

CFD를 활용한 바닥공조시스템 디퓨저의 성층화 모델 예측

Prediction of Stratification Model for Diffusers in Underfloor Air Distribution System using the CFD

손정은(Jeong-Eun Son)¹, 유병호(Byeong-Ho Yu)¹, 방승기(Seung-Ki Pang)², 이광호(Kwang Ho Lee)^{3*}

¹국립한밭대학교 대학원 건축공학과, ²경민대학교 건축학과, ³국립한밭대학교 건축공학과

¹Graduate School, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Republic of Korea

²Department of Architecture, Kyungmin College, Eujeongbu, 11618, Republic of Korea

³Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Republic of Korea

(Received September 7, 2016; revision received December 12, 2016; Accepted: December 21, 2016)

Abstract Underfloor air distribution (UFAD) is an air distribution strategy for providing ventilation and space conditioning in buildings. UFAD systems use the underfloor plenum beneath a raised access floor to provide conditioned air through floor diffusers that create a vertical thermal stratification during cooling operations. Thermal stratification has significant effects on energy, indoor air quality, and thermal comfort performance. The purpose of this study was to characterize the influence of a linear bar grille diffuser on thermal stratification in both interior and perimeter zones by developing Gamma-Phi based prediction models. Forty-eight simulations were carried out using a Computational Fluid Dynamics (CFD) technique. The number of diffusers, the air flow supply, internal heat gains, and solar radiations varied among the different cases. Models to predict temperature stratification for the tested linear bar grille diffuser have been developed, which can be directly implemented into dynamic whole-building simulation software such as EnergyPlus.

Key words UFAD(바닥공조시스템), Cooling(냉방), Temperature Stratification(온도 성층화), Diffuser(디퓨저), CFD(전산유체역학)

* Corresponding author, E-mail: kwhlee@hanbat.ac.kr

기호설명

T : 온도 [°C]
 Q : 실 공급 풍량 [m³/h]
 θ : 토출 각도 [°]
 m : 워크스테이션 개수
 n : 디퓨저 개수
 A_{eff} : 디퓨저 유효 면적 [m²]
 W : 실 냉방 부하 [kW]

하첨자

OZ : 거주역
 S : 공급 온도 [°C]
 R : 환기(Return) 온도 [°C]
 int : 내주부
 $peri$: 외주부
 L : 외주부 길이 [m]

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

바닥공조(Underfloor Air Distribution)시스템은 거주

역(Lower Zone)과 비거주역(Upper Zone)으로 나누어 공조 공기를 바닥 패널(Raised Access Floor) 상부에 위치한 바닥 디퓨저(Floor Diffuser)를 통해 공조기로부터 실내 거주역으로 직접 공급하는 시스템을 말한다.⁽¹⁾ 기존 천장취출형 공조(Ceiling Based Air Distribution)시스템에 비해 냉방운전 시 상대적으로 적은 반송동력과 높은 공급온도로 실내 설정온도를 맞출 수 있어 에너지 절약적인 시스템으로 알려져 있다.⁽²⁾ 최근 바닥공조시스템과 관련하여 미국 냉동공조학회 ASHRAE를 중심으로 바닥공조시스템 관련 기술과 설계 지침 등의 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽¹⁾ 바닥공조시스템에서는 바닥 디퓨저로부터 취출된 공조 공기가 실내 발생한 열부하(Heat Load)를 처리하고 천장(Return Plenum)으로 배기되면서 실내 온도 성층화(Temperature Stratification)가 발생하는 것이 이상적이다.⁽³⁾ 온도 성층화는 바닥에서 천장까지 일정하지 않은 수직 온도 분포로 공조된 찬 공기는 거주역에, 상승된 공기는 비거주역에 집중됨으로써 상대 밀도에 따른 내부 공기의 온도분포 결과이다.⁽⁴⁾ 온도 성층화가 잘 형성될수록 비거주역의 부하를 고려할 필요성을 없애주기 때문에 바닥공조시스템에서 에너지 효율에 매우 큰 영향을 주는 핵심적인

기술이라고 할 수 있다.

국외의 경우 온도 성층화와 관련하여 바닥공조시스템의 냉방설계풍량 산정법 개발⁽⁵⁾ 및 성층화 정도를 정량적으로 나타내기 위한 무차원 수 Γ (Gamma), Φ (Phi) 도입⁽⁶⁾ 등의 관련 연구들이 다양하게 선행되었다. 바닥공조시스템에서는 디퓨저의 설계된 형상에 따라 온도 성층화가 달라지는데 미국 버클리 대학교의 CBE(Center for the Built Environment)에서 제안된 Gamma-Phi 상관관계식을 통해 디퓨저의 온도 성층화 정도를 정량적으로 나타낼 수 있다.⁽⁷⁾ 또한, Gamma-Phi 상관관계식으로 나타낸 디퓨저의 성층화 예측 모델은 건물에너지 해석 프로그램인 EnergyPlus 프로그램에 탑재되어 여러 조건 변화에 따른 시뮬레이션이 가능해 외부환경 및 재정적 문제로 다양한 조건 하에서 실측실험을 실시하지 못하는 한계를 보완할 수 있다.

본 연구에서는 Gamma-Phi 회귀분석 상관관계식을 활용하여 디퓨저 고유의 성층화 모델을 예측함으로써 성층화 모델 관련 가이드라인을 위한 기초자료로 제공하고자 한다. 국내의 경우 바닥공조시스템에서의 성층화 관련 체계적 연구 사례가 부족한 실정에서 성층화에 중요한 영향을 미치는 인자인 디퓨저에 관한 연구를 통해 차후 유용한 성층화 모델 설계 자료가 될 것으로 기대된다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구는 바닥공조시스템 디퓨저의 성층화 모델 예측식 산출을 목표로 하는 논문으로 전산유체역학 프로그램인 CFD를 활용하여 실시하였다. 시뮬레이션은 각각 다른 부하 조건의 16개 Case를 설정하여 내주부와 외주부에서 실시하였다. 실 높이에 따른 온도 값을 구하여 Gamma 값에 따른 Phi 값 패턴을 확인하고 회귀분석을 통해 성층화 예측 모델인 Gamma-Phi 상관관계식을 도출하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 온도 성층화

바닥공조시스템에서의 온도 성층화 현상 제어는 최적의 시스템 설계와 작동을 위해 가장 주요한 요소 중 하나이다.⁽⁸⁾ 성층화란 상대 밀도에 따라 밀도가 높은 저온의 공기는 하부에, 밀도가 낮은 고온의 공기는 상부로 향하는 공기의 부력효과로 인한 불규칙한 수직 온도 분포를 말한다. 바닥공조시스템은 Fig. 1⁽⁹⁾과 같이 사람 키(h)만큼의 거주역(Lower Zone)을 설정하고, 그 외의 구역을 비거주역(Upper Zone)으로 설정하여 거주역만을 공조 공간으로 설정한다. 이로 인해 냉방 공조된 거주역은 낮은 온도를, 비거주역은 상대적으로 높

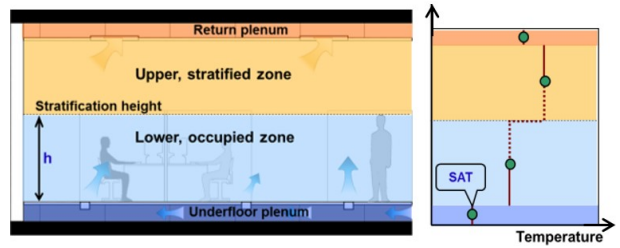


Fig. 1 Room air temperature stratification model.⁽⁹⁾

은 온도의 온도층이 형성된다. 온도층 형성으로 불필요한 구역까지 공조를 행하는 실 완전 혼합 공조에 비해 에너지가 절감되는 것으로 온도 성층화의 정도 즉, 거주역과 비거주역의 온도 차이가 클수록 이상적이다.

2.2 Gamma-Phi Formulation

Phi(Φ)는 실내 수직 온도분포 즉, 온도 성층화 정도를 설명하는 무차원 계수로 실 높이에 따라 다음과 같은 식으로 정의된다.⁽¹⁰⁾

$$\Phi = \frac{T_{oz} - T_s}{T_R - T_s} \quad (1)$$

여기서, T_{oz} 는 거주역 평균 온도, T_s 는 공급 온도, T_R 은 천장에 위치한 배기구를 통해 나가는 환기 온도를 의미한다. 식을 통해 나온 Phi 값은 0에서 1의 값을 가지게 되는데 일반적으로는 0.6에서 1의 값을 가진다. Phi 값이 1일 경우 거주역 온도와 환기 온도는 동일한 것으로 성층화 현상이 형성되지 않음을 의미한다. 반면 Phi 값이 작을수록 거주역 온도와 환기 온도 차이가 큰 것으로 성층화가 잘 형성되었음을 의미한다.

Gamma 또한 무차원 계수로 디퓨저의 특성 및 갯수, 부하, 공급 풍량, 공급 온도 등의 다양한 조건에 따라 산출되는 계산 값이다. 공급 온도의 경우 식(2), 식(3)에는 포함되어 있지 않은 요소지만 공급 풍량인 Q에 직접적인 영향을 미치는 변수이다. 내주부와 외주부에 대한 Gamma 계산식은 각각 식(2), 식(3)과 같다.⁽¹⁰⁾

$$\Gamma_{int} = \frac{(Q \cdot \cos\theta)^{\frac{3}{2}}}{m \cdot \left(\frac{n}{m} \cdot A_{eff}\right)^{\frac{5}{4}} \cdot (0.0281 \cdot W)^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

$$\Gamma_{peri} = \frac{(Q \cdot \cos\theta)}{(n \cdot A_{eff})^{\frac{5}{4}} \cdot (0.0281 \cdot W_L)^{\frac{1}{3}}} \quad (3)$$

실측 및 CFD 시뮬레이션을 통해 여러 조건 하에서의 Gamma와 Phi를 산출한 후 회귀분석을 통해 Gamma에 따른 Phi 값 변화에 대한 Gamma-Phi 상관관계식을 산출한다.

3. 시뮬레이션 개요

3.1 시뮬레이션 선정 및 모델링

본 연구에서 선정한 시뮬레이션 프로그램은 Computational Dynamics사에서 개발한 범용 CFD 프로그램인 STAR-CCM+를 활용하였다. 정상상태로 계산하였으며, 중력을 적용하였고 실내 환경평가를 위해 Realizable k- ϵ 난류 모델로 설정하여 시뮬레이션 하였다. Mesh는 Trimmer를 사용하여 Grid를 형성하였다.

시뮬레이션 모델링은 가로와 세로가 8 m, 높이 2.7 m의 4면이 벽체로 구성된 사무소 건물을 모사한 것으로 Fig. 2와 같다. 바닥에 설치된 디퓨저를 통해 공조되며 천장에 위치한 환기구를 통해 배기된다. 본 연구를 통해 개발된 디퓨저는 Fig. 3과 같이 Linear Bar Grille 형상이며 디퓨저 및 시뮬레이션 설정 값은 Table 1과 같다.

거주역은 바닥에서부터 1.7 m로, 그 외의 부분을 비거주역으로 설정하였으며 각 부분에 따른 측정 지점은 Table 2에 나타냈다. 초기 실내 온도는 28°C로 설정하고 실 공급온도는 16°C로 고정하였다. 실을 공조하고 천장을 통해 배기되는 공기 온도는 모델링한 환기구에 각 5개의 측정점을 설정하고 그 평균값으로 하였다.

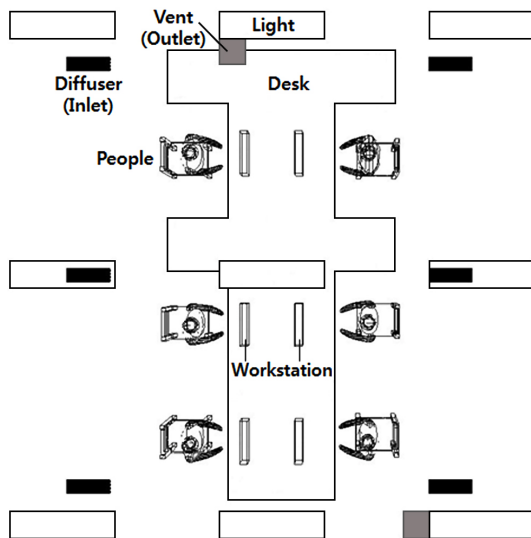


Fig. 2 Layout of simulation model.

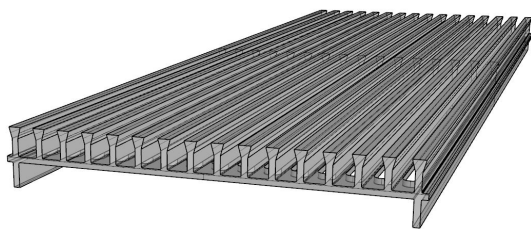


Fig. 3 Diffuser model.

3.2 시뮬레이션 Case

16개의 Case를 설정하여 내주부에 대하여 한 번, 외주부에 대하여 두 번 시뮬레이션 하여 총 48개의 Case를 시뮬레이션 하였으며 각 Case 설정 값은 Table 3과 같다. 넓은 범위의 Gamma 값을 얻기 위해 디퓨저 개수와 공급 풍량, 실내 기기, 인체, 조명 부하 값을 다양하게 설정하였다. 기기 및 인체, 조명에 대하여서는 발열량은 Table 1과 같이 설정하였으며 각 Case 별로 개수를 변화시켰다. 외부 환경에 영향을 받지 않는 내주부는 일사로 인한 부하를 0 W로, 외주부는 서측 벽에 일사 부하를 1,000 W와 2,000 W를 각각 한 번씩 입력하여 Case당 세 번 시뮬레이션 하였다.

Table 1 Input condition of simulation

Division		Value
Heat Source	Light	68 W
	People	75 W
	Workstation	65 W
Diffuser	Size	0.2 m×0.6 m
	Effective area	0.035 m ²
	Discharge angle from vertical	15°
	Supply air temperature	16°C
Initial temperature		28°C

Table 2 Stratification height

Zone	Height	Measurement points
Lower zone	From 0 m to 1.7 m	0.1 m, 0.7 m,
		1.3 m, 1.7 m
Upper zone	From 1.7 m to 2.7 m	2.0 m, 2.3 m,
		2.6 m, 2.7 m

Table 3 Simulation cases

Number of diffuser	Q (m ³ /h)	Number of heat source(W)			Solar (W)
		WS	People	Light	
6	75(0.33 m/s)	4	4	6	0 1,000 2,000
	150(0.66 m/s)	2	2	3	
	225(0.99 m/s)	4	4	6	
	225(0.99 m/s)	6	6	9	
	300(1.32 m/s)	4	4	6	
	300(1.32 m/s)	6	6	3	
4	75(0.33 m/s)	4	4	6	0 1,000 2,000
	150(0.66 m/s)	2	2	3	
	150(0.66 m/s)	4	4	6	
	225(0.99 m/s)	4	4	6	
	300(1.32 m/s)	4	4	6	
	300(1.32 m/s)	6	6	9	
2	150(0.66 m/s)	4	4	6	0 1,000 2,000
	225(0.99 m/s)	4	4	6	
	225(0.99 m/s)	6	6	9	
	300(1.32 m/s)	4	4	6	

4. 시뮬레이션 결과

4.1 내주부 Gamma-Phi 관계

Fig. 4는 서측벽에 일사로 인한 부하를 0 W로 입력하여 내주부를 모델링하였을 때 각 Case의 Gamma 값에 따른 Phi 값의 변화를 나타낸 그래프이다. 분산형 그래프로 Gamma는 내주부에 대한 계산식인 식(2)로 계산하였다. 내주부에서 Gamma는 1.78에서 24.43의 범위 값을, Phi는 0.37에서 0.82의 범위 값을 가지며 Gamma가 커질수록 Phi 또한 증가하는 것을 나타냈다.

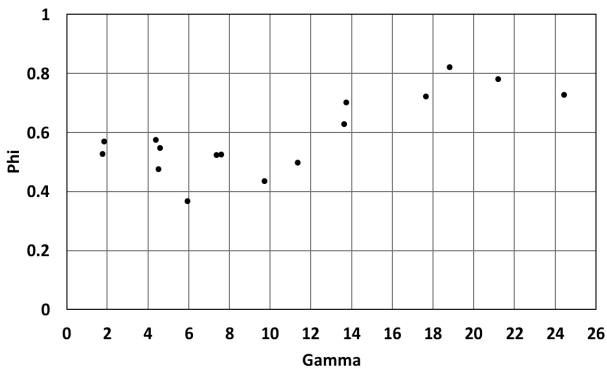


Fig. 4 Γ - Φ relationships of average T in the occupied zone of interior zone.

Table 4 Gamma and Phi value of interior

Number of diffuser	Case	Gamma	Phi
6	75, W4.P4.L6	1.78	0.53
	150, W2.P2.L3	5.93	0.37
	225, W4.P4.L6	13.75	0.70
	225, W6.P6.L9	13.62	0.63
	300, W4.P4.L6	21.19	0.78
	300, W6.P6.L3	24.43	0.73
4	75, W4.P4.L6	1.85	0.57
	150, W2.P2.L3	4.59	0.55
	150, W4.P4.L6	4.53	0.48
	225, W4.P4.L6	9.71	0.44
	300, W4.P4.L6	18.83	0.82
	300, W6.P6.L9	17.65	0.72
2	150, W4.P4.L6	4.39	0.58
	225, W4.P4.L6	7.37	0.52
	225, W6.P6.L9	7.59	0.53
	300, W4.P4.L6	11.36	0.50

Table 4는 내주부에서 각 Case의 Gamma와 Phi를 정리한 표로 디퓨저 개수에 따라 풍량, Workstation(W), People(P), Light(L) 갯수 순서로 구분하였다. 디퓨저 갯수가 6개, 4개인 경우 풍량이 증가할수록 Phi가 증가하여 성층화가 잘 형성되지 않은 것으로 분석된다. 태양 일사가 없어 실내 부하가 크지 않은 내주부에 풍량이 증가하면 거주역 뿐만 아니라 비거주역까지 공조 공기가 공급되어 거주역-비거주역 온도차이가 감소하게 되어 식(1)로 계산되는 Phi 값이 1.0의 값에 가까워지는 것으로 사료된다. 디퓨저 갯수가 2개인 경우 디퓨저당 공급되는 풍량이 증가 하여도 전체 실 공급 풍량이 적어 Phi 값이 감소하면서 성층화가 잘 형성되는 것으로 분석된다.

Fig. 5는 내주부에서의 Gamma-Phi 관계에 대한 95% 신뢰구간과 추세선을 나타낸 그래프이다.

4.2 서측 외주부 Gamma-Phi 관계

Fig. 6은 서측 벽면에 일사로 인한 부하를 1,000 W, 2,000 W로 각각 입력하여 서측 외주부를 모델링하였을 때 각 Case의 Gamma 값 변화에 따른 Phi 값을 나타낸 분산형 그래프이다. Gamma는 외주부에 대한 계산식인 식(3)으로 계산하였다. 식(3)에서 WL의 값은 실내 발생한 부하를 외주부 길이로 나눈 값이다. Table 5는 외주부에서 각 Case의 Gamma와 Phi를 정리한 표로 일사 부하가 1000 W일 때 Gamma는 4.47에서 19.99의 범위 값을, Phi는 0.41에서 0.76, 일사 부하가 2,000 W인 경우 Gamma는 4.17에서 17.73, Phi는 0.37에서 0.63의 범위 값을 가진다. 내주부와 비교하였을 때 외주부에서는 Gamma 값이 커짐에 따라 Phi 값 변화는 미미한 것으로 나타났다. 각 Case에 상관없이 풍량이 증가함에 따라 Gamma는 증가하였으나 Phi는 미비한 증가 추세를 보였으며 0.4에서 0.6사이의 좁은 범위의 분포를 보인다. 일사로 인해 증가한 실내 부하로 실

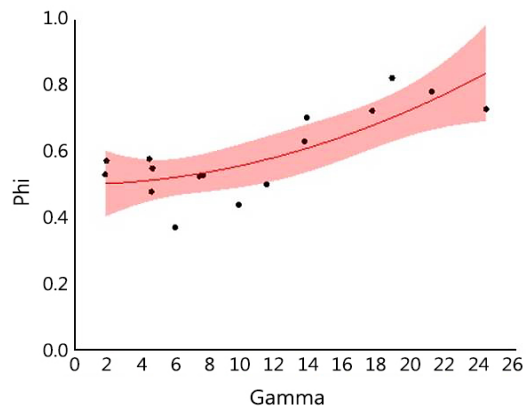


Fig. 5 95% confident intervals for the interior zone.

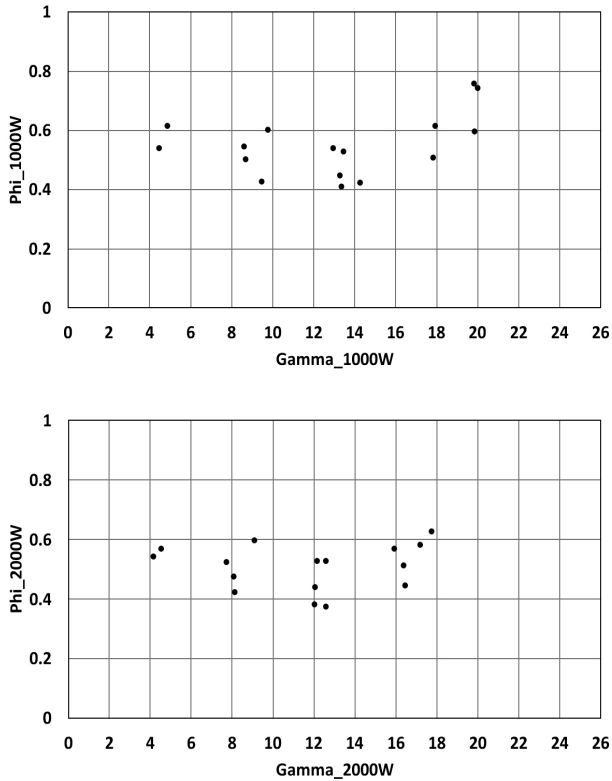


Fig. 6 Γ - Φ relationships about average T in the occupied zone of west perimeter.

Table 5 Gamma and Phi value of west perimeter

Number of diffuser	Case	1,000 W		2,000 W	
		Gamma	Phi	Gamma	Phi
6	75, W4.P4.L6	4.47	0.54	4.17	0.54
	150, W2.P2.L3	9.47	0.43	8.13	0.42
	225, W4.P4.L6	14.27	0.42	12.57	0.37
	225, W6.P6.L9	13.34	0.41	12.03	0.38
	300, W4.P4.L6	19.83	0.76	17.18	0.58
	300, W6.P6.L3	19.99	0.74	17.73	0.63
4	75, W4.P4.L6	4.85	0.62	4.55	0.57
	150, W2.P2.L3	8.59	0.55	7.73	0.52
	150, W4.P4.L6	8.67	0.50	8.07	0.48
	225, W4.P4.L6	13.28	0.45	12.04	0.44
	300, W4.P4.L6	19.84	0.60	16.45	0.45
	300, W6.P6.L9	17.92	0.62	15.92	0.57
2	150, W4.P4.L6	9.76	0.60	9.10	0.60
	225, W4.P4.L6	13.45	0.53	12.59	0.53
	225, W6.P6.L9	12.95	0.54	12.16	0.53
	300, W4.P4.L6	17.83	0.51	16.36	0.51

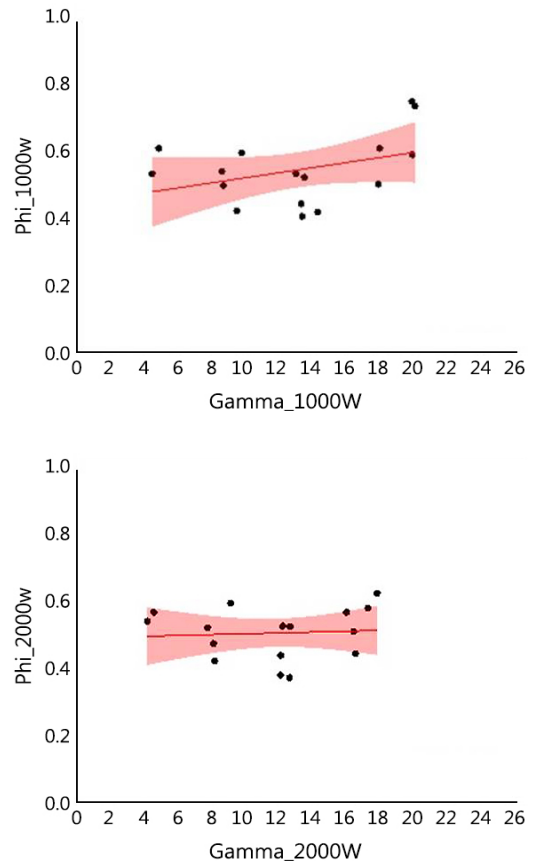


Fig. 7 95% confident intervals for the west perimeter.

온도가 전반적으로 상승 된 상태에서 공급된 공조 공기가 거주역 부하만을 집중적으로 처리하여 거주역 온도는 낮아진다. 외주부에서는 상대적으로 더 많은 부하가 발생하기 때문에 풍량이 증가하여도 높은 부하로 인해 Gamma 값의 변화 즉, 디퓨저 개수와 부하의 변화에도 일정 수준의 거주역-비거주역 온도차를 유지하게 되는 것으로 사료된다. 즉, 성능화가 유지되는 것으로 그에 따라 Phi 값 또한 미비한 변화를 보이는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 서측 외주부에서의 Gamma-Phi 관계에 대한 95% 신뢰구간과 추세선을 나타낸 그래프로서, 내부주에서 보다 낮은 상관관계를 나타냈다.

4.3 Gamma-Phi 상관관계식 산출

시뮬레이션 결과를 바탕으로 회귀분석을 통해 내주부, 외주부에서 디퓨저의 Gamma 값 변화에 따른 Phi 값 변화 상관관계식을 산출하였으며 상관관계식은 Table 6과 같다. 시뮬레이션을 통해 산출한 내주부 Gamma 값은 $1.78 \leq \Gamma \leq 24.43$ 의 범위를 나타냈으며, Gamma 값이 커질수록 Phi 값 또한 상승하였고 다중회귀분석을 통해 식

Table 6 Gamma-Phi correlation

Division		$\Gamma-\Phi$
Interior		$\Phi = 0.0005\Gamma^2+0.0005\Gamma+0.4987$
West	1,000 W	$\Phi = 0.0077\Gamma+0.4511$
perimeter	2,000 W	$\Phi = 0.0013\Gamma+0.4932$

을 산출하였다. 외주부에서는 일사로 인한 부하가 1,000 W일 때 Gamma는 $4.47 \leq \Gamma \leq 19.99$, 일사 부하가 2,000 W인 경우 $4.17 \leq \Gamma \leq 17.73$ 로 나타났다. Gamma 값 증가에 따라 Phi 값은 좁은 상승폭을 보였으며 외주부에서의 상관관계식은 일차식으로 산출하였다.

5. 결론

본 연구는 전산유체역학 해석기법을 활용하여 다양한 디퓨저의 갯수, 풍량, 실내 발열을 설정하고 실내 수직 온도 분포를 정밀하게 분석하여 바닥공조시스템의 디퓨저에 대한 성층화 성능식인 Gamma-Phi 상관관계식을 도출한 것으로, 그 결론은 다음과 같다.

- (1) 일사에 영향을 받지 않는 내주부는 외주부에 비해서 적은 실내 부하를 보이는데, 공급 풍량이 증가할수록 거주역뿐만 아니라 비거주역까지 공조되어 거주역-비거주역 온도차 감소로 Phi 값이 1.0에 가까워져 성층화가 잘 형성되지 않음을 나타냈다.
- (2) 외주부의 경우 일사로 인해 실내 부하가 상승하게 된다. 공급 풍량이 증가하여도 거주역의 높은 부하 처리로 인해 일정 수준의 거주역-비거주역 온도차를 보였고 그에 따라 Phi 값은 0.4에서 0.6의 값을 나타냈다.

References

1. Chung, J. D., Hong, H. K., and Yoo, H. S., 2006, Effect of Radiative Mean Temperature on Thermal comfort of Underfloor Air Distribution, In Proceedings of the Summer Conference of SAREK, Yongpyong, South Korea, pp. 15-20.
2. Yoon, S. H., Jang, H. I., Kim, K. A., Yu, K. H., and

- Suh, S. J., 2013, An Energy Performance Evaluation of UFAD System under the Various Conditions of Thermal Load, Journal of Air-Conditioning and Ref. Eng., Vol. 25, No. 1, pp. 14-19.
3. Zhang, K., Zhang, X., Li, S., and Jin, X., 2014, Experimental Study on the Characteristics of Supply air for UFAD System with Perforated Tiles, Journal of Energy and Buildings, Vol. 80, pp. 1-6.
4. Zhang, K., Zhang, X., and Li, S., 2016, Simplified Model for Desired Airflow Rate in Underfloor Air Distribution(UFAD) Systems, Journal of Applied Thermal Engineering, Vol. 93, pp. 244-250.
5. Jang, H. I., Yoon, S. H., Lee, H. S., and Suh, S. J., 2012, Comparison on the Energy Performance of Underfloor Air Distribution System According to Modeling Method Using EnergyPlus, Journal of Air-Conditioning and Ref. Eng., Vol. 24, No. 10, pp. 718-723.
6. Lin, Y. J. P. and Linden, P. F., 2005, A Model for and Under Floor Air Distribution System, Journal of Energy and Buildings, Vol. 37, No. 4, pp. 399-409.
7. Schiavon, S., Webster, T., Dickerhoff, D., and Bauman, F., 2014, Stratification Prediction Model for Perimeter Zone UFAD Diffusers based on Laboratory testing with Solar Simulator, Journal of Energy and Building, Vol. 82, pp. 786-794.
8. Webster, T. and Bauman, F., 2006, Design Guidelines for Stratification in UFAD Systems, Journal of HPAC Eng., Vol. 78, No. 6, pp. 6-16.
9. Paftery, P., Lee, K. H., Webster, T., and Bauman, F., 2011, Analysis of a hybrid UFAD and Radiant Hydronic Slab HVAC System, Center for the Built Environment, pp. 1-10.
10. Webster, T., Lee, K. H., Hoyt, T., Feng, J., Daly, A., Schiavon, S., and Bauman, F., 2011, Development of Guidelines for Modeling Underfloor Air Distribution (UFAD) Systems in EnergyPlus, eQUEST, and Energy-Pro for Use in California non-residential Building Energy Efficiency Standards, Center for the Built Environment, Final Report, pp. 1-39.