

지하철 터널내 열환경 예측 프로그램 개발에 관한 연구

A study on the development of thermal environment prediction program in tunnel of the subway

김 종 렬*, 김 동 규*, 김 종 수**, 최 광 환**, 정 호 민***, 박 준 택****
J. R. Kim, D. G. Kim, J. S. Kum, K. H. Choi, H. M. Jeong, J. T. Park

Key words : Platform(플랫폼), Concourse(중층), Tunnel(터널), Internal heat gain(내부발열), Waste heat recovery(폐열회수), Subway(지하철)

Abstract

Recently scientists and engineers are developing a system to get waste heat of low-temperature level with advanced heat pump, which have not been used up to now. As the reason, it is necessary to examine capability of using waste heat which is raised up in the tunnel of subway out of widely distributed low-temperature waste heat in large cities. Therefore we surveyed thermal environment of the tunnel of subway in Somyŏn, downtown of Pusan, from November 1995 to December 1996 and developed a program to predict the thermal environment of subway on the basis of experimental data and the geometries of tunnels.

This paper has proved availability of waste heat of subway when the measured results obtained in subway in the winter time and the simulated results of thermal environment prediction program are compared, as well as has reported results of estimating reliability of the simulation program. As the result, the characteristics of thermal environment in the tunnel of subway in Somyŏn station in the winter time are to be followed; 1) temperature in the tunnel is about 10°C higher than outside air temperature, 2) temperature change in the tunnel is less than that in the platform so that we may obtain stable heat source, 3) and when the measured results obtained in subway in the winter time and the simulated results of thermal environment prediction program is compared, both results show similar tendency.

Therefore, we confirm estimating reliability of the simulation program.

*부경대학교 대학원

**부경대학교

***경상대학교

****한국에너지기술연구소

기 호 설 명

- A : 면적, m^2
- A_{ki} : 구간 i의 벽체면중 격자점 k의 면적, m^2
- A_w : 벽체면적, m^2
- C : 열용량, $MJ/(m^3 \cdot K)$
- c : 구름량
- C_p : 공기비열, $J/(kg \cdot ^\circ C)$
- G : 환기량, m^3/s
- g : 중력가속도, m/s^2
- G_{ij} : 구간 i에서 구간 j로의 환기량, m^3/s
- G_j : 구간 j에서 구간 i로의 환기량, m^3/s
- h : 공기와 벽사이의 열전달율, $W/(m^2 \cdot K)$
- J : 일사량, W/m^2
- J_n : 야간복사량, W/m^2
- K : 열관류율, $W/(m^2 \cdot K)$
- k_q : 물질이동계수, $kg/(m^2 \cdot s \cdot kg/kg')$
- L : 길이, m
- L : 물의증발잠열, J/kg
- l : 일사의 잠열변환율
- LE : 증발잠열, J/kg
- m : 질량, kg
- Q : 발열량, W
- L_T : 각 구간의 터널길이, m
- L_w : 터널길이에서 증발이 일어나는 길이 (젖음길이), m
- Q_T : 열차에 의한 발열량, W
- Q_P : 인체에 의한 발열량, W
- Q_i : 조명에 의한 발열량, W
- Q_{Li} : 구간 i에서 내부 발열의 잠열성분, kg/s
- Q_{Si} : 구간 i에서 내부 발열의 현열성분, W
- Q_{Ti} : 열차와 터널과의 열교환에 의한 발열량, W
- q_s : 벽체온도의 절대습도, kg/kg'
- q_R : 구간내 공기의 절대습도, kg/kg'
- T : 온도, $^\circ C$
- t : 소요시간, s
- T_a : 외기의 절대온도, K
- T_{ai} : 구간 i에서의 공기온도, $^\circ C$
- T_{aj} : 구간 j에서의 공기온도, $^\circ C$
- T_{ki} : 구간 i의 벽체면에 위치한 격자점 k의 온도, $^\circ C$

- T_w : 벽체표면에서의 공기온도, $^\circ C$
- V : 속도, m/s
- x : 습도, kg/kg'
- x_a : 외기의 절대습도, $kg/kg(DA)$
- θ_{ar} : 상당외기온도, $^\circ C$
- θ_s : 지표면온도, $^\circ C$
- θ_a : 외기온도, $^\circ C$
- a_T : 지표면 일사흡수율

그리스문자

- ρ : 밀도, kg/m^3
- $(\rho C)_{ar}$: 공기의 체적열용량(=1170), $J/m^3 \cdot K$
- λ_s : 흙의 열전도율, $W/(m \cdot K)$
- α_c : 지표면 대류열전달율, $W/(m^2 \cdot K)$
- ϵ : 장파방사율, (=0.95)
- σ : 스테판-볼츠만 상수, (= 5.67×10^{-8})
- \sum_k : 벽표면 격자점 전체
- \sum_i : 인접구간 전체의 합계

하 첨 자

- a : 공기
- i, j : 구간
- L : 잠열
- l : 조명
- o : 외기
- P : 인체
- S : 현열
- T : 열차
- w : 벽체표면

1. 서 론

도시의 과밀화는 열섬효과(heat island effect) 및 온실효과(green-house effect) 등 도시환경 악화와 함께 지하공간의 이용을 촉진시켰으며, 그 결과 현재 대도시권에서는 지하철, 지하상가 및 지하주차장 등 다양한 지하 공간이 늘어나고 있다. 수

도시의 과밀화를 수용하기 위한 수평적인 도시공간 확대의 한계로 인하여 수직 개념의 공간활용을 도입하기에 이르렀다. 대도시는 이와 같은 공간적인 과밀도와 함께 인간의 편리함과 쾌적함을 추구한 결과, 에너지 소비 밀도가 높아졌으며 여기서 발생하는 그다지 높지 않은 저온레벨의 배열원이 도시 곳곳에 폭넓게 분포되어 있다.

본 연구에서는 대도시의 미이용 에너지 활용을 도모하기 위하여 이러한 저온 배열원 중에서도 가장 안정적이면서 대용량의 열량을 갖고 있는 지하철내에서의 폐열 실태 및 회수가능성에 대하여 조사해 보고자 한다. 최근에 저온레벨인 배열 및 폐열을 회수할 수 있는 열펌프(heat pump)가 개발되어 지금까지 회수하기에 어려움이 많았던 40°C이하의 저온 배열원까지도 회수 가능하여 에너지원으로써 크게 주목을 받고 있다. 이러한 미이용 에너지인 저온레벨의 배열원이 새로운 열공급원으로써 재이용된다면 대도시 차원에서의 에너지 사용 효율면에서도 많은 이점이 있다. 특히 지하철내에서 발생하는 폐열량의 증가로 터널내의 온도상승이 문제로 되고 있는 현시점에서 이러한 기법은 에너지 절약의 한 수단일 뿐만 아니라 터널내의 고온화 현상을 방지하는 수단으로도 응용이 될 수 있다.

그러므로 지하철 터널내와 플랫폼, 그리고 중층(concourse)에서의 공기 온도와 풍속을 측정하여 지하철내의 온도변화는 물론 열의 이동을 파악할 수 있고, 더 나아가 지하철내에서 발생한 열량 중 회수가 가능한 폐열량을 정확히 예측할 수 있는 온열환경 예측 시뮬레이션 프로그램을 개발할 필요가 있다. 이는 폐열회수 가능량 산정은 물론 신설되는 지하철 역사내의 환기설비에 대한 기초설계 자료를 제공하고, 더 나아가서는 지하상가 및 지하주차장에서의 온열환경을 예측할 수 있기 때문에 적절한 냉난방 시스템을 구축하는데 도움이 된다.

따라서 본 논문에서는 현재까지 진행된 연구중 동계기간을 중심으로 한 실측 개요 및 실측 결과, 그리고 온열환경 예측 프로그램의 계산 수법에 대해서 언급하였다. 또한 본 예측 프로그램의 시뮬레이션 결과치를 실측치와 비교·검토하여 지하철내의 온열환경 예측 프로그램의 정도를 높이는 한편 신뢰성을 확인한 결과에 대해서 보고하고자 한다.

2. 실측 개요

2.1 실측 장소 및 기간

본 연구에서 실측 대상으로 한 지하철 역은 부산에 위치한 서면역 및 범내골역으로 정하였다. 이 역들은 부산 도심의 교통 요충지로 하루 승객의 이동량이 가장 많은 역중의 하나이며 중층부의 양단에는 부전지하상가와 대현지하상가가 각각 위치하여 다른 역에 비해 발생열이 대기중으로 빠져나가는 것이 매우 어려운 구조로 되어 있어 지하철 내에서의 발생열이 많이 축적되는 편이다. 게다가 서면역 바로 아래에는 지금 새로운 지하철 2호선 공사가 한창 진행되고 있으며, 가까운 시기에 개통을 할 예정이기 때문에 온열환경적으로 매우 유리하다고 판단하여 측정 대상으로 선정하였다.

실측 대상역인 서면역 및 범내골역 플랫폼의 평면도를 Fig.1과 2에 각각 나타냈다. 대상역의 터널내에서는 기본적으로 기계환기방식을 채택하고 있으며, 역과 역사와의 터널내 3곳에 환기실이 위치하고 있다. 이 환기실에는 각각 3대의 대형 강제팬이 설치되어 있으나, 현재 지하철 내에서의 환기는 주로 열차의 진입 및 진출시 발생하는 열차풍에 의한 피스톤 작용에 의존하고 있다.

실측은 1995년 11월 25일부터 1996년 12월 31

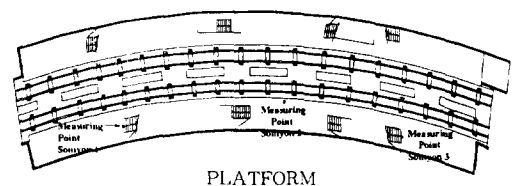


Fig.1 A plan of the platform at Somyeong station

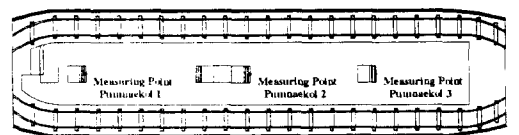


Fig.2 A plan of the platform at Bumnaekol station

일까지 측정하였다. 본 논문에서는 지하철내 온도와 지상온도의 변화폭이 큰 동계기간에 측정된 결과를 중심으로 통계·처리하였으나 예측 프로그램의 정도를 파악하기 위한 비교자료로서는 96년 4월 18일부터 5월 18일까지의 한달간 계측 데이터를 이용하였다.

2.2 실측방법

각 측정지점은 실측의 특성상 장기간 무인으로 연속 측정이 가능한 내장형 메모리가 부착되어 있는 계측기기를 설치하여 측정하였다. 특히 지하철 터널내에서는 열차의 진동으로 인한 노이즈 현상을 방지하기 위하여 측정기기를 케이스로 완전히 봉하여 측정에 임하였다. 측정 간격에 있어서 지하철내의 플랫폼옴과 중층에서의 온도 및 습도, 그리고 풍속을 1시간 간격으로 측정하였다. 이를 위하여 온도 및 습도, 그리고 풍속이 동시에 측정 가능한 계측기기를 사용하였다. 그리고 터널내 벽체의 흡·방열 특성을 조사하기 위하여 터널내 벽체표면과 벽체내의 5cm 깊이에 열전대를 설치하여 온도변화를 측정하였으며, 측정간격은 30분으로 설정하였다. 측정간격을 30분으로 한 이유는 지하철내의 터널이 온열환경 특성을 가장 잘 나타내고 축열 및 방열을 행하는 구체이므로 특성을 보다 정확하게 파악할 필요가 있었기 때문이다. 이렇게 해서 연속적으로

측정한 값들은 2주일 간격으로 측정지점에서 퍼스널 컴퓨터로 직접 받아서 데이터 해석에 이용하였다. Table 1에 측정 지점 및 측정개소를 나타냈다.

그리고 플랫폼옴에서의 측정은 천정에 위치한 그릴 부분에 계측기를 부착하여 연속적으로 측정하였다. Fig.3에 측정 센서의 실제 모습을 나타냈다.

3. 수치 계산

3.1 계산 모델

먼저 계산 모델에 있어서 지하철 구내를 크게 중층, 플랫폼옴 그리고 터널 3부분으로 구분하여 생각하였다. 또한 플랫폼옴에서 터널의 중간 부분까지, 즉 환기실이 위치한 곳까지를 Fig.4와 같이 7구간으로 분할하였으며, 지반내의 온도계산은 2차원으로 하였다.

각 구간의 온도 및 습도 계산에 있어서는 먼저 각 구간내에서 공기가 완전히 혼합한다고 가정하여 지하철 터널내의 발열량 및 환기에 의한 열이동량, 그리고 지중의 흡열 및 방열량으로 이루어진 열평형식으로부터 구하였다. Fig.5에 지하철 터널내에서 온도 및 습도를 예측할 수 있는 온열환경 예측 프로그램의 전반적인 개요를 나타내었으며, Fig.6에 그 계산 흐름도를 나타내었다.

Table 1 Measured condition

Items	Sites and numbers of measurement	Measuring instrument
Air temperature	Inside of the tunnel : 2 points Somyŏn paltform : 3 points Bumnaekol platform : 3points	CLIMOMASTER
Humidity	Inside of the tunnel : 1 point Somyŏn paltform : 3 points Bumnaekol platform : 3points	
Wall-surface temperature	Inside of the tunnel : 1point	DS-64K
Wall-inside temperature	Inside of the tunnel : 2points (Depth 5cm, 10cm)	
Air velocity	Inside of the tunnel : 1 point Somyŏn paltform : 3 points Bumnaekol platform : 3points	CLIMOMASTER

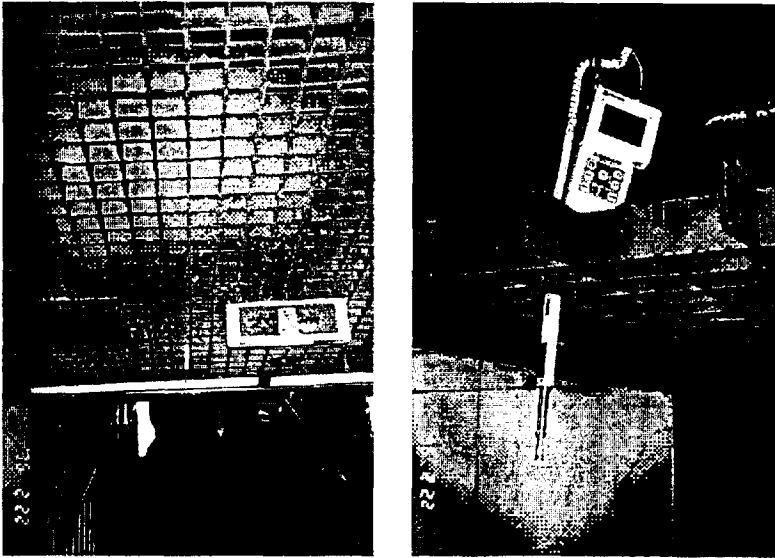


Fig.3 View of measuring instrument

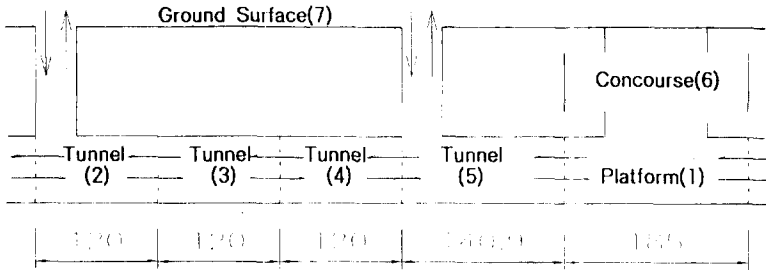


Fig.4 Block Models for calculation

지하철 내에서의 열평형식은 다음과 같다.

$$A_w h(T_a - T_w) + C_p G_r(T_a - T_a) = Q_r + Q_n + Q_i + Q_{in} \quad (1)$$

식(1)의 우변항은 지하철내의 발열원으로서 크게 열차발열, 인체발열, 조명발열 그리고 터널내와 열차와의 열교환 등 4가지 요소들로 이루어져 있다. 이외에도 환기팬에 의한 발열영도 있으나 실제로 환기팬이 거의 가동되지 않으므로 계산에서는 무시하였다. 다음에 지하철내의 발열원별로의 특징을 서술한다.

3.1.1 열차발열

지하철의 경우 열차의 운행에 의해 생성되는 발

생열은 정속 주행시간이 짧기 때문에 열차의 가속시에 발생하는 가속열과 감속시에 발생하는 제동열이 거의 대부분을 차지하고 있다고 볼 수 있다. 이 중 가속시에 발생하는 가속열량은 감속시에 발생하는 제동열량의 약 25% 정도에 불과하다고 보고되어 있다.⁽¹⁾ 감속시의 발생열은 열차가 최고속도로 주행하고 있는 시점에서 운동에너지와 위치에너지의 합과 같다고 생각할 수 있으나, 회생 브레이크(Brake) 이용 열차에 대해서 전력회생율 r_r 에 따라 발열량이 감소한다. 전력회생율이란 브레이크를 밟았을 때 운동에너지가 전기에너지로 변환되는 비율로, 전력회생율 r_r 가 0이던 운동에너지가 모두 열에너

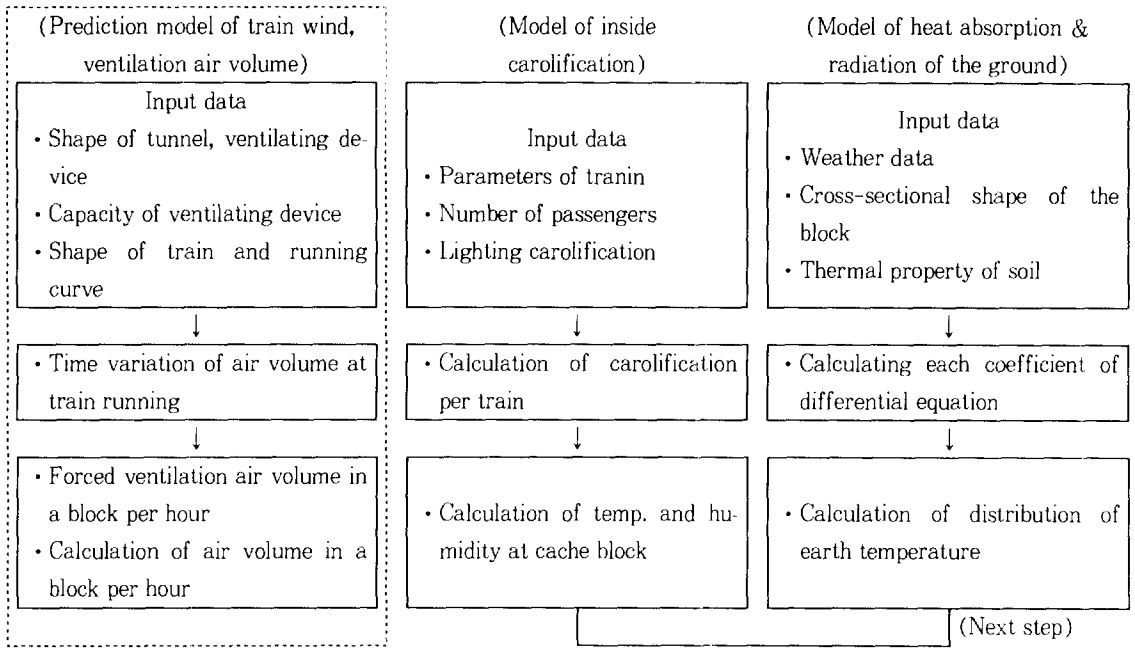


Fig.5 Calculating summary of program

지로 변환된다는 것을 의미한다.

한편 열차의 운동에너지에서 모터나 차바퀴가 갖는 운전에너지지를 고려할 필요가 있다. 그러나 일반적으로 열차의 운동에너지를 계산할 때에는 승차정원 적재시 운행중량 $m(kg)$ 에 대해서 약 8% 정도 늘려서 산출하면 좋다고 알려져 있다.⁽¹⁾ 따라서 1회의 가속 및 정지시에 발생하는 평균발열량 $Q_T [W]$ 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$Q_T = 1.08(1.25 - r_T)m \left(\frac{V_{max}^2}{2} + h_{1g} \right) / t_T \quad (2)$$

여기서, $V_{max}[m/s]$ 는 열차의 최고속도, $h_1[m]$ 는 구간내의 상승 고도, $t_T[s]$ 는 발차에서 다음역 발차까지 소요된 시간을 나타낸다.

위 식(2)에서 대상 지하철에 대해서 전력회생율을 0으로 가정하여 평균발열량 Q_T 를 계산한 결과, Q_T 가 약 355kW 정도였으며 이 값을 실제 시뮬레이션 계산에 이용하였다.

또한 지하철 차량으로부터 터널내 공기쪽으로 발열되는 열량은 열차의 체재시간에 비례하여 각 구

간에 분배되는 것으로 간주하였다.

3.1.2 인체발열

인체로부터의 발열은 기온이나 인간의 활동상태에 따라 달라지지만 본 연구에서는 1인당 발열량 Q_{II} 를 보행 상태시인 226W⁽²⁾로 일정하게 간주하였다. 또한 1인당 발열량을 각 구간의 기온 θ_R 에 따라 현열 $Q_{HS}[W/인]$ 와 잠열 $Q_{III}[W/인]$ 로 구분하여 아래 식과 같이 계산하였다.⁽³⁾

$$Q_{HS} = 83 - 7(\theta_R - 24) \quad (3a)$$

$$Q_{III} = 226 - Q_{HS} \quad (3b)$$

따라서 각 구간에서의 인체로부터의 총발열량은 다음과 같이 구하였다.

$$Q_T = N \cdot Q_{II} \cdot H_s \cdot a \quad (3c)$$

여기서, N : 승하객수, Q_{II} : 한사람의 발열량, H_s : 구간에서의 지체시간, a : 승하객수에 대한 동과객수의 비이다.

3.1.3 조명발열

조명발열량은 각 구간의 발열량 형태로 계산하는

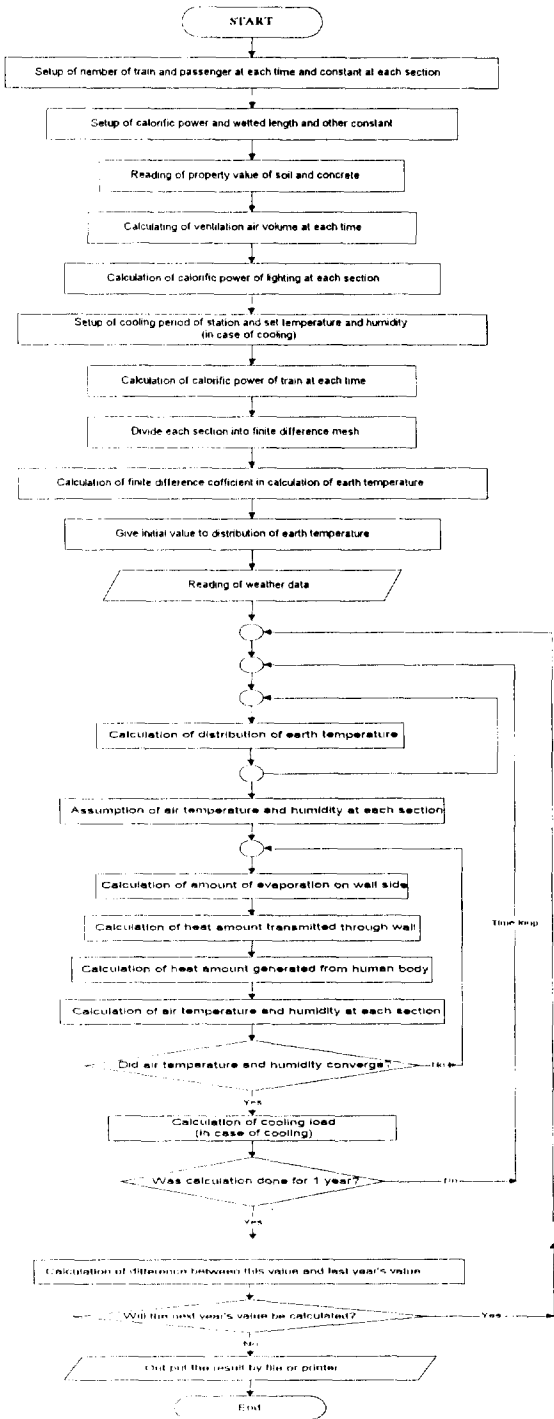


Fig.6 A flowchart of calculating program

것이 일반적이다. 따라서 부산지하철 1호선 기본계획서⁽⁴⁾에 입각하여 플랫폼옴과 중층에서는 각각 7.5W/m², 터널에서는 12m당 40W로 일정하게 간주하였으며, 또한 운전시간외의 소등은 고려하지 않고 24시간 모두 점등해 있는 것으로 가정했다. 한편, 지하철 열차내에서 발생하는 조명발열은 차량 1대당 1,000W로 간주하여 계산하였다. 따라서 각 구간에서의 조명발열량은 아래 식으로 구하였다.

$$\text{플랫폼옴·중층} : Q_{ipc} = 7.5 \cdot A \quad (4a)$$

$$\text{터널} : Q_{it} = 3.34 \cdot L \quad (4b)$$

$$\text{열차내 조명발열} : Q_{lit} = 1000 \cdot T_N \quad (4c)$$

여기서, A : 플랫폼옴, 중층의 면적, L : 터널길이, T_N : 열차편성수를 말한다.

3.1.4 열차에서의 방열량

프로그램에서는 열차내의 온·습도를 플랫폼옴 및 터널부분과는 별도로 계산하여 양자 사이의 열이동을 고려하였다. 열차에서 외부로의 열관류율은 차량벽체의 열저항이 공기의 열전달 저항에 비해 작기 때문에 무시하고 정차시 10W/(m²·K) 그리고 주행시 35W/(m²·K)로 하였으며,⁽¹⁾ 열차의 외부환기량은 주행중의 40회/h, 정차중 60회/h를 이용하였다.

이상의 값을 이용하여 열차내에서의 인체발열과 조명발열 중 차량내에서 주위로 방출되는 열량을 계산하였다.

3.2 지반의 온도 계산

지하철내의 온열환경은 주위의 지중온도에 따라 크게 변한다. 따라서 터널, 플랫폼옴 그리고 중층부분에서의 온도 및 습도변화를 계산하기 위해서는 무엇보다도 지중온도를 정확히 예측하는 것이 필요하다. 지중에서의 흡방열량은 벽체온도 및 주위의 지중온도를 계산하기 위하여 2차원의 비정상열전도 방정식인 식(5)를 이용하였다.

$$\rho \cdot C \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

여기서 λ는 흙의 열전도율이다.

계산 대상은 터널을 포함하는 단면으로 하였으며, 경계조건으로서 측면경계와 바닥경계는 열이동이 없는 단열조건, 즉 $\partial\theta/\partial y=0$ 혹은 $\partial\theta/\partial z=0$ 으로 하였다.

지표면에서의 경계조건은 식(6) 및 (7)에 의해 시간당 상당외기온도 θ_{ac} 를 구하여 계산하였다.

$$-\lambda_s \frac{\partial\theta}{\partial z} = \alpha_s (\theta_{ac} - \theta_s) \quad (6)$$

$$\theta_{ac} = \theta_a + \frac{a(1-l)J - \epsilon J_n}{\alpha_c} \quad (7)$$

J_n 은 야간복사량으로 Brunt의 실험식을 이용하여 계산하였다.

$$J_n = \sigma T_a^4 \left(0.49 - 2.1 \sqrt{\frac{x_a}{0.622 + x_a}} \right) (1 - 0.062c) + 4\sigma T_a^3 (\theta_s - \theta_a) \quad (8)$$

여기서, 2차원 비정상 열전도 방정식을 해석적으로 구하는 것은 거의 불가능하므로 기초식을 차분법으로 이산화하여 수치계산에 의해 온도분포를 구하였다. 차분의 시간 스텝은 1시간으로 하였으며 양해법으로 이산화 방정식을 구하여 지중온도를 계산하였다. Fig.7에는 대상역의 단면도 및 차분격자와 2차원 계산에 필요한 제어체적에 대해서 나타내었다.

이산화방정식에서 각 접점에서의 열전도 계수 중, 콘크리트 벽면과 실내공간 사이의 λ_1 는 식(9)와 같이 공기의 대류열전달율을 고려한 복합열전도율을 구하여 경계면을 계산하였다.

$$\lambda_1 = \left(\frac{1}{\Delta x} + \frac{1}{2\lambda_c + h} \right) \cdot \Delta x \quad (9)$$

여기서, h는 실내공기의 대류열전달율이며, Δx 는 콘크리트의 온도대표 격자점과 공기층의 벽면 최근접 격자점과의 거리이다.

그리고 콘크리트와 흙의 경계점 사이에서의 열전도계수 λ_2 는 콘크리트의 흙의 열전도율이 다르기 때문에 이 경계면에서의 열유속이 연속이 되도록 격자폭을 동일하게 하여 조화평균의 값이 되도록

해서 식(10)에 의거하여 계산하였다.

$$\lambda_2 = \frac{2\lambda_s \lambda_c}{\lambda_s + \lambda_c} \quad (10)$$

또한 지하철 구내의 플랫폼옴과 터널 벽면으로부터의 증발량 E [kg/s]를 다음 식에 의해 계산하였다.

$$E = L_T L_a k_q (q_s - q_R) \quad (11)$$

위 기호중 물질이동계수는 $k_q = \alpha / (0.28 + 0.51 X_R)$ 로 계산하는데 X_R 은 공기의 절대습도이다. 그리고 증발에 의해 빼앗기는 증발잠열 LE는 각 구간의 공기로부터 잃는 것으로 가정하였다.

이상에서 구간 i에 있어서의 기온 T_{Ri} [°C] 및 절대습도 X_{Ri} [kg/kg']는 다음 식으로부터 구하였다.

$$T_{Ri} = \frac{Q_{Si} - LE + K \sum T_{ki} A_{ki} + (\rho C)_{air} \sum G_{ji} T_{Rj}}{K \sum A_{ki} + (\rho C)_{air} \sum G_{ji}} \quad (12)$$

$$X_{Ri} = \frac{Q_{Ti} + E + \rho_{air} \sum G_{ji} X_{Rj}}{\rho_{air} \sum G_{ji}} \quad (13)$$

한편 지표면의 열수지 계산에서는 지표면 온도의 경년차가 지하철 각 구간의 온습도에 미치는 영향이 작기 때문에 각 구간의 기온 및 습도 계산에 있어서 부산지방 표준기상데이터를 기상데이터로 사용하였다.

3.3 열차에 의한 환기량

본 온열환경 예측 프로그램에서 가장 해석하기 어려운 것은 열차풍에 의한 환기량을 구하는 것이었다. 따라서 열차의 운행에 의해서 각 구간으로 이동하는 환기량을 실제로 측정을 통하여 구하였으며, 터널내의 열차에 의한 환기량을 계산하는데 필요한 단면적을 확보할 수 있는 장소에서 열차풍을 측정하였다. 열차풍량은 유출 및 유입별로 풍속에 단면적을 곱한 뒤 적분하여 구하였다. 즉 열차풍량을 계산하는 식은 다음과 같다.

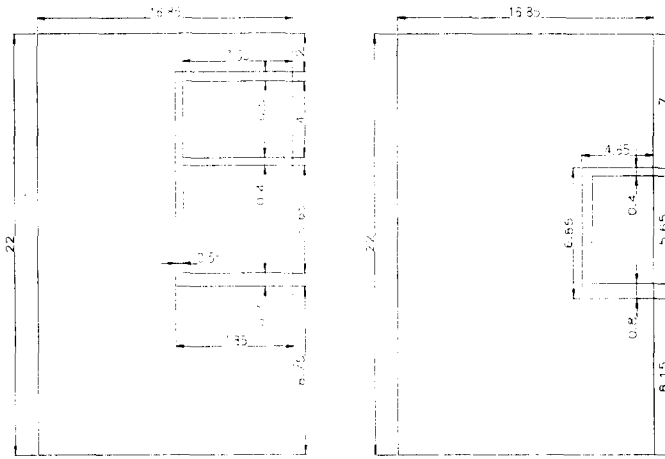


Fig.7 (a) Cross section of Somyen station

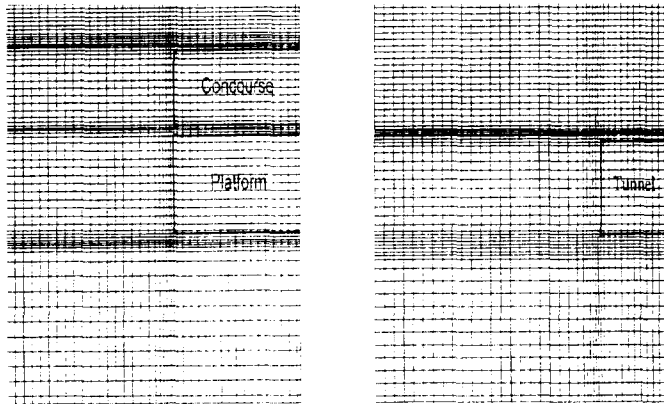


Fig.7 (b) Difference lattice-partition

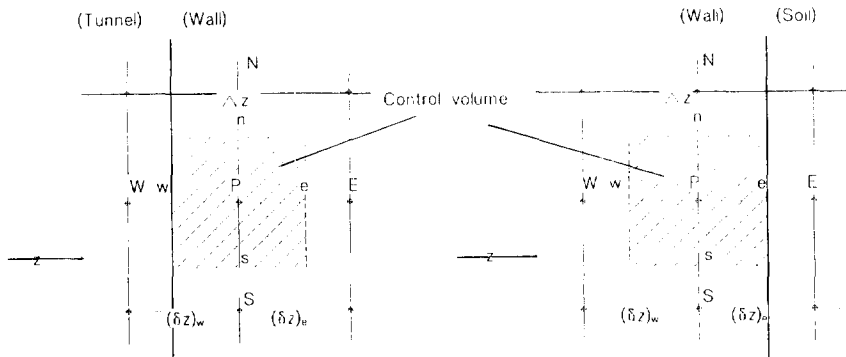


Fig.7 (c) Control volume of two-dimension

$$Q = \int_0^t Av dt \quad (14)$$

여기서, Q는 열차풍량($m^3/열차$)이며, A는 단면적(m^2), v는 풍속(m/s), 그리고 t는 정상류에서 다시 정상류까지 소요되는 시간이다.

3.4 수치계산에 이용한 정수

지하철 열환경 예측 프로그램의 입력조건중 서면역의 열차 운행횟수(상하선의 합계) 및 승객수의 시간적 변화를 Table 2에 나타냈다. 승객수는 1996년 1월의 교통량 조사결과를 기준값을 시뮬레이션 계산에서는 요일에 관계없이 일정하다고 가정하였다. 이는 평일의 수치로 일요일이나 공휴일에

있어서는 Table 2에 나타난 수치보다는 실제로 적지만 본 수치계산에서는 계산의 편의상 평일하루의 이용객수를 그대로 계산에 이용하였다. 또한 벽면 및 지중으로부터의 흡열 및 방열을 계산하는데 이용한 물성치는 Table 3과 같다.

4. 실측결과 및 시뮬레이션

본 연구에서는 지하철내의 열환경 중 월변동 혹은 연변동이라고 하는 비교적 긴 주기의 변동을 연구대상으로 하고 있기 때문에 열차운행에 따른 분단위의 단기적인 변동은 큰 의미를 갖지 않으므로 고려하지 않았다. 따라서 측정값의 대표적 시간으로

Table 2 Train-running frequencies and number of passengers by an hour at Sömyön station (by 96. 1. 9.)

Time	Train-running frequencies (Upward+Downward)	Number of passengers	Time	Train-running frequencies (Upward+Downward)	Number of passengers
5	8	2300	15	20	5700
6	16	4500	16	24	6800
7	30	8500	17	32	9100
8	32	9100	18	30	8500
9	20	5700	19	20	5700
10	20	5700	20	16	4500
11	20	5700	21	16	4500
12	20	5700	22	16	4500
13	20	5700	23	16	4500
14	20	5700	24	12	3400

Table 3 Geometry Constant for Simulation

Heat conductivity [$w/(m \cdot K)$]	Soil	1.2
	Wall	1.6
Heat flux of wall [$MJ/(m^3 \cdot K)$]	Soil	1.9
	Wall	2.3
Heat transfer coefficient [$w/(m^2 \cdot K)$]	Ground surface	12.0
	Tunnel-Platform surface	11.6
	Concourse-Ceiling-Air layer	9.3
Absorption of solar radiation on the ground surface		0.95

써 1시간 단위를 대상으로 하였으며, 서면역 및 범넷골역의 실측 결과도 1시간 간격으로 되어 있다. 또한 미이용 에너지를 사용하는 열펌프에서는 열원의 온도레벨이 중요하다. 따라서 밖으로 배기되는 지하철 터널내의 공기온도와 외기와의 온도차를 비교하였다. 이때 외기온도로서는 부산기상청에서 측정된 기상데이터를 기준으로 하였다. 그리고 측정 결과 및 고찰은 다음과 같다.

4.1 공기온도의 변화

측정기간내 양역에서 실측된 공기온도의 변화를 Fig.8 및 Fig.9에 나타냈다.

Fig.8에서 알 수 있듯이 서면역 플랫폼의 중앙 지점과 범넷골역 중앙지점과의 온도분포를 보면 서면역에서는 주간과 야간의 온도변화가 크다. 이는 서면역 플랫폼의 구조와 범넷골역 플랫폼의 구조차이에 따른 외기의 유입량에 영향을 받기 때문이라고 생각된다. 즉 서면역은 선로를 중앙에 두고 양쪽에 승강장을 배치한 상대식 플랫폼의 구조이며 범넷골역은 승강장을 양쪽 선로가 끼고 있는 섬식 플랫폼의 구조를 하고 있다. 따라서 중층에서 플랫폼으로 이동하는 계단의 수와 면적은 서면역이 2배이다.

Fig.9는 서면역의 플랫폼에서 측정된 데이터로서 측정점마다 온도차가 발생하고 있음을 알 수 있다. 즉 한 역에서도 측정지점에 따라 온도가 서로 다르며 이는 서면역을 낀 부전역이나 범넷골역에서 터널을 통해 전해지는 열량이 같지 않고 또한 열차풍 및 환기에 의해 플랫폼으로 유입되는 공기의 상태가 각 지점의 구조에 따라 영향을 다르게 미치기 때문이라고 판단된다.

4.2 터널내 온도변화

Fig.10에 나타나 있듯이 터널내의 벽표면과 벽체 내 5cm 깊이의 온도는 지반의 열용량 때문에 온도 변화폭이 매우 적다. Fig.10에서 알 수 있듯이 터널내의 공기가 외기온과 비교하여 약 10°C 정도의 온도차를 나타내고 있으며, 이 온도차는 열펌프의 구동원으로써 외기상태보다 COP 향상 측면에서 매우 유리하다.

4.3 시뮬레이션 결과의 비교

본 논문에서 개발하고자 한 프로그램의 예측성능을 파악하기 위해 플랫폼과 터널에서의 실측치와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 플랫폼은 서면역의 플랫폼 중앙인 2지점의 실측치를 계산치와 비

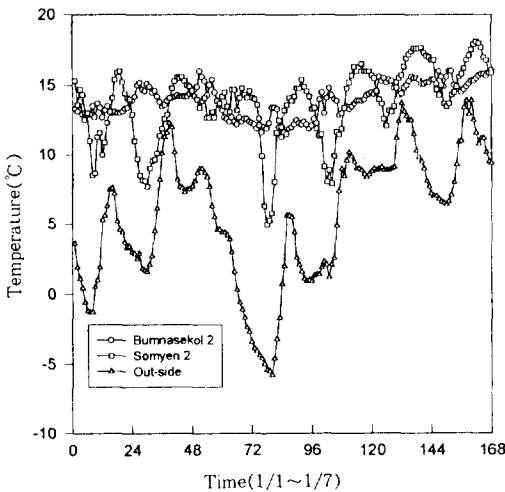


Fig.8 Temperature variation of at each station

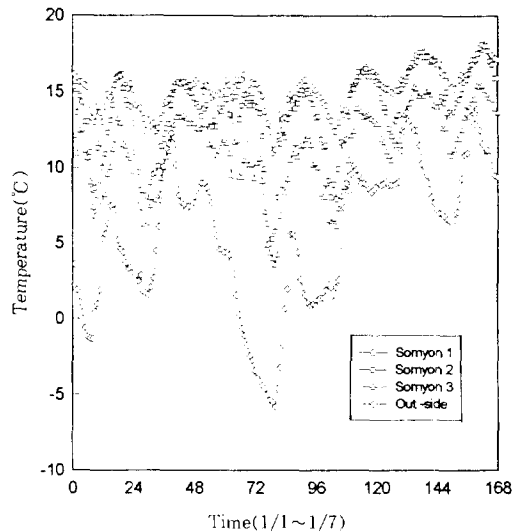


Fig.9 Temperature variation at each measuring point at somyon subway station

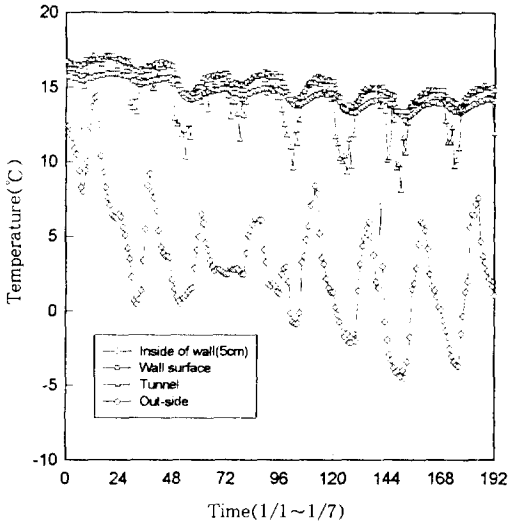


Fig.10 Temperature variation of the tunnel wall

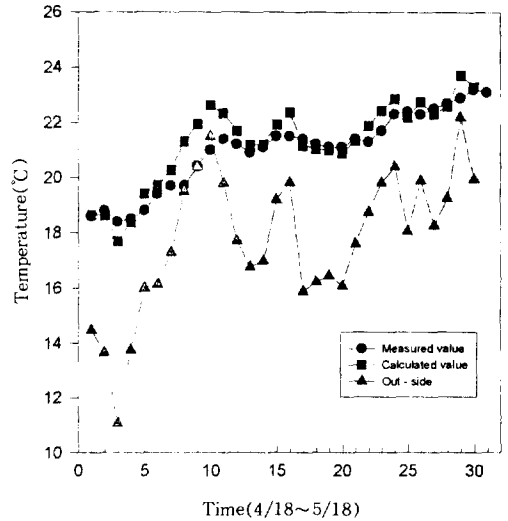


Fig.12 A comparison between values measured and calculated at the tunnel

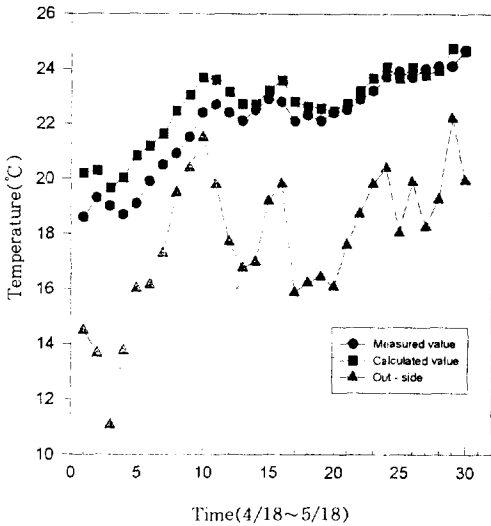


Fig.11 A comparison between values measured and calculated at the platform

교하였다. 그리고 터널의 경우는 서면역에서 범넛골역 방향의 터널내 첫 번째 환기구인 지점에서 측정하였기 때문에 시뮬레이션 결과 역시 구간 5지점에 해당하는 계산치를 비교값으로 하였다.

지금까지 진행된 프로그램의 계산치와 실측치를 비교·검토한 결과는 다음과 같다.

1) 플랫폼옴에서의 실측치와 계산치는 Fig.11과

같이 거의 근사한 값을 나타내고 있으나 온도차는 발생하고 있다. 이는 열차풍에 의한 환기량과 자연환기량을 계산하는 과정에서 발생하는 오차의 영향 때문이라고 생각된다.

2) 터널내에서의 계산치와 실측치를 Fig.12에 나타냈다. 터널내의 실측치와 계산치는 거의 유사한 변화를 보여주고 있으나 외기의 변화가 급격한 곳에서는 약간의 오차가 나타나고 있다. 이는 터널내에서 대기로 유입, 유출되는 외기량을 정확히 산정하지 못했기 때문에 발생하는 오차의 영향으로 사료된다.

5. 결 론

미이용 에너지인 지하철 폐열을 이용할 수 있는 가의 타당성을 검증하기 위하여 실제로 대상역인 서면역과 범넛골역에서 온열환경 실측을 행하였다. 또한 지하철 터널내에서의 온열환경을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하여 수행한 계산 결과와 지하철 온열환경 실측결과를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 동계의 경우, 외기에 비해 터널내의 온도가 약 10°C 정도로 높아 저열원 열펌프를 이용하여 온

수 및 난방을 행할 시에 매우 유리하다.

2) 지하철내에서의 실측결과에 입각하여 지하철내 온열환경을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램의 시뮬레이션 값과 비교한 결과 실측치와 거의 일정한 상관관계를 얻었다.

3) 따라서 대상역에서의 정확한 열차운행의 Diagram 및 이용승객수를 고려하여 본 시뮬레이션 프로그램의 정도를 높이고자 하며 이를 이용하여 향후 지하철역에서 발생하는 발열량 및 이용가능량을 추정해 보고자 한다.

4) 앞으로 지하철역내에서 열차풍 및 자연환기에 따라 대기로 유입 및 유출되는 풍량을 정확히 산정하여 풍량차이에 따른 오차를 줄일 필요가 있다.

후 기

본 연구는 통상산업부의 에너지절약기술개발사업 과제의 일환으로 수행되었으며, 본 연구의 프로그램 개발에 많은 조언을 해 준 日本 大阪大學의 水野 稔 교수, 下田 吉之교수께 감사의 마음을 표한다.

참 고 문 헌

1. Subway Environmental Design Handbook- (Vol.1) Principles and Application, 402, 1975, PB 254788.
2. 금종수, 김성완 역, 1993, 공기조화계산법, 기문당, pp.226~227, 179~220.
3. 下田吉之, 1990, “都市における地下利用の熱的評價に關する基礎的研究”, 學位論文
4. 부산직할시, 1981, 부산지하철 제1호선 건설기본계획(환기설비), pp.5~134.
5. 吉田治典, 1980/10, “地下鐵内の溫度·熱負荷豫測のためのシミュレーション”, 空氣調和·衛生工學會論文集, pp.317~320.
6. 黒本 他3人, 1990/10, “地下鐵トンネルの排熱利用に關する研究(その1, 2)”, 空氣調和·衛生工學學術論文集, pp.137~144.
7. 黒本 他3人, 1991/11, “地下鐵トンネルの排

熱利用に關する研究(その3)”, 空氣調和·衛生工學會學術講演會講演論文集, pp.733~736.

8. 下田 他3人, 昭和63/10, “地下鐵を例とした地下空間の熱環境シミュレーション(1)~(3)”, 日本建築學會大會學術講演便概集, pp.221~226.
9. 福代 他2人, 1994, “地下鐵構内の環境豫則に關する研究(1)-換氣量豫測手法の檢討-”, 空氣調和·衛生工學會近畿支部學術研究發表會論文集, pp.103~104.
10. 香月 正司, 中山 顯, 1990, “熱流動の數値シミュレーション”, 森北出版株式會社, pp.3~34.
11. 松尾 陽 他 5人, 1985, “地下居室の熱的特性に關する研究(1), シミュレーションによる熱舉動の把握”, 日本建築學會大會學術講演便概集, pp.959~960.
12. Patankar, S. V. 1984, Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing corporation, pp.1~77.
13. 부산광역시 지하철 본부, 1985, 부산지하철 1호선 1단계구간 시공도(제1권)
14. 명현국 역, 1995, 수치유체공학, 한미, pp.7~36.
15. 홍준표, 1991, 열전도·확산의 수치해석, 반도출판사, pp.13~78.
16. 이택식의 2인 역, 1993, 열전달, 화중당, pp.67~192.
17. 김종열외 4인, 1996, “지하철 폐열회수량 예측 프로그램 개발-제1. 실측 및 시뮬레이션 비교”, 공기조화·냉동공학회 부산·경남지부 공동학술대회 논문집, pp.122~127.
18. 김종열외 4인, 1996, “지하철 터널내 온열환경 예측프로그램 개발에 관한 연구-제1. 부산지하철역 동계실측 결과”, 공기조화·냉동공학회 하계학술발표 논문집, pp.207~210.
19. 김종열외 4인, 1996, “지하철 터널내 온열환경 예측프로그램 개발에 관한 연구-제2. 시뮬레이션 수법 및 실측치 비교”, 공기조화·냉동공학회 하계학술발표 논문집, pp.211~214.