

지능형 헬스케어 욕조시스템 개발을 위한 온수 온도변화

김기범[†]

전북대학교 공과대학 생체정보공학부·공학연구원 공업기술연구센터·실버공학연구센터
561-756 전북 전주시 덕진구 덕진동1가 664-14
(2006년 3월 9일 접수, 2006년 6월 20일 채택)

Change of the Warm Water Temperature for the Development of Smart Healthcare Bathing System

Gi-Beum Kim[†]

Division of Bionics and Bioinformatics, The Research Center of Industrial Technology, The Research Center of Silver Engineering, Engineering Research Institute, College of Engineering, Chonbuk National University, 664-14, Duckjin-dong 1ga, Duckjin-gu, Jeonju, Jeonbuk 561-756, Korea
(Received 9 March 2006; accepted 20 June 2006)

요약

본 연구에서는 전도열손실과 증발에 의한 열손실을 바탕으로 욕조의 자유표면에서 일어나는 온수의 열손실을 해석하고자 한다. 연구결과 욕조의 성능을 평가할 수 있는 식을 열전달 기본식으로 부터 관계식을 도출하였으며 이 식은 매우 시정적이며 정량적이었다. 특히 욕조 내 온수의 냉각은 증발에 의한 열손실이 지배적이었다. 또한, 온수의 온도 냉각 속도는 온수의 온도에는 크게 영향을 받지 않으나 욕실의 습도에 따라 크게 영향을 받는 것으로 확인되었다. 그러므로 욕조의 온도는 41~45 °C를 유지하며 욕실의 습도가 95%를 유지하는 것이 가장 효과적이라 판단된다.

Abstract – In this study, heat loss through free surface of water contained in bathtub due to conduction and evaporation has been analyzed. As a result of this study, a relational equation has been derived based on the basic theory of heat transfer to evaluate the performance of bath tubes. The derived equation was rational and quantitative. The major heat loss was found to be due to evaporation. Moreover, it has been found out that the speed of heat loss depends more on the humidity of the bathroom than the temperature of water contained in the bathtub. So, it is best to maintain the temperature of bathtub water to be between 41 to 45 °C and the humidity of bathroom to be 95%.

Key words: Bathing System, Heat Transfer, Evaporation Heat Loss, Conductivity Heat Loss, Evaporation Latent Heat

1. 서론

현대 욕실은 단순히 생리욕구를 충족시켰던 개념에서 휴식기능, 안전의 기능까지 갖춘 복합적인 건강 관리공간으로 그 의미와 기능이 확대되어 가고 있다. 또한, 미래의 욕실은 몸을 씻는 것에 한정되지 않고 눈에 보이지 않는 건강의 이상 징후까지 찾아낼 수 있는 건강 체크 공간으로 발전할 것이 예상된다[1]. 주거공간에서 열적 환경의 복합적인 요소가 인체에 미치는 영향을 정량적으로 표현하고 이를 바탕으로 쾌적한 열적 조건의 범위를 제시하기 위한 다양한 온열 환경 평가지표들이 개발되어 왔다. 또한, 인간-온열계 환경 해석을 위하여 주거공간에서의 온열 환경 분석, 인체의 온열 메커니즘 분석 및 냉난방 공조장치에 의한 열적 환경의 변화를 중심으

로 연구가 진행되어 왔다[2, 3]. 욕실 내의 환경적 측면으로는 욕실 및 욕조에 대한 심미 기능학적인 연구도 활발하게 진행되어 최적의 욕조설계에 대한 인체공학적인 설계방안들도 연구되고 있다[4]. 일반적으로 욕조의 열적 환경 해석에서 욕조 내 온수의 냉각속도를 지배하는 열손실에는 첫째로 온수의 자유표면을 통한 증발열 손실과, 둘째로 침수된 욕조벽을 통한 열전도 손실 그리고 셋째로 침수되지 않은 노출된 욕조 벽면에서의 대류열 손실로 나누어진다. 이 밖에 복사에 의한 열손실도 생각할 수 있으나, 온수의 온도를 고려하기에는 너무 낮아서 이는 무시되어진다. 이상 세 가지 열손실 중 세 번째는 첫 번째와 두 번째에 비해서 2% 미만으로 되기 때문에 일반적으로 무시될 수 있다. 그러나 상대습도가 아주 높지 않을 때에는 첫째의 증발열 손실이 가장 지배적이다[5]. 그러므로 본 연구에서는 전도와 증발에 의한 열손실을 바탕으로 욕조의 자유표면에서 일어나는 온수의 열손실을 해석하고자 하였다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: kgb70@chonbuk.ac.kr

2. 이론적 배경

2-1. 전도열 손실에 의한 냉각식

온수가 동일한 두께(Δx)의 균일한 보온재로 둘러싸였을 때를 가 정하였을 때, 자유표면에서의 증발열 손실량과 이와 같은 양의 열 손실을 갖는 욕조 벽면적으로 자유표면적을 나타낼 수 있다[5]. 온 수의 질량을 M, 비열을 C_p, 총전도증면적을 A, 시간 t 동안에 초기 온도 T₀에서 T로 냉각된다고 하면, 열수지는 (1)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$MC_p(T_0 - T) = \int_0^t Ak \left(\frac{T - T_\infty}{\Delta x} \right) dt \quad (1)$$

여기서, T_∞는 욕실 내의 평균온도이다. 이 식을 다시 정리하면 (2)식과 같은 욕조 내 온수의 냉각식을 도출할 수 있다.

$$T = T_\infty + (T_0 - T_\infty) e^{-\frac{Ak}{MC_p \Delta x} t} \quad (2)$$

(2)식과 같은 욕조 보온 기본식을 보면 결국 온수의 온도는 시간에 대한 음의 지수함수로 감소함을 알 수 있다. 또한, (2)식의 양변을 각각 T₀로 빼면 온도강하(냉각)를 시간의 함수로 표시할 수 있으며 (3)식을 얻을 수 있다.

$$\frac{T_0 - T}{T_0 - T_\infty} = 1 - e^{-\frac{Ak}{MC_p \Delta x} t} \quad (3)$$

이 식이 온수의 냉각기본식이다.

2-2. 총괄열전도도, k

욕조 벽 층을 통한 전도열 손실에 의하여 욕조 내의 온도 T는 외면 의 경막 계수 h에 의해서 곡선으로 감소하고, PVC 판과 보온재 층에 서 각각 다른 구배의 직선적으로 감소하며, 다시 보온 벽 외면의 경막 계수 h'에 의해서 곡선으로 실온까지 감소하게 되는데, 이를 점선으 로 표시한 것 같이 T에서 T_∞로 단일한 열전도에 의해 떨어진다[6].

$$\frac{T - T_1}{h \Delta x} = \frac{T_1 - T_2}{k_1 \Delta x / \Delta x_1} = \frac{T_2 - T_3}{k_2 \Delta x / \Delta x_2} = \frac{T_3 - T_\infty}{h' \Delta x} = \frac{T - T_\infty}{k} \quad (4)$$

여기서, $k = \left(\frac{1}{h \Delta x} + \frac{\Delta x_1}{k_1 \Delta x} + \frac{\Delta x_2}{k_2 \Delta x} + \frac{1}{h' \Delta x} \right)^{-1}$ 이며 총괄 열전도도(k) 를 구할 수가 있다.

2-3. 증발열 손실

욕조 내의 온수의 냉각은 자유표면에서의 증발에 의한 물질전달로 인한 열손실이 큰 비중을 차지하고 있다. 이와 같은 이유는 증발 잠열 이 크기 때문이며 이와 같은 증발열 손실이 지배적인 요인이 된다[5].

2-3-1. 증발량

증발량을 산출할 수 있는 완전한 이론식이 없으며 다만 반경험 이론식만 있다. Lee와 Suh의 논문에 의하면 대기의 온도와 수표면 온도가 평형을 이루고 있는 경우 증발에 의한 수분감소량 E_{ev}은 (5)식 과 같이 반경험 이론식을 만들었다[5].

$$E_{ev} = (0.37 + 0.0041\bar{v})(P_s - P_w)^{0.88} \quad (5)$$

여기서, \bar{v} 는 바람의 일속, P_s는 수면상 5'의 곳에서의 온도에 대한 포화수증기압이며 P_w는 같은 위치에서의 실제증기압이다.

2-3-2. 증발 잠열, L

증발 잠열은 온수의 온도를 절대온도로 표시하며 (6)식과 같이 나 타낼 수 있다[5].

$$L = (T + 273.16) S_{fg} \quad (6)$$

여기서, S_{fg}는 증발 엔트로피이며 수증기표에서 찾을 수 있다[7].

2-3-3. 증발열 손실량 계산

증발이 발생하는 자유표면의 수분이 줄어드는 양은 자유표면적 A_f를 곱하면 증발량을 부피로 알 수 있으며, 밀도와 증발 잠열을 곱 하면 증발열 손실량(Q_{ev})의 열량을 적분으로서 얻을 수 있어 (7)식 과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{ev} = \int_0^t E_{ev} A_f \rho L dt = \int_{T_0}^T E_{ev} A_f \rho L \frac{MC_p \Delta x}{(T_0 - T_\infty) k A} dT \quad (7)$$

여기서, $dt = -\frac{MC_p \Delta x}{(T_0 - T_\infty) k A} dT$ 로 표시할 수 있으며 E_{ev}가 증발에 의 한 수분 강하이기 때문에 음으로 표시해야 한다.

2-3-4. 등가 자유 면적

앞에서와 같이 증발 열손실을 계산하려면 복잡한 적분계산을 해 야 하며, 총전도증면적도 온도와 습도의 함수이기 때문에 그 관계 를 알지 못하고서는 이 적분을 하는 것이 어렵다. 따라서 먼저 등가 자유표면적 A'_f를 구해야 한다. 단위 시간당의 증발열 손실량은 E_{ev}A_fρL(cal)이며, 자유표면에 동일한 전도벽면적 A'_f을 통하여 유출 되는 열량은 kA'_f(T-T_∞)/Δx이다. 여기서 A'_f를 구하면 다음 (8)식과 같이 나타낼 수 있다.

$$A'_f = \frac{\rho E_{ev} L \Delta x}{k(T - T_\infty)} A_f \quad (8)$$

3. 결과 및 고찰

3-1. 총괄 열전도율 k의 결정

열전도율과 경막계수의 결정은 매우 까다롭다. 그러므로 본 연구 에서는 다음과 같은 실험으로 그 총괄 열전도율 k를 결정하였다. 다 음 Fig. 2와 같이 열 차단막을 덮고 10 cm가량 덮어서 욕조자유표 면에서 일어나는 증발의 열손실을 차단한다. 따라서 열은 욕조 벽 면을 통하는 전도 열손실만이 될 것이다. 또 다른 실험은 두 개의

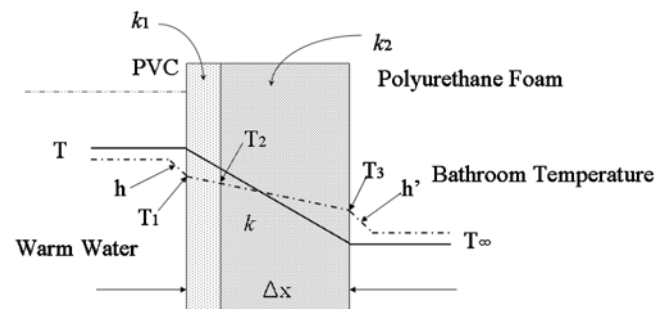


Fig. 1. The composition of heat resistances materials.

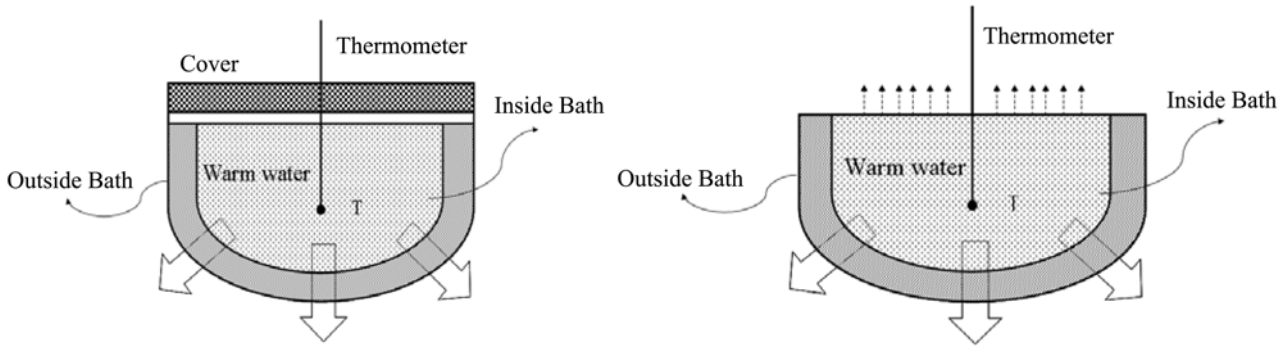


Fig. 2. Diagram to measure heat conductivity.

수조의 자유표면을 그대로 열어 놓고 온수의 온도 강하를 시간에 따라 측정하는 것이다. 이 양자의 차가 순증발에 의한 열손실에 의한 것으로 볼 수 있다.

이 실험에서 두 수조의 온수의 물의 부피는 200 L이다. 욕조의 벽 두께는 11 cm이었다. 온수의 온도는 45 °C이며 욕실의 온도는 21 °C, 습도는 80%이었다. 실험결과 열 차단막을 사용하였을 때 1시간 경과 후 온수의 온도는 0.2 °C의 온도 변화를 가져왔으며, 차단막을 사용하지 않았을 때는 1.3 °C의 온도 변화를 나타내었다. 결국, 1시간 동안에 욕조 벽면을 통한 열손실로 0.2 °C가 냉각된 것이다. 그러므로 (3)식에서 총괄 열전도도를 결정하기 위하여 각각의 변수를 대입하여 계산하면 $0.3 \times 10^{-4} \text{ cal/cm} \cdot \text{°C} \cdot \text{sec}$ 의 열전도도를 얻을 수 있었다. 이 값이 실제 욕조벽의 총괄 열전도율의 값이다.

3.2. 증발 잠열

증발 잠열은 (6)식을 이용하여 계산할 수 있다. 그러나 (6)식에서 S_{fg} 는 증발 엔트로피이며 수증기표에서 찾을 수 있다. 그러나 증발 엔트로피는 온도에 대한 함수이므로 온도에 대한 관계식을 만들기 위하여 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있으며 $S_{fg} = 3.486T^{-0.174}$ 와 같은 관계식을 얻을 수 있었다. 그러므로 이 관계식을 (6)식에 대입하여 정리하면 (9)식과 같이 나타낼 수 있다.

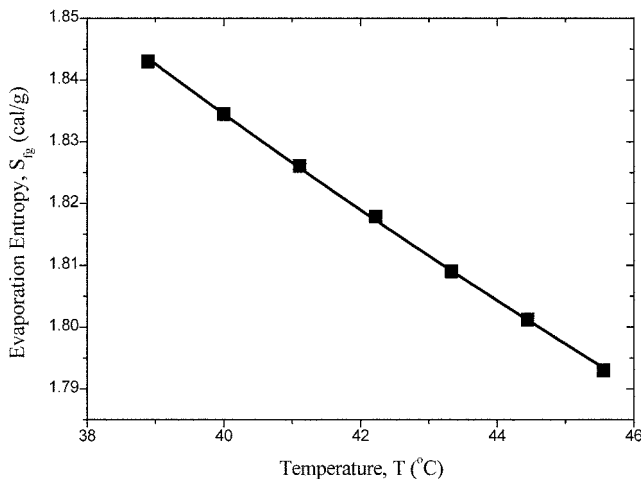


Fig. 3. Evaporation entropy variation with temperature.

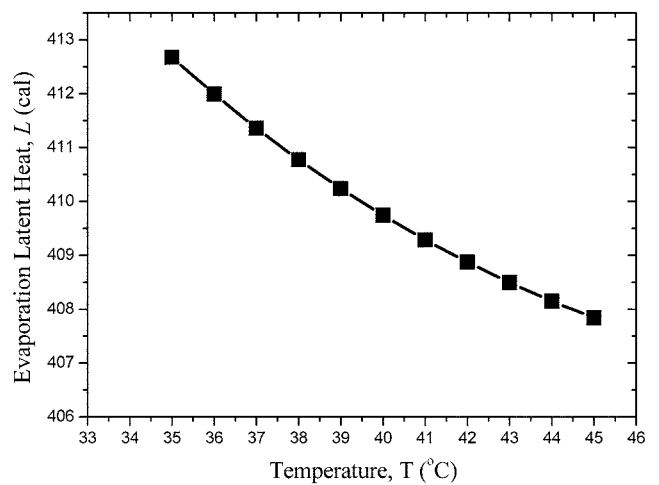


Fig. 4. Evaporation latent heat in terms of temperature.

$$L = (T + 273.16)(3.484T^{-0.174}) \tag{9}$$

(9)식을 이용하여 온도에 대한 증발잠열을 계산하면 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 온도가 증가하면 증발잠열은 감소하는 경향을 보이고 있다. 잠열은 물질이 온도·압력의 변화를 보이지 않고 평형을 유지하면서 한 상에서 다른 상으로 전이할 때 흡수 또는 발생하는 열을 의미한다. 이와 같이 온도가 증가하면 증발잠열이 감소 이유는 욕조 온수 표면에서 5' 위의 온도가 욕조의 온수온도와 차이가 없기 때문이다. 그러므로 욕실 내 온도를 욕조 온도와 차이를 줄여줌으로써 증발에 의한 열손실을 감소시킬 수 있으리라 판단된다.

3.3. 증발량의 계산

온수의 증발량을 계산하기 위하여 (5)식에서 온도의 변화에 따른 P_s 는 수증기표를 이용하여 (10)식과 같이 나타낼 수 있었다.

$$P_s = 0.0041 \times e^{T/22.009} - 0.004 \tag{10}$$

여기서, T는 온도(°C)이다. 또한, (10)식을 (5)식에 대입하여 정리하면 증발량을 계산할 수 있다. 그러나 (5)식에서 P_s 와 P_w 사이에

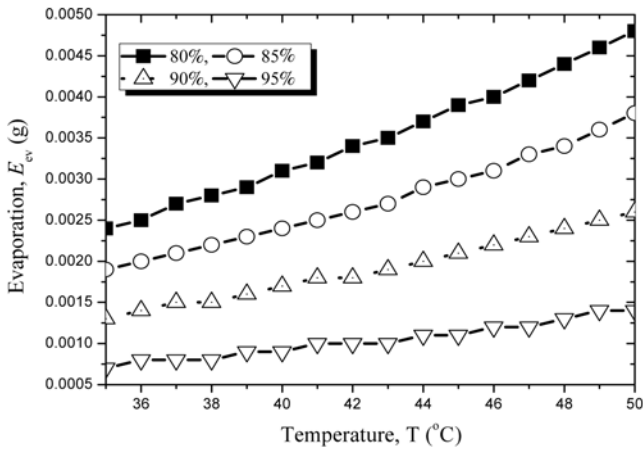


Fig. 5. Amount of evaporation vs. bathroom temperature at several bathroom humidity.

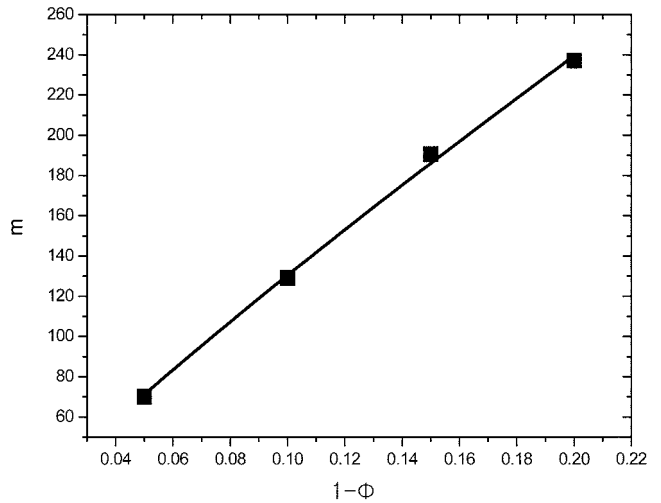


Fig. 6. The variation of m according to the bathroom humidity.

는 상대습도 ϕ 로 $P_w = P_s \phi$ 와 같은 관계가 있으므로 $(P_s - P_w)^{0.88}$ 는 $(P_s - P_w)^{0.88} = P_s^{0.88} (1 - \phi)^{0.88}$ 로 나타낼 수 있다. 그러나 (10)식은 보통 욕조 온수가 35~50 °C일 때 가장 유효한 식이다. 이 식을 (5)식에 대입하여 정리하면 (11)식과 같이 나타낼 수 있다. 이 식이 욕조의 온수의 표면에서 발생하는 증발량을 계산하는 식이다.

$$E_{ev} = (0.37 + 0.0041\bar{v})(0.0041 \times e^{T/22.009} - 0.004)^{0.88} (1 - \phi)^{0.88} \quad (11)$$

(11)식에서 1항의 \bar{v} 는 욕실 내 바람의 유속이다. 그러나 욕실에서의 유속을 계산하거나 구하는 것은 매우 복잡하고 어렵다. 그러므로 본 연구에서는 이 바람의 유속을 무시하고 계산하도록 하였다. 그 결과 온도에 따른 증발량을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 욕조 내 습도가 높을 경우 증발하는 온수의 양은 낮아짐을 확인할 수 있었다. 또한, 온수의 온도가 높을수록 증발되는 온수의 양은 증가함을 확인할 수 있었다.

3-4. 등가 자유 면적

실제 자유표면적 A_f 의 $\frac{\rho E_{ev} L \Delta x}{k(T - T_{\infty})}$ 배가 등가자유표면적 A'_f 로 된다는 뜻이다. 이렇게 정의한 것이 의미가 있으려면 $\rho E_{ev} L \Delta x / k(T - T_{\infty})$ 가 변하지 않는 값이 되면 이상적이다. 등가 자유면적을 계산하기 위하여 m값을 계산한 결과를 Table 1에 표시하였다. 이 값은 실험에 의하여 얻어진 결과로 표에서 알 수 있듯이 m 값은 41~45 °C 내에서는 온도에 따라 변하지 않는 일정식이 되며 한 개의 식으로 나타내기 위하여 Fig. 6과 같은 표현할 수 있다. 이와 같은 결과에서 비

Table 1. Change amount of m by change of warm water temperature in various bathroom humidity

φ	$\frac{\rho E_{ev} L \Delta x}{k(T - T_{\infty})} \equiv m$			
	T=45 °C	T=43 °C	T=41 °C	Average Value m
0.8	236.34	237.18	238.02	237.18
0.85	202.4	184.38	184.8	190.53
0.9	128.23	129.07	129.49	128.93
0.95	69.56	69.98	70.4	69.98

선형 연립방정식을 이용하여 $m = 982.24(1 - \phi)^{0.877}$ 으로 나타낼 수 있으며 0.2% 미만의 오차범위로 나타낼 수 있다. 결국, 실험에 사용한 욕조의 자유표면적 A_f 를 $A'_f = mA_f$ 로 변환시켜 전면이 전도벽으로 둘러싸인 것으로 일반욕조 냉각 성능을 계산할 수 있다.

3-5. 온수의 냉각계산

욕조 내 온수의 냉각온도를 계산하기 위하여 (2)식을 이용한다. 그러나 (2)식에서 우변의 두 번째 항에서 지수에 있는 총전달층면적(A)를 계산하기 위하여 등가자유면적과 실제 온수 벽면적을 고려하여야 한다. 그러므로 지수 $kA/MC_p \Delta x$ 를 B라고 가정하였을 때 B 값은 온수의 양과 총전달층 면적의 함수로 나타낼 수 있다. 뿐만 아니라 총전달층 면적은 욕실 내 습도의 함수로 나타낼 수 있으므로 B값은 온수의 양과 욕실 내 습도의 함수로 나타낼 수 있다. 그래서 본 연구에서는 B의 값을 온수의 양과 욕실 내 습도의 변화에 따라 Table 2에 나타내었다. 또한, Table 2를 이용하여 욕실 내의 습도에 변화에 따른 B값의 변화량 예측하기 위하여 Fig. 7과 같이 나타내었다. 그림에서 B의 값은 욕실의 습도에 대한 함수로 나타낸 이유는 $kA/MC_p \Delta x$ 에서 A는 $A'_f + A_0$ 이다, 그러므로 등가자유면적은 습도의 함수이므로 본 연구에서는 B의 변화 값을 습도의 함수로 나타내었다. 여기서 A_0 는 실제 온수 벽면적, A'_f 는 등가자유면적이며 A_f 는 실제 자유면적이다.

Fig. 7에서 얻어진 결과식을 이용하여 온수의 초기온도와 욕실의 온도에 따라 욕조 내 온수의 온도 변화를 나타낸 그림이 Fig. 8이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 3시간 경과 후 욕실 내의 습도가 낮을 경

Table 2. Change amount of B by change of warm water amount in various bathroom humidity

φ	B					
	50 L	100 L	150 L	200 L	250 L	300 L
0.8	0.33254	0.18632	0.12326	0.09677	0.08074	0.06995
0.85	0.2588	0.14738	0.09599	0.07538	0.06291	0.05451
0.9	0.1819	0.10677	0.06755	0.05307	0.04431	0.03841
0.95	0.09987	0.06345	0.03721	0.02928	0.02448	0.02124

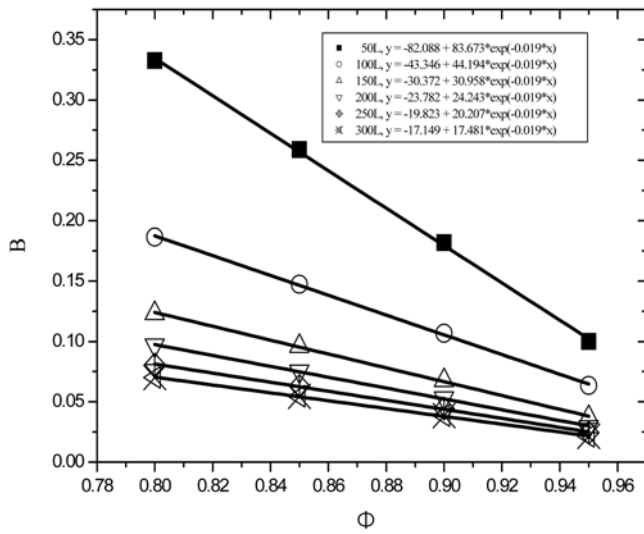


Fig. 7. Values of B vs. bathroom humidity according to the amount warm water.

우 습도가 높을 때 보다 온도변화가 현저히 나타났다. 또한, 온수의 부피가 작을 경우 부피가 클 경우보다 온도 변화가 현저히 나타났다. 그러나 온수의 부피가 같고 초기 온수의 온도가 다를 경우 온수의 온도변화는 크게 차이가 없었다.

3-6. 증발열 손실량의 계산

욕조 내 온수의 자유 표면으로부터 발생하는 단위 시간당 증발열 손실량은 $E_{ev} A_f \rho L$ (cal)로 표시 할 수 있으며 이 열손실량을 온수의 온도에 따라 Fig. 9와 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 욕조 내 온수의 초기온도가 높을 경우 증발에 의한 열손실은 크다.

또한, 온수의 부피가 증가하면 증발에 의한 열손실 또한 증가하는 경향을 보이고 있다. 그 이유는 온수의 부피가 증가하면 상대적으로 증발에 의한 열손실이 일어나는 자유표면적이 증가하기 때문에 증발열 손실이 더 증가하게 된다. 마지막으로 욕실 내 습도가 증가하면 증발에 의한 열손실이 낮아지는 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다.

3-7. 전도열 손실량의 계산

전도에 의한 열손실을 계산하기 위해서 자유표면에 동일한 전도벽면적 A_f' 을 통하여 유출되는 열량은 $kA_f'(T-T_{\infty})/\Delta x$ 으로 계산 할 수 있으며 그 결과를 Fig. 10과 같이 나타낼 수 있다. 전도에 의한 열손실의 변화는 증발에 의한 열손실 경향과 같은 경향을 보이고 있다. 그러나 무엇보다 중요한 것은 전도에 의한 열손실은 증발에 의한 열손실보다 작은 손실을 보이고 있다. 그러므로 욕조 내 온수의 온도변화는 전도에 의한 열손실보다는 온수의 자유표면으로 방출되어지는 증발열 손실이 더 지배적임을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구결과 욕조의 성능을 평가할 수 있는 식을 열전달 기본 식으로 부터 관계식을 도출하였으며 이 식은 매우 시정적이며 정량적이었다. 특히 욕조 내 온수의 냉각은 증발에 의한 열손실이 지배적이었다. 또한, 온수의 온도 냉각 속도는 온수의 온도에는 크게 영향을 받지 않으나 욕실의 습도에 따라 크게 영향을 받는 것으로 확인되었다. 그러므로 욕조의 온도는 41~45 °C를 유지하며 욕실의 습도가 95%를 유지하는 것이 가장 효과적이라 판단 된다.

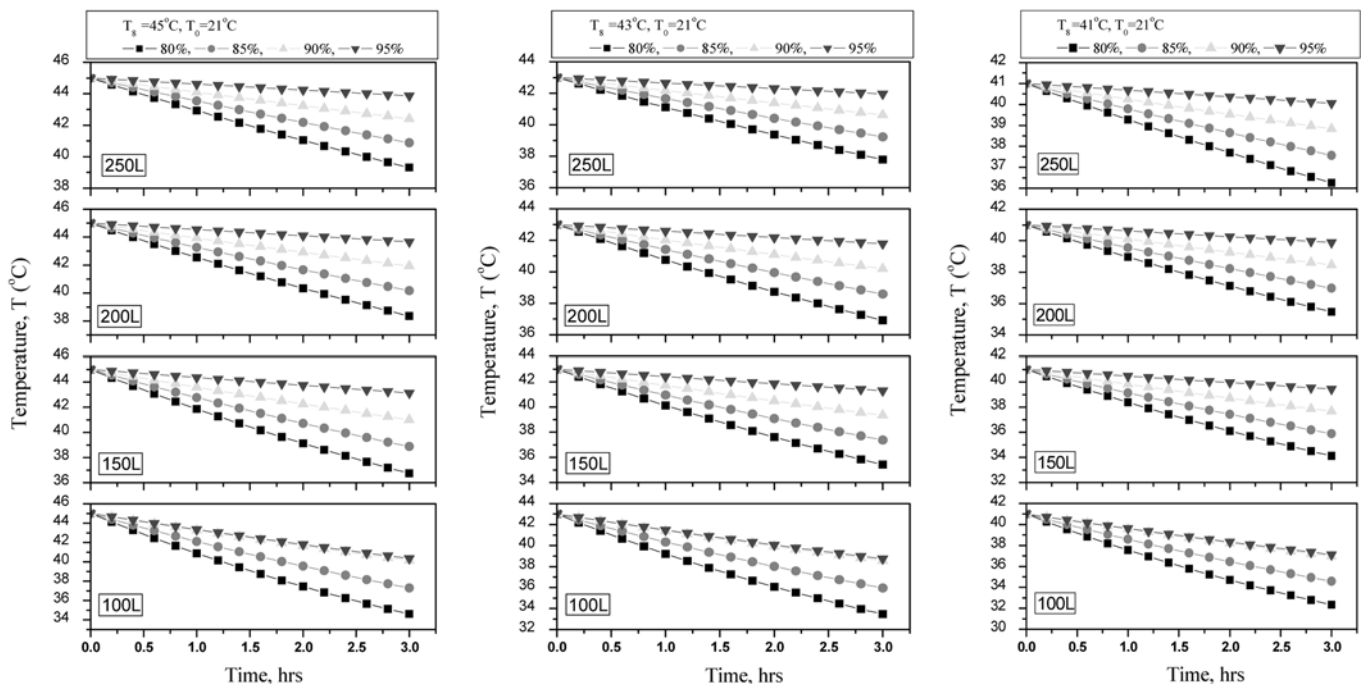


Fig. 8. Water temperature vs. time at various bathroom humidity.

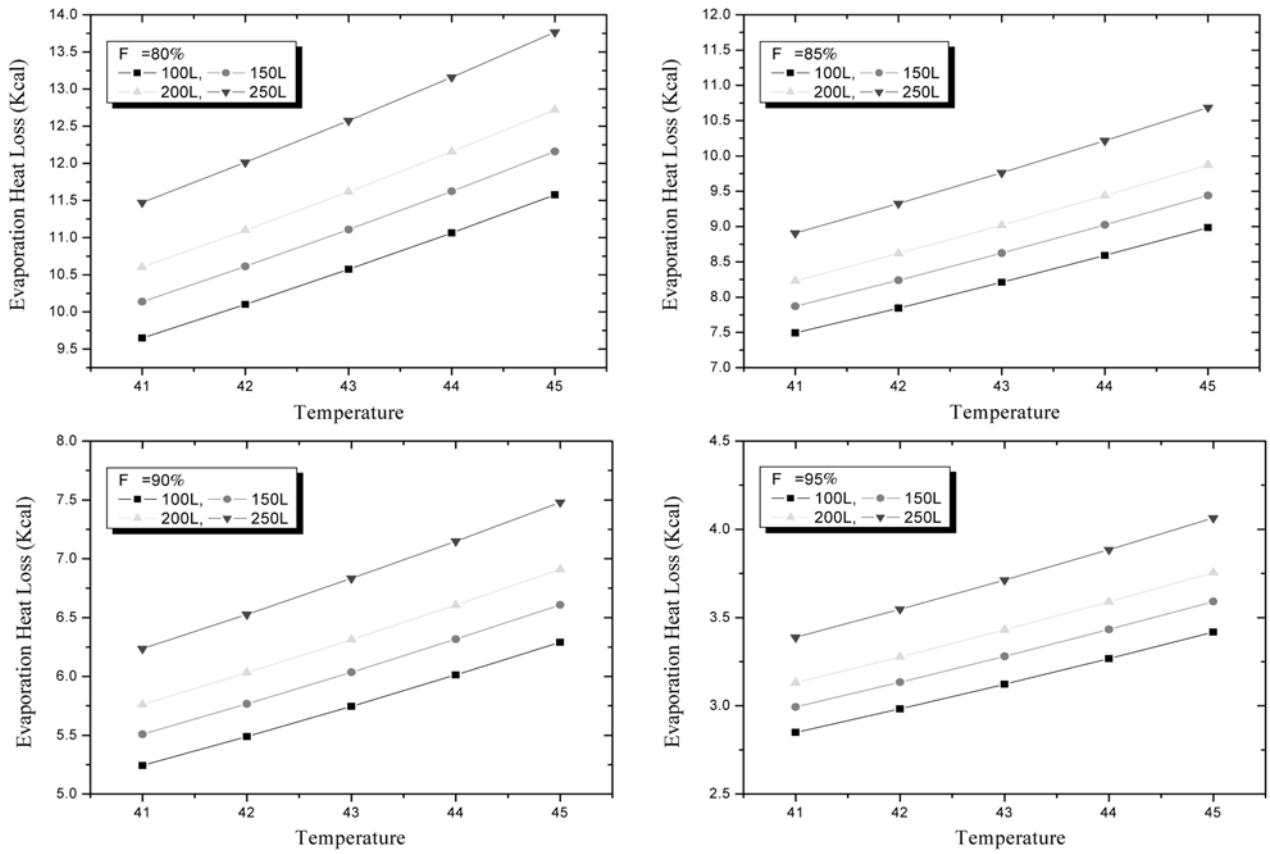


Fig. 9. Change of evaporation heat loss by change of warm water temperature in various bathroom humidity.

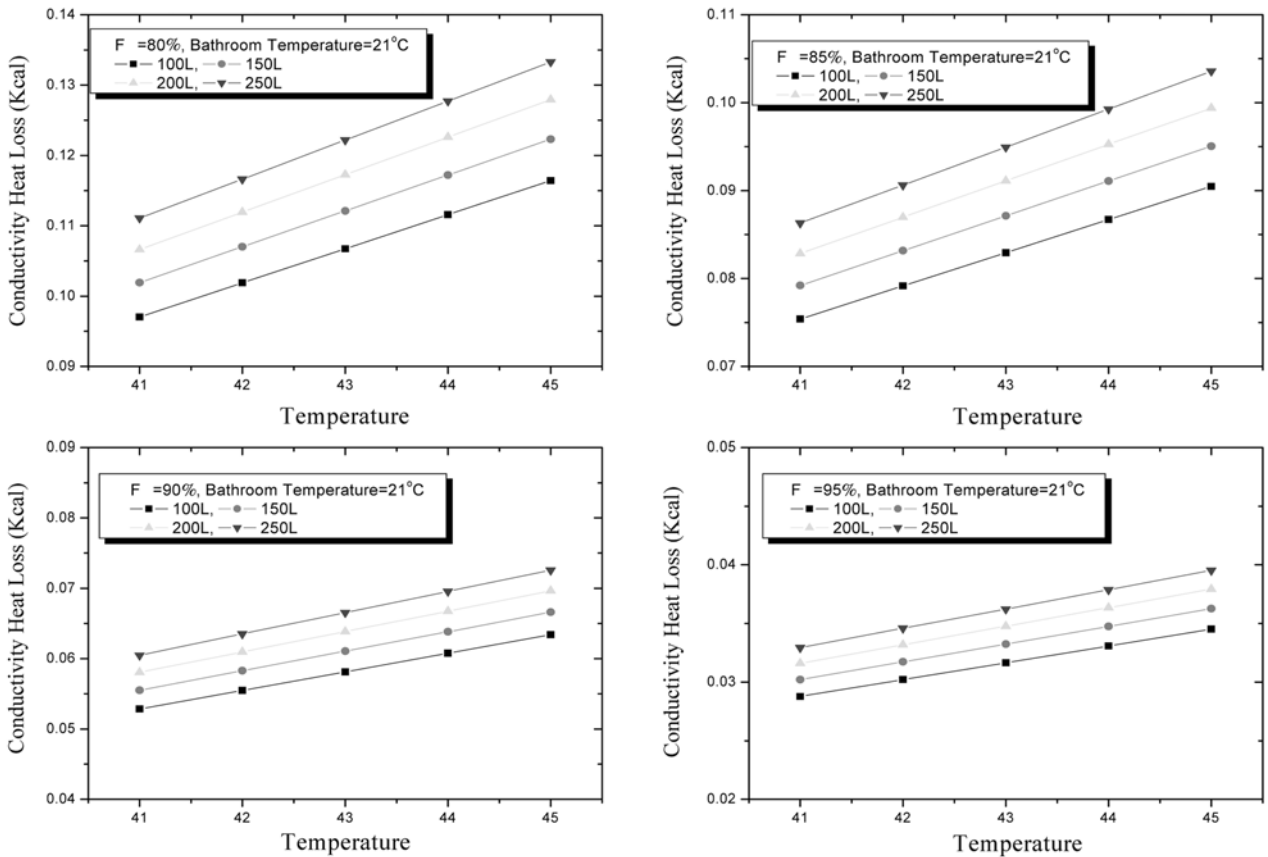


Fig. 10. Change of conductivity heat loss by change of warm water temperature in various bathroom humidity.

사용기호

M	: mass of Hot Water [g]
C_p	: specific heat [cal/g·°C]
A	: total conductivity area [cm ²]
t	: time [sec]
T_0	: initial temperature [°C]
T	: temperature after t hours [°C]
T_∞	: temperature in Bathroom [°C]
Δx	: thickness of heat insulating material [cm]
k	: total thermal conductivity [cal/cm·sec·°C]
h	: film coefficient of heat transfer [cal/cm ² ·sec·°C]
\bar{v}	: velocity of wind [cm/sec]
P_s	: saturated vapor pressure of 5 point on surface of water [mmHg]
P_w	: vapor pressure of 5 point on surface of water [mmHg]
L	: evaporation latent heat [cal]
S_{fg}	: evaporation Entropy [cal/g]
Q_{ev}	: evaporation Heat loss [kcal]
A'_f	: equivalence free surface area [cm ²]
A_f	: practical free surface area [cm ²]

ρ	: density [g/cm ³]
E_{ev}	: evaporation amount [g]

참고문헌

1. Kim, Y. C., Yu, M., Kim, H. J., Kwon, T. K., Hong, C. U. and Kim, N. G., "Analysis of Thermal Environmental System in the Bathroom," 2005 Spring Joint Conference of ESK & KOSES, and The 8th Korea Japan Joint Symposium on Ergonomics, 375-378(2005).
2. Myong, H. K., "Evaluation Index of Indoor Thermal Environment," *J. of the S.A.R.E.K.*, **21**(4), 257-270(1992).
3. Kwon, O., Ko, J. W. and Lee, J. Y., "Man-Thermal Environment System," Kyung Choon Sa, Seoul, 13-15(2004).
4. Kim, Y. D., Hwang, K. M. and Kang, B. L., "Exploratory Study on the Dimensions of Satisfaction with the Bathtub in the Apartment House," *Journal of Marketing Research*, **9**(3), 109-131(2004).
5. Lee, B. H. and Suh, J. I., "A Performance Equation of Bath Tubes," *J. of the S.A.R.E.K.*, **10**(1), 1-11(1981).
6. Choi, I. G., Cho, S. H. and Ro, S. T., "Heat Transfer," Bosung, Seoul(1993).