

'99 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

수직관 벽면을 통한 열유속 측정 및 보정 방법

A Measurement and Compensation Method of the Heat Flux through a Vertical Tube Wall

주인철, 전문현, 노희천

한국과학기술원

대전광역시 유성구 구성동 373-1

성창경, 김성호

한국전력공사 전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

실험 및 코드 계산을 통하여 수직관 벽면을 통한 열유속을 효율적으로 측정하기 위한 연구를 수행하였다. 실험에서는 열유속 측정 오차의 정도와 오차의 선형성 및 보정 가능성을 살펴보았다. 또한 HEATING 7.2C 코드를 이용하여 접착물질의 열전도성과 열전대의 외경, 외부 열전달 조건, 그리고 열전대의 설치 위치가 열유속 측정에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 연구를 바탕으로 관 벽면을 통한 열유속의 효율적인 측정을 위한 방법 및 절차를 도출하였다.

Abstract

In the present work, a series of studies to effectively measure the heat flux through the vertical tube wall have been performed throughout the experiments and code calculation. In the experimental work, we have investigated the degree of errors and the linearity of the errors produced in the measurement of heat flux and feasibility of compensating the errors. Using HEATING 7.2C code, in addition, the effects of the thermal conductivity of bonding material, outside diameter of thermocouple, external heat transfer condition, and the location of thermocouple have been analyzed. Based on these works, the methodology and procedure to effectively measure the heat flux have been developed.

1. 서론

원자력발전소의 여러 계통중에는 증기발생기 U 튜브 또는 PRHRS, PSCS 등의 열교환기 튜브와 같이 수직관내의 뜨거운 유체로부터 발생하는 열이 벽면을 통하여 수직관 바깥쪽의 보다 차가운 수조내의 유체로 전달되는 경우를 쉽게 찾아볼 수 있다.

이와 같은 수직관내 열전달 현상을 실험적으로 규명하여 정량화 하고자 하는 경우, 가장 중요한 측정인자는 벽면을 통하여 수직관 외부로 방출되는 열유속이다. 또한 관 바깥쪽의 열전달 특성의 변화는 수직관내의 열전달 특성을 변화시킬 수 있기 때문에, 수직관 바깥쪽의 열전달 특성을 최대한 유지할 수 있는 열유속 측정방법이 바람직하다. 이러한 측정방법 중에는 서로 다른 반경방향의 위치에 설치한 두 개의 열전대를 이용하여 측정한 온도차로부터 다음과 같이 열유속을 계산하는 방법이 많이 이용되어 왔다 (그림 1).

$$q''(r_i) = k \frac{\Delta T}{r_i \ln(r_o/r_i)} \quad (1)$$

하지만 이와 같은 방법으로 측정한 열유속 값은 다음과 같은 인자들에 의하여 실제와는 다른 값을 나타내게 된다: ① 각각의 열전대가 갖고 있는 일정한 값의 Bias 오차에 따른 두 열전대간의 온도측정 오차 (ΔT 측정 오차), ② 열전대가 설치된 위치 (r_i 또는 r_o) 측정의 오차, ③ 설치된 열전대가 Fin의 역할을 함으로써 발생하는 온도분포의 변화, ④ 열전대를 수직관에 설치하는 과정에서 접착물질의 열전도성과 수직관의 열전도성과의 차이에 의한 온도분포의 변화.

일반적인 type-K 열전대는 95%의 신뢰도 범위에서 $\pm 2.5^\circ\text{C}$ 내외의 Bias 오차를 갖고 있다 [1, 2]. 위의 ②, ③, ④의 오차를 고려하지 않은 경우, 각각의 열전대가 갖고 있는 일정한 값의 Bias 오차 ($\sigma(\Delta T)$)가 열유속 측정에 미치는 오차 ($\sigma(q'')$)는 식 (1)에 의하여 다음과 같이 된다.

$$\frac{\sigma(q'')}{q''} = \frac{\sigma(\Delta T)}{\Delta T} \quad (2)$$

주어진 열전대간의 온도측정 오차에 대하여 열유속 범위에 따른 열유속 측정 오차는 표 1에 제시되어 있다. 수직관 치수는 올진 3&4 호기 증기발생기 전열관을 모사한 수직관을 기준으로 결정하였으며, 관 재질은 SUS 304로 가정하였다.

두 열전대사이의 거리와 열유속이 증가할수록 벽면을 통한 온도차가 증가하기 때문에, 열유속 측정 오차는 감소한다. 하지만, Mid-Loop 운전중 증기발생기를 노심붕괴열의 제거원으로 이용하는 Reflux Condensation Operation과 같이 열유속이 낮은 경우에는 벽면을 통한 온도차가 작기 때문에, 표 1에서 보는 바와 같이 낮은 범위의 열전대간의 온도측정 오차에 대하여서도 열유속 측정 오차는 높은 값을 갖는 것을 알 수 있다.

또한 표 2에 나타난 바와 같이 열전대가 설치된 위치 (r_i 또는 r_o) 측정의 오차가 열유속 측정 오차에 미치는 영향은 열유속 범위에 관계없이 일정하며, 열유속 측정 오차는 두 열전대사이의 거리가 증가함에 따라서 감소하게 된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 벽면 온도차를 이용하여 열유속을 측정하는 경우, 특히 낮은 열유속 범위에서, 실제 열유속과 큰 차이를 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 열유속 측정에서 발생하는

오차를 보정하여 보다 정확한 값을 구할 수 있는 방안을 모색하였으며, 또한 열유속 측정 오차를 최소화하기 위한 열전대의 규격 및 열전대 설치 방법에 대한 연구를 수행하였다.

표 1 열전대간의 온도측정 오차에 의한 열유속 측정의 추정 오차

$\sigma(\Delta T)$ (°C)	$q''(r_i)$ (kW/m ²)	$r_i = 8.6 \text{ mm}$			
		$r_o = 12.1 \text{ mm}$	12.6 mm	13.1 mm	13.6 mm
± 0.5	5	$\pm 51.5 \%$	$\pm 45.9 \%$	$\pm 41.7 \%$	$\pm 38.2 \%$
	10	$\pm 25.8 \%$	$\pm 23.0 \%$	$\pm 20.8 \%$	$\pm 19.2 \%$
	20	$\pm 12.9 \%$	$\pm 11.5 \%$	$\pm 10.5 \%$	$\pm 9.6 \%$
± 0.05	5	$\pm 5.15 \%$	$\pm 4.59 \%$	$\pm 4.17 \%$	$\pm 3.82 \%$
	10	$\pm 2.58 \%$	$\pm 2.30 \%$	$\pm 2.08 \%$	$\pm 1.92 \%$
	20	$\pm 1.29 \%$	$\pm 1.15 \%$	$\pm 1.05 \%$	$\pm 0.96 \%$

표 2 열전대 설치 위치의 측정 오차에 대한 열유속 측정의 추정 오차

$\sigma(r_i)$ (mm)	$\sigma(r_o)$ (mm)	$r_i = 8.6 \text{ mm}$			
		$r_o = 12.1 \text{ mm}$	12.6 mm	13.1 mm	13.6 mm
+0.5	0.0	-13.2 %	-10.9 %	-9.2 %	-7.8 %
-0.5	0.0	9.7 %	8.2 %	7.1 %	6.1 %
0.0	+0.5	10.6 %	9.2 %	8.2 %	7.3 %
0.0	-0.5	-14.1 %	-11.9 %	-10.2 %	-8.9 %

2 열전대 이용한 열유속 측정 및 전기히터를 이용한 열유속 보정

2.1 제작 및 설치

열전대를 사용하여 측정한 열유속 값의 오차를 조사하기 위해서는 실제 열유속 값을 알 수 있어야 한다. 본 연구에서는 그림 1과 같이 수직관 내부에 니크롬선을 사용한 전기히터를 설치하여 다음의 식 (3)에 의하여 정확한 열유속을 계산하였다. 그리고 이 값을 열전대를 사용하여 측정한 열유속 값 [식 (1)]과 비교함으로써, 열전대를 사용하여 측정한 열유속 값의 오차를 구하였다. 또한 상용화된 micro-foil heat flux sensor의 적용가능성을 살펴보기 위하여 그림 2와 같이 수직관 표면을 평면으로 가공한 후 여기에 RdF Corp.의 heat flux sensor를 설치하였다.

$$q''(r_i) = \frac{V \cdot I}{\pi r_1 L} \quad (3)$$

여기서 V 와 I 는 인가된 전압과 그 때의 전류이며, L 은 히터 또는 수직관의 길이이다.

수직관 및 설치된 열전대와 heat flux sensor의 사양을 표 3에 제시하였다. 접착물질로 사용된 에폭시의 열전도성은 약 16 W/m°C로써, SUS 304의 열전도성과 유사한 크기의 값을 갖는다.

표 3 수직관, 열전대 및 열유속 센서의 사양

수직관	열전대	열유속 센서
■ 내경 : 8.1mm ■ 외경 : 13.6mm ■ 길이 : 1.0m ■ 재질 : SUS 304	■ 외경 : 0.5mm ■ type-K ■ 설치 위치 : - $r_i = 8.6\text{mm}$, $r_o = 12.1\text{mm}$ - 수직관 바닥에서 0.6m ■ 열전대간의 사잇각 = 20° ■ 접착물질 : - silver paste (1차 실험) - 고 열전도성 에폭시 (2차 실험)	■ 크기 : $11.5 \times 11.5 \text{ mm}^2$ ■ 두께 : 0.3 mm ■ 민감도 : $0.063 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ ■ 반응속도 : 0.4 sec ■ 사용범위 : $\sim 113.6 \text{ kW}/\text{m}^2$ ■ 접착물질 : - 고전도성 에폭시 ■ 설치위치 : - 수직관 바닥에서 0.55m

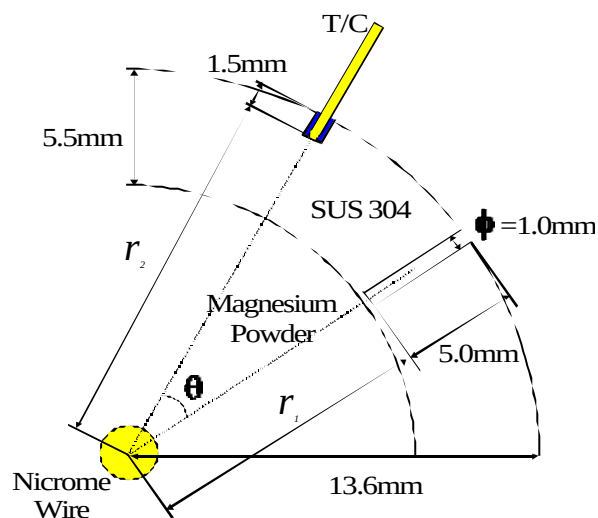


그림 1 열전대를 사용하여 열유속을 측정하기
위한 수직관 및 전기 Heater

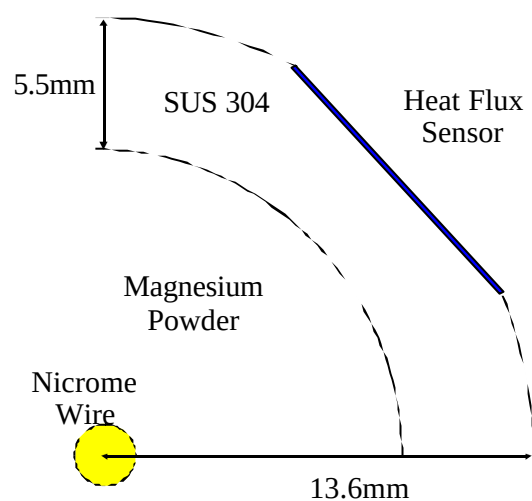


그림 2 열유속센서를 사용하여 열유속을 측정하기 위한 수직관 및 전기 Heater

2.2 실험 절차 및 범위

실험은 수직관 외부조건이 대기중의 자연순환인 경우와 체적이 0.3m^3 인 수조내에서의 자연순환인 경우에 대하여 수행되었다. 실험 수행 절차는 다음과 같다: (1) 접착물질을 사용하여 열전대와 열유속 센서를 수직관의 벽면안에 또는 표면에 고정시킨다. (2) 히터에 전압을 인가하지 않은 상태에서 각각의 열전대의 Bias 오차의 상대적인 차이를 조사하기 위하여, 대기중 또는 수조내에 수직관을 위치시킨 후 두 개의 열전대가 지시하는 온도를 약 1시간정도 측정한다. (3) 두 개의 열전대가 동일한 온도를 지시하도록, 열전대의 Bias 오차의 상대적인 차이를 보정한다. (4) 위의 (2)와 동일한 방법으로 온도를 다시 측정한 후, 두 열전대가 지시하는 평균온도의 차이가 $\pm 0.02^\circ\text{C}$ 내의 범위를 만족하는 지 확인한다. 이 범위를 만족하지 않을 경우 (2)와 (3)의 절차를 반복 수행한다. (5) 전기 Heater에 미리 지정한 전압을 인가하고, 열전대에 의한 열유속 값에 변화가 없는 정상상태에 도달할 때까지 충분한 시간동안(약 4시간 이상) 관찰한다. (6) 정상상태에 도달한 후에 취득한 data로부터 열유속 값[식 (1)]을 계산하여, Heater에 인가된 전압과 전류로부터 계산된 열유속 값[식 (3)]과 비교한다.

실험 수행 범위는 1차 실험과 2차 실험으로 구분할 수 있으며, 표 4에 정리하였다. 2차 실험에서는 두 개의 열전대를 동일한 수직높이(0.6m)의 반대 방향에 추가로 설치하여, 총 네 개의 열전대를 이용하여 서로 다른 두 곳에서의 열유속을 측정하였다. 또한 2차 실험의 경우 열유속센서는 사용하지 않았다.

표 4 실험 수행 범위

	$q''_{Heater}(r_i)$ (kW/m ²)	냉각 조건	계측기 및 접착물질	기 타
1차 실험	1.5, 3.0, 6.0, 11.5	대기중 자연순환 수조안 자연순환	열전대 (silver paste) 열유속 센서 (에폭시)	
2차 실험	1.5~11.5 (1.0씩 증가)	수조안 자연순환 (물의 bulk 온도 = 23~37°C)	열전대 (에폭시)	2회 반복 수행

2.3 실험 결과

1차 실험에 대한 결과는 그림 3에 제시되어 있다. 열전대(TC)와 열유속 센서(HFS) 모두 좋은 선형성을 보여주고 있다. 이것은, 표 1에서도 살펴본 바와 같이, 각 열전대의 Bias 오차의 상대적인 차이가 매우 잘 보상되었음을 보여주며, 열유속 측정에서의 오차는 나머지 인자들에서 발생하는 오차에 기인하는 것으로 판단된다. 하지만 냉각조건(즉, 수직관 외부의 열전달 계수)이 바뀔에 따라서 열유속 계산값에 큰 차이를 보여주고 있다. 열전대를 사용하는 경우에는, 공기로 냉각하게 되면 열전달계수가 크게 감소하여 수직관 표면과 주위 공기와의 온도차가 현저히 증가하게 된다. 이런 경우 바깥쪽에 위치한 열전대의 Fin으로써의 역할이 증가하게 되어 주어진 Heater의 발열량에 대하여 열전대가 측정하는 온도차가 증가하게 된다. 이에 따라서 열전대로부터 측정한 열유속 값은 실제보다 매우 높은 값을 갖게 되는 것으로 판단된다. 또한 열유속 센서를 사용하는

경우에는 열유속 센서의 열저항이 수직관(SUS 304) 보다 현저히 크다. 이러한 이유로 물로 냉각함에 따라 열전달계수가 크게 증가하게 되면, 열저항이 큰 열유속 센서로는 상대적으로 적은 열이 전달되어 측정된 열유속 값이 실제보다 낮은 것으로 판단된다.

2차 실험은 네 개의 열전대를 서로 다른 두 곳에 각각 두 개씩 설치하여(그림 1에 표시된 위치와 그 위치를 기준으로 θ 방향으로 180° 떨어진 반대 지점), 각각의 위치에서의 열유속을 측정하였다. 그리고 동일한 열유속 조건에 대하여 추가적인 반복 실험을 수행하였다. 2차 실험에서 얻은 실험 결과는 그림 4에 제시되어 있다. 2차 실험에서도 열유속 측정결과에는 좋은 선형성이 있음을 알 수 있고, 이는 각 측정 위치에 대한 열유속 측정 오차를 쉽게 보정하여 사용할 수 있음을 보여준다. 첫 번째 측정에서 얻은 열유속 측정의 오차를 linear fitting하여 정량화하였고, 이 결과를 두 번째 측정 결과에 적용하여 보정한 결과 실제 열유속 값[식 (3)]에 잘 일치하는 열유속 측정값을 얻을 수 있었다.

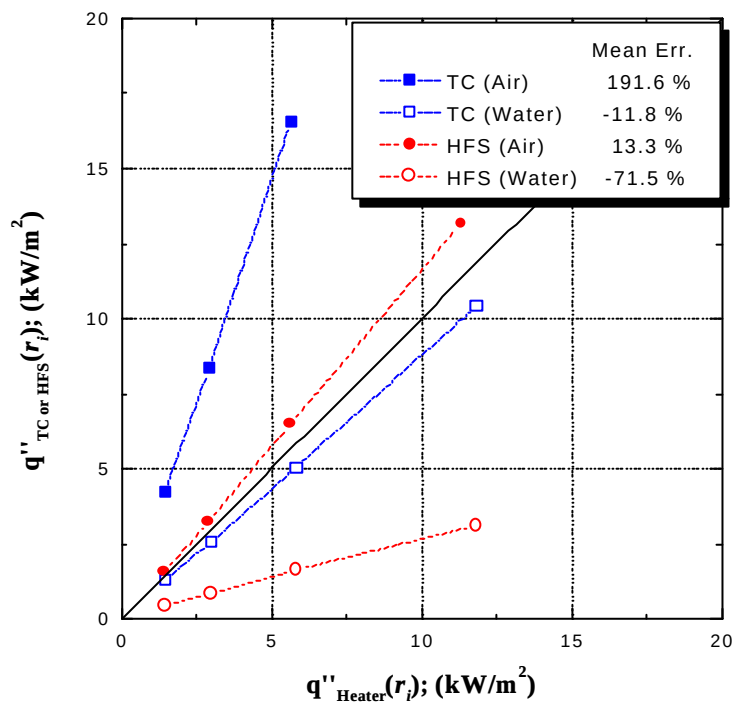


그림 3 열전대 및 열유속 센서를 이용한 열유속 측정 결과 (1차 실험)

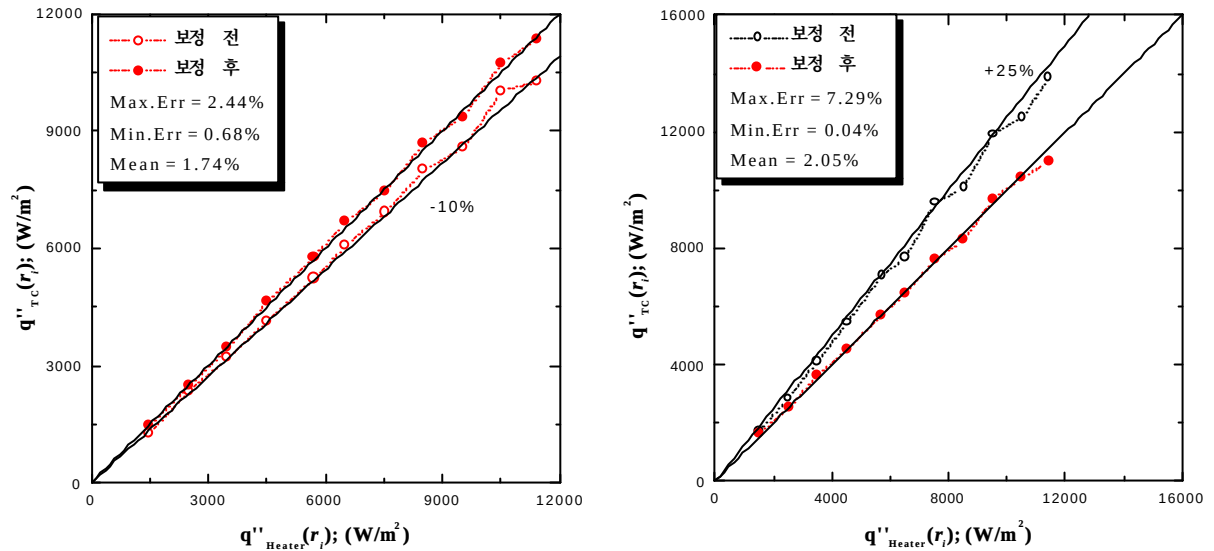


그림 4 열유속 측정 오차 및 보정 결과 (2차 실험)

3. HEATING 7.2C를 이용한 열유속 계산

물의 자연순환에 의한 냉각조건에서 열전대를 이용하여 수직관 벽을 통한 열유속을 직접 측정하였으며, 각 열전대간의 Bias 오차의 상대적인 차이를 보상해주면 좋은 선형성을 갖는 보정 결과를 얻을 수 있음을 알게 되었다. 하지만 측정결과만으로는 각 인자들이 열유속 측정시 발생하는 오차에 미치는 영향을 정량적으로 분석할 수는 없었다. HEATING 7.2C를 이용하여 여러 조건에 대하여 수직관내 온도분포 및 열유속을 계산하였고, 이를 바탕으로 열유속 측정 오차를 최소화하기 위한 방안을 도출하였다. 하지만 HEATING에 의한 온도분포의 계산에서는 열전대의 Bias 오차 및 설치된 열전대의 위치 측정 오차에 의한 온도 분포 및 열유속 측정의 오차는 반영되지 않았다.

3.1 HEATING 7.2C 모델링

3차원 원통 좌표계를 사용하여 실험에 사용된 수직관을 그림 5와 같이 실제 치수를 기준으로 모델링 하였다. r 축으로는 34개의 격자선을, θ 축으로는 39개의 격자선을, 그리고 z 축으로는 21개의 격자선을 사용하여 수직관을 세분화하였으며, 총 19387개의 마디점에서의 온도를 계산하였다. 특히, 열전대가 설치된 부근의 영역에 대하여 보다 미세한 간격의 격자선을 사용하였다.

마디점의 개수 및 간격, 수렴 조건, 초기 온도조건등의 입력 조건에 대한 온도계산 결과의 민감도 분석을 위한 예비 계산을 수행하였다. 민감도 분석결과를 바탕으로 계산된 최종 온도가 이러한 입력 조건에 대하여 영향을 받지 않는 안정화된 입력 조건을 결정하였다.

HEATING을 이용한 계산에서는 열유속, 접촉물질의 열전도성, 외부 열전달 조건, 열전대의 외경, 그리고 열전대간의 거리가 수직관 벽내의 온도분포와 열유속 측정에 미치는 영향을 살펴보았

다. 계산을 수행한 범위가 다음의 표 5에 제시되어 있다. 굵은 글씨에 밑줄이 있는 조건을 기본 계산 조건으로 사용하였으며, 특별한 언급이 없는 경우 각 변수의 조건은 기본 계산 조건을 사용한 것이다.

표 5 HEATING 계산시 고려한 변수 및 조건

변 수	조 건
열유속 범위	▪ $q''(r_i) = 5.0, 10.0, 20.0, 30.0 \text{ kW/m}^2$
접착물질의 열전도성	▪ $k = 1.0 \times k(\text{SUS } 304) = 14.5 + 0.01114 \times T \text{ W/m}^\circ\text{C}$ ▪ $k = 0.1 \times k(\text{SUS } 304)$ ▪ $k = 10.0 \times k(\text{SUS } 304)$
외부 열전달 조건	▪ $h = 0.34T^{0.33} \text{ kW/m}^2\text{C}$ (수조내의 자연대류) ▪ $h = 0.0034T^{0.33} \text{ kW/m}^2\text{C}$ (대기중의 자연대류) ▪ $h = 0.13074T^{0.20} \text{ kW/m}^2\text{C}$ (수조내의 비등 열전달)
열전대 외경	▪ 0.5mm & 1.0mm
열전대간의 거리	▪ $r_i = \underline{8.6\text{mm}}$, $r_o = \underline{12.1} \sim 13.6\text{mm}$
열전대의 열전도성	▪ $k = 1.0 \times k(\text{SUS } 304)$

대기 및 수조내 자연대류시의 열전달계수는 앞절의 실험에서 얻은 data를 기준으로 결정하였다. 또한 수직관의 비등 열전달계수는 Rohsenow[3]의 실험상관식을 사용하였다.

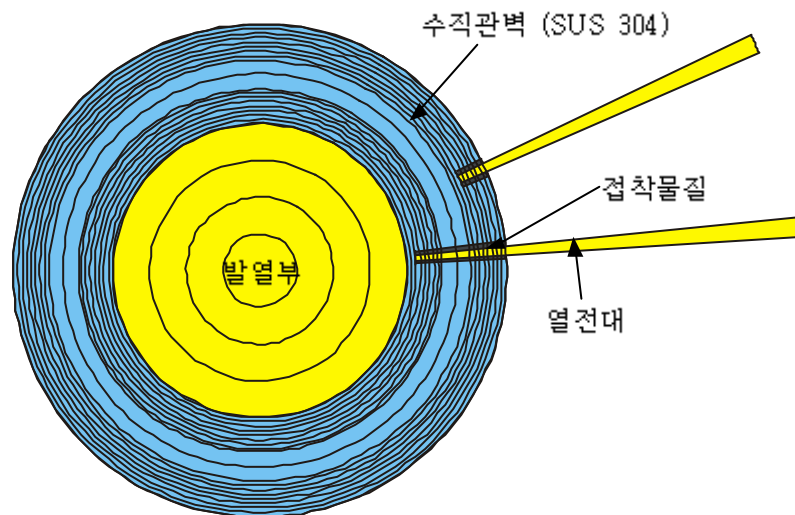


그림 5 수직관 모델링의 개략도

3.2 HEATING 계산 결과

그림 6과 그림 7은 전형적인 반경방향으로의 열전대 중심선에 대한 온도분포의 계산결과이며, 각각 수직관 벽의 외각영역과 안쪽영역에 설치된 열전대의 온도분포이다. 그림 6에서 보듯이, 관 벽면내에 설치된 열전대는 Fin의 역할을 하게되어 관 표면의 온도가 열전대가 설치되지 않은 경우(Ideal Case)에 비하여 낮아진다. 또한 접착물질의 열전도성이 금속관의 열전도성 보다 낮은 경우에는 접착물질의 열전도성이 금속관의 열전도성과 동일한 경우에 비하여 열전대를 통한 온도 감소폭이 증가하게 된다. 하지만 두 경우에 있어서 Fin의 역할이 소멸되는 지점은 약 12.1mm 부근으로 동일함을 알 수 있다. 그러나 접착물질의 열전도성이 금속관의 열전도성 보다 매우 높은 경우에는, 그림 6과 7에서 보듯이, 열전대가 설치된 지점 이전에는 온도가 낮고 이 후 온도 감소폭이 완만해 지는 경향을 보이고 있다. 특히, 관 표면 부근에서는 열전대의 Fin 역할에 의한 온도 감소폭도 작으며 Fin으로써의 영향을 미치는 영역도 좁음을 알 수 있다. 열전대를 고정시키는 접착물질의 열전도성에 따라서 반경방향으로의 열전대 중심의 온도분포가 비교적 크게 변하게 된다. 이러한 온도분포의 차이는 열유속 측정에도 영향을 미치며, 그림 8에서 보듯이, 열유속 값은 접착물질의 열전도성에 따라서 -5.4 ~ +8.1%까지 차이가 난다. 하지만 접착물질의 열전도성에 관계없이 열유속 측정값은 비교적 좋은 선형성을 보여주고 있다.

또한 그림 8에는 열전대의 외경이 열유속 측정에 미치는 영향이 나타나 있다. 열전대의 외경이 증가할수록 Fin의 역할이 증가하게 되어, 외각 영역의 열전대의 온도는 보다 낮은 값을 지시하게 된다. 이에 따라서 두 열전대간의 온도차가 증가하여, 보다 높은 열유속이 측정된다. 중심으로부터 반경방향으로 12.1mm 위치에 설치된 열전대의 외경이 0.5mm에서 1.0mm로 증가할 경우, 측정된 열유속의 오차는 +4.0%에서 +10%로 증가한다. 따라서 열유속 측정시 오차를 줄이기 위해서는 보다 작은 외경의 열전대를 사용하는 것이 바람직하다.

그림 9에는 수직관 외부의 열전달 조건 및 외각 영역에 설치된 열전대의 위치가 열유속 측정의 오차 및 열유속 측정의 선형성에 미치는 영향이 제시되어 있다. 외부 열전달 조건이 비효율적일수록 Fin으로써의 열전대의 역할이 증가하게 되고, 이에 따라서 전반적인 열유속 측정 오차가 증가하게 된다. 특히, 설치된 열전대의 위치가 관 표면에 가까울수록 열유속 측정 오차는 증가하며, 이러한 증가폭은 외부 열전달 조건이 저하될수록 크게 증폭된다. 수조내의 비등 및 단상 자연순환 열전달 조건에 대하여, 열전대의 설치 위치가 열유속 측정 오차 및 열유속 측정의 선형성에 미치는 영향이 그림 10에 보다 자세히 나타나 있다. 열전달계수가 매우 큰 비등 자연순환 조건에서도, 열전대의 설치위치가 12.1mm에서 13.6mm(관 표면)으로 이동함에 따라서 열유속 측정오차는 +6% ~ +16% 까지 증가하였고, 열유속 측정의 선형성은 5배정도 저하되었다. 표 1과 표 2에서 살펴본 바와 같이, 두 열전대간의 거리가 증가할수록 열전대의 온도 측정 오차 및 설치된 열전대의 위치 측정 오차가 열유속 측정 오차에 미치는 영향은 감소한다. 하지만 열전대간의 거리를 증가시키기 위해 또는 가공의 편의를 위해, 열전대를 수직관의 표면에 부착하는 것은 보다 큰 오차를 유발시킬 수 있다. 특히, 외부의 열전달 조건이 비효율적인 경우에는 이러한 오차는 매우 큰 폭으로 증가하게 된다. 또한 설치된 열전대가 표면에 가까울수록 열유속 측정 오차의 선형성이 저하되어, 열유속 보정에 불확실도가 증가하게 된다. 따라서 보정을 통한 열유속 측정의 정확도를 향

상사키기 위해서는, Fin으로써의 열전대의 영향이 무시될 수 있는 지점에 열전대를 설치하는 것이 매우 바람직하다.

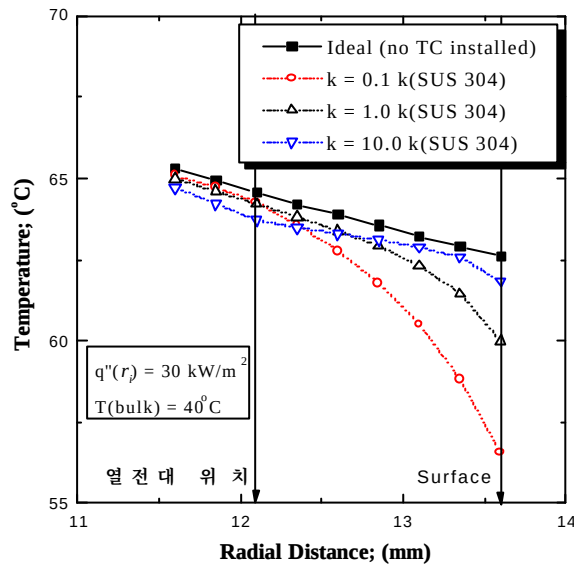


그림 6 열전대 중심선을 따른 벽면내 온도 분포(외각쪽 열전대)

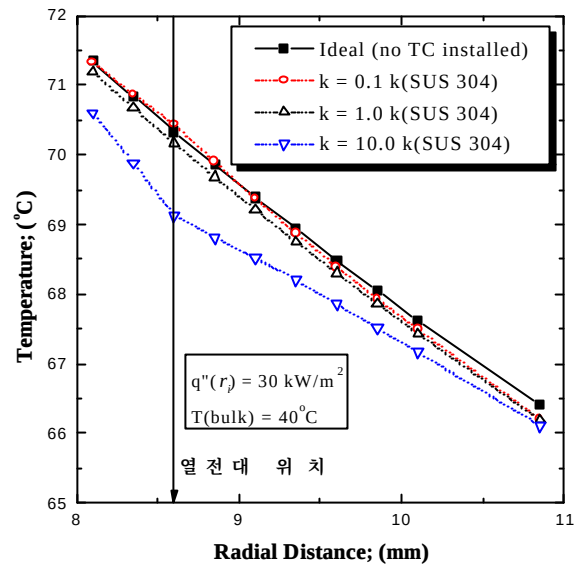


그림 7 열전대 중심선을 따른 벽면내 온도 분포(안쪽 열전대)

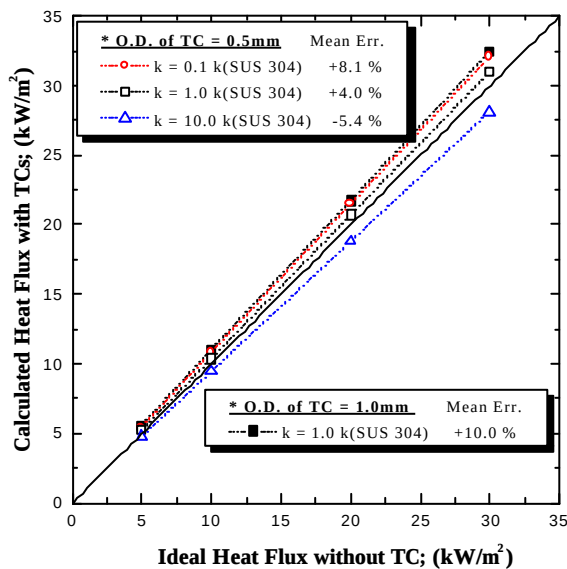


그림 8 열전대 외경과 접착물질의 열전도성이 열유속 측정에 미치는 영향

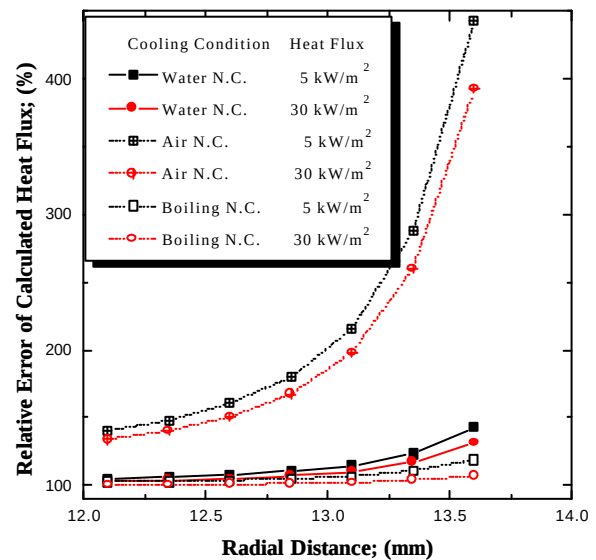


그림 9 외부 열전달 조건 및 열전대의 위치가 열유속 측정에 미치는 영향

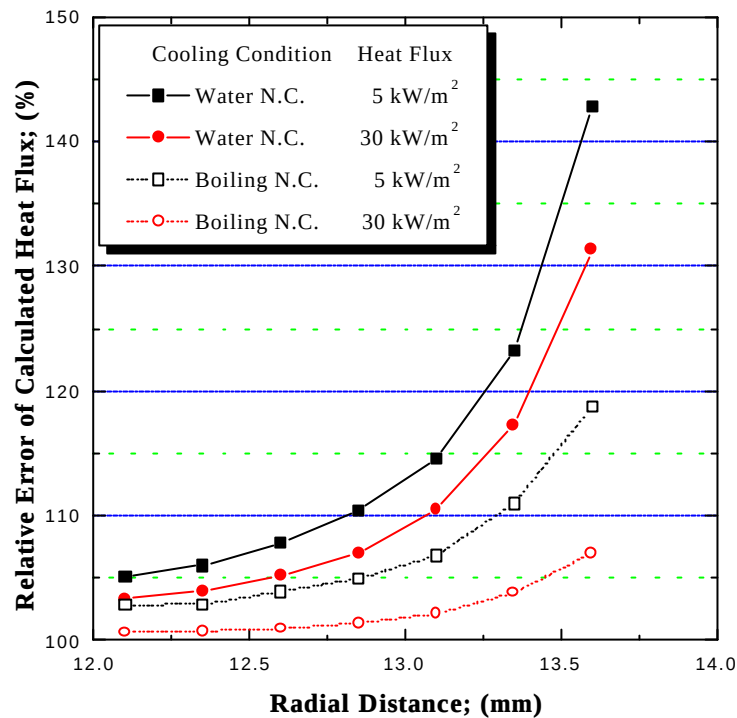


그림 10 외부 열전달 조건 및 열전대의 위치가
열유속 측정 오차 및 오차의 선형성에 미치는 영향

4. 결 론

실험 및 코드 계산을 통하여 수직관 벽면을 통한 열유속을 효율적으로 측정하기 위한 연구를 수행하였다. 실험을 통하여 열유속 측정 오차의 정도와 오차의 선형성 및 보정 가능성을 살펴보았다. 또한 HEATING 7.2C 코드를 이용하여 접착물질의 열전도성과 열전대의 외경, 외부 열전달 조건, 그리고 열전대의 설치 위치가 열유속 측정에 미치는 영향을 분석하였다. 관 벽면을 통한 열유속의 효율적인 측정 방법에 관하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 열전대를 이용한 열유속 측정시에는 여러 가지 인자들에 의하여 측정된 열유속에 비교적 큰 오차가 발생할 가능성이 매우 높기 때문에, 열유속 측정에 있어서 보정 절차가 반드시 필요하다.
- (2) 열전대를 이용한 온도차 측정에서 발생하는 오차는 특히, 낮은 열유속 측정에 상당한 오차를 발생시키며 측정 오차의 선형성을 저하한다. 또한 일반적인 열전대의 오차 범위는 측정하고자 하는 벽내의 온도차에 대하여 높은 측정 오차를 발생시킬 수 있는 영역에 속하기 때문에, 두 열전대의 Bias 오차의 상대적인 차이를 반드시 보정해 주어야 한다.
- (3) 열유속 측정 오차를 최소화하고 오차의 선형성을 향상시키기 위해서는, Fin으로써의 열전대의 영향이 소멸되는 지점에 열전대를 설치하여야 한다.
- (4) 위 조건들을 만족하였을 경우, 비교적 낮은 범위의 열유속 측정 오차를 기대할 수 있으며 전기 히터등을 이용한 보정 절차를 통하여 정확한 열유속 측정을 기대할 수 있다.

- (5) Fin의 영향이 소멸되는 지점은 외부 열전달 조건에 크게 의존하기 때문에, 외부 열전달 조건이 크게 변하는 경우에는 이에 대한 별도의 보정 절차가 필요하다.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors gratefully acknowledge the financial support of Korea Electric Power Research Institute (KEPRI) provided for this work.

참 고 문 헌

- [1] Ernest O. Doebelin, Measurement Systems: Application and Design, 4th edition, McGRAW-HILL, 1990.
- [2] The Temperature Handbook, Vol. 29, OMEGA Engineering, INC., 1995.
- [3] W. M. Rohsenow, "A Method of Correlating Heat-Transfer Data for Surface Boiling of Liquids," Transactions of the ASME, Vol. 74, pp.969 ~976, 1952.
- [4] K. W. Childs, "Heating 7.2 User's Manual," ORNL/TM-12262, 1993.