

대규모 실내경기장의 동계 온열환경 특성 실측조사 - 인체부하 미고려 조건 -

A Study on the Indoor Thermal Environment of the Large Gymnasium Space in Winter - Without Heat Loads from Occupancy -

최 동 호* 정 성 진** 석 호 태***
Choi, Dong-Ho Jeong, Seong-Jin Seok, Ho-Tae

요 약

본 연구에서는 기존 대공간의 난방시에 발생할 수 있는 분포상의 문제점을 실측실험을 통해 확인하여, 궁극적으로는 대공간의 열환경 개선과 효율적인 난방설계를 위한 기초데이터를 제시하고자 하였다. 본 연구에서는 인체부하 미고려시의 동절기 대공간의 실내온열환경 실측실험을 비난방시와 난방시로 구분하여 실시하였으며 공간내 수평 및 상하온도분포특성, 취출기류의 거동특성, 실내쾌적온열환경 특성, 환기량 평가 등 대공간의 실내열환경을 포괄적으로 검토하였다.

Abstract

The purpose of this study is to provide fundamental heating design data for the large public enclosures as gymnasium. This study executed indoor thermal environment verification of the existing gymnasium by measuring temperature distribution with and without heating the space in winter. Heating loads from human body was not considered. We examined various indoor thermal environment factors of the large enclosed space in this study which include vertical and horizontal temperature distribution, supply and return air flow feature, thermal comfort environment feature, amount of ventilation and etc.

키워드 : 대공간, 난방 시스템, 온도성층, 수직온도분포

Keywords : Large enclosures, Heating system, Thermal stratification, Vertical temperature distribution

1. 서 론

최근 여가시간 및 집회수요의 증가로 전천후 대규모 실내공간의 건립 필요성이 한층 고조되고 있다. 최근의 대공간은 단일 공간내에서 집회, 스포츠, 이벤트 행사 등 다양한 집회수요에 대응할 수 있는 다목적 형태로 건립되는 추세이며, 실내온열환경 제어 측면에서도 이용자의 쾌적성 확보와 건물에너지절감을 위한 설계기법의 개발 필요성이 제기되고 있다¹⁻⁶⁾.

대공간은 실용적, 천장높이, 사용공간, 외벽면적비에서 소규모 건축물과 차별화된 특성을 지니고 있으며, 환경조절 난이도 관점에서 일반건축물과는 차별화된 실내기후조절 수법의 적용이 요구된다. 대공간의 공간용적대비 높은 외벽면적비율과 벽체 및 지붕의 상대적으로 낮은 단열기밀성능은 외부부하 증가로 직결될 우려가 있으며, 높은 천장고와 큰 실용적은 실내 분포상의 문제를 야기하는 원인으로 인식되고 있다.

본 연구에서는 기존 대공간의 난방 시에 발생할 수 있는 분포상의 문제점을 실측실험을 통해 확인하여, 궁극적으로는 대공간의 열환경 개선과 효율적인 난방설계를 위한 기초데이터를 제시하고자 하였다. 본 연구에서는 동절기 대공간의 실내온열환경

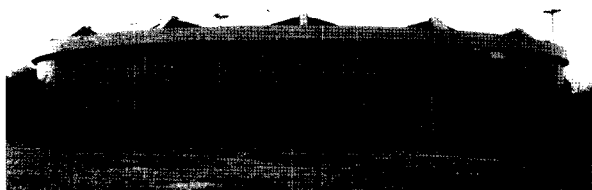
* 정회원, 대구가톨릭대학교 건축학과, 교수
** 학생회원, 대구가톨릭대학교 건축학과, 석사과정
*** 교신저자, 정회원, 영남대학교 건축학부, 부교수
Tel : 053-810-2423 Fax : 053-810-4625
E-mail : hotstone@yumail.ac.kr

실측실험을 비난방시와 난방 시로 구분하여 실시하였으며, 공간 내 수평 및 상하온도분포특성, 취출기류의 거동특성, 실내쾌적온열환경 특성, 환기량 평가 등 대공간의 실내열환경을 포괄적으로 검토하였다. 또한 대공간에서 나타나는 분포상의 문제점을 완화하기 위한 대안으로서 실내 기류유인팬 작동에 따른 실내 열환경 개선효과를 확인하기 위한 비교 실험도 함께 실시하였다. 이번 대공간의 동계 온열환경 실측조사를 통하여 수집된 정량화된 실험데이터는 대 공간 난방설계지침 마련을 위한 기초데이터로서 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 실험개요 및 설정조건

2.1 실측대상공간

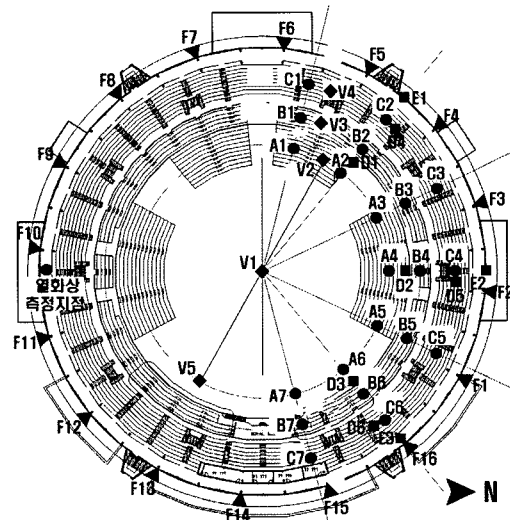
실측대상건물을 <사진 1> 건물개요를 <그림 1>, <표 1>에 나타내었다. 수도권 소재 체육공원 내에 위치한 실내체육관을 실측대상 건물로 선정하였다. 실측대상 건물은 1986년 준공된 지하1층, 지상3층(높이: 22.4m, 직경: 97m)의 철근콘크리트 구조로서 건축면적 8,658m², 연면적 16,358m² 규모이다. 1,2층 객석 5,223석, 가변형 객석 1,635석을 갖추고 있으며, 지하층은 기계실, 전기실, 1층은 경기장 아레나, 가변형 객석, 사무실, 2층은 객석, VIP실, 3층은 객석으로 배치되었다. 지붕구조는 케이블 돔 구조로서 실리콘 코팅 유리섬유로 마감되었다. 실험대상 건물의 열원설비는 경기장 존에는 공원 내 중앙공급실(Power Plant)에서 증기를, 사무실 존에는 지역난방공사에서 공급된 중온수를 지하공동구를 통해 실측대상건물내 공조기로 공급되고 있다. 공조시스템은 경기장 존에 냉난방용 1대와 환기용 1대, 사무실 존에 냉난방용 1대와 환기용 1대가 각각 설치되어 이들이 경기장 존



<사진 1> 실측대상 건물 전경

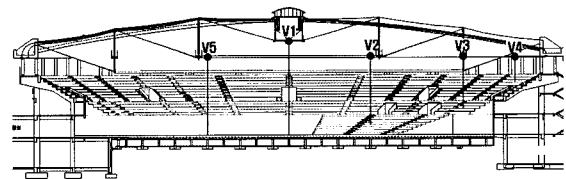
<표 1> 실측대상 건물 개요

준공년도	1986년 4월
규모	지하1층, 지상3층(높이: 22.4m, 직경: 97m)
지붕구조	케이블 돔 구조
지붕재료	실리콘코팅 유리섬유
대지면적	647,416m ²
건축면적	8,658m ²
연면적	16,358m ²



A, B, C : 수평온도(0.1m, 1.1m), 풍속 측정점
D1-D3 : 급기온도 측정점, E1-E3 : 배기온도 측정점
V1-V5 : 수직온도 측정점 F : 기류유인팬

(a) 평면도



(b) 단면도

<그림 1> 실측대상 건물

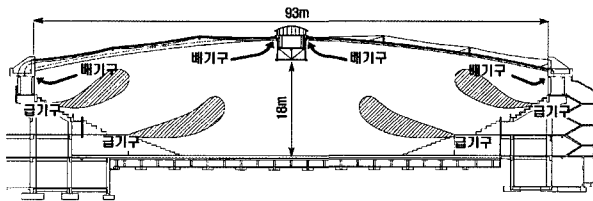
(189,000Kcal)과 사무실 존(128,700Kcal)에 정풍량 방식으로 온풍을 공급한다. 실험은 공간의 대칭성을 고려하여 전체 실내면적의 1/2을 실측대상영역으로 선정하여 실측하였다.

2.2 측정항목 및 측정방법

측정항목, 측정기기, 측정점 위치를 <표 2>에 나타내었다. 대공간의 온열환경 특성을 평가하기 위하여 외부기상, 온열환경지표(MRT, PMV), 풍속, 기류가시화, 환기량을 측정하였다. 또한 체육관 외부에는 외

<표 2> 측정항목별 측정기기와 측정위치

측정 기기	측정 항목	측정위치	
		수직	수평
SOAM-TLS Monitoring Device	온도	V1-V5(76점)	A,B,C(42점)
		1층객석	B2,B4,B6(3점)
	후구 온도	2층객석	C2,C4,C6(3점)
		급기구	D1-D6(6점)
SK-sato / KEIRYOKI	온습도	배기구	E1,E2,E3(3점)
		급기구	D1,D3(2점)
Hotwire Anemometer / 8570	풍속	배기구	E1,E3(2점)
		1층객석	B1-B7(7점)
		2층객석	C1-C7(7점)
		Thermal Comfort Meter / AM-101	PMV MRT
TESTO	환기량	아래나 중앙(1점)	
DAVIS / 세창 인스트루먼트	기상스 테이션	대상건물 인접 평지 (1점)	
THERMO TRACER / TH5104R	열화상	열화상 측정점(1점)	



<그림 2> 공조개념도(난방)

부기상 계측을 위한 풍향풍속계, 일사량계, 상대습도계 등의 기상계측 장비를 설치하여 시시각각 변화하는 외부기상 데이터를 실시간으로 파악할 수 있도록 하였다. 측정점은 계측대상영역을 7등분하여 각 영역부의 중심에 등 간격으로 측정점을 배치하였다. 본 논문에서는 경기장 내에 다수의 Thermistor 센서를 설치하여 높이별, 위치별 온도를 계측하였으며, 본 논문에서는 각 부분의 기준점, 기준 높이의 측정값 위주로 나타내었다. 모든 온도데이터는 Data logger를 통해 컴퓨터에 자동적으로 저장되도록 하였다. 또한 급기구, 배기구의 온도와 상대습도는 휴대형 디지털 온습도계(SK-L200 II α)를 해당위치에 설치하여 계측하였다.

2.3 측정조건 및 측정기간

난방설정조건을 <표 3>에 나타내었다. 인체발열

<표 3> 난방설정조건

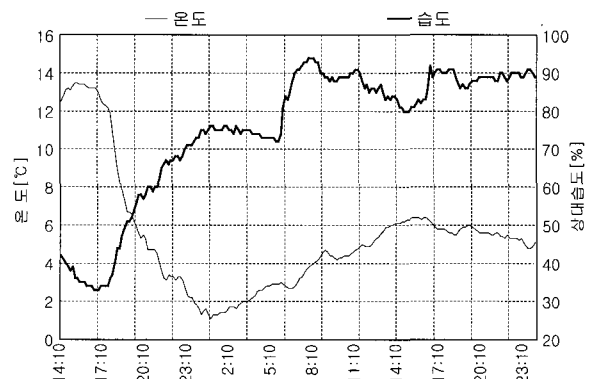
실험 Case	날짜	상세 난방설정조건		
Case1	2007 02.07	비난방		
Case2	2007 02.08	1차	09:00-11:00	난방 On
			11:00-11:50	난방 Off
		2차	11:50-13:30	난방 On
			13:30-14:00	난방 Off
		3차	14:00-15:30	난방 On
			15:30-17:15	난방 Off, 기류유인팬 On

부하 미고려시의 동계 대공간 온열환경을 평가하기 위하여 비난방시와 난방시로 구분하여 실측하였으며, 실측은 2007년 2월 7일과 8일 양일간에 걸쳐 실시되었다. 실측대상공간의 모든 출입구는 실험기간 중 항상 닫힌 상태를 유지함으로써 외기유입에 의한 영향을 최소화하였으며, 조명부하에 의한 영향을 해소하기 위하여 실측 중에는 최소한의 실내조명만을 점등하였다. 또한 1층 객석부의 중앙지점인 B4지점을 기준점으로 설정하여 기준점온도가 1차 난방에서 20°C On, 21°C Off로 설정 하였으나, 중앙공급실에서 실측대상경기장으로 공급되는 열원(증기)의 시간지연에 따른 응답성 문제로 2, 3차 난방공급시에는 실내난방 설정온도 폭을 크게 하여 21°C On, 24°C Off로 설정하여 실험을 실시하였다.

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 외부기상

측정일의 외부 온습도를 <그림 3>에 나타내었다.



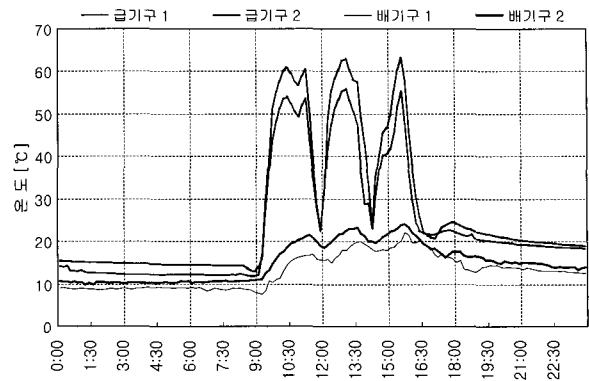
<그림 3> 외부기상조건(2007.02.07~08)

비난방 실험일인 2월 7일의 외기온도는 최고 13.5°C, 최저 1°C로서 겨울철로서는 비교적 높은 외기온도를 나타내었으며, 상대습도는 33~87%를 나타내었다. 한편 난방실험이 진행된 2월 8일의 외기온도와 상대습도는 각각 1.2~6.3°C, 70~94%를 나타내어 비난방 실험일인 2월 7일보다 상대적으로 낮은 기온을 나타내었다.

3.2 온도분포

3.2.1 급배기온도

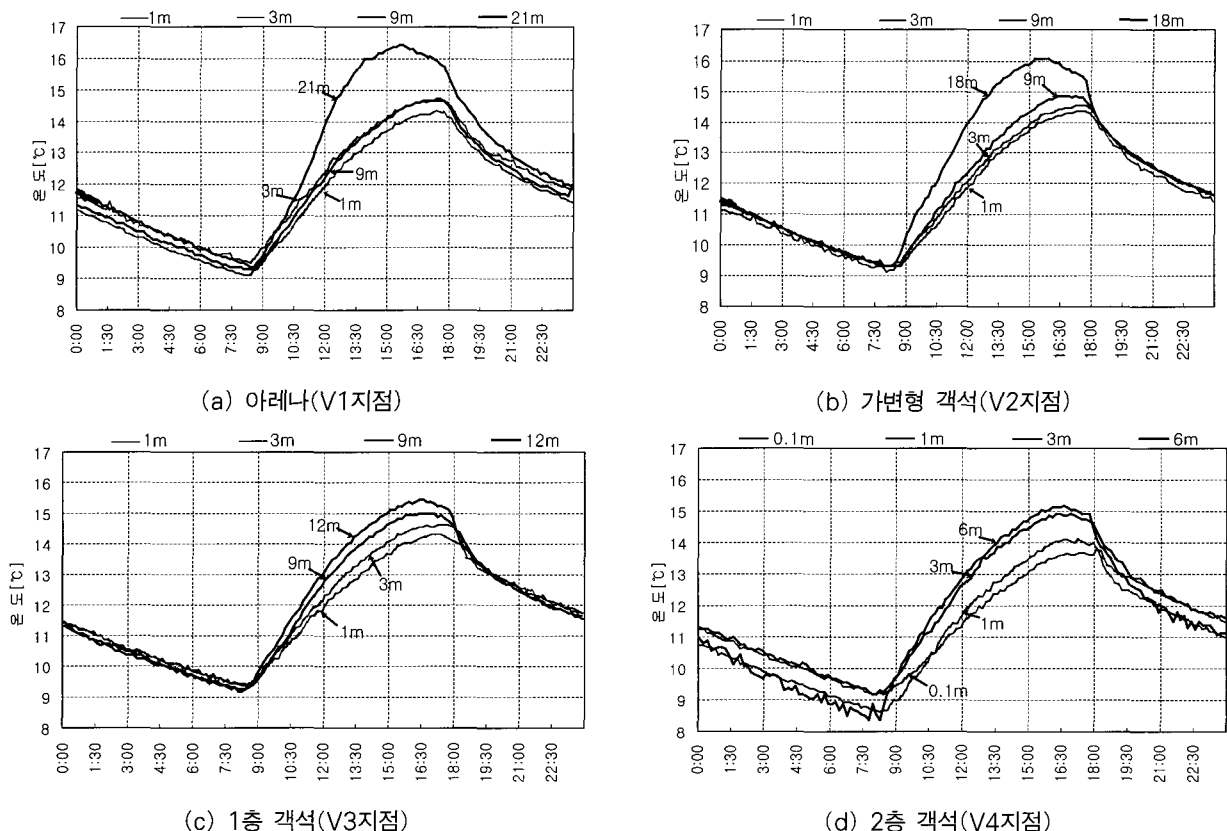
급배기온도 측정결과를 <그림 4>에 나타내었다. 실측대상건물내의 열원공급은 지역내 중앙공급실에서 생산된 증기를 지하공동구를 통해 원격지인 실측대상건물내 공조기로 공급받아 난방하므로 공조제어의 빠른 응답성은 기대하기 어려웠다. 2개소에서 측정된 급기온도는 최고 급기온도기준 7°C 전후의 온도차가 관측되었으며, 급기온도는 공조가동 중에는 50°C 이상의 급기온도를 유지하였다. 한편 배기온도는 배기구위치에 따라 5°C 전후의 온도차가 확인되었다.



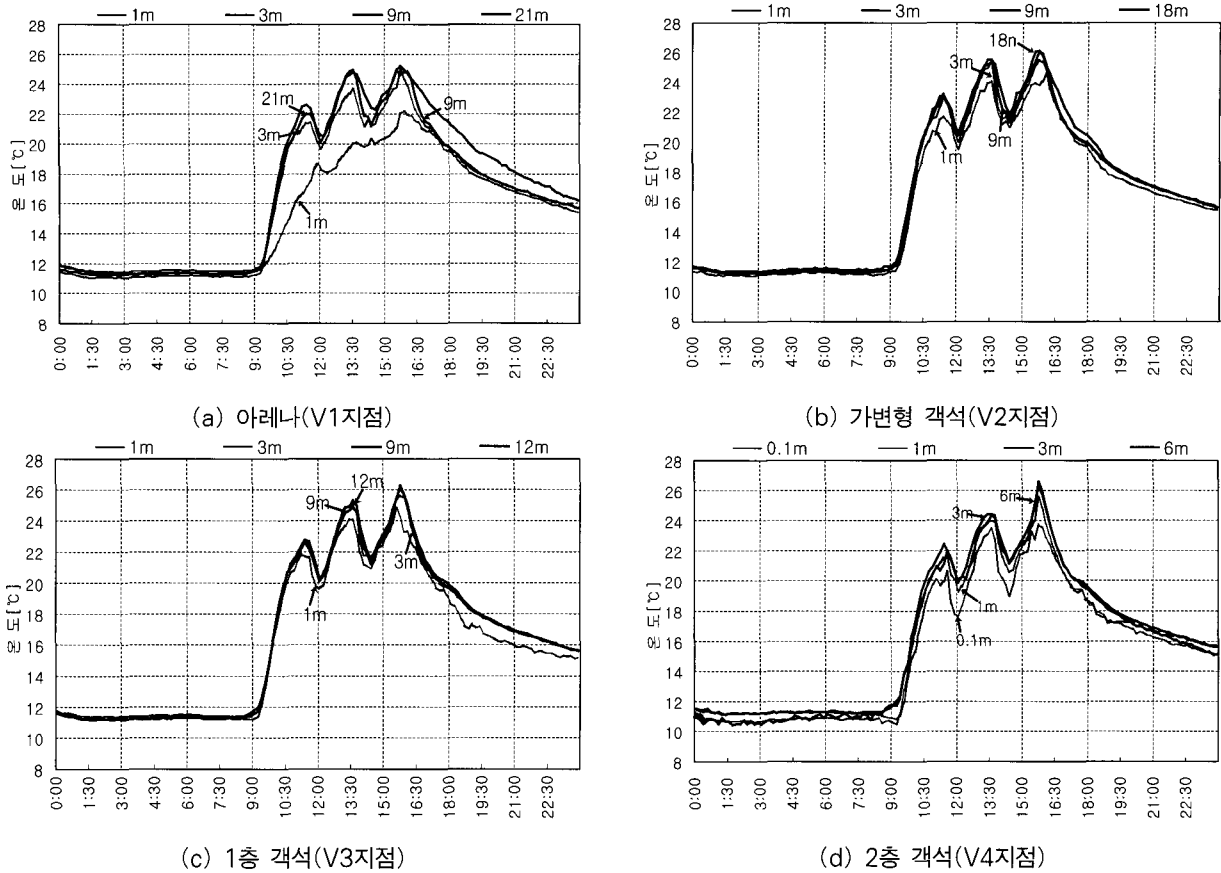
<그림 4> 급·배기온도(Case2: 난방)

3.2.2 수직온도 변화추이

높이별 수직온도 변화추이를 <그림 5, 6>에 나타내었다. 비난방시의 실내온도는 외기온도에 연동되어 일출직후에 일중 최저치를, 16시를 전후하여 일중 최고치를 나타내었다<그림 5>. 비난방시에 각 높이별 기온은 천장 조명부하의 영향을 간접적으로 받는 아래나와 가변형 객석 최상부를 제외하면 상하온도차는 아래나, 객석부 모두 1°C 전후의 작은 온



<그림 5> 높이별 온도변화추이(Case1: 비난방)



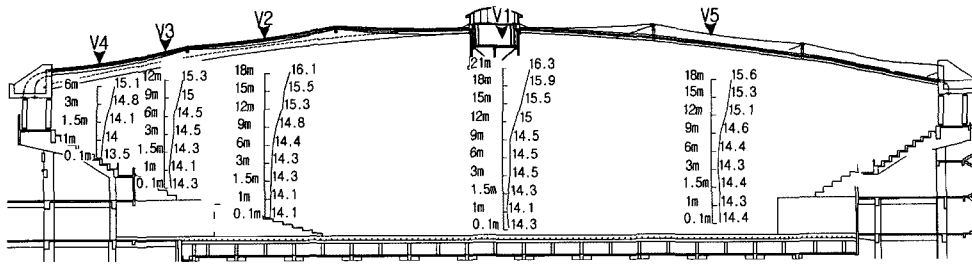
〈그림 6〉 높이별 온도변화추이(Case2: 난방)

도차만이 관측되었다. 한편 난방시의 수직온도 변화 추이는 비난방시와는 상이한 양상을 나타내어 설정된 난방운전조건에 따라 다양한 변화를 나타내었다. 난방개시전에는 모든 위치에서 높이에 관계없이 저온의 균일한 온도를 나타내었으나, 난방이 개시된 9시 이후부터 난방이 1차 공급되는 11시까지 급속한 온도상승을 관찰할 수 있었다<그림 6>. 특히 아레나에서는 부력에 편승하여 상승한 취출기류가 공간 상부에 위치함에 따라 급속한 온도상승곡선을 나타낸 반면, 상대적으로 높이가 낮은 지상 1m높이에서는 완만한 온도상승곡선과 함께 저온을 나타내었으며, 일종 온도변화폭도 공간상부보다 상대적으로 적은 것으로 나타났다<그림 6>. 아레나보다 상대적으로 높은 위치인 객석부 기온은 모든 높이에서 거의 동일한 온도를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 높이별 온도차는 난방가동시가 중지시보다 높게 형성되었다. 이렇게 실내에 형성된 온도성층은 난방종료후에도 상당시간동안 지속되고 있음을 실험결과

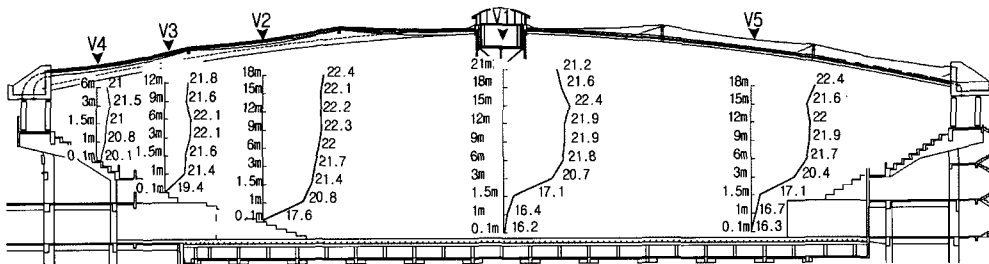
를 통해 확인할 수 있었다.

3.2.3 수직온도분포

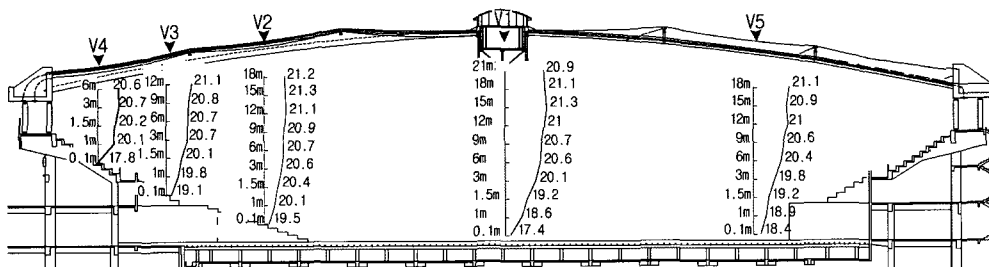
비난방시와 난방시의 수직온도분포를 <그림 7, 8>에 나타내었다. 먼저, 비난방시의 높이별 상하온도차는 측정된 5곳 모든 지점에서 최대 2°C 이하의 작은 상하온도차만을 관찰할 수 있었다. 실내조명이 설치된 아레나 및 가변형 객석 최상부에서는 조명부하의 간접적 영향으로 상대적으로 고온을 나타내었다. 비난방조건에서는 아레나 바닥상부 9m 이하의 하부공간에서는 높이별 온도변화가 거의 관찰되지 않았으나, 그 상부공간에서는 위로 향할수록 뚜렷한 온도상승 경향을 나타내었다<그림 7>. 한편, 난방실험에서는 시간대에 따라 난방조건이 각각 상이하어 온도성층의 발생정도와 형성범위에 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 난방개시후 약 2시간이 경과된 11시와 난방중지 후 난방이 재개된 13:30의 수직온도분포는 두 측정시점 모두 유사한 분포특성을 나타내었다<그림 8>



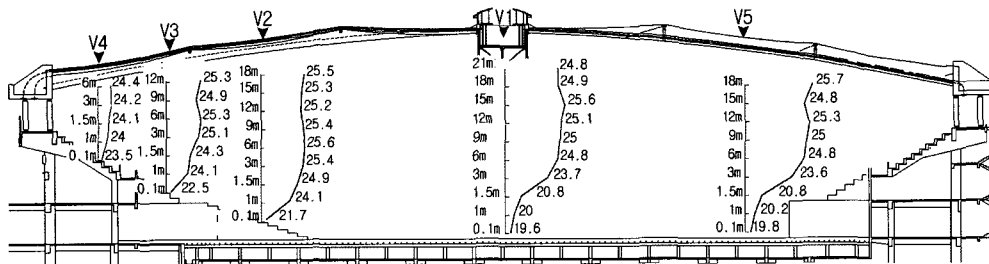
〈그림 7〉 비난방시의 수직온도분포(Case1, 측정시각 16:00)



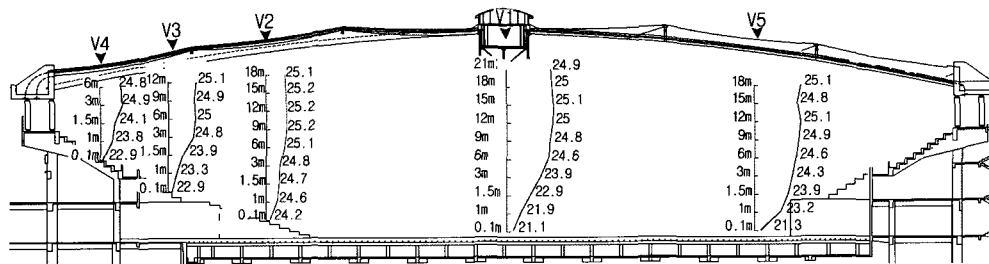
(a) 11:00 (난방 On)



(b) 11:50 (난방 Off)



(c) 13:30 (난방 On)



(d) 16:00 (난방 Off, 기류유인팬 On)

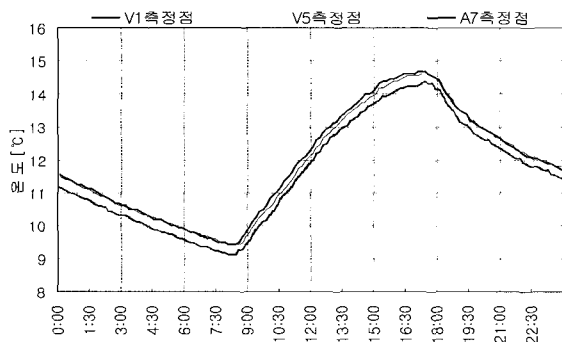
〈그림 8〉 난방시의 수직온도분포(Case2)

(a),(c)>. 아래나 중앙의 상하온도차는 각각 5.0℃, 5.2℃로서 비교적 크게 형성되었으나, 1층 객석과 2층 객석에서는 상대적으로 낮은 층고의 영향으로 상하온도차는 크게 축소된 반면, 평균기온은 높이가 높은 만큼 상대적으로 고온을 나타내었다. 난방시의 아래나 중앙의 수직온도프로파일에 의하면 바닥상부 1.5~3.0m 높이를 경계로 급격한 온도변화를 나타냄으로서 상부의 온도성층이 이 위치까지 확장하였음을 확인할 수 있었다. 난방공급을 중단한 11:50의 경우 아래나 중앙부가 3.5℃, 1,2층 객석부가 2.0~2.8℃의 상하온도차가 관측됨으로서 난방이 공급된 11:00, 13:30에 비해 전반적으로 상하온도차는 크게 줄어들었으며, 수평방향의 각 지점간의 상하온도차 형성폭도 경감되었음을 알 수 있다<그림 8 (b)>. 경기장내 공간상부에 폭넓게 형성된 온도성층을 완화하기 위한 기류유인팬 가동조건에서는 기류유인팬에 의한 선회류의 도달여부에 따라 수직온도분포에 차이가 있음을 확인할 수 있었다<그림 8(d)>. 선회류가 도달된 가변형 객석부의 경우 상하온도차는 줄어들어 0.9℃의 비교적 작은 온

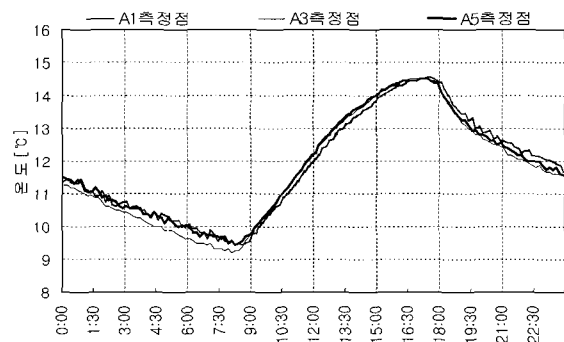
도차만이 관측되었으며, 선회류가 도달된 거주역내의 공기온도는 주변의 동일높이의 기온보다 상대적으로 고온을 유지한 것으로 파악되었다. 기류유인팬은 대공간 내부에 폭넓게 형성된 온도성층 완화에 효과적으로 작용하고 있음을 확인할 수 있었으며, 거주역의 온도는 기류유인팬으로부터의 선회류 확산성상에 영향을 받을 것으로 사료되므로 기류유인팬의 배치 및 선회류의 확산성상, 운전조건에 대한 추가적인 검토도 거주역의 온도균일화를 위해 필요할 것으로 추정된다. 이상의 수직온도분포 실험결과를 통해 난방운전조건별 경기장내 온도성층의 영향범위와 분포 특성을 파악할 수 있었다.

3.2.4 수평온도 변화추이

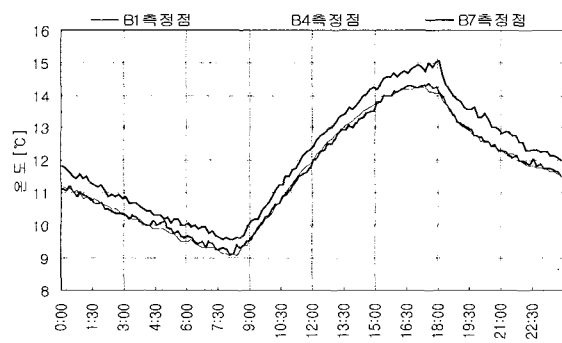
수평온도 변화추이를 <그림 9, 10>에 나타내었다. 먼저 비난방시 아래나의 1.1m높이 수평온도비교에서는 아래나 중심부가 아래나 가장자리보다 0.3℃가량 낮은 온도를 나타내었으며, 1층 객석에서는 주변 출입구를 통해 기류가 유입됨으로서 위치에 따라서



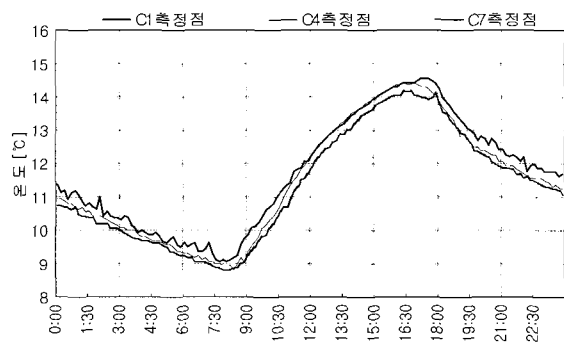
(a) 아래나 온도



(b) 가변형 객석온도

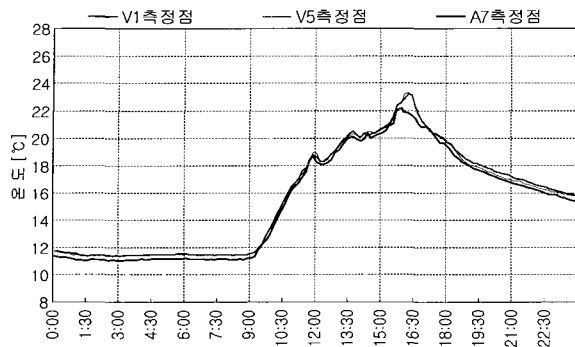


(c) 1층 객석온도

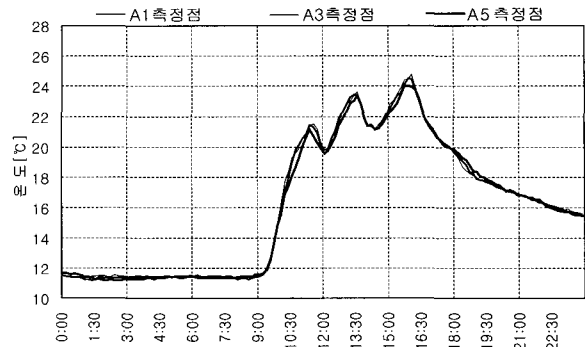


(d) 2층 객석온도

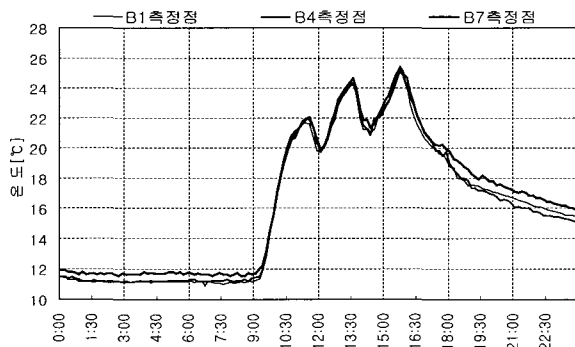
<그림9> 동일영역에서의 수평온도비교(지상1.1m, Case1: 비난방)



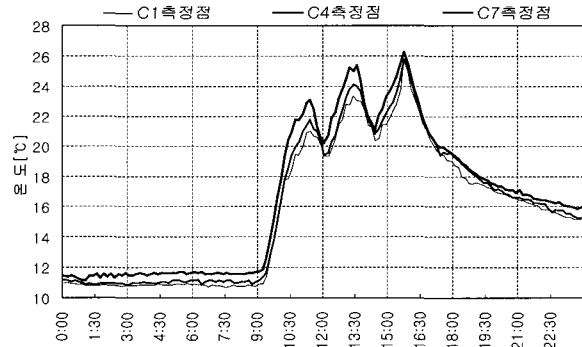
(a) 아레나 온도



(b) 가변형 객실온도

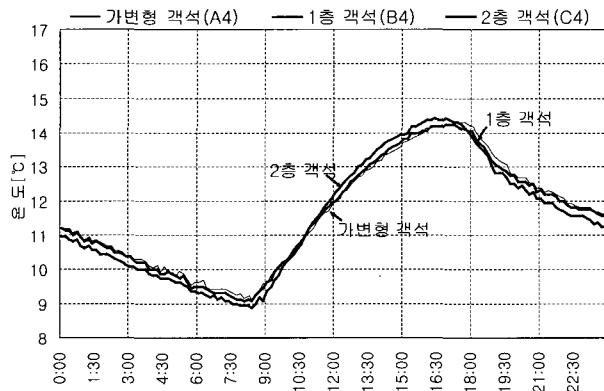


(c) 1층 객실온도

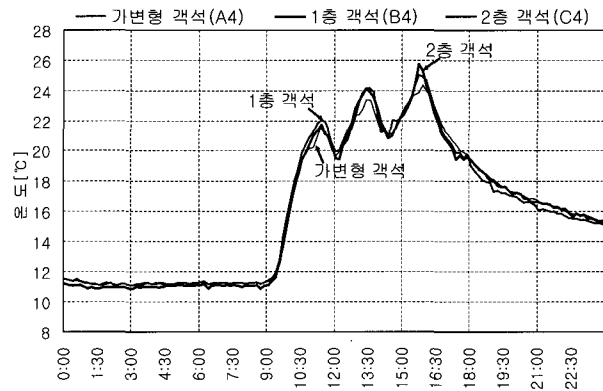


(d) 2층 객실온도

<그림 10> 동일영역에서의 수평온도비교(지상 1.1m, Case2: 난방)



(a) Case1: 비난방



(b) Case2: 난방

<그림 11> 가변형, 1층, 2층객실간 온도비교(지상1.1m)

는 최대 0.8°C 전후의 온도차를 확인할 수 있었다<그림 9>. 난방실험에서 공조기가 가동되는 주간시간 동안에는 2층 객실에서 최대 2°C의 수평온도분포가 확인된 것을 제외하고는 주목할 만한 수평온도분포는 발생하지 않은 것으로 조사되었다<그림 10>.

3.2.5 객실 온도분포

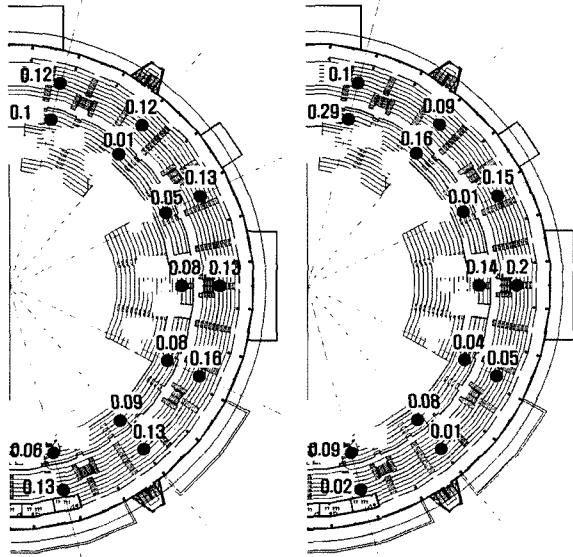
가변형 객실, 1층 객실, 2층 객실에서 측정된 객실온도

비교결과를 <그림 11>에 나타내었다. 비난방시와 난방시 모두 가변형 객실, 1, 2층 객실의 거주역 온도비교에서는 2층, 1층, 가변형 객실 순으로 온도가 높게 나타났으나, 그 차이는 극히 작은 것으로 파악되었다<그림 11>.

3.3 풍속분포

경기장 내 각 위치별 풍속측정결과를 <그림 12>에 나타내었다. 난방실험일인 2월 8일 10시와 14시의 두

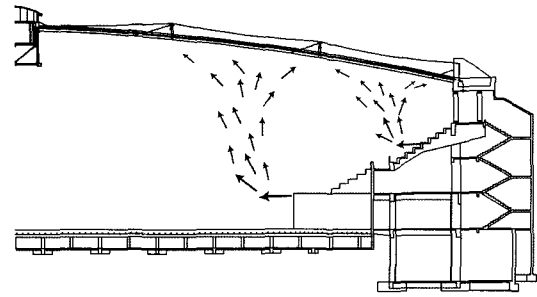
차레 측정된 1, 2층 객석 풍속분포는 두 측정시점 모두 0~0.3m/s의 저풍속만이 계측되어 급기기류에 의한 드래프트는 발생하지 않은 것으로 조사되었다.



(a) 10:00시 (b) 14:00시
 <그림 12> 풍속분포(Case2:난방) 단위:m/s

3.4 기류가시화

난방시의 기류가시화 사진 및 기류스케치를 <사진 2>, <그림 13>에 나타내었다. 난방시의 취출기류는 1층 객석 선단 급기구에서 아래나로 향해 취출된 후 급기기류의 강한 부력에 편승하여 공간상부로 빠른 속도로 상승한 후 지붕에 근접한 위치에서 주변으로 서서히 확산되는 양상을 나타내었다. 2층 객석 급기구에서는 객석바닥부근에서 저속으로 취출된 급기기류가 취출과 동시에 상승한 후 공간상부에서 확산되는 모습을 확



<그림 13> 기류가시화 스케치(Case2: 난방)

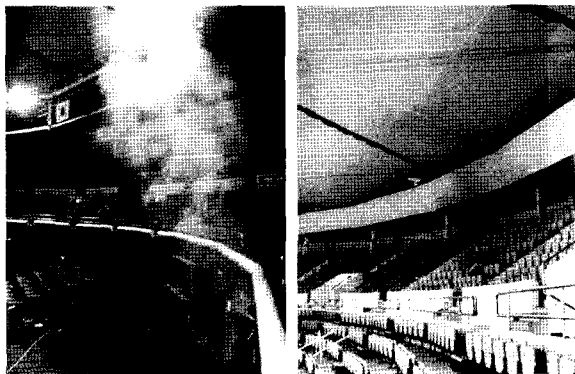
인할 수 있었다. 따라서 아래나 바닥부근으로는 취출기류는 직접적으로 도달되지 못하고 공간상부의 2차 순환류의 영향을 간접적으로 받는 것으로 추정된다.

3.5 실내온열환경평가

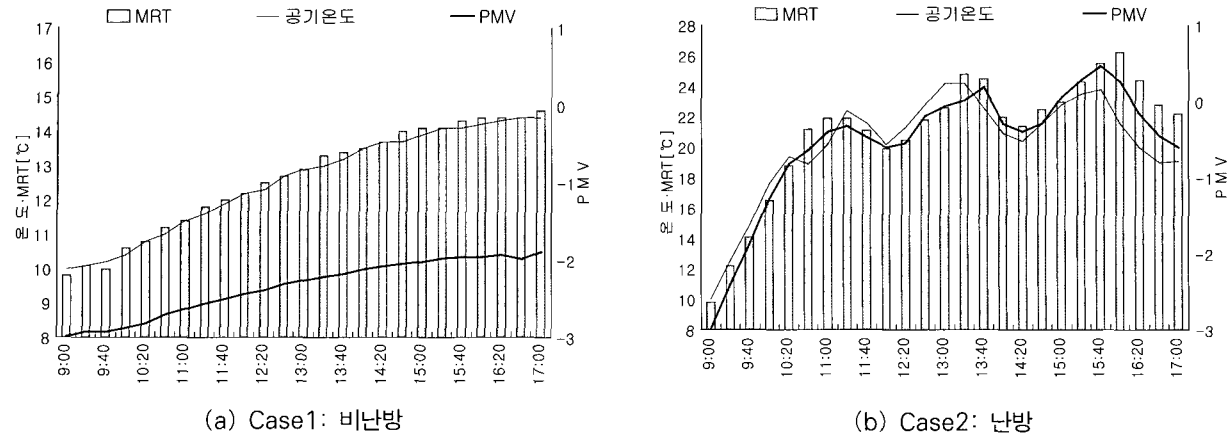
1층 객석 기준점에서 측정된 MRT, PMV 산출결과를 <그림 14>에 나타내었다. 비난방시의 MRT는 10~14℃의 값을 나타내어 실내기온과 거의 동일한 값을 나타내었으며, PMV는 -2~3사 이에서 분포함으로써 저온으로 인한 열적 불쾌적감을 나타낸 것으로 조사되었다<그림 14(a)>. 한편, 난방시 MRT는 전반적으로 실내기온과 유사한 분포를 나타내었으나, 일부시간대에서는 기온보다 최대 4℃ 정도 높은 것으로 조사되었다<그림 14(b)>. 09시의 난방개시시점의 PMV는 -2.7로서 저온으로 인한 열적 불쾌적감을 나타내었으나, 난방개시후 2시간이 경과한 오전 11시 이후에는 쾌적범위인 -0.5~+0.5 사이의 값을 나타냄으로서 열적중립상태를 유지한 것으로 조사되었다. MRT, PMV분포는 난방조건에 따라 다소 변화하는 양상을 나타내었다.

3.6 환기량 평가

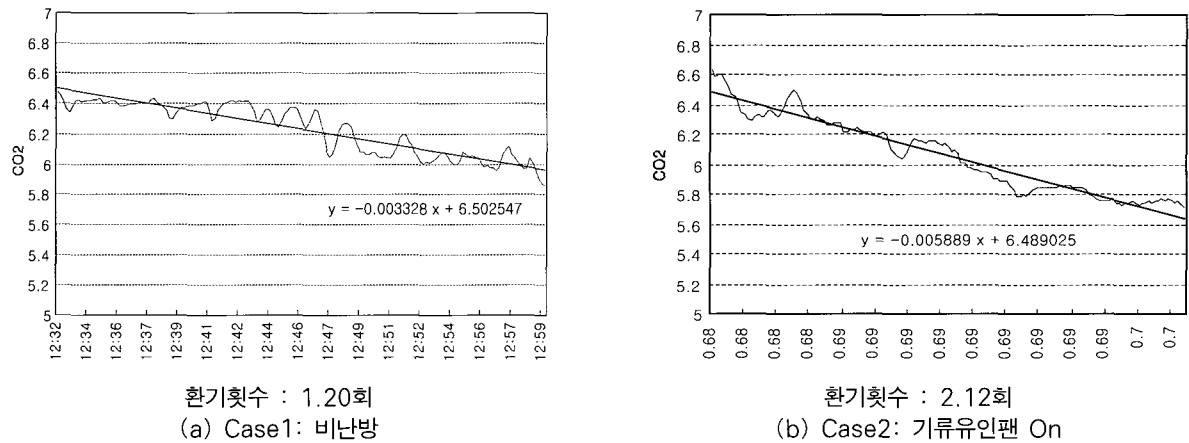
비난방시와 난방시의 환기량 산출결과를 <그림 15>에 나타내었다. 실측대상 대공간의 환기량 산출 실험은 아래나 중앙부에서 실시되었다. 비난방시와 난방시 모두 Step-down법으로 진행되었으며, 공간내 이산화탄소 농도의 감쇄속도를 실시간 모니터링하여 실측대상 공간의 침기량을 산출하였다. 비난방시의 환기회수는 1.20회, 난방시는 2.12회로 산출됨으로서 난방시의 환기회수가 비난방시보다 약 2배 정도 높게 나타났다.



(a) 가변형 객석 (b) 2층객석
 <사진 2> 기류가시화(Case2: 난방)



〈그림 14〉 기준점의 MRT, PMV 분포



〈그림 15〉 환기량 측정결과

4. 결 론

동계 대공간 실측실험을 통해 난방시와 비난방시의 상하온도분포, 취출기류의 확산거동특성, 실내온열환경과 분포상의 문제점을 파악할 수 있었다. 본 연구를 통해 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 실내 수직온도실측데이터를 분석함으로써 경기장내 온도성층 발생 정도와 영향범위를 효과적으로 파악할 수 있었다. 난방시의 상하온도차는 층고가 높은 아레나의 경우 5°C 이상의 비교적 큰 폭의 온도차가 형성되었으나, 1,2층 객석에서는 상대적으로 낮은 층고의 영향으로 상하온도차는 크게 줄어든 반면, 평균기온은 상대적으로 고온을 나타내었다.
- 2) 실내에 설치된 기류유인팬은 공간상부에 형성

된 온도성층완화에 효과적으로 작용하였으며, 선회류가 도달되는 영역에서는 상하온도차가 크게 경감하였다.

- 3) 실측대상 대공간의 수평온도분포를 분석한 결과 경미한 수준의 온도차를 제외하고는 주목할 만한 수평온도분포는 발생하지 않은 것으로 파악되었다.
- 4) 기류가시화 실험결과, 급기기류는 취출직후 강한 부력에 편승하여 공간상부로 상승함으로써 하부의 거주역 온열환경조성에는 효과적으로 작용하지 못한 것으로 파악되었다..
- 5) 1층 객석부 실내온열환경(MRT, PMV) 평가 결과, 열적중립온도에 도달하기까지는 난방개시 후 최소 2시간정도 소요되는 것으로 조사되었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#06 R&D B03)에 의해 수행되었습니다. 또한 실측실험을 수행함에 있어서 많은 협조와 도움을 주신 국민체육진흥공단 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 原広司, 高井啓明, 市橋隆, 大宮由紀夫, 石尾明久, 似鳥雅則, "札幌ドームの熱環境計画と実施", 空気調和・衛生工学, 第78卷 第10号, p.47~54, 2004. 10
2. 川瀬貴晴, 山村真司, 市橋隆, 石尾明久, "さいたまスーパーアリーナの空気調和・衛生設備", 空気調和・衛生工学, 第77卷 第10号, p.19~25, 2003.10
3. 荒川一郎, 高井啓明, 岩田英二, 小川洋充, 高橋紀之, 樋口埤明, 佐藤稔, 松田珠由樹, "福岡ドームの空気調和・衛生設備", 空気調和・衛生工学, 第69卷 第12号, p.37~52, 1995.12
4. 高井啓明, 松縄堅, 伊香賀俊治, 小野塚一宝, "東京ドームの設備計画と実施(その1), 空気膜構造維持設備", 空気調和・衛生工学, 第64卷 第1号, p.53~67, 1990.01
5. 高井啓明, 松縄堅, 伊香賀俊治, 小野塚一宝, 半澤久, "東京ドームの設備計画と実施(その2), 空調設備", 空気調和・衛生工学, 第64卷 第4号, p.59~70, 1990.04
6. 高井啓明, 伊香賀俊治, 松縄堅, 小野塚一宝, 吉田克之, 小田原健治, 山川公一郎 "東京ドームの設備計画と実施(その3), 衛生・防災関連設備", 空気調和・衛生工学, 第64卷 第5号, p.59~68, 1990.05