

ONB 측정을 위한 수중 음파 신호 분석

Analysis of Acoustic Sound Signal for ONB Measurement

박상준, 김현일, 한기양, 채희택, 박철

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로 핵연료를 모사한 모의 실험 핵연료 다발을 이용하여 수중 음파 분석을 통한 ONB(Onset of Nucleate Boiling) 시점을 측정하였다. 이를 위하여 수중 마이크로폰과 전단 증폭기, 그리고 증폭된 음파 신호를 수집, 처리할 수 있는 계통을 구성하였다. 수중에서 발생한 음파 신호는 마이크로폰을 통해 전류 신호로 전환되고 이 신호를 다시 주파수 영역에서 분석하면 각 음파 신호를 생성원별로 분류해 낼 수 있다. 출력이 상승하여 가열봉 표면에서 비등이 시작되면, 이 때 기포의 발생과 소멸 과정에서 새롭게 생성된 음파 신호를 확인하는 것으로 ONB 발생 시점을 측정하였다. 서로 다른 유량 조건에서의 실험을 통해 수중 마이크로폰을 통한 ONB 발생 시점의 확인이 가능함을 확인하였다.

Abstract

The onset of nucleate boiling (ONB) was measured in a test fuel bundle composed of several fuel element simulators (FES) by analysing the aquatic sound signals. In order measure ONBs, a hydrophone, a pre-amplifier, and a data acquisition system to acquire/process the aquatic signal was prepared. The acoustic signal generated in the coolant is converted to the current signal through the microphone. When the signal is analyzed in the frequency domain, each sound signal can be identified according to its origin of sound source. As the power is increased to a certain degree, a nucleate boiling is started. The frequent formation and collapse of the void bubbles produce sound signal. By measuring this sound signal one can pinpoint the ONB. Since the signal characteristics is identical for different mass flow rates, this method can be applicable for ascertaining ONB.

1. 서론

ONB(Onset of Nucleate Boiling)는 연료봉 표면에서 냉각수의 비등으로 기포가 발생하기 시작하는 시점이다. 특히 “하나로”와 같은 고출력 연구용 원자로에서 ONB는 정상 운전 동안 충분한 열적 안전 여유를 확보하기 위한 중요한 설계 인자들 중의 하나이다. 충분한 ONB 여유를 가짐으로서 냉각수 채널의 불안정한 냉각수 흐름과 기포 발생으로 인한 중성자속 및 반응도 변화를 방지할 수 있다. ONB의 시점은 그 특성상 육안 관찰에 의존할 수 밖에 없다. 1989년 Kowalsky는 과냉 비등(subcooled boiling) 열전달 실험을 통해 봉 표면의 기포 발생을 육안으로 관찰하여 ONB를 확인하였다[1]. 그러나, 기포 생성을 육안으로 관찰하기 위해서는 어느 정도 기포의 성장이 진행되어야 하며, 핵 비등이 발생하는 시점에서 관측 창 등을 통한 기포 관찰은 실질적으로 매우 어렵다. 또한 여러 개의 봉으로 구성된 다발 형태의 구조에서는 다발 안쪽 부분의 관찰이 불가능하므로 육안 관찰에 의한 정확한 ONB 시점의 측정에는 한계가 있다. 따라서 마이크로폰에 의한 수중 음파 신호를 이용한 ONB 측정 시도가 Binder[2]와 Dimmick[3] 등에 의해 수행되었다. 마이크로폰에 실리는 수중 음파 신호를 주파수 영역에서 분석하면 각각의 고유 주파수를 가진 음원(sound source) 별로 분류할 수 있다. 핵 비등이 발생하기 시작하면 봉 또는 다발 표면에서 매우 작은 기포들이 수없이 생성 및 소멸되며 이 과정이 특정 주파수 대역의 음파 신호를 발생시킨다. 따라서 기포 발생으로 인한 음파 신호의 주파수를 알아내고, 이 주파수에서의 신호 변동을 측정하면 정확한 ONB 시점 측정이 이론적으로 가능하다.

본 실험에서는 하나로의 핵연료봉을 모사한 가열봉을 장전한 모의 핵연료 냉각 채널 실험 장치의 냉각수 출구 부분에 소형 수중 마이크로폰을 삽입시키고 가열봉의 출력을 상승시키면서 육안으로 확인된 비등 전후의 음파 신호의 변화를 측정하였다. 측정한 자료는 real FFT(Fast Fourier Transform)를 통해 주파수 영역에서 분석하였다. 이 과정에서 마이크로폰에 함께 실린 수많은 잡음을 제거시키기 위하여 주파수 영역 스펙트럼에 대한 여과 작업도 software적으로 처리하였다. 서로 다른 냉각 채널의 유량 조건에서 측정한 결과 각 조건에서 비등 이전과 이후 주파수 영역 스펙트럼의 뚜렷한 차이를 발견할 수 있었다.

2. 실험 장치

2.1 시험 다발 및 모의 냉각 채널

전체 실험 장치의 개략도는 그림 1과 같으며, 유동 생성을 위한 왕복 피스톤 펌프와 맥동 방지 장치, 시험봉 가열을 위한 정류기, 응축기 및 열교환기, 장치의 내부 압력 및 온도 유지를 위한 저장 수조와 각종 지시기 그리고 시험 채널 등으로 구성되어 있다[4].

시험 다발은 하나로의 18봉 핵연료 집합체 사각형 부수로(sub-channel)를 모사한 것으로 4 개의 시험봉이 사각 배열을 하고 있다. 이 시험봉들은 상·하부의 봉단접합판(end plate)과 3 개의 중간 격자판(spacer)에 의해 지지된다. 시험봉의 전체 길이는 198 cm로서 가열봉 부분의 길이는 70 cm이며, 위쪽으로 50 cm 그리고 아래쪽으로 78 cm 길이의 확장 튜브를 연결하였다. 가열봉은 실제 하나로 핵연료봉과 기하학적으로 동일한 제원으로 외경 6.2 mm,

두께 0.85 mm의 SUS 튜브에 전기 절연을 위하여 0.12 mm 두께의 aluminum oxide를 코팅하고 다시 8 개의 냉각 핀이 부착된 외경 7.87 mm의 알루미늄 피복관을 입혀 제작한 것이다.

모의 냉각 채널은 하나로 핵연료 조건을 조사할 수 있도록 시험 다발이 장전된 유동관과 안정된 입출구 유동을 얻기 위한 상·하 플레넘으로 구성되어 있다. 가열 부분의 단면은 사각형이며 상부에는 채널 내부를 육안으로 관찰할 수 있도록 투명 창을 마련하였다. 그림 2와 그림 3은 시험봉과 모의 냉각 채널을 나타낸 것이다.

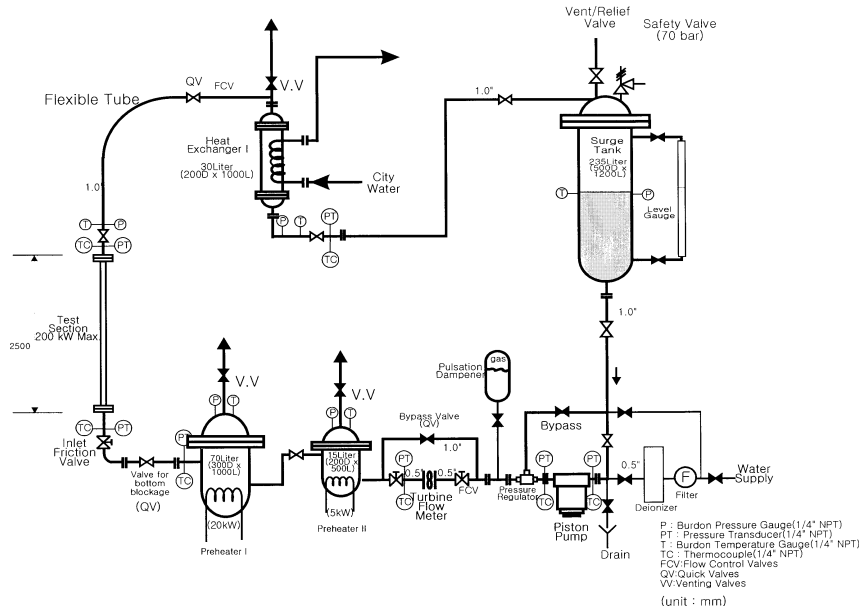


그림 1. 실험 장치 개략도

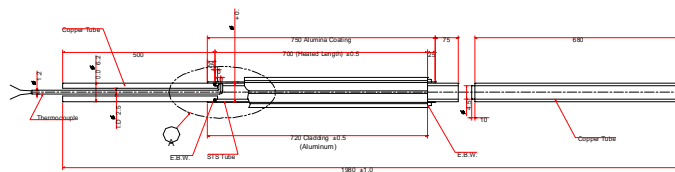


그림 2. 시험봉

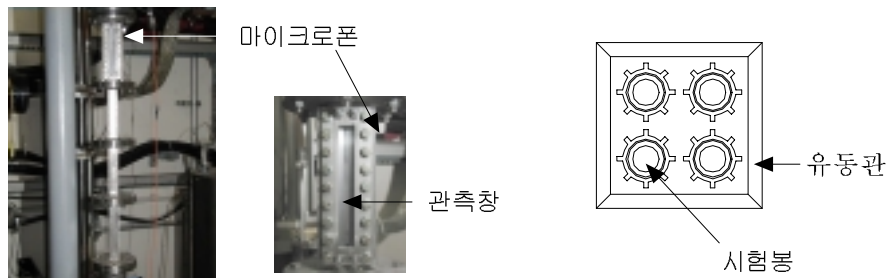


그림 3. ONB 시험 채널 및 부수로

2.2 마이크로폰 및 음파 신호 측정 장치

수중 음파 신호 측정을 위하여 시중에서 쉽게 구할 수 있는 직경 1 cm, 길이 2 cm 정도의 소형 콘덴서 마이크로폰을 사용하였다. 콘덴서 마이크로폰은 외부 음파로부터 떨림판에 전달된 음압(sound pressure)을 전기적 신호로 바꾸어주는 역할을 하며, 넓은 영역의 주파수 범위에 걸친 감도 특성이 양호하여 매우 높은 주파수 범위까지의 음파 신호 측정 및 분석에 폭넓게 사용되고 있다. 마이크로폰이 고온의 냉각수와 직접 접촉해야 하므로 열에 잘 견디는 플라스틱 관 안에 삽입하고 관의 앞쪽 면은 수중에서 발생한 음파가 안쪽의 마이크로폰에 전달될 수 있도록 떨림판을 부착한 후 모의 채널 상부에 삽입하였다.

마이크로폰에서 발생한 전기 신호는 매우 미약하므로 자체 제작한 전단 증폭기를 이용하여 증폭된 신호를 개인 컴퓨터 안에 내장한 I/O board에 연결하였다. 측정된 음파 신호는 I/O board에서 A/D 전환기를 통해 수집된 후 주파수 영역으로 분석된다. 그림 4는 전단 증폭기의 구성 회로도를 나타낸 것이며, 그림 5는 신호 측정 계통을 간단히 나타낸 것이다.

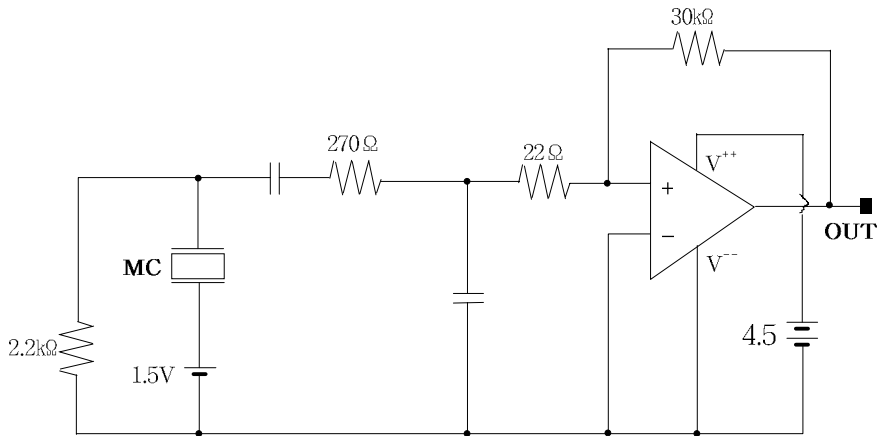


그림 4. 전단 증폭기 회로도

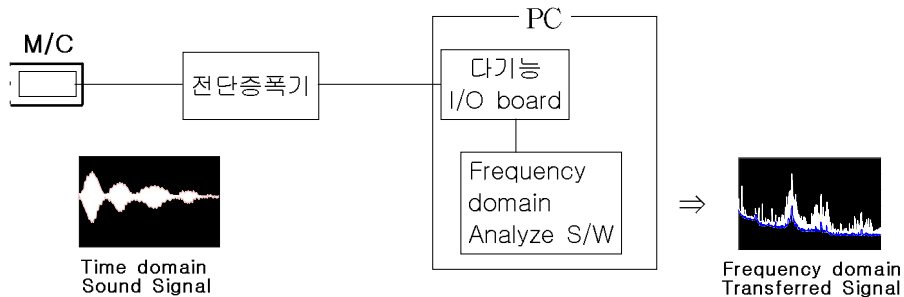


그림 5. 수중 음파 신호 수집 계통도

3. 측정 결과 및 분석

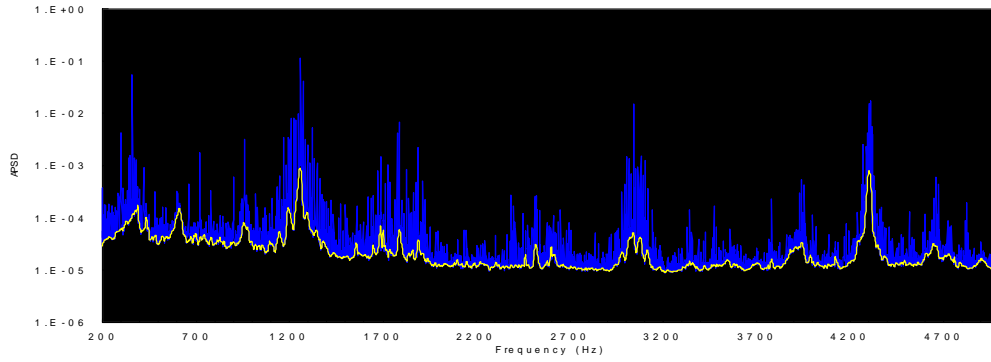
I/O board를 통해 전환된 마이크론의 신호는 10 μ sec 단위로 수집하였다. 수집한 시간 영역의 자료는 한번에 2^{16} (65536)개 씩 real Fast Fourier Transform을 통하여 1.5 Hz ~ 50 kHz 범위의 주파수 영역 함수로 전환하고 이들에 대한 auto power spectrum(APS)을 생산하였다. FFT 결과에 대한 APS는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$APS(X_i) = \frac{FFT(X_i) \times FFT^*(X_i)}{n^2} = \frac{|FFT(X_i)|^2}{n^2}$$

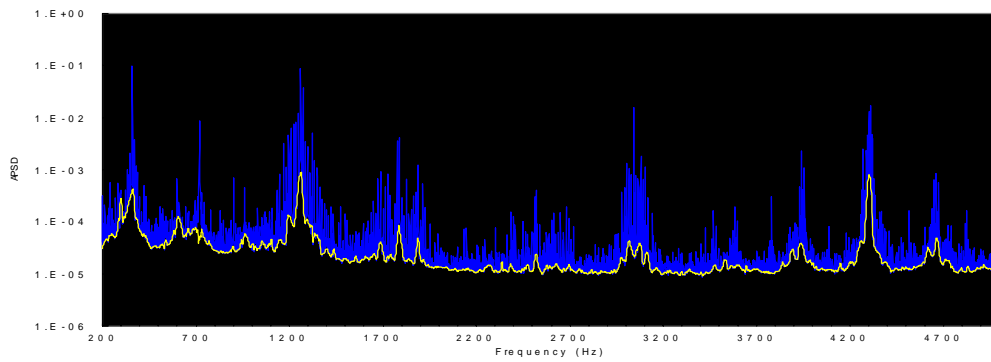
여기서, n은 시간 영역 자료의 수를 나타내며, 실수 부분만에 대하여 Fourier 전환하므로 켈레 복소수(complex conjugate)의 FFT*는 실수 부분과 동일 시 된다. 신호 수집과 APS은 모두 실시간으로 처리되며, 500 회 이상의 APS 결과를 누적 평균하여 측정 결과의 신뢰성을 높이도록 하였다.

그림 6은 100 kg/m²sec의 유량 조건에서 출력에 따라 측정한 APS와 이로부터 불필요한 잡음 요소를 제거한 결과를 함께 나타낸 것이다. 그림의 여과하지 않은 상태의 스펙트럼에서 나타나듯이 수많은 잡음이 여과되지 않은 채로 마이크론에 전달되어 출력 변화에 대한 변화를 확인하기가 어렵다. 이러한 잡음은 시험 다발 주위에 설치된 각종 구동 장치들과 시험 다발 가열에 사용되는 각종 기계 및 고압 전기 장치에서 발생하는 다양한 주파수 대역의 잡음 신호에서 동반한 것이다. 또한 실험에 사용한 전단 증폭기가 충분한 외부 잡음 방지 대책이 없이 자체 제작되었고, 마이크론과 전단 증폭기 사이의 거리가 너무 멀어 신호선을 타고 들어온 각종 잡음이 그대로 증폭되어 전해질 수밖에 없었다. 잡음을 발생원 별로 보면 전기적인 잡음과 기계적인 잡음 요소로 크게 나눌 수 있는데, 전기적으로 발생하는 잡음들은 대부분 주파수 변동폭이 좁아 고유 주파수를 중심으로 폭이 매우 좁은 선 spectrum의 형태를 보이며 기계적인 원인의 잡음은 peak 폭이 전기적인 잡음보다 넓게 나타난다. 소리 신호는 일반적으로 매우 높은 고주파수대를 제외하고는 주파수 peak의 변동폭이 전기 또는 기계적인 다른 경우보다 훨씬 넓고 이러한 현상은 음성의 주파수 분석의 예에서 흔히 볼 수 있다. 비등 초기 기포의 생성과 소멸 속도는 일정하지 않고 그 분포도 상당히 넓어 기계적인 잡음에 의한 것보다 훨씬 넓은 폭을 갖는 peak가 예상된다. 이에 따라 측정 결과에서 폭이 좁은 peak들을 제거하였으며, 이를 위해 우선 그래프 상에서 6 point 이하(약 10 Hz 폭)로 형성된 매우 날카로운 peak들을 제거하고, 다음으로 FWHM을 기준으로 나머지 폭이 좁은 peak들도 제거하였다. 제거된 부분은 peak 양 끝 점의 값을 포함하여 그 전후의 3 point 값들을 이용한 1 차 fitting을 하였다. 폭이 좁은 peak 들을 제거한 spectrum은 다시 5 point 이동 평균을 이용하여 smoothing 시켰다. 그림의 각 출력별 잡음 제거 결과를 보면 결국 원래 spectrum의 base line을 따라가는 형태로 나타나는데, 비등이 확인된 경우(c) 200 Hz의 주파수대와 4 ~ 4.5 kHz 주변의 고주파수 영역에서의 상승이 뚜렷하고 그 이외는 거의 동일한 형태이다. 잡음을 제거한 후의 spectrum 만을 하나의 선형

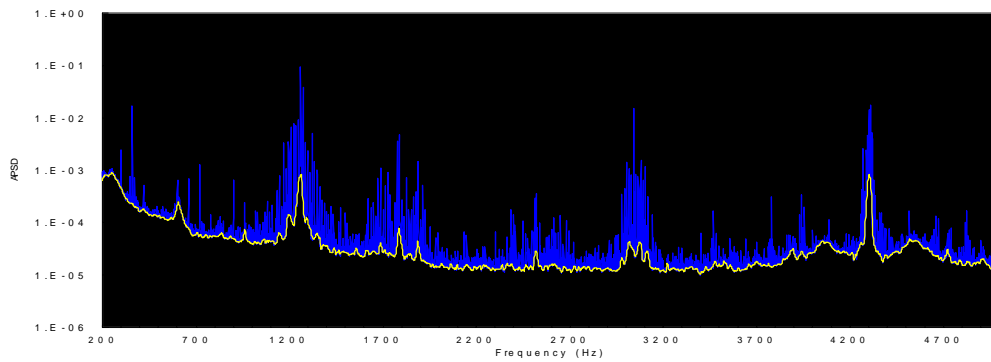
그래프로 나타낸 것이 그림 7이다. 이들 사이의 명확한 차이를 나타내기 위하여 비등 전후의 APS를 single phase 상태에 대한 변화율로 나타낸 것이 그림 8이다.



(a) single phase 상태



(b) 비등 발생 이전



(c) 비등 확인 이후

그림 6. 잡음 제거 이전 및 이후의 APSD

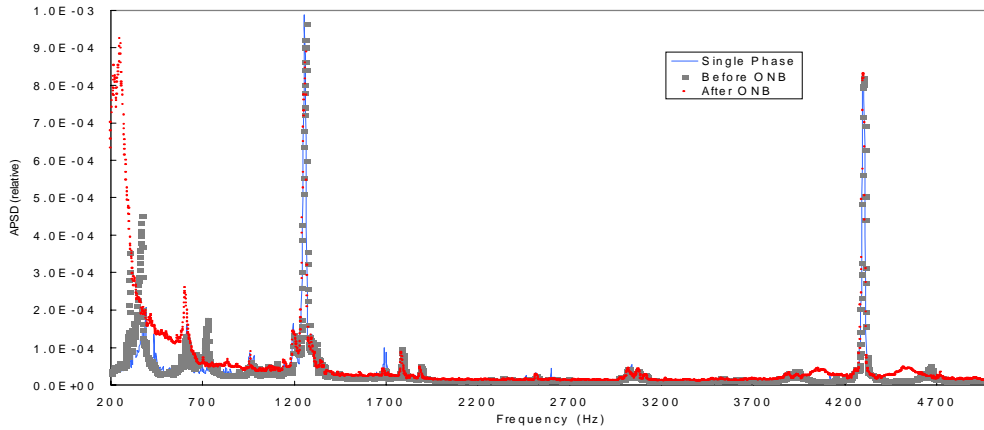


그림 7. 출력 변화에 따른 APSD(filtered)의 변화

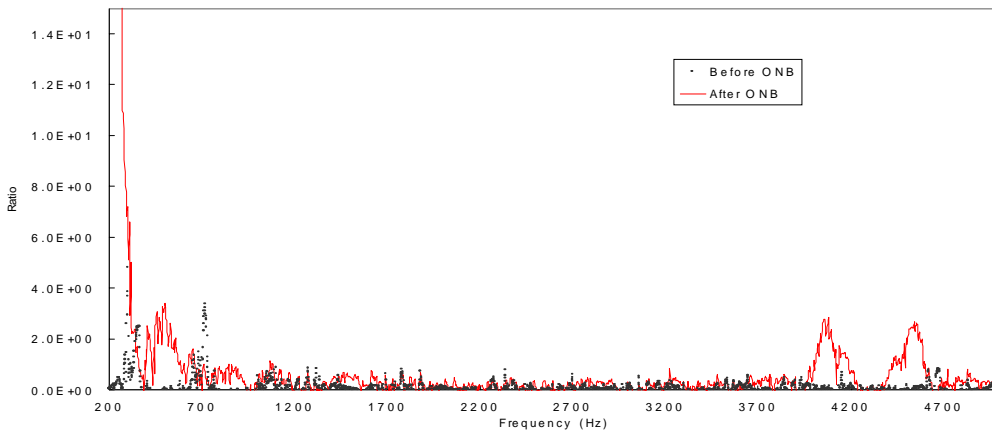


그림 8. Single phase 상태에 대한 비등 전후의 APSD(filtered)의 비율

그림 8에서 200 Hz 부근의 변화를 제외하면 약 4 kHz와 4.5 kHz 부근에서 비등시의 뚜렷한 APSD 증가가 보인다. 이러한 현상은 150, 200, 250 kg/m²sec의 유량 조건에서도 항상 동일하게 관찰되었다. Dimmick[3]의 실험에서 기포로 인한 peak가 3.8 kHz 부근에서 약 800 Hz 정도의 폭을 갖고 관찰된 것과 비교하면 이번 측정에서 나타난 4 kHz 부근의 peak도 비등에 의한 것으로 생각된다. 이 부근의 주파수 영역에서 2 개의 peak로 나뉘어진 것은 그림 6 또는 그림 7에서 보듯이 약 4.2 kHz 부근에 존재하고 있는 매우 큰 peak가 원인인 것으로 판단된다. 이 peak에 대한 정확한 원인은 밝혀내지 못하였으나 시험 채널의 각종 전기, 기계 장치로부터의 격리, 안정된 전단 회로의 구성 등으로 실험 조건을 개선하면 사전 제거가 가능할 것이다. 한편 낮은 주파수 영역에서의 상승도 아직 그 정확한 원인을 확인하지 못하였으나 출력 상승에 따른 background 상승 효과로 추측된다.

4. 결 론

일반적으로 고출력 연구용 원자로에서는 정상 운전중의 비등이 허용되지 않기 때문에 ONB 여유도는 열수력적 설계 측면에서 매우 중요한 변수중의 하나이다. 이러한 ONB 시점 확인은 보통 육안 관찰에 의존하는 것이 보통이나, 이번 실험에서 수중 마이크로폰을 이용하여 비등 발생 시 기포의 생성 소멸 과정에서 형성된 음파 신호에 의한 ONB 측정을 시도하였다. 이를 위하여 하나로의 18봉 핵연료 다발과 부수로 채널을 모사한 시험 채널에서 단상 유동 상태(single phase flow), 육안으로 비등이 처음 발견되기 시작한 상태, 그리고 비등이 발생하기 직전으로 생각되는 조금 낮은 출력 상태에서 각각 시험 채널에 삽입한 수중 마이크로폰을 통하여 음파 신호를 수집하여 주파수 영역에서 분석하였다. 주파수 분석 결과 약 4.2 kHz ~ 4.5 kHz 부근에서 기포에 의한 것으로 추정되는 음파 신호를 측정할 수 있었다. 따라서 이러한 수중 음파 분석을 이용하면 의한 육안 관찰에 의한 방법보다 더욱 정확한 ONB 측정에 사용될 수 있을 것으로 확인되었다. 그러나 기포에 의한 음파 신호가 매우 미약하므로 다른 주변 기기들로부터 수중 마이크로폰에 전달되는 잡음을 최소화해야 하며, 전단 증폭기 및 신호선 등에 유입되는 잡음 처리가 중요시된다.

참고 문헌

1. J. E. Kowasky, et. al., "Heat Transfer of Subcooled Water on a Finned Tube", The 5-th International Symposium on Multi-phase Flow and Particulate Phenomena, Miami, U.S.A., 1989.
2. P. E. Binder and R. J. Cowhey, "Feasibility Test of the Acoustic Detection of Subcooled Void in SLOWPOKE-Type Reactors", ARD-TD-191, 1989.
3. G. R. Dimmick, et al., "Result from the DRNU5 Bundle CHF Test", MX10-03300-419-TN, ARD-TD-446, 1993.
4. 김현일 외, "하나로 열수력 Database 및 해석체계 구축", 한국원자력연구소, KAERI/RR-2152/2000, 2000.