

동절기 옥외 수영장 시설의 운영을 위한 바닥난방 성능평가 및 설계기준에 관한 사례연구

Evaluation of Floor Heating Performance and Design Criteria for Operating an Outdoor Swimming Pool During Winter : A Case Study

조진균(Jinkyun Cho)¹, 우경현(Kyunghun Woo)², 김진호(Jin-Ho Kim)^{3*}

¹한국건설생활환경시험연구원, ²삼성물산(주) 건설부문, ³수원과학대학교 건축기계설비과

¹Construction & Energy Business Division, KCL(Korea Conformity Laboratories), Jincheon, 27872, Korea

²Construction Technology Team, Samsung C&T Corporation, Seongnam, 13530, Korea

³Department of Building Technology, Suwon Science College, Hwasung, 18516, Korea

(Received March 26, 2017; revision received March 29, 2017; Accepted: March 30, 2017)

Abstract This study aimed to analyze the deck floor heating system of an outdoor swimming pool in terms of the thermal capacity/output and the surface temperature distribution based on the outdoor temperature, to design for anti-freezing during winter. Through the transient heat transfer simulation with PHYSIBEL and theoretical equations, the surface temperature distribution of the floor heating system at two outdoor conditions in Jeju, were calculated and evaluated. The results indicate that the specific thermal output required for maintaining 4°C surface temperature at the design outdoor temperature of 0.1°C, was about 90 W/m². This performance analysis can be applied for future design criteria, including optimizations of system capacity and size.

Key words Outdoor swimming pool(옥외수영장), Floor heating system(바닥난방시스템), Anti-freezing(결빙방지), 3-dimensional heat transfer analysis(3차원 전열해석), Thermal capacity(열용량)

* Corresponding author, E-mail: jinho.kim@ssc.ac.kr

기호설명

K_o	: upward heat transmittance [W/m ² °C]	q	: design heat capacity [W/m ²]
K_u	: downward heat transmittance [W/m ² °C]	t_a	: time constant [h]
a_o	: surface heat transfer coefficient [W/m ² °C]	T_U	: ground temperature [°C]
d	: pavement thickness [m]	T_o	: outdoor temperature [°C]
λ	: heat conductivity [W/m°C]	c	: specific heat [kJ/kg°C]
q_o	: upward heat capacity [W/m ²]	δ	: density [kg/m ³]

1. 서 론

국내의 대규모 호텔, 리조트 및 워터파크에서 온수를 사용하는 옥외 수영장들이 동절기에도 지속적으로 운영이 된다. 이러한 동절기 운영에 따른 수영장(pool)이 위치한 외부 바닥데크(deck)의 낮은 표면온도로 사용자의 불쾌감 유발 및 결빙에 의한 안전성 문제가 예상된다. 그러나 실내가 아닌 옥외 수영장의 동절기 운영조건 및 데크 바닥난방의 명확한 설계기준은 없는 실정이다. 또한 외부의 온도조건, 사용자의 착의량, 수영장의 사용시간 및 시설운영에 따라 바닥온도에 대한 사용자의 불쾌적도를 평가하거나 고려하여 바닥온도를 설정

하는 것은 많은 불확실성이 있으며 과도한 에너지 소비로 이어질 수 있다.

본 연구는 옥외 수영장 바닥난방 시스템의 설계기준이 불명확하여, 안전성을 고려한 결빙을 방지 할 수 있는 최소의 기준으로 전열성능 평가를 진행하였다. 바닥난방 시스템의 방열량, 동절기 지역적 기후조건에 대한 표면온도 등 요구사항과 부합하는지를 사전검토를 통한 설계 적정성을 검증하는 것이 주된 목적이다.

이를 위하여, 1단계로 바닥난방의 최소 설계기준을 만족할 수 있는 지역적 기후환경 및 설계온도를 고려하여 분석조건 설정을 명확하게 하고, 2단계로 바닥난방 시스템의 표면온도 예측방법 및 실험식을 사용하여 해당 시스템의 전열성능을 분석하였다. 그리고 3차원 구조체에 대한 전열해석 시뮬레이션을 이용하여 전열 성능을 복합적으로 평가 후, 시뮬레이션 결과와 예측 이론식 결과의 상호 비교평가를 3단계로 수행하였다. 마지막으로 결빙방지를 위한 최소 설계기준(바닥난방 코일, 장비용량 등)의 난방출력 및 설계 적정성을 분석하는 단계로 진행 하였다.

2. 분석대상 및 조건

2.1 분석대상 및 시스템 개요

해석 대상 시설은 제주지역에 소재한 대규모 호텔/리조트의 부속시설로 1,000 m²의 옥외 수영장이 해당되고, 그 중 1개의 수영풀을 선정하였다. Fig. 1과 같이, 수영풀 주변을 둘러싸고 있는 데크에 난방 시스템이 구성되어 있다. 두 개의 데크의 폭은 약 4.0 m이며, 내부에 설치된 바닥난방 코일은 각각 피치간격 250 mm의 10개의 XL 파이프프로 구성되어 있다. 배관 1개의 길이는 30~40 m이며, 1개의 데크에 2개 존(5개의 파이프)으로 구분되었고 온수의 입구와 출구를 서로 반대로 구성하여 온도편차를 최소화 하도록 설계되어 있다. 옥외 수영장 데크의 바닥난방 시스템 상세는 Table 1과 같다. 데크의 마감은 화산석이고 몰탈과 무근콘크리트 두께를 고려하면, 20 mm 배관 상부로 140 mm의 각각의 두께를 갖는 구조체가 있다. 또한 배관 하부방향으로 전달되는 열량의 열손실을 최소화하기 위해 단열재를 설치하였다.

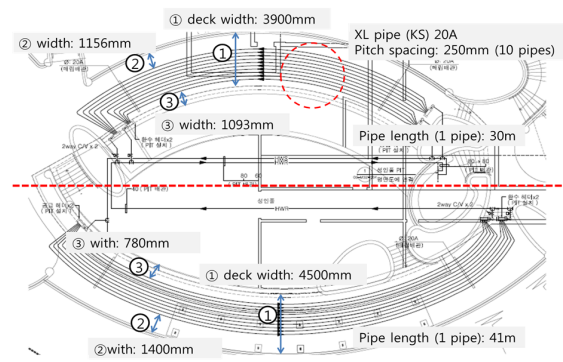


Fig. 1 Floor heating system configuration.

Table 1 Floor heating system details in outdoor zone (above ground)

	Thickness (m)	Specific heat (kJ/kg °C)	Density (kg/m ³)	Heat conductivity (W/m °C)	Outdoor swimming pool deck floor heating system
Volcanic rock(flagstone)	0.03	1.01	2,850	3.5	
Mortar	0.04	0.65	2,040	0.55	
Plain concrete	0.07	0.86	2,000	1.1	
Floor heating(20 mm)	0.02	1.80	940	0.22	
Styrofoam	0.04	1.51	30	0.04	
Plain concrete	0.10	0.86	2,000	1.1	
Riprap	0.15	5.00	2,750	3.84	

Table 2 Heat source and supply conditions of floor heating system in outdoor zone

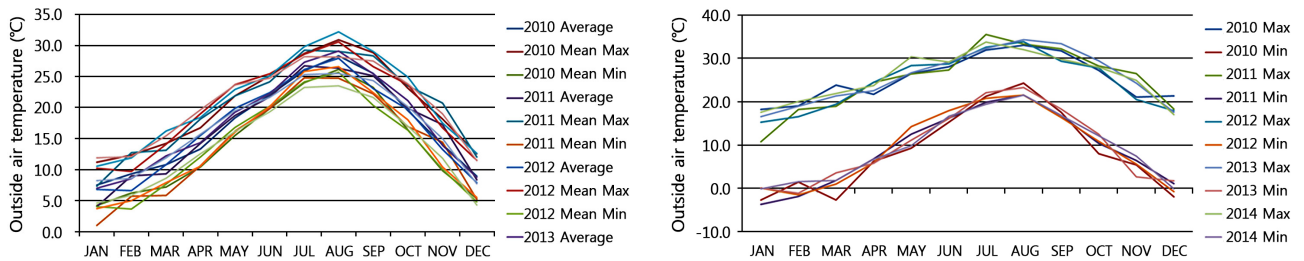
Heat capacity(W)	69,700	Pipe length(m)	40	
Hot water outlet temperature(°C)	55	Inner pipe diameter(mm)	16	
Hot water inlet temperature(°C)	50	1 pipe flow rate(m³/h)	0.6	
Total flow rate(m³/h)	12	Pipe-section area(m²)	0.0002	
Total number of pipes(EA)	20	Flow speed(m/s)	1.2	

Table 2의 바닥난방 시스템의 열원공급 조건을 보면, 온수의 공급온도는 55°C, 환수온도는 50°C로 $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ 및 온수유량은 12 m³/h이다. 따라서 데크의 면적(200 m²)을 기준으로 단위면적당 열량은 약 250 W/m²가 된다.

시뮬레이션 경계조건으로 배관의 길이는 40 m로 하고 1개의 배관에는 평균 0.6 m³/h의 온수가 1.2 m/s의 유속으로 공급되도록 설정하였다.

2.2 시스템 분석조건

옥외 수영장의 바닥난방 시스템 성능을 평가하기 위해서는 외부로 노출된 데크 상부 바닥면에 접하는 외기와 하부 구조체와 면하는 지중구조체의 온도조건의 설정이 필요하다. 시스템 검토를 위한 Table 3의 제주도의 건축물 에너지 설계기준에 의한 동절기 외기설계온도와 5년간(2010~2014년) 서귀포 지역의 평균 외기온도 분포를 고려하여 선정 하였다. Fig. 2(a)에서와 같이 5년간 월평균 최저 기온은 1.0°C로 연중 영상을 유지하고 있으며, Fig. 2(b)의 일평균 최저 극값은 -3.7°C로 30년 기후데이터⁽¹⁾의 일평균최저 극값(-3.9°C)과 유사하다. 구조체의 전열해석을 위한 외기조건은 제주도의 외기설계조건인 0.1°C와 서귀포지역의 일평균 최저 극값 -3.9°C의 두 가지 조건 모두 해석을 수행하였다. 구조체의 하류 쪽으로 작용하는 전열해석을 위한 온도설정은 바닥난방 시스템설치를 위한 0.5 m 이상의 굴착기준으로 Table 4의 기상청의 지중온도 분포의 최저값인 10.4°C를 적용 하였고 수영풀의 물 온도는 28.0°C를 기준으로 분석하였다.



(a) Monthly average outdoor air temperature.

(b) Daily extreme average outdoor air temperature.

Fig. 2 5-year outdoor air temperature statistical data.

Table 3 Design temperature(building energy codes)

Dry bulb(°C)	Cooling	Heating
Jeju Island	30.9	0.1

Table 4 Monthly underground temperature(Jeju Island)

Ground Temp.	JAN	FEB	MAR	SEP	OCT	NOV	DEC
0.5 m	10.6	10.4	12.1	26.3	22.7	18.1	13.4
1.0 m	14.1	12.8	13.0	25.9	23.8	20.7	17.0
1.5 m	15.4	13.7	13.0	24.4	23.2	21.0	18.2

3. 옥외 바닥난방 시스템 전열해석 평가

동절기 옥외 수영장 바닥난방 시스템의 운영을 위한 필요 열량을 분석하고 지역의 기후특성을 고려한 적절한 설계기준을 제시하기 위해서 대규모 호텔의 부속시설을 대상으로 사례연구를 진행하였다. 이를 위해서 3차원 전열해석 프로그램 PHYSIBEL을 활용하여 바닥난방 시스템의 전열해석을 수행하였다.

3.1 옥외 바닥난방 시스템의 설계이론

3.1.1 옥외 바닥난방 시스템의 전열량 산출 이론

결빙방지를 위한 옥외의 바닥난방 시스템은 도로용설 시스템의 설계이론을 활용하여 해석이 가능하다. 결빙 방지에 필요한 열방정식은 Chapman에 의해 제안되었고, Chapman과 Katunich은 노면에 필요한 설계출력에 대한 이론식을 제안하였다.⁽²⁾ 옥외수영장 바닥난방 시스템의 하부와 측면의 손실을 고려하여 설계출력을 계산하여야하며, 이 손실량은 마감형태, 외기온도, 지중온도 등에 따라서 큰 차이를 보인다.⁽³⁾ 바닥난방의 표면에서의 실질적인 설계출력을 산출하기 위해서는 식(1)의 상부에 대한 열관류율과 식(2)의 하부에 대한 열관류율을 계산해야한다. 그리고 외기온도와 지중온도 조건을 산입하여 식(3)의 표면으로 작용하는 열용량 산출이 가능하다.⁽⁴⁾ 다시, 구조체의 물성치를 고려한 상향으로 전달되는 열량에 대한 시간상수를 식(4)를 사용하여 산출하고 식(5)의 최대 도달 가능한 표면온도 상승범위 계산 후 최종적으로는 식(6)을 사용하여 시간경과에 따른 바닥난방 시스템 표면의 상승온도를 도출할 수 있다.

$$K_O = \frac{1}{\frac{1}{a_o} + \sum \frac{d}{\lambda}} \quad (1)$$

$$K_U = \frac{1}{\sum \frac{d}{\lambda}} \quad (2)$$

$$q_o = \frac{K_O}{K_O + K_U} q + \frac{K_O}{K_O + K_U} K_U (T_U - T_O) \quad (3)$$

$$t_a = \frac{1.15 \sum c \delta d}{K_O} \quad (4)$$

$$T_{\max} = \frac{q_o}{a} \quad (5)$$

$$T = T_O + T_{\max} (1 - e^{-\frac{1}{t_a}}) \quad (6)$$

3.1.2 옥외 바닥난방 시스템의 전열성능 분석

외부에 노출된 바닥난방 시스템의 전열성능에 대한 이론식을 사용하여 제주지역의 동절기 옥외수영장 테크의 표면온도 산출이 가능하였다. 앞에서 설정한 분석조건에 따라 외기의 온도는 0.1℃와 -3.9℃의 두 가지 조건에 대해서 분석을 하였고 외기와 면한 구조체의 표면열전달계수는 평균 풍속인 1.5 m/s를 기준으로 적용하였다. Table 5는 외기조건에 따른 옥외 바닥난방 시스템의 입력조건과 출력결과를 보여준다. 입력열량(q)은 설계용량인 250 W/m²이며, 배관의 상·하로 작용하는 열관류율은 각각 동일하지만 외기온도가 더 낮을 경우, 출력열량(q_o)이 증가하게 되어 에너지 요구량이 증가하게 된다.

Table 5 Calculation results of thermal performance

Boundary conditions		Condition-1	Condition-2
Inputs	q [W/m ²]	250	250
	$a_o^{a)}$ [W/m ² °C]	20	20
	$T_o^{b)}$ [°C]	0.1	-3.9
	$T_u^{b)}$ [°C]	10	10
Results	K_o [W/m ² °C]	4.897	4.897
	K_u [W/m ² °C]	1.408	1.408
	q_o [W/m ²]	197	201
	t_a [h]	17.24	17.24
	T_{max} [°C]	9.86	10.08

a) at wind speed 1.5 m/s

b) Korea Meteorological Agency data

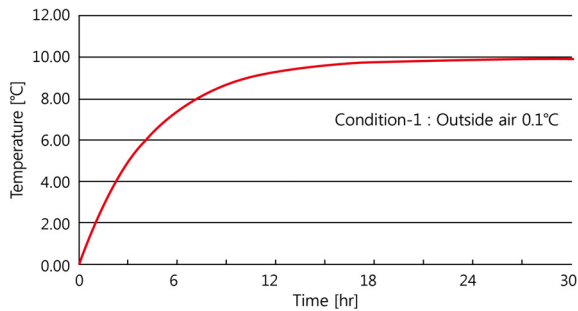


Fig. 3 Surface temperature changes on condition-1.

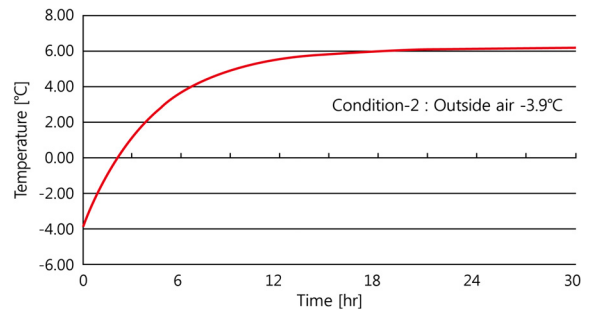


Fig. 4 Surface temperature changes on condition-2.

외기조건 0.1°C의 Fig. 3에서와 같이, 표면온도는 지속적으로 상승하여 약 9.8°C에 도달하며, 초기가동 후 약 18시간 경과 시 안정화에 접어든다. 외기조건 -3.9°C의 경우도 지속적으로 표면온도가 상승하여 동일시간 경과 후 안정화가 되며 온도는 약 6.2°C에 수렴한다. 또한 결빙방지가 가능한 표면온도 조건으로는 약 2시간 경과 후 도달이 가능하다. 현재의 설계용량은 동절기 연속운전을 한다는 조건에서는 실제로 결빙을 방지하는 목적보다는 초과한 용량이다. 그러나 초기가동 후, 일정시간 내에 영상의 온도를 유지해야하는 사항일 경우 추가적인 검토가 필요하다.

3.2 비정상 전열해석 평가 시뮬레이션

3차원 비정상상태 전열해석 시뮬레이션을 통해 옥외 바닥난방 시스템의 온수 공급온도 및 설계유량을 기준으로 구조체의 전열량과 배관의 환수온도 변화량 및 방열면의 표면온도 변화를 평가하였다. 해석프로그램은 PHYSIBEL(VOLTRA)를 사용하였고 이론식으로 계산한 결과와 비교하여 검증하였다.

3.2.1 시스템 모델링 및 분석방법

Fig. 5의 해석을 위한 시뮬레이션 모델은 옥외 바닥난방이 적용된 데크 부분인 160 m²(4 m×40 m)의 구조체를 Table 1의 기준으로 구성하였다.

온수 공급온도 55°C와 유량 12 m³/h을 기준으로 외기의 온도조건을 0.1°C와 -3.9°C를 적용한 2개의 모델을 대상으로 환수온도 강하, 평균 표면온도를 분석하였다. 구조체 상·하부의 표면열전달율을 포함한 열관유율은 각각 4.90과 1.40 W/m²°C로 설정하였고 배관경 20 mm(내경 16 mm)의 XL관을 사용하였다. 전열해석은 온열원 초기가동 후, 10분 간격으로 36시간 동안 진행하였다. 구조체의 4개의 단면으로는 열손실이 없는 것으로 가정하였다. 바닥난방 시스템은 배관매설층 하부에 단열층을 두어 하부의 방열량이 상부방열량의 약 10% 수준이다.

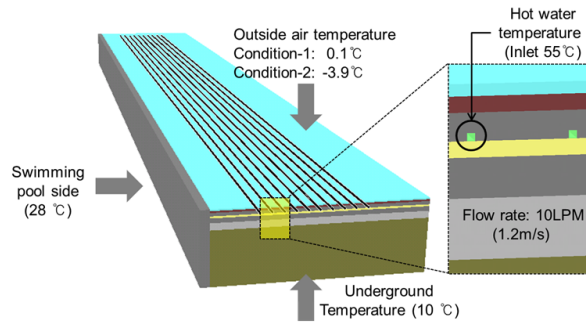


Fig. 5 Simulation modeling and pipe layout.

3.2.2 시뮬레이션 결과 분석

외기온도에 따른 바닥난방 시스템의 전열특성을 평가하기 위해 해석모델의 온수공급온도, 환수온도 그리고 평균표면온도를 구하였다.

외기조건 0.1°C의 구조체 표면온도 변화는 Fig. 6과 같이, 지속적으로 온수를 공급함에 따라 증가하였고 약 17시간 이후부터는 안정화 되어 9.9°C에 도달하게 된다. 환수온도는 52.8°C, 온도강하(ΔT)는 2.2°C로서 거의 일정한 감소폭을 나타내며 수렴하였다. Fig. 7은 동일 외기조건에서의 온도가 안정화된 상태의 구조체의 표면 온도 분포를 보여준다.

Fig. 8의 외기조건 -3.9°C인 구조체 표면온도 변화는 초기가동 후 지속적으로 증가하여 17시간 이후 약 6.3°C에 안정화 된다. 또한 환수온도도 52.7°C, 온도강하(ΔT)는 2.3°C로서 거의 일정한 방열량을 갖는 것으로 해석되었다. 그리고 Fig. 9은 -3.9°C의 외기조건에서의 안정화된 구조체의 표면온도 분포를 보여준다.

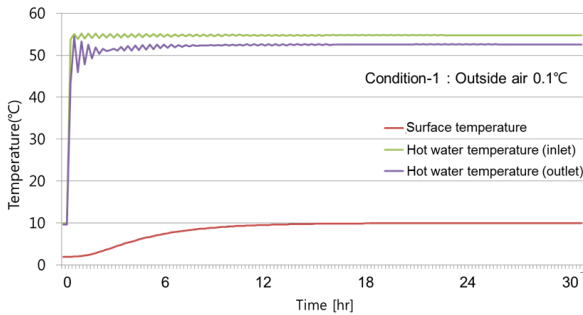


Fig. 6 Temperature differences between hot water supply and return on condition-1.

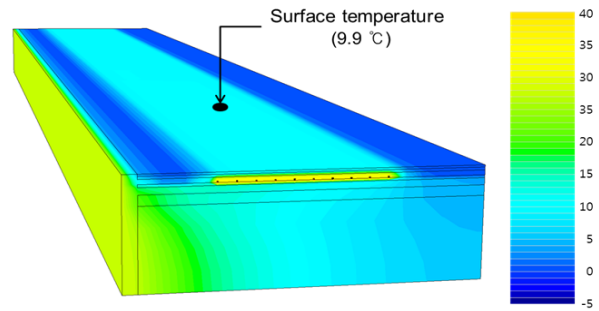


Fig. 7 Floor surface temp. distribution at condition-1.

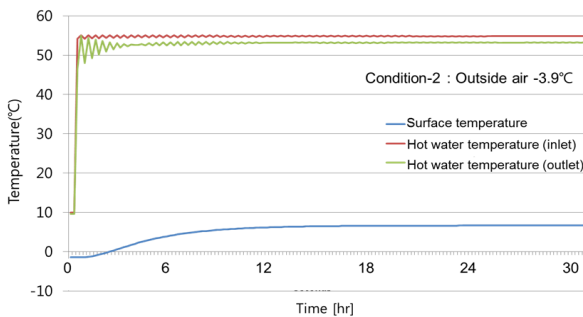


Fig. 8 Temperature differences between hot water supply and return on condition-2.

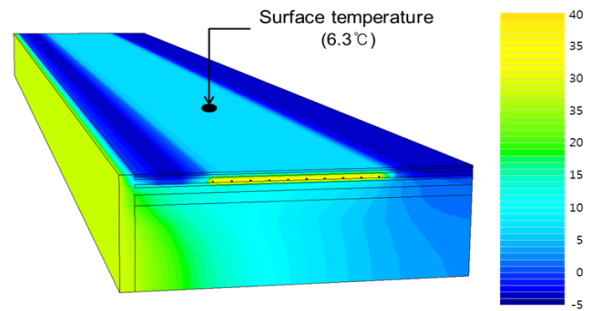


Fig. 9 Floor surface temp. distribution at condition-2.

Table 6 Corroboration of theoretical equation and simulation results

	Surface temperature		Time(h)	
	at 0.1℃	at -3.9℃	at 0.1℃	at -3.9℃
Theoretical equation	9.8	6.2	17.24	17.24
PHYSIBEL simulation	9.9	6.3	16.83	17.17
Percentage difference	-1.01%	-1.59%	2.44%	0.41%

Table 7 Outdoor temperature for heating design

	Seoul	Daejeon	Gwangju	Busan	Jeju
Dry bulb(℃)	-11.3	-10.3	-6.6	-5.3	0.1

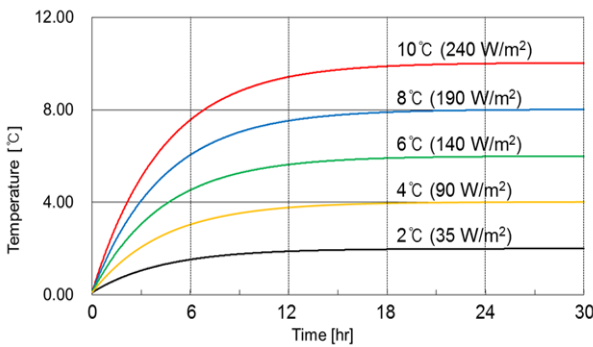


Fig. 10 Thermal output according to the target surface temperature variation at Jeju.

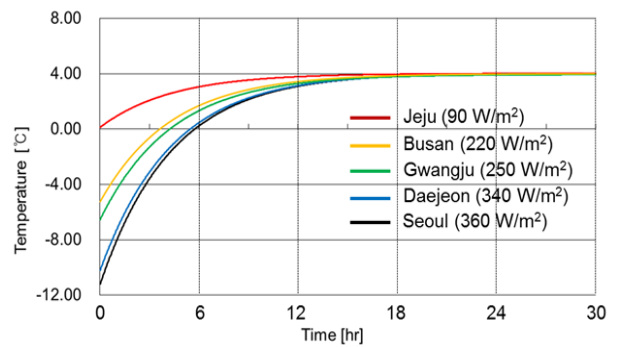


Fig. 11 Thermal output according to various regions at the target surface temperature 4℃.

4. 옥외 바닥난방 설계의 적정성 검토

결빙방지를 위한 바닥난방 시스템 표면온도 예측방법의 이론식과 3차원 구조체 전열해석 시뮬레이션과 상호비교를 한 결과, Table 6에서와 같이 바닥표면의 온도와 안정화되어 수렴하는 시간이 3% 이내에서 거의 일치하는 것으로 분석되었다. 따라서 이론식을 기준으로 설계 적정성 및 기준제시가 가능하다.

이론식을 이용하여 제주지역의 외기설계온도 0.1℃, 온수공급온도 55℃ 기준으로 Fig. 10과 같이, 표면온도를 2~10℃를 유지하기 위한 공급열량은 35~240 W/m²으로 나타났다. 따라서 일정시간 동안 1℃의 표면온도를 상승시키는데 약 25 W/m²의 열량이 필요하다. 실제로 결빙방지를 위한 외기온도기준을 일평균 최저 극값을 사용할 경우는 과도한 설계용량선정으로 이어질 수 있기 때문에 설계온도를 기준으로 선정을 하되, 동절기 동안은 연속운전을 하는 운영조건이 필요하다.

연속운전을 전제로 옥외수영장 데크의 결빙방지를 위한 구조체의 최소 표면온도 기준을 4℃로 가정을 하면, 주요 도시별 설계외기온도(Table 7)를 기준으로 필요한 설계용량은 Fig. 11과 같이 서울, 대전, 광주, 부산, 제주지역별로 각각 360, 340, 250, 220, 90 W/m²가 된다. 즉 제주와 서울을 비교하면 5배의 용량차이가 발생하는 것으로 분석되었다.

5. 결 론

동절기 옥외수영장에서 결빙방지를 위한 바닥난방시스템을 적용하기 위해서는 외기조건에 따른 전열특성을 파악하는 것이 중요하다. 바닥난방 시스템은 구조체 축열로 인해 공급되는 외기의 온도조건, 운전방법 및 결빙방지를 위한 최소 표면온도조건에 따라 동적으로 열적인 반응특성이 다르게 나타난다.

본 연구는 현재 설계기준이 불분명한 옥외 수영장의 난방시스템을 전열해석 프로그램을 이용하여 구조체

축열시스템을 분석하였고 일정 표면온도 유지를 위한 평가모델의 이론식에 근거한 전열해석을 진행하여 전열특성을 고찰 하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 동절기 결빙방지를 위한 옥외 수영장의 난방 시스템 표면온도 예측방법의 이론식과 3차원 구조체 전열 해석 시뮬레이션과 상호비교를 한 결과, 구조체 표면의 온도와 안정화에 소요되는 시간이 3% 이내의 정확도를 확인 하였다.
- (2) 제주지역의 사례분석을 통해 외기설계온도 0.1℃ 기준으로 표면온도를 4~10℃를 유지하기 위한 공급열량은 90~240 W/m²으로 나타났다. 일정시간동안 표면온도를 1℃ 상승에 25 W/m²의 열량이 필요하다.
- (3) 적정 설비용량과 에너지 절약적인 측면에서 결빙방지를 위한 난방시스템은 외기설계온도를 기준으로 적용하고 연속난방이 전제되어야 한다.

옥외수영장 데크의 결빙방지를 위한 난방시스템의 명확한 설계기준 확립을 위해 지역별, 시스템 구성별 전열성능은 향후 사용자의 온열쾌적감과 연계하여 보다 현실적인 구조체의 표면온도 기준을 제시하는 것이 필요할 것이다.

References

1. KMA, 2011, Climatological normals of Korea(1981~2010), Korea Meteorological Administration.
2. ASHRAE, 2015, ASHRAE Handbook-HVAC Applications, Chapter 51 snow melting and freeze protection.
3. Housing Research Institute, 1996, A Study on the Criteria of Design and Construction for Snow Melting System, Korea National Housing Corporation.
4. Recknagel, H. and Sprenger, E., 1982, Heating and Air Conditioning, Gradjevinska knjiga, Belgrade.