 줄이고자 하였다. iv) 외부공기의 공급 면적을 늘리고, 엔진룸 공기유입구, 냉각공기 유입구 등 신선공기가 요구되는 곳에 자연환기구를 설치하고자 하였다. v) 필요할 경우 냉방기의 도입을 고려하였다. 환기 개선안은 Case 1~3으로 요약하여 표 7에 제시하였다. 현재 부하시험장 제원과 환기설비의 위치를 그림 7에, 3가지 개선안에 대한 개략도를 그림 8에 나타내었다.

Case 1의 경우 개선사항은 표 7에 나타난 것과 같이 RBL에서 배기되는 고온의 공기를 덕트를 설치하여 건물 밖으로 배출시키고, 측면 자연환기구의 면적을 최대한 넓혀서 유입공기의 양을 늘리는 것이다. 그리고 현재 설치되어 있는 12대의 급기용 축류 팬의 용량을 130 CMM에서 260 CMM으로 증가시킨다. Case 2의 경우 변경사항은 그림 8에서 배기 팬 4대를 추가로 설치하고, Case 1과 마찬가지로 측면 자연

Table 7. Improvement cases of ventilation facilities in the studied building.

Case	Contents
1	① Install duct for exhausted hot air from RBL.
	② Add on of the ventilation open window (4.4 m × 0.8 m 6 sets, 2.4 m × 0.8 m 4 sets).
	③ Extend the intake fan (130 CMM → 260 CMM)
2	① Add on the exhaust fan (696 CMM, 4 sets)
	② Add on the ventilation open window (4.4 m × 0.8 m 6 sets, 2.4 m × 0.8 m 4 sets).
	③ Extend the intake fan (130 CMM → 260 CMM)
3	① Install air-conditioner at the RBL intake.
	② Add on the ventilation open window (4.4 m × 0.8 m 6 sets, 2.4 m × 0.8 m 4 sets).

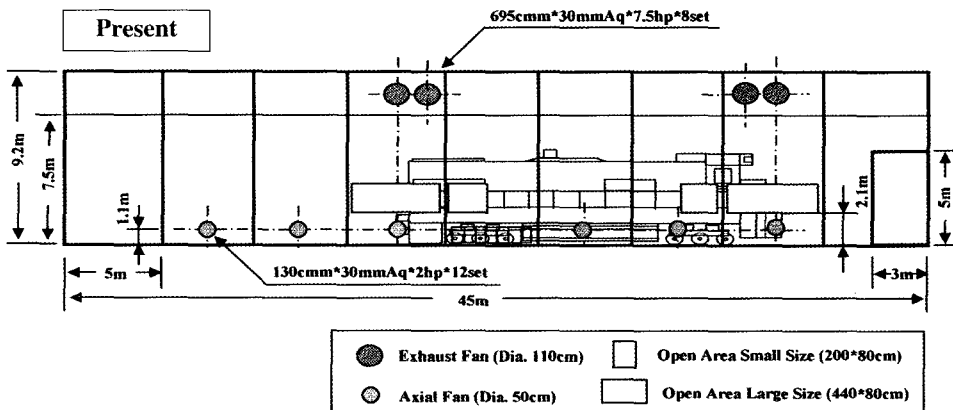


Fig. 7. Figures of the present studied building.

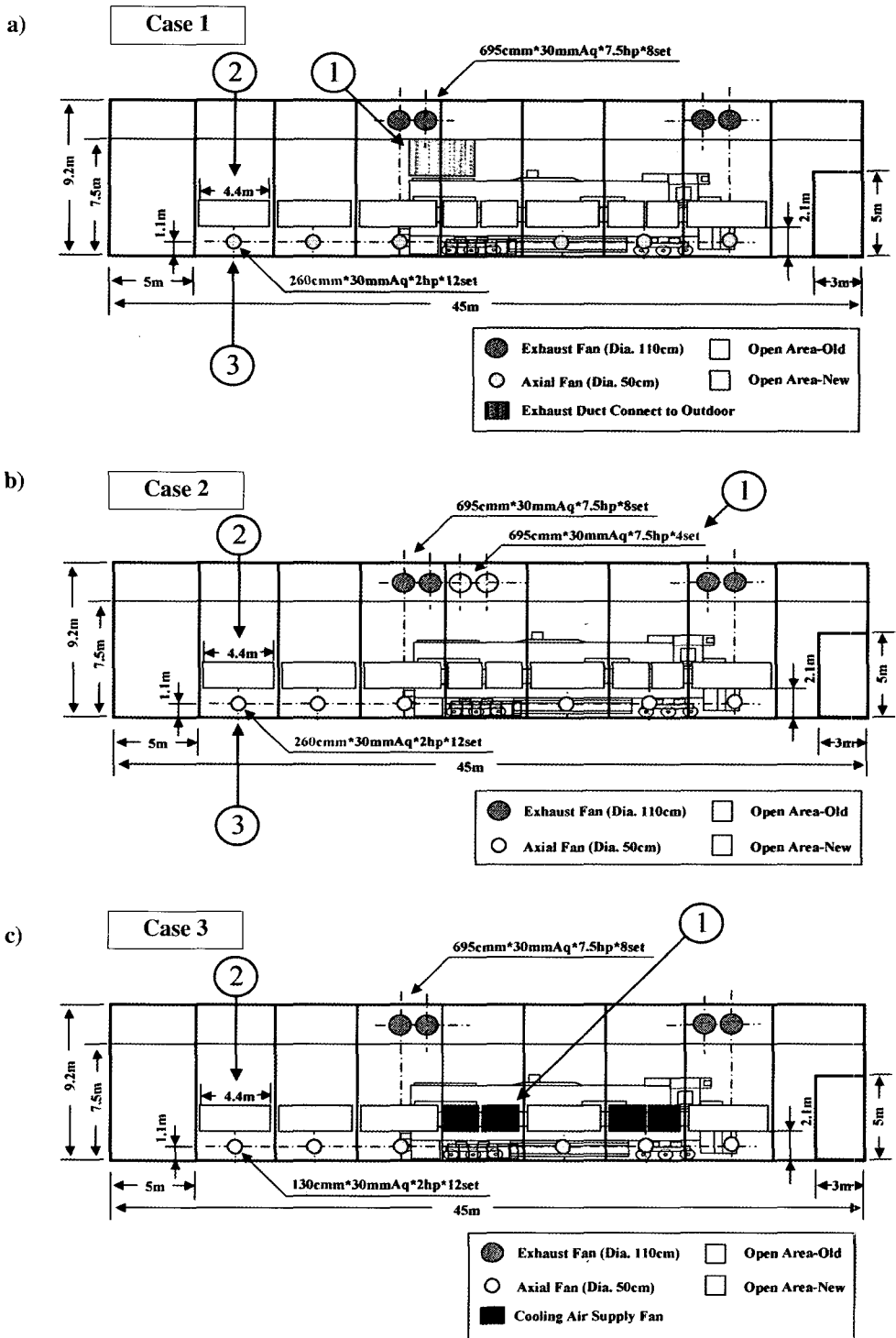


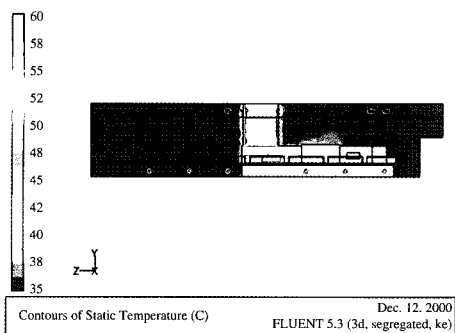
Fig. 8. Schematic view of each case for the studied building.

환기구의 면적을 최대한 확대하여 유입공기의 양을 늘리고, 축류 팬 12대의 용량을 2배로 증가시키는 것이다. Case 3에서는 측면 자연환기구 중 디젤기관차 엔진공기 유입구와 RBL 냉각공기 유입구 부분에 냉방기를 설치하여 20°C, 2 m/s의 신선한 공기를 공급

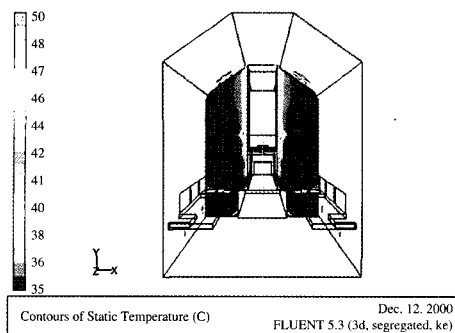
하며, 측면 자연환기구의 면적을 최대한 확대하여 유입공기의 양을 늘린다.

### 3. 4 개선안에 대한 유동해석 (1)

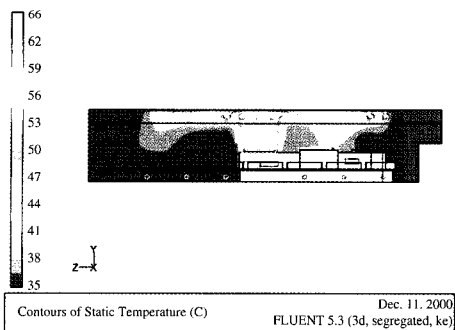
Case 1에 대한 유동해석 결과를 그림 9의 a)와 b)



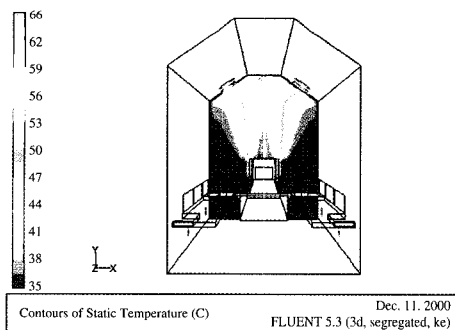
a) Case 1 (side view)



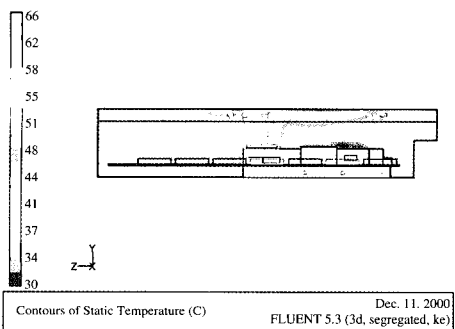
b) Case 1 (section view)



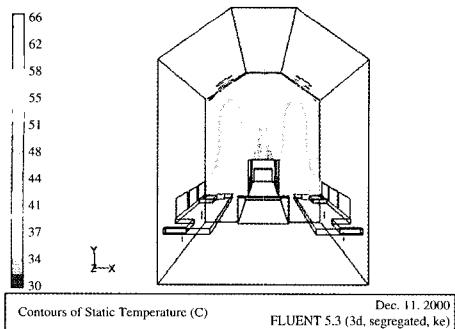
c) Case 2 (side view)



d) Case 2 (section view)



e) Case 3 (side view)



f) Case 3 (section view)

Fig. 9. Temperature distributions for each case described by Fluent.

에 나타내었다. 그림에서와 같이 Case 1을 적용할 경우 RBL에서 배기되는 공기가 닥트를 통해 전부 건물 외부로 배기되므로 디젤기관차 표면과 닥트에서 방출되는 열을 제외하고 실내에 다른 열원이 없게 된다. 그러므로 RBL 배기 배출용 닥트와 디젤기관차 표면을 제외하고는 경계조건에서 설정한 유입공기 온도인 35°C에서 거의 상승하지 않았다. 속도분포의 경우도 급기용 축류 팬과 배기용 팬 주변을 제외하고 급격한 기류의 변화는 없었다. 압력분포도 속도와

마찬가지로 축류 팬과 배기 팬 주변을 제외하고 변화 폭이 20~30 Pa로서 뚜렷한 변화가 없는 것으로 나타났다. 즉, Case 1을 적용할 경우 부하시험장의 온도 측면에서 상당한 효과가 있는 것으로 판단된다.

Case 2를 적용했을 경우의 유동해석 결과를 그림 9의 c)와 d)에 나타내었다. 그림에서 개선 전의 유동해석결과와 Case 2를 적용했을 경우의 결과를 비교하면, RBL에서 배출된 공기가 측면도의 오른쪽에 위치한 제어실 쪽으로 확산되지 않고, 외부로 배출되는

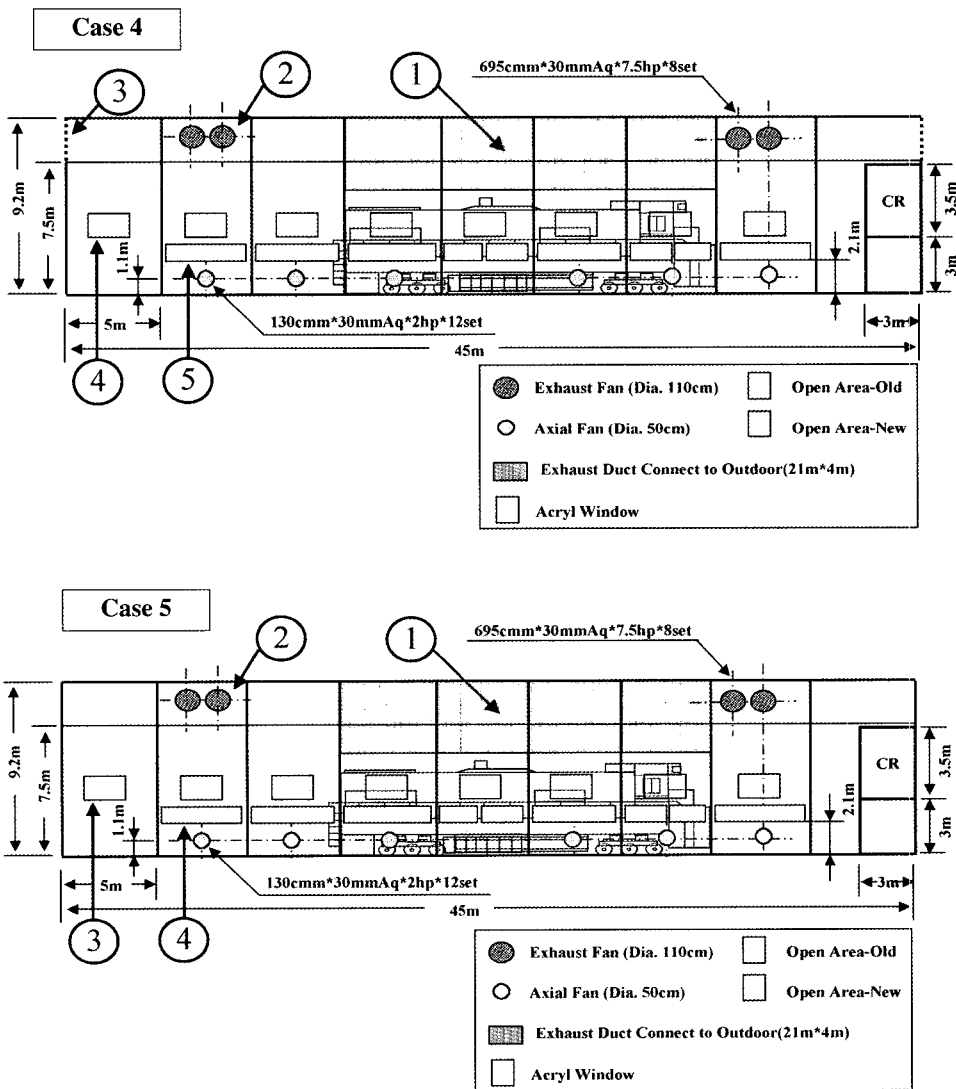


Fig. 10. Schematic views for Case 4 and Case 5 on the studied building.

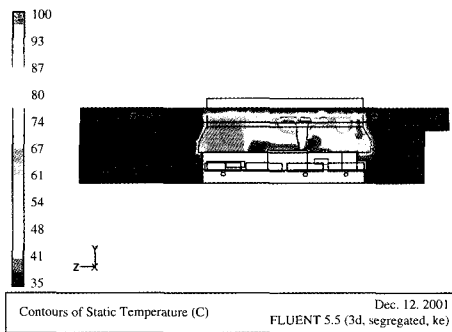
것을 볼 수 있다. RBL 상부에 추가로 설치한 배기 팬에 의해 65°C 가량의 고온의 공기가 엔진룸 유입구와 RBL 냉각공기 유입구 쪽으로 확산되지 않고 바로 배출되어 부하시험장의 실내온도를 낮추는 것으로 나타났다. 속도분포의 경우도 RBL 상부와 급기 용량을 증가시킨 급기용 축류 팬, 배기 팬 주변에서 기류의 흐름이 빨라지는 것을 볼 수 있다. 압력분포는 배기 팬 주변에서 대기압 보다 약 20 Pa 가량 높은 최대값을 나타냈으며, 추가로 설치한 자연환기구 주변에서 최소값을 보였다. Case 2의 경우 그림 9의 c)와 d)의 온도분포도에서 보여주듯이 RBL에서 상승한 더운 공기가 배기 팬의 추가 설치로 실내 유동을 교란시키지 않고, 적절하게 배기되는 것으로 확인되었다.

Case 3을 적용했을 경우의 유동해석 결과를 그림 9의 e)와 f)에 나타내었다. 온도분포를 Case 2와 비교할 때 RBL에 의해 상승한 공기의 상당량이 제어실 쪽으로 이동하는 것을 알 수 있다. 자연환기구로 유

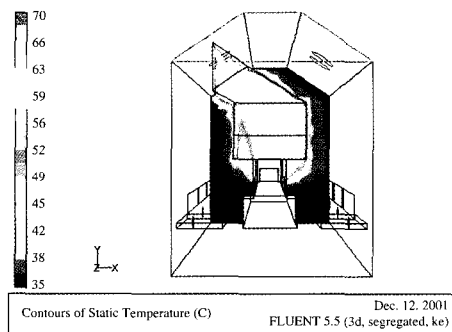
입된 신선공기가 엔진룸 유입구와 RBL 공기유입구 주변의 온도를 낮추어 고온의 공기가 디젤기관차 엔진으로 유입되어 발생하는 엔진의 출력저하를 다소 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 속도분포의 경우 RBL에서 배기된 공기에 의해 주변보다 빠른 기류가 제어실 쪽으로 향하고, 압력의 경우는 Case 2에서와 유사한 것으로 나타났다.

### 3.5 개선안에 대한 유동해석 (2)

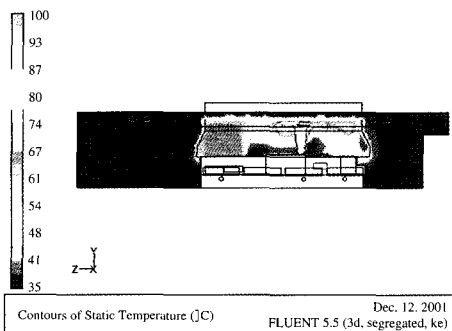
Case 1~3에 대한 유동해석을 실시하고, 해석결과를 근거로 환기 측면에서 보완된 두 번째 안을 제시하였다. Case 1~3과 Case 4는 그림 10에서 ㉓이라고 표시한 측면 그림의 유무로 구분할 수 있다. 2단계 개선안의 주요 내용을 정리하면 다음과 같다. Case 4는 Case 1~3에서 가장 큰 문제로 지적된 실내공간의 열원을 제거하기 위해 디젤기관차 배기가스와 RBL에서 배출되는 고온의 공기를 닥트를 통해 전부 건물 외부로 배출시키는 방법을 선택하였다. 현



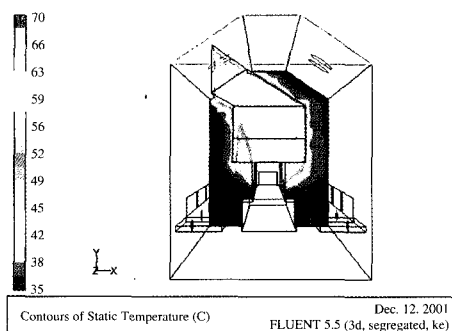
a) Case 4 (side view)



b) Case 4 (section view)



c) Case 5 (side view)



d) Case 5 (section view)

Fig. 11. Temperature distributions for Case 4 and Case 5 described by Fluent.

재 채광이 부족한 실내 환경을 개선하기 위해 그림 10과 같이 부하시험장 측면에 2m×1.2m의 크기로 채광창을 설치하고, 4.4m×0.8m의 면적을 가지는 자연환기구를 추가로 설치하여 신선 공기의 도입량을 늘릴 수 있게 하였다. 디젤기관차 배기가스와 RBL에서 배출되는 가스의 배기를 위한 덕트를 21m×4m의 크기로 하였다. 부하시험장 하부에서 상부로 공급되는 외기의 흐름을 차단하고 있는 작업대를 그릴로 교체하여 내부 공기의 순환을 원활하게 하였다. 배기 팬의 위치를 부하시험장의 좌우로 옮겨서 덕트로 배기되지 못하는 배출가스를 기계 환기로 배기되게 하였다. Case 5는 그림에서와 같이 부하시험장 양측면 상부에 그릴이 없이 배기 팬에 의해 기계 환기가 되게 하였다.

Case 4에 대한 유동해석 결과를 그림 11의 a)와 b)에 나타내었다. 그림에서 개선 전의 유동해석결과 디젤기관차와 RBL에서 배출되는 가스는 덕트 내·외부 온도 차이와 유체가 지닌 유속으로 인해 전부 건물 외부로 배출된다. 그러므로 부하시험장에는 엔진룸과 배기덕트에서의 열 방출 이외에 다른 열원이 없기 때문에 경제조건에서 설정한 유입공기 온도인

35°C에서 거의 상승하지 않았다. 측면과 단면에서의 속도분포의 경우 덕트 내부에서의 기류변화를 제외하고 별다른 변화가 없었다. 압력분포도 속도분포와 마찬가지로 급기용 축류 팬과 배기용 팬 주변을 제외하고는 실내에서 압력에 뚜렷한 변화가 없는 것으로 나타났다. 부하시험장에서의 온도, 압력, 속도분포를 검토해본 결과, Case 4를 적용할 경우 상당한 개선효과가 있을 것으로 판단된다.

Case 5에 대한 유동해석 결과를 그림 11의 c)와 d)에 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 Case 4와 Case 5의 차이점은 부하시험장 측면 그림에서 좌·우측 상단의 자연환기구인 그릴의 유무로 구분되며, 유동해석 결과 Case 4와 Case 5는 큰 차이는 없지만 부하시험장 내부의 전체 유동을 고려할 때 Case 4를 적용하는 것이 더 효과적일 것으로 사료된다.

### 3.6 환기설비 개선을 위한 설계

부하시험장의 환기설비를 개선하기 위해 유동해석을 실시하고, 해석자료를 근거로 CAD를 이용하여 개선사항에 대한 설계를 하였다. 각 위치별 개선사항을 요약하면 다음과 같다. i) 디젤기관차에서 배출되

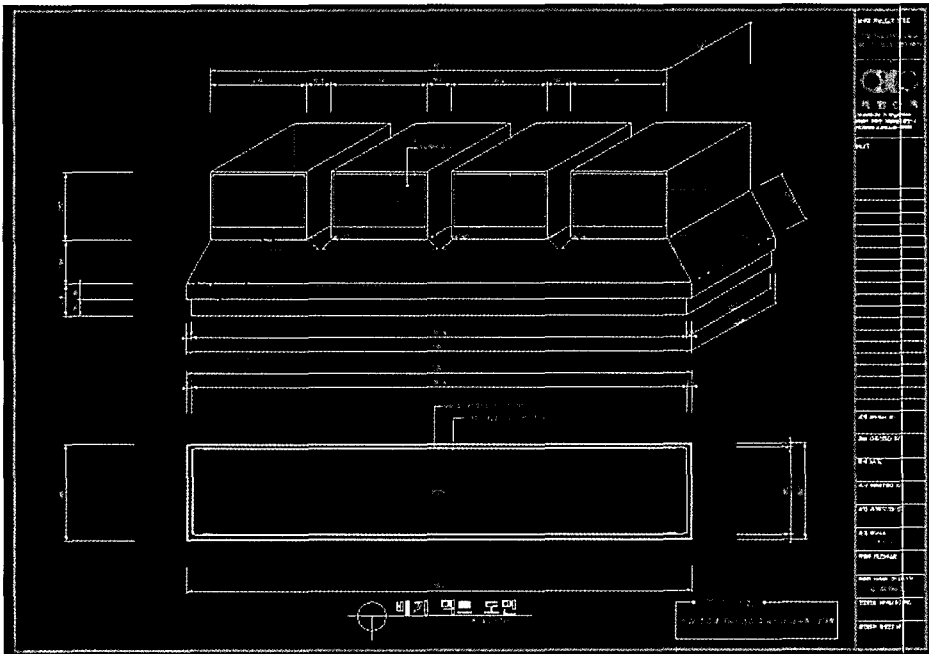


Fig. 12. Drawings of duct for the emission of the diesel engine and the RBL exhaust gas.

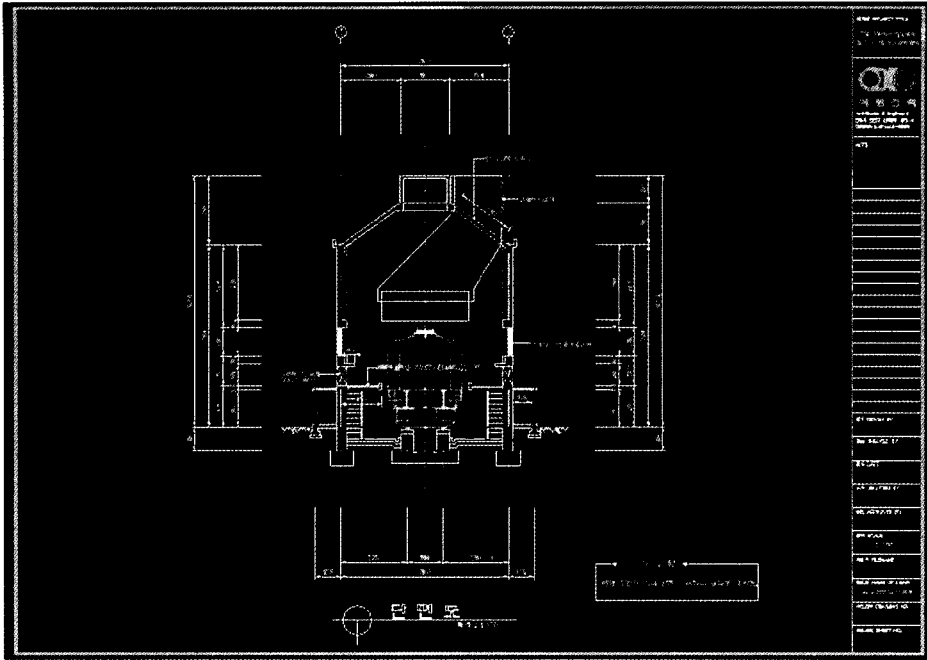


Fig. 13. Drawings of a section view on the studied building.

는 배기가스와 RBL에서의 배기가스를 전량 외부로 배출시킬 수 있는 21m×4m 크기의 닥트를 설치하고, 건물에는 5m 간격으로 보가 있으므로 이것을 피해서 4m×4m 크기로 네 개로 나뉘어서 그림 12와 같이 설계하였다. 닥트의 재질은 스텐리스 강으로 하여 고온의 배기가스에 견딜 수 있도록 하고, 부하시험 대상 차량에 따라 높이를 조절할 수 있게 고안하였다. ii) 그림 13에 부하시험장 환기설비를 개선한 경우의 단면도를 나타내었다. 그림에서 닥트는 디젤기관차 상부에 설치되고, 건물의 상부 측면을 개방하여 배기되는 구조로 설계하였다. 지붕에는 빗물의 유입을 막을 수 있게 스텐리스 강판이 놓여지고, 닥트의 끝단에는 전동식 개폐가 가능한 그릴을 설치하여 4개의 닥트가 독립적으로 개폐될 수 있게 하였다. iii) 유동해석 결과 건물 하부에서 유입된 신선 공기가 부하시험장 중간에 설치된 작업대로 인해 상승하지 못하므로, 이를 개선하기 위해 현재 콘크리트로 설치된 건물 중앙부의 작업대를 통풍이 가능한 그릴로 교체하는 것을 설계에 반영하였다. iv) 현재 부족한 부하시험장 내부의 채광을 위해 측면에 2m×

1.2m의 크기의 채광창을 설치하고, 채광창 하부에는 자연환기구의 면적을 4.4m×0.8m의 면적을 가지는 자연환기구 12개를 추가로 설치하여 자연 환기에 의한 신선 공기의 도입량을 늘릴 수 있게 하였다. v) 배기 팬의 위치를 부하시험장 좌우로 옮겨서 닥트로 배기되지 못하는 가스를 기계 환기로 처리되도록 설계하였다. vi) 부하시험장 주변 주택가에서의 소음 문제를 해결하기 위해 그림 12와 그림 13의 부하시험장 건물 바깥으로 연결되는 배기닥트의 내부에 공명형 소음기를 설치하고, 닥트의 방향을 주택가와 반대로 향하게 하였다.

향후 작업환경을 보다 개선하기 위해서는 제어실에 각종 센서와 부하시험 장치를 설치하여 대부분의 작업이 소음도가 심한 부하시험장과 격리될 수 있도록 해야할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 CFD 프로그램을 이용하여 시설물에서의 환기 문제를 해결하고자 하였으며, 환기 설비

를 개선해야 하는 철도차량 엔진 부하시험장을 연구 대상으로 하였다. 부하시험장에서 온도상승의 원인을 규명하기 위해 온도 측정시스템을 사용하여 부하시험 중 실내 주요지점에서의 온도상승을 측정하였다. 온도는 총 여섯 곳에서 부하시험과 동시에 실시간으로 측정하여 분석하였다. 분석결과, 부하시험장에서의 온도상승은 급·배기 용량의 균형이 맞지 않고, 기류의 흐름이 원활하지 못한 것이 가장 큰 문제점으로 파악되었다. 특히, RBL에 의해 형성된 고온의 난기류와 급·배기 팬 등 환기설비가 적재적소에 설치되지 못한 것도 한 원인으로 지적되었다.

CFD 전용프로그램인 Fluent를 이용하여 부하시험장의 유동을 가시화하고, 유동해석 결과를 근거로 환기설비를 개선하기 위해 3가지 시나리오(Case 1~3)를 설정하였다. 각 시나리오에 대해서 유동해석을 실시하여 환기 개선효과를 검토하고, 환기효과 면에서 보다 보완된 2가지 시나리오(Case 4~5)를 작성하여 유동해석을 실시하였다. 유동해석 결과 Case 4와 Case 5는 큰 차이는 없지만 부하시험장 내부의 전체 유동을 고려할 때 Case 4를 적용하는 것이 더 효과적일 것으로 사료된다.

환기설비 개선안을 요약하면 다음과 같다. 부하시험장에 대형 덕트를 설치하여 디젤기관차와 RBL에서 배출되는 가스가 모두 건물 외부로 배출되게 하였다. 부하시험장 측면에 자연환기구의 면적을 최대한 넓혀서 외기의 도입량을 늘릴 수 있게 하였으며, 건물 내부에서 유동을 방해하는 인자들을 제거하여 내부공기의 순환을 원활하게 하였다. 천장에 설치된 배기 팬의 위치를 건물 좌우측 끝단으로 옮겨서 미처 배출되지 못한 배기가스가 기계 환기로 처리되도록 하였다. 연구결과와 유동해석 자료를 근거로 CAD를 이용하여 개선사항을 반영하여 설계를 하여 향후 시설물 개선시 활용할 수 있게 하였다. 본 연구를 통하여 건물과 환기설비의 설계 단계에서 CFD를 활용하여 건물의 환기 성능을 향상시키는 것이 효과적이지만 시설물을 개선하고자 할 때도 유용하게 사

용될 수 있다는 것을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- 박덕신, 김태오, 김동술 (2003) 디젤기관차 엔진에서 배출되는 입자의 특성분석, 한국대기환경학회지, 19(2), 133-143.
- 박덕신, 김동술 (2004) 철도디젤차량에서 배출되는 오염물질의 배출량 산정방법 개발, 한국대기환경학회지, 20(4), 539-553.
- 윤세택 (1984) 최신 디젤전기기관차, 정문사문화주식회사, 112-114
- 철도청 (1996) 디젤전기기관차 검수지침서 (I).
- Awbi, Awbi (1991) Computational fluid dynamic-tool or toy?, in: Proceedings of the 1991 IMechE Conference on Computational Fluid Dynamics in Ventilation, London, UK.
- Awolesi, S.T., H.W. Awbi, M.J. Seymour, and R.A. Hiley (1991) Computational fluid dynamic-tool or toy?, in: Proceedings of the 1991 IMechE Conference on the Use of CFD Techniques for the Assessment and Improvement of a Workshop Ventilation System, London, UK.
- Gosdam, A.D. (1999) "Developments in CFD for Industrial and Environmental Applications in Wind Engineering.," *Journal of Wind Eng. and Industrial Aerodynamics*, Vol. 81, 21-39.
- Graca, G.C., Q. Chen, L.R. Glickman, and L.K. Norford (2002) Simulation of wind-driven ventilative cooling systems for an apartment building in Beijing and Shanghai, *Energy Buildings* 34(1), 1-11.
- Srebric, J., Q. Chen, and L.R. Glickman (2000) A coupled airflow-and-energy simulation program for indoor thermal environment studies, *ASHRAE Transactions* 105(2), 414-427.
- Tantasawasdi, C., J. Srebric, and Q. Chen (2001) Natural ventilation design for houses in Thailand, *Energy Buildings* 33(8), 815-824.