

〈論 文〉

# 유체 누출에서의 음향방출 신호분석

김용민\* · 윤용구\*\* · 김호철\*\*\*

(1989년 6월 26일 접수)

## Analysis of Acoustic Emission Signals from Fluid Leakage

Yong-Min Kim, Young-Ku Yoon and Ho-Chul Kim

**Key Words:** Acoustic Emission Signal(음향방출신호), Critical Leakage(임계누출), Laminar Equivalent Diameter(층류등가지름), Aerodynamic Model(기체역학적 모델), Secondary Flow(이차유동)

### Abstract

Acoustic emission signals due to leak from circular holes of 0.4, 1, 2 and 4mm diameter and rectangular slits of different geometry having the same cross section as 4mm diameter hole was studied both analytically and experimentally. Acoustic emission signals from a wide-band type transducer were transformed to digital signals through a digital oscilloscope, and  $V_{rms}$  and frequency spectrum were obtained by processing digital signals. Relationships between acoustic parameters and fluid mechanical parameters were derived analytically. A quadrupole aerodynamic model was applied in the analysis of leak from the circular holes and  $V_{rms}$  was found to be proportional to the root square of leak rate through the circular hole. A modified model based on dipole source mechanism and laminar equivalent diameter was applied in the analysis of leak signals from the rectangular slits. In the case of constant pressure,  $V_{rms}$  increased as the laminar equivalent diameter of slit decreased. In the case of constant laminar equivalent diameter, however the result was similar to that for leak from the circular hole. The frequency spectra of leak signals shows the same frequency characteristics irrespective of the pressure difference.

### 기 호 설 명

$A_{eff}$  : 등가 단면적

$C_b$  : 출구에서의 음속

$d_{eff}$  : 등가 층류 지름

$\dot{m}$  : 누출률

$P_o$  : 파이프내의 압력 (정체압력)

$P_s$  : 파이프 외부의 압력 (배압)

$\Pi_1$  : 단극자 음향방출원의 단위시간당 방출에너지

$\Pi_2$  : 쌍극자 음향방출원의 단위시간당 방출에너지

$\Pi_4$  : 사극자 음향방출원의 단위시간당 방출에너지

$\rho_o$  : 파이프 내의 유체 밀도

$V_m$  : 측정된 혼합신호의 제곱 평균 제곱근 전압

$V_n$  : 측정된 잡음(noise)의 제곱 평균 제곱근 전압

$V_{rms}$  : 음향 방출신호의 제곱 평균 제곱근 전압

\*한국과학기술원 핵공학과

\*\*정회원, 한국과학기술원 핵공학과

\*\*\*한국과학기술원 물리학과

### 1. 서 론

원자력발전소의 냉각재 누출중에서 냉각재 상실

사고(LOCA)와 같은 대량누출 사고를 제외한 정상 및 과도상태시의 소량 누출에서 문제가 되는 것은 파이프, 밸브와 같은 원자로 냉각재 압력경계(RCPB)의 임의의 부분에서 예기치 않게 일어나는 미확인 누출이다. 이 소량의 누출을 조기에 효과적으로 탐지하여 대형의 누출사고를 미연에 방지하는 것은 원자력발전소의 안전성 증대 및 이용율 향상의 견지에서 대단히 중요한 과제이다.

현재 원자력발전소에서 채택하고 있는 미확인 누출탐지방법에는 (1) 격납용기내의 방사선량 측정, (2) 격납용기의 배수조(sump)의 수위측정, (3) 격납용기의 대기순환 냉각장치의 열부하 측정, (4) 격납용기내의 습도 및 온도측정 등의 4가지 방법이 있다<sup>(1)</sup>.

이들 방법들은 미국 원자력규제위원회(NRC)의 규제지침 1.45<sup>(2)</sup>의 요구조건을 만족하나 누출이 일어났을 때, 누출량에 대한 민감도가 낮고, 누출을 인지하는데 필요한 감응시간이 길며 누출부위의 위치를 찾아내는데 문제가 있다. 따라서, 이런 문제점을 보완하기 위한 누출탐지 방법으로 최근 연구되고 있는 것이 음향방출(acoustic emission)을 이용한 누출탐지방법이다<sup>(3,4)</sup>. 음향방출은 재료에 소성변형, 전위이동, 응력부식균열(SCC)의 성장, 상변태 및 파괴 등과 같은 과도 현상에 수반하는 에너지 방출의 한 형태이며 유체의 유동이 불안정할 경우 그에 따른 유체 밀도의 변화에 의해서도 발생을 기대할 수 있다. 이런 음향방출을 이용한 누출탐지 방법의 장점은 누출 즉시 누출을 탐지할 수 있고 소량의 누출에도 민감하며 관측자가 누출부위에 접근하지 않아도 누출부위의 위치를 파악할 수 있다는 것이다.

음향방출에 관한 여러 가지 실험들이 행하여졌으나 종전의 실험들의 특징은 누출현상을 설명하는데 있어서 필히 수반되어야 할 음향학 및 유체역학을 함께 고려한 고찰이 결여되었고 단지 실험결과와 기록과 보고가 주종을 이루었다. 이는 해석적으로 설명이 곤란한 음향방출 자체의 특징 때문이기도 하지만, 음향방출을 실제 누출탐지에 이용하기 위해서는 누출현상에 대한 기본적인 고찰이 선행되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 음향학적 인자와 유체역학적 인자들 사이의 관계를 고려하여 해석적으로 유도하고 각 누출조건에서 누출신호의 특징을 살피고 나아가 음향방출 신호로서 누출상태를 추정하고자 함을 본 연구의 목적으로 하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 파이프 측면에 뚫린 원통형 구멍과 사각형 틈(Slit)을 통한 누출시 질식 상태에서의 임계누출

파이프 측면에 뚫린 구멍을 통해 포화증기나 압축공기가 누출되는 양상은 축소노즐(convergent nozzle)이나 오리피스(orifice)를 통해 유체가 누출되는 것과 유사하므로 이런 관점<sup>(5)</sup>에서 누출률은

$$\dot{m}_{\text{noise}} = \rho_o C_o A Z \quad (1)$$

이다. 여기서,

$$C_o = \left( \frac{\gamma P_o}{\rho_o} \right)^{1/2}$$

$$Z = \left\{ \frac{2}{\gamma - 1} \left[ \left( \frac{P_b}{P_o} \right)^{2/\gamma} - \left( \frac{P_b}{P_o} \right)^{(2\gamma+1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2} \quad (2)$$

$\rho_o$ : 파이프내의 유체밀도

$P_o$ : 파이프 내의 압력(정체압력)

$P_b$ : 파이프 외부의 압력(배압)

$\gamma$ : 증기일 때 1.3, 공기일 때 1.4

정체 압력을 일정하게 두고 배압을 낮추면 유체의 출구 속도는 증가하지만, 유체의 누출속도가 음속이 될 정도로 배압을 낮추면, 그 이후부터는 배압을 낮추어도 유체의 출구속도는 증가하지 않고 유체의 속도에 전혀 영향을 주지 못하는 질식상태가 되며 이 때의 누출을 임계누출이라 한다. 식 (2)에서  $Z$ 가 최대일 때 임계누출이 되므로

$$\frac{dZ}{d(P_b/P_o)} = 0 \text{에서}$$

$$\frac{P_b}{P_o} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/\gamma - 1} \quad (3)$$

$$\frac{\rho_b}{\rho_o} = \left( \frac{1}{\gamma + 1} \right)^{1/\gamma - 1} \quad (4)$$

임계누출시 출구의 누출속도는 음속과 같으므로,

$$v_b = C_b = \left( \frac{\gamma P_b}{\rho_b} \right)^{1/2} \quad (5)$$

여기서  $C_b$ : 출구에서의 음속

본 실험에서와 같이 배압이 대기압일 때 식 (3)에서 포화증기인 경우 정체압력이 1.83 기압 이상이면 질식상태가 되며, 그 때의 임계누출률은 식 (3), 식 (4)와 식 (5)에서

$$\dot{m}_{\text{noise}} = \rho_b C_b A = \rho_o C_o A \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)} \quad (6)$$

이 된다.

다음으로 파이프 측면에 뚫린 사각형 틈을 통한 임계누출율 계산을 용이하게 할 목적으로 사각형

유체통로에서의 유동특성을 원통형 유체 통로에서의 유동특성으로 환산시 사각형 유체통로의 마찰효과를 좀더 정확히 반영하기 위해 층류 등가지름 ( $d_{eff}$  : laminar equivalent diameter) 개념을<sup>(6,7)</sup>을 도입하면 세로  $a$ , 가로  $b$ 인 사각형 튜를 통한 임계누출률은

$$\dot{m}_{\text{slit}} = \rho_0 C_0 A_{\text{eff}} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(7+1)/2(\gamma-1)} = \dot{m}_{\text{nozzle}} \frac{A_{\text{eff}}}{A} \quad (7)$$

이다.  
여기서,

$$\text{등가단면적 } A_{\text{eff}} = \frac{\pi}{4} d_{\text{eff}}^2,$$

$A$  = 원통형 구멍의 단면적

$$\text{층류등가지름 } d_{\text{eff}} = \Phi^* \left( \frac{a}{b} \right) d_h$$

$$\text{형상 함수 } \Phi^* \left( \frac{a}{b} \right) = \frac{2}{3} + \frac{11}{24} \frac{a}{b} \left( 2 - \frac{a}{b} \right)$$

$$\text{수력 지름 } d_h = \frac{4 \times \text{단면적}}{\text{접수 둘레 (wetted perimeter)}}$$

### 2.2 유체에서의 음향방출원

유체에서의 음향방출은 유체의 불안정한 요동에 의해 유체의 밀도가 변할 때 발생한다. 이 때 유체 요동의 요인으로는 폭발, 연소 및 가열, 유체와 경계면과의 상호작용, 유체 자체의 운동량 변화 등이며, 이들을 음향방출원으로 하는 파동방정식의 해를 구해보면 유체에서의 음향방출시 유체의 불안정한 요동이 폭발, 연소 및 가열에 의한 것이면, 그때의 음향방출원은 단극자 음향방출원이 되고, 유체와 경계면과의 상호작용에 의해서 쌍극자 음향방출원이 되고, 유체 자체의 운동량 변화에 기인할 때 사극자 음향방출원이 된다<sup>(8)</sup>. 이 때 각각의 음향 방출원의 단위 시간당 방출 에너지는 다음과 같다<sup>(9,10)</sup>.

$$\Pi_1 \approx \rho v^4 C^{-1} d^2$$

$$\Pi_2 \approx \rho v^6 C^{-3} d^2 \quad (8)$$

$$\Pi_4 \approx \rho v^8 C^{-5} d^2$$

$\rho$  : 밀도

$v$  : 유체속도

$C$  : 유체에서의 음속

$d$  : 음향방출원의 지름

여기서,

$\Pi_1$  : 단극자 음향방출원의 단위시간당 방출 에너지

$\Pi_2$  : 쌍극자 음향방출원의 단위시간당 방출 에너지

$\Pi_4$  : 사극자 음향방출원의 단위시간당 방출 에너지

### 3. 실험

#### 3.1 온수 및 증기누출 시험루프 (Hot Water and Steam Leak Testing Loop)

Fig. 1의 개략도에서 보듯이 온수 및 증기누출

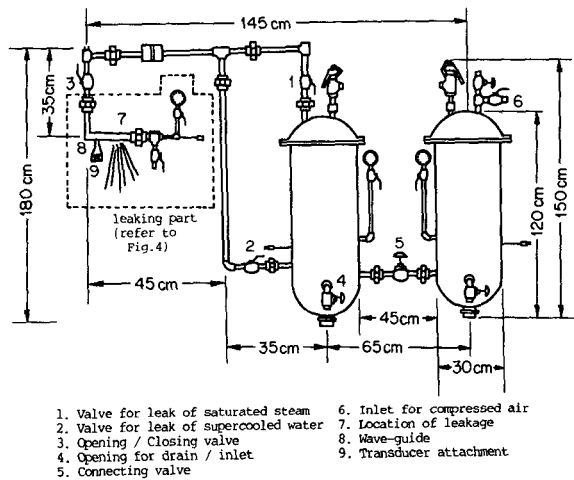


Fig. 1 Experimental hot-water and steam leak testing loop

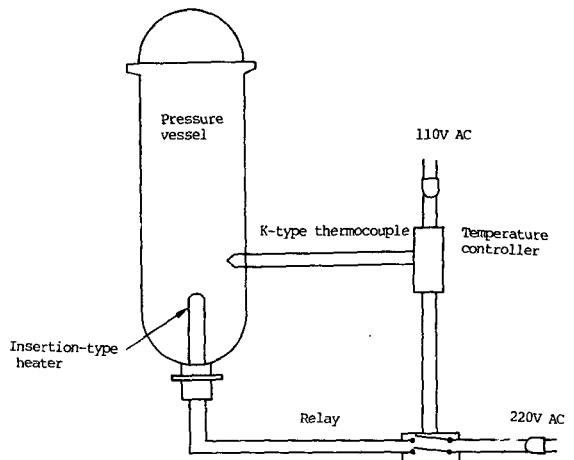


Fig. 2 Schematic diagram of temperature control circuit for hot-water pressure vessel and steam leak testing loop

시험루프는 4kW짜리 투입식 전열기(immersion heater)가 내장된 두께 5mm의 304L 스테인리스강 압력용기 두 개로 구성되어 있다. 이곳에 흡수구 4를 통해 물을 채우고 Fig. 2의 온도조절기로 전열기의 전원공급을 조절하여 압력용기내의 계기 압력을 1기압 이상 5기압 이하에서 일정하게 유지하면서 누출이 실험에 필요한 시간동안 정상상태에서 일어나도록 하였다. 이때 밸브 1과 밸브 3을 개방하여 포화증기를 누출시켰다.

3.2 신호포착 및 처리장치

Fig. 3은 음향신호포착 및 처리장치의 개념도인데 실험장치의 진동 및 주위소음에 의한 저주파수 영역의 영향을 제거하고 순수하게 누출에서 전파되는 고주파수 영역의 신호를 포착하기 위해 탐촉자(transducer)를 100kHz-2MHz 와이드 밴드 타입(wide band type)을 사용했고, 필터는 125kHz-2MHz 밴드 패스타입(band pass type)을 사용하였다.

실험중 수시로 제공 평균제공전압( $V_{rms}$ : root mean square voltage)과 주파수 스펙트럼을 관찰하여 실험상태를 점검하기 위해서 Omega Engineering사의 전위기록계와 Hewlett-Packard사의 모델 3585A 스펙트럼 분석기를 사용하였다. 실제 실험결과 및 고찰에 필요한 누출신호의  $V_{rms}$ 와 Fourier 변환에 의한 주파수 스펙트럼은 Nicolet사의 모델 2090 디지털 오실로스코프에서 애널로그 신호를 디지털 신호로 변환시켜 GPIB(general purpose interface bus)를 통하여 컴퓨터로 보내어져 계산하여 얻었다.

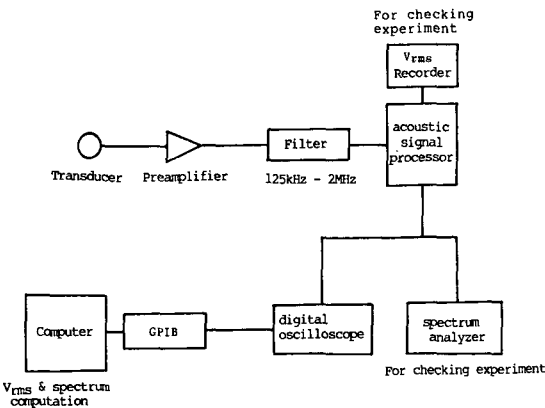


Fig. 3 Conceptual diagram of acoustic-signal acquisition and processing equipment

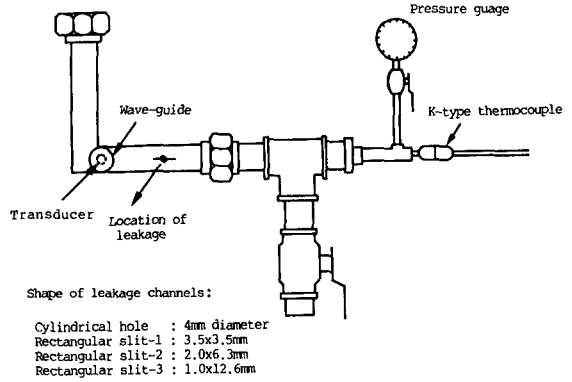


Fig. 4 Magnified diagram of the leaking part in the testing loop shown in Fig. 1

3.3 누출 부위

Fig. 4에 나타낸 온수 및 증기누출 시험루프의 누출이 일어나는 부분에 부착된 K-형 열전대와 압력계는 누출이 일어날 때의 온도와 압력을 측정하기 위한 것이다. 파이프의 곡률 때문에 탐촉자를 파이프에 직접 부착하기가 곤란하므로 원뿔형 웨이브 가이드(horn type wave guide)를 용접한 후 웨이브가이드 전면의 평평한 곳에 탐촉자를 부착하였다.

Fig. 4는 Fig. 1의 누출부위를 확대한 개략도로서 웨이브 가이드, 탐촉자, 누출지점의 위치 및 누출형상의 기하학적 크기를 나타냈는데 사각형의 면적은 지름 4mm의 원통형 구멍과 같도록 가로와 세로의 크기를 변화시켰다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 원통형 구멍의 지름이 일정할 경우  $V_{rms}$ 와 누출률과의 관계

실험에 있어서 디지털 오실로스코프의 데이터 채집률은 200 ns/point로 하였으며, 하나의 실험조건에 대한 데이터 총수는 4096 point이다. 측정된 신호에는 음향방출에 의한 신호뿐 아니라, 잡음(noise)이 혼합되어 있으므로 신호의  $V_{rms}$ 를 다음과 같이 얻었다<sup>(11)</sup>.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_m^2 - V_n^2}{\text{증폭률}}}$$

여기서,

$V_m$ : 측정된 혼합신호의 제공 평균 제공전

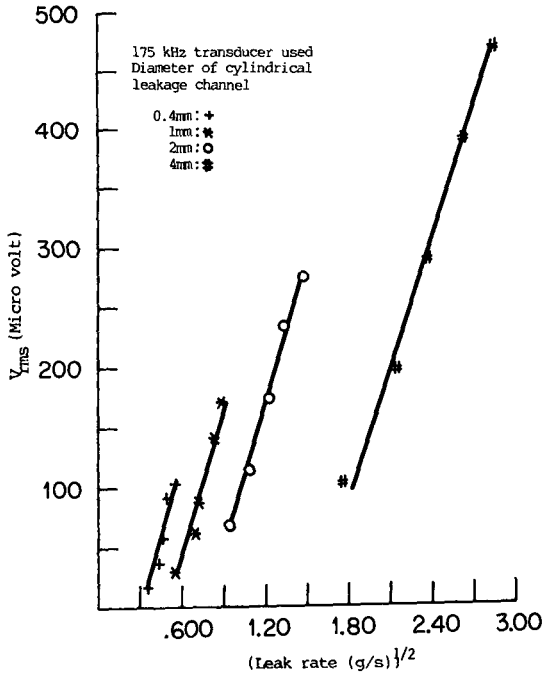


Fig. 5 Root mean square voltage ( $V_{rms}$ ) of the acoustic signal as a function of  $(\text{leak rate})^{1/2}$  for leakage through various cylindrical channels with indicated constant diameters

전압

$V_n$  : 측정된 잡음의 제곱 평균 제곱근 전압 (2~5 $\mu$  Volts)

$V_{rms}$  : 음향방출신호의 제곱평균 제곱근 전압

주 영상 실험<sup>(12)</sup>의 오리피스에 의해 측정된 누출률과  $V_{rms}$ 를 이용하여 그린 Fig. 5에서 원통형 구멍의 지름이 일정하고 누출유체가 포화증기일 때,  $V_{rms}$ 는 누출률의 제곱근( $m^{1/2}$ )에 대해 선형적으로 비례함을 알 수 있다. 이것은 다음과 같이 설명된다.

정체압력이 2기압 이상 6기압 이하이고 배압이 대기압일 때 누출은 2.1절에서 논의한대로 질식상태에서의 임계누출이므로 유체의 누출속도는 음속과 같다. 그리고, 원통형 유체통로를 통한 누출은 급격한 압력감소에 의한 난류제트분사로서 유체팽창에 기인한 유체자체의 운동량 변화만이 존재하며, 폭발, 연소 및 가열이나 유체와 유체통로 사이에 힘을 주고 받을 만한 상호작용이 존재하지 않으므로, 사극자 음향방출원만을 고려하는 Lighthill의 기체역학적 모델(aerodynamic model)로서 설명된

다.<sup>(8,9)</sup>

식 (8)에서 사극자 음향방출원의 단위 시간당 방출에너지를 임계누출에 적용하면  $\Pi_4 = \rho_o v^3 C_o^{-5} d^2$ 에서 임계누출에서  $v = C_o$ 이면 원통형 유체통로에서의 임계누출시 사극자 방출원에 의한 단위시간당 방출에너지는

$$\Pi_{hole} = \rho_o C_o^3 d^2 \tag{9}$$

이며, 지름이 일정하므로

$$\Pi_{hole} \propto \rho_o C_o^3 \tag{10}$$

이다.

기체상태방정식에서 밀도

$$\rho_o = \frac{P_o}{RT_o} \tag{11}$$

그리고, 유체에서의 음속은

$$C_o = \left( \gamma \frac{P_o}{\rho_o} \right)^{1/2} \tag{12}$$

식 (11)과 식 (12)를 식 (10)에 대입하면,

$$\Pi_{hole} \propto P_o \tag{13}$$

그리고, 임계누출률은 지름이 일정할 때

$$\dot{m}_{hole} \propto \rho_o C_o \tag{14}$$

식 (12)를 식 (13)에 대입하면,

$$\dot{m}_{hole} = \gamma \rho^{1/2} P^{1/2} \text{이고, } \rho \propto P \text{이므로}$$

$$\dot{m}_{hole} \propto P_o \tag{15}$$

식 (13)과 식 (15)에서

$$\Pi_{hole} \propto \dot{m}_{hole} \tag{16}$$

이다.

음향방출신호가 탐측자에 의해 전기신호로 변환되었을 때 단위시간당 방출에너지와 음향방출 신호의 평균 제곱근전압과의 관계는<sup>(13)</sup>

$$\Pi_{hole} = \frac{1}{t_f - t_o} \int_{t_o}^{t_f} v(t)^2 dt = V^2_{rms} \tag{17}$$

여기서

$t_o$  : 신호 포착 초기시간

$t_f$  : 신호 포착 최종시간

$v(t)$  : 시간에 대한 신호진폭

식 (16)과 식 (17)에서  $V_{rms} \propto m^{1/2}_{hole}$ 를 유도할 수 있으며 Fig. 5의 결과를 설명할 수 있다.

4.2 사각형 틈을 통한 누출시 압력이 일정할 때  $V_{rms}$ 와 누출률과의 관계

Fig. 6에는 세로/가로 각각 3.5/3.5mm, 2/6.3mm, 1/12.6mm인 사각형 틈을 통해 누출이 일어날 때  $V_{rms}$ 와 누출률과의 관계가 나타나 있다. 여기서,  $V_{rms}$ 은 4.1절과 같은 방법으로 계산하였으며 누출률의 계산시 사각형 틈의 단면적은 실제 단

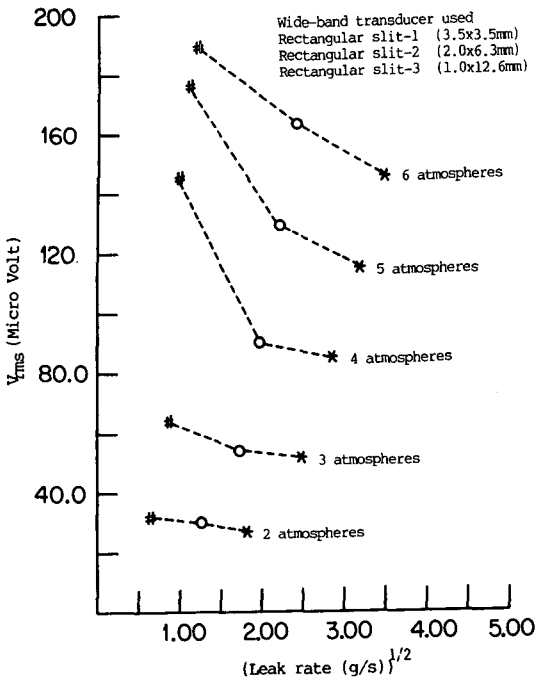


Fig. 6  $V_{rms}$  as a function of (leakage rate)<sup>1/2</sup> for leakage through rectangular slits under indicated constant pressures

면적이 아니고 2.1절에서 논의한 것처럼 사각형 틈을 원통형 구멍으로 환산한 등가 단면적( $A_{eff}$ )과 지름 4mm인 원통형 구멍의 측정된 누출률을  $m_{hole}$ 로 하여 식 (7)과 같이 계산하였다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 압력이 일정하고 세로가 감소할수록, 즉 등가 층류지름이 감소하여 누출률이 감소할 때 원통형 구멍의 경우와 같이 기체역학적 모델을 적용하면  $V_{rms}$ 의 수준도 감소하겠지만 결과는 반대가 된다. 이것은 다음과 같이 설명할 수 있다.

사각형 틈을 통해 누출이 일어날 경우에는 누출 유체가 유체통로와 접촉하는 면적이 동일한 단면적의 원통형 구멍의 경우보다 증가하고 유체와 유체통로간의 마찰이 증가하며 사각형 유체통로의 모서리에서는, 원통형 구멍에서는 볼 수 없는, 이차유동(secondary flow)이 나타나는 데 이들은 누출유체와 유체통로간의 상호작용의 요인이 되며 쌍극자 음향방출원으로서 작용한다. 따라서 사각형 틈의 경우에는 쌍극자 음향 방출원을 유체자체의 운동량 변화에 의한 사극자 음향방출원과 함께 고려해야

한다. 그러므로, 사각형 유체통로를 통한 임계누출시 사극자 음향 방출원과 쌍극자 음향방출원을 고려할 때 식 (8)에서 단위시간당 방출에너지는 다음과 같다.

$\Pi_{slit-1}$  : 임계누출시 3.5/3.5mm 사각형 틈에서의 단위시간당 방출에너지

$\Pi_{slit-2}$  : 임계누출시 2/6.3mm 사각형 틈에서의 단위시간당 방출에너지

$\Pi_{slit-3}$  : 임계누출시 1/12.6mm 사각형 틈에서의 단위시간당 방출에너지

$$\begin{aligned} \Pi_{slit-1} &= K_{2slit-1} \rho C^3 d_{eff}^2 \text{slit-1} \\ &\quad + K_4 \rho C^3 d_{eff}^2 \text{slit-1} \\ &\propto (K_{2slit-1} + K_4) d_{eff}^2 \text{slit-1} \\ &\propto K_{slit-1} d_{eff}^2 \text{slit-1} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{slit-2} &= K_{2slit-2} \rho C^3 d_{eff}^2 \text{slit-2} \\ &\quad + K_4 f P q C^3 d_{eff}^2 \text{slit-2} \\ &\propto (K_{2slit-2} + K_4) d_{eff}^2 \text{slit-2} \\ &\propto K_{slit-2} d_{eff}^2 \text{slit-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{slit-3} &= K_{2slit-3} \rho C^3 d_{eff}^2 \text{slit-3} \\ &\quad + K_4 \rho C^3 d_{eff}^2 \text{slit-3} \\ &\propto (K_{2slit-3} + K_4) d_{eff}^2 \text{slit-3} \\ &\propto K_{slit-3} d_{eff}^2 \text{slit-3} \end{aligned}$$

여기서,

$d_{eff\ slit-1}$  : 3.5/3.5mm 사각형 틈의 층류등가 지름

$d_{eff\ slit-2}$  : 2/6.3mm 사각형 틈의 층류등가 지름

$d_{eff\ slit-3}$  : 1/12.6mm 사각형 틈의 층류등가 지름

식 (18)에서 상수  $K_{slit-1}$ ,  $K_{slit-2}$ ,  $K_{slit-3}$ 의 물리적 의미를 알아보기 위해 임계누출시 단위시간당 음향 방출 에너지를 일반적으로 표시하면

$$\Pi = K \rho C^3 d^2 \propto K \rho C^2 \frac{\pi d^2}{4} C \propto K \frac{1}{2} m C^2 \text{이다.}$$

윗 식에서  $K$ 는 임계누출시 유체의 운동에너지가 음향방출 에너지로 변환될 때의 효율이므로, 상수  $K_{slit-1}$ ,  $K_{slit-2}$ ,  $K_{slit-3}$ 는 사각형 유체통로에서의 에너지 변환효율임을 알 수 있다. 그리고, 사각형 유체통로에서의 에너지변환 효율이 나와 있는 Table 1에서 알 수 있듯이 등가층류지름이 감소할수록 누출유체와 유체통로 사이에 접촉면적이 넓어지고 이차유동에 의한 상호작용의 증가 때문에 에너지 변환 효율이 증가하여 Fig. 6과 같은 결과가 나타난다.

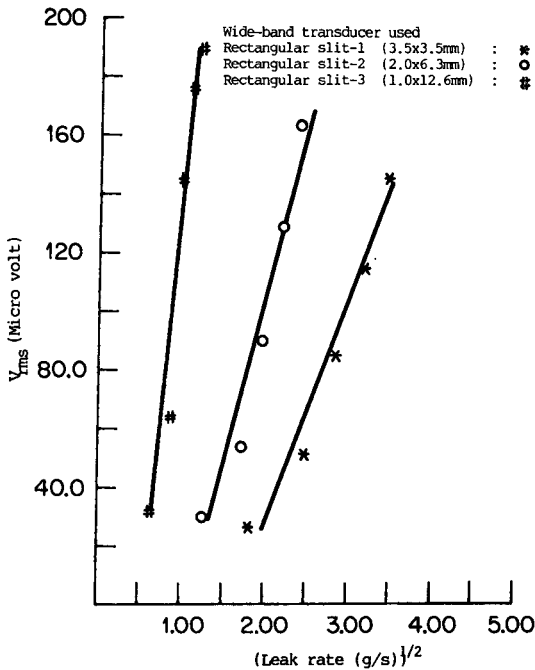
**Table 1** Energy conversion efficiencies for fluid leakage channels as determined from the slopes of the ( $V_{rms}$ ) vs (leak rate)<sup>1/2</sup> diagram shown in Fig. 8

	Height × Width	Equivalent laminar diameter	Energy conversion efficiency
4mm diameter cylindrical channel		4mm	$0.27 \times 10^{-11}$
Rectangular slit-1	3.54 × 3.54	3.98mm	$0.37 \times 10^{-11}$
Rectangular slit-2	2.0 × 3.6	2.76mm	$0.97 \times 10^{-11}$
Rectangular slit-3	1.0 × 12.6	1.36mm	$6.01 \times 10^{-11}$

(Wide-band transducer used)

**4.3 사각형 틈을 통한 누출시 등가층류지름이 일정할 경우  $V_{rms}$ 와 누출률과의 관계**

Fig. 7에는 세로/가로가 각각 3.5/3.5mm, 2/6.3mm, 1/12.3mm 사각형 틈들에 대해  $V_{rms}$ 와 누출률과의 관계가 나타나 있다. 사각형 유체통로의 세



**Fig. 7**  $V_{rms}$  as a function of (leak rate)<sup>1/2</sup> for leakage through various rectangular slits with constant effective diameters

로/가도가 일정할 때 즉 등가층류지름이 일정하면 누출률이 증가함에 따라 원통형 유체통로의 경우와 같이  $V_{rms}$ 도 증가함을 알 수 있다. 이것은 사극자 음향방출원과 쌍극자 음향방출원을 고려한 다음 식으로써 설명된다.

$$\begin{aligned} \Pi_{slit} &= K_{2slit}\rho C^3 d_{eff}^2 + K_4\rho C^3 d_{eff}^2 \\ &= (K_{2slit} + K_4)\rho C^3 d_{eff}^2 = K_{slit}\rho C^3 d_{eff}^2 \end{aligned} \quad (19)$$

여기서,  $\Pi_{slit}$ 은 사각형 유체통로를 통한 누출시 단위시간당 방출에너지이고  $K_{slit}$ 는 사각형 유체통로에서의 에너지변환 효율이다.

그리고, 등가층류지름이 일정한 사각형 틈을 통한 임계누출률은

$$\dot{m}_{slit} \propto \rho C \quad (20)$$

식 (19)와 식 (20)을 가지고 4.1절과 같이 전개하면,  $V_{rms} \propto m^{1/2}_{slit}$ 을 유도할 수 있으며, Fig. 7의 결과를 설명할 수 있다.

**4.4 원통형 구멍을 통한 누출과 사각형 틈을 통한 누출 비교**

Fig. 8에는 지름 4mm인 원통형 구멍과 세로/가도가 각각 3.5/3.5mm, 2/6.3mm, 1/12.6mm인 사각형 틈을 통한 누출시 누출량의 제공근에 대한  $V_{rms}$ 의 값들이 함께 표시되어 있는데 원통형 구멍을 통한 누출시 누출량은 가장 큼에도 불구하고  $V_{rms}$  수준은 가장 낮다. 이것은 사각형 틈을 통한 누출의 경우 사극자 음향 방출원뿐 아니라, 쌍극자 음향 방출원이 동시에 음향방출원으로서 작용하며, 쌍극자 음향방출원의 효과가 사극자 음향방출원의

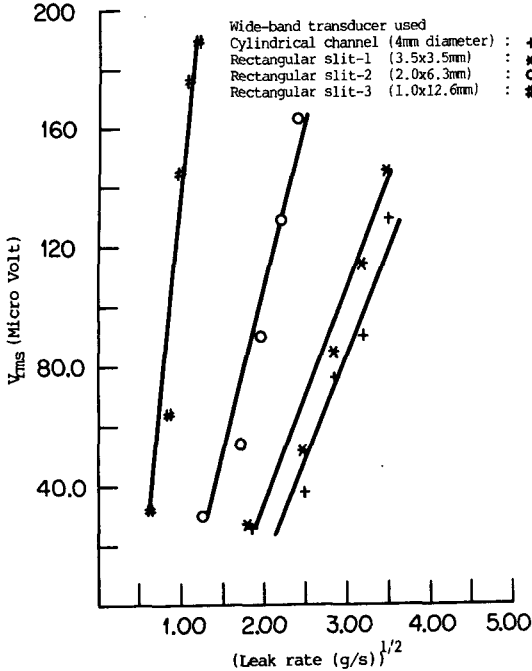


Fig. 8 Comparison of  $V_{rms}$  as a function of (leak rate)<sup>1/2</sup> for leakage through a cylindrical channel and rectangular slits of different geometries

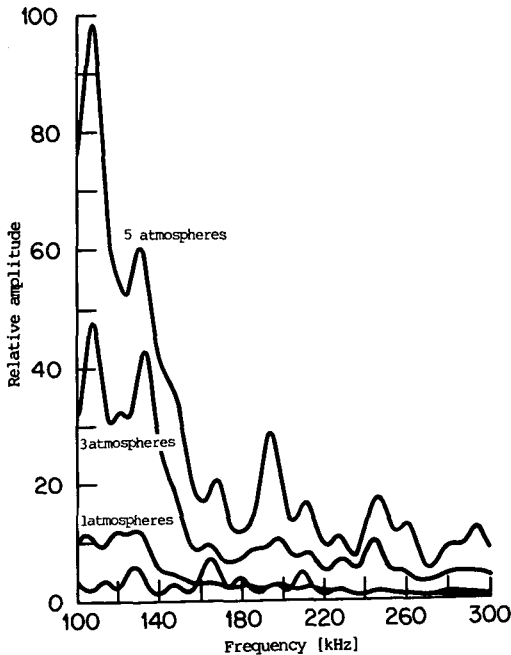


Fig. 9 Acoustic emission frequency spectra for leakage under different pressures (gauge) through a 4mm diameter cylindrical channel

효과보다 현저하기 때문이다.

#### 4.5 주파수 스펙트럼의 분석과 소량누출에 대한 민감도

Fig. 9는 지름 4mm 원통형 구멍을 통해 누출이 일어날 때 1계기압, 3계기압, 5계기압에서의 주파수 스펙트럼을 나타내는데 공명이 일어나는 주파수는 같고, 단지 그 진폭만이 변하는 것을 보여주고 있다. 여기서 1계기압 이하의 적은 누출에서도 주변잡음과 현저히 구별된다는 것은 음향방출을 이용한 누출탐지방법이 소량의 누출에 대해서도 양호한 민감도를 가진다는 것을 시사해 준다.

#### 5. 결 론

(1) 파이프 측면에 뚫린 원통형 구멍을 통한 누출 시 사극자 기체역학(aerodynamic) 모델을 적용할 수 있다. 누출 지름이 일정할 경우  $V_{rms}$ 은 누출량의 제곱근에 선형적으로 비례함이 해석적으로 유도되는데 이 관계는 실험으로 확인되었다.

(2) 사각형 틈을 통한 누출시에는 유체자체의 운동량 변화에 의한 사극자 음향방출원 뿐만 아니라 누출유체와 유체통로와의 접촉면적 증가와 이차유동에 의한 상호작용으로 인한 쌍극자 음향방출원을 함께 고려해야 한다.

(3) 사각형 유체통로에서 세로가 작아질수록 즉 등가충류지름이 감소할수록, 유체의 운동에너지가 음향방출 에너지로 변환되는 효율이 증가한다.

(4) 원통형 구멍을 통한 누출과 사각형 틈을 통한 누출을 비교하면 쌍극자 음향방출원에 의한 효과가 사극자 음향 방출원에 의한 효과보다 현저하다.

(5) 주파수 스펙트럼에서 누출형상이 일정하면 누출률의 증가에 따라 진폭은 증가하지만 공명주파수는 일정하다.

#### 참 고 문 헌

- (1) KEPCO, "Preliminary Safety Analysis Report for KNU 7&8", CHAPT.5.
- (2) NRC, 1973, "Reactor Coolant Pressure Boundary Leakage Detection Systems", U.S. Atomic Energy Commission Regulatory Guide 1.45.
- (3) Smith, J.R., Rao, G.V. and Gopal, R., 1979, "Acoustic Monitoring for Leak Detection in Pressurized Water Reactor", ASTM STP 697, pp. 177~204.



- (4) Kupperman, D.S. and Claytor, T.N., 1985, "Acoustic Leak Detection for Reactor Coolant Systems", Nucl. Eng. and Design, Vol. 86, pp. 13~20.
- (5) White, F.M., 1986, "Fluid Mechanics", McGraw Hill, New York, pp. 511~582.
- (6) Demuren, A.O. and Rodi, W., 1984, "Calculation of Turbulence-Driven Secondary Motion in Non-Circular Ducts", J. Fluid Mech., Vol. 140, pp. 180~222.
- (7) Jones, Jr., O.C., 1976, "An Improvement in the Calculation of Turbulent Friction in Rectangular Ducts", J. Fluid Eng., June, Vol. 98, pp. 173~181.
- (8) Morse, P.M. and Ingard, K.U., 1968, "Theoretical Acoustics", McGraw Hill, New York, pp. 322~331.
- (9) Lighthill, M.J., 1952, "On Sound Generated Aerodynamically", Proc. Roy. Soc. A11, pp. 564~587.
- (10) Morse, P.M. and Ingard, K.U., 1968, "Theoretical Acoustics", McGraw Hill, New York, pp. 760~769.
- (11) Kim, H.C. and Kish, T., 1979, "Acoustic Emission Energy Release in Polycrystalline Al", Phys. Stat. Soc. (a) 55, 189.
- (12) 주영상, 1984, "유체누출시 발생하는 Acoustic Emission", 석사논문, 한국과학기술원, 핵공학과.
- (13) Beranek, L.L., 1971, "Noise and Vibration Control", McGraw Hill, New York, pp. 126~127.