

◎ 論 文

초음파 측정법을 이용한 정상상태의 푸울비등 연구

장 길 흥*

(1992년 8월 26일 접수)

Study of Pool Boiling under Steady State using Ultrasonic Measurement

G. H. Jang

Key Words : 푸울비등(pool boiling), 접수면적율 (fraction of wetted area), 최소열유속점(minimum heat flux point), 급냉법(quenching method), 초음파탐침(ultrasonic probe), 천이비등(transition boiling)

Abstract

A recently developed new technique for measuring the fraction of wetted area has applied to pool boiling of water. The basis of the new applied technique of ultrasonic makes use of the reflection of ultrasonic from the vapour surface to measure the fraction of wetted area values.

The results are the measured fraction of wetted area values in nucleate and transition boiling and the pool boiling curve for water under steady state conditions. The measurement of this paper shows a fraction of wetted area around 0.98 at the critical heat flux for water.

1. 서 론

가열면의 접수면적율(fraction of wetted area)은 핵비등 이탈(DNB : Departure from nucleate boiling)점과 천이비등(transition boiling)영역의 열전달을 파악하기 위한 중요한 지표가 된다. 특히 가열면의 건조화에 대한 구조는 원자로 장애연구의 큰 관심 부분이다. 푸울비등(pool boiling)은 세가지 특성 열전달 구조 즉 안정적인 핵비등(nucleate

boiling), 불안정한 천이비등 그리고 안정한 막비등(film boiling)으로 구성되어 있다. 천이비등영역 즉 DNB점과 최소열유속점(minimum heat flux point, Leidenfrost point)사이의 영역의 열전달은 전열면이 건조상태와 접수상태가 지속적으로 바뀌는 구조를 갖게되므로 전열면의 접수상태는 중요한 연구주제가 된다.

본 연구에서는 접수면적율을 측정하기 위한 새로운 측정방법과 결과에 대해 기술한다. 이 새로운 측정법(Ultrasonic-Echo-Impulse Method)은 초

* 한국중공업, 기술연구소

음파 반사 원리를 이용하였으며 아울러 이 원리를 적용할 조그만 푸울비등 실험장치도 개발하였다. 접수면적율은 접수면적과 총면적의 면적비로 정의하였다. 지금까지 발표한 대부분의 실험방법은 비정상상태하의 급냉법¹⁻⁹⁾(quenching method)을 이용했다. 실험장치에는 온도제어를 통해 열을 공급하는데 제어를 통해 핵비등과 불안정한 천이비등 영역을 정상상태(steady state)하에서 측정하여 비등곡선(boiling curve)과 접수면적율 선도를 구했다. 본 초음파 반향-임펄스법(Echo-impulse method)은 타 실험법에 비해 다음과 같은 장점을 가진다: 1) 실험매체(중류수) 유동을 방해하지 않으며, 2) 비교적 간단하고 큰 어려움없이 실험장치를 만들 수 있으며, 3) 기포 및 막(film)이 비교적 균일하게 분포되어 있고 또한 제어를 통해 시간의 평균 값을 구할 수 있으므로 높은 실험 정확도를 가진다.

2. 본 론

2.1 실험장치

Fig. 1은 푸울비등 실험단면도를 나타낸다. 시험부(test section)는 복수기(condenser)를 연결한 원형유리관(Φ50mm)으로 구성된 상부와 16개의 전기 카터리지 히터가 실린더형 동봉(copper cylinder block : Φ70mm)에 삽입되어 있는 하부로 구분할 수 있다. 시험유리관에는 탈기된 중류수를 채우고 유리관 상부에는 대기압하에서 실험하기 위해 구멍을 내었다.

Fig. 2는 전기 카터리지(cartridge heater)의 배치와 온도측정을 위한 열전도 위치를 나타낸 것이다. 전기 카터리지 히터는 시험부의 구리전열체의 가열면에서 물을 비등시키기 위해 개당 200W의 용량으로 열을 공급한다. 전열체에 온도분포를 균일하게 하기 위해 16개의 카터리지 히터를 크고 작은 두개의 원형으로 배치했다. 가열면의 온도측정을 위해 NiCr-Ni 열전대를 사용했으며 열전대의 접점은 온도 조절기(thermostat)를 사용하여 50℃를 항상 유지하게 했다. 구리전열체와 초음파탐침(ul-

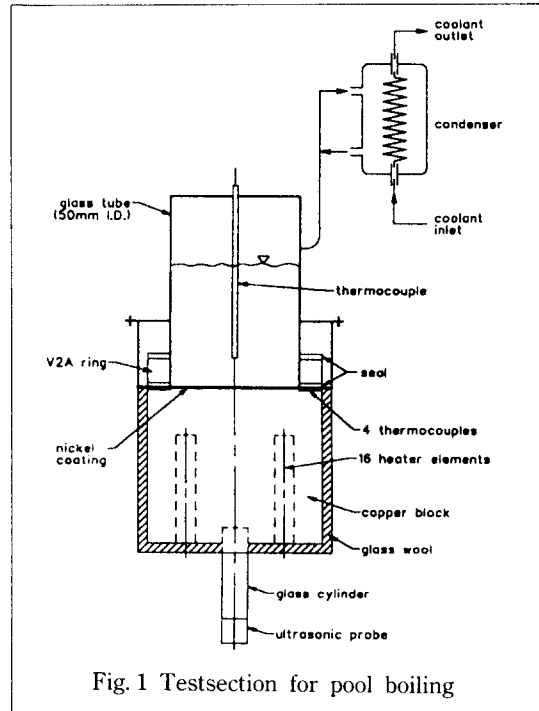


Fig. 1 Testsection for pool boiling

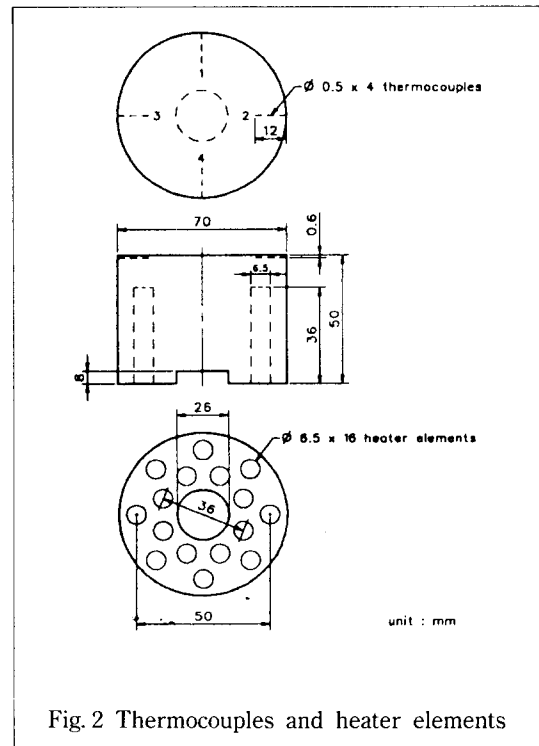


Fig. 2 Thermocouples and heater elements

trasonic probe ; 1MHz, SEB^(E)) 사이에는 탐침이 열에 민감한 것을 감안하여 유리실린더($\Phi 20\text{mm} \times 150\text{mm}$)를 부착시켰다. 초음파 탐상용 접촉매질(coupling paste)은 구리전열체와 유리실린더 사이는 고온부이므로 550°C 까지 사용할 수 있는 접촉매질(ZGM-high-temperature coupling paste)을 그리고 유리실린더와 초음파 탐침사이는 저온부이므로 -10°C 에서 $+50^{\circ}\text{C}$ 온도 범위에 사용하는 접촉매질(ultrasonic coupling agent ZG5 : No. 54 558)을 사용하였다.

2.2 측정원리와 방법

Fig. 3은 초음파 측정법과 원리도를 나타낸다.

가열면의 접수면적울 측정은 상이한 두매질 사이의 경계면에서 초음파가 반사하는 성질을 이용했다. 초음파는 강하게 감쇄된 짧은 파장군으로 이루어진 임펄스를 발생한다. 송신 탐촉자(transmitter)는 전기적으로 고음압의 임펄스를 발진하는데 임펄스 폭은 진동자(crystal)주기의 약 $1/4$ 크기이다. 이렇게 발생한 초음파는 접촉매질과 유리실린더를 지나 구리 전열체 상부면(가열면)에 이른다. 기포와 직접 접촉하는 가열면에서 초음파 임펄스는 접수율에 따라 완전 또는 부분반사하여

역으로 구리전열체, 유리실린더를 경유하여 초음파 수신탐촉자(receiver)로 되돌아온다.

그런데 수신되는 시그날은 비등면에서 반사된 시그날 외 시험부의 다른면에서 부터 반사된 시그날도 포함되어 있다. 이중 한 임펄스 시그날만이 비등면에서 반사된 특성 시그날이므로 이 특성 임펄스는 펄스 스펙트럼(pulse spectrum)에서 가려내야 하는데 거리에 따라 다른 임펄스 시그날이 수신되므로 빨리 도착한 임펄스와 늦게 도착한 임펄스를 시간판별기(time discriminator)를 이용하여 필요한 특성 임펄스를 선별해 낸다. 선별을 위해서는 시간판별기에는 가변 초기시간(variable forward time) 가변 윈도우 폭(variable window width)용 두개의 타임머(timer ; monoflop)가 장치된 출입 회로(gate circuit)가 필요하다. 이렇게 해서 시간판별기에서는 비등상태에서 반사된 임펄스만 평균값을 만드는 전자장치로 보내는데 이 전자장치의 출구 임펄스는 비등면에서의 평균 접수면적울을 나타낸다. 이 시그날은 A/D변환기에서 디지털화된 시그날을 PC에 보내 저장한다. Fig. 4는 기포 또는 막으로부터 수신되는 시그날에서 마지막으로 저장되는 실험 전체의 측정 및 제어 계통도를 나타낸다.

3. 제 어

4개의 열전대(Thermocouple ; $\Phi 0.5\text{mm}$, NiCr-Ni)를 가열면 0.6mm 아래에 부착하고 그 중 한 열전대를 온도제어용으로 사용했다. 열전대에서 포착한 열기전력(열전압)은 극히 미소하므로 400 배로 증폭시켜 만든 제어용 열기전력-시그날을 아날로그 컴퓨터(analog computer)로 보낸다(Fig. 4) 여기서 제어는 아날로그 컴퓨터를 사용했는데 설정치와 실제치의 편차는 P-조절기(P-regulator)를 통해 가열정도를 제어하는데 이때의 제어 전압 즉 아날로그 컴퓨터의 출구전압은 사이리스트 조정 유니트(thyristor regulating unit ; 0-10 V)를 이용하여 신속하게 카터리지 히터에 제어

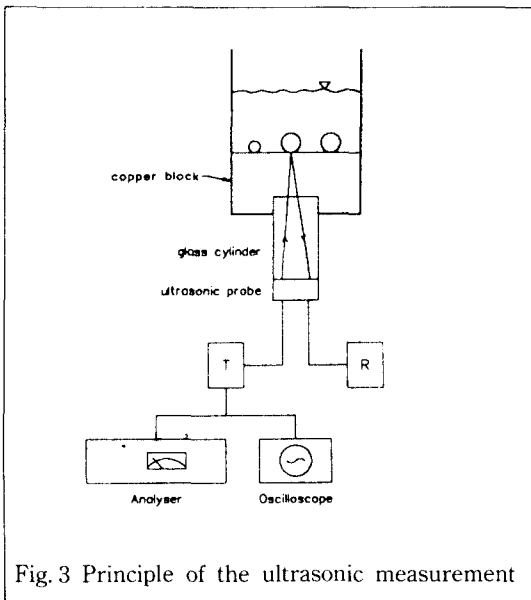


Fig. 3 Principle of the ultrasonic measurement

시그널을 보낸다. 이와같은 경로로 출력조절에 의한 온도제어를 통해 정상상태하에서 실험했다.

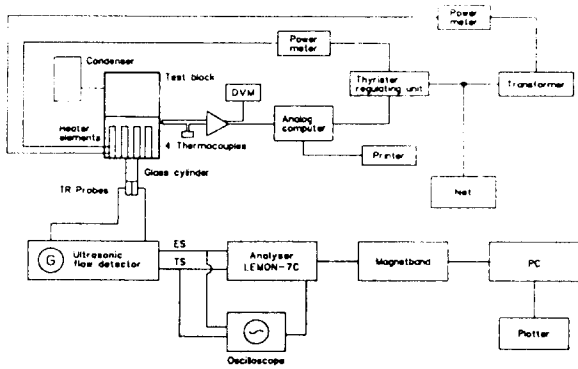


Fig. 4 Experimental setup

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5는 접수면적율을 벽면 과열온도(wall superheater; $T_w - T_{sat}$)에 따라 나타내었는데 보다 효과적으로 비교하기 위해 비등곡선과 접수면적율 선도를 동시에 도식화시켰다.

접수면적율 f 은 최대 열유속점(maximum heat flux point)까지는 직선으로 아주 완만하게 감소하여 DNB점에서의 접수면적율은 $F=0.98$ 로 나타나 접수면적율의 변화가 거의 없음을 보여준다. 이 값은 1950년대 말에 정립한 Zuber¹⁰⁾ 이론에서 나온 $f=0.80$ 보다 훨씬 높고 최근 Schroeder-Richter/Bartsch^{11, 12)}의 이론에서 유래한 값, $f=1$ 에 아주 근접한다. 천이비등 구역은 처음에는 벽면 과열온도가 증가함에 따라 접수면적율이 급격히 떨어지다가 다시 과열온도 90K에서는 완만하게 감소하는데 과열온도 120K에서의 접수면적율 f 은 0.03으로 가열면이 거의 건조상태가 된다. 과열온도 120K보다 높은 온도는 고온에다 긴 측정시간으로 인해 초음파 접촉매질이 건조해져서 접수면적율을 더 이상 측정 하지 못했다. 푸울 비등곡선은 40개의 측정점으로 세가지 비등영역을 모두 보여준다.

Fig. 6에서는 본 실험결과치를 Tong의 관계식¹³⁾과 Dhuga와 Winterton¹⁴⁾의 실험 실험결과와 비교한 것을 제시한다. 초음파 실험 결과는 Tong의 관계식에 근접함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 측정된 최대 열유속점(DNB점)

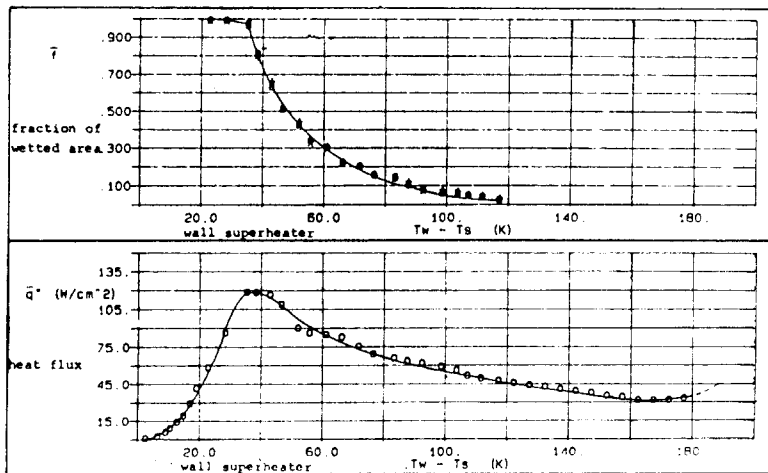


Fig. 5 Measured fraction of wetted area during transition boiling and the pool boiling curve for water.

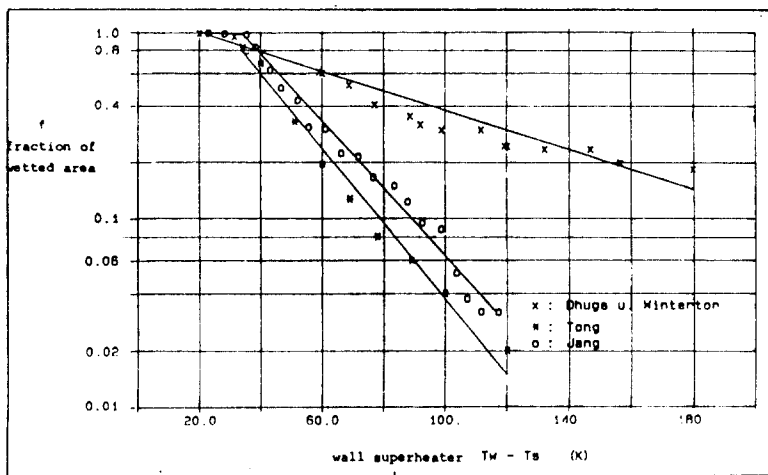


Fig. 6 Comparison of measured and predicted fraction of wetted area (log).

에서의 접수면적율은 $f=0.98$ 이이었으므로 지금까지 보고된 $f=1.0$ 과 잘 일치하였다.

푸울비등으로 기포 및 막(film)이 유동비등에 비하여 균일하게 분포되므로 높은 측정 신뢰도를 나타냈다. 초음파법에 의한 접수면적율 측정은 실험 매체의 유동상태를 방해하지 않는 장점이 있었으나, 고온에서 구리전열체와 유리실린더사이의 접촉매질이 건조되어 최소열유속점에서의 접수면적율은 측정이 불가능했다.

參考文獻

- 1 Gunther, F. C., "Photographic Study of Surface-Boiling Heat Transfer to Water With forced Convection", Trans. ASME, Vol.73, pp 115~123, 1951.
- 2 Westwater, D. B. and Kirby, D. B., "Pool Boiling from a Glass Plate viewed from Below.", University of Illinois, Urbana, 1963.
- 3 Dhuga, D. S. and Winterton, R. H. S., "The Pool Boiling Curve and Liquid-Solid Contact", 8th Int. Heat Transfer Conf., San Francisco, 4, pp. 2055~2059, 1986.
- 4 Cheng, S. C., Poon, K. T. and Heng, K. T., "Transition Boiling Heat Transfer in forced vertical Flow", Final Report Argonne Contract No. 31-109-38-3564, 1981.
- 5 Yao, S. and Henry, R. E., "An Investigation of the minimum Film Boiling Temperature on horizontal Surfaces", Trans. ASME J. Heat Transfer, Vol. 100, pp 260~267, 1978.
- 6 Nishikawa, K., Fujii, T. and Honda, H. "Experimental Study on the Mechanism of Transition Boiling Heat Transfer", Bull. JSME, Vol. 15 pp. 93~103, 1972.
- 7 Weisman, J., Kao, Y. K. and Rahrooh, G., "Transition Boiling Heat Transfer in a vertical Round Tube", ASME Paper No. 79-HT-47, 1979.
- 8 Lee, L., Chen, J. C. and Nelson, R. A., "Liquid Solid Contact Measurements using a Surface Thermocouple Temperature Probe in Atmospheric Pool Boiling Water", Rev. Sci. Intst., pp 47~56, 1983.
- 9 Netti, S., Bitrie, T. J. and Chen, J. C., "Fiber-Optic Liquid Contact Measurements in Pool Boiling", Rev. Sci. Instrum, Vol. 57 No. 12, pp

- 711~720, 1958.
- 10 Zuber, N., "On the Stability of Boiling Heat Transfer", Tran. ASME Vol. 80, pp 711-720, 1958.
- 11 Schroeder-Richter, D. and Bartsch, G., "Analytical calculation of the DNB-superheating by a postulated Thermo-Mechanical Effect of Nucleate Boiling", Int. J. of Multiphase Flow, 1990.
- 12 Schroeder-Richter, D. and Bartsch, G., "The Two Limiting Superheat Temperatures for Transition Boiling", ICHMT Seminar on Phase-Interface Phenomena in Multiphase Flow, Dubrovnik, 1990.
- 13 Tong, L. S., "Heat Transfer in Reactor Safety", Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf.m Vol. 6, pp 285~309, Toronto, Canada, 1978
- 14 Dhuga, D. S. and Winterton, R. H. S., "Measurement of Surface Contact in Transition Boiling", Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 28, No. 10, 1985.