

Conical Tip-type 미세열전대 개발 및 동적특성에 관한 연구

Development of Conical Tip-type Microthermocouple and Measurements of Dynamic Characteristics

김학준*, 김성진**, 박근철**, 김효정*

* 한국원자력안전기술원, 대전광역시 유성구 구성동 19번지

** 서울대학교, 서울 관악구 신림9동 산56-1

요약

10 μ m의 order를 갖는 미세 wire를 이용, 노출형의 K-type 미세열전대를 제작하였다. 측정접합부 주위의 기하학적인 형태에 따라, Hot Wire-type과 Conical Tip-type으로 분류, 제작하였다. Ar-Ion 레이저와 셔터를 이용하여 동적반응시간을 측정하였고, 기상과 평균액상 온도 측정을 위한 알고리즘을 개발하였다. 수조비등 시 전기전도도탐침의 신호와 미세열전대의 신호를 동시에 비교하여 제작한 미세열전대의 시간 및 공간 분해능을 정성적으로 관찰하였다. wire의 직경과 측정접합부의 크기, 유속 등에 따라 시정수는 큰 차이를 보였고, 개발된 Conical Tip-type 미세열전대의 우수성을 입증하였다.

Abstract

Two exposed K-type microthermocouples (Hot Wire-type and Conical Tip-type) were fabricated. Dynamic response time was measured by Laser technique and an algorithm was developed to determine local phase temperatures. Signals from a single electrical conductivity probe were compared to those of microthermocouples simultaneously. Geometric conditions such as wire diameter, features of sensing part effected dynamic characteristics of thermocouples seriously. The Conical Tip-type microthermocouple was proved to be more available than the former.

1. 서론

원자로 사고 시 야기될 수 있는 계통내의 자연순환 현상과 이상유동 해석을 위한 실험적인 연구가 국내외에서 활발하게 이루어지고 있다. 이상 자연 순환 시 충분한 순환 유량 및 계통의 안전성 확보를 위해 이상 유동 변수에 대한 예측은 자연순환을 이용한 열전달 계통의 설계에 중요한 역할을 한다. 최근 연구가 활발하게 진행 중인 일체형원자로의 경우에도 피동안전계통을 채택하고 있고, 강화된 자연순환에 의한 노심냉각을 지향하고 있다[1].

이상 유동의 특성에 관한 연구는 산업계 전반에 걸쳐 매우 중요한 분야로 여겨지고 있으며 단상 유동에서의 현상학적인 해석과는 달리 정량적인 해를 얻기 위해서는 실험적인 상관

관계식이 요구된다. 특히 미세 공간 및 시간의 분해능이 요구되는 온도측정에 이용되는 센서와 신호처리 기술개발은 이상유동 뿐 아니라 제트엔진 설계 등의 기반이 되는 연소 시스템의 해석, chip cooling과 같은 micro-scale 기기들의 열전달 문제를 규명하는데 매우 중요한 분야로 인식되고 있다.

현재 미포화 비등장에서의 불연속적인 상변화에 따른 국부적인 온도측정을 위한 방법으로 Cold Wire Film, 미세열전대 등이 이용되고 있다. Cold Wire Film은 미세한 유동에서도 측정하고자 하는 온도장이 민감하게 변하고 상변화 시 발생하는 기계적인 충격에 의한 wire와 지지대의 교란이 출력신호에 큰 영향을 미치기 때문에 국부 온도 측정에는 적합하지 않다. 반면 미세열전대는 유동 생성에 따른 wire의 진동으로 인한 출력신호의 교란과 같은 기계적인 영향을 줄일 수 있고, 측정하고자 하는 신호간의 보정횟수를 줄일 수 있는 장점이 있다.

미포화 비등 유동장에서의 기존 연구 내용을 보면 Jiji & Clark(1964)과 Walmet & Staub(1969)는 미포화 비등 유동장에서의 온도분포를 측정하려 하였으나 열전대의 반응속도가 너무 느려 액상과 기상의 온도를 구분하지 못했다. Shiralkar(1970)와 Dix(1973)은 Hot-film을 사용해서 R-114의 미포화 비등 유동장에서 기포율 분포를 측정하였다. 그리고 Delhaye et al.(1973)은 미포화 비등 유동장에서 액상과 기상을 구별할 수 있는 미세열전대를 만들어서 물에서 측정을 하였다. 이들은 국부 기포율을 PDF방식으로 측정할 수 있다고 제안했다[2]. R.P.Roy et al.는 hot wire와 미세열전대를 이용하여 R-113 유체에서 수조 비등과 비등 유로 시 각각의 온도 분포 결과를 제시하였다. 수조 비등 시 microthermocouple의 반응 시간은 상 변화를 구분하기에 충분했지만, 비등 유동 시에는 혼합 유체의 평균 온도를 측정하는 것으로 만족했다[3].

2. 본 론

2.1 실험이론

미세열전대의 측정접합부는 흐르는 유체 내부에 존재하게 되는데 이 때 Biot No. 가 0.1 보다 작기 때문에 lumped thermal capacitance 가정을 사용할 수 있다. 측정접합부 주위의 열전달 메커니즘은 대류, 전도, 복사에 의한 성분으로 고려할 수 있다. 유동이 있는 유체 내에서의 열전달 메커니즘은 복사에 의한 것보다는 대류에 의한 것이 지배적이다[4]. 또한 측정 접합부에서 주위 wire로의 전도에 의한 영향을 고려할 수 있는데, 이는 wire의 natural frequency와 관련된다. K-type과 같은 경우, 두 wire의 성분과 물성치 등이 비슷하여 wire의 natural frequency를 단일 성분으로 볼 수 있다[5].

측정 접합부를 구성하는 물질의 성질과 기하학적인 구조, 주위 유체의 물성치를 고려하여 위 식을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$(\rho C_p l)_J \frac{dT}{dt} + h T^* = 0 \quad (1)$$

여기서 $T^* = (T_J - T_{fluid})$ 이고, 식(1)을 T^* 에 대해서 다시 정리하면 다음과 같다.

$$- T^* = \frac{(\rho l c_p)_J}{h_{conv}} \frac{dT^*}{dt} \quad (2)$$

초기 경계조건이 $T(0) = T_i$ 일 때 $T^*(0) = T_i^*$ 가 되고 측정시간 t 초 동안 위 식을 풀게 되면 아래와 같이 표현된다.

$$\frac{(\rho l c_p)_J}{h_{conv}} \int_{T_i^*}^{T^*} \frac{1}{T^*} dT^* = - \int_0^t dt \quad (3)$$

$$\frac{T^*}{T_i^*} = \frac{T - T_{fluid}}{T_i - T_{fluid}} = \exp \left[- t / \left(\frac{(\rho l c_p)_J}{h_{conv}} \right) \right] \quad (4)$$

식 (1)-(4)에 사용된 기호는 다음과 같다.

C_{pJ}	측정접합부 비열
T_J	측정접합부 온도
T_{fluid}	주위 유체 온도
h_{conv}	대류열전달계수
l_J	측정접합부 두께
ρ_J	측정접합부 밀도

2.2 실험장치

2.2.1 미세열전대

본 연구에서는 미세열전대 측정접합부의 형태에 따라 Hot Wire-type[그림1]과 Conical Tip-type[그림2]으로 각각 제작 하였다. K-type의 Chromel 및 Alumel 합금을 사용하였고, wire의 직경은 25.4 μ m, 12.5 μ m 두 종류를 선택하였다. 측정접합부는 micro spot welding system[(주)나라나노텍]을 개량, 사용하였다. 두 wire를 용접하기 위해 용접헤드(NBH-100)를 날카로운 팁모양으로 제작하여 가압에 의한 용융 부위가 최소화 되도록 하였다. 용접에 필요한 유도전원은 MSW-306eRP 모델을 사용하였고, 통전시간은 10-20 μ s로 조정하였으며, 130-150 Volt의 전압이 용접에 소요되었다.

Hot Wire type 미세열전대

측정접합부가 연결된 wire의 진동을 억제하고, 기계적인 강도를 높이기 위해 외경 0.35mm의 Stainless Steel needle을 지지대로 사용하였다. 지지대는 외경 3mm의 2 hole ceramic tube를 통과하고, tube 내부에서 127 μ m 보상도선과 각각 연결, 절연처리 하였다. tube는 다시 외경 3.1mm의 Stainless Steel tube에 부착하여 측정 시 이동 및 고정을 용이하게 하였다. 측정접합부를 제외한 모든 연결부위는 고온용 에폭시로 몰딩 처리하여 절연성 및 기계적인 강도를 높였다.

Conical Tip type 미세열전대

삽입방식 계측센서의 단점인 유동장의 교란을 최소화하기 위해 측정접합부를 Conical Tip-type으로 제작하였다. 이 형태의 미세열전대는 Spot welding 방법으로 제작된 측정접합부와 연결 wire를 접점을 중심으로 분리시키는 분리자(Separator), 절연물질(Insulator), 외부의 충격으로부터 보호하고 wire의 손상을 막기 위한 차폐체(Shield material)등의 구조

로 이루어져 있다. 분리자는 절연물질이면서 가공이 편리한 폴리프로필렌을 사용하였고 절연물질과 차폐체는 실험온도범위(0-200℃)내에서 충분히 견고하며 높은 비전기적 강도를 지닌 고온 에폭시(Araldite, Crystal Clear Epoxy)를 사용하였다.

2.2.2 측정 채널

동적반응시간 측정 채널

본 실험장치는 미세열전대의 동적반응시간 측정을 위한 것이다. 실험장치는 물탱크, 필터, 펌프, 유량계, 아크릴 사각채널(150mm, 150mm, 1000mm), Argon-Ion 레이저장치 (Power=10W, Beam Dia.=1.4 mm, stability = ± 0.5 %, DANTEC Co.), 셔터, 미세열전대로 구성되어 있다[그림3].

수조비등 측정 채널

수조비등측정에 사용된 사각채널은 (180mm, 130mm, 600mm)의 Stainless Steel로 제작하였고, 비등현상을 관찰하기 위해 전면과 후면에 강화유리를 부착하였다. 상부 덮개에 1.2kW 교류 전열봉을 연결하였고, 온도제어기를 이용하여 출력을 조정하였다. L자 형태의 전열봉은 하단 발열부에 테프론으로 장착한 그리드와 기포를 유도하기 위한 1.5mm의 구멍을 뚫은 캡을 장착하였다. 측면은 미세열전대와 전기전도도탐침을 동시에 장착하여 신호를 관찰할 수 있도록 하였다[그림4].

2.3 신호보정

동적반응시간 측정

온도센서의 동적반응(Dynamic Response)을 측정하는 방법은 크게 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 구분된다. 온도센서를 일정 속도, 일정 온도의 유체 속에 넣어 두고 복사열을 일정 간격 또는 주기적으로 변화시켜서 측정하는 간접적인 방법과 다른 하나는 순간적으로 유체의 온도변화를 주는 직접적인 방법이 있다. 주로 간접적인 방법을 많이 사용하는데 이는 유체의 온도를 순간적으로 변화시키기 어렵기 때문이다. 간접적인 방법의 열원으로는 주로 일정출력의 작은 초점을 가진 레이저를 많이 사용한다[6].

본 연구에서는 전자의 방법을 선택해서 열원으로 Argon-Ion 레이저빔을 사용했다. 그리고 이 레이저빔은 셔터를 통과해 유체가 흐르는 아크릴 사각채널안의 미세열전대의 접점을 가열하게 된다. 측정접점의 온도는 평형상태가 될 때까지 상승하게 되고 레이저빔을 차단하기 위해 셔터를 닫는다. 이와 같이 일정간격으로 열원인 빔을 공급/차단(step change)시켜 줌으로 발생하는 미세열전대 접점에서의 과도반응은 Data Aquisition System을 통해 기록된다.

2.4 기상 및 액상온도측정 알고리즘

이 알고리즘은 입력된 온도신호의 기울기를 계산하여 배열에 저장한 뒤 노이즈 경계 (Noise Criteria), 다중버블과 단일버블의 영향, 기포의 폭 경계를 적용한 뒤 최종적으로 온도 기울기 배열을 구한다. 여기서 기포의 최종적 시작점과 끝점을 구하고 미세열전대 고유

의 특성 커브를 찾아 구해진 시정수 값을 이용해 액상 및 기상 온도를 구한다. 액상만 있는 구간, 기상이 지나가는 구간, 기상이 지나간 후 액상이 지나가면서 점점의 온도가 변하는 구간으로 나누고, 각 구간에서 구해진 액상 및 기상 온도는 PDF방식을 사용하여 최대빈도에 해당하는 온도값을 찾게 된다[그림5].

2.5 실험 및 결과

수조비등채널 측정

본 실험에서 제작한 미세열전대의 측정접합부와 전기전도도탐침의 팁을 기포의 진행방향에 일치시켜 수조비등 시 기포의 거동에 따른 두 센서의 출력신호를 정성적으로 분석하였다. 채널 측면에 미세열전대와 전기전도도 탐침을 장착한 후, 전열봉 표면에 핵비등이 시작하여 주위 유체로 분리되는 시점에서 측정하였다. 채널 상부는 밀폐한 채로 관을 연결하여 비등 시 발생하는 수증기가 대기로 분출되게 하였다. 일단 비등이 발생하면 기포와 액상 자유 표면에서 생성되는 수증기에 의해 채널 내부의 압력이 국부적으로 증가하게 된다. 이는 측정 지점의 압력을 증가시켜 포화온도를 증가 시킨다. 전열봉 표면 위 3mm 지점에 미세열전대의 측정접합부를 위치시켰고, 측정접합부 위 0.1mm 지점에 전기전도도탐침의 팁을 위치시켰다. 각각의 출력 신호는 디지털 오실로스코프(Tektronix, TDS 510A)를 통해 관찰, 저장하였다.

수조비등 시 미세열전대와 전기전도도탐침의 신호 비교 결과를 [그림6]에 나타내었다. 상분리에 적합한 것으로 판명된 전기전도도탐침의 신호는 탐침의 팁에 기포가 지나갈 경우 출력 전압이 확연하게 감소함을 보이고 있다. 동시에 미세열전대의 신호는 피크 형태를 이루며 증가함을 보이고 있다. 탐침의 팁과 미세열전대 측정접합부의 복잡한 형상과 다중기포의 영향 등으로 인해 두 신호가 일치 하지 않는 부분도 관찰되었다.

미세열전대 측정접합부의 형태에 따라 출력신호의 거동은 다른 양상을 보였다. Hot Wire type은 상대적으로 유동의 교란을 더 발생시키고, 기포의 중앙에 측정접합부가 놓이는 확률이 적어지며, wire를 따른 기포의 rolling 및 작은 크기의 기포가 측정접합부를 비껴가게 되는 경우가 증가하는 것에 기인하는 것으로 판단되었다. 또한 기포의 변형에 따른 다중기포의 영향을 더 많이 받는 것으로 관찰되었다. 실제 전기전도도탐침의 신호 분석에 관한 보고에서도 위와 같은 현상이 보고된 바 있다[7-8].

동적반응시간 측정

제작된 미세열전대의 동적 반응 시간은 수msec의 기포존재시간을 갖고 있는 미포화 비등 유동장에서 국부온도 측정의 가능성을 판단하는 근거가 된다.

12.5 μ m 미세열전대와 25 μ m 미세열전대의 동적 반응 시간을 측정하기 위해 Argon-Ion 레이저장치 (Power=4-9w, Beam Diameter=1.4mm, stability = \pm 0.5%, DANTEC Co.)와 셔터(셔터 속도, 1/1,1/2,1/4,1/8,1/15,1/30,1/60,1/125,1/250,1/500,1/1000sec)를 이용하여 0-1.2m/s의 유속 조건에 따라 측정하였다[그림7].

구해진 시정수의 특징은 다음과 같다. 첫째, 시정수는 점점의 크기가 작을수록 감소함을 보이고 있다. 동적 반응 시간을 측정한 결과 12.5 μ m 미세열전대와 25 μ m 미세열전대의 시정수는 유동이 있는 경우 각각 7-12msec와 1.7-4msec의 값의 결과를 얻었다. 둘째, 시정수

의 값은 유속에 영향을 많이 받는다. 정지된 상태에서의 시정수값은 수십 msec의 값을 갖는데 비해 유속이 있을 경우 수 msec의 값을 갖게 됨을 볼 수 있다. 하지만 열원인 레이저빔의 에너지에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다[그림8-13].

3. 결론 및 향후 연구내용

본 연구에서는 미포화 비등 유동장에서의 불연속적으로 발생하는 상변화에 따른 국부적 온도 분포를 측정하기 위해 hot Wire-type과 Conical Tip-type의 미세열전대를 제작하였다. Conical Tip-type 미세열전대가 액상과 기상을 분리하는데 훨씬 더 적합한 것으로 판단되었다. 측정된 시정수는 측정접합부의 크기와 유체의 유속에 영향을 많이 받았고, 수 msec 이내로 측정되었다. 이는 향후 수행 예정인 유로비등장에서의 상분리 및 각 상별 온도 측정에 충분히 빠른 것으로 판명되었다. 또한 유속과 레이저빔의 에너지를 일정하게 유지하고 노출시간을 조절한 실험에서 시정수의 값이 일정함을 보였다. 이 결과로부터 동적 반응 시간 측정의 액상과 기상의 평균 온도 측정 알고리즘을 개발하였다.

향후 고속카메라와 미세열전대의 신호를 동기화시켜 액상과 기상의 변화에 있어서 국부적 온도변화를 정량적으로 분석하고, 액상과 기상의 평균온도 측정 알고리즘에 액상 온도에 대한 PDF 방식 적용 및 실험적 보정상수 등을 적용하기 위한 실험이 더 수행되어야 하며, 최종적으로 미포화 비등 유동 실험장치에서 액상과 기상의 평균온도를 측정하기 위한 실험이 수행되어야 한다.

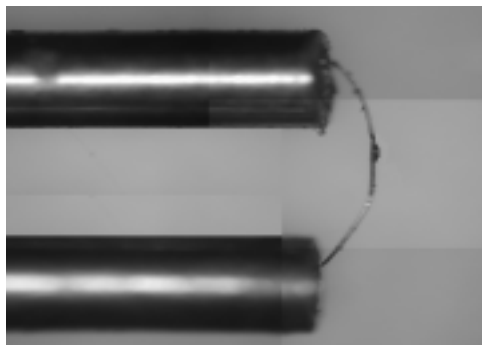
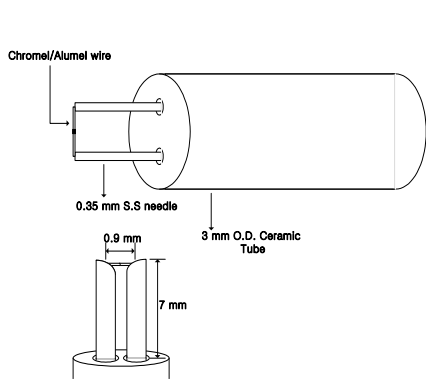


그림1. Hot Wire-type 미세열전대

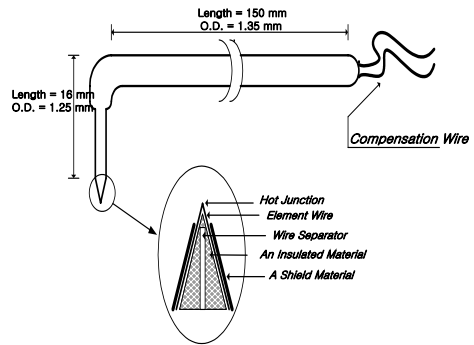


그림2. Conical Tip-type 미세열전대

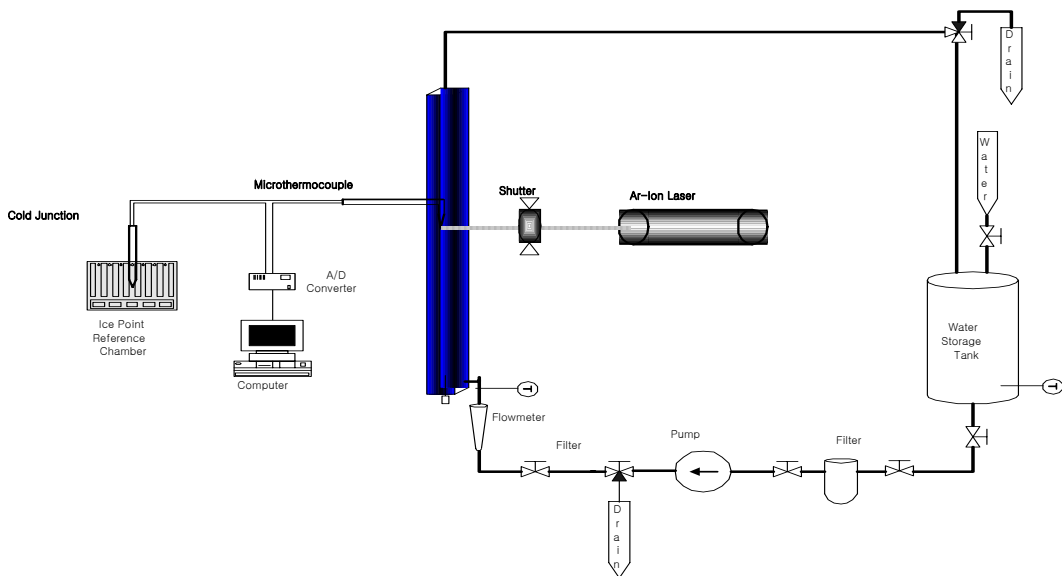


그림3. 동적반응시간 측정채널 개략도

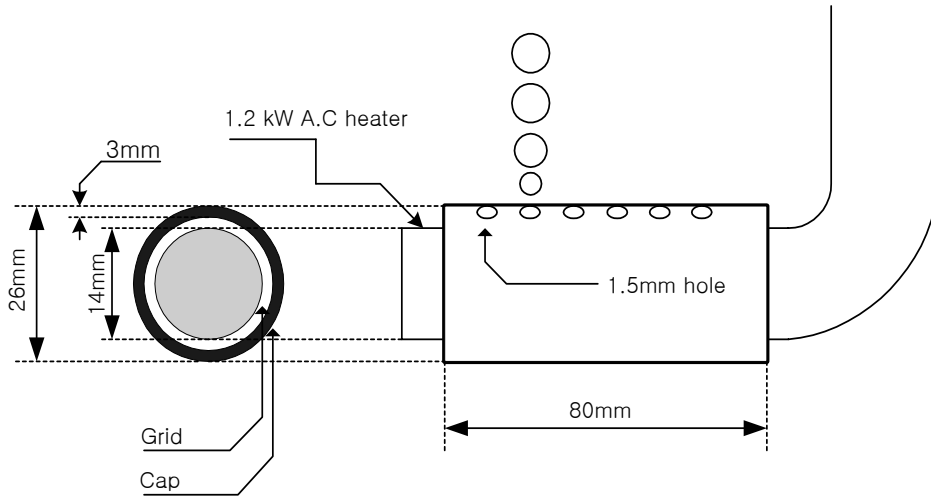


그림4. 수조비등채널 히터 구조

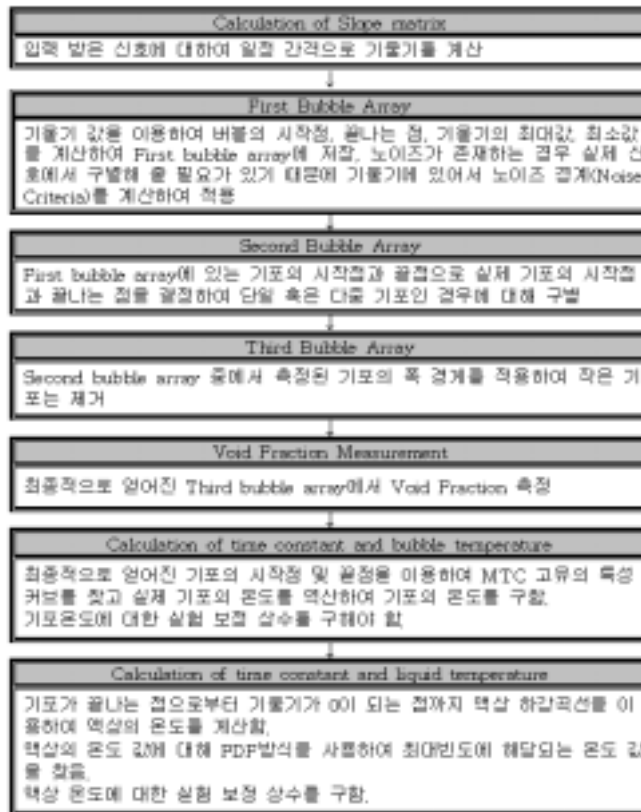
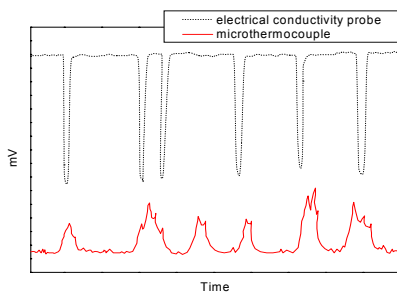
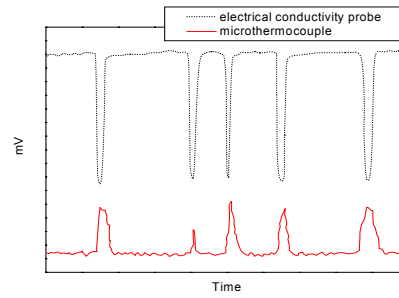


그림5. 액상 및 기상 평균온도측정 알고리즘



Hot Wire-type



Conical Tip-type

그림6. 수조비등 시 신호 비교

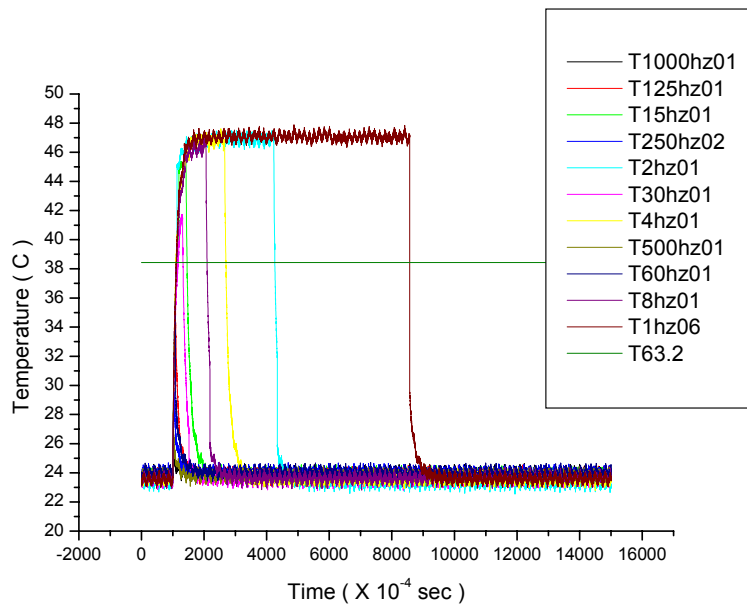


그림7. 노출시간에 따른 온도분포(Laser Power = 4w, Flow Vel. = 0.3 m/s)

유량 및 열원의 에너지 변화에 따른 시정수값

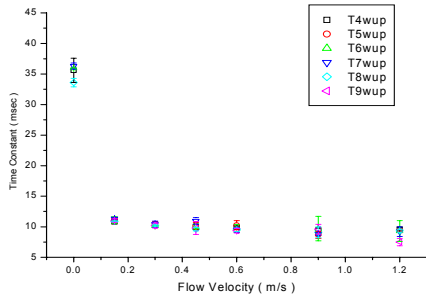


그림8. 25 μm , 온도가 증가할 때

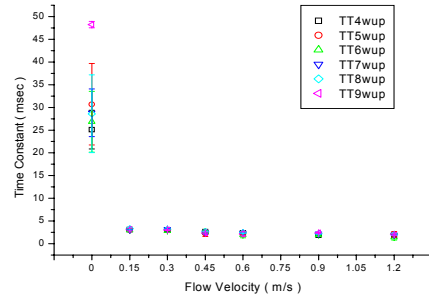


그림9. 12.5 μm , 온도가 증가할 때

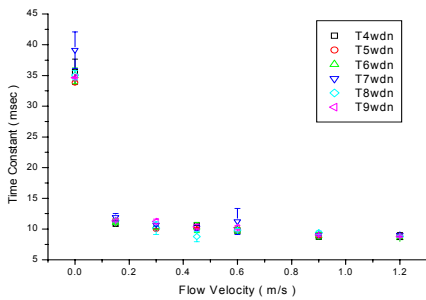


그림10. 25 μm , 온도가 감소할 때

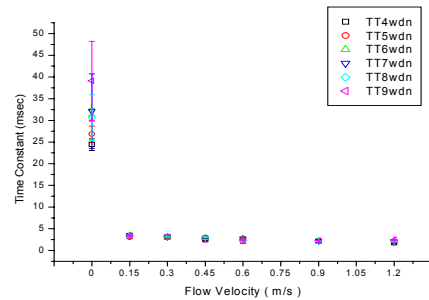


그림11. 12.5 μm , 온도가 감소할 때

유량에 따른 12.5 μm 와 25 μm 의 시정수값의 비교(Laser Power = 6W)

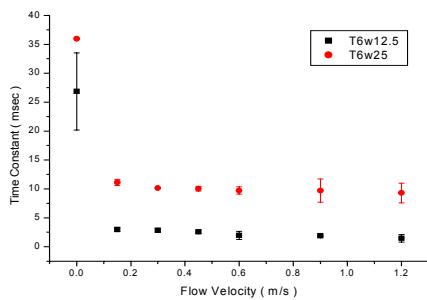


그림12. 온도가 증가할 때

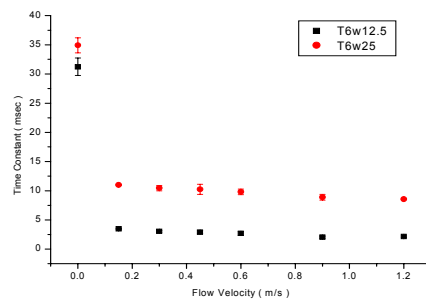


그림13. 온도가 감소할 때

참고문헌

1. 장문희 외, “일체형 원자로(SMART) 기본설계 보고서”, KAERI/TR-2142/2002, 2002. 3
2. J.M.Delhay et al, “Void fraction and vapor and liquid temperatures: Local measurements in two-phase flow using a Microthermocouple”, *Journal of heat transfer*, pp. 365-370, 1973. 8
3. R.P.Roy et al, “Local measurements in the two-phase region of turbulent subcooled boiling flow”, *Transactions of the ASME*, vol.116 pp.660-669, 1994. 8
4. P. Beckman et al, “A fast reponse microthermocouple”, *Review of Scientific Instruments*, vol.64 pp. 2947-2951, 1993. 10
5. L.J.Forney et al, “Measurement of frequency response in short thermocouple wires”, *Review of Scientific Instruments*, vol.64 pp. 1280-1286, 1993. 5
6. G. Fish et al, “Ultrafast response micropipette-based submicrometer thermocouple” *Review of Scientific Instruments*, vol.66 pp. 3300-3306, 1995. 5
7. M.Ishii et al, “Measurement of interfacial area using four-sensor probe in two-phase flow”, *Perdue Univ. Report*, PU NE-91-1, 1991
8. I.Kataoka et al, “Sensitivity analysis of bubble size and probe geometry on the measurements of interfacial concentration in gas-liquid two-phase flow”, *Nuclear Engineering and Design*, vol.146, pp.53-70, 1994