

〈論 文〉

流體속에 잠긴 球周圍에서의 熱 및 流動特性에 관한 研究

朴 喜 鎔* · 林 景 彬**

(1981年 5月 6日 接受)

Study on the Thermal and Flow Characteristics around a Sphere
Submerged in the Fluid

Hi Yong Pak and Kyung Bin Lim

Abstract

An empirical formula for the mass flow rate in natural convection plume above a spherical heated body which is submerged in a finite fluid contained in a tank was determined.

The ratio of depth of submergence to diameter of the sphere for which the sphere sensed an infinite medium was found to be bigger than 7.

A dimensionless heat transfer correlation for the natural convection from a sphere was determined for $Gr \cdot Pr$ between 7×10^7 and 2×10^8 also.

1. 序 論

流體속에 잠겨진 加熱體의 온도가 增加함에 따라 그 주위의 流體의 온도도 增加하고 따라서 境界層이 형성되면서 浮力에 의하여 주위유체가 自由表面쪽으로 상승되는 소위 "plume"이 생기게 되는데, 이 plume의 質量流量에 관한 지식은 熱 및 流動特性의 기초가 된다.

원통형 加熱體 周圍에서 自然對流이 일어나는 경우 plume의 質量流量에 관한 연구는 수평의 論文을^(1,2,3) 찾아 볼 수 있었으나 球形 加熱體 주위의 自然對流에서의 plume의 質量流量에 관한 研究는 전혀 수행되어 있지 않다.

원통형 加熱體 주위에서 plume의 質量流量에 관한 研究는 Gebhart¹⁾ 등에 의하여 최초로 수행되었다. 이들은 무한유체속에 수평원통이 잠겨져 있음을 가정하기 위하여 지름이 대단히 작은 수평으로 놓인 線熱源

(line source) 주위의 2차원 境界層內에서 연속 방정식, 운동량 방정식 및 에너지 방정식을 세우고, 여기에 相似變數와 流動函數를 가정하여 다음과 같은 結果式을 유도하였다.

$$\dot{m}_{ex} = 4^{\frac{3}{5}} J \left[\frac{g \beta \rho^2 \mu^2 Q}{C_p I} \right]^{\frac{1}{5}} x^{\frac{3}{5}} \quad (1)$$

여기서 \dot{m}_{ex} 는 원통의 단위길이당 plume의 質量流量이고 I 와 J 는 Prandtl 수에 따라서 정해지는 常數이다. 또한 이들은 空氣中에서 지름이 0.05in이고, 길이가 6in인 wire를 加熱하고 간접계 실험을 하여 線熱源위로 거리가 線熱源 直徑의 400배 이상에서 式(1)은 實驗結果와 잘 일치한다는 사실을 확인하였다.

Skipper²⁾ 등은 기름탱크안에 수평원통형 히타를 設置하여 實驗을 行하였는데, 히타 주위의 plume이 상승하여 自由表面으로부터 가열된 流體의 層이 형성되고 이 層의 下端境界가 아래로 내려오는 時間 τ 와 自由表面으로부터의 거리 x 와의 관계는 거의 모든 형태의 히타에 대하여 $\tau = Cx^n$ 으로 나타낼 수 있음을 확인하였다.

* 正會員, 漢陽大學校 工科大學

** 漢陽大學校 大學院

Fand²⁾ 등은 깊이 46in의 물통속에 지름이 $d=0.4555$ in, 길이가 1in의 수평 원통형 히터를 사용하여 실험을 수행하였는데 $\frac{1}{2} < \frac{x}{d} < 100$ 의 범위에서 plume의 質量流量을 나타낼 수 있는 관계식을 발표하였다.

이와 같이 주로 수평원통형 가열체 주위에 대해서만 연구가 수행된 이유는 많은 가열체의 形狀이 원통에 가깝고 또한 원통형 모델에 대한 解釋의 研究가 비교적 간단하며, 加熱體의 제작이 용이하기 때문이라고 판단된다. 그러나 加熱體 가운데는 원통형으로 가정할 수 있는 경우에 못지 않게 球形으로 가정할 수 있는 경우도 대단히 많다.

球形의 加熱體가 空氣아닌 다른 流體(특히 液體) 안에서 가열되는 경우의 자연대류 熱傳達에 대하여 Holman⁴⁾은 Yuge⁵⁾가 空氣안에서 실험한 結果에 Prandtl 數를 도입하여 다음과 같은 式을 권장하였다.

$$Nu = 2 + 0.43(Gr \cdot Pr)^{0.25} \quad 1 < Gr \cdot Pr < 10^5 \quad (2)$$

그러나 Yuge의 式은 無限空氣속에서 球가 놓여 있는 경우에 實驗을 한 結果인데 空氣아닌 流體속에서 球로부터 自然對流가 일어나는 實驗을 한다면 일정한 容器안의 流體는 결코 無限流體라고 볼 수 없다.

本 研究에서는 流體안에 잠겨진 球로부터 自然對流 熱傳達이 일어나는 경우 球주위의 plume의 質量流量을 나타낼 수 있는 式을 구하고 有限한 크기의 容器안의 液體속에 잠겨 있는 球形物體주위에 自然對流가 일어날 때 위의 式(2)가 사용될 수 있는 (깊이/구의 직경) 범위를 實驗적으로 구하고자 한다.

2. 理論的 考察

Fig. 1과 같이 流體가 들어 있는 가로 L 세로 W 의 단면과 높이가 H 인 육면체의 容器를 생각하자.

容器內에 잠겨있는 球形物體를 加熱하면 球 周圍에 熱境界層이 생기고, 이 層은 plume의 形態로 상승하여 自由表面으로 떠오르게 되어, Fig. 1의 점선으로 표시한 것과 같은 뜨거운 流體層이 생긴다. 이 加熱된 流體層과 바로 아래에 있는 가열되지 않은 유체 사이에 존재하는 커다란 溫度勾配의 차이 (즉, 밀도의 차이)로 인하여 서로 섞이지 않고 구별되며 두 층의 境界面은 수평을 유지하고 따라서 가열유체층의 하단면의 下降속도는 단면전체에 균일하다고 볼 수 있다.^{2,3)}

球가 加熱되는 동안에 球로부터 떠오르는 뜨거운 流體가 自由表面에 도달하면 그것은 갈라지면서 뜨거운 層을 형성한다. 加熱過程이 계속됨에 따라서 뜨거운

層은 自由表面에 계속 섞이게 되고 이 層의 下端은 계속하여 아래로 내려오며 이 層이 球에 도달하기 전에는 球表面의 온도는 아무런 영향을 받지 않고 일정하게 유지된다.

連續理論에 따라 가열된 유체층의 하단면에서 plume을 통하여 가열유체층으로 들어가는 質量유량은 가열유체층 하단면의 하강으로 인한 質量유량과 같기 때문에 x 단면에서의 plume의 質量유량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{m}_x = \rho(L-P)(W-P)V_x \quad (3)$$

여기서 \dot{m}_x 는 球가 加熱될 때의 plume의 質量流量이고 ρ 는 流體의 密度이며 P 는 自由表面에서 x 만큼 떨어진 plume의 폭이고, V_x 는 加熱된 流體層 下端의 降下速度이다.

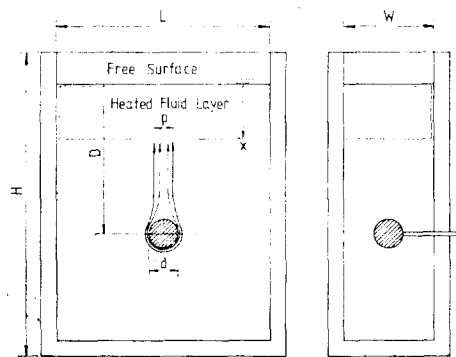


Fig. 1 Coordinate system of analytic model.

수평원통 주위의 자연대류현상에 대한 간섭제사진⁴⁾을 참조하여 보면 plume의 두께는 원통의 지름에 비하여 작다. 球주위의 자연대류현상에서도 비슷한 경향으로 나타난다고 보고 P 는 W 나 L 에 비하여 대단히 작다고 가정하자. 즉 $P \ll W$ 및 $P \ll L$ 이라 하면

$$\dot{m}_x = \rho L W V_x \quad (4)$$

加熱된 流體層 下端이 微小거리 dx 만큼 움직이는데 걸리는 時間 $d\tau$ 는

$$d\tau = \frac{dx}{V_x} = \frac{dx}{\dot{m}_x / \rho L W} = \frac{\rho L W}{\dot{m}_x} dx \quad (5)$$

따라서 加熱된 流體層 下端이 自由表面으로부터 加熱된 球表面까지 도달하는데 걸리는 時間 τ^* 는

$$\tau^* = \rho L W \int_0^{D-d} \frac{dx}{\dot{m}_x} \quad (6)$$

이제 우리는 式(6)에 代入하여 積分을 수행하였을 때 實驗적으로 測定한 τ^* 값과 일치하는 τ^* 값을 나타내는 함수 $\dot{m}_x = f(x)$ 의 형태를 정해야 한다. 이를 위하여

Fand³⁾가 수평으로 놓인 원통주위의 질량流量에 관한 實驗式을 얻기 위하여 사용한 함수의 형태를 인용하면 다음과 같이 된다. 이때 m_x 를 無次元化하기 위하여 m_x 를 점성계수 μ 와 球의 直徑 d 로 나누어 주었다.

$$\frac{\dot{m}_x}{\mu d} = K(GrPr)^n \left(\frac{x}{d}\right)^n \quad (7)$$

여기에서 K, m 및 n 은 常數이다.

式 (7)을 式 (6)에 代入하여 積分해 주면 다음과 같이 된다.

$$\tau^* = \frac{\rho LW}{K(GrPr)^n(1-n)} \left(\frac{D}{d} - \frac{1}{2}\right)^{1-n} \quad (8)$$

式 (8)을 다시 無次元 형태로 表示하면

$$\frac{\tau^* \mu (GrPr)^n}{\rho LW} = \frac{1}{K(1-n)} \left(\frac{D}{d} - \frac{1}{2}\right)^{1-n} \quad (9)$$

이제 實驗을 수행하여 τ^* 를 구하고 이 값과 式 (9)의 τ^* 값이 같아지도록 K, m 및 n 의 값을 定해 주어야 한다.

3. 實 驗

3.1. 實驗裝置

本 研究에서 實驗을 수행하는데 사용한 球은 熱傳導係數가 큰 銅으로 만들었으며, 直徑은 30mm로 하였다. 실험에 사용한 球의 內部는 Fig. 2와 같이 4개 부분으로 構成되어 있다. 銅의 두께는 3mm로 하였으며 銅半球體(hemisphere)는 傳熱선을 감은 中心體(ceramic core)에 꼭 맞게하여 epoxy로 붙였다. 中心體는 無機材料인 矽酸과 Kaolin을 1대 1로 混合하여 150°C로 24時間 加熱시켰다. 그위에 傳熱선을 감기 위하여 4mm 간격으로 홈을 냈으며 傳熱선을 홈에 감은 뒤 미소두께의 Silicon rubber와 雲母를 사용하여 絶緣시켰다. 이때 사용한 傳熱선의 直徑은 0.26mm

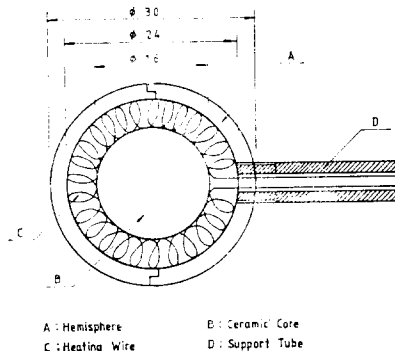


Fig. 2 Cross section of test model.

이고 저항은 23Ω/m이다. 支持管(support tube)은 球를 탱크안에서 수평으로 고정시키기 위하여 사용되었고, 이 管을 통하여 傳熱선을 容器밖으로 뽑아내었다. 支持管을 통한 傳熱傳導損失을 가급적 減少시키기 위하여 支持管은 비교적 熱傳導係數가 낮은 0.5% C의 steel로 만들었으며 漏水를 방지하기 위하여 끝에 나사를 내어 테프론 테이프를 감아 球에 끼워넣고 epoxy로 封하였다.

熱電對는 Chrome-Alumel ($\phi 0.1\text{mm}$)을 사용하였고 熱接點은 熱傳導係數가 크고 電氣적으로 絶緣性이 큰 Omega社 제품인 Copper Oxide Cement(使用範圍: 215°C~530°C)를 사용하여 球表面에 부착하여 容器의 頂 뚜껑을 통하여 線을 뽑아내었다. 보다 精密한 自然對流實驗을 위해서는 熱電對를 球表面안으로 구멍을 뚫어 表面 가까이 부착시켜서 支持管을 통하여 線을 뽑아야 하겠지만 製作의 어려움 때문에 바로 부착하였다. 그렇게 하더라도 熱電對의 지름이 불과 0.1mm밖에 되지 않기 때문에 對流流動에 미치는 영향은 무시할 수 있다.

이때 球의 表面은 거울과 같이 깨끗이 닦아서 輻射熱傳達을 最少化하고 또한 氣泡가 발생하지 않도록 하였다.

本 實驗에 사용한 容器는 水頭에 의한 水壓에 견디도록 두께가 5mm인 아크릴을 사용하였고 가로 400mm, 세로 200mm 높이 800mm로 하였다. 容器안에는 물을 넣어 실험하였고, 球의 中心은 容器의 바닥으로부터 150mm되는 곳에 설치하였으며 容器안의 물의 量을 조절함으로써 自由表面으로부터 球의 中心까지의 길이 D 와 球의 直徑 d 의 比를 조절할 수 있었고, 최대 D/d 는 20까지 할 수 있었다. 球의 加熱量을 측정하기 위하여 Wattmeter를 설치 하였으며, 온도의 측정은 Fluke 회사의 digital thermometer (Model 2190)로 하였다.

3.2. 實驗方法

球形의 實驗 model 제작시 電熱線을 가급적 均일하게 감아서 球의 表面溫度가 均일하게 되도록 하였다. 그러나 球주위에 熱境界層이 생겨서 plume의 형태로 上昇하기 때문에 球의 方位角에 따라 溫度가 달라짐은 널리 알려진 사실이다.

方位角에 따른 球表面의 溫度變化를 檢討하기 위하여 Fig. 3과 같이 球의 下端인 停滯點으로부터 시작하여 45° 간격으로 5군대에 熱電對를 설치하고 자기 다

은 加熱量에 대하여 溫度를 측정하였다.

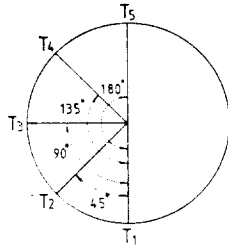


Fig. 3 Locations of thermocouple hot junctions on spherical surface.

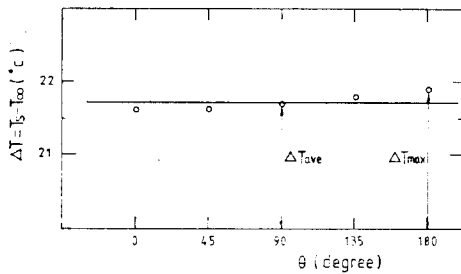


Fig. 4 Typical surface temperature variation when $q=65.8W$.

Fig. 4는 $q=65.8W$ 일 때의 表面溫度分布의 一例이다. 여기에서 縱軸은 球表面溫度 T_s 와 境界層밖의 물의 부피溫度 T_∞ 의 차이, 즉 $\Delta T = T_s - T_\infty$ 를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 $\theta=180^\circ$ 일 때 ΔT_{max} 가 되고 $\theta=0^\circ$ 일 때 ΔT_{min} 이 되며, $\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}=0.928$ 이고 $\theta=90^\circ$ 일 때 대략 ΔT 의 평균값을 나타낸다. 이와같은 傾向은 다른 값의 加熱量에 對해서도 대략 비슷하게 나타나기 때문에 實驗을 수행하는 동안에는 $\theta=90^\circ$ 인 지점에서만 表面溫度를 측정하여 이 값을 T_s 값으로 정했다.

加熱되지 않은 물의 부피溫度 T_∞ 를 測定하기 위하여 球의 下端部로부터 熱境界層밖으로 충분히 떨어졌다고 생각되는 120mm 지점 (容器 밑 바닥으로부터 30mm 높이)에 熱電對를 設置하였다.

容器內 물의 各位置에서의 溫度分布를 알기 위하여 熱電對를 球의 中心軸으로부터 연직방향으로 50mm 間隔으로 設置하였으며 水面높이에 따라 그 位置를 수시로 변경하였다. 容器內에 있는 水面의 높이는 容器下端部에 수도꼭지를 달아서 調節하였고, 물의 溫度를 일정하게 하기 위하여 實驗이 끝나면 每번 물을 갈아 넣었다.

本 實驗에서 電源에 의해 加해진 加熱量이 自然對流로 放熱되는 것이 아니라 支持管을 통한 傳導熱傳達量이 매우 크리라 생각된다. 이것을 검토하기 위하여 支持管上에 가급적 球에 가까운 지점(2mm 지점)과 7mm 떨어진 지점에 대하여 동시에 溫度를 測定하고 微小거리에서 支持管을 통한 自然對流를 無視하고, 또한 Δx 간의 線型的인 溫度分布를 假定하여 $q=KA(T_1-T_2)/\Delta x$ 를 이용하여 熱損失을 계산하여 본 결과 여러값의 q 에 대하여 대략 6%程度의 傳導에 의한 熱損失이 있었다. 輻射熱로 인한 熱損失 역시 고려하였으나 본 실험의 溫度範圍內에서는 極히 작기 때문에 무시하였다.

Fig. 5에는 球를 加熱하였을 때 球의 表面溫度가 時間에 따라 變하는 傾向을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 表面溫度가 a 점까지 갑자기 上昇하게 되는데 이것은 球周圍의 自然對流 境界層이 形成되기 전에 球 自體의 傳導현상 때문이고 自然對流 境界層이 발달함에 따라 ab 를 따라서 溫度가 떨어져서 드디어 bc 구간과 같이 定常狀態에 도달하게 된다. 그러나 τ_c 로 表示된 時間에 도달하면 뜨거운 層이 球表面에 도달하고 球表面溫度는 선분 cd 를 따라 증가한다. 그러므로 實驗의 結果로 τ_a 와 τ_c 를 決定하면 定常狀態 동안의 質量流量을 測定할 수 있다.

式 (9)에서 τ^* 는 自由表面 바로 아래에 가열된 層이 自由表面으로부터 球의 表面까지 도달하는 時間이고, 이 값을 實驗의 結果로 測定하여 式 (9)에서 n, m 및 K 값을 定하여야 한다.

Fig. 5에서 $\tau=0$ 에서 $\tau=\tau_b$ 까지의 期間에서 m_x 가 τ 에 關하여 어떠한 형태로 變하는가에 對해서는 별도의 實驗裝置를 고안하여 살펴보아야 하겠지만 本 研究에서는 대략적으로 非定常狀態에서의 質量流量은 時間에 따라 線型的으로 變한다고 가정하면, 즉 $\tau < \tau_b$ 에서 $m_x=c\tau$ 라 하면 $\tau_{exp}^*=\tau_c-\frac{1}{2}\tau_b$ 라 할 수 있다.

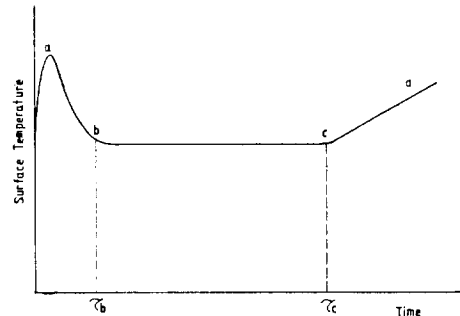


Fig. 5 Typical example of surface temperature variation with respect to time.

4. 結果 및 考察

本實驗에서 試驗球에 加해진 加熱量은 $q=28.2, 65.8$ 및 $103.4W$ 였었고, 球의 지름에 대한 自由表面으로부터 球까지의 거리의 比, 즉 D/d 는 $1, 5, 7, 10, \frac{40}{3}, \frac{50}{3}$ 및 20 으로 變化시켰다.

$D/d=1$ 및 5 인 경우 球의 表面溫度는 實驗始作과 더불어 不安定한 搖動을 나타냈기 때문에 결코 Fig.5와 같은 結果를 얻을 수 없었다. 이는 球가 流體의 自由表面에 너무 가까이 位置하였기 때문에 plume 으로 인한 加熱된 流體의 循環작용이 심한 탓이라고 볼 수 있다.

따라서 $D/d \geq 7$ 인 경우의 데이터만 이용할 수 있었다.

$D/d \geq 7$ 인 경우 대부분의 溫度測定 結果는 定常狀態인 bc 區間에서의 약간의 搖動狀態를 除外하고는 대체로 Fig. 5의 傾向을 나타내었다. Data의 再現性을 立證하기 위하여 모든 實驗은 同一條件下에서 두번씩 반복하였다. 加熱量과 D/d 를 組合하여 모두 15세트의 實驗을 하였고 同一實驗을 반복하였으니 實驗番號30까지의 結果를 얻었으나 지면의 절약상 $q=103.4W$ 때의 結果中 代表的인 4가지 실험결과만을 Table 1과 Fig. 6에 나타내었다.

Table 1 Typical experimental results when $q=103.4W$.

Test No.	D/d	T_w (°C)	T_s (°C)	τ_b (min)	τ_c (min)	τ_{xp}^* (min)
1	20	15.5	45.0	14	34	27.0
4	16.7	15.5	44.8	13	23	21.5
8	10	15.5	45.0	13	22	15.5
9	7	15.4	45.2	13	19.5	13.0

Table 1과 같은 형태의 30회의 실험결과를 이용하여 式 (8) 또는 式 (9)를 최대오차가 가급적 작게 나타낼 수 있는 m, n 및 K 값을 試行錯誤法으로 전자계산기를 사용하여 결정하였다.

誤差範圍 $\pm 5.3\%$ 를 인정하면서 최종적으로 얻은 異常數값들은 $K=1.40$, $m=0.52$, $n=0.50$ 이었다. 이 값을 使用하여 式 (7) 및 式 (9)에 代入하여 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\dot{m}_{1,x}}{\mu d} = 1.4(GrPr)^{0.52} \left(\frac{x}{d}\right)^{0.5} \quad (10)$$

$$\frac{\tau^* \mu (GrPr)^{0.52}}{\rho L W} = \frac{1}{1.4(1-0.50)} \left(\frac{D}{d} - 0.5\right)^{0.5} \quad (11)$$

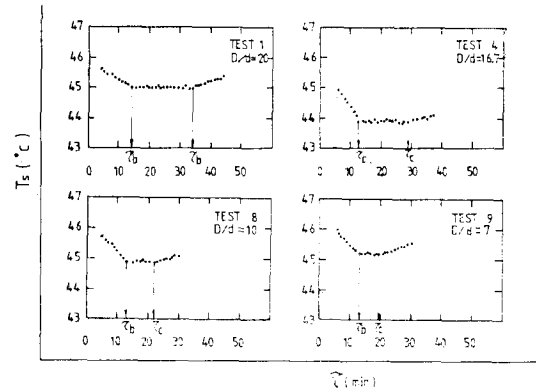


Fig. 6 Typical experimental results showing τ_b and τ_c when $q=103.4W$.

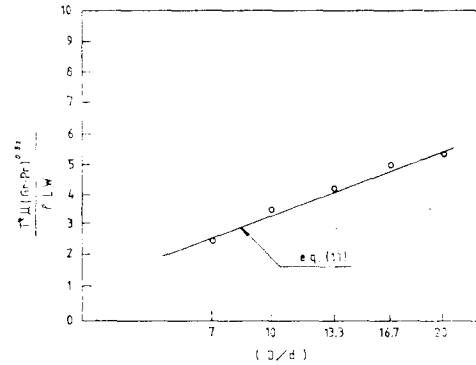


Fig. 7 Comparison of experimental data with eq(11).

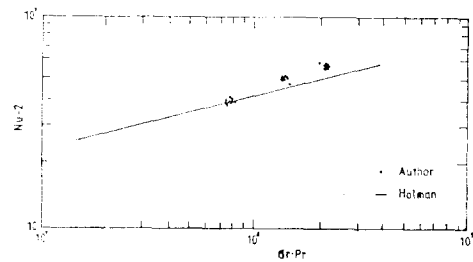


Fig. 8 Comparison of experimental Nusselt number around a sphere with equation recommended by Holman.⁴⁾

式 (11)과 $q=103.4W$ 때의 실험결과를 그래프로 나타내면 Fig. 7과 같다.

本實驗에서의 球의 表面溫度와 流體溫度의 차이, 즉 $\Delta T = T_s - T_w$ 의 範圍는 $11.5^\circ C \sim 28.8^\circ C$ 였으며 이 範圍에서의 $GrPr$ 의 範圍는 $7.05 \times 10^7 \sim 2.17 \times 10^8$ 이었다.

流體안에서의 球周圍의 自然對流 熱傳達에 대하여 Holman이 권장한 式 (2)의 使用範圍는 $1 < GrPr < 10^8$

이었기 때문에 本 實驗의 $GrPr$ 範圍에서도 式 (2)가 사용될 수 있는지를 檢査하기 위하여 式 (2)와 더불어 實驗結果를 Fig. 8에 나타내 보았다.

그림에서 보는바와 같이 $GrPr=7.05 \times 10^7 \sim 7.62 \times 10^7$ 까지는 Holman의 式과 잘 일치되고 있으나 $GrPr=1.51 \times 10^8 \sim 2.17 \times 10^8$ 사이에서는 일치가 되지 않고 Holman의 결과보다 더 큰 값을 나타내고 있다. 著者는 공기안에서 球주위의 자연대류열전달에 대한 振動效果를 연구하면서 式 (2)의 사용범위를 $Gr=6 \times 10^5$ 까지 연장할 수 있다는 것을 實驗적으로 입증하였는데⁶⁾ 이 때 공기의 Prandtl 수를 대략 0.7로 잡는다면 $GrPr=4.2 \times 10^5$ 까지 연장할 수 있다. 本 실험에서 얻은 $GrPr=7 \times 10^7$ 근방에서의 결과가 비록 式 (2)와 잘 맞는다고 하더라도 $GrPr=4.2 \times 10^5$ 과 7×10^7 사이의 범위가 너무 크기때문에 이 범위에서의 결과는 논할 수가 없고 이 연구에서 얻은 $GrPr=7.05 \times 10^7$ 과 2.17×10^8 사이의 데이터를 최소한의 최대오차로 나타낼 수 있는 式을 구하여 보면 다음과 같다.

$$Nu = 2 + 0.096 (GrPr)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

本 연구에서 구한 데이터를 式 (12)로 나타냈을 때 최대오차범위는 $\pm 7\%$ 이다.

本 研究에서 流體속에 잠겨있는 球形히타를 加熱할 때 생기는 plume의 質量流量에 관한 式을 誘導하는 과정에서 容器內的 球가 無限한 流體속에 잠겨 있다고 가정하였다. 그러나 이 가정은 완전하지 못하다. 왜냐하면 本 實驗에서와 같이 일정한 크기의 容器內的 流體 속에 잠겨있는 球로부터 自然對流가 일어날 때에는 無限한 流體속에서는 發生하지 않는 수직으로 떠오르는 plume의 循環作用과 自由表面으로 인한 方向變化가 發生하기 때문이다.

그러나 $D/d \geq 7$ 인 경우 球表面의 溫度測定結果에서 보는 바와 같이 容器內에 생기는 循環作用은 plume의 流動보다 훨씬 弱하다고 볼 수 있고, 또한 plume의 方向變化도 全體運動量에 대하여 거의 영향을 주지 않는다고 볼 수 있다.

定常狀態에서의 球주위의 自然對流 熱傳達係數는 本質적으로 球주위로부터 上昇하는 plume 質量流量과 直接的인 관계가 成立하기 때문에 式 (2) 역시 球의 直徑에 대한 自由表面으로부터 球까지의 거리의 비가 7보다 클 때 사용될 수 있다. 그러므로 本 實驗에서 求한 式 (10) 및 式 (12)는 有限한 容器內에서 實驗을 하여 求한 式이지만 無限한 流體속에서 잠겨있는 경우에도 適用될 수 있고, 無限한 流體속에 잠겨있다고 가정할 수 있는 D/d 의 限界는 7이라 할 수 있다.

5. 結 論

本 論文에서 流體속에 잠겨있는 球 주위에서 自然對流 熱傳達이 일어나는 경우 實驗을 통하여 얻은 結論은 다음과 같다.

1. 直徑이 d 인 球가 容器內 流體에 잠겨있는 경우 球의 直徑에 對한 自由表面으로부터 球까지의 거리의 비가 7 이상인 경우에는 球가 無限流體속에 잠겨있다고 볼 수 있고 球가 加熱될 때 形成되는 plume의 質量流量은 다음과 같은 式으로 表示된다.

$$\frac{\dot{m}_{ax}}{\mu d} = 1.40 (GrPr)^{0.52} \left(\frac{x}{d} \right)^{0.50}$$

2. 球 주위의 自然對流 熱傳達에 관한 Holman의 式은 流體의 自由表面으로부터 球까지의 깊이가 球의 直徑의 7배 이상인 경우 有限한 容器안에서도 적용할 수 있고 $GrPr=7.05 \times 10^7 \sim 2.17 \times 10^8$ 의 범위에서 다음과 같은 실험식을 얻었다.

$$Nu = 2 + 0.096 (GrPr)^{\frac{1}{3}}$$

참 고 문 헌

1. B. Gebhart, L. Pera and A.W. Schorr, Steady laminar natural convection plumes above a horizontal line source, Int. J. Heat Mass Transfer, vol.13, no.6, pp.161~171, 1970.
2. R.G.S. Skipper, J.S.C. Holt and O.A. Saunders, Natural convection in viscous oils, Int. Developments in Heat Transfer, part V, ASME, pp. 1003~1010, 1961.
3. R.M. Fand and K.K. Keswani, Mass rate of flow in the natural convection plume above a heated horizontal cylinder immersed in a liquid, Trans. ASME, Series C, J. of Heat Transfer, vol. 95, pp.192~198, 1973.
4. J.P. Holman, Heat Transfer, 4th ed, Chap. 7, p.243,254, McGraw-Hill, New York, 1976.
5. T. Yuge, Experiments on heat transfer from spheres including combined natural and forced convection, ASME, Series C, J. of Heat Transfer, vol. 82, pp.24~220, 1960.
6. 朴喜鎔, 趙承煥, 球形物體주위의 自然對流熱傳達에 대한 振動效果, 空氣調和·冷凍工學會誌, 第7卷 第3號, pp.151~159, 1978.