

2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

시간전달차법 초음파 유량계의 불확실도 계산
Flow Rate and Uncertainty Calculation Theory
for Transit Time Ultrasonic Flowmeter

정재천, 장우현, 한희환, 김범식
한국전력기술주식회사
대전광역시 유성구 덕진동 150번지

박문호 박기성
한전기공주식회사
경기도 성남시 분당구 금곡동 196번지

요 약

시간전달차법 초음파 유량계의 불확실도 요소를 분석하고 원전 주급수 측정 자료를 이용한 계산 결과에 대해 기술하였다. 원전 주급수는 높은 압력과 온도 그리고 매우 빠른 유속의 특성이 있으므로 잘 발달된 난류 유동하의 초음파 유량계 불확실도를 구하기 위해, 유량보정계수 산정에 따른 불확실도, 초음파 탐촉자의 설치 및 운전 조건, 그리고 온도와 압력등 유량계의 특성에 영향을 주는 불확실도 항목등으로 요인을 나누어 이론적 공식을 산정하고, 원전 주급수 배관 외경 및 두께 측정자료와 운전변수 측정결과를 이용하여 주급수 유량 계산 합성 불확실도를 계산하였다. 계산에 의해 확인된 이론적 불확실도는 0.52% 이었으며, 표준 유량 시험을 통해 각 불확실도 항목에 대한 검증을 실시하고 표준 유량과 편차를 비교한 결과 0.6% 이내로, 이론적 분석내용과 잘 일치함을 입증하였다.

Abstract

Flow rate and uncertainty calculation for transit time Ultrasonic Flow Measurement Systems (UFMS) for NPPs are developed in this work. Feedwater of NPP has characteristics of high Reynolds number, high temperature, and high pressure. Therefore, accurate measuring of feed water is required to reduce the uncertainty which occurs during installation, measuring and data processing. We classify the uncertainty factors as; velocity profile correction factor, diameter measurement of pipe inside diameter, spacing between transducers and the density of fluid. Uncertainty calculations were done using feed-water pipe data and plant operating data. For verification of the calculation results, the experiments under standard fluid loop were taken place. The discrepancy between known mass flow rate and the measuring flow rate is approximate 0.6%. It shows a good agreement with the theoretical uncertainty of 0.52%.

1. 서 론

주급수 유량을 측정하기 위한 초음파 유량계의 형식은 시간전달차법과 상관관계법으로 나눌 수 있다. 시간전달차법 유량계는 탐촉자의 설치 방법에 따라 삽입식 또는 배관 외벽 부착식으로 나누어 진다. 삽입식 유량계는 배관 재질의 특성, 내부 조도(Roughness), 외경 및 두께 등의 물리적인 영향에 의한 오차율을 줄일 수 있어 외벽 부착식 유량계측 방법에 비해 정확한 유량측정이 가능

한 장점이 있으나 플랜지 형태의 전용 배관에 탐촉자가 삽입되어 있으며 센서 부분과 배관이 일체화 되어 전체 직경이 약 20인치에 이르므로 국내 표준유량시험장치에 의한 주기적인 교정과 보정이 불가능하다. 또한 정확도 향상을 위해 다회전 방법을 사용하므로 탐촉자의 고장시 측정 정확도 유지가 어려운 단점이 있다.

시간차법 초음파 유량계의 다른 형태인 외벽 부착식 초음파 유량계는 배관 외벽에 전용 탐촉자 고정 장치를 먼저 설치하고 유량 측정용 탐촉자를 설치하게 되므로 발전소 운전기간 중에도 상시 유지 보수가 가능하고 특히 급수와 직접 접촉이 없으므로 상대적으로 수명이 길다. 그러나 배관의 두께 및 내경 불균일에 따라 초음파 전파에 영향을 미치며, 초음파 전달경로 측정이 부정확할 경우 불확실도가 증가하여 정확도가 떨어지는 단점이 있다.

본 논문의 제 2장에서는 주급수 유량계산의 일반 공식과 시간 전달차법 초음파 유량계의 유량 보정계수에 대해 기술하였다. 제 3장에서는 시간전달차법 초음파 유량계의 불확실도 인자를 도출하고 각 불확실도 계산 공식을 이론적으로 유도한 결과를 소개하였다. 제 4장에서는 이론적으로 작성된 공식을 검증하기 위해 원전에서 측정된 주급수 배관 및 운전 자료를 이용하여 합성 불확실도를 계산하고 표준 유량장치와의 비교 시험을 통해 각 불확실도 인자들의 불확실도를 평가하였다.

2. 주급수 유량계산 일반 공식

시간전달차법 초음파 유량계의 유량 산출을 위해 사용하는 공식은 식 (1)과 같다.

$$W_{feedwater} = \frac{\rho \cdot V \cdot A}{C_f} \quad (1)$$

여기서, C_f : 유량보정계수
 ρ : 주급수의 밀도
 V : 배관내 주급수의 유속
 A : 배관의 단면적

식 (1)에서 유량보정계수는 다음의 과정에 의해 결정된다. 시간전달차법 초음파 유량계에 의해 측정된 유속은 초음파 전달경로상의 평균 유속으로 정의할 수 있다. 시간전달차법 초음파 유량계에서 측정하는 유속은 초음파 전달경로, 또는 배관 직경에서의 평균 유속분포이므로 유속분포를 유로의 직경으로 나눈 값으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

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

그러나 실제 평균 유속은 식 (3)와 같이 배관의 단면적에서의 평균값으로 표현할 수 있다.

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

유속(V)는 초음파의 속도(C)보다 매우 느리게 진행하므로 ($V \ll C$), 측정된 유속과 실제 평균 유속(\bar{V})과의 비는 유량보정계수(C_f)라고 불리며 식 (4)과 같이 표현된다.

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

3. 초음파 유량계의, 불확실도 인자 산정

시간전달차법 초음파 유량계의 불확실도 요소 및 산정 공식은 식 (5)와 같다.[1]

$$\varepsilon_W = [\varepsilon_{Cf}^2 + \varepsilon_{di,T,P}^2 + \varepsilon_{\rho}^2 + \varepsilon_{\Delta t}^2 + \varepsilon_L^2 + \varepsilon_C^2 + \varepsilon_{\theta}^2]^{0.5} \quad (5)$$

여기서, ε_W : 주급수 유량계산 불확실도
 ε_{Cf} : 유량보정계수 불확실도
 $\varepsilon_{di,T,P}$: 배관 내경측정 불확실도
 ε_{ρ} : 주급수 밀도에 의한 불확실도
 $\varepsilon_{\Delta t}$: 전달시간차 산정 불확실도
 ε_L : 송, 수신 탐촉자간 설치간격 불확실도
 ε_C : 주급수내의 초음파 전파속도에 의한 불확실도
 ε_{θ} : 배관 중심에서의 송, 수신용 탐촉자 전달각도 불확실도

본 논문에서는 상기 불확실도 요인중, 불확실도 영향이 매우 적은 원전 주급수 밀도에 의한 불확실도(ε_{ρ})는 계산결과만을 기술하였으며 전달시간차 산정 불확실도($\varepsilon_{\Delta t}$) 역시 제작사의 제품에 따른 특성에 좌우되는 불확실도이므로 별도의 산정은 수행치 않고 추정값을 사용하고 표준유량 시험시 얻어진 계통오차를 이용하여 검증을 실시하였다.

3-1 배관 내경측정 불확실도

초음파 유량계는 관내 유속분포가 충분히 발달된 측대칭인 것을 전제로 하고 있어 검출기 전후에는 적절한 직관 길이가 필요하다. 이는 배관 단면상의 평균 유속을 측정함에 따라 유속분포의 영향이 측정 정밀도에 중요한 요소가 되기 때문이다. 따라서 고정도의 유량측정을 위해서는 충분한 길이의 직관부가 필요하다. 또한 초음파 유량계의 성능을 충분히 발휘하기 위해 배관의 관경, 관두께, 관의 재질, 라이닝의 유무, 라이닝의 두께 및 재질등을 정확히 파악하여 계산에 고려하는 것이 중요하다.

95% 신뢰도 구간에서의 배관 내경 측정 합성불확실도 (ε_{di})는 95% 신뢰도 구간에서의 배관 측정 기구, 급수 압력 및 온도 측정 계기, 열팽창계수등에 대한 값으로 나타낼 수 있다. 이 오차량은 우연오차와 정규분포의 특성을 가지고 있으며 독립적 변량이므로 SRSS방법에 의해 합성 불확실도를 구한다. 식 (6)에서는 평균 배관 내경, 압력 및 온도 보정을 거쳐 정규화된 오차량을 보여준다.[2]

$$\varepsilon_{di,T,P} = \left[\varepsilon_{d',i,T,P}^2 + \left(\frac{d_i}{d_{i,T,P}} \right) \cdot \varepsilon_{di}^2 \right]^2 \quad (6)$$

여기서, ε_{di} : 배관 내경 측정 합성 불확실도
 $\varepsilon_{di,T,P}$: 주급수 온도, 압력 영향을 고려한 배관 내경 합성 불확실도
 $d_{i,T,P}$: 주급수 온도, 압력 영향을 고려한 배관 내경 측정치
 d_i : 배관 내경 측정치

3-2. 송, 수신 탐촉자간 설치 간격

송, 수신 탐촉자간 설치 간격 측정값은 유속을 결정하고, 주급수 유량을 계산하는데 사용된다. 시간 전달차법 초음파 유량계의 경우 1쌍의 송, 수신 탐촉자를 사용하여 초음파 진행 경로상의 유속을 측정하므로 배관상 탐촉자 설치 예정지점에 대한 각각의 탐촉자간 간격을 탐촉자 설치전에 측정하여야 한다. 거리측정에는 디지털 캘리퍼스등이 사용되며 유속 계산의 입력으로는 실제 탐촉자가 설치되는 지점의 간격 측정치가 사용된다.

설치간격 측정값의 95 % 신뢰도 구간은 각 가중치 계수에 대한 95% 신뢰구간을 각각 구하고 SRSS를 취하여 얻을 수 있다. 또한 간격 측정 기구의 불확실도, 탐촉자 설치시의 불확실도 및 초음파 빔의 음향 전달 효율, 그리고 탐촉자 설치시 정렬상태의 변화등에 대한 불확실도도 고려된다. 식 (7)를 이용하여 95% 신뢰구간 합성 불확실도를 SRSS 방법에 의해 구한다.

$$\epsilon_{Lspacingdata} = [\epsilon_{Lspacingmeas}^2 + \epsilon_{caliber}^2 + \epsilon_{probe}^2 + \epsilon_{tempeect}]^{0.5} \quad (7)$$

여기서, $\epsilon_{Lspacingdata}$: 데이터 취득시의 탐촉자 설치간격 불확실도
 $\epsilon_{Lspacingmeas}$: 간격 측정시의 불확실도
 $\epsilon_{caliber}$: 간격 측정계기의 불확실도
 ϵ_{probe} : 탐촉자 제작 불확실도
 $\epsilon_{tempeect}$: 온도의 영향에 따른 불확실도

3-3. 유량보정계수에 의한 불확실도

시간 전달차법 초음파 유량계에 일반적으로 사용하는 유량보정계수 공식은 식 (8), (9), (10)와 같다.[3]

$$C_f = 1 + 0.2488 \cdot Re^{-1/8} \quad (8)$$

$$C_f = 1.119 - 0.011 \cdot \text{Log}(Re) \quad (9)$$

$$C_f = 1 + 0.01 \sqrt{6.25 + 431 \cdot Re^{-0.237}} \quad (10)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot d_i}{\mu} \quad (11)$$

상기 3가지의 식 중 식 (9)의 공식을 대표적으로 분석하고자 한다.

식 (10)과 (11)을 각각 자연 로그를 취하고 미분한 결과는 식 (12) 및 식 (13)과 같다.

$$\frac{dC_f}{C_f} = \frac{-0.510735 \cdot Re^{-0.237} \cdot (6.25 + 431 \cdot Re^{-0.237})^{-0.5}}{1 + 0.01 \cdot (6.25 + 431 \cdot Re^{-0.237})^{0.5}} \cdot \frac{dRe}{Re} \quad (12)$$

$$\frac{dRe}{Re} = \frac{ddi}{di} + \frac{dV}{V} + \frac{d\rho}{\rho} - \frac{d\mu}{\mu} \quad (13)$$

식 (13)에 편미분자 밀도 ρ 및 점도 μ 항을 온도와 압력에 대해 편미분하면 식 (14)이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \frac{dRe}{Re} = & \frac{ddi}{di} + \frac{dV}{V} + \frac{\partial \rho}{\partial P} \cdot \frac{P}{\rho} \cdot \frac{dP}{P} \\ & + \frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{T}{\rho} \cdot \frac{dT}{T} - \frac{\partial \mu}{\partial P} \cdot \frac{P}{\mu} \cdot \frac{dP}{P} - \frac{\partial \mu}{\partial T} \cdot \frac{T}{\mu} \cdot \frac{dT}{T} \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)을 정리하고 SRSS를 취하면 식 (15)와 같다. 식 (13)과 (14)에서 속도 항의 오차는 영(0)이 되며 이는 속도항을 반복적으로 계산하여 구해진 속도가 구해진 최종 속도에 이르게 되면 오차가 영이 되기 때문이다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{Re} = & \left[\epsilon_{di}^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \cdot \frac{P}{\rho} \cdot \epsilon_P \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{T}{\rho} \cdot \epsilon_T \right)^2 \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial \mu}{\partial P} \cdot \frac{P}{\mu} \cdot \epsilon_P \right)^2 + \left(\frac{\partial \mu}{\partial T} \cdot \frac{T}{\mu} \cdot \epsilon_T \right)^2 \right]^{0.5} \end{aligned} \quad (15)$$

따라서, 유량보정계수의 95% 신뢰도 구간에서의 불확실도 계산 공식은 다음의 식 (16)과 같다.

$$\varepsilon_{CF} = \left[\left\{ \frac{-0.510735 \cdot Re^{-0.237} \cdot (6.25 + 431 \cdot Re^{-0.237})^{-0.5}}{1 + 0.01 \cdot (6.25 + 431 \cdot Re^{-0.237})^{0.5}} \cdot \varepsilon_{Re} \right\}^2 \right]^{0.5} \quad (16)$$

3-4. 배관 중심에서의 송, 수신 초음파 전달각도 불확실도

배관의 중심과 송, 수신 초음파가 이루는 각도는 식 (17)와 같다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{d_o}{L_{spacingdata}} \right) \quad (17)$$

초음파 전달각을 구하는 식 (17)에 자연 로그를 취하고 미분을 취하면 식 (18) 과 식 (19)가 얻어진다.

$$\frac{d\theta}{\theta} = \frac{du}{u} \quad (18)$$

$$\text{여기서, } u = \tan^{-1} \left(\frac{d_o}{L_{spacingdata}} \right) = \tan^{-1}(w)$$

$$\begin{aligned} \frac{du}{u} = & \frac{d_o}{(1+w^2) \cdot L_{spacingdata} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{d_o}{L_{spacingdata}} \right)} \cdot \frac{dd_o}{d_o} \\ & - \frac{d_o}{L_{spacingdata} \cdot (1+w^2) \cdot \tan^{-1} \left(\frac{d_o}{L_{spacingdata}} \right)} \cdot \frac{dL_{spacingdata}}{L_{spacingdata}} \end{aligned} \quad (19)$$

초음파 전달각의 95 % 신뢰구간은 식 (20)와 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\theta} = & \left[\left\{ \frac{d_o}{(1+w^2) \cdot L_{spacingdata} \cdot \tan^{-1} \left(\frac{d_o}{L_{spacingdata}} \right)} \cdot \varepsilon_{do} \right\}^2 \right. \\ & \left. + \left\{ \frac{d_o}{L_{spacingdata} \cdot (1+w^2) \cdot \tan^{-1} \left(\frac{d_o}{L_{spacingdata}} \right)} \cdot \varepsilon_{Lspacingdata} \right\}^2 \right]^{0.5} \end{aligned} \quad (20)$$

주급수의 온도와 압력의 변화에 따라 초음파 전달속도가 변한다. 초음파 전달속도는 압력보다는 온도의 영향을 더욱 많이 받는다. 따라서 압력에 따른 초음파 전달속도 불확실도는 고려하지 않는다. 초음파 전달속도의 온도에 따른 변화 곡선은 그림 1과 같다.

식 (21)은 그림 1의 변화 곡선에 대해 최소 자승법과 polynomial 에 의해 구한다. 식 (21)의 불확실도는 약 ± 0.3 %로 계산된다.

$$\begin{aligned} C = & 0.1402761253 \times 10^4 + 0.4846966517 \times 10^1 \cdot T_{FWdata} - 0.4890472547 \times 10^{-1} \cdot T_{FWdata}^2 \\ & + 0.1842836926 \times 10^{-3} \cdot T_{FWdata}^3 - 0.4647676105 \times 10^{-6} \cdot T_{FWdata}^4 \\ & + 0.7072176418 \times 10^{-9} \cdot T_{FWdata}^5 - 0.6428286798 \times 10^{-12} \cdot T_{FWdata}^6 \end{aligned} \quad (21)$$

식 (21)을 정규화하기 위해 양변에 자연 로그를 취하고 T_{FWdata} 로 미분한 결과는 식 (22)과 같다.

$$\frac{dC}{C} = \frac{T_{FWdata}}{C} \cdot \frac{dC}{dT_{FWdata}} \cdot \frac{dT_{FWdata}}{T_{FWdata}} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dT_{FWdata}} = & 0.4846966517 \times 10^1 - 0.9780945094 \times 10^{-1} \cdot T_{FWdata} \\ & + 0.5528510778 \times 10^{-3} \cdot T_{FWdata}^2 - 1.859070442 \times 10^{-6} \cdot T_{FWdata}^3 \\ & + 3.536088209 \times 10^{-9} \cdot T_{FWdata}^4 - 3.8569720788 \times 10^{-12} \cdot T_{FWdata}^5 \end{aligned} \quad (23)$$

여기서, T_{FWdata} : 자료 취득시의 주급수 온도

초음파 전달속도 보정계수를 적용한 후의 전달속도 불확실도는 식 (24)와 같다.

$$\epsilon_C = \left[\left\{ \left(\frac{T_{FWdata}}{C} \right) \cdot \left(\frac{dC}{dT_{FWdata}} \right) \cdot \epsilon_{TFWdata} \right\}^2 + \epsilon_{C(cal)}^2 \right]^{0.5} \quad (24)$$

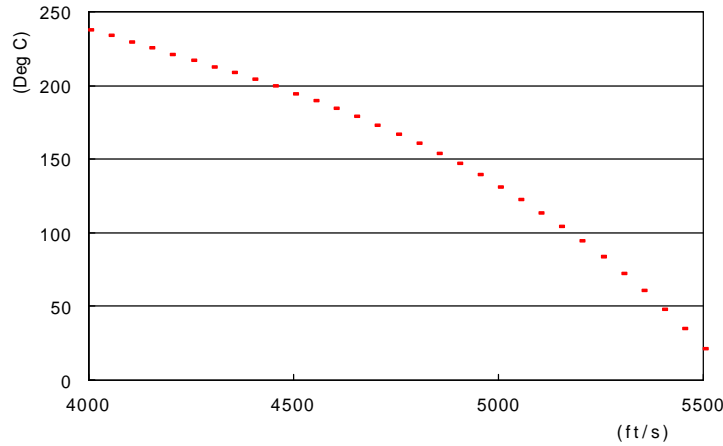


그림 1. 주급수 온도의 변화에 따른 초음파 음속 변화

4. 원전 측정 자료를 이용한 합성 불확실도 계산 및 표준 유량시험 결과와 비교 검증

시간전달차법 초음파 유량계의 합성 불확실도를 원전 주급수 배관 측정자료와 주급수 유량측정 자료를 이용하여 계산하고 계산 결과를 검증하였다. 검증을 위해 0.2%의 불확실도를 가진, 단위 시간당 탱크에 유입된 유체의 무게를 측정하여 유량을 산출하는, 표준 유량 시험장치를 이용하여 초음파 유량계의 합성 불확실도와 각 불확실도 요소들에 대한 계산 결과의 정확성을 시험하였다.

4-1 배관 내경측정 불확실도 계산

표 1의 배관 내경 측정결과에 대한 배관 내경 측정에 대한 표준 편차 (σ)는 식 (25)와 같다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [x_i - \bar{x}]^2}{n-1}} \quad (25)$$

$$\sigma_{di} = 0.000293 \text{ m}$$

배관 내경의 신뢰도 구간 95%에 대한 측정 불확실도는 식 (26)에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{di} &= \frac{S_{t(n-1, \alpha/2)} \sigma_{di}}{\sqrt{n} d_i} \times 100 \\ &= 0.02868 \end{aligned} \quad (26)$$

여기서, $S_{t(n-1, a/2)} = 2.069$ 자유도 $n = 24$

식 (6)을 이용하여 산출한 배관 내경 측정 불확실도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{d_i, T, P} &= \left[\epsilon_{d_i, T, P}^2 + \left(\frac{d_i}{d_{i, T, P}} \right)^2 \times \epsilon_{d_i}^2 \right]^{0.5} \\ &= 0.07288 \% \end{aligned}$$

여기서, $d_i = 0.431451 \text{ m}$, $d_{i, T, P} = 0.4314511 \text{ m}$
 $\epsilon_{d_i} = 0.02868 \%$

측정 항목	측정 평균값
배관 외경 측정 평균값 (d_o)	0.507837 m
배관 내경 측정 평균값 (d_i)	0.431451 m
배관 두께 측정 평균값 (기준점, t_x)	0.038335 m
배관 두께 측정 평균값 (반대측, t_{x+180})	0.038103 m

표 1. 불확실도 계산에 사용한 주급수 배관 측정 평균값

4-2. 송, 수신 탐촉자간 설치 간격 불확실도 계산

측정 항목	측정 및 계산값
탐촉자 설치시 간격 측정 평균값	$L_{spacingmeas} = 0.30493 \text{ m}$
탐촉자간 간격 측정 표준편차	$\sigma_{L, spacingmeas} = 0.00008636 \text{ m}$
탐촉자간 간격 불확실도	$\epsilon_{L, spacingmeas} = 0.02025 \%$
유량 측정시 탐촉자 설치 간격 평균값	$L_{spacingdata} = 0.30493 \text{ m}$
캘리퍼의 측정 오차	$E_{caliper} = 0.00000635 \text{ m}$
탐촉자의 제작 오차	$E_{probe} = 0.00006 \text{ m}$
캘리퍼에 의한 불확실도	$\epsilon_{caliper} = \frac{E_{caliper}}{L_{spacingmeas}} \times 100 = 0.00208 \%$
탐촉자에 의한 불확실도	$\epsilon_{probe} = \frac{E_{probe}}{L_{spacingmeas}} \times 100 = 0.0197 \%$
설치간격에 의한 측정 불확실도	$\epsilon_{L, spacingdata} = 0.2835 \%$

표 2. 탐촉자 설치 간격 불확실도 계산에 사용된 측정 평균값 및 계산 결과

4-3. 원전 주급수 유속 및 레이놀드 번호 계산

$$\begin{aligned}\bar{V} &= \frac{W}{3600} \\ &= \frac{\pi}{4} d_{i,T,P}^2 \rho \\ &= 6.4038 \frac{m}{s}\end{aligned}$$

여기서, W : 질량유량 (=2,805,237 kg/hr)

$$d_{i,T,P} = 0.4314511 \text{ m}$$

$$\rho = 832.293 \frac{kg}{m^3}$$

$$\begin{aligned}Re &= \frac{\rho \cdot V \cdot d_{i,T,P}}{\mu_m} \\ &= 19815461.0\end{aligned}$$

$$\mu_m = 11.6049 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}$$

4-4. 유량 보정계수 불확실도 계산

$$\begin{aligned}\epsilon_{CF} &= \left[\left\{ \frac{-0.510735 \cdot Re^{-0.237} \cdot (6.25 + 431 \cdot Re^{-0.237})^{-0.5}}{1 + 0.01 \cdot (6.25 + 431 \cdot Re^{-0.237})^{0.5}} \cdot \epsilon_{Re} \right\}^2 \right]^{0.5} \\ &= 5.5112489 \times 10^{-4} \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\epsilon_{Re} &= \left[\epsilon_{di}^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \cdot \frac{P}{\rho} \cdot \epsilon_P \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot \frac{T}{\rho} \cdot \epsilon_T \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\partial \mu}{\partial P} \cdot \frac{P}{\mu} \cdot \epsilon_P \right)^2 + \left(\frac{\partial \mu}{\partial T} \cdot \frac{T}{\mu} \cdot \epsilon_T \right)^2 \right]^{0.5} \\ &= 0.227 \%\end{aligned}$$

$$\text{여기서, } \rho_{FW} = 832.293 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mu = 11.6049 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}$$

$$P_{FW} = 10.01 \text{ MPa(abs)}$$

$$T_{FW} = 230.0 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\epsilon_{di} = 0.02868 \%$$

$$\epsilon_P = 0.50 \%$$

$$\epsilon_T = 0.20 \%$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial P} = 0.95 \frac{kg}{m^3 \cdot MPa}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial T} = -1.45514 \frac{kg}{m^3 \cdot K}$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial P} = 2.5816 \times 10^{-7} \frac{kg}{m \cdot s \cdot MPa}$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial T} = -5.3 \times 10^{-7} \frac{kg}{m \cdot s \cdot K}$$

4-5. 배관 중심에서의 송, 수신 초음파 전달각도 불확실도

식 (20)을 이용해 계산한 95% 신뢰도 구간에서의 초음파 전달각도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\epsilon_\theta &= \left[\left\{ \frac{d_o}{(1+w^2) \cdot L_{spacingdata} \cdot \tan^{-1}\left(\frac{d_o}{L_{spacingdata}}\right)} \cdot \epsilon_{do} \right\}^2 \right. \\ &\quad \left. + \left\{ \frac{d_o}{L_{spacingdata} \cdot (1+w^2) \cdot \tan^{-1}\left(\frac{d_o}{L_{spacingdata}}\right)} \cdot \epsilon_{L_{spacingdata}} \right\}^2 \right]^{0.5} \\ &= 0.1033 \%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \theta = u = \tan^{-1}\left(\frac{d_o}{L_{spacingdata}}\right) &= \tan^{-1}(w) = 58.8187 \text{ deg } ree = 1.02658 \text{ rad} \\ w = \frac{d_o}{L_{spacingdata}} &= 1.652412 \\ d_o = 0.507837 \text{ m} & \quad \varepsilon_{d_o} = 0.00985 \% \\ L_{spacingdata} = 0.30493 \text{ m} & \quad \varepsilon_{L_{spacingdata}} = 0.2835 \% \end{aligned}$$

4-6. 95% 신뢰도 구간에서의 초음파 전달속도 불확실도 계산 결과

식 (24)에 의해 산정한 95% 신뢰도 구간에서의 초음파 전달속도의 불확실도 계산결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \varepsilon_C &= \left[\left\{ \left(\frac{T_{FWdata}}{C} \right) \cdot \left(\frac{dC}{dT_{FWdata}} \right) \cdot \varepsilon_{T_{FWdata}} \right\}^2 + \varepsilon_{C(cal)}^2 \right]^{0.5} \\ &= 0.32888 \% \\ \frac{dC}{dT_{FWdata}} &= 0.4846966517 \times 10^1 - 0.9780945094 \times 10^{-1} \cdot T_{FWdata} \\ &\quad + 0.5528510778 \times 10^{-3} \cdot T_{FWdata}^2 - 1.859070442 \times 10^{-6} \cdot T_{FWdata}^3 \\ &\quad + 3.536088209 \times 10^{-9} \cdot T_{FWdata}^4 - 3.8569720788 \times 10^{-12} \cdot T_{FWdata}^5 \\ &= -3.60975 \frac{m}{s \cdot ^\circ C} \\ T_{FWdata} &= 230^\circ C \\ C &= 0.1402761253 \times 10^4 + 0.4846966517 \times 10^1 \cdot T_{FWdata} - 0.4890472547 \times 10^{-1} \cdot T_{FWdata}^2 \\ &\quad + 0.1842836926 \times 10^{-3} \cdot T_{FWdata}^3 - 0.4647676105 \times 10^{-6} \cdot T_{FWdata}^4 \\ &\quad + 0.7072176418 \times 10^{-9} \cdot T_{FWdata}^5 - 0.6428286798 \times 10^{-12} \cdot T_{FWdata}^6 \\ &= 1232.1 \frac{m}{s} \\ \varepsilon_{T_{FWdata}} &= 0.2 \% \\ \varepsilon_{C(cal)} &= 0.3 \% \end{aligned}$$

4-7. 주급수 유량측정의 합성 불확실도

4-1항부터 4-6까지에서 계산된 각 불확실도 요소별 계산결과 및 합성 불확실도는 표 3과 같다.

불확실도 요인	ε_{cf}	ε_A	ε_ρ	ε_{tx}	ε_L	ε_c	ε_θ	ε_{flow}
계산값	5×10^{-4}	0.073	0.08	0.2	0.284	0.329	0.103	0.52

표 3. 시간 전달차 초음파 유량계의 합성 불확실도 계산 결과

4-8. 표준 유량시험을 통한 계산된 불확실도의 검증

먼저 주급수 유량 측정용 시간 전달차법 초음파 유량계의 합성 불확실도 계산 결과의 타당성을 검증하기 위해 표준 유량시험장치의 유속을 0.57m/sec로부터 1.8m/sec까지 7단계로 나누어 오름차순과 내림차순으로 시험하고 그 결과를 기록하였다. 그림 2와 같이 표준 유량과 초음파 유량계의 보정전 계측 유량편차는 유속의 변화상태에서 최대 0.6%의 편차를 보여 4항에서 계산된 합성

불확실도가 정확함을 검증하였다. 아울러 계통오차를 보정한 후 유량 편차량을 산정한 결과 그림의 붉은 선과 같이 약 0.3%의 편차를 나타냈다.

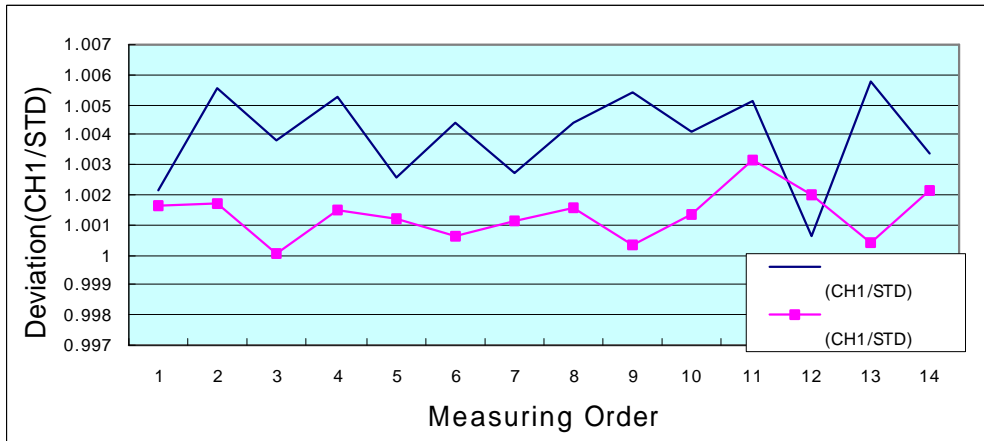


그림 2. 표준유량과 초음파 유량계의 계측 유량 편차

표 3의 합성 불확실도 산정시 사용된 초음파 유량계의 전달속도차 불확실도 0.2%를 검증하기 위해 10회의 시험 결과를 대상으로 재현도를 분석하여 표 4와 같이 약 0.186%의 오차를 가지고 있음을 확인하였다. 이 불확실도는 탐촉자의 전기적 불균일성과 초음파 유량계 신호처리장치의 불확실도를 모두 포함하는 것으로 판단된다.

표준 유량 (kg/hr)	측정 유량 (kg/hr)	편차 (측정 유량/표준 유량)	재현도 (%)
5684.567	5696.9381	1.002176225	0.1861225%
5694.371	5725.8434	1.005526985	-0.1489535%
5685.855	5707.582	1.003821219	0.0216231%
5682.185	5712.0922	1.005263398	-0.1225948%
5687.606	5702.2522	1.00257509	0.1462360%
5693.61	5718.7617	1.004417567	-0.0380117%
5687.154	5702.5109	1.002700279	0.1337171%
5683.105	5707.9781	1.004376727	-0.0339277%
5683.577	5714.1732	1.005383282	-0.1345832%
5690.18	5713.7012	1.004133701	-0.0096251%

표 4. 초음파 유량계 반복 시험시의 유량 재현도

탐촉자 설치 간격 변화에 따른 영향을 확인하기 위해 두쌍의 탐촉자를 동일 배관에 동일한 방법으로 설치하고 유량계 채널 1번과 2번에 각각 연결한 후 유량 계측값과 전달시간차 계산 결과의 변화를 확인하였다. 유량계에서 요구하는 탐촉자 설치간격은 236.3mm로 계산되었으나, 인위적으로 채널 1번 송, 수신 탐촉자 간격을 6.2% 더 벌어지게 하여 두 채널간의 유량 계측값을 비교한 결과 설치 간격에 의한 유량 편차는 그림 3과 같이 최대 1.1%인 것으로 측정 되었다. 이는 신호가 수신되는 최대 이격 한계이므로 실제 유량계 설치 조건과 절차서에 따라 유량 측정을 수행할 경우 이론적 계산 결과인 약 0.3% 이내의 불확실도를 충분히 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

설치간격 편차를 6.2%으로 하여 초음파 전달속도 편차를 측정된 결과 그림 4에서와 같이 유량 편차율과 거의 같은 약 1.2%로 측정되어 4-6항의 계산 결과가 보수적임을 검증하였다.

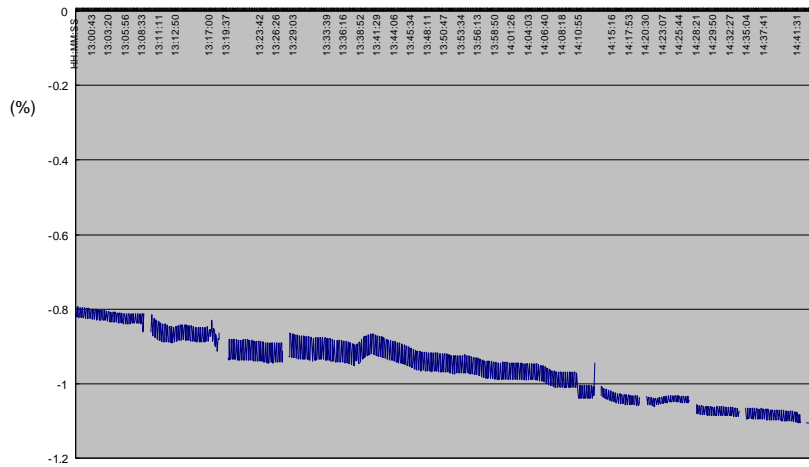


그림 3. 채널 1번과 채널 2번의 측정 유량 편차율
(주: 채널 1번은 236.3mm로 고정 및 채널 2번은 251mm 까지 가변 하면서 유량 측정)

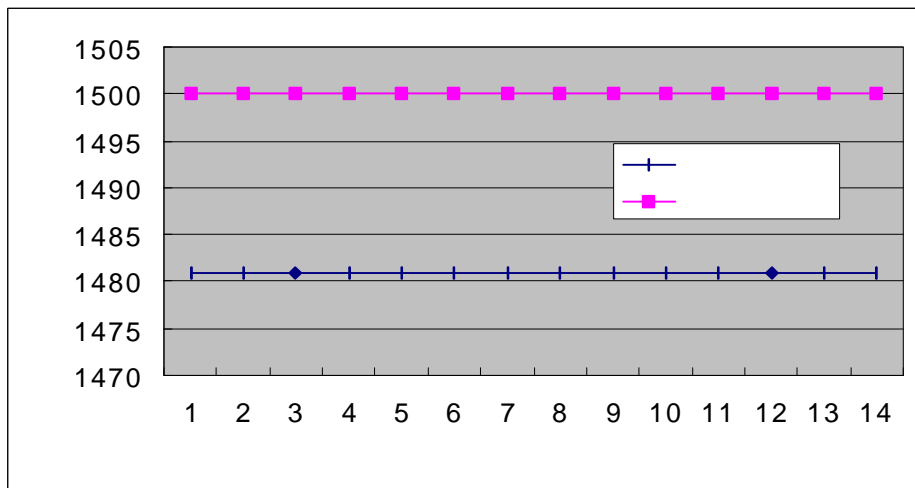


그림 4. 탐촉자 설치간격 변경전 및 변경후 초음파 전달속도의 변화추이

5. 결론 및 향후 연구 계획

원전의 주급수 유량을 정확하게 측정하기 위해, 현재 상용화되어 있는 시간 전달차법 유량계의 불확실도 요소를 이론적으로 분석하여 계산 공식을 작성하고 원전 주급수 측정 자료를 이용한 계산결과를 표준 유량 시험 결과와 비교하여 검증하였다.

계측유량은 유속의 변화상태에서도 최대 0.6%의 오차를 보여 산정된 합성 불확실도가 정확함을 검증하였다.

표 3의 합성 불확실도 산정시 사용된 초음파 유량계의 전달 속도차 불확실도 0.2%를 검증하기 위해 10회의 시험 결과를 대상으로 재현도를 분석하여 표 4와 같이 약 0.186%의 오차를 가지고 있음을 확인하였다. 이는 탐촉자의 전기적 불균일성과 초음파 유량계 신호처리장치의 불확실도에 따른 것으로 보인다.

탐촉자 송, 수신부간 간격 변화에 의한 불확실도를 평가하기 위해 송, 수신 탐촉자 간격을 6.2%

더 벌어지게 하여 두 채널간의 유량 계측값을 비교한 결과 최대 1.1%의 유량편차를 갖는 것으로 측정 되었다. 이는 신호가 수신되는 최대 이격 한계이므로 실제 유량계 설치 조건과 절차서에 따라 유량 측정을 수행할 경우 이론적 계산 결과인 약 0.3% 이내의 불확실도를 충분히 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 설치간격 편차를 6.2%로 하여 초음파 전달속도 편차를 측정한 결과 유량 편차율과 거의 같은 약 1.2%로 측정되어 계산 결과가 보수적임을 검증하였다. 유량 보정계수의 계산 불확실도를 평가한 결과 매우 낮은 수치를 얻을 수 있었으며 이는 유량 보정계수가 레이놀드 수의 함수로서 유속 측정의 정확도에 직접적으로 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다.

금년은 가동원전 엔지니어링 서비스 기술개발 과제의 3차 년도로서, 주로 원전의 주급수 조건인 압력 1000psi, 온도 220℃의 조건과 최대 유속 10%에서 정확도를 유지할 수 있는 초음파 유량계 개발에 연구의 목표를 맞춰 수행할 예정이다.

참고자료

1. 정재천외, “원전용 초음파 유량계의 측정 불확실도 감소 및 유량계산 최적화”, 한국원자력학회, 2000 추계학술발표회
2. Westinghouse CENP, “Venturi Performance,” YNA/HS-000078, June. 2000
3. 일본 계량기기 공업연합회, “유량계측 A to Z,” pp 124-131
4. Frank M. White, “Viscous Fluid Flow,” Mc-Graw Hill Inc., New York, 1974, pp. 484.
5. 한국측정기기교정협회, “계량 및 측정에 관한 법령집”
6. 표준과학연구원, “Development of a mobile flow proving system”, KSRI-86-36-IR, KSRI-87-42-IR, KSRI, 1987
7. ISO, “Measurement of fluid flow Estimation of uncertainty of a flow rate measurement”, ISO 5168
8. 한국측정기기교정협회, “초음파 유량계의 표준 교정절차”, KASTO 98-10-307-191
9. 지대성, “초음파 유량계의 불확실도 계산 자문 보고서“, 2000. 9,

알리는 글

본 논문은 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구결과입니다.