

Uniform Heat Flux가 있는 원관내 난류유동의 급팽창에 관한 실험적 연구(I)

권기린*, 강필오**

An Experimental Study of the Turbulent Flow and Heat Transfer
Downstream of an Abruptly Expanding Circular Pipe (I)

Ki-Rin Kwon and Phil-Oh Kang***

Summary

Experiments were carried out for the turbulent flow and heat transfer downstream of an abrupt circular pipe expansion.

The uniform heat flux condition was imposed to the downstream of the abrupt expansion by using an electrically heated pipe. The following conclusions are drawn from the test data.

1. Axial velocity increased rapidly at $y/R=0.6$ in the abrupt concentric expansion turbulent flow through the test tube; it decreased rapidly at $x/d=9$ in the case of the abrupt eccentric expansion and inclined expansion of 4 degrees.
2. Friction factor of the test tube showed a constant value at $x/d=13$ and regardless of the inlet flow boundary condition.
3. For all Reynolds number, the wall temperature showed a curve of parabolic variation at $24 \leq x/d \leq 59$. The bulk temperature showed a minimum value at $x/d=6 \sim 9$, but it showed a linear distribution of increase.
4. The location of the Nu/Nu_{DB} showed at the point of 3 step heights at $Re=80,000, 100,000$ of the abrupt concentric expansion. Nu/Nu_{DB} showed at the point of 2 step heights at $Re=120,000$.

序 論

急膨脹을 통한 亂流流動은 管路의 入口領域에서,

박리로 인한 난류운동에너지의 증가로 Re수가 동일할때의 完全發達流動 영역에서 얻을 수 있는 것보다도 實質的으로 더 큰 混合率과 熱傳達係數를 만든다. (Baughn 등, 1984; Dellenback 등, 1987)

* 공과대학 기계공학과 (Dept. of Mechanical Engineering, Cheju Univ., Cheju-do, 690-756, Korea)

** 대학원 기관공학과 (석사과정)

近者에 이르러 에너지의 效率의 利用에 對한 강조가 나날이 높아지면서 管路內의 急膨脹의 熱傳達에 대한 實驗의 研究와 數値解析의 研究가 최근에까지 활발히 進行되어 오고 있다. (Ede 등, 1959; 1956; Emerson, 1966; Gooray 등, 1985; Habib 등, 1982; Krall 등, 1966)

그럼에도 불구하고 剝離되고 再附着된 領域에서의 流動構造가 극히 難解한 관계로 熱傳達메카니즘의 詳細함은 아직도 明確히 糾明되지 못하고 있다.

Zemanick와 Dougall은 膨脹比를 0.43, 0.54, 0.82로 하여 圓管內에서 空氣가 急膨脹할때의 熱傳達舉動을 詳細히 研究하여 peak Nu수는 7-9 step heights에서 나타남을 알아냈고, Baughn등은 膨脹比를 0.267~0.800까지 5종으로 하여 역시 圓管內에서 急膨脹時의 熱傳達 係數를 求하고, peak Nu수는 5-15 step heights에서 나타났음을 報告하였다.

최근에는 急膨脹되는 管路內 亂流熱傳達에 數値解析의 方法을 選擇하여 從前의 實驗的 研究結果와 比較檢討하는 事例도 많아지고 있다. (Gooray 등, 1985; Johnson 등, 1982; 이 용주 등, 1992; Nakanishi 등, 1992; Zemanick 등, 1970)

더불어 Dellenback등은 swirl이 있는 圓管內 膨脹 流動의 流動場의 조사와 함께 熱傳達 舉動을 보다 具體的으로 發表한 바도 있다.

本 研究(I)에서는 圓管內에서 膨脹管의 入口條件을 달리하여 急膨脹하는 亂流流動의 軸方向速度 成分 舉動을 觀察하고, 空氣가 中央으로 流入될 때 uniform heat flux가 이 流動에 미치는 影響을 把握하여, 各種 熱機器의 設計와 燃燒現象 解析에 基礎的인 參考資料를 얻고자 하였다.

材料 및 方法

1. 實驗裝置

Fig. 1. 은 實驗裝置의 全體의인 概略圖이다.

流體實驗에 사용한 test tube는 내경이 150mm, 두께가 0.8mm, 길이가 2,000mm인 透明 아크릴관을 사용하였고, 管壁의 壓力과 流速을 測定하기 위하여 側面과 윗면에 구멍을 뚫고, 側面에는 $\phi 7\text{mm} \times L30\text{mm}$ 의 銅管을 設置하였다. 熱傳達 實驗에 사용한 test tube는

내경이 150mm, 두께가 0.8mm, 길이가 3,000mm인 銅을 材料로 하여 製作하였고, 이 試驗管에 均一加熱(uniform heating)을 기하기 위하여 heating coil을 均一한 間隔으로 감고, 管壁溫度 및 試驗管 內部를 흐르는 流體의 溫度를 測定하기 위하여 K type thermocouple을 test tube에 設置하고, 전자식 溫度計에 連結하였다.

또한, heating coil로 부터 發熱되는 熱量의 損失을 막기 위하여 試驗管의 外部를 石綿 테이프로 감았다.

Fig. 2. 는 試驗管에 heating coil을 감은 모습의 사진이다.

또한, 入口條件을 달리하여 膨脹 試驗을 위해 사용된 upstream tube는 내경이 50mm, 두께가 0.8mm, 길이가 1,500mm인 透明 아크릴관이 사용되었고, 試驗管의 끝 部分에는 다시 平均流速을 測定하기 위하여 multi-pitot tube (Tobar 301)을 設置하여 micromanometer에 連結함으로써 Re수를 決定할 수 있었다.

다시 實驗裝置를 大形 送風機에 連結하여 室內 空氣를 吸入시킴으로써 流動을 만들 수 있었으며, Re수의 변경은 送風機의 回轉數를 조절함으로써 쉽게 얻을 수 있었다.

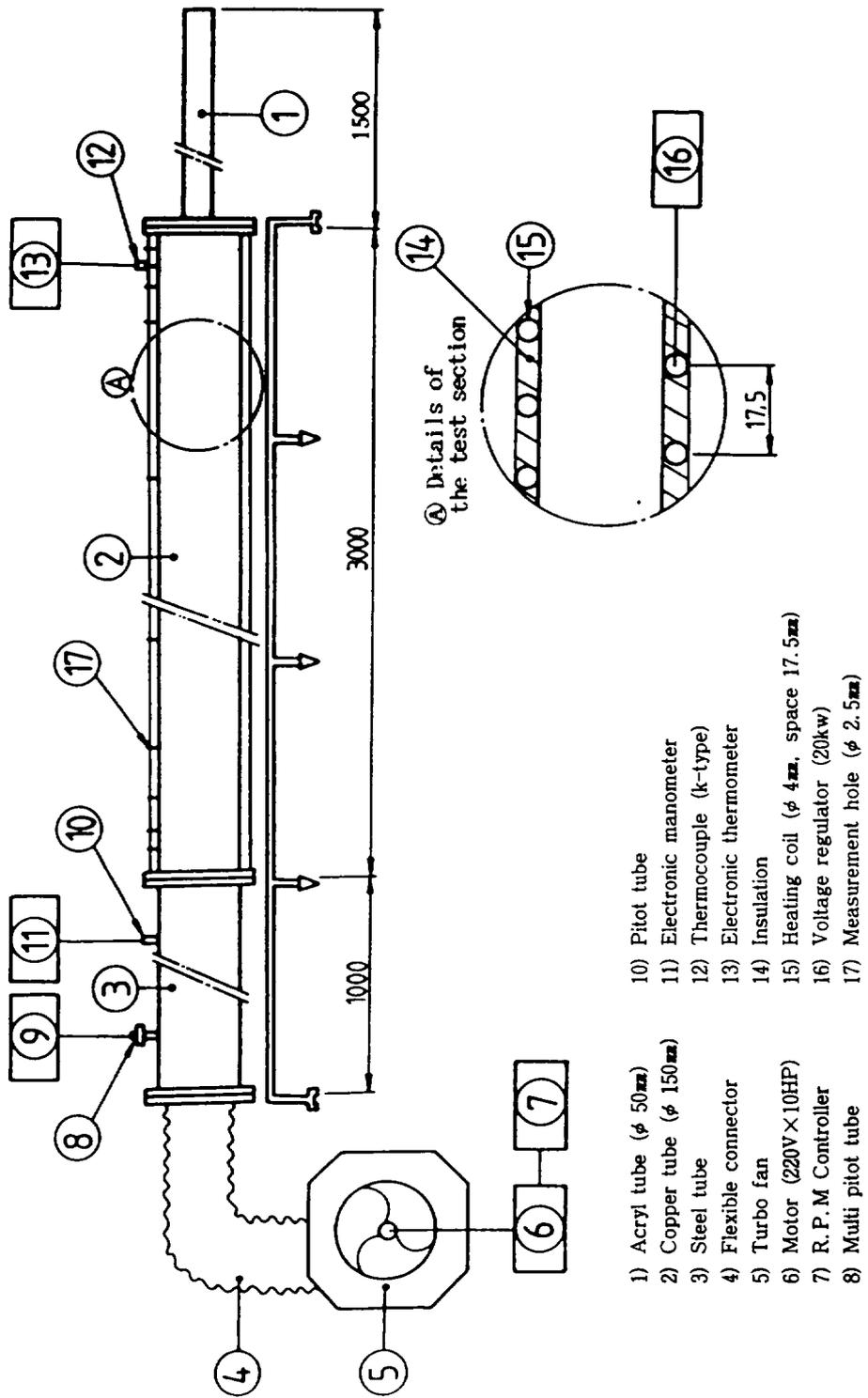
2. 實驗方法

1) 流速測定

우선 미압계를 試驗管 끝에 있는 멀티피토우튜브에 連結하여 空氣의 平均速度를 求하여 Re수를 決定하였으며, pitot tube를 試驗管의 中央에 位置시키고, micromanometer와 連結시킨 후, 測定하려는 地點에서 pitot tube를 管壁으로 부터 管 中心方向으로 一定한 間隔으로 移動시키면서 모든 測定點의 軸方向速度를 測定하였다.

이때 測定하지 않는 試驗管의 全壓 및 靜壓 測定孔을 모두 막아서 壓力의 誤差를 줄였다. 또한, 膨脹管의 入口條件은 空氣의 流動狀態가 膨脹管의 ① 中央으로 流入되는 경우, ② 偏心되어 流入되는 경우, ③ 4° 傾斜되어 流入되는 경우로 구분하여 動壓을 測定하였으며 流速은 베르누이 方程式으로 求하였다.

$$u = 1.291 \sqrt{Pv} \dots\dots\dots (1)$$



- 1) Acryl tube (ϕ 50mm)
- 2) Copper tube (ϕ 150mm)
- 3) Steel tube
- 4) Flexible connector
- 5) Turbo fan
- 6) Motor (220V \times 10HP)
- 7) R. P. M Controller
- 8) Multi pitot tube
- 9) Inclined manometer
- 10) Pitot tube
- 11) Electronic manometer
- 12) Thermocouple (k-type)
- 13) Electronic thermometer
- 14) Insulation
- 15) Heating coil (ϕ 4mm, space 17.5mm)
- 16) Voltage regulator (20kw)
- 17) Measurement hole (ϕ 2.5mm)

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

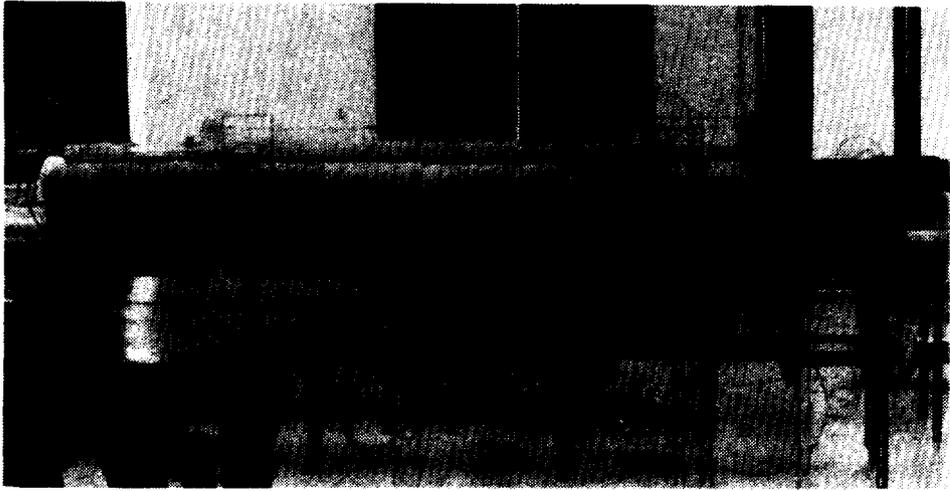


Fig. 2. Photograph of the test tube mounted with heating coil

2) 管摩擦係數 測定

流速 測定때와 마찬가지로 方法으로 Re수를 決定한 다음, Re=60,000~120,000에서 試驗管内의 流動狀態가 安定된 후 試驗管을 따라 各 測定位置에서의 壓力損失을 multimanometer로 測定하여 管摩擦係數를 求하였다.

3) Bulk temperature (Tb)와 熱傳達係數 (h)

前項과 마찬가지로 方法으로 室内 空氣를 流入시키고, Re수를 決定한 다음, 正常狀態에서 Heating coil에 a. c. 電原(AC 240V, 7.5A)을 供給하고 Heat Flux를 一定하게 한다. 試驗管 内部를 흐르는 流體의 bulk temperature는 各 測定位置에 熱電對를 插入하여 管壁로부터 中心까지 各 各 定해진 間隔(1mm, 2mm, 4.5mm 이후에는 5mm 間隔)에서 測定하여, 이 溫度들로부터 計算되었다. 그리고 wall temperature는 試驗管의 壁에 裝置한 熱電帶로부터 測定되었다. 測定 計算한 流體의 bulk temperature (Tb)와 wall temperature (Tw)로 부터 熱流速(dq)을 求하였으며 두 測定點間의 對流 熱傳達係數(h)를 다음 式으로 求하였다.

$$dq = \dot{m} C_p dT_b \dots\dots\dots (2)$$

$$q = h(2\pi r) dx (T_w - T_b) \dots\dots\dots (3)$$

$$h = \frac{\dot{m} C_p dT_b}{2\pi r dx (T_w - T_b)} \dots\dots\dots (4)$$

이 對流 熱傳達係數(h)와 bulk temperature (Tb)에 따른 熱傳達率을 찾아, 다음 式에 代入하여 Nusselt 수를 求하였다.

$$Nu = \frac{hD}{k} \dots\dots\dots (5)$$

結果 및 考察

1. 軸方向 速度分布

Fig. 3은 空氣의 流動을 試驗管의 中央으로 流入

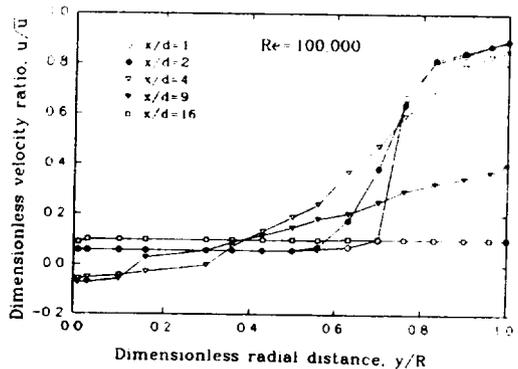


Fig. 3. Axial velocity profiles for Re=100,000 with a concentric expansion

膨脹시킨 狀態下에서의 軸方向速度를 Pitot tube로 測定한 結果를 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이, Re수가 100,000 일때 亂流流動의 軸方向速度는 管壁에서 管의 中心으로 갈수록 增加하였으며, 특히 $y/R=0.6$ 以後 급격히 增加하였다.

또한, 各各의 Re수가 80,000 以上 되었을 때 $x/d=4$ 또는 9 以下의 領域에서는 부(-)의 速度가 나타나기도 하였는데, 이러한 現象은 재순환영역내에서의 逆流現象이 發生했기 때문으로 여겨진다.

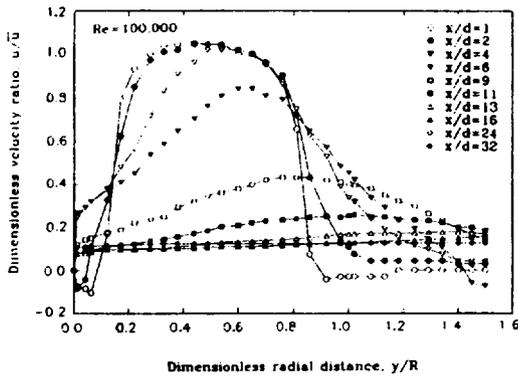


Fig. 4. Axial velocity profiles for Re=100,000 with a eccentric expansion

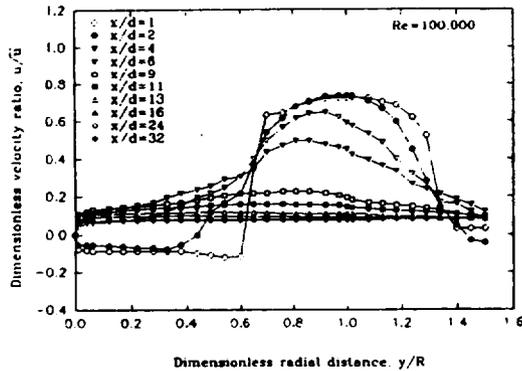


Fig. 5. Axial velocity profiles for Re=100,000 with 4°-inclined concentric expansion

Fig. 4와 Fig.5는 모두 Re=100,000에서의 空氣流動을 試驗管에 偏心되게 流入膨脹시킨 경우와 4° 傾斜되게 流入膨脹시킨 경우의 軸方向速度를 나타낸 그림이다.

Fig. 4에서 最大速度는 試驗管의 管壁쪽에서 나타

난 반면, Fig.5에서는 管의 中心部近으로 移動하여 나타남과 아울러 軸方向거리가 增加되었을 때는 漸進的으로 移動하는 傾向을 보였다.

2. 管 摩擦係數

流體가 流動管을 따라 흐를 때 管壁에서의 摩擦에 의한 摩擦損失을 가져와 流體輸送 動力을 增加시키는 原因이 되므로, 摩擦係數는 중요한 意味를 지닌다. Fig.6은 空氣流動이 試驗管 中央의 膨脹시 Re=60,000~120,000에서 管 摩擦係數를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 管 摩擦係數는 Re수가 增加함에 따라 全般的으로 그 값이 크게 나타났으며, 流動入口 條件이 偏心되어 流入膨脹된 경우와 4° 傾斜되어 流入된 경우에도, 이와 비슷한 樣相으로 나타났다. 세가지 경우 모두 摩擦係數는 全體的으로 管 入口 領域에서 높게 나타났다가 流動이 完全히 發達한 領域에서 부터는 서서히 減少함을 보여 주었다.

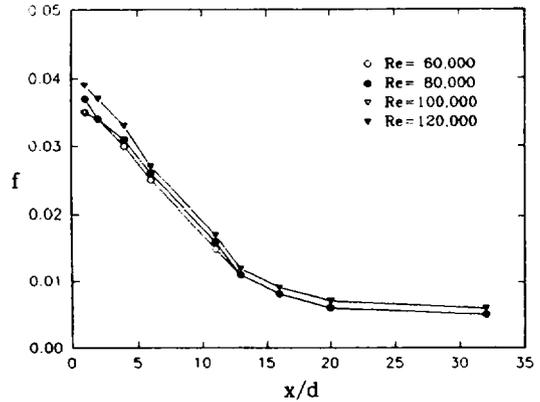


Fig. 6. Friction factor distribution for various Reynolds number with a concentric expansion

3. Bulk temperature (T_b) 와 wall temperature (T_w) 및 熱傳達 係數

Fig. 7-1과 Fig. 7-2는 試驗管을 따른 wall temperature (T_w)를 나타내고 있는데, T_w는 Re수가 작을수록 모두 크게 높아졌고, straight tube의 管 入口로 부터 $x/d=24$ 까지는 溫度上昇率이 급격하게 增加하였으나 그 以後부터는 緩慢히 增加하다가 減

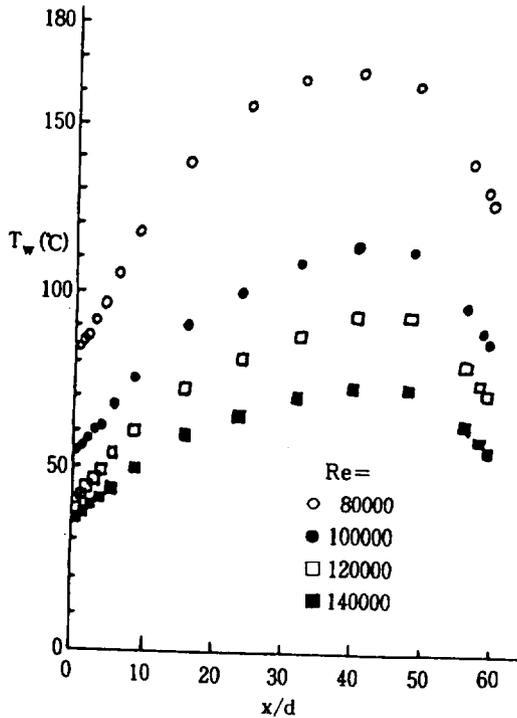


Fig. 7-1. Distribution of wall temperature along the test tube

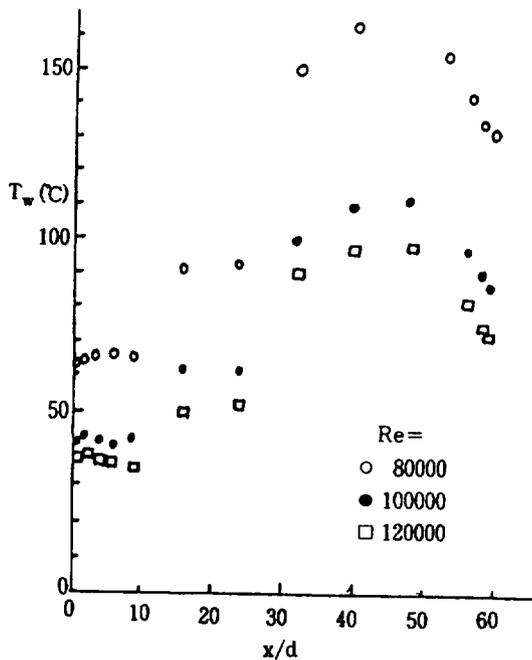


Fig. 7-2. Distribution of wall temperature along the abrupt expansion

少하였다. 급팽창하는 경우에는 $x/d=6\sim 9$ 에서 wall temperature (T_w)는 최소치가 되었으며 $24 \leq x/d \leq 59$ 에서 T_w 는 포물선형으로 나타났다.

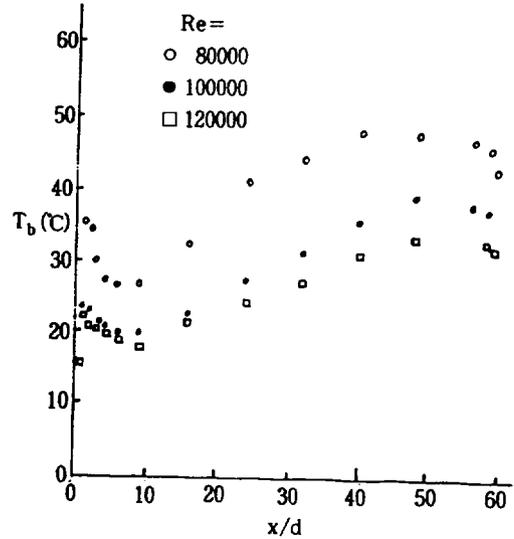


Fig. 8. Distribution of bulk temperature along the test tube

Fig. 8은 역시 試驗管을 다른 bulk temperature (T_b)분포를 보여 주고 있는 Graph인데, T_b 는 同一位置에서 Re수가 작을수록 全般的으로 높게 나타났다.

그림에서 알 수 있는바와 같이, 특히 T_b 는 管入口領域에서 서서히 減少하여 $x/d=6\sim 9$ 부근에서 最小値를 보이다가, 다시 試驗管을 따라 거의 線形的으로 增加함을 나타내어 주고 있다.

Fig. 9는 試驗管을 따른 Nu/Nu_{DB} 수의 분포를 Re수에 따라 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있는바와 같이 Nu수는 각각의 Re수에 대하여 管入口에서 부터 試驗管을 따라 급격히 增加하다가 $x/d=9$ 以後부터 급격히 減少하고, 다시 $x/d=24$ 以後부터는 거의 그 값이 一定하였다. Peak Nusselt수의 位置는 $Re=80,000, 100,000$ 일때 $x/d=3$ 에서 나타났다.

이를 Baughn등(1984)의 實驗値($Re=40,000\sim 76,000, d/D=0.4\sim 0.8$ 일 때, 3~6 step heights에서 最大)와 比較하면 다소 差異를 보이고 있는데 이러한 結果는 Re수와 膨脹比의 큰 差異에서 影響을 받은 것으로 여겨진다. 또한 $Re=120,000$ 인 경우 Nu_{max}

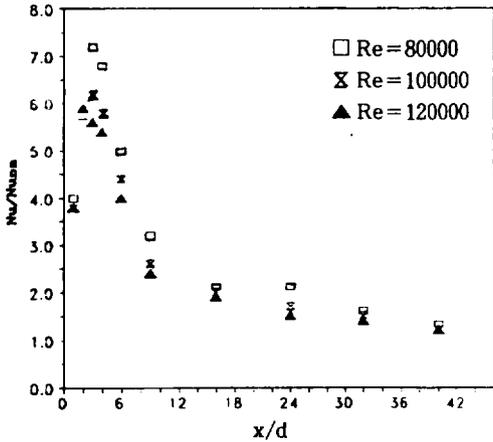


Fig. 9. Distribution of Nu/Nu_{DB} along the test tube

가 2 step heights에서 나타났는데, 이러한 거동은 Krall 등 (1966)의 실험값 ($Re=100, 200$ 일때, $d/D=0.5$ 에서 $Nu/Nu_{fd}=4$)와 비교하여 보면 Nu_{max} 값은 잘 일치하고 있으나, peak Nusselt수의 위치는 현격한 차이를 보이고 있다. 이러한 현상은 Re수와 실험 방법의 큰 차이에서 영향을 받아 기인된 결과라고 생각된다.

Graph에서 Nu_{DB} 는 完全發達된 圓管內의 流動에서의 Nusselt수를 Dittus-Boelter式으로 부터 計算한 값이다.

摘 要

以上과 같이 uniform heat flux가 있는 亂流流動의 急膨脹에 대한 實驗을 한 結果 다음과 같은 結果를 얻었다.

- 1) 空氣의 流動을 試驗管의 中央으로 流入膨脹 시

켰을때, 軸方向速度는 $y/R=0.6$ 以後 급격히 增大하였으며, 偏心되게 流入膨脹시켰을 때와 4° 傾斜지게 流入膨脹시켰을 때는 $x/d=9$ 以上에서 軸方向速度가 急激히 減少하였다.

- 2) 管 摩擦係數는 入口 流動條件에 關係없이 $x/d=13$ 以上에서 거의 一定한 값을 나타내었다.
- 3) 급팽창시에는 Bulk temperature (T_b)와 wall temperature (T_w)는 $x/d=6\sim 9$ 에서 모두 最小値가 되었으며, 그 以後부터는 線形的으로 增加하였지만, 팽창이 없는 경우에는 T_w 가 $x/d=24\sim 59$ 사이에서 拋物線形으로 나타났다.
- 4) 中央으로 流入膨脹시에 $Re=80, 100, 100, 000$ 일 경우 Nu/Nu_{DB} 의 位置는 3 step heights에서 나타났으며, $Re=120, 000$ 일때 Nu/Nu_{DB} 는 2 step heights에서 나타났다.

Nomenclature

- d : upstream tube diameter
- D : downstream tube diameter
- R : radius of a downstream tube
- y : distance from the wall
- m : mass flow rate
- k : thermal conductivity of air
- \bar{u} : mean axial velocity in upstream tube
- f : friction factor
- x : axial distance from expansion face
- T_b : bulk temperature
- T_w : wall temperature
- u : local velocity
- Re : Reynolds number in upstream tube

참 고 문 헌

Baughn, J. W., M. A. Hoffman, R. K. Takahashi and B. E. Launder, 1984. ASME Trans., J. of Heat Transfer, Vol. 106, 789-796.

Dellenback, P. A., D. E. Metzger and G. P. Neitzel, 1987. Heat Transfer to Turbulent Swirling Flow through a Sudden Axisymmetric Expansion, ASME J. of Heat Transfer, Vol. 109, 613-620.

Ede, A. J., 1959. Effect of an Abrupt Disturbance of the Flow on the Local Heat

- Transfer Coefficient in a Pipe, HEAT 164, National Engineering Laboratory, East Kilbride, Glasgow, Scotland.
- Ede, A. J., C.I. Hislop and R. Morris, 1956, Effect on the Local Heat Transfer Coefficient in a Pipe of an Abrupt Disturbance of the Fluid Flow : Abrupt Convergence and Divergence of Diameter Ratio 2 : 1, *Proc. Inst. Mech. Engrs.* London, Vol. 170, 1113-1126.
- Emerson, W.H., 1966, Heat Transfer in a Duct in Regions of Separated Flow, *Proceedings of the Third International Heat Transfer Conference*, Paper No. 26, 267-275.
- Gooray, A.M., C.B. Watkins and W. Aung, 1985, Turbulent Heat Transfer Computations for Rearward-facing Steps and Sudden Pipe Expansions, *ASME Trans., J. of Heat Transfer*, Vol. 107, 70.
- Johnson, R.W. and B.E. Launder, 1982, Discussion of On the Calculation of Turbulent Heat Transport Downstream from an Abrupt Pipe Expansion, *Numerical Heat Transfer*, Vol. 5, 493.
- Habib, M. A. and D.M. McEligot, 1982, Turbulent Heat Transfer in a Swirl Flow Downstream of an Abrupt Pipe Expansion, *Proc of the 7th Int. heat Transfer Conf.*, Washington, D.C, 159-165.
- Krall, K.M. and E.M. Sparrow, 1966, Turbulent Heat Transfer in the Separated, Reattached, and Redevelopment Regions of a Circular Tube, *J. of Heat Transfer, Trans. ASME*, Vol. 88, No. 1, Series C, 131-136.
- 이용주, 김광용, 조용철, 1992, Prediction of Turbulent Heat Transfer Downstream of a Sudden Axisymmetric Expansion, *Proceeding of the 2nd JSME-SSME thermal engineering conference*, 1 · 53-58.
- Nakanishi, S., M. Sakurai and H. Osaka, 1992, Numerical Study on two-dimensional Expansion Channel Flow-asymmetric Flow. *Proceeding of the 2nd JSME-KSME thermal engineering conference*, 1 · 59-62.
- Zemanick, P.P. and R.S. Dougall, 1970, *ASME Trans., J. of Heat Transfer*, Vol. 92, 53-60.