2003 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

측정 불확실도 해석을 통한 초음파유량계의 급수유량 측정 적용성 고찰

A Study on Applicability of Ultrasonic Flowmeter for Feedwater Flow Measurements Using Measurement Uncertainty Analysis

유성식, 손석훈, 이병진, 손종주, 장우현, 서종태
한국전력기술(주)
대전광역시 유성구 덕진동 150

황의환, 이종선
한국수력원자력(주)
전라남도 영광군 홍농읍 계마리 514

요 약

원자력발전소 주급수유량의 측정과 관련하여, 현재 사용되는 벤츄리계 대비 초음파유량계의 적용성을 평가하기 위해 초음파유량계와 벤츄리계의 측정 불확실도를 분석하고, 그 결과에 근거하여 원자로 열출력의 측정 불확실도를 분석하였다. 가동중인 한국표준형원전의 증기발생기 급수배관에 초음파유량계를 설치하였고, 취득된 실측자료들은 측정 불확실도 분석에 활용되었다. 본 연구의 결과들은 초음파유량계를 이용하여 급수유량을 측정할 때 원자로 열출력의 측정 불확실도는 안전해석 가정치내에서 충분하게 개선됨을 보여주었다.

Abstract

The measurement uncertainties of an ultrasonic flowmeter and current venturi meter were analyzed to evaluate an applicability of ultrasonic flowmeter on measuring main feedwater flow rate in a nuclear power plant. The measurement uncertainty of a reactor power was also analyzed using the measurement uncertainties of flow meters. The ultrasonic flowmeter was installed on a feedwater pipe line of a typical 1000 MWe Korean Standardized Nuclear Power Plant and the collected data were used in the analyses. The results have indicated that the measurement uncertainty of reactor power on using the ultrasonic flowmeter are sufficiently enhanced within the uncertainty range assumed in the safety analysis.

1. 서 론

원자력발전소의 운전출력은 규제기관의 인허가 요건에 의해 정격 열출력(rated thermal power: RTP)의 100% 이내로 제한되기 때문에, 과대평가가 되면 바로 전기출력 감소로 이어지고,

과소평가의 경우에는 안전성에 영향을 미친다. 따라서 원자력발전소에서 원자로 열출력을 정확하게 측정하는 것은 매우 중요하다[1].

원자로 열출력은 증기발생기 내의 유량과 에너지 평형을 이용하는 고전적 열역학 방법에 의해 계산되는데, 증기발생기의 급수유량과 거의 선형적인 비례 관계를 가진다. 그래서 정확한 열출력 측정을 위해서는 급수유량의 정확한 측정이 필수적이다. 원자력발전소에서 급수유량 측정에 가장 많이 사용되는 장비는 벤츄리계이다. 벤츄리계는 벤츄리관을 통하여 흐를 때의 압력강하를 벤츄리 입구와 목의 압력 탭을 이용하여 측정하는데, 이 차압을 이용하여 유량을 계산한다[2].

벤츄리계를 이용한 급수유량 측정에서 가장 심각한 문제점은 일정 기간에 걸쳐 진행되는 벤츄리 목 부분에서의 부식 생성물 침적이다. 이것은 일반적으로 벤츄리에 의해 측정되는 차압을 증가시켜 실제보다 높은 유량을 지시토록 한다. 이러한 잘못된 유량 지시는 열출력의 과대평가를 야기하는데, 열출력이 과대평가되면 실제 출력은 낮아지므로 열적 여유도가 증가하여 안전성 측면에서는 문제가 없으나, 통상적으로 약 2%의 부당한 전기출력 감소를 야기하는 것으로 알려져 있다. 이러한 전기출력 감소는 800 MWe 발전소의 경우 kWh 당 US$ 0.05의 전기 비용을 감안할 때 매일 2만불의 손실을 가져오고, 원자력발전소 전체를 고려하면 총 손실은 매우 크다고 할 수 있다[3]. 특히 국내 원자력발전소의 일부에서 급수유량의 과대평가로 인한 전기출력 감소 현상이 실제 나타나고 있어, 이의 해결을 위한 연구가 더욱 절실히 요구되고 있다.

최근 많은 해외 원자력발전소들에서 정확한 급수유량 측정을 위해 정확도가 높은 초음파유량계를 사용하는 사례가 늘고 있는데, 초음파유량계의 급수유량 측정값을 벤츄리계의 측정값 대신 열출력의 온라인 계산 입력으로 사용하거나 벤츄리계의 교정에 사용한다. 그러나 초음파유량계의 측정 결과를 원자력발전소에 적용하기 위해서는 초음파유량계의 측정 불확실도가 열출력의 측정 불확실도에 대한 인허가 기준을 만족하는지에 대한 분석이 선행되어야 한다. 참고로 원자력발전소의 안전해석에서는 열출력의 측정 불확실도를 2%로 가정하기 때문에, 급수유량의 측정 불확실도 등에 근거한 열출력의 측정 불확실도는 이 가정치보다 작아야 한다.

본 연구에서는 현재 사용되는 벤츄리계 대비 초음파유량계의 적용성을 평가하기 위해 초음파유량계와 벤츄리계의 측정 불확실도를 분석하고, 그 결과에 근거하여 원자로 열출력의 측정 불확실도를 분석하였다. 가동중인 한국표준형원전의 증기발생기 급수배관에 초음파유량계를 설치하였고, 이때의 실측 자료들을 초음파유량계의 측정 불확실도 분석에 사용하였다.

2. 원자력발전소에서의 급수유량 측정

원자력발전소의 열출력은 규제기관의 인허가 요건에 의해 제한되기 때문에 열출력을 정확하게 측정하는 것이 경제적인 측면에서 매우 유익하다. 원자로 열출력을 구하는 에너지 평형식은 다음과 같이 단순하게 표현가능하다.

$$Q_{th} = M_{FW}(h_s - h_{FW}) - Q_{net} \qquad (1)$$

여기서 Q_{th}는 이차측 열출력, M_{FW}는 급수 질량유량, h_s는 증기엔탈피, h_{FW}는 급수 엔탈피, Q_{net}는 원자로냉각재펌프 가동열이나 냉각재 누설에 의한 열손실 등을 고려한 증기발생기로의

순에너지 유입량을 의미한다. 열출력은 식(1)에서 보는 바와 같이 급수유량과 선형적인 관계를 가지고 있다.

대부분의 원자력발전소에서는 급수유량 측정을 위해 그림 1과 같은 벤츄리계를 사용하는데, 정확도와 적용성 그리고 적절한 가격 등이 그 이유다. 벤츄리계는 대표적인 장애식 유량계로서, 유체를 가속시켜 발생하는 입구와 목과의 압력차를 이용하여 유량을 측정한다. 급수 벤츄리계의 유량식은 다음과 같다[4].

$$M_{FW} = \left(\frac{C_d A_T F_a}{\sqrt{1-\beta^4}} \right) \sqrt{\frac{2DP_{FW}}{\upsilon_{FW}}} \qquad (2)$$

여기서 C_d는 유출계수(discharge coefficient), A_T는 벤츄리 목 단면적, F_a는 열팽창 계수, β는 벤츄리 배관 직경(D)과 벤츄리 목 직경(d)과의 비(d/D), DP_{FW}는 벤츄리 측정 차압, υ_{FW}는 급수 비체적이다.

벤츄리계는 사용 중에 다양한 문제들에 직면하는데, 가장 대표적인 문제가 발전소 출력 감소의 원인인 이물질침적(fouling) 현상이다. 벤츄리계의 이물질침적은 증기발생기 급수에 포함된 철산화물이나 철수산화물 같은 부식생성물이 벤츄리 수렴부에 침착되는 현상으로 정의된다[5]. 발전소 운전동안 벤츄리의 이물질침적은 진행되는데, 이에 따라 압력강하는 증가하고, 결국 급수유량이 증가되는 것처럼 잘못된 지시를 유발한다. 이 경우 식(1)에 따라 원자로 열출력은 실제보다 과대평가된다.

원자로 열출력은 발전소의 인허가 출력 이하로 제한되기 때문에, 벤츄리계의 급수유량 과대평가로 인한 열출력의 과대평가는 실제 열출력을 감소시켜, 결국 전기출력의 감소를 유발한다. 이때 급수유량은 정상적인 값 근처에서 일정하게 유지되는 것으로 지시되기 때문에, 출력 손실을 명확하게 감지하는 것은 어렵다.

3. 초음파유량계의 측정 원리

유량은 단면의 형상에 관계없이 평균유속 $\overline{V}$와 단면적 A의 곱으로 나타낼 수 있다. 초음파유량계가 측정하는 유속 V는 배관의 직경축, 즉 유속을 측정하기 위한 초음파의 전파경로인 측정선을 통과하는 평균 유속이며, 단면에 대한 평균 유속은 아니기 때문에 측정 유

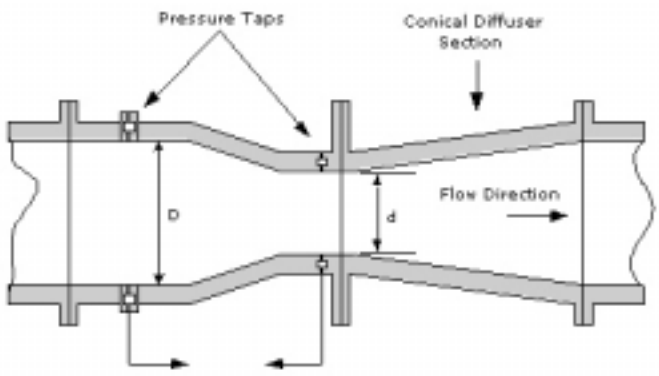

그림 1. 벤츄리계

속 V를 단면에 대한 평균 유속 $\overline{V}$로 환산하기 위해서는 측정선상의 유속 V와 관내의 평균 유속 $\overline{V}$의 비로 정의되는 유속보정계수 K를 구해야 한다. 이때 유량 Q는 아래 식과 같이 표현할 수 있다[6]. 원하는 유량을 계산하기 위해서는 측정유속 V를 결정해야 한다.

$$Q = \rho \overline{V} A = \rho K V A \tag{3}$$

본 논문의 분석에서 사용된 초음파유량계는 상관관계법의 초음파유량계인데, 그 측정원리는 다음과 같다. 그림 2에 보인 바와 같이 관 외벽에 일정거리를 두고 부착한 두개 조의 초음파 센서(transducer)를 이용하여 유체와 같은 속도로 이동하는 와류에 의한 교란신호를 감지하고, 식(4)에 의해 상관(cross-correlate)시킨다.

$$\psi_{xy}(\tau) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t+\tau) dt \tag{4}$$

여기서 $x(t)$는 그림 2의 점 A에서 기록되는 상류측 교란 신호, $y(t)$는 점 B에서 기록되는 하류측 교란신호, τ는 교란 전달시간이다. 난류에 의한 교란들이 점 A와 B에서 유사한 신호를 생성하고 교란의 모든 성분이 같은 속도로 전달된다면, 상관함수 $\psi_{xy}(\tau)$의 최대값은 점 A와 B간의 난류교란 전달시간에 상응하는 $\tau(=\Delta t)$에서 생긴다. 점 A와 B간의 간격이 L이라면 측정선상의 유속은 다음과 같다.

$$V = \frac{L}{\Delta t} \tag{5}$$

본 논문에서 초음파유량계의 유속보정계수는 다음의 식들을 이용하여 결정된다[7].

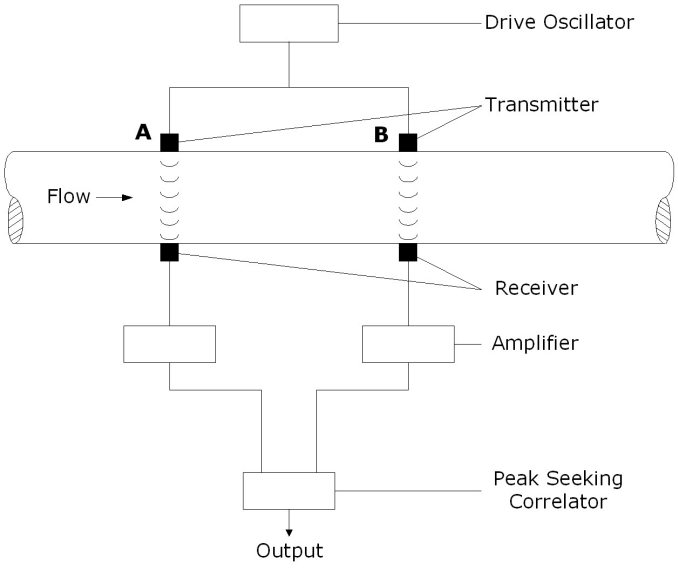

그림 2. 상관관계법 초음파유량계

$$K = K_0(1+\Delta K) \tag{6}$$

$$K_0 = 1/\left(0.9859 + 2.4431V^*\right) \tag{7}$$

$$V^* = \sqrt{\left(0.0032 + 0.221\mathrm{Re}^{-0.237}\right)/8} \tag{8}$$

여기서 K_0는 특정 레이놀즈 수(Reynolds number: Re)에서의 완전 전개(fully developed) 유동 단면에 대한 유속보정계수, ΔK는 배관직경에 대한 엘보로부터 유량계 설치 위치 길이의 비에 따른 유속보정계수의 변화, V^*는 마찰속도(frictional velocity)이다.

초음파유량계의 설치 위치와 엘보의 사이에 충분한 직관부가 형성된다면 ΔK는 0으로 설정된다[7]. 이때 유량은 유속보정계수와 관로의 단면적을 구한 다음 식(3), (5), (6)을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$Q = \frac{\rho KAL}{\Delta t} = \frac{\pi\rho K_0 D^2 L}{4\Delta t} \tag{9}$$

4. 측정 불확실도 해석 방법론

4.1. 초음파유량계의 측정 불확실도

측정 불확실도는 측정 결과에 관련하여 측정량을 합리적으로 추정한 값의 분산 특성을 나타내는 인자이다. 모든 불확실도 요소들에 대해 제곱합의 제곱근을 취하는 방식을 적용하고, 합성하여 불확실도를 구한다.

초음파유량계의 급수유량 측정 불확실도는 식 (9)를 이용하여 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\xi_{M_{FW}} = \sqrt{\xi_{K_0}^2 + \left(2\xi_{d_{iTP}}\right)^2 + \xi_L^2 + \xi_{\Delta t}^2 + \xi_\rho^2} \tag{10}$$

여기서 $\xi_{M_{FW}}$는 급수유량 측정 불확실도, ξ_{K_0}는 유속보정계수에 대한 측정 불확실도, $\xi_{d_{iTP}}$는 온도와 압력에 대해 보정을 한 배관 내경의 측정 불확실도, ξ_L은 상하류측 탐촉자 간격에 대한 불확실도, $\xi_{\Delta t}$는 교란신호 전달시간의 측정 불확실도, ξ_ρ는 급수밀도의 측정 불확실도이다.

유속보정계수의 불확실도는 통계적 처리기법을 이용하여 식 (7)과 (8)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi_{K_0} = \sqrt{\xi_{K_0(cal)}^2 + \xi_{K_0(\mathrm{Re})}^2} \tag{11}$$

여기서 $\xi_{K_0(cal)}$은 표준유량시험장치에서 구한 교정오차이고, $\xi_{K_0(\mathrm{Re})}$는 레이놀즈 수에 의한 유속보정계수의 불확실도이다.

배관의 내경은 배관의 외경과 두께의 측정으로부터 구한다. 만일 배관의 외경 및 두께 측정이

유량 측정시의 온도 및 압력과 다른 온도 및 압력에서 이루어졌을 경우에는 배관의 내경에 배관의 팽창 또는 수축에 의한 영향을 보정해주어야 한다. 이때 배관 내경의 불확실도는 다음과 같다.

$$\xi_{d_{iTP}} = \sqrt{\xi_{d_i}^2 + \left(d_i / d_{iTP}\right)^2 \xi_{d_i}^2} \tag{12}$$

여기서 ξ_{d_i} 는 전적으로 배관의 측정으로부터 구할 수 있는 불확실도, ξ_{d_i} 는 측정 장비, 급수의 온도 및 압력, 온도 및 압력의 측정기기, 열팽창계수 등의 불확실도에 근거하여 구할 수 있는 불확실도, d_i 는 측정 내경의 평균, d_{iTP} 는 온도와 압력에 대해 보정한 내경이다.

초음파 센서 간격에 대한 불확실도인 ξ_L 은 통계적 처리기법을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi_L = \sqrt{\xi_{Lm}^2 + \xi_{L0}^2} \tag{13}$$

여기서 ξ_{Lm} 은 길이 측정시의 불확실도, ξ_{L0} 는 온도, 열팽창계수, 측정기기의 불확실도 등에 의한 불확실도이다.

밀도는 온도와 압력에 대한 함수이다. 이에 따라 급수 밀도의 불확실도는 아래와 같이 주어진다.

$$\xi_\rho = \sqrt{\left(\left.\frac{\partial \rho}{\partial T}\right|_{pr} \cdot \frac{T_{FW}}{\rho} \cdot \xi_{T_{FW}}\right)^2 + \left(\left.\frac{\partial \rho}{\partial P}\right|_{temp} \cdot \frac{P_{FW}}{\rho} \cdot \xi_{P_{FW}}\right)^2} \tag{14}$$

여기서 T_{FW} 와 P_{FW} 는 급수 온도와 압력, $\xi_{T_{FW}}$ 와 $\xi_{P_{FW}}$ 는 급수 온도와 압력의 불확실도이다.

4.2. 벤츄리계의 측정 불확실도

벤츄리계에 의한 급수유량은 식 (2)에 의하면 6개의 변수에 의해 결정되는데, 열팽창계수 F_a 는 급수온도의 함수이고, β 는 d와 D의 함수이며, 비체적 υ_{FW} 는 급수 온도 및 압력의 함수이므로, 벤츄리계에 의한 급수유량의 불확실도는 통계적 처리기법을 이용하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\xi_{M_{FW}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{6}\left(\theta_{X_i}\xi_{X_i}\right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{6}\left[\left(\frac{\partial M_{FW}}{\partial X_i}\right)\xi_{X_i}\right]^2} \tag{15}$$

여기서 θ_{X_i} 는 6개 독립변수(X_i)의 변화에 대한 급수유량의 변화를 보여주는 민감도 계수이고, ξ_{X_i} 는 변수 X_i 의 측정 불확실도를 나타낸다.

4.3. 원자로 열출력의 측정 불확실도

원자로 열출력은 증기발생기의 열출력에 몇 가지 보정인자를 고려하여 계산된다. 보정인자는 원자로냉각재계통 및 증기발생기의 제어체적 내부로 유입되는 에너지 입력과 제어체적 외부로 방출되는 에너지 손실을 의미한다. 단순하게 표현된 에너지 평형식은 아래 식과 같고 이는 식 (1)과 동일하다.

$$Q_{th} = E_{SG} - Q_{net} \tag{16}$$

여기서 E_{SG}는 증기발생기의 열출력이고, Q_{net}는 증기발생기로의 순에너지 유입량이다.
증기발생기의 열출력은 급수유량 M_{FW}, 취출수 유량 M_{BD}, 급수 엔탈피 h_{FW}, 증기발생기의 압력 P_{SG}, 주증기 건도 x, 취출수 건도 x_{BD}의 함수로 나타낼 수 있다. 즉,

$$E_{SG} = f(M_{FW}, M_{BD}, h_{FW}, P_{SG}, x, x_{BD}) \tag{17}$$

증기발생기 열출력의 불확실도는 식 (15)와 유사하게 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\xi_{E_{SG}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{6}\left(\theta_{X_i}\xi_{X_i}\right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^{6}\left[\left(\frac{\partial E_{SG}}{\partial X_i}\right)\xi_{X_i}\right]^2} \tag{18}$$

여기서 $\xi_{E_{SG}}$는 증기발생기 열출력의 측정 불확실도, θ_{X_i}는 6개 독립변수(X_i)의 변화에 대한 증기발생기 열출력의 변화를 보여주는 민감도 계수이고, ξ_{X_i}는 변수 X_i의 측정 불확실도를 나타낸다.
원자로 열출력의 불확실도는 통계적 처리기법을 이용하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\xi_{Q_{th}} = \sqrt{\xi_{E_{SG}}^2 + \xi_{Q_{net}}^2} \tag{19}$$

여기서 $\xi_{Q_{th}}$와 $\xi_{Q_{net}}$는 각각 열출력과 순에너지 유입량의 불확실도이다.

5. 결과 및 고찰

원자력발전소의 급수유량 측정에 대한 초음파유량계의 적용성을 평가하기 위해, 1000 MWe급 한국표준형원전의 급수 배관에 초음파유량계를 설치하여 급수유량을 측정하였고, 실측자료를 사용하여 측정 불확실도 해석을 수행하였다. 측정은 벤츄리계의 이물질침적 특성에 따른 급수유량의 과대평가 효과를 확인하기 위해 운전주기 중간에 이루어졌다. 초음파유량계의 설치에 앞서 급수 배관 표면의 보온재를 제거하고, 배관 직경과 두께를 측정하였다. 아울러 상류측과 하류측의 초음파 전달시간이 같아지도록 표면을 가공하였다. 발전소의 실측자료들은 약 120 시간에 걸쳐 10분 간격으로 발전소 주전산기로부터 취득되었고, 초음파유량계 관련 측정자료들은 위의 120 시간중 48 시간에 걸쳐 취득되었다.

표 1. 초음파유량계의 측정 불확실도

변수	불확실도
K_0	0.251
d_{iTP}	0.084
L	0.182
Δt	0.185
ρ	0.132
M_{FW}	0.420

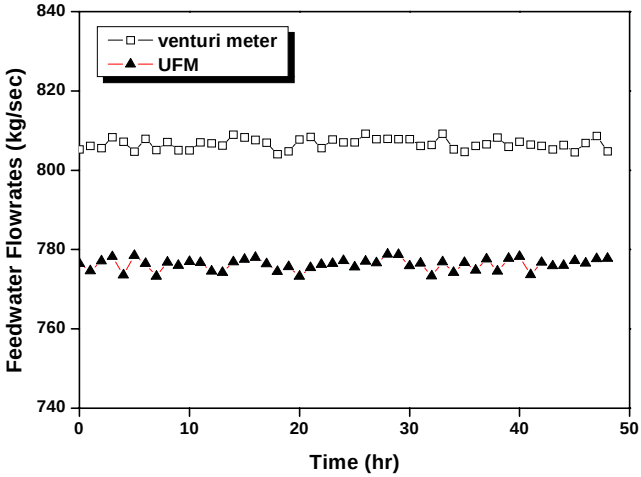

그림 3. 벤츄리계 대비 초음파유량계의 급수유량 측정값

실측자료를 이용한 초음파유량계의 불확실도 분석 결과는 표 1과 같다. 초음파 유량계의 측정 불확실도에 가장 지배적인 영향을 미치는 인자는 유속보정계수에 의한 교정오차이었고, 초음파유량계를 이용한 급수유량 측정의 합성 불확실도는 0.42%이었다. 그림 3은 초음파유량계를 이용한 측정 동안의 초음파유량계와 벤츄리계의 급수유량 측정값을 동시에 보여준다. 초음파유량계의 유량 평균값은 776.3 kg/sec이었고 벤츄리계의 유량 평균값은 이보다 약 3.7%정도 큰 806.7 kg/sec이었다.

핵연료 재장전 후 원자로 기동에서부터 유량측정 시점인 운전주기 중간까지의 전기출력 감소 추이나 터빈 충동압력의 추이를 분석한 결과, 초음파유량계 측정값이 실제값에 가까운 값임을 유추할 수 있었고, 이를 근거로 벤츄리계에 의한 급수유량이 이물질침적 등에 의해 과대하게 평가되고 있음을 알 수 있었다.

표 2는 벤츄리계의 측정 불확실도 평가에서 고려되는 각 변수들의 감도계수를 급수유량의 전출력 설계값의 %단위로 해서 보여준다. 표 3은 증기발생기 열출력의 불확실도 평가에서 고려되는 각 변수들의 감도계수와 증기발생기 열출력 불확실도에 대한 기여도를 정격열출력의 %단위로 해서 보여준다.

표 2. 벤츄리계의 측정 불확실도 관련 감도계수

변수	감도계수*
C_d	100.13 (%)
d	22.2 (%/inch)
D	-1.7 (%/inch)
DP_{FW}	0.105 (%/inH_2O)
T_{FW}	0.044 (%/^{o}F)
P_{FW}	-0.00037 (%/psia)

* 변수 X_i에 대한 $\left(\partial M_{FW}/\partial X_i\right)/M_{FW}\times 100$(주급수 설계유량의 %)

표 3. 증기발생기 열출력의 측정 불확실도 관련 감도계수 및 기여도

변수	감도계수*	기여도(%RTP)**
x	58.83 (%)	0.15
x_{BD}	0.0 (%)	0.0
M_{BD}	-9.36E-06 (%/lbm/hr)	-0.30
P_{SG}	-0.0036 (%/psia)	-0.18
h_{FW}	-3.202E+05 (%/^{o}F)	-0.41
M_{FW}	1.11E-05 (%/lbm/hr)	0.73

* 변수 X_i에 대한 $\left(\partial E_{SG}/\partial X_i\right)/RTP\times 100$ (% RTP)

* 변수 X_i에 대한 (민감도계수 $\times \xi_{X_i}$)

표 2에서 보이는 감도계수와 설계에서 고려되는 각 변수들의 오차를 이용하여 계산한 벤츄리계 급수유량의 측정 불확실도는 1.03%이었고, 열출력의 측정 불확실도에 가장 지배적인 영향을 미치는 인자는 이미 예견할 수 있었던 것처럼 급수유량의 측정 불확실도이었다. 이러한 분석 결과는 원자력발전소에서 열출력의 정확한 측정이 안전성 측면이나 경제성 측면에서 절대적으로 필요하다는 점에서 급수유량의 정확한 측정이 필수적임을 보여준다. 그림 4는 급수유량 불확실도와 열출력 불확실도의 관계를 보여준다. 30% 출력 이상에서는 거의 선형적인 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

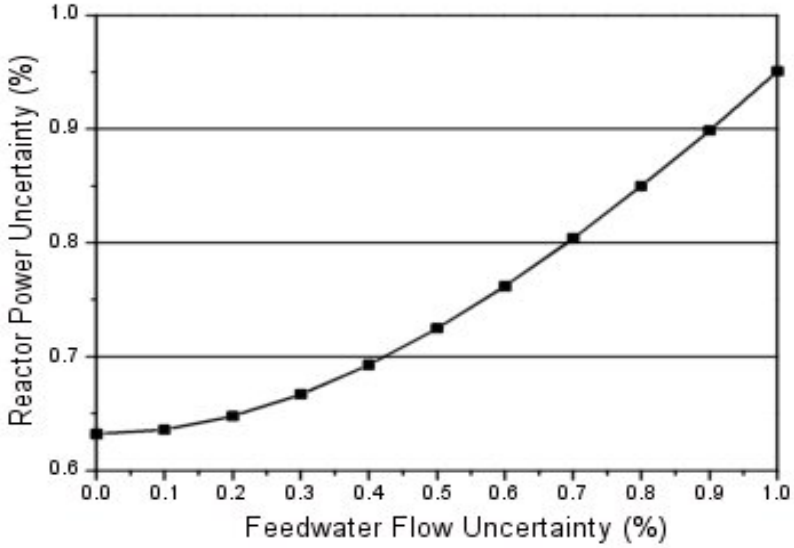

그림 4. 급수유량 불확실도에 따른 원자로 열출력 불확실도

표 1의 초음파유량계 측정 불확실도와 표 2와 3의 벤츄리계 관련 결과들을 이용하여 계산한 원자로 열출력의 측정 불확실도는 각각 약 0.7%와 약 1%이었다. 결과적으로 초음파유량계의 적용을 통해 원자로 열출력의 측정 불확실도는 약 0.3% 정도 감소됨을 알 수 있었다. 참고로, 본 논문에서 제시되는 벤츄리계의 측정 불확실도는 이물질침적 현상이나 기타 비교정(decalibration) 조건들을 배제하고서 계산한 값이기 때문에, 이물질침적 현상을 고려한다면 초음파유량계와의 불확실도 차이는 더욱 커질 것이다.

지금까지의 연구결과들을 볼 때, 원자력발전소의 급수유량 측정에 대한 초음파유량계의 적용성은 우수하다고 판단된다. 초음파유량계에 의한 급수유량 측정은 이물질침적 현상에 대한 유량의 과대지시 및 전기출력 감소를 방지하여, 궁극적으로는 발전소의 성능 및 효율을 증대시킬 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구에서는 초음파유량계 및 원자로열출력의 측정 불확실도 분석에 기반하여 초음파유량계의 급수유량 측정에 대한 적용성을 분석하였고, 그 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초음파유량계의 측정 불확실도는 이물질침적 현상이 배제된 조건에서의 벤츄리계의 측정 불확실도보다 우수하였다.
2) 초음파유량계의 측정 불확실도에 가장 지배적인 영향을 미치는 인자는 유속보정계수에 의한 교정오차이다.
3) 초음파유량계는 이물질침적 현상에 대한 영향을 받지 않고 급수유량을 정확하게 측정하여 발전소의 성능 및 운전 효율을 향상시킬 것이다.
4) 초음파유량계의 작은 측정 불확실도는 안전해석에서의 열출력 불확실도 가정치에 대해 충분한 여유를 가지며, 이러한 여유도는 향후 발전소의 정격출력 증강에 활용가능할 것이다.

참고 문헌

(1) Kadir Kavaklioglu and Belle R. Upadhyaya, 1994, "Monitoring Feedwater Flow Rate and Component Thermal Performance of Pressurized Water Reactors by means of Artificial Neural Networks," Nucl. Tech., Vol. 107, pp. 112 ~ 123.

(2) E. O. Doebelin, 1983, "Measurement Systems Applications and Design," McGraw-Hill, New York, pp. 571 ~ 573.

(3) 1993, " Flowrate Measurement Causes Unneeded Derating, " Nuclear News, pp. 39 ~ 40.

(4) ASME Report, 1971, "Application Part Ⅱ of Fluid Meters," Research Committee on Fluid Meters, New York, pp. 230 ~ 232.

(5) E. F. C. Somerscales and J. G. Knudsen, 1981, "Fouling of Heat Transfer Equipment," Hemisphere Publishing Co., New York, pp. 527.

(6) 日本計量機器工業聯合會, 1997, " 計裝 엔지니어를 위한 流量計測 A to Z," 테크하우스, pp. 124-131.

(7) A-YG3-PS-0001, 2000, "Crossflow Feedwater Flow Measurement at YGN Unit 3," CE Nuclear Power LLC.

(8) Armando Lopez, 2000, "CROSSFLOW Technical Presentation," ABB, pp. 10.