

유수대류계수에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Coefficient of Flow Convection

전 상 은* 오 태 근** 양 주 경*** 김 진 근****
Jeon, Sang Eun Oh, Tea Keun Yang, Ju Kyong Kim, Jin Keun

ABSTRACT

Pipe cooling method is widely used for reduction of hydration heat and control of cracking in mass concrete structures. However, in order to effectively apply pipe cooling systems to concrete structures, the coefficient of flow convection relating the thermal transfer between inner stream of pipe and concrete must be estimated.

In this study, a device measuring the coefficient of flow convection is developed. Since a variation of thermal distribution caused by pipe cooling has a direct effect on internal forced flows, the developed testing device is based on the internal forced flow concept. Influencing factors on the coefficient of flow convection are mainly flow velocity, pipe diameter and thickness, and pipe material. Finally, a prediction model of the coefficient of flow convection is proposed using experimental results from the developed device.

According to the proposed prediction model, the coefficient of flow convection increases with increase in flow velocity and decreases with increase in pipe diameter and thickness. Also, the coefficient of flow convection is largely affected by the type of pipe materials.

1. 서 론

유수대류계수는 파이프 쿨링을 적용할 때 유수와 콘크리트의 열교환을 나타내는 중요한 열물성치이다. 유수대류계수에 대한 연구는 1980년대에 일본에서 시작되었으며 현재까지 밝혀진 바에 의하면 유수대류계수는 유속에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 현재 국내에서 가장 널리 사용되고 있는 유수대류계수에 관한 모델식으로 일본 콘크리트 공학협회에서 제안된 식에 의하면 유속이 0.2~0.6 m/s 범위일 때 138~328 kcal/m²hr°C의 값을 갖는다^{(1),(2)}. 또한 유수대류계수에 유동성질과 파이프의 성상을 고려한 모델식이 제시되고 있다^{(3),(4)}. 그러나 이와 같은 유수대류계수의 연구에도 불구하고 제안식에 따라 동일 범위에서의 유수대류계수가 다르고 유수대류계수에 대한 영향인자로서 유속만을 고려하고 있다.

* 성희원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

** 성희원, 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

*** 성희원, 창원대학교 토목환경공학과 교수

**** 성희원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

유수대류계수의 영향인자를 고려한 모델식을 제안하기 위해서는 유수대류계수의 열역학적 특성을 알아야 하고 이를 효율적으로 모사할 수 있는 실험 방법이 개발되어야 하므로 본 연구에서는 유수대류계수의 개념을 통해 영향인자를 선정하고 실험 방법을 결정하여 유수대류계수에 대한 일반적인 모델식을 제안하고자 한다.

2. 실험 개요

2.1 실험 변수

동일한 관 형상, 유수, 표면온도, 입수온도 조건이라 하더라도 관의 재료나 유속이 달라진다면 출수 온도도 변하기 때문에 관의 재료가 유수대류계수에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또한 관의 두께나 직경의 변화에 의한 유수대류계수의 변화도 알 수 없다. 따라서 본 연구에서는 유동 성질인 유속뿐만 아니라 표 1에서 보인 바와 같이 관의 정상인 재료, 두께, 직경에 대한 유수대류계수의 변화를 실험적으로 구하고자 한다.

표 1 실험 변수

영향인자		실험 변수
유동성질	유속	0.2~1.5 m/sec
파이프	종류	steel, PVC
	직경	34mm, 21mm
	두께	2mm, 3mm

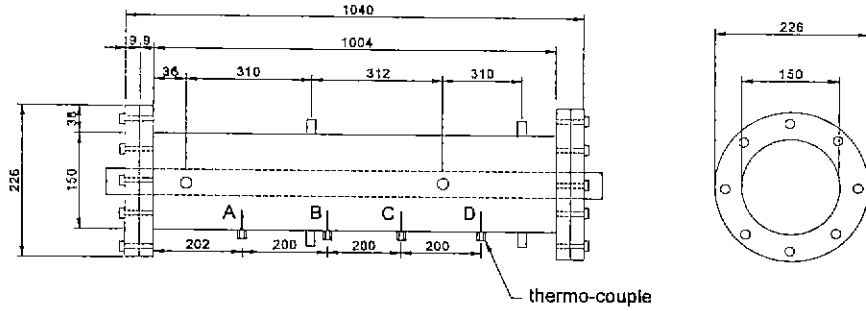
2.2 실험 방법

본 연구에서 고안된 실험 장치의 형상 및 온도 센서의 위치는 그림 1과 같다. 본 실험장치는 크게 일정 표면온도 설정부, 온도측정부로 나눌 수 있다. 일정 표면온도 설정부는 circulator와 아크릴 셀로 이루어져 있으며, 본 실험에 사용된 circulator는 용량 30L, 가용 온도범위 -25~110℃ 이고 수조안에 온도센서를 장착하여 수조의 온도를 일정하게 함으로써 유출구로 나가는 물의 온도를 일정하게 하여 주는 역할을 한다. 아크릴 셀은 파이프의 표면온도를 일정하게 유지하기 위한 장치로 셀 내부는 circulator를 이용하여 일정 온도의 물을 순환시켜주고, 셀 내부의 온도를 직접 모니터링하기 위하여 온도센서를 장착하였다. 파이프의 입구온도와 출구온도를 얻기 위하여 본 실험에서는 파이프 내부 중앙에 K type thermo-couple을 설치하여 입구온도와 출구온도의 변화를 측정하였다.

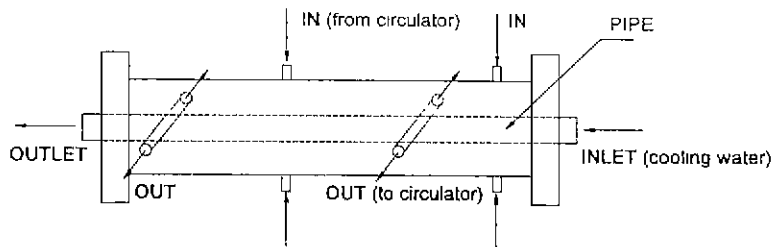
또한 유속이 증가하면 파이프 내의 유체에 의한 열손실이 커지기 때문에 이를 보충하기 위하여 circulator에 전열기를 추가적으로 배치하여 열손실을 최대한으로 방지하였다. 따라서 높은 셀 내부 온도를 유지시킬 수 있었으며, 표면온도를 원하는 수준으로 조절할 수 있었다.

2.3 해석 방법

그림 1과 같은 조건에서의 열전달은 셀 내부의 물과 파이프와의 대류, 파이프의 전도, 파이프와 파이프를 흐르는 유수 사이의 대류에 의해 일어난다(그림 2). 여기서 구하고자 하는 유수대류계수는 파이프와 파이프를 흐르는 유수 사이의 대류에 관계된 것이므로 그림 2에서 \overline{h}_i 에 해당한다. 본 실험에서는 온도센서를 이용하여 직접 파이프의 외측 온도를 측정하였으므로, $T_{\infty} = T_{w,o}$ 으로 가정하였다. 따라서 전체 열전달 저항은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다



(a) 셀과 표면 온도센서의 위치



(b) 셀과 circulator와의 연결

그림 1 고안된 실험 장치

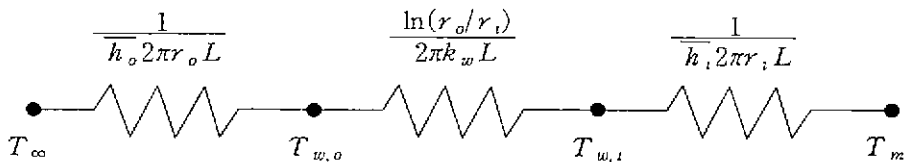


그림 2 실험 장치에서 일어나는 열전달의 모식도

$$R_{tot} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k_w L} + \frac{1}{h_i 2\pi r_i L} \quad (1)$$

여기서, R_{tot} : 열저항 ($\text{hr} \cdot ^\circ\text{C}/\text{kcal}$)

r_o : 파이프의 외경 (m)

r_i : 파이프의 내경 (m)

L : 파이프의 길이 (m)

k_w : 파이프의 열전도율 ($\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$)

\bar{h}_i : 유수대류계수 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}$)

또한 파이프 내부로 흐르는 유수에 의한 열손실은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다

$$q = \dot{m}c_p(T_{m,out} - T_{m,in}) = \dot{m}c_p[(T_{w,o} - T_{m,in}) - (T_{w,o} - T_{m,out})] \quad (2)$$

여기서, q : 열손실량 (kcal/sec)

c_p : 유수의 비열 (kcal/kg · °C)

$T_{m,out}$: 출구에서 유수의 평균 온도 (°C)

$T_{m,in}$: 입구에서 유수의 평균 온도 (°C)

$T_{w,o}$: 파이프의 외측 온도 (°C)

\dot{m} : 질량 유속 (kg/sec)

파이프 내부 유체의 평균 온도는 그림 3과 같이 이상화하여 결정할 수 있다. 본 실험장치에 의해 파이프 외측의 온도를 일정하게 하였으므로 관 내부의 유수 온도는 파이프 길이에 따라 그림 3과 같이 변화하며, 이 때의 평균 온도는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 이 때의 열전달율은 식 (4)와 같다.

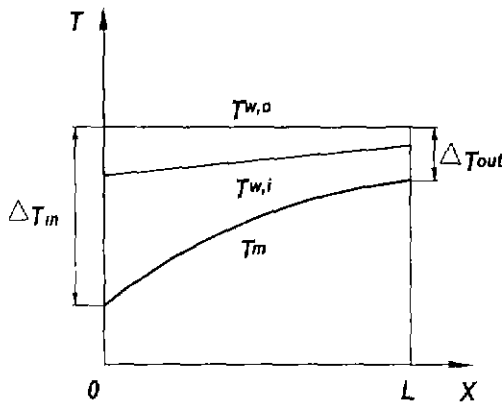


그림 3 길이에 따른 온도변화

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_{out} - \Delta T_{in}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{out}}{\Delta T_{in}}\right)} \quad (3)$$

$$q = \frac{\Delta T_{lm}}{R_{tot}} \quad (4)$$

식 (4)의 열전달은 식 (2)의 열손실에 의해 일어나기 때문에 식 (2)와 식 (4)를 이용하면, 식 (5)와 같은 유수대류계수의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\bar{h}_i = \frac{1}{2\pi r_i L \left[\frac{\Delta T_{lm}}{\dot{m}c_p(\Delta T_{in} - \Delta T_{out})} - \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k_w L} \right]} \quad (5)$$

3. 실험 결과 및 분석

3.1 실험 결과

본 연구에서 수행한 유수대류계수 실험을 통하여 얻은 결과를 표 2에 정리하였는데, 표 2에서 실험체의 표기방식은 다음과 같다. 첫 영문자는 파이프의 재료를 나타내고 S는 Steel 파이프, P는 PVC 파이프이다. Dxx(Diameter)는 파이프의 직경(외경)을 나타내는 것으로 단위는 mm이다. 마지막

T_{xx}(Thickness)는 파이프의 두께를 나타내며 직경과 마찬가지로 단위는 mm이다 예를 들면 SD34.3T3.3은 외경이 34.3mm, 두께 3.3mm인 steel 파이프를 나타낸다. 셸 내부 온도 A, B, C, D는 그림 1에서 보는 바와 같이 길이 방향으로 셸 내부 온도의 변화를 알아보기 위하여 설치한 온도센서의 값이며, 입구온도와 출구온도는 각각 파이프 내부 중앙에서의 온도값으로 셸의 입구와 출구 위치에서의 온도를 나타낸다. 유수대류계수는 식 (5)를 사용하여 구하였다. 일정 표면 온도 조건의 검증을 위해 40, 50, 60℃로 표면 온도를 변화하여 실험을 실시하였다.

표 2 실험 결과

실험체	셸 내부의 온도 (℃)					입구 온도 (℃)	출구 온도 (℃)	유 속 (m/sec) (kg/sec)	유수대류계수 (kcal/m ² hr ℃)
	A	B	C	D	평균				
SD34.3T3.3	40.2	40.8	40.8	40.8	40.7	10.3	11.6	0.456(0.273)	516
	40.6	41.1	41.2	41.2	41.0	10.7	11.9	0.528(0.316)	536
	40.0	40.5	40.4	40.5	40.4	11.0	11.6	0.980(0.585)	506
	39.5	40.1	40.2	40.4	40.1	10.9	11.5	1.20(0.720)	632
	49.0	49.7	49.7	49.7	49.5	10.4	11.75	0.618(0.370)	547
	48.8	49.3	49.3	49.4	49.2	10.5	11.7	0.720(0.430)	571
	48.5	49.3	49.3	49.1	49.1	10.7	11.8	0.836(0.500)	615
	48.7	49.5	49.6	49.5	49.3	10.9	11.7	1.27(0.760)	680
	58.5	59.2	59.2	59.3	59.1	10.4	12.2	0.565(0.338)	535
	58.7	59.3	59.5	59.7	59.3	10.4	11.8	0.800(0.480)	589
SD33.5T2.0	40.5	40.5	40.5	40.5	40.5	9.9	10.5	1.14(0.780)	604
	50.5	50.5	50.5	50.5	50.5	13.7	18.3	0.096(0.066)	340
	48.2	48.5	48.6	48.7	48.5	9.0	11.4	0.351(0.240)	587
	49.5	50.1	49.9	50.0	49.9	9.1	10.7	0.585(0.400)	626
	48.8	49.3	49.1	49.2	49.1	9.0	9.9	1.05(0.717)	637
	58.8	59.3	59.3	59.3	59.2	9.4	11.0	0.673(0.460)	587
SD21.6T2.5	57.9	58.2	58.0	58.2	58.1	9.5	10.5	1.12(0.770)	626
	42.2	41.7	41.8	41.5	41.8	9.3	11.9	0.620(0.135)	793
	41.9	41.8	41.7	41.5	41.7	9.3	11.2	0.947(0.205)	876
	41.7	41.4	41.4	41.4	41.5	9.5	11.0	1.22(0.264)	897
	50.9	50.9	51.0	50.5	50.8	9.5	13.4	0.508(0.110)	767
	51.1	51.0	51.1	50.5	50.9	9.8	12.1	0.980(0.212)	863
	51.0	50.8	50.9	50.2	50.7	9.9	11.7	1.30(0.283)	904
	60.0	60.2	60.1	59.5	60.0	9.9	13.7	0.680(0.147)	817
PD32.0T3.5	60.2	60.0	60.0	59.5	59.9	10.0	13.0	0.938(0.203)	891
	60.0	60.0	59.9	59.3	59.8	9.9	12.2	1.26(0.272)	909
	84.7	84.9	84.7	84.9	84.8	13.7	13.9	0.390(0.191)	24.2
PD32.0T3.5	84.5	84.6	84.5	84.6	84.6	13.8	14.0	0.670(0.327)	41.6
	82.7	82.9	82.7	82.9	82.8	13.8	13.9	1.23(0.603)	39.3

3.2 결과 분석

3.2.1 일정 표면 온도의 검증

본 실험에서 고안된 실험장치와 해석 방법에서 일정 표면 온도라는 가정을 하였다. 그러나 일정 표면 온도라는 조건으로 주어진 식 (5)를 통하여 실제의 다양한 온도 조건에 적용하고자 하면, 일정 표면 온도를 변화시켰을 때의 유수대류계수는 일정해야 한다. 이를 검증하기 위하여 각 실험체에 대해

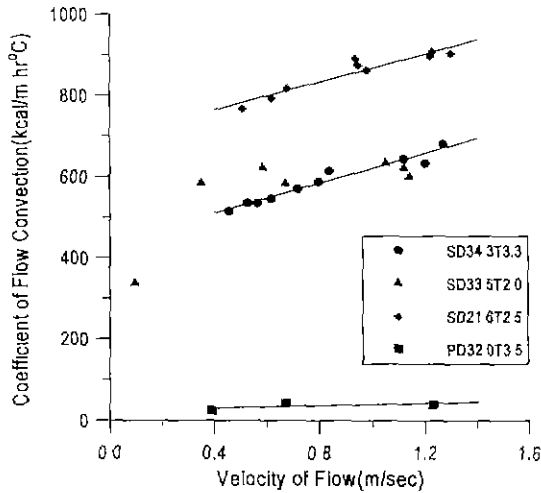


그림 4 실험결과와 제안 모델식

시하였다. 아래 제시된 식의 적용범위는 유속이 0.4~1.4m/s 이다. 실험 결과의 경향을 본다면 유속이 0.4m/s 이하일 경우에는 유속과 유수대류계수 사이의 비선형 관계가 나타날 것으로 사료되며, 저 유속에서의 실험 방법을 고안한다면 이를 검증할 수 있을 것이다.

$$h_w = 694 + 174v_w \quad \text{for SD21.6T2.5} \quad (6)$$

$$h_w = 438 + 183v_w \quad \text{for SD34.3T3.3} \quad (7)$$

$$h_w = 24 + 15v_w \quad \text{for PD32.0T3.5} \quad (8)$$

4. 결 론

유수대류계수의 실험을 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- (1) 유수대류계수는 파이프와 유수의 사이의 열전달을 나타내는 중요한 인자다.
- (2) 유수대류계수는 파이프 재질, 직경, 두께에 따라 다르게 나타나며, 유동성질인 유속에 따라서 증가한다. 본 논문에서는 실험 결과를 바탕으로 하여 이들 영향인자에 따른 유수대류계수 모델식을 제시하였다.
- (3) 파이프의 형태와 재질에 따른 보다 많은 연구를 수행하면 영향인자를 모두 포함하는 모델식을 개발할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. 小澤章三, "マスコン크리트の初期ひび割れとそ防止對策に關する研(I)", 發電水力, No 57, 1962 3.
2. 오병환, 신경준, 차수원, "매스 콘크리트 구조물의 파이프 쿨링에 의한 냉각효과", 한국콘크리트학회 불확률발표회 논문집, Vol. 11, No 1. 1999. 5. pp299~304
3. 田邊, 山川, 渡邊, "パイプクーリングにおける管壁面の熱傳達の決定ならびに冷却効果の解析", 土木學會論文集, 第34号, 1984 3
4. A. Bejan, "Heat Transfer", Wiley, 1993.
5. 이택식, 이재현, 이준식, "열전달", 최중당, 1992