

공기열원 히트펌프의 에너지원으로 지하철 배열 이용에 관한 연구

김 종 렬 · 정 기 철

동명대학 가스냉동과

(2000년 11월 10일 접수, 2000년 12월 8일 채택)

A study on the utilization of exhausted heat from subway for energy source of heat pump

J.R. Kim · K.C. Jeong

Dept. of Gas & Refrigeration, TongMyong College

(Received 10 November 2000 ; Accepted 8 December 2000)

요 약

지구환경 보존 및 화석연료의 고갈에 대한 대책으로 미활용 에너지원에 대한 연구들이 진행되고 있다. 본 연구는 이러한 관점에서 지하철에서 배기되는 공기를 공기열원 히트펌프의 열원으로 이용할 수 있는가를 알아보기 위해 서울 지하철 5호선 Y역을 대상역으로 선정하여 터널내의 공기온도, 배열량을 시뮬레이션하였다. 이 배열량을 난방용 열원으로 히트펌프에 이용했을 경우 전력소비량과 대기를 직접 이용하는 히트펌프의 전력소비량을 계산하여 에너지 절약량을 검토하였으며, 여름철 냉방 유무 및 환기시간에 따른 터널내 온열환경을 파악하였다.

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.

Key words : Unused energy, COP, Exhausted heat, Heat pump

1. 서론

도시의 과밀화에 따른 공간의 효율적 측면에서 지하상가, 지하주차장, 지하창고, 지하철 등 다양한 지하공간이 늘어나고 있다. 또한 편리성과 쾌적성을 추구한 나머지 대도시는 열섬효과와 더불어 도시 환경은 점점 열악한 상태로 변해가고 있다. 특히, 자원 고갈과 함께 지구환경의 보존을 위해 화석연료의 사용

을 억제 혹은 대체하여 이산화탄소의 방출량을 줄여 환경을 개선하거나 종래의 에너지를 대체하는 대체 에너지원 개발, 사용하지 않았던 미이용 에너지를 활용하여 화석연료에 대한 의존성을 줄이고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

이중에서 미이용 에너지원으로 평가되고 있는 지하철 폐열의 경우, 지하공간의 특성상, 지반의 열용량이 크기 때문에 일정한 온

도를 유지하는 특성이 있다. 그러나 지하공간 중에서도 지하철은 이용승객의 증가, 열차 운행횟수의 증대, 부대설비 등 내부발열량이 지반의 흡·방열량을 초과하게 되어 대지의 함온성, 단열성의 특징을 살린 자연적인 쾌적환경을 기대할 수 없는 지경에 이르렀다. 이러한 지하철내 열환경을 쾌적하게 유지하기 위해 냉방시스템을 도입하거나 기계환기방식을 채택하여 상승분의 열량을 대기로 방출하고 있으나 이러한 열량의 재이용 측면에서 폐열을 지상으로 직접 배기하지 않고 열회수장치를 이용하여 배열량의 일부를 회수하여 공조시스템의 열원으로 이용하면 환경악화를 방지할 수 있을 뿐 아니라 에너지 절약 효과도 꾀할 수 있다. 따라서 지하철 건설이 확대되고 있는 우리나라로서는 회수·이용이 가능한 폐열량이 해를 거듭할수록 증대될 것으로 예측된다.

따라서 본 연구는 겨울철 공기열원 히트펌프를 사용하는데 열악한 조건인 서울을 예들 들어 지하철 배열을 사용할 경우와 그렇지 않고 대기에 노출된 상태로 히트펌프를 가동할 경우의 에너지 절약성을 파악하는데 그 목적이 있으며 동시에, 지하철 5호선의 터널 및 역의 온도를 추정하여 환기량을 적절하게 제어할 수 있는 데이터를 제공하고자 한다.

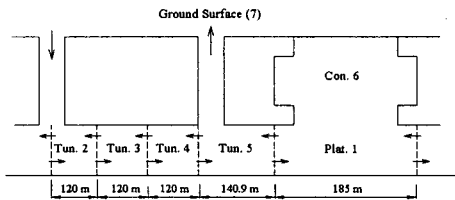


Fig. 1 Block models for calculation.

2. 시뮬레이션 수법

본 논문에서 이용한 시뮬레이션 수법은 이미 발표¹⁾한 바 있는 지하철내 열환경 예측 시뮬레이터를 이용한 것으로, 가장 일반적인 지하철 구조인 터널 중간(Fig. 1의 Tun.2)에서 공기를 공급하고 터널 양단(Fig. 1의 Tun.5)에서 배출하는 방식을 계산모델로 선정하였다. 즉 역에서 터널 중간에 위치한 급기구까지를 계산대상으로 하고, Fig. 1에 나타난 것처럼 승강장, 터널 지역을 7구간으로 분할하여 각 구간마다 2차원의 지반내 온도

분포를 차분법에 의한 비정상열전도계산에 의해 구했다. 각 구간내의 공기는 완전혼합을 가정하고 1시간마다 열차수, 승객수, 환기량을 주어 계산하였다. 발열원으로서의 열차, 인체, 조명, 열차내외의 열이동을 고려하였다.

3. 계산방법

3.1. 공기열원 히트펌프의 COP

지하철 배열 회수 가능량에 영향을 미치는 인자로는 히트펌프의 성적계수이며 기존 연구²⁾에 의하면 성적계수는 열원온도에 의존한다. 즉 공기열원 히트펌프의 성적계수 (Q_s /열원기기 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 것²⁾을 이용하였다. 참고한 논문에서는 일본의 D사에서 제공된 기술자료에 의해 비교적 소형인 히트펌프로서 용량이 116.3[kW], 큰 히트펌프로서 용량 1163[kW], 그 중간인 582[kW]을 선정하여, 이용하고자 하는 온수를 45℃로 할 경우 공기열원에 따른 소요동력과 소요능력을 변수로 하여 COP를 계산하였지만 식 (1)과 거의 차이가 없었다고 발표하였다. 따라서 본 연구에서는 그 결과인 식 (1)을 계산에 이용하였다.

$$COP = \frac{74.1}{45 - t_i} + 1.63 \quad (1)$$

여기서, t_i 는 터널의 배기구 공기온도(℃)이다.

3.2. 열회수가능량(배열량)

열회수란 겨울철에 외기보다 높은 온도의 배기에서 열을 회수하는 것을 말한다. 또한 열회수를 하는 기기로서 공기열원 히트펌프를 이용하는 것을 전제로 각 시각마다 시간당 열회수량을 구할 수 있지만 열회수 측에서만 결정할 수 없는 즉, 요구하는 부하가 어느 정도인가라는 부하측의 요구에 의존하므로 최적 기기와 운전방법은 별도로 연구할 필요성이 있다. 열회수 이용가능열량은 다음의 식에 의해 구할 수 있다.

$$Q = \rho \cdot V \cdot C \cdot (t_r - t_{ref}) \quad (2)$$

여기서,

ρ : 밀도 (kg/m^3), V : 유량 (m^3/h)

C : 비열 ($\text{kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$)

t_r : 배기구 온도($^\circ\text{C}$)

t_{ref} : 히트펌프 기준온도(5°C)

그러나 본 연구에서는 터널내 존재하는 부존열량을 파악하는 것이 보다 중요하므로 위의 우향 온도차를 배기구 온도와 외기온도의 차이로 계산하였다. 유량은 배기구에서 팬에 의해 배기되는 공기량을 1시간으로 변환하여 계산하였으며, 비열은 공기의 비열이다.

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 에너지 절약 특성의 지표로서, 원리적으로 간단한 전동히트펌프를 이용한 경우 다음과 같이 에너지 절약량을 구하였다.

$$E_c = E_0 - E_1 = Q_s \cdot \left(\frac{1}{\text{COP}_0} - \frac{1}{\text{COP}_1} \right) \quad (3)$$

여기서,

E_c : 전력 에너지 절약량

Q_s : 공급열량

E_0 : 종래 열원시스템의 소비전력량

E_1 : 미활용 열원이용 시스템의 소비전력량

COP_0 : 종래 열원시스템의 총합성적계수

COP_1 : 미활용 열원이용 시스템의 총합성적계수

여기에 총괄성능계수란 다음과 같다.

$$\text{총괄성능계수} = Q_s / (\text{열원기기동력} + \text{열원반송동력} + \text{공조동력}) \quad (4)$$

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

종래 시스템은 공기열원 히트펌프로 하지만 팬동력은 열원기기의 소비전력에 포함하기 때문에 열원반송동력은 0으로 되며 따라서 종래 시스템의 종합효율은 공기열원 히트펌프의 성적계수와 같게 된다. 즉 앞에서 구한 COP의 값과 동일한 것으로 별도로 계산하지 않았다. 그리고 열원기기의 동력은 에너지 환산값으로 전력을 860/0.38 Kcal로, 전력 환산값에서 0.38은 송전효율을 의미한다.

Table 1. Train-running frequencies and number of passengers by an hour at Y station(by 2000. 4. 15.)

| Time | Train-running frequencies (Upward + Downward) | Number of passengers | Time | Train-running frequencies (Upward + Downward) | Number of passengers |
|------|---|----------------------|------|---|----------------------|
| 5 | 32 | 800 | 15 | 36 | 5,800 |
| 6 | 32 | 800 | 16 | 36 | 7,200 |
| 7 | 48 | 1,000 | 17 | 48 | 5,800 |
| 8 | 48 | 3,300 | 18 | 48 | 6,500 |
| 9 | 48 | 7,500 | 19 | 48 | 6,700 |
| 10 | 36 | 3,800 | 20 | 48 | 4,200 |
| 11 | 36 | 2,700 | 21 | 36 | 3,000 |
| 12 | 36 | 3,600 | 22 | 36 | 2,600 |
| 13 | 36 | 4,600 | 23 | 32 | 1,700 |
| 14 | 36 | 5,400 | 24 | 32 | 500 |

3.4. 수치계산에 이용한 점수

지하철 열환경 예측 프로그램의 입력조건 중 열차 운행횟수(상하선의 합계) 및 승하객 수는 서울 지하철 5호선의 Y역 데이터로, Table 1에 나타냈다. 승하객 수는 2000년 4월의 교통량 조사결과를 기준값으로 시뮬레이션 계산에서는 요일에 관계없이 일정하다고 가정하였다. 이는 평일의 수치로 일요일이나 공휴일에 있어서는 Table 1에 나타난 수치보다 실제로는 적지만 본 수치계산에서는 계산의 편의상 평일 하루의 이용객수를 그대로 계산에 이용하였다. 또한 벽면 및 지중으로부터의 흡열 및 방열을 계산하는데 이용한 물성치는 Table 2와 같다.

Table 2. Geometry Constant for Simulation.

| | | |
|--|---------------------------------|------|
| Thermal conductivity [W/(m · K)] | Soil | 1.2 |
| | Wall | 1.6 |
| Heat flux of wall [MJ/(m ³ · K)] | Soil | 1.9 |
| | Wall | 2.3 |
| Heat transfer coefficient [W/(m ² · 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 |

4. CASE STUDY

4.1. 설정조건

사례연구를 위해 기계환기 방식에서의 터널내 발열량 및 기계환기의 기본조건을 Table 3과 같이 하였으며, 터널과 역에서의 온도 및 열회수 이용가능열량, COP 등을 계산하기 위한 조건은 Table 4와 같다.

Table 3. Standard condition used in calculation.

| | | |
|----------------------|----------------------------------|--|
| Heat generation rate | Heat generation rate by 1 train | 355 kW |
| | Heat generation rate by 1 people | 225.6 W |
| | Heat generation rate by light | 20 W/m ² (concourse, platform) |
| Ventilation rate | Supply rate by fan | 4000 m ³ /min |
| | Exhaust rate by fan | 2000 m ³ /min |
| | Wind rate by train in a tunnel | 5000 m ³ /train |

지하철내의 발열원중 전동차의 편성수는 10량으로 고정하였으며 교통량은 1.0배와 2.0배로 변화시켜 장차 증가할 교통량이 배열량 및 터널내 온도에 미치는 영향도 고려하였다. 그리고 기계환기방식의 팬용량은 급기팬 4000 m³/min, 배기팬 2000 m³/min의 용량을 각각 한 대씩 운전하는 것으로 가정하였다. 또한 여름철 냉방이 겨울철 터널내의 온도에 영향을 미치는가를 알아보기 위해 오전 8시부터 오후 8시까지 26℃로 유지하는 것으로 설정하였다.

환기시간은 일반사무실의 공조시간대인 8시부터 18시까지와 열차가 운행되는 5시부터 24시까지로 시간을 분류하였다.

Table 4. Case study condition of simulation.

| Case | Ventilation time | Cooling | traffic density |
|--------|------------------|---------|---------------------|
| Case 1 | 5~24 | Off | standard |
| Case 2 | 8~18 | Off | " |
| Case 3 | 5~24 | On | " |
| Case 4 | 8~18 | On | " |
| Case 5 | 5~24 | Off | 2 times of standard |
| Case 6 | 8~18 | Off | " |
| Case 7 | 5~24 | On | " |
| Case 8 | 8~18 | On | " |

5. 계산결과 및 고찰

시뮬레이션 조건에 의한 결과를 하루의 온도변화, 월평균 온도변화 및 이를 기초로 식 (1)에 의해 배열량을 계산한 결과를 나타냈다. 그리고 각각의 배열량을 외기를 직접 이용한 히트펌프의 성능계수와 배열을 이용한 히트펌프의 성능계수를 계산하고

이때 에너지 소비량의 절약량에 대해 검토하여 지하철 배열이 미활용 에너지원으로서의 이용 가능한지에 대한 타당성을 정리하였다.

5.1. 각 조건에 따른 터널 배기구의 온도 변화

Fig. 2는 각 케이스를 시뮬레이션한 결과, 배기구(Point 5)에서의 온도변화 중에서 1월 15일의 결과를 나타낸 것이다.

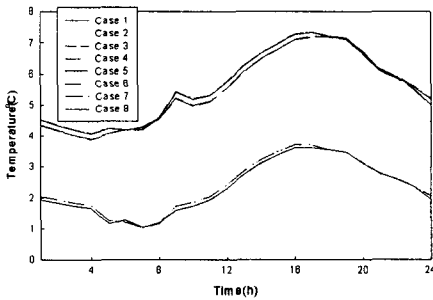


Fig. 2. Temperature variation by each case at Point 5.

먼저, 위 결과에서 환기조건이 같을 경우 여름철 역냉방을 하지 않을 경우(Case 1)와 하였을 경우(Case 3), 겨울철 배기구에서의 온도변화는 아주 미미한 것으로 그다지 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 그러나 환기시간을 다르게 할 경우 환기시간이 5~24시까지 19시간 환기하는 Case 1은 10시간 환기하는 조건인 Case 2보다 약 0.1°C 낮은 온도를 나타냈다.

이는 환기시간에 따라 터널내 온도가 크게 달라질 수 있으며 또한 환기량 역시 터널내 온도를 정확히 예측하여 환기시스템을 운전할 필요가 있다는 것을 추론할 수 있다. 즉 환기량과 환기시간을 과대로 설정할 경우 송풍동력 뿐만 아니라 지하철내 온도가 지나치게 낮아져 겨울철 별도의 난방설비를 필요로 할 수 있다는 것이다.

교통량이 2배로 증가했을 경우, 현재의 교통량보다 약 2.4°C가 높은 배기구의 온도를 나타냈다. 현재의 교통량일 경우와 다른 점은 교통량이 증가할수록 역을 냉방하는 것이 하지 않는 경우보다 0.02°C 정도의 온도가 낮다는 것을 알았다. 그리고 환기시간에 따른 변

화도 Case 6은 Case 5보다 약 0.2°C정도 높게 나타났다.

Fig. 3은 월평균 배기구에서의 온도를 나타낸 것이다. 1월의 경우, Case 1은 Case 2보다 약 0.02°C가 낮았으며, 2월에는 0.05°C, 3월은 0.07°C, 12월은 0.08°C 정도 낮은 온도를 보였다. 그러나 대체로 1월은 3.4°C, 2월은 3.3°C, 3월은 8.34°C 정도였다. 교통량이 현재를 기준으로 배기구 온도는 외기온도보다 약 6°C 정도 높았으며 교통량이 2배로 증가했을 경우 약 9°C 정도의 차이를 보였다.

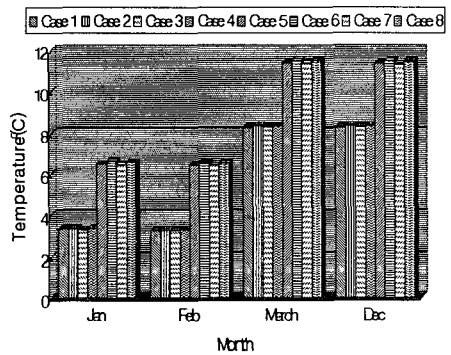


Fig. 3. Monthly mean temperature by each case at Point 5.

Table 5. Results of COP by each case at each month

| Month \ Case | January | February | March | December |
|--------------|---------|----------|-------|----------|
| Case 1 | 3.409 | 3.407 | 3.650 | 3.651 |
| Case 2 | 3.412 | 3.409 | 3.653 | 3.654 |
| Case 3 | 3.409 | 3.406 | 3.650 | 3.651 |
| Case 4 | 3.412 | 3.409 | 3.653 | 3.653 |
| Case 5 | 3.555 | 3.552 | 3.834 | 3.833 |
| Case 6 | 3.561 | 3.559 | 3.843 | 3.842 |
| Case 7 | 3.553 | 3.551 | 3.833 | 3.832 |
| Case 8 | 3.561 | 3.558 | 3.842 | 3.840 |
| Out side | 3.154 | 3.193 | 3.460 | 3.337 |

5.2. 각 조건에 따른 공기열원 히트펌프의 COP

외기를 직접 이용한 공기열원 히트펌프의 성능계수와 환기시간이나 교통량을 변화시켜 배열회수가능량을 추정된 뒤 이를 이용한 공

기열원 히트펌프의 성능계수를 식 (1)에 의해 구하였다.

지하철 배열을 이용할 경우 검토조건에 의해 배기구의 온도를 계산하고 이 온도를 식 (1)에 의해 구했으며 그 결과는 Table 5와 같다. 즉 히트펌프의 COP는 배기구 온도에만 의존한다는 조건에 의해 계산된 값이므로 터널에서 배출되는 공기의 온도가 가장 높은 3월과 12월의 교통량 2배의 조건에서 히트펌프의 성능계수가 높았다.

5.5. 에너지 소비량 평가

식 (2)에서 구한 부존열량을 계산한 뒤 평균값에 해당하는 200 Gcal/h를 식 (3)의 공급열량으로 주어 에너지 절약량을 계산하였다. 이 공급열량은 반드시 식 (2)에서 구한 값이 최적이라고 판단할 수 없으며, 기기의 운전조건이나 성능 및 이용자측의 수요열량 등에 의해 산출될 수 있다.

Fig. 4에서 환기시간에 따른 배열량을 Case 1을 기준으로 각 케이스의 월평균을 보면, Case 2는 약 1.5 Gcal/month, Case 3은 -2 Gcal/month, Case 4는 1.43 Gcal/month, Case 5는 96.4 Gcal/month, Case 6은 101Gcal/month, Case 7은 95.9 Gcal/month, Case 8은 100.6 Gcal/month의 차이가 발생하였다. 일반적으로 환기시간에 따라 터널내 온도가 변화되어 배열량에도 영향을 미치리라 예상되었지만, 시뮬레이션에서 가정한 환기시간에 의해서는 지하철내 온도에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알았다.

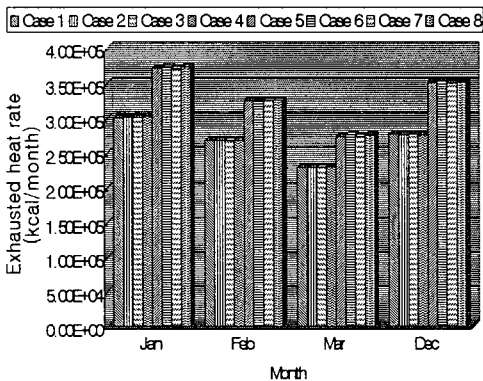


Fig. 4. Monthly mean exhausted heat rate by each case

에너지 절약 가능량은 Fig. 5와 같이 시간당 평균 Case 1은 5.27 Mcal/h, Case 2는 5.32 Mcal/h, Case 3은 5.26 Mcal/h, Case 4는 5.31 Mcal/h, Case 5는 8.40 Mcal/h, Case 6은 8.54 Mcal/h, Case 7은 8.39 Mcal/h, Case 8은 8.52 Mcal/h를 나타냈다.

이는 kWh로 환산하면 현재의 교통량에서는 약 6.15 kWh이며, 교통량이 2배로 증가한 경우에는 약 9.75 kWh 정도의 에너지 절약 가능량을 예측할 수 있었다.

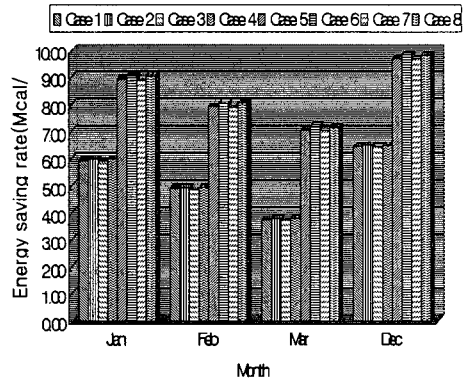


Fig. 5. Energy saving rate by each case(Mcal/h)

6. 결 론

서울 지하철 5호선을 모델로 설정하여 터널내의 환기시간, 여름철 냉방 유무, 열차의 교통량 등을 변화시켜 배열량 및 대기온도에서 히트펌프를 이용한 경우와 지하철 배열을 이용했을 때의 에너지 절약량에 대해 사례연구를 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 서울의 경우, 겨울철 터널내 온도가 그다지 높지 않기 때문에 환기시간을 길게 할수록 환기팬의 동력비뿐만 아니라 지하철내의 배기구 온도가 낮아져 승객들을 위한 난방이 추가로 필요하므로 불리할 수 있다.
- (2) 현재의 교통량이나 2배로 증가한 경우에도 여름철 냉방 유무에 상관없이 겨울철 터널내 온도에 미치는 영향은 거의 없다는 것을 알 수 있었다.
- (3) 지하철 배열을 공기열원 히트펌프로 이용할 경우 에너지 절약량은 현재의 교통

량인 조건에서 시간당 평균 6.15 kWh, 교통량을 현재보다 2배 증가했다고 할 경우 9.85 kWh 정도를 절약시킬 수 있다는 것을 알았다.

후 기

본 논문은 2000학년도 동명대학 학술연구비에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김종열외 5인, 지하철 터널내 열환경예측 프로그램 개발에 관한 연구, 공기조화·냉동공학회 논문집 제9권 제4호, pp.504~516, 1997
2. 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, 學位論文集. 1993
3. 吉田治典外5人, 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, pp.13~22, 1996