

미활용 에너지원으로서의 지하철 배열이용에 관한 연구

Research on using the exhausted heat from subway tunnel as unused energy

김 종 렬*, 김 증 수*, 최 광 현*, 윤 정 인*, 박 준 택***, 김 동 규**, 김 보 철**, 정 용 현****
J. R. Kim, J. S. Kum, K. H. Choi, J. I. Yoon, J. T. Park, D. G. Kim, B. C. Kim, Y. H. Chung

key words : Unused energy(미활용 에너지), Consumption of electric power(소비전력), Coefficient of performance(성적계수), Energy saving(에너지절약), Subway tunnel(지하철), Exhausted heat(배열)

Abstract

Researches on unused energy are being continued because of the limited fossil fuel and the destruction of environment. Therefore this study was performed as follows.

The collectable amount of exhausted heat for an air-conditioning was calculated by the subway thermal environment prediction program. And the electric power needed by conventional heat source equipments was compared with one by unused heat source equipments when the exhausted heat was used by heat pump in heating and hot water supplying.

The results are summarized as follows; 1) Forced ventilation should be conducted to keep optimal temperature in subway tunnel in summer as well as in winter. According to the simulation, temperature in tunnel was higher than that on the ground in summer when the forced ventilation was conducted only in winter. 2) Ventilating time should be calculated out to the optimal condition for not only saving power of ventilation fan but reusing exhausted heat. By the simulation, it is certain that the exhausted heat should be eliminated in air-conditioning time. 3) The use of exhausted heat source heat pump could save 8% of electric power per hour in comparison with existing heat pump. It was based on a present heat generation and traffic for ventilating time of general air-conditioning, but could be different by ventilating time. 4) As the traffic increases up to 1.5 or 2 times, electric power consumption of the conventional heat pump increases to 11% or 13.5% per mean hour in comparison with that of the exhausted heat source heat pump, though all-day ventilation.

* 정희원, 부경대학교 냉동공조공학과

** 부경대학교 대학원 냉동공조공학과

*** 정희원, 한국에너지기술연구소

**** 오오사카대학 환경공학과

기 호 설 명

q_r	: 시간당 열회수량[kcal/h]
c_p	: 공기비열[kcal/kg · °C]
V	: 환기량[kg/h]
t_i	: 배기구 온도[°C]
t_o	: 외기온도[°C]
E_e	: 전력 에너지 절약량[kW/h]
Q_s	: 공급열량[kca/h]
E_0	: 종래 열원 시스템의 소비전력량[kW/h]
E_1	: 배열 이용 시스템의 소비전력량[kW/h]
COP_0	: 종래 열원 시스템의 총괄성능계수
COP_1	: 배열 이용 시스템의 총괄성능계수

1. 서 론

도시에 남아도는 혹은 이용대상으로 되지 않았던 미활용 에너지를 환경적인 측면과 에너지재이용 측면에서 공조용 열원으로 사용하기 위한 연구들이 외국의 경우 활발하게 진행되고 있지만 우리나라의 경우에는 아직까지 초보단계에 머무르고 있다.

미활용 에너지에는 쓰레기 소각장의 배열이나 공장 배열, 지하철 배열과 열의 공급원 혹은 흡수원으로 되는 하천이나 해수, 하수처리수 등이 있다. 이러한 낮은 레벨의 온도차 에너지는 직접 에너지원으로서 이용하는 것이 곤란하기 때문에 일반적으로는 공조용 히트펌프의 열원으로서 이용된다. 이러한 열원을 이용한 경우, 동일한 열수요에 대해 일반적인 기기와의 1차 에너지소비량의 차이를 두고 미활용 에너지의 에너지로서의 이용가치가 평가된다.

또한 지역냉난방 등의 도시계획단계에 있어서 미활용 에너지나 열수요의 데이터 베이스를 기초로 그 활용가능성을 평가할 때 열원 기기의 성능이 이들에게 미치는 영향은 크다.

따라서 열원의 종류, 온도에 대한 열원 기기의 COP를 정확하게 표현하는 모델이 필요하다. 이를 위해서는 원단위라고 하는 기초데이터가 필요하다. 여기서 말하는 원단위란 건물의 바닥 면적당 용도별 에너지, 물 소비량을 건물종류별 및 사용용도별로 정리한 값이다. 주로 도시나 지역차원의 에너지(냉열, 온열, 전력) 수요량을 통계·처리한 것으로 지역냉

난방의 에너지원으로 평가하고자 할 때 이용하는 것이다.

그러나 본 연구에서 비교하고자 하는 열원 기기는 공기열원 히트펌프로 지상의 공기를 이용하는 경우와 지하철 배열을 활용하는 경우로 나누어 에너지 소비량을 추정하고자 하는 것으로, 이러한 열원 기기의 COP는 열원의 온도에 의해 크게 영향받기 때문에 원단위의 개념은 다루지 않았다.

본 연구는 앞에서 발표⁽¹⁾한 지하철 열환경 예측프로그램을 이용하여 지하철 배열이 미활용 에너지로 이용 가능한지에 대해 알아보기 위해 배열부존량을 계산하고 이를 난방용 열원으로 이용했을 때 절약량에 대해 예측해 보고자 한다. 즉 열회수량의 계산대상으로서는 기존이 지하철역을 참고로 가상조건의 역을 고려하여 기계환기방식을 가정한 뒤 각 케이스로 나누어 시뮬레이션한 것을 토대로 지하철 배열을 이용할 수 있는 가능량을 검토하였다. 그리고 배열을 이용하여 임의의 건물에 난방 혹은 온수를 공급하는 경우와 대기상태에서 히트펌프를 사용하여 공급하는 경우로 나누어 에너지 소비량을 계산하고 에너지 절약량을 평가하였다.

2. 시뮬레이션 수법

본 논문에서 이용한 시뮬레이션 수법은 이미 발표⁽¹⁾한 것과 동일하다. 즉 터널 중간(Fig.1의 Tun. 2)에서 공기를 공급하고 터널 양단(Fig.1의 Tun.5)에서 배출하는 방식을 취하는 지하철내의 역과 한 쪽이 중간 배기실에 끼여 있는 범위를 계산대상으로 하고, Fig.1에 나타난 것처럼 승강장, 터널 지역을 7구간으로 분할하여 각 구간마다 2차원의 지반내 온도분포를 차분법에 의한 비정상열전도계산에 의해 구했다. 각 구간내의 공기는 완전혼합을 가정

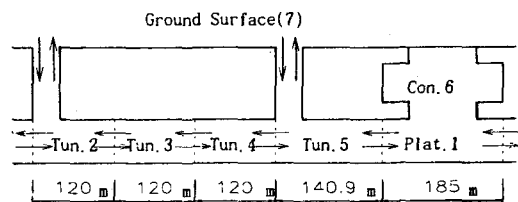


Fig.1 Block Models for calculation

하고 시간마다 열차수, 승객수, 환기량을 주어 계산하였다. 발열원으로서의 열차, 인체, 조명, 열차내외의 열이동을 고려하였다.

3. 계산방법

3.1 배열이용가능량 계산

배열회수가능량을 계산하기 위해 지하철내 발열량은 환기실에서만 배출된다고 가정하였다. 우선 지하철에서의 배열회수가능량은 열회수 기기로 공기열원 히트펌프를 이용하여 시간당 열회수량 q_r 을 다 음식에 의해 구했다. 또한 지하철내 부존열량은 식 (1)에 의해 구하면, 단 각 시간당 온도차($t_i - t_o$)가 0보다 큰 경우이다.

$$q_r = c_p \cdot V(t_i - t_o) \quad (1)$$

여기서,

q_r : 시간당 열회수량[kcal/h]

c_p : 공기비열[kcal/kg · °C]

V : 환기량[kg/h]

t_i : 배기구 온도[°C]

t_o : 외기온도[°C]

즉 배열회수가능량은 ($t_i - t_o$)를 5°C 이상인 경우만 계산하도록 하는데 이는 효율이 좋은 운전을 하도록 하기 위함이다. 이 온도를 내리면 열회수량은 증가하지만 히트펌프의 효율이 떨어지는 단점이 발생한다.

이 기준온도를 몇 도로 해야 하는가 하는 문제는 열회수에 대한 요구가 어느 정도인가라는 부하측의 요구에 의존하며 열 회수측에서만 결정할 수 없는 문제이다.

3.2 공기열원 히트펌프의 COP

지하철 배열회수가능량에 영향을 미치는 인자로는 히트펌프의 성적계수이며 기존 연구²⁾에 의하면 성적계수는 열원온도에 의존한다. 즉 공기열원 히트펌프(냉동기)의 성적계수(Q_s /열원기 동력)의 온도 의존성에 관해서는 실제 시스템의 각 COP와 같은 열원·입출력 온도에서의 가역카르노 사이클의 COP와의 비가 1차 함수에 근사할 수 있다고 가정하여 회귀식에 의해 모델화한 것¹⁰⁾을 이용하였다. 참고한 논문

에서는 일본의 D사에서 제공된 기술자료에 의해 비교적 소형인 히트펌프로서 용량이 116.3[kW], 큰 히트펌프로서 용량 1,163[kW], 그 중간인 582[kW]을 선정하여, 이용하고자 하는 온수를 45°C로 할 경우 공기열원에 따른 소요동력과 소요능력을 변수로 하여 COP를 계산하였지만 식 (2)와 거의 차이가 없었다고 발표하였다. 따라서 본 연구에서는 그 결과인 식 (2)를 계산에 이용하였다.

$$COP = \frac{74.1}{45 - t_i} + 1.63 \quad (2)$$

여기서, t_i 는 터널의 배기구 공기온도(°C)이다.

3.3 에너지 소비량 평가

평가항목은 배열회수 시스템의 에너지 절약 효과를 예측하기 위한 것으로 기존의 대기상태에서 운전하는 히트펌프의 1차 에너지 소비량과 터널내의 공기를 증발기에 통과시켜 운전할 때의 히트펌프의 1차 에너지 소비량을 계산하였다. 미활용 에너지 이용에 의한 엔지 절약 특성의 지표로서, 원리적으로 간단한 전동히트펌프를 이용한 경우 다음과 같이 에너지 절약량을 구하였다.

$$E_e = E_0 - E_1 = Q_s \cdot \left(\frac{1}{COP_0} - \frac{1}{COP_1} \right) \quad (3)$$

여기서,

E_e : 전력 에너지 절약량

Q_s : 공급열량

E_0 : 종래 열원 시스템의 소비전력량

E_1 : 미활용 열원 이용 시스템의 소비전력량

COP_0 : 종래 열원 시스템의 총합성적계수

COP_1 : 미활용 열원 이용 시스템의 총합성적계수

여기에 총괄성능계수란 다음과 같다.

총괄성능계수 =

$$\frac{Q_s}{\text{열원기동력} + \text{열원반송동력} + \text{공조동력}} \quad (4)$$

공조동력(지역냉난방의 경우는 열매체의 반송동력도 포함함)은 종래열원, 미활용 열원 어느쪽의 시스템이라도 같기 때문에 무시하였다. 또 각 기기의 부

분부하 특성도 고려하지 않았다.

중래 시스템은 공기열원 히트펌프로 하지만 팬동력은 열원기기의 소비전력에 포함하기 때문에 열원 반송동력은 0으로 되며 따라서 중래 시스템의 종합효율은 공기열원 히트펌프의 성적계수와 같게 된다. 즉 앞에서 구한 COP의 값과 동일한 것으로 별도로 계산하지 않았다. 그리고 열원기기의 동력은 에너지 환산값으로 전력을 860/0.38kcal로, 가스는 고위발열량으로 환산하여 계산하는데 전력환산값에서 0.38은 송전효율을 의미한다.

4. 시뮬레이션에 의한 CASE STUDY

4.1 설정조건

사례연구를 위해 지하철 모델을 가상하여 설정한 뒤, 기계환기방식에서의 터널내 발열량 ac 기계환기의 기본조건을 Table 1과 같이 하였으며, 배열회수가능량, COP, 에너지 소비량을 계산하기 위한 검토 조건은 Table 2와 같다.

지하철내의 발열원중 전동차의 편성수를 8량으로 고정하였으며 1.5배와 2.0배로 변화시켜 장차 증가

할 교통량이 배열량 및 터널내 온도에 미치는 영향도 고려하였다. 그리고 기계환기방식의 팬용량은 급기팬 4,000m³/min, 배기팬 2,000m³/min의 용량을 각각 한 대씩 운전하는 것으로 가정하였다.

Case 1은 부산지하철과 같은 경우로 기계환기방식을 채택하고 있지만 운전하지 않고 열차의 피스톤 작용에 의한 자연환기에 의해 지상과 공기를 교환하는 방식이다. Case 2는 24시간 환기시키는 경우이며, Case 3은 일반 건물의 공조시간대와 동일한 시간에 기계로 환기시키는 경우이다. 그리고 Case 4는 열차가 운행하는 시간대에 환기시키는 경우이다.

5. 계산결과 및 고찰

시뮬레이션 조건에 의한 결과를 1) 환기시간에 따른 배열량, 2) 교통량 변화에 따른 배열량으로 나누어 고찰하였다. 그리고 각각의 배열량을 외기를 직접 이용한 히트펌프의 성능계수와 배열을 이용한 히트펌프의 성능계수를 계산하고 이때 에너지 소비량을 절약량에 대해 검토하여 지하철 배열이 미활용 에너지원으로서의 이용 가능한지에 대한 타당성을

Table 1 Standard condition used in calculation

Heat generation rate	Heat generation rate by 1 train	355kW
	Heat generation rate by 1 people	225.6W
	Heat generation rate by light	20W/m ² (concourse, platform)
Ventilation rate	Supply rate by fan	4,000m ³ /min
	Exhaust rate by fan	2,000m ³ /min
	Wind rate by train in a tunnel	5,000m ³ /train

Table 2 Setup condition of Case Study

Classification	Item	Variation of item	Ventilation time(hour)
Case 1	Heat generation rate Ventilation rate	Standard (existence and nonexistence of cooling)	0(Natural ventilation)
Case 2			24
Case 3			13(8 : 00 ~ 20 : 00)
Case 4			19(5 : 00 ~ 24 : 00)
Case 5	Traffic density (Passenger)	1.5 times of standard	24(Natural ventilation)
Case 6		2times of standard	
Case 7	Heat pump using outside air directly		

정리하였다.

5.1 환기시간에 따른 배열회수가능량 및 온도 변화

부산 지하철의 경우, 현재로는 기계환기 대신 자연환기에 크게 의존하고 있는 것이 현실이다. 그러므로 강제배기팬을 가동하지 않는 조건하에서 계산하면 지하철 배기구에서의 배기온도는 1월의 평균온도가 12.03°C이며, 터널내의 부존열량은 약 350Mcal/h 정도이다. 이 열량을 팬으로 약 2,000m³/min로 일정하게 배기구에서 배출할 경우, 하루중의 환기시간에 따른 배열회수가능량은 Fig.2와 같다.

터널내 발생열량을 일정하게 하고 환기시간만을 바꾸어 시뮬레이션 한 경우, 환기시간이 많으면 많을수록 시간당의 평균 배열회수가능량은 작다는 것을 알 수 있다.

Case 2의 경우, 하루 24시간을 전부 환기한다는 조건하에서 계산한 결과로 1월의 경우 배열회수가능량이 약 279Mcal/h 정도였으며, 이 때의 배기구의 배기온도는 약 9.80°C 정도가 되었다. 그리고 13시간 동안을 강제로 배기한다는 조건인 Case 3은 평균 배열회수가능량이 약 281 Mcal/h로 시간당 배열회수 가능량이 2Mcal/h 정도 증가하였다. 그리고 터널내의 공기온도는 9.85°C로 낮아졌으며, Case 4인 19시간을 환기시키는 경우와 비교하면 6시간 동안의 차는 그다지 크게 나타나지 않았다.

5.2 교통량 변화에 따른 배열량 및 온도변화 열차 이용승객수, 열차 운행횟수, 그리고 열차 편

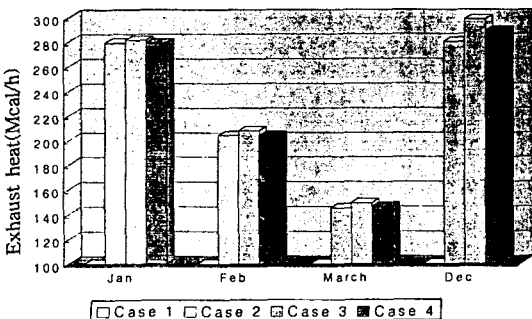


Fig.2 Monthly mean exhausted heat rate by ventilation time

성수로 이루어져 있는 교통량이 배열회수가능량과 터널내 열환경에 미치는 영향을 조사하기 위하여 교통량을 기준치보다 1.5배와 2배로 늘리고 또 이 조건하에서 자연환기 상태와 24시간 환기하는 경우로 각각 나누어서 시뮬레이션하였다. 그 결과 자연환기 방식에서 터널내 발열원을 기준으로 한 경우 12.03°C이었던 열환경이 같은 조건에서 교통량을 1.5배로 한 경우 13.98°C로 약 1.95°C정도 더 높아졌다.

그리고 동일한 환기조건에서 교통량을 2배로 한 경우에는 15.75°C로 약 3.73°C가 높아졌다. 즉 교통량이 증가하는 만큼 지하철 배열회수가능량은 증가하였다. 그러므로 서울 지하철과 같이 교통량이 많은 지역에서의 배열회수가능량이 부산과 같이 서울에 비해서 비교적 교통량이 적은 지역에서의 배열회수가능량보다도 같은 조건하에서는 많을 것으로 예측할 수 있다.

5.3 열원종류에 따른 월평균 COP

외기를 직접 이용한 공기열원 히트펌프의 성능계수와 환기시간이나 교통량을 변화시켜 배열회수가능량을 추정한 뒤 이를 이용한 공기열원 히트펌프의 성능계수를 식(2)에 의해 구하였다.

지하철 배열을 이용할 경우 검토조건에 의해 배기구의 온도를 계산하고 이 온도를 식(2)에 의해 구했으며 그 결과는 Table 3과 같다.

5.4 에너지 소비량

앞에서 구한 배열이용가능량을 평균 200Mcal/h로 하여 공급열량 Q_s로 가정하고 식(2)에 의해 구해

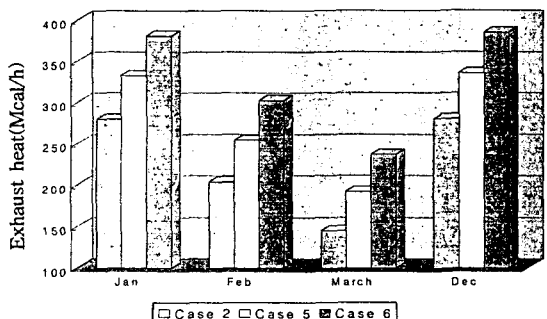


Fig.3 Monthly mean exhausted heat rate by traffic density

Table 3 Result of COP by each case at each month

Case \ Month	January	February	March	December
Case 1	3.88	3.9	4.08	4.09
Case 2	3.74	3.74	3.85	3.83
Case 3	3.76	3.78	3.86	3.91
Case 4	3.74	3.76	3.85	3.89
Case 5	3.84	3.85	4.00	4.11
Case 6	3.93	3.95	4.14	4.24
Out side	3.37	3.47	3.7	3.54

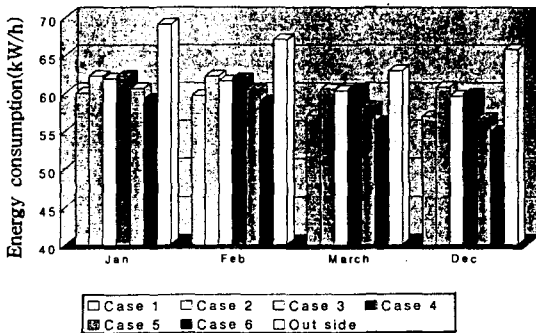


Fig.4 Energy consumption by each case(kW/h)

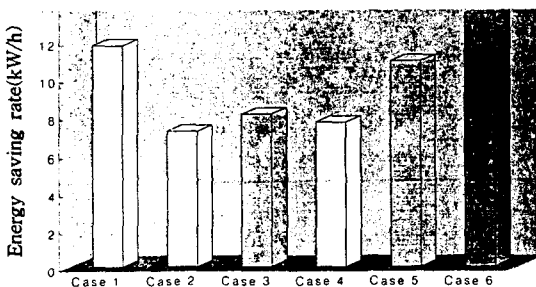


Fig.5 Energy saving rate by each case(kW/h)

진 히트펌프의 COP를 식(3)으로 계산한 결과, 소비 전력으로 환산한 값은 Fig.4와 같다.

즉 외기를 직접 이용한 히트펌프의 소요동력은 월의 경우, 시간당 69kWh이지만 환기시간을 고려한 Case 2~4는 61.85에서 62.85kWh로 10%정도를 절약할 수 있다. 그러나 교통량을 1.5배, 2배로 증가한 경우 12.4%, 14.24%를 절약할 수 있다는 결

과를 얻었다.

2월의 경우도 1월보다는 약간 낮지만 외기상태에서는 67.02이지만 환기시간을 고려한 Case 2~4는 59.63에서 62.18kWh로 9% 정도를 절약할 수 있다. 그러나 교통량을 1.5배, 2배로 증가한 경우 9.9%, 2.15%를 절약할 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 절약량을 Fig.5에 나타냈다.

6. 결 론

본 연구는 미이용 에너지원으로서 지하철배열을 공조용 열원으로 이용하기 위한 타당성을 검토하기 위해 이미 발표한 지하철열환경예측 프로그램으로 가상의 지하철 모델을 설정하여 터널내 배기구의 환기시간, 열차의 교통량 등을 변화시켜 배열회수가능량 및 대기온도에서 히트펌프를 이용한 경우와 지하철 배열을 이용했을 때의 에너지 절약량에 대해 사례연구를 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 환기시간은 환기팬의 동력비 뿐만 아니라 지상으로 배열되는 열량을 재이용하기 위해서도 최적의 조건을 산출해야 한다. 이용측면에서는 공조시간대에 의해 배열하는 것이 가장 바람직하다는 것을 계산결과 확인하였다.

2) 공기열원 히트펌프를 사용할 경우 환기시간에 따라 다르지만 현재의 발열량 및 교통량을 기준으로 일반공조시간대의 환기시간인 경우 외기를 직접 이용한 히트펌프보다 시간당 8%의 전력을 절약한다는 것을 알 수 있었다.

3) 교통량을 현재보다 1.5배, 2배 증가시킬 경우, 24시간의 환기시간에도 불구하고 배열이용히트펌프의 에너지 소비량이 외기를 직접 이용한 히트펌프의 소비량보다 평균시간당 11%, 13.48%로 줄어들었다.

참 고 문 헌

- 김종열의 5인, 1997. 지하철 터널내 열환경예측 프로그램 개발에 관한 연구, 공기조화·냉동공학 논문집 제9권 제4호, pp. 504~516.
- 金之孝行, 都市未利用エネルギーの活用可能性に関する研究-熱源機器のモデル化と未利用マップの作成および都市廢熱狀況の把握, 1993, 學位論文集.

3. 김종열외 4인, 1996, 지하철 폐열회수량 예측프로그램 개발-제1. 실측 및 시뮬레이션 비교, 공기조화·냉동공학회 부산·경남지부 공동학술대회 논문집, pp. 122~127.
4. 김종열외 4인, 1996, 지하철 터널내 온열환경 예측프로그램 개발에 관한 연구-제1. 부산지하철역 동계실측 결과, 공기조화·냉동공학회 하계학술발표 논문집, pp. 207~210.
5. 김종열외 4인, 1996, 지하철 터널내 온열환경 예측프로그램 개발에 관한 연구-제2. 시뮬레이션 수법 및 실측치 비교, 공기조화·냉동공학회 하계학술발표 논문집, pp. 211~214.
6. 김종열외 6인, 1997, 지하철 터널내 온열환경 예측프로그램 개발에 관한 연구-제3. 열차풍 예측 프로그램 개발, 공기조화·냉동공학회 하계학술발표 논문집, pp. 692~697.
7. 武田, 坂本, 失崎, “地下鐵の排熱に関する調査研究(その2)-熱環境特性調査-”, 空氣調和・衛生工學會學術講演會講演論文集, 1993-10(大阪), pp. 205~208.
8. 武田, 失崎, “地下鐵排熱に関する調査研究(その3)トンネル部の溫熱環境シミュレーション-”, 空氣調和・衛生工學會學術講演會講演論文集, 1994. 10. 7~9(熊本), pp. 337~340.
9. 小野, 高木, 太田, 前川, 黒本, 岩井, “地下鐵トンネルの排熱利用に関する研究(その4-排熱利用效果の検討)”, 空氣調和衛生工學學術論文集, 1992-10, pp. 1185-1188.
10. 吉田, 伊丹, 寺井, “地下鐵道における冬期熱回収と夏期溫度豫測”, 空氣調和・衛生工學會論文集, No. 61, 1996-4, pp. 16~23.
11. 落藤, 長野, 中村, “排熱利用による地域供給システムの構成と評價, 第1報 排熱利用の基本構成と(Sapporo)市の排熱賦存量”, 空氣調和・衛生工學會學術講演會論文集, 1991-10, pp. 725~728.
12. New York City Transit Authority, “Systems Evaluation of Subway Cooling Equipment”, 1968.