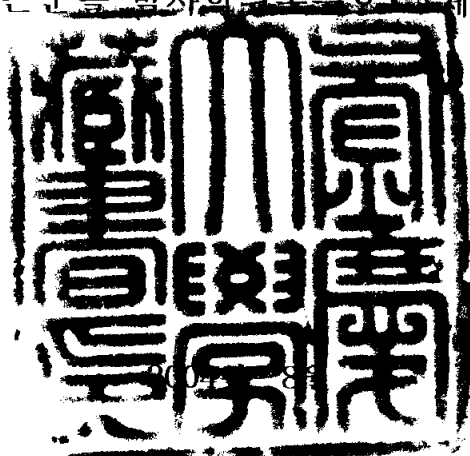


공학박사 학위논문

학교건물의 열·공기환경 특성에
관한 연구

지도교수 금 종 수

이 논문을 박사학위논문으로 제출함



부경대학교 대학원

냉동공조공학과

안 철 린

안철린의 공학박사 학위논문을 인준함

2004년 8월 31일

주	심	공학박사	최	광	환
위	원	공학박사	박	효	순
위	원	공학박사	박	종	일
위	원	공학박사	이	석	모
위	원	공학박사	금	중	수



목 차

List of Tables	vi
List of Figures	viii
Nomenclatures	xii
Abstract	xv
제 1 장 서론	
1.1 연구배경	1
1.2 연구동향	2
1.3 연구목적	6
1.4 연구내용 및 방법	7
제 2 장 실내 환경의 쾌적성에 관한 기초이론	
2.1 환경과 인간	11
2.2 온열환경	12
2.2.1 인체의 열핑형	12
2.2.2 온열환경 요소	13
2.2.3 국부적 불쾌감	19
2.2.4 온열환경의 평가지표	21
2.2.5 온열환경의 쾌적범위	28

2.3 공기환경	30
2.3.1 실내 오염물질의 발생원	30
2.3.2 환기에 의한 공기질 제어	32
2.3.3 환기 성능평가 방법	34
2.3.4 환기효율 지표	37
2.3.5 실내 필요 환기량	43
2.4 학교건물의 실내 환경기준	47
세 3 장 학교건물의 특성 및 냉난방시설 현황조사	
3.1 현황조사의 개요	50
3.1.1 배경 및 목적	50
3.1.2 조사방법 및 범위	50
3.2 학교건물의 특성	52
3.2.1 학교건물의 규모	52
3.2.2 학교 유형별 재실시간	53
3.2.3 냉난방부하 특성	54
3.3 냉난방시설 현황 분석	58
3.3.1 교실 냉난방시설 현황	58
3.3.2 냉난방 방식별 시설 현황	59
3.3.3 학교 급별 냉난방시설 현황	61
3.3.4 지역 유형별 냉난방시설 현황	62
3.3.5 기후 지역별 냉난방방식 현황	64
3.4 요약	66

제 4 장 학교건물의 온열환경 분석

4.1 실험대상 학교와 측정방법	68
4.1.1 실험 개요	68
4.1.2 실험대상 학교의 구조	68
4.1.3 측정 기자재	71
4.1.4 측정방법	72
4.2 동절기 온열환경 측정	77
4.2.1 상하 온도차 비교	77
4.2.2 수평면 온도차 비교	77
4.2.3 기류 분포 분석	80
4.2.4 예상온열감(PMV) 분포	81
4.2.5 공기확산성능계수(ADPI)	83
4.3 하절기 온열환경 측정	85
4.3.1 상하 온도차 비교	85
4.3.2 수평면 온도차 비교	87
4.3.3 기류 분포 분석	88
4.3.4 예상온열감(PMV) 분포	89
4.3.5 공기확산성능계수(ADPI)	91
4.4 온열환경에 대한 설문조사	92
4.4.1 조사 개요	92
4.4.2 난방시 설문조사 결과 및 고찰	93
4.4.3 냉방시 설문조사 결과 및 고찰	99
4.5 천장형 냉난방기 기류각도 수치해석	105

4.5.1 개요	105
4.5.2 수치해석	106
4.5.3 기초 이론	107
4.5.4 해석 모델	109
4.5.5 천장형 히트펌프의 구성 및 경계조건	110
4.5.6 거주영역의 쾌적도	113
4.5.7 난방시 취출각도에 따른 열환경 분석	114
4.5.8 냉방시 취출각도에 따른 열환경 분석	120
4.6 요약	126

제 5 장 학교건물의 공기환경 분석

5.1 실험대상 학교와 측정방법	128
5.1.1 실험개요	128
5.1.2 실험대상 학교	129
5.1.3 환기장치 구성	130
5.1.4 측정 장치	132
5.1.5 측정방법	133
5.1.6 단위교실의 자연환기량 측정	135
5.2 실험결과 및 고찰	139
5.2.1 환기장치 미가동시 이산화탄소 변화	139
5.2.2 환기장치 가동시 이산화탄소 변화	140
5.3 환기량 분석 결과	144
5.4 급기구 위치에 따른 환기효율 특성	146

5.5 요약	149
제 6 장 결론	
6.1 전체 결론	151
6.2 향후 연구과제	155
참고문헌	156

List of Tables

Table 2.1 Thermal environment factors	14
Table 2.2 Typical metabolic heat generation for various activity	18
Table 2.3 Classification of thermal environment evaluation index	21
Table 2.4 Comfort range of indoor thermal environment	28
Table 2.5 Sources and influences of indoor contaminant	31
Table 2.6 Recommended ventilation air flow rate for comfort control	44
Table 2.7 Minimum ventilation rate requirements in school buildings	45
Table 2.8 Guidelines for environmental design in classrooms	49
Table 3.1 Status of class scale	52
Table 3.2 Stay time in the classroom by the school	53
Table 3.3 Input data for load calculation by the classroom	55
Table 3.4 Results on heating & cooling load calculation by the classroom	55
Table 3.5 Status of heating & cooling by the school	58
Table 3.6 Status of equipment by the heating & cooling method	60
Table 3.7 Status of heating & cooling equipment by the school	61
Table 3.8 Status of heating & cooling equipment by region	63
Table 3.9 Status of heating & cooling equipment by climatic area	65
Table 4.1 The summary of model school buildings	69
Table 4.2 The summary of classrooms	70
Table 4.3 Specification of measurement equipments	71

Table 4.4 Scale of TSV	92
Table 4.5 Findings on survey of floor type FCU in heating	93
Table 4.6 Findings on survey of 4-way ceiling type in heating	93
Table 4.7 TSV for each position in heating	97
Table 4.8 Findings on survey of floor type FCU in cooling	99
Table 4.9 Findings on survey of 4 way ceiling type in cooling	99
Table 4.10 TSV for each position in cooling	103
Table 4.11 Experimental knowledge of k ε model & P_r number	109
Table 4.12 Velocity data of diffusion gate	112
Table 5.1 Description of school building	130
Table 5.2 Specification of Measurement Equipment of IAQ	132
Table 5.3 Measurement schedule & method to the school hours	134
Table 5.4 Results on natural ventilation in the classroom	138
Table 5.5 Results of measurement for CO ₂ density to the amount of ventilation	144

List of Figures

Fig. 1.1 Flow chart of the present study	10
Fig. 2.1 Interaction between environment and human	11
Fig. 2.2 Heat transfer between thermal environmental element and human body	12
Fig. 2.3 Effective temperature of typical indoor clothing condition	22
Fig. 2.4 Chart of new effective temperature	23
Fig. 2.5 Relationship between PMV and PPD	27
Fig. 2.6 Concept of spread air and the room mean age	35
Fig. 2.7 Room mean age of the frequency distribution curve	36
Fig. 2.8 Ventilation effectiveness in the breathing zone of spaces ventilated in different ways	40
Fig. 3.1 Results on heating & cooling load calculation by the classroom	56
Fig. 3.2 Status of heating & cooling by the school	59
Fig. 3.3 Status of equipment by the heating & cooling method	60
Fig. 3.4 Status of heating & cooling equipment by the school	62
Fig. 3.5 Status of heating & cooling equipment by region	63
Fig. 3.6 Heating degree days in Korea	64
Fig. 3.7 Status of heating & cooling equipment by climatic area	65
Fig. 4.1 The plane of classrooms	70
Fig. 4.2 Data logger	71
Fig. 4.3 Air velocity	71
Fig. 4.4 Measuring points for temperature and airflow	73

Fig. 4.5 Schematic of measurement system	74
Fig. 4.6 Complete view of experiments	74
Fig. 4.7 Measurement systems	75
Fig. 4.8 Schematic of air current measurement system	76
Fig. 4.9 Air current measurement system	76
Fig. 4.10 Vertical temperature distribution	78
Fig. 4.11 Horizontal temperature distribution (F.L+1.1m)	79
Fig. 4.12 Horizontal air current distribution (F.L+1.1m)	80
Fig. 4.13 PMV distribution according to air conditioning type	82
Fig. 4.14 T_{eff} distribution according to air conditioning type	84
Fig. 4.15 Vertical temperature distribution	86
Fig. 4.16 Horizontal temperature distribution (F.L+1.1m)	87
Fig. 4.17 Horizontal air current distribution (F.L+1.1m)	88
Fig. 4.18 PMV distribution according to air conditioning type	90
Fig. 4.19 T_{eff} distribution according to air conditioning type	91
Fig. 4.20 TSV in heating	94
Fig. 4.21 LTSV in heating	95
Fig. 4.22 Claims for modification of fixing temperature in heating	96
Fig. 4.23 TSV for each position in heating	98
Fig. 4.24 TSV in cooling	100
Fig. 4.25 LTSV in cooling	101
Fig. 4.26 Claims for modification of fixing temperature in cooling	102
Fig. 4.27 TSV for each position in cooling	104
Fig. 4.28 Flow chart for numerical	107
Fig. 4.29 Model of the numerical simulate	110

Fig. 4.30 Formation mesh in the numerical	110
Fig. 4.31 Sketch of the ceiling type air conditioner	111
Fig. 4.32 Diffusion angle of the ceiling type air conditioner	111
Fig. 4.33 Indoor air temperature change in winter	114
Fig. 4.34 Vertical temperature distribution in winter	115
Fig. 4.35 Horizontal temperature distribution in winter	116
Fig. 4.36 Vertical stream distribution in winter	118
Fig. 4.37 Vertical stream distribution in winter	119
Fig. 4.38 Indoor temperature change in summer	120
Fig. 4.39 Vertical temperature distribution in summer	121
Fig. 4.40 Horizontal temperature distribution in summer	122
Fig. 4.41 Vertical stream distribution in summer	124
Fig. 4.42 EDT distribution in summer	125
Fig. 5.1 Plane of the ventilating system	131
Fig. 5.2 Photograph of the ventilating system	131
Fig. 5.3 Multi gas monitor	133
Fig. 5.4 Photograph of IAQ Measurement in the classroom	134
Fig. 5.5 Results of measurement for density of CO ₂ during shutdown	139
Fig. 5.6 Results of measurement for density of CO ₂ [350 CMH ventilation device]	140
Fig. 5.7 Results of measurement for density of CO ₂ [500 CMH ventilation device]	141

Fig. 5.8 Results of measurement for density of CO ₂ [850 CMH ventilation device]	142
Fig. 5.9 Results of measurement for density of CO ₂ [1,000 CMH ventilation device]	143
Fig. 5.10 Relations between amount of ventilation and density of CO ₂	145
Fig. 5.11 Schematic diagram of a classroom	146
Fig. 5.12 Schematic diagram for an optimum location of a supply diffuser	147
Fig. 5.13 A supply effectiveness with distance between heat pump and supply diffuser	148

Nomenclatures

Alphabetic

C	Convection heat loss	[W/m ²]
clo	Clothing level	[-]
C _p	Specific heat under constant pressure	[J/kg · K]
C _{res}	Rate of convective heat loss from respiration	[W/m ²]
d	Production of diffusion substance	[1/s]
D _m	Diffusivity	[m ² /s]
DBT	Dry bulb temperature	[°C]
E _{sk}	Rate of total evaporative heat loss from the skin	[W/m ²]
E _{res}	Rate of evaporative heat loss from respiration	[W/m ²]
F _{pi}	Angle factor between person and surface A _i	[-]
F _{ni}	Angle factor between person and surface A _i at a certain direction	[-]
g _i	Degree of acceleration	[m/s ²]
H	Specific enthalpy	[J/kg]
k	Turbulent energy	[m ² /s ²]
K	Thermal conductivity	[J/m · s · K]
M	Rate of metabolic energy production	[W/m ²]
met	Metabolism	[W/m ²]
MRT	Mean radiant temperature	[°C]
p	Pressure of fluid	[N/m ²]
q	Caloric value	[J/m ³ · s]

Q	Air volume	[m ³ /h]
R	Gas constant	[J/kg·K]
RH	Relative humidity	[%]
t	Temperature	[°C]
T	Temperature of fluid of solid	[K]
T _o	Standard temperature of fluid	[K]
T _r	Mean radiant temperature	[°C]
u _i	Fluid velocity in the direction of x _i	[m/s]
v	Air velocity	[m/s]
V	Volume of room	[m ³]
W	Mechanical work load	[W/m ³]
x _i	Unit coordinates	[m]

Greek Letters

a_c	Convective heat transfer coefficient	[kcal/m ² ·h·°C]
a_r	Radiant heat transfer coefficient	[kcal/m ² ·h·°C]
β	Body surface coefficient of expansion	[1/K]
η	Coefficient of air change performance	[-]
ρ	Density of fluid or solid	[kg/m ³]
μ	Coefficient of viscosity	[kg/m·s=Pa·s]
μ_i	Intrinsic viscosity	[kg/m·s=Pa·s]
μ_r	Eddy viscosity	[kg/m·s=Pa·s]
ϵ_p	Local air change index	[%]
ϵ_a	Air change efficiency	[%]

$\bar{\tau}_p$	Local mean age of air	[sec]
$\langle \tau \rangle$	Room mean age of air	[sec]
$\phi(t)$	Age of Distribution	
$\Phi(t)$	Cumulative age distribution	

Subscript

a	Air
b	Back
c	Convection
cl	Cloth
d	Down
e	Evaporation
ex	Exhaled air
f	Front
l	Left
r	Radiant
ri	Right
res	Respiration
s	Standard environment
sk	Skin
u	Up

Study on the Characteristics of Thermal Environment and Air Quality in School Buildings

Chul Lin Ahn

Department of Refrigeration & Air Conditioning Engineering,
The Graduate School, Pukyong National University

Abstract

The ratio of the students in elementary, middle and high schools occupies about 27% of the total Korean population. Their mental and physical growth is the most active during these ages. And as students spend most of their time at schools from elementary schools to high schools, the healthy and comfortable environment is necessary for them.

The improvement of the school facilities' comfort should be considered as the most important element to increase students' learning ability and teachers' efficiency.

In this study, the efficiency of the environmental materialization of the school facilities is evaluated for the improvement of thermal environment and air quality in school buildings. And by the analysis of the problems about air conditioning system, this study provides various materials of the healthy and comfortable thermal environment.

Air conditioning system in school buildings is related to the school scale, and 35% of the researched schools have less than 10 classrooms among the 10,188 schools in Korea. The LOADSYS is used to grasp the characteristics of school building heating and cooling load. After study, the amount of cooling load showed more than 2.4 times as big as heating load in the school of all area. This is the best feature in the school buildings, and because a number of students are in the small space.

For thermal characteristics research in classrooms, we measured thermal and air distribution in classrooms, such as radiation heating, floor type FCU, and 4 way ceiling type air conditioning system. And thermal sensation analysed by evaluation items such as ADPI, PMV, PPD according to ISO 7730 and ASHRAE standards 55-92 for estimate of comfortable thermal environment. To survey response about the thermal environment, 100 students had question research. In this research, 4-way ceiling type is excellent in TSV and LTSV in summer and winter.

This study investigated several cases by numerical method to search the most proper diffusion direction in ceiling type air conditioner. And diffusion direction was invested in 15°, 30°, 45°, 60°. The velocity and temperature distribution of air in the room calculated by 3-dimensional method, which include the effect of insulation of the building and sunlight. This analysis shows that optimum diffusion direction is 30° in winter and 15° in summer to

increase thermal comfort.

To improve air quality in school classrooms, polluted indoor air should be improved by efficient ventilation systems. So it is important to measure the amount of ventilation needed in classrooms. The amount of natural ventilation which were measured through a tracer gas method is shown 155m³ for hour, and the number of ventilation is 0.89 times for hour.

And we have established a heat recovery ventilation system from 4 cases of airflow in classrooms, and we have measured the change of CO₂ density. According to air quality measurements in the classrooms, the density of CO₂ is 70% well above environmental standards which are 1,000 ppm. When the amount of ventilated airflow increases, indoor air quality is improved. It is surveyed that the most suitable amount of external inducted air is 25.7 CMH for person to satisfy CO₂ less than 1,000 ppm in classrooms.

When operating both air conditioner and ventilating system in classrooms, supply diffusers would set in near ceiling type air conditioner, and supply diffusers would be arranged in a diagonal direction from ceiling type air conditioner for improvement of thermal environment and ventilating performance.

Key words : School building, Thermal environment, Air quality, Heat recovery ventilation, Ventilating performance

제 1 장 서론

1.1 연구배경

우리나라 전체 인구에서 초·중등 학생들이 차지하는 비율은 약 27%정도이며, 이 시기에 신체와 정신의 성장발육이 가장 왕성하다. 그리고 초등학교에서 고등학교에 이르기까지 많은 시간을 학교 내에서 생활하고 있으므로 이들이 생활하는 공간인 학교의 환경을 개선하여 심리적, 정서적으로 안정된 건강하고 쾌적한 환경을 만들어 주어야 한다. 이러한 적극적인 시도는 결과적으로 학생들의 건강을 증진시키고 학교 교육과정에서의 학습능률을 높일 수 있는 방안이 될 수 있을 것이다.

그동안 우리나라는 경제성장이라는 우선적인 국가정책과제의 추진에 의해 교육시설 개선을 위한 투자가 충분치 않았으며, 도시화에 따라 급격히 증가하는 학생을 수용하기에 급급한 실정이었다.

한국교육개발원에서 학생들을 대상으로 실시한 설문조사에 의하면 학교에서 생활하기에 가장 불편한 것으로 “교실이 수업하기에 춥거나 더운점”으로 조사되었고, 교사들을 대상으로 실시한 설문조사에 의하면 “교실에 냉·난방설비가 필요하다”가 1순위로 가장 높게 나타나는 등 온열환경 개선에 대한 요구가 증대되고 있으나, 아직 까지 경제성장에 따른 생활수준의 향상과 국민들의 교육에 대한 관심에 비해 학교의 시설환경은 열악한 실정이다[1].

학교건물은 특징상 좁은 공간에 많은 학생들이 생활하고 있으므로 단위면적당 채실인원이 많고, 최근 신축되는 학교건물의 경우 냉난방시설에 따른 건축물의 기밀성 향상과 더불어 건축 내장재 등에서 발생하는 오염원의 다양화로 실내 공기오염이 증가하고 있다. 이러한 물질들은 농도가 매우 낮

기 때문에 쉽게 김출되지 않으며, 환기량이 부족할 경우 불편감이 증대되어 학생들의 건강과 학습능력향상에 커다란 지장을 주고 있다.

학교건물에 있어서 쾌적성의 향상은 학생들의 학습능률과 교사들의 업무능률을 향상시킬 수 있는 중요한 요소로서 학교건물에 있어서 가장 우선적으로 고려되어야 한다.

학교건물의 쾌적한 실내환경을 만들기 위해 세계 여러 나라에서는 학생들이 생활하는 공간에 대한 환경위생기준을 실의 용도에 따라 규정하고 있으며, 우리나라에서도 선진국보다는 늦었지만 새로운 교육과정의 운영과 쾌적한 학습환경의 요구에 따라 OECD 국가수준에 걸 맞는 교육환경을 조성하기 위하여 2002년 4월 기존의 “학교보건법”을 개정하고, “학교보건법 시행규칙”을 제정하여 “교실의 환경위생기준”을 설정하였다. 이에 따라 학교 교실의 온도, 환기, 이산화탄소, 미세먼지 등의 공기질 제어를 통하여 쾌적한 환경을 조성하도록 하고 있다. 또한, 기존 학교에 관한 경과조치로서 이 기준에 미달되는 학교는 5년 이내에 기준에 적합하게 보완하도록 하고 있다[2].

따라서 학교 교실에서 형성되는 실내환경에 중요한 영향을 미치고 있는 온열 및 공기환경에 대한 현황과 문제점을 분석하고 개선방안을 제시하기 위한 기초자료의 제공이 시급한 실정이다.

1.2 연구동향

인간은 주위 환경으로부터 상당히 복잡한 과정을 거쳐 쾌적한 상태를 느끼게 되는데, 이러한 인간의 쾌적감과 온열환경 사이의 관계를 파악하기 위한 연구는 19세기 말 유럽과 미국 등에서 시작되었다[3,4]. 그 후 인간이 가장 직접적으로 느끼는 실내의 기온, 습도, 기류, 복사 등의 물리적 환경과 인간의 쾌적감각과의 상관성을 밝혀내려는 다양한 연구가 지속적으로 수행

되었다[5,6,7,8,9,10].

학교건물의 실내환경에 대해서 C. L. Anderson과 William H. Creswell 은 1980년 "School health practice"를 통하여 교실의 온도와 습도의 기준을 계절별로 제시하고, 환기, 조명에 대하여 정리 하였다[11]. Donald B. Stone, Lawrence B. Stone, James D. Brown은 1983년 초등학교 교실의 난방, 환기, 조명, 소음에 대한 기준을 제시하였고[12], Marion B. Pollock, Kathleen Middseton은 1994년 난방, 환기, 조명에 대한 학교건강지침에 대하여 발표 하였다[13]. 1999년 W. Edward Montz 등은 고등학교 교실에서 여러 가지 실내공기 오염을 유발시키는 건축상의 문제에 대하여 정리하였고[14], C. L. Henckel 등은 학교 교실의 공기질을 분석하고 오염물질을 저감할 수 있는 건물요소에 관해서 발표하였다[15].

미국환경보호청 (USEPA)에서는 2000년에 학교의 실내공기질과 학습성적과의 관련성에 관해서 보고서를 발표하고 온도와 습도, 실내 공기질은 건강에 중요한 요소로서 열악한 실내 공기질 (Poor indoor air quality)은 학생들의 집중력, 계산력, 기억에 영향을 주고 있다고 하면서 사례를 제시하고 있다. 또한 학교의 실내공기질을 양호하게 유지하기위한 지도요강 "IAQ Tools for Schools Kit"을 공포하였다[16].

일본에서는 1902년 Misima 교수의 태양열 수열면에서 북측편북도 교실이 유리하다는 발표로 일본 정부에서는 북측편북도 교실로 학교를 건립토록 하였는데[17], 1991년 Akira Hoyano가 남향교실 재검토 및 북향교실의 제안에 의해서, 그리고 북향교실의 공학적 열환경 연구 및 남향교실과 북향교실의 열환경 특성에 대해 정량적으로 분석되면서 이 분야에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 또한 1992년 Akira Hoyano, Geun Young Doe는 남향교실을 재검토하고, 자연형 시스템(Passive system) 교실의 열환경에 관한 연구를 발

표하면서 북측형교실을 제안하였으며, 교실에서 형성되는 환경에 주된 문제점이 일사의 입사와 환기량에 있다는 것을 밝히고, 일사의 유효한 이용 및 환기량의 확보를 목적으로 남쪽에 복도를 배치하고 다수실 실온변동과 수치계산을 통하여 제안한 페시브 교실의 열환경이 종래의 남향교실에 비해 유리하다고 발표하였다[18,19].

Iwashita는 2000년 학교 실내환경의 쾌적성을 조사하기 위하여 3개의 초등학교에 대해 온열 및 공기환경에 대한 실측과 설문조사를 실시하였고, 10개의 초등학교 교실에서 휘발성 유기화합물(VOCs) 농도를 측정하여 30년 이상 경과된 교실과 최근 신축된 교실의 공기오염도를 비교하였다. Jim Ishii는 2001년 고등학교 보통교실을 대상으로 1년간에 걸쳐 물리적·심리적 측면에서 온열환경 측정 및 평가를 실시하였다[20].

국내에서는 1993년 안옥희 등이 교사 내의 쾌적한 온열 조건은 온도·습도·기류·복사열 등과 밀접한 관련이 있으며, 이러한 온열요소는 직접 신체의 생리적 기능을 좌우하는 중요한 요소라고 하였으며, 1996년 박미진은 교실에서의 적정온도는 공기의 움직임, 움직임의 강도 및 착의상태, 재실시간 등에 따라서 다르기 때문에 일률적으로 정하기는 어렵지만 대체로 18 ± 2 °C가 적당한 것으로 조사하였다.

교육개혁부산시민연대에서는 1996년 부산시내에 재학 중인 초·중등 학생을 대상으로 “학교에서 가장 먼저 해결되어야 할 것”에 대하여 전체학생의 72.9%가 교실 온도문제가 먼저 해결되기를 바라고 있으며, “교실이 너무 덥거나 추운 것이 학생들의 학습에 미치는 영향의 정도”에 대하여 85.6%의 학생이 교실온도가 많거나 적게 공부에 영향을 미치고 있다는 조사를 발표하였다[21].

1999년 임상훈은 학교 교실 환경실계에 관한 새로운 접근을 시도하여 남

측복도 자연형 태양열 냉난방시스템을 제안하였고[22], 전의찬 등은 도시 학교시설에서의 밀폐정도에 따른 실내 공기오염도를 평가하기 위하여 이산화탄소, 일산화탄소, 부유 분진 등을 측정하였으며, 이산화탄소의 경우 창문을 닫아놓은 밀폐상태의 농도가 기준치에 비하여 2배 정도 높은 값을 나타내는 것으로 발표하였다. 또한, 지준명 등은 밀폐된 교실, 공기조화 교실과 자연 통풍이 되는 교실에 존재하는 낙하세균의 수를 측정하여 실내 공기오염도를 평가하였다.

박성운 등은 학교시설의 실내공기 중 방사선가스인 라돈(Rn) 농도를 측정하였으며, 서울시내 15개 초등학교에서 조사한 라돈 농도의 평균치는 환경부의 환경기준 권고치와 세계보건기구(WHO)의 권고치보다 낮은 것으로 측정되었으나, 일부 지역의 최대 농도는 권고치보다 높게 나타난 것으로 발표하였다.

한국에너지기술연구원에서는 1998년과 2000년에 온열환경 개선을 위한 학교건물의 냉난방시설 모형개발 연구를 실시하여 학교시설 환경기준설정에 따른 냉난방설비의 본격적인 보급에 앞서 체계적이고 효율적인 학교건물의 냉난방설비에 대한 기본 방안을 제시하였다[23]. 또한, 김운신은 학교내의 환경위생에 대한 현황과 문제점을 분석하고, 학교보건에 필요한 시설과 설비의 개선방안을 제시하였으며, 교실내의 온·습도, 환기, 조도, 분진, 소음 등 환경위생에 대한 기준안을 마련하였다[24].

2002년 신은상 등은 수원지역 초·중·고등학교 교실의 아황산가스(SO₂), 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO₂), 미세 먼지(PM₁₀) 및 이산화탄소(CO₂)의 농도를 측정하였고, 교실내의 공기를 오염시키는 것은 외부대기의 영향보다는 교실 내에서 발생하는 오염물질의 영향이 크게 작용하는 것으로 분석하였다. 특히, 하절기에는 창문의 개방횟수가 많은 이유로 미세 먼지에 의한

영향이 주된 원인이고, 동절기에는 학생들의 인원수와 활동성에 직접적으로 영향을 받은 오염원이 이산화탄소의 미세 먼지임을 제시하였다[25].

그동안 아파트, 사무소 및 상가 등의 실내환경에 대해서는 많은 연구가 이루어졌지만 학생들이 사용하는 학교 건물에 대해서는 출입이 자유롭지 못한 이유 등으로 교실의 실제 상황을 충분히 고려한 진반적이고 체계적인 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 학교건물 설비시스템의 환경구현 능력을 평가하여 건강하고 쾌적한 실내 환경을 창출하기 위한 온열 및 공기환경에 대한 실태조사와 지속적인 연구가 진행되어야 한다.

1.3 연구목적

건축물의 실내환경은 열, 공기, 습기, 조명, 음, 색 등을 비롯한 건축환경의 심리적인 여러 가지 요소들을 포함하는 공간의 상태를 말한다. 쾌적한 실내 환경의 조성이 1차적으로 건축적인 조절(Passive control)에 의해서 이루어진다면 매우 바람직하나, 건축물의 한계성으로 인해 부분적 또는 전체적으로 설비적인 조절(Active control)에 의존하지 않을 수 없다.[26]

학교건물의 쾌적성은 온도, 습도, 기류속도, 조명 등과 같은 물리적인 요소와 학생들이 수행하는 작업종류, 착의량, 대사량 등 감성적인 영향에 의해 쾌적도를 다르게 느낄 수 있다. 그러나 물리적인 환경은 학습자라는 주체의 해석을 거쳐 감성적·심리적인 조건으로 전환되기 때문에 교육환경에 있어서 물리적인 요소는 매우 중요시 되어야 한다.

본 연구는 성장기 학생들이 생활하는 학교건물의 온열 및 공기환경 개선을 위하여 건축물 설비시스템의 환경구현 능력을 평가하고, 그에 따른 문제점을 분석함으로써 건강하고 쾌적한 온열환경을 창출할 수 있는 공조시스템 제반자료를 마련하고자 한다.

학교건물 설비시스템 현황조사를 실시하여 건축물의 열부하 특성 및 냉·난방시설 실태를 파악하고, 단위교실을 대상으로 여름철과 겨울철 온열환경 요소의 측정과 재실자 설문조사를 통하여 쾌적감 분석을 수행하며, 학교건물에 설치되고 있는 천장사방토출 공조시스템의 기류각도에 대한 수치해석을 수행하여 동절기와 하절기 최적 취출각도를 제시하고자 한다. 또한, 실내 공기질 개선을 위하여 실내공기의 환기상태를 평가하는데 지표로 사용되는 이산화탄소의 농도가 환기시스템의 작동 여부 및 환기량에 따라 어떻게 변하는지를 측정·평가하여 최소 필요 환기량을 도출하고, 환기효율 특성을 파악하여 학교 교실의 온열환경 및 공기질 개선을 위한 방안을 마련할 수 있는 기초자료를 확보하고자 하였다.

이와 같은 연구를 통하여 학교건물 설비시스템의 온열 및 공기환경 구현 능력을 비교·분석하고 개선방안을 제시함으로써 학생 및 교직원들의 학습 능력 향상과 삶의 질 개선에 기여하고자 한다.

1.4 연구내용 및 방법

학교건물의 온열 및 공기환경 특성을 파악하고, 실내환경을 개선하기 위한 본 연구에서는 문헌조사를 통하여 학교시설환경에 대한 국내·외 시설기준과 평가방법 등을 조사하고, 세부 연구방향을 설정하였으며, 전국 16개 시·도교육청의 협조를 얻어 학교건물의 설비시스템 현황 및 특성을 조사·분석하였다. 그리고 온열 및 공기환경 측정을 위하여 학교건물로서 대표적 구조를 가진 모델 학교를 선정하여 실내공간에 대한 물리적인 환경측정을 실시하고, 최근 학교건물에 설치되고 있는 천장형 공조시스템에 대한 수치해석을 수행하였다. 이와 같이 수집한 데이터를 분석하여 온열환경에 대한 개선방안을 비교·검토하였다.

본 연구의 진행단계를 Fig. 1.1에 나타내었으며 그 내용은 다음과 같다.

1) 학교건물의 쾌적성 평가와 관련된 이론에 대하여 조사하고 물리적 및 인적요소에 의한 온열환경지표, 온열쾌적감과 쾌적범위, 측정 및 실험방법, 실험결과분석에 의한 학습과 온열환경의 조건 등 이론을 정립하였으며, 학교건물 설비시스템 현황조사를 실시하여 학교건물의 열부하 특성 및 냉·난방시설 실태조사를 실시하였다.

2) 학교건물 일반교실에 설치된 바닥복사난방, 바닥설치 환코일유닛, 천장사방토출 공조시스템에 대하여 실내공간에 대한 온도 및 기류 분포를 여름철과 겨울철로 나누어 측정·분석하였으며, 재실자의 온열감에 대한 설문조사를 통하여 학교건물의 온열환경을 분석함으로써 문제점을 파악하였다. 또한 온열환경의 만족도를 나타내는 열쾌적감을 평가하기 위하여 평면 및 단면상의 유효온도와 기류속도를 분석하여 공기확산성능계수(ADPI)를 구하고, ISO 7730에 따라 예상온열감(PMV) 및 예상불만족율(PPD)에 대해 예측함으로써 쾌적도를 평가하였다.

3) 학교 교실의 온열환경개선을 위하여 설치되는 천장사방토출 공조시스템에 대하여 실내 열복사에 의한 영향과 외기조건에 따른 벽체전열 및 일사의 영향을 고려한 수치해석 시뮬레이션을 수행하여, 토출각도 15°, 30°, 45°, 60°에 대한 온도 및 기류 분포를 조사하고, ISO 7730에 따른 예상온열감(PMV)과 ASHRAE 지침에 따른 유효드래프트온도(EDT)에 대해 쾌적도를 예측함으로써, 동절기 난방시와 하절기 냉방시에 최적 취출각도를 제시하고자 하였다.

4) 학교 교실의 실내공기질 개선을 위하여 단위교실의 자연환기량(공기유동량)을 측정하였으며, 용량이 다른 열회수용 환기장치(Heat recovery

ventilator)를 설치하고, 실내공기의 환기상태를 평가하는데 지표로 사용되는 이산화탄소의 농도가 환기시스템의 작동 여부 및 환기량에 따라 어떻게 변하는지를 측정·평가하여 교실의 환경위생기준을 유지하기 위한 신선 외기 도입량을 분석하였다. 또한, 단위 교실에 천장사방토출 실내기를 작동시키고, 환기장치의 급·배기구의 위치에 따른 환기효율 특성을 파악하였다.

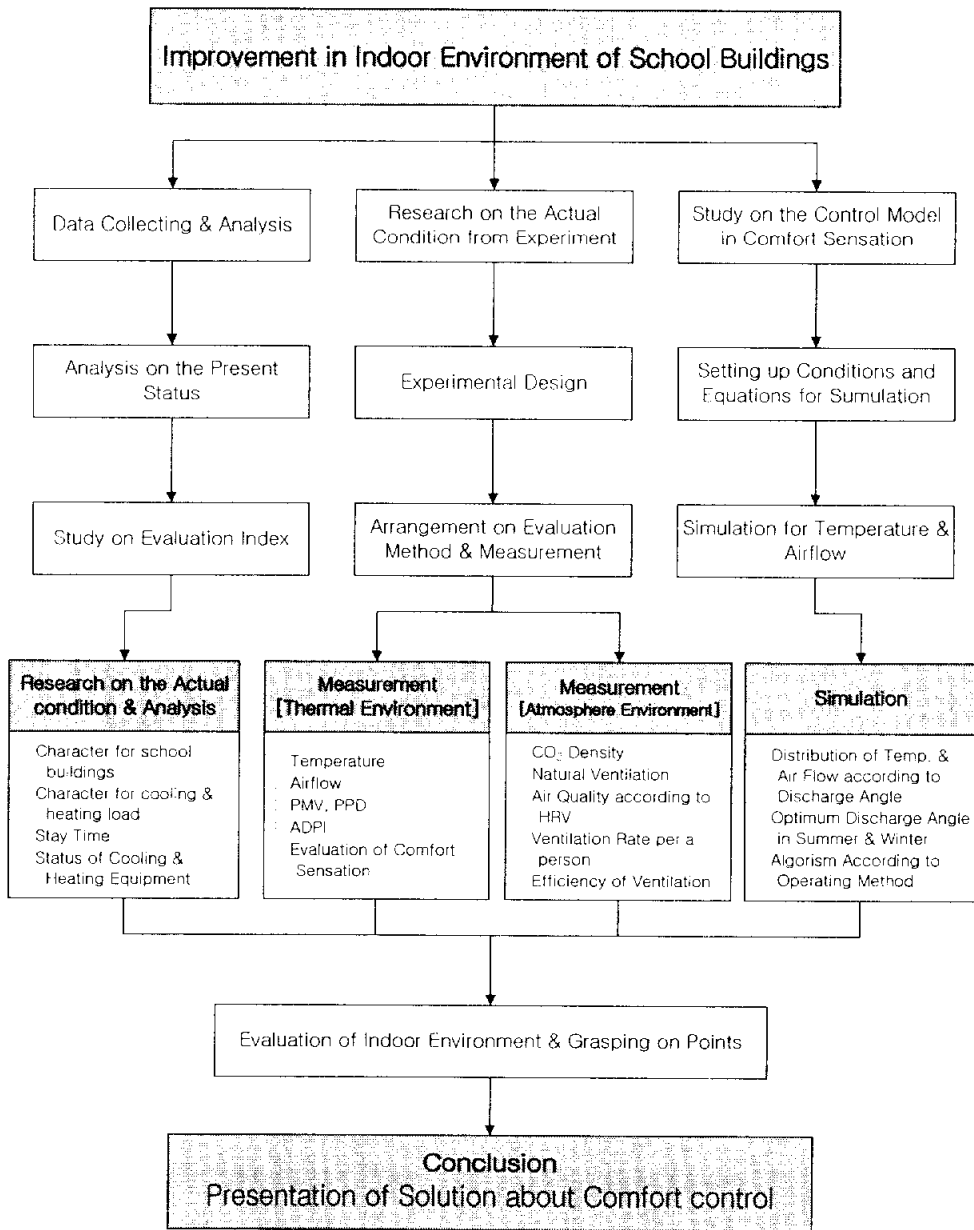


Fig. 1.1 Flow chart of the present study

제 2 장 실내환경의 쾌적성에 관한 기초이론

2.1 환경과 인간

건축물의 실내공간에 있어서 인체의 온열환경을 취급하는 주된 목적은 인간이 열적으로 쾌적하게 생활할 수 있도록 실내 환경을 조성하기 위한 것이다.

Fig. 2.1은 건축과 설비가 만들어 내는 인공적인 환경에서 인간과 실내환경의 관계를 도식적으로 나타낸 것이다. 인간은 직접적으로 열·공기·소리·빛·공간 환경과 영향을 주고받으며 그에 따른 결과로 생리적, 심리적 반응을 나타낸다. 또한 인간의 행동이 환경을 변화시키기도 하며 인간과 환경은 상호영향을 주고받으며 같이 존재한다고 할 수 있다. 따라서 쾌적한 상태라는 것은 주어진 환경에서의 물리적 인자에만 의해 좌우되는 것이 아니라 인간이 주관적으로 느끼는 심리적·생리적 인자와도 깊은 관계가 있기 때문에 이들 사이의 상관관계를 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다.

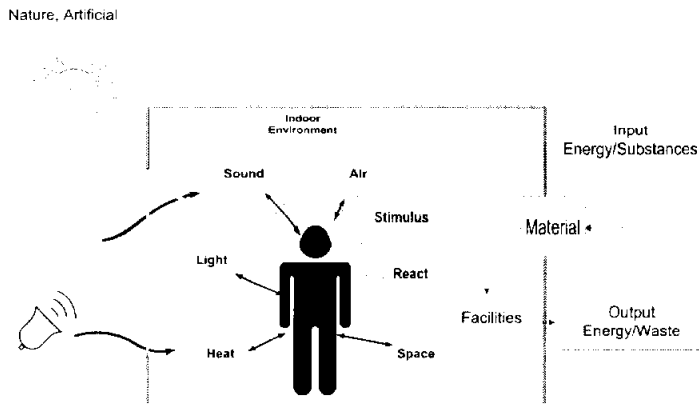


Fig. 2.1 Interaction between environment and human

ASHRAE Standard 에서는 개인의 온열 쾌적함을 ‘열 환경에 대한 만족을 표현하는 마음의 상태’ 라고 정의하고 있는데[28], 이것은 몸 전체가 열적으로 중립 상태에 있다는 것을 의미하고, 또한 이것은 몸의 어느 부분에서 국부적인 열이나 추위에 불쾌감이 생기는 경우가 있어서는 안 된다는 것을 의미하기도 한다.

온열 쾌적감의 개념을 물리적인 변수로 변환하여 나타내기 어려운 점이 있는데, 이는 심리적 쾌적상태를 나타내야 하기 때문이다. 따라서 환경의 평가는 온도, 습도, 소음, 조명 등의 물리적인 수치 외에도 인간의 반응이나 감각 등도 포함하는 다면적인 검토가 이루어져야 한다.

2.2 온열환경

2.2.1 인체의 열평형

인체는 내·외환경의 변화에 따라서 체내 발생열량과 체외 방출열량이 평형을 유지하여 체온을 일정하게 유지한다. Fig. 2.2는 인체와 온열환경과의 열수지 관계를 나타내고 있다.

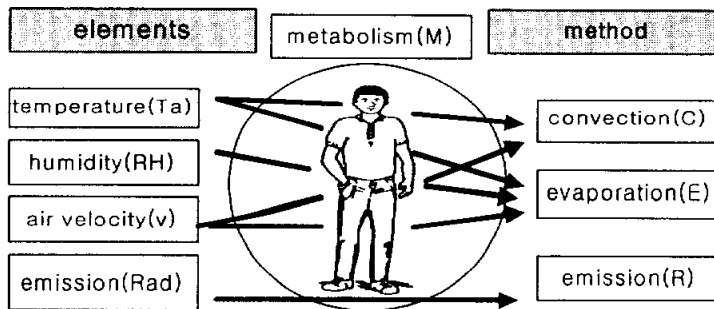


Fig. 2.2 Heat transfer between thermal environmental element and human body

인체는 음식물로 에너지를 공급하고 활동에 의해 에너지를 소비하는데 이를 에너지대사라고 하며, 인간의 활동정도에 따라 다르게 나타난다.

인체와 온열환경과의 열수지식은 식 (2-1)로 나타낼 수 있으며, 열평형식이라고도 한다. 인체의 열생산량과 열방산량이 평형을 이룰 때, 즉 $S=0$ 일 때의 열환경을 열적 중성점(Thermal neutral point)이라 하며, 인체는 쾌적한 상태에 있게 된다. $S>0$ 일 때는 인체에 열이 축적되는 경우이므로 더위를 느끼게 되고, $S<0$ 일 때는 주위에 열을 빼기게 되므로 추위를 느끼게 된다. 열적 중성점 부근의 인정범위를 열적중성대라 하며, 쾌적감은 일반적으로 이 범위에 속하는 것으로 알려져 있다. 각 경로별 열량의 (+)값은 방열을 나타내며, (-)값은 수열을 나타낸다.

$$S = M - (W \pm C \pm R - E) \quad (W/m^2) \quad (2-1)$$

여기서, S : 열수지 밸런스

M : 대사량 [W/m^2]

W : 기계적 일의 량 [W/m^2]

C : 대류에 의한 열교환 [W/m^2]

R : 복사에 의한 열교환 [W/m^2]

E : 피부 및 호흡에 의한 증발열교환 [W/m^2]

2.2.2 온열환경 요소

인체의 감각을 고려한 쾌적한 온열환경을 설정하기 위해서는 온열감각에 영향을 미치는 인자를 정확히 파악할 필요가 있다. 열적 환경에 대한 쾌적감과 온열감은 인체와 실내 환경간의 밀접한 상호작용에 따라 정해지므로 실내 온열환경 평가시에는 기본적으로 환경측의 물리적 요인과 인체측의 요

인을 모두 고려하는 것이 바람직하다. 환경측의 물리적 요인으로는 온도, 습도, 기류속도, 주위 벽면의 복사열이 있으며, 인체측 요인으로는 착의량, 대사량, 심리상태, 연령, 성별, 환경에의 순응정도 등이 있다. 또한 불균일한 온도 등은 국부적 불쾌감을 일으키며 온열환경을 악화시키는 요인이 된다.

Table 2.1 Thermal environment factors

Classification	Basic factor	Inequality
Physical Factor	<ul style="list-style-type: none"> · Temperature · Relative humidity · Air current · Radiant temp. 	<ul style="list-style-type: none"> · Vertical air temperature difference · Radiant temperature asymmetry · Fluctuation of room temp. · Inequality of air current
Human body factor	<ul style="list-style-type: none"> · Clothing · Metabolism 	<ul style="list-style-type: none"> · Individual variations · Age · Sex

(1) 공기온도(Air temperature, t_a)

실내 공기의 온도는 건구온도를 말하며, 단위에 따라 섭씨온도[°C], 화씨온도[°F], 절대온도[K] 등으로 표현된다. 보통의 실내조건에서 가장 간단하고 실제적인 온열지표로 쓰인다. 실내에서 상하·수평의 온도 분포가 있는 경우 실내기온을 정확히 표현하기가 어려우며, 의자에 앉아있는 경우 보통 바닥면으로부터 60cm 되는 곳을 인체 중심으로 간주하며, 실내 환경의 평가를 위해서 바닥면으로부터 10cm, 60cm, 110cm 높이의 위치에서 공기온도를 측정하는 경우가 많다.

(2) 습도(상대습도 : Relative humidity, RH)

습도는 주로 상대습도 또는 절대습도로 표시한다. 일반적으로 습도는 온열감에 영향을 미치고, 낮거나 높은 습도는 인체에 비열적 불쾌감을 준다. 즉, 낮은 습도에서는 정전기 문제가 발생하고, 높은 습도에서는 피부의 젖음율 증가에 따른 불쾌감을 유발한다.

(3) 기류속도(Air velocity, v_a)

기류란 실내의 공기의 흐름을 말한다. 일반적으로 거주공간에서 기류속도는 0.5m/s 이하를 유지하도록 하고 있다. 기류가 너무 강하면 드래프트(draft) 현상을 일으켜 불쾌감을 느끼게 되고, 더울 때는 같은 기온이라도 기류가 있으면 시원하게 느껴진다. 연구결과에 의하면, 평균 기류속도 뿐만 아니라 기류속도의 변동량도 인체의 열적 쾌적감에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 기온이 26℃ 이상 28℃까지는 기류속도를 0.8m/s 까지 증가시켜도 좋다고 ANSI/ASHRAE Standard 55-1992에서 추천하고 있다[28].

(4) 평균복사온도(Mean radiant temperature : MRT, T_r)

평균복사온도란 실제의 불균일한 복사장에서 재실자가 주위 환경과 복사 열교환을 행하는 것과 똑같은 양의 복사 열교환을 해하는 균일한 주위 온도를 의미한다.

같은 공기온도라도 천장이 햇볕 등으로 뜨거워져 있으면 복사에 의해 덥게 느껴지고, 겨울에 차가운 창문 근처에서는 춥게 느껴진다. 또한, 평균복사온도의 개념에는 인체와 주위와의 형태계수가 고려되어 있기 때문에, 인간이 실내의 어느 위치에 있느냐에 따라 평균복사온도는 달라진다. 따라서 평균복사온도는 종래 편의상 사용되고 있는 각 평면, 천장 등의 면적평균

가중온도와는 다르다. 형태계수도 인간이 구면체가 아니므로 방향에 따라 다르게 된다. 평균복사온도는 식 (2-2)와 같이 나타내고 있다.

$$T_r = \sqrt[4]{\sum F_p (t_i + 273)^4} - 273 \quad (2-2)$$

여기서, T_r : 평균복사온도[°C]

t_i : 주위벽, 천정, 바닥면의 표면온도[°C]

F_{pi} : 주위벽, 천정 및 바닥면과 인체의 형태계수

(5) 착의량(Clothing level)

의복은 인체의 생리기능 보완과 신체보호 등의 중요한 기능을 보유하며 제 2의 피부(second skin) 역할을 하고 있다.

1clo의 보온력이란 기온 21.2°C, 습도 50%이하, 기류 0.1m/s의 실내에서 의자에 앉아 안정하고 있는 성인남자(50kcal/m²·h의 에너지 대사)가 쾌적하면서 평균 피부온도가 약 33°C로 유지할 수 있는 착의의 보온력을 말한다. 보통의 열저항치로 환산하면 1clo는 0.115m²·°C/W가 된다. 예를 들면, 겨울철에 두꺼운 신사복이 약 1.0clo이고, 여름철의 하복이 0.6clo이다.

의복의 단열성을 결정하는 가장 좋은 방법은 열마네킹에 의한 측정과 실제 조사대상자에 대한 측정이다. 그러나 대부분의 공학적인 응용에서는 기준표와 식에 의한 계산으로도 충분하다.

(6) 대사량(Metabolism)

쾌적 및 건강을 위하여 적절한 조건을 선택하기 위해서는 인간이 물리적인 활동으로 인하여 소비하는 에너지를 알 필요가 있다. 대사 에너지 생성

량은 인간 활동의 강도에 비례하여 증가하며, 대사량은 활동의 종류, 사람 및 활동이 수행된 조건에 따라 광범위하게 변한다. 인체의 대사량은 보통 met로 표시되며, 1met는 의자에 앉아 안정하고 있을 때의 대사량으로 58.2W/m²이다. 건강한 정상인의 경우 20대는 최대에너지량이 약 12met 이고, 70대에는 7met 정도로 떨어진다.

여자와 어린이는 남자에 비해 최대 에너지량이 30% 정도 작다. Table 2.2에서 보는 것처럼 일상의 사무작업은 1.0~1.4met, 농구와 같은 격렬한 운동은 5.0~7.6met의 대사량에 해당한다.

Table 2.2 Typical metabolic heat generation for various activity

Activity	W/m ²	met
Resting		
Sleeping	40	0.7
Reclining	45	0.8
Seated, quiet	60	1.0
Standing, relaxed	70	1.2
Walking(on the level)		
0.89 m/s	115	2.0
1.34 m/s	150	2.6
1.79 m/s	220	3.8
Office Activities		
Reading, seated	55	1.0
Writing	60	1.0
Typing	70	1.2
Filing, standing	80	1.4
Walking about	100	1.7
Lifting/packing	120	2.1
Driving/Flying		
Car	60-115	1.0-2.0
Aircraft, routine	70	1.2
Aircraft, instrument landing	105	1.8
Aircraft, combat	140	2.4
Heavy vehicle	185	3.2
Miscellaneous Occupational Activities		
Cooking	95-115	1.6-2.0
House cleaning	115-200	2.0-3.4
Seated, heavy limb movement	130	2.2
Machine work		
sawing(table saw)	105	1.8
light(electrical industry)	115-140	2.0-2.4
heavy	235	4.0
Handling 50kg bags	235	4.0
Pick and shovel work	235-280	4.0-4.8
Miscellaneous Leisure Activities		
Dancing, social	140-255	2.4-4.4
Calisthenics/exercise	175-235	3.0-4.0
Tennis, singles	210-270	3.6-4.0
Basketball	290-440	5.0-7.6
Wrestling,competitive	410-505	7.0-8.7

* 1met = 58.2 W/m²

2.2.3 국부적 불쾌감

전신온냉감이 중립상태에 있더라도 신체의 일부분이 따뜻하고, 그 나머지 부분은 차갑다면 그 사람은 안락한 조건에 있지 않은 것이다. 이것은 불균일 복사, 드래프트(draft), 불균일한 상하온도, 불균일한 바닥온도 등과 같은 원인으로 국부온냉감에 의한 불쾌가 존재하게 되면 쾌적한 상태라고 볼 수 없으며, 이를 국부적 불쾌감(local thermal discomfort)라고 한다. 이러한 국부적 불쾌는 곧 전체적인 불쾌로 이어지기 때문에 주의를 요한다[27].

(1) 상하 온도차(Vertical air temperature difference)

실내 상하 온도분포의 한계에 대해서, ISO 7730에서는 발목뼈(바닥 위 0.1m)와 머리(바닥 위 1.1m)와의 온도차 3°C이내를 권장하고 있다. 그러나 이것은 실내의 정온기류에서의 기준치이며 신체의 부분마다 기류분포가 다르면 아주 작은 상하 온도차에서도 불쾌감이 발생할 가능성이 있다.

(2) 복사의 불균일(Radiant temperature asymmetry)

복사의 불균일성은 미소면 복사온도의 백터차를 이용하여 나타낸다. 따뜻한 벽면과 찬 천장에 대해서는 불쾌감이 적다. ISO-7730 및 ASHRE Standards 55-92에서는 따뜻한 천장에 대한 불균일 한계는 5°C이내, 차가운 창 및 벽면에 대한 불균일 한계는 10°C이내로 한다. 불균일 복사량에 의한 불쾌감을 막기 위해서는 특히 개구부의 단열계획이 중요하다.

(3) 드래프트·기류(Draft)

ISO-7730 및 ASHRE Standards 55-92에 있어서 실내기류의 허용 한계로 동계 0.15m/s이하, 하계 0.25m/s이하를 권장하고 있다. 종래의 환경 기준보

다 저풍속이 권장되는 것은, 현실의 환경상태에서 기류는 난류이고 층류인 경우와 비교해서 불쾌감이 생기기 쉽기 때문이다. 그리고 더울 때에는 시원함을 느끼기 위해 적극적으로 기류를 이용하는 것이 에너지절약의 관점에서도 중요하다[29].

(4) 바닥온도(Floor temperature)

ISO 7730에서는 보통 실내의 바닥온도를 19℃에서 29℃까지 권장하며, 바닥난방장치가 있을 때는 최대 난방부하시의 최고 온도는 29℃이하를 권장한다. 이러한 권장치는 구두를 신고, 의자에 앉은 상태로 있는 경우이다. 우리나라와 같은 좌식 생활양식에서 바닥난방을 할 경우 온냉감신고가 입식에 비해 상승하였다는 보고가 있다. 그리고 체온보다 높은 표면온도의 난방은 저온화상을 일으킬 위험이 있다[29].

(5) 개인적 성향차(Individual variation)

사람들이 동일한 의복을 착용하고 동일한 행동을 수행하더라도 모든 사람들이 만족하는 단일 환경은 없다, ASHRE Standards 55-95에서 특정화된 쾌적 영역은 90% 수용 또는 10% 불만족을 기초로 하며, Fanger는 예상불만족율(PPD)과 예상온열감(PMV)을 연관시켰다.

2.2.4 온열환경의 평가지표

실내 온열환경의 종합평가에 대해서는 20세기 초부터 연구되기 시작하여 여러 가지 방법이 제안되고 있다. 실내 온열환경은 단일요소로 평가하기는 어렵고 쾌적감을 지배하는 기온, 습도, 기류, 복사열 등의 요소에 의하여 종합적으로 평가되고 있다.

실내 온열환경 평가지표란 온열환경 요소를 적절히 조합하여 인체의 온열감각에 가까운 평가를 얻을 수 있도록 만든 것으로 이들은 특성에 따라 Table 2.3과 같이 분류할 수 있다[27].

Table 2.3 Classification of thermal-environment evaluation index

Classify		Evaluation Indices
Physical Indices		DBT, RH, RT, WBT, BGT
Physiological Indices		P4SR, Wettedness, HSI
Heat-balance Indices		OT, HOT, SOT, MRT, SET*
Subjective Indices	Temp. Sensibility	ET, ET*, CET
	Comfort Sensibility	PMV, PPD

(1) 유효온도(Effective temperature, ET)

1923년에 Houghten과 Yaglou에 의해 제안된 것으로, 초기에 미국에서 사용되었던 지표로서 감각온도 또는 실감온도라고도 한다. 건구온도, 상대습도, 기류의 3요소를 조합해서 감각의 지표로 정한 것으로, 상대습도 100%인 정지 공기(기류속도 8~13cm/s)의 실내온도를 유효온도의 기준으로 하여, 다른 실내 상태에서 이것과 같은 감각을 줄 때 같은 유효온도를 갖는 것으로 정의하였다. 또한 1925년 Yaglou가 유효온도에 실내측정조건을 보완하여 수

정유효온도(Corrected effective temperature, CET)를 발표하였는데 유효온도에 복사열의 영향을 고려하였다. 건구온도 대신 흑구온도를, 습구온도 대신 상당습구온도를 사용하였다.

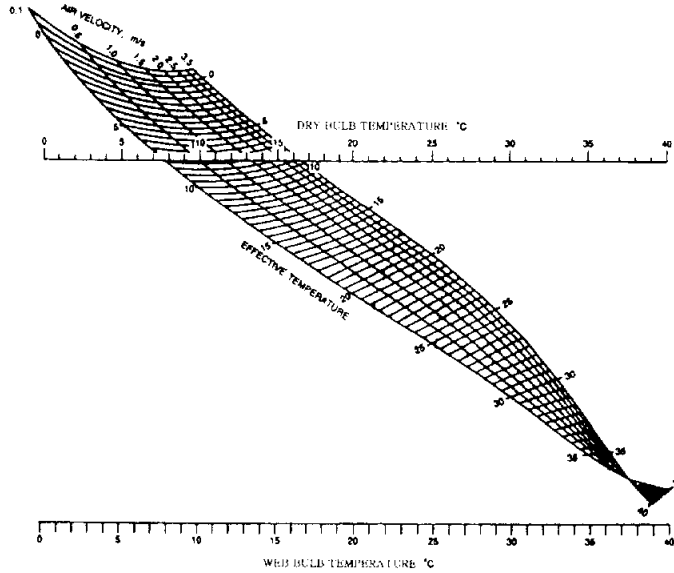


Fig. 2.3 Effective temperature of typical indoor clothing condition

(2) 신유효온도(New effective temperature, ET^*)

Gagge 등이 1971년 개발한 지표로 1972년 ASHRAE Handbook Fundamentals에 발표되었다. 이론적으로 환경조건을 해석하고 이를 종합한 지표로 ASHRAE의 습공기 선도상에서 상대습도 50%에 해당하는 점으로부터 등피부젖음율(wettedness)선을 긋는다. 이 선상의 조건을 상대습도 50%인 기온과 같은 유효온도라고 한다. 유효온도가 상대습도 100%를 기준으로 한 것에 비해 신유효온도(ET^*)는 일반적으로 경험하는 상대습도 50%를 기준으로 한 것이며, 쉽게 적용하기 위해 도표로 나타내었다. 이때 착의량은

0.6clo, 기류속도는 0.15m/s가 기준이다. Fig. 2.4는 신유효온도를 습공기 선도상에서 나타낸 것이며, 인간이 느끼는 온열반응에 따라 신유효온도를 여러 구간으로 나누었다.

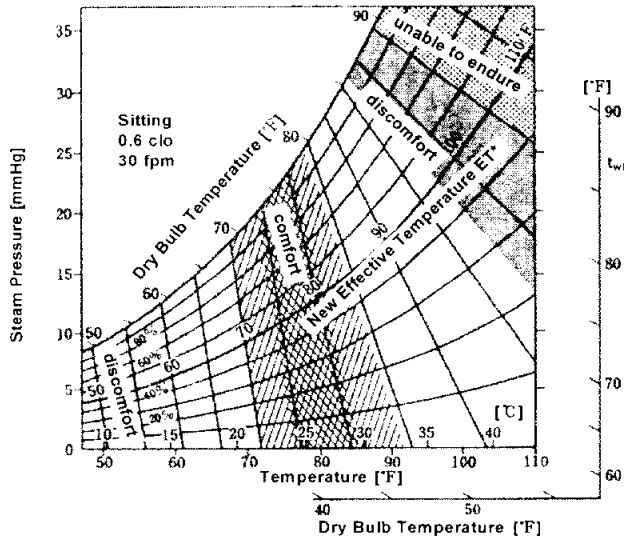


Fig. 2.4 Chart of new effective temperature

(3) 신표준유효온도 (Standard new effective temperature, SET*)

신표준유효온도는 표준착의량의 재실자가 실제의 환경에서와 같은 현열손실(피부온도 : t_{sk})과 잠열손실(피부젖음률 : w)을 경험하게 되는 기류속도 0.1m/s, 상대습도 50%인 표준조건하에서 균일한 열환경(기온 = 주위 벽면온도)의 온도로 정의된다. 이것은 온열환경에 있어서 사람의 체온조절 시스템을 생리학 등에 의해 얻어진 데이터에 기초해서 수학적으로 모델화해 산출한 것으로, 온도의 차원을 갖는다. 이 SET*을 사용하면, 여러 가지 조건의 실내환경을 가상 공기온도이기는 하나 단일변수에 의해 비교 평가할 수 있으며, 또한 공기온도라는 우리에게 친숙한 물리량을 척도로 사용하기 때문

에 실내 온열환경의 양상이 쉽게 이해될 수 있다.

$$SET^* = t_{so}' + \left(\frac{w h_{es}'}{h_s'} \right) (p_{so} - 0.5 P_{SET^*,s}) \quad (2-3)$$

여기서, t_{so}' : 표준작용온도[°C]

h_{es}' : 유효 증발 열전달계수[W/m²]

h_s' : 유효 현열전달계수[W/m²]

p_{so} : 표준작용 수증기압[kPa]

$P_{SET^*,s}$: SET^* 에서의 포화 수증기압[kPa]

w : 피부젖음률

(4) 작용온도(Operative temperature, OT)

1937년 Gagge 등에 의해 제안되었으며, 인체와 환경 사이의 열교환에 기초를 두어 기온, 기류, 복사열의 영향을 이론적으로 종합한 것으로 대류에 의한 열전달률과 복사에 의한 열전달률에 의해 기온과 평균복사온도를 가중 평균한 값이며, 계산식은 다음과 같다.

작용온도는 미국기준인 ANSI/ASHRAE Standard 55-1992에서 쾌적 범위를 나타내는데 사용되고, 국제 기준인 ISO-7730에서도 쾌적범위를 알기 쉽게 표현하는데 사용된다.

$$OT = \frac{\alpha_c \cdot t + \alpha_r \cdot MRT}{\alpha_c + \alpha_r} \quad (2-4)$$

여기서, α_c : 대류에 의한 열전달률[W/m²·h·°C]

a_r : 복사에 의한 열전달률[W/m²·h·°C]

t : 기온[°C]

MRT : 평균 복사온도[°C]

(5) 불쾌지수(Discomfort index, DI)

유효온도의 발표 후 대규모 실태조사가 행하여지고, 유효온도와 불쾌지수의 관계가 구하여졌다. 공기온도와 습구온도에 의한 유효온도를 유사한 불쾌율로 나타낸 것이 불쾌지수이며, 미국인에 대한 불쾌지수산출의 식은 다음과 같다.

$$DI = 0.72(t_a + T_w) + 40.6 \quad (2-5)$$

여기서, DI : 불쾌지수[-]

t_a : 공기온도[°C]

T_w : 습구온도[°C]

(6) 예상온열감(Predicted mean vote, PMV)

1967년 Fanger에 의해 제시된 예상온열감은 인간의 온열감각에 대한 이론을 정량화시킨 것이다. 인체의 대사율, 의복의 열저항값 등을 산정하고 건구온도, 평균복사온도, 기류속도 및 수증기 분압 등을 측정하여 인체의 열평형을 기초로 한 쾌적방정식에 대입하여 인체의 온열감을 이론적으로 예측한 것이다. 즉, PMV는 온열환경 6가지 요소를 쾌적방정식에 대입시켰을 때의 발산열량과 방열량의 불평형분(인체 열부하)과 사람의 온열감각을 피험자

실험에 의해 연관시켜 지워 나타내는 지표로서, PMV값을 열적 중립상태를 0으로 하고 -3~+3의 수치척도를 각각 춥다(cold), 서늘하다(cool), 약간 서늘하다(slightly cool), 중립(neutral), 조금 따뜻하다(slightly warm), 따뜻하다(warm), 덥다(hot)로 나타내며, 아래에 PMV식과 적용범위를 나타냈으며 사용범위는 $PMV = -3 \sim +3$ 이다.

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0.303 e^{-0.36M} + 0.028)[(M - W) - 3.05 \times 10^{-3} \\
 & \times \{5733 - 6.99(M - W) - P_a\} - 0.42 \times (M - W) - 58.15] \\
 & - 1.7 \times 10^{-5M} (5867 - P_a) - 0.0014M \times (34 - t_a) \\
 & - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \{ (t_{cl} + 273)^4 \\
 & - (\bar{t}_r + 273)^4 \} - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \} \quad (2-6)
 \end{aligned}$$

여기서, M : 체표면적당 신진 대사량[1met=58.2W/m²]

W : 외부일(대부분의 일은 0임)[W/m²]

I_{cl} : 의복의 열저항[m² · °C/W]

f_{cl} : 의복 면적비

t_{cl} : 의복의 표면온도[°C]

p_a : 수증기 분압[Pa]

(7) 예상불만족감(Predicted percentage of dissatisfied, PPD)

PMV는 같은 환경에 처해 있는 많은 사람의 열적반응 평균치를 나타낸 것이다. 그러나 각각의 응답은 평균치 근처에 분산된 것으로 더운 사람과 추운 사람의 수를 아는 것도 중요하다. 예상 불만족률은 어느 환경에 놓여진 사람들의 불만족률을 나타낸 것으로, 몇 명의 사람이 온열적으로 불만을

나타내고 있는가를 나타낸다. 그리고 이것은 앞서 언급되었던 예상온열감과 연관되어 뛰어난 지표로 활용되고 있다.

$$PPD = 100 - 95 \exp[-0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2] \quad (2-7)$$

ISO 7730에서는 Fig. 2.5에 나타난 것처럼 PMV, PPD의 값으로서 $-0.5 < PMV < +0.5$, $PPD < 10\%$ 를 권장하고 있지만, $PMV = 0$ 에서도 5%의 불만족자가 있음을 예측할 수 있다. PMV는 다른 온열지표와 달리 직접 감각량을 표시하기 쉬우며, 또한 PPD에 의해 불만족율도 간단하게 예측할 수 있기 때문에 광범위하게 사용되는 온열환경 지표이다.

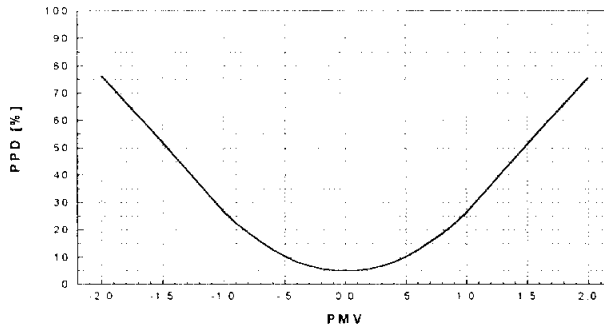


Fig. 2.5 Relationship between PMV and PPD

2.2.5 온열환경의 쾌적범위

실내 온열환경의 쾌적범위 설정에 관한 연구는 피험자에게서 온열감각을 응답하게 하여 얻은 주관적 반응에 관한 조사와 인체의 열평형을 바탕으로 한 생리적인 중성역에 관한 이론적 연구로 대별할 수 있다. 현재 국제적으로 널리 통용되고 있는 쾌적열환경에 관한 기준은 ANSI/ASHRAE standard 55-1981, 1992[28]와 ISO 7730[29]이 있다.

Table 2.4 Comfort range of indoor thermal environment

Factors		ASHRAE 55-1992	ISO 7730
Comfort zone(OT)	Summer	23~26°C(ET*)	23~26°C(24.5±1.5°C)
	Winter	20~24°C(ET*)	20~24°C(22±2°C)
Metabolism rate		<1.2met>	
Clothing	Summer	0.5clo	0.5clo
Humidity		30~70%	-
Air velocity	Summer	<0.25m/s>	
Vertical temp. difference		<3°C>	
Vector radiant temperature		vertical<5°C>, horizontal<10°C>	
Floor surface temperature		<29°C>	

ASHRAE 55-1992은 환경지표로서 신유효온도 ET*를 쓰고 ISO 7730은 PMV·PPD 지표를 쓰는 차이가 있으나, PMV에 해당하는 작용온도를 계산할 수가 있으며, 두 기준의 내용은 비슷하다. 즉, 두 기준은 모두 열환경의 요소를 인체의 측면에서 작업량(met), 착의량(clo), 환경 측면에서 온도, 습

도, 기류속도, 복사열로 정하고 , 주어진 활동량과 착의량에 대한 환경인자의 조합에 따른 온열감을 표현하고 있다. Table 2.4는 실내 온열환경의 쾌적 범위를 ASHRAE Standard 55-1992와 ISO 7730을 비교하여 나타낸 것이다.

쾌적성 평가를 하기 위하여 온열환경의 물리적요소를 평가하는 것은 매우 중요한 일이다. 그러나 계측방법, 계측기기, 요구되는 정확도는 인체와의 관련성을 고려해서 결정하지 않으면 안 된다. ASHRAE기준에는 계측기의 요구정도가 표시되어 있으며 특히, 기류에 대해 난류의 강도(기류의 표준편차)가 평가되도록 되어 있고, 실내환경 측정기에 관한 기준에 대해서는 ISO 7726에 나타나 있다. 또한 온열 환경의 측정은 재실자가 어느 정도의 시간동안 머문다고 생각되는 위치(거주역)에서 측정을 해야 한다. 여기서 거주역이란, 일반적으로 각 벽면으로부터 0.6m 내측과 바닥면으로부터 1.8m까지의 공간을 말한다.

2.3 공기환경

최근 건축물의 에너지절감 및 효율을 높이기 위한 노력의 일환으로 건물
의 기밀성이 향상되면서 환기 부족으로 인한 실내공기질(Indoor air quality,
IAQ)이 악화되고 있다. 또한 다양한 건축자재에서 새로운 오염물질이 방출
되고, 경제활동에 따른 사무기기 및 생활용품 사용의 증가로 오염물질이 방
출되면서 실내공기가 오염되고 있으며, 실제로 기밀성이 높은 건물에서 재
실자가 장시간 거주할 경우 불쾌감을 느끼게 되고 두통, 코·목의 이물감,
기침, 피부의 건조나 가려움증, 현기증이나 구토, 피로감 등의 증상을 일으
키는 경우가 빈번히 발생한다.

세계보건기구(WHO)에서는 이러한 증상을 건물병증후군(Sick building
syndrome, SBS)이라 정의하고 있다[26].

특히 재실자의 밀도가 높고 하루 중 대부분의 시간을 보내게 되는 학교
교실의 경우 공기질의 중요성이 한층 더 크다고 할 수 있으며, 오염된 실내
환경은 재실자의 학습의욕을 떨어뜨리고, 학생들의 건강에 나쁜 영향을 주
고 있다[24].

2.3.1 실내 오염물질의 발생원

실내공기오염은 온도, 습도, 기류, 복사열 등의 온열환경요소와 일산화탄
소, 이산화탄소, 질소산화물 등의 가스성분 및 공기중에 떠다니는 부유분진,
각종 미생물 등 오염물질 제요소가 복합적으로 작용하여 진행된다. 건물의
재실자 들이 산소를 흡입하고 탄산가스를 배출하며, 활동 중에도 많은 오염
물질을 발생시키고 있다.

Table 2.5 Sources and influences of indoor contaminant[30]

Contaminant	Place of origin	Influence to human body
Dust, Heavy metal	Inflow of outdoor dust, Dust at the floor, Life activity	Pneumoconiosis, Silicosis, Occupational lung disease
Asbestos	Adiabatic board, Insulation material, Asbestos Cloth, Asbestos break, Thermal insulation	Skin diseases, Respiratory disease, Occupational lung disease
Cigarette smoke (Gases, HC, PAHs, Dust and so on)	Cigarette	Headache, Fatigue, Bronchitis, Pneumonia, Bronchial asthma, Lung cancer
Combustion gases (CO, NO ₂ , SO ₂ and so on)	Stove, Combustion, Gas range	Chronic lung disease, Air way resistance, Central nervous system
Radon	Soil, Rock, Underground water, Granite, Concrete	Lung cancer
Formaldehyde (HCHO)	Plywood, Board, Furniture, Adiabatic board, Cigarette smoke, Beauty aids, Clothing	Cough, Diarrhea, Dizziness, Vomiting, Skin diseases, Rhinitis , Emotion anxiety, Amnesia
Volatile Organic Compounds (Benzene, Toluene, Styrene, Aldehyde, Ketone)	Paint, Adhesive, Spray, Combustion, Laundry, Clothing, Aromatic, Construction materials.	Fatigue, mental illness, Headache, Vomiting, Vertigo, Central nervous system
Ozone(O ₃)	Copy machine, living supplies, Combustion	Cough, Headache, Asthma, Allergy disease
Microbial substance (Filamentous fungi , Bacteria, Virus)	Humidifier, Cooling air conditioning, Refrigeration, Pets	Allergy disease, Respiratory disease

더욱이 최근에는 새로운 건축자재가 사용됨에 따라 포름알데히드(formaldehyde), 석면(asbestos), 라돈(radon) 등과 같은 오염물질이 방출되고 있으며 컴퓨터, 복사기 등의 사무기기 사용이 증가함에 따라 다양한 오염물질이 발생되고 있다.

Table 2.5는 실내에서 발생하는 주요 오염물질을 발생원과 인체에 대한 영향으로 나타낸 것이다. 실내의 공기오염을 방지하기 위해서는 실내에서 발생하는 오염물질의 특성을 파악하고 적정한 환기 및 정정장치를 계획하여 효율적으로 실내 공기질을 유지할 수 있도록 하여야 한다.

2.3.2 환기에 의한 공기질 제어

환기란 실내공간에 요구되는 깨끗한 공기를 공급하는 것을 의미하며 실내의 공기정화, 온열 환경조건의 개선, 산소의 공급, 수증기 제거 등 재실공간에 대하여 오염물질을 제거하고 희석하는 역할을 하며 재실자의 신진대사에 필요한 신선한 공기를 공급할 수 있도록 실내·외의 공기를 교체하는 행위를 말한다. 실내에 공급되는 깨끗한 공기가 오염된 공기와 완전하게 혼합되는 것으로 가정하면, 일정한 오염원의 발생량이 존재하는 실내에서 오염물질의 농도는 환기량과 밀접한 관계를 나타낸다.

일반적인 단위 학교 교실에서 환기 및 기밀성능에 영향을 미치는 주요 공기유동 경로는 창호, 출입문, 배기구 또는 배기팬, 건물외벽 구조체 등을 통한 건물 내·외부간의 공기유동과 교실과 교실사이에서 발생하는 건물내부간의 공기유동을 들 수 있다.

건물 내·외부로 공기유동은 실내 환기량을 증가시켜 에너지 사용량을 유발시키고, 의도하지 않은 침기(Infiltration) 현상을 일으켜 실내 거주자의 열적 쾌적감을 저하시킬 수 있으며, 우리나라와 같이 한랭한 동계조건을 갖

는 지역에서는 결로발생의 문제가 제기되기도 한다. 이러한 공기유동 경로를 확인하고 그로 인해 발생할 수 있는 침기 및 누기량을 측정하여 건물의 환기 및 기밀성능을 정량적으로 평가하는 것은 에너지절약 측면뿐만 아니라 쾌적한 실내환경의 확보와 거주자의 건강유지 등의 관점에서 매우 중요하다.

ASHRAE 62-1991에서는 적절한 실내 공기질을 유지하기 위한 각 오염물질의 농도한계를 제시하는 방법과 최소 환기량을 제시하는 두 가지 방법에 관하여 설명하고 있다[31].

(1) 희석

발생한 오염물질이 국부적으로 정체되어 있지 않도록 나머지 실내공기와 혼합하여 실내 오염물질의 농도를 제어한다. 발생원의 위치가 불확정적이며 발생원에 의한 제어가 불가능한 경우 실내의 공기를 전체적으로 혼합함으로써 전체 평균농도를 낮추고 신선외기와 교체하는 방법을 의미하여 가장 일반적인 실내환경 제어방법이다. 이것은 오염농도의 제어 측면에서 뿐만 아니라 ASHRAE 62-1991에서 제시하는 최소 외기량을 공급하는 방법이기도 하다. 외기의 공급에 의하여 필연적으로 환기에 의한 냉난방부하가 발생하는데 공기 대 공기 열교환기 등을 설치하여 급기와 배기의 온도차에 의한 엔탈피를 회수함으로써 에너지절약을 기할 수 있다.

(2) 혼합방지

혼합방지는 오염발생을 국부적으로 격리하는 방법으로 에어커튼 등의 실내기류 방생장치나 환기장치를 이용하여 격리하는 방법을 의미한다. 예를 들어 벽으로 구분되어 있지 않는 흡연실과 비흡연실의 사이에 에어커튼을

설치하여 두 개의 다른 구역의 공기가 서로 혼합되지 않도록 하는 방법이다.

(3) 차압에 의한 기류 제어

두 개의 서로 다른 공조 구역에 대해서 압력차를 유지시킴으로써 한 방향으로만 실내기류가 형성되도록 제어하는 방법이다. 한쪽 공조 구역에서의 배기가 다른 공조구역의 급기 역할을 하는 것으로 공조구역을 차별화할 때 이용될 수 있다. 예를 들면 병원에서는 외부의 오염물질이 유입되지 않게 하기 위해서 환자실에 양압(+)¹⁾을 유지시켜 주어야 한다. 또한 전염성이 있는 환자실에 대해서는 발생한 각종 병원균등이 다른 곳으로 확산되지 않도록 하기 위해서 오히려 환자실에 음압(-)²⁾을 유지시켜 주어야 한다.

2.3.3 환기 성능평가 방법

환기 성능을 평가하기 위해서 환기효율의 개념을 많이 사용한다. 환기효율이란 실내에 존재하는 오염공기가 어떻게 효과적으로 환기시스템으로부터 공급되는 신선한 공기와 교체되는가를 나타내는 척도로서, 표준적인 환기상태를 기준으로 하여 실제상황에서의 환기의 효과를 나타낼 수 있어야 한다.

환기성능을 평가하기 위한 추적가스 측정법은 추적가스를 이용하여 공기 유동을 평가하는 방법으로 오래전부터 사용되어져 왔다. Pettenkofer(1858)가 사용한 추적가스 기법은 가장 오래된 것으로서 석탄을 태워 CO₂를 만들어 사용하였으며 병원에서 환기량을 평가 하는데 사용되었다. 그 후 Marlet(1935)와 Dick(1950)는 건물내의 자연환기량을 평가하는데 추적가스 기법으로 수증기를 사용하였다. Perera(1983) 등은 건물내 기류의 연구에 대한 다중추적기술(Multiple tracer techniques)로 여러 가지 가스의 농도를 동시

에 측정할 수 있도록 설계되어진 적외선 분석기를 사용하여 SF₆, CO₂ 및 NO₂를 동시에 분석하였다[32].

Fig. 2.6은 공기령 정의에 대한 개념도로서 공기입자가 실내의 임의의 P점에 도달하는데 걸리는 시간을 공기령(Age of air) 또는 연령(Internal age)라고 하며, P점에서 배기구로 도착하는데 걸리는 시간을 여명(Residual life of air)이라 하며, 급기구에서 배기구까지의 시간을 수명 또는 체류시간(Residence time of air)이라고 한다. 공기의 국소평균연령은 공기가 급기구로부터 실내의 임의의 점 P로 이동하는데 걸리는 평균시간으로 정의하며 이 시간이 짧을수록 실내의 임의의 점에서의 공기는 더 신선하며 환기가 효과적으로 이루어진다고 할 수 있다. 실평균연령은 실내 전공간에 대해 각 점에서의 공기의 평균연령에 대한 평균으로 실 전체 환기의 효율을 나타내는 지표로서 이용할 수 있다.

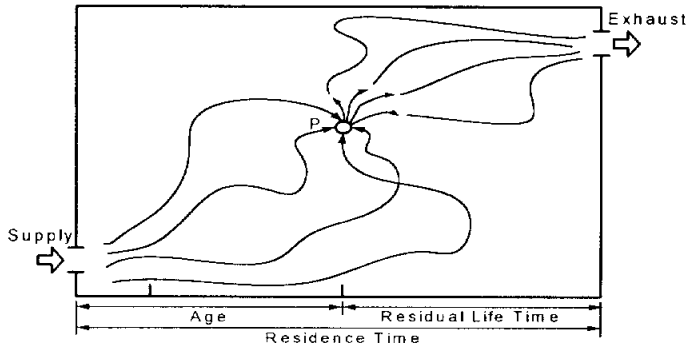


Fig. 2.6 Concept of spread air and the room mean age

실내의 각 위치에서의 공기는 연령반도분포(Age of distribution)인 $\phi(t)$ 와 통계누적 연령분포(Cumulative age distribution)인 $\Phi(t)$ 에 의해 특징 지워진다. Fig. 2.7은 급기로부터 시각 $t=0$ 에서 급기된 공기입자 중 P점에 도

달하는 공기입자의 빈도분포곡선으로서 연령빈도함수 $\phi(t)$ 는 급기구를 통해 실내로 유입된 공기입자 중 실내 임의의 점 P에서의 연령이 t인 공기의 빈도를 나타내는 함수이며 연령이 t인 공기입자의 개수를 말한다.

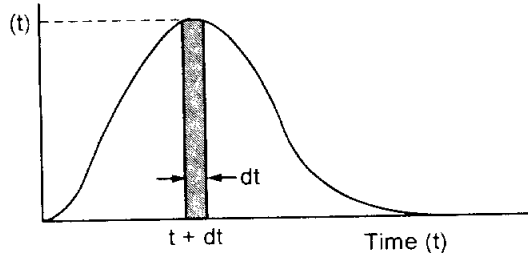


Fig. 2.7 Room mean age of the frequency distribution curve

통계학적 연령분포함수 $\Phi(t)$ 는 그 지점에서 공기의 연령이 t보다 작거나 같은 공기 입자의 총합으로서 시각 0에서 t까지의 연령을 가진 공기입자의 총 개수를 의미한다. $\phi(t)$ 와 $\Phi(t)$ 의 관계를 수학적으로 나타내면, 통계학적 연령분포함수 $\Phi(t)$ 를 시간 t에 대해 미분하면 연령빈도함수 $\phi(t)$ 를 얻게 된다.

$$\frac{\delta\Phi(t)}{\delta t} = \phi(t) \quad \text{또는} \quad \int_0^t \phi(t)dt = \Phi(t) \quad (2-8)$$

따라서 공기의 국소 평균연령은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\tau_p = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot \phi(t)dt}{\int_0^{\infty} \phi(t)dt} \quad (2-9)$$

여기서, 분모는 실내 임의의 측정점 P에 도달하는 공기입자의 총수를 의미하며 분자는 공기입자의 빈도를 그 연령으로 가중한 것을 의미한다. 그리고 연령빈도함수 $\phi(t)$ 를 공기입자의 총수에 대해서 무차원화 하면, 분모는 1이 되므로 결과적으로 국소 평균연령은 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_p = \int_0^{\infty} t \cdot \phi(t) dt \quad (2-10)$$

따라서 국소 평균연령은 측정점에 따른 연령 분포의 시간에 대한 일차 모멘트이다. 이와 같은 공기령은 추적가스를 사용하여 시간에 따른 농도변화를 측정하여 측정할 수 있다.

2.3.4 환기효율 지표

실내환기의 목적은 실내에서 발생하는 오염물질과 열 등을 실내기류에 의해 효과적으로 배출하여 실내의 청정도 및 양호한 열환경을 유지하는데 있다. 실내에는 환기구로부터 신선공기가 빨리 도착하여 청정도가 높은 지점이 있는가 하면 상대적으로 오염물질과의 교체가 불충분하여 실내에서 발생하는 오염물질이 배출되기 어려운 지점이 있다. 이러한 실내 각 지점에서 신선공기와 의 교체되는 것은 급기구에서부터 배기구에 이르기까지 실내공기의 유동장에 의해 결정된다. 환기효율지표는 이러한 다양한 공기가 교체되는 방법을 수량적으로 구체화하여 평가하는 것으로서 실내 각 지점의 함수로서 다루어지는 지표이다.

(1) AIVC의 실내 공기교환효율(Air change efficiency)

AIVC(Air infiltration and ventilation center)에서는 Technical Note 28 “A Guide to Air Change Efficiency”으로 공기령의 개념을 기본으로 하는 환기효율지표를 제안하고 있다[33].

공기입자가 P점에 도달하는 모든 공기입자의 평균도달시간인 P점의 국소 평균공기령(Local mean age of air, $\bar{\tau}_p$)은 특정한 P점에 있어서의 값이고 이것을 실내의 모든 점에서 구하여 공간 평균값으로서 정의한 것이 실평균 공기령(Room mean age of air, $\langle \bar{\tau} \rangle$)이다. $\bar{\tau}_p$ 와 $\langle \bar{\tau} \rangle$ 를 이용하여 국소공기교환율(Local air change index, ϵ_p), 공기교환성능계수(Coefficient of air change performance, η), 그리고 실내공기교환효율(Room air change efficiency, ϵ_a)을 구하면 다음과 같다.

$$\epsilon_p = \frac{\tau_n}{\tau_p} \quad (2-11)$$

$$\eta = \frac{\tau_n}{\langle \tau \rangle} \quad (2-12)$$

$$\epsilon_a = \frac{\tau_n}{\tau_r} \quad (2-13)$$

여기서, τ_n 은 명목시간 상수(Nominal time constant)로서 환기횟수의 역수이며 실내 전체 체적만큼 외기를 공급하는데 걸리는 시간, 즉 실용적을 공급되는 유량으로 나눈 값이며 완전 혼합일 경우 실평균 공기령과 같게 된다. τ_r 은 공기교환시간(Air change time)으로서 실내공기가 완전히 교체되

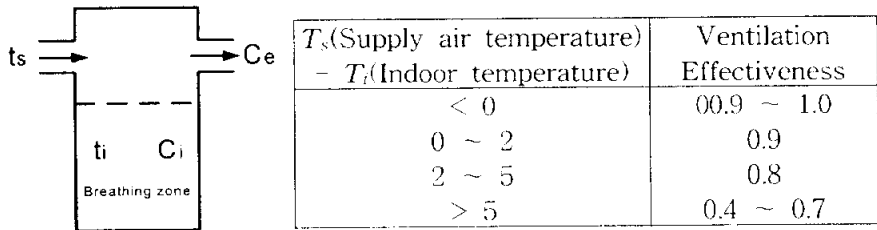
는데 걸리는 시간으로서 $\bar{\tau}_r = 2\langle \tau \rangle$ 가 된다. ϵ_a 는 실내공기가 어느 정도 빨리 교체되는가에 대한 척도로서 피스톤 유동일 경우 $\tau_n = \bar{\tau}_r$ 이므로 $\epsilon_a = 1.0$ 이 된다. 그리고 완전 혼합일 경우 $\epsilon_a = \tau_n / \bar{\tau}_r = \tau_n / 2\tau_n = 0.5$ 로서, η 는 1.0 또는 100%가 된다.

(2) EC Commission에 의한 환기 지침

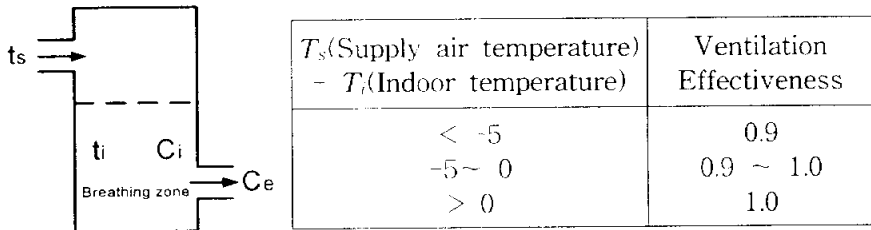
유럽의 환기효율(Ventilation effectiveness, ϵ_v)은 거주역에서의 공기 청정 지수로서 공기의 오염물질 농도를 사용하여 배기구에서의 농도와 호흡역에 있어서의 농도비로서 다음과 같은 식으로 정의하고 있다.

$$\epsilon_v = \frac{C_e - C_s}{C_i - C_s} \quad (2-14)$$

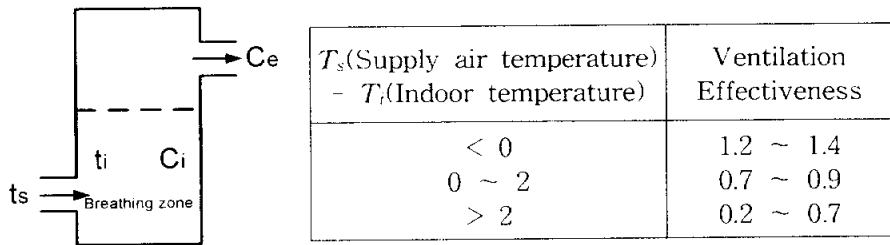
여기서, C_e 는 배기중의 오염물질 농도, C_s 는 취출공기중의 오염물질 농도, 그리고 C_i 는 거주역에서의 오염물질 농도이다. ϵ_v 는 오염물질의 발생상황과 발생장소에서 큰 영향을 받기 때문에 환기효율을 제시할 때는 반드시 이러한 오염물질에 대해 명확히 기술해야 한다. Fig 2.8은 유럽의 환기규격안으로서 CEN TC 156/WG "Ventilation for Buildings"에서 제시한 각종 환기방식에 의한 호흡역의 환기효율의 예를 나타낸 것이다[34].



(a) mixing ventilation



(b) mixing ventilation



(c) displacement ventilation

Fig. 2.8 Ventilation effectiveness in the breathing zone of spaces ventilated in different ways

(3) ASHRAE Standard에 의한 환기효율

ASHRAE에서는 Standard 55-1992[28]에서 재실자를 위한 온열환경 조건을, 그리고 Standard 62-1991[31]에서 실내공기의 질이 고려된 실내공기환경 유지를 위한 환기규정을 제시하고 있는데, 허용 공기환경기준을 재실자의 80%이상이 만족하고 있으며, 취기가 있는 오염물질에 적어도 비전문가가 20

병이상 포함된 평가집단의 80%이상이 대상 공간에 들어가서 15초 이내에 답변한 평가의 결과가 만족스러운 것일 때 허용 가능한 실내공기환경으로 정의하고 있다. 또한 실내 공기질의 기준값과 그 기준값을 달성하기 위하여 실내 공기가 완전혼합되어 있다는 가정하에 외기도입량을 규정하였다.

J. E. Janssen은 환기효율(Ventilation efficiency, E_v)을 거주역에 공급되는 외기량과 건물전체에서의 총 외기도입량에 대한 비율로서 정의하였고 재순환 덕트(Return duct) 계까지 포함한 실내를, 취출기류인 단락유동(Short circuiting)영역과 거주역으로 분할한 성층모델(Stratification model)에 의해 환기효율을 유도하였다[35]. 대표적인 환기시스템으로 강제 환기되고 있는 실내에서, 급기에 포함되는 총 외기량을 Q_{os} , 외기량 Q_o , 취출구에서 배기구로 단락유동이 되는 비율인 성층율 $S(0\sim 1.0)$, 순환공기(Return air)가 재순환되는 비율이 $R(0\sim 1.0)$ 일 때, 급기되는 총 외기량은 $Q_{os}=Q_o+R\times S\times Q_{os}$ 가 되며, 사용되지 않고 배기되는 배기량은 $Q_{oe}=(1-R)\cdot S\cdot Q_{os}$ 가 된다. 이 때 거주역에 대해서 외기가 혼합되는 효율 E_v 는 다음과 같다.

$$E_v = \frac{Q_o - Q_{os}}{Q_o} = \frac{1 - S}{1 - RS} \quad (2-15)$$

만약 식 (2-15)에서 배기가 없다면 $R=1$ 로서 이때의 효율은 100%가 된다. 이후 ASHRAE Standard 129P (Public review draft)에서는 신선한 외기가 거주역으로의 분배되는 성능을 호흡역에서 평가하였다. 호흡역에서의 평균 공기교환율(Air change effectiveness, E_{ace})은 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$E_{ace} = \frac{\tau_r}{A_{avg}} \quad (2-16)$$

여기서, A_{avx} 는 실내 호흡역에서 측정된 공기량의 평균으로서 실내 공간에 있어서 호흡역 높이의 공기량 평균값을 전 거주역의 대표값으로 보고 있다.

(4) Sandberg에 의한 환기효율

공기연령의 개념을 이용하여 환기효율을 제안한 Sandberg는 실내에 공급된 신선외기가 실내 공간으로 공급될 때까지 소요되는 시간이 짧을수록 환기효율이 높다고 정의하였다[36]. ASHRAE와 AIVC등은 물론, 현재 사용되고 있는 대부분의 환기효율의 개념은 그의 연구결과에 근거하고 있다.

Sandberg에 의해 제안된 환기효율은 크게 두 가지 개념으로 나눌 수 있다. 건물 또는 공간내에서 발생된 오염물을 제거할 수 있는 능력을 나타내는 Ventilation efficiency와 환기를 위한 신선공기를 건물 또는 공간내에 전달하는 능력을 나타내는 Ventilation effectiveness로 나눌 수 있다.

Ventilation efficiency ($\langle \epsilon \rangle$)는 오염물의 실평균농도에 대한 배기구에서의 오염물 농도비로서 다음과 같이 나타낸다.

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{C_e}{\langle C \rangle} = \frac{\tau_n}{\tau_{ce}} \quad (2-17)$$

여기서, C_e 는 배기구에서의 농도, $\langle C \rangle$ 는 실평균 농도, τ_n 은 명목 시간 상수, 그리고 τ_{ce} 는 배기구에서의 평균 공기량으로서 이와 같은 환기효율의 정의는 1937년 Yaglou에 의해 확립되어온 개념이다. 이에 비해 Ventilation effectiveness (ϵ_a)는 실평균 공기량에 대한 명목 시간 상수(Nominal constant)의 비로서 나타내며 공기교환율(Air exchange effectiveness)이라고

하고 다음과 같이 나타낸다.

$$\epsilon_a = \frac{\tau_n}{2\langle\tau\rangle} \quad (2-18)$$

여기서, τ_n 은 명목 시간 상수, $\langle\tau\rangle$ 은 실평균 공기령이다.

일반적으로 Ventilation efficiency보다 공기교환율(Air exchange effectiveness)의 개념으로 Ventilation effectiveness를 많이 사용한다[31].

2.3.5 실내 필요 환기량

환기는 실내 공기의 오염을 허용치 이하로 유지시키기 위하여 실내로 깨끗한 공기를 공급하고 오염된 공기를 실외로 배출시키는 것을 의미하며, 이때 외기 도입량 증가는 실내의 환기횟수를 증가시켜 오염된 공기를 희석시킴으로써 쾌적성을 향상시킬 수 있다.

공조설비의 설계과정에서 적절한 환기량의 설정은 매우 중요한 사항이며 재실자의 신선대사에 필요한 신선한 공기를 공급할 수 있도록 최소 환기량을 설정하게 된다. 환기량을 과도하게 설정하면 냉방 또는 난방에너지의 소비량이 증가하게 되어 비합리적인 설계가 된다.

세계 주요국가의 환기기준은 대개 주거용 건물과 사무소나 학교와 같은 공공건물의 유형에 따라 최소환기량 기준치를 제시하고 있다. 그러나 건물의 실용도별 환기량에 대한 각국의 기준은 실의 체적이나 재실자 수가 각기 다르기 때문에 단순하게 비교하기는 매우 어렵다.

Table 2.6은 미국(ASHRAE Standard 62 1989), 일본(HASS 102-1997), 유럽(EU)에서 권장하는 각 공간별 필요환기량을 나타낸 것으로, 재실공간에

공급해 주어야 하는 최소환기량 규정이다.

Table 2.6 Recommended ventilation air flow rate for comfort control

Nation	Standard for Ventilation	Application	Ventilation Rate
U.S.A	ASHRAE Standard 62-1989	Shop	1.25 ($\ell/s \cdot m^3$)
		Classroom	2.8 ($\ell/s \cdot m^3$)
		Conference Room	5.0 ($\ell/s \cdot m^3$)
		Office Space	1.25 ($\ell/s \cdot m^3$)
		Residence	1.25 ($\ell/s \cdot m^3$)
			7.5 ($\ell/s \cdot person$)
Japan	HASS 102-1997	Living Room of Residence	8.3 ($\ell/s \cdot person$)
Europe	EU	Private Office Space	1.4 ($\ell/s \cdot m^3$)
		Conference Room	4.3 ($\ell/s \cdot m^3$)
		Auditorium	11.0 ($\ell/s \cdot m^3$)
		Restaurant	3.2 ($\ell/s \cdot m^3$)
		Classroom	4.3 ($\ell/s \cdot m^3$)

ASHRAE Standard 62-1973에서는 다양한 건축조건에서의 최소 환기량과 권장량을 설정한 이후 몇 번의 개정작업을 거쳐 에너지소비와 실내오염문제에 적절한 균형을 유지하기 위한 ASHRAE Standard 62-1989를 제시하고 있다.

노르웨이, 덴마크 등 유럽국가에서는 WHO에서 1987년 제정한 유럽의 실내공기환경 지침서(Air quality guidelines for Europe)에 근거하여 기준을 설정하고 있으며, WHO는 이 기준을 실내공기환경과 건강 측면의 여러 연

구결과에의 축적된 증거자료를 참고로 1997년 개정안을 제시하고 있다.

ASHRAE Standard 62-1989의 환기규격에서 주택의 경우 1인당 권장 환기량이 $7.5 \ell/s \cdot \text{인}$, 바닥면적당 권장환기량이 $0.25 \ell/s \cdot \text{m}^2$ 로 규정하고 있다. 일본의 환기규격 HASS 102-1997에서는 거실에서 $8.3 \ell/s \cdot \text{인}$ 으로 ASHRAE 환기규격과 유사한 환기조건을 갖는다.

Table 2.7은 각국에서 규정하고 있는 학교건물에 대한 최소 필요환기량 기준을 나타낸 것이다. 환기량의 표시는 국가별로 1인당의 필요환기량($\text{m}^3/\text{인}$) 또는 실 전체에 대한 시간당 필요환기량(m^3/h), 환기횟수(회/h)등으로 표시하고 있다. 학교건물에서는 주로 재실자로부터 발생하는 실내의 CO_2 농도를 제어하기 위한 필요환기량으로 제시된 것이며, 일반 주거용 건물보다 다소 높은 환기량을 보이고 있다. 환기횟수 1~5회/h, 1인당 환기량 4~10 ℓ/sec 정도의 범위에서 기준이 설정되었다.

Table 2.7 Minimum ventilation rate requirements in school buildings[26]

Nation	Ventilation Rate
Belgium	30 m^3/h for a person
Canada	8 ℓ/sec for a person
Finland	0.6~0.8 m^3/h for a person
France	15 m^3/h for a person
Germany	30 m^3/h for a person
Italy	1.5~5.0 (ventilation rate)
Netherlands	0.55 m^3/h for a person
New Zealand	8 ℓ/sec for a person
Sweden	10 ℓ/sec (smoking), 5 ℓ/sec (non smoking)
England	5~8 ℓ/sec or 1~2 ℓ/sec
U.S.A	8 ℓ/sec for a person
Norway	0.7~5.5 ℓ/sec for a person

환기량 설정에서는 흡연여부에 따라 기준치를 다르게 제시하고 있는데 흡연구역의 필요환기량은 금연구역보다 약 30~60%정도의 높은 값으로 규정하고 있으며, 금연구역의 최소환기량은 나라에 따라 $4\sim 10\ell/s \cdot \text{person}$ 을 권장하기도 하였다.

대부분의 국가가 최소 필요환기량을 1인당 ℓ/s 로 기준하는 것과는 달리 노르웨이의 경우, 작업환경관련지침(Guidelines relating to the working environment act, Climate and air quality in the workplace)에서는 재실자로부터 발생하는 오염물질과 재실자 이외의 오염원 즉, 건축자재로부터 방출되는 오염물질과 그 외 작업활동이나 장비로부터 요구되는 환기량을 보정하여 최종 환기량을 제시하는 방법을 제안하고 있다. 재실자에 의한 최소환기율은 금연시 작업의 경중에 따라 $7\sim 10\ell/s \cdot \text{person}$ (사무소 경작업의 경우 $7\ell/s \cdot \text{m}^3$), 흡연시 $20\ell/s \cdot \text{person}$ 으로 재실자 이외의 오염원으로부터 발생하는 오염물질의 제거를 위한 환기율은 일반적으로 공용면적을 포함하는 바닥면적당 $0.7\ell/s \cdot \text{m}^3$ 으로 제시하였다. 또한, 건물자체에 의한 오염의 정도를 세분하여 신축건물의 경우, 처음 1년간은 최소 $1.7\ell/s \cdot \text{m}^3$ 을 권장하고 건물 입주전 2~3주간 고온으로 건물을 난방함으로써 오염물질을 제거하는 기법(bake out)을 적용할 경우는 그 수치가 완화될 수 있음을 명기하고 있다.

이와 같이 건물자체로부터 방출되는 오염물질의 제거를 위한 환기량을 세 단계로 제시한 노르웨이의 예는 최근 재실자보다는 건물자체가 보다 위대한 오염원이 될 수 있다는 의견을 반영하는 환기기준 설정의 새로운 방향을 보여주는 중요한 예라고 할 수 있다.

2.4 학교건물의 실내 환경기준

우리나라 최초의 학교 설계도면은 1895년에 간행된 “學校建築圖說明及設計人斐”이다[17]. 주요내용을 살펴보면 “교사의 형상은 될 수 있는 한 장방형으로 하고 복도를 두어 교실을 좌우로 배열하는 등은 삼가 할 것, 교실의 방향은 남 또는 서남, 동남으로 하여 외부 광선을 생도의 좌측으로부터 받을 수 있도록 할 것, 추운 지방의 창은 이중으로 하며 따뜻한 지방에서는 창 밑에 통풍창을 설치하여야 한다.”로 되어 있어 환기와 채광이 불량한 중 복도 형식은 부정되었고, 햇볕에 의한 자연난방과 환기에 대하여 특별히 정하고 있다.

또한 교실의 향에 대하여 남측편복도 교실 형태와 북측편복도 교실에 대한 논란이 있었으나, 1902년 일본 Misima 교수의 “교사 위생상의 이해 조사 보고”에 의해 태양열 수열면에서 북측편복도 교실의 우위를 인정하여 일본 정부에서는 북측편복도 교실로 학교를 건립토록 하였는데, 당시 일제 치하에 있던 우리나라도 그대로 답습하게 되었고, 오늘날까지 북측편복도 교실 형태를 유지시키고 있는 실정이다.

해방 이후 학교건물의 내부 설비기준으로는 1969년에 제정된 “학교시설·설비기준령”이 있으며 1992년까지 14차례에 걸쳐 개정 보완되었다. 주요내용 중 환경기준으로는 1969년 제정당시 도서실과 야간수업에 사용되는 교실의 책상 밑과 흑판 면에 대하여 조도기준은 50룩스 이상으로 하도록 하고 있으며, 7차 개정에서는 조도의 기준을 150룩스로 상향조정하였다. 이와 같이 당시의 환경기준은 도서실 및 야간학교 교실에 있어서 조도만을 기준으로 하였다.

1995년 5월 신교육체제를 수립하기 위한 교육개혁 방안을 수립하게 되었고 이리한 신교육체제에 능동적으로 대처하기 위한 방안의 하나로서 교육여

간의 개선을 중요추진과제로 선택하게 되었다. 이를 실행하기 위해 당시 교육부에서는 교육여건 개선을 위한 기초 작업으로 교육환경개선사업 재원 확보를 위한 “교육환경개선특별회계법”을 1995년 12월 제정하였고, 이에 따라 1997년 9월 “고등학교이하각급학교의 설립·운영에 관한규정”을 제정하여 처음으로 학교건물 교사내 환경기준을 정하였다. 조도기준을 150룩스에서 300룩스로 상향조정하여 KS규정의 최소기준과 일치시키고, 실내온도는 그 당시의 여건을 감안하여 겨울철 난방시설만을 고려하도록 최저 온도 기준 18℃를 신설하였으며, 소음기준은 “소음·진동규제법 시행규칙” 관련사항을 고려하여 55dB이하로 정하였다.

그러나 “고등학교이하각급학교의 설립·운영에 관한규정”에서 제시한 조도, 온도, 소음의 3가지 요소만으로 규정된 기준이 학습자들의 학습능률과 쾌적한 학습환경을 조성하기 위한 필요한 요소라고 볼 수는 없었다.

따라서 새로운 교육과정의 운영과 쾌적한 학습환경의 요구에 따라 시대에 걸맞는 환경기준의 필요성과 OECD국가수준에 걸맞는 교육환경을 조성하기 위하여 교육인적자원부에서는 2002. 4. 18일 기존의 “학교보건법”을 개정하고 “학교보건법 시행규칙(교육인적자원부령 제804호)”을 제정하여 교실의 환경위생기준을 실정하였다. Table 2.8은 교실내의 환경위생기준을 나타내었다.

또한 기존 학교에 관한 경과조치로서 이 기준에 미달되는 학교의 설립·경영자는 이 규칙 시행일로부터 5년 이내에 기준에 적합하게 보완하도록 하고 있다.

학교시설의 이산화탄소 농도 기준은 우리나라와 미국의 경우 1,000 ppm을 기준으로 하고 있으나, 일본의 경우는 분부과학성에서 제정한 학교환경위생기준에 따라 1,500 ppm으로 기준을 정하여 실내 공기환경을 관리하고 있다.

세계보건기구(WHO)의 일반생활환경 권고치는 920 ppm으로 되어 있다.

또한 사람을 유일한 오염원으로 간주하였을 때, 실내 공기환경의 최소 환기기준 설정을 위하여 ASHRAE에서는 방문자의 20%가 불만족할 경우를 근거기준으로 하였고, 유럽과 일본 등지의 연구결과에 의하면 1인당 약 8ℓ/s (29m³/h)의 환기량을 요구하고 있다. 그러나 학교의 경우 학생들의 쾌활량이 다소 작은 것을 감안하여 1인당 6ℓ/s (21.6m³/h)가 환경위생기준으로 설정되었다.

Table 2.8 Guidelines for environmental design in classrooms

Classify	Standard Amount
Temp.	<ul style="list-style-type: none"> · Winter : 18~20℃ · Summer : 26~28℃
Humidity	<ul style="list-style-type: none"> · 30%~80%
Ventilation	<ul style="list-style-type: none"> · 21.6m³/h for a person
CO ₂	<ul style="list-style-type: none"> · less than 1,000ppm in an hour
PM10(Dust)	<ul style="list-style-type: none"> · 150μg/m³ in a day
Roughness	<ul style="list-style-type: none"> · more than 300Lux
Natural lighting	<ul style="list-style-type: none"> · The rate between outdoor roughness and indoor roughness must be more than 5% · The rate between maximum and minimum of roughness must be less than 10 : 1
Noise	<ul style="list-style-type: none"> · less than 55dB

* 자료 : 학교보건법 시행규칙

제 3 장 학교건물의 특성 및 냉난방시설 현황조사

3.1 현황조사의 개요

3.1.1 배경 및 목적

최근 경제성장에 따른 생활수준의 향상과 OECD국가 수준의 쾌적한 교육 환경 조성을 위한 노력의 일환으로 학교건물에 난방시설은 물론 냉방설비의 설치가 점차 증가되고 있다. 이러한 시설의 보급은 신체적 정신적 성장 발육단계에 있는 학생들에게 쾌적한 환경을 조성함으로써 학습능률의 향상이 예상된다. 그러나 냉난방시설 가동에 따른 에너지소비 증대로 많은 재정수요가 요구될 뿐 아니라, 가동 중에는 오염된 공기를 신선한 외부의 공기와 교환하지 못하여 발생할 수 있는 공기질 문제 등, 실내환경에 부정적인 면으로도 이어질 수 있다.

본 장에서는 학교건물의 특성 및 전국 초·중·고등학교의 냉난방설비 현황을 파악하고 문제점을 분석함으로써 온열환경 개선을 위한 기초 자료를 제시하는데 목적이 있다.

3.1.2 조사방법 및 범위

냉난방시설 실태조사는 2003년 3월 전국 16개 시·도 교육청의 협조를 얻어 실시하였다. 이번 냉난방시설 실태조사에서는

첫째, 학교 건물 특성에 따른 냉난방 방법과 문제점을 파악하고자 하였으며, 이에 대한 연구범위로 학교 건물의 규모, 학교 유형별 재실시간 및 이용 형태에 따라 조사하였다. 냉난방 부하특성을 파악하기 위하여 건축물의 에

너지설계기준에 따라 지역별로 부하를 계산하여 비교 검토하였으며, 학교건물의 표준적인 모델을 기준으로 열부하계산 프로그램 LOADSYS를 활용하여 계산하였다.

둘째, 전국 초·중·고등학교의 냉난방설비시스템 실태조사는 교실냉난방 현황, 방식별 시설현황, 학교급별 냉난방시설현황, 기후 및 지역 유형별 냉난방시설현황으로 구분하여 실시하였다. 특히, 이번 현황조사에서는 학교마다 교실 수 차이가 크므로 보다 정확한 자료를 파악하기 위하여 학교의 규모에 상관없이 교실수를 기준으로 조사하였다.

3.2 학교건물의 특성

3.2.1 학교건물의 규모

건축물의 설비시스템 선정은 건물의 규모와 밀접한 관계가 있으므로 학교 건물의 규모를 파악하기 위하여 학급 규모에 따른 학교 분포현황을 조사하였다. 우리나라 전체 초·중·고등학교의 학교수는 2002년 12월 현재 10,188 개교이며, 학급 규모에 따른 학교수는 Table 3.1과 같다. 초등학교의 경우 10학급 미만의 학교가 전체의 41%로써 소규모 학교의 비중이 상당히 높으나, 중학교의 경우는 소규모에서 40학급의 학교까지 비교적 고른 분포를 나타내고 있으며, 고등학교의 경우는 30학급의 학교가 전체의 24%로 가장 많다. 전체적으로 대도시나 중소도시는 일반 규모(초 : 30학급, 중·고 : 24학급 정도)의 학교가 큰 비중을 차지하는데 비해 농어촌은 소규모 학교가 많다.

일반적으로 학급 규모가 작은 학교 일수록 유휴교실이 많고 교실의 사용률이 낮으므로 개별 냉난방이 필요하며, 학급규모가 많은 학교건물에서는 중앙난방방식이 합리적이다.

Table 3.1 Status of class scale

(Unit : Figure)

Figure Classify	below5	6-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	over60	Figure
Elementary School	393 (7%)	1,819 (34%)	721 (13%)	782 (15%)	758 (14%)	603 (11%)	251 (5%)	57 (1%)	5,384 (100%)
Middle School	606 (21%)	468 (17%)	481 (17%)	662 (24%)	487 (17%)	103 (4%)	2 (-%)		2,809 (100%)
High School	98 (5%)	227 (11%)	403 (20%)	353 (18%)	476 (24%)	371 (18%)	52 (3%)	15 (1%)	1,995 (100%)
Sum	1,097 (11%)	2,514 (24%)	1,605 (16%)	1,797 (17%)	1,721 (17%)	1,077 (11%)	305 (3%)	72 (1%)	10,188 (100%)

3.2.2 학교 유형별 재실시간

학교건물은 이용시간 및 이용형태의 차이에 따라 초등학교와 중·고등학교의 두 가지 유형으로 구분할 수 있다. 초등학교는 하루 중 건물의 사용시간이 비교적 짧으나, 중·고등학교는 건물의 사용시간이 야간에까지 연장되는 관계로 설비의 부하 산정이나 시스템 선정시 충분히 고려해야 한다. 따라서 중·고등학교의 설비시설물은 주간은 물론 야간 사용시간대까지 충분한 방열을 확보할 수 있는 시스템의 선정이 필수적으로 요구되며, 인문계 고등학교의 경우는 여름 및 겨울방학 기간 동안의 냉방 및 난방부하가 가장 크다는 점을 감안한 냉난방설비의 설치가 요망된다.

또한 학교가 학생들만의 학습공간으로서의 역할 뿐만 아니라 지역사회로 개방되거나, 방과후 특별활동에 사용되는 시간이 늘어나는 추세에 따라 일부 특별활동이 이루어지는 교실에 대해서는 별도의 조닝으로 구분되어야 한다. Table 3.2는 학교 유형에 따른 재실시간을 나타내고 있다.

Table 3.2 Stay time in the classroom by the school

Classify		Elementary School	Middle School High School	Consideration Factor
Stay Time	General Classroom	about 6 hours	about 9 hours	Special classroom and control office need separate division
	Special Classroom	about 4 hours	about 10 hours	
	Control Office	about 10 hours	about 10 hours	
Using Facilities in School holidays		Control Office	General Classroom, Control Office	
Provision for winter sowing		Rest room (Daily Heating)	Rest room (Daily Heating)	Unit Heater

3.2.3 냉난방부하 특성

학교건물은 작은 공간에 많은 학생들이 생활하는 등 일반적인 사무용 건물과 다른 특징을 가지고 있다. 냉난방부하 특성을 파악하기 위하여 온열환경 측정대상건물의 구조를 기준으로 냉난방 부하계산 프로그램인 LOADSYS를 사용하여 부하계산을 하였다. LOADSYS는 공조장치의 용량을 결정하기 위한 최대부하 계산법으로 미국에서 개발된 CLTD(Cooling Load temperature difference)법을 사용하였으며, CLTD법은 동적열부하계산법이 개발되면서 응답계수(Response factor)를 사용한 벽체의 비정상열전도 해석이 가능하게 되어 복사성분의 축열에 의한 지연효과를 고려할 수 있도록 되어 있다.

단위교실의 부하 계산을 위하여 실내·외 온도, 구조체의 열관류율, 내부발열, 침입외기량 등의 입력조건이 있으며, 모델학교에 대한 부하계산 입력 조건은 Table 3.3과 같다.

설계용 외기온도 및 실내온도조건은 “건축물의에너지절약설계기준(건설교통부고시 제2002-314호, 2003. 1. 7)”에 따라 중부(서울), 남부(광주, 부산), 제주 지역별로 구분 입력하였다. 침입외기부하는 실내·외 온도차와 외부풍속에 의해 영향을 받으므로, 하절기에는 실·내외 온도차가 작고 풍속이 작아 침입외기 부하를 무시할 수 있으나, 동절기에는 실·내외 온도차가 크고 풍속이 크므로 침입외기 부하를 계산하여야 한다. 학교건물은 외벽측과 복도측으로 창문이 설치되어 있으며, 쉬는 시간에 출입문 개폐가 잦기 때문에 침입외기량을 충분히 고려하여야 한다.

Table 3.3 Input data for load calculation by the classroom

Classify			Conditions				
			Seoul	Gwangju	Busan	Jeju	
Outdoor air condition	Cooling	dry-bulb temp. /wet-bulb temp.[°C]	31.2/25.5	31.8/26.0	30.7/26.2	30.9/26.3	
	Heating	dry-bulb temp. /wet-bulb temp.[°C]	-11.3/-12.4	-6.6/-7.8	-5.3/-7.7	0.1/-1.7	
Fixing condition	Cooling	dry-bulb temp /relative humidity	27.0°C / 55%				
	Heating	dry-bulb temp /relative humidity	21.0°C / 25%				
Ventilation			1 times/hr				
Caloric value			10 W/m ²				
Caloric value from human body			sensible heat : 51W/hr · person latent heat : 55W/hr · person				
Structure of building	direction		facing south				
	floor height		2.7m				
	width × length		7.5 × 9m				
	Window(facing south)		1.5m × 2m (4EA, double window)				
	Aisle	Door		0.9m × 2m (2EA)			
		Window		1.5m × 2m (2EA)			

Table 3.4 Results on heating & cooling load calculation by the classroom

Classify		Seoul	Gwangju	Busan	Jeju
Cooling Load [W/hr]	Sensible Heat	9,579	9,554	9,418	9,398
	Latent Heat	1,804	1,804	1,804	1,804
	Sum	11,383	11,359	11,223	11,203
Heating Load [W/hr]		5,615	5,161	4,290	4,427
		4,617	4,123	3,931	3,474

* 표 안의 윗부분은 건물의 외주부 교실이며, 아래는 가장 가운데 위치한 교실의 부하임.

실제 학교건물 설계시, 부하기기의 선정은 대개 부하가 가장 큰 교실을 대상으로 하기 때문에 이러한 영향을 파악하기 위하여 모델학교의 단위교실 중 최상층 외부에 위치한 교실을 대상으로 부하계산을 하여 상대적으로 유리한 위치인 건물 가운데 위치한 교실과의 결과를 비교하였다.

단위교실별 부하를 우리나라의 지역별 기후조건대가 상이한 4개 지역에 대하여 그 결과를 계산하였다.

Table 3.4는 단위교실에 대한 부하계산 결과를 서울(중부), 광주(남부), 부산(남부), 제주 지역별로 나타내었다. 모든 지역에서 냉방부하가 난방부하에 비하여 2.4배 이상 크고 부산의 경우는 2.8배 이상 큰 것으로 조사되었으며, 교실의 위치에 따라 냉방부하는 큰 차이가 없으나 난방부하는 서울의 경우 약 18%까지 차이가 나는 것으로 조사되었다. 또한 각 지역별로 냉방부하의 차이는 적으나 난방부하의 차이는 크며, 서울과 부산의 부하차이는 24%정도 이다.

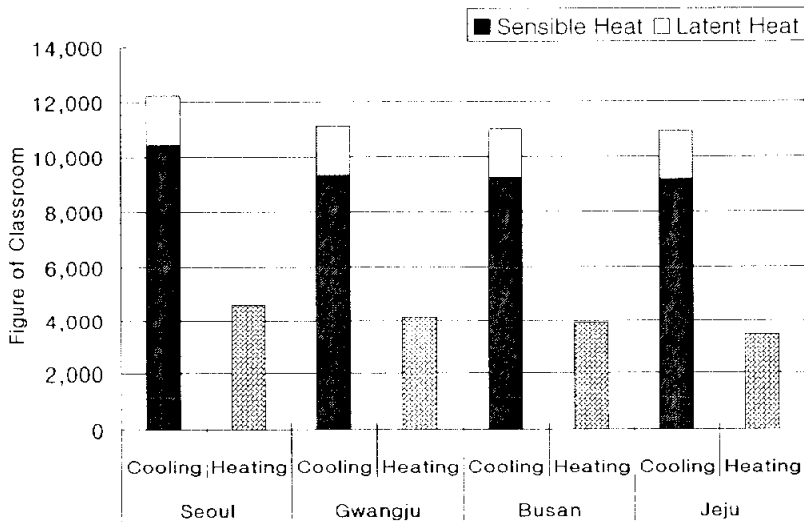


Fig. 3.1 Results on heating & cooling load calculation by the classroom

냉방부하가 난방부하에 비하여 큰 것은 단위교실에 많은 학생들이 생활하는 관계로 인체발열량이 많기 때문이며, 이 점이 다른 건물에 비하여 학교 건물의 큰 특징으로 조사되었다.

3.3 냉난방시설 현황 분석

3.3.1 교실 냉난방시설 현황

학교건물의 냉난방시설 실태를 파악하기 위하여 전국 16개 시·도교육청의 협조를 얻어 학교 교실의 냉난방시설 현황을 조사하였다. 2003년 2월 기준 전국의 초·중·고등학교 냉난방시설 조사 결과는 Table 3.5와 같다. 전체 교실의 85.4%는 난방시설이 되어 있으나 14.6%는 난방시설이 되어있지 않으며, 냉방 및 난방시설을 동시에 갖추고 있는 교실도 6.9%인 것으로 조사되었다.

비난방교실은 초등학교의 경우 전체교실의 10.8%, 중학교의 경우 18.5%, 고등학교의 경우 18%, 특수학교의 경우 3.5%로 조사되어 초등학교에 비하여 중·고등학교가 상대적으로 높게 나타났다.

Table 3.5 Status of heating & cooling by the school

(Unit : Figure)

Classify	Sum of all Classroom	Cooling & Heating	Heating	None
Elementary School	184,625 (100%)	10,181 (5.5%)	154,449 (83.7%)	19,995 (10.8%)
Middle School	98,687 (100%)	5,536 (5.6%)	74,854 (75.9%)	18,297 (18.5%)
High School	104,636 (100%)	11,130 (10.6%)	74,699 (71.4%)	18,807 (18.0%)
Special School	5,041 (100%)	462 (9.2%)	4,401 (87.3%)	178 (3.5%)
Sum	392,989 (100%)	27,309 (6.9%)	308,403 (78.5%)	57,277 (14.6%)

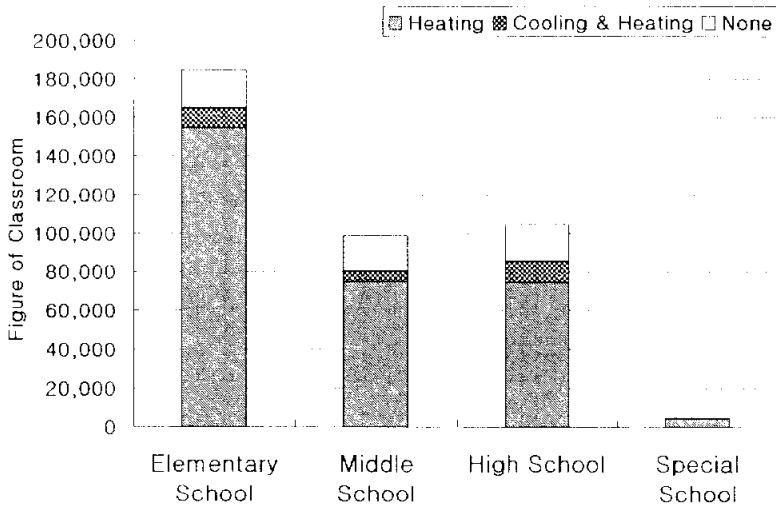


Fig. 3.2 Status of heating & cooling by the school

3.3.2 냉난방 방식별 시설 현황

최근 학교건물의 냉난방 방식별 보급 추세를 알아보기 위하여 Table 3.6 과 같이 조사하여 분류하였다. 석유난로에 의한 개별난방방식이 30.2%로 가장 많고 가스온풍기 29.8%, 심야진기축열히터 14.4%, 스팀 또는 온수보일러 9.2%, 지역난방 6.7%의 비율로 나타나고 있으며, 0.1%에 해당하는 250실의 교실이 석탄을 사용하며, 기타 1.5%에 해당하는 5,476실은 나무 등을 사용하는 새래식 난로 방식이다.

전체 냉난방교실 중 31.8%가 개별난방 인데 대부분이 석유난로를 사용하는 것으로 조사되었으며, 일반교실에 사용하는 대부분의 석유난로는 연통이 없는 회전분부식을 사용하기 때문에 유독가스의 발생으로 인한 실내공기오염의 우려가 있다. 그리고 난방시설이 안된 14.6%와 개별난로(석유, 석탄, 나무 등)를 사용하는 31.8%는 개선이 필요하며, 지역·학교별 교실의 온열 환경 격차가 큰 것으로 조사되었다.

Table 3.6 Status of equipment by the heating & cooling method

Cooling & Heating Method		Figure of classroom(rate)
Cooling & Heating	Heat pump	21,149 (6.3%)
	Heater / Chiller	6,160 (1.8%)
Central heating	Boiler	30,727 (9.2%)
	District heating	22,449 (6.7%)
Unit heater	Gas warm-air heater	99,891 (29.8%)
	Off-peak electricity	48,412 (14.4%)
	Kerosene stove	101,211 (30.1%)
	Coal	250 (0.1%)
	The others	5,476 (1.6%)
Sum		335,712 (100%)

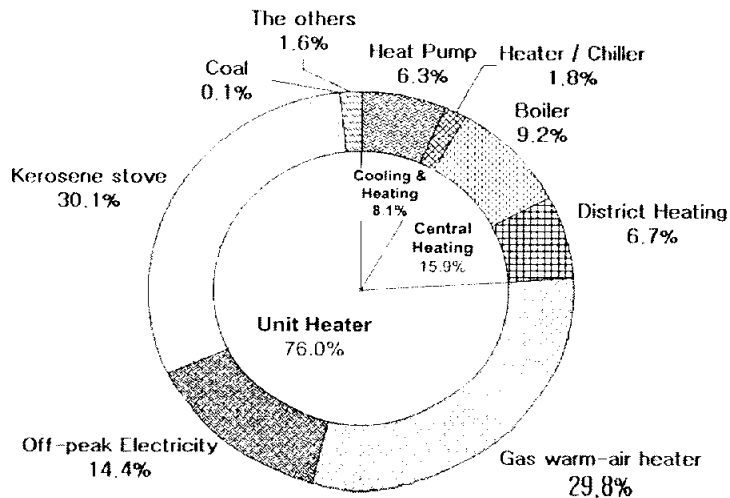


Fig. 3.3 Status of equipment by the heating & cooling method

3.3.3 학교 급별 냉난방시설 현황

학교 급별에 따른 냉난방방식의 차이를 알아보기 위해 학교 급별로 냉난방방식 분포현황을 조사하여 Table 3.7과 같이 나타내었다. 초·중·고등학교 모두 석유난로와 가스온풍기의 비중이 가장 큰 것으로 조사 되었다. 심야전기축열히터는 초등학교에는 많이 보급되었으나, 고등학교에는 오후 늦게 또는 야간에도 수업이 있는 관계로 축열량 부족에 의한 난방공급일량이 부족하여 보급률이 저조한 것으로 생각된다.

초·중학교에 비해 고등학교의 냉난방시설 비율이 높은 것은 대학입시를 대비하여 야간이나 방학 중에도 수업을 하기 때문인 것으로 생각된다.

Table 3.7 Status of heating & cooling equipment by the school

(Unit : Figure)

Classify	Heater Chiller	Boiler	District Heating	Gas warm heater	off-peak electricity	Kerosene stove	The others	Sum
Elementary School	10,181 (6%)	12,879 (8%)	10,965 (7%)	46,436 (28%)	28,709 (17%)	52,608 (32%)	2,852 (2%)	164,630 (100%)
Middle School	5,536 (7%)	5,704 (7%)	5,622 (7%)	27,408 (34%)	11,432 (14%)	23,375 (29%)	1,314 (2%)	80,391 (100%)
High School	11,130 (13%)	10,407 (12%)	5,696 (7%)	25,223 (29%)	7,634 (9%)	24,276 (28%)	1,463 (2%)	85,829 (100%)
Special School	462 (9%)	1,737 (36%)	166 (3%)	821 (17%)	637 (13%)	952 (20%)	84 (2%)	4,862 (100%)
Sum	27,309	30,727	22,449	99,891	48,412	101,211	5,713	335,712

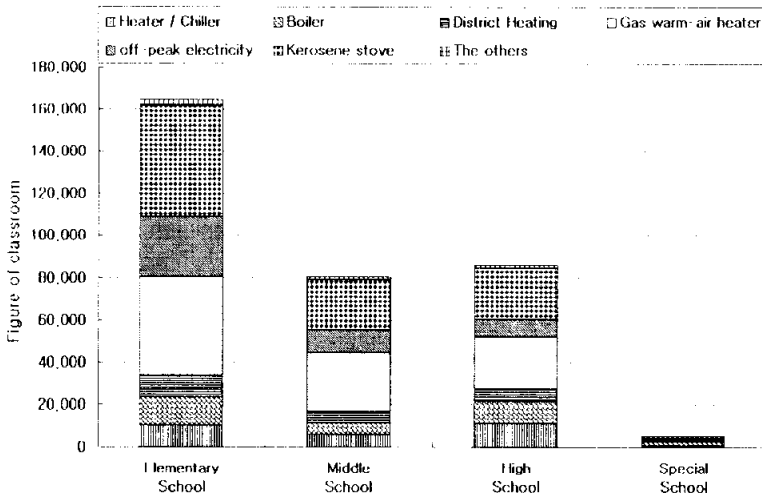


Fig. 3.4 Status of heating & cooling equipment by the school

3.3.4 지역 유형별 냉난방시설 현황

지역에 따른 냉난방설비의 차이를 알아보기 위해 지역별로 냉난방설비현황을 조사하여 Table 3.8과 같이 나타내었다. 냉난방기는 대도시 지역에 가장 많이 보급되어 있으며, 보일러에 의한 중앙난방 및 지역난방과 같은 현대화된 난방방식은 도시지역에 집중 보급된 것으로 나타났다. 이는 지역난방이 신도시나 대규모 아파트단지 위주로 보급이 되고 있기 때문이며, 도시지역의 학교는 규모가 크기 때문에 중앙난방 도입이 보다 효과적인 것이기 때문이다. 석유난로를 많이 사용하는 순서는 농어촌 90%, 도서벽지 70%, 중소도시 33% 순으로 나타나고 있고 대도시지역에서는 석유난로의 사용 비율이 6%로 적게 나타나고 있다. 반면 대도시지역은 가스개별온풍기의 사용비율이 46%로 타 지역에 비해 높게 나타났는데 이는 연료원에 대한 접근성이 용이하기 때문일 것으로 추정된다.

Table 3.8 Status of heating & cooling equipment by region

(Unit : Figure)

Classify	Heater Chiller	Boiler	District Heating	Gas warm heater	off-peak electricity	Kerosene stove	The others	Sum
Cosmopolitan city	19,163 (11%)	21,509 (13%)	22,449 (13%)	79,912 (46%)	19,365 (11%)	10,121 (6%)		172,519 (100%)
Business town	7,646 (8%)	7,682 (8%)	-	19,979 (22%)	26,627 (29%)	30,363 (33%)		92,297 (100%)
Farming and fishing village	436 (0.7%)	1,433 (2.3%)	-	-	2,144 (4%)	50,606 (90%)	1,717 (3%)	56,336 (100%)
Remote Place	64 (0.3%)	103 (0.7%)	-	-	276 (2%)	10,121 (70%)	3,996 (27%)	14,560 (100%)
Sum	27,309	30,727	22,449	99,891	48,412	101,211	5,713	335,712

주) 대도시 : 도시적 특성이 강한 지역으로 서울특별시, 광역시의 '동'지역
 중소도시 : 도시와 농촌의 중간적 성격 지역으로 9개 도의 '시'지역
 농어촌 : 농어촌적인 성격이 강한 지역으로 9개 도의 '군'지역
 도서벽지 : 농어촌중 특수한 성격을 띠는 도서·벽지의 분교, 소규모 학교

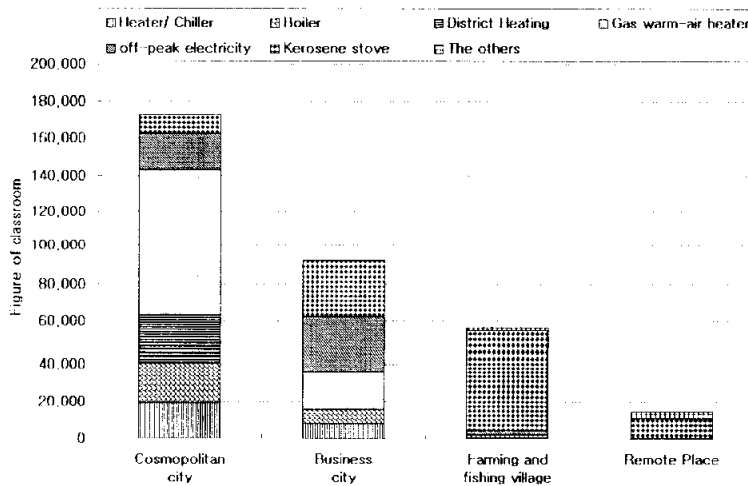


Fig. 3.5 Status of heating & cooling equipment by region

3.3.5 기후 지역별 냉난방방식 현황

기후 권역별에 따른 냉난방방식의 차이를 알아보기 위해 ‘건축물의설비기준등에관한규칙’의 지역별 구분에 따라서 냉난방시설 현황을 조사하여 Table 3.9와 같이 나타내었다. 비교적 추운 중부지방에서의 난방교실비율은 98%이나 남부지방의 난방교실비율은 75.9%이며, 제주도는 27.5%이다.

건물의 소요에너지 산정에는 반드시 지역기후의 특성을 고려해야 하며, 이를 위해서는 난방도일이 유용하게 쓰인다. 제주도의 경우, 난방도일이 1,600~1,900deg·day(18℃ 기준)로서 중부지방의 3,000deg·day(18℃ 기준) 이상에 비해 1,000deg·day 이상의 차이를 보이고 있으므로 난방의 필요성이 상대적으로 적은 지역으로 볼 수 있다.

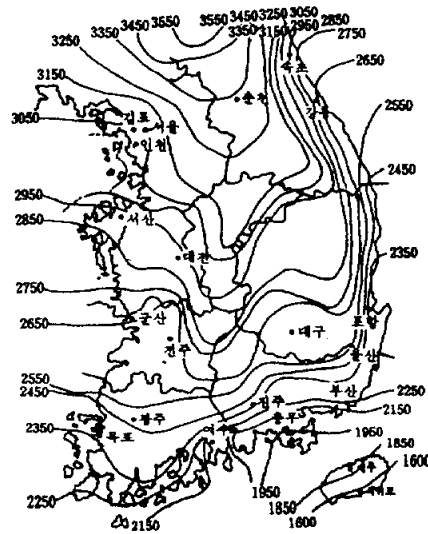


Fig. 3.6 Heating degree days in Korea

중부지방에서는 가스온풍기, 보일러 및 지역난방의 보급률이 비교적 높게

나타나고 있으며 난방일수와 난방시간이 중부지방보다 적은 남부지방에서는 다른 지방에 비해 석유난로의 사용율이 42%로 매우 높다. 석유난로는 저렴한 초기 투자비 때문에 어느 지역에서나 손쉽게 도입되는 난방방식인 것으로 조사되었다.

Table 3.9 Status of heating & cooling equipment by climatic area

(Unit : Figure)

Classify	Heater Chiller	Boiler	District Heating	Gas warm heater	off-peak electricity	Kerosene stove	The others	Sum
Central districts	12,424 (7%)	19,992 (11%)	19,495 (11%)	75,260 (42%)	24,313 (14%)	24,281 (14%)	1,748 (1%)	177,513 (100%)
Southern districts	14,827 (9%)	10,694 (7%)	2,954 (2%)	24,631 (16%)	23,965 (15%)	76,187 (49%)	3,549 (2%)	156,807 (100%)
Jeju	58 (4%)	41 (3%)	-	-	134 (10%)	743 (53%)	416 (30%)	1,392 (100%)
Sum	27,309	30,727	22,449	99,891	48,412	101,211	5,713	335,712

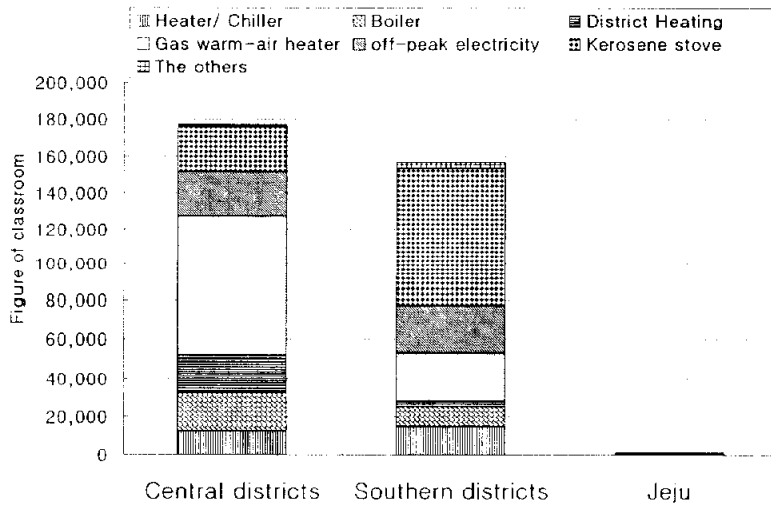


Fig. 3.7 Status of heating & cooling equipment by climatic area

3.4 요약

본 장에서는 학교건물의 특성과 냉난방시설현황을 파악하기 위하여 전국 규모의 설비시스템 실태조사를 수행하였다.

우리나라 초·중등학교 중 10학급 미만의 학교가 35%로써 소규모 학교의 비중이 상당히 높다. 또한 학교 유형별로 건물의 이용율 및 사용시간이 크게 차이가 나며, 특별교실과 특별활동이 이루어지는 교실에 대해서는 유지관리 측면에서 개별 냉난방이 유리한 것을 알 수 있다.

학교건물의 냉난방부하 특성을 파악하기 위하여 냉난방 부하계산 프로그램인 LOADSYS를 이용하여 계산한 결과, 모든 지역에서 냉방부하가 난방부하에 비하여 2.4배 이상 큰 것으로 나타나 학교 특성에 적합한 공조시스템 개발이 요구된다.

우리나라 초·중등학교 전체 교실의 85.4%가 난방을 하고 있으나, 그 중 76%는 석유난로 등에 의한 개별난방이며, 6.9%는 냉방 및 난방시설을 동시에 갖추고 있어 지역별, 학교별 온열환경 격차가 크다. 그리고 난방시설이 안된 14.6%와 개별난로를 사용하는 61.6%는 개선이 필요하며, 차후 개선시에는 건강하고 쾌적한 교육환경을 조성하기 위하여 냉난방 및 환기장치가 완비되고, 유지관리비를 고려한 에너지절약형 시스템으로 발전될 것으로 예상된다.

학교건물에 가장 많이 사용되는 개별난방의 경우 대부분(30.2%)이 석유난로를 이용하고 있는데, 그 이유를 살펴보면 건물의 설계 단계부터 냉난방설비를 고려하지 않았고, 초기 투자비용 및 운전비용이 저렴하며, 개별난방 방식으로 관리가 용이하기 때문일 것으로 추측된다. 그리고 교실에서 사용하는 대부분의 석유난로는 연통이 없는 회전분무방식을 사용하는데 그 이유는 설치 및 철거가 쉽고, 설치 장소의 계약을 적게 받으며, 연통의 설치가 필요

없기 때문일 것으로 생각된다. 그러나 유독가스의 발생으로 인한 실내 공기 오염의 우려가 있다.

또한 새롭게 신축 또는 개축되는 학교건물은 지구환경 문제에 대처하기 위한 교육프로그램으로서 유럽과 일본 등에서 활발히 보급되고 있는 환경친화적인 학교(ECO School)¹⁾사업과 같이 추진되어야 할 것으로 생각된다.

1) ECO는 Ecology의 약자로서 「환경친화적인」 의미와 Energy Conservation의 약자로서 「에너지를 효율적으로 사용하는」 의미를 가지고 있으며, 에너지를 효율적으로 사용한다는 것은 환경친화적인 것과 밀접한 관계가 있다. 안철린, “학교 에너지 실비 실태조사” 한국교육시설학회지 제5권4호, pp 105~113, 1998.

제 4 장 학교건물의 온열환경 분석

4.1 실험대상 학교와 측정방법

4.1.1 실험 개요

본 장에서는 학교건물의 온열환경 특성을 파악하기 위해 학교건물로서 대표적 구조를 가진 일반교실을 선정하여, 동절기 실험은 2003년 1월 16일부터 2003년 2월 20일까지, 하절기 실험은 2003년 7월 21일부터 2003년 8월 20일까지 실시하였다. 실험대상 학교는 부산광역시에 위치한 학교건물을 모델로 선정하여 일반교실에 설치된 바닥복사난방(Floor radiant heating), 바닥설치 팬코일유닛(Floor type Fan Coil Unit), 천장사방토출 히트펌프(4 way ceiling type) 공조시스템에 대하여 실내 공간에 대한 온도 및 기류 분포를 측정·조사하였다.

그리고 온열환경의 만족도를 나타내는 열쾌적감을 평가하기 위하여 평면 및 단면상의 유효온도와 기류속도를 분석하여 공기확산성능계수(Air distribution performance index, ADPI)를 구하고, ISO 7730에 따라 예상온열감(Predicted mean vote, PMV) 및 예상불만족율(Predicted percentage of dissatisfied, PPD)에 대해 예측함으로써 쾌적도를 평가하였다.

4.1.2 실험대상 학교의 구조

실험대상 학교는 측정오차를 고려하여 최근 신축한 건물로서 단열상태가 양호한 철근 콘크리트 라멘조의 동일한 구조를 가진 3개의 학교를 선정하였으며, 교실 바닥은 목재 후로링, 벽체는 수성페인트, 천장은 석고시멘트계의

불연 천장재로 마감되어 있다.

측정대상 교실의 온열환경을 조절하기 위한 냉난방시스템은 Table 4.1과 같다. 바닥 복사난방은 교실 전체 바닥에 20cm 간격으로 온수 코일이 매설되어 있고, 바닥설치 팬코일유니트는 외부창틀 아래 교실 바닥에 2대가 설치되어 있으며, 천장사방토출 히트펌프의 실내기는 교실 중앙부 천장속에 설치되어 있다.

Table 4.1 The summary of model school buildings

Classify	Figure of Class	The year of construction	Heat source apparatus	Method	Fuel
S Elementary School	36	1998	Boiler	Radiant heating	Kerosene
D Elementary School	36	2000	Absorption heater-chiller	Floor type FCU	City gas
M High School	30	2002	Electric heat-pump	4-way ceiling type	Electricity

온열환경을 측정하기 위한 대상 학교의 보통교실 크기는 Fig. 4.1과 같이 가로 7.5m, 세로 9m, 천장의 높이는 2.7m이다. 교실 전면에 칠판이 설치되어 있고, 칠판을 정면으로 하였을 때 좌측에는 외부창이 있으며, 우측에는 복도중창이 있다. 복도중창 각 앞면과 뒷면에 출입문이 위치하고 있다. 실험대상 학교의 경우 교실당 인원수는 학생 35명, 교사 1명이다.

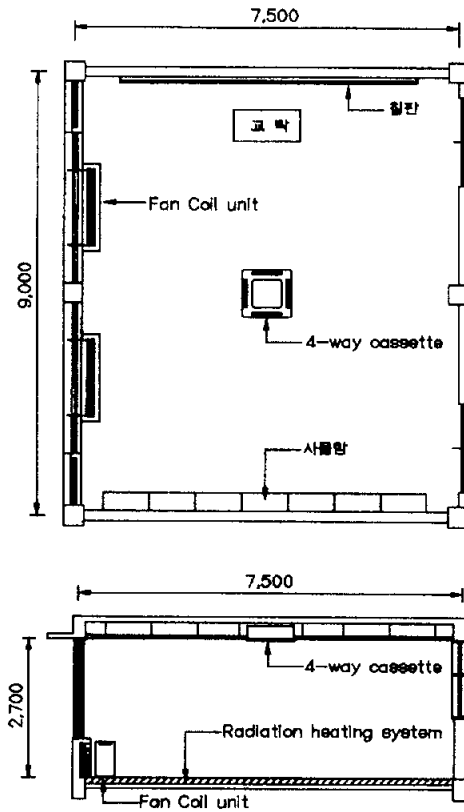


Fig. 4.1 The Plane of Classrooms

Table 4.2 The summary of classrooms

Classify		Contents
Dimensions		7.5m × 9.0m = 67.5m ²
Floor height		2.7m
Window (Double window)		1.5m × 2.0m × 4EA
Aisle	Door	0.9m × 2.0m × 2EA
	Window	1.5m × 2.0m × 2EA
Coefficient of heat transmission		Outer wall : 0.5 W/m ² h ^o C
		Roof : 0.35 W/m ² h ^o C
		Window : 2.9 W/m ² h ^o C

4.1.3 측정 기자재

학교건물 온열환경실험에 사용된 측정 기자재는 Table 4.3과 같으며, 측정 장비의 외형을 장치별로 Fig. 4.2와 Fig. 4.3에 나타내었다. 온도 및 기류 센서에 의해 측정된 데이터는 Data logger에 저장되며 컴퓨터로 이송하여 자료를 처리 하였다.

Table 4.3 Specification of measurement equipments

Quantity	Model	Measuring range	Resolution
Air temperature	Thermocouple (0.3mm T-Type)	-200 ~ 400℃	0.001℃
Relative Humidity	VelociCalc	0~95%	0.1%
Air velocity	WA-390 (Kaijo)	0 ~ ±10m/s	0.005m/s
CO ₂ Density	445 VAC (testo)	0 ~ 5,000 ppm	1 ppm
Collection of Data	MV 200 (YOKOGAWA)	-	-

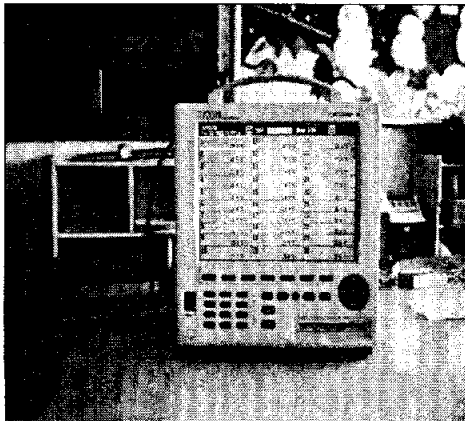


Fig. 4.2 Data logger
(MV-200)

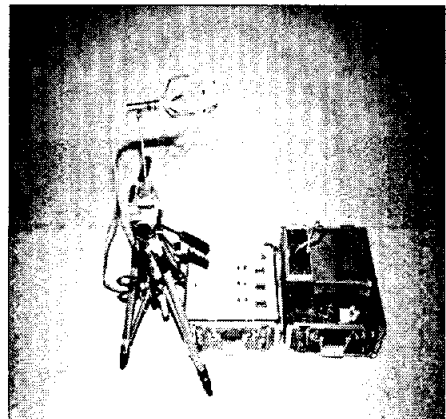


Fig. 4.3 Air velocity
(WA-390)

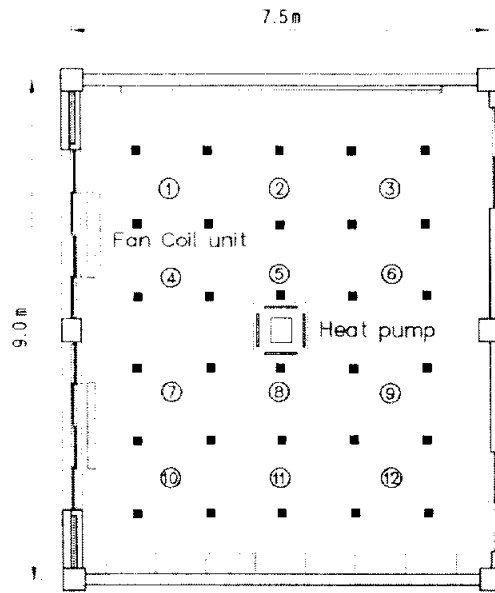
4.1.4 측정방법

일반적으로 실내 온도측정은 ISO 7730에 따라 바닥 위 10cm와 앉은 자세일 때 머리 부분에 해당하는 110cm와의 온도차를 측정하여 비교하고 있으나, 본 실험에서는 교실의 온도 분포를 정밀하게 측정하기 위하여 Fig. 4.4와 같은 방법으로 측정을 하였다.

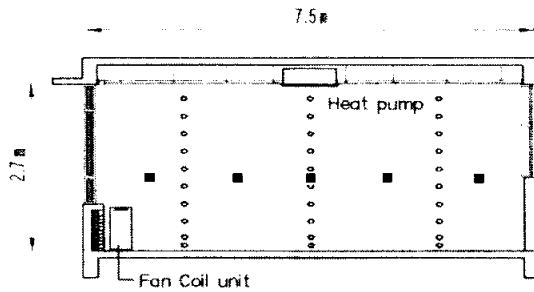
수평면의 온도 및 기류를 측정하기 위해 바닥에서 110cm 높이에 가로방향 150cm, 세로방향 150cm의 등 간격으로 30개소에 센서를 설치하였다. 각 측정 높이에 대하여 평면적으로 가로, 세로 150cm의 격자를 형성하여 교실 공간상의 각 높이별 평면에 30개소를 측정하였다.

상하 온도차 측정은 Fig. 4.4와 같이 단위 교실을 외부 창측(Window side), 중앙부(Center), 복도측(Aisle side)으로 구분하여 12개소를 선정하고, 각 지점 바닥에서 10cm, 40cm, 70cm, 100cm, 130cm, 160cm, 190cm, 220cm, 250cm 위치에 센서를 설치하여 총 108개소를 측정하였다.

측정시간은 각 설비가 최대의 성능을 발휘하여야 하는 시간을 선정하였다. 실내 온도는 겨울철 22℃, 여름철 26℃가 되도록 기기를 설정하였으며, 실외 온도는 겨울철 -1℃, 여름철 30℃ 정도일 때 장비를 설치하여 측정하였다. 하절기 냉방측정은 오후 13시 경에 각 설비를 가동시키기 시작하여 최대의 열부하가 발생하는 14시와 15시 사이에 측정하였고, 난방측정은 일사에 의한 영향을 받지 않도록 오전 4시와 6시 사이에 측정을 실시하였다. 모든 측정은 설비 가동 후 약 1시간 후에 실시하였다.



(a) Measuring points for temperature and airflow (horizontal)



(b) Measuring points for temperature and airflow (vertical)

- : 상하온도차 측정점 위치
- : 수평면 온도 및 기류 측정점 위치

Fig. 4.4 Measuring points for temperature and airflow

(1) 실내 온도 측정장치

실내 공기 온도 및 벽체의 온도를 측정하기 위하여 각 측정점에 T type 열전대를 설치하였다. 온도는 Yokogawa사의 HR 2500 형식의 Data Logger와 3882E 모델의 리모트 스캐너에 연결한 후 Data logger에서 GP-IB를 사용하여 PC로 저장하였다.

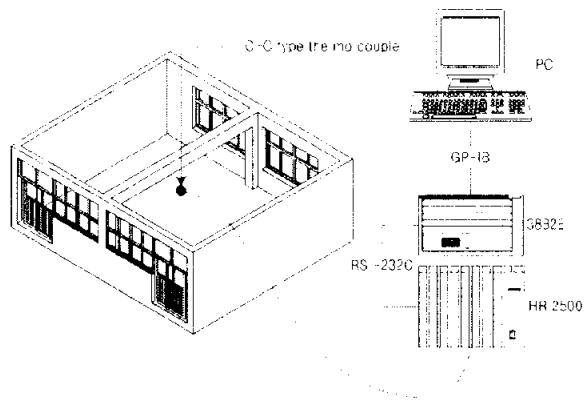


Fig. 4.5 Schematic of measurement system

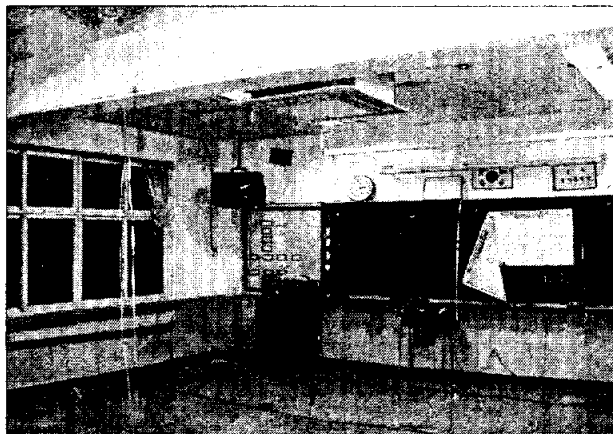


Fig. 4.6 Complete view of experiments

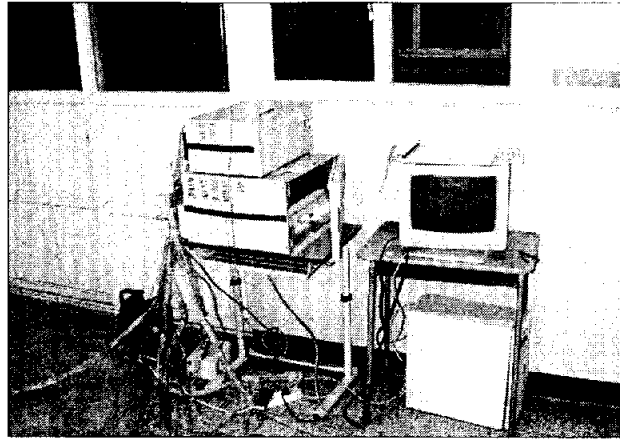


Fig. 4.7 Measurement systems

바닥을 제외한 사방 벽면의 중앙부에 1개소씩 벽면의 온도를 측정하였으며 각 실비의 토출온도를 측정하였다. 외기는 좌측 창에서 1m를 이격시켜 설치하였으며, 전면과 후면 각 1개소씩 2개소를 측정하였다.

(2) 실내 기류 측정장치

측정 개소는 온도 측정 평면과 동일하게 하였으며, 일정한 기류의 분포를 얻기 위하여 설비를 가동시킨 후 1시간이 지나 실내의 온도가 일정하게 유지되면 기류가 더 이상의 변화가 없을 것이라 판단하고 측정을 실시하였다.

기류 측정은 Kaijo사의 WA 390 초음파 풍속계를 각 위치에 설치한 후, 각 위치에서 2분간 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터는 Netdaq사의 2645A Data logger를 통해 PC에 저장하였다.

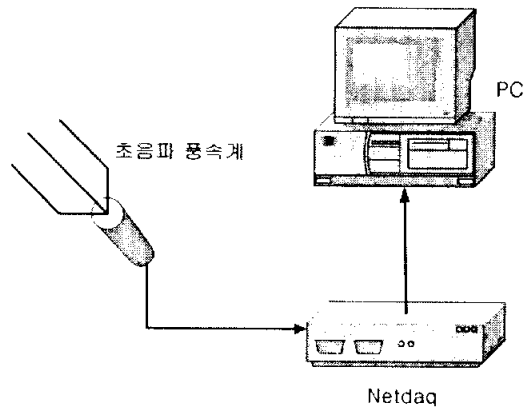


Fig. 4.8 Schematic of air current measurement system

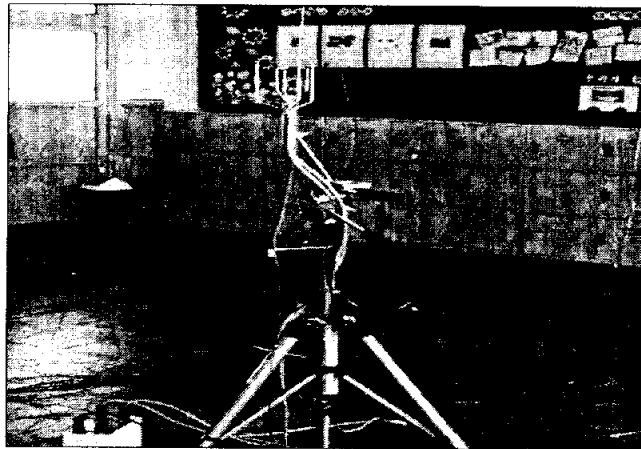


Fig. 4.9 Air current measurement system

4.2 동절기 온열환경 측정

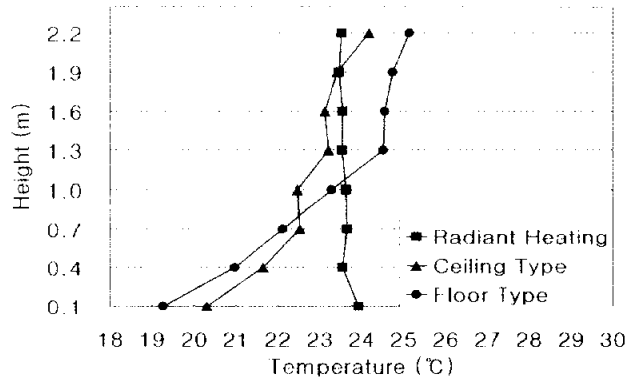
4.2.1 상하 온도차 비교

Fig. 4.10은 난방 시스템별로 상하 온도차를 나타낸 것이다. 실내 온도 22℃를 기준으로 하였을 때, 바닥 10cm 높이에서 온도 편차가 가장 높은 것은 바닥설치 FCU 방식이며, 110cm 높이에서 온도 편차가 가장 높게 나타난 것은 천장사방토출형 공조시스템이다.

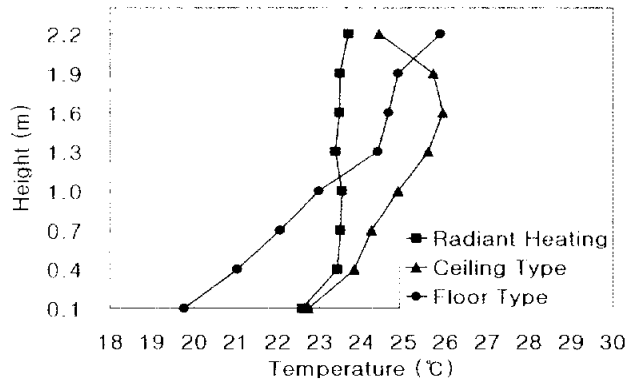
상하 온도차가 작게 나타난 순서로는 바닥복사난방, 천장사방토출형, 바닥설치 FCU 순으로 나타났다. 바닥복사난방은 모든 위치에서 상하 온도차가 3℃ 이내에 들어 ASHRAE 규정을 가장 잘 만족하고 있으며, 바닥설치 FCU의 경우는 모든 지점에서 상하 온도차가 권장치를 초과하였다.

4.2.2 수평면 온도차 비교

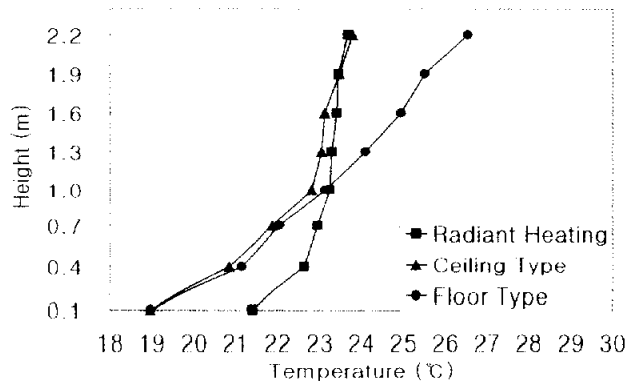
Fig. 4.11은 학생들이 앉아 있을 때 머리부분에 해당하는 110cm 높이에서 수평면의 온도분포를 나타낸 것이다. 전 구역에 걸친 온도 편차를 살펴보면 바닥설치 FCU 1.5℃, 바닥복사난방 2.0℃, 천장사방토출형 6.0℃의 순으로 나타났다. 이러한 원인을 살펴보면 바닥설치 FCU의 경우 기기에서 강하게 토출된 온풍이 일단 천장면에 도달한 후 교실 전체에 고르게 확산되기 때문에 높이 110cm 위치에서는 편차가 적게 나타나고 있으며, 천장사방토출형의 경우는 실내기에서 토출된 온풍이 천장으로로부터 뿜어져 나와 110cm 높이에서는 온풍의 영향을 직접 받게 되는 것으로 조사 되었다.



(a) Aisle side of the class room

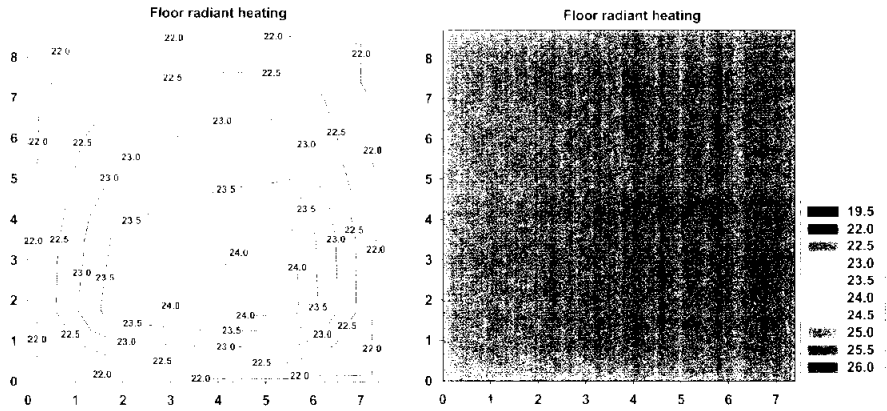


(b) Center of the classroom

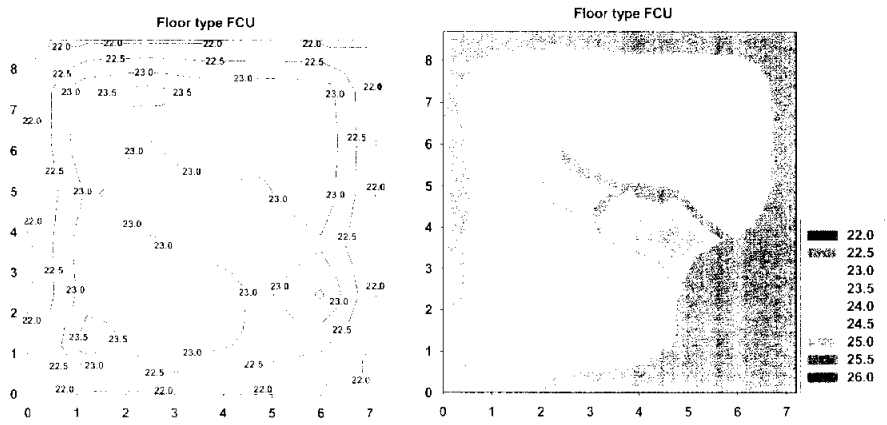


(c) Window side of the classroom

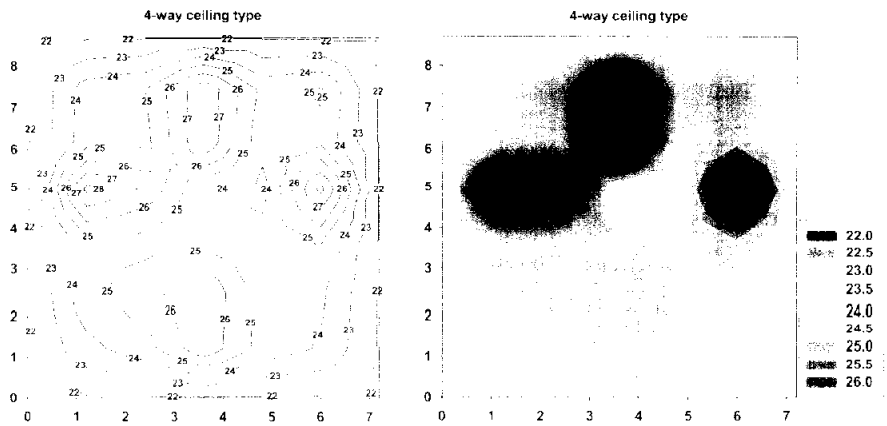
Fig. 4.10 Vertical temperature distribution



(a) Floor radiant heating



(b) Floor type FCU



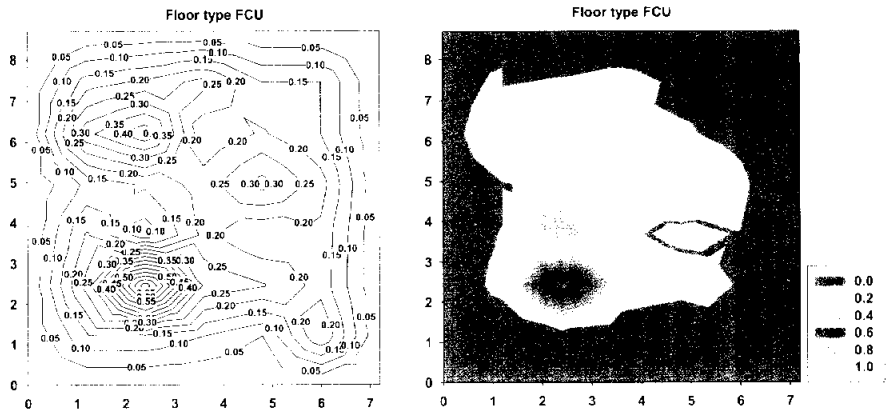
(c) 4-way ceiling type

Fig. 4.11 Horizontal temperature distribution (F.L. 1.1m)

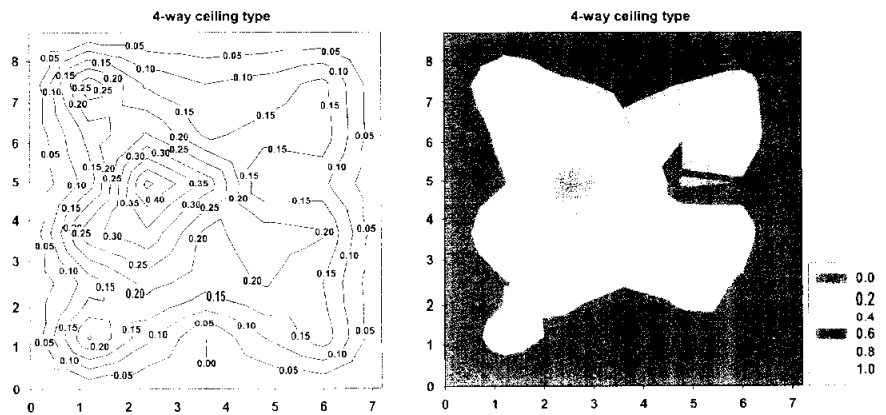
4.2.3 기류 분포 분석

Fig. 4.12는 강제 대류방식의 천장사방토출 히트펌프 (풍량 : 28 CMM, 풍속 : 3.4m/s), 바닥설치 FCU (풍량 : 17 CMM, 풍속 : 3.0m/s)를 대상으로 기류 분포를 측정하였다.

ISO 7730에서는 실내 최적 기류속도를 0.25m/s로 제시하고 있으나, 바닥 110cm 높이에서 천장사방토출형의 풍속은 최대 0.46m/s, 평균 0.19m/s이며, 바닥설치 FCU는 최대 0.74m/s, 평균 0.21m/s로 나타났다.



(a) Floor type FCU



(b) 4-way ceiling type

Fig. 4.12 Horizontal air current distribution (F.L+1.1m)

그러나 그림에 나타난 것처럼 실내기의 토출구 근처에서 기류 속도가 빠른 것을 알 수 있으며 특히, 바닥설치 FCU의 경우 일정 부분에 기류 속도가 집중적으로 매우 높게 나타나는 구역이 존재한다.

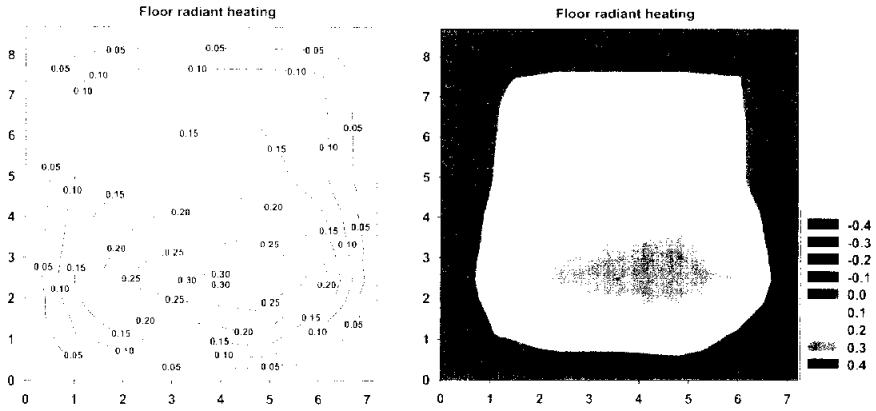
4.2.4 예상온열감(PMV) 분포

본 실험에서는 학교 교실에 설치된 냉난방시설의 온열환경 평가를 위하여 수평과 수직면에서의 온도 및 기류 변화를 관찰하였으며, 열적 쾌적감은 열환경에 대한 만족 또는 불만족을 나타내는 것으로서 쾌적감의 한계는 PMV, PPD 지표에 의해 표현될 수 있다.

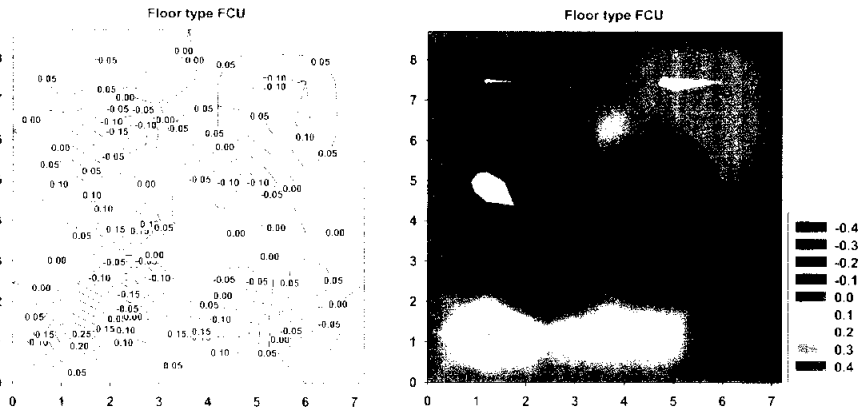
ISO 7730에서는 쾌적 열환경의 조건으로 예상온열감 PMV가 $-0.5 < PMV < +0.5$ 의 범위에 있을 때 쾌적영역에 포함되는 것으로 제시하고 있다. 수평면에서의 온도분포와 기류 분포에 대한 측정값을 바탕으로 PMV, PPD를 계산하였다. 계산요소 중 활동량은 앉아서 독서 등의 간단한 활동을 하는 정도의 1.2met, 착의량은 일반적인 동계 복장인 1.0clo, 상대습도는 40%RH를 적용하였다.

Fig. 4.13은 난방 방식별 PMV 분포를 나타낸 것이다. 각 방식의 모든 측정점에서 $-0.5 < PMV < 0.5$ 범위 내에 포함되는 것을 알 수 있다.

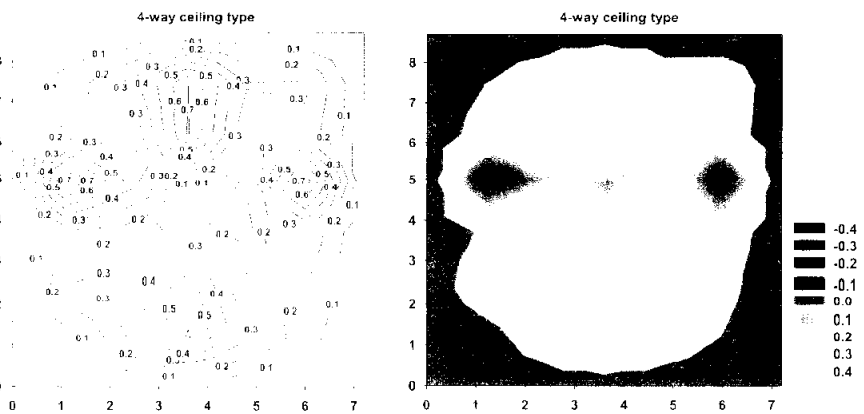
예상불만족률 PPD는 PMV 값에 대한 불만족자의 비율을 나타내는 지표로서 10% 이하일 때 쾌적영역에 포함된다. 바닥복사난방 및 바닥설치 FCU는 모든 측정점에서 $PPD \leq 10\%$ 범위 내에 포함되었고, 천장사방토출형은 80% 정도가 이 범위에 포함되었다.



(a) Floor radiant heating



(b) Floor type FCU



(c) 4-way ceiling type

Fig. 4.13 PMV distribution according to air conditioning type

4.2.5 공기확산성능계수(ADPI)

실내의 여러 위치에서 유효드래프트온도(T_{eff})와 기류속도를 해석하여 전체 측정점수에 대하여 쾌적감을 느끼는 측정점수의 비율을 공기확산성능계수 ADPI라고 한다. 각 측정점의 유효드래프트온도(T_{eff})가 -1.7°C 에서 $+1.1^{\circ}\text{C}$ 범위에서 기류속도가 0.35 m/s 이내에 있으면 쾌적감의 대부분이 쾌적함을 느끼는 것으로 나타내고 있다.

$$T_{eff} = (T - T_{avg}) \cdot 8.0(V - 0.15) \quad (4-1)$$

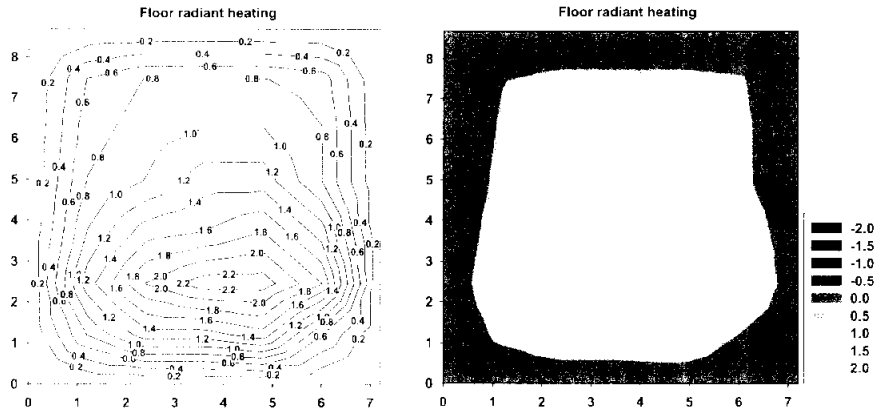
여기서, T_{eff} : 유효드래프트온도 [$^{\circ}\text{C}$]

T : 국부온도 [$^{\circ}\text{C}$]

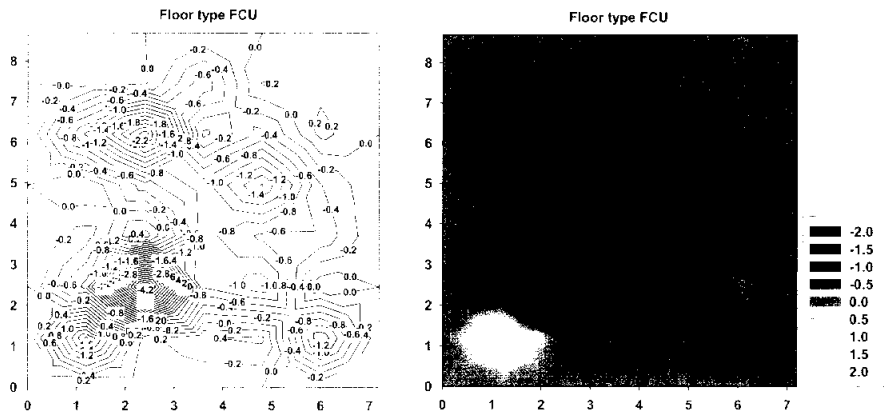
T_{avg} : 공기평균온도 [$^{\circ}\text{C}$]

V : 국부속도 [m/s]

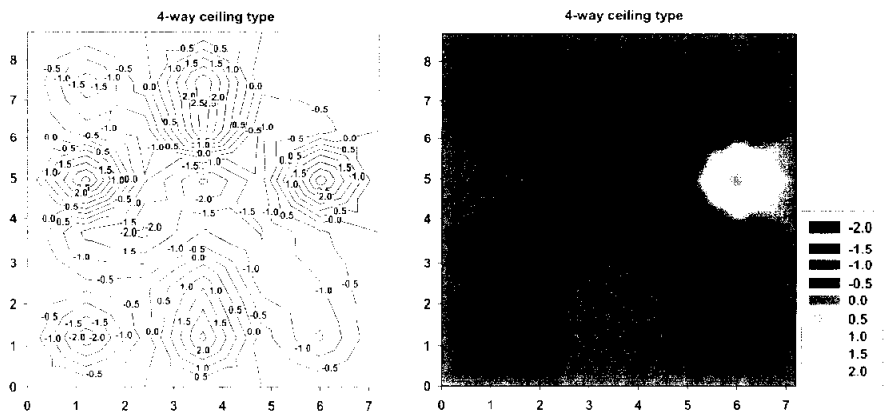
Fig. 4.14에서는 실내 각 측정점에 대해 유효드래프트온도(T_{eff})를 나타내었다. 각 방식별 공기확산성능계수는 바닥설치 FCU 90%, 천장사방토출형 57%, 바닥복사난방 53% 순으로 계산되었다.



(a) Floor radiant heating



(b) Floor type FCU



(c) 4 way ceiling type

Fig. 4.14 T_{eff} distribution according to air conditioning type

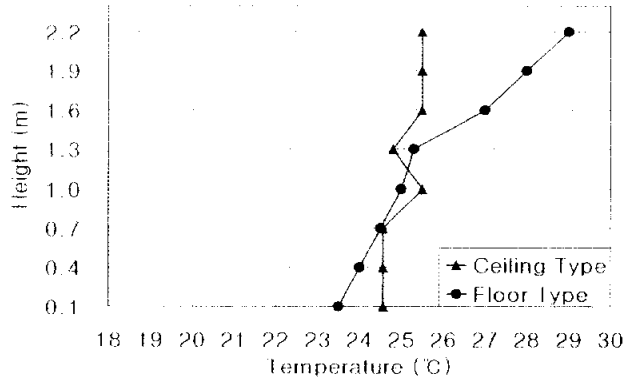
4.3 하절기 온열환경 측정

4.3.1 상하 온도차 비교

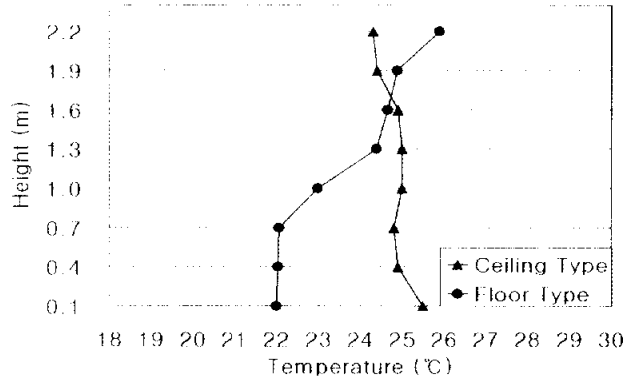
Fig. 4.15는 측정 비교 대상인 냉방시스템별로 상하 온도차를 나타낸 것이다. 냉방시에는 차가운 공기가 상부에 위치하는 형태가 되어 밀도차에 의한 대류 현상으로 인해 발생하는 상하 온도차는 동절기에 비해 크게 나타나지 않았다.

교실 공간 전체를 보면, 바닥설치 FCU에서 토출되어지는 기류가 실내를 충분히 순환하지 못하고 중간 높이 정도로 상승한 후 이내 하강하는 것으로 나타나지만 거주역인 1.7m 이내의 공간에서는 상하온도차가 크게 나타나지 않아 ISO 7730 규정치인 3℃를 초과하지 않는다.

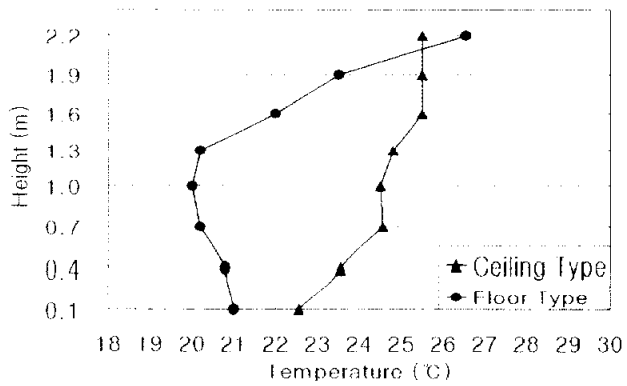
천장사방토출형은 상하 온도 분포가 매우 직계 나타나고 있으며, 이는 토출되어진 기류가 충분한 기류속도를 가지지 않아도 자연대류로 인해 하강하므로 고온 분포를 나타내는 것으로 볼 수 있다.



(a) Aisle side of the classroom



(b) Center of the classroom



(c) Window side of the classroom

Fig. 4.15 Vertical temperature distribution

4.3.2 수평면 온도차 비교

Fig. 4.16은 학생들이 앉아 있을 때 바리부분에 해당하듯 110cm 높이에서 수평면의 온도분포를 나타낸 것이다. 기존 구역에서 온도 편차를 살펴보면 전장사방보출형 1.5℃, 바닥치 FCU는 5.6℃로 나타났으며, 전체 온도분포는 전장사방보출형이 비교적 높게 나타나 있는데 이는 다 학교의 측정치보다 높은 외부 기온으로 인한 것이다. 바닥치 FCU의 경우 냉기류의 발생원 근처에서 온도가 집중적으로 낮아지는 지점이 나타났는데 온도 편차가 심각한 정도로 높다고 볼 수 있다. 전장사방보출형의 경우 냉기류 발생원의 위치에 따른 영향이 거의 나타나지 않는다.

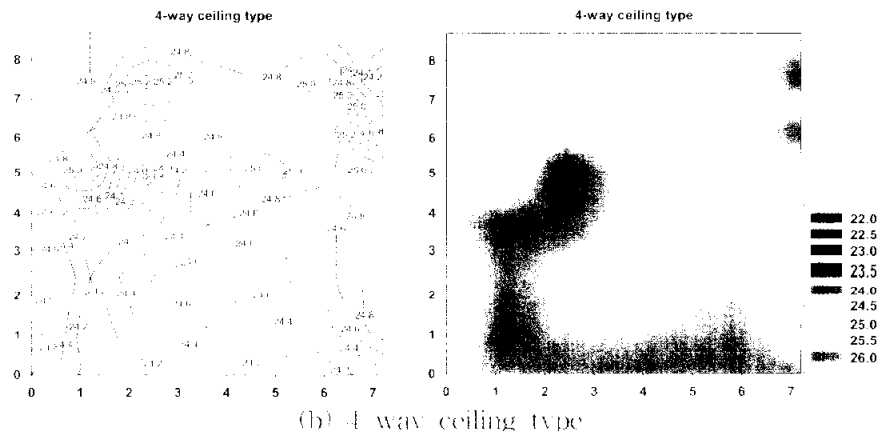
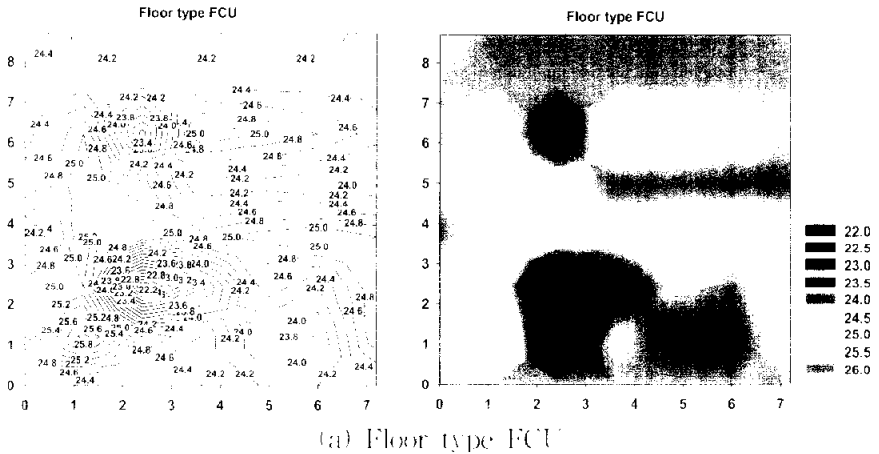


Fig. 4.16 Horizontal temperature distribution (FL-1.1m)

4.3.3 기류 분포 분석

단위 교실의 기류분포를 측정하기 위하여 강제 대류방식인 천장사방토출 (풍량 : 28 CMM, 풍속 : 3.4m/s), 바닥설치 FCU (풍량 : 17 CMM, 풍속 : 3.0m/s)를 대상으로 기류 분포를 측정하였다.

바닥 110cm 높이에서 천장사방토출형의 풍속은 최대 0.46m/s, 평균 0.19m/s이며, 바닥설치 FCU는 최대 0.74m/s, 평균 0.21m/s로 나타났다. Fig. 4.17에 나타난 것처럼 실내기의 토출구 근처에서 기류 속도가 빠른 것을 알 수 있으며, 특히 바닥설치 FCU의 경우 일정 부분에 기류 속도가 집중적으로 매우 높게 나타나는 구역이 존재한다.

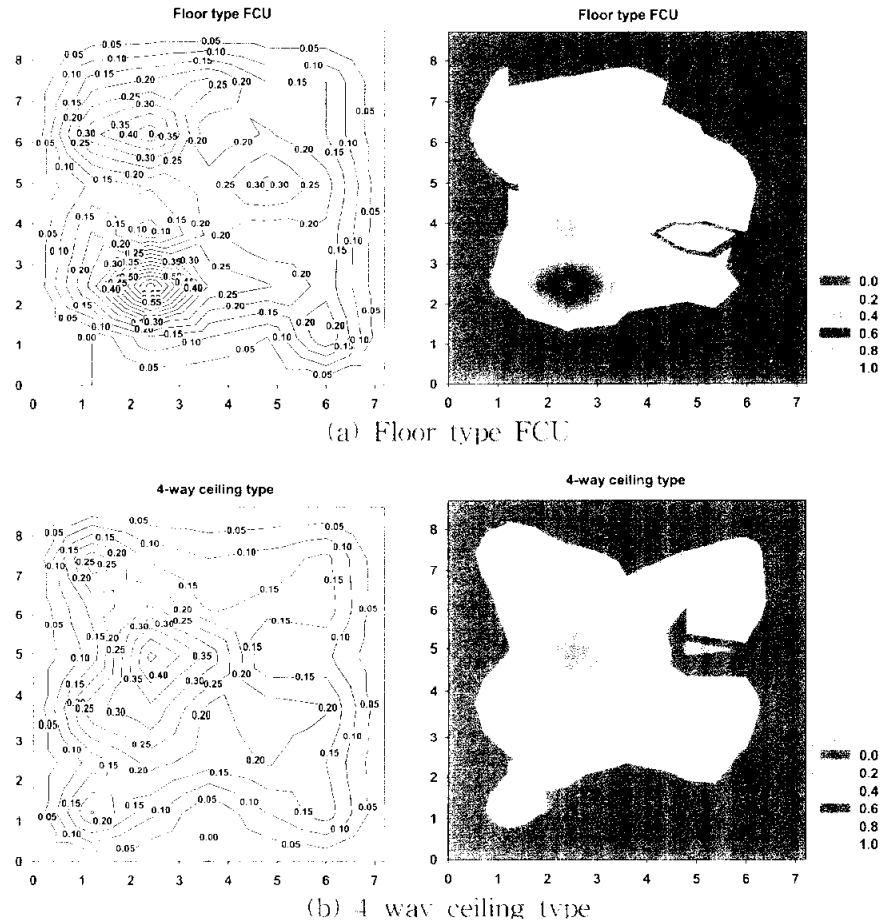


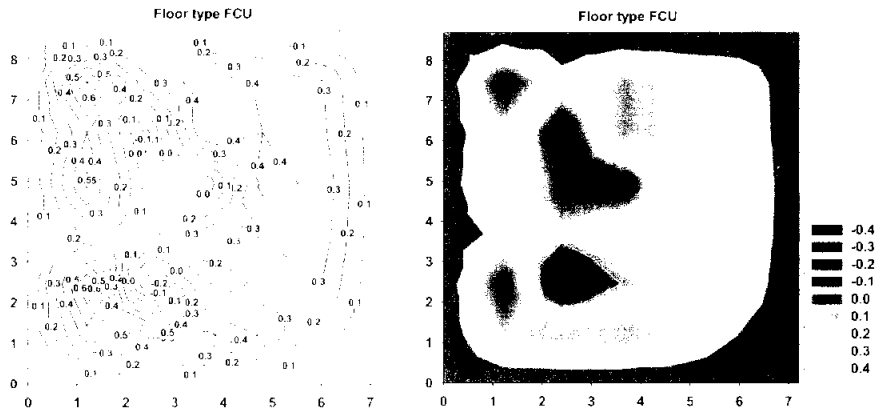
Fig. 4.17 Horizontal air current distribution (F.L+1.1m)

4.3.4 예상온열감(PMV) 분포

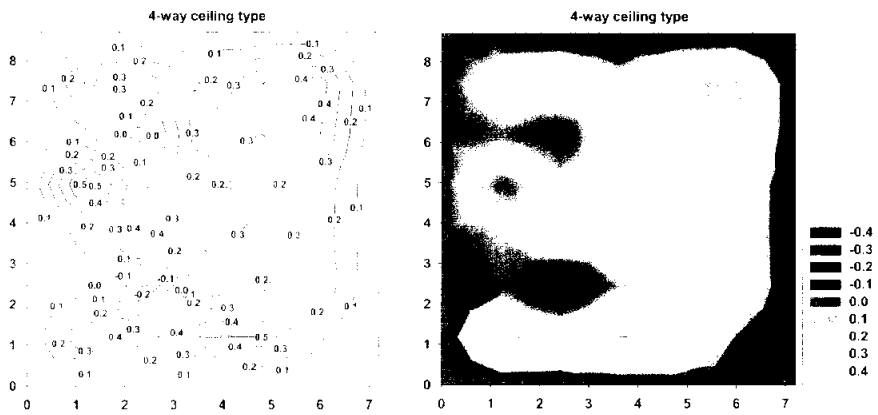
본 실험에서는 학교 교실에 설치된 냉난방시설의 온열환경 평가를 위하여 수평, 수직면에서의 온도 및 기류 변화를 관찰하였으며, 열적 쾌적감은 열환경에 대한 만족 또는 불만족을 나타내는 것으로서 쾌적감의 한계는 PMV와 PPD 지표에 의해 표현될 수 있다. Fig. 4.18은 냉방방식별 PMV 분포를 나타낸 것이다. 각 방식의 모든 측정점에서 $-0.5 < PMV < 0.5$ 범위 내에 포함되는 것으로 나타났다.

예상불만족률 PPD는 PMV 값에 대한 불만족자의 비율을 나타내는 지표로서 10% 이하일 때 쾌적 영역에 포함된다. 바닥설치 FCU는 전체 가운데 83%의 측정점에서 $PPD \leq 10\%$ 범위 내에 포함되었고, 천장사방토출형은 93% 정도가 이 범위에 포함되었다.

계산요소 중 활동량은 앉아서 독서 등의 간단한 활동을 하는 정도의 1.2met, 착의량은 일반적인 하계 복장인 0.6clo, 상대습도는 60% RH를 적용하였다.



(a) Floor type FCU

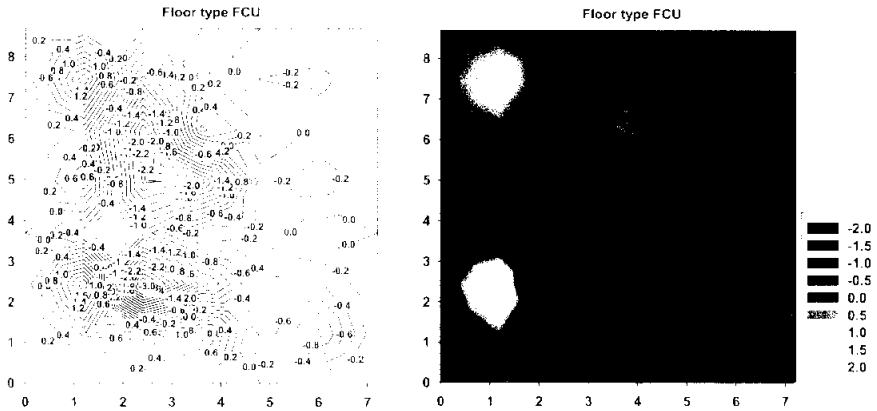


(b) 4 way ceiling type

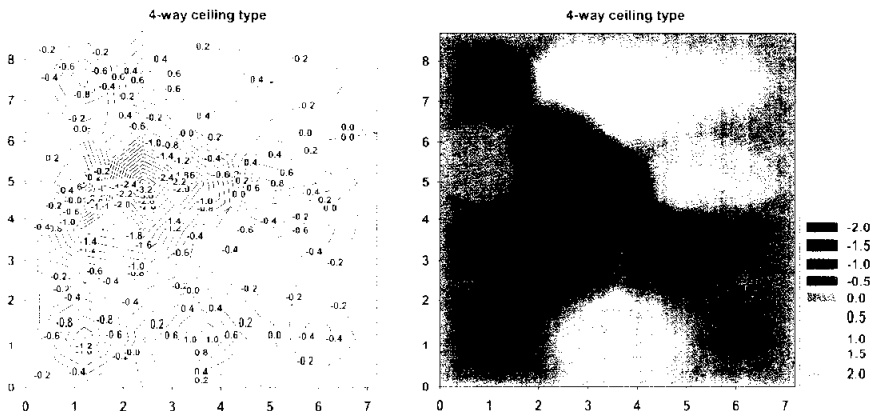
Fig. 4.18 PMV Distribution according to air conditioning type

4.3.5 공기확산성능계수(ADPI)

Fig. 4.19)에서는 실내 각 측정점에 대해 유효드래프트온도(T_{eff})를 나타내었다. 그리고 기류속도를 적용하여 전체 측정점수에 대해 쾌적감을 느끼는 측정점수의 비율을 공기확산성능계수 ADPI라고 한다. 각 측정점의 유효드래프트온도(T_{eff})가 -1.7°C 에서 $+1.1^{\circ}\text{C}$ 범위안에 있으면서 기류속도가 0.35 m/s 이내이면 쾌적영역으로 해석한다. 각 방식별 공기확산성능계수는 바닥설치 FCU가 76%, 천장사방포출형이 87%로 계산되었다.



(a) Floor type FCU



(b) 4-way ceiling type

Fig. 4.19 T_{eff} distribution according to air conditioning type

4.4 온열환경에 대한 설문조사

4.4.1 조사 개요

학교 교실의 온열환경에 대한 재실자의 반응을 조사하기 위하여 측정과 병행하여 설문조사를 실시하였다. 설문지에는 온열환경 연구의 목적과 설문조사시 주의 사항을 제시한 후 학생들의 책상 주위에서 쾌적감을 조사하였다. 그리고 재실자의 온열 쾌적성을 파악하기 위해 온열환경에 민감한 신체 부위를 알아보고 온열감, 복사감, 습도감, 기류감, 쾌적감 및 적합도 응답분포를 조사하였으며, 각 인자별로 온열감과 쾌적감에 미치는 영향을 분석하였다.

설문조사는 겨울철과 여름철로 나누어 실시하였으며, 겨울철은 2003. 2. 6일, 여름철은 2003. 7. 23일 실시하였다. 설문조사는 초등학교 6학년 학생을 대상으로 여름철과 겨울철 각각 100명이고, 이 중에서 남자가 50명, 여자가 50명 이었다.

조사 대상학교는 냉난방시설이 되어 있고 교실에 설치된 실내기로서 바닥 설치 FCU가 설치된 D 초등학교와 천장사방토출 실내기가 설치된 G 초등학교를 선정하였으며, 설문 내용은 설문응답자가 어린 학생임을 고려하여 Table 4.4와 같이 평가척도를 축소하였다.

Table 4.4 Scale of TSV

Scale	English	Korean
+2	Hot	덥다
+1	Warm	따뜻하다
0	Neutral	중립
-1	Cool	서늘하다
-2	Cold	춥다

4.4.2 난방시 설문조사 결과 및 고찰

Table 4.5는 겨울철 바닥설치 FCU의 전체 온냉감, 국부 온냉감 및 온도설정 변경요구 설문결과를 나타낸 것이다. 각 항목은 5단계 척도로 분류한 신체가 느끼는 전체적인 온냉감과 신체를 상·중·하로 분류한 국부 온냉감 및 온도설정 변경요구의 설문에 대하여 응답자 수를 나타내었다.

Table 4.5 Findings on survey of floor type FCU in heating

Classify		The number of persons [%]				
Item		Cold	Cool	Neutral	Warm	Hot
TSV		8	26	15	45	6
LTSV	Head	4	36	19	38	4
	Chest	6	34	15	43	2
	Thigh	25	32	11	32	0
Item		Lower	Slightly lower	Maintenance	Slightly raise	Raise
of Set Point Alteration		4	9	34	47	6

Table 4.6은 겨울철 천장사방토출형의 전체 온냉감, 국부 온냉감 및 온도설정 변경요구 설문결과를 나타낸 것이다.

Table 4.6 Findings on survey of 4 way ceiling type in heating

Classify		The number of persons [%]				
Item		Cold	Cool	Neutral	Warm	Hot
TSV		2	13	10	51	24
LTSV	Head	1	12	11	55	21
	Chest	3	17	12	53	16
	Thigh	9	35	12	32	11
Item		Lower	Slightly lower	Maintenance	Slightly raise	Raise
of Set Point Alteration		8	37	36	15	4

Fig. 4.20은 난방시 전체적인 온냉감신고를 나타낸 것이다. 전체응답자는 각 공조시스템에서 공통적으로 '따뜻하다'라는 응답이 가장 많았다. 바닥설치 FCU보다 천장사방토출형의 경우에서 '덥다' 또는 '따뜻하다'라는 응답자가 많았으며, 바닥설치 FCU에서 '춥다' 또는 '서늘하다'라는 응답자가 많았다. 그리고 천장사방토출형 의 경우 '서늘하다', '춥다'라는 응답이 상대적으로 적게 나타나 천장사방토출형이 바닥설치 FCU보다 난방효과가 우수한 것으로 나타났다.

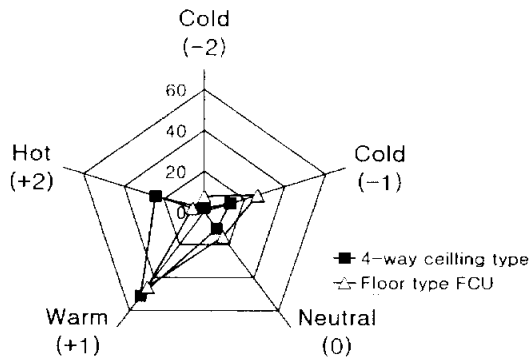
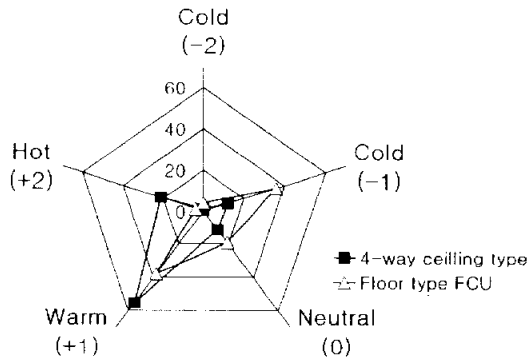
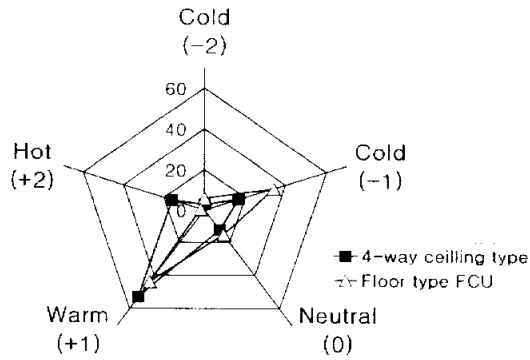


Fig. 4.20 TSV in heating

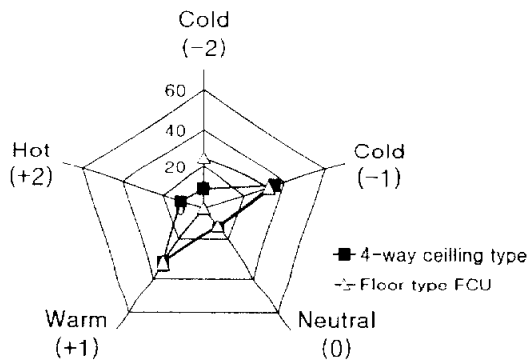
Fig. 4.21은 난방시 국부온냉감에 대한 응답내용을 나타낸 것이다. 머리, 얼굴, 가슴, 배 부위에서 천장사방토출형이 바닥설치 FCU의 경우보다 '따뜻하다'라고 응답한 사람이 많았다. 다리, 발 부위에서는 바닥설치 FCU의 경우 '춥거나 서늘하다'라고 응답한 사람이 전체의 57%를 차지하며, 천장사방토출형의 경우는 44%로 나타나, 난방시 상하 온도차를 많이 느끼는 것으로 조사되었다.



(a) Head



(b) Chest



(c) Thigh

Fig. 4.21 LTSV in heating

Fig 4.22는 난방시 온도설정 변경에 대한 요구를 나타낸 것이다. 천장사방 토출형과 바닥설치 FCU에 대한 응답자 분포가 대칭으로 나타났다. 천장사방 토출형은 '약간 낮춤' 바닥설치 FCU은 '약간 높힘'이 가장 많았으며, 이러한 현상에서 천장사방 토출형이 바닥설치 FCU보다 학생들의 요구에 적합한 것으로 조사되었다.

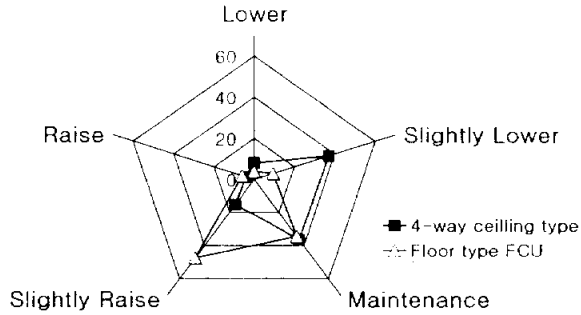


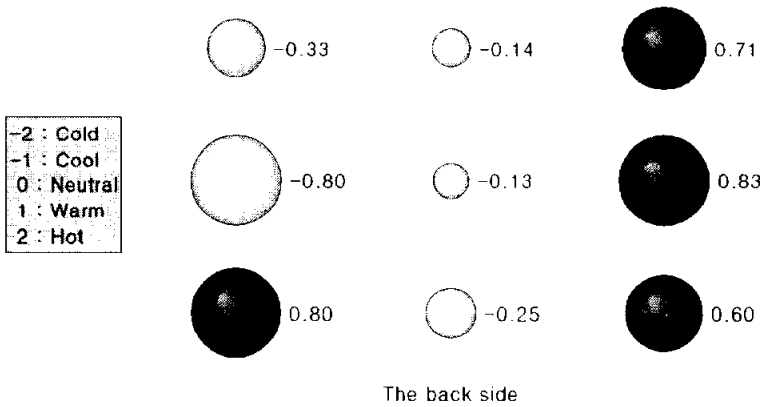
Fig. 4.22 Claims for modification of fixing temperature in heating

Table 4.7은 단위 교실을 9개의 지역으로 나누고, 위치별로 온냉감신고의 평균값을 나타내었다. 전체 온냉감신고의 평균값은 전장사방토출형이 0.82, 바닥설치 FCU가 0.35로 나타났다.

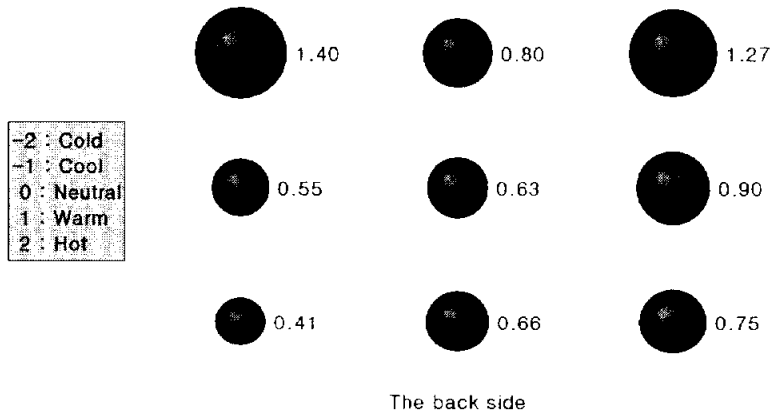
Table 4.7 TSV for each position in heating

Classify	4-way ceiling	Floor type FCU
The number of persons	100	100
Average of TSV	0.82	0.35
Classify of Location	TSV	
Front · Left	1.40	-0.33
Front · Middle	0.80	-0.14
Front · Right	1.27	0.71
Middle · Left	0.55	-0.8
Middle · Middle	0.63	-0.13
Middle · Right	0.91	0.83
Back · Left	0.41	0.80
Back · Middle	0.66	-0.25
Back · Right	0.75	0.6

Fig. 4.23은 겨울철 난방시 위치별 온냉감 신고의 평균값을 그림으로 나타내었다. 바닥설치 FCU의 경우 5개 지역에서 서늘하게 느끼는 것으로 조사되었다.



(a) Floor type FCU



(b) 4-way ceiling type

Fig. 4.23 TSV for each position in heating

4.4.3 냉방시 설문조사 결과 및 고찰

Table 4.8은 냉방시 바닥설치 FCU의 전체 온냉감, 국부 온냉감 및 온도설정 변경요구 설문결과를 나타낸 것이다. 각 항목은 5단계 척도로 분류한 신체가 느끼는 전체적인 온냉감과 신체를 상·중·하로 분류한 국부 온냉감 및 온도설정 변경요구의 질문에 대하여 응답자 수를 나타내었다.

Table 4.8 Findings on survey of floor type FCU in cooling

Classify		The number of persons [%]				
Item		Cold	Cool	Neutral	Warm	Hot
TSV		2	44	32	6	16
LTSV	Head	24	33	20	16	7
	Chest	1	38	28	10	23
	Thigh	2	40	21	15	22
Item		Lower	Slightly lower	Maintenance	Slightly raise	Raise
of Set Point Alteration		24	33	20	16	7

Table 4.9는 냉방시 천장사방토출형의 전체 온냉감, 국부 온냉감 및 온도설정 변경요구 설문결과를 나타낸 것이다.

Table 4.9 Findings on survey of 4-way ceiling type in cooling

Classify		The number of persons [%]				
Item		Cold	Cool	Neutral	Warm	Hot
TSV		4	61	20	5	9
LTSV	Head	5	68	11	5	10
	Chest	8	56	15	11	9
	Thigh	8	47	17	8	20
Item		Lower	Slightly lower	Maintenance	Slightly raise	Raise
of Set Point Alteration		10	34	25	24	6

Fig. 4.24는 냉방시 전체적인 온냉감신고를 나타낸 것이다. 전체응답자는 각 공조시스템에서 공통적으로 '서늘하다'라는 응답이 가장 많았다. 바닥설치 FCU보다 천장사방토출형의 경우에서 '서늘하다'라는 응답자가 많았으며, 바닥설치 FCU에서 '덥다'라는 응답이 상대적으로 많이 나타나 천장사방토출형이 바닥설치 FCU보다 냉방효과가 우수한 것으로 나타났다.

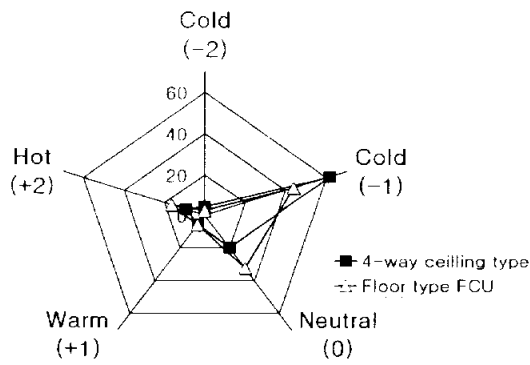
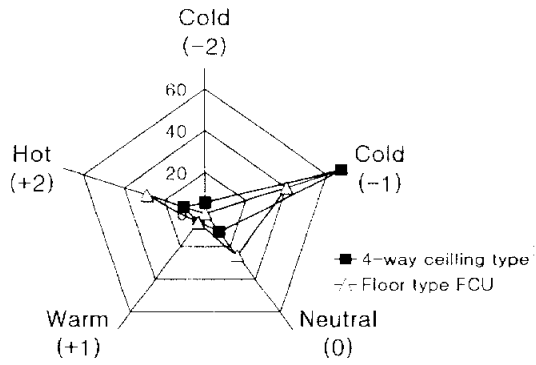
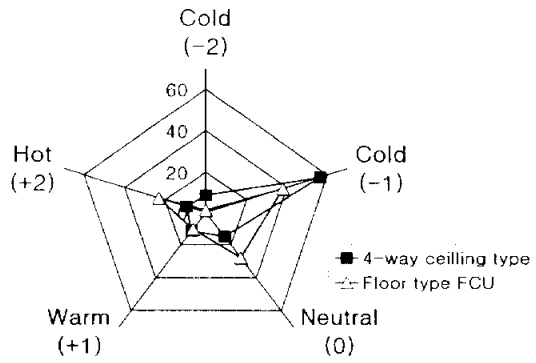


Fig. 4.24 TSV in cooling

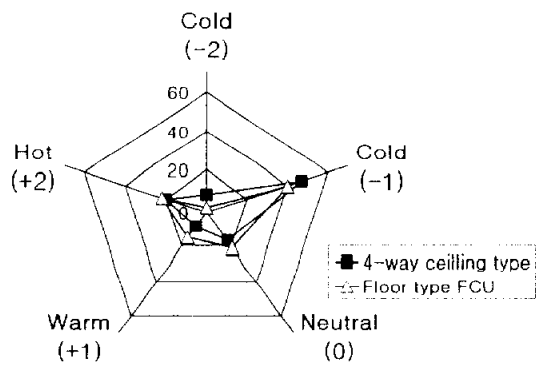
Fig. 4.25는 냉방시 국부온냉감에 대한 응답내용을 나타낸 것이다. 두 방식 모두 대부분의 인원이 '서늘하다'로 응답하였으나, 천장사방토출이 상당히 큰 차이로 많았다. 천장사방토출형의 경우 '덥거나 따뜻하다'고 응답한 인원이 20% 이내로 적은 편이나, 바닥설치 FCU의 경우 응답자의 분포가 고루 퍼져있는 것으로 나타난다. 냉방시에는 난방시와 비교하여 상하 온도차를 많이 느끼지 않는 것으로 조사되었다.



(a) Head



(b) Chest



(c) Thigh

Fig. 4.25 LTSV in Cooling

Fig 4.26은 냉방시 온도설정 변경에 대한 요구를 나타낸 것이다. 천장사방
 토출형과 바닥설치 FCU에 대한 응답자 분포가 비슷한 것으로 나타났다. 천
 장사방토출형은 '약간 높임' 바닥설치 FCU은 '많이 낮춤'의 요구가 있으나,
 두 방식 모두 '약간 낮춤'이 가장 많이 나타나 냉방효과가 우수한 것으로 조
 사되었다.

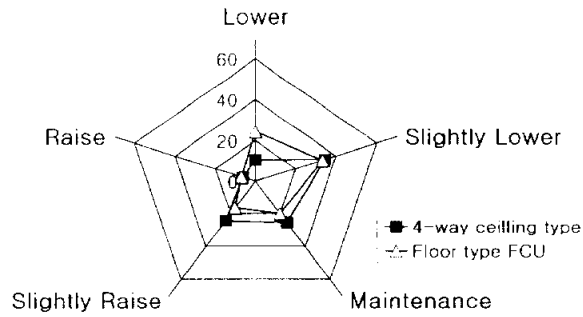


Fig. 4.26 Claims for modification of fixing temperature in cooling

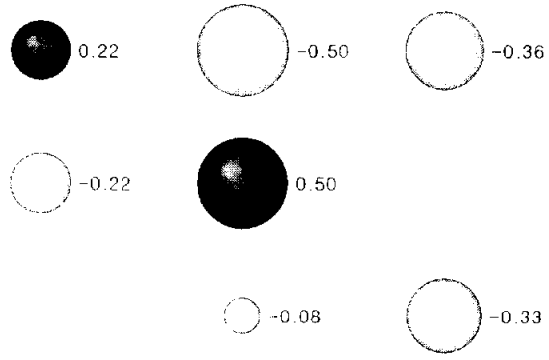
Table 4.10은 단위 교실을 9개의 지역으로 나누고, 위치별로 온냉감신고의 평균값을 나타내었다. 전체 온냉감신고의 평균값은 천장사방토출형이 -0.50, 바닥설치 FCU가 -0.09로 나타났다.

Table 4.10 TSV for each position in cooling

Classify	4-way ceiling	Floor type FCU
The number of persons	100	100
Average of TSV	-0.50	-0.09
Classify of Location	TSV	
Front · Left	-0.21	0.22
Front · Middle	-0.38	-0.50
Front · Right	-0.20	-0.36
Middle · Left	-0.27	-0.22
Middle · Middle	-0.86	0.50
Middle · Right	-0.67	0.00
Back · Left	-0.67	0.00
Back · Middle	-0.50	-0.08
Back · Right	-0.75	-0.33

Fig. 4.27은 여름철 냉방시 위치별 온냉감 신고의 평균값을 그림으로 나타내었다. 바닥설치 FCU의 경우 2개 지역에서 덥게 느끼는 것으로 조사되었다.

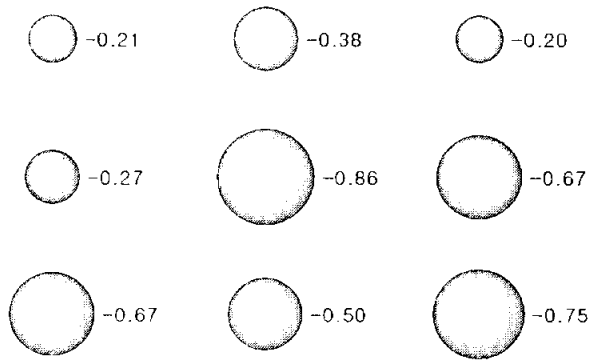
-2 : Cold
 -1 : Cool
 0 : Neutral
 1 : Warm
 2 : Hot



The back side

(a) Floor type FCU

-2 : Cold
 -1 : Cool
 0 : Neutral
 1 : Warm
 2 : Hot



The back side

(b) 4-way ceiling type

Fig. 4.27 TSV for each position in cooling

4.5 천장형 냉난방기 기류각도 수치해석

4.5.1 개요

최근 학교 교실의 환경위생기준이 세정되어 학교건물에서도 냉·난방시설을 기본적으로 갖추도록 하고 있으며, 히트펌프 기술의 발전에 따라 현대의 신외기에 복수의 실내 유닛을 집속할 수 있는 멀티방식이 개발되면서 기존 또는 신축학교 건물에 천장형 공조시스템이 급속히 보급되고 있는 추세이다. 그러나 학교건물 공간의 활용성, 유지관리의 편리성, 개별제어의 필요성에 따라 바닥에 설치하던 실내기가 천장 매입형으로 전환되고 있으나, 천장형의 경우 토출기류가 학생들의 머리 부분에 직접 도달하게 되어 열적 불쾌감을 느낄 수 있으므로 실내 공간의 쾌적영역을 증가시키기 위한 적정 풍량 및 토출각도에 대한 검토가 이루어져야 한다.

따라서 학교 교실의 온열환경개선을 위하여 설치되는 공조시스템으로써 천장 사방토출 공조시스템을 적용하게 될 경우를 중심으로 실내 열복사에 의한 영향과 외기조건에 따른 벽체전열 및 일사의 영향을 고려한 시뮬레이션을 수행하여, 천장 사방토출 실내기의 토출각도 15°, 30°, 45°, 60°에 대한 온도 및 기류 분포를 조사하였다.

그리고 온열환경의 만족도를 평가하기 위한 평면 및 단면상의 유효온도와 기류속도를 분석하고, ISO 7730에 따른 예상온열감(Predicted mean vote, PMV)과 ASHRAE 지침에 따른 유효드래프트온도(Effective Draft Temperature, EDT)에 대해 쾌적도를 예측함으로써, 동절기와 하절기에 적절한 천장 사방토출 실내기의 취출각도를 제시하고자 한다.

4.5.2 수치해석

본 프로그램은 Microsoft Visual FORTRAN 6.0을 기본적인 컴파일러로 활용하였으며, 실내환경에 대하여 정상계산 뿐만 아니라 기류나 각 벽면의 방사 및 벽체내의 열전도를 고려하여 외기조건과 건물조건을_입력함으로써 실내의 비정상적인 열환경을 예측하고자 하는 것이다.

본 프로그램은 Simple 알고리즘(음해법)을 채용하고 있으며, TDMA(선순법)으로 기류속도 (u, v, w)를 계산하고 온도, 압력 등을 계산하였다. 또한 전반적인 계산방법은 Partankar의 열전달 및 유체유동수치해법을 따르고, 난류모델은 Launder 등의 표준 $k-\epsilon$ 모델을 활용하여, Staggered Grid를 채용함으로써 정상, 비정상 계산이 가능하도록 하였다. 프로그램의 구성은 (a) 입력부 프로그램, (b) 각 벽체의 전열계산부 프로그램, (c) 형태계수의 계산부 프로그램, (d) 실내 열·기류 해석부 프로그램, (e) 쾌적지표 PMV 계산부 프로그램, (f) 출력부 프로그램으로 구성되었다.

Fig. 4.28은 전체적인 프로그램의 진행과정을 나타낸 것이다. 대상 교실의 형상과 벽체조건을 입력하는 단계를 시작으로 계산을 위한 각 조건을 입력하며, 각 계산조건에 해당되는 온열환경해석 코드를 선택하여 계산을 수행한다. 그리고 계산의 결과를 온도, 기류분포와 PMV분포 등으로 나타냄으로써 열환경을 예측할 수 있도록 한다.

또한 계산 결과에 적합한 Field Test를 통하여 계산 결과를 검증하며, 계산 프로그램을 수정 보완하여 이전의 단계를 수행함으로써 프로그램의 개발을 진행하였다.

마지막으로 계산의 결과와 Field Test의 결과를 비교하여 신뢰성이 인정될 때 장치를 개선하기 위한 Case Study를 수행하며 장치개선을 위한 최적조건을 제시하도록 구성하였다.

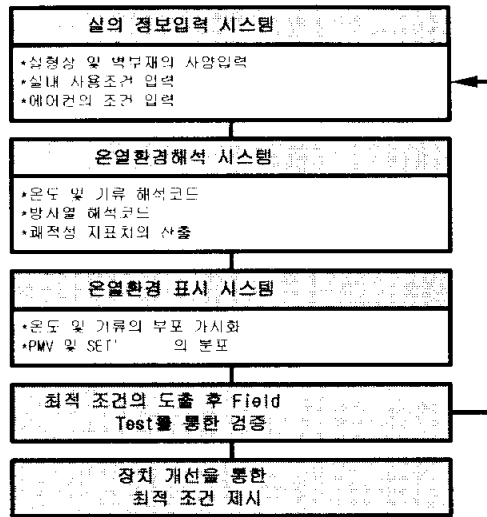


Fig. 4.28 Flow chart for numerical

4.5.3 기초 이론

실내의 기류장을 대상으로 하는 해석에서는 속도가 최대가 될 경우라도 수 m/s이며, 온도는 실온 0~40℃ 정도를 상정하게 된다. 따라서 기초식은 밀도에 관하여 압력의 영향을 무시할 수 있는 비압축성 흐름으로 예상하는 것이 일반적이며, 온도에 의한 밀도 변화는 부력항만 고려한 Boussinesq 근사를 적용하는 것이 가능하다. 또한 실내는 벽면 부근을 제외하고 난류로 예상하여 해석하였다.

난류유동은 비정상 상태의 불규칙적인 유동형상으로 레이놀즈 시간 평균(time averaging) 개념을 도입하여 다음과 같은 식으로 나타내었다. 난류유동에서의 임의의 값은 시간 평균량과 변동량으로 나눌 수 있으며 유동을 방해하는 레이놀즈 응력 등이 시간 평균 방정식에 더해진다.

연속의 식 :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (4-2)$$

운동량 수송 방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_i)}{\partial x_j} \\ = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \left\{ (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + F_i \right\} \end{aligned} \quad (4-3)$$

스칼라양 ψ 의 수송 방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\psi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \psi)}{\partial x_j} \\ = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\Gamma^\psi + \Gamma_t^\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x_j} \right\} + S_\psi \end{aligned} \quad (4-4)$$

k 의 수송 방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} + G + B - \rho \epsilon \end{aligned} \quad (4-5)$$

ϵ 의 수송 방정식 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\mu_\epsilon}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right\} \\ + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G + B) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4-6)$$

이상의 식에서 사용된 C_D , C_1 , C_2 , σ_k , σ_ε 은 모두 $k-\varepsilon$ 방정식 모델의 경험상수를 활용하였으며, Launder, Spalding에 의하여 추천되고 있는 값을 이용하였다.

Table 4.11 Experimental knowledge of $k-\varepsilon$ model & P_r number

C_D	C_1	C_2	σ_ε	σ_k	σ_t
1.44	1.92	0.09	1.0	1.3	0.7

4.5.4 해석 모델

본 연구에 사용된 시뮬레이션 건물은 최근에 신축된 초등학교 보통교실로 선정하였다. 교실의 크기는 가로 9m × 세로 7.5m로써 직사각형 모양이며, 실의 남측면은 외부에 접한 창문이 있고 북쪽은 복도로 통하는 출입문이 앞·뒤로 설치되어 있다.

Fig. 4.29는 계산의 대상이 되는 학교 교실의 형상을 나타낸 것이다. 계산은 전장사방토출 실내기가 학교 교실의 중앙에 설치되어있는 상태를 대상으로 수행하였으며, 오전 9시에 가동하여 30분이 경과하는 동안에 재실자의 호흡선에 해당하는 바닥에서 1.1m 높이의 온도를 예측하여 결과를 비교하였다.

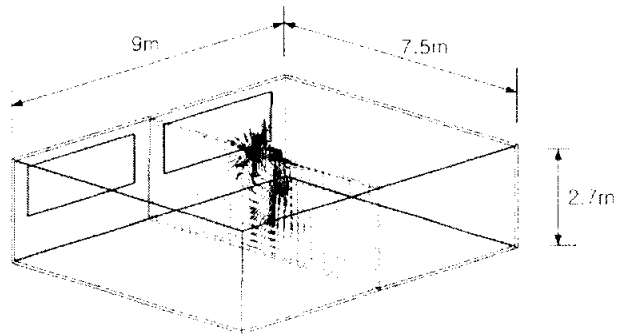


Fig. 4.29 Model of the numerical simulate

Fig. 4.30은 계산격자의 형상을 나타내었으며, X좌표 62, Y좌표 50, Z좌표 10으로 총 58,900개의 계산격자로 형성되었다.

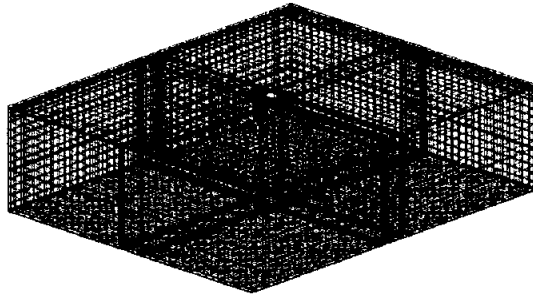


Fig. 4.30 Formation mesh in the numerical

4.5.5 천장형 히트펌프의 구성 및 경계조건

본 연구의 시뮬레이션을 위한 천장사방토출 히트펌프는 4HP 용량의 모델로 사용하였으며 취출구와 흡입구의 형상은 Fig. 4.31와 같다. 실내기의 토출 풍량은 사방으로 고르게 취출 되도록 설정되었으며, 풍량은 현재 학교 건물에 설치된 천장사방토출 실내기 토출구의 풍량을 측정하여 평균값에 해

당하는 504m³/h를 입력하였다. 다음은 계산의 대상이 되는 천장사방토출 실내기의 형상을 나타낸 것이다.

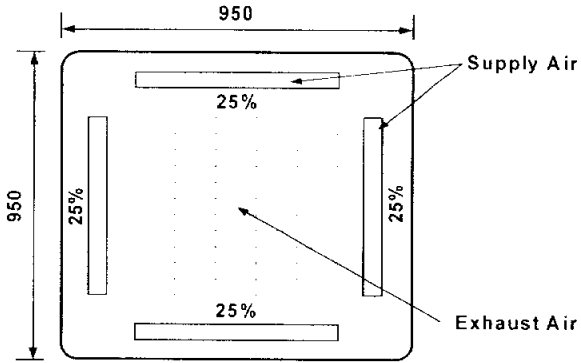


Fig. 4.31 Sketch of the ceiling type air conditioner

천장사방토출 실내기의 최적 토출각도를 도출하기 위하여 여러 가지 조건을 선정하였다. 취출각도는 천장면과 이루는 각도를 Fig. 4.32와 같이 15°씩 변화를 주면서 수행하였다.

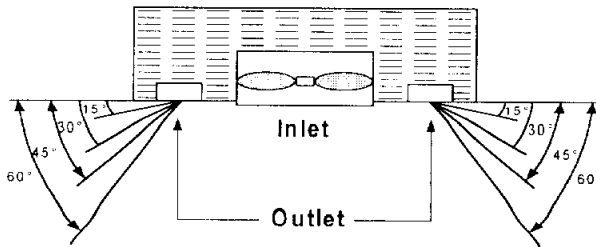


Fig. 4.32 Diffusion angle of the ceiling type air conditioner

Table 4.12는 각 토출구의 풍향과 풍속데이터를 나타낸 것이며, 토출각도는 15°, 30°, 45°, 60°로 설정하여 취출각도의 변화에 따른 온열환경 해석을 하였다.

Table 4.12 Velocity data of diffusion gate

Angle of discharge	Air current speed	Z direction	X-Y direction
60°	4.86	4.21	2.43
45°	4.69	3.32	3.32
30°	4.86	2.43	4.21
15°	5.42	1.40	5.23

그리고 외기조건으로는 부산지방의 동절기 조건을 활용하였다. 건물의 벽체조건을 각각 입력하였으며, 계산의 개요는 다음과 같다.

- 표준 $k-\epsilon$ 난류 모델
- 외기온도 : 부산지역 동절기 기상 데이터
위치 : 부산 위도 35.13도, 경도 129.1도
- 계산시간 : 평년기온 1월21일 9시~10시
- 계산간격 : 1sec
- 수속판정 : 기류 0.1%, 온도 0.01℃
- 초기온도 : 동절기 10℃ 하절기 30℃
- 취출온도 : 동절기 30℃ 하절기 18℃
- 일사차폐계수 : 0.7
- 벽면일사흡수율 : 1.0
- 일사, 반사는 고려하지 않음

- 인접실 온도는 외기온도와 실온의 평균
- 토출각 : 15°, 30°, 45°, 60°
- 토출풍량 : 504m³/h

4.5.6 거주영역의 쾌적도

거주영역의 쾌적도를 평가하기 위해서 사용된 지표는 PMV(예상온열감)를 활용하였으며, 드래프트를 평가하기 위해서는 EDT(유효드래프트 온도)를 활용하였다. PMV는 쾌적환경을 나타내기 위한 쾌적방정식에 의거하여 도출되는 값으로 쾌적상태 이외의 환경에 확장 적용시키려고 하는 지표이다. EDT는 ASHRAE에서 드래프트의 지침으로 정의하고 있는 것으로 다음의 식으로 계산한다.

$$EDT = (t_x - t_m) - 0.039(200v_x - 30) \quad (4-7)$$

여기서 t_x 와 t_m 은 각각 계산하고자 하는 지점의 온도와 실내의 평균온도를 나타내며, v_x 는 계산하고자 하는 지점의 기류속도이다. EDT가 -1.5에서 +1℃의 영역에 있으며, 기류속도가 0.35m/s 이내일 때, 거주자의 대부분이 쾌적한 것으로 평가하고 있다.

4.5.7 난방시 취출각도에 따른 열환경 분석

Fig. 4.33은 동절기 천장사방토출 에어컨의 가동 후 호흡선 110cm 높이의 실내온도 변화를 나타낸 것이다. 토출각도 15°의 경우 10분경과 후 실내온도가 가장 높은 것으로 나타났으며 토출각도 60°의 경우에는 30분이 경과한 시점에서는 실내온도가 다른 설정각도와 유사한 값을 나타내고 있으나 10분이 경과한 시점에서는 다른 토출각도보다 작은 값을 나타내는 것으로 나타났다.

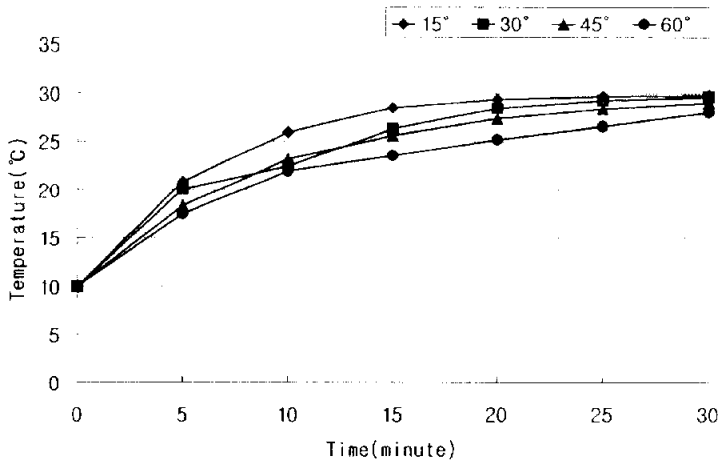
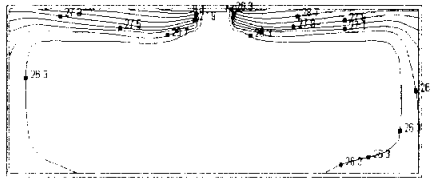


Fig. 4.33 Indoor air temperature change in winter

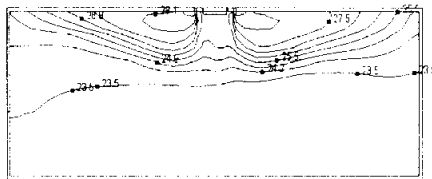
Fig. 4.34는 동절기 천장사방토출 실내기의 가동후 10분이 경과한 시점에서의 복도와 실외를 좌우로 하는 X-Y평면에서의 수직온도분포를 나타낸 것이다. 토출각도가 15°, 30°, 45°인 경우에는 재실공간의 온도가 균일한 것으로 나타났으나 60°의 경우에는 실내공간의 온도분포가 상당히 불균일한 것으로 나타났다. 또한 토출각도가 15°일 경우에는 거주공간의 수직면 온도분포에서 상하온도차가 상당히 발생하는 것으로 판단되어 재실자에게 불쾌감을 줄 가능성이 있는 것으로 나타났다.



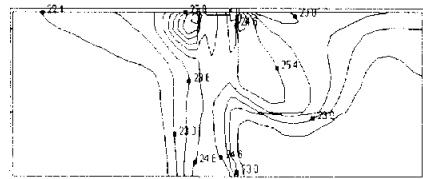
(a) Diffusion angle $\theta=15^\circ$



(b) Diffusion angle $\theta=30^\circ$



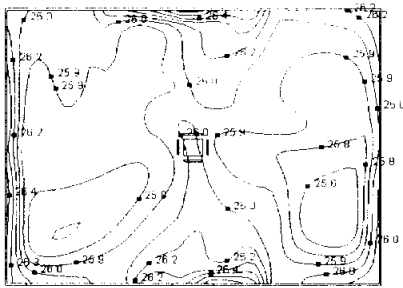
(c) Diffusion angle $\theta=45^\circ$



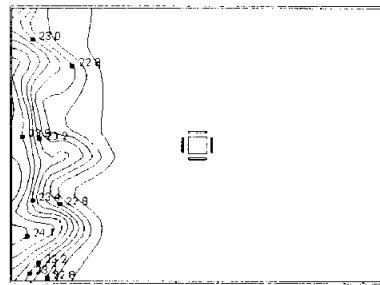
(d) Diffusion angle $\theta=60^\circ$

Fig. 4.34 Vertical temperature distribution in winter

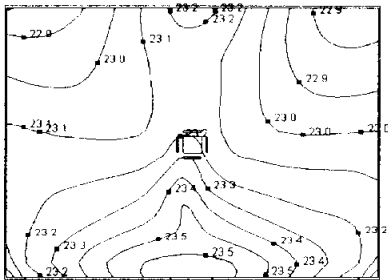
Fig. 4.35는 동절기 천장사방토출 실내기의 가동후 10분이 경과한 시점에서
 서의 복도와 실외를 좌우로 하는 X-Y평면에서 1.1m높이의 수평면 온도분
 포를 나타낸 것이다. 토출각도가 15°, 30°, 45°인 경우에는 새실공간의 온도
 가 균일한 것으로 나타났으나 60°의 경우에는 실내공간의 온도분포가 상당
 히 불균일한 것으로 나타났다.



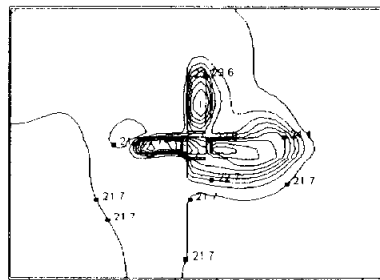
(a) Diffusion angle $\theta=15^\circ$



(b) Diffusion angle $\theta=30^\circ$



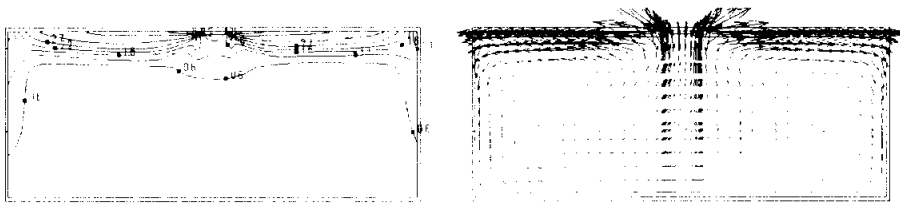
(c) Diffusion angle $\theta=45^\circ$



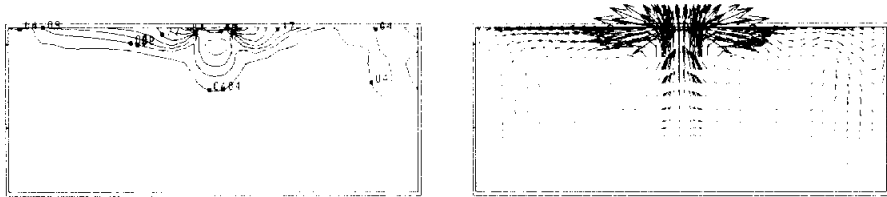
(d) Diffusion angle $\theta=60^\circ$

Fig. 4.35 Horizontal temperature distribution in winter

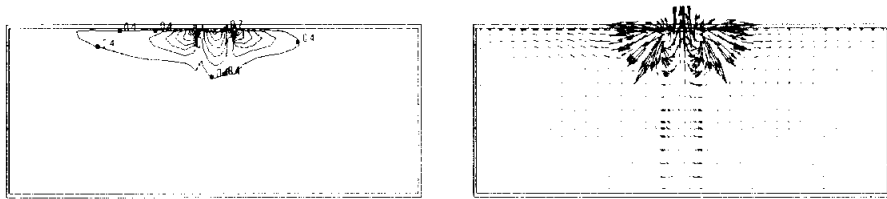
Fig. 4.36은 동절기 천장사방토출 실내기의 가동후 10분이 경과한 시점에서 북도와 실외를 좌·우로 하는 X·Y평면에서의 기류분포와 기류방향을 나타낸 것이다. 15°, 30°의 토출각도에서는 천장면에서 확산되어 실내에 기류가 분포하게 되므로 전체적인 기류의 분포가 호흡선인 1.1m 높이에서는 균일하게 나타나지만, 토출각도 45°에서는 일부 공기가 토출직후 흡입구로 배출되는 현상을 보이는 것을 알 수 있다. 그리고 토출각도 60°에서는 상당한 량의 토출공기가 흡입구로 배출되는 현상을 보이므로 실내온도가 다른 토출각도의 조건보다 느리게 상승하는 원인이 되는 것을 예측할 수 있다. 그리고 기류분포도 불균일하며 재실자의 호흡선에 해당하는 바닥에서 1.1m에서 천장형 에어컨의 수직 아래에 해당하는 영역은 상당한 드래프트가 예상된다.



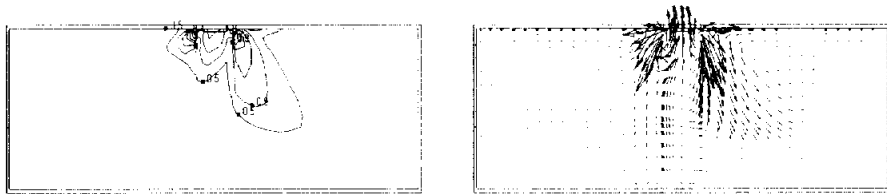
(a) Diffusion angle $\theta=15^\circ$



(b) Diffusion angle $\theta=30^\circ$



(c) Diffusion angle $\theta=45^\circ$



(d) Diffusion angle $\theta=60^\circ$

Fig. 4.36 Vertical stream distribution in winter

Fig. 4.37은 재실자 호흡선 1.1m 높이에서의 유효드래프트 온도를 나타낸 것이다. 토출각도 15°에서는 기류가 벽면을 따라서 형성되므로 드래프트영역이 벽면에 가까이 형성되어 실제 재실자에게는 큰 영향을 주지 않을 것으로 생각되며, 30°와 45°에서는 토출구의 주 기류가 도달하는 영역에서 드래프트영역이 발생하지만 전체적인 기류속도가 크지 않으므로 그 영향은 크지 않을 것으로 생각된다. 60°에서는 기류해석의 결과에서 예측되는 바와 같이 토출구의 하부에서 드래프트를 크게 느낄 수 있는 것을 알 수 있다.

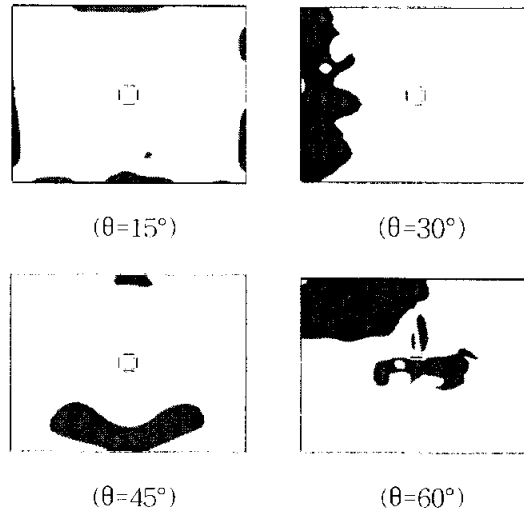


Fig. 4.37 Vertical stream distribution in winter

4.5.8 냉방시 쿨출각도에 따른 열환경 분석

Fig. 4.38은 냉방시 천장사방토출 실내가의 가동 후 호흡선 110cm 높이의 실내온도변화를 나타낸 것이다. 토출각도 15°의 경우 10분경과 후 실내온도가 가장 낮은 것으로 나타났으나, 토출각도 30°와는 큰 차이를 보이지 않으며 거의 동일한 것으로 나타났다. 토출각도 60°의 경우에는 30분이 경과한 시점에서는 실내온도가 다른 설정각도와 유사한 값을 나타내고 있으나 10분이 경과한 시점에서는 다른 토출각도보다 상당히 높은 값을 나타내는 것으로 나타났다.

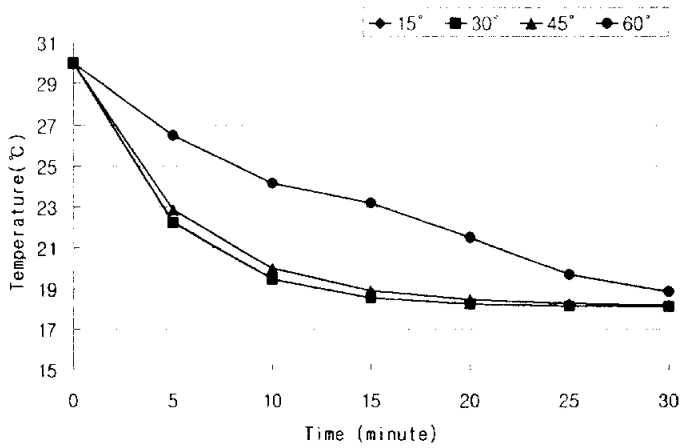
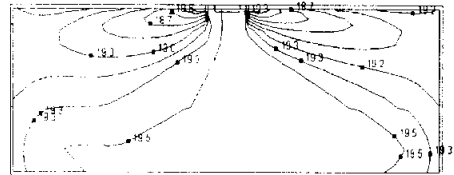


Fig. 4.38 Indoor temperature change in summer

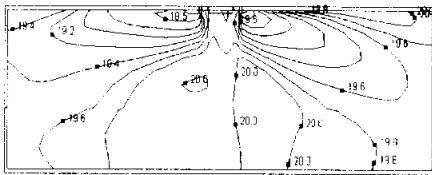
Fig. 4.39는 냉방시 천장사방토출 실내기의 가동 후 10분이 경과한 시점에서 서의 북도와 실외를 좌·우로 하는 X-Y평면에서의 수직온도분포를 나타낸 것이다. 토출각도가 15°인 경우에는 재실공간의 온도가 균일한 것으로 나타났으나 토출각도 30°, 45°의 경우에는 실내공간온도가 일부 불균일한 형태를 보이며, 60°의 경우에는 실내공간의 온도분포가 상당히 불균일한 것으로 나타났다. 또한 토출각도가 15°일 경우에는 봉질기의 운전조건과는 달리 거주 공간의 수직면 온도분포에서 상하온도차가 가장 적게 발생하는 것으로 나타났으며, 호흡선 110cm 높이에서 토출각도 15°와 거의 유사한 평균온도변화를 보이는 토출각도 30°에서는 수직면온도가 토출각도 15°의 경우보다 불균일한 것으로 나타났다.



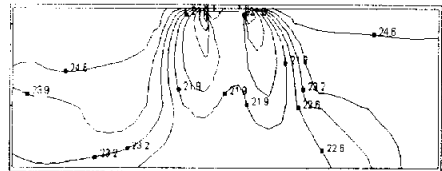
(a) Diffusion angle $\theta=15^\circ$



(b) Diffusion angle $\theta=30^\circ$



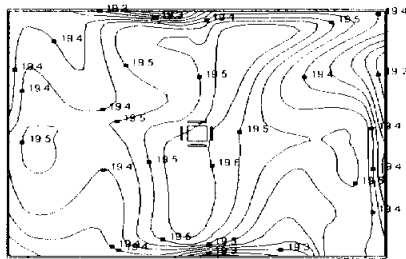
(c) Diffusion angle $\theta=45^\circ$



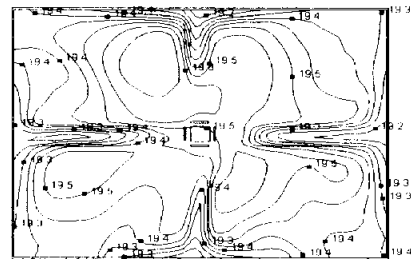
(d) Diffusion angle $\theta=60^\circ$

Fig. 4.39 Vertical temperature distribution in summer

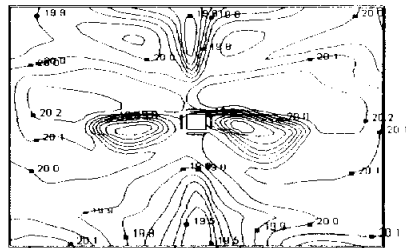
Fig. 4.40은 냉방시 천장사방토출 실내기의 가동 후 10분이 경과한 시점에서의 복도와 실외를 좌·우로 하는 바닥에서 110cm높이의 수평면 온도분포를 나타낸 것이다. 토출각도가 15°인 경우에는 채실공간의 온도가 균일한 것으로 나타났으나 토출각도 30°, 45°의 경우에는 실내공간온도가 일부 불균일한 형태를 보이며, 60°의 경우에는 실내공간의 온도분포가 상당히 불균일한 것으로 나타났다. 또한 토출각도가 15°일 경우에는 동절기의 운전조건과는 달리 거주공간의 수평면 온도분포에서 상하온도차가 가장 적게 발생하는 것으로 나타났으며, 호흡선 110cm높이에서 토출각도 15°와 거의 유사한 평균온도변화를 보이는 토출각도 30°에서는 수직면온도가 토출각도 15°의 경우보다 불균일한 것으로 나타났다.



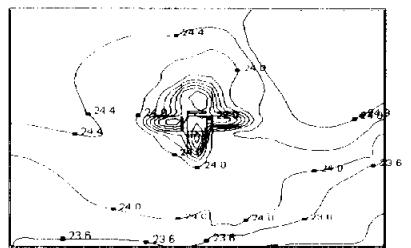
(a) Diffusion angle $\theta=15^\circ$



(b) Diffusion angle $\theta=30^\circ$



(c) Diffusion angle $\theta=45^\circ$

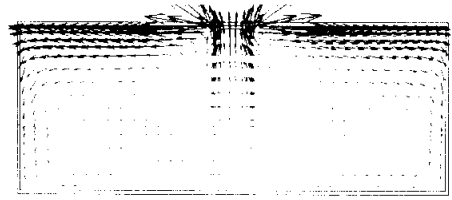
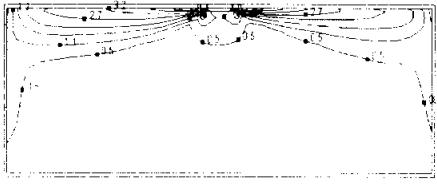


(d) Diffusion angle $\theta=60^\circ$

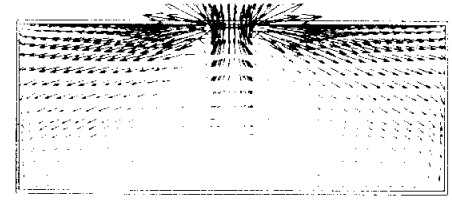
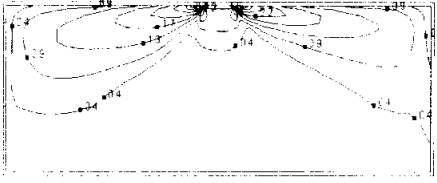
Fig. 4.40 Horizontal temperature distribution in summer

Fig. 4.41은 냉방시 천장사방토출 실내기의 가동후 10분이 경과한 시점에서 북도와 실외를 좌·우로 하는 X-Y평면에서의 기류분포와 기류방향을 나타낸 것이다. 15°의 토출각도에서는 천장면에서 확산되어 실내에 기류가 분포하게 되므로 전체적인 기류의 분포가 호흡선인 110cm 높이에서는 균일하게 나타나지만 토출각도 30°, 45°에서는 냉기류의 밀도차에 의해 재실공간까지 토출구의 직접적인 기류가 도달하여 불균일한 분포를 보인다. 그리고 토출각도 60°에서는 동질기 해석결과와 같이 상당한 량의 토출공기가 흡입구로 배출되는 현상을 보이므로 실내온도가 다른 토출각도의 조건보다 느리게 하강하는 원인이 되는 것을 예측할 수 있다.

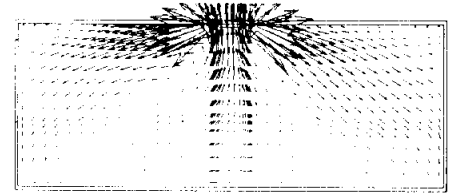
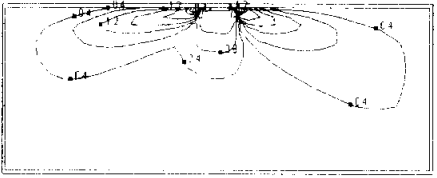
그리고 기류분포도 불균일하며 재실자 호흡선 110cm에서의 천장사방토출 실내기의 수직 아래에 해당하는 영역은 상당한 드래프트를 느낄 것으로 생각된다.



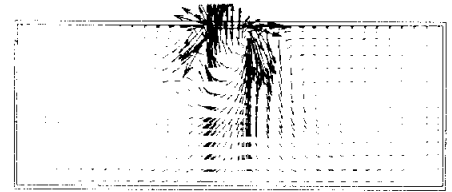
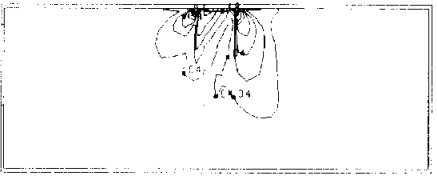
(a) Diffusion angle $\theta=15^\circ$



(b) Diffusion angle $\theta=30^\circ$



(c) Diffusion angle $\theta=45^\circ$



(d) Diffusion angle $\theta=60^\circ$

Fig. 4.41 Vertical stream distribution in summer

Fig. 4.42는 하절기 천장사방토출 실내기의 가동후 10분이 경과한 시점에 재실자 호흡선 110cm 높이에서의 유효드래프트 온도를 나타낸 것이다. 토출각도 15°에서는 기류가 벽면을 따라서 형성되므로 드래프트영역이 벽면에 가까이 형성되어 실제 재실자에게는 큰 영향을 주지 않을 것으로 생각되며, 30°와 45°에서는 토출구의 주 기류가 도달하는 영역에서 드래프트 영역이 발생하며 기류속도가 0.25m/s이상으로 예측되므로 천장사방토출 실내기의 가동에 따른 기류의 발생으로 넓은 영역에서 약한 드래프트를 발생시킬 것으로 예상된다. 60°에서는 기류해석의 결과에서 예측되는 바와 같이 토출구의 하부에서 드래프트를 크게 느끼는 것으로 나타났다.

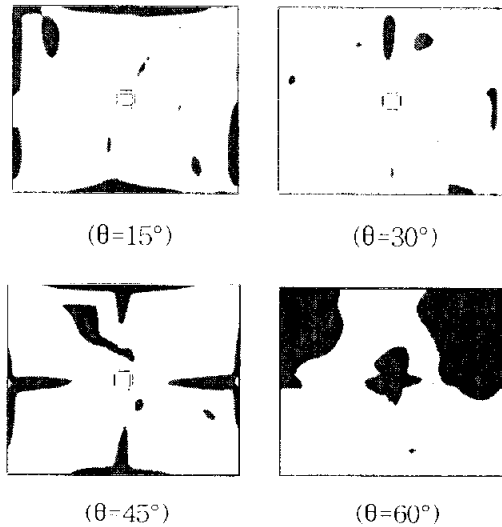


Fig. 4.42 EDT distribution in summer

이와 같은 수치해석을 통하여, 동절기 난방시에는 토출각도 15°와 30°에서 실내온도분포가 균일하며 호흡선 110cm 높이에서의 온도상승이 크므로 난방에 가장 효과적인 토출각이라 할 수 있으나, 토출각도 15°의 경우에는 상하

온도차가 크게 발생하였으며, 하절기 냉방시에는 토출각도 15°와 30°에서 호흡선 110cm 높이의 평균온도가 거의 동일하게 빠른 속도로 낮아지지만, 토출각도 30°의 경우에는 온도분포와 기류분포를 분석한 결과, 주 기류가 재실자에 영향을 줄 수 있어 드래프트의 발생이 예상된다.

동절기와 하절기에서 토출각도 60°의 경우에는 토출된 기류가 흡입구의 압력에 의해 토출직후 배출되는 현상이 나타나므로 냉난방의 설정온도에 도달하는 시간이 상대적으로 길어질 것으로 생각되며, 천정형 에어컨의 아래 부분에서는 상당히 많은 드래프트 영역이 발생되었다.

4.6 요약

학교 교실의 온열환경 평가와 개선을 목적으로 바닥 복사난방, 바닥설치 FCU, 천장사방토출 공조시스템에 대하여 온열환경 및 쾌적성을 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 온열환경 분석결과, 겨울철 상하 온도차가 적게 발생한 순서는 바닥 복사난방, 천장사방토출형, 바닥설치 FCU로 나타났으며, 바닥설치 FCU의 경우 모든 지점에서 상하 온도차가 ASHRAE에서 권장하는 3℃를 크게 초과하였다. 그리고 바닥으로부터 110cm 높이에서의 수평면 온도차는 바닥 복사난방 및 바닥설치 FCU 방식은 온도 편차 2℃ 이내로 양호하나, 천장사방토출형은 5℃를 초과하는 것으로 나타났다. 또한 천장 사방토출형, 바닥설치 FCU, 바닥복사난방 모든 방식이 110cm 높이에서의 측정결과로 계산한 PMV, PPD가 쾌적 영역 내에 포함되어 있는 것으로 나타났다.

(2) 여름철 상하 온도차가 적게 발생한 순서는 천장사방토출형, 바닥설치 FCU이다. 바닥설치 FCU의 경우 상하온도차가 크게 나타났지만 거주역인 170cm 이내의 공간에서는 ASHRAE 규정치인 3℃를 크게 초과하지는 않았으며, 천장사방토출형은 상하 온도분포가 매우 적게 나타났다. 그리고 바닥

으로부터 110cm 높이에서의 수평면 온도차는 천장사방토출형 1.5℃, 바닥설치 FCU 5.6℃으로 나타났다. 특히 바닥설치 FCU의 경우 냉기류의 발생원의 위치에 따른 영향이 크게 나타났다.

(3) 온열환경에 대한 설문조사 결과, 난방 및 냉방시 전체 온냉감은 천장사방토출형이 양호한 것으로 나타났으며, 국부 온냉감도 천장사방토출형이 양호한 것으로 나타났다.

이상에서 살펴본 바와 같이 학교건물의 실내 온열환경 측면에서 겨울철에는 바닥복사난방이 여름철에는 천장사방토출형이 가장 바람직한 것으로 조사되었으며, 학교 건물의 특성상 예열시간이 오래 걸리는 바닥복사난방 방식은 초등학교 유치부나 저학년 교실에 제한적으로 시설되어 있다.

제 5 장 학교 건물의 공기환경 분석

5.1 실험대상 학교와 측정방법

5.1.1 실험개요

최근 건축물의 기밀성 향상과 더불어 건축 내장재 등에서 발생하는 실내 오염원의 다양화로 미세 먼지, 가스상 물질(CO, CO₂, SO₂, NO₂), 석면, 라돈, 포름알데히드(HCHO), 중금속, 미생물성 물질, 악취 등의 오염물질에 의한 실내 공기오염이 증가하고 있다. 이러한 물질들은 농도가 매우 낮기 때문에 쉽게 검출되지 않으며, 환기량이 부족한 경우 실내에 잔류하게 되어 건강에 해를 미치고 있다.

학교건물의 경우 단위 면적당 재실인원이 많고 마감재로 사용되는 재료로부터 유해 물질이 발생되어 학생들이 두통을 호소하는 등 “새학교 증후군(New school building syndrome)” 현상이 나타나고 있으며, 여름철과 겨울철에는 냉·난방기의 가동으로 인하여 실내가 밀폐됨으로서 환기부족으로 인한 불편감이 증대되고, 학생들의 건강과 학습능력향상에 지장을 주고 있다.

학교건물의 쾌적한 실내 환경을 만들기 위해 세계 여러 나라에서는 학생 1인당 공급되어야 할 외기량을 실의 용도에 따라 규정하고 있으며, 재실자의 쾌적성을 위한 최소한의 필요환기량을 규정하고 있다. 우리나라에서도 최근 “학교보건법” 개정에 따라 교실의 환경위생기준이 제정되어 기계적 환기시설을 이용한 일정 수준의 환기를 하도록 의무화 하고 있지만 이 기준을 만족하는 학교는 거의 없는 실정이다.

실내 공기질 제어와 쾌적성 향상을 위한 방안으로 실내 공기오염 발생원의 제거 또는 대체, 개선, 환기, 공기청정기 등에 의한 방법이 제안되고 있지만, 환기(Ventilation)는 가장 효과적인 실내 오염물질 제어방법으로 인식되고 있다. 환기는 실내 공기의 오염을 허용치 이하로 유지시키기 위하여 실내로 깨끗한 공기를 공급하고 오염된 공기를 실외로 배출시키는 것을 의미하며, 이때 외기 도입량 증가는 실내의 환기횟수를 증가시켜 오염된 공기를 희석시킴으로서 쾌적성을 향상시킬 수 있다.

실내의 종합적인 오염정도 또는 환기상태를 평가하는 척도로 이산화탄소의 농도를 사용하고 있으며, 이산화탄소는 주로 재실자들의 호흡에 의하여 발생하게 되므로 실내공간에서 농도가 증가하면 호흡에 필요한 산소의 양이 부족하게 되어 중요한 실내오염물질 중의 하나로 취급되고 있다.

따라서 본 연구에서는 실내 공기질 향상을 위하여 모델 학교에 용량이 다른 환기장치를 설치하고, 학생들이 활동하고 있는 학교 교실을 대상으로 실내공기의 환기 상태를 평가하는데 지표로 사용되는 이산화탄소의 농도가 환기장치의 작동 여부 및 환기량에 따라 어떻게 변하는지를 측정·평가하여 최소 필요환기량을 도출해내고, 이러한 결과를 통해 향후 학교 교실의 공기질 개선을 위한 방안을 마련할 수 있는 기초 자료를 확보하고자 한다.

5.1.2 실험대상 학교

학교 교실의 공기질 개선을 위한 실험 대상 H중학교는 부산광역시 영도구에 소재하며, 주변산간 및 해안지역에 위치한 학교로서 공해에 의한 공기오염도가 비교적 낮다. 또한 교실이 북측에 있고 복도가 남측에 있으며, 운동장이 교사 남쪽 5m 아래에 있어 흙먼지에 의한 영향이 적다. 교실의 외부창은 산이 인접해 있어 항상 신선한 공기를 공급할 수 있을 것으로 판단되

어 실험대상 학교로 선정하게 되었다.

측정시기는 하절기(2003년 7월 20일~7월 26일) 총 5회에 걸쳐 실시하였다. Table 5.1은 실험 대상학교의 건물 개요를 나타낸 것이다.

Table 5.1 Description of school building

Classify	Contents
Dimension	Lot area : 19,705m ² , Architectural area : 5,883m ²
Structure	reinforced concrete rahmen building
Height	floor height : 3.3m, ceiling height : 2.7m
Area	9m × 7.5m = 67.5m ²
Scale	Classes : 22, Students : 745
Air conditioning system	Ceiling type heat-pump (3.5HP)
Window	Steel sash (3mm) + Plastic sash (3mm)
Conclusion	Ceiling : Ceiling frame + 6mm gypsum cement Wall : water paint Floor : Lumber flooring board

5.1.3 환기장치 구성

환기장치는 천장 내부공간에 설치 가능한 350 CMH와 500 CMH의 용량을 가진 열회수형 환기장치(Heat Recovery Ventilator)를 설치하였다.

Fig 5.1은 환기장치의 설치 평면도이며, Fig 5.2는 환기장치의 실제 모습을 나타낸 것이다. 천장의 중앙보틀 사이에 두고 교실의 전면부와 후면부에 각 1대의 환기장치를 설치하여 환기량 350 CMH, 500 CMH, 850 CMH (350 + 500), 1000 CMH (500 + 500)의 4가지 조건으로 가동유무에 따른 CO₂ 농도를 측정하였다

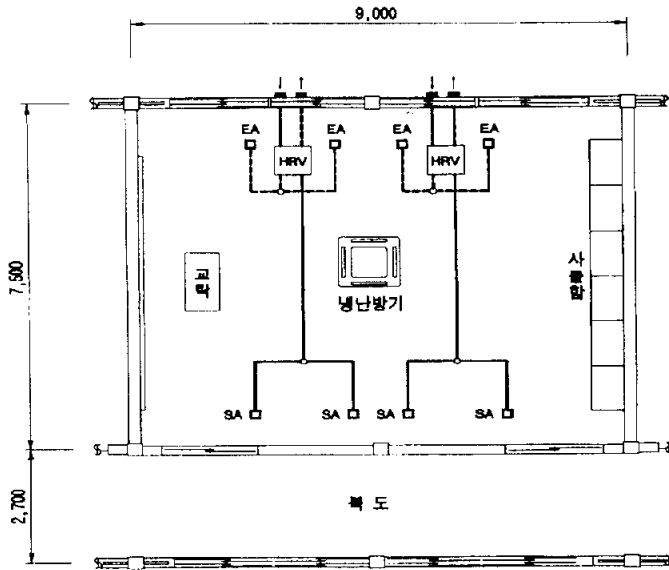


Fig. 5.1 Plane of the ventilating system

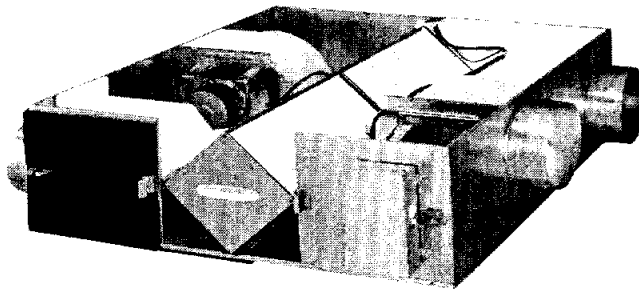


Fig. 5.2 Photograph of the ventilating system

환기장치는 환기구와 환기덕트, Controller, 외부 흡기구와 배기구, 전열교환기로 구성된다. 교실 창문에 설치한 외부 흡입구를 통해 신선한 외기가 유입되면 덕트를 통해 환기팬이 내장된 전열교환기로 전달이 되고 실내 급기용 기구를 통해 교실에 공급된다. 반대로 실내의 오염된 공기는 배기용 환기구와 덕트를 통해 전열교환기로 전달이 되어 외부 배기구를 통해 대기

중으로 방출된다.

5.1.4 측정 장치

실험대상 교실의 CO₂와 온도, 습도를 측정하기 위하여 실내오염 종합측정 장치를 교실의 중앙에 설치하였다. 측정원리는 비분산 적외선 측정법에 따라 이산화탄소에 의한 적외선 흡수량의 변화를 선택성 검출기로 측정하여 공기 중에 포함되어 있는 이산화탄소의 농도를 연속 측정하는 방법이다.

Table 5.2는 측정장치의 측정범위와 정밀도를 나타낸 것이며 측정 항목인 CO₂와 온도, 습도를 연속적으로 측정이 가능하다. Fig 5.3은 측정장치와 컴퓨터를 On-line으로 설치한 것을 나타내었다.

Table 5.2 Specification of Measurement Equipment of IAQ

Equipment	Model	Measuring factor	Measuring range	Resolution
Multi-function meter logger	TESTO 445	Temperature	-50~150 °C	± 0.1 °C
		Relative Humidity	0~100% RH	± 0.1% RH
		Air current speed	0~60 m/s	0.01 m/s
		CO ₂	0~10000 ppm	0~0.1 ppm
		CO	0~500 ppm	0.1 ppm

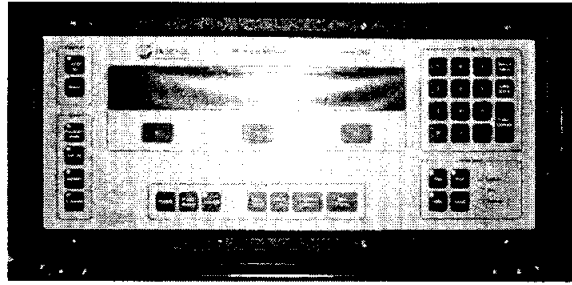


Fig. 5.3 Multi Gas Monitor

5.1.5 측정방법

측정 장소는 교사 2층 일반 교실을 정하였으며, 교실당 재실 인원은 30명 (남:19명, 여:11명)이었다. 측정은 학교 수업시간을 고려하여 2교시 수업인 오전 10시 20분부터 6교시 수업이 끝나는 시간인 오후 3시 25분까지 5분 간격으로 CO₂농도를 연속 측정하였다. 2교시 측정은 환기장치를 가동하지 않는 상태에서 측정하였으며, 3교시부터 점심시간을 포함한 6교시까지는 환기장치를 가동한 상태에서 측정하였다. 환기조건은 350 CMH, 500 CMH, 850 CMH (350 + 500), 1000 CMH (500 + 500)의 4가지 조건으로 열회수 환기장치를 교환해 가며 7일간에 걸쳐 실험을 실시하였다. Table 5.3은 환기장치의 수업 시간대별 측정방법을 나타낸 것이며, Fig. 5.4는 실험대상 학교 교실에서 측정장치를 이용한 실제 공기질 측정 모습을 나타내고 있다.

Table 5.3 Measurement schedule & method to the school hours

School hours		Measuring method	Measuring Factor
2 class	10:20~11:05	Measurement for 5 minutes when ventilator is not operated	CO ₂ Density of indoor & outdoor air (ppm)
3 class	11:15~12:00		
4 class	12:10~12:55		
Lunch time	12:55~13:45		
5 class	13:45~14:30		
6 class	14:40~15:25		



Fig. 5.4 Photograph of IAQ Measurement in the Classroom

5.1.6 단위교실의 자연환기량 측정

밀폐되어 있는 상태의 교실에서도 실제로 어느 정도는 외기가 침입되고 열교환과 오염물질의 경감이 이루어지고 있다. 이러한 외기의 침입량은 실내에서 발생하는 오염물질의 확산과 분포를 파악하고, 실내 공기흐름의 적정성과 환기량 산정을 위해 정확히 측정할 필요가 있다.

학교건물 단위교실의 환기 및 기밀성능에 대한 실측데이터를 확보하기 위해 추적가스법에 의한 측정을 실시하였다.

(1) 추적가스법 (Tracer gas method)

추적가스법에 의한 측정장치는 ASTM E741-83 (Standard test method for determining air leakage rate by tracer dilution)의 개념을 기본으로 구성하였다.

임의로 추적가스(tracer gas)를 실내로 분출한 후, 시간경과에 따른 가스농도의 변화량을 가스측정기 등으로 측정하여 건물의 기밀 및 환기성능을 평가하는 방법으로 크게 측정기간에 따라 단기측정법(short term tracer gas method)과 장기측정법(long term tracer gas method)으로 구분된다.

단기측정법은 추적가스를 실내로 주입한 후, 그 농도변화를 짧은 기간에 측정하는 것이며, 장기측정법은 BNL(Brookhaven National Laboratory)의 R. Dietz에 의하여 1986년에 개발된 것으로 일주일 혹은 몇 개월의 장기간에 걸쳐 대상건물의 환기 및 기밀성능을 측정하는 방법이다[42].

실제의 공간에서는 공간내의 공기의 움직임에 따라 오염물질이 공간내로 서서히 확산하며 농도의 분포가 생기게 되지만, 공간내에 어떤 오염물질이 발생하여 발생한 순간에 오염물질이 공간전체에 퍼지며 공간의 어느 곳에서나 같은 농도가 된다고 가정할 수 있는 상황에서는 오염물질 농도의 시간변

화를 측정하는 것으로 공간의 환기량을 구할 수 있다.

일단 요구되는 양이 방출되면 가스 공급을 중단하고 실내공기와 혼합한 후에 추적가스의 농도감쇠 경향을 가스분석기를 이용하여 일정간격으로 여러 차례 측정한다. 일반적으로 측정기간은 1시간 내외이다. 만약 추적가스가 실내 공기와 잘 혼합되고, 환기를 일으키는 구동력(바람, 온도차, 기계환기 시스템 등)이 일정하다면, 추적가스의 농도감쇠는 대수관계를 보인다.

이 방법에 의한 환기횟수 산정은 식 (5-1)과 같다.

$$N = \frac{1}{\Delta T} \times \ln \frac{C_1}{C} \quad (5-1)$$

여기서, C_1 : 시간 t_1 에서의 추적가스농도[ppm]

C : 시간 t 에서의 추적가스 농도[ppm]

ΔT : t, t_1 측정시간차 (time difference)

(2) 단위 교실의 자연환기량

추적가스로는 국내에서 구입 및 운반이 용이하고, 현장에서 사용하기에 위험성이 적은 불활성, 불연성인 CO_2 가스를 사용하였다. 추적가스법에 의한 실내 환기성능 측정시 가장 유의하여야 할 점은 실내로 방출된 추적가스가 실내의 기존 공기에 균일하게 확산되어 혼합될 수 있도록 팬(fan)을 이용하여 효과적으로 혼합시키는 것이다. 따라서 측정시 지속적으로 미기류를 발생시켜 추적가스를 공간 내에서 균일하게 혼합시켰다.

측정 시작 시간과 그로부터 30분이 지났을 때의 실내 CO_2 농도를 측정하여 감소량을 구하였고, 정확한 실험을 위해 이와 같은 과정을 5회 반복하였

다. 추직가스의 농도측정을 위해서 TESTO사의 multi-gas monitor를 사용하였다.

측정방법은 KS F 2603(옥내 환기량 측정방법, 이산화탄소법)에 따라 실내에서 이산화탄소의 발생이 정지되면, 실내 공기 중의 CO₂ 농도가 급기로 인해 감소하는 것을 측정하여 계산하는 방법을 사용하였다. CO₂ 농도의 감소량을 측정하고 아래의 Seidel의 식 (5-2)을 이용하여 누기량을 구할 수 있다.

$$Q = 2.303 \frac{V}{t} \log_{10} \frac{C_1 - C_0}{C_t - C_0} \quad (5-2)$$

여기서, Q : 누기량 (m³/h)

V : 그 실내 기체의 부피

C₁ : 측정 시간 (t = 0)에 있어서 실내공기 중의 CO₂ 농도

C_t : t 시간 후에 있어서 실내공기 중의 CO₂ 농도

외부 급기의 CO₂ 농도는 평균 373 ppm으로 측정되었으며, 일반적인 교실의 체적은 171m³이다. 환기회수 N = Q(환기량) / V(교실체적)으로 학교 교실의 자연환기량 측정 결과는 Table 5.4와 같으며, 평균 자연환기량은 시간당 154.8m³, 평균 환기회수는 시간당 0.89회로 조사되었다.

Table 5.4 Results on natural ventilation in the classroom

Section	Initial Density (C_i)	Density after t times (C_t)	Amount of natural ventilation	The number of air changes
1 times	6,319 ppm	4,071 ppm	165m ³	0.95
2 times	6,220 ppm	4,018 ppm	165m ³	0.95
3 times	5,290 ppm	3,624 ppm	144m ³	0.83
4 times	4,715 ppm	3,133 ppm	156m ³	0.90
5 times	6,083 ppm	4,134 ppm	144m ³	0.83

5.2 실험결과 및 고찰

5.2.1 환기장치 미가동시 이산화탄소 변화

Fig. 5.5는 환기장치를 가동시키지 않은 상태에서의 실험측정 결과를 나타낸 것이다. 이산화탄소 농도의 최대치가 2,207 ppm의 값을 나타내었고, 실제 수업시간의 이산화탄소 평균농도는 1,709 ppm을 보였다. 수업 중 45분 동안 이산화탄소의 농도가 계속 증가하였으며, 휴식시간과 점심시간이 되자 학생들이 출입문을 열어 1,000 ppm 이하로 떨어졌다.

교실의 환경위생기준에 비하여 이산화탄소의 평균농도가 1.7배 이상 초과하는 것으로 나타났다.

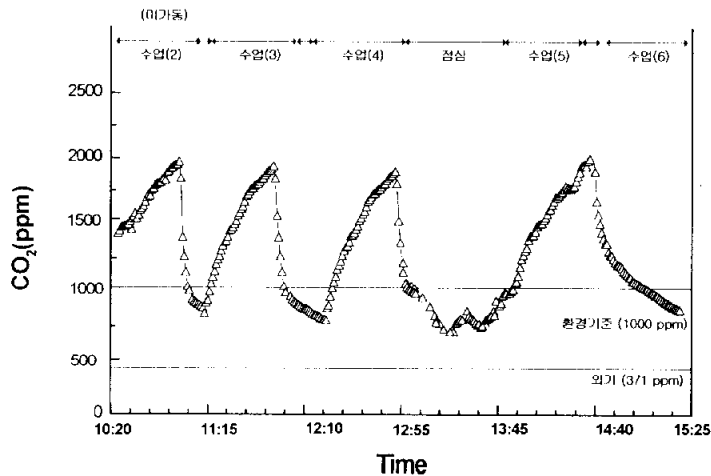


Fig. 5.5 Results of measurement for density of CO₂ during shutdown

5.2.2 환기장치 가동시 이산화탄소 변화

환기장치의 환기량에 따라 350 CMH, 500 CMH, 850 CMH, 1000 CMH의 4가지로 구분하여 환기장치를 가동 전 1시간 동안과 가동 후 4시간동안의 CO₂ 농도를 측정하였다.

(1) 350 CMH 환기장치에 의한 실험

Fig. 5.6은 350 CMH의 환기장치 실험측정 결과이다. 환기장치를 가동하지 않은 상태에서 실내 이산화탄소의 농도가 최대 2,150 ppm으로 측정되었다. 이후 교실 앞부분에 설치된 환기장치를 가동시킨 결과 가동 중 이산화탄소의 농도가 최대 1,813 ppm으로 측정되어 337 ppm 정도의 환기성능을 보이는 것으로 나타났다. 실제 수업시간의 이산화탄소 평균치는 1,488 ppm으로 나타나 환기장치를 가동시켜 662 ppm의 이산화탄소가 감소되었음을 알 수 있다.

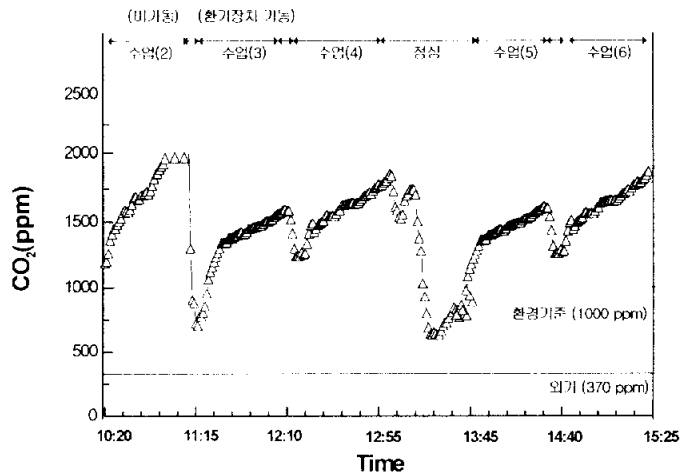


Fig. 5.6 Results of measurement for density of CO₂ [350 CMH ventilation device]

(2) 500 CMH 환기장치에 의한 실험

Fig. 5.7은 500 CMH의 환기장치 실험측정 결과를 나타내었다. 환기장치를 가동하지 않은 상태에서 실내 이산화탄소의 농도가 최대 2,055 ppm으로 측정되었다. 이후 교실 몇부분에 설치된 환기장치를 가동시킨 결과 가동 중 이산화탄소의 농도가 최대 1,491 ppm으로 나타나 564 ppm 정도의 환기성능을 보이는 것으로 조사되었다. 실제 수업시간의 이산화탄소 평균치는 1,307 ppm을 보여 환기시스템을 가동시켜 748 ppm의 이산화탄소가 감소되었음을 알 수 있다.

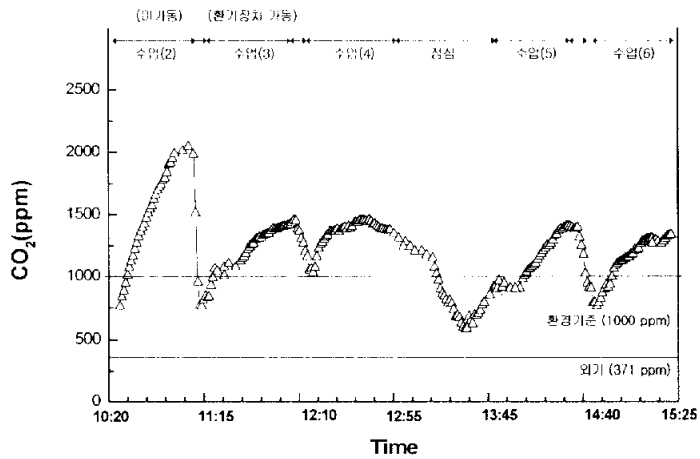


Fig. 5.7 Results of measurement for density of CO₂
[500 CMH ventilation device]

(3) 850 CMH 환기장치에 의한 실험

Fig. 5.8은 850 CMH의 환기장치 실험측정 결과를 나타내었다. 환기시스템을 가동하지 않은 상태에서 실내 이산화탄소 농도가 최대 1,714 ppm으로 측정되었다. 이후 교실 앞부분에 설치된 350 CMH, 뒷부분에 설치된 500 CMH의 환기장치를 가동시킨 결과 가동 중 이산화탄소의 농도가 최대 1,489 ppm을 보임으로서 225 ppm정도의 환기성능을 보이는 것으로 나타났다. 환기성능이 낮은 것은 환기장치를 가동시키지 않은 상태에서 이산화탄소의 농도가 1,714 ppm정도로 낮게 측정되었기 때문일 것으로 추측된다.

또한 실제 수업시간의 이산화탄소 평균치가 975 ppm으로 나타나 환경위생기준 1,000 ppm을 만족하고 있다.

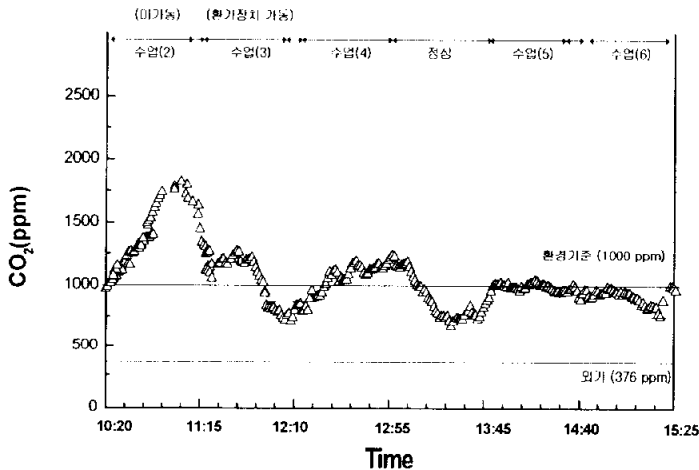


Fig. 5.8 Results of measurement for density of CO₂
[850 CMH ventilation device]

(4) 1,000 CMH 환기장치에 의한 실험

Fig. 5.9는 1,000 CMH의 환기장치 실험측정 결과를 나타내었다. 환기시스템을 가동하지 않은 상태에서 실내 이산화탄소 농도가 최대 2,323 ppm으로 측정되었다. 이후 교실 앞부분에 설치된 500 CMH, 뒷부분에 설치된 500 CMH의 환기장치를 가동시킨 결과 가동 중 이산화탄소의 농도가 최대 1,220 ppm으로 나타나 1,103 ppm정도의 환기성능을 보이는 것으로 나타났다. 실제 수업시간의 이산화탄소의 평균치는 816 ppm을 보여 수치상으로 1,507 ppm의 이산화탄소 농도의 감소를 보였다. 이는 환기장치의 환기용량이 1000 CMH으로 늘어남에 따라 환기성능이 크게 개선됨을 확인할 수 있다.

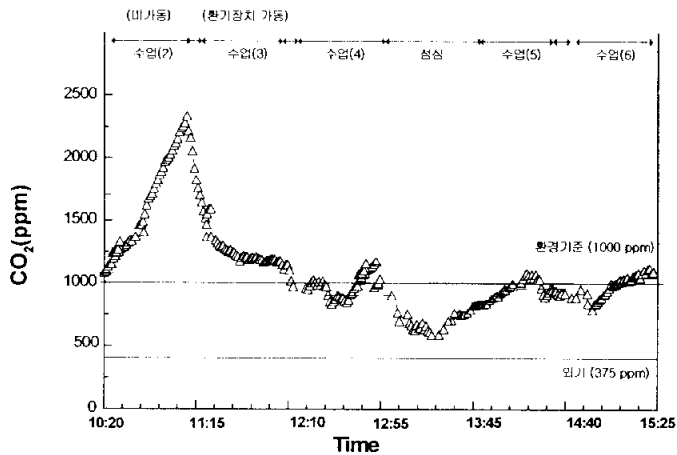


Fig. 5.9 Results of measurement for density of CO₂
[1,000 CMH ventilation device]

5.3 환기량 분석 결과

Table 5.5는 환기장치의 환기량별 CO₂ 농도 측정결과를 나타낸 것이다. 환기장치의 성능을 평가하기 위해서 수업시간 중 환기장치를 가동하지 않았을 때와 가동하였을 때의 CO₂ 농도 평균값을 비교 하였다. 측정결과 환기장치를 가동하지 않은 상태에서 CO₂ 평균농도는 2,060 ppm을 보였고, 환기장치를 가동하였을 때의 CO₂ 농도 값은 큰 환기량을 가지는 환기장치일수록 낮게 나타났다.

“학교보건법 시행규칙”에서 규정하고 있는 “교사 안의 환경위생기준”에 따르면, 교실에 필요한 1인당 환기량은 21.6 CMH이며 교사를 포함한 31인 기준일 경우 최소 670 CMH정도의 환기량이 필요한 것으로 되어 있다.

Table 5.5 Results of measurement for CO₂ density to the amount of ventilation

Amount of ventilation (CMH)	The number of persons	CO ₂ Density of outdoor air (ppm)	CO ₂ Density(ppm)			
			Ventilator in non-operation	Ventilator in operation		
				Max	Average in school hours	Total average
350	30	370	2,150	1,813	1,488	1,281
500	30	368	2,055	1,491	1,307	1,165
850	30	376	1,714	1,489	975	923
1,000	30	375	2,323	1,220	816	803

그러나 이번 실험의 4가지 측정조건 중 이산화탄소에 대한 환경위생기준 1,000 ppm이하의 필요 환기량을 만족하는 경우는 850 CMH와 1,000 CMH 일 때의 환기장치이며, 이때의 수업시간 평균 CO₂ 농도는 975 ppm과 816 ppm으로 측정되었다.

Fig. 5.10은 환기량과 이산화탄소 농도와의 관계를 나타내고 있다. 여름철 교실의 공기질 1,500 ppm을 기준할 경우 환기량 350 CMH, 교실의 공기질 1,000 ppm을 기준으로 할 경우 환기량 770 CMH 정도가 필요한 것으로 분석되었다.

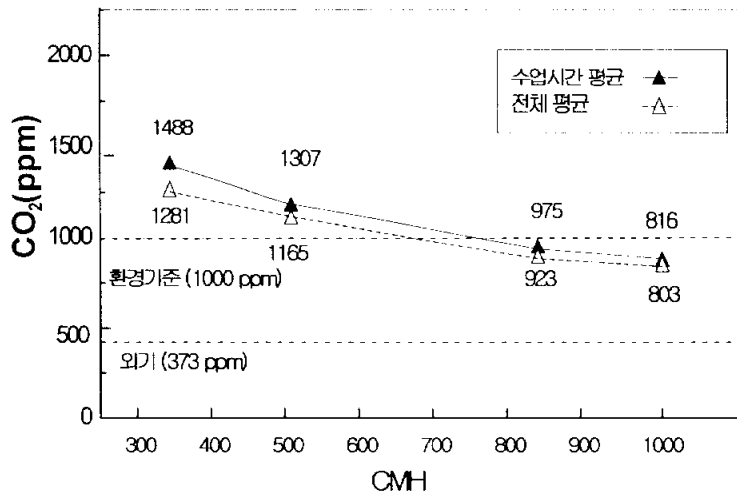


Fig. 5.10 Relations between amount of ventilation and density of CO₂

5.4 급기구 위치에 따른 환기효율 특성

단위 교실에 천장사방토출 실내기를 작동시키고, 급기구·배기구의 위치가 변화하는 경우에 실내의 온열환경과 환기특성을 살펴보기 위하여 실험대상 교실에 Fig. 5.11과 같이 천장형 히트펌프와 환기장치를 설치하였다.

천장사방토출 히트펌프는 하절기 실외를 통해 유입된 열량을 제거하여 쾌적한 온열환경을 제어하며, 급기구와 배기구는 신선한 공기의 공급과 실내의 오염된 공기를 배기시키는 역할을 한다. 환기장치의 환기량은 850 CMH이며, 교실의 환기회수는 2.14회/hr 이다. 환기특성을 살펴보기 위하여 공간의 두 지점에서 국소급기지수(local supply index)와 공기교환효율(air change effectiveness)을 측정하였다. 천장형 실내기에서 토출된 냉방기류는 환기장치에서 공급되는 신선공기와 혼합을 증대시키며 천장 부근에서의 열성층화 및 신선공기가 실내공간에 순환하지 않고 배기되는 것을 억제하므로 급기구를 천장형 실내기 근처에 배치하는 것이 교실의 온열환경과 환기특성에 유리하다.

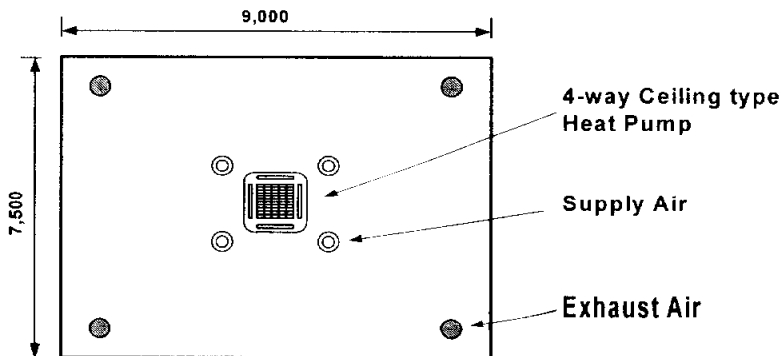


Fig. 5.11 Schematic diagram of a classroom

다음 Fig. 5.12와 같이 교실의 중앙에 천장형 실내기가 있고, 급기구가 천장형 실내기에 대하여 직교방향과 대각선방향으로 설치된 경우에 대하여 살펴보았다.

직교방향에 위치한 경우에는 천장형 실내기에서 토출된 기류와 일직선상에 놓이게 됨으로 환기장치 급기구에서 공급된 공기는 천장형 실내기의 기류와 같이 유동된다. 또한 대각선방향에 위치한 경우에는 급기구에서 공급된 신선공기가 천장형 실내기의 흡입구로 유인되어 실내공기와 혼합되고, 운동량이 큰 기류로 확산된다.

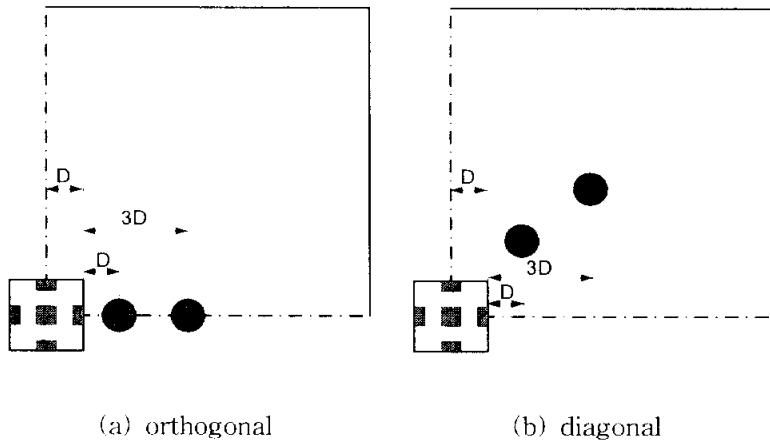


Fig. 5.12 Schematic diagram for an optimum location of a supply diffuser.

천장형 실내기와 급기구의 간격에 따른 실평균 급기효율을 Fig. 5.13에 나타내었다. 급기효율 측면에서 신선공기가 공급되는 급기구를 천장형 실내기와 직교방향으로 배치시키는 것보다는 대각선 방향으로 배치시키는 것이 효율적임을 알 수 있다. 특히 대각선 방향으로 1D 위치에서의 급기효율은 약 113%로서 완전혼합의 100%보다 크게 나타난다. 이는 급기구에서 공급된 신선공기와 실내공기가 천장형 실내기의 흡입구로 흡입되면서 자연스럽게 실내공기와 혼합된 후 실내에 확산되기 때문으로 생각된다.

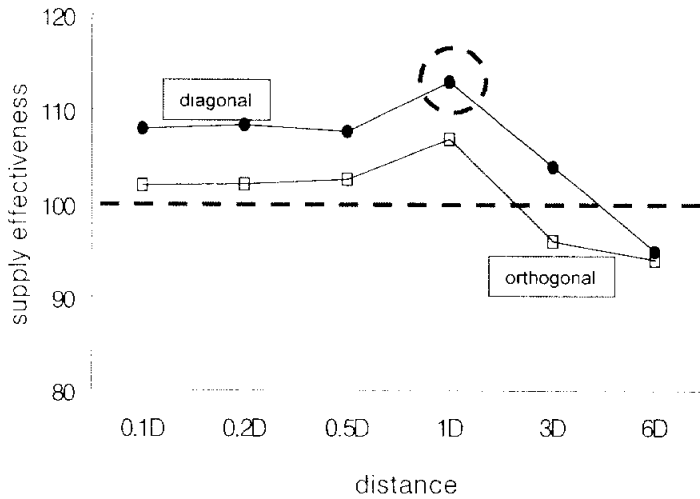


Fig. 5.13 A supply effectiveness with distance between heat pump and supply diffuser.

5.5 요약

최근 미국에서는 열악한 공기질(Poor indoor air quality)이 학생들의 집중력, 계산력, 기억력 등의 학습력에 영향을 주었던 사례를 발표하고 있으며, 미국환경보호청(EPA)에서는 “IAQ Tools for Schools Kit” (2000)를 공포하였다. 일본 문부과학성에서는 “학교환경위생기준(2002)”을 개정하여 유해물질인 Formaldehyde 및 VOCs에 대해 상세하게 기준치를 설정하고, 그 기준을 초과하는 경우의 대책도 발표하는 등, 세계 여러 나라에서는 성장기 학생들이 생활하는 학교 교실의 공기오염을 방지하기 위하여 다각적인 노력을 하고 있다.

본 장에서는 학교건물의 공기질 향상을 위하여 단위 교실에 용량이 다른 환기장치를 설치하고 이산화탄소 농도에 따른 환기성능을 실험적으로 분석하였다.

학교건물의 자연환기량 측정은 추적가스를 이용한 공기링 측정을 통해 평가되는데 본 연구에서는 CO₂가스를 사용하였으며 평가방식으로는 ASTM Standard E741-83에 의한 채강방법(Step down method)을 이용하였다. 측정에 의한 결과, 환기횟수는 시간당 0.89회로 조사되었다.

어름철 냉방시 중학교 학생 30명이 수업 중인 교실에서 이산화탄소의 최대농도가 2,207 ppm이며 평균농도는 1,700 ppm으로 측정되어 교실의 환경위생기준 1,000 ppm에 비하여 70% 정도 초과하는 것을 알 수 있다.

환기장치의 외기 도입량이 클수록 실내 공기질은 향상 되었고, 외부 공기의 이산화탄소 농도가 373 ppm 일 때, 수업 중인 교실의 이산화탄소 농도를 1000 ppm이하로 유지하기 위한 최소한의 외기도입량은 770 CMH 정도로 분석 되었으며, 교실의 환경위생기준에서 규정하고 있는 1인당 환기량 21.6 CMH에 비하여 19% 정도 초과하는 것으로 조사되었다.

환기장치의 배치위치를 효과적으로 설계하기 위해서는 급기구를 천장형 실내기 근처에 배치하는 것이 교실의 온열환경과 환기특성에 유리하며, 급기구를 천장형 실내기와 직교방향으로 배치시키는 것보다는 대각선 방향으로 배치시키는 것이 효율적임을 알 수 있다.

우리나라의 학교 환경위생기준 이산화탄소 농도기준이 미국의 학교시설기준과 동일하게 설정되었으나, 미국의 실내 CO₂ 농도 기준 1,000 ppm은 외기 CO₂ 농도가 300 ppm 정도인 경우의 실내 기준이며, 우리나라 도시지역의 외기 CO₂ 농도 측정값이 430~500 ppm인 점을 감안하면 미국과 동일한 1,000 ppm 기준을 만족시키기 어려운 값이라 볼 수 있다. 또한, 학급당 학생수를 비교해 보면 미국의 학급당 학생수가 17명 정도인데 비하여 학급당 인원이 30명 이상인 우리나라의 여건을 감안해 볼 때, CO₂ 농도 기준을 미국의 기준으로 맞추기에는 다소 무리가 따른다고 할 수 있으므로 학교여건이 유사한 일본의 환경위생기준인 1,500 ppm으로 변경하는 방안을 고려할 필요성이 있음을 알 수 있다.

제 6 장 결론

6.1 전체 결론

본 연구는 성장기 학생들이 생활하는 학교건물의 온열환경 향상을 목적으로 진행하였다. 단위 교실을 대상으로 냉난방시스템의 환경구현 능력을 평가하고, 여름철과 겨울철 온열환경요소의 측정과 세실자 설문조사에 의해 쾌적감 분석을 수행하였다. 또한, 실내공기질 개선을 위하여 이산화탄소의 농도가 환기장치의 작동상태에 따라 어떻게 변하는지를 분석하고, 환기효율 특성을 파악하여, 그에 따른 문제점을 분석함으로써 건강하고 쾌적한 온열환경을 창출할 수 있는 공조시스템 기초 자료를 마련하고자 하였다.

본 연구의 주요 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 우리나라 전체 학교 중 10학급 미만의 학교가 35%로써 소규모 학교의 비중이 상당히 높고, 모든 지역에서 냉방부하가 난방부하에 비하여 2.4배 이상 큰 것으로 나타나 학교 특성에 적합한 공조시스템 개발이 요구된다..

(2) 전체 교실의 85.4%가 난방을 하고 있으나, 그 중 76%는 석유난로 등에 의한 개별난방이며, 6.9%는 냉방 및 난방시설을 동시에 갖추고 있어 지역별, 학교별 교실의 온열환경 격차가 큰 것으로 조사되었다. 그리고 난방시설이 안된 14.6%와 개별난로를 사용하는 61.6%는 개선이 필요하며, 차후 개선시에는 건강하고 쾌적한 교육환경을 조성하기 위하여 냉난방 및 환기장치가 완비되고, 유지관리비를 감안한 에너지절약형 시스템으로 발전될 것으로

예상된다.

(3) 학교 교실의 온열환경 분석결과, 겨울철 상하 온도차가 적게 발생한 순서는 바닥 복사난방, 천장사방토출형, 바닥설치 FCU이며, 수평면 온도차는 바닥복사난방, 바닥설치 FCU가 2℃ 이내, 천장사방토출형은 5℃를 초과하였다. 여름철 상하 온도차가 적게 발생한 순서는 천장사방토출형, 바닥설치 FCU이며, 수평면 온도차는 천장사방토출형 1.5℃이내, 바닥설치 FCU는 5℃를 초과하는 것으로 나타났다.

(4) 온열환경에 대한 재실자 설문조사 결과, 전체 온냉감은 난방 및 냉방시 천장사방토출형이 양호한 것으로 나타났으며, 국부온냉감도 천장사방토출형이 양호한 것으로 조사되었다.

(5) 천장사방토출형 실내기 기류각도 수치해석 결과, 동절기 난방시 토출각도는 30°가 적절한 것으로, 하절기 냉방시 토출각도는 15°가 적절한 것으로 분석되었으며, 토출각도 60°의 경우에는 토출된 기류가 흡입구의 압력에 의해 토출직후 흡입되는 현상으로 인하여 실내기 아래 부분에서는 상당히 많은 드레프트 영역이 발생하는 것을 알 수 있었다.

(6) 추적가스법에 의한 측정결과, 학교건물 단위교실의 자연환기량은 시간당 155m³, 환기횟수는 시간당 0.89회로 조사되었으며, 여름철 냉방시 중학교 학생 30명이 수업 중인 교실에서 이산화탄소의 최대농도가 2,207 ppm, 평균농도는 1,709 ppm으로 측정되어 교실의 환경위생기준 1,000 ppm에 비하여 70% 정도 초과하는 것으로 분석되었다.

(7) 단위 교실에 환기시스템 적용결과, 환기장치의 외기 도입량이 증가함에 따라 실내공기질은 향상 되었다. 외부 공기의 이산화탄소 농도가 373 ppm 일 때, 수업 중인 교실의 이산화탄소 농도를 1000 ppm이하로 유지하기 위한 최소한의 외기도입량은 770 CMH, 1인당 외기도입량으로 환산하여 25.7 CMH로 분석 되었으며, 학교 환경위생기준에서 규정하고 있는 1인당 최소환기량 21.6 CMH에 비하여 19% 정도 초과하는 것으로 분석되었다.

(8) 온열환경을 위한 천장형 히트펌프와 공기질 개선을 위한 환기장치가 도입된 학교 교실에서 급기구와 배기구의 위치가 실내의 공기질에 미치는 영향을 살펴본 결과, 급기구를 천장형 실내기 근처에 배치하는 것이 교실의 온열환경과 환기특성에 유리하며, 급기효율 측면에서 신선공기가 공급되는 급기구를 천장형 실내기와 직교방향으로 배치시키는 것보다는 대각선 방향으로 배치시키는 것이 효율적인 것으로 분석되었다.

학교건물은 신체적, 정신적으로 성장기에 있는 어린 학생들이 장시간 생활하는 소중한 실내 공간이다. 이곳에서 생활하는 학생들은 성인들과 비교하여 일반적으로 열악한 환경에 대한 적응력이 떨어지고, 유해 오염물질에 의한 영향을 받아 쉽게 건강을 해칠 수 있다.

따라서 우리나라에서도 학교건물의 실내환경을 쾌적하게 유지하기 위한 제도의 정비와 지속적인 연구가 필요하며, 특히 실내공기질을 환경기준 이내로 유지하기 위한 환기방식에 대한 검토는 냉난방설비의 보급과 더불어 시급히 추진되어야 할 과제이다.

이와 같은 연구를 통해 문제점 및 향후 개선방안을 제시해 보면,

첫째, 학교건물 신축시 냉난방 및 환기시설을 고려하지 않음으로써 기존 건물에 설비를 추가할 경우 시공상 어려움과 많은 비용이 소요되고 있다. 따라서 설계 단계부터 냉난방 및 환기장치 등의 추가 설비를 위한 공간확보가 필요하다.

둘째, 현재 학교건물에 보급되고 있는 천장사방토출 실내기 형상으로는 하절기 냉방기류 15° 토출이 불가능 하므로 실내 공간의 쾌적영역 증대를 위하여 새로운 모델 개발이 필요하다.

셋째, 교실의 공기질 향상을 위하여 환기장치의 설치가 시급한 실정이며, 교실내의 환경위생기준에 따른 이산화탄소 농도 1000 ppm을 만족시키기에 는 어려움이 많은 실정이므로 단계적으로 실현가능한 환경위생기준 실정이 필요함을 알 수 있다.

넷째, 환기효율을 증대시키고 환기로 인해 배출되는 에너지를 회수 할 수 있는 방안과 재실자 이외의 건축자재로부터 방출되는 오염물질의 제거를 위한 환기량을 보정하여 최종 환기량을 결정하는 방법 등에 관해 지속적으로 연구가 이루어져야 하며, 특히 전체적인 환기량 확보의 개념에 있어서 계획 환기를 위한 환기경로의 설계방법에 대한 연구가 필요한 것으로 생각된다.

6.2 향후 연구과제

본 연구의 수행과정에서 나타난 향후 연구과제는 다음과 같다.

- ① 성장기 학생들의 온열환경 반응특성(온열감, 쾌적감 등) 조사
- ② 학교건물의 온열환경 개선을 위한 Passive Solar Systems 개발
- ③ 쾌적한 실내공기환경 확보를 위한 오염물질의 유동 양상과 환기성능 분석 연구
- ④ 학교건물의 공기질 개선을 위한 최적환기량 분석 및 계획환기 기법의 개발

참 고 문 헌

- [1] 한국교육개발원, “교육환경개선사업 평가연구”, 교육부 수탁연구 CR 98-11, pp. 102-121, 1998.
- [2] 교육인적자원부, “학교보건법 시행규칙”, 교육인적자원부령 제 804호, 2002. 4.
- [3] Fanger, P. O., “Thermal comfort analysis and application in environmental engineering”, McGraw Hill, NewYork, 1970.
- [4] Shiller G. E., “A comparison of measured and predicted comfort in office buildings”, ASHRAE Transactions, Vol. 96, part 1, pp. 609-622, 1990.
- [5] 김종수, 성시봉, 심민섭, 고범석, “어름칠 한국인의 온열 쾌적조건에 관한 실험적 연구” 공기조화·냉동공학회 하계 학술발표 논문집, pp. 102-106, 1992.
- [6] 박종일, “실내온열환경의 쾌적성 평가에 관한 연구”, 경희대학교 박사학위논문, 1998.
- [7] Jonse, B. W., and Ogawa Y., “Transient interaction between human and the thermal environmental”, ASHRAE Transaction, Vol. 98, Part 1, pp. 189~195, 1992.
- [8] T. Miura, K. Kimura, Y. Dominaga, A. Akutsu, and Y. Suzuki, “Experimental studies on the optimum temperature of room cooling in summer for lightly clothed men in relation to the outdoor temperature”, Journal science of labour, Vol. 39-8, Part 3, pp. 403-422, 1963.

- [9] Tanabe S., Kimura K., Hara T., "Thermal comfort requirements during the summer in Japan", ASHRAE Transactions, Vol. 93, Part 1, pp. 564~577.
- [10] Fukai K., Gotoh S., Ito H., Akui S., "Experimental study on correlation between standard new effective temperature(SET*) and japanese thermal sensation", Transactions of the Society of Heating, Air Conditioning and Sanitary Engineerings of Japan, No. 51, part 2, pp. 139~147, 1993.
- [11] C. L. Anderson, William H. Creswell, "School health practice", The C. V. Mosby Company saint louis, 1980.
- [12] Donald B. Stone, Lawrence B. Stone, James D. Brown, "Elementary school health education ecological perspectives", Brown Compant Publishers, 1983.
- [13] Marion B. Pollock, Kathleen Middseton, "School health instruction", Mosby Company, 1994
- [14] W. Edward Montz et al., "Construction problems cause numerous air quality complaints in high school addition", Indoor Air, Vol 4, pp. 968-973, 1999.
- [15] C. L. Henckel et al., "Survey of indoor air quality and pelleted complaints and building factors in Minnesota schools", Indoor Air, Vol 1, pp. 590 595, 1999.
- [16] Indoor Environments Division, U.S. Environmental Protection Agency, "Indoor Air Quality(IAQ) Tools for Schools Kit", EPA 402-K 95-001, 2000.

- [17] 유영철, “교육시설의 역사 및 개선방안 연구”, 한국교육시설학회, pp. 5~7, 2000.
- [18] 海干野 晃, “ハツシアシステムを取り入れた教室の熱環境に関する研究”
日本建築學會計面系論文報告漢 第433号, 1992
- [19] 都 根永, “教師の評價に基づいた温暖地域の小學校教室における冬季の物理環境に関する研究”日本建築學會計面系論文報告漢 第481号, 1996
- [20] Jin Ishii, “ Field survey on thermal environment in classroom”, 25th Symposium on Human-Environment System, Part 1 4, pp. 11-14. 2001.
- [21] 김석준, “교실 냉난방설비 확보를 위한 사업보고서”, 교육개혁부산시민 연대회의, pp. 21-38, 1996.
- [22] 임상훈, “학교 교실 환경설계에 관한 새로운 접근”, 한국교육시설학회, Vol. 6, NO. 4, pp. 24~32, 1999.
- [23] 교육인적자원부, “학교건물의 에너지절약형 냉난방시설 모형개발에 관한 연구”, 교육정책연구 2000-일-06, 2000.
- [24] 교육인적자원부, “학교보건 및 교내 환경위생 개선방안에 관한 연구”, 정책연구과제 2000-37, 2000.
- [25] 신은상, 김진우,, “수원지역 초·중·고등학교 교실의 실내 공기오염도에 관한 연구”, 대한위생학회지 제17권 제1호, pp. 20-27, 2002.
- [26] 대한설비공학회, “설비공학편람”, 대한설비공학회, 2001.
- [27] 한국과학기술연구원, “실내환경 쾌적성 평가방법에 관한 연구(I) (온열 및 공기질에 대해서)”, 과학기술처, 1993.
- [28] ANSI/ASHRAE Standard 55-1992, “Thermal Environment Conditions for Human Occupancy”, ASHRAE, 1992.

- [29] ISO 7730, "Moderate Thermal Environmental-Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of Conditions for Thermal Comfort", ISO, 1995.
- [30] 김신도, "실내공간 실내공기오염 특성 및 관리방안연구" 환경부, 2002.
- [31] ASHRAE Standard 62-1991, "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality", ASHRAE, 1991.
- [32] 강태욱, "실내 쾌적성 향상을 위한 환기성능 분석과 룸 에어컨의 환기 공조부하 특성에 관한 연구", 부산대학교 박사학위논문, 2002.
- [33] AIVC, "A Guide to Air Change Efficiency", Technical Note AIVC-28, Air Infiltration and Ventilation Centre, 1990.
- [34] European Prestandard, "Ventilation for Building : Design Criteria for the Indoor Environment". ENV 1752, European Committee for Standardization, 1994.
- [35] J. E. Janssen, T. J. Hill, "Ventilation for Control of Indoor Air Quality : A Case Study" Environment International, Vol. 8, pp. 487-496, 1982.
- [36] Sandberg, M. and M. Sjoberg, "The use of Moments for Assessing Air Quality in Ventilated Rooms" Building and Environment, Vol 18, pp. 181-197, 1983.
- [37] ASHRAE Standard 129-1997, "Measuring Air Change Effectiveness", ASHRAE, 1997.
- [38] HASS 102 1997, "換氣規格・同解説", 日本 空氣調和・衛生工學會, 1997
- [39] 서세영, "추적가스를 이용한 열환경챔버내의 환기효율 측정 실험", 공기조화냉동공학회 논문집 제61권, 415-420, 1997.

- [40] 한국교육개발원, “미래 학교시설 계획에 관한 연구 초·중등 학교를 중심으로”, 한국교육개발원, 1994.
- [41] 박효순, “학교건물의 냉난방시설 최적화에 관한 연구” 한국교육시설학회, Vol. 6.3, pp. 84-92, 1999.
- [42] 금종수, 성시풍, 심민섭, 고범석, 최진영, 박종한, “동계체감실험에 의한 온냉감 평가와 PMV, SET*의 적용성 검토” 공기조화·냉동공학회 하계 학술발표 논문집, pp. 170-174, 1993.
- [43] 손장열, 윤동원, 박병윤, 이정재, 이승민, “외기도입량 변화에 따른 사무소건물의 실내공기 환경특성”, 대한건축학회 학술발표논문집, 제16권1호, 1996.
- [44] 김경환, “에어컨과 환기시스템을 적용한 실내 온열 및 환기 특성”, 대한설비공학회 2003하계발표대회 논문집, 1111-1116, 2003.
- [45] 이경희·윤재욱·정재국, “사무소 건물의 실내공기환경을 고려한 자연 환기기준 설정에 관한 연구”, 대한건축학회논문집 제13권 제6호, 185-195, 1997.
- [46] 손장열·이정재·박병윤·문현준, “사무소 건물에서 외기도입량이 실내 공기환경에 미치는 영향에 관한 연구”, 대한건축학회논문집 제11권10호, 1995.
- [47] 김경환, “에어컨과 환기시스템을 적용한 실내 온열 및 환기 특성”, 대한설비공학회 2003하계발표대회 논문집, pp 1111-1116, 2003.
- [48] 조명수, “환기장치를 적용한 학교 교실의 실내공기질 개선에 관한 연구”, 부산대학교 석사학위논문, 2003.
- [49] 안철린, 신병환, 금종수, 정용현, 大西潤治, “동절기 천장형 에어컨의 취출방향에 따른 열환경 평가”, 대한설비공학회 2002하계학술발표대회 논

문집, pp. 1194-1204, 2002

- [50] 안철린, 김좌진, 신병환, 김종수, “겨울철 학교 교실의 온열환경 특성 및 쾌적성 평가 연구” 한국생활환경학회지 제10권 제4호, 2003.
- [51] 안철린, 김좌진, 김종수, 박효순, “학교건물의 공기질 개선을 위한 환기 시스템 적용에 관한 연구” 한국교육시설학회지 제11권 제2호, 2004.
- [52] K. H. Lee, Y. G. Lee et al., “Indoor Air Quality and Sick Building Syndrome in Office Buildings”, AIR '96 The International Conference of Indoor Air Quality and Climate, ISIAQ, 1996.
- [53] AHAM Standard-1986, “AHAM Standard method for measuring performance of household electric air cleaners”, AHAM, 1986.
- [54] AIVC, “Ventilation and Building Airtightness”, Air Infiltration and Ventilation Centre, UK, 1994.
- [55] Fanger, P. O., “Human requirements in future Air-Conditioned Environment”, International Journal of Refrigeration, Vol, 1.24, pp. 148-153, 2001.
- [56] A. P. Gagge, A. P. Fobelets, L. G. Berglund, “A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment”, ASHRAE Transactions, Vol. 92, part 2, pp. 709-731, 1986.
- [57] Offermann, F. J., “ASHRAE Standard 129 Standard method of measuring air change effectiveness Initial test result”, 8th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol 1, 206-211, 1999.
- [58] Int-Hout, D., “Thermal comfort calculation / a computer model”, ASHRAE Transaction, Vol. 96, Part 1, pp. 840-844, 1990.

- [59] Sandberg, M., "Ventilation efficiency as guide to design", ASHRAE Transactions Part B, Vol 89, pp 455-479, 1983.
- [60] 室内環境フォーラム, "オフィスの室内環境評価法(POEM-O)", 建設省建築研究所 Vol. 93, Part 1, pp. 564~577.