



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

공학석사학위논문

바닥 복사난방이 적용된 사무소
공간에서의 downdraft 평가

Downdraft Assessment of the Office with
Radiant Floor Heating

2013 년 2월

서울대학교 대학원

건축학과

박 소 정

바닥 복사난방이 적용된 사무소
공간에서의 downdraft 평가

Downdraft Assessment of the Office with
Radiant Floor Heating

지도교수 김 광 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2013년 2월

서울대학교 대학원

건축학과

박 소 정

박소정의 공학석사 학위논문을 인준함

2013년 1월

위원장	인
부위원장	인
위원	인

국문 초록

최근 바닥 복사난방의 열쾌적 측면의 이점이 부각되면서 국내 뿐 아니라 국외에서의 적용이 늘어나고 있다. 우리나라에서 복사난방은 주로 주거건물에 적용되어 왔으나 최근 오피스 건물이나 상업 건물에서의 적용이 이루어지고 있는데 이러한 건물들은 건물의 외피에서 창문이 차지하는 비율이 높아 바닥 복사난방 적용 시 외부환경에 의해 발생할 수 있는 불쾌적에 대한 고려가 필요하다. 특히 겨울철에 차가운 창문으로 인해 차가운 공기의 하강 흐름이 발생해 인체에 불쾌감을 주는 현상인 downdraft의 억제가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 downdraft의 개념을 정립하고 발생 원리를 분석하였으며 이를 고려하여 바닥 복사난방이 downdraft를 억제하는 원리에 대한 분석을 수행하였다. 이를 통해 바닥 복사난방 적용 시 참고가 될 수 있는 계획 지침을 제시하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) Downdraft의 발생 원리를 분석하여 바닥 복사난방의 downdraft 억제를 위한 원리를 도출하였다. Downdraft에 영향을 주는 창문의 인자는 창문의 수직 높이 및 열관류율 조건으로 차가운 기류의 하강 속도에 영향을 주며 바닥 복사난방 적용 시 downdraft에 억제에 영향을 미치는 인자는 바닥 복사난방의 발열면적 및 표면온도 조건으로, 자연대류의 원리를 이용해 차가운 기류에 열을 전달하여 공기의 온도를 상승시키며 따뜻한 기류로 인한 상승 흐름을 형성하여 차가운 기류가 바닥면을 타고 재실 영역으로 흘러들어오는 것을 억제한다.

(2) Downdraft 억제를 위해서는 차가운 공기에 열을 신속하게 공급해주어야 하므로 바닥 복사난방의 표면온도를 높게 적용할수록 유리하다. 바닥 복사난방의 표면온도를 높게 적용할 경우, 실내의 열쾌적을 위해 실내에 요구되는 발열량에 맞추어 발열면적을 창문 근처에 좁게 적용해야 한다. 그러나 바닥 복사난방의 표면온도가 너무 높아질 경우 차가운 기류와의 온도차가 커짐에 따라 바닥 위에서 기류의 이동 속도가 빠르게 형성되며, 차가운 공기가 하강하여 밀도가 낮아진 창문 근처의 공간으로 상승 기류의 유인이 발생함에 따라 하강 기류의 속도를 증가시킬 수 있다. 따라서 바닥 복사난방의 표면온도가 너무 높을 경우에는 오히려 downdraft가 심화될 수 있으므로 바닥 복사난방 적용 시 적정 발열 면적 및 표면온도의 확보가 필요하다.

(3) 창문의 열관류율을 낮추어 적용할 경우 창문 근처에 형성되는 차가운 공기의 온도가 높아지고, 창문을 타고 흐르는 차가운 기류의 하강 속도가 감소하게 된다. 실내의 공기 온도 분포와 기류 속도 분포가 달라짐에 따라 바닥 복사난방 적용 시 downdraft 억제를 위해 필요한 발열 면적 및 표면온도가 달라지는 것으로 나타났다. 따라서 바닥 복사난방 적용 시 창문의 열관류율 조건에 대한 고려가 필요하다.

(4) 창문의 수직 높이가 복층 높이 정도로 높은 경우에는 차가운 기류의 하강 속도가 증가함에 따라 바닥 복사난방의 적용에도 불구하고 downdraft의 억제가 어려운 것으로 나타났다. 그러나 창문의 열관류율 조건을 향상시킬 경우에는 차가운 기류의 하강 속도가 줄어들게 되며 창문 근처의 공기의 온도가 상승함에 따라 바닥 복사난방의 발열을 통해 downdraft를 억제할 수 있는 것으로 판단되었다.

주요어 : 바닥 복사난방, Downdraft, Draft rate

학 번 : 2011-20590

목 차

제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구의 범위 및 방법	2
제 2 장 Downdraft 평가를 위한 예비적 고찰	6
2.1 Downdraft의 개념	6
2.2 Downdraft 평가 방법	9
2.2.1 개요	9
2.2.2 허용 가능한 평균 기류 속도를 통한 평가	10
2.2.3 실내의 평균적인 열쾌적 평가 기준을 통한 평가	11
2.2.4 실내의 국부적인 열쾌적 평가 기준을 통한 평가	12
2.2.5 Downdraft 평가 실험 및 시뮬레이션을 통한 평가	16
2.3 바닥 복사난방 적용 시 downdraft 메커니즘	18
2.3.1 바닥 복사난방의 downdraft 억제 메커니즘	18
2.3.2 Downdraft 억제 시 고려해야 할 실내 조건의 요소	25
2.4 Downdraft 메커니즘을 고려한 바닥 복사난방의 평가인자	29
2.5 소결	30
제 3 장 Downdraft 평가 방법 및 평가 모델	32
3.1 개요	32
3.2 바닥 복사난방 평가 방법	32
3.2.1 Downdraft 평가 기준	32
3.2.2 Downdraft 평가 방법	33
3.2.3 Downdraft 평가를 위한 평가인자의 조건	36
3.2.4 Downdraft 평가 도구	37
3.3 바닥 복사난방 평가 모델	38
3.3.1 시뮬레이션 평가 모델	38

3.3.2	평가 대상 공간 경계 조건	39
3.3.3	평가인자에 따른 평가 대상 공간 조건	40
3.4	바닥 복사난방 평가 케이스	41
3.4.1	기존 연구 결과와의 비교를 통한 검증	42
3.4.2	바닥 복사난방의 영향인자에 따른 downdraft	44
3.4.3	창문의 계획인자에 따른 downdraft	45
3.5	소결	47
제 4 장	Downdraft 평가 및 바닥 복사난방 계획 지침	48
4.1	개요	48
4.2	바닥 복사난방이 downdraft에 미치는 영향	48
4.2.1	기존 연구 결과와의 비교를 통한 검증	48
4.2.2	바닥 복사난방의 영향인자에 따른 downdraft	50
4.2.3	창문의 계획인자에 따른 downdraft	58
4.3	바닥 복사난방 적용을 위한 계획 지침	79
4.3.1	바닥 복사난방의 영향인자	79
4.3.2	창문의 계획인자	79
4.4	소결	80
제 5 장	결 론	81
참고 문헌	84
ABSTRACT	86

표 목차

<표 2.1> Downdraft의 정의	8
<표 2.2> 일반적인 열쾌적을 위해 허용 가능한 열환경의 범위	12
<표 2.3> DR 범위에 따른 Class 구분(ASHRAE 55P)	14
<표 2.4> DR 범위에 따른 Class 구분(ISO 7730)	15
<표 3.1> 시뮬레이션의 물리적 조건	38
<표 3.2> 평가 대상 공간의 경계 조건	40
<표 3.3> 평가 대상 공간의 조건	41
<표 3.4> 실험 및 시뮬레이션 구현 조건	44
<표 3.5> 시뮬레이션 케이스	45
<표 3.6> 시뮬레이션 케이스	46
<표 3.7> 시뮬레이션 케이스	47
<표4.1> 바닥 복사난방의 적용에 따른 기류	52
<표4.2> 바닥 복사난방의 적용에 따른 공기 온도 분포	55
<표4.3> 바닥 복사난방의 적용에 따른 draft rate 분포	57
<표4.4> 창문의 열관류율이 낮은 조건에서의 기류	59
<표4.5> 창문의 열관류율이 낮은 조건에서의 공기 온도 분포	62
<표4.6> 창문의 열관류율이 낮은 조건에서의 draft rate 분포	64
<표4.7> 창문의 수직 높이가 높은 조건에서의 기류	65
<표4.8> 창문의 수직 높이가 높은 조건에서의 공기 온도	69
<표4.9> 창문의 수직 높이가 높으며 창문의 열관류율 조건이 향상된 조건에서의 기류	72
<표4.10> 창문의 수직 높이가 높으며 창문의 열관류율 조건이 향상된 조건에서의 공기 온도	76

그림 목차

[그림2.1] 건물의 유형에 따른 설계 기준(design criteria) 예시	10
[그림2.2] PMV의 함수로써의 PPD	12
[그림2.3] 각각의 class에 속한 환경에서 허용 가능한 최대 기류 속도 (ASHRAE 55P)	14
[그림2.4] 각각의 class에 속한 환경에서 허용 가능한 최대 기류 속도 (ISO 7730)	15
[그림2.5] 바닥면의 발열에 의한 차가운 기류 흐름 억제	19
[그림2.6] 차가운 창문 표면에 의한 기류 현상	23
[그림2.7] 바닥 복사난방 적용에 따른 기류 현상	23
[그림2.8] 바닥 복사난방을 더 ‘넓은 면적’에 더 ‘낮은 온도’로 적용 시 기류 형성	24
[그림2.9] 바닥 복사난방의 적용에 따른 기류 속도 및 공기 온도 분포	24
[그림3.1] Draft rate 수치의 절대적인 높이에 따른 downdrat 발생	35
[그림3.2] Draft rate 수치의 절대적인 너비에 따른 downdrat 발생	35
[그림3.3] Mesh 모델	39
[그림3.4] Heiselberg 실험 경계 조건	43
[그림3.5] 시뮬레이션 경계 조건	43
[그림4.1] 최대 기류 속도 분포	49
[그림4.2] Draft rate 분포	49
[그림4.3] 바닥 복사난방의 적용에 따른 기류 속도 분포	53
[그림4.4] 바닥 복사난방의 적용에 따른 공기 온도 분포	54
[그림4.5] 바닥 복사난방의 적용에 따른 draft rate 분포	56
[그림4.6] 창문의 열관류율이 낮은 조건에서의 기류 속도 분포	60
[그림4.7] 창문의 열관류율이 낮은 조건에서의 공기 온도 분포	61
[그림4.8] 창문의 열관류율이 낮은 조건에서의 draft rate 분포	63

[그림4.9] 창문의 수직 높이가 높은 조건에서의 기류 속도 분포	67
[그림4.10] 창문의 수직 높이가 높은 조건에서의 공기 온도 분포	68
[그림4.11] 창문의 수직 높이가 높은 조건에서의 draft rate 분포	71
[그림4.12] 창문의 수직 높이가 높은 공간에서 열관류율 향상된 조건의 기류 속도 분포	74
[그림4.13] 창문의 수직 높이가 높은 공간에서 열관류율 향상된 조건의 공기 온도 분포	75
[그림4.14] 창문의 수직 높이가 높은 공간에서 열관류율 향상된 조건의 draft rate 분포	78

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 사람들의 삶의 질 향상으로 인해 실내에서의 열쾌적에 대한 관심이 증대되고 있다. 따라서 건물에서 기존의 컨벡터나 에어컨과 같이 고온이나 저온의 기류를 토출하여 인해 불쾌감을 줄 수 있는 시스템을 대체하여 복사난방 시스템을 적용하는 경우가 증가하고 있다.

복사난방은 건물의 천장이나 바닥에 적용되어 주로 복사열을 이용하여 난방 하는 방식이다. 천장 복사시스템의 경우 70%의 열전달이 복사로, 30%의 열전달이 대류로 이루어지며 바닥 복사시스템은 각각 50% 대 50%로 이루어진다.¹⁾

복사열을 이용하기 때문에 대류난방 시 발생할 수 있는 불쾌한 토출 기류나 팬에 의해 발생하는 소음 문제를 해결할 수 있으며 실내 온도를 균일하게 형성할 수 있다는 장점이 있다.

인체의 열감각은 기온과 기류 및 벽체의 복사온도의 종합적인 영향을 통해 형성되는데, 이렇듯 실내 공기 환경이 인체의 생리면에 미치는 영향을 고려한 온도를 작용온도(Operative Temperature)라고 한다. 복사시스템이 적용된 공간에서는 대류시스템이 적용된 곳에 비해 실내 온도가 같은 상황에서 난방 시에는 높은 작용온도(OT)를 얻을 수 있으며 냉방 시에는 더 낮은 작용온도(OT)를 얻게 되어 일정한 실내 설정온도로 난방할 경우 열쾌적 측면에서 유리하다.

우리나라에서 복사난방은 주거건물에 주로 적용되어 왔으나 요즘에는 열쾌적 측면의 장점으로 인해 오피스 건물이나 상업 건물에서의 적용이 이루어지

1) Jan F. Kreider. "Heating and cooling of buildings". p.463.

고 있으며, 건물의 로비와 같이 층고가 높은 대공간에서 재실자 근처에 직접 난방을 하기 위해 적용하기도 한다.

그러나 바닥 복사 적용 시 부하 변동에 대한 빠른 대응이 어렵기 때문에 특히 건물에서 외피로부터의 열전달에 의해 저온이나 고온의 기류 발생 시 즉각적으로 저감하지 못하게 될 경우 이러한 기류로 인해 거주영역에서 불쾌적이 발생할 수 있다. 이러한 현상 중에 가장 문제가 되고 있는 현상으로 특히 겨울철에 발생 가능성이 높은 downdraft 현상이 있다. Downdraft는 차가운 기류가 거주 영역까지 침입하여 신체가 국부적으로 냉각됨에 따른 불쾌감을 느끼게 되는 현상이다. 오늘날 건물의 외피에서 유리의 면적이 늘어나고 있으며 커튼월 형식의 외피가 많이 적용됨에 따라 이러한 현상에 대한 대처가 중요하다. 따라서 바닥 복사난방을 적용했을 때 downdraft를 억제할 수 있도록 적용해야 한다. 이를 위해서는 우선 바닥 복사난방이 적용된 공간에서 downdraft 현상에 미치는 영향에 대한 평가가 필요하다.

본 연구의 목적은 바닥 복사난방의 downdraft 억제 원리를 분석하고 바닥 복사난방이 적용된 공간에서 downdraft의 평가를 수행하여 바닥 복사난방의 적용을 위한 계획 지침을 제시하는 것이다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구에서는 바닥 복사난방의 downdraft 억제 원리를 분석하고 바닥 복사난방이 적용된 공간에서 바닥 복사난방이 downdraft에 미치는 영향의 평가와 더불어 바닥 복사난방의 적용에 대한 계획 시 downdraft에 대한 고려를 할 수 있도록 계획 지침을 제시하고자 한다. 따라서 바닥 복사난방이 downdraft 억제 시 영향을 주는 영향인자를 도출하고 바닥 복사난방이 적용

된 공간에서 downdraft에 영향을 주는 실내 공간의 조건을 반영하여 downdraft에 대한 평가를 수행하였다. Downdraft 평가를 위해 평가 방법을 고찰하였으며 평가 방법에 의거하여 바닥 복사난방의 영향 인자에 따른 downdraft의 평가를 수행하였다. 그리고 평가 결과의 분석을 통해 바닥 복사난방 적용 시 계획 지침이 될 수 있는 결과를 제시하였다.

분석을 위해 평가 케이스를 선정하였으며 3차원 정상상태 시뮬레이션을 통해 평가를 수행하였다.

본 연구의 범위 및 방법을 연구 진행 순서에 따라 정리하면 다음과 같다.

(1) Downdraft 평가를 위한 예비적 고찰

Downdraft를 고려한 바닥 복사난방의 적용을 위한 전 단계로 먼저 downdraft 관련 문헌 및 연구의 고찰을 통해 downdraft의 정의 및 발생 원리에 대한 분석을 수행하였다. 또한 downdraft의 평가 방법을 파악하고 이를 이용하여 연구를 수행한 사례를 고찰하였다. 그리고 바닥 복사난방이 적용된 공간에서의 downdraft 평가에 대한 선행 연구 분석을 통해 바닥 복사난방이 downdraft를 억제하는 원리를 분석하였다.

(2) 바닥 복사난방 적용 시 downdraft 평가 인자 도출

바닥 복사난방 적용 시 downdraft 현상에 미치는 영향을 파악하기 위해 영향 인자를 도출하였다. 또한 바닥 복사난방이 적용되는 대상 공간의 조건에 따른 영향을 반영할 수 있도록 downdraft에 영향을 미치는 조건인 외피의 조건을 계획인자로 선정하였으며 평가 및 분석이 불필요한 요소들은 평가 대상에서 제외하였다.

(3) 바닥 복사난방 적용 시 downdraft 평가 방법 및 평가 모델 제시

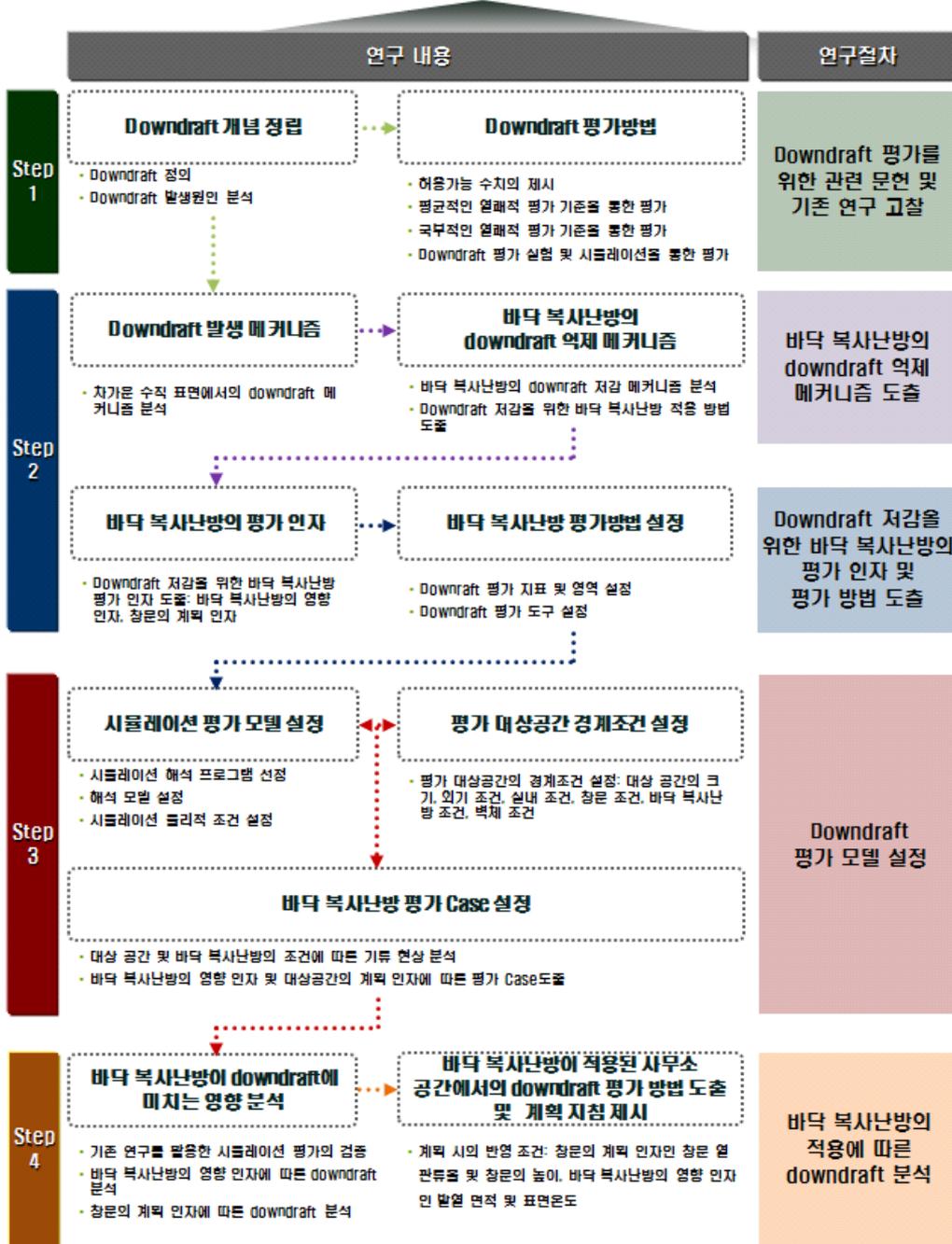
바닥 복사난방이 적용되었을 때 실내 공간에서의 기류 속도 및 온도의 평가와 더불어 바닥 복사난방의 영향인자 및 실내 공간의 계획인자에 따라 발생하는 downdraft를 분석하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. Downdraft 평가를 위한 평가 방법 및 평가 모델을 도출하고 바닥 복사난방의 영향인자 및 실내 공간의 계획인자를 고려하여 평가 케이스를 선정하였다.

(4) Downdraft를 고려한 바닥 복사난방 적용 계획 지침 제시

앞서 설정된 평가 모델을 통해 바닥 복사난방의 영향 인자 및 대상 공간의 계획 인자가 downdraft의 발생에 미치는 영향을 평가하였다. 실내 공간의 조건에 따라 downdraft를 고려하여 바닥 복사난방을 적용할 수 있도록 평가 결과를 바탕으로 계획 지침을 제시하였다.

본 연구의 범위 및 방법에 의한 연구 진행은 다음 [그림 1.1]의 연구 흐름도와 같다.

바닥 복사난방이 적용된 공간에서의 downdraft 평가



제 2 장 Downdraft 평가를 위한 예비적 고찰

Downdraft 평가를 위한 방법을 도출하기에 앞서 downdraft에 대한 개념 정립이 필요하다. Downdraft는 겨울철에 창문 근처에 발생한 차가운 공기가 하강하여 실내로 이동함에 따라 재실자가 국부적인 추위를 느끼게 하여 불쾌감을 주는 현상이다. 그러나 downdraft의 개념이 일반적으로 기류에 의한 불쾌적 현상을 의미하는 draft의 경우와 구분되지 않고 용어가 중복 되어 적용되고 있기 때문에 어느 범위의 현상까지를 downdraft라 지칭할 수 있는지를 파악할 수 있도록 downdraft의 개념에 대한 정립이 필요하였다.

본 장에서는 기존의 문헌 및 연구에서 정의하고 있는 downdraft에 대한 분석을 통해 downdraft의 개념을 정립하였으며, downdraft 평가를 위해 적절한 평가 기준을 선정하였다.

또한 downdraft 저감을 위한 바닥 복사난방의 적용 방법을 도출하기에 앞서 기존 문헌 및 연구의 고찰을 통해 실내에서 downdraft 현상에 영향을 주는 인자를 분석하고, 바닥 복사난방이 적용된 공간에서의 downdraft 억제 메커니즘을 파악하였다.

2.1 Downdraft의 개념

건물 실내의 공간은 외피를 통해 일사 및 기후 변화와 같은 외부환경의 영향을 받게 되며, 외부환경과 실내 공간 사이 온도차에 의해 외피를 통한 열전달 현상이 나타난다. 따라서 겨울철에는 실내 공기보다 온도가 낮은 외기로 인해 실내에서 외부로의 열손실이 발생하게 되며, 외피의 실내측 표면온도가 낮아져 외피에 인접한 공기가 냉각되고, 높은 밀도를 가지게 되어 하강하는 흐름을 형성하게 된다. 이러한 차가운 기류가 실내측의 재실 영역으로 이동하

여 재실자의 몸에 닿게 되면 국부적인 열손실로 인한 불쾌감을 유발하게 되는데, 이러한 불쾌적 현상은 ‘downdraft’ 또는 ‘draft’ 등으로 불리고 있다. 그러나 draft라는 용어는 디퓨저에서 토출되는 차가운 기류에 의해 느끼게 되는 불쾌적을 의미하기도 하므로 본 연구에서 분석하고자 하는 주제인 ‘downdraft’로 불릴 수 있는 현상에 대한 명확한 경계가 필요하다.

따라서 downdraft를 평가 방법의 도출에 앞서 downdraft라 정의내릴 수 있는 현상의 개념을 정립하고자 하였으며, ‘draft’로 지칭되는 현상과의 관계를 제시하고자 하였다. 기존의 문헌이나 연구에서 정의하고 있는 downdraft와 draft의 의미를 조사하였으며, 지칭하고 있는 용어와 실제로 의미하는 개념에 대해 조사한 결과 다음 <표 2.1>과 같이 정리할 수 있었다.

Downdraft에 대해 다루고 있는 관련 문헌 및 기존 연구에서 downdraft를 지칭하는 용어로는 ‘downdraft’, ‘draft’, ‘cold draft’, ‘downdraught’, ‘down draught’ 등으로 다양한 용어가 사용되는 것을 알 수 있었다. 이러한 용어들을 통해 공통적으로 제시하고 있는 정의를 분석해보면 downdraft는 ‘차가운 창문 표면(cold surfaces, glazed surfaces in winter)’에 의해 발생한 ‘차가운 공기(cold stream of air)’의 ‘자연대류 하강 흐름(cold natural convective flows, cold air draining off the window surface)’에 의해 발생하는 것으로 개념을 정립할 수 있었다. 이와 반면에 draft를 지칭하는 용어로는 ‘draught’, ‘draft’, ‘cold draft’ 등이 있음을 알 수 있었으며 이러한 용어들을 통해 제시하고 있는 정의를 분석해보면 draft는 ‘공기의 유동(air movement)’과 ‘공기의 온도(air temperature)’로 인해 ‘원치 않은 몸의 국부적인 냉각 또는 따뜻함(Unwanted local cooling of the body, An unwanted local cooling of the human body, localized feeling of coolness or warmth of any portion of the body)’이 발생하는 것을 의미하였다.

<표 2.1> Downdraft의 정의

출처 \ 항목	정 의	용 어	실제 개념
ISO 7730 ²⁾	unwanted local cooling of the body caused by air movement	Draught	Draft
ASHRAE Standard 55P ³⁾	unwanted local cooling of the body caused by air movement	Draft	Draft
P. O. Fanger ⁴⁾ (1988)	An unwanted local cooling of the human body caused by air movement	Draught	Draft
Koestel and Tuve ⁵⁾ (1955), Reinmann et al. ⁶⁾ (1959)	Any localized feeling of coolness or warmth of any portion of the body caused by both air movement and air temperature, with humidity and radiation considered constant	Draft	Draft
Heiselberg ⁷⁾ (1994)	the problem caused by the cold natural convective flows from cold surfaces	Draught, Downdraught	Downdraft
Heiselberge ⁸⁾ (1995)	the problem caused by cold natural convective flows along the glazed surfaces in winter	Downdraft	Downdraft
Peter Lyons ⁹⁾ (2000)	discomfort risk resulting from cold air draining off the window surface	Downdraft	Downdraft
U Larsson ¹⁰⁾ (2002)	The cold stream of air created by the temperature between the room air and the surface of the window	Downdraught	Downdraft
Mirosław Zukowski ¹¹⁾ (2007)	During the winter period the natural convection flow along a cold window surface can be the cause of thermal discomfort	Draught	Downdraft

2) ISO 7730: 2005(E), p. 2.

3) ASHRAE Standard 55P, p. 16.

4) P. O. Fanger. "Air turbulence and sensation of draught". Energy and Buildings, vol. 12, 1988, pp. 21-39.

5) Koestel, A. "Paths of horizontally projected heated and chilled air jets". ASHRAE Transactions 61:213, 1955.

6) Reinmann et al. "Evaluation of three room air distribution systems for summer cooling". ASHRAE Transactions 65:717, 1959

7) Per Heiselberg. "Draught risk from cold vertical surfaces". Building and Environment, vol. 29, no. 3, 1994, pp. 297-301.

8) Per Heiselberg. "Energy-Efficient Measures to Avoid Downdraft from Large Glazed Facades", 1995, ASHRAE Transactions, vol. 101, part 2, pp. 1127-1135.

Downdraft와 draft의 용어 및 정의에 대해 분석한 결과 downdraft는 ‘인체의 국부적인 냉각’에 따른 불쾌적 현상 중 ‘차가운 창문 표면’에 의해 발생한 ‘차가운 공기’의 ‘자연 대류 하강 흐름’에 의한 것을 의미하며, draft는 인체의 국부적인 냉각 및 따뜻함에 따른 불쾌적 현상 전체를 의미한다. 즉 draft는 ‘디퓨저에서 토출되는 강제적인 기류의 흐름’과 더불어 ‘자연 대류의 하강 흐름’ 등의 다양한 원인에 따라 국부적인 냉각 또는 따뜻함을 느끼게 되는 불쾌적 현상을 모두 포함한 개념을 의미하며, downdraft는 draft에 포함되는 개념이라 볼 수 있다.

2.2 Downdraft 평가 방법

2.2.1 개요

본 장에서는 downdraft를 평가하기 위한 방법 설정을 위해 기존 연구 및 문헌에서 downdraft를 평가하는 방법에 대해 분석하였다. 분석 결과 downdraft로 인한 불쾌적을 평가하는 방법에는 여러 가지가 있었으며, downdraft는 정성적(定性的)인 인체의 느낌에 관한 문제이기 때문에 기준의 엄격성이 ‘일반적인 경우’와 ‘좀 더 엄격하게 적용되는 경우’, ‘좀 더 완화되어 적용되는 경우’의 3가지 단계로 나뉘어 적용되고 있었다. 다. 첫 번째 평가 방법으로는 건물의 용도에 따라 작용 온도가 어느 특정 범위 내로 유지되는 상황에서 허용 가능한 기류속도의 수치를 앞서 언급한 3가지 단계에 따라 적용하여 평가하는 방법이 있었으며, 실내의 전반적인 쾌적을 평가하기 위한 지표

9) Peter Lyons, "Window Performance for Human Thermal Comfort", vol. 106, no. 1, 2000, pp.594-602

10) U Larsson et al. "Experimental investigation of downdraught from well-insulated windows". Building and Environment, vol. 37, issue. 11, 2002, pp.1073-1082.

11) Miroslaw Zukowski, "A new formula for determining a minimum recommended value of inlet air velocity from UFAD system to prevent occupants from draught risk", vol. 42, issue. 1, 2007, pp. 171-179.

를 적용하는 방법, 그리고 draft로 인한 국부적인 불쾌적을 평가하기 위한 지표를 적용하는 방법이 있었다. 이러한 평가 방법들을 고찰하여 downdraft로 인한 불쾌적을 평가하기에 적절한 기준을 선정하였다.

2.2.2 허용 가능한 평균 기류 속도를 통한 평가

Downdraft로 인한 불쾌적을 평가하기 위한 방법으로 실내의 작용 온도가 일반적인 범위 내에 존재할 때 허용 가능한 평균 기류 속도를 통한 평가 방법을 적용할 수 있다.

[그림2.1] 건물의 유형에 따른 설계 기준(design criteria) 예시

Type of building/space	Activity W/m ²	Category	Operative temperature °C		Maximum mean air velocity ^a m/s	
			Summer (cooling season)	Winter (heating season)	Summer (cooling season)	Winter (heating season)
Single office Landscape office	70	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,12	0,10
Conference room Auditorium		B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,19	0,16
Cafeteria/restaurant Classroom		C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,24	0,21 ^b
Kindergarten	81	A	23,5 ± 1,0	20,0 ± 1,0	0,11	0,10 ^b
		B	23,5 ± 2,0	22,0 ± 2,5	0,18	0,15 ^b
		C	23,5 ± 2,5	22,0 ± 3,5	0,23	0,19 ^b
Department store	93	A	23,0 ± 1,0	19,0 ± 1,5	0,16	0,13 ^b
		B	23,0 ± 2,0	19,0 ± 3,0	0,20	0,15 ^b
		C	23,0 ± 3,0	19,0 ± 4,0	0,23	0,18 ^b

^a The maximum mean air velocity is based on a turbulence intensity of 40 % and air temperature equal to the operative temperature according to 6.2 and Figure A.2. A relative humidity of 60 % and 40 % is used for summer and winter, respectively. For both summer and winter a lower temperature in the range is used to determine the maximum mean air velocity.

^b Below 20 °C limit (see Figure A.2).

여기서,

Category A	: PPD(%) <6, -0.2 < PMV < 0.2
Category B	: PPD(%) <10, -0.5 < PMV < 0.5
Category C	: PPD(%) <15, -0.7 < PMV < 0.7

ISO 7730은 다음 [그림2.1]¹²⁾과 같이 건물의 유형에 따라 특정 작용 온도 범위 내에서 허용 가능한 최대 평균 기류 속도의 기준을 여름철과 겨울철로 나누어 등급(Category A, B, C)에 따라 제시하고 있다.

이때 작용온도(operative temperature) 기준은 일반적인 수준의 활동량에서 여름철(냉방 기간)에는 착의량 0.5clo, 겨울철(난방 기간)에는 착의량 1.0clo를 기반으로 하고 있다. 평균 기류 속도의 기준에서 난류강도는 혼합 환기(mixing ventilation)일 때인 40%가 적용되었다.

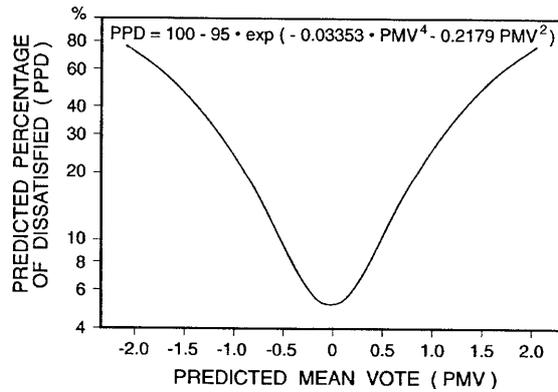
2.2.3 실내의 평균적인 열쾌적 평가 기준을 통한 평가

Downdraft를 평가하기 위한 방법으로 실내에서의 평균적인 열쾌적을 평가하는 지표인 PPD(predicted percentage of dissatisfied)를 통해 분석하는 방법이 있다.

PPD는 큰 그룹의 사람들 중 몸 전체에서 매우 춥거나 더운 느낌을 느껴 열적으로 불쾌적을 느낄 수 있는 사람의 비율을 예측하는 지표¹³⁾이며 다음 [그림2.2]와 같이 PMV(predicted mean vote)의 함수로 쓰일 수 있다. PPD와 PMV 상에서 쾌적 범위는 <표 2.2>와 같이 3단계로 나뉠 수 있다. 이때 PPD에 대사율(metabolic rate)은 1.0~2.0 met, 착의량(clothing insulation)은 1.5 clo 이하, 기류 속도(air speed)는 0.2m/s 이하의 값이 적용된다.

12) EN ISO7730,

13) ASHRAE standard 55, 2010



[그림2.2] PMV의 함수로써의 PPD

<표 2.2> 일반적인 열쾌적을 위해 허용 가능한 열환경의 범위

Comfort Class	PPD	PMV Range
A	< 6	-0.2 < PMV < +0.2
B	< 10	-0.5 < PMV < +0.5
C	< 15	-0.7 < PMV < +0.7

2.2.4 실내의 국부적인 열쾌적 평가 기준을 통한 평가

Downdraft를 평가하기 위해 ‘공기의 유동’과 ‘공기의 온도’에 따른 국부적인 냉각으로 인한 불쾌적 현상인 draft를 평가하기 위한 방법을 적용할 수 있다. 대표적인 평가 방법으로 Draft rate(DR)를 활용하여 평가하는 방법이 있다.

Draft rate는 draft로 인한 국부적인 불쾌감을 평가하는 열쾌적 지표로 ASHRAE Standard 55P 및 ISO7730에서 제시하고 있다. Draft 감각은 기류 속도(air velocity), 공기 온도(air temperature), 난류강도(turbulence intensity), 활동량(대사율, metabolic rate), 착의량(clothing insulation)에

의해 영향을 받는다.¹⁴⁾

실내에서의 평균적인 열쾌적을 평가하는 지표인 PPD와의 차이점은 난류강도를 고려한다는 점인데 난류강도(Tu)란 평균 기류 속도(v)와 기류 속도의 표준 편차(SD_v)의 비율을 의미하는 것으로 다음과 같은 식 (2.1)과 같이 나타내어진다.¹⁵⁾

$$Tu = (SD_v/v_a) \cdot 100 \quad (2.1)$$

여기서,

Tu : 난류강도 [%]
 v : 평균 기류 속도 [m/s]
 SD_v : 기류 속도의 표준 편차

P. O. Fanger의 연구¹⁶⁾에 따르면 동일한 공기 온도 및 평균 기류 속도인 환경에서 난류강도가 낮은 경우보다 높은 경우에 downdraft를 더 심하게 느낄 수 있다는 연구 결과가 있다.

Draft로 인한 불쾌감을 평가할 때 대사율(metabolic rate)은 1.0 - 1.3 met 이고, 착의량(clothing insulation)은 0.5 - 0.7 clo (lightly clothed person) 사이의 조건이 적용된다.

Draft에 대한 민감성은 피부가 옷으로 덮이지 않은 상태일 때 가장 크며, 이러한 부위로는 신체의 머리 부분에 해당하는 머리, 목, 어깨와 다리 부분에 포함되는 발목, 발, 다리 부위 등이 있다.

14) ASHRAE 55P, pp. 16-17.

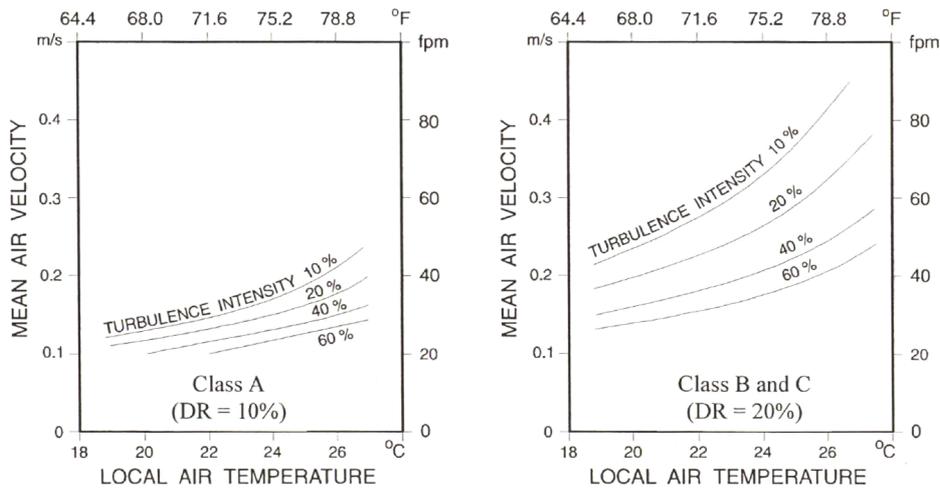
15) Ibid. pp. 6.

16) P. O. Fanger. "Air turbulence and sensation of draught". Energy and Buildings, vol. 12, 1988, pp. 21-39.

ASHRAE Standard 55P에서는 다음 <표 2.3>과 같이 Draft rate를 Class A, B, C로 나누어 제시하고 있으며 각각의 Class에 따라 draft로 인한 불쾌적 을 느끼는 사람의 허용 가능한 최대 비율을 제시하고 있다. 각각의 Class에 속한 열환경에서 공기 온도와 난류 강도의 함수로써 허용 가능한 최대 기류 속도를 다음의 [그림2.3]과 같이 차트로 제시하고 있으며 이때 Class B와 C 에는 Draft rate 20% 기준이 동일하게 적용된다. ISO 7730에서도 이와 비슷 하게 Draft rate를 다음 <표 2.4>와 같이 Category A, B, C로 나누어 적용하 고 있으며 이때 Category C는 [그림2.4]와 같이 Draft rate 30% 기준을 적용한다는 점에서 ASHRAE의 기준과 차이가 있다.

<표 2.3> DR 범위에 따른 Class 구분(ASHRAE 55P)

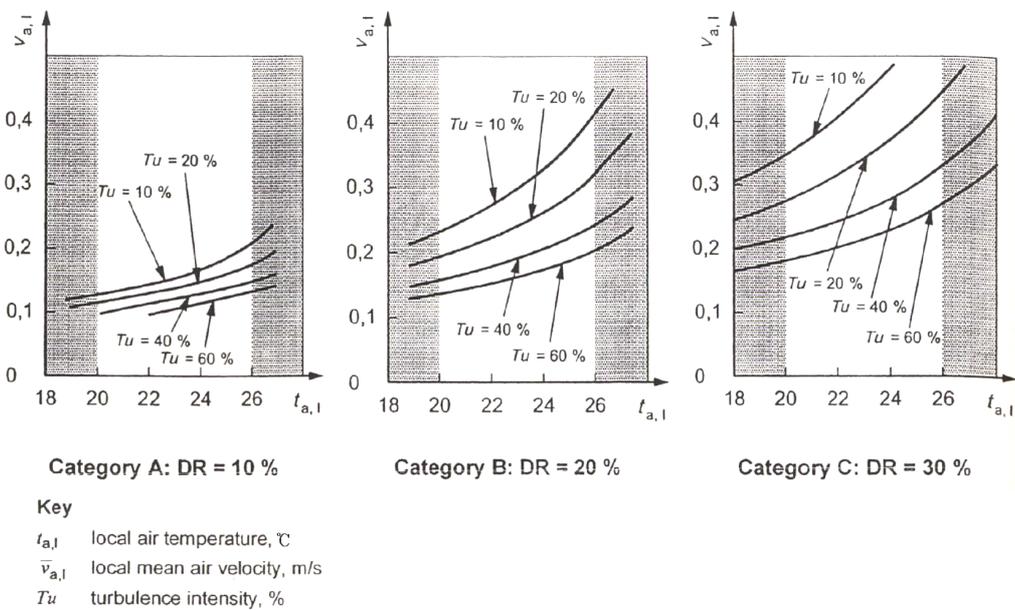
Class	DR due t o draft	비 고
A	< 10	일반적인 적용 기준에 비해 엄격한 기준
B	< 20	일반적인 적용 기준
C	< 20	일반적인 적용 기준에 비해 관대한 기준



[그림2.3] 각각의 class에 속한 환경에서 허용 가능한 최대 기류 속도(ASHRAE 55P)

<표 2.4> DR 범위에 따른 Class 구분(ISO 7730)

Category	Thermal state of the body as a whole		Local discomfort
	PPD %	PMV	DR %
A	< 6	-0.2 < PMV < 0.2	< 10
B	< 10	-0.5 < PMV < 0.5	< 20
C	< 15	-0.7 < PMV < 0.7	< 30



[그림2.4] 각각의 class에 속한 환경에서 허용 가능한 최대 기류 속도(ISO 7730)

Draft rate는 다음과 같은 식 (2.2)로 계산할 수 있으며 이 때 사람은 온 몸의 열감각이 중립에 가까우며 주로 앉은 상태의 가벼운 활동량 상태이다. 거주 범위(occupied zone)의 많은 부분에서 평균적인 난류강도는 혼합 환기(mixing ventilation) 시 35% 정도이며 치환환기(displacement ventilation)

가 적용된 경우나 기계적인 환기가 적용되지 않은 경우(without mechanical ventilation)에는 20%정도이다. 이 값은 난류강도가 측정되지 않은 경우 다음 식 (2.2)에 적용될 수 있다.

$$DR = (34 - t_{a,l})(\bar{v}_{a,l} - 0.05)^{0.62} (0.37 \cdot \bar{v}_{a,l} \cdot Tu + 3.14) \quad (2.2)$$

여기서,

- DR : Predicted percentage of people dissatisfied due to draft [%]
- $t_{a,l}$: Local air temperature [°C]
- $\bar{v}_{a,l}$: Local mean air velocity [m/s]
- Tu : Local turbulence intensity [%] (if unknown, 40% may be used)

여기서, $\bar{v}_{a,l} < 0.05\text{m/s}$ 일 경우 $\bar{v}_{a,l} = 0.05\text{m/s}$ 적용

여기서, $DR > 100\%$ 일 경우 $DR = 100\%$ 적용

2.2.5 Downdraft 평가 실험 및 시뮬레이션을 통한 평가

Downdraft를 평가하기 위해 실험 또는 시뮬레이션을 수행하여 차가운 창문 표면에 의해 발생한 차가운 공기의 하강 흐름에 따라 기류 속도 및 온도 분포를 평가하는 방법이 있다.

Heiselberg의 연구에서는 창문을 사이에 두고 양편에 실외 공간과 실내 공간이 구현된 단열 공간에서의 실험을 통해 창문의 표면온도에 따라 형성되는 하강 기류의 최대 기류 속도 분포를 분석하여 downdraft 발생 정도를 평가하였다. 또한 이를 위한 기초 연구로 기류의 흐름을 가시화하여 차가운 기류의 경계층 흐름을 파악하였다.

U Larsson의 연구에서는 한쪽 벽의 윗 편에 창문이 적용된 실험공간에서 적용된 창문의 단열성, 창턱의 넓이 등에 따라 형성되는 하강 기류의 흐름을 분석하였다. Downdraft의 발생을 평가하기 위한 방법으로 먼저 기류 속도 분포 측면의 분석을 위해 창문으로부터 최대 기류 속도가 나타나는 지점까지의 거리와 최대 기류 속도의 절반 수준의 속도가 분포하는 지점까지의 거리의 그래프를 제시하였으며, 온도 분포 측면의 분석을 위해 실내의 온도와 창문 표면온도의 편차 대비 그 지점에서의 온도와 창문 표면온도의 편차의 비율을 나타낸 그래프를 제시하였다.¹⁷⁾

Hua Ge는 실험을 통해 환기 시스템을 창문에서 멀리 떨어진 방의 구석에 위치시켰을 경우 downdraft 발생을 분석하였으며, 벽체에서의 거리에 따른 공기 온도 및 기류 속도, DR의 분포에 대한 평가를 수행하였다.¹⁸⁾

L. Schellen은 실험 및 CFD 시뮬레이션을 통해 downdraft의 평가를 수행하였으며, 창문의 높이 및 표면온도 등에 따른 기류 속도 및 DR을 분석하였다.¹⁹⁾

Jurelionis는 CFD 시뮬레이션을 통해 실내에서의 PPD 분포를 나타내어 downdraft 발생을 분석하였다. 창문의 단열성에 따라 나타나는 최대 기류 속도를 Heiselberg, H. Manz의 수식과 비교 평가하여 신뢰성을 확보하였다. 또한 창문 단열성에 따라 downdraft로 인한 불쾌감이 발생하지 않도록 하는 외피 높이의 한계치를 제시하였다. ²⁰⁾ 그러나 그는 PPD 지표에는 난류강도의

17) U Larsson et al. "Experimental investigation of downdraught from well-insulated windows". Building and Environment, vol. 37, issue. 11, 2002, pp.1073-1082.

18) Hua Ge et al. "Experimental investigation of cold draft induced by two different types of glazing panels in metal curtain walls". Building and Environment, vol. 39, issue. 2, 2004, pp.115-125.

19) L. Schellen, "Downdraught assessment during design_ Experimental and numerical evaluation of a rule of thumb", Building and Environment, vol. 57, 2012, pp.290-301

20) Andrius Jurelionis, "CFD predictions of indoor air movement induced by cold window surfaces", Journal of Civil Engineering and Management, vol. 14, no. 1, 2008, pp.29-38.

영향을 반영할 수 없으며 추후 Draft rate를 통한 평가를 수행하고자 하는 계획을 밝혔다.

많은 연구에서 draft rate를 활용하여 downdraft를 평가하고 있었으며 draft rate는 난류 강도의 영향을 고려하여 기류속도가 낮게 형성되는 자연대류와 기류속도가 높게 형성되는 강제대류에 따른 인체의 국부적인 냉각에 대한 불쾌적의 차이를 반영하여 평가를 수행할 수 있었다.

2.3 바닥 복사난방 적용 시 downdraft 메커니즘

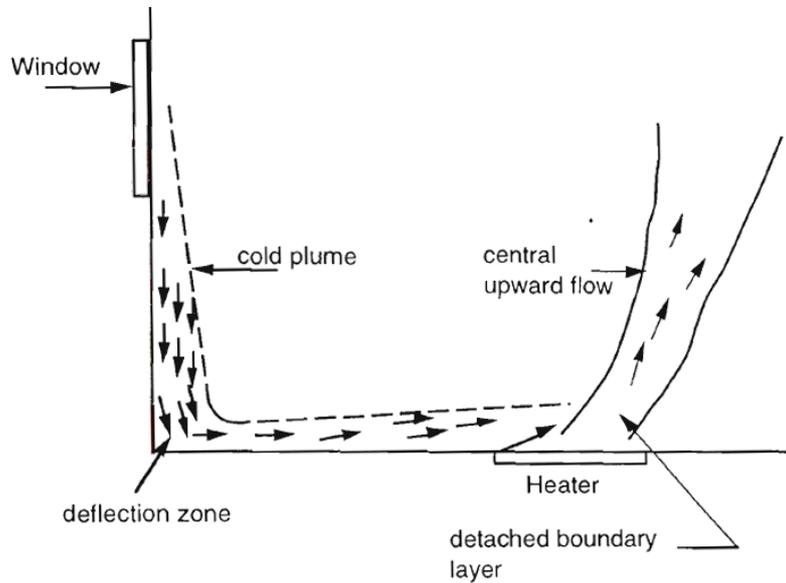
바닥 복사난방이 downdraft에 미치는 영향을 평가하기 위해 바닥 복사난방이 downdraft를 억제하는 메커니즘을 도출하였다. 그리고 바닥 복사난방이 실내 공간에 적용되었을 때 downdraft에 미치는 영향을 평가하기 위하여 관련 연구 및 문헌의 고찰을 통해 바닥 복사난방이 적용된 실내 공간에서 downdraft에 영향을 미치는 인자를 도출하였으며, 바닥 복사난방의 적용 방법에 따른 downdraft 현상을 분석하고자 하였다.

2.3.1 바닥 복사난방 적용 시 downdraft 억제 메커니즘

창문으로부터 하강하여 바닥을 타고 흘러 들어오는 차가운 기류를 억제하기 위해서는 아래쪽에서 위쪽으로 따뜻한 기류의 상승 흐름을 형성해주어야 한다. 바닥 복사난방은 차가운 창문 근처에 형성된 ‘차가운 공기’가 바닥면을 타고 이동해올 때 넓은 발열표면에서 자연 대류의 원리를 통해 열을 전달하여 공기의 온도를 서서히 높여주며 따뜻한 기류로 인한 상승 흐름을 형성하여 차가운 기류가 바닥면을 타고 ‘재실 영역으로 흘러들어오는 것’을 억제한다. 이와 같은 원리는 다음 [그림2.5]와 같이 나타낼 수 있으며, 따라서 downdraft를 억제하기 위해서는 바닥 복사난방의 표면온도를 높게 적용하여 차가운 공

기의 온도를 높여주고 차가운 기류의 흐름을 억제할 수 있어야 한다.

그러나 바닥 복사난방의 표면온도가 높아졌을 때 실내가 과열되면 열적으로 불쾌적하기 때문에 바닥 복사난방의 표면온도를 높이는 경우 실내에 요구되는 발열량에 맞추어 발열 면적을 줄여 창문 근처의 좁은 면적에 적용해야 한다.



[그림2.5] 바닥면의 발열에 의한 차가운 기류 흐름 억제²¹⁾

따라서 동일한 창문의 조건이 적용된 공간에서 발열 면적이 좁게 적용될수록 표면온도가 높게 형성되며 발열 면적이 넓게 적용될수록 표면온도는 낮게 형성이 된다.

Downdraft는 공기의 온도와 기류 속도의 영향에 의해 형성되는 것이기 때문에 바닥 복사난방의 발열면적 및 표면온도에 따라 실내의 공기 온도와 기류

21) Kulkarni, Ratnakar, "Natural convection in enclosures with localised heating and cooling", Doctor of Philosophy thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Wollongong, 1998. p. 127

속도에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

바닥 복사난방이 자연 대류의 원리를 통해 차가운 창문 근처에 형성된 ‘차가운 공기’에 열을 공급하여 온도를 높여주게 되며, 이 과정에서 형성되는 공기 온도와 기류 속도의 관계를 수식을 통해 살펴보자면, 자연 대류에서 상대적으로 높은 온도의 유체와 낮은 온도의 유체가 있을 때 유체는 온도 차이에 의한 밀도 차에 의해 속도를 가지고 이동하게 된다. 유체의 밀도 ρ 가 V 의 속도를 가지고 이동할 때 단위 체적 당 운동에너지는 $\frac{1}{2}\rho V^2$ 로 나타내어질 수 있으며 이는 유체의 잃어버린 위치에너지와 같은 다른 형태의 에너지로부터 발생한 에너지이다. 이때 수직 거리 L 이 지남에 따라 경계층에 있는 밀도가 작은 유체와 외부에 있는 더 높은 밀도를 가진 유체 사이의 위치에너지의 차이는 $g\Delta\rho L$ 로 표현 될 수 있다. 여기서 g 는 중력에 의한 가속도의 크기이며 $\Delta\rho$ 는 경계층의 유체와 멀리 있는 유체 사이의 특성 밀도 차를 의미한다. 이와 같은 관계를 식으로 표현하면 다음 식 (2.13)과 같다.

$$\rho V^2 \approx g\Delta\rho L \quad (2.13)$$

따라서 자연대류에 의해 발생하는 속도의 일반적인 크기의 순서는 다음 식 (2.14)와 같다.

$$V = \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} g L} \quad (2.14)$$

이러한 크기의 순서의 추정을 이용하여 유동 유체의 레이놀즈 수를 정의해보자면 다음 식 (2.15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Re_L = \frac{LV}{\nu} = \sqrt{\frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}gL^3}{\nu^2}} \quad (2.15)$$

따라서 다음과 같은 식 (2.16)을 도출할 수 있다.

$$Re_L^2 = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}gL^3}{\nu^2} \quad (2.16)$$

이것은 자연 대류 현상에서 주로 발생하는 무차원군(dimensionless group)이며 Grashof Number(Gr)로 불릴 수 있으며 다음 식 (2.17), (2.18)로 나타낼 수 있다.

$$Gr = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}gL^3}{\nu^2} \quad (2.17)$$

$$Gr = \frac{\beta\Delta TgL^3}{\nu^2} \quad (2.18)$$

여기서,

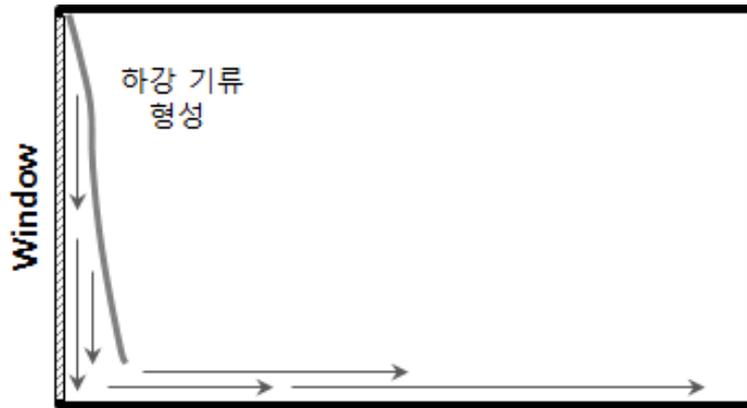
- g : 중력 가속도 (acceleration due to gravity) (9.81m/s^2)
- β : 열팽창 계수 (expansion coefficient) [$1/\text{K}$]
- ν : 유체의 동점도(kinematic viscosity of the fluid) [m^2/s]
- ΔT : 차가운 벽체의 표면온도와 열 경계층 (thermal boundary layer) 밖의 유체의 온도 차 [K]
- $\Delta\rho$: 경계층의 유체와 멀리 있는 유체 사이의 특성 밀도 차
- L : 대류의 특성 길이 (The characteristic length-scale of convection) [m]

따라서 속도의 크기는 두 유체의 온도 차에 비례하여 커지는데, 바닥 복사난방의 표면온도가 높게 형성될수록 차가운 기류에 열을 많이 공급하여 공기 온도가 상승하는 반면 기류 속도가 높게 형성되게 된다.

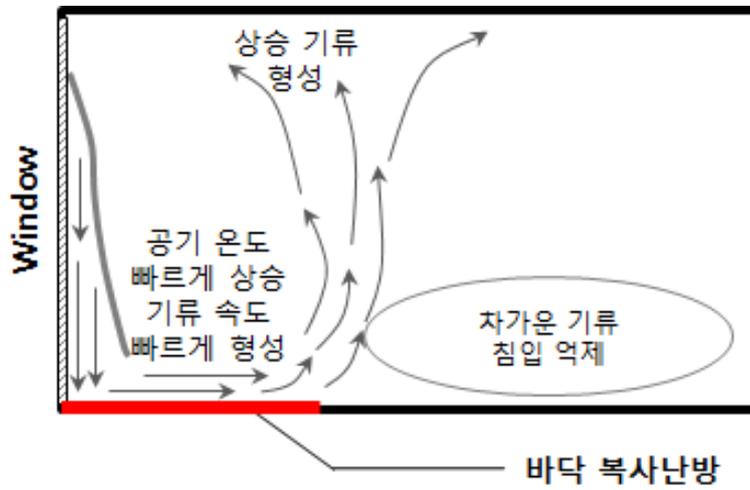
먼저 [그림2.6]과 같이 차가운 창문 표면에 의해 차가운 공기가 하강 흐름을 형성하여 재실영역으로 흘러오는 공간에 바닥 복사난방을 [그림2.7]과 같이 적용할 경우 하강하는 차가운 기류가 바닥 복사난방으로 인해 열을 얻어 '온도가 상승'하며 바닥 복사난방으로 인해 발생한 따뜻한 기류가 상승 흐름을 형성하여 '차가운 기류의 실내로의 유입을 차단'한다.

창문 근처의 좁은 면적에 바닥 복사난방이 높은 표면온도로 적용될수록 차가운 기류가 실내로 유입되는 것을 일찍 차단하여 실내에서 바닥 근처의 공기 온도가 높게 형성 되는데, 바닥을 타고 흐르는 차가운 공기와 바닥 복사난방 표면으로부터 형성되는 따뜻한 공기 사이의 온도차(Δt)가 커짐에 따라 '바닥 위에서의 기류의 이동 속도가 빠르게 형성'된다. 이러한 공기의 흐름에 따라 바닥면 위에서의 기류 속도는 다음 [그림2.9]에서의 조건 1의 경우와 같은 경향을 보이게 된다.

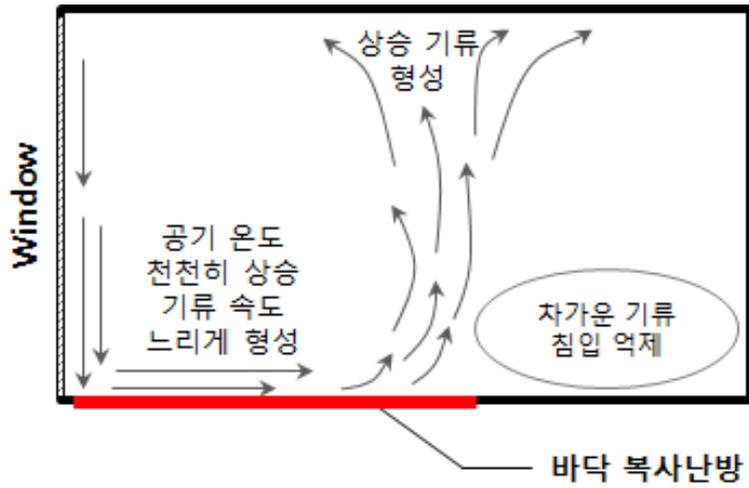
반면 바닥 복사난방이 좀 더 넓은 면적에 적용되어 좀 더 낮은 표면온도로 발열할 경우 차가운 기류가 실내로 유입되는 것을 상대적으로 늦게 차단하여 실내에서 바닥 근처의 공기 온도가 좀 더 낮게 형성이 되지만, 바닥 복사난방의 표면으로부터 형성되는 따뜻한 공기의 온도가 상대적으로 낮아져 차가운 공기와의 온도차(Δt)가 더 작아짐에 따라 바닥 위에서의 기류의 이동 속도가 좀 더 낮게 형성된다. 이러한 공기의 흐름을 도식화 하면 다음 [그림2.8]과 같은 원리로 나타낼 수 있으며 이러한 공기의 흐름에 따라 바닥면 위에서의 기류 속도는 다음 [그림2.9]에서의 조건 2의 경우와 같은 경향을 보이게 된다.



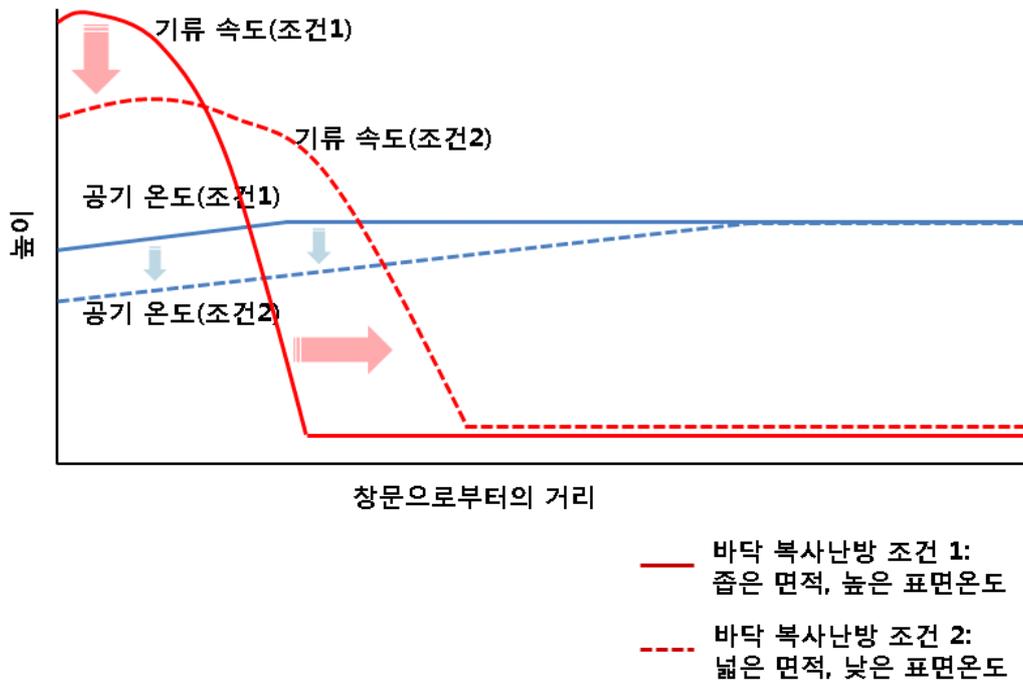
[그림2.6] 차가운 창문 표면에 의한 기류 현상



[그림2.7] 바닥 복사난방 적용에 따른 기류 현상



[그림2.8] 바닥 복사난방을 더 '넓은 면적'에 더 '낮은 온도'로 적용 시 기류 형성



[그림2.9] 바닥 복사난방의 적용에 따른 기류 속도 및 공기 온도 분포

따라서 재실 영역에서 downdraft를 억제하기 위해서는 창문 근처에 바닥 복사난방이 적용되었을 때 적절한 표면온도를 형성하여 차가운 기류의 온도를 충분히 상승시킬 수 있어야 하며 따뜻한 기류의 상승 흐름을 통해 차가운 기류를 억제하는 과정에서 기류 속도가 높게 나타남에 따라 재실 영역 내에서 draft rate의 수치가 허용 가능 기준 수치 이상으로 형성되지 않아야 한다.

2.3.2 Downdraft 억제 시 고려해야 할 실내 조건의 요소

바닥 복사난방의 적용을 통해 downdraft 억제 시 고려해야 할 실내 공간의 조건을 반영하기 위해, 기존 연구문헌 고찰을 통해 실내 공간에서 downdraft에 영향을 미치는 인자를 도출하였다. Downdraft는 차가운 창문 표면에 의해 형성되는 차가운 공기가 자연 대류 하강 흐름을 통해 인체를 국부적으로 냉각시켜 불쾌적을 주는 현상이다. Downdraft의 초기 연구로써 E. R. G. Eckert et al.²²⁾은 차가운 창문 표면 위의 난류 자연대류 흐름에 대한 이론적 분석을 수행하였다.

여기서 차가운 수직 표면 근처에서의 기류의 층의 상태는 강제 대류 흐름과 자유 대류 흐름에서 모두 비슷하게 나타난다고 가정이 되었으며 전단응력의 법칙 또한 동일하게 적용되었다. 따라서 강제 대류 흐름으로부터 도출된 벽체 위에서의 전단 응력(shearing stress)과 열전달 계수(heat transfer coefficient)사이의 실증적인 관계가 경계층의 두께와 경계층 내에서의 최대 기류 속도, 자유 대류 흐름에서의 열전달 계수를 추정하는데 이용되었다.

난류 자유 대류 흐름에서 자유 대류 경계층의 온도와 속도의 윤곽(profile)을 특정 형태로 가정하였으며, 수직 면 위의 난류 경계층 흐름(boundary layer flow)에서 측정된 지점의 속도는 다음과 같은 식 (2.4)를 통해 나타내

22) E. R. G. Eckert et al. "Analysis of turbulent free-convection boundary layer on flat plate". NACA Report 1015, 1951.

어질 수 있다. 이 때 벽으로부터 수평 거리인 y 는 속도 경계층의 두께인 δ 이하여야 한다. 속도의 항을 그라쇼프 수를 통해 나타내면 다음과 같은 식 (2.5)와 같으며, 경계층의 두께는 식 (2.6)과 같이 나타내어질 수 있다.

여기서 그라쇼프 수가 높을수록 벽체 위의 속도도 높아지는데, 그라쇼프 수는 창문의 표면온도와 실내 공기의 온도차가 클수록 높아지며 하강하는 기류 흐름의 시작점으로부터의 거리가 멀수록 높아진다. 따라서 창문의 표면온도가 낮을수록 실내 공기와의 온도차가 크게 발생하게 되고 이에 따라 기류의 속도도 빨라지게 되며, 창문의 높이가 높을수록 기류 속도가 빨라지게 된다.

$$u = u_1 \left(\frac{y}{\delta}\right)^{1/7} \left(1 - \frac{y}{\delta}\right)^4 \quad (2.4)$$

$$u_1 = 1.185 \frac{\nu}{x} (Gr)^{1/2} [1 + 0.494(Pr)^{2/3}]^{-1/2} \quad (2.5)$$

$$\delta = 0.565x (Gr)^{-1/10} (Pr)^{-8/13} [1 + 0.494(Pr)^{2/3}]^{1/10} \quad (2.6)$$

$$Gr = \frac{g\beta_w x^3}{\nu^2} \quad (2.7)$$

여기서,

Gr	: 그라쇼프 수 (Grashof number)
Pr	: 동점성에 대한 열의 분자확산도의 비 (The ratio of momentum diffusivity (kinematic viscosity) to thermal diffusivity)
g	: 중력 가속도 (acceleration due to gravity) (9.81m/s^2)
θ_w	: 창유리 표면온도와 경계층 밖의 유체와의 온도 차 (temperature difference between wall and fluid outside) [K]
u	: x 방향으로의 속도 [m/s]
u_1	: 경계층 밖의 속도 (velocity outside boundary layer of comparable forced convection flow) [m/s]
β	: 열팽창 계수 (expansion coefficient) [1/K]
y	: 벽으로부터 수평 거리 (horizontal distance from wall) [m]
x	: Downstream에서 경계층의 시작 지점으로부터의 거리 (distance along plate from starting point of boundary layer) [m]
δ	: 속도 경계층의 두께 (velocity boundary layer thickness) [m]
ν	: 동점성 dynamic viscosity (kinematic viscosity) [m^2/s]

Downdraft는 이렇게 차가운 창문 표면을 타고 흘러내려온 공기가 바닥을 타고 실내로 유입되었을 때 발생하는 현상이므로 Heiselberg는 E. R. G. Eckert et al.의 수식에서 다음 식 (2.8)을 바탕으로 ‘차가운 창문 표면’을 타고 흐르는 ‘차가운 공기’가 ‘자연대류 하강 흐름’으로 인해 바닥을 타고 흐를 때 바닥 근처에서의 최대 기류 속도 및 최저 공기 온도’를 실험을 통해 측정하여 식(2.8)에서의 계수 k 를 도출하였다.²³⁾ 이때 차가운 표면의 수직 높이가 높을수록, 그리고 차가운 표면과 재실 영역의 참조 온도 사이의 온도차가 클수록 발목 높이에서의 최대 기류 속도가 높아진다.

$$U_{\max} = k\sqrt{(h\Delta t)} \quad (\text{m/s}) \quad (2.8)$$

여기서,

23) Per Heiselberg. “Draught risk from cold vertical surfaces”. Building and Environment, vol. 29, no. 3, 1994, pp.297-301.

- U_{\max} : 발목 높이에서의 최대 기류 속도[m/s]
 k : 실험을 통해 도출된 값 (0.052-0.10 사이)
 h : 차가운 표면의 수직 높이[m]
 Δt : 차가운 표면과 거주역의 참조 온도 사이의 온도차 [°C]

그러나 실제 downdraft에 민감한 영역은 차가운 외피 근처가 아닌 실제 사람들이 거주하는 채실 영역이므로 Heiselberg는 downdraft를 느낄 수 있는 위험을 평가하기 위해 차가운 기류가 하강하여 바닥을 따라 흐르면서 바닥 근처에서 나타나는 ‘최대 기류속도’ 및 ‘최저온도’를 평가하였다. 실험을 통해 평가를 수행한 결과 공기 흐름에서 최대 기류 속도와 최소 온도는 차가운 표면으로부터 0.4m 거리 이내에서 측정이 되었다. 이후 창문으로부터의 거리 2m까지는 기류 속도가 줄어들다가 2m 이후의 지점에서는 최대기류속도가 25% 넘게 감소하여 일정하게 유지되었다. 이러한 실험 결과를 통해 다음과 같은 식 (2.9), (2.10), (2.11), (2.12)를 도출하였다.

$$U_{\max}(x) = 0.055 \sqrt{(h\Delta t)} \quad (\text{m/s}) \quad x < 0.4 \quad (2.9)$$

$$U_{\max}(x) = 0.095 \frac{\sqrt{(h\Delta t)}}{x + 1.32} \quad (\text{m/s}) \quad 0.4 \leq x \leq 2.0 \quad (2.10)$$

$$U_{\max}(x) = 0.028 \sqrt{(h\Delta t)} \quad (\text{m/s}) \quad x > 2.0 \quad (2.11)$$

$$t_f(x) = t_r - (0.3 - 0.034x)\Delta t \quad (^\circ\text{C}) \quad (2.12)$$

여기서,

- x : 차가운 표면으로부터의 거리 [m]
 t_f : 바닥을 타고 흐르는 차가운 공기의 최저 온도[°C]
 t_r : 채실 영역의 참조 온도[°C]
 Δt : 채실 영역의 참조 온도와 차가운 표면의 평균온도 사이의 온도차[°C]

Downdraft는 이와 같이 차가운 표면인 창문으로부터 형성된 기류가 바닥면에 깔려 오는 흐름에 의해 바닥면 근처에서 주로 발생하게 된다. 바닥면을 타고 재실영역으로 흐르는 기류의 속도는 창문 근처에서 형성되는 차가운 기류의 하강 속도에 영향을 받는데, 창문 근처에서 기류의 최대속도는 창문의 ‘표면온도’가 낮을수록, 창문의 ‘수직 높이’가 높을수록 높아지게 된다.

따라서 바닥 복사난방 적용 시 고려해야 할 실내공간의 인자로 창문의 ‘열관류율’과 ‘수직 높이’를 선정하였다.

2.4 Downdraft 메커니즘을 고려한 바닥 복사난방의 평가인자

Downdraft 메커니즘 분석 결과 차가운 기류의 역제를 위해 열을 공급하고 상승기류를 형성하는 바닥 복사난방의 발열조건에 따른 평가를 수행하고자 하며 이때 downdraft에 영향을 미치는 인자로 차가운 하강 기류를 형성하는 창문의 조건을 고려하고자 한다.

차가운 하강 기류에 열을 공급하는 바닥 복사난방의 발열조건에서 ‘표면온도’ 및 ‘발열면적’에 따라 발생하는 따뜻한 기류와 창문으로부터 하강하여 흘러들어오는 차가운 기류와의 온도차(Δt)가 달라져서 기류속도 및 공기 온도에 영향을 준다. 따라서 바닥 복사난방의 ‘표면온도’ 및 이에 따른 ‘발열면적’을 downdraft에 영향을 미치는 ‘영향인자’로 선정하였다.

그리고 창문의 조건에서 차가운 하강 기류의 속도 및 온도는 ‘창문의 표면온도와 실내 공기와의 온도 차(θ_w)’ 및 ‘창문의 수직 높이(h)’에 의해 영향을 받게 되므로, 창문의 표면온도에 영향을 주는 ‘창문의 열관류율’ 및 ‘창문의 수직 높이’를 downdraft에 영향을 미치는 실내 공간의 건축적인 ‘계획 인자’로 선정하였다.

또한 바닥 복사난방의 영향인자가 downdraft에 미치는 영향에 대한 평가를

수행하기 위해 창문의 계획인자의 영향만을 고려하였으며 그 외에 대상 공간 내에서 기류 흐름이나 공기 온도에 영향을 미칠 수 있는 다른 조건들은 배제하고자 하였다.

2.5 소결

본 장에서는 downdraft를 평가하기 위한 방법과 각각의 방법을 적용하여 연구를 수행한 사례를 조사하였으며 바닥 복사난방이 적용된 경우 downdraft 메커니즘을 분석한 연구 사례를 조사하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Downdraft와 draft의 용어 및 정의에 대해 분석한 결과 draft는 ‘인체의 국부적인 냉각 및 따뜻함에 따른 불쾌적 현상’ 전체를 의미하며 downdraft는 draft에 포함되는 개념이라 볼 수 있다. 따라서 downdraft는 인체의 국부적인 냉각에 따른 불쾌적 현상 중 ‘차가운 표면에 의해 발생한 차가운 공기의 자연 대류 하강 흐름에 의한 불쾌적’을 의미한다.
- 2) 실내의 평균적인 열쾌적을 평가하기 위한 지표인 PPD를 활용하는 것보다 국부적인 열쾌적을 평가하기 위한 draft 평가 지표인 draft rate를 적용할 경우 난류강도의 영향까지 고려한 세밀한 평가가 가능하기 때문에 downdraft 평가에 좀 더 적절한 지표로 판단이 되었다. 따라서 downdraft를 평가하기 위한 지표로 draft rate를 선정하였다.

- 3) Downdraft는 기류속도가 높을수록 공기 온도가 낮을수록 발생 가능성이 높아지는데, 건물의 외피에서 창문의 표면온도가 낮을수록 차가운 기류 층의 온도와 실내 공기 온도 간의 차이가 크게 발생하게 되어 기류 속도가 빨라지며, 창문의 높이가 높을수록 기류 속도가 빨라지게 된다.
- 4) Downdraft 억제를 위해 바닥 복사난방의 표면온도를 높게 적용할 경우 차가운 기류에 열을 많이 공급해줌에 따라 공기 온도를 높게 형성할 수 있으나 기류 속도를 증가시키게 된다. Downdraft는 공기의 온도와 기류 속도 두 인자 간의 상호 관계에 의해 불쾌감을 주는 현상이기 때문에 바닥 복사난방 적용 시 차가운 기류의 온도를 충분히 상승시킬 수 있으면서도 따뜻한 기류의 상승 흐름을 통해 차가운 기류를 억제하는 과정에서 기류 속도가 높게 나타남에 따라 재실 영역 내에서 draft rate의 수치가 허용 가능 기준 수치 이상으로 형성되지 않도록 해야 한다.

제 3 장 Downdraft 평가 방법 및 평가 모델

3.1 개요

본 장에서는 2장에서 수행된 바닥 복사난방이 적용된 공간의 downdraft 메커니즘의 분석을 통해 도출된 평가인자가 downdraft에 미치는 영향의 평가를 수행하고자 하였다.

따라서 downdraft를 평가하기 위한 기준을 설정하고 평가 기준을 통해 downdraft 평가인자의 평가 방향을 설정하였으며 이에 따른 평가 케이스를 설정하였다. 또한 평가 도구로써 CFD 시뮬레이션 프로그램을 선정하였다.

3.2 바닥 복사난방 평가 방법

3.2.1 Downdraft 평가 기준

Downdraft의 평가 시 downdraft로 인한 불쾌감의 강도에 대한 평가가 필요하며 downdraft로 인한 불쾌감이 발생하는 영역이 얼마나 되는지에 대한 평가가 필요하다. 따라서 절대적인 수치를 통해 downdraft로 인한 불쾌감의 강도의 평가 기준에 대한 설정과 downdraft의 평가가 이루어지는 평가 영역에 대한 설정이 필요하다.

Downdraft를 절대적인 수치를 평가하기 위한 기준으로 2장에서 도출된 지표인 draft rate를 선정하였다. Draft rate는 기류 속도 및 온도에 영향을 반영하기 때문에 바닥 복사의 평가인자에 따른 기류 속도 및 온도의 분석을 통해 downdraft의 평가를 수행하였다.

Downdraft는 인체의 정성적인 느낌에 따른 불쾌적 현상이기 때문에 downdraft를 억제하기 위한 영역으로 실제 사람이 장시간 머물러 활동하는 '재실 영역'에서의 평가를 수행하고자 하였다.

일반적으로 재실 영역은 바닥으로부터 1.8m 높이며 외벽이나 외피 창문으로부터 1.0m 거리, 내벽으로부터 0.5m 거리 이상의 영역을 의미한다.²⁰⁾

따라서 재실 영역에서의 분포하는 draft rate의 백분율을 ASHRAE와 EN 15377의 기준에 의거하여 만족할 수 있는 class의 수준을 제시하였다.

따라서 재실 영역에서 downdraft가 하강 기류로 인해 다리 부근에서 발생하는 측면을 고려하여 발목 높이 부근의 draft rate 분포를 평가하여 draft rate의 수치의 높이와 draft rate 수치가 높은 부분의 너비가 얼마나 넓게 분포하는지를 평가하였다.

또한 바닥 복사난방으로 인해 형성되는 기류 흐름을 분석하기 위해 실 단면의 기류 속도 분포를 시각적으로 분석하였다.

3.2.2 Downdraft 평가 방법

바닥 복사난방을 적용 시 downdraft 억제를 위해서는 재실 영역 내에서의 draft rate의 수치가 목표 기준으로 설정한 수치 이상으로 형성되지 않아야 한다.

바닥 복사난방 적용 시 창문 근처에서의 공기 온도가 낮게 분포하고 하강 기류로 인해 기류 속도가 빠르게 나타나기 때문에 draft rate의 수치가 창문 근처에서 높게 나타나고 더 깊은 공간에서는 차가운 기류의 억제를 통해 draft rate의 수치가 낮게 나타나는 경향을 보인다.

따라서 draft rate의 수치가 재실 영역 내에서 허용 가능한 기준 수치 이상으로 발생하지 않기 위해서는 draft rate 수치가 높게 나타나는 부분의 절대적인 ‘높이’도 중요하나 draft rate 수치가 허용 가능한 기준 수치 이상으로 높게 나타나는 부분이 재실 영역을 침범하지 않기 위해서는 draft rate의 수

20) BS EN 15377-1: Heating systems in buildings - Design of embedded water based surface heating and cooling systems - Part 1: Determination of the design heating and cooling capacity, 2008, p. 7.

치가 높게 나타나는 부분의 ‘너비’도 중요하다.

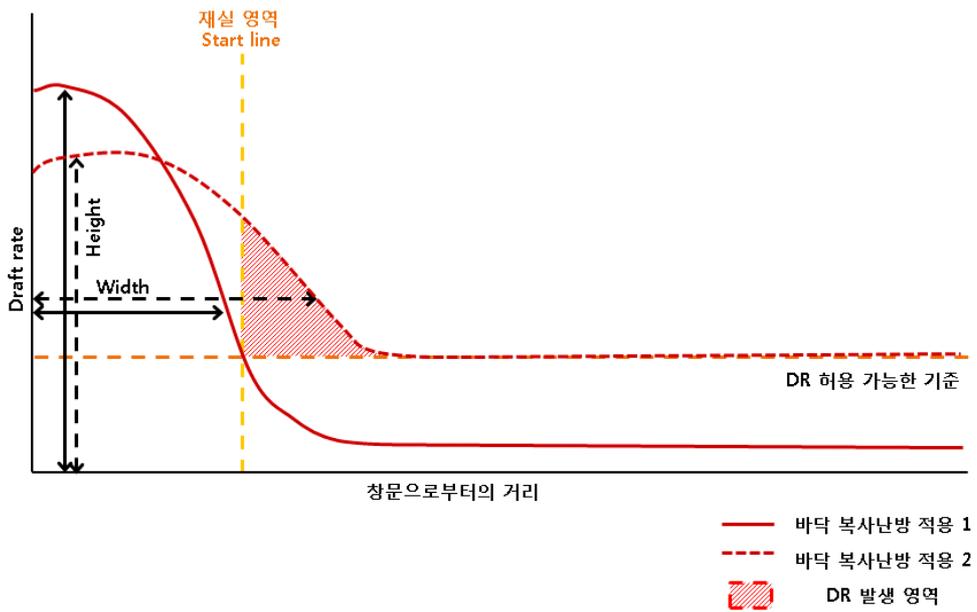
만약 draft rate의 수치의 높이가 허용 가능 기준 수치보다 높더라도 높은 수치의 영역이 재실 영역 외에서만 나타나고 재실 영역 내에서는 draft rate가 허용 가능 기준 수치보다 낮게 나타난다면 downdraft를 억제한 것으로 볼 수 있다.

따라서 downdraft의 발생은 draft rate의 높이와 너비로 판단 가능한데, 여기서 Downdraft의 높이는 위의 그래프에서 Y축의 크기, 너비는 허용 가능한 기준 이상까지의 X축 크기를 의미한다.

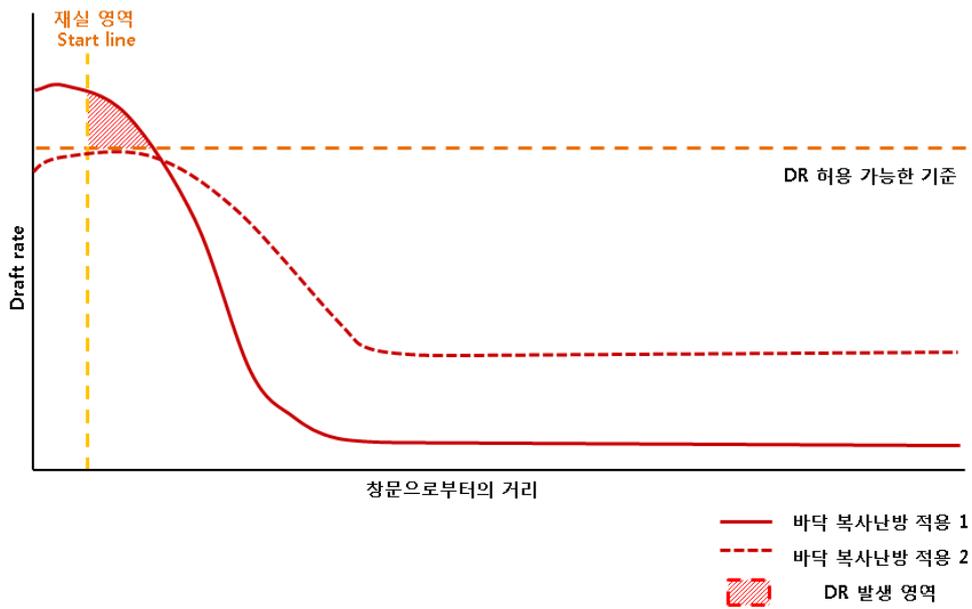
Draft rate의 ‘높이’와 ‘너비’는 바닥 복사난방의 표면온도와 발열면적의 영향을 받는데, 다음 [그림3.1]에서 ‘바닥 복사난방 적용 1’의 경우 바닥 복사난방의 표면온도가 높고 발열면적이 좁게 적용되어 상승기류의 유인이 심화되고 자연 대류의 속도가 증가함에 따라 기류 속도가 빨라져 draft rate의 절대적인 높이가 높게 형성되어 재실 영역 내에서 downdraft가 발생하였다. 그러나 표면온도가 더 낮고 발열면적이 더 넓게 적용된 ‘바닥 복사난방 적용 2’의 경우 상승기류의 유인이 약화되고 자연 대류 속도의 감소에 따라 기류 속도가 느려져 draft rate의 수치가 높은 부분이 ‘바닥 복사난방 적용1’의 경우보다 증가하나 절대적인 높이가 허용 가능 기준 미만으로 감소하여 재실 영역에서 downdraft가 발생하지 않았다.

반면 [그림3.2]에서의 경우 여기서는 ‘바닥 복사난방 적용 2’의 경우 draft rate의 절대적인 높이는 낮으나 허용 가능한 기준 수치 이상으로 나타나는 부분이 재실 영역 내에 존재하기 때문에 downdraft가 발생했다고 볼 수 있다.

따라서 바닥 복사의 표면온도와 발열면적에 따라 발생하는 draft rate 수치의 높이와 draft rate 수치가 높게 나타나는 너비는 재실 영역의 설정 및 허용 가능한 기준 수치에 따라 downdraft 발생 여부를 평가할 수 있다.



[그림3.1] Draft rate 수치 of 절대적인 높이에 따른 downdrat 발생



[그림3.2] Draft rate 수치 of 절대적인 너비에 따른 downdrat 발생

따라서 설정된 재실 영역 및 허용 가능한 draft rate 수치의 기준을 적용하여 바닥 복사난방 적용 조건에 따른 downdraft 평가가 필요하다.

3.2.3 Downdraft 평가를 위한 평가인자의 조건

건물의 창문과 바닥 복사난방의 조건에 따른 downdraft의 평가를 수행하기 위해 이외의 조건은 실내의 기류 속도 및 온도에 영향을 주지 않도록 하였다. 실내의 기류 속도 및 온도에 영향을 주는 인자는 대상 공간 내부와 외부 공간의 온도 조건 및 대상 공간의 천장과 바닥, 실내 벽체의 열관류율 조건이 있다. 대상 공간 내부의 온도는 겨울철 실내 설정온도인 20℃로 고정하였으며 실외 온도는 downdraft가 발생이 가장 큰 상황을 고려하기 위해 서울시 기준의 설비 용량 산정을 위한 최대 부하 조건에서의 온도 -11.3℃²¹⁾ 기준으로 설정하였다. 천장과 바닥, 실내 벽체를 통한 열전달 측면은 고려하지 않기 위해 열관류율 조건을 단열 조건으로 설정하였다.

차가운 기류의 하강 속도에 영향을 미치는 창문의 계획인자는 ‘창문의 수직 높이’, 그리고 ‘창문의 열관류율’이 있으며 창문의 수직 높이가 높아짐에 따라, 그리고 창문의 열관류율이 높을수록 창문의 표면온도가 낮아져 차가운 기류의 하강 속도가 빨라지고 이에 따라 바닥을 타고 실내로 흘러들어오는 기류 속도가 빨라진다.

창문의 높이는 downdraft 발생 위험성이 높은 커튼월 건물의 경우를 고려하여 대상 공간의 천장고 높이와 동일하게 설정되었으며, 천장고의 조건은 일반적인 사무소 건물의 한 층 높이 공간과 더불어 로비 공간에서의 복층 높이의 공간이 되었을 때의 영향을 평가하고자 하였다. 창문의 열관류율은 건물에서 주로 적용되는 일반복층유리의 열관류율 조건에 대한 평가와 단열 성능을

21) 국토해양부 고시 제2008 - 652호 [별표6] 냉난방장치의 용량계산을 위한 설계 외기온·습도 기준 건축물의 에너지절약설계기준 (서울지역 기준)

강화하여 로이복층유리를 적용했을 경우의 열관류율인 조건에 대한 평가를 수행하고자 하였다.

Downdraft를 억제하기 위해 적용되는 바닥 복사난방의 표면온도에 따라 차가운 기류와 바닥 복사난방의 표면으로부터 발생하는 따뜻한 기류 사이의 온도차가 달라져 기류의 이동 속도에 영향을 준다. 따라서 바닥 복사난방의 발열면적과 이에 따라 설정되는 표면온도를 영향 인자로 설정하여 평가하고자 하였다.

바닥 복사난방의 발열면적이 외주부 내에 존재할 경우 외주부 바닥의 한계 표면온도 조건인 35℃의 조건을 적용하였다. 그리고 바닥 복사난방을 바닥 전체에 적용한 경우는 재실 영역 바닥의 한계 표면온도인 29℃의 조건을 적용하였다. 바닥 복사난방이 외주부에 적용될 때 발열면적 설정을 위해서는 외주부의 외벽으로부터의 깊이에 대한 기준이 필요한데, 현재 통일된 기준이 적용되고 있지 않다. 다양하게 적용되는 기준들을 살펴보면 EN15377에서 제시하는 기준은 최대 창문으로부터 1.0m 거리²²⁾ 내를 외주부로 정하고 있으며, 일반적으로 건물에서 외주부 시스템 설계 시 창문으로부터 3m 거리, 혹은 실 깊이의 1/3 정도로 적용하고 있다. 따라서 이러한 경우들을 외주부의 깊이 산정 시 고려하여 발열면적을 설정하였다.

3.2.4 Downdraft 평가 도구

Downdraft와 같은 자연 대류 현상을 평가하기 위한 도구로 모형실험(mock-up test) 또는 컴퓨터를 활용한 시뮬레이션을 활용할 수 있다. 순환 기류의 형성 및 거주역에서의 draft rate 분포에 대한 시각적인 분석과 더불어 실내에서의 전체적인 기류의 흐름 분석을 위해 CFD 시뮬레이션을 통한

22) BS EN 15377-1: Heating systems in buildings - Design of embedded water based surface heating and cooling systems - Part 1: Determination of the design heating and cooling capacity, 2008, p. 7.

평가를 수행하였다.

자연대류의 특성을 해석하기 위해 공기 유동을 3차원 정상상태로 가정하였으며 3차원 정상상태 지배 방정식을 사용하였다.

CFD 시뮬레이션 프로그램은 CD-adapco사에서 개발한 프로그램인 Star-CCM+ 6.02를 활용하였으며 이는 CFD 해석 모델 프로그램 중 공기 유동, 열전달 등의 거동 해석에 적합하도록 만들어진 프로그램이다.

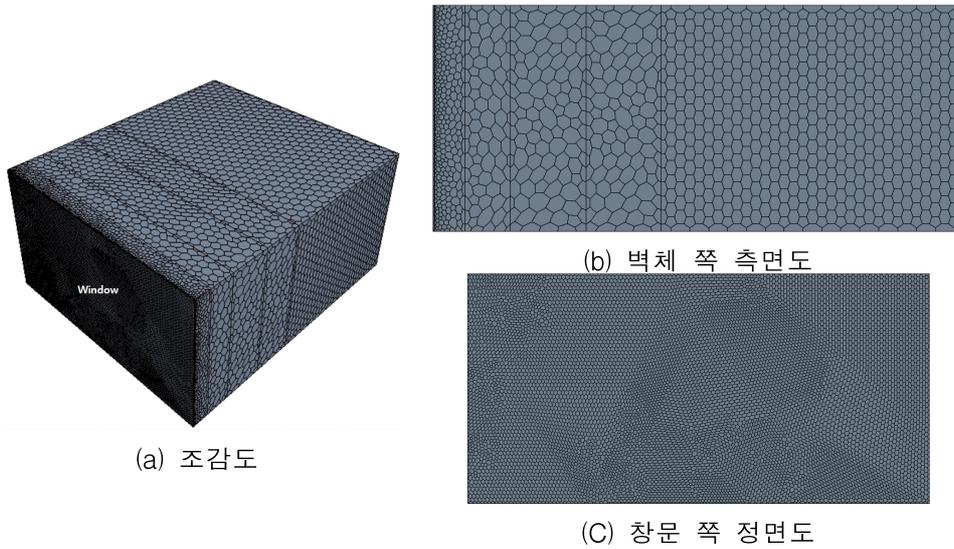
3.3 바닥 복사난방 평가 모델

3.3.1 시뮬레이션 평가 모델

실내의 기류 속도 및 온도, draft rate 분포를 평가하기 위해 CFD 시뮬레이션 상용프로그램 STAR-CCM+ 6.02을 통해 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 메쉬의 조건은 다음 [그림3.3]과 같으며 시뮬레이션의 물리적 조건은 다음 <표 3.1>과 같다. 시간의 변화를 고려하지 않은 정상상태로 해석하였으며 K-ε 난류 모델을 적용하였다. 복사를 고려하여 일반적으로 실내 공간에서 적용되는 조건인 Surface-to-surface Radiation을 적용하였다.

<표 3.1> 시뮬레이션의 물리적 조건

Physics model		Data
Physics	Time	Steady
	Turbulence model	K-ε Turbulence
	Radiation	Surface-to-surface Radiation
	Equation of state	Constant density (Including BoussinesqModel)



[그림3.3] Mesh 모델

3.3.2 평가 대상 공간 경계 조건

평가 대상 공간의 경계조건 설정은 다음 <표 3.2>와 같다. 대상 공간에서 벽체의 조건은 단열 조건으로 설정하였으며 창문의 조건은 바닥 복사난방으로 인한 가열로 인해 부분적으로 창문의 표면온도가 상승하는 조건을 반영하기 위해 창문의 두께와 동일한 공간을 모사하여 창문의 물성치를 부여하였으며 창문의 외측 면에 외부 공간의 온열 환경 조건을 convection 조건으로 반영하였다.

<표 3.2> 평가 대상 공간의 경계 조건

구분	내용	
실내 조건	Space	창문 및 바닥 복사난방 및 벽체와 천장, 바닥의 면에 둘러싸인 공간
창문 조건	Space	창문의 열관류율에 따른 물성치(Thermal conductivity)를 가진 solid 조건으로 모사
바닥 복사난방 조건	wall, Temperature	요구되는 발열량을 제공할 수 있는 temperature 조건으로 설정
외기 조건	wall, convection	외부의 온열환경 조건을 반영한 convection 조건으로 설정
벽체 조건	Wall, Adiabatic	벽체를 통한 외부와의 열교환의 영향을 억제하기 위해 단열 조건으로 설정

3.3.3 평가인자에 따른 평가 대상 공간 조건

바닥 복사난방이 적용된 공간에서 downdraft를 평가하기 위하여 대상 공간을 설정하였으며 평가 대상 공간의 조건은 다음 <표 3.3>과 같다. 대상 공간은 한쪽 면 전면 유리가 적용된 공간으로 설정하였으며 천장고 높이는 사무공간 및 로비공간의 천장고 조건을 반영하여 한 층 높이와 복층 높이의 조건으로 설정하였다. 실내외 온도차에서 외기온도는 downdraft 발생 위험이 높은 조건으로 설정하기 위해 기기의 용량 산정 온도인 -11.3°C ²³⁾ 기준으로 설정하였으며 태양 복사열은 포함하지 않았다. 창문의 조건은 일반 복층 유리 조건으로 일반적으로 쓰이는 열관류율 $2.7\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 의 조건과 로이 복층 유리 조건으로 열관류율 $1.75\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 의 조건을 적용하였다.²⁴⁾

23) 국토해양부 고시 제2008 - 652호 [별표6] 냉·난방장치의 용량계산을 위한 설계 외기온·습도 기준 건축물의 에너지절약설계기준 (서울지역 기준)

24) 한글라스 카탈로그자료실, http://www.myhnglas.co.kr/product/cata_list.asp

<표 3.3> 평가 대상 공간의 조건

구분	내용		
대상 공간 크기	한층 높이	6(m) x 7(m) x 3(m) (w x d x h)	
	복층 높이	6(m) x 7(m) x 6(m) (w x d x h)	
외기온도 조건	-11.3℃		
실내온도 조건	20℃		
창문 조건	유리창 종류	일반 복층유리	로이 복층유리
	열관류율 [W/m²K]	2.7	1.75
바닥 복사난방 조건	발열면적 [m²]	외주부 깊이에 적용된 경우(1.0m, 2.0m, 3.0m) 바닥 전체에 적용된 경우	
	표면온도 [℃]	발열면적에 따라 외주부 바닥 한계 표면온도 (35℃), 재실 영역 바닥 한계 표면온도(29℃) 기준 적용	
벽체 조건	열출입이 없는 단열 조건		

바닥 복사난방의 발열면적은 외주부에 적용되었을 경우 외주부의 깊이로 적용되는 1.0m, 2.0m(실의 약 1/3 깊이), 3.0m 조건을 적용하였으며 바닥 전체에 적용된 경우에 대한 평가를 수행하였다. 표면온도는 발열면적에 따라 요구되는 발열량에 맞추어 적용하였으며 이때 적용된 면적에 따라 외주부에서의 바닥면 한계 표면온도인 35℃와 재실영역에서의 바닥면 한계 표면온도인 29℃의 온도를 넘어가지 않도록 하였다.

3.4 바닥 복사난방 평가 케이스

바닥 복사난방의 영향 인자와 대상 공간 및 창문의 조건에 해당하는 계획 인자에 따라 downdraft를 분석하였다. 또한 평가 케이스를 선정하여 바닥 복사난방의 적용 계획 시 downdraft를 고려하여 참고가 될 수 있는 지침을 도출할 수 있도록 대상 공간 및 창문의 계획 인자와 바닥 복사난방의 영향 인자에 따른 실내 기류 분포의 경향성을 파악하고자 하였다.

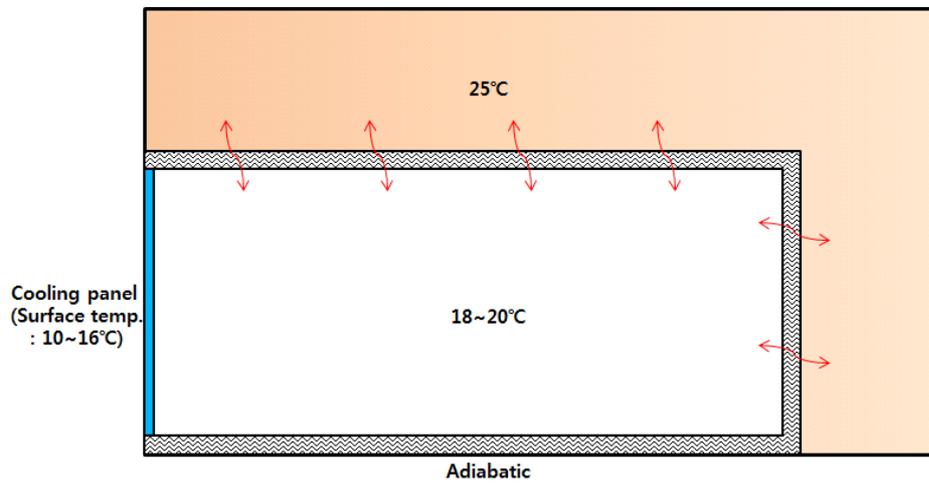
3.4.1 기존 연구 결과와의 비교를 통한 검증

시뮬레이션 평가를 수행하기에 앞서 시뮬레이션 공간에서의 평가 결과에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 대상 공간을 Heiselberg의 실험에서 모사한 공간과 동일하게 모사 후 측정된 기류 속도 분포의 경향성이 동일하게 나타나는지 평가하고자 하였다.

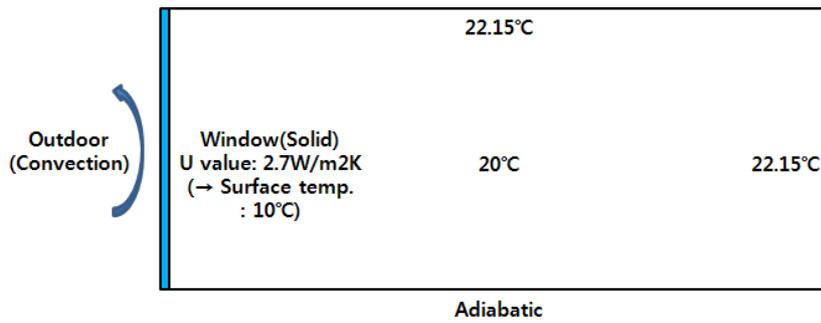
Heiselberg의 실험에서는 폭 6m, 깊이 7m, 높이 3m의 공간을 모사하였으며 한쪽 벽 전면에는 창문을 모사하는 복사 패널이 위치하여 방냉하게 하였으며 복사 패널 표면의 평균 온도의 편차는 $\pm 5\%$ 내로 유지되었다. 열평형을 이루기 위하여 복사 패널이 위치하는 벽을 제외한 나머지 벽과 천장은 더 높은 온도인 25°C 로 유지되는 홀에 면하게 하여 벽체를 통한 열전달을 통해 열이 공급되도록 하였으며 바닥은 단열상태로 유지되었다. 기류 속도가 측정된 지점은 바닥으로부터 0.01-0.5m 높이 사이의 지점이었으며 차가운 벽체에서 0.2-6m 깊이 지점까지이다. 측정 지점 간 간격은 0.1m이다. 실험 결과 최대 기류 속도는 차가운 벽체로부터 0.4m 거리 이내의 지점에서 나타났으며 바닥으로부터는 0.03m 이하의 지점에서 나타났다. 벽체로부터 2.0m 거리에서는 최대 기류 속도의 25%로 감소하였다.

Heiselberg의 실험과 동일한 조건의 시뮬레이션을 구현하기 위해 동일 크기의 공간을 모사하였다. 그러나 Heiselberg의 실험에서는 창문을 반영하기 위해 일정한 온도로 유지되는 패널을 적용하였지만 추후 바닥 복사난방이 적용된 경우를 평가할 때 창문의 표면에 복사열 및 대류열이 전달되어 창문 표면온도에 미치는 변화를 반영하기 위해 창문을 두께가 있는 솔리드로 구현하였으며 외부 공간을 컨벡션 조건으로 모사하여 외부의 온열환경을 반영하였다. 이때 창문의 열관류율 조건은 Heiselberg의 실험에서 방냉하는 복사 패널로 인해 손실되는 열량과 동일한 열량이 손실되는 조건을 적용하였다. 실험

에서 창문을 통해 손실되는 열량을 보충하기 위해 나머지 벽체와 천장을 통한 열전달이 이루어졌는데 시뮬레이션에서는 벽체 및 천장을 온도 조건으로 모사하여 실험에서의 조건과 동일한 열량을 전달하도록 모사하였다. Heiselberg의 실험과 시뮬레이션의 구현 조건은 다음 <표3.4>와 같다.



[그림3.4] Heiselberg 실험 경계 조건



[그림3.5] 시뮬레이션 경계 조건

<표 3.4> 실험 및 시뮬레이션 구현 조건

구분	Heiselberg 실험	Simulation
실내 공간 크기	6 x 7 x 3 (w x d x h) (m)	6 x 7 x 3 (w x d x h) (m)
창문 표면온도	10~16°C	10°C (외기온도: -11.3°C / 창문 열관류율: 2.7W/m ² K)
테스트 룸 온도	18~20°C	20°C

3.4.2 바닥 복사난방 영향인자에 따른 downdraft

바닥 복사난방의 영향 인자인 발열면적과 표면온도에 의해 실내에서 나타나는 draft rate 수치의 분포를 분석하고자 하였다. 따라서 바닥 복사난방을 외주부 범위 안에 적용한 케이스와 더불어 바닥 전체에 적용한 케이스에 대한 평가를 수행하였다.

대상공간의 외주부의 범위로 여러 기준을 적용할 수 있었는데, EN15377 기준에서 제시하는 창문으로부터 1.0m 깊이까지의 경우, 건물에서 일반적인 외주부의 깊이로 적용되는 창문으로부터 실의 약 1/3 깊이까지의 경우, 그리고 창문으로부터 3.0m²⁵⁾까지의 경우를 평가하였다. 이와 같은 조건들을 고려한 시뮬레이션 케이스의 조건은 다음 <표3.5>와 같다. 이때 발열면적이 1.0m로 적용된 케이스에서는 표면온도가 41°C로 형성되는데 ASHRAE 기준에서 제시하는 외주부 바닥 한계 표면온도 기준인 35°C를 넘어가지만 바닥면의 한계 온도 관련 연구에 의하면 ASHRAE의 기준에서는 공기 온도가 22-25°C로 유지된 상태의 실험결과를 통해 한계 표면온도를 제시한 것이며 이보다 공기온도가 더 낮은 경우에는 복사표면의 한계 온도가 더 높아져도 된다는 연구 결과²⁶⁾가 도출되었으므로, 실내 온도가 20°C 이하로 유지되는 대상

25) 김현중, “사무소 건물의 외주부 산정법에 따른 열부하 패턴”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, vol. 27, no. 1, 2007, p.1030.

공간에 좀 더 완화된 한계온도 기준을 적용하여 적용 가능한 케이스로 평가하고자 하였다. 창문의 열관류율은 일반적으로 건물에 적용되는 창문인 일반 복층유리를 적용하였으며 창문의 수직 높이는 일반적인 오피스 건물에서 한 층의 천장고 높이로 적용하였다.

<표 3.5> 시뮬레이션 케이스

Case	바닥 복사난방 조건		대상공간 조건		
	발열면적에 따른 외주부 깊이 [m]	표면온도 [°C]	실의 깊이 [m]	창문 조건	
				열관류율 [W/m ² K]	높이 [h]
case 1.1	1.0	41.0	7.0	2.7	3.0
case 1.2	2.0	31.2	7.0	2.7	3.0
case 1.3	3.0	27.7	7.0	2.7	3.0
case 1.4	7.0	23.6	7.0	2.7	3.0

3.4.3 창문의 계획인자에 따른 downdraft

Downdraft에 영향을 미치는 창문의 계획 인자는 표면온도 및 수직 높이이며, 이와 같은 조건에 따라 대상공간에서의 최대 기류속도의 분포 및 공기 온도 분포가 달라진다.

따라서 창문의 수직 높이 및 열관류율에 따른 draft rate 수치의 높이와 너비의 양상을 분석하고자 하였다.

가. 창문의 열관류율

창문의 열관류율이 낮아짐에 따라 draft rate의 높이와 너비의 변화를 평가하고자 하였다. 따라서 다음과 같이 열관류율을 로이 복층 유리 수준으로 낮춘 1.75W/m²K 수준으로 적용하였을 때 시뮬레이션 케이스의 조건은 다음 <표3.6>과 같다.

26) Wang Z et al, "Modeling thermal comfort with radiant floors and ceilings", "4th Indoor Environmental Quality(IEQ)", 2009, pp.1-8.

<표 3.6> 시뮬레이션 케이스

Case	바닥 복사난방 조건		대상공간 조건		
	발열면적 [m]	표면온도 [°C]	실의 깊이 [m]	창문 조건	
				열관류율 [W/m ² K]	높이 [h]
case 2.1	1.0	34.1	7.0	1.75	3.0
case 2.2	2.0	27.5	7.0	1.75	3.0
case 2.3	3.0	25.2	7.0	1.75	3.0
case 2.4	7.0	22.4	7.0	1.75	3.0

나. 창문의 높이

창문의 계획 인자인 수직 높이(h)가 높아졌을 때의 draft rate의 높이와 너비를 평가하고자 하였다. 따라서 다음 표와 같이 천장고가 오피스 건물의 복층 높이인 6.0m로 높아진 상태에서 기존의 경우와 동일한 창문의 열관류율인 2.7W/m²K를 적용한 케이스를 평가하였다.

그러나 창문의 높이가 높아졌을 경우 draft rate의 수치가 높아지기 때문에 downdraft를 억제하기 어려울 것으로 판단하였고, 따라서 창문의 높이가 높아졌을 때 더 낮은 열관류율의 창문을 적용하여 downdraft의 억제 가능성을 판단하기 위하여 창문의 열관류율을 로이 복층 유리 수준인 1.75W/m²K로 낮춘 적용한 케이스를 평가하고자 하였다. 이와 같은 조건으로 선정된 케이스의 조건은 다음 <표3.7>과 같다.

<표 3.7> 시뮬레이션 케이스

Case	바닥 복사난방 조건		대상공간 조건		
	발열면적에 따른 외주부 깊이 [m]	표면 온도 [°C]	실의 깊이 [m]	열관류율 [W/m ² K]	높이 [h]
case 3.1	2.0	41.0	7.0	2.7	6.0
case 3.2	3.0	34.5	7.0	2.7	6.0
case 3.3	7.0	26.7	7.0	2.7	6.0
case 3.4	2.0	34.1	7.0	1.75	6.0
case 3.5	3.0	29.8	7.0	1.75	6.0
case 3.6	7.0	24.5	7.0	1.75	6.0

3.5 소결

Downdraft에 영향을 미치는 바닥 복사난방의 영향 인자는 발열면적 및 표면온도이며, 실내 공간에 바닥 복사난방이 적용되었을 때 downdraft를 평가하기 위해서는 downdraft 현상에 영향을 주는 창문의 계획 인자인 열관류율 및 수직 높이 조건을 고려해야 한다. 또한 바닥 복사난방의 영향인자와 창문의 계획인자에 따른 downdraft에의 영향만을 고려하기 위해 그 외의 요소는 고정시키거나 평가에서 제외하고자 하였다.

따라서 본 장에서는 바닥 복사난방의 영향 인자에 따라 downdraft에 미치는 영향을 파악하였으며, 이때 창문의 계획 인자에 따른 영향을 파악할 수 있도록 시뮬레이션을 통한 평가 케이스를 도출하였다.

평가를 위해서 CFD 시뮬레이션을 통한 해석을 수행하였으며 대상 공간 및 경계 조건을 설정하여 downdraft 평가 모델을 구성하였다.

제 4 장 Downdraft 평가 및 바닥 복사난방 계획 지침

4.1 개요

Downdraft를 고려하여 바닥 복사난방 적용 시 downdraft에 영향을 미칠 수 있는 대상 공간의 조건을 고려하여 계획을 수립해야 한다. 또한 대상 공간에 적용된 바닥 복사난방이 downdraft를 억제할 수 있는지에 대해 판단할 수 있어야 한다.

본 장에서는 앞서 도출한 평가 인자와 평가 모델을 바탕으로 각각의 평가 인자가 downdraft에 미치는 영향을 평가하였다. 먼저 바닥 복사난방이 적용된 공간에서 각각의 영향 인자 및 계획 인자에 따른 기류 현상을 파악하였다. 또한 계획 인자를 고려하여 바닥 복사난방이 적용된 공간에서 downdraft에 대한 평가를 수행하였다.

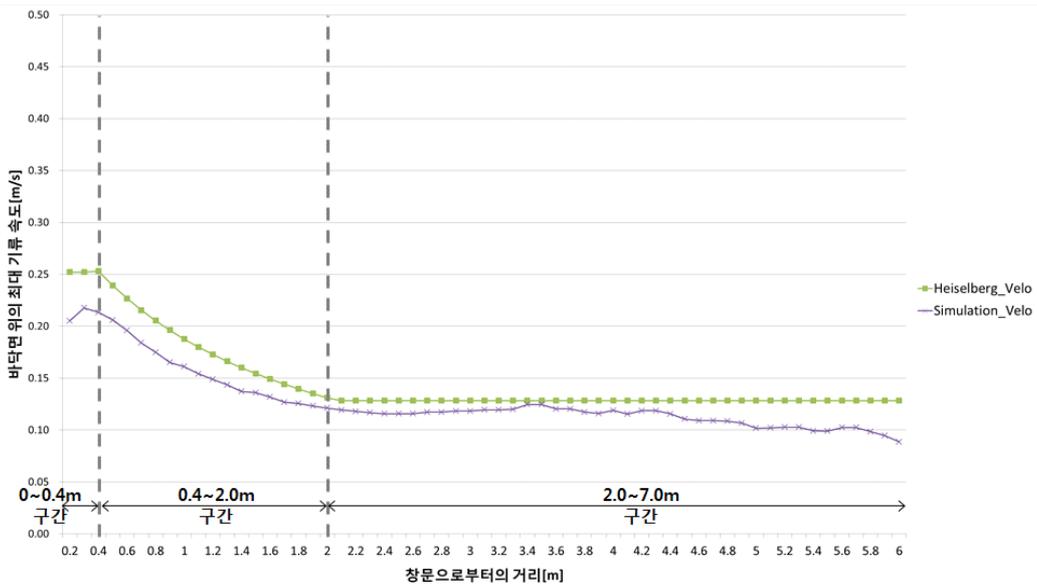
평가를 통해 도출된 결과를 바탕으로 대상 공간의 계획 인자에 따라 바닥 복사난방 적용 시 downdraft에 대해 만족하고자 하는 쾌적의 수준에 따라 적용 계획 시 참고가 될 수 있는 계획 지침을 마련하였다.

4.2 바닥 복사난방이 downdraft에 미치는 영향

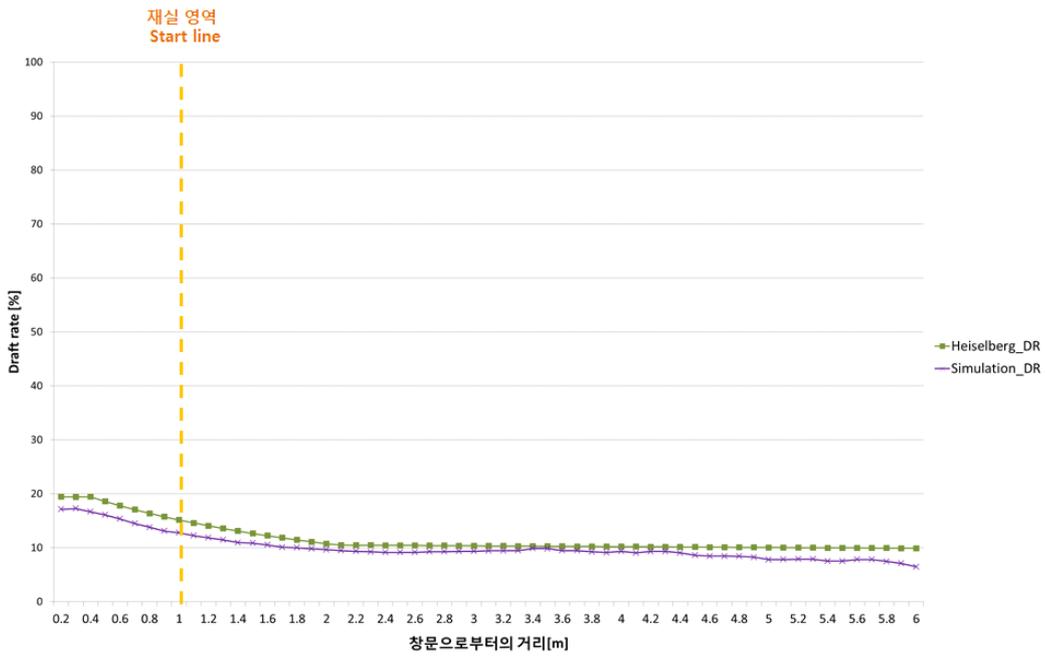
4.2.1 기존 연구 결과와의 비교를 통한 검증

바닥 복사난방의 적용에 따른 downdraft 분석을 위한 시뮬레이션 평가에 앞서 Heiselberg의 실험과 동일한 조건의 시뮬레이션을 모사하여 시뮬레이션 평가의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 따라서 Heiselberg의 실험에서 도출한 수식을 통해 계산한 최대 기류 속도 분포와 시뮬레이션 대상 공간 내의 동일한 위치에서 측정된 최대 기류 속도 분포에 대한 비교 분석을 수행하였다.

분석 결과 다음 [그림4.1]과 같은 기류 속도 분포가 나타났다.



[그림4.1] 최대 기류 속도 분포



[그림4.2] Draft rate 분포

시뮬레이션의 최대 기류 속도 분포는 Heiselberg의 실험에서 도출된 수식에서의 최대 기류 속도 분포와 비슷한 경향을 나타내었으며 두 결과 간에 최대 0.03m/s정도까지의 오차가 있었지만 draft rate 수치 상에서 보았을 때 2~3% 정도의 미미한 차이를 보였으므로 시뮬레이션의 결과가 어느 정도 신뢰성이 있는 것으로 판단되었다.

4.2.2 바닥 복사난방의 영향 인자에 따른 downdraft

바닥 복사난방의 영향 인자인 표면온도와 발열 면적에 따라 draft rate 수치 분포의 높이와 너비가 영향을 받는다. 따라서 영향 인자에 따라 draft rate의 높이와 너비에 미치는 영향의 분석을 위한 시뮬레이션 결과를 도출하였다. 3장에서 설정한 평가 대상 공간의 모델 조건에 따라 외주부 및 바닥 전체에 바닥 복사난방을 적용한 케이스에 대한 평가를 수행하였다.

가. 기류 현상

바닥 복사난방의 발열면적 및 표면온도 조건에 따라 형성된 기류의 모습은 다음 <표4.1>과 같다. 발열면적이 가장 적고 표면온도가 가장 높게 적용된 조건인 case1-1에서는 하강하는 차가운 공기와 바닥에서 발생하는 따뜻한 공기 사이의 온도차가 크게 형성됨에 따라 바닥면 근처에서의 기류의 속도가 빠르게 나타났다. 차가운 공기가 바닥을 타고 실내로 이동하면서 온도가 빨리 상승하게 됨에 따라 바닥에서의 따뜻한 기류는 창문과 멀리 떨어지지 않은 곳에서 상승 흐름을 나타내었다. 이 기류는 차가운 공기가 하강한 후 밀도가 낮아진 창문 쪽 공간으로 유인되는 현상이 크게 발생하였다. case1-2에서는 좀 더 발열면적이 넓게, 표면온도가 더 낮게 적용되었는데 차가운 공기와 따뜻한 공기의 온도차가 줄어들어 따라 바닥면 근처에서의 기류의 속도가 감소했으

며 차가운 공기의 온도가 좀 더 늦게 상승됨에 따라 상승 기류가 창문으로부터 좀 더 멀리 떨어진 곳에서 발생하여 상승 기류의 창문으로의 유인 현상이 약화되는 모습을 볼 수 있었다. 기류의 상승 흐름은 바닥 복사난방이 적용된 직상부에서 발생하지 않고 차가운 기류의 밀려 유입하는 힘에 의해 실 깊숙이 밀려나서 형성되었다.

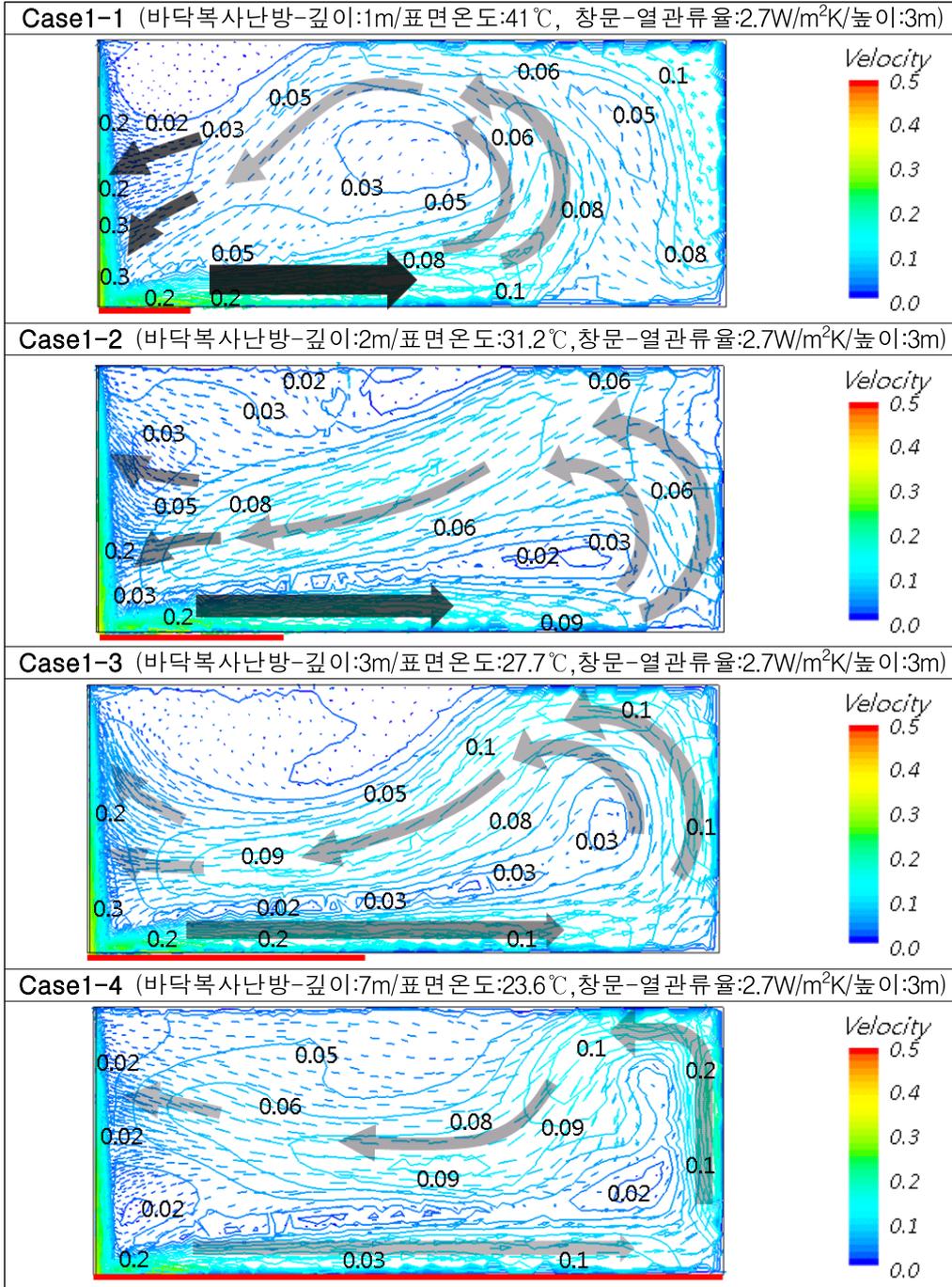
나. 기류 속도 분포

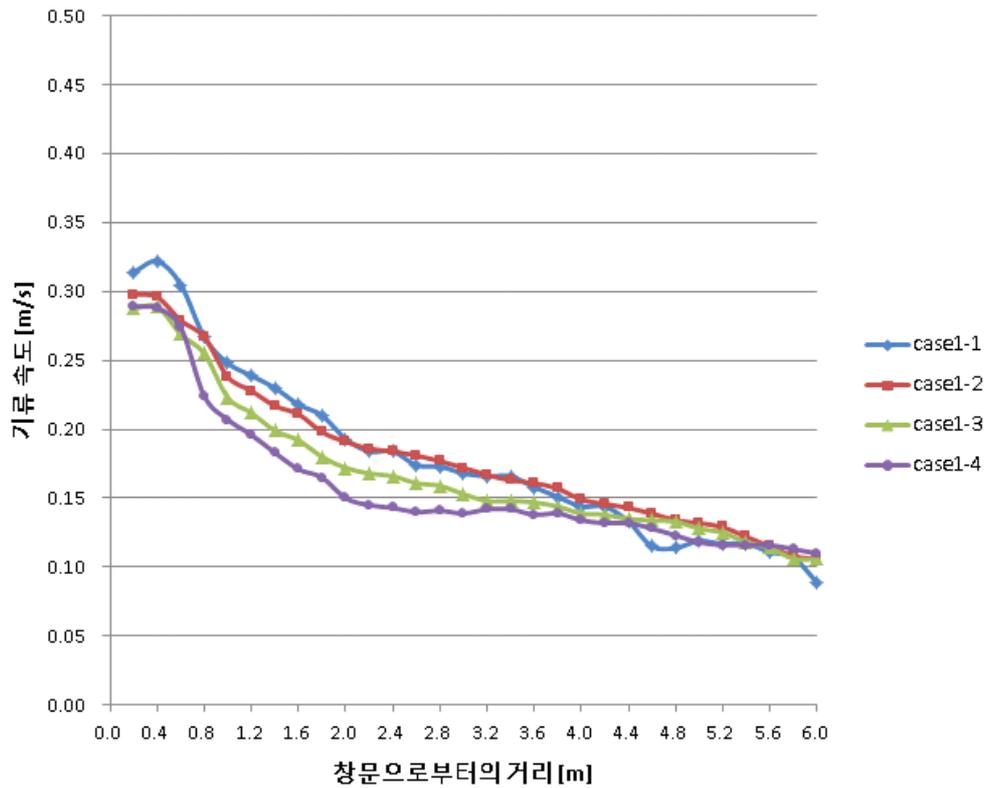
각각의 케이스에 따라 대상 공간에서 바닥면 위에서의 최대 기류 속도의 분포를 다음 [그림4.3]과 같이 도출하였다. 앞에서의 기류 현상 분석결과와 같이 바닥 복사난방이 가장 좁은 면적에 적용된 case1-1의 경우 창문 근처에서의 최대 기류 속도가 가장 높게 나타났으며 case1-2, 1-3, 1-4의 경우로 갈수록 발열면적이 넓어지고 표면온도가 낮아짐에 따라 자연 대류 흐름의 속도가 낮아져 점점 기류 속도가 감소하였다.

다. 공기 온도 분포

각각의 케이스에 따른 바닥면 위에서의 최저 공기 온도의 수치를 다음 [그림 4.4]와 같이 도출하였다. 예상했던 대로 바닥 복사난방의 표면온도가 가장 높게 적용된 케이스인 case1-1의 경우 바닥면 위에서의 최저 공기 온도가 가장 높은 수치로 나타났으며 차가운 기류의 유입을 억제하여 창문으로부터 약 1.6m거리 이후에서는 실내 평균온도인 20℃ 정도로 안정적인 공기 온도 분포가 형성되었다. 반면 case1-4의 경우 차가운 기류의 유입을 억제하지 못하여 바닥면 위의 최저 공기 온도가 실내에서 전체적으로 가장 낮게 형성되었다. 다음 <표4.2>는 실내의 수직 단면에서의 공기 온도 분포의 모습이다.

<표4.13> 바닥 복사난방의 적용에 따른 기류





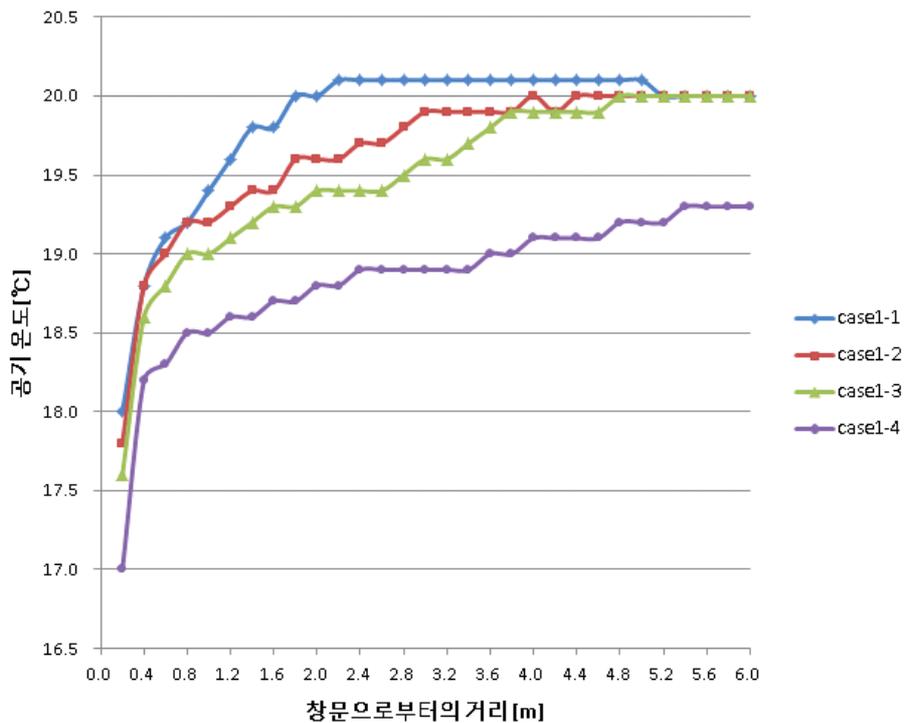
[그림4.3] 바닥 복사난방의 적용에 따른 기류 속도 분포

실내의 수직 단면에서의 온도 분포를 보면 바닥 복사난방의 표면온도가 가장 높게 적용된 case1-1의 경우 외피 근처에서 차가운 기류가 억제되어 실내 설정 온도에 근접한 온도의 공기가 실내에 전체적으로 분포하였다. 반면 case1-4의 경우 낮은 온도의 공기가 실 깊숙이 유입되었다.

라. Draft rate 분포

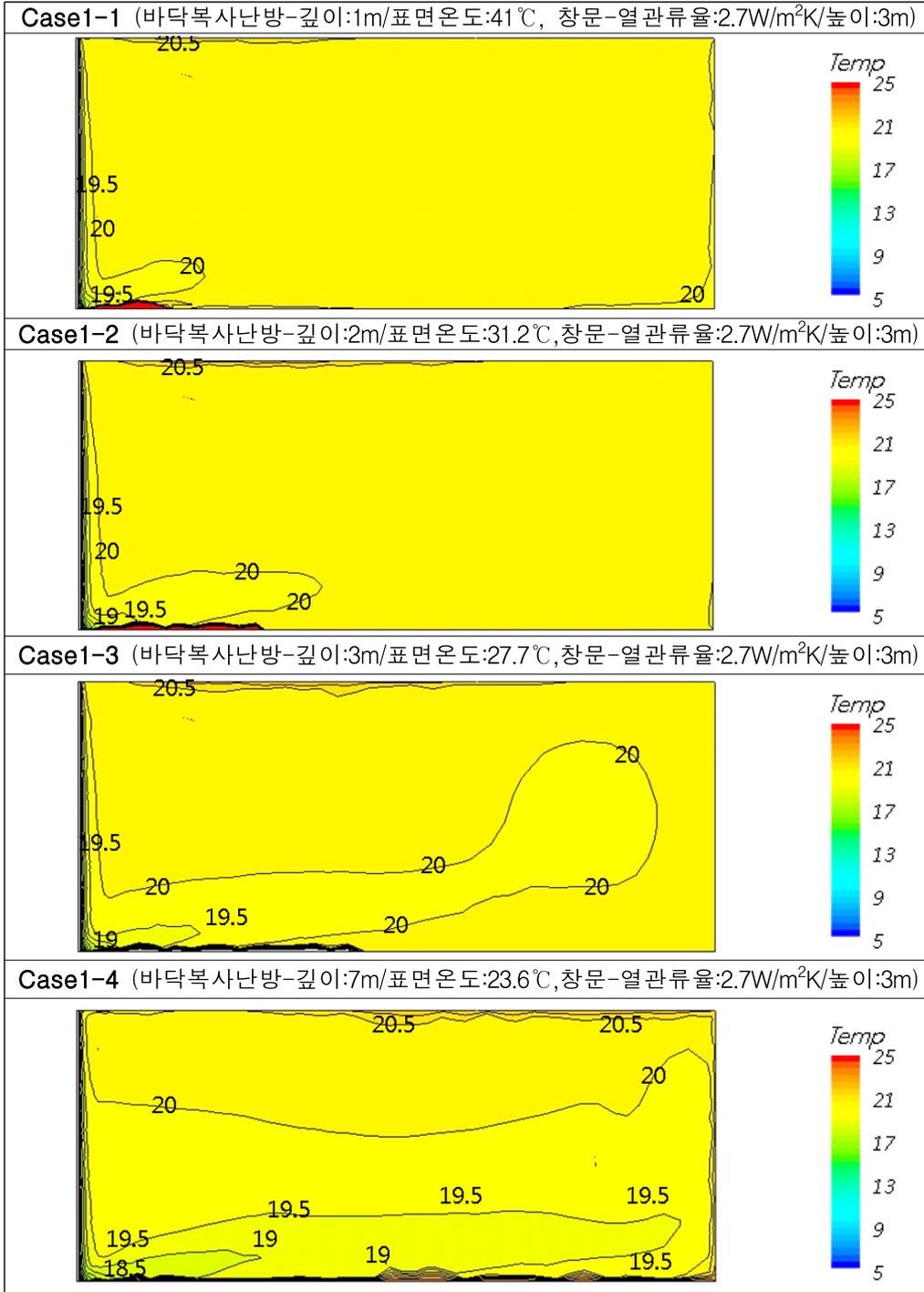
각각의 케이스에 따른 바닥면 위에서의 최대 draft rate의 수치를 다음 [그림 4.5]와 같이 도출하였다. 바닥면 전체에 바닥 복사난방이 적용된 경우인 case1-4의 경우 낮은 표면온도로 인해 차가운 기류를 억제하지 못하여 draft rate의 수치가 가장 높게 형성되었다.

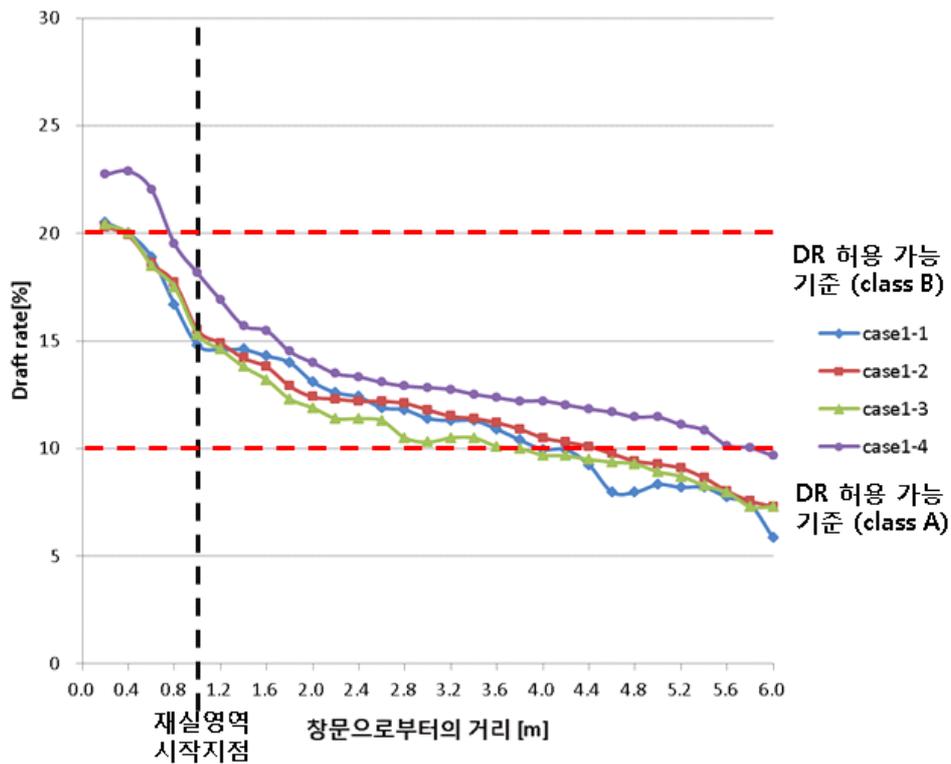
바닥 복사난방의 발열면적이 가장 좁게 적용된 case1-1의 경우 기류 속도가 가장 높게 분포하였으나 바닥 근처의 공기의 온도를 높게 형성해줌에 따라 draft rate 수치가 상대적으로 낮게 나타났다.



[그림4.4] 바닥 복사난방의 적용에 따른 공기 온도 분포

<표4.14> 바닥 복사난방의 적용에 따른 공기 온도 분포

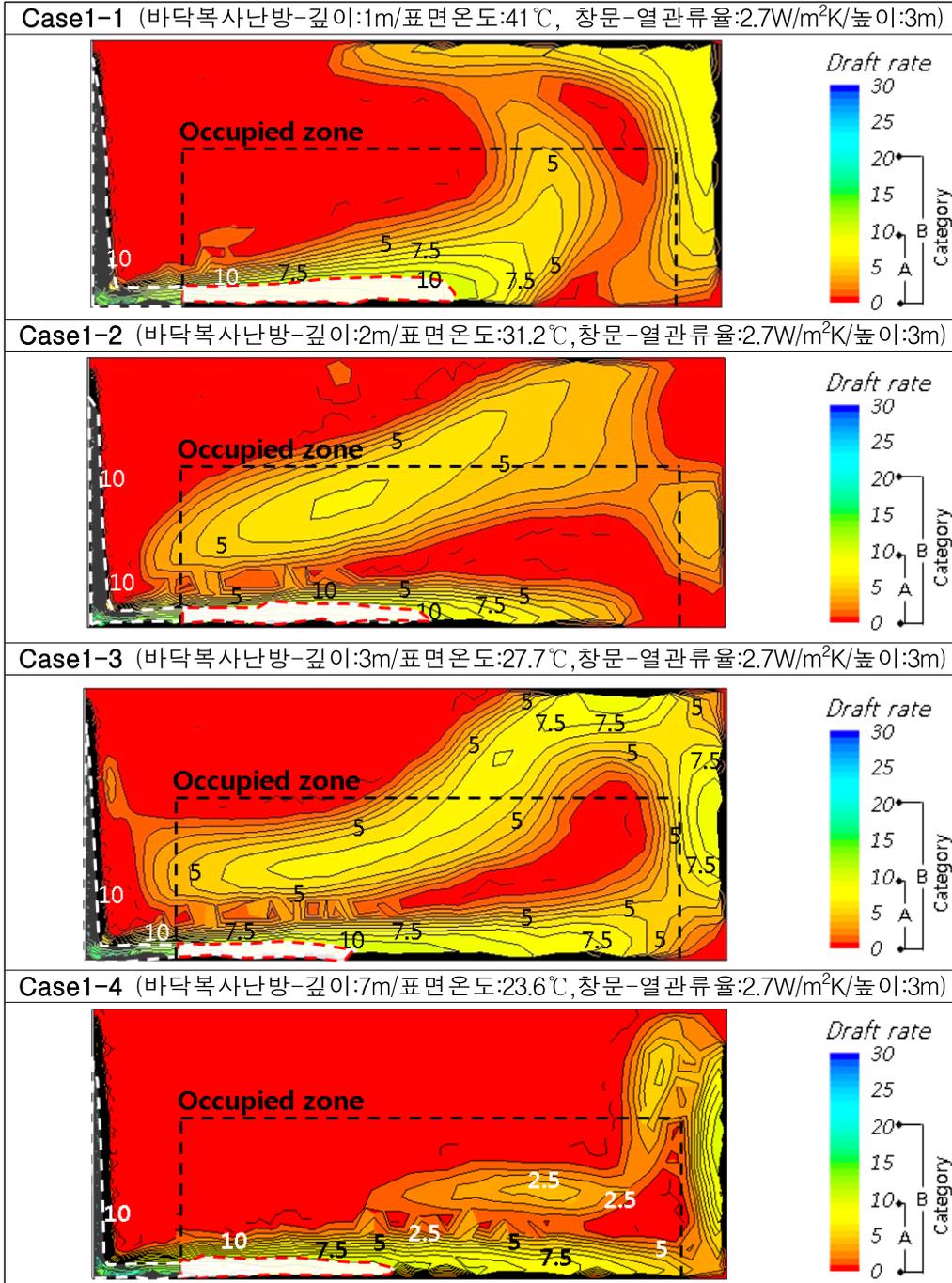




[그림4.5] 바닥 복사난방의 적용에 따른 draft rate 분포

다음 <표4.3>은 실내의 draft rate의 수직 단면 분포의 모습으로, 모든 케이스의 경우 Draft rate 범위에 따른 단계적인 class가 제시된 <표2.3>에서 일반적으로 적용되는 기준인 class B의 기준을 만족하였다. Case1-3의 경우 재실 영역에서 draft rate 수치가 높은 영역이 가장 좁게 나타났는데, 이는 적절한 높이의 발열면적 및 표면온도를 통해 자연대류 혼합 흐름이 더 높지 않게 형성되었으며 기류의 유인 현상이 약화되어 기류 속도가 상대적으로 높지 않게 형성되었으며 바닥 복사난방이 바닥 전체에 적용된 경우인 case1-4에 비해 차가운 기류의 온도를 충분히 높여줄 수 있었기에 draft rate의 수치가 낮게 나타난 것으로 판단할 수 있었다.

<표4.15> 바닥 복사난방의 적용에 따른 draft rate 분포



4.2.3 창문의 계획인자에 따른 downdraft

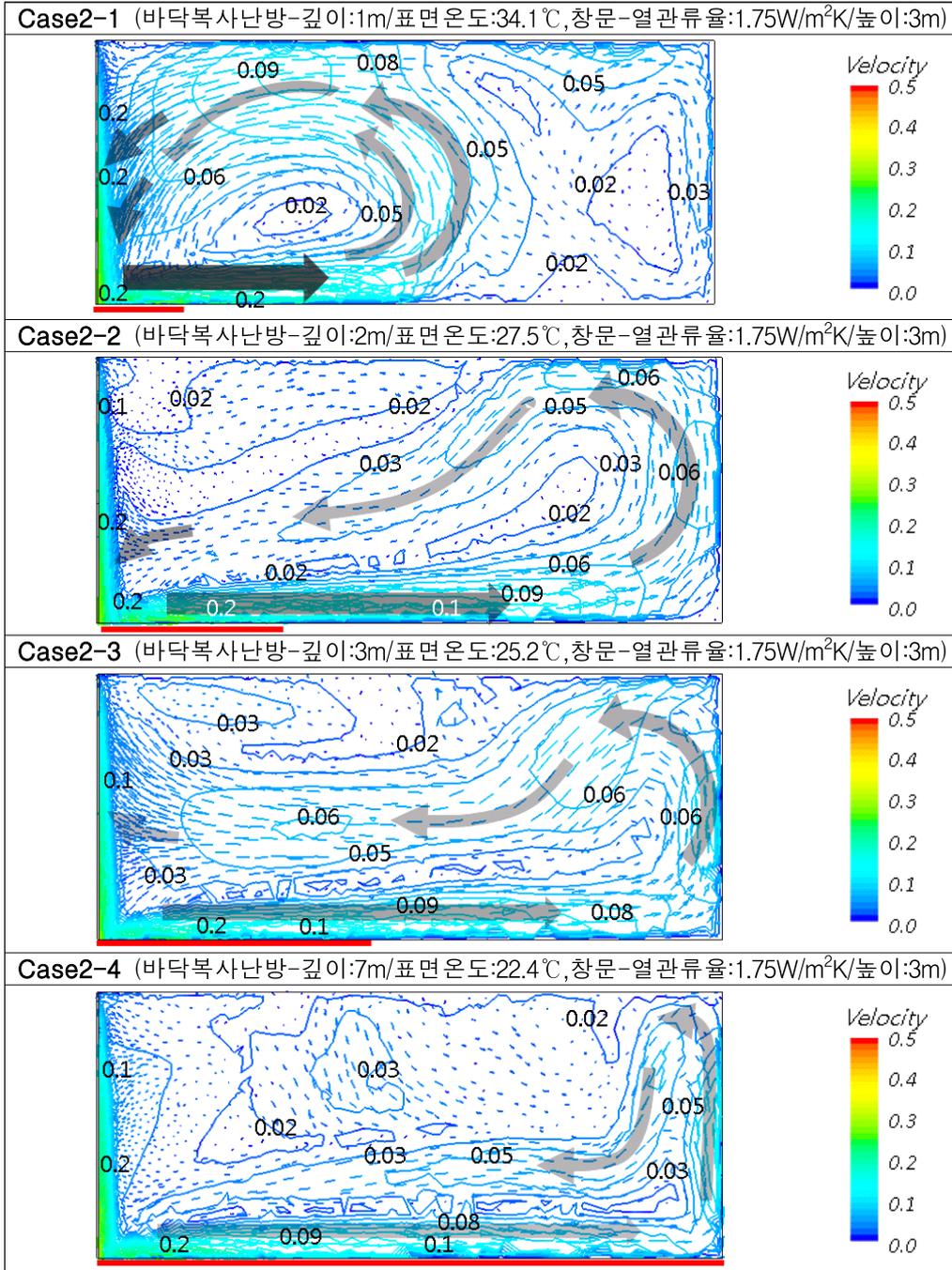
창문의 계획인자인 표면온도와 수직 높이에 따라 draft rate 발생에 미치는 영향의 분석을 위한 시뮬레이션 결과를 도출하였다. 3장에서 설정한 평가 대상 공간의 모델 조건에 따라 창문의 열관류율 조건 및 수직 높이 조건을 적용한 케이스에 대한 평가를 수행하였다. 다음은 4.2.2의 평가 케이스에서보다 향상된 열관류율 조건이 적용된 케이스의 시뮬레이션 분석 결과이다.

가. 기류 현상

로이 복층 유리가 적용된 공간에서는 일반 복층 유리가 적용된 경우보다 높은 창문 표면온도 및 낮은 바닥 복사난방의 표면온도로 인해 창문 및 바닥 복사난방의 영향을 받아 형성되는 기류 사이의 온도차가 감소하였으며, 따라서 바닥면에서의 기류 이동 속도가 더 낮게 나타났다.

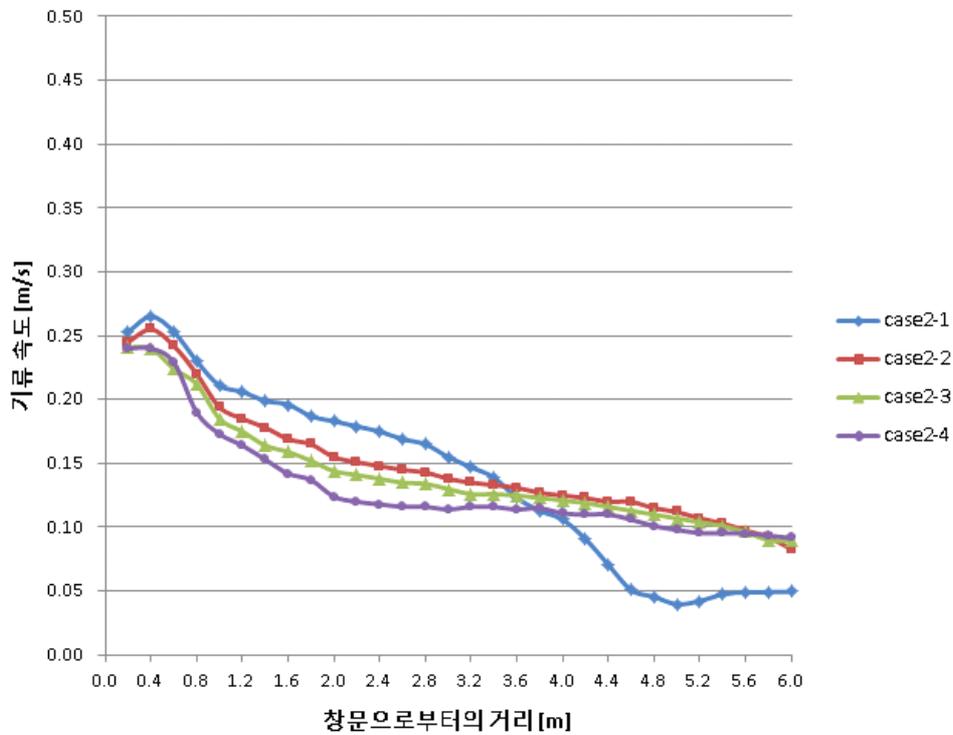
한편 기류의 흐름은 앞의 케이스와 비슷한 경향으로 나타났는데, 상승 기류의 창문으로의 유인은 바닥 복사난방의 면적이 가장 좁게 적용된 case2-1에서 가장 활발하게 발생하였다. 바닥 복사난방의 발열면적이 점점 넓게 적용되고 표면온도가 낮게 형성됨에 따라 바닥 면 위에서의 기류 속도가 더 낮게 나타났다으며 상승 기류의 흐름이 약화됨에 따라 창문 쪽으로의 상승 기류의 유인 현상이 약화되었다.

<표4.16> 창문의 열관류율이 낮은 조건에서의 기류



나. 기류 속도 분포

각각의 케이스에 따라 대상 공간에서 바닥면 위에서의 최대 기류 속도의 수치를 다음 [그림4.6]과 같이 도출하였다. 일반 복층 유리가 적용된 공간에서는 창문 근처에서의 기류의 속도가 0.3m/s 이상으로 형성되었으나 창문의 열관류율이 높아짐에 따라 창문의 표면온도가 상승하여 창문 근처에서의 최대 기류 속도가 0.3m/s 이하로 감소하였다.

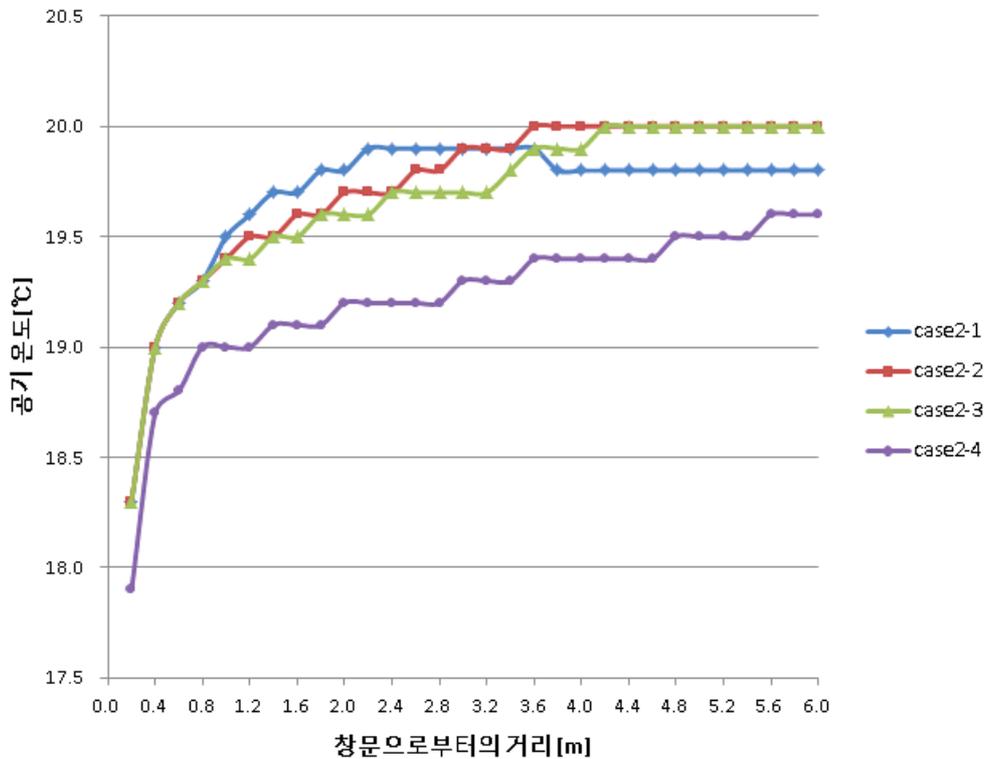


[그림4.6] 창문의 열관류율이 낮은 조건에서의 기류 속도 분포

바닥 복사난방이 가장 좁은 면적에 적용된 case2-1의 경우 창문 근처의 바닥 면에서의 최대 기류 속도가 가장 높게 나타났으나 실내 쪽 바닥면에서의 기류 속도는 감소하였으며 바닥 복사난방의 표면온도가 더욱 더 낮게 적용되는 case2-2, 2-3, 2-4에서 점점 기류 속도가 감소하였다.

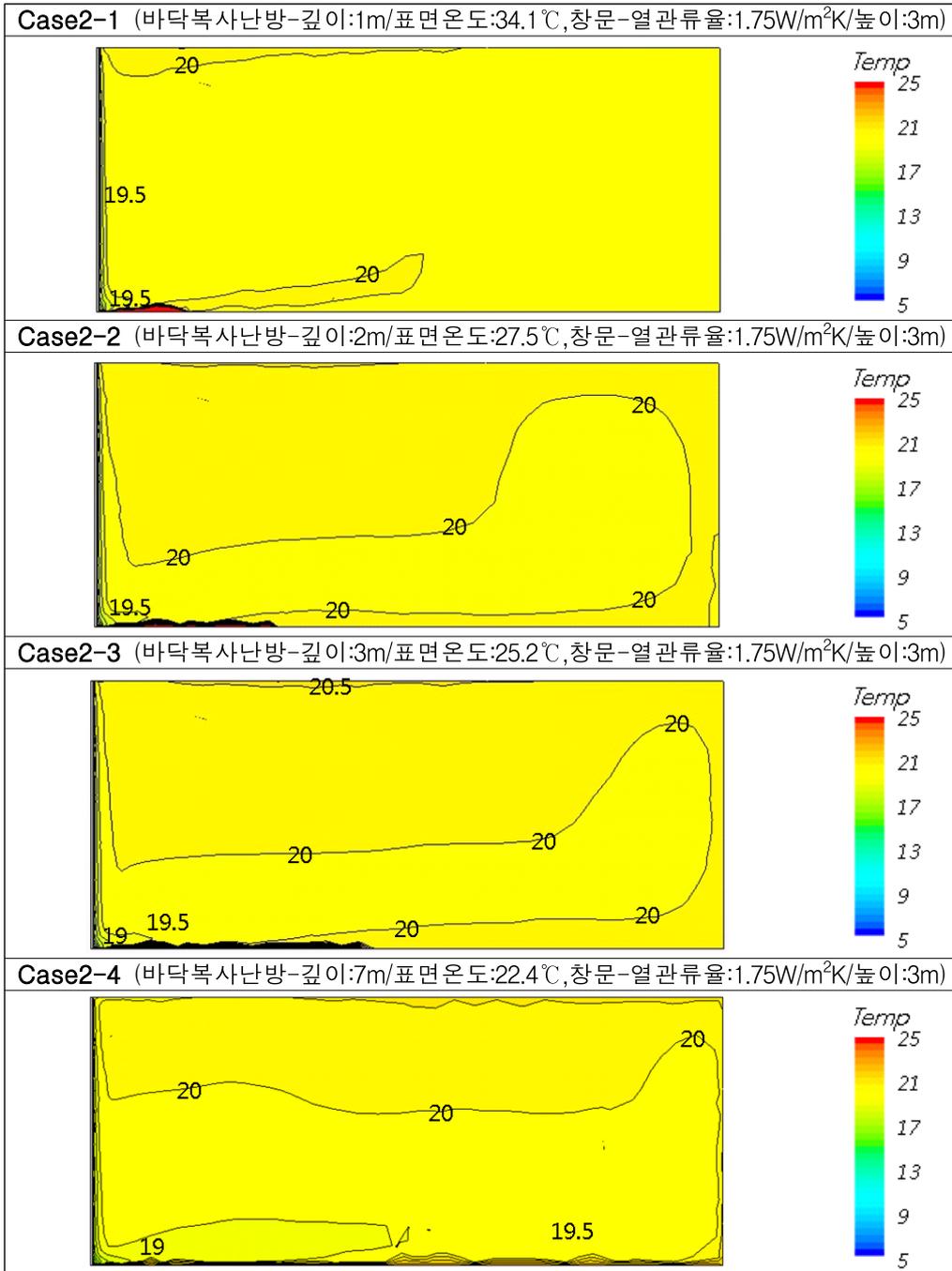
다. 공기 온도 분포

각각의 케이스에 따른 바닥면 위에서의 최저 공기 온도의 수치를 다음 [그림 4.7]과 같이 도출하였다.

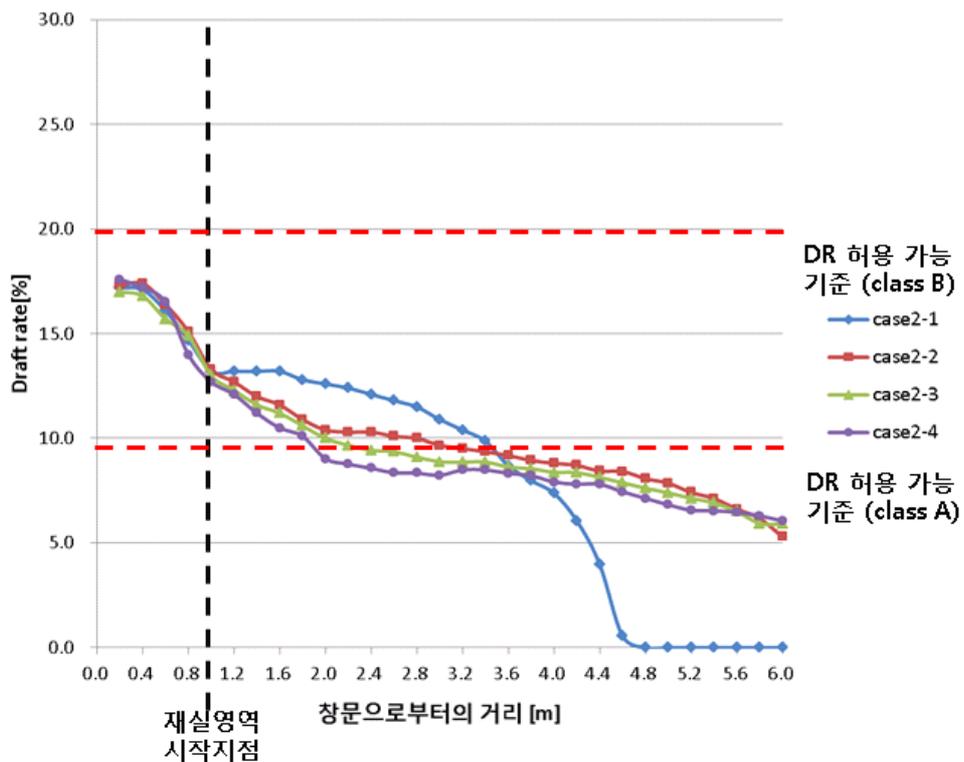


[그림4.7] 창문의 열관류율이 낮은 조건에서의 공기 온도 분포

<표4.17> 창문의 열관류율이 낮은 조건에서의 공기 온도 분포

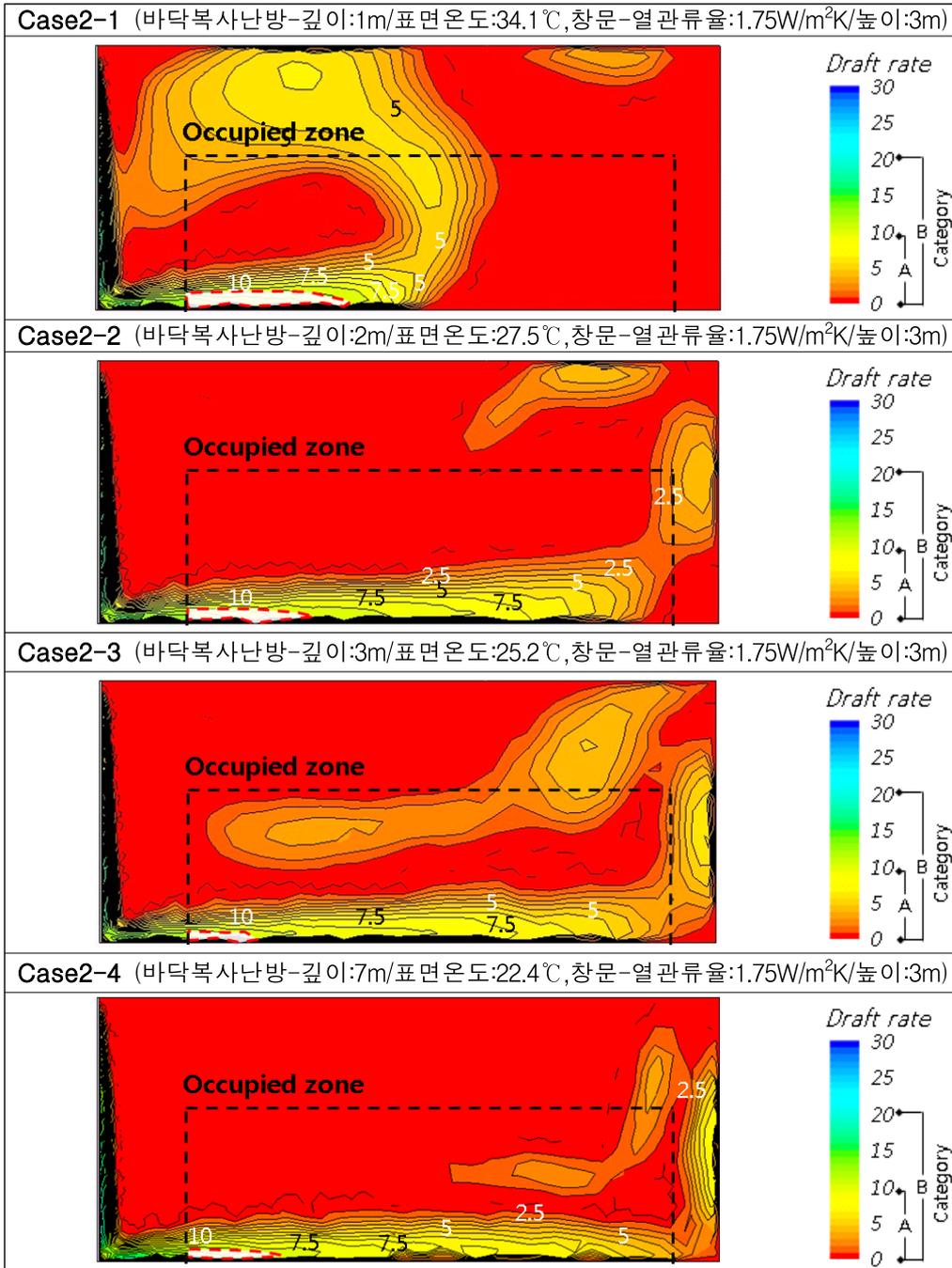


바닥 복사난방의 표면온도가 가장 높게 적용된 케이스인 case2-1의 경우 차가운 기류의 유입을 가장 신속하게 억제하여 창문으로부터 약 1.0m거리 이후에서는 19.5℃ 이상의 공기 온도가 나타나 안정적인 공기 온도의 분포를 보였다. 바닥 복사난방이 바닥 전체에 적용된 case2-4의 경우 차가운 기류의 유입을 막지 못하여 실내 깊숙이 바닥면 위로 낮은 온도의 공기가 존재하였다.



[그림 4.8] 창문의 열관류율이 낮은 조건에서의 draft rate 분포

<표4.18> 창문의 열관류율이 낮은 조건에서의 draft rate 분포



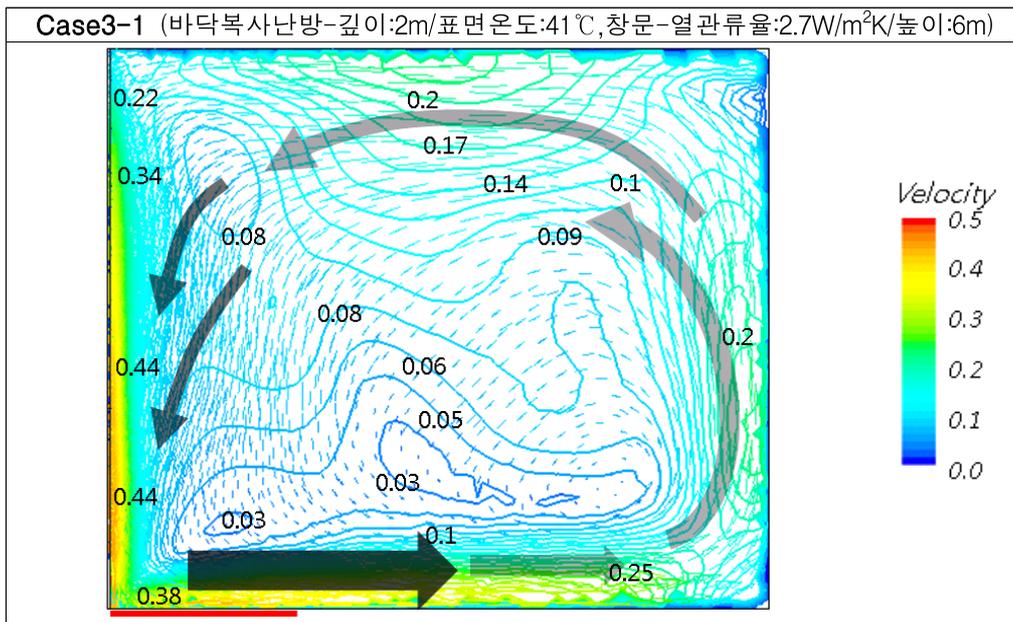
라. Draft rate 분포

실내에서의 draft rate 분포는 다음 [그림4.8]과 같으며, 모든 케이스의 경우 draft rate class B를 만족하는 수준으로 나타났으며 case2-1의 경우 바닥 근처에서의 공기 온도를 가장 높게 형성해주었으나 기류속도가 높게 발생하여 다른 케이스들에 비하여 draft rate의 수치가 다소 높게 나타났다. 실의 수직 단면에서의 draft rate의 분포는 <표4.6>과 같으며 채실영역에서 draft rate의 수치가 높게 나타나는 부분의 너비는 바닥 복사난방의 적용 면적이 넓어질수록 줄어들어 앞장의 분석결과와 차이를 보였다. 따라서 창문의 열관류율 조건이 달라졌을 때는 downdraft 억제를 위한 바닥 복사난방의 적용 면적이 달라짐을 알 수 있었다.

다음으로 창문의 수직 높이에 따른 downdraft 평가를 수행하였다.

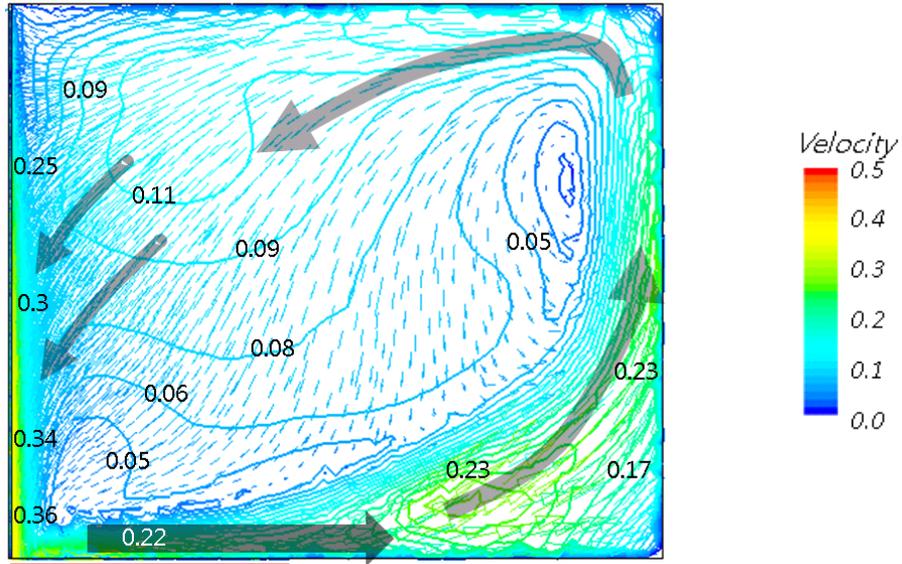
가. 기류 현상

<표4.19> 창문의 수직 높이가 높은 조건에서의 기류 (계속)

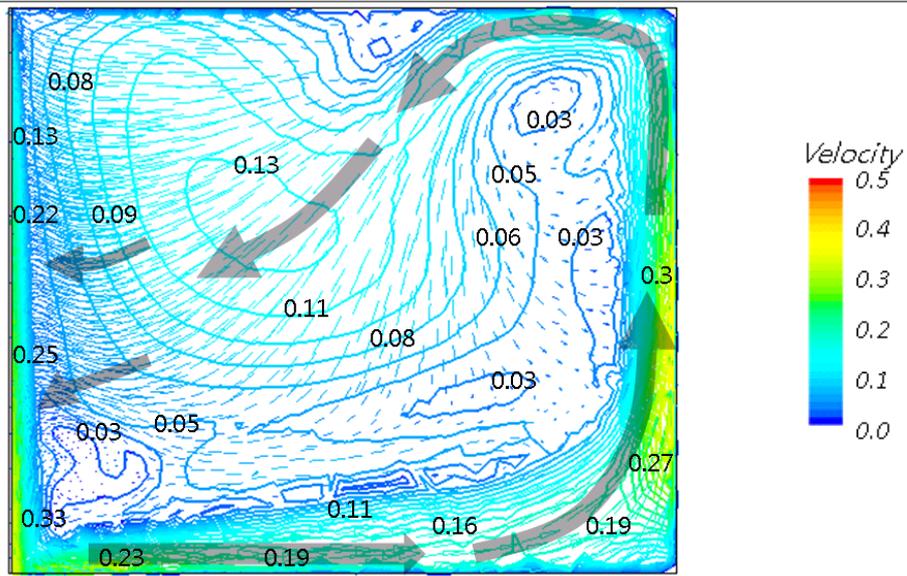


<표4.7> 창문의 수직 높이가 높은 조건에서의 기류

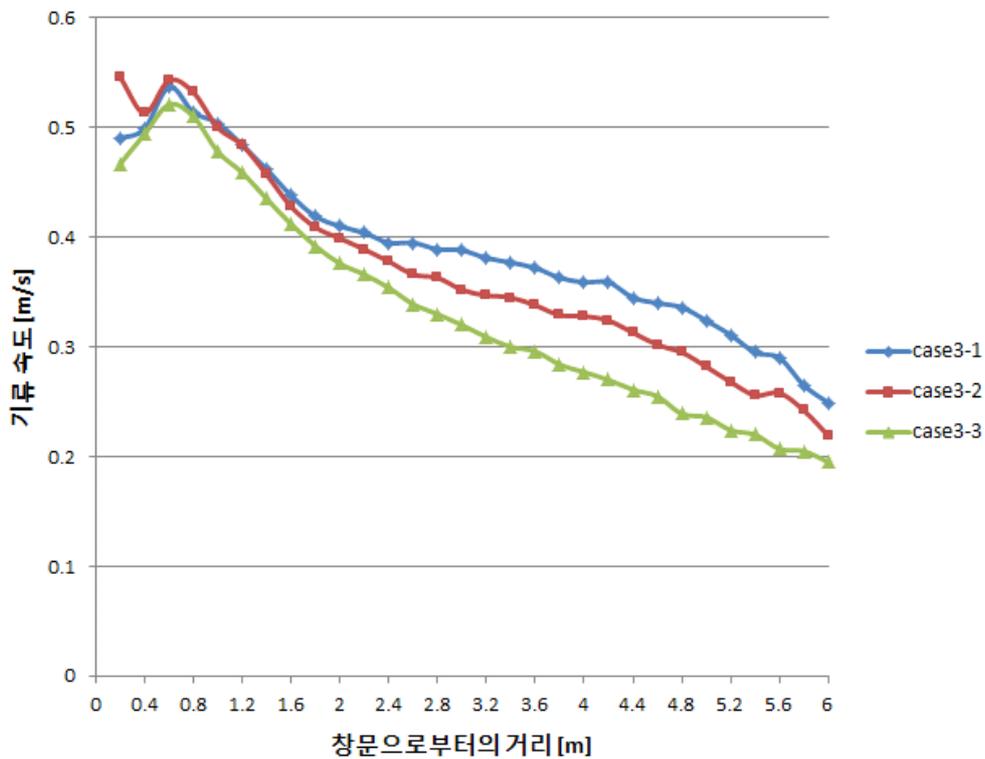
Case3-2 (바닥복사난방-깊이:3m/표면온도:34.5°C,창문-열관류율:2.7W/m²K/높이:6m)



Case3-3 (바닥복사난방-깊이:7m/표면온도:26.7°C,창문-열관류율:2.7W/m²K/높이:6m)



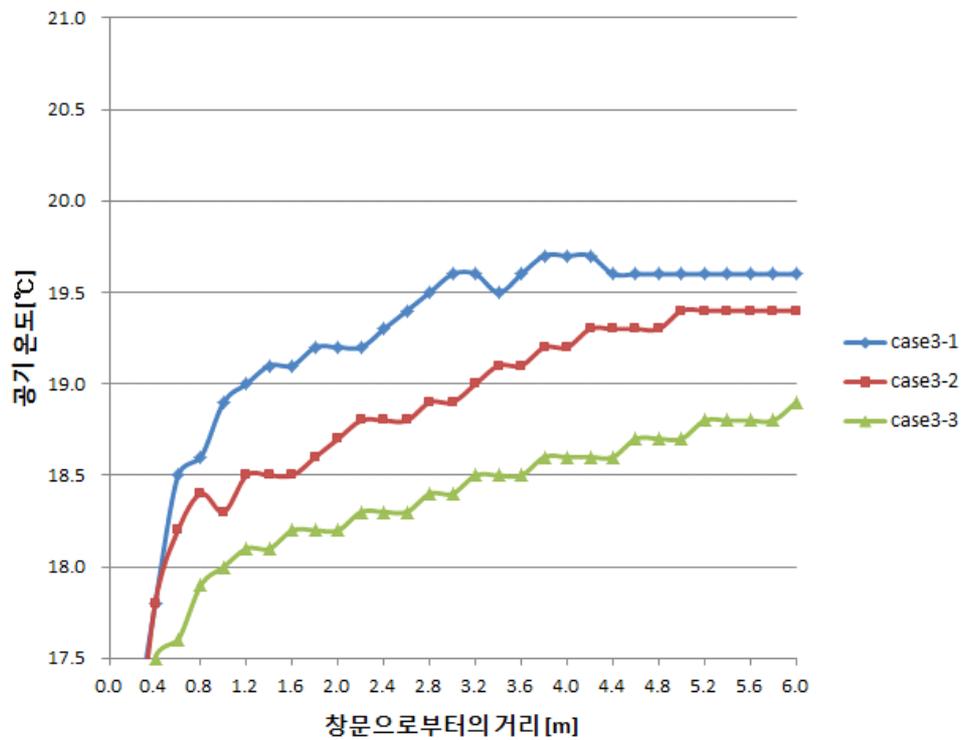
창문의 수직 높이 조건이 높은 공간에서의 시뮬레이션 분석 결과 다음 <표 4.7>과 같은 기류 현상이 나타났다. 창문의 수직 높이가 두 배가 됨에 따라 기류의 속도는 최대 0.5m/s까지 증가하였다. 바닥 복사난방이 가장 적은 면적에 적용된 case3-1의 경우 바닥면 근처에서의 기류의 이동 속도가 가장 빠르게 나타났으며 상승 흐름이 창문 근처로 유인되는 현상이 가장 심하게 발생하여 창문 면에서의 기류의 하강 속도도 가장 빠르게 발생하였다. 바닥 복사난방의 적용 면적이 넓어질수록 창문의 반대쪽 벽 쪽으로 기류의 상승 흐름이 집중되었으며 상승 흐름이 창문으로부터 멀어짐에 따라 창문 근처로의 유인 현상이 감소하였다.



[그림4.9] 창문의 수직 높이가 높은 조건에서의 기류 속도 분포

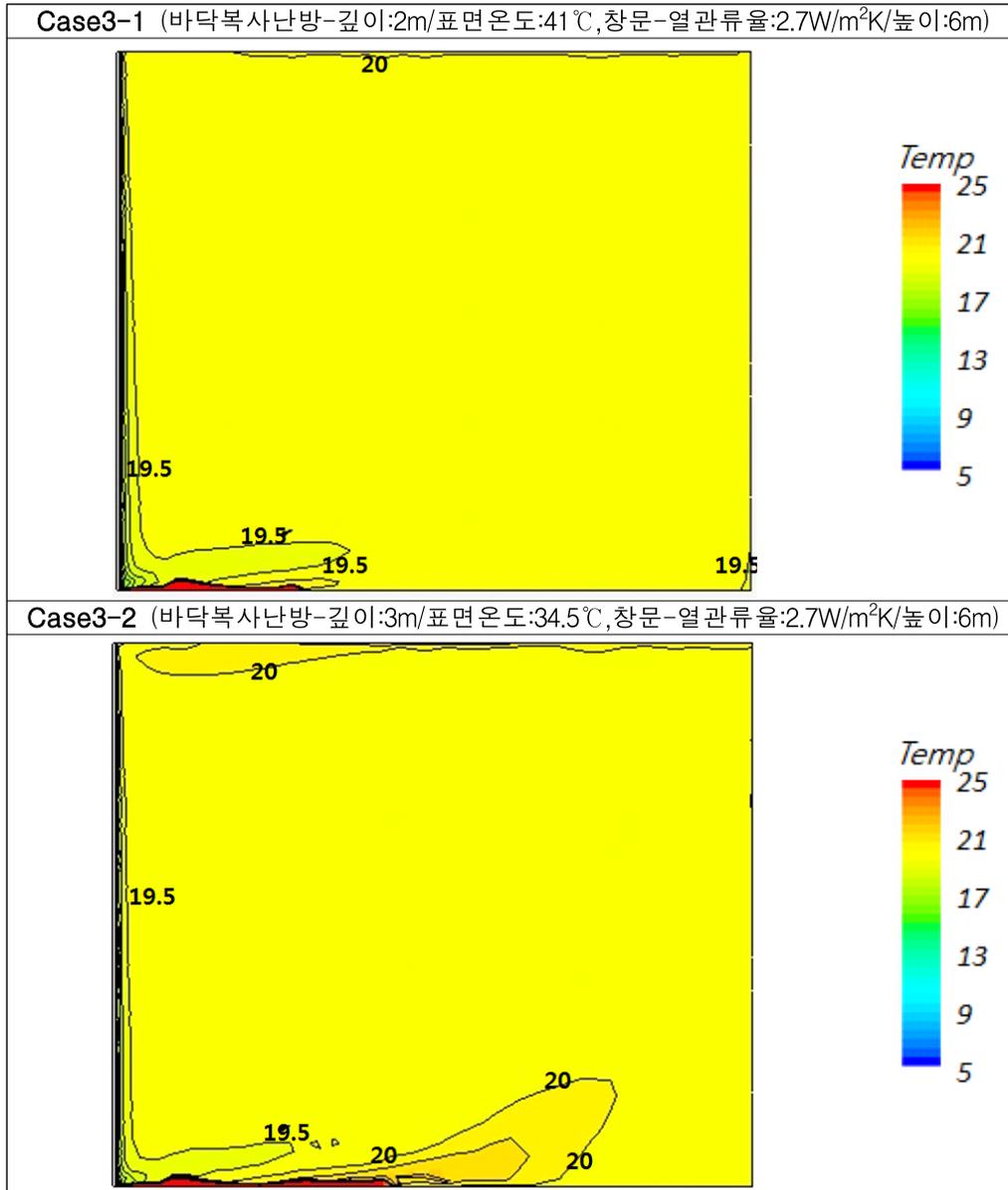
나. 기류 속도 분포

창문의 수직 높이가 높게 적용됨에 따른 기류 속도 분포는 [그림4.9]와 같다. 바닥 복사난방의 발열 면적이 좁고 표면온도가 높을수록 기류 속도가 빠르게 형성되는 것을 알 수 있다. [그림4.10] 및 <표4.8>은 공기 온도 분포로 바닥 복사난방의 표면온도가 높을수록 공기 온도가 높게 형성되는 것을 알 수 있다.

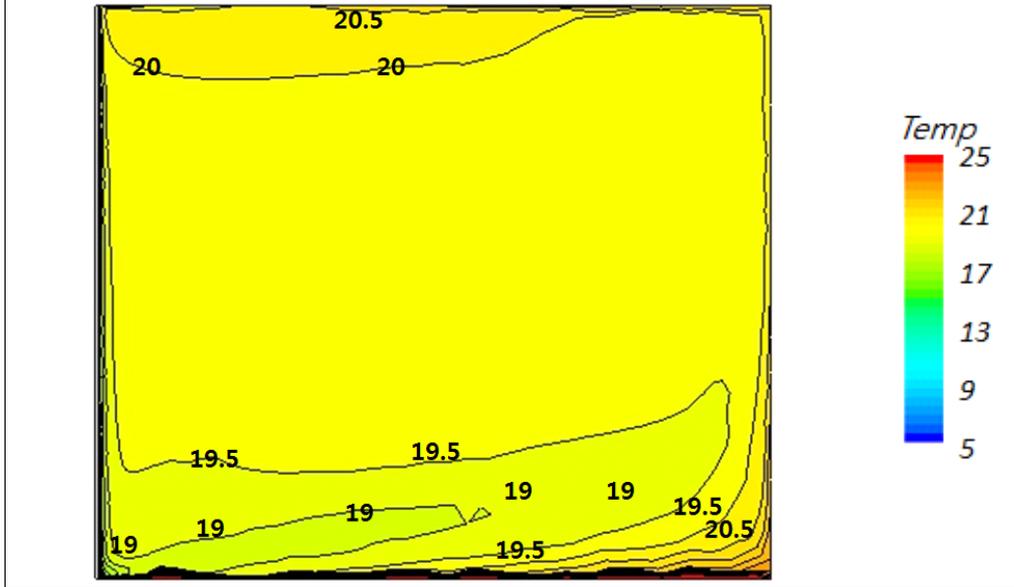


[그림4.10] 창문의 수직 높이가 높은 조건에서의 공기 온도 분포

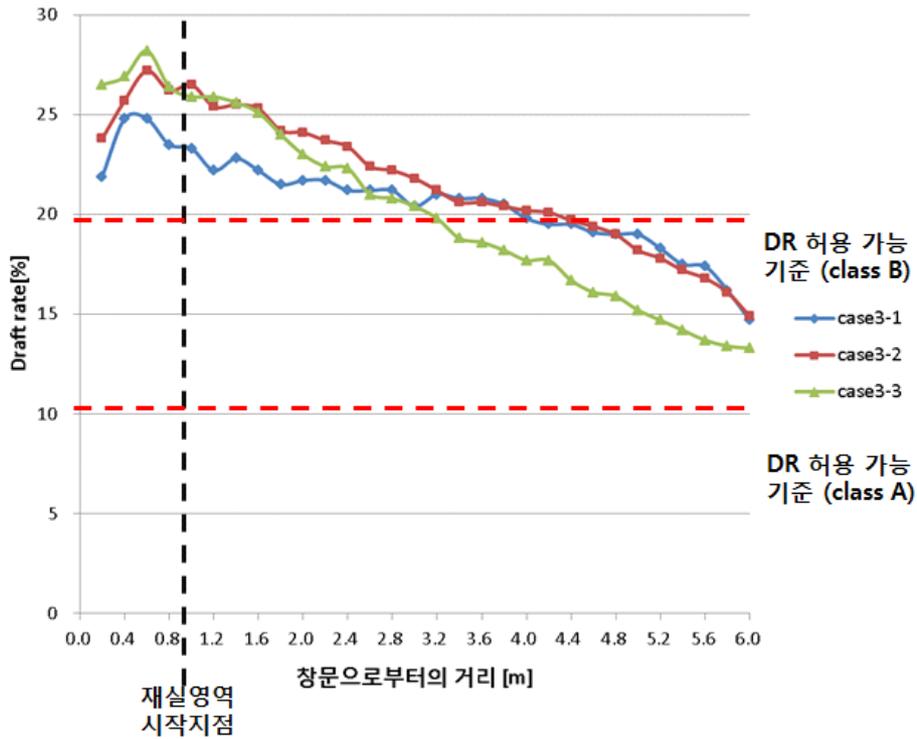
<표4.8> 창문의 수직 높이가 높은 조건에서의 공기 온도



Case3-3 (바닥복사난방-깊이:7m/표면온도:26.7°C,창문-열관류율:2.7W/m²K/높이:6m)



창문의 수직 높이가 높은 조건에서의 draft rate 분포는 [그림4.11]과 같다. 세 케이스 모두 draft rate의 수치가 높게 발생하여 draft rate class B를 만족하지 못하는 수준으로 나타났다. 바닥 복사난방의 발열면적이 넓을수록 실내에서의 draft rate 수치가 낮게 나타났으나, 창문 근처에서는 다른 케이스에 비해 차가운 기류에 온도를 높여주지 못하여 draft rate의 수치가 높게 형성되었다.



[그림4.11] 창문의 수직 높이가 높은 조건에서의 draft rate 분포

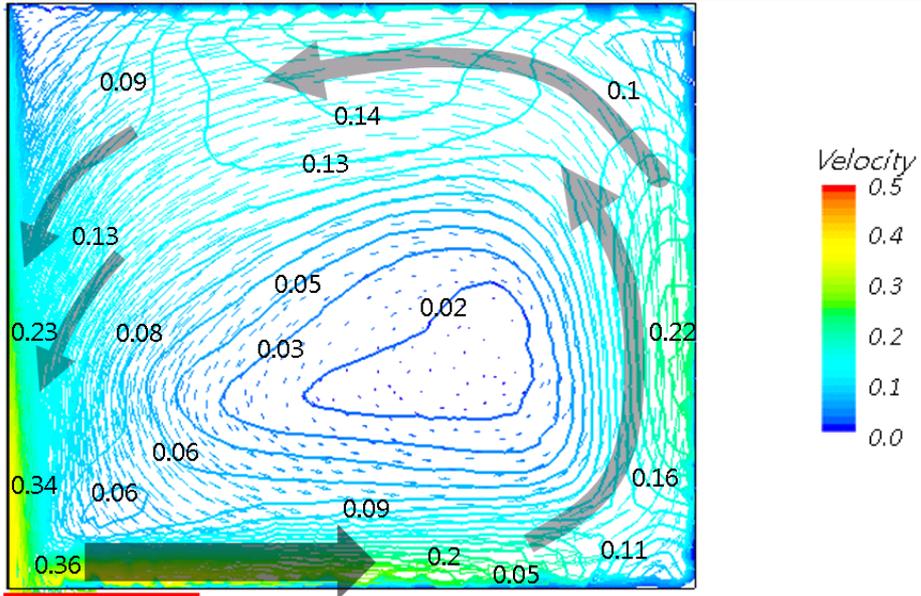
따라서 다음 평가 케이스에서 창문의 수직 높이가 높은 공간에서 창문의 열관류율을 향상시켜 적용하여 draft rate를 감소 측면을 평가하고자 하였다.

가. 기류 현상

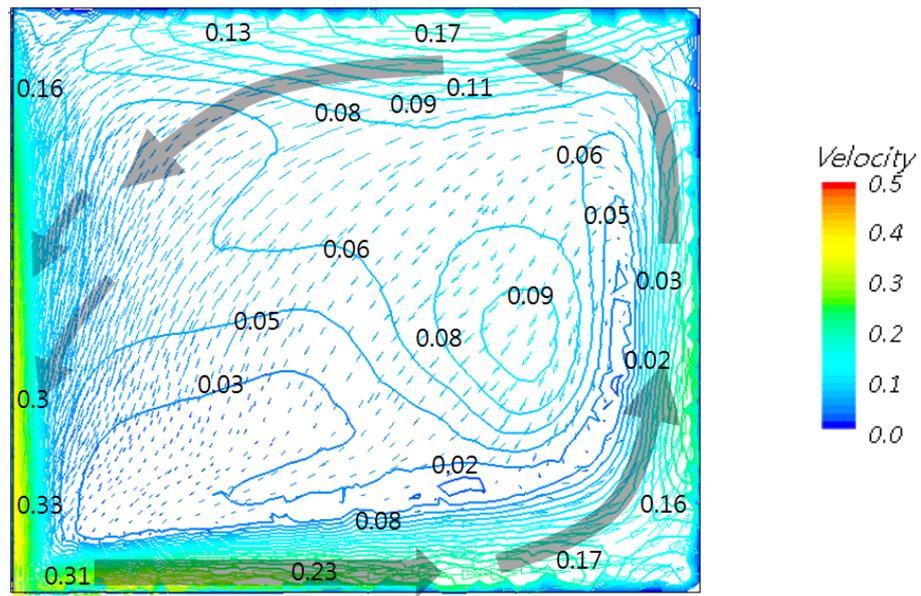
다음 <표4.9>는 창문의 수직 높이가 높은 상황에서 창문의 열관류율이 향상되어 적용된 경우의 기류 흐름의 결과이다.

<표4.9> 창문의 수직 높이가 높으며 창문의 열관류율 조건이 향상된 조건에서의 기류

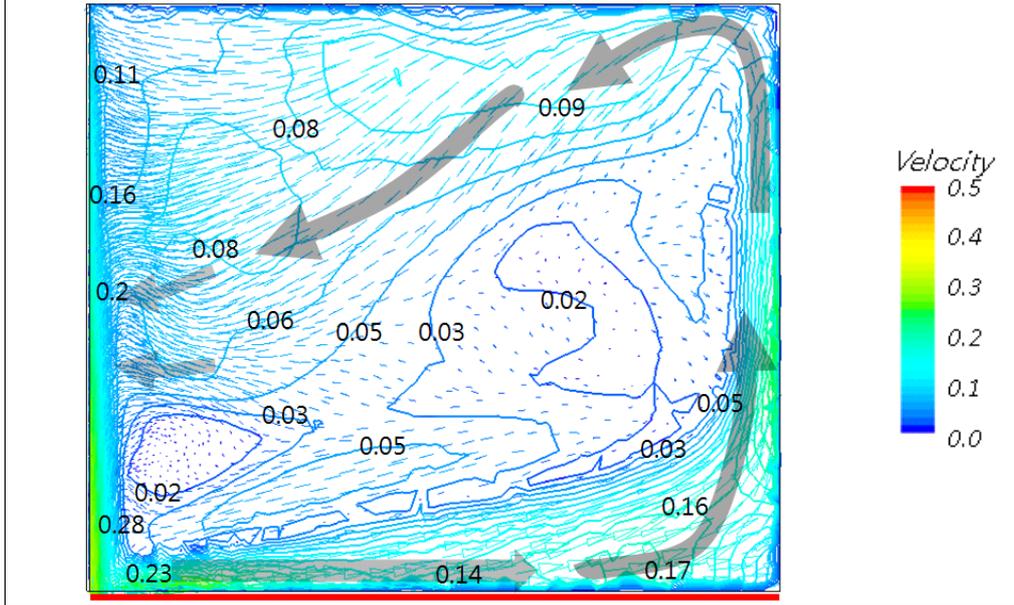
Case3-4 (바닥복사난방-깊이:2m/표면온도:34.1℃,창문-열관류율:1.75W/m²K/높이:6m)



Case3-5 (바닥복사난방-깊이:3m/표면온도:29.8℃,창문-열관류율:1.75W/m²K/높이:6m)



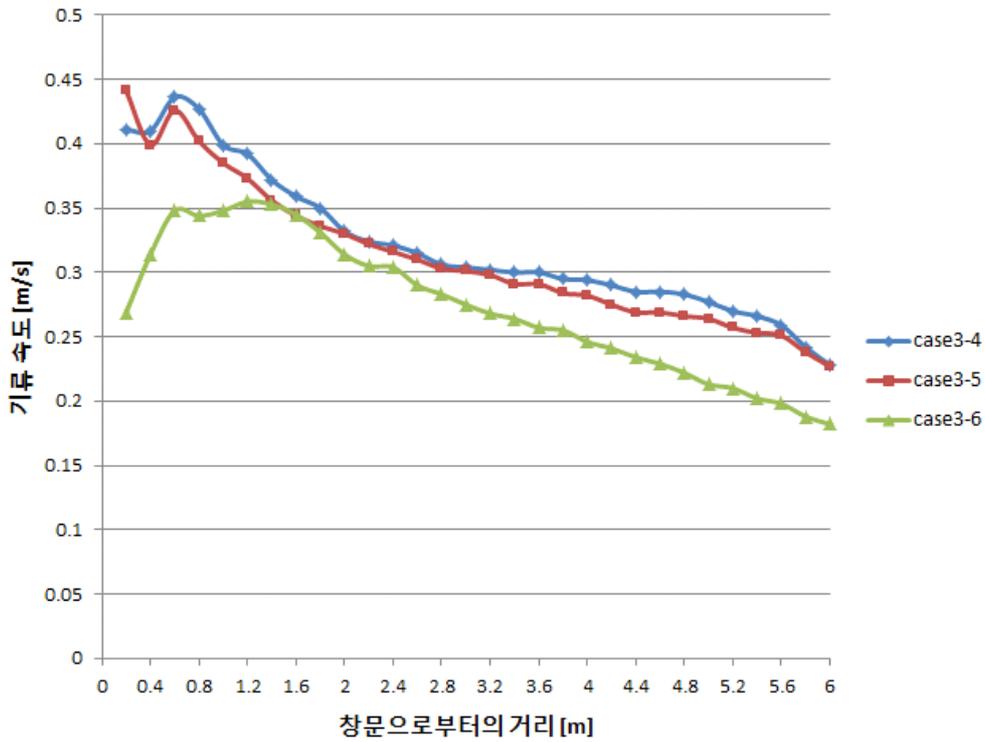
Case3-6 (바닥복사난방-깊이:7m/표면온도:24.5°C,창문-열관류율:1.75W/m²K/높이:6m)



창문의 열관류율 조건이 향상됨에 따라 창문 표면온도가 높아져 창문에서 형성되는 차가운 기류와 바닥 복사난방의 표면에 의해 형성되는 따뜻한 기류 사이의 온도차가 줄어들어 자연 대류 흐름의 속도가 감소함에 따라 기류의 하강 속도 및 바닥 면에서의 이동 속도도 줄어들었다.

나. 기류 속도 분포

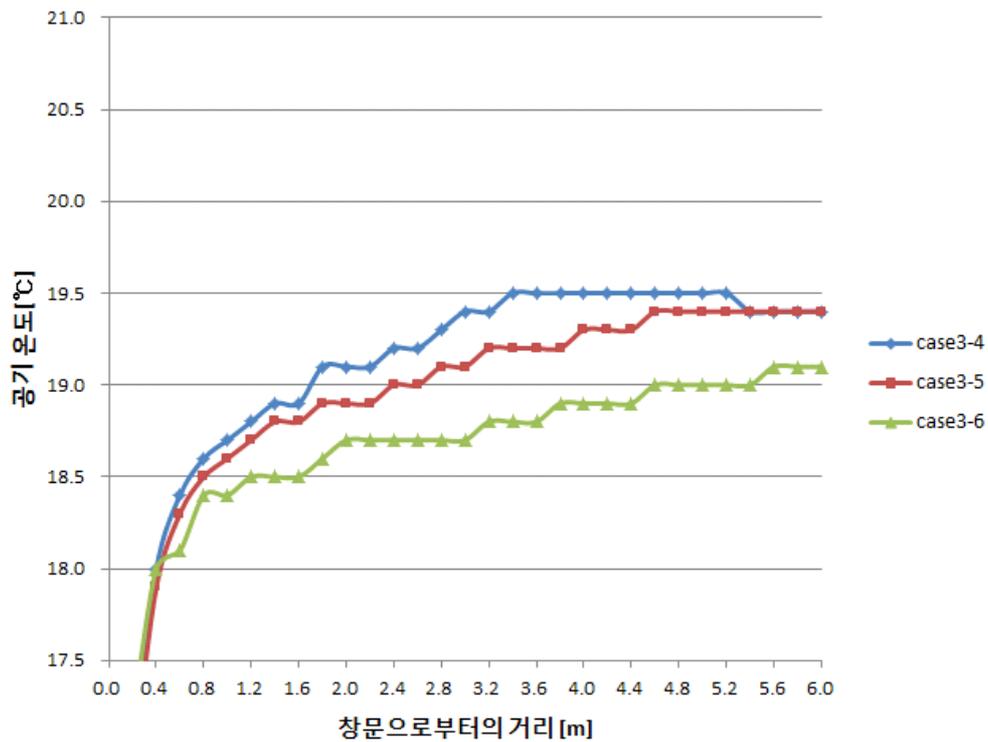
창문의 수직 높이가 높은 공간에서 열관류율이 향상된 조건의 기류 속도 분포는 다음 [그림4.12]와 같다. 이전의 케이스에 비해 기류 속도가 전반적으로 낮아진 것을 알 수 있으며 case3-6의 경우 큰 편차를 두고 기류 속도가 낮아졌다. 이는 차가운 공기를 형성하는 창문의 표면온도가 높아짐에 따라 자연대류 흐름의 속도가 감소하였기 때문이다.



[그림4.12] 창문의 수직 높이가 높은 공간에서 열관류율 향상된 조건의 기류 속도 분포

다. 공기 온도 분포

창문의 수직 높이가 높은 공간에서 열관류율이 향상된 조건의 공기의 온도 분포는 다음 [그림4.13]과 <표4.10>과 같다. 바닥 복사난방의 표면온도가 높게 적용됨에 따라 최저 공기 온도의 온도 상승이 빨리 이루어졌으며, 이전의 케이스에 비해 전반적으로 높은 공기 온도를 보이는 것을 알 수 있었다.

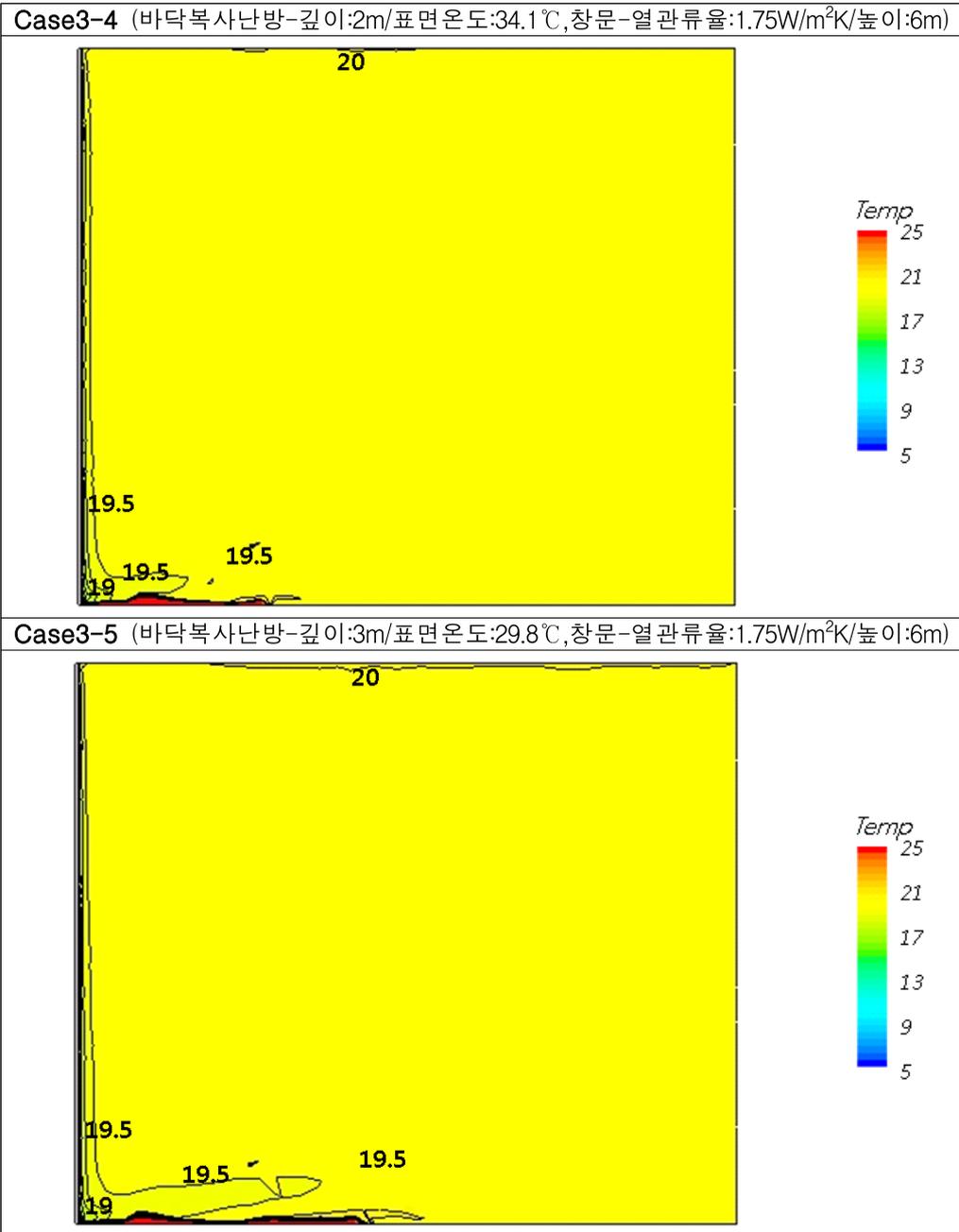


[그림4.13] 창문의 수직 높이가 높은 공간에서 열관류율 향상된 조건의 공기 온도 분포

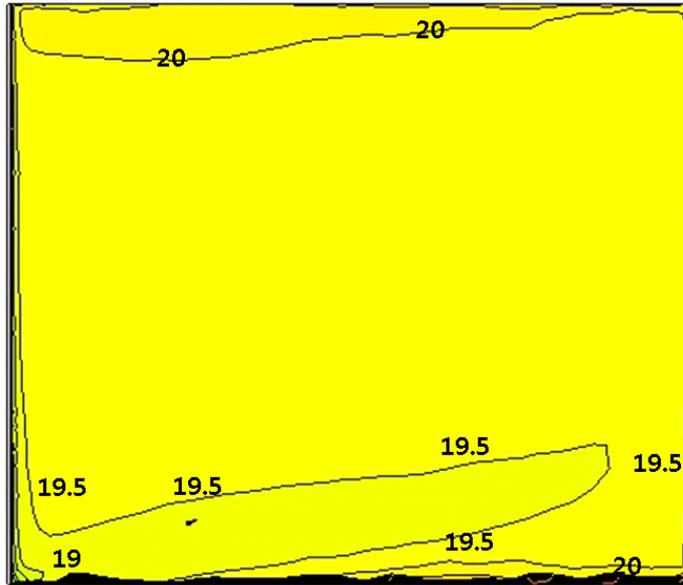
라. Draft rate 분포

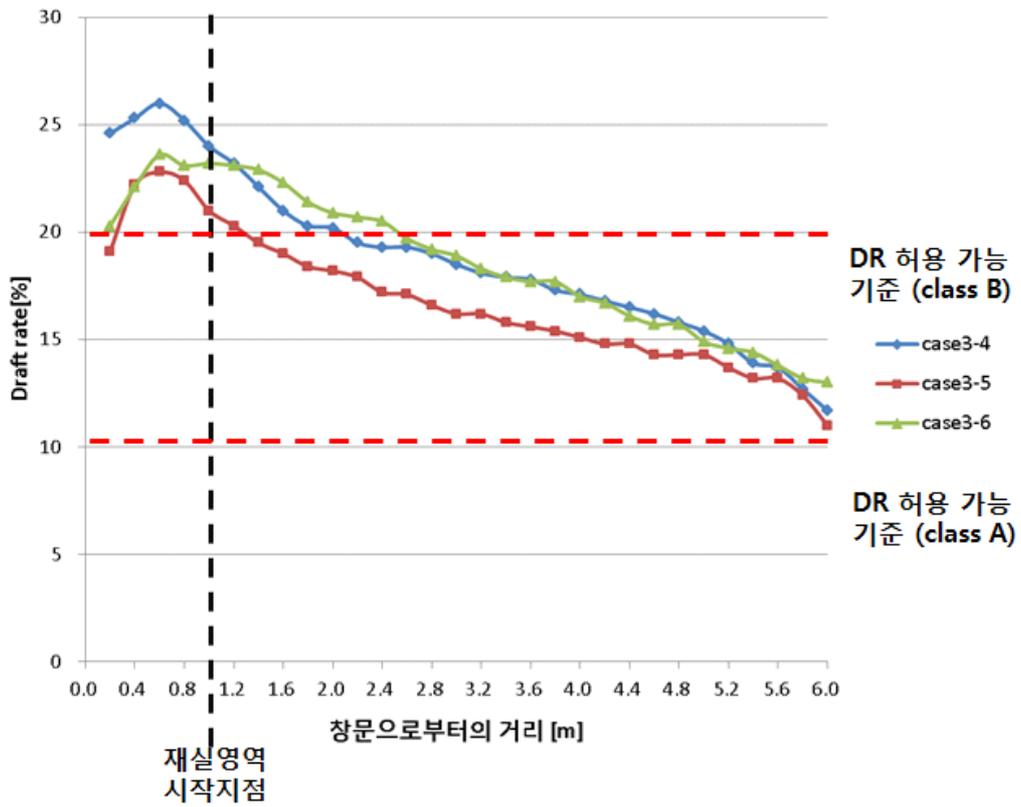
창문의 수직 높이가 높은 공간에서 창문의 열관류율이 향상된 조건의 draft rate 분포는 다음 [그림4.14]와 같다. Case3-5의 경우 채실 영역에서 draft rate class B의 수준을 거의 만족할 만큼 draft rate의 수치가 감소한 것을 볼 수 있다.

<표4.10> 창문의 수직 높이가 높으며 창문의 열관류율 조건이 향상된 조건에서의 공기 온도



Case3-6 (바닥복사난방-깊이:7m/표면온도:24.5°C,창문-열관류율:1.75W/m²K/높이:6m)





[그림4.14] 창문의 수직 높이가 높은 공간에서 열관류율 향상된 조건의 draft rate 분포

4.3 바닥 복사난방 적용을 위한 계획 지침

바닥 복사난방이 적용된 공간에서 창문의 열관류율 및 수직 높이에 따른 실내 draft rate의 분석 결과를 바탕으로 바닥 복사난방 적용 시 계획 지침을 제시하고자 하였다.

4.3.1 바닥 복사난방의 영향인자

일반적인 창문의 열관류율 조건의 공간에서 바닥 복사난방 적용 시 적용된 downdraft 평가 기준에 따라 downdraft가 발생하였다고 볼 수 있는 경우가 나타났다. 따라서 창문의 열관류율 조건을 향상시켜 적용할 경우 창문의 표면 온도가 증가함에 따라 차가운 기류의 온도를 증가시킬 수 있으며 하강 기류의 속도를 감소시켜 draft rate의 수치의 높이의 감소 및 허용 가능한 기준 위로 수치가 나타나는 너비를 감소시킴에 따라 downdraft를 억제할 수 있다. 또한 downdraft의 억제가 가능한 바닥 복사난방의 발열면적의 범위가 확대됨에 따라 바닥 복사난방 적용의 유연성을 확보할 수 있다.

4.3.2 창문의 계획인자

일반적인 창문의 열관류율 조건의 공간에서 창문의 수직 높이가 높은 경우에는 차가운 기류의 하강 속도가 증가함에 따라 바닥 복사난방의 적용에도 불구하고 downdraft를 억제하기 어려웠다. 따라서 창문의 수직 높이가 높은 공간에서 창문의 열관류율 조건을 향상시켜 적용한다면 창문의 표면온도가 높아져 차가운 기류의 온도를 증가시킬 수 있으며 기류의 하강 속도가 줄어들어 바닥 복사난방의 발열을 통해 downdraft를 억제할 수 있다.

4.4 소결

1) Downdraft 억제를 위해 차가운 기류의 흐름을 억제하고자 바닥 복사난방의 표면온도를 높게, 면적을 좁게 적용하여 상승 흐름을 강하게 형성한 경우 상승 기류가 실내 깊숙이 밀려서 형성됨에 따라 재실 영역의 바닥면에서 전반적으로 기류의 속도가 높게 형성되었으며 상승 기류의 유인으로 인해 창문 근처의 기류 속도가 증가함에 따라 draft rate 수치가 높게 형성되었다.

2) 바닥 복사난방의 면적을 외주부 내에서 점차 넓게 적용할수록 창문 근처의 기류 속도가 감소하여 draft rate 수치가 낮아졌으나 바닥 전체에 적용된 경우는 차가운 기류의 유입을 억제하지 못하여 바닥면 근처의 공기 온도가 너무 낮게 분포함에 따라 재실 영역 내에서 draft rate 수치가 높게 형성되었다.

3) 창문 열관류율 조건을 향상시켜 적용한 경우 하강 기류 속도의 감소 및 공기 온도의 증가로 인해 재실 영역에서의 draft rate의 수치의 높이를 감소시킬 수 있다. 또한 창문의 열관류율 조건이 향상됨에 따라 draft rate의 수치가 낮게 분포하는 바닥 복사난방의 발열면적 및 표면온도의 조건이 달라졌다.

4) 창문의 높이가 높아질 경우 하강 기류의 속도가 빨라져 draft rate의 수치가 높게 발생하였지만 창문 열관류율을 낮추었을 때는 draft rate의 수치의 높이를 감소시켜 재실 영역 내에서 허용 가능한 기준 수치 이하로 형성할 수 있었다.

제 5 장 결 론

바닥 복사난방은 주로 복사열을 이용하여 난방 하는 방식으로 실내 온도를 균일하게 형성할 수 있는 등 열쾌적 측면의 장점으로 인해 적용이 증가하고 있다. 그러나 바닥 복사난방 적용 시 부하 변동에 대한 빠른 대응이 어렵기 때문에 건물의 외피로부터의 열전달에 의해 불쾌감을 줄 수 있는 기류의 억제에 즉각적으로 대응하기 불리하다는 장점이 있다. 오늘날 건물의 외피에서 유리의 면적이 늘어나고 있으며 특히 커튼월 형식의 외피가 적용된 공간에서는 downdraft가 발생할 가능성이 크므로 외벽의 전면이 유리로 된 공간에서 바닥 복사난방 적용 시 downdraft에 대한 고려가 필요하다.

본 연구에서는 바닥 복사난방의 downdraft에의 영향 인자를 평가하였으며 downdraft에 영향을 미치는 창문의 계획 인자들을 고려하였다. 따라서 이를 평가하기 위한 평가 모델을 설정하고 창문 및 바닥 복사난방의 조건에 따른 실내 기류 분포를 평가하여 바닥 복사난방의 downdraftf 억제 원리를 파악하였으며 이를 고려한 바닥 복사난방 계획 지침을 제시하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Downdraft 억제를 위해 바닥 복사난방 적용 시 높은 표면온도로 좁은 면적에 적용할 경우 상승기류의 유인 현상이 발생하여 하강기류 및 실내로 유입되는 기류의 속도가 증가하여 downdraft가 억제되지 못하는 경향을 보였다. 반면 면적이 너무 넓게 적용되면 기류의 속도는 감소하나 차가운 기류의 유입을 억제하지 못하여 바닥 근처의 공기 온도가 낮게 나타나게 되어 재실영역에서 downdraft가 발생하는 경향을 보였다.

- 2) 바닥 복사난방의 표면에 의해 형성된 따뜻한 기류의 상승 흐름이 창문과 가까운 곳에서 발생할 경우 기류의 유인 현상으로 인해 하강기류의 속도가 빨라지는 현상이 발생하였고, 이에 따라 바닥을 타고 유입되는 차가운 기류의 속도도 증가하여 downdraft를 억제하지 못하는 경향을 보였다. 따라서 downdraft 억제를 위해서는 기류의 유인 현상이 발생하지 않도록 바닥 복사난방의 적정 면적의 확보가 필요하다고 판단할 수 있었다.
- 5) 창문의 열관류율 조건을 향상시켜 적용할 경우 공기의 온도가 상승하고 하강기류의 속도도 감소했으며 상승기류의 창문으로의 유인 현상이 완화되어 기류 속도가 감소하는 경향을 보였다. 따라서 downdraft 억제를 위해 적용해야 할 바닥 복사난방의 발열 면적 및 표면온도의 범위가 다르게 나타났다. 즉 창문의 열관류율 조건을 향상시킴에 따라 바닥 복사난방의 적용의 유연성이 확보될 것으로 판단할 수 있었다.
- 6) 창문의 수직 높이가 높아졌을 경우 하강 기류의 속도가 빨라졌으며 하강 기류의 힘에 의해 따뜻한 공기의 상승 흐름이 실 깊숙이 밀려나서 형성되었다. 따라서 재실 영역의 바닥 근처의 전체에서 기류 속도가 빠르게 형성되었으며 기류의 온도도 낮게 나타나 downdraft를 억제하지 못하였다. 그러나 창문의 열관류율 조건을 향상시켜 적용할 경우 하강기류의 속도가 완화되었으며 바닥 근처에서의 기류 속도가 감소하여 downdraft를 억제할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.
- 7) 바닥 복사난방의 downdraft 억제 원리로 공기의 온도 상승 및 상승 흐름의 형성을 예상하였는데, 예상과 달리 상승 흐름이 실 깊숙이 밀

려나 형성됨에 따라 기류의 속도가 높게 나타나는 부분이 재실 영역을 침범하였다. 따라서 차가운 기류의 흐름이 상승 흐름을 통해 외주부 내에서 완벽히 차단될 수는 없었으나 창문의 열관류율 조건의 향상 시 기류 속도의 감소 및 공기 온도의 상승을 통해 downdraft를 억제할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Jan F. Kreider. "Heating and cooling of buildings". p.463.
2. ISO 7730: 2005(E), p. 2.
3. ASHRAE Standard 55P, p. 16.
4. P. O. Fanger. "Air turbulence and sensation of draught". Energy and Buildings, vol. 12, 1988, pp. 21-39.
5. A. Koestel, "Paths of horizontally projected heated and chilled air jets". ASHRAE Transactions 61:213, 1955.
6. Reinmann et al. "Evaluation of three room air distribution systems for summer cooling". ASHRAE Transactions 65:717, 1959
7. P. Heiselberg. "Draught risk from cold vertical surfaces". Building and Environment, vol. 29, no. 3, 1994, pp. 297-301.
8. P. Heiselberg. "Energy-Efficient Measures to Avoid Downdraft from Large Glazed Facades", 1995, ASHRAE Transactions, vol. 101, part 2, pp. 1127-1135.
9. P. Lyons, "Window Performance for Human Thermal Comfort", vol. 106, no. 1, 2000, pp.594-602
10. U. arsson et al. "Experimental investigation of downdraught from well-insulated windows". Building and Environment, vol. 37, issue. 11, 2002, pp.1073-1082.
11. M.. Zukowski, "A new formula for determining a minimum recommended value of inlet air velocity from UFAD system to prevent occupants from draught risk", vol. 42, issue. 1, 2007, pp. 171-179.
12. ASHRAE 55P, pp. 16-17.
13. P. O. Fanger. "Air turbulence and sensation of draught". Energy and Buildings, vol. 12, 1988, pp. 21-39.
14. U. Larsson et al. "Experimental investigation of downdraught from well-insulated windows". Building and Environment, vol. 37, issue. 11, 2002, pp.1073-1082.
15. Hua Ge et al. "Experimental investigation of cold draft induced by two different types of glazing panels in metal curtain walls". Building and Environment, vol. 39, issue. 2, 2004, pp.115-125.

16. L. Schellen, "Downdraught assessment during design_ Experimental and numerical evaluation of a rule of thumb", *Building and Environment*, vol. 57, 2012, pp.290-301
17. A. Jurelionis, "CFD predictions of indoor air movement induced by cold window surfaces", *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 14, no. 1, 2008, pp.29-38.
18. E. R. G. Eckert et al. "Analysis of turbulent free-convection boundary layer on flat plate". NACA Report 1015, 1951.
19. P. Heiselberg. "Draught risk from cold vertical surfaces". *Building and Environment*, vol. 29, no. 3, 1994, pp.297-301.
20. Kulkarni, Ratnakar, "Natural convection in enclosures with localised heating and cooling", Doctor of Philosophy thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Wollongong, 1998. p. 127
21. BS EN 15377-1: Heating systems in buildings - Design of embedded water based surface heating and cooling systems - Part 1: Determination of the design heating and cooling capacity, 2008, p. 7.
22. Z. Wang et al, "Modeling thermal comfort with radiant floors and ceilings", "4th Indoor Environmental Quality(IEQ)", 2009, pp.1-8.
23. 국토해양부 고시 제2008 - 652호 [별표6] 냉·난방장치의 용량계산을 위한 설계 외기온 습도 기준 건축물의 에너지절약설계기준 (서울지역 기준)
24. 한글라스 카탈로그자료실, http://www.myhanglas.co.kr/product/cata_list.asp
25. 김현중, "사무소 건물의 외주부 산정법에 따른 열부하 패턴", 대한건축학회 학술발표대회 논문집, vol. 27, no. 1, 2007, p.1030.

ABSTRACT

Downdraft assessment of the space with Radiant Floor Heating

By Park, So-Jeong
Department of Architecture
Masters Course in Graduate School
Seoul National University
Advised by
Professor Kim, Kwang-Woo
2013. 2.

Radiant heating system keeps a space uniformly heated and comfortable. Because of an increased awareness of the advantages of radiant system, many countries are applying this system recently. However, when applying the radiant floor heating, the consideration of thermal discomfort which can be caused by the external environment is necessary. Recently, the amount of glass area used in office buildings has been increasing. Because of this, heat loss through the building envelope has increased, and the risk for the occurrence of downdraft has also increased. Downdraft is descending cold air induced by cold windows in cold weather, which may cause thermal discomfort to occupants. Therefore, in this study, the principle of the prevention of downdraft with radiant floor heating was analyzed. And the guidelines are proposed which gives simple

reference when applying radiant floor heating.

In order to estimate air movement in a room, numerical simulations are executed. A computational model of the room with radiant floor heating is constructed within the CFD program Star CCM+. Eight cases with varying surface temperature and surface area of the radiant floor heating and a window U-value are considered.

The results of this research are summarized as follows:

(1) When the radiant floor heating was applied to smaller surface area and higher surface temperature in order to prevent downdraft, a rising current of air was attracted toward the window. So, the velocity of a descending air current and the air flowing over the floor increased and downdraft couldn't be prevented.

On the other hand, when the radiant floor heating was too widely applied, the velocity of the airflow decreased but cold airflow couldn't be prevented. So, downdraft occurred in the occupied area.

(2) Contrary to expectations, according to the rising current of warm airflow pushed deep into the room, the velocity of the airflow near the floor was high in the occupied area. So, the cold airflow could not be blocked completely through the rising current of warm air which occurred on the surface of a radiant floor heating.

(3) The velocity of a descending air current near the window was increased, when the current of warm air rose not far from the window which was formed from the surface of the radiant floor heating. In this situation, downdraft couldn't be prevented because the velocity of the air flowing over the floor increased.

So, in order to prevent downdraft, attraction of the rising current of warm air should be avoided and the proper surface area of radiant floor heating is needed.

(4) When the insulation performance of the windows increased, the air temperature was increased and air velocity was decreased near the floor. And the attraction of the rising current of warm air has decreased. So, the range of surface area and surface temperature of the radiant floor heating were changed which should be applied in order to prevent downdraft.

(5) When the vertical height of the windows increased, the velocity of a descending air current increased and the large circulation of air flow occurred. So, the air velocity near the floor was high and the air temperature was low in the whole of the occupied area. Therefore the downdraft couldn't be prevented.

However, as the insulation performance of the windows increased, the velocity of a descending air current and airflow near the floor decreased. So, the downdraft could be prevented.

Keywords: Radiant Floor Heating, Downdraft, Draft rate

Student Number : 2011-20590

감사의 글

2년 동안의 대학원 생활은 길었지만 또 너무나도 빠르게 지나간 것 같습니다. 바쁜 일정을 소화하면서 학위 논문을 어떻게 완성할 수 있을지 막막했던 적도 있었습니다.

앞으로 더 발전시켜야 할 부분이 많은 부족한 논문이지만, 이렇게 완성하여 제출할 수 있게 된 데에는 저의 노력도 있었겠지만 아마 주변 분들의 도움이 없었으면 매우 힘들었을 것이라 생각합니다. 그래서 이 짧은 글을 통해 제게 도움을 주신 소중한 분들께 조금이나마 감사한 마음을 표하고자 합니다.

먼저 저의 지도교수님이셨던 김광우 교수님께 감사드리고 싶습니다. 교수님께서서는 학술적인 부분에서 많은 가르침을 주셨으며, 논리적으로 문제에 접근하는 방법을 훈련하게 해주셨습니다. 또한 연구실 생활과 더불어 앞으로 사회에 나가 생활을 하는 데 있어 지녀야 할 인성적인 부분까지 많은 것들을 가르쳐 주셨습니다. 비록 교수님께 저는 잠시 가르침을 받았던 제자이지만 앞으로 사회생활을 하면서도 늘 존경하는 마음을 가지고 교수님의 가르침을 떠올리고자 합니다.

그리고 저의 두 번째 지도교수님이신 여명석 교수님께 감사드리고 싶습니다. 언제나 열정적으로 연구하시는 교수님의 모습이 존경스러웠으며, 저 또한 더욱 더 분발해야겠다는 생각을 하곤 하였습니다. 학기 마지막까지 신경 써주시고 지도해 주신 점, 매우 감사하게 생각합니다.

동기들 중에서 가장 만언니 역할을 하며 정신적 지주가 되어주었던 미혜언니, 함께 수다 떨며 연구와 학업의 스트레스를 해소하곤 했던 활력소 유지, 같은 팀으로서 의지할 수 있어 고마웠던 승재오빠, 막내이지만 책임감 있고 든든했던 소원이, 늘 어설픈 농담으로 우리를 웃겨주었던 현민오빠에게 감사함

을 표하고 싶으며, 앞으로도 서로 의지할 수 있는 영원한 동기이고 싶습니다.

저의 피엠티인 구상오빠, 늘 티격태격하는 관계였지만 오빠에게 배울 점도 참 많았던 것 같아요. 고생 많으셨어요, 저의 두 번째 피엠티인 대욱오빠, 무심한 듯 하지만 제게 힘든 일이 있을 때마다 잘 챙겨주어 너무 고마웠어요. 종종 연구실 찾아갈게요. 낙천적인 에너지를 마구 분출해주었던 웅준오빠, 바쁘다는 핑계로 술 한 잔 제대로 못한 것 같네요. 조만간 한 잔 해요. 연구하는 데 있어 정말 많은 도움을 주셨던 창호오빠, 그동안 정말 감사했어요. 조만간 국수 먹기를 기대할게요. 방장으로서 고생 많았던 승효오빠, 종종 보게 된 오빠의 로맨틱한 모습에 놀라곤 했어요. 이제 방장도 끝났으니 부담 없이 연애도 더 즐기시길 바라요. 연구실의 굳은 일을 도맡아 하며 늘 고생 많았던 병희언니, 언니는 제 2의 방장이었던 것 같아요. 십년간의 우정을 사랑으로 결실 맺은 행복한 상훈오빠, 두레미담은 오빠가 주는 식권으로 먹을 때가 짙 맛있었어요. 유자차는 다음에 꼭 사드릴게요. 절대 동안 태현오빠, 연구실에서 오빠 말투가 제일 재밌는 거 아시죠? 앞으로도 늘 동안 유지하시고, 행복한 신혼생활 보내시길 바랄게요. 같은 베이에 앉아 우리의 지저분함을 잘 참아주었던 동우오빠 고마워. 앞으로 옆자리에 오는 신입생은 깔끔한 분일 거라 믿어. 예쁜 아기를 둘이나 낳으신 선우언니, 육아도 일도 행복하게 병행하시길 바랄게요. 옷도 예쁘게 입으시고 남동생들에게 인기도 많은 가영언니, 조만간 꼭 좋은 인연 만나실 거예요. 저에게 조언도 많이 해주시고 고마웠어요. 성격도 화통하고 유쾌한 화국이, 노란 포스트잇이 인상 깊었던 민철이, 남은 연구실 생활 파이팅이야. 그리고 유일한 1학년으로서 고생 많았던 지민이, 총무로서 이것저것 센스 있게 챙겨주고 고마웠어.

옆에서 가장 큰 힘이 되어준 혜윤, 혜성, 그리고 희창이 고마워. 짧은 날 고생은 사서라도 하는 것이기에 우리 모두 다 잘될 거라 믿어. 앞으로 멋지게

살아보자. 그동안 바쁘다는 핑계로 연락도 잘 안하고, 서운하게 만들었던 친구들에게도 미안하고 고마워. 특히 희선이, 진이, 이제 연락하고 자주 만나자. 그리고 타지에 있어 자주 못 보는 다연, 선주, 정진, 수경, 주희, 유희, 마음속으로 늘 응원하고 있을게. 그리고 옆에서 누구보다도 걱정해주고 응원해 준 우리 가족과 늘 귀여운 애교로 마음을 녹여주는 까미, 다들 너무 고마워. 엄마, 아빠, 앞으로 효도할게요.

미처 다 적지 못한 소중한 분들께도 감사의 마음을 전하며 글을 마칩니다. 감사합니다.

2013년 2월

박 소 정