

# 전동차내 쾌적성 평가에 관한 기초연구

## A Basic Study on Evaluation of Comfortableness in Electric Rolling Stock

박덕신<sup>1)</sup>, 이주열<sup>2)</sup>, 정우성<sup>3)</sup>

Duck-Shin Park, Ju-Yeol Lee, Woo-Sung Jung

---

### ABSTRACT

Ventilation system on passenger rooms should be designed for the health and comfort of the passengers. One of the main aim is to create an acceptable thermal environment without draught problems. The draught sensation increases when the air temperature decreases and the air velocity increases. Airflow in passenger rooms is turbulent. Lateral temperature and humidity gradients in the electric rolling stock have been studied. And, the difference in the mean temperatures measured at 0.7, 0.9, 1.2, 1.7 m above the floor. It has been found that temperature with large fluctuations caused more draught complains.

---

### 1. 서론

대부분의 시간을 실내공간에서 생활하는 현대인에 있어 쾌적한 실내 환경은 일의 효율성을 증대시키고, 건강한 삶을 유지하는데 매우 중요하다. 인간의 생활수준이 향상되면서 쾌적한 실내환경에 대한 요구가 높아지고 있는 추세이며, 거주자의 건강과 쾌적함을 위해 환기시스템이 사용되어 진다. 인간은 주위 열환경으로부터 상당히 복잡한 열교환 과정을 거쳐 쾌적한 상태를 느끼므로 쾌적한 실내환경의 구현을 위해서는 먼저 인간이 가장 직접적으로 느끼는 실내의 기온, 습도, 기류 등과 같은 물리적인 환경과 인간의 주관적인 쾌적감과의 상관관계를 밝혀내는 것이 매우 중요하다.

밀폐된 좁은 공간에 다수의 승객이 체류하는 전동차의 경우 공조 상태를 쾌적하게 유지하는 데에는 많은 어려움이 있다. 승객이나 차내 조명으로부터 발생하는 대량의 열을 한정된 공간에 설치된 공조설비로 처리해야 한다. 특히, 출퇴근 시간이나 여름철에는 고속으로 신선한 공기를 차내로 급기해야 하므로 차가운 공기에 직접 접촉하게 되면 불쾌감이 생긴다. 인간이 느끼는 온도는 전동차내의 기온, 습도 및 풍속 등의 환경에 의해 다양하게 변화된다.

- 
- 1) 한국철도기술연구원, 선임연구원
  - 2) 한국철도기술연구원, 연구원
  - 3) 한국철도기술연구원, 책임연구원

“사람이 쾌적하다고 느끼는 공간”을 나타내는 인자는 다양하며, 이런 인자에는 측정이 불가능하거나 정량평가가 어려운 항목들도 다수 포함된다. 본 연구에서는 전동차에서 쾌적성을 평가하기 위한 기초연구로서 비교적 정량화가 쉬운 기온과 습도를 대상으로 전동차 내에서 승객의 위치를 기준으로 0.7, 0.9, 1.2, 1.7 m의 높이에서 기온과 습도의 분포를 측정하고, 상용 코드인 Fluent를 이용한 3D 유동해석을 통해 전동차 내에서 온·습도 분포에 편차가 생기는 원인을 규명하고, 환기시스템의 문제점을 파악하고자 하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 측정대상

대부분의 실내공간에서 기온은 바닥으로부터 높아질수록 상승한다. 전신은 열적 중립 상태이더라도 온도구배가 상당히 크면 국부 온불쾌감이 머리 부분에서 생기고, 냉불쾌감이 발 부분에서 생긴다. 실내 상하 온도차의 한계에 대해서 ISO 7730에서는 앉은 상태에서 발목(바닥 위 10cm)과 머리(바닥 위 110cm)의 온도차를 3 ℃ 이내로 유지할 것을 추천하고 있다. 반면 ANSI/ASHRAE 55-1992에서는 서 있는 상태에서의 발목(바닥 위 10cm)과 머리(바닥 위 170cm)의 온도차를 3 ℃ 이내로 유지할 것을 추천하고 있다.

ANSI/ASHRAE 55-1992에서는 온열환경 수직 측정위치를 지표면에서 0.1, 0.6, 1.1, 1.7 m 높이로 할 것을 추천하고 있으며, 여기서 0.1 m는 발목, 0.6 m는 착석시 인체의 중심, 1.1 m는 착석시 인체의 머리, 1.7 m는 서있을 때의 머리 높이에 해당된다. 본 연구에서는 철도청 소속 4호선 전동차에 승객이 탑승했을 때의 높이를 실측하여 ANSI/ASHRAE 55-1992의 추천 높이를 약간 변경하고, 전동차의 구조상 측정이 어려운 0.1 m 높이를 제외한 지점에서 기온과 습도를 측정했다. 수직 기온 및 습도 분포 측정지점은 그림 1과 같이 0.7, 0.9, 1.2, 1.7 m로서 0.7 m는 착석시 인체의 무릎, 0.9 m는 착석시 인체의 중심, 1.2 m는 착석시 인체의 머리, 1.7 m는 서있을 때의 머리에 해당되는 높이이다. 그림 2에 전동차 내에서의 수평 기온 및 습도 분포 측정위치를 나타내었다. 그림 2에서 전동차의 체원은 내부를 기준으로 길이가 18.9 m이고, 폭이 2.9 m로서 수평 기온 및 습도 측정지점은 세로 축의 경우 전동차의 진행방향을 기준으로 6등분으로 나누어 0.48 m의 간격으로 5지점으로 하였다. 가로축은 총 길이인 18.9 m를 1.1 m로 나누어 16지점으로 하여 총 80지점을 선정하여 측정하였다.

### 2.2 측정장치 및 방법

창문이 있는 실내공간은 복사열에 의해 온도분포에 많은 영향을 받으므로 전동차 내부의 기온 및 습도의 측정은 햇볕이 차단된 차고에서 행하였다. 전동차 내부의 온도분포를 고르게 하기 위해 측정 시작 30분전 HVAC(heating, ventilation and air conditioning)를 정상 운행 상태로 가동하였다. 전동차내의 온도분포는 Datalogger(UCAM-20PC, Kyowa Co.)를 이용하여 Thermocouple 16개를 전동차의 가로 방향으로 설치하여 설치위치를 계속 이동하면서 한 지점에서 최소 5분간 측정하여 측정값을 평균하였다. 전동차내의 습도분포는 전기 커패시터 방식의 센서를 이용하여 온도 분포 측정위치와 동일한 위치에서 측정하였다.

### 3. 유동해석 및 결과

전동차 내부의 유동해석에는 상용 열유체 해석 프로그램인 Fluent Ver 6.0을, 격자의 구성에는 Gambit Ver. 2.0을 사용했다. 유동해석에 적용한 난류 모델로는 표준 k-ε 모델을, 벽면근처의 처리에는 standard wall function을 사용했다. 운동량 계산에는 Quick 기법을, 압력-속도 연성에는 SIMPLEC, 난류에너지(turbulence kinetic energy), 소산율(turbulence dissipation rate)의 계산에는 2차 상향차분법을 사용하였다. 완화계수(under relaxation factor)는 압력의 경우 0.3, 운동량은 0.7, 난류에너지 및 소산율은 0.8로 정하여 계산을 수행하였다. 연속방정식 X, Y, Z 방향 속도, 난류에너지 및 소산율의 수렴판정조건은  $10^{-3}$ 이며, 에너지 방정식은  $10^{-6}$ 을 수렴조건으로 하였다.

전동차의 용적은 133 m<sup>3</sup>이고, CO<sub>2</sub> 필요 환기량은 승객 160명을 기준으로 28.9 m<sup>3</sup>/min이고, 환기량은 31.6 m<sup>3</sup>/min으로 설정되어 있다. 전동차 공조의 특징은 공기 유입구가 좌우 대칭으로 2열로 구성되어 있다. 그리고, 두 곳의 리턴그릴이 있으며, 이곳을 통해 유입된 공기가 전부 배출된다. 배출공기의 70 %는 재순환되고, 30 %는 외기로 배기된다. 유입공기의 유속은 0.51 m/sec이며, 전동차 내부의 유속은 평균 약 0.2 m/sec로 계산되었다.

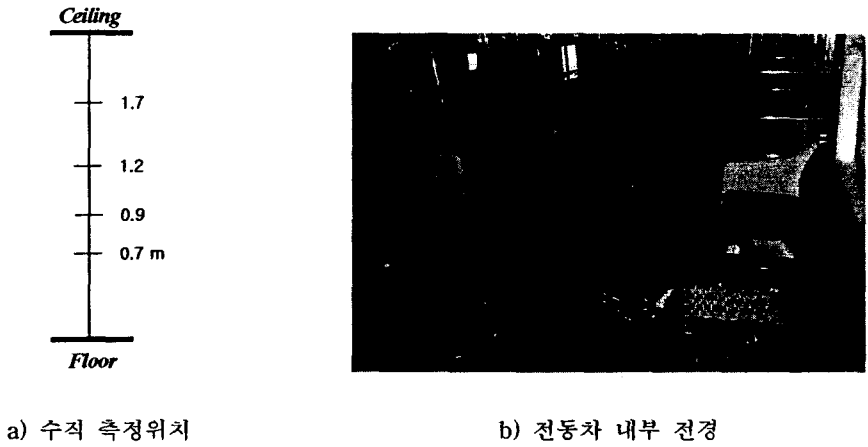


Fig. 1. 전동차내 수직 온도/습도 분포 측정위치 및 내부전경

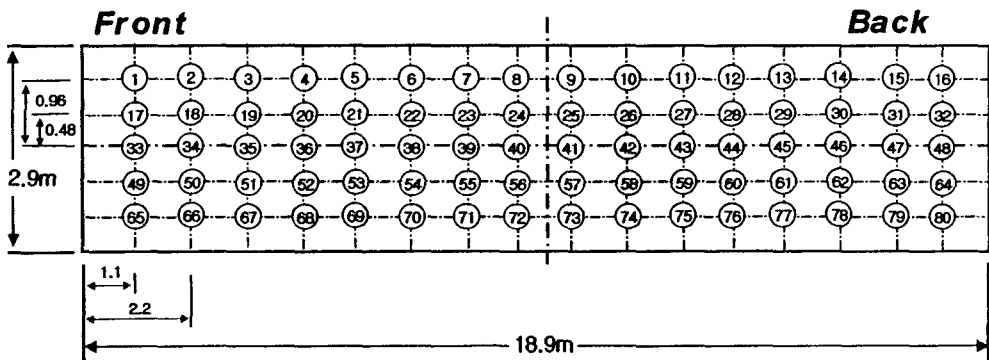


Fig. 2. 전동차내 수평 온도 및 습도 분포 측정위치 (m)

그림 3에 전동차의 유동해석에 사용된 계산모델을 나타내었다. 전동차 내부 공조기의 위치가 좌우 대칭이므로 유동을 해석하기 위해서 전체 객실의 1/2만 모델링하고, 경계조건으로 대칭 조건을 주었다. 모델링은 직교좌표계를 사용했으며, 계산 격자는 tetrahedral을 이용하여, 경계조건을 포함한 전체계산 셀의 수는 약 130,000개로 구성하였다. 유동해석은 74번의 반복계산을 거쳐 수렴하였으며, 계산수렴에 9시간 정도가 소요되었다. 표 1에 전동차 해석 경계조건을 나타내었다. 천장에 위치한 유입구에는 Velocity Inlet 조건을 주고, 유속은 0.51 m/sec, 온도는 10 ℃, 난류강도는 10 %로 하였다. 리턴그릴은 Out-flow로 외부압력(대기압) 조건을 주었으며, 전체 유량이 배출되게 하였다. 전동차 벽면은 Wall로 처리하고, 단열조건을 주었으며, 온도는 25 ℃로 설정하였다.

유동해석 결과 전동차 중앙 통로 쪽으로 향하는 슬롯에 의해 유입된 공기는 중앙 통로로 하강하여 바닥을 거쳐 창문과 측면을 따라 상승하다가 천장의 리턴그릴로 순환되는 흐름을 보였다. 또 다른 슬롯에 의해 유입된 공기는 선반 쪽으로 향한 후 창문을 타고 내려오다가 중앙으로의 순환을 보였다. 그림 4에 전동차 측면에서의 속도분포를 나타내었다. 그림 3의 전동차 계산모델에서 return grill이 위치한 곳의 속도분포가 지배적인 것을 알 수 있었다. 그림 5에 전동차 수직 온도분포 측정위치별(지표면에서 0.7, 0.9, 1.2, 1.7 m) 온도분포를 제시하였다. 그림에서 온도분포가 뚜렷하게 구분되는 것을 볼 수 있다. 이것은 return grill에 의해 형성된 속도분포에 의해 다른 곳보다 다소 높은 공기가 배기되면서 나타난 형상으로 보여지며, 기온분포도는 지표면에서 상층으로 올라갈수록 기온차이가 더 심해지는 것으로 나타났다.

Table 1. 전동차 전산유체해석 경계조건

Boundary Conditions	Position	Values
Velocity Inlet	Ceiling	- Velocity : 0.51 m/sec - Temperature : 10 ℃ - Turbulence intensity : 10 %
Out-flow (Return grill)	Ceiling	- Out pressure (atmospheric pressure) - 100 % of flow
Wall	Train body	- Adiabatic condition - Temperature : 25 ℃

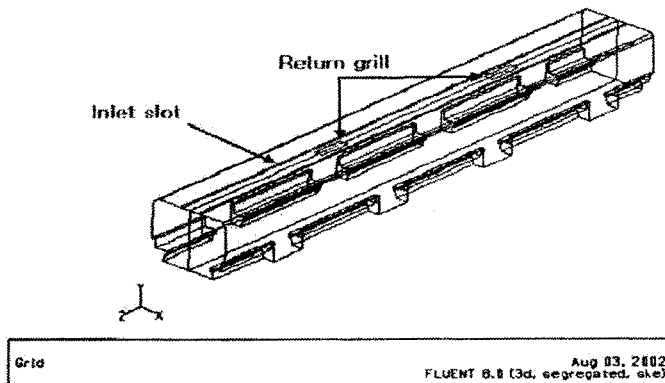


Fig. 3. 전산유체해석에 사용된 전동차 계산모델

#### 4. 측정결과 및 고찰

표 2에 전동차내 수직 및 수평 온도분포 측정결과를 나타내었다. 표에서 H는 전동차 바닥 면에서의 측정 높이를 의미하고, W는 전동차의 진행방향을 기준으로 가로축을 L은 1.1 m 간격으로 나눈 세로축을 의미한다. 그림 6 a)에 전동차 바닥 면에서 0.7 m 높이에서 측정한 기온의 분포를 2D로 도식화하였다. 측정결과 0.7 m 높이에서 기온이 가장 높은 곳은 L=7.7 m, W=-0.48 m 지점이었으며, 가장 기온이 낮은 곳은 L=17.6 m, W=+0.48 m 지점인 것으로 조사되었다.

그림 6 b)는 0.9 m 높이에서의 온도분포 측정결과로서 그림 6 a)와는 다소 다른 분포 특성을 보이는 것으로 나타났다. 그림 6의 온도분포 측정결과를 유동해석 결과인 그림 5와 비교해보면 온도분포 특성에 약간의 차이가 있는 것을 알 수 있다. 그림 6에서 최대 온도가 나타난 지점은 전동차 천장에 return grill이 위치한 곳인 L=6과 7 사이이지만 전동차의 측면에서 볼 때 또 다른 return grill이 위치한 대칭지점인 L=11과 12 사이에 고온의 온도분포가 형성되지 않았다. 이것은 측정 대상 전동차의 환기용량의 불균형 때문으로 판단되며, 향후 보다 많은 측정과 면밀한 분석이 요구된다.

#### 5. 결론

전동차에서 쾌적성을 평가하기 위해서 비교적 정량화가 쉬운 기온과 습도를 대상으로 기초연구를 수행하였다. 전동차 내부의 유동은 강제환기에 의존하므로 3D 전산유체해석 프로그램으로 전동차 내부의 환기특성과 유동을 파악하였다. 해석결과 전동차 내부의 유동은 천정의 return grill에 의해 지배되는 것을 알 수 있었다. Datarogger를 이용해서 실측한 탑승 승객의 위치를 기준으로 0.7, 0.9, 1.2, 1.7 m의 높이에서 기온과 습도의 분포를 측정하였다. 실측치와 예측치를 비교해본 결과 다소 상이한 결과를 나타내었다. 보다 많은 측정과 면밀한 분석이 선행되어야 하겠지만 이것은 환기시스템에 의해 전동차 내부의 온도분포가 다소 불평형을 이루는 것으로 사료되어진다.

본 연구는 전동차 내부의 쾌적감을 평가하기 위한 선행 연구로서 향후 기온과 습도 이외에 기류속도와 인간과 주위의 6가지 열환경 요소를 이용한 온열감 평가지표인 예상 온열감(PMV, Predicted Mean Vote) 등을 구하여 보다 정량화된 결과를 도출하고, 쾌적성 지표와 HVAC 시스템과의 상관성을 구명하여 전동차 내부의 온도 및 기류속도 편차의 원인을 규명하여 이용 승객이 보다 쾌적하게 이용할 수 있게 하고자 한다.

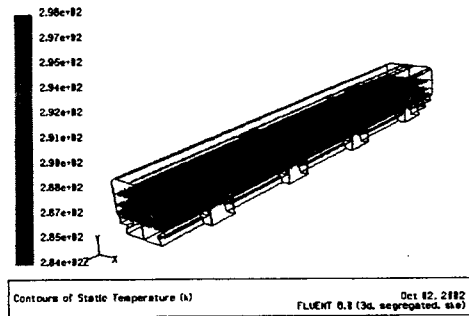
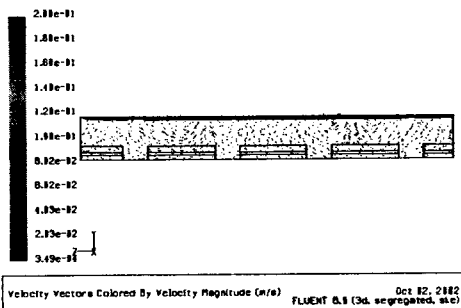


Fig. 4. 전동차 측면에서의 속도분포

Fig. 5. 전동차 높이별 측정위치에서의 온도분포

Table 2. 전동차내 수직 및 수평 온도분포 측정결과 (H·L·W=m, 온도=℃)

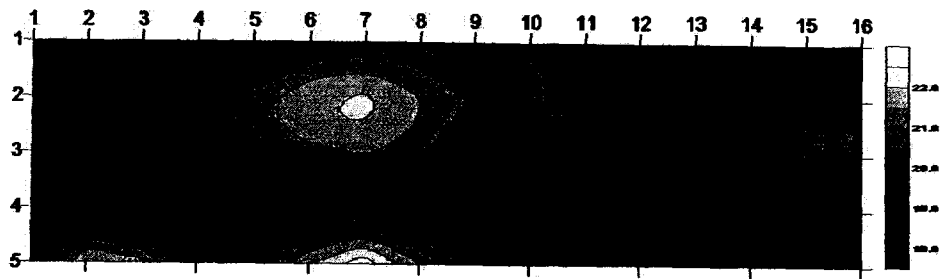
H \ W		L																
		1.1	2.2	3.3	4.4	5.5	6.6	7.7	8.8	9.9	11.0	12.1	13.2	14.3	15.4	16.5	17.6	
H = 0.7	W =	-0.96	20.5	18.8	18.3	17.6	18.9	20.3	20.5	20.4	19.7	20.4	19.3	18.1	17.7	18.1	18.2	18.5
		-0.48	20.2	20.3	20.5	20.9	21.4	21.9	22.1	21.5	21.0	20.9	19.9	19.3	19.5	19.7	20.1	20.0
		Center	19.7	19.0	19.2	19.8	20.7	21.3	21.6	21.1	20.2	19.9	18.9	19.0	19.7	20.2	20.6	20.6
		+0.48	19.5	19.2	18.8	18.2	19.2	19.5	20.1	19.4	19.5	19.9	19.5	19.7	19.2	18.1	17.9	17.5
		+0.96	19.2	22.2	21.7	19.9	20.7	22.0	22.9	21.6	20.3	19.8	20.1	20.6	19.0	19.2	20.3	20.6
H = 0.9	W =	-0.96	20.1	19.3	19.1	18.8	20.0	20.5	21.1	21.0	20.1	19.9	18.8	18.6	18.7	19.0	19.4	18.9
		-0.48	19.4	20.2	20.0	19.9	19.7	19.6	19.4	19.4	19.4	19.7	19.3	19.7	18.9	17.9	17.4	17.1
		Center	17.8	19.4	19.8	20.0	20.3	20.0	19.7	19.2	18.6	19.5	19.2	20.5	20.4	19.0	18.0	17.0
		+0.48	20.0	20.3	20.8	21.6	22.0	22.4	22.4	21.6	20.4	20.0	19.4	20.3	21.2	21.4	21.2	20.3
		+0.96	20.3	20.0	19.9	19.5	20.3	20.7	20.9	20.8	20.1	19.8	19.0	18.4	17.9	18.0	18.0	18.5
H = 1.2	W =	-0.96	19.7	21.6	21.8	21.5	21.0	20.8	20.8	20.6	20.7	21.0	20.7	20.8	20.2	19.4	19.1	18.6
		-0.48	20.0	19.4	19.8	20.7	21.7	22.2	22.3	21.9	21.3	20.9	20.0	19.6	20.0	20.2	20.3	20.1
		Center	19.5	19.8	20.3	21.0	21.5	21.6	21.5	21.1	20.0	19.9	19.6	20.0	20.3	20.2	19.6	19.4
		+0.48	17.6	17.8	18.4	19.3	20.2	20.6	20.8	20.1	19.0	18.4	17.5	18.5	19.7	19.9	19.4	18.6
		+0.96	20.2	20.3	20.1	19.8	20.6	20.9	21.5	21.1	20.5	21.3	20.7	19.9	19.7	18.9	19.4	19.5
H = 1.7	W =	-0.96	20.4	22.6	22.6	22.0	22.1	20.2	19.8	19.5	19.3	20.2	20.8	21.9	21.2	19.5	18.3	17.0
		-0.48	19.1	18.8	18.8	19.6	19.8	20.2	20.3	20.2	19.2	19.3	18.6	18.1	18.5	18.3	18.4	18.4
		Center	17.0	17.7	18.4	19.0	20.3	20.6	20.4	20.2	18.9	19.2	18.1	18.3	18.8	18.5	18.0	18.1
		+0.48	20.1	20.1	20.1	20.8	21.6	21.5	21.7	21.5	20.8	20.7	20.2	20.6	20.5	19.9	19.4	18.6
		+0.96	19.8	20.9	20.7	21.5	21.4	21.5	21.5	21.0	20.9	20.5	19.8	19.6	19.8	19.8	19.9	18.8

주) H = height (높이), L = length (가로축), W = wide (세로축)

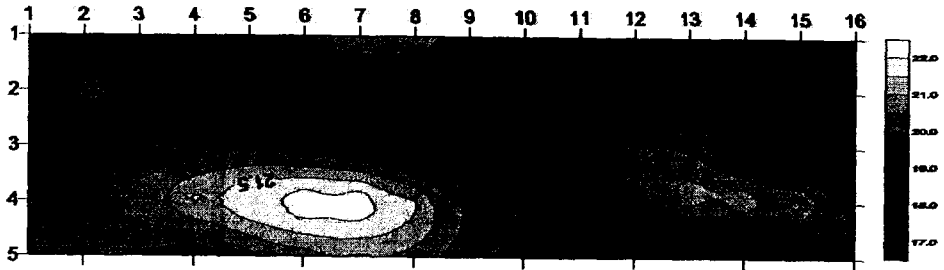
Table 3. 전동차내 수직 및 수평 습도분포 측정결과 (H·L·W=m, 습도=%)

H \ W		L																
		1.1	2.2	3.3	4.4	5.5	6.6	7.7	8.8	9.9	11.0	12.1	13.2	14.3	15.4	16.5	17.6	
H = 0.7	W =	-0.96	56	68	61	60	61	60	72	67	69	58	67	60	58	67	74	74
		-0.48	55	69	60	61	60	61	73	66	68	57	65	58	58	69	76	75
		Center	57	70	61	62	61	62	75	67	69	55	65	58	58	69	76	75
		+0.48	59	72	64	64	64	64	78	69	61	57	66	60	60	71	77	75
		+0.96	53	65	57	57	57	57	57	64	57	52	62	55	55	64	71	69
H = 0.9	W =	-0.96	57	69	64	63	64	63	72	65	58	59	67	60	59	68	75	73
		-0.48	57	70	63	63	63	63	74	65	58	59	65	58	60	70	77	73
		Center	58	71	64	64	64	64	75	66	59	58	65	58	60	71	77	73
		+0.48	60	73	67	67	67	67	78	68	61	58	66	60	61	72	78	74
		+0.96	54	66	58	58	58	58	70	62	56	52	62	55	55	66	72	68
H = 1.2	W =	-0.96	60	70	59	65	59	65	73	64	57	60	66	71	61	70	75	71
		-0.48	61	71	58	65	58	65	73	64	56	61	65	72	62	71	77	72
		Center	62	72	58	60	58	66	75	64	56	60	65	72	62	72	78	72
		+0.48	64	74	61	69	61	69	78	67	60	61	66	73	62	72	78	73
		+0.96	57	66	55	62	55	62	71	60	58	54	61	67	56	67	72	67
H = 1.7	W =	-0.96	62	73	56	67	56	67	72	63	57	61	65	70	63	72	75	70
		-0.48	62	73	57	67	57	67	72	63	56	62	64	70	64	74	76	71
		Center	64	74	57	68	57	68	74	63	56	63	64	71	65	75	77	71
		+0.48	67	77	59	71	59	71	76	65	59	64	65	72	66	76	77	71
		+0.96	60	71	52	64	52	64	70	60	55	57	59	66	60	69	71	66

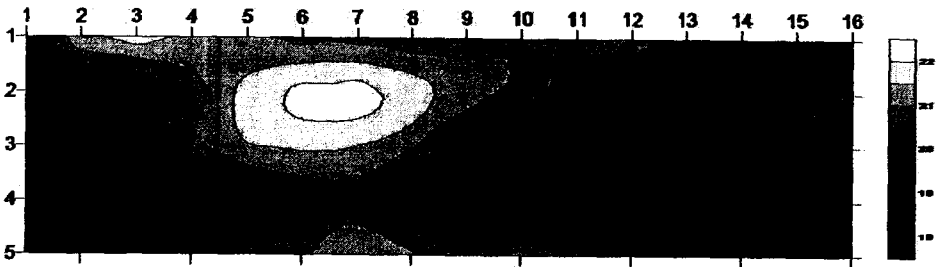
주) H = height (높이), L = length (가로축), W = wide (세로축)



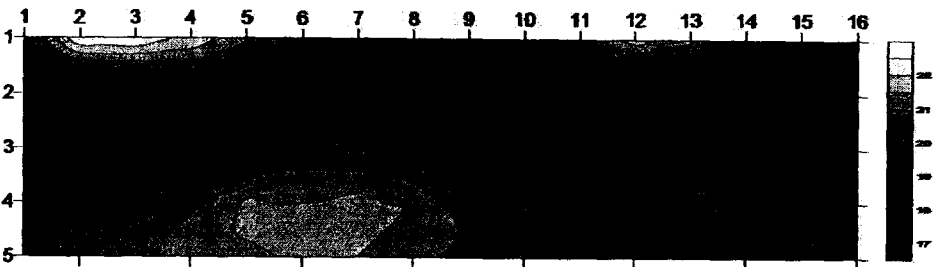
a) 지표면에서 0.7 m 높이



b) 지표면에서 0.9 m 높이



c) 지표면에서 1.2 m 높이



d) 지표면에서 1.7 m 높이

Fig. 6. 전동차내 수직 측정 위치에서의 2D 온도분포

## 참고문헌

- [1] 이철희, 배귀남, 최항철, 이춘식 (1994) 여름철 사무실내 온열환경 특성 및 쾌적성 평가, 공기조화·냉동공학 논문집 6(9) pp206-217.
- [2] 조용, 권혁승, 김성현, 김영일 (2000) 사무실 공간의 냉방시 천장 및 바닥 급기 풍조 방식에 따른 열환경 평가 실험, 설비공학 논문집 12(9), pp. 810-816.
- [3] 최익순, 정광섭, 박영철, 한화택, 이정재 (2001) 개별공조시스템(PACS)을 적용한 작업공간에서의 온열환경 특성 및 쾌적성 평가, 설비공학 논문집 13(2), pp106-114.
- [4] 최익순, 정광섭, 박영철, 한화택, 이정재 (2001) PMV 지표에 의한 개별 공조시스템(PACS)의 쾌적성 평가에 관한 연구, 설비공학 논문집 13(7), pp. 647-652.
- [5] 한국과학기술연구원 (1994) 실내환경 쾌적성 평가방법에 관한 연구(Ⅱ)-온열 및 공기질에 대하여, 과학기술처.
- [6] 한국철도기술연구원 (2002) 실내 쾌적성 향상 기술 개발, 철도청.
- [7] 한국철도기술연구원 (2002) 객실 실내 공기질 향상 방안에 관한 연구, 철도청.
- [8] Hiroyuki, T., M. Ishizaki, Y. Hirota, J. Hiram and K. Nagase (1998) A Study on Evaluation of Comfortableness in Passenger Room of Trains, *J-Rail '98*, pp. 393-396.
- [9] Melikov, A.K., U. Kruger, G. Zhou, T. L. Madsen and G. Langkilde (1997) Air Temperature Fluctuations in Rooms, *Building and Environment*, 32(2), pp. 101-114.