

피토관의 피치각도가 유속측정에 미치는 영향에 대한 실험 연구

임병준*† · 어동진* · 김기환* · 김우식* · 설효성* · 최해섭*

Experimental Study on the Pitot Tube Pitch Angle Effect on the Measurement of Velocity

Byung-Jun Lim*†, Dong-Jin Euh*, Kihwan Kim*, Woo-Shik Kim*, Hyou Sung Seol*, Hae-Seob Choi*

Key Words : Pitot Tube(피토투브), Pitch Angle(피치 각도), APR1000 reactor(APR1000 원자로), Hot Leg(고온관)

ABSTRACT

In this study, we evaluated the correlation between the performance of the Pitot tube used to measure the velocity of the fluid in the nuclear reactor Hot Leg and the angle of the incoming fluid. The main variables were the pitch angle between the pitot-tube and the streamline, the Reynolds number. The experiment was conducted by adjusting these variables, the experimental results confirmed that the standard deviation percentage was evaluated to be within 2% under most conditions, meeting the range to simulate the conditions of APR1000.

1. 서론

원자로의 열 균형(Heat Balance) 계산은 원자로의 정확한 열출력을 파악하고 안전 설계 측면에서 필수적이다. 이를 계산하기 위해서는 고온관 내의 냉각재의 유속과 온도의 정확한 측정이 필요하다.

냉각재의 온도는 고온관에 설치된 RTD(Resistance Thermal Detector)를 이용해 측정한다. 그러나 이 온도 값은 고온관에서의 평균 값이기 때문에 냉각재 온도를 정확히 대변할 수 없다. 이는 냉각재의 온도 분포와 유속 분포에 따라 RTD의 측정값이 실제 온도와 다를 수 있기 때문이다. 따라서 고온관에서의 속도 분포에 대한 offset과 불확도를 정량화해야 한다^(1,2).

이를 위해 이후 연구에서는 피토관을 이용하여 고온관의 속도 분포를 구하였다⁽²⁾. 하지만 유체가 고온관으로 들어올 때 급격히 방향이 바뀌는 원자로의 구조적 특성 때문에 피토관의 측정부와 냉각재의 유선(Streamline)이 평행하지 않게 되는 문제가 발생한다. 이는 피토관으로 측정된 냉각재의 속도가 정확하지 않을 수 있다는 것을 의미한다.

본 연구에서는 원자로 고온관 냉각재의 속도 측정 시 사

용되는 피토관을 입사 유체와 여러 Pitch 각도로 설치하여 속도를 측정하는 실험을 수행하였다. 이를 통해 피토관 측정부와 유선의 불일치로 인한 유속의 불확도를 확인 및 정량화하고자 하였다.

2. 피토관 성능 평가

2.1 실험 방법

2.1.1 피토관을 이용한 유속 측정

피토관으로 유체의 속도를 측정하는 방법은 베르누이 방정식 (1, 2, 3)을 이용한다.

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \frac{v_s^2}{2} + \frac{p_s}{\rho} + gz_s \quad (1)$$

$$p_s - p_1 = \rho \frac{v_1^2}{2} \quad (2)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(p_s - p_1)}{\rho}} \quad (3)$$

v_1 : 피토관을 통해 측정된 유속, p_1 : 유체의 정압,

p_s : 유체의 전압(동압+정압), ρ : 유체의 밀도

* 한국원자력연구원(Reactor System Safety Research Division)

† 교신저자, E-mail : jblim@kaeri.re.kr

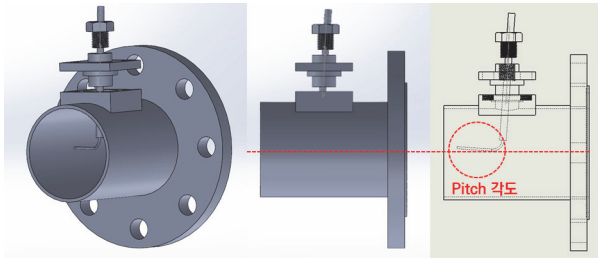


Fig. 1 Cross-section of pitot tube installation

피토관의 전압측과 정압측의 차압을 측정하고, 이를 식(3)을 통해 유체의 속도를 구한다. 여기서 필요한 조건은 유체의 이동 방향과 피토관이 수평인 상태여야 한다는 것이다. 만약 유체와 피토관이 수평하지 않은 상태에서 측정된 속도(차압값)는 실제값과 차이가 생길 것이다. 본 연구에서는 유체의 이동 방향과 피토관 사이에 Pitch 각도가 생겼을 때 실제 속도와 어느 정도 차이가 생기는지 확인할 것이다. 여기서 실제 속도는 피토관 전단에 설치된 질량유량계로 측정한다. 질량유량계로 속도를 측정하는 방법은 식 (5)와 같다.

$$Q = \rho v_2 A \quad (4)$$

$$v_2 = \frac{Q}{\rho A} \quad (5)$$

v_2 : 유량계로 측정된 유속, Q : 유량, ρ : 유체의 밀도,
 A : 유량계의 유로 단면 넓이

실험에서는 Fig. 1처럼 피토관을 일정 Pitch 각도(피토관을 고정하는 지지대를 이용) 별로 설치하고 측정된 유속(v_1)과 질량유량계로 측정된 유속(v_2)을 비교하여 각도에 따른 피토관의 성능을 평가하는 것이 목표이다. 이를 간단하게 표현하면 식 (6)과 같다.

$$C_\theta = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sqrt{\frac{2dP}{\rho}}}{\frac{Q}{\rho A}} \quad (6)$$

dP : 피토관의 차압, θ : 피토관의 Pitch 각도

C_θ 은 질량유량계로 측정된 Re 값과 피토관의 Pitch 각도에 따라 측정된다. 보통 이 값은 유속 분포 특성 때문에 질량유량계로 측정된 v_2 보다 약간 큰 값을 가지게 된다. 실험에서 중점적으로 볼 변수는 식 (7)에서의 K_θ 값이다. 이 값이 1에 가까울수록 Pitch 각도에 따른 속도 왜곡의 영향이 적다는 것을 의미한다.

$$K_\theta = \frac{C_\theta}{C_0} \quad (7)$$

2.1.2 완전발달영역(Fully Developed Region) 검증

이 실험에서 중점적으로 고려해야 할 요소는 실험대의 완전발달영역의 생성 여부이다. 피토관이 설치된 위치에서 유체의 흐름이 완전발달영역이 아니라면, 유선이 일정하지 않으므로 독립변수로 설정된 Pitch 각도의 영향으로 인해 실험결과의 신뢰성이 저하될 수 있다.

피토관이 설치된 실험대의 전단은 그림 2.2과 같이 곡관(Elbow)으로 되어있다. 만약 곡관부와 피토관 사이의 거리가 완전발달영역이 형성될 만큼 충분하지 않다면, 휘어진 유체의 유선이 측정부와 평행하지 못하여 실험에서 설정한 Pitch 각도에 영향을 줄 것이다. 또한 실험대 후단에는 수직으로 상승하는 곡관이 있어 이 역시 실험에 영향을 줄 수 있다.

이를 해결하기 위하여 일반적으로 사용하는 비율을 이용해 전단 곡관부와 실험대까지의 거리 R_1 , 실험대부터 후단 곡관부까지의 거리 R_2 를 아래 식 (8), (9)과 같이 설계하였다.

$$R_1 = 20D = 1,650\text{mm} \quad (8)$$

$$R_2 = 9D = 740\text{mm} \quad (9)$$

D : 피토관이 설치된 단관의 내경(82.4mm)

실제로 이 설계로 완전발달영역이 만들어졌는지 확인할 필요가 있다. 이를 검증하기 위해 Aichelen Method를 사용하였다⁽³⁾. Fig. 3과 같이 배관의 수직 깊이 0.119D와 0.881D에서의 유속차이가 6% 이하일 경우, 이 유동이 완전발달영역안에 있다고 볼 수 있다.

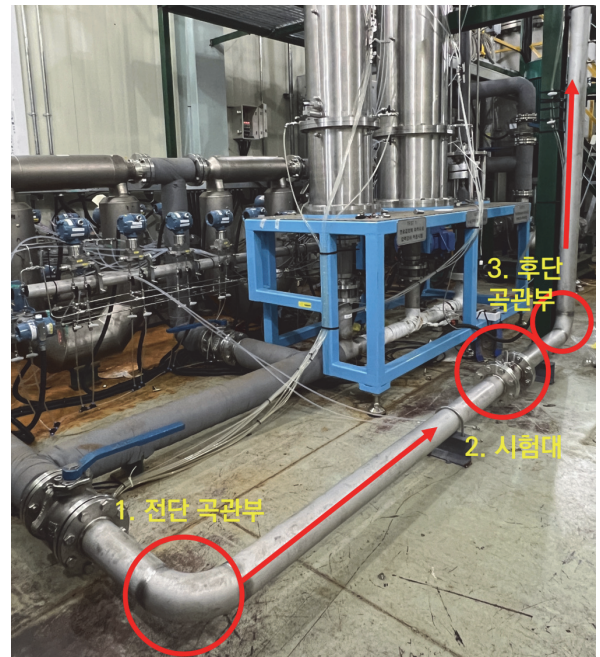


Fig. 2 Test Loop

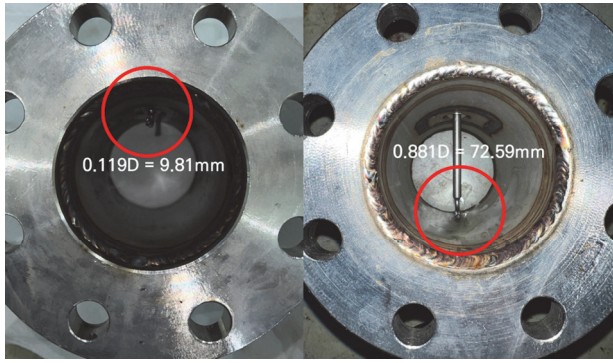


Fig. 3 Pitot tube installed in the flange duct

실험 조건은 Table 1, 결과는 Table 2, Fig. 4와 같다. 실험 결과 두 곳의 유속 차이는 ±3% 미만으로, 완전발달영역을 확인할 수 있었다.

Table 1 Test condition (Fully developed region)

조건	값
유체 종류	순수물 (Demineralized Water)
유체 온도	60℃
압력	1atm
Re 수	2.0×10^5
	4.0×10^5
	6.0×10^5
	8.0×10^5
	1.0×10^6
피토관 위치	0.119D(9.81mm)
	0.881D(72.59mm)
피토관 Pitch 각도	0°
데이터 수집 시간	120 sec
계측기 및 DAS 영점 조절 시간	60 sec
DAS 샘플링 속도	1,000Hz

Table 2 Test result (Fully developed region)

Re	$C_{0,0.119}$	$C_{0,0.881}$	$\frac{C_{0,0.881}}{C_{0,0.119}}$
2.0×10^5	1.0560	1.0297	0.9751
4.0×10^5	1.0348	1.0159	0.9816
6.0×10^5	0.9947	1.0197	1.0251
8.0×10^5	0.9877	1.0118	1.0244
1.0×10^6	0.9877	1.0065	1.0190

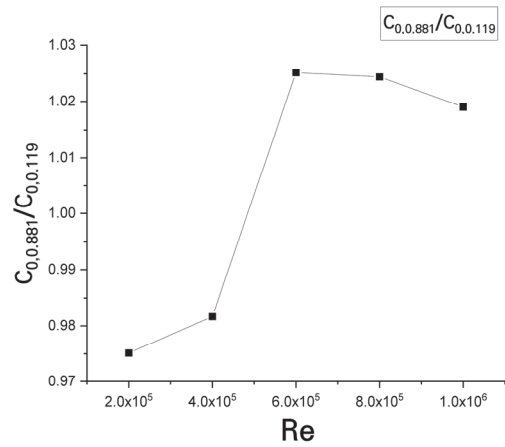


Fig. 4 Test result (Fully developed region)

2.2 실험 루프 구성

실험은 한국원자력연구원 내의 CALIP(Calibration Loop for Internal Pressure drop)에서 수행되었다. 실험 루프는 히터가 포함된 물탱크, 입형 다단 펌프, 두 대의 열전대, 두 대의 질량유량계, 피토관, 압력계로 구성되어 있다. 실험 루프의 P&ID는 Fig. 5와 같다.

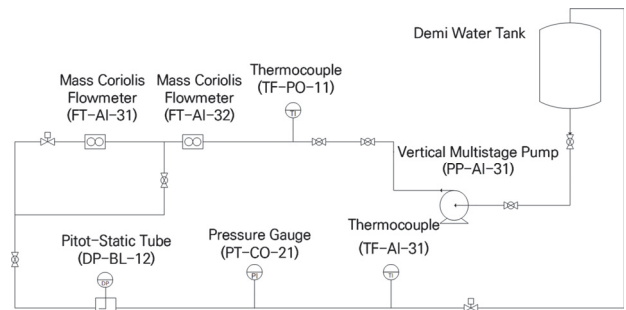


Fig. 5 P&ID of Test Loop



Fig. 6 Vertical multistage pump(Left), Coriolis mass flowmeter(Right)

Table 3 Specs of pump

펌프 종류	Vertical Multistage Pump
제작사	WILO
용량	162m ³ /h
양정	100m
단수	2
인버터 유무	유

Table 4 Specs of coriolis mass flowmeter

유량계 종류	Coriolis Mass Flowmeter
제작사	Micro Motion Elite
사용 범위	4.4kg/h ~ 272,000kg/h
질량/체적 유량 정확도	0.10%

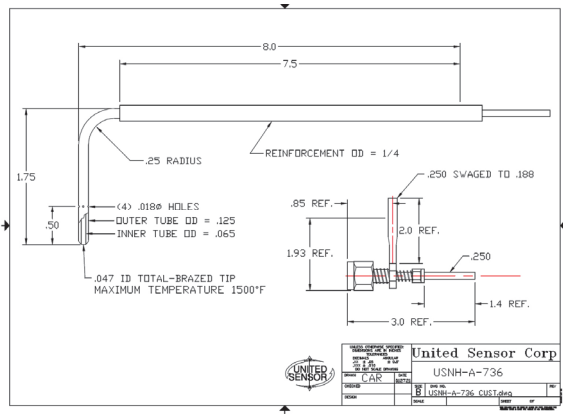


Fig. 7 Details of pitot tube

펌프와 질량유량계의 스펙은 Table 3, Table 4와 같다. 본 실험에서는 United Sensor사의 피토관을 사용하였다. 도면은 Fig. 7과 같다.

2.3 실험 조건 및 절차

2.3.1 실험 조건

본 실험은 제2절에서 수행한 완전발달영역 확인 실험과 피토관의 위치, 피토관의 Pitch 각도만 다르게 다른 조건은 모두 같다. 실험 조건은 Table 5와 같다.

2.3.2 실험 절차

본 실험의 절차는 1개의 조건 당 피토관 설치, 충수 및 승온 운전, 계측기 벤트 및 영점 조절, 실험 및 데이터 수집 순서로 진행된다. 이후 다른 조건의 실험을 진행하기 위해서는 배수 후 피토관 재설치 작업이 필요하다.

Table 5 Test condition

조건	값
유체 종류	순수물 (Demineralized Water)
유체 온도	60℃
압력	1atm
Re 수	2.0 × 10 ⁵
	4.0 × 10 ⁵
	6.0 × 10 ⁵
	8.0 × 10 ⁵
	1.0 × 10 ⁶
피토관 위치	41.2mm (0.5D, D=82.4mm)
피토관 Pitch 각도	-10°
	-6°
	-4°
	-2°
	0°
	2°
	4°
6°	
10°	
데이터 수집 시간	120 sec
계측기 및 DAS 영점 조절 시간	60 sec
DAS 샘플링 속도	1,000Hz

가. 피토관 설치

각 실험 조건 별 피토관의 Pitch 각도로 Fig. 1과 같이 피토관을 플랜지 단관에 설치한다. 피토관의 설치시 지지대를 이용하고, 설치가 완료되면 지지대는 플랜지 단관에서 탈거한다.

나. 충수 및 승온 운전

펌프를 저속으로 가동하여 충수를 진행한다. 배관에 충수가 되면 히터를 작동한다. 이후 열전대(TF-AI-31) 기준으로 60℃가 될 때까지 히터를 작동시킨다.

다. 계측기 벤트 및 영점 조절

펌프 저속 운전하면서 차압계(DP-BL-12), 압력계(PT-CO-21)을 벤트한다. 벤트가 완료되면 펌프 운전을 멈추고 5분 뒤 DAS 상 계측기의 영점조절을 60초간 진행한다.

라. 실험 및 데이터 수집

펌프를 실험조건에 맞게 운전하면서 케이스당 120초간 데이터를 수집한다.

3. 실험 결과 및 결론

3.1 실험 결과

실험은 총 45개의 조건을 진행하였고 결과는 Table 6, Fig. 8과 같다.

Table 6 Test result(\bar{v}_1, \bar{v}_2 : average for 120sec, s : std of \bar{v}_1)

Re	θ	\bar{v}_1	$\frac{s}{\bar{v}_1} \times 100(\%)$	C_θ	$K_\theta = \frac{C_\theta}{C_0}$
2.0×10^5 ($\bar{v}_2=1.145\text{m/s}$)	-10°	1.1851	1.0486	1.0599	0.9892
	-6°	1.2252	0.8484	1.0697	0.9983
	-4°	1.2224	1.0623	1.0681	0.9968
	-2°	1.2212	0.9952	1.0660	0.9949
	0°	1.2268	0.9354	1.0715	1.0000
	2°	1.2209	0.9650	1.0651	0.9940
	4°	1.2213	0.8694	1.0666	0.9954
	6°	1.2213	0.8872	1.0666	0.9955
	10°	1.2044	0.8231	1.0514	0.9812
4.0×10^5 ($\bar{v}_2=2.290\text{m/s}$)	-10°	2.3262	0.6318	1.0161	0.9520
	-6°	2.4299	0.4830	1.0611	0.9942
	-4°	2.4254	0.6031	1.0589	0.9921
	-2°	2.4147	0.5995	1.0546	0.9881
	0°	2.4429	0.5726	1.0673	1.0000
	2°	2.4135	0.6090	1.0537	0.9873
	4°	2.4214	0.5732	1.0582	0.9915
	6°	2.4286	0.5116	1.0602	0.9934
	10°	2.3631	0.5318	1.0322	0.9671
6.0×10^5 ($\bar{v}_2=3.435\text{m/s}$)	-10°	3.4577	0.3429	1.0067	0.9393
	-6°	3.6516	0.3775	1.0622	0.9912
	-4°	3.6569	0.4797	1.0647	0.9935
	-2°	3.6342	0.4156	1.0578	0.9870
	0°	3.6797	0.4403	1.0717	1.0000
	2°	3.6322	0.4569	1.0575	0.9868
	4°	3.6391	0.4114	1.0602	0.9893
	6°	3.6496	0.4068	1.0616	0.9905
	10°	3.4983	0.4554	1.0188	0.9506
8.0×10^5 ($\bar{v}_2=4.580\text{m/s}$)	-10°	4.5385	0.3996	0.9912	0.9270
	-6°	4.8539	0.3153	1.0591	0.9905
	-4°	4.8708	0.3291	1.0635	0.9947
	-2°	4.8395	0.3391	1.0568	0.9884
	0°	4.8946	0.3378	1.0692	1.0000
	2°	4.8394	0.3933	1.0567	0.9883
	4°	4.8447	0.3663	1.0583	0.9898
	6°	4.8534	0.3194	1.0589	0.9904
	10°	4.6186	0.3804	1.0084	0.9431

Re	θ	\bar{v}_1	$\frac{s}{\bar{v}_1} \times 100(\%)$	C_θ	$K_\theta = \frac{C_\theta}{C_0}$
1.0×10^6 ($\bar{v}_2=5.725\text{m/s}$)	-10°	5.6102	0.2532	0.9799	0.9178
	-6°	6.0633	0.2982	1.0591	0.9919
	-4°	6.0677	0.4039	1.0600	0.9928
	-2°	6.0341	0.2452	1.0538	0.9869
	0°	6.1112	0.2813	1.0677	1.0000
	2°	6.0358	0.3002	1.0542	0.9873
	4°	6.0350	0.2896	1.0544	0.9875
	6°	6.1086	0.2232	1.0670	0.9993
	10°	5.7210	0.2428	0.9993	0.9359

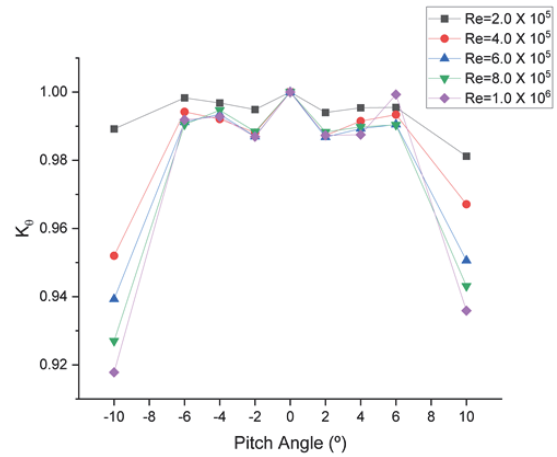


Fig. 8 Test result $K_\theta (= \frac{C_\theta}{C_0})$

Table 6과 Fig. 8에서는 각 레이놀즈 수와 Pitch 각도에 따른 피토크의 성능을 보여준다. 특히 모든 실험 조건에서 Pitch 각도가 -6°~+6° 사이에서는 각도가 0°일때와 2% 미만의 차이만 나타났다.

각도가 커질수록 유선과 피토크 전압 측정부의 차이로 인하여 동압 성분이 유선과 불일치하는 만큼 낮게 측정된다.

3.2 결론

본 연구에서는 원자로 고온관 냉각재의 속도 측정 시 사용되는 피토크가 Pitch 각도에 따라 유속 측정 성능을 측정하였다. 실험은 CALIP 장치에서 진행되었고, 입사 유체와 여러 Pitch 각도(9개의 조건), Re수(5개의 조건)를 변수로 두어 속도를 측정을 총 45회 수행하였다. 실험대의 특성상 측정지점이 완전발달영역인지 확인하였고, 각도별 Boss를 제작하여 피토크를 특정 Pitch 각도로 설치하였다. 실험 모든 실험 조건에서 Pitch 각도가 -6°~+6° 사이에서는 각도가 0°일때와 2% 미만의 차이만 나타났다. 이 연구는 이후

과제에서 수행할 고온관 유속 측정 실험에서 피토관과 Streamline의 피치 각도에 따른 측정 신뢰성 보충자료로 활용될 것이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 20217810100010)

References

- (1) Jang, H., Oh, S., Lee, B., Cheong, J., Baik, S. and Kim, S., An Analysis of the Hot Leg Thermal Stratification Effect on the Hot Leg Temperature Measurement for KSNP, Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Taejon, Korea, October, 2000.
- (2) Kim, K., Choi, H., Euh, D., Kwon, T., Experimental Study of the Velocity Profile in the Hot Leg of the APR+, Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Gyongju, Korea, October 29-30, 2015.
- (3) E. Ower, R. C. Pankhurst, The Measurement of Air Flow: Edition 5, 2014, pp. 117~118.