

원전용 초음파 유량계의 측정 불확실도 감소 및 유량 계산 최적화

Ultrasonic Flow Measurement System for NPPs by Optimum Flow Rate Calculation
and Uncertainty Improvement

정재천, 장우현, 장훈선, 김항배
한국전력기술주식회사

김승태, 박문호, 박기성
한전기공주식회사

지대성
(주)기연 컨설팅

요 약

원전의 주급수 유량과다 측정 현상 및 원인에 대해 소개하고 초음파 유량계를 이용하여 이를 보정하는 일반적인 방법에 대해 기술하였다. 상용화된 상관관계법 유량계, 시간 전달차법 유량계의 불확실도원을 평가하고 각 방식의 장단점에 대하여도 비교 및 분석하였다. 또한 유량 보정계수, 송수신 탐촉자의 설치 위치에 따른 오차, 그리고 유체의 밀도 변화 등에 따른 불확실도와 유량계산에 미치는 영향을 평가 및 분석하였다. 분석한 내용을 표준유량시험장치를 이용하여 보정 및 확인한 결과를 기술하고 측정 불확실도를 향상시키는 방안과 유량계산의 최적화를 이루는 방안에 대하여 기술하였다.

Abstract

Optimum flow rate calculation and uncertainty improvement methodologies using Ultrasonic Flow Measurement Systems (UFMS) for NPPs are developed in this work. Recently, ultrasonic flow measurement technologies have become better means to replace older ones. We focused on the major factors to increase the overall uncertainty for flow calculation. Those are, velocity profile correction factor, diameter measurement of pipe inside diameter, spacing between transducers and the density of fluid. For improvement of velocity profile correction factor, both Prandtl formula and actual fluid test are proposed. To determine the uncertainty of spacing between transducers, an experiment was done to get the maximum error of spacing due to misalignment of transmitting and receiving transducers. The experiment using standard fluid system having uncertainty of $\pm 0.2\%$ is used to find out the overall uncertainty of the new method and the results show a good agreement with the predicted calculations.

1. 서 론

국내외 원전에서 주급수 유량 과평가 현상을 자주 경험하고 있으며 이는 유량 측정에 사용되는 Venturi형 유량계의 목 부분이나 도압관 입구부위에 이물질이 침적하는 등의 원인에 의한 것으로 분석되고 있다. [1] 주급수의 과평가는 이차측 열출력 과평가를 수반하므로 궁극적으로는

전기출력 손실을 가져온다. 이러한 유량 과평가에 의한 전기출력 감소현상을 줄이기 위해 운전중인 원전에 초음파 유량계를 이용하여 주급수 유량 등의 별도의 측정계기를 독립적으로 측정하고 Venturi에 의해 측정된 유량과의 편차를 보정하는 방법이 개발되어 사용되고 있다.

초음파 유량계를 이용한 Venturi 유량상수 보정은 이물질 침적 등의 경년 열화 가능성이 상대적으로 적은 유량계측장치를 이용하여 지속적인 교정을 전제로 하여 발전소에 적용하는 것이 통례이며 특히 원전 주급수 유량상수 변경에 반영하기 위해서는 유량 과평가 현상이 급격한 출력변동 등에 의해 완화되어 오히려 출력의 일시적 과다현상이 발생하는 Defouling Event에 대해서도 분석을 실시하고 여유도를 확보하여야 한다. [1]

본 논문의 제 2장에서는 원전의 주급수 유량과다 측정 현상 및 원인에 대해 소개하고 초음파 유량계를 이용하여 이를 보정 하는 일반적인 방법에 대해 기술하였다.

제 3장에서는 상관관계법 유량계, 시간 전달차법 유량계의 불확실도원을 평가하고 각 방식의 장단점에 대하여도 비교 및 분석하였다. 또한 유량 보정계수, 송수신 탐촉자의 설치 위치에 따른 오차, 그리고 유체의 밀도 변화 등에 따른 불확실도와 유량계산에 미치는 영향을 평가하였다.

제 4장에서는 제3장에서 분석한 내용을 표준유량시험장치를 이용하여 보정 및 확인한 결과를 기술하고 측정 불확실도를 향상시키는 방안과 유량계산의 최적화를 이루는 방안에 대하여 기술하였다.

2. 원전 주급수 유량과다 측정 현상 및 원인

미국 Palo Verde 원전 Unit 1-3에서는 Venturi 유량계의 이물질 침적 징후가 발견되었으며 주급수 유량의 과다 계산으로 약 35Mw의 전기출력 저하를 경험하였다. 이러한 유량 과다 계산은 Venturi형 유량계를 사용하는 원전에서 주로 나타나고 있으며 원자로 노형과는 무관하게 보고되고 있다.

종래의 경우, 유량과다 현상을 제거하기 위해 Venturi의 주기적 세정과 같은 소극적 대책을 사용하여 왔으나 세정 6개월 이내에 출력 저하현상을 경험하고 있으며 심한 경우 3개월 이내에도 출력이 저하된 사례도 보고되었다. 주 침적 이물질은 산화철등의 성분으로 구성되어 있으며 Venturi 목 부위에 침적되는 것으로 알려져 있다. [2]

미국 MacGuire 원전의 경우, 복수계통의 화학처리 방식을 alternative amine 방식으로 변경한 결과 이물질 침적 징후가 제거됨을 보고하였고,[3] 이차 주급수 계통의 튜브재질을 기존의 구리합금에서 스테인레스 재질로 교체한 경우도 있었다.

Venturi 이물질 침적의 원인 및 메카니즘은 아직 구체적으로 밝혀진 바가 없으며 실제 유량 과측정에 비례하여 Venturi의 목부위 내경이 좁아지지 않는 경우도 많으므로 이에 대한 정밀한 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다. 참고로 발전소 출력 저하에 대처하기 위해 각 원전에서는 유량 계산을 위한 신규 프로그램을 개발하면서 주급수 유량의 이물질 침적 factor의 96시간 연속 평균값을 적용 (Oconee 원전)하기도 하고 각 입력변수, 설정치, 민감도 및 각종 가정에 대한 재검토 실시 (Surry 원전) 하는 등의 대책을 수립, 시행하고 있다. [3],[4]

초음파 유량계를 이용하는 방법으로는 기존의 주급수 유량계측용 Venturi 설치 Upstream에 별도의 유량계를 설치하고 열출력 계산 프로그램에 Venturi의 계측 유량과 초음파 유량계 계측 유량의 비를 곱하여 보정하는 루틴을 포함시켜 사용하는 방법이나 이는 기존의 유량 측정계열의 불확실도(약 1.5%)를 포함하여야 하므로 0.5%급의 초음파 유량계를 사용하여 보정하더라도 통상적인 열출력 계산 불확실도 2%를 저감시킬 수 없는 단점이 있었다.

최근 CENP에서는 특정한 원전의 운전조건 (배관 직경등)과 Reynolds Number하에서 유량 보정계수를 최적화하여 0.5%의 불확실도를 갖는 초음파 유량계를 개발하였으며 이를 이용하여 원전의 출력을 1% 상승시키는 기술도 개발하고 있다. [5]

3. 초음파 유량계의 불확실도 근원 평가

3-1 상관관계 초음파 유량계의 원리 및 불확실도 근원

본 유량계의 기본원리는 파이프 외벽에 일정거리 L을 두고 부착한 두 개의 초음파 센서를 이용하여 유체와 같은 속도로 이동하는 입자, 기포 또는 난류에 의한 교란신호를 감지하여 식(1)에 의해 상관 (cross correlate) 시킨다.

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t+\tau)dt \quad (1)$$

여기서, x(t) : 상류측 유동신호, y(t) : 하류측 유동신호

τ : 초음파의 전달시간

유체의 평균 유속(V)는 식 (2)과 같이 구할 수 있다. 여기서 L은 상류측 초음파 탐촉자와 하류측 탐촉자와의 거리이다.

$$\bar{V}_{cross} = \frac{L}{\tau} \quad (2)$$

따라서 유동량은 식 (3)에 의해 결정된다.

$$Q = C_0 \cdot \bar{V}_{cross} \cdot A = C_0 \cdot \bar{V}_{cross} \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \quad (3)$$

여기서, D : 유동관의 내경 C_0 : 유속분포 보정계수

상관관계법 초음파 유량계의 합성 불확실도 구성 인자는 식 (4)와 같다. [6]

$$\epsilon_{WFW} = [\epsilon_{Cf}^2 + (2 \cdot \epsilon_{d,i,T,P})^2 + \epsilon_{Lspacingdata}^2 + \epsilon_{txflow}^2 + \epsilon_{\rho FW}^2 + \epsilon_{inst}]^{0.5} \quad (4)$$

여기서, ϵ_{Cf} = 유량보정계수의 불확실도

$\epsilon_{d,i,T,P}$ = 배관내경의 합성 불확실도

$\epsilon_{\rho FW}$ = 주급수밀도의 불확실도

$\epsilon_{Lspacingdata}$ = 송, 수신 탐촉자간 거리 불확실도

ϵ_{inst} = 유량계 교정 불확실도

ϵ_{txflow} = 초음파 전달 시간 불확실도

상기의 합성 불확실도 구성 인자중 유량보정 계수의 불확실도, 교정 불확실도 및 송, 수신 탐촉자간 거리 불확실도가 유량의 합성 불확실도 근원에 가장 영향을 주는 것으로 발표되고 있다. [6]

3-2 Leading Wedge Type 초음파 유량계

본 유량계는 시간 전달차 원리를 이용한 유량계의 일종으로서 배관의 중간에 4쌍의 송, 수신 탐촉자를 설치한 Spool Piece 형태의 Pipe Section을 삽입하여 유량을 측정하는 방식을 특징으로 한다.

4쌍의 초음파 탐촉자가 배관의 각 부분의 유속을 정확하게 측정하므로 정밀한 유량 측정이 가능하다.

유량은 체적 유량으로서 4쌍의 초음파 탐촉자로부터 측정된 유량값을 Gaussian Quadrature법에 의해 직접 적분함으로써 구하게 된다.

배관을 흐르는 부피유량 Q는 식(5)과 같이 구할 수 있다.

$$Q = \int_0^r V(r) \cdot 2\pi r dr \quad (5)$$

여기서, V(r) : 배관 반경 r에서의 유속

r : 배관 중앙으로부터 거리

Gaussian Quadrature 방법은 “Normalized ”구간 $[-1, 1]$ 에서 n 개의 Sample Point $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ $[-1, 1]$ 와 n 개의 상응하는 Weighting $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$ 을 구하여 Discrete한 몇 개 Point의 함수 값을 알고 있을 때 근사적으로 연속함수의 전 적분구간의 적분값을 식 (6)와 같이 구하는 방법이다.

$$\int_{-1}^{+1} f(x)dx \approx W_1 f(x_1) + W_2 f(x_2) + W_3 f(x_3) + W_4 f(x_4) \quad (6)$$

본 방식의 고유한 정확도는 먼저 다음과 같은 Sample Point와 Weighting구간에 탐촉자가 정확히 위치하는가를 검증하는 것이다. 수치적분에 의한 결과는 표 1과 같다.

표 1. Gaussian Quadrature 수치적분법에 의하여 구해진 Sample Point와 Weighting [7]

Sample Point X_k	Weighting W_k
± 0.8611363116	0.3478548451
± 0.3399810436	0.6521451549

본 방식은 전술한 바와 같이 탐촉자 위치 유량 보정 계수의 불확실도가 상대적으로 작아 무시할 수 있는 장점이 있으며 탐촉자간 거리 불확실도도 상관 관계법 유량계, 시간전달차 유량계의 경우와 거의 같아 이론적 정확도는 더욱 커지는 것으로 보인다. 그러나 배관내에 초음파 탐촉자를 삽입하는 방식이므로 탐촉자의 임피던스 정합층 마모 및 이물질 침적으로 인한 시간 지연 불확실도가 발생하고 Weighting Factor의 불확실도가 추가적으로 발생하므로 타 방식의 초음파 유량계와의 불확실도 비교는 어렵다.

3-3. 시간 전달차법 초음파 유량계

유체내 초음파펄스의 전파경로의 길이를 L , 유체내 고유음속을 C 라하면 검출기 P_u 와 P_d 와의 사이를 왕래하는 초음파펄스의 음속 C_o 는 유속 V 의 영향을 받아 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_o = C \pm V \cos \theta \quad (7)$$

2개의 전파시간차 Δt 를 구하면 식(8)과 같다.

$$\Delta t = t_u L - t_d L = \frac{2L - V \cos \theta}{C^2 - V^2 \cos^2 \theta} \quad (8)$$

여기서, $t_d L$ = 초음파펄스의 순방향 ($P_u \rightarrow P_d$) 전파시간

$t_u L$ = 초음파 펄스의 역방향 ($P_d \leftarrow P_u$) 전파시간

측정유속 V 는 식(9)과 같이 초음파펄스의 전파시간차 Δt 에 비례하는 함수로 표현할 수 있다.

$$V = \frac{C^2}{2L \cdot \cos \theta} \cdot \Delta t \quad (9)$$

따라서 식(10)에서 보여주는 바와 같이 측정유속에서 평균유속으로 환산하기 위해서는 유량보정계수와 관로의 단면적을 계산하면 유량을 구할 수 있다.

시간 전달차법 초음파 유량계의 합성불확실도는 식(10)과 같은 요인으로 구성되어 있다.

$$\epsilon_W = [\epsilon_{Cf}^2 + \epsilon_{d.i.T.P}^2 + \epsilon_\rho^2 + \epsilon_{tx}^2 + \epsilon_L^2 + \epsilon_C^2 + \epsilon_\theta^2]^{0.5} \quad (10)$$

여기서, ϵ_W : 주급수 유량측정 합성 불확실도

ϵ_{Cf} : flow profile correction factor에 의한 불확실도

$\epsilon_{d.i.T.P}$: 배관의 단면적 불확실도

ϵ_ρ : 주급수 밀도 불확실도

ϵ_{tx} : 초음파 전달시간 불확실도

ϵ_L : 송, 수신용 탐촉자 설치위치 불확실도

ϵ_C : 물에서의 초음파 속도 불확실도

ϵ_θ : 송, 수신 탐촉자 설치각도 불확실도

3-4 유량 보정 계수 불확실도

원전 주급수의 유속은 진출력 운전시 약 21ft/sec에 이고, Reynolds Number(Re)는 10^7 이상이다. (표준원전 기준) 따라서 Velocity Profile중 유체의 진행방향과 수직되는 성분은 변하지 않는다고 가정한다.

파이프의 반경을 a 라 하고 Longitudinal 및 Radial Coordinate을 (x, r) 이라 하면 Wall Coordinate y 는 식 (11)과 같이 정의된다.

$$y = a - r \quad (11)$$

따라서 pipe를 흐르는 평균유속은 r 과 y 의 term으로 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.

$$u_{av} = \frac{1}{\pi a^2} \int_0^a 2\pi r u dr = \frac{2}{a} \int_0^a u dy - \frac{2}{a^2} \int_0^a u y dy \quad (12)$$

$$\text{여기서, } a^+ = a \frac{v^*}{\nu}$$

위식에서 구한 a^+ 와 Reynolds number를 이용하여 표면 마찰계수 Λ 를 구하면 식 (13)과 같다.

$$\Lambda = \frac{8v^{*2}}{u_{av}^2} = \frac{32a^{+2}}{Re_{a^+}} \quad (13)$$

식 (13)을 Prandtl Formula라고 하며 일반적으로 식 (14)와 같이 friction velocity Term으로 나타내기도 한다. [8]

$$\frac{1}{\sqrt{8 \cdot v^*}} = 2.0 \cdot \log(Re \cdot \sqrt{8 \cdot v^*}) - 0.8 \quad (14)$$

상용 초음파 유량계의 경우 레이놀즈수 Re_D 의 함수로 유량보정계수 k 를 식(15)-(17)과 같이 구하여 사용한다. [9]

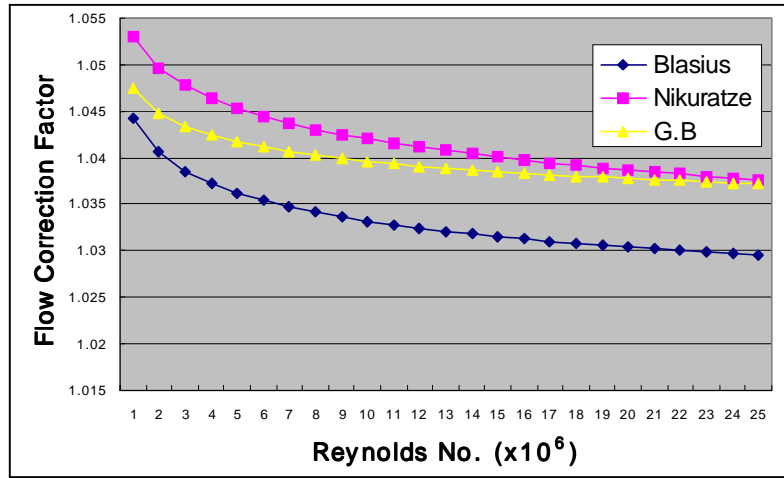
$$k = 1 + 0.2488 Re_D^{-1/8} \quad (3 \times 10^3 \leq Re_D \leq 10^6) \quad (15)$$

$$k = 1 + 0.01 (6.25 + 431 Re_D^{-0.237})^{1/2} \quad (3 \times 10^3 \leq Re_D \leq 10^6) \quad (16)$$

$$k = 1.119 - 0.011 \log Re_D \quad (3 \times 10^3 \leq Re_D \leq 5 \times 10^6) \quad (17)$$

상기 식 (15)에서 식(17) 까지를 이용하여 유량 보정계수를 레이놀드 번호에 따라 구하고 Plot 하면 그림 1과 같은 결과를 얻을 수 있다.

그림 1. 레이놀즈 번호 증가에 따른 유량보정 계수 변화 곡선



위의 세 식을 이용한 보정계수 차이, 즉 (15)과 (16) 사이에는 최소 0.25 %, 최대 0.8 %, (1)과 (3) 사이에는 최소 0.8 %, 최대 0.85 %, (16)와 (17) 사이에는 최소 0.04 %, 최대 0.5 % 정도의 차이가 있다. 또한 식 (15), (16), (17) 중에서 어느 식이 가장 정확한가는 여기에서 판단할 수는 없으나, 발표연대가 가장 이른 식 (15)보다는 발표 연대가 늦은 식 (16) 또는 식 (17)이 더 정확할 것으로 판단된다. 또한 식 (16)와 식 (17) 중에서는 어느 식이 더 정확한 가는 판단하기가 어렵다.

NRC Information Notice 95-01에 대해 RPC는 Flow Profile Correction Factor를 구하는데 있어 상기의 이론적 공식을 측정 대상 배관 직경과 유체의 속도에 대한 고려 없이 사용할 경우 최대 6%의 차이가 발생할 수 있다는 의견을 제시하고 있다. [10]

따라서 Reynolds Number에 따른 이론적인 보정계수에 배관의 직경과 유속의 영향을 고려하여 최종적인 보정계수를 적용하는 것이 필요하다. RPC의 경우에도 중수로의 feeder pipe에 흐르는 유량을 정확하게 측정하기 위하여 측정 대상 배관과 동일한 NRC Loop 에서 사전에 유량계 교정을 실시하고 Feeder 직경에 따라 1%~4%의 추가적인 보정계수를 적용한 사례가 있다.

AMAG의 경우에도 상관관계법 유량계의 유량 보정계수 적용을 위해 Alden Lab에서 실제 원전 주급수 배관의 직경과 같은 배관을 사용하여 원전 주급수 계통 모델을 만들고 이를 이용하여 초음파 유량계의 보정을 수행하였다. [11]

CENP의 상관관계법 초음파 유량계에서 사용하는 Friction Velocity 식과 Fully Developed Flow Profile Correction Factor는 식 (19)와 같다. [6]

$$v^* = \left[\frac{0.0032 + 0.221 \cdot Re^{-0.237}}{8} \right]^{0.5} \quad (18)$$

$$C_0 = \frac{1}{0.9859 + 2.4431 \cdot v^*} \quad (19)$$

표 2. 상관관계법 유량계에 사용된 formula와 시간차법 유량계에 사용된 Prantl Formula를 이용하여 계산한 Friction Velocity

상관관계법의 Friction Velocity, v^*	Prantl Formula의 Friction Velocity, v^*	%편차
0.030258664	0.030328446	0.016 %.

시간전달차법의 Friction Velocity와 상관관계법의 Friction Velocity를 식 (14)와 식 (18)를 이용하여 주급수의 Reynolds Number가 19,740,628시에 각각 계산한 결과는 표 2과 같이 거의 같음을 알 수 있었다.

두 계산 결과를 이용하여 유량 보정계수를 구하면 표 3과 같은 차이를 얻게 된다. 단, 보정계수의 계산시 Prantl Formula의 Friction Velocity와 Nikuratz에 유량보정계수 산정에 사용된 Friction Velocity는 거의 차이가 없다고 가정하였다.

표 3. CENP 경험식과 Nikuratz에 의한 유량보정계수

CENP 경험식에 의한 유량보정계수	Nikuratz에 의한 유량보정계수	%편차
0.943552	0.962694	2.03%

이와 같은 결과를 가지고 원전 주급수 유량을 시간차법과 상관관계법 초음파 유량계를 비교 시험한 결과를 표 3에 나타내었다.

표 4. 시간차법과 상관관계법 초음파 유량계의 유량측정 시험 결과

계산내용	상관관계법 측정자료	시간차법 측정자료	%편차
계산치 (Ton/Hr)	2794.08	2735.54	2.14%

표 4의 결과는 표2의 유량 보정계수 편차가 재현되고 있어 정밀한 유량계의 제작을 위해 가장 중요한 요소가 유량 보정계수의 최적화임을 잘 보여주고 있다.

배관 내경의 불확실도는 식(20)의 요인들을 가진다.

$$d'_{i,T,P} = d_{0[t_x-t_{x+180}]} + \Delta d_{i,T} + \Delta d_{i,P} \quad (20)$$

여기서, $d_{0[t_x-t_{x+180}]}$ = 배관의 수직방향 직경

$\Delta d_{i,t}$ = 온도의 영향에 의한 배관 내경의 변화량

$\Delta d_{i,P}$ = 압력의 영향에 의한 배관 내경의 변화량

송,수신 탐촉자의 설치 위치 차이에 기인한 불확실도는 식 (21)와 같다.

$$\epsilon_{L,spacingdata} = [\epsilon_{L,spacingmeas}^2 + \epsilon_{L,transducer}^2 + \epsilon_{probe}^2] \quad (21)$$

여기서, $\epsilon_{L,spacingmeas}$ = 탐촉자간 거리 측정시의 통계학적 불확실도

$\epsilon_{L,transducer}$ = 탐촉자 거리 측정장치의 불확실도

$\epsilon_{L,probe}$ = 탐촉자의 제작 불확실도

3-5 상관관계법 초음파 유량계와 시간전달차법 초음파 유량계의 불확실도 비교

위에서 고찰한 내용을 근거로 상관관계법과 시간 전달차법 초음파 유량계의 불확실도를 분석한

결과를 표 5에 나타내었다. 분석은 표준원전 주급수 계통 자료와 측정 자료를 가지고 수행하였다.

표 5. 상관관계법과 시간전달차법의 초음파 유량계 불확실도 분석 결과

불확실도 요인	ϵ_{cf}	$\epsilon_{d,i,T,P}$	ϵ_{ρ}	ϵ_{tx}	ϵ_L	ϵ_c	ϵ_{θ}	ϵ_{flow}
상관관계법	0.25	0.084	0.132	0.185	0.182	0	0	0.42
시간전달차법	5×10^{-4}	0.073	0.08	0.2	0.284	0.329	0.103	0.52

위 표 5의 결과와 같이 상관관계법은 초음파 전달시간 불확실도와 물에서의 초음파 속도 불확실도, 그리고 직접 접촉식으로 탐촉자를 배관에 부착하므로 송, 수신 탐촉자 설치각도 불확실도가 거의 없는 것으로 분석되었다. 반면에 시간 전달차법은 유량 보정계수가 상대적으로 낮은 것으로 나타났으며 이는 유량 보정계수의 적용에 따른 차이로 판단된다.

4. 표준유량 시험장치를 이용한 측정 불확실도 보정 및 확인

초음파 유량계의 측정 오차를 산정하는 방법중의 하나로 여러번의 측정값을 통계적 방법으로 평가하는 방법으로서 측정값의 표준편차와 시험 표준편차를 각각 구하여 합성 제곱근에 의해 결정하게 된다.

초음파 유량계의 정확도를 산정하기 위해 사용하는 불확실도 평가는 계기의 유량 측정시 발생시킬 수 있는 모든 오차를 불확실도로 나타나게 되므로 불확실도란 측정값이 참값에서 벗어날 수 있는 최대 범위라고 정의할 수 있다.

불확실도 측정 항목중 대표적인 것은 최대 허용 오차를 알고 있는 표준 유량 장치를 이용하여 반복적으로 실험을 수행한 후 평균값과 평균 실험분산(S^2), 실험표준편차(S)를 구하여 측정 평균값이 기대값에 얼마나 잘 추정하는가를 정량적으로 평가한다.

초음파 유량계를 이용한 주급수 유량측정은 3장에서 고찰한 바와 같이 계측기의 불확실도를 저감하는 연구가 가장 중요하며 이를 위해서는 원전의 프로세스와 동일한 조건에서 시험이 이루어져야 하나, 국내 여건상 불가능하므로 유속과 부착되는 배관의 직경을 축소시켜 약 0.2%의 측정 오차를 가진 표준유량장치에서 시험을 반복하여 수행하였다.

4-1. 시험 장치의 구성 및 유량 측정

표준유량장치는 먼저 저수조의 물을 펌프를 이용하여 흡입한 뒤 압력이 걸린 Boost Tank에 의해 정유량 토출 상태로 만든다. 토출된 유량은 충분한 상류측, 하류측 직선배관을 유지시켜 유속의 분포를 잘 발달된 난류의 상태로 만든다.

측정이 개시되면 저수조로 우회되던 유체는 Divert를 이용하여 무게를 측정할 수 있는 Weight Tank로 흐르게 하고 동시에 탱크의 무게 변화 시간 변화를 정밀하게 측정하게 된다.

시험에 사용된 기기와 측정 조건은 다음과 같다.

먼저 측정에 사용되는 초음파의 주파수가 측정의 정확도에 미치는 영향을 분석하기 위해 1Mhz, 2Mhz의 중심 주파수를 가진 탐촉자를 각각 10인치 직경의 스테인레스 스틸 배관에 설치하였다. 측정에 사용된 초음파 유량계는 시간 전달차법의 측정원리를 사용하는 Panametrics사의 DF868 유량계를 사용하였다. 탐촉자는 송, 수신 탐촉자간 거리를 정확히 측정하기 위해 Slide Track을 가진 Universal Clamping Fixture를 이용하여 배관 외면에 부착하는 방식을 사용하였다.

유량의 측정을 위해 유체의 흐름을 1회에 측정하는 1 Traverse 방법과 유체의 흐름을 2회에 걸쳐 측정하는 2 Traverse 법을 사용하여 정확도를 비교하였다.

그림 2. 표준 유량 시험장치의 구성

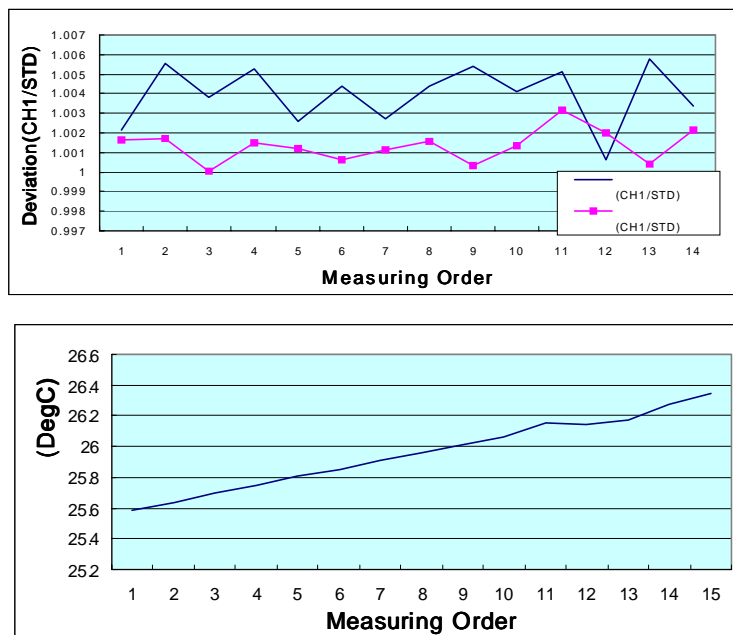


그림 2. 표준 유량 시험장치의 구성



4-2 결과 분석

그림 3. 급수의 온도 보정이 초음파 유량계측의 정확도에 미치는 영향



표준유량 시험장치시 탐촉자 송, 수신부간 간격 변화에 의한 최대 발생오차를 산정하기 위해 탐촉자간 간격을 정상 설치시 간격인 236.3mm 에서 251 mm 로 늘렸을 경우를 비교한 결과, 실제 탐촉자 설치간격이 6.2% 증가된 경우 유량 측정치 오차는 약 1.21%로 측정되었다.

유체의 속도가 측정 정확도에 미치는 영향을 분석한 결과 1.795 m/s의 속도에서 15회 측정값의 Repeatability는 $\pm 0.1861\%$ 인 반면 유속을 0.965 m/s 부터 1.8m/s 의 유속에서 Repeatability는 $\pm 0.317\%$ 로서 측정의 정확도가 떨어지는 것으로 확인되었다.

송, 수신 초음파 경로에 따른 오차를 비교하기 위하여 channel 1은 2 Traverse로 하여 유속을 측정하는 초음파 경로를 2배가 되게 하고 Channel 2는 1 Traverse로 하여 비교한 결과, 유량 측정치 오차는 약 0.22% (channel 2 > channel 1)가 발생하여 초음파의 전달경로가 길수록 정확도가 향상됨을 확인하였다.

그림 3에서는 급수의 온도보정이 초음파 유량계측의 정확도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 60

초 주기를 갖는 유량 시험을 15회에 걸쳐 수행하였다. 매 측정 차수마다 유량계는 온도에 따른 밀도 보정 프로그램을 가동하였으므로 온도의 상승과 측정 오차의 증가와는 상관 관계가 없음을 실험을 통하여 확인하였다.

5. 결론 및 향후 연구 계획

원전의 주급수 유량과다 측정 현상을 감소시키기 위하여 현재 국외 원전에 사용되고 있는 상관관계법 유량계와 시간 전달차법 유량계의 불확실도 근원을 평가하고 각 방식의 장단점에 대하여도 비교, 분석을 수행하였다. 먼저 시간전달차법의 Friction Velocity와 상호관계법의 Friction Velocity를 주급수의 Reynolds Number가 실제 원전의 주급수 조건과 동일한 19,740,628시에 각각 계산한 결과는 거의 같음을 알 수 있었다. 단, 원전 주급수 측정을 위해 개발된 상관관계법 유량계의 경우, 유량보정계수 산정시 사용되는 공식이 상용 시간차법 유량계의 사용식과 상이하며, 또한 비교 계산된 두 방식의 유량계 보정계수의 편차량이 실제 유량 측정 결과에서도 발생하고 있으므로 유량보정계수의 최적화가 가장 중요한 요소로 분석되었다.

상관관계법과 시간전달차법의 초음파 유량계 불확실도 분석 결과 상관관계법은 초음파 전달시간 불확실도와 물에서의 초음파 속도 불확실도, 그리고 직접 접촉식으로 탐촉자를 배관에 부착하므로 송, 수신 탐촉자 설치각도 불확실도가 거의 없는 것으로 분석되었다. 반면에 시간 전달차법은 유량 보정계수가 상대적으로 낮은 것으로 나타났으며 이는 유량 보정계수의 적용에 따른 차이로 판단된다.

탐촉자 송, 수신부간 간격 변화에 의한 최대 발생오차는 탐촉자 설치간격이 6.2% 증가된 경우를 측정된 결과, 유량 측정치 오차는 약 1.21%로 나타났다.

유체의 속도가 측정 정확도에 미치는 영향을 분석한 결과 유속의 변동이 없을 경우의 Repeativity는 $\pm 0.1861\%$ 인 반면 유속이 급격히 변화하는 환경에서의 유속측정 Repeativity는 $\pm 0.317\%$ 로서 측정의 정확도가 떨어지는 것으로 확인되었다.

1 Traverse와 2 Traverse의 초음파의 전달경로를 갖는 유량 측정조건에서는 전달경로가 길수록 정확도가 향상됨을 확인하였으며 원전에서의 측정도 2 Traverse로 하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

급수의 온도보정이 초음파 유량계측의 정확도에 미치는 영향을 분석한 결과, 유량계 자체의 온도에 따른 밀도 보정이 적절함을 확인하였다.

본 시험은 상온의 유체(온도 23℃)에서 수행한 결과로서 원전의 주급수 조건인 1000PSI, 220℃의 조건과 유속 10% 에는 미치지 못하며 정확한 결과를 얻기 위해서는 합성 불확실도를 다음의 인자들을 고려하여 향후 연구시 반영 할 예정이다.

- 온도, 압력에 대한 초음파 전달속도 차이 보정
- 유체의 압력에 의한 밀도차이, 비체적 차이 고려
- 실험대상 관경과 실제 주급수 관경의 영향 분석
- 배관의 조도 변화에 따른 유량 측정 불확실도 변화 분석

참고자료

1. C.S Sullivan, "Feedwater Flow Fouling Study," EPRI Nuclear Plant Performance Improvement Seminar, Sep. 1996
2. D.Augenstein et al., "Correction of Dynamic Venturi Fouling at Watts Bar NPP using External Leading Edge Flow Meter," Caldon Inc.
3. INPO Information, "Feedwater and Condensate System Engineering Working Meeting Summary," MA-1111, Feb. 1997, MA-1053, May. 1996

4. INPO Information, "Power Reactor Engineering Meeting," MA-1081, Oct. 1996.
5. Nuclear Regulation Commission, "Safety Evaluation by the Office of Nuclear Reactor Regulation, ABB Combustion Engineering Nuclear Power Topical Report CENP-397-P, Rev.01"
6. ABB-CE, " CrossFlow-Ultrasonic Flowmeter," Presentation for KOPEC NSSS, Sep. 1999
7. 고리 제1발전소 기술부, "초음파 유량측정 설비를 이용한 급수 유량 측정 및 열출력 자동화"
8. Frank M. White, " Viscous Fluid Flow," Mc-Graw Hill Inc., New York, 1974, pp. 484.
9. 일본 계량기기 공업연합회, "유량계측 A to Z," pp 124-131
10. RPC, "Comments on NRC Information Notice 95-08(1)", Apr. 1995
11. Y. Gurevich et al., "Theory and Application of a Non-invasive Ultrasonic Cross-Correlation Flow Meter"

알리는 글

본 논문은 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발사업의 연구결과입니다.