

난류열혼합 영역에서 온도측정 센서의 감응도가
온도요동 측정에 미치는 영향

Effect of the Sensor Sensitivity on the Temperature Fluctuation
Measurement in a Turbulent Thermal Mixing Region

남호윤, 김종만, 최병해, 최종현

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

난류열혼합 영역에서는 온도가 고주파수로 요동하므로 이 온도의 요동을 정확히 측정하려면 센서의 감응도가 주요 고려인자가 된다. 온도 측정용 센서들의 감응도를 비교분석하기 위하여 2개 이상의 제트에 의해 형성되는 난류혼합영역에서 직경이 다른 여러 종류의 cold wire와 열전대들을 사용하여 온도요동을 측정하였다. 같은 조건에서 측정한 무차원 온도요동량(θ^*)은 센서의 시간상수(time constant)에 따라 뚜렷한 차이를 볼 수 있었고 유속 12m/s 정도에서 요동의 주파수 spectrum은 100Hz 근방에서 최대값을 보이고 있으나 50Hz에서 300Hz 범위로 넓게 분포되어 있다. 4.5~16m/s 유속범위에서 두 센서(A,B)로 측정한 온도요동량의 비(θ_B^*/θ_A^*)는 유속에 따라 감소하는 경향을 보였고, 이 요동량의 비는 시간상수(response time)의 비의 log 값에 따라 직선적으로 감소하였다. 센서의 직경을 기준으로 계산한 시간상수에 따라 온도요동량의 비를 비교하면 cold wire와 열전대 쌍에서와 열전대와 열전대 쌍의 온도요동량의 비가 다른 경향을 보였다.

Abstract

The sensitivity of a sensor is an important parameter to measure the temperature fluctuation with high frequency in the turbulent thermal mixing region. In order to compare the sensitivity of the sensors, an experiment has been carried out for measuring the temperature fluctuation in a turbulent mixing region formed by two or more jets using cold wires and thermocouples which have different diameters. The dimensionless temperature fluctuation (θ^*) measured at the same condition shows much difference according to the time constant of the sensor, and the frequency of the fluctuation was about 100Hz at 12m/s flow velocity but in a broad range of 50~300Hz. When the flow velocity is in a 4.5~16m/s range, the ratio of temperature fluctuation (θ_B^*/θ_A^*) measured by two sensors decreases with the increase of flow velocity, and decreases linearly with the log value of the response time ratio. When the ratio of temperature fluctuation is compared according to the time constant based on the diameter of sensor, there exists a different trend between the ratio of temperature fluctuation by the pair with cold wire and thermocouple and that by the pair with thermocouple and thermocouple.

1. 서론

고온과 저온의 유체가 혼합되면 온도의 요동이 발생하는데 이 온도의 요동의 생성과 소멸은 열유체 분야에서 중요한 의미를 갖는다. 열유체를 해석하기 위한 전산코드에서는 여러 종류의 난류해석 모델이 개발되고 있다. 액체금속로에서의 난류열혼합에 대한 연구는 시스템의 열유체를 해석하는데 필요할 뿐만 아니라 구조재의 열특성을 해석하는데도 필요하다. 난류열혼합에 의한 온도요동은 인접한 재료의 온도요동을 유발시키고, 결과적으로 이 온도요동은 재료의 열피로 파손을 유발시킨데 이러한 현상을 thermal striping이라 부른다. 최근에는 원자로의 경제성을 향상시키기 위하여 구조를 조밀하게 설계하는 경향이 있다. 이로 인해 온도요동이 심하게 일어나는 유동영역이 재료의 벽면에 더욱 가까워지므로 충분한 여유 공간을 갖는 기존의 원자로 설계에서보다는 thermal striping을 더욱 중요하게 고려되어 핵연료집합체 상부에서 제트유동에 의해 일어나는 열혼합에 관한 실험적 연구가 수행되었다. 이 연구에서 측정하는 온도요동의 진폭과 주기는 재료의 열피로에 중요한 의미를 가지므로 이를 정확히 측정할 수 있는 방법이 매우 중요하였다.

제트유동에 의해 발생하는 난류열혼합에서 난류요동의 주파수는 대략 유동의 속도에 비례하고 제트의 직경에 반비례하는 것으로 일반적으로 알려져 있다. 이 실험에서는 공기를 사용하여 실험을 수행하였는데 기존연구에 의하면 공기의 속도가 40m/s 정도이고, 노즐의 직경이 0.03m 이면 대략 750Hz 까지의 난류요동이 발생할 수 있으므로 온도의 요동을 충분히 감지하기 위해서는 고감도의 온도측정 센서 즉, 센서의 감응시간이 0.2ms 이하인 센서가 요구된다. 이 정도로 요동하는 온도요동의 진폭을 측정하기 위하여서는 직경이 3 μ m 정도인 센서가 필요하므로 이 실험에서는 cold wire를 주 센서로 사용하였다. 이 센서는 고가 일뿐만 아니라 쉽게 파손되어 연구에 어려움이 수반된다. 센서의 감응도(sensitivity)에 대한 정확한 결정방법과 감응도가 낮은 센서로 측정하여 고주기의 유동현상을 구현할 수 있는 보상방법을 개발하면 차후의 유사한 실험에서는 저가이면서 다루기 쉬운 열전대를 사용할 수 있을 것으로 예상된다. 그러므로 난류열혼합 현상을 측정하는 이 실험에 여러 종류의 열전대를 cold wire와 동시에 설치하여 온도의 감응도를 연구하는 실험을 부차적으로 수행하였다. 이 논문에서는 난류열혼합 영역에 설치한 2종류의 cold wire와 4종류의 열전대에서 측정한 온도요동량을 비교분석한 것에 대해 기술하였다.

요동의 진폭을 측정하는데 있어서 요동의 주기는 센서의 감응도에 직접적인 영향을 미치므로 난류열혼합이 일어나는 영역(온도장)에서 측정한 실험자료들의 요동주기 분석이 선행되어야 한다. 현재 이 실험에서 측정한 실험자료들의 주기를 분석하는 단계에 있어 센서의 감응도를 분석하고 이론을 개발하는 데는 제한적이므로 이 논문에서는 실험자료를 정리하고 이에 미치는 인자들의 경향을 분석하였다.

2. 실험

2.1 실험장치

이 연구에 활용한 실험장치인 thermal striping 실험장치는 구동유체로 공기를 사용하였다. 고온의 공기와 저온의 공기가 평형으로 인접한 노즐들에서 분사되어 실험부에서 혼합되는 형태이다. 실험장치의 개념도는 그림 1에 도시하였다. 실험장치는 두개의 루프 즉, 실험부에 고온의 공기를 공급하는 루프(고온루프)와 저온의 공기를 공급하는 루프(저온루프)로 구성된다. 고온루프는 blower에서 공급되는 공기가 유량조절용 밸브를 통과한 후 필터(Filter-H), strainer, 유량계(FM-H)를 거친 후 가열기(Heater-H)에서 가열되어 실험부에 공급된다. 저온루프에서는 Triple Jet 실험부의 두개의 저온용 노즐에 공기를 공급하기 위하여 가열기(Heater-C)와 필터(Filter-C)를 통과한 후 두개의 배관으로 나누어진 후 각각의 유량계를 통과하여 실험부에 공급된다.

그림 2와 같은 규격으로 실험부를 2개를 만들었다. 고온과 저온으로 냉각재가 분출되는 인접한 핵

연료집합체들의 경계면을 모의하는 Double Jet 실험부와 핵연료집합체 중심간의 유출거리를 고려하여 모의한 Triple Jet 실험부 등이다. 노즐의 규격은 15x180mm 이다. Double Jet 실험부는 두개의 노즐이 두께 5mm인 유리판을 사이에 두고 붙어 있는 형태이다. Triple Jet 실험부는 노즐의 중심들 간의 간격이 52.5mm 이고, 중심 노즐에는 고온의 공기가 좌우 측면 2개에는 저온의 공기가 유입된다. 유입관은 충분히 발달된 난류를 실험부에 주입하기 위하여 길이가 1500mm이고, 이 주입관들에는 LDV에 의한 유속을 측정하기 위해 smoke를 주입하는 주입구가 설치되어 있다. 공기가 혼합되는 노즐의 상부는 폭 360mm, 넓이 360mm, 높이 2000mm 이다. 이 실험부의 하부 1000mm는 육안으로 관찰하기 위하여 양 측면을 유리로 제작하였다.

두개의 blower는 SIMENS 사의 2단 RLING blower로 최대용량이 160 liter/sec 이다. 유량계는 OMEGA 사의 turbine 형 가스용 유량계로 1% reading 오차를 갖고 있다. 고온루프에 설치된 유량계의 최대용량은 118 liter/sec이고, 저온루프의 유량계는 61.4 liter/sec 이다. 장치의 설계온도는 100℃ 이고, 설계압력은 blower의 헤드를 고려하여 0.5기압이다. 가열기에 의해 실험장치의 운전온도는 20~90℃ 범위에서 조절된다. 유량계의 상류에는 strainer를 설치하였고, 또한 충분한 유로길이를 유지하였다. 필터는 온도측정용으로 사용되는 cold wire를 보호하기 위한 것이며, 또한 유량의 ruffle을 줄이는 데도 기여한다.

이 실험장치는 온도요동의 주기와 진폭을 측정하기 위하여 설치한 것이므로 초기의 노이즈와 ripple을 최소한으로 줄이는 방향으로 제작하였다. Ripple이 적은 blower를 사용하였고, 유로의 중간에 설치된 필터, 가열기 및 strainer는 ripple을 감소시키는 역할을 한다. 노즐의 유입관 및 유량계의 유입관과 유출관을 충분히 길게 만들어 충분히 발달된 난류가 형성되도록 설치하였다. 실험장치는 전기적으로 분리하여 1급 접지에 연결하였고, 전기를 많이 사용하는 가열기와 blower는 전기적으로 실험장치와 격리하였다.

2.2 온도측정 센서

유속이 10~40 m/sec 범위에서 공기의 난류특성은 50Hz에서 750Hz까지 고주파로 요동한다. 이 온도의 요동을 충분히 측정하기 위해서는 고감도의 온도센서가 필요하다. 초기온도 T_∞ 에서 시스템의 온도가 T_0 로 변할 때 t 초 후 센서에 감지되는 온도 T 는 다음과 같다.

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = 1 - \exp\left[-\left(h/\rho C_P \frac{V_s}{A_s}\right)t\right] \quad (1)$$

여기에서 h 는 유체의 열전달계수이며 V_s , A_s , ρ , C_P 는 센서의 부피, 표면적, 밀도 및 열용량이다. 센서가 직경이 d 인 wire이면 시간상수(time constant) τ 는 다음과 같이 표시된다.

$$\tau = \frac{\rho C_P d}{4h} \quad (2)$$

유체의 열전달계수 h 는 직경이 작은 wire에서는 Kramers[1]의 실험식이 이용되는데 이 실험식에서 wire의 직경을 기준으로 한 Reynolds number의 범위는 $0.01 < Re < 10000$ 이다.

$$Nu = hd/k = 0.42Pr^{0.2} + 0.57Pr^{0.33}Re^{0.5} \quad (3)$$

여기에서 k 는 유체의 열전도도이고, Pr 은 유체의 Prandtl number 이다. 온도용 센서의 시간상수는 온도가

변할 때 그 변화의 62.3%를 감지할 수 있는 시간을 의미하는데 이 시간상수의 대략 5배의 시간이면 변화량의 99.9%를 감지할 수 있다. 그러므로 측정하고자하는 시스템의 변화시간이 센서의 시간상수보다 5배 이상 길면 실제로 변화하는 온도를 그대로 측정할 수 있다.

난류에서 요동의 주파수(f)는 유체의 속도(V)와 수력직경(d_h)에 관련되는데, 요동의 특성을 나타내는 무차원 주파수(f^*)는 다음과 같이 정의된다.

$$f^* = \frac{d_h f}{V} \quad (4)$$

기존의 실험들[2]에서는 f^* 는 0.1~0.75 정도의 범위를 보이고 있다. 500Hz로 요동하는 공기의 온도를 측정하기 위해서는 다음과 같은 과정을 거쳐 필요한 센서의 시간상수를 결정할 수 있다. 한 개의 sine 파에서 온도의 상승과 하강이 이루어지므로 변화하는 시간은 1.0 ms 이므로 센서의 시간상수는 0.2ms보다 적어야 한다.

이 실험에서는 TSI사 제품인 직경이 1.27 μ m인 cold wire와 카노막스사의 직경이 5 μ m인 cold wire를 사용하여 측정하였다. 열전대의 감응속도를 비교하기 위하여 그림 3에서와 같이 cold wire 2개와 동시에 직경이 다른 열전대 4개를 간격이 5mm되게 설치하였다. 유속 10m/s, 온도 60 $^{\circ}$ C에서 예측한 센서들의 시간상수는 표 1에 기술하였다. 이 표에서 보면 난류열혼합 실험에서 직경이 1.27 μ m인 cold wire 만이 공기를 사용하는 온도요동의 변화를 실제 현상대로 측정할 수 있으며 다른 센서를 사용하면 온도를 보정하여야 되는 것을 알 수 있다.

2.3 실험방법 및 범위

초기의 온도와 유속을 변화시키면서 12종류의 초기조건에서 온도장 영역의 온도와 온도요동량을 측정하였다. 실험인자를 변화시키는 순서는 가장 먼저 온도를 고정시키고 다음으로 유속을 변화시켰다. 온도와 유속이 설정조건으로 안정화되면 설정한 한 수직 위치에서 센서를 고정시킨 센서 설치대를 수평방향으로 이동하면서 측정하였다. 온도장 영역을 수평(360mm)으로는 23에서 40개소에 측정하였는데 중심에는 최소 2.5mm 간격으로 변두리에는 10~50mm 간격으로 측정하였다. 공기의 유로가 진행되는 방향인 수직방향은 12개소에 25~100mm 간격으로 측정하여 실험조건에 따라 다르나 대략 한 실험조건의 온도장에서 총 측정한 위치는 최소한 276개소이다.

측정에서는 한개 센서의 측정시간을 늘리기 위하여 cold wire 2개와 열전대 2개만을 HP1413C 계측기로 측정하였다. 각각의 센서에 대해 초당 4096개의 data를 4초간 측정하였고, 이를 7번 반복하였다. 센서의 감응도를 비교하기 위해서 동시성은 없지만 같은 실험조건에서 서로 다른 센서들이 같은 위치에 있을 때의 data를 비교, 분석하였다.

3. 실험결과 및 검토

3.1 측정오차

유량의 오차는 $\pm 1\%$ 이고, 30m/s에서 최대 ripple은 0.1m/s, RMS 값은 0.03m/s 이었다. 실험에 사용한 모든 열전대는 0 $^{\circ}$ C와 100 $^{\circ}$ C에서 보정하여 사용하였다. Cold wire의 온도보정은 실험장치에서 공기의 유속을 30m/sec 보내면서 노즐 출구에서 열전대의 온도와 cold wire의 저항을 계측하여 보정하였다. 실험범위에서 열전대는 $\pm 0.3^{\circ}$ C의 오차를 보였고, cold wire는 최대 $\pm 0.5^{\circ}$ C의 오차를 보였다. 주입되는 공기의 온도는 최대 $\pm 0.13^{\circ}$ C의 ripple 보였고, 60 $^{\circ}$ C에서 RMS 값은 최대 0.02 $^{\circ}$ C 이었다.

3.2 제트유동에서 속도분포

열혼합 영역에서 온도의 요동을 정확히 측정하기 위해서는 센서의 감응도가 중요하고, 감응도 분석에는 요동의 주파수가 필요하다. 요동의 주파수는 유체의 속도에 관련되고, 센서의 시간상수도 속도에 관련된다. 그러

나 본 실험에서는 온도장을 먼저 측정하고 속도장을 차후에 측정하기 때문에 현 단계에서는 속도분포를 이론적으로 예측하는 것이 필요하다. 노즐이 한 개인 2차원 난류 제트유동에서 유동의 제트 진행방향(x)의 속도 u 와 제트와의 수직방향(y)의 속도 v 의 분포는 무차원 거리 $\eta = \sigma y/x$ 을 사용하여 Tollmien[3]에 의해 다음과 같은 이론식이 주어진다.

$$u = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{\frac{K\sigma}{x}} (1 - \tanh^2 \eta) \quad (5)$$

$$v = \frac{\sqrt{3}}{4} \sqrt{\frac{K}{x\sigma}} [(2\eta(1 - \tanh^2 \eta) - \tanh \eta)] \quad (6)$$

여기에서 K 는 kinematic moment로 초기의 제트에서의 속도가 u_o , 노즐의 폭이 s 이면 $K = u_o^2 s$ 이고 σ 는 실험값으로 7.67이다. 이 이론은 본 실험에서와 같이 인접한 노즐이 2 내지 3개이면 그대로 적용할 수 없다. 제트-1의 중심이 y -좌표 상에서 y_1 있고, kinematic moment가 K_1 이면 이 제트의 속도 u_1, v_1 은 식(5)과 식(6)에서 η 는 $\eta = \sigma(y - y_1)/x$ 로, K 는 K_1 으로 대치하면 된다. 제트가 3개 있을 때에 이 식들로 기술되는 제트의 형태가 전체의 momentum 만이 보존되게 변한다고 가정하면 3개의 제트 즉, 제트-1, 제트-2, 제트-3에 의해 형성되는 속도장(u, v)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (7)$$

$$v = \sqrt{v_1 \cdot |v_1| + v_2 \cdot |v_2| + v_3 \cdot |v_3|} \quad (8)$$

이 식을 실험장치와 같은 조건인 $y_1 = -52.5\text{mm}$, $y_2 = 0\text{mm}$, $y_3 = 52.5\text{mm}$ 로 설정하고 $s=15\text{mm}$ 인 경우 초기 속도가 각각 10m/s, 20m/s, 10m/s 이면 식(7)을 사용하여 계산한 속도분포는 그림 4와 같다. 이 논리는 속도장 측정실험에서 검증할 예정이다.

3.3 실험자료 분석

초기조건이 다른 12종류의 실험에서 속도의 구배가 완만한 지점인 노즐부터의 거리 323~823mm 구간에서 센서의 감응도를 비교할 수 있는 1510개의 실험자료를 생산하였다. 두개의 센서가 한 쌍을 이루는데 비교할 수 있는 쌍의 수는 10개이고, 12개의 실험조건과 연관시키면 25개 그룹의 data를 획득하였다.

그림 5는 대표적으로 설정유속이 10/20/10m/s 이고 설정온도가 40/60/40℃ 인 실험에서 수평 -10mm, 수직 173mm에서 계측된 온도의 요동을 보이고 있다. 여기에서 수평의 중심점은 중심에 있는 노즐의 중앙을 0으로 설정하였고, 수직위치는 노즐의 출구에서부터의 거리이다. 이 경우에 온도요동은 $\pm 5^\circ\text{C}$ 정도를 보이고 있으며, 육안으로 0.1초 간격에 대략 10개의 주기가 관측된다. 한 주기에는 대략 40개의 data가 존재하므로 충분히 주파수 분석이 가능하다. 이를 FFT하여 주파수의 spectrum을 분석한 것이 그림 6이다. Spectrum은 100Hz 근방에서 최대값을 보이고 있으나 50Hz에서 300Hz 범위로 넓게 분포되어 있고, 다른 시간구간에서도 이와 같은 현상을 보이고 있다. 이 위치에서 식(7)으로 계산한 속도는 11.8 m/s 이었고, 수력직경은 27.7mm 이므로 식(4)에서 주파수를 100Hz로 보면 무차원 주파수는 0.235 정도이다.

무차원 온도요동량(θ^*)은 온도의 RMS 값을 주입되는 두 유체의 온도차($T_H - T_C$)로 나눈 것으로 다음과 같이 정의된다. 여기에서 T_m 은 평균온도, N 은 data의 개수를 의미한다.

$$\theta^* = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (T_i - T_m)^2 / N}}{T_H - T_C} \quad (9)$$

그림 7은 같은 실험조건에서 열전대와 cold wire에서 측정한 평균온도를 도시한 것이다. 노즐에서 48mm 떨어진 위치에서는 약간의 온도차가 나타나는데 이는 하부면의 영향인 것으로 생각된다. 그림 8에서는 같은 조건에서 온도의 요동량을 보여주고 있는데 직경이 같은 두개의 cold wire는 거의 값이 같은 반면 열전대는 직경이 클수록 감응도가 낮아 요동량이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 이는 50Hz에서 300Hz 정도로 요동하는 이 실험에서는 열전대들의 시간상수가 너무 크기 때문이다.

그림 9는 Triple Jet 실험에서 유속이 10/20/10m/s, 설정온도가 40/60/40℃인 경우에서 4개의 센서의 쌍(sensor A/ sensor B)에서의 온도요동량의 비를 유속에 따른 변화는 경향을 보여주고 있다. 쌍을 이루는 두 센서의 온도요동량 비(θ_B^*/θ_A^*)는 식(9)에서 정의한 두개 센서의 온도요동량의 비를 의미한다. 이 그림에서 보면 유속이 5.5~11.5m/s 범위에서는 온도요동량의 비는 열전대로만 쌍을 이루는 50.8/127 μ m 쌍인 경우를 제외하면 유속에 무관하거나 약간 감소하는 것으로 나타난다. 직경이 같은 1.27/1.27 μ m 센서들의 요동량의 비는 1 ± 0.05 범위를 보이고 있고, 센서의 직경차가 가장 큰 1.27/127 μ m 센서들의 이 값은 0.15 정도이다. 그러나 열전대와 열전대로 구성된 50.8/127 μ m 센서 쌍은 cold wire와 열전대로 구성된 1.27/50.8 μ m 센서 쌍과 유사한 값을 보이고 있다. 이 이유에 대해서는 차후에 분석이 필요하다.

그림 10은 직경 1.27 μ m인 cold wire와 직경 50.8 μ m인 열전대로 구성된 센서 쌍으로 5개의 실험조건에서 측정한 값을 서로 비교한 것이다. 이 그림에서 보면 온도의 조건이 달라도 속도의 조건이 같으면 동일한 결과를 보이고 있다. 실험조건에 관계없이 서로 비슷한 범위의 값을 보이고 있으며 유속이 증가할수록 감소하는 것을 볼 수 있다. 이론적인 분석에 따르면 유속이 증가하면 요동의 주파수가 증가하게 된다. 요동 주파수가 증가하게 되면 직경이 1.27인 cold wire는 전 주파수 영역에서 충분한 감응도를 갖고 있어 감응도의 변화가 없지만, 감응도가 낮은 센서의 감응도는 더욱 적어지게 되어 그 요동량의 비는 더욱 적어지게 된다. 즉, 이론적으로 유속이 증가되면 온도요동량의 비는 감소하게 되는데 이 실험결과와 잘 일치하고 있다.

그림 11은 25개 그룹 각각에서 측정한 data를 평균한 값을 보이고 있다. x-축은 각 쌍의 센서들의 시간상수의 비를 보여주고, y-축은 온도요동량의 비를 보여주고 있다. 요동량의 비는 시간상수의 비의 log 값에 따라 감소함을 보이고 있다.

4. 결 론

- (1) 난류열혼합 실험에서 온도측정 센서의 감응도를 비교분석할 수 있는 센서 10개 쌍과 실험조건에 따른 25개의 그룹을 갖는 실험자료를 1510개 생산하였다.
- (2) 유속이 11.8m/s인 지점에서 주파수 spectrum은 100Hz 근방에서 최대값을 보이나 50Hz에서 300Hz 범위로 넓게 분포되었다. 이 때 무차원 주파수는 0.235 이었다.
- (3) 무차원 온도요동량의 비는 센서의 쌍에 따라 뚜렷한 경향을 보였고, 유속이 증가하면 온도요동량의 비는 같거나 또는 증가하는 경향이 여러 실험조건에서 나타나는데 이는 이론과 일치하고 있다.
- (4) 무차원 온도요동량의 비는 시간상수의 비의 log 값에 따라 비례적으로 감소하였고, cold wire와 열전대가 쌍을 이루는 경우와 열전대와 열전대가 쌍을 이루는 경우는 다른 경향을 보였다.
- (5) 요동의 주파수가 센서의 감응도에 영향을 미치므로 이에 대한 실험자료 분석과 이론 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 지원에 의하여 되었다.

참고문헌

1. H. Kramers, "Heat Transfer from Spheres to Flowing Media", Physica, 12, 61-80, 1946.
2. S. Moriya & I. Ohshima, "Hydraulic Similarity in the Temperature Fluctuation Phenomena of Non-isothermal Coaxial Jet", Nucl. Eng. & Des., 120, 385-393, 1990.
3. H. Schlichting, "Boundary Layer Theory", McGraw-Hill, p746, 1976.

표 1 온도센서의 종류에 따른 time constant (공기속도: 10m/s, 온도: 60℃)

센서	cold wire $\phi 1.27\mu\text{m}$	cold wire $\phi 5.0\mu\text{m}$	열전대 $\phi 50.8\mu\text{m}$	열전대 $\phi 76.2\mu\text{m}$	열전대 $\phi 128\mu\text{m}$	열전대 $\phi 254\mu\text{m}$
Time constant (ms)	0.05	0.51	30	56	125	360

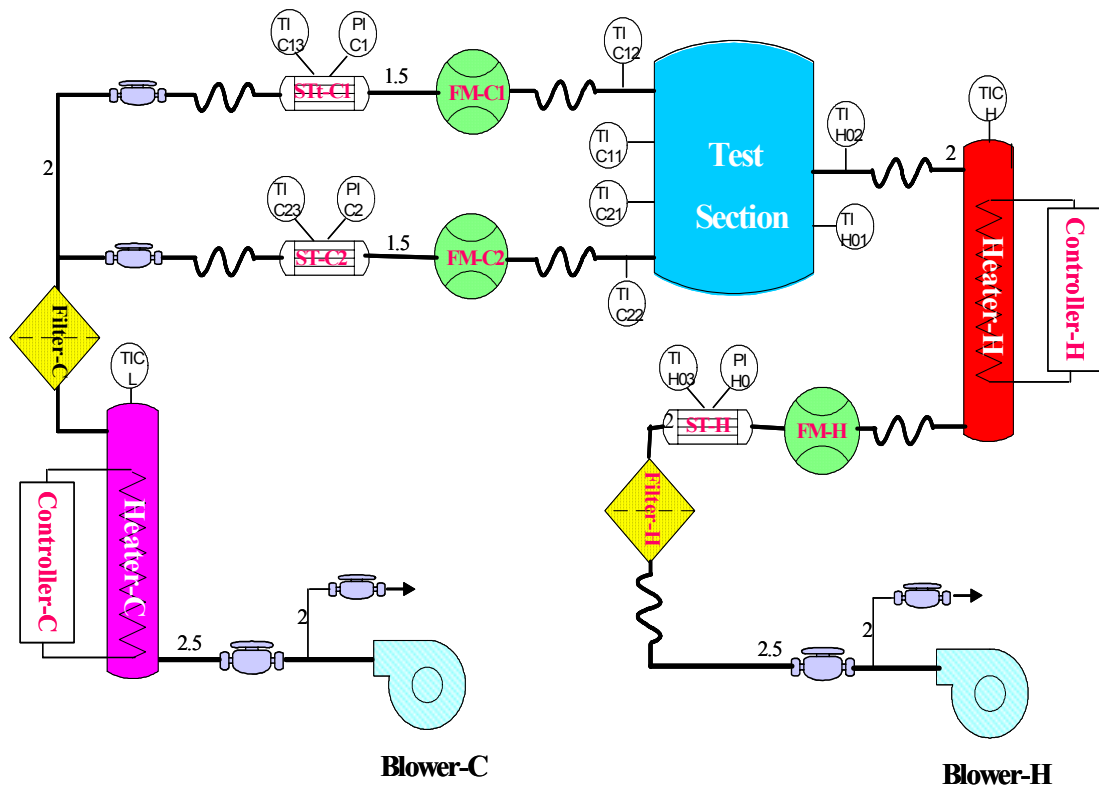


그림 1 Thermal Stripping 실험장치 개념도

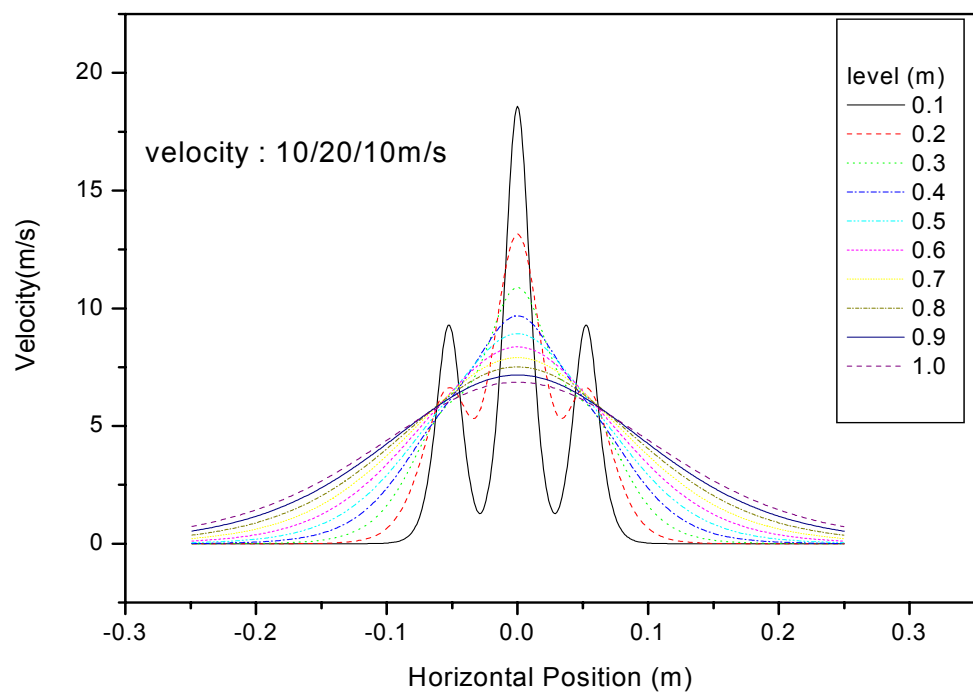


그림 4 유속 10/20/10m/s인 Triple Jet에서 이론식으로 계산한 유속 분포도

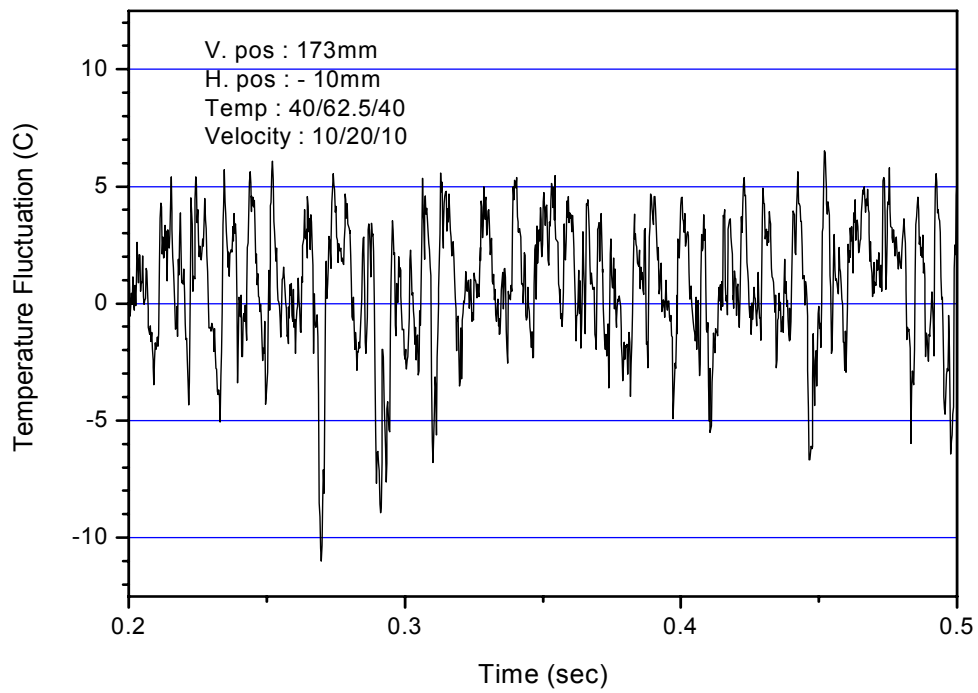


그림 5 시간에 따른 온도장에서 온도의 요동현상

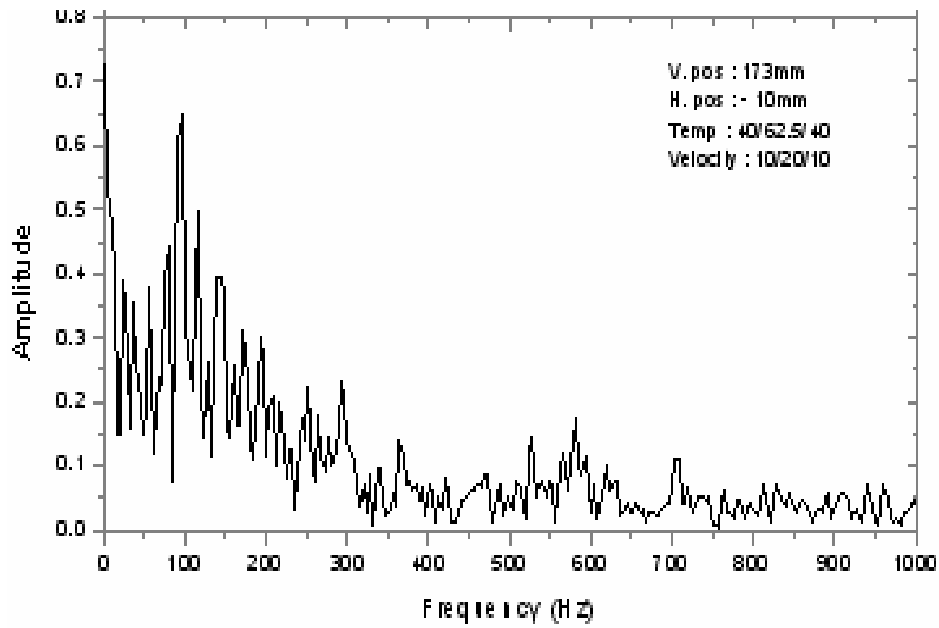


그림 6 온도요동의 주파수 spectrum density

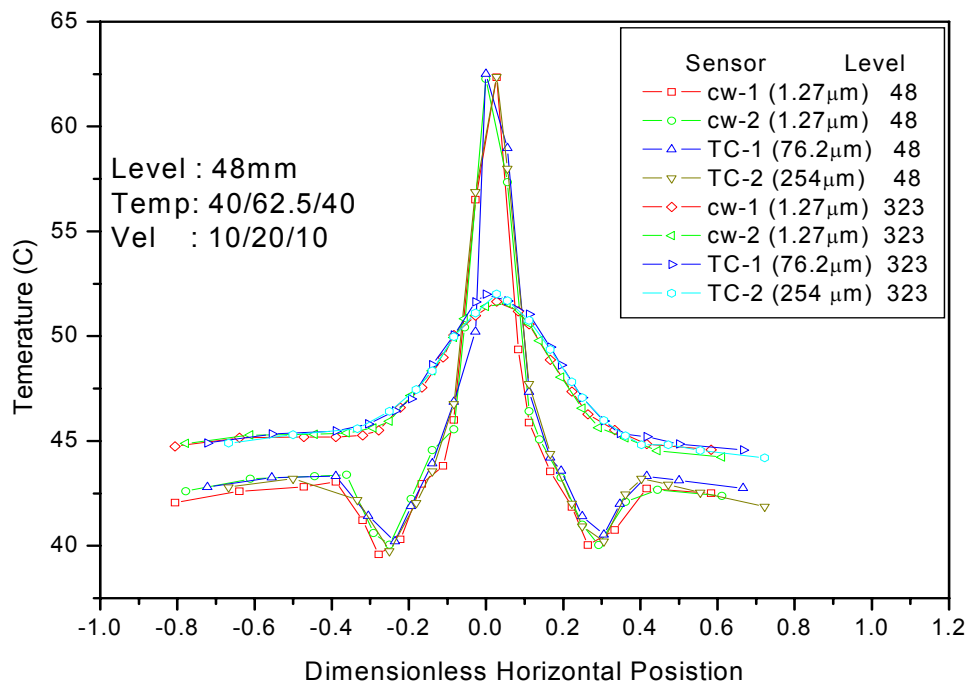


그림 7 수평위치와 수직위치에 따른 2개의 cold wire와 2개의 열전대의 평균온도

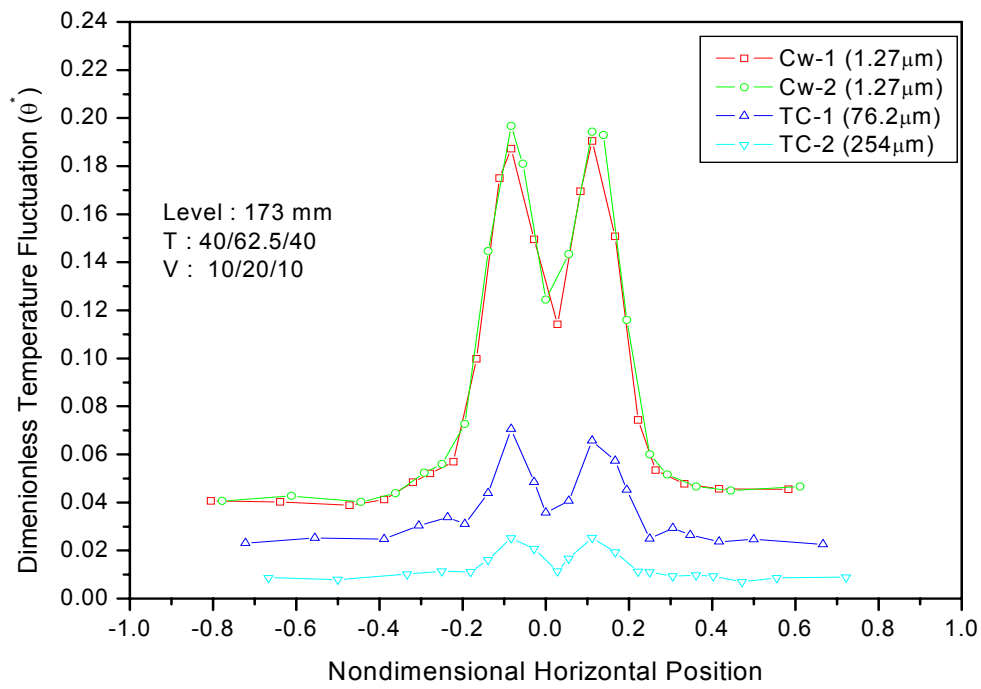


그림 8 수평위치와 수직위치에 따른 2개의 cold wire와 2개의 열전대의 온도 요동량

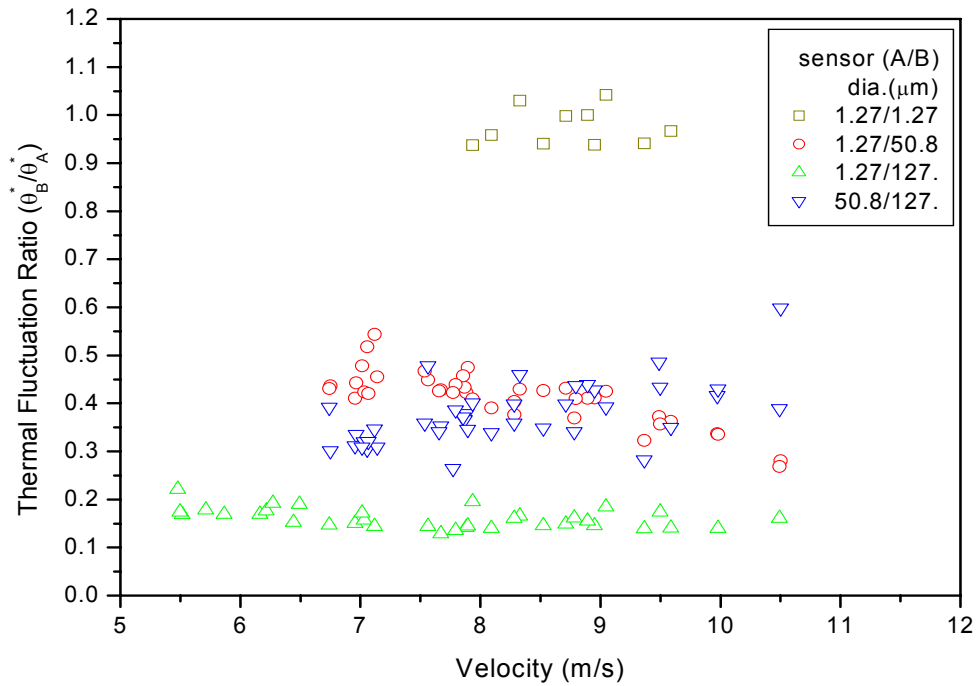


그림 9 유속이 10/20/10m/s, 온도가 40/60/40℃ Triple Jet 실험에서 규격이 다른 4쌍의 센서에서 측정 한 온도요동량의 비와 유속관계

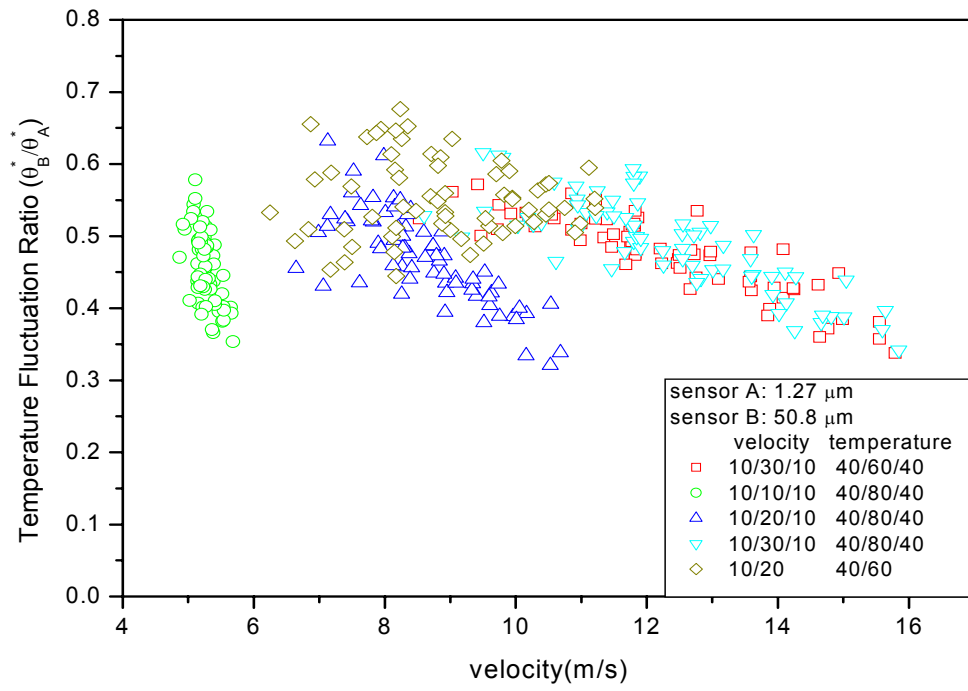


그림 10 Cold wire (1.27 μm)와 열전대(50.5 μm) 쌍을 사용하여 측정한 실험들에서 온도요동량의 비와 유속과의 관계

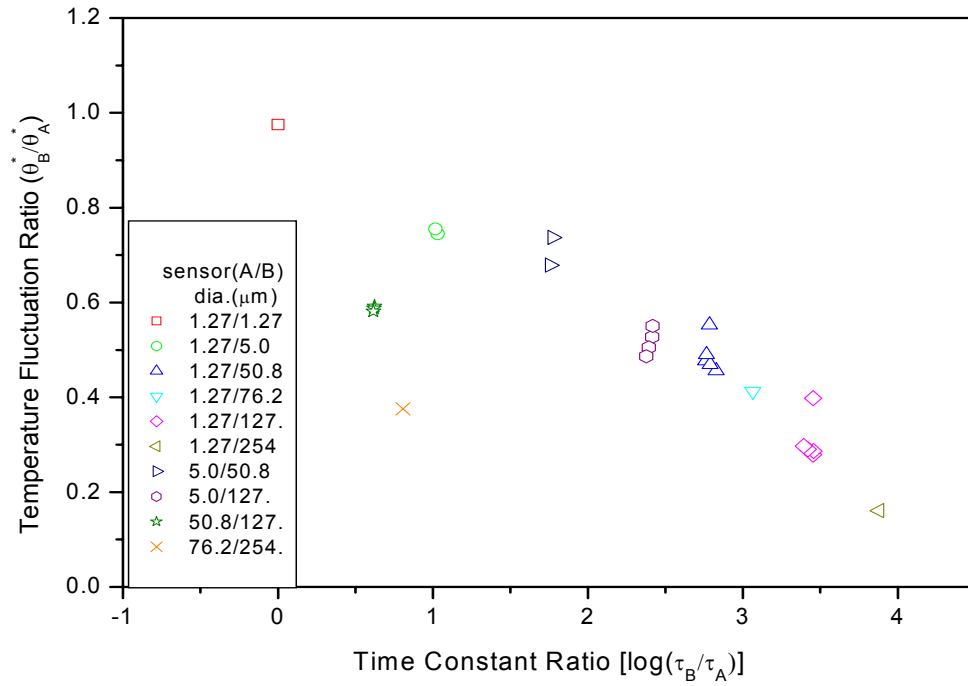


그림 11 센서 쌍과 실험조건에서 같은 조건에서 평균한 온도요동량 비를 시간상수 비의 log 값과의 관계