

# 칼리머 증기발생기에서 물-소듐 반응에 의한 소음 발생과 수소 기포의 소음 흡수

○김태준\*, Valeri S. Yughay\*\*, 황성태\*  
\*한국원자력연구소  
\*\*핵물리공학연구소(러시아)

## Noise Generation by Water-Sodium Reaction and its Absorption on Hydrogen Bubbles for KALIMER Steam Generator

○Tae-Joon Kim\*, Valeri S. Yughay\*\*, Sung-Tai Hwang\*  
\* Korea Atomic Energy Research Institute, Taejon, Korea  
\*\* Institute for Physics and Power Engineering, Obninsk, Russia

### ABSTRACT

The experimental results of sodium-water reaction noise measurement in frequency range 1~200kHz are presented. The experiments of noise generation under the condition of sodium test facility, water leak rate 0.01~1.2 g/s and temperature of sodium 250~500°C, were carried out. From theoretical study it is noted that the noise resonant attenuation on hydrogen bubbles in liquid sodium plays the significant role for leak noise spectra formation. Interaction of leak noise and hydrogen bubbles in sodium being accompanied by thermal, emission and viscosity energy dissipation was studied.

Acoustic noise spectra were investigated from point of view of water leak detection in sodium/water steam generator. The results of sodium-water reaction noise absorption on hydrogen bubbles in liquid sodium by temperature 250~500°C are presented. The theoretical model of noise absorption using the coefficients of attenuation was developed. From calculation the coefficients of attenuation were estimated.

### 1. 서론

원자력 발전의 개발 중심은 아시아 지역 국가인 중국, 한국, 일본에서 앞서 계획되고 있고 그 다음 아프리카, 남아메리카 순으로 개발 계획이 되어질 것으로 IAEA는 예측하고 있다. 또 IAEA는 15~20년 후의 유럽, 미국에서는 원자력 발전소의 개발은 중단되어 갈 것이며, 동유럽 국가들은 핵 개발을 억제해 갈 것이며, 아시아 국가들은 급속한 원자력 개발을 예측하였다. 약 15년 후에 원자로 설계를 위하여 최고의 기계장치, 운전 및 유지전문적 기술이 사용되며 원자력 에너지의 안전성을 상승시키기 위한 확인된 기술이 요구되어진다.

과거 50년 동안 소듐 냉각 방식의 액체금속로(fast breeder reactor) 개발의 내력을 가지고 있을 뿐만 아니라 25년의 풍부하고 성공적인 소듐

냉각방식의 액체 금속로의 경험이 축적되었다. 그러나 아직까지 좋지 않은 민감도와 응답성 때문에 원만히 검출되는 모니터링 장치는 없다. 이런 모니터링 장치가 운전되고 있는 원자력 발전소의 비상 시스템은 여러 가지 고장이 잦으며, 모니터링과 비상 시스템의 불안전성을 극복하기 위한 장치 개발이 필요하다. 안전성에 관해서 러시아, 미국, 프랑스, 일본 등 여러 국가에서 원자력 발전소에 관한 강력한 비상 조치 방법이 요구되었다.

현재의 원자로 소음 해석 방법은 다음의 주요 영역에서 사용된다. 1차 계통과 증기발생기의 느슨해진 부품의 모니터링, 압력 용기 및 내부의 진동 모니터링, 증기 발생기와 isolation 발브의 건전성을 확인하기 위한 누출 모니터링, 비동 계통의 불안정성과 같은 모니터링, 두 상 흐름 측정을 위한 열역학적인 현상 모니터링 등이

있다[1]. 따라서 원자력발전소의 좀더 새롭고 안전한 응답성 및 검출 신뢰성이 좋은 진단 및 제어 장치 개발이 분명히 필요하다.

특히 소듐-물 증기발생기에서는 아주 높은 음향 누출 검출 방법 개발이 요구되어 수많은 실험적인 조사[2]와 기술적 해결이 필요하였고, 높은 온도에서 음향 측정 장치와 누출 검출 알고리즘 개발 및 누출 발전에 따른 음향 효과 연구가 필요하였다.

## 2. 실험 장치

장치는 러시아의 IPPE 시험시설을 이용하였고, KAERI에서는 Fig.1과 같이 물 mock-up 실험 장치는 SUS304로 만들어진 용기를 사용하였고, 용기의 크기는 높이 2000mm, 지름 500mm, 두께 10mm이다. 물 펌프는 용기 안쪽의 물을 순환시키기 위해서 설치되어 있다. 이것은 SG의 순환 조건과 같이 물이 상승하는 것과 똑같이 만들기 위함이다.

가스 공급 장치는 낮은 압력 공급 장치와 120kg/cm<sup>2</sup>의 고압 공급 장치로 구성되어 있다.

용기의 바깥 표면에 길이 500mm, 지름 5mm인 음향 가이드를 설치하였다. 500mm 간격으로 음향 가이드를 3개 설치하고 음향 센서는 DECI사의 SE1000-H를 사용하였고 pre-amplifier가 연결되어 있다. Fig.1의 (A)와 같이 음향 센서를 DECI의 센서 어댑터를 장착 혹은 탈착이 용이하게 되어 있다. Fig.1의 (B)는 Injector의 구멍(defect) 크기 0.253mm를 보여준다.

신호 분석기는 LabVIEW로 작성되었고 분석은 4 채널이 가능하며, 샘플링은 1024, 2048byte로 하였고, raw 신호와 FFT로 분석한다.

## 3. 누출 현상

### 3.1 KALIMER 증기발생기

KALIMER 증기발생기는 헬리칼 코일형, 수직의 셀-튜브 형 열교환기이다. 흐름은 튜브측으로는 물/스팀, 셀측은 소듐으로 교차 흐름이다. 소듐은 상부 입구를 통하여 증기 발생기로 들어가 튜브 번들을 통하여 흐른다. 공급수는 증기 발생기 바닥에 위치해 있는 튜브 시트를 통하여 공급된다. 공급수는 헬리컬 코일 튜브 번들을 통하여 흐르며 과열 스팀이 발생하는 상부 튜브 출구로 유출된다. 증기 발생기는 잘못된 운전 조건하에서도 견디도록 설계되었다.

Fig.2와 같이 증기발생기의 크기는 높이 8.8m, 지름 2.8m로 설계되었다. Fig.3은 KALIMER 튜브 번들의 튜브 정렬을 보여주며 이것으로부터 BN-600(러시아)와 SuperPhenix(프랑스)의 조건과 비교하면 KALIMER 증기 발생기의 경우 튜브 간격이 약

2배 크기 때문에 누출검출시간의 장점을 가지고 있다.

### 3.2 KALIMER 증기발생기에서 물/스팀 누출 검출

증기발생기에서 소듐으로 스팀/물 누출 가능성 검출은 수소 검출 측정, 음향 검출 측정, rupture disk의 파이프 압력의 측정으로, 물/스팀 누출 정보와 누출 검출 장치로 잘못 운전되는 증기발생기를 감정한다. KALIMER SG에서 물 누출 규모 분류는 다음과 같다.

소규모 누출(Small leak; <10g/sec)이 있고, 중규모 누출(Intermediate leak; 10-1000g/sec)은 일반적으로 약 30 sec 동안 누출이 유지될 때이며, 음향 검출 시스템으로 3 sec 이내에 누출을 판별하여야 한다. 대규모 누출(Large leak; 1kg/sec 이상)은 일반적으로 수 초 동안 계속될 때이며, rupture disk를 파손시키는 수준으로 정의한다.

Fig.4는 구조물의 파괴 과정 때문에 누출의 self-development과 시간, 누출 검출 과정을 보여준다. T1은 매우 작은 누출 속도이며, 누출이 수 시간 동안 아주 안정하다. T2는 누출 통로의 파괴 때문에 누출이 아주 급격하게 증가한다. T2는 아주 짧고 10분 이내이다. 이런 시간으로부터 근접 튜브의 파괴 과정이 시작된다. T3는 근접 튜브의 파괴가 완료되는 시간이며 누출 속도가 매우 높다. T4는 근처 튜브의 2차 누출 때문에 누출량이 매우 높은 수준으로 된다.

Fig.5, Fig.6, Fig.7, Fig.8은 KALIMER 구조재를 사용하였을 때 소듐-물 실험 동안 얻어진 누출 속도와 시간과의 관계를 보여준다. 프랑스, 미국, 러시아 자료와 비교하면 KALIMER 구조재에 대한 실험 결과는 아주 일치한다. 이런 결과를 토대로, KALIMER 증기발생기에서  $\leq 0.01g/s$ 의 누출 검출 민감도,  $\leq 40min$ 의 응답 시간 안에 작은 누출 검출을 위한 기본 요구사항을 정의할 수 있었다[3].

Fig.9는 소듐속으로 극미량(micro), 소규모(small), 중규모(intermediate), 대규모(large) 물 누출 검출 알고리즘이다.

## 4. 음향 전파 특성

### 4.1 음향 측정 대상물인 소듐-물 증기발생기의 특징

구조적으로 증기발생기는 높이/지름이 18.8m/2.8m인 원통 용기이기 때문에, 낮은 주파수 소음 분포로 볼 때 증기발생기는 가느다란 파이프로 간주된다. 용기는 무한 매체에서 보다 작은 한정된

파동 길이로 음속으로 전파 때문에 탄성체이고, 구조재의 소리 파동 길이보다 작은 용기 원주 길이라면 용기의 성질은 탄성이다. 이런 관계에서 볼 때 증기발생기의 파동 전파 속도는 1kHz보다 작은 주파수에서 변화한다. 용기벽의 탄성과 소음 압축성의 관점에서 볼 때 증기발생기의 1kHz에서 파동속도는 상대적으로 약 30% 감소한다.

누출 소음 검출에서 주된 배경 소음은 물 비동 소음이며 검출 장벽이다. 그러므로 누출 소음 검출에 관한 배경 소음의 영향은 다음과 같이 고려함이 바람직하다.

소듐속에서 음속은 냉각수의 상태 변수의 함수이다. 소듐 용융점에서 음속에 관한 계산값으로 볼 때 200℃로 증가하면 5%의 음속이 감소한다.

동은 상태에서 증기발생기의 압력 변화는 소듐속에서 음속 변화로 나타난다.

소듐속에서 고체, 기체성의 불순물은 0.2~200 kHz 범위에서 음향의 국부적인 불균일성으로 나타나기 때문에, 고체 불순물은 밀도에 따라 고려되어야 하며 기체 불순물은 기체 압축성이 고려되어야 한다.

음속은 매체 압축성 변동에 따라 중요하게 작용한다. 그래서 증기발생기 설계가 미치는 영향을 고려하여 주파수 범위를 선정하는 일이며 누출 검출에서 가장 중요한 수단이다.

#### 4.2 소듐속으로 물 누출시 소음 발생 메커니즘

소규모 누출은 검출이 이루어지는 동안 근접 튜브를 손상시키지 않으며, 물/스팀 누출의 검출 과정은 주로 hydrogen gas와 관련되어 있으며 음향 효과에 의해서 영향을 받는다. 따라서 증기발생기의 물/스팀 누출이 동반될 때 여러 가지 가능성의 소음이 발생한다. 즉,

- 증기 발생기의 튜브가 용접되어있는 부분, 혹은 튜브 손상부분에서 스팀 jet의 분사,
- 소듐-물 반응에 의한 hydrogen 기포의 상승과 함께 진동,
- 화학반응 동안 국부 열 방출로 일어나는 누출 부위에서 소듐 비동,
- 누출 증가와 손상 발전 동안에 구조물에서의 음향 방출 등이 음향소음 발생의 원인이 된다.

스팀 jet 분사가 크게 일어날 때 소규모 누출은 기포성이 큰 분사 모드를 가진다. 소듐속에서 진동하는 hydrogen 기포의 공명 주파수는 누출 소음 원천이 된다. 확실히 주파수 영역을 측정하기 위해서 소듐속으로 물 누출에 의해 생긴 hydrogen 기포의 크기 분포를 아는 것이 중요하다. 실험 자료에 기초하여 <10g/h의 누출시 hydrogen 기포의 최초 크기는 2mm 정도이다[5]. 손상 부위에서

떨어져 갈 때 기포 크기는 움직이는 동안 작아진다. 이것은 소듐속에서 hydrogen이 녹아들기 때문이다.

2개 이상의 기포가 합쳐질 때는 큰 기포를 따라 작은 기포가 함께 따라간다. Self-development 누출 동안 초기 손상 크기는 증가하고, 결과적으로 생기는 hydrogen 기포 크기 또한 증가한다. 소듐속으로 물이 누출될 때 bubbling 누출 모드에서 jetting 누출 모드로 이동하며 여러 가지 다른 소음들이 생긴다. 다시 말해서 스팀 jet 분사 소음이 증가한다. 그러므로 증기발생기 속에서 물이 누출되면 복잡한 과정을 거쳐 특징적인 주파수 특성이 사라진다.

#### 4.3 소듐속에서 hydrogen 기포의 누출 소음 감쇠

소듐속에서 음속이 hydrogen 기포에 미치는 간섭은 다음 3가지 에너지 형태로 나타난다.

- Thermal loss는 기포가 뜨거워지면서 소듐으로 열전달이 일어나면서 부피 변화로 생긴 손실 ( $\delta_T$ ),
- Emission loss는 기포를 통해서 sound energy가 확산되면서 생긴 손실 ( $\delta_E$ ),
- Viscosity loss는 소듐속에서 진동하는 hydrogen 기포 주위의 소듐 흐름에 의해서 생긴 손실 ( $\delta_V$ )이다.

전체 감쇠 계수는 thermal loss, emission loss, viscosity loss의 합( $\delta = \delta_T + \delta_E + \delta_V$ )이다.

Fig.10은  $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 의 hydrogen 기포 크기와 감쇠 계수의 주파수 의존성을 나타낸다. 소듐속에서 계산된 hydrogen 기포의 감쇠 계수를 보면 온도 의존성이 가장 크게 나타난다. 270℃에서 500℃로 소듐 온도가 증가하면 음파와 초음파의 주파수 영역에 걸쳐서 생성되고 있음이 관측된다.

계산 결과에 따르면, 350℃에서 최대 피크의 소음 스펙트럼은 음파 주파수 영역 쪽으로 이동하며, 500℃까지 온도가 증가하면, 초음파 영역에서와 마찬가지로 음파 소음 레벨이 상당히 나타남을 알 수 있다.

Fig.11과 Fig.12는 측정거리 1650mm, 여러 가지 누출속도에서 350℃와 500℃ 소듐속으로 물이 누출될 때 소음 스펙트럼을 보여준다.

Fig.13은 누출속도는 0.4, 0.5, 0.6 g/s, 소듐 온도는 350℃, 400℃, 450℃, 500℃이고, 측정거리 1650mm에서 실험한 누출 소음 스펙트럼 결과이다. 나타난 결과를 보면 누출소음 감쇠 값의 계산 결과와 거의 일치한다.

#### 5. 물 속에 아르곤 가스의 injection 동안 소음 발생 메커니즘

## 5.1 아르곤 가스의 운동 모드

물 속으로 아르곤 가스가 누출되는 동안 음향 발생은 아르곤 가스의 성질, 가스 유출 통로의 운동 모드, 물의 성질에 의존한다. 유출 통로를 통하여 아르곤 가스의 viscous 운동은 점성류(laminar) 혹은 난류(turbulent) 일 수 있다. 유출 통로를 통한 아르곤의 난류 운동 동안에 전이의 vortex가 생기고, 압력 진동에 의한 wall boundary pulsation을 만들어 내며, 난류에 의한 누출 소음의 음향 신호를 만들어낸다.

## 5.2 아르곤 분사에 의한 bubbling 모드

매우 작은 압력 차이에서 물 속으로 아르곤 가스를 분사하였을 때, 아르곤 기포의 운동은 압력 차이에서 시작하며 유출 통로의 출구에서 아르곤 기포가 만들어진다. 음향 신호 발생의 원인은 압력 차이 증가로 인하여 가스 jet의 기포를 조깅한다. 이때 물 속에 아르곤 기포의 부피 진동 주파수는 모드 0, 모드 2, 모드 3 등은 다음과 같은 식으로 결정된다[4]. 모드 0에서,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho_w}}$$

모드 2와 모드 3 그리고 그 다음은,

$$f_n = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{(n^2-1)(n+2)\sigma}{\rho R_0}},$$

$$n=2,3,\dots\dots\dots$$

아르곤 기포의 반경  $R_0$ 은 평형 조건하에서 injection 순간에 다음과 같다.

$$d\sigma = (\rho_w - \rho_{Ar}) \frac{4}{3} \pi R_0^3$$

Fig.14는 운동 모드 0과 2, 3의 관계식의 실험 결과를 설명해준다. Fig.14의 (B)에서와 같이 최대 주파수의 피크는 가스 유량 증가에 따라 높은 주파수 밴드 쪽으로 이동하고 있다. 이의 예측으로 볼 때 물 속으로 아르곤 가스의 높은 유량 분사에서는 기포 크기가 감소하는 것을 볼 수 있다. 모드 0에서의 공명 주파수는 기포 자체가 팽창과 수축이 반복하면서 발생하는 주파수 특성이고, 모드 2는 수직으로 상하 방향으로 운동할 때의 주파수 특성이고, 모드 3은 아르곤 가스와 물 사이의 계면에서 non-spherical 운동에 의한 주파수 특성을 나타낸다. 이번 실험에서와 같이 0.253mm의 defect 크기의 injection 시켰을 때 아르곤 기포 크기는 0.77mm로 예측되며 모드 0의 공명 주파수는 2177Hz로 예측된다.

모드 2에서는 70Hz, 모드 3에서는 128Hz이다. Fig.14에서와 같이 약 2kHz의 주파수 밴드에서 최대 피크가 나타남을 볼 수 있어 누출 시에 가스 기포 크기를 예측할 수 있었다.

## 6. 결론

이번 실험과 계산 결과는 칼리머 증기 발생기의 음향 누출 소음 검출을 위한 것이며, 특히 <0.1g/s의 소규모 누출을 검출하기 위함이다.

KALIMER 증기발생기의 음향 누출 소음 검출 개발은 무엇보다도 음향 누출 소음 검출 측정의 민감도, 응답성, 신뢰성이 좋은 누출 검출 기술 개선이 필요하고, 이를 위해서는 raw음향 신호의 adaptive filtering과 neural network 신호처리 및 소음 모니터링과 제어기술이 필요하다.

## 참고문헌

- 1.Reactor Noise SMORN V. Progress in Nuclear Energy, Volume 21. "Proceedings of the Fifth Specialists Meeting on Reactor Noise", Munich, F.R.G. 12-16 October 1987. Pergamon Press. (1988)
2. IAEA-TECDOC-946, "Acoustic signal processing for the detection of sodium boiling or sodium water reaction in LMFBRs", May(1997)
3. Kim Tae-Joon, Valery S. Yughay, Hwang Sung-Tai, "Advantages of Acoustic Leak Detection System Development for KALIMER Steam Generator" (in press)
4. Kim Tae-Joon, Valery S. Yughay, Hwang Sung-Tai, "Simulation of Water/Steam into Sodium Leak Behaviour for Acoustic Noise Generation Mechanism Study" (in press)
5. V.I. Subbotin, e.a., "Detection of Water into Sodium Leak", Proc. IAEA Symp., "Sodium-Cooled Fast Reactor Engineering", Vienna, 1970, pp471.

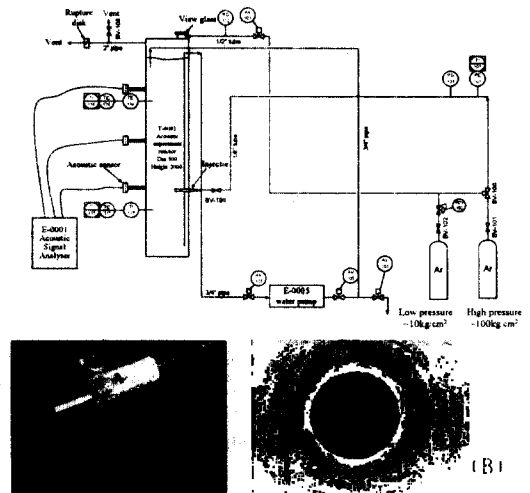


Fig. 1. The Experimental System

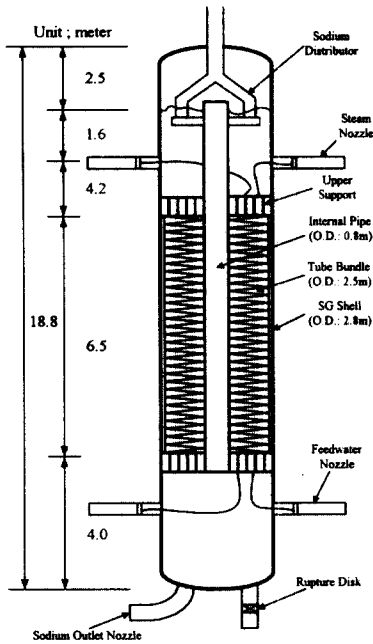


Fig. 2. KALIMER Steam Generator

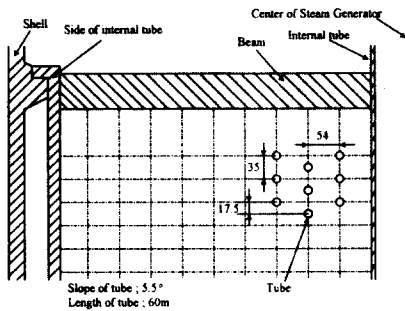


Fig. 3. KALIMER tube Bundle arrangement

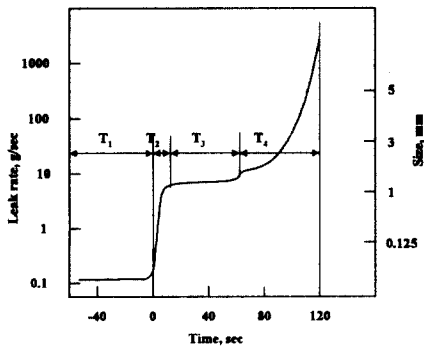


Fig. 4. The Change of Water Discharge into Sodium in Time

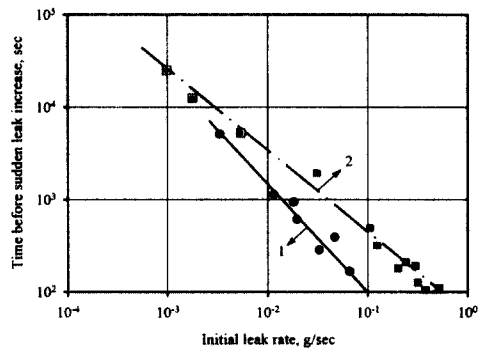


Fig. 5. Time Period from Leak Beginning until Sudden Leak Increase of Water Leak Rate (Sodium Temp. 450°C, Wall Thickness 2.5mm) 1. 2.25Cr 1Mo, 2. X18H9 Steel (Cr18 Ni9)

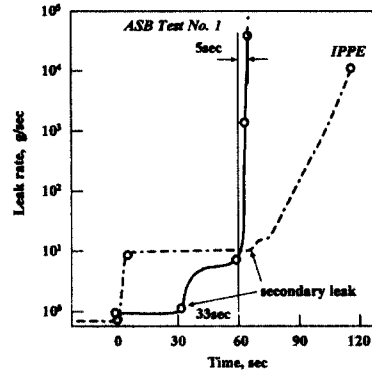


Fig. 6. Time Dependence of Water Leak Flow Rate

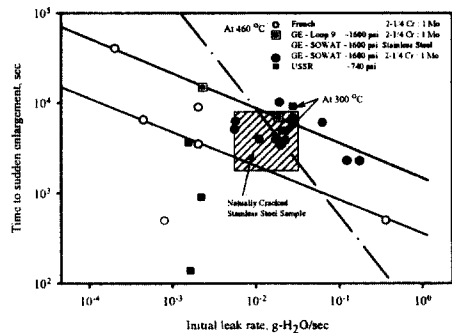


Fig. 7. Time to Sudden Enlargement vs. Initial Leak Rate (•: data of IPPE using KALIMER SG Structure Mat'l, 2.25Cr 1Mo)

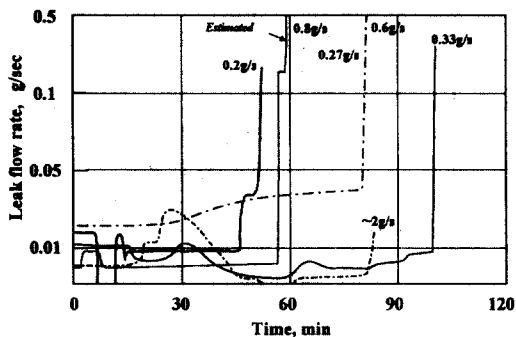


Fig. 8. Time Dependence of Water Leak Flow Rate (Estimated by Results of IPPE Experiments using KALIMER SG Structure Mat'1, 2.25Cr 1Mo)

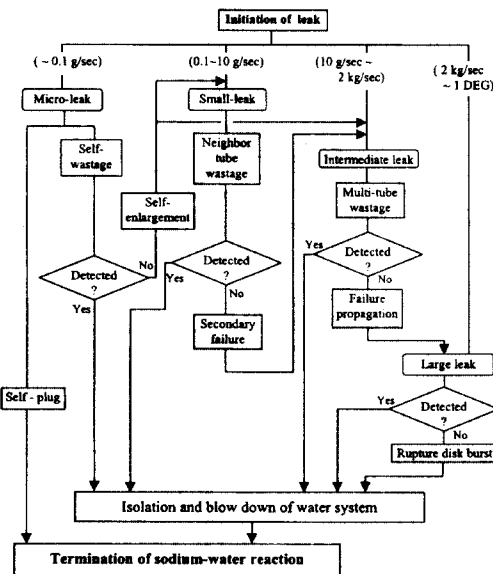


Fig. 9. Detection Procedure for the Termination of Sodium-Water Reaction

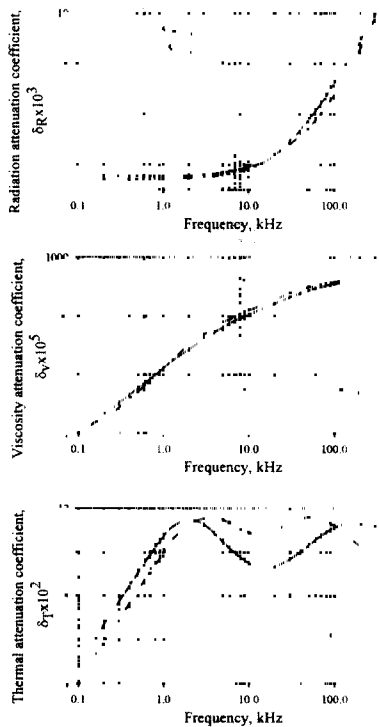


Fig. 10. Thermal, Viscosity and Radiation Attenuation of Sound on Hydrogen Bubbles in Sodium

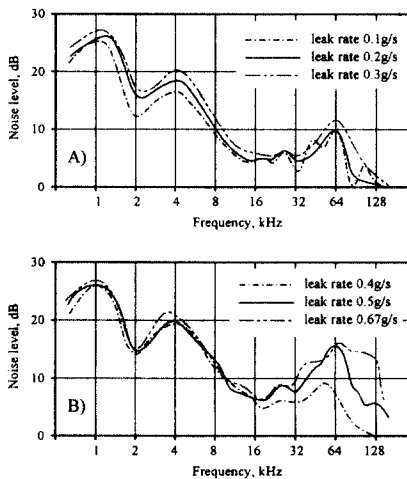


Fig. 11. Leak Noise Spectra at a Sodium Temp. of 350°C, Distance 1650mm

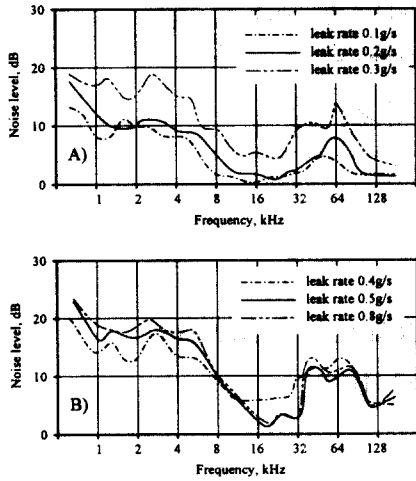


Fig.12. Leak Noise Spectra at a Sodium Temp. of 500°C, Distance 1650mm

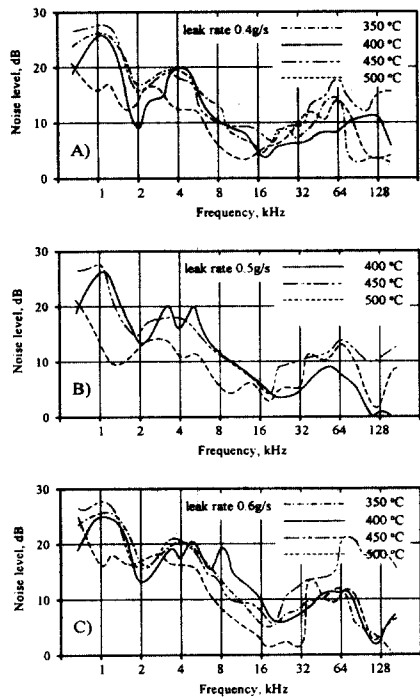


Fig.13. Leak Noise Spectra at Different Sodium Temp., Distance 1650mm

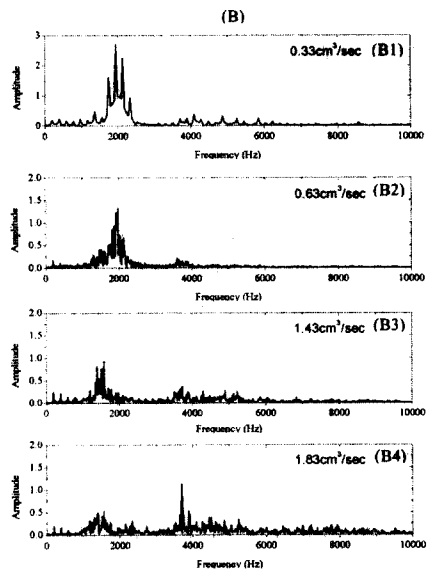
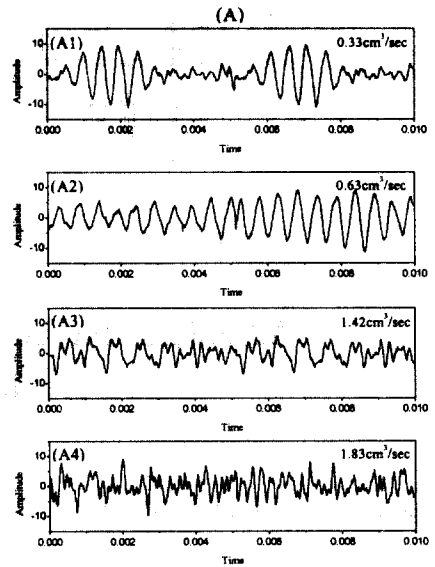


Fig.14. Patterns of Raw Acoustic Signals and FFT Results for its Signals Relative with Changing the Flow Rate, (A): Raw Signals, (B): FFT of Raw Signals