

## 원자력발전소의 급수유량 측정에 대한 초음파유량계의 적용성 연구

유성식\* · 박종호\*\*

### A Study on Applicability of Ultrasonic Flowmeter to Feedwater Flow Measurements in Nuclear Power Plants

Sung-Sik Yu\*, Jong-Ho Park\*\*

*Key Words:* Feedwater Flow (급수유량), Ultrasonic Flowmeter (초음파 유량계), Venturi Meter (벤츄리 유량계), Fouling (이물질침적), Measurement Uncertainty (측정 불확도)

#### ABSTRACT

The measurement uncertainties of an ultrasonic flowmeter were analyzed to evaluate its applicability to the measurement of the steam generator feedwater flow-rate in a nuclear power plant. The analyses of measurement uncertainties of a reactor power were also performed with the analyses of feedwater flow measurement uncertainties. Two ultrasonic flowmeters based on a cross-correlation technique and a transit time method were used in this study. The ultrasonic flowmeters were installed on a feedwater pipe line of a typical 1000 MWe Korea-standardized nuclear power plant to take the necessary data. The results have shown that the measurement uncertainties of the ultrasonic flowmeters are adequately smaller than those of a venturi meter. The research has also indicated that the measurement uncertainties of the reactor power based on the ultrasonic flowmeter uncertainties are sufficiently bounded by the uncertainty range usually assumed in nuclear safety analyses.

#### 1. 서 론

발전소 계통들의 효율적인 운전은 오랫동안 전력산업계의 주요 목표중 하나인데, 이는 전기비용을 줄이고자 함이다. 특히 원자력발전소의 경우 전출력 (full power)에서의 운전은 매우 중요하다. 원자로의 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 원자로 열출력은 아주 정확하게 측정되어야만 한다<sup>(1)</sup>.

현재 원자로 열출력은 증기발생기 내의 질량과 에너지 평형을 이용하는 고전적 열역학 방법에 의해 계산되는데, 증기발생기의 급수유량과 거의 선형적인 비례 관계를 가진다<sup>(2)</sup>. 그래서 정확한 열출력 측정을 위해서는 급수유량의 정확한 측정이 필수적이다. 원자력 발전소에서 급수유량 측정에 가장 범용으로 사용되는 장비는 벤츄리 유량계이다. 벤츄리 유량계는 벤츄리관

\* 충남대학교 대학원, 한국전력기술(주)

\*\* 충남대학교 기계공학과

을 가로지를 때의 압력강하를 벤츄리 입구와 목의 압력 탭을 이용하여 측정하고, 이 차압을 이용하여 급수관의 유량을 계산한다<sup>(3)</sup>.

벤츄리 유량계를 이용한 급수유량 측정에서 가장 중요한 문제는 일정 기간에 걸쳐 진행되는 벤츄리 목 부분에서의 부식생성물 침적이다. 이것은 벤츄리에 의해 측정되는 차압을 증가시켜 실제보다 높은 유량을 지시토록 한다. 이러한 잘못된 유량 지시는 열출력의 과대평가를 야기하면서 통상적으로 약 2%의 부당한 전기출력 감소를 가져오는데 원자력발전소 전체를 고려하면 총 손실은 매우 크다고 할 수 있다<sup>(4)</sup>.

최근 많은 해외 원자력발전소들에서 정확한 급수유량 측정을 위해 정확도가 높은 초음파유량계 (ultrasonic flowmeter: UFM)를 사용하는 사례가 늘고 있다. 초음파유량계의 급수유량 측정값을 벤츄리 유량계의 측정값 대신 열출력의 온라인 계산 입력으로 사용하거나 오프라인으로 벤츄리 유량계의 교정에 사용한다. 초음파유량계를 원자력발전소에서의 측정이나 운전에 적용하기 위해서는, 초음파유량계의 측정 불확도가 열출력의 측정 불확도에 대한 인허가 기준 이내인지에 대한 검증이 선행되어야 한다. 원자력발전소의 안전해석에서는 열출력의 측정 불확도를 2%로 가정하기 때문에, 급수유량의 측정 불확도 등에 근거한 열출력의 측정 불확도는 이 가정치보다 작아야 한다<sup>(2)</sup>.

본 연구에서는 두 가지 방식의 초음파유량계에 대해 측정 불확도를 평가하였다. 상관관계법 (cross correlation)과 전파시간차법 (transit time)의 초음파유량계가 그 대상이다. 아울러, 각 초음파유량계의 측정 불확도에 근거한 열출력의 측정 불확도가 안전해석 가정치보다 충분히 작은가를 분석하였다. 가동중인 한국표준형원전의 증기발생기 급수배관에 각각의 초음파유량계를 번갈아 설치하였고, 측정된 급수유량값들을 벤츄리 유량계의 유량값과 비교 분석하였다. 또한, 이때의 실측 자료들은 초음파유량계의 측정 불확도 분석에 사용되었다.

## 2. 원자력발전소에서의 급수유량 측정

원자력발전소의 열출력은 규제기관의 인허가 요건에 의해 제한되기 때문에 열출력을 정확하게 측정하는 것이 경제적인 측면에서 매우 유익하다. Fig. 1은 원자력발전소의 일차측인 원자로와 이차측인 증기발생기간의 열전달 경로 및 증기발생기에서의 에너지 흐름을

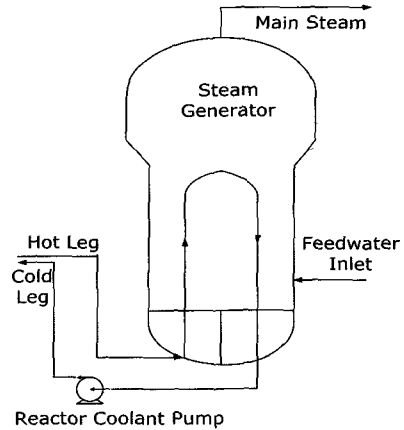


Fig. 1 Schematic of steam generator

보여준다. 원자로 열출력을 구하는 에너지 평형식은 다음과 같이 단순하게 표현가능하다<sup>(2)</sup>.

$$Q_{th} = M_{FW}(h_S - h_{FW}) - Q_{*t} \quad (1)$$

여기서  $Q_{th}$ 는 이차측 기준으로 계산한 열출력,  $M_{FW}$ 는 급수 질량유량,  $h_S$ 는 증기엔탈피,  $h_{FW}$ 는 급수 엔탈피,  $Q_{*t}$ 는 원자로냉각재펌프 가동열이나 냉각재 누설에 의한 열손실 등을 고려한 증기발생기로의 순에너지 유입량을 의미한다. 열출력은 식(1)에서 보는 바와 같이 급수유량과 거의 선형적인 관계를 가지고 있다.

대부분의 원자력발전소에서는 급수유량 측정을 위해 Fig. 2와 같은 벤츄리 유량계를 사용하는데, 정확도와 적용성 그리고 적절한 가격 등이 그 이유다. 벤츄리 유량계는 대표적인 장애식 유량계로서, 유체를 가속시켜 발생하는 입구와 목과의 압력차를 이용하여 통과하는 유량을 측정한다. 급수 벤츄리의 유량식은 다음과 같다<sup>(2),(5)</sup>.

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

여기서  $C_d$ 는 유출계수 (discharge coefficient),  $A_T$ 는 벤츄리 목 단면적,  $F_a$ 는 열팽창계수,  $\beta$ 는 벤츄리 배관 직경 ( $D$ )과 벤츄리 목 직경 ( $d$ )과의 비 ( $d/D$ ),  $DP_{FW}$ 는 벤츄리 측정 차압,  $\rho_{FW}$ 는 급수 비체적이다.

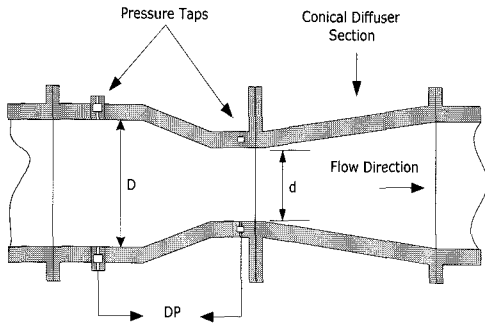


Fig. 2 Schematic of venturi meter

벤츄리 유량계는 사용 중에 다양한 문제에 직면하는데, 가장 대표적인 문제가 발전소 출력 감소의 원인인 이물질침적 (fouling) 현상이다. 벤츄리 이물질침적은 증기발생기 급수에 포함된 철산화물이나 철수산화물 같은 부식생성물이 벤츄리 수렴부에 침착되는 현상으로 정의된다<sup>(6)</sup>. 벤츄리의 압력강하는 이물질침적의 진행에 따라 증가하는데, 이는 급수유량이 증가되었다는 거짓 지시를 유발한다. 이 경우 식(1)에 따라 원자로 열출력은 실제보다 과대평가된다.

원자로 열출력은 발전소의 인허가 출력 이하로 제한되기 때문에, 벤츄리 유량계의 급수유량 과대평가로 인한 열출력의 과대평가는 실제 열출력의 감소와 함께 전기출력의 감소를 유발한다. 그러나 급수유량은 설계값 부근에서 일정하게 유지되는 것으로 지시되기 때문에, 출력 손실을 명확하게 감지하는 것은 어렵다. 급수유량의 거짓 지시에 따른 오차는 초음파유량계에 의한 측정 또는 터빈 충동(impulse) 압력이나 주증기 유량과 같은 발전소 표준 변수들의 주의 깊은 검토를 통해 확인될 수 있다.

### 3. 초음파유량계의 측정 원리

어떠한 단면의 형상에 관계없이 유량은 평균유속  $\bar{V}$  와 단면적 A와의 곱으로 나타낼 수 있다. 초음파 유량계가 측정하는 유속 V는 배관의 직경축, 즉 유속을 측정하기 위한 초음파의 전파경로인 측정선을 통과하는 평균유속이며, 단면에 대한 평균유속은 아니다. 따라서 측정유속 V를 단면에 대한 평균유속  $\bar{V}$ 로 환산하기 위해서는 측정선상의 유속 V와 관내의 평균유속  $\bar{V}$ 의 비로 정의되는 유속보정계수 K를 구해야 한다. 이때 유량 Q는 아래 식과 같이 표현할 수 있다<sup>(7)</sup>.

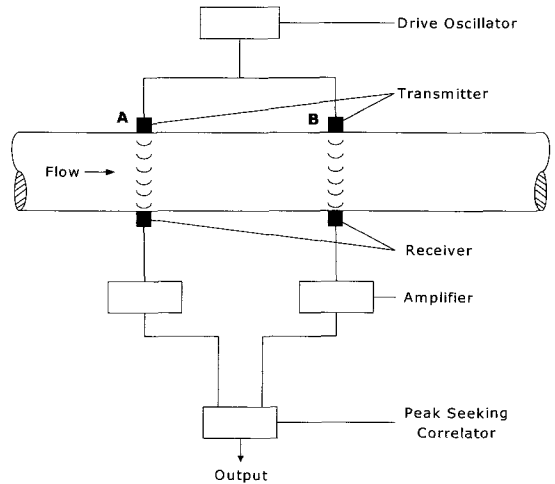


Fig. 3 Ultrasonic cross-correlation flowmeter

$$Q = \rho \bar{V} A = \rho K V A \quad (3)$$

원하는 유량을 계산하기 위해서는 측정유속 V를 결정해야 하는데, 이 유속을 측정하는 방식에 따라 초음파유량계의 방식이 구분된다. 본 논문에서 분석되는 초음파유량계는 상관관계법과 전파시간차법의 초음파유량계이고 그 측정원리는 다음과 같다.

#### 3.1. 상관관계법

Fig. 3에 보인 바와 같이 관 외벽에 일정거리를 두고 부착한 두개 조의 초음파 탐촉자(transducer)를 이용하여 유체와 같은 속도로 이동하는 난류에 의한 교란신호를 감지하고, 식(4)에 의해 상관(cross-correlation)시킨다.

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

여기서  $x(t)$ 는 Fig. 3의 점 A에서 기록되는 상류측 교란 신호,  $y(t)$ 는 점 B에서 기록되는 하류측 교란신호,  $\tau$ 는 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.

$$V = L / \Delta t \quad (5)$$

본 논문에서 상관관계법 초음파유량계의 유속보정계수는 다음의 식들을 이용하여 결정된다<sup>(6)</sup>.

$$K = K_0(1 + \Delta K) \quad (6)$$

$$K_0 = 1 / (0.9859 + 2.4431 V^*) \quad (7)$$

$$V^* = \sqrt{(0.0032 + 0.221 Re^{-0.237}) / 8} \quad (8)$$

여기서  $K_0$ 는 특정 레이놀즈 수 (Reynolds number:  $Re$ )에서의 완전 전개 (fully developed) 유동 단면 (profile)에 대한 유속보정계수,  $\Delta K$ 는 배관직경 ( $D$ )에 대한 엘보로부터 유량계 설치 위치 길이 ( $\ell$ )의 비 ( $\ell / D$ )에 따른 유속보정계수의 변화,  $V^*$ 는 마찰속도 (frictional velocity)이다.

초음파유량계가 엘보로부터 충분히 먼 거리에 설치된다면 (즉,  $\ell / D \geq 14.94$ ),  $\Delta K$ 는 0으로 설정된다<sup>(6)</sup>. 이때 유량은 유속보정계수와 관로의 단면적을 구한 다음, 식(3), (5), (6)을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$Q = \rho K A L / \Delta t = \pi \rho K_0 D^2 L / (4 \Delta t) \quad (9)$$

### 3.2. 전파시간차법

Fig. 4에서와 같이 초음파 발신기  $T_1$ 로부터 수신기  $R_1$ 로 초음파를 발사할 경우 초음파의 속도(유체 중에서의 음속)를  $C$ , 유체의 속도를  $V$ 라 하면 벡터 합에 의하여 전파속도는  $C + V \cos \theta$ 가 되고 이때 전파시간  $t_1$ 은 다음과 같이 된다.

$$t_1 = L / (C + V \cos \theta) \quad (10)$$

여기서  $L$ 은 유체 내의 초음파 전파 경로 길이,  $\theta$ 는 유동 방향과 초음파 전파 경로와의 교차 각도를 가리킨다. 이와 반대로 발신기  $T_2$ 로부터 수신기  $R_2$ 까지 초음파 전파 속도는  $t_2$ 는 아래와 같이 된다.

$$t_2 = L / (C - V \cos \theta) \quad (11)$$

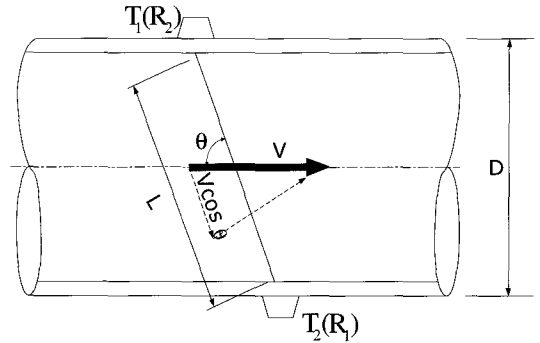


Fig. 4 Transit time ultrasonic flowmeter

이때 도달 시간차  $\Delta t$ 는  $t_2 - t_1$ 이므로 다음과 같다.

$$\Delta t = 2LV \cos \theta / (C^2 - V^2 \cos^2 \theta) \quad (12)$$

위의 식과  $C^2 \gg V^2 \cos^2 \theta$ 인 점을 고려하면 유속  $V$ 는 다음과 같다.

$$V = C^2 \Delta t / (2L \cos \theta) \quad (13)$$

본 논문에서 전파시간차법 초음파유량계의 유속보정계수는 상관관계식 초음파유량계의 유속보정계수인 식(6)과 동일하다. 여기서  $K_0$ 는 다음 식을 사용하였다<sup>(7)</sup>.

$$K_0 = 1 / (1 + 0.01 \sqrt{6.25 + 431 Re^{-0.237}}) \quad (14)$$

초음파유량계가 엘보로부터 충분히 먼 거리에 설치된다면 유량은 식(3), (6), (13)을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$Q = \rho K A C^2 \Delta t / (2L \cos \theta) = \pi \rho K_0 D^2 C^2 \Delta t / (8L \cos \theta) \quad (15)$$

## 4. 측정 불확도 해석 방법론

### 4.1. 초음파유량계의 측정 불확도

측정 불확도는 측정 결과에 관련하여 측정량을 합리적으로 추정된 값의 분산 특성을 나타내는 파라미터

이다. 모든 불확도 요소들에 대해 제곱합의 제곱근 (square root sum of squares: SRSS)을 취하는 방식을 적용하고, 합성하여 불확도를 구한다.

식 (9)와 (15)를 이용하면, 상관관계법 초음파유량계와 전파시간차법 초음파유량계에 의한 급수유량의 측정 불확도는 통계적 처리기법을 이용하여 각각 식 (16)과 (17)로 나타낼 수 있다.

$$\xi_{M_{FW}} = [\xi_{K_0}^2 + (2\xi_{d_{ITP}})^2 + \xi_L^2 + \xi_{dt}^2 + \xi_\rho^2]^{0.5} \quad (16)$$

$$\xi_{M_{FW}} = [\xi_{K_0}^2 + (2\xi_{d_{ITP}})^2 + \xi_L^2 + \xi_{dt}^2 + \xi_\rho^2 + \xi_C^2 + \xi_\theta^2]^{0.5} \quad (17)$$

여기서  $\xi_{M_{FW}}$ 는 급수유량 측정 불확도,  $\xi_{K_0}$ 는 유속보정계수에 대한 불확도,  $\xi_{d_{ITP}}$ 는 온도와 압력에 대해 보정한 배관 내경의 불확도,  $\xi_L$ 은 상하류측 탐촉자 간격 또는 초음파 전달경로에 대한 불확도,  $\xi_{dt}$ 는 교란신호 전달시간 또는 초음파 전달시간 측정 불확도,  $\xi_\rho$ 는 급수밀도의 측정 불확도,  $\xi_C$ 는 급수내의 초음파 전파속도에 대한 불확도, 그리고  $\xi_\theta$ 는 송·수신용 탐촉자의 교차각도에 의한 불확도이다.

유속보정계수의 불확도는 통계적 처리기법을 이용하여 식 (7), (8), (14)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi_{K_0} = (\xi_{K_{0(cal)}}^2 + \xi_{K_{0(Re)}}^2)^{0.5} \quad (18)$$

여기서  $\xi_{K_{0(cal)}}$ 은 표준유량시험장치에서 구한 교정오차이고  $\xi_{K_{0(Re)}}$ 는 레이놀즈 수에 의한 유속보정계수의 불확도이다.

배관의 내경은 배관의 외경과 두께의 측정으로부터 구한다. 만일 배관의 외경 및 두께 측정이 초음파유량계 측정시의 온도 및 압력과 다른 온도 및 압력에서 이루어졌을 경우에는 배관의 팽창 또는 수축에 의한 영향으로 인한 배관의 내경에 대한 보정을 해주어야 한다. 통계적 처리기법에 따른 배관 내경의 불확도는 다음과 같다.

$$\xi_{d_{ITP}} = [\xi_{d_i}^2 + (d_i/d_{ITP})^2 \xi_{d_i}^2]^{0.5} \quad (19)$$

여기서  $\xi_{d_i}$ 는 전적으로 배관의 측정으로부터 구할 수 있는 불확도,  $\xi_{d_i}$ 는 측정 장비, 급수의 온도 및 압력, 온도 및 압력 측정기기, 열팽창계수 등의 불확도에 근거하여 구할 수 있는 불확도,  $d_i$ 는 측정 내경의 평균,  $d_{ITP}$ 는 온도와 압력에 대해 보정한 내경이다.

탐촉자 간격 또는 초음파 전달경로에 대한 불확도인  $\xi_L$ 은 통계적 처리기법을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi_L = (\xi_{Lm}^2 + \xi_{Lo}^2)^{0.5} \quad (20)$$

여기서  $\xi_{Lm}$ 은 길이 측정시의 불확도,  $\xi_{Lo}$ 는 온도, 열팽창계수, 측정기기의 불확도 등에 의한 불확도이다.

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

$$\xi_\rho = \left[ \left( \left. \frac{\partial \rho}{\partial T} \right|_{pr} \cdot \frac{T_{FW}}{\rho} \cdot \xi_{T_{FW}} \right)^2 + \left( \left. \frac{\partial \rho}{\partial P} \right|_{temp} \cdot \frac{P_{FW}}{\rho} \cdot \xi_{P_{FW}} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (21)$$

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

송·수신용 탐촉자의 교차 각도에 대한 불확도는 초음파 전달경로 길이(L)와 배관의 평균 외경( $d_0$ )의 관계로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi_\theta = \left[ \left( \frac{w}{(1+w^2)\tan^{-1}(w)} \cdot \xi_{d_0} \right)^2 + \left( \frac{w}{(1+w^2)\tan^{-1}(w)} \cdot \xi_L \right)^2 \right]^{0.5} \quad (22)$$

여기서  $w$ 는  $d_0/L$ ,  $\xi_{d_0}$ 는 평균 외경의 불확도이다.

## 4.2. 원자로 열출력의 측정 불확도

원자로 열출력은 증기발생기의 열출력에 몇 가지 보정인자를 고려하여 계산된다.

여기서 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<sup>(2)</sup>.

$$Q_{th} = E_{SG} - Q_{\neq i} \quad (23)$$

여기서  $E_{SG}$ 는 증기발생기의 열출력이고,  $Q_{\neq i}$ 는 증기발생기로의 순에너지 유입량이다.

증기발생기의 열출력은 급수유량  $M_{FW}$ , 취출수(blow-down)유량  $M_{BD}$ , 급수엔탈피  $h_{FW}$ , 증기발생기의 압력  $P_{SG}$ , 주증기 건도(quality)  $x$ , 취출수 건도  $x_{BD}$ 의 함수로 나타낼 수 있다. 즉,

$$E_{SG} = f(M_{FW}, M_{BD}, h_{FW}, P_{SG}, x, x_{BD}) \quad (24)$$

식 (2)에 의하면 벤츨리 유량계에 의한 급수유량은 6개의 변수에 의해 결정되는데, 열팽창계수  $F_d$ 는 급수온도의 함수이고,  $\beta$ 는 d와 D의 함수이며, 비체적  $\nu_{FW}$ 는 급수 온도 및 압력의 함수이므로, 벤츨리 유량계에 의한 급수유량의 불확도는 통계적 처리기법을 이용하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\xi_{M_{FW}} = \left[ \left( \frac{\partial M_{FW}}{\partial C_d} \right)^2 \xi_{C_d}^2 + \left( \frac{\partial M_{FW}}{\partial d} \right)^2 \xi_d^2 + \left( \frac{\partial M_{FW}}{\partial D} \right)^2 \xi_D^2 + \left( \frac{\partial M_{FW}}{\partial DP_{FW}} \right)^2 \xi_{DP_{FW}}^2 + \left( \frac{\partial M_{FW}}{\partial T_{FW}} \right)^2 \xi_{T_{FW}}^2 + \left( \frac{\partial M_{FW}}{\partial P_{FW}} \right)^2 \xi_{P_{FW}}^2 \right]^{0.5} \quad (25)$$

여기서,  $\xi_{M_{FW}}$ ,  $\xi_{C_d}$ ,  $\xi_d$ ,  $\xi_D$ ,  $\xi_{DP_{FW}}$ ,  $\xi_{T_{FW}}$ ,  $\xi_{P_{FW}}$ 는 아래첨자로 표기한 각 인자의 불확도를 나타낸다.

증기발생기 열출력의 불확도는 다음 식으로 나타낼 수 있다. 식에서  $\xi_{E_{SG}}$ ,  $\xi_{M_{FW}}$ ,  $\xi_{M_{BD}}$ ,  $\xi_{h_{FW}}$ ,  $\xi_{P_{SG}}$ ,  $\xi_x$ ,  $\xi_{x_{BD}}$ 는 아래첨자로 표기한 각 인자의 불확도를 나타낸다.

$$\xi_{E_{SG}} = \left[ \left( \frac{\partial E_{SG}}{\partial M_{FW}} \right)^2 \xi_{M_{FW}}^2 + \left( \frac{\partial E_{SG}}{\partial M_{BD}} \right)^2 \xi_{M_{BD}}^2 + \left( \frac{\partial E_{SG}}{\partial h_{FW}} \right)^2 \xi_{h_{FW}}^2 + \left( \frac{\partial E_{SG}}{\partial P_{SG}} \right)^2 \xi_{P_{SG}}^2 + \left( \frac{\partial E_{SG}}{\partial x} \right)^2 \xi_x^2 + \left( \frac{\partial E_{SG}}{\partial x_{BD}} \right)^2 \xi_{x_{BD}}^2 \right]^{0.5} \quad (27)$$

원자로열출력의 불확도는 통계적 처리기법을 이용하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\xi_{Q_{th}} = (\xi_{E_{SG}}^2 + \xi_{Q_{\neq i}}^2)^{0.5} \quad (26)$$

여기서  $\xi_{Q_{th}}$ 는 열출력의 불확도,  $\xi_{E_{SG}}$ 는 증기발생기 열출력의 불확도,  $\xi_{Q_{\neq i}}$ 는 순에너지 유입량의 불확도이다.

### 5. 결과 및 고찰

원자력발전소의 급수유량 측정에 대한 초음파유량계의 적용성을 평가하기 위해 1000 MWe급 한국표준형원자력발전소의 실측자료를 사용하였다. 한국표준형원자력발전소의 급수 배관에 상관관계법 초음파유량계와 전파시간차법 초음파유량계를 교대로 설치하여 급수유량을 측정하였다.

측정은 벤츨리 유량계의 이물질침적 특성을 고려하여 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 120시간에 걸쳐 10분 간격으로 발전소 주전산기로부터 취득하였다. 초음파유량계 관련 측정자료들은 위의 120 간중 48시간에 걸쳐 취득하였다.

본 연구에서 사용된 상관관계법 초음파유량계는 미국 표준유량시험 기관인 Alden Research Laboratory (ARL)에서 교정하였는데 그 교정오차는 약 0.25%이었다<sup>(9)</sup>. 전파시간차법 초음파유량계의 교정오차는 해당 제품에 대한 정보 부족으로 파악할 수가 없었다. 이에 따라 본 논문에서는 전파시간차법 초음파유량계의 교정오차를 상관관계법 초음파유량계의 교정오차와 동일하다고 가정하였다.

Table 1 Measurement uncertainties of ultrasonic flowmeters

Parameter	Cross-correlation(%)	Transit time(%)
$K_0$	0.251	0.250
$d_{ITP}$	0.084	0.073
L	0.182	0.284
$\Delta t$	0.185	0.201
$\rho$	0.132	0.129
C	-	0.329
$\theta$	-	0.103
$M_{FW}$	0.420	0.583

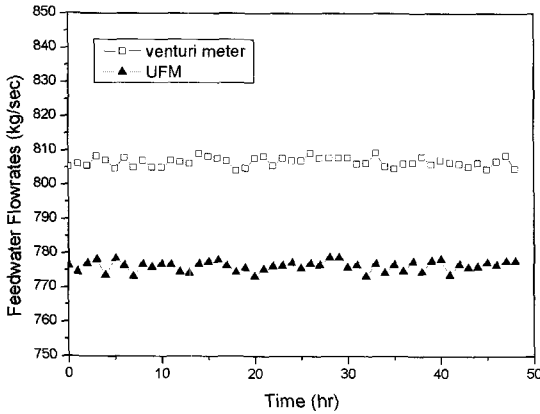


Fig. 5 UFM and venturi feedwater flow-rates

상관관계법과 전파시간차법 초음파유량계의 불확도 분석 결과는 Table 1과 같다. 전파시간차법 초음파유량계가 측정 방법상의 차이로 인해 상대적으로 조금 큰 불확도를 보여주었다.

Fig. 5는 상관관계법 초음파유량계와 벤츨리 유량계의 급수유량 측정값을 보여준다. 초음파유량계의 측정유량 평균값은 776.3 kg/sec이었고 벤츨리 유량계의 측정유량 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 보면, 초음파유량계 측정값이 실제값에 가까운 값을 유추할 수 있다. 이러한 결과로부터 벤츨리 유량계에 의한 급수유량이 이물질침적 등에 의해 과대하게 평가되고 있음을 알 수 있었다. 전파시간차법 초음파유량계의 측정값은 상관관계법 초음파유량계의 측정값과 유사하였다.

Table 2 Design values and measurement uncertainties related to reactor power calculation

Parameter	Unit	Design Value	Uncertainty
$x$	-	0.9975	0.0025
$x_{BD}$	-	0.0	0.0
$M_{BD}$	lbm/hr	64,080	32,040
$P_{SG}$	psia	1,070	50
$h_{FW}$	btu/lbm	430.60	1.267E-06
$Q_{\#t}$	MW	17	8.5

Table 3 Sensitivity coefficients and contributions on venturi flow-rate uncertainty

Parameter	Sensitivity Coefficient*	Contribution** (% of feedwater)
$C_d$	100.13 (%)	0.250
$d$	22.2 (%/inch)	0.111
$D$	-1.7 (%/inch)	0.017
$DP_{FW}$	0.105 (%/inH2O)	0.978
$T_{FW}$	0.044 (%/°F)	0.171
$P_{FW}$	-0.00037 (%/psia)	0.092

\*  $(\partial M_{FW}/\partial X_i)/M_{FW} \times 100$  of each parameter  $X_i$  in % design feedwater flow

\*\* sensitivity coefficient  $\times \xi_{X_i}$  of parameter  $X_i$

이미 앞서 말한 바와 같이 초음파유량계의 적용성 평가는 급수유량의 측정 불확도에 따른 원자로 열출력의 측정 불확도의 변화에 대한 분석에 근거한다. 이를 위해 초음파유량계와 벤츨리 유량계의 측정 불확도를 이용하여 원자로 열출력 측정 불확도에 대한 최적 (best-estimate) 분석을 수행하였다. 불확도 관련 인자들의 실제 설계값을 분석에 사용하였다. 발전소 조건으로는 100% 전출력 그리고 비정상 (abnormal) 상태의 취출수 조건을 고려하였다. 분석에 사용된 열출력 측정 관련 설계값들은 Table 2에서 보여진다.

Table 3은 벤츨리 유량계의 측정 불확도에 대한 분석 결과로부터 얻어진 각 인자들의 감도계수와 급수유량 불확도에 대한 기여도를 보여준다.

Table 4 Sensitivity coefficients and contributions of each parameter on steam generator power uncertainty

Parameter	Sensitivity Coefficient*	Contribution** (% of RTP)
$x$	58.83 (%)	0.147
$x_{BD}$	0.0 (%)	0.0
$M_{BD}$	-9.36E-06 (%/lbm/hr)	-0.30
$P_{SG}$	-0.0036 (%/psia)	-0.180
$h_{FW}$	-3.202E+05 (%/btu/lbm)	-0.406
$M_{FW}$	1.11E-05 (%/lbm/hr)	0.734

\*  $(\partial E_{SG}/\partial X_i)/RTP \times 100$  of each parameter  $X_i$  in % RTP

\*\* sensitivity coefficient  $\times \xi_{X_i}$  of parameter  $X_i$

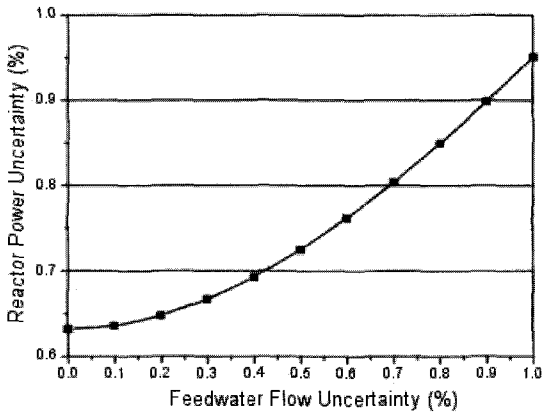


Fig. 6 Reactor power uncertainty vs. feed flow uncertainty

벤츄리 유량계의 불확도에 가장 크게 기여하는 인자는 차압임을 알 수 있다. 이러한 결과는 이물질침적 등에 의해 차압이 과대 지시되면 이는 직접적으로 급수유량 불확도에 영향을 준다는 것을 의미한다.

Table 4는 증기발생기 열출력의 불확도에 대한 분석으로부터 얻어진 각 인자들의 감도계수와 기여도를 나타낸다. 증기발생기 열출력 불확도에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 급수유량이었다. 이러한 분석 결과는 원자력발전소에서 열출력의 정확한 측정이 안전성 측면이나 경제성 측면에서 절대적으로 필요하다는 점에서 급수유량의 정확한 측정이 필수적임을 보여준다. Fig. 6은 급수유량 불확도와 열출력 불확도의 관계를 나타내는데 20%출력 이상에서는 거의 선형적인 관계를 가지고 있음을 보여준다.

원자로 열출력의 불확도 분석에서는 증기발생기 열출력에 의한 불확도가 0.921%이었고  $Q_{\#t}$ 의 불확도는 0.302%인 것으로 나타났다. 통상적인  $Q_{\#t}$  값은 17 MW로서 전체 열출력에 비해 작은 값인데도 불구하고  $Q_{\#t}$ 에 의한 불확도가 크게 나타난 것은,  $Q_{\#t}$ 를 정략적으로 계산하는 것이 매우 복잡하여 설계 경험에 따라 순에너지 유입량의 50%를 불확도로 가정하였기 때문이다.

Table 5는 초음파유량계와 벤츄리 유량계의 측정 불확도에 따른 원자로 열출력의 불확도 분석 결과이다. 벤츄리 유량계의 측정 불확도에 근거한 원자로 열출력의 불확도는 약 0.97%이었고 안전해석 가정치인 2% 불확도에 충분한 여유가 있음을 알 수 있었다. 초음파유량계의 측정 불확도를 적용했을 때 열출력의 불확도는 더욱 낮아짐을 알 수 있었다.

Table 5 Measurement uncertainties of reactor power and feedwater flow-rates

Method	Feedwater(%)	Reactor Power(%)
Venturi meter	1.034	0.969
Cross-correlation UFM	0.420	0.699
Transit time UFM	0.583	0.755

초음파유량계의 측정 불확도가 벤츄리 유량계의 측정 불확도에 비해 작다는 점을 감안하면 당연한 결과일 것이다. 만일 초음파유량계를 벤츄리 유량계 대신 원전의 급수유량 측정에 적용한다면 불확도 개선에 따라 인허가출력 이상으로의 출력증강 (power uprate)도 가능할 것이다. 한편 본 논문에서 분석된 벤츄리 유량계의 측정 불확도는 이물질침적 현상이나 기타 비교정 (decalibration) 조건들을 배제한 결과이기 때문에 이물질침적 현상을 고려한다면 초음파유량계와의 불확도 차이는 더욱 커질 것이다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 원자력발전소의 급수유량 측정에 대한 초음파유량계의 적용성을 평가하기 위해, 초음파유량계의 측정 불확도를 분석하였다. 또한, 열출력의 측정 불확도에 대한 최적 분석을 통해, 초음파유량계의 측정 불확도가 열출력 불확도의 안전해석 가정치를 충분히 만족하는지 여부를 분석하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 상관관계법 및 전파시간차법 초음파유량계의 측정 불확도는 이물질침적 현상이 배제된 조건에서의 벤츄리 유량계 측정 불확도보다 충분히 우수하였다.
- 2) 벤츄리 유량계의 측정 불확도에 가장 지배적인 영향을 미치는 인자는 벤츄리 차압의 측정 불확도이고, 급수유량의 측정 불확도가 열출력의 측정 불확도에 가장 크게 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.
- 3) 급수유량 측정에 초음파유량계를 적용할 경우, 열출력의 측정 불확도가 충분히 개선됨을 알 수 있었다.
- 4) 초음파유량계는 이물질침적 현상에 대한 영향을 받지 않고 우수한 측정 불확도를 보여주기 때문



에, 급수유량 측정에 대한 적용은 발전소의 성능 및 운전 효율을 향상시킬 것이다. 또한 안전해석에서의 열출력 불확도 가정치에 대한 충분한 여유는 향후 출력증강 등에 활용할 수 있는 여지를 보여준다.

## 후 기

본 논문은 과학기술부에서 시행한 원자력연구개발 사업의 연구 결과입니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Kavaklioglu, K. and Upadhyaya, B. R., 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) 김범식 외, 2002, *가동원전 엔지니어링 서비스 기술개발*, 한전기공(주), pp. 1-32~40.
- (3) Doebelin, E. O. 1983, *Measurement Systems Applications and Design*, McGraw-Hill, New York, pp. 571~573.
- (4) 1993, "Flowrate Measurement Causes Unneeded Derating," Nuclear News, pp. 39~40.
- (5) ASME Report, 1971, "Application Part II of Fluid Meters," Research Committee on Fluid Meters, New York, pp. 230~232.
- (6) Somerscales, E. F. C. and Knudsen, J. G., 1981, *Fouling of Heat Transfer Equipment*, Hemisphere Publishing Co., New York, pp. 527.
- (7) 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.
- (8) Lopez, A., 2000, "CROSSFLOW Technical Presentation," ABB, pp. 10.
- (9) CE Nuclear Power LLC., 2000, "Crossflow Feedwater Flow Measurement at YGN Unit 3," A-YG3-PS-0001.