

2002 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

다회선 방식 초음파 유량계의 원전 주급수 계통 적용연구

Development of a Multi-path Ultrasonic Flow Meter for the Application to
Feedwater Flow Measurement in Nuclear Power Plants

정재천, 하재홍, 김용호, 장우현

한국전력기술주식회사

박기성, 박민수, 박문호

한전기공주식회사

요 약

원전 주급수 유량 측정을 위한 다회선식 초음파 유량계에 대해 소개하고 레이놀즈 수 천만 이상의 높은 유속에서 배관 단면 평균 유속을 정확히 산정할 수 있는 보정계수 산정 모델의 개발 과정 및 검증 방법에 대해 기술하였다. 아울러 유속 보정계수와 유속분포의 상관관계에 대해 고찰하고 본 연구에서 개발된 모델을 이용하여 표준원전용 유속 보정계수를 산정 하였으며 본 방식의 다회선식 초음파 유량계를 원전 주급수 유량 측정에 적용시 합성 불확실도를 계산하였다.

Nikuradse 모델의 3개 지점 값을 입력으로 하여 검증 결과, 본 개발 모델이 정확함을 입증하였고, 상관 관계법 원전 주급수 초음파 유량계의 보정계수와 비교한 결과도 매우 근사함을 확인하였다.

본 모델의 검증 및 산정된 보정계수는 제한적인 실험 조건으로 인해 직접 적용은 어려우나, 추후 반복적인 확인 시험을 거쳐 최종 검증식이 작성될 수 있는 이론적 및 실용적 모델을 완성하였다.

ABSTRACT

In this work, we propose a method to measure the feedwater flow using multi-path ultrasonic flow meter (UFM). Since the UFM measures a path velocity at which the ultrasonic wave is propagated, the flow profile may be important to convert the path velocity to the velocity averaged over the entire cross section of the flowing medium. The conventional UFM has used the smooth-wall circular pipe model presented by Nikuradse. However, this model covers a lower range which is less than 3.2 million while the Reynolds number of the feedwater flow in operating nuclear power plants (NPPs) is about 20 million. Therefore, we proposed the non-linear correlation model that combines the ratio between the DP output and UFM output. Experiments were performed using both computer simulation and newly constructed NPPs' test data. The uncertainty analysis result shows that the proposed method has reasonably lower uncertainty than conventional UFM.

1. 서 론

다회선 초음파 유량계는 초음파 센서의 설치 경로 및 유량 측정 방식에 따라 Chordal 방식과 Diametric 방식으로 분류할 수 있다. Chordal 방식은 그림 1.(가) 와 같이 각 선상의 선평균 유속

을 구하고, 평균 유속을 구한 다음 유량을 계산하는 방식이며 Diametric 방식은 그림 1.(나) 와 같이 여러 개의 직경 경로에서 각각 선상의 선평균 유속을 구하고, 평균 유속을 구한 다음, 전체 평균 유속을 구하여 평균 단면적을 곱하여 유량을 계산하는 방식이다.

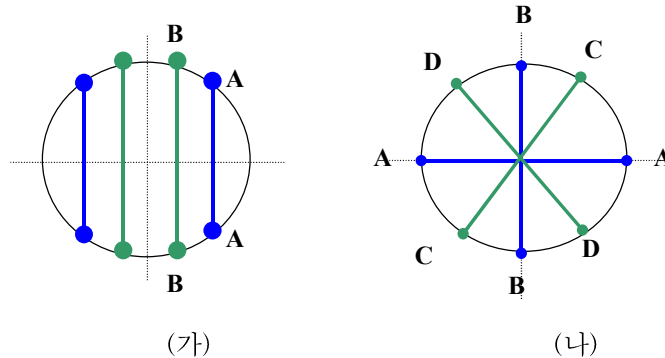


그림 1. 다회선 초음파 유량계의 선평균 유속 측정 개념도
((가). Chordal 방식 (나). Diametric 방식)

다회선 초음파 유량계는 측정 선상에서 최대 유속을 구하는 것이 아니라 각 측정 경로 상에서의 선평균 유속을 구하는 것이므로 각 경로 상에서 최대 유속과 평균 유속과의 관계를 정확하게 파악하여야 평균 유량을 구하는 것이 가능하다. 최대 유속과 평균 유속과의 관계를 정확하게 파악하는 것은 매끄러운 배관 내의 조도, 충분한 직관부 등 이상적인 조건하에서는 가능하나, 실제 유체가 흐르고 있는 상황하에서는 배관의 형상, 사용된 배관 자재의 설치 위치, 배관 내의 조도 등 현장조건에 따른 여러 가지 요소가 많이 관련되어 있어, 정확하게 파악하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 다회선 초음파의 경우 유량 측정 정확도를 악화시키는 불확실도 요소가 1회선 초음파 유량계보다 상대적으로 많아진다. 그러나, 직관부의 길이가 짧은 경우에는 유속분포의 왜곡 정도가 심해지므로 다회선 초음파 유량계가 1회선 초음파 유량계보다 정확도 및 불확실도 측면에서 볼 때 더 우수하다.

중심선에서의 선평균 유속을 여러 직경 경로에서 측정하여 그의 평균을 구하여 유량을 구하는 Diametric 방식은 건식(dry type 또는 clamp-on type)으로 가능하며 현장 적용이 쉽고 유량 측정 정확도 및 불확실도 측면에서도 유리하다. Chordal 방식의 경우 건식 적용을 위한 절차가 복잡하고 원진 주급수 배관의 경우, 직관부의 길이가 요건을 만족하고 있으므로 본 연구에서는 Diametric 방식의 다회선 유량 측정 방식을 중심으로 기술하고자 한다. 특히 Diametric 방식 초음파 유량계는 1회선 초음파 유량계와 같이 선평균 유속을 측정하므로 배관 단면의 평균 유속을 구하기 위해서는 유속 보정계수의 최적화가 필수적이다.

이와 같은 배경으로, 본 논문에서는 다음의 4개 분야에 대해 중점적으로 기술코자 한다.

- 가. 유속보정계수와 유속분포의 상관관계
- 나. 유속 보정계수 산정 모델의 개발
- 다. 개발된 모델을 이용한 표준원전용 유속 보정계수의 산정
- 라. 다회선식 원진 주급수용 초음파 유량계의 불확실도 계산

2. 유속보정계수와 유속분포의 상관관계

배관 상류측 초음파 전과시간 t_1 과 하류측 전과시간 t_2 의 측정값의 평균값인 t_0 와 그의 시간차인 Δt , 관 내경 D , 그리고 유동 방향과 초음파 전과 경로와의 교차각도 θ 로부터 유체 온도에 따라 변화하는 음속의 영향을 배제한 유속은 식 (1)과 같이 구할 수 있다

$$V = \frac{D}{t_0 \sin 2\theta} \cdot \Delta t \quad (1)$$

초음파 유량계에서 측정하는 유속은 초음파 도달 시간차를 이용하는 방식에서는 초음파 전파 경로 상의 평균 유속을 측정하는 것이다. 그러나 유체는 점성의 영향으로 배관내의 벽면 부근에서는 유속이 저하되고 관 중심부에서는 최대 유속으로 되는 유속 분포를 가지고 있기 때문에 초음파 유량계에서 검출하는 유속도 관 단면의 실제 평균 유속과는 차이가 있게 된다. 배관 내 이상적인 유속분포는 그림 2 (가)와 같이 형성된다.

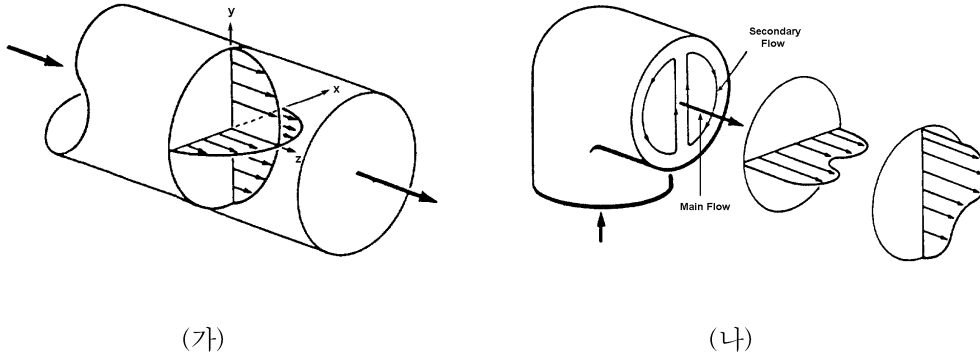


그림 2 (가) 배관내의 이상적인 유속분포, (나) 엘보에 의해 왜곡된 유속분포 [1]

초음파 유량계에서 검출한 유속 V 는 위의 그림 2(가)에 표시된 직경 상 (초음파 전파 경로 상)의 유속 분포를 평균한 값, 즉 관내 유속 분포도에서 사선부의 면적을 관 직경으로 나눈 값으로 식 (2)와 같이 표시할 수 있다. [2]

$$V = \frac{1}{D} \int V(x) \cdot dx \quad (2)$$

그러나 관 전체의 평균 유속 \bar{V} 는 관 단면의 유속 분포를 평균한 값으로 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\bar{V} = \frac{1}{A} \int \int V(x, y) \cdot dx \cdot dy \quad (3)$$

측정된 유속 V 와 실제적인 관내의 평균 유속 \bar{V} 의 비를 유속 보정 계수 K 라고 정의하여 식 (4)로 표시된다.

$$K = \frac{V}{\bar{V}} \quad (4)$$

따라서 실제 초음파 유량계는 검출한 유속 값을 유량 보정 계수로 보정하여 여기에 관의 단면적을 곱하여 식 (5)와 같이 유량을 계산하게 된다.

$$Q = \frac{V}{K} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \quad (5)$$

초음파 유량계는 관내 유속 분포가 충분히 발달된 축대칭인 것을 전제로 하고 있기 때문에 검출부 전, 후단에 적절한 길이의 직관부가 필요하다. 이는 초음파 전달 시간차법의 경우 배관 단면의 직경상의 평균 유속을 측정하기 때문에 먼 유속을 측정하는 전자 유량계와 비교할 때 유속 분포의 영향을 쉽게 받기 때문이다. 따라서 정확한 유량 측정을 위해서는 그만큼 긴 직관부가 필요하게 된다. 또한, 배관이 굽거나 초음파 유량계 전/후단에 엘보우 등이 있으면 유속분포는 정상적인 직선 배관의 유속분포와

는 다르게 나타난다. 엘보우에 의한 유속분포는 엘보우 주위로 흐르는 주 유량에 작용하는 원심력에 의해 그림 2(나)와 같이 최대 속도는 굴곡부위 바깥쪽으로 이동하게 되어 축방향의 유속분포는 왜곡되고 주 유량은 더욱 가속된다.

3. 유속 보정계수 산정 모델의 개발

유속 보정계수의 산정은 유체의 진행 특성, 레이놀드 수, 배관 내벽의 상대적 조도 및 관내부의 형상, 상류측과 하류측 유체의 교란등에 의해 영향을 받으므로 유량의 흐름형태가 고르지 않을 경우, 정확한 계수를 산출하는 것은 매우 어렵게 된다. 원자력발전소 주급수 배관은 유량 측정의 정확성을 위한 직관부 형성요건을 만족한다. 따라서 초음파 유량계를 원전 유량 계측에 적용하기 위해서는 주급수 배관내의 유속분포가 잘 발달된 난류 형태라고 가정하고, 초음파 전달시간차로 측정된 선평균 유속을 유체 단면 평균 유속으로 바꾸어 주어야 한다. 상용 초음파 유량계에서는 Nikuradse 또는 G.B 식과 같은 유속 보정계수를 사용한다. [3] 그러나 이들 식은 레이놀즈 수 백만 이하에서만 정확도가 보장되므로 레이놀즈 수 천만 이상에서 사용할 경우에는 약 0.4%~0.7% 까지의 추가적인 불확실도를 갖는 것으로 발표되고 있다. [4]

따라서 레이놀즈 수 천만이상 2천 5백만 이하의 구간에서 정확도를 유지할 수 있는 유속 보정계수의 산출은 원전 주급수용 초음파 유량계 개발시 측정 정확도 보장의 핵심적 요소가 된다.

가. 모델의 개발

본 모델의 추정 곡선 형태는 일반적으로 널리 검증된 Nikuradse공식의 형태인 로그 형태의 곡선으로 식 (6)와 같다고 가정한다.

$$K = a - b \log(Re) \quad (6)$$

표준 유량시험 결과 및 신규 표준원전의 벤츄리관과의 비교값을 이용하여 최소자승법에 의해 잔차 (Residual) X가 최소가 되는 지점에서 미정 상수 a 및 b를 구하였다. 잔차 X는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$X = \sum_{i=1}^n [K_i - \{a - b \cdot \log(Re)_i\}]^2 \quad (7)$$

미정 상수 "a"와 "b"에 대한 편미분을 도입하면 식 (8) 및 (9)과 같다.

$$\frac{\partial X}{\partial a} = -2 \sum_{i=1}^n [K_i - a + b \cdot \log(Re)_i] = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial X}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n [K_i \log(Re)_i - a \log(Re)_i + b \cdot \{\log(Re)_i\}^2] = 0 \quad (9)$$

미정 상수를 간단히 구하기 위해 각 부분을 식 (10)에서 (13)과 같이 치환한다.

$$P = \sum_{i=1}^n K_i \quad (10)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \log(Re)_i \quad (11)$$

$$R = \sum_{i=1}^n K_i \log(Re)_i \quad (12)$$

$$S = \sum_{i=1}^n \{\log(Re)_i\}^2 \quad (13)$$

치환된 결과를 정리하여 미정 상수 a 및 b를 구하면 식 (14)와 (15)와 같이 얻을 수 있다.

$$a = \frac{SP - QR}{nS - Q^2} \quad (14)$$

$$b = \frac{QP - nR}{nS - Q^2} \quad (15)$$

나. 모델의 검증

미정 상수를 구하기 위한 모델을 검증하기 위해 Nikuradse 모델에서 사용되었던 3개의 레이놀즈 수에 대한 유속 보정계수 K 값을 이용하여 백만 지점, 천만 지점 및 천 구백만 지점의 계수를 입력하여 미정 상수 a 및 b 가 Nikuradse 모델과 같은 결과로 출력되는지를 확인하여 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 검증 결과는 표 1에 수록하였다.

표 1 원전 주급수 적용을 위한 유속 보정계수 산정모델 검증 결과

Reynolds No.	K	log(Re)	log(Re)^2	K*log(Re)
1000000	1.053	6	36	6.318
10000000	1.042	7	49	7.294
19000000	1.038934	7.278754	52.98025	7.562142
sum(above)=				
	3.133934	20.27875	137.9803	21.17414
a= 1.119				
b= 0.011	P	Q	S	R

4. 개발된 모델을 이용한 표준원전용 유속 보정계수의 산정

원전 주급수 유량 측정용 유속 보정계수 K 를 구하기 위해서는 레이놀즈 수 천만 이상 이천 오백만 이하의 범위에서 초음파 유량계에 의한 측정 유량과 실제 교정 및 실험을 통하여 구할 수 있는 유량과의 비교를 통해 얻어진 각 레이놀즈 수에서의 보정계수 K 값을 입력으로 구할 수 있다. 본 절차는 다음과 같이 수행된다.

- 1) 주급수 유량 측정에 사용되는 Venturi 관의 교정성적서를 참조한다. 이 경우 레이놀즈 수는 최소 100만, 최대 700만 정도일 것으로 가정한다.
- 2) 국가교정기관에서 수행한 초음파 유량계의 교정성적서로 이 경우에는 최대 레이놀즈 수는 100만을 넘지 않을 것으로 판단된다.
- 3) 초음파 유량계의 교정성적서의 경우 최대 레이놀즈 수는 700만 이하일 것으로 판단된다.
- 4) 레이놀즈 수 700만 이상 2000만 정도까지는 초음파 유량계와 주급수 유량 측정용 Venturi 관의 현장 측정 결과를 상호 비교함으로써 구할수 있을 것으로 판단된다. 이때 실험을 통하여 밝히고자 하는 K 값은 레이놀즈 수 700만, 1200만, 1500만, 1800만, 2000만 정도만 취득해도 정확한 미정 상수 a 및 b 를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 표준 유량장치 유량과 신규 표준원전 벤츄리 유량값을 초음파 유량계 측정 유량과 비교한 결과를 그 지점에서의 유속 보정계수로 놓고 미정 상수를 구하였다. 신규 표준원전 벤츄리관 측정 유속을 평균유속으로 가정하면 식 (16)과 같은 보정계수 산출이 가능하다.

$$K_{re} = \frac{U_{measured}}{U_{corrected}} \quad (16)$$

초음파 유량 측정에 사용된 평균유속은 Nikuradse 공식을 적용하여 유속 보정계수 $K_{Nikuradse}$ 를 산정하였으므로 실제 유량을 고려한 유속 보정계수 K_{re} 는 식 (17)과 같다.

$$K_{re} = \frac{1}{K_{Nikuradse}} \quad (17)$$

구하고자 하는 최종 유속 보정계수는 평균유속에 대한 실제 유속이므로 식 (18)과 같이 산출할 수 있다.

$$K_{new} = K_{re} \cdot K_{Nikuradse} \quad (18)$$

표 2 신규 표준원전 초음파 유량계 및 벤츄리 유량계 측정자료 비교

측정	초음파 유량계 자료			벤츄리 유량계 자료		
	유속 (m/s)	유량보정 계수	레이놀즈 수	유속 (m/s)	레이놀즈 수	유량보정 계수
1차	5.2023	0.9610	15,778,187	5.1108	15,376,456	0.9824
2차	5.2788	0.9610	16,014,316	5.1418	15,469,518	0.9740
3차	5.2195	0.9610	15,840,723	5.1263	15,422,932	0.9821
4차	5.2876	0.9618	16,043,378	5.1487	15,490,538	0.9738
평균값	5.2471	0.9612	15,919,151	5.1319	15,439,861	0.9781

표 2에서 초음파 유량계의 유속은 레이놀즈 수가 약 15,919,151일 때 Nikuradse 공식을 이용한 유속 보정계수 0.9612를 적용하여 산출된 평균 유속이다. 이에 반해 벤츄리 유량계를 통해 측정된 유속은 실제 유속의 평균값이라 가정할 수 있다. 그러므로 유속 보정계수는 레이놀즈 수 15,439,861에 대한 유속 보정계수를 계산하면 식 (19)와 같다.

$$K_{new} = K_{re} \cdot K_{Nikuradse} = 0.9781 \times 0.9612 = 0.94015 \quad (19)$$

이를 바탕으로 신규 표준원전 유량측정 결과에 따른 새로운 유속 보정계수는 표 3과 같다.

표 3 표준원전 주급수 유량조건을 반영하여 산출한 유속 보정계수

Reynolds No.	K	log(Re)	log(Re)^2	K*log(Re)
240000	1.068575	5.380211	28.94667	5.749159
400000	1.066349	5.60206	31.38308	5.973751
16000000	1.06366	7.20412	51.89934	7.662734
Sum(above)=	3.198584	18.18639	112.2291	19.38564
a=	1.08023819			
b=	0.002316599	P	Q	S
				R

그림 3에서 신규 표준원전 측정값을 기준으로 산정한 유속 보정계수는 Nikuradse의 공식과 G. B 공식을 이용한 유속 보정계수와 비교할 때 차이가 있으나 Cross-Correlation 방식의 초음파 유량계 제작사가 발표한 유속 보정계수와는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. [5][6]

나. 제시된 다회선 초음파 유량측정 방식의 합성 불확실도 계산

모든 직경 경로에서의 선평균 유속 측정이 올바르게 되었으며 또한 각 직경 경로에서의 선평균 유속 값이 비슷한 값을 가진다고 가정하면 평균 유량은 식 (24)와 같이 계산할 수 있다

$$W_{feed\ water, avg} = \frac{1}{4} \cdot [W_{feedwater1} + W_{feedwater2} + W_{feedwater3} + W_{feedwater4}] \quad (24)$$

따라서 각 직경 경로에서의 선평균 유속을 구하여 유량을 계산하는 방식의 다회선 초음파 유량계의 95.45 % 신뢰수준에서의 유량 측정 확장 불확실도는 각 유량계별 확장 불확실도 산출 결과를 이용하여 식 (25)와 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_{W, avg} = k \cdot \sqrt{\left\{ \frac{1}{4} \cdot \frac{\epsilon_{W1}}{2} \right\}^2 + \left\{ \frac{1}{4} \cdot \frac{\epsilon_{W2}}{2} \right\}^2 + \left\{ \frac{1}{4} \cdot \frac{\epsilon_{W3}}{2} \right\}^2 + \left\{ \frac{1}{4} \cdot \frac{\epsilon_{W4}}{2} \right\}^2} \quad (25)$$

만일 각 직경 경로에서의 유량 측정 불확실도가 동일하다면, 다회선식 초음파 유량계의 확장 불확실도는 식 (26)과 같다.

$$\epsilon_{W, avg} = \frac{\epsilon_W}{2} \quad (26)$$

식 (26)에서 나타난 바와 같이 중심선상에서의 유속 측정을 통하여 유량을 계산하는 방식은 회선수가 많으면 많을수록 유량 측정 불확실도 및 정확도는 향상된다. 그러나 각 경로의 유량 측정 불확실도를 동일하게 유지하는 것은 어려움이 크므로, 중심선상에서 유속을 측정하여 유량을 측정하는 4회선의 초음파 유량계가 적합할 것으로 판단된다.

본 측정방식의 확장 불확실도를 구하기 위해 먼저, 각 측정선상의 유량 측정 확장 불확실도를 식 (27)에 의해 구하였다. [9]

$$\epsilon_W = k \cdot \left[\epsilon_K^2 + (2 \cdot \epsilon_{d_i, T, P})^2 + \epsilon_{d_i, T, P}^2 + (2 \cdot \epsilon_{t_0})^2 + \epsilon_{\rho}^2 + \epsilon_{\Delta t}^2 + 2 \cdot \epsilon_{\theta}^2 + \epsilon_{st}^2 + \epsilon_{res}^2 \right]^{0.5} \quad (27)$$

여기서 k : 포함인자(coverage factor)로 신뢰수준 95.45 %에서 2를 적용한다.

ϵ_K : 유량보정계수 K 의 불확실도로 식 (22)로부터 산정한 값(0.00055 %)과 교정 및 실험 데이터로부터 산정한 불확실도 값을 합성하여 구한다.

$\epsilon_{d_i, T, P}$: 내경의 불확실도는 0.07 %로 가정한다.

ϵ_{t_0} : 송신 및 수신 시간의 평균의 불확실도로 0.01 %로 가정한다.

ϵ_{ρ} : 주급수의 밀도에 관련된 불확실도로 0.08 %로 가정한다.

$\epsilon_{\Delta t}$: 측정된 시간차에 관련된 불확실도로 0.01 %로 가정한다.

ϵ_{θ} : 송신 및 수신 초음파 센서 사이의 각도에 관련된 불확실도로 0.1 %로 가정한다.

ϵ_{st} : 초음파 유량계의 장기 안정도에 관련된 불확실도로 아래의 세 가지 방법 중 한가지를 선택한다.(여기에서는 0.02 %로 가정한다.)

- 1) 초음파 유량계 제조업체에서 제공한 안정도에 대한 기술 자료를 $\sqrt{3}$ 으로 나누어 준 값
- 2) 현재 교정 성적서와 전년도 교정 성적서와의 오차의 차이를 $\sqrt{3}$ 으로 나누어

준 값

3) 위의 두 가지 데이터 다 가용하지 않은 경우 현재의 교정 성적서의 불확실도를 $\sqrt{3}$ 으로 나누어 준 값

ϵ_{res} : 초음파 유량계의 분해능에 관련된 불확실도로 0.003%로 가정한다.

주급수 유량 측정에 사용되는 Venturi 관의 교정성적서는 레이놀즈 수 최소 100만, 최대 700만 이내에서 수행한 결과이며, 국가교정기관에서 수행한 초음파 유량계의 교정성적서는 이 경우에는 최대 레이놀즈 수는 100만을 넘지 않는다. 이에 대한 불확실도는 초음파 유량계와 Venturi tube와의 차이를 $2\sqrt{3}$ 으로 나누어 준 값을 사용하면 가능할 것으로 판단된다.

국가교정기관에서 발행한 교정 성적서에 주어진 확장 불확실도를 0.64 %로 가정하면, 불확실도의 합성에 사용할 합성불확실도는 확장불확실도를 포함인자인 $k=2$ 로 나누어 준 값인 0.32 %가 된다. 또한 레이놀즈 수 700만, 1200만, 1500만, 1800만, 2000만에서 Venturi tube와 초음파 유량계의 상대오차를 각각 0.58 %, 0.65 %, 0.69 %, 0.74 %, 0.73 %라고 가정하면 각각의 불확실도는 0.17 %, 0.19 %, 0.20 %, 0.21 %, 0.21 %이다. 따라서 가장 큰 값인 0.32 %를 채택한다.

유속 보정계수 K 의 레이놀즈 수에 대한 불확실도 0.00055 %와 K 의 교정 불확실도 0.32 %를 합성하면 0.32 %를 얻게된다.

위의 값들을 이용하여 유량 측정에 대한 불확실도를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\epsilon_W &= k \cdot \left[\epsilon_K^2 + (2 \cdot \epsilon_{d_i, T, P})^2 + \epsilon_{d_i, T, P}^2 + (2 \cdot \epsilon_{t_0})^2 + \epsilon_{\rho}^2 + \epsilon_{\Delta t}^2 + 2 \cdot \epsilon_{\theta}^2 + \epsilon_{st}^2 + \epsilon_{res}^2 \right]^{0.5} \\ &= 2 \cdot \sqrt{0.32^2 + (2 \cdot 0.07)^2 + 0.07^2 + (2 \cdot 0.01)^2 + 0.08^2 + 0.01^2 + 2 \cdot 0.1^2 + 0.02^2 + 0.003^2} \\ &= 0.79 \%\end{aligned}$$

중심선을 지나는 경우의 4회선 초음파 유량계의 불확실도는 각 회선에서의 불확실도가 다른 경우에는 식 (25)를, 각 회선에서의 불확실도가 동일한 경우에는 식 (26)을 이용하여 구할 수 있다. 만일 각 회선에서의 유량 측정 불확실도가 1회선 초음파 유량계에서 계산한 0.79 %로 동일하다고 가정하면 중심선을 지나는 4회선 초음파 유량계의 유량 측정 불확실도는 식 (26)에 의하여 0.40 %가 된다.

6. 결론 및 향후 연구계획

원전 주급수 유량 측정을 위한 다회선식 초음파 유량계에 대해 소개하고 레이놀즈 수 천만 이상의 높은 유속에서 배관 단면 평균 유속을 정확히 산정할 수 있는 보정계수 산정 모델의 개발 과정 및 검증 방법에 대해 기술하였다. 아울러 유속 보정계수와 유속분포의 상관관계에 대해 고찰하고 본 연구에서 개발된 모델을 이용하여 표준원전용 유속 보정계수의 산정하였으며 본 방식의 다회선식 초음파 유량계를 원전 주급수 유량 측정에 적용시 합성 불확실도를 계산하였다.

본 연구에서의 실험 결과를 기준으로 산출한 유량보정계수를 모든 원전의 주급수 유량 측정에 직접 적용하기는 어렵다. 이는 첫째, 실험조건인 신규 표준원전은 직관부가 충분히 확보된 형상을 가지고 있으나, 주로 노형에 따라 직관부 길이가 각각 다르므로 유속분포 역시 달라지게 되어 보정계수에 영향을 줄 것으로 판단되며, 둘째, 초음파 유량 측정 시점이 출력 80% 대역에서 수행하므로 전 출력조건에 비해 유량 변동이 커서 측정 신뢰도가 저하될 것으로 판단된다. 세계 국내 표준유량 측정설비가 제공하는 유체의 유속이 최대 2 meter/sec 이내로서

레이놀즈 수 기준 몇 십만에 불과해 곡선 생성을 위한 측정점이 매우 한정된 상태에서 시험을 수행하였기 때문이다.

본 연구에서 제시한 모든 결과식 및 모델은 검증과정을 통해 적정함을 확인하였으므로 추후 반복적인 현장 시험 및 표준유량과의 비교 시험을 통해 최적의 유량보정계수 산정을 위한 이론적 기초로 활용이 가능하다.

향후 연구에서는 레이놀즈 수가 최대 700만에 이르는 국외 표준유량시험 시설을 이용한 실험 결과와 전출력 조건의 신규 원전에서의 측정값과 비교하여 유속 보정계수의 정확성을 평가할 예정이다.

본 연구 결과는 국내외 원전의 출력 증강 및 전기출력 저하 방지, 그리고 원전 안전성 확보에 활발하게 적용되기를 기대한다.

참고자료

1. Lawrence C. Lynnworth "Ultrasonic Measurement for Process Control", Academic Press, Inc., 1989
2. 한국표준과학연구원 "유체 유량", KRISS-91-164-ET, 공업진흥청, 1998
3. 일본 계량기기 공업연합회, "유량계측 A to Z," pp 124-131
4. Herb Estrada "Identifying and Bounding the Uncertainties in LEFM Flow Measurements", CALDON Inc., Oct. 1996,
5. ABB-CE, "CrossFlow-Ultrasonic Flowmeter," Presentation for KOPEC NSSS, Sep. 1999
6. Y. Gurevich et al., "Theory and Application of a Non-invasive Ultrasonic Cross-Correlation Flow Meter"
7. 정재천 외 "원전용 초음파 유량계의 측정 불확도 향상 및 유량 계산 최적화" 2000 추계 학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2000
8. 정재천 외 "시간전달차법 초음파 유량계의 불확실도 계산", 2001 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 2001
9. 한국 표준과학 연구원 "측정 불확도 표현지침", KRISS-98-096-SP, 1998

알리는 글

본 논문은 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구결과입니다.