

均一剪斷流中の 角柱 後流의 2次元 亂流特性

南 青 都*

The Characteristics of Two - Dimensinal Turbulent Wake Flow Past a Rectangular Cylinder in Uniform Shear Flow

Chung - Do Nam

1. 序 論

角柱는 圓柱와 더불어 構造物의 代表的 形狀일 뿐만아니라 또한 流動속에 있는 物體 周圍나 後流의 特性을 考察할 수 있는 基本的인 形狀이기 때문에 오래 前부터 많은 研究가 이루어져 왔다^{(1)~(9)}. 또 角柱 周圍의 流動이나 後流에 대한 研究는 高層빌딩과 같은 地上 構造物의 耐風安定성과 壁面上의 抵抗等과 같은 流體力이나 또는 流出油와 같은 汚染物質의 擴散範圍와 關聯되어 工學的인 問題 뿐만 아니라 環境問題로서도 重要な 研究課題가 되고 있다.

그런데 流體를 取扱하는 工學的 諸裝置에 있어서 流體의 流動은 大部分이 亂流이고 比較的 큰 平均速度勾配를 가지는 剪斷亂流이다. 亂流中에서의 平均剪斷速度는 攪亂에 의한 레이놀즈應力에 의하여 發生·維持되므로 剪斷應力의 分布特性이 바로 平均速度場을 決定한다고 할 수 있다. 또 레이놀즈應力의 發生은 서로 垂直한 速度變動에 의한 運動量의 擴散, 混合을 意味하며, 亂流剪斷層에 있어서 組織的構造가 運動量, 熱, 物質等의 輸送에 重要な 役割을 擔當하고 있으므로, 에너지의 擴散·輸送을 이루고 있는 剪斷亂流의 攪亂特性과 그의 役割은 實用 工學的인 面에서도 重要な 問題로 擡頭되고 있는 實情이다. 예를 들면 多段으로 된 터보機械나 熱交換器의 管群等에 있어서는 上流側 物體의 亂流後流 때문에 下流側 物體에는 강한 變動壓力 및 變動流體力이 作用한다. 따라서 下流側 物體에 作用하는 變動流體力等을 評價하기 위해서는 物體의 數倍 程度의 下流에 있어서 亂流 後流構造를 밝히는 것이 必要하다. 그리고 實際의 流動에 있어서 攪亂의 發生이나 亂流 에너지의 變遷機構는 平均流의 舉動과 密接한 關係가 있고 또 複雜한 外部條件에 支配되기 때문에 組織的 亂流와 같이 그의 存在가 確認되면서도 그의 力學的인 現象이 아직 詳細하게 把握되지 않고 있다.

한편 角柱 周圍의 流動에 대한 研究로는, 流動中の 構造物等이 받는 流體力의 問題와 關聯하여, 主로 均一流中에 있는 2次元 角柱에 대하여 行하여 졌으며, 表面壓力 分布, 抗力, 揚力, 時間平均 流線等의 平均量, 後流에서의 流出量에 隨伴되는 變動力 및 이것과 關聯되는 變動周波數等이 調査되었다. 이와같은 均一流中에서의 研究成果에서도 알 수 있는 바와같이, 物體 形狀의 差異에 따라서 그 流體力學的 特性은 크게 變化한

* 한국해양대학교 해사대학 기관공학과

다. 지금까지의 研究結果에 의하면 均一流中에서 角柱의 前面이 流動方向과 直角으로 設置된 경우, 流動은 流入하는 主流에 대하고 있는 前面의 높이에 대한 主流에 平行한 側面의 길이(의 比 즉 邊長比 (以下 邊長比라 한다)에 따라서 流體力이나 周邊의 流動形態가 다르게 나타난다. 邊長比가 0.65 程度에서는 前緣으로부터의 剝離 剪斷層이 急激히 背面에 接近하여 背壓을 低下시켜 抗力을 增加시킨다⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾. 또 邊長比가 約 2.8 程度 以上이 되면 이 剝離 剪斷層의 一部分이 角柱 側面에 附着하면서 흐르게 되어 後緣에서 rolling하는 渦와, 前緣으로부터 剝離한 흐름이 rolling하는 渦와 後流領域에서 서로 뒤섞여서 存在하게 된다⁽¹²⁾. 다시 邊長比를 增加시켜 邊長比가 6 程度가 되면 스트로할(Strouhal) 數가 不連續적으로 變化하게 된다⁽¹³⁾. 이와 같이 邊長比의 變化에 따라 角柱 後流의 渦特性을 明確하게 밝힌다는 것은 渦放出의 形態를 把握하는 物理的意味 뿐만 아니라 工學的으로는 物體 後方의 物質의 輸送과 擴散의 狀態를 把握하기 위해, 또한 物體에 作用하는 變動流體力의 特性을 알기 위한 基礎資料가 되므로 重要하다고 할 수 있다.

한편 均一剪斷流의 경우 Ayukawa等⁽¹⁴⁾은 均一剪斷流속에 있는 長方形柱 周邊의 流動에 대한 數值解析을 통하여 그 結果가 均一剪斷流속의 後流에서의 스트로할 數, 抗力係數 및 揚力係數의 rms 값이 實驗値와 잘 一致하고 있으며 流動形態(flow pattern)는 剪斷率(shear rate)에 따라서 상당한 差異가 나타나고, Karman 渦列은 剪斷率의 臨界値를 넘으면 사라진다고 밝히고 있다. 이와같이 角柱 周圍의 流動은 流入하는 主流에 대하고 있는 前面의 높이(h)에 대한 主流에 平行한 側面의 길이(d)의 比에 따라서 前緣 剝離剪斷層이 後流로 直接流入하거나 或은 側面에 再附着하여 後緣으로부터 새로운 剝離剪斷層이 생기는 등 複雑한 流動形態를 가지고 있다. 그러나 이러한 角柱의 邊長比(d/h)를 體系的으로 變化시키면서 長方形柱의 後流 特性을 調査⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾한 境遇는 드물며 더구나 剪斷流中에서의 研究結果⁽¹⁷⁾는 아주 미미한 實情이다.

따라서 本 研究의 목적은 速度勾配가 一定한 均一剪斷流中에 側面이 流動에 平行하게 놓여진 角柱 後流의 2次元 流動에 대해서 前緣 剝離剪斷層이 後流로 流入하는 完全剝離形 角柱에서부터 側面에 週期的으로 再附着하는 角柱까지의 幅과 높이의 比에 따라서 速度 分布, 레이놀즈應力 分布, 亂流運動에너지 分布, 高次모멘트 등을 求하여 그 特性을 調査함으로써 長方形 斷面柱의 邊長比에 따른 後流 流動特性을 調査하여 流動의 物理的인 機構를 明確하게 糾明하고자 하였다.

2. 實驗裝置 및 實驗方法

2-1. 實驗裝置

本 實驗에 使用된 風洞은 開回路 노즐形의 吸入式 亞音速 風洞으로 全體길이는 7180 mm 이고, 노즐形의 空氣流入部 斷面積은 533 mm×533 mm 이며, 縮小比는 約 3 이다. 空氣는 3.7 KW 3相 誘導電動機에 의해 驅動되는 軸流送風機에 의해서 노즐形의 縮小部를 거쳐 吸入되고 剪斷流 發生機를 지나 實驗區間과 擴大部를 거쳐 送風機를 통하여 外部로 흘러 나간다. 空氣中の 먼지 등을 除去하기 위하여 流入部인 縮小部 末端에 250 메쉬의 촘촘한 그물網을 設置하였으며, 均一剪斷流를 얻기 위하여 縮小部 다음에 剪斷流 發生裝置가 設置되어 있다. 닥트의 길이는 剪斷流 發生裝置로부터 生成되는 흐름이 安定된 흐름과 等方性(homogeneity)을 가지도록 充分히 길게 하였고, 均一흐름(uniformity)을 위해 試驗區間 前方에 다시 24 메쉬의 그물망을 挿入하였다. 風洞 中間部인 닥트 外壁의 材質은 15mm 두께의 透明한 아크릴로 製作하였으며 試驗區間の 斷面積은 305 mm×305 mm 이다. 電動機와 팬의 振動을 防止하기 위하여 風洞받침대

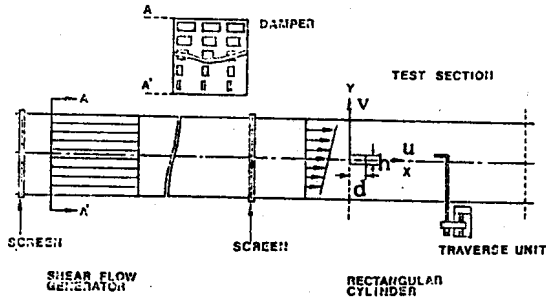


Fig. 1. Schematic diagram of the wake flow past a rectangular cylinder in the uniform shear flow.

주기 위하여 댐퍼(damper)가 붙어 있으며 또 各 流路의 出口側 中央에는 均一한 흐름을 얻기 위해 直徑 4 mm 의 黃銅막대를 흐름方向과 直角方向으로 設置하였다. 또 分割平板은 두께가 1.5 mm 인 鐵板을 使用하였으며 흐름으로 因한 分割板의 振動을 防止하기 위하여 兩端 壁에 깊이 約 2 mm 程度의 홈을 파서 固定하였다. 均一 剪斷流를 얻기 위해서는 各 流路 마다 흐름에 주어지는 內部抵抗이 달라져야 하므로 特別히 設計된 댐퍼가 各 流路入口에 設置되어 있다. 또 댐퍼는 두장의 두꺼운 종이에 各 流路마다 여러개의 長方形 구멍을 뚫어서 한장은 各 流路의 分割板과 密着되어 흐름이 漏洩하지 않도록 固定되어 있고, 앞쪽에 있는 나머지 한장은 各 流路마다 開放되는 구멍의 크기를 調節할 수 있도록 나누어져 있으며, 移動板이 固定板과 完全히 겹칠 때 댐퍼의 開放面積은 最大가 된다.

2-2. 實驗方法

2-2-1. 測定方法

風洞에서 均一 剪斷亂流를 얻기 위해서 標準피토투관(pitot tube)으로 速度를 測定하면서 各 流路 앞에 있는 댐퍼를 調節하였다. 測定位置에 로의 支持臺(support)의 垂直方向 移送는 PC에 의해 制御되는 3次元 自動移送裝置를 使用하여 5mm씩 移動하였으며 標準피토투관과 連結된 마이크로 마노미터의 出力은 熱線風速計(TSI 1054A)를 通하여 A/D 變換된 뒤 PC에서 프로그램에 의해 그래픽으로 出力되도록 하여 垂直方向의 各 測定點에서의 速度의 크기가 均一한 速度勾配가 될 때까지 試行錯誤法으로 長時間 동안 遂行하여 均一剪斷流를 얻을 수 있었다.

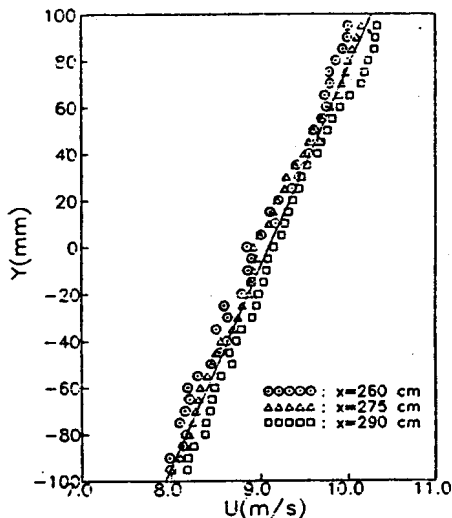


Fig. 2. Mean velocity distributions in the range of measurements.

의 支柱는 두꺼운 고무판으로 固定하였고 出口側에 는 消音器가 設置되어 있어 팬 騒音을 줄이도록 하였다.

Fig.1은 風洞裝置의 概略圖와 座標系를 나타낸다.

그리고 實驗에서 使用된 剪斷流 發生裝置는 Champagne等⁽¹⁸⁾이 考案한 것과 類似하게 製作된 것으로 15 流路(channel)로 이루어져 있으며, 境界層이 生기는 最上部側(top) 과 最下部側(bottom) 流路를 除外하고는 各 流路에서의 높이는 같다. 各 流路마다 入口側에는 內部흐름에 抵抗을

Fig.2는 試驗區間에서의 x 軸 各位置에서의 平均 速度分布를 나타낸다. 닥트 上,下壁에서의 壁面效果를 排除한 y 軸方向의 範圍는 닥트中心으로부터 上,下 約100mm 의 範圍로서, 얻어진 均一 剪斷流

는 斷面 中心線에서의 流速에 대하여 約 1% 程度의 誤差로 本 研究의 目的에 充分히 滿足할 수 있는 것이고 2次元性도 調査하여 實驗區間인 닥트(duct) 兩端 壁面附近을 除外하고는 充分히 保障되고 있는 것을 알 수 있었다. 剪斷速度勾配는 實驗區間에서 約 12 sec^{-1} 이고 그 때 中心線에서의 速度는 約 8.9 m/s 이다. 또 剪斷流 發生裝置를 使用했을 때 試驗區間에서의 亂流強度는 最大 4% 程度였다.

實驗에 使用한 모델인 長方形柱는 試驗區間 先端인 剪斷流 發生裝置로부터 흐름方向으로 닥트 幅의 比가 約 8.5 되는 位置에 흐름方向과 水平으로 設置하였다. 實驗에 使用한 長方形柱의 材質은 各 面이 매끄러운 아크릴이고, 幅과 前面 높이의 比는, 均一流에서 臨界形狀 附近인, $d/h=2.79$ 을 包含하여 完全 剝離形인 $d/h=2.0$, 再附着形인 $d/h=4.0$ 그리고 그 中間인 $d/h=3.0$ 을 取하여 4 種으로 하였고, 흐름에 對應한 前面 높이 h 는 15 mm, 길이는 303 mm로 一定하다.

本實驗에서 使用한 座標系는 Fig.1 에서 表示한 바와 같다. 그림에서 보는바와 같이 主流方向(x軸方向)의 平均速度成分을 u , 垂直方向(y軸方向)의 平均速度成分을 v 라 하고, 流動과 直角인 幅(span)方向으로 z 軸을 取한다. 또 座標 原點은 角柱 前面中央의 停滯點이다.

變動速度成分을 測定하기 위해서 스피릿 필름 센서(split film sensor)와 X 形熱線(X-type hot wire)을 使用하였는데, 一般的으로 亂流強度가 크고 頻繁한 逆흐름이 存在하여 既存의 X 形熱線으로는 滿足할 만한 結果를 얻기가 힘든 領域은 스피릿 필름 센서를 使用한다. 스피릿 필름 센서는 크기가 X 形熱線보다 작아서 速度勾配가 큰 領域에서도 空間分解能이 좋고, 흐름에 攪亂을 적게 미칠 뿐만 아니라 使用可能한 速度範圍가 制限받지 않고 汚染에 比較的 鈍感하고 튼튼하기 때문이다.

그리고 熱線 프로브는 特殊한 形態를 除外하고는 比較的 亂流強度가 크지않고 逆흐름이 없는 部分에서만 使用하는 것으로 알려져 있다. 本 實驗에서는 X 形熱線 프로브와 스피릿 필름 프로브를 使用하여 獲得한 各 各의 데이터를 分析하여 그 값을 比較해 본 結果 角柱 바로 뒤의 逆흐름이 存在하는 領域에서는 流入角의 影響으로 X 프로브로 받은 데이터는 相當한 差異를 보였으나 逆흐름이 없는 $x/h=15$ 以後에서는 別다른 差異를 보이지 않음을 알 수 있었다.

實驗中 센서(sensor)에서 感知되는 흐름方向 速度成分(u)과 흐름方向과 垂直方向速度成分(v)의 두 信號는 定溫熱線風速計(CTA : TSI1504A)에 의해 電壓值로 變換된다. 熱線流速計의 브리지出力 電壓信號는 A/D 變換機能을 가진 汎用 波形分析機(DATA 6000 : MODEL 611)의 4 채널로 入力되는데 各 채널당 100마이크로 秒($\mu\text{sec} : 10\text{KHz}$)의 sampling rate로 2048個의 데이터가 同時에 signal conditioner 와 sample & holder를 차례로 거쳐 multiflexer를 통해 A/D 變換器에서 디지털化된다. 이렇게 디지털化된 데이터는 GPIB(IEEE 488) 카드를 통하여 프로그램에 의해 PC 에서 亂流分析用 데이터로 바뀌어지며, 그 結果는 그래픽으로 出力되도록 하였다. 한 地點當 標本갯수는 2048개, 標本 採取時間은 100마이크로 秒(μsec)로 固定하였고, 測定上의 精度를 기하기 위해 10회 앙상블平均을 取하였다. 實驗은 주로 溫度變化가 적은 夜間에 行하였으며 外部 바람의 影響을 排除하기 위하여 室內에서 循環시켰다. 實驗始作時와 끝나는 時點에서의 溫度上昇은 2°C 以內였으므로 데이터 分析時에 別途의 溫度補償은 하지 않았다.

또한 센서를 測定하고자 하는 正確한 測定地點으로 移送하고, 移動等으로 인한 測定誤差를 줄이기 위해 PC에 의해 調整되는 自動移送裝置를 使用하였다. 自動移送裝置의 스테핑 모터는 PCL-714 카드의 펄스 發生器에서 發生되는 펄스信號와 DC 電源供給機(30 Volt, 4 Amp.)에서 供給되는 電源으로 驅動된다. 以上の 데이터 獲得過程은 PC를 통하여 프로그램에 의해 制御되는 온라인 시스템 構造로 되어 있어 實驗時間

을 短縮할 수 있었다.

2-2-2. Data 處理

Fig.3 은 本 實驗時 센서로부터 얻어지는 速度成分들의 데이터 獲得過程과 信號處理 系統을 나타내는 시스템의 概略圖이다.

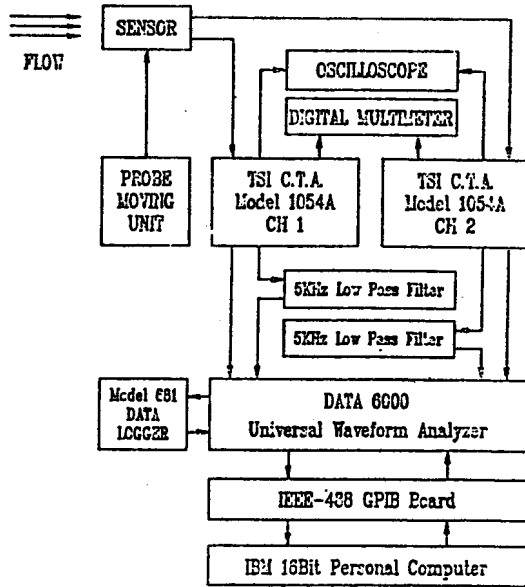


Fig. 3. Schematic diagram of the data acquisition system.

X 形熱線 프로브 또는 스프릿 필립 프로브로부터 感知되는 流動方向 速度成分(u)과 流動方向과 垂直方向 速度成分(v)의 두 信號는 定溫熱線風速計 (CTA : TSI1504A)에 의해 適切한 電壓值로 變換된다. 이 때 熱線風速計의 安定度를 確認하기 위해 內藏된 矩形波 發生機를 통하여 矩形波를 브릿지回路로 흘러보내어 微分增幅器를 通過할 때의 應答特性을 오실로스코프로 確認한다. 熱線風速計의 브릿지出力 電壓信號는 14비트 高分解能의 A/D 變換機能을 가진 Data 6000의 4개의 채널로 入力되는데 이 때 各 채널當 100μsec(10KHz)의 sampling rate로 2048개의 데이터가 同時에 signal conditioner와 sample & holder를 차례로 거쳐 multiplexer를 通過 A/D 變換器를 通過해서 디지털信號로 變換된 뒤 PC 의 하드디스크나 Data6000 資料貯藏裝置인 data logger(Model 681)에 貯藏된다. 分析處理 過程에서는 矯正作業에서 얻은 常數들을 利用하여 實際의 速度값으로 變換시키고 이로

부터 얻어진 亂動成分으로부터 PC에서 프로그램에 의해 各種 亂流統計值를 얻는다.

3. 實驗結果 및 考察

3-1. 平均流動場

Fig.4(a),(b),(c),(d) 는 邊長比가 各各 $d/h=2.0, 2.79, 3.0, 4.0$ 일때의 長方形柱 後流의 流動方向의 平均速度 U 의 分布를 나타낸다. 橫軸 座標 스케일은 닥트 中心으로부터의 垂直方向距離를 角柱 前面의 높이 h로 無次元化 한 값이다. 한편 縱軸의 스케일은 均一剪斷流의 닥트中心에서의 自由流動速度 U_c 로 無次元化 한 값을 나타낸다. Fig.4(a)에서는 $d/h=2.0$ 일때 後流中心線上에서의 平均速度 U 는 流動方向으로의 x 軸 位置 $x/h=5, 10, 15, 20$ 位置에 따라서 各各 U_c 의 40%, 76%, 82%, 84%를 나타내고 있다.

즉 角柱 後緣에서 가장 가까운 $x/h=5$ 에서는 後緣附近에서의 rolling 現象의 影響으로 速度缺損이 60% 程度가 일어나고 있으나 後緣에서 멀어짐에 따라 그 影響은 漸次 줄어들고 있음을 알 수 있다.

또 速度缺損이 일어나는 垂直方向으로의 後流幅 b는 後緣에서 멀어짐에 따라 점차 넓어지고 있다. $x/h=5$ 位置에서는 $-2.4 < y/h < 2.2$, $x/h=10$ 에서는 $-3.6 < y/h < 3.0$, $x/h=15$ 位置에서는 $-4.6 < y/h < 3$.

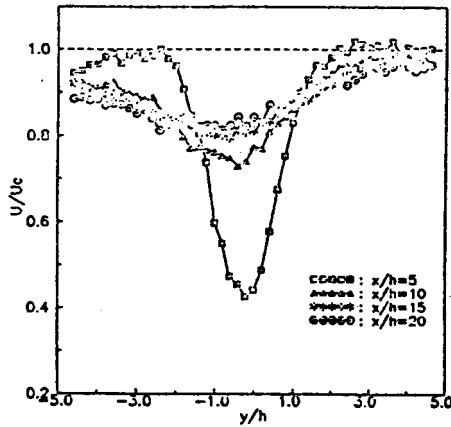


Fig. 4 (a). Distributions of mean velocity U/U_c of $d/h = 2.0$.

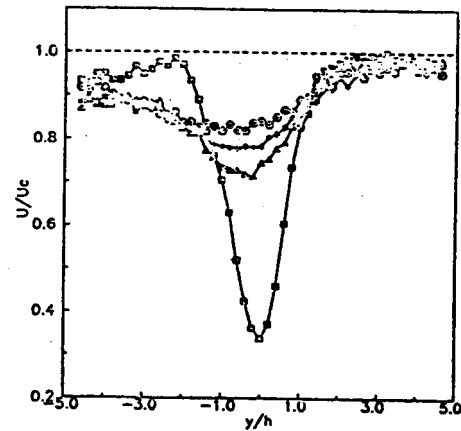


Fig. 4 (b). Distributions of mean velocity U/U_c of $d/h = 2.79$. Symbols are the same as in Fig.4 (a).

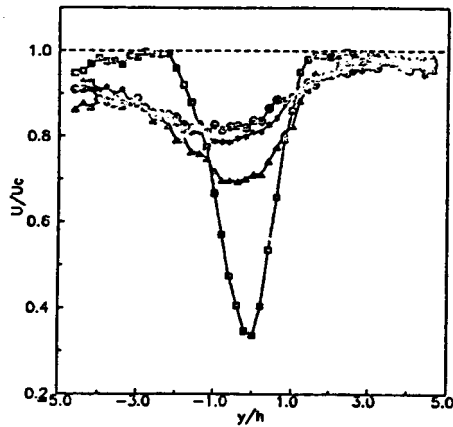


Fig. 4 (c). Distributions of mean velocity U/U_c of $d/h = 3.0$. Symbols are the same as in Fig.4 (a).

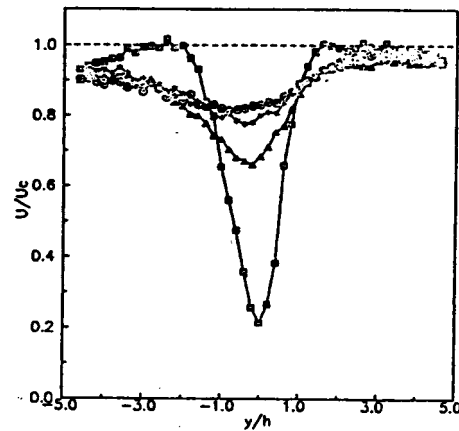


Fig. 4 (d). Distributions of mean velocity U/U_c of $d/h = 4.0$. Symbols are the same as in Fig.4 (a).

5로 x 軸方向으로 멀어짐에 따라 後流幅의 增加比는 점점 減少하며 $x/h=15$ 以後에서는 後流幅은 거의 一定하다. 또 最大速度缺損이 일어나는 位置는 $x/h=5$ 에서는 $y/h = -0.2$, $x/h=10$ 에서는 $y/h = -0.4$, $x/h=15$ 에서는 $y/h = -0.6$, $x/h=20$ 에서는 $y/h = -0.8$ 이다.

이러한 事實은 邊長比가 다른 $d/h=2.79, 3.0, 4.0$ 의 경우도 같은 傾向이다. 이 位置들은 最大速度缺損이 일어나는 位置가 後流中心線이 아니라 角柱로부터 멀어짐에 따라서 均一剪斷流의 自由流動速度가 낮은 쪽으로 기울고 있음을 나타내는 것이다. 이것은 最大速度缺損이 일어나는 位置가 均一流(uniform flow)에서 後流中心線上에서 存在하는 境遇⁽¹⁹⁾와는 判異하게 差를 立證하는 것이다. 또 均一剪斷流의 경우에도 物體가 圓柱일 때 流動方向으로의 最大速度缺損點은 後流中心線上에 있다는 結果⁽²⁰⁾와도 相異한 結果이다. 後術하겠지만, 亂流運動에너지의 分布(Fig.6(a))에서 보면 u 成分은 後流中心線上에서 약간 벗어난 位置에서 上下 두個의 頂點이 생기지만, 剪斷流에서는 速度勾配의 影響으로 後流中心線보다 下部쪽이 더 强하게 나타

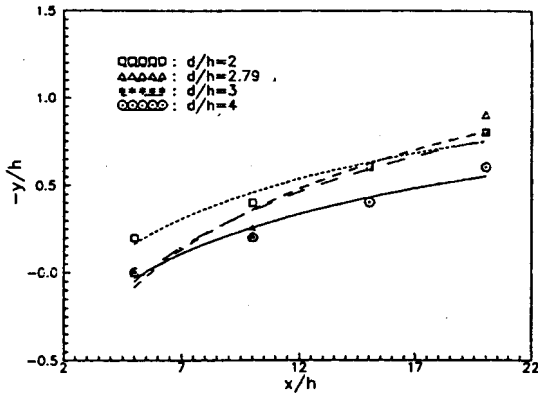


Fig. 5. Distributions of max. velocity defective points of u component along to the stream direction.

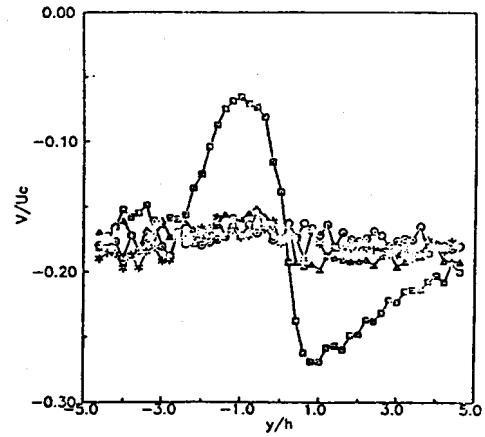


Fig. 6 (a). Distributions of mean velocity V/U_c of $d/h=2.0$ Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

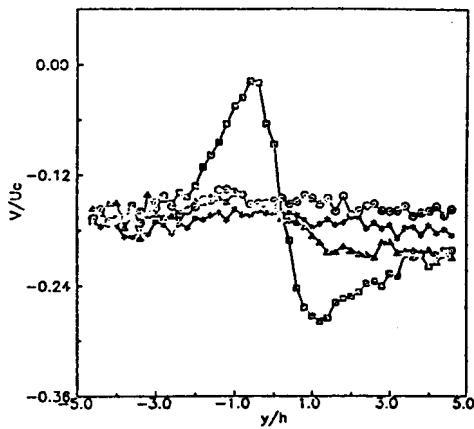


Fig. 6 (b). Distributions of mean velocity V/U_c of $d/h=2.79$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

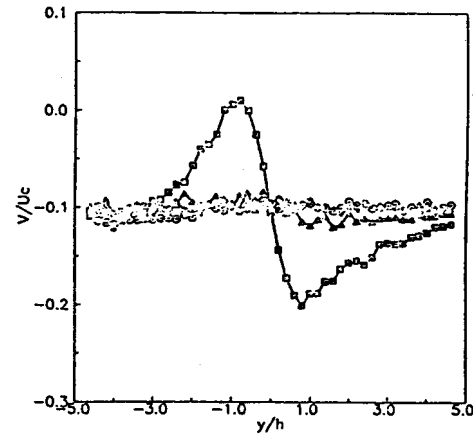


Fig. 6 (c). Distributions of mean velocity V/U_c of $d/h=3.0$ Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

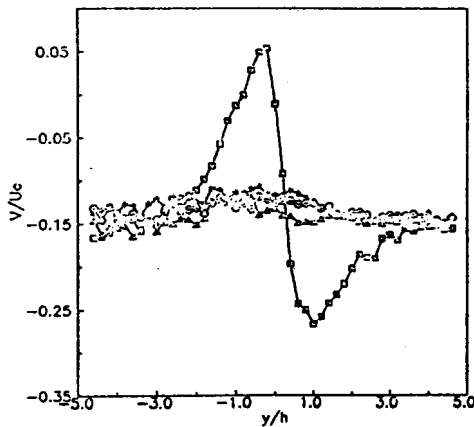


Fig. 6 (d). Distributions of mean velocity of V/U_c of $d/h=4.0$. Symbols are the same as in Fig.4 (a).

난다는 事實과 對應되므로 後流에서의 最大速度 缺損位置가 速度가 작은 쪽으로 기울어진다는 事實은 妥當하다.

한편 均一流中이라도 回轉하는 圓柱의 경우에 있어서는 圓柱의 回轉速度變化로 因하여 後流에서는 速度勾配가 생기므로 最大速度缺損點의 位置는 速度가 減少되는 下部側으로 移動한다는 結果가 밝혀져 있다⁽²¹⁾.

Fig.5 는 各 邊長比에 따른 x軸方向으로의 最大速度缺損位置의 推移를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 $d/h=2.0$ 인 경우 外에는 後緣에서 第一 가까운 $x/h=5$ 인 位置에서는 最大速

度缺損位置는 대략 後流中心線(y_c)上에 存在한다. $x/h=10$ 以後의 位置에서는 下流로 멀어짐에 따라 下部側으로 偏向되고 있음을 알 수 있다. 즉 $d/h=2.0$ 인 경우에는 $y=0.421 \ln X - 0.515$, $d/h=2.79$ 인 경우에는 $y=0.641 \ln X - 1.116$, $d/h=3.0$ 인 경우에는 $y=0.586 \ln X - 1.009$, $d/h=4.0$ 의 경우에는 $y=0.421 \ln X - 0.712$ 의 近似式을 滿足한다. 따라서 一般的인 實驗式으로 나타내면 $y=K \ln x + C$ 로 된다. 그런데 邊長比가 增加함에 따라 기울기도 약간 增加하지만 邊長比가 4.0 일때 最大速度缺損位置의 下部側으로 偏向되는 기울기는 다시 緩慢해지고 있음을 알 수 있다. 이것은 角柱 前緣에서의 剝離剪斷層이 側面에 再附着하기 때문이라고 생각된다.

Fig.6(a),(b),(c),(d)는 邊長比가 各各 $d/h=2.0, 2.79, 3.0, 4.0$ 일 때의 垂直方向 成分의 平均速度 V 의 分布를 나타낸다. V/U_c 의 大部分의 값들이 0 보다 작다는 事實은 剪斷流에 있어서 速度勾配의 影響으로 主流動이 아래쪽으로 처지고 있음을 意味한다. 近接後流에서는 後流中心線을 境界로 하여 流動方向이 서로 非對稱(anti-symmetric)이 되고 있다. 즉 後緣 上部側에서는 위에서 아래쪽으로, 또 後緣下部側에서는 아래쪽에서 위로 向하는 成分이 크게 作用하고 있음을 意味한다. 이것은 均一流中에 놓인 2次元 物體의 경우와는 약간 相異한 傾向을 보이고 있다⁽²⁰⁾⁽²²⁾. 以上에서 u, v 成分의 값을 比較해 볼 때 角柱의 後緣에 가까울수록 u 成分보다 v 成分이 支配的임을 알 수 있다.

3-2. 亂流運動에너지 및 剪斷應力

Fig.7(a), (b), (c), (d)는 邊長比가 各各 $d/h=2.0, 2.79, 3.0, 4.0$ 일때의 Bradshaw가 提案한 $w^2 = 1/2(u^2 + v^2)$ 式을 適用하여 求한 亂流運動 에너지로 $q^2 = 3/4(u^2 + v^2)$ 式에서 求한 것이다. 邊長比 2.0인 경우에 亂流運動에너지는 $x/h=5$ 에서는 $11.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $x/h=10$ 에서는 $4.7 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $x/h=15$ 에서는 $2.7 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $x/h=20$ 에서는 $1.8 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 으로 下流로 갈 수록 急激히 減少하고 있다.

邊長比 2.79 인 경우의 亂流運動에너지는 $x/h=5$ 에서는 $8.7 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $x/h=10$ 에서는 $4.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $x/h=15$ 에서는 $2.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $x/h=20$ 에서는 $1.7 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 으로 下流로 갈 수록 역시 急激히 減少하고 있음을 알 수 있다.

邊長比 3.0인 경우의 亂流運動에너지는 $x/h=5$ 에서는 $7.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $x/h=10$ 에서는 $3.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $x/h=15$ 에서는 $2.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $x/h=20$ 에서는 $1.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 이며, 邊長比 4.0인 경우의 亂流運動에너지는 $x/h=5$ 에서는 $6.2 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $x/h=10$ 에서는 $3.9 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $x/h=15$ 에서는 $2.1 \text{ m}^2/\text{s}^2$, $x/h=20$ 에서는 $1.5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 로 나타나고 있다.

全體的으로 볼 때 가장 큰 亂流運動에너지가 存在하는 位置는 速度가 빠른 上部側보다도 速度가 느린 下部側에 存在하며 下流로 멀어짐에 따라 下部側으로 약간 偏向되고 있다. 또 後緣에서 가까운 位置일수록 流動方向의 速度缺損이 크므로 亂流運動에너지 값도 작아진다.

Fig.8(a), (b), (c), (d)는 邊長比가 各各 $d/h=2.0, 2.79, 3.0, 4.0$ 일때의 x 軸位置에 따른 時間平均에 의한 亂流運動에너지의 流動方向으로의 2乘積을 U_c^2 로 無次元化한 값을 나타내고 있다.

$d/h=2.0$ 의 경우, $x/h=5$ 位置에서는 後流中心線 즉 $y/h=0$ 을 境界로 하여 코히어런트渦의 特徵인 雙峰形態로서, 上部側에서는 $y/h=0.5$ 되는 位置에 頂點이 存在하며 그 값은 U_c^2 의 4.6%이고, 下部側에서는 後流中心線에서 좀더 멀리 떨어진 $y/h=-1$ 되는 位置에 頂點이 存在하고 그 값은 9.8%로 上部側의 것보다 2 倍程度 크다. 또 變曲點은 流動方向으로 멀어짐에 따라 $x/h=10$ 位置에서 이미 사라지고 없으며 따라

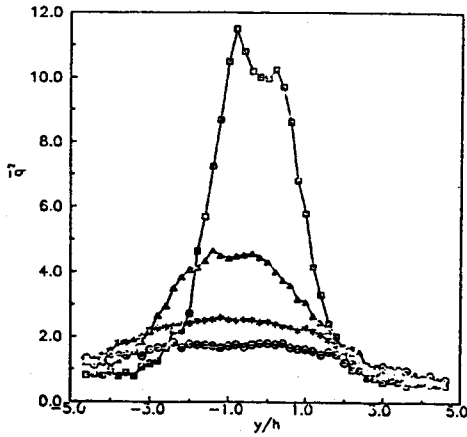


Fig. 7 (a). Distributions of turbulent kinetic energy q^2 of $d/h=2.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

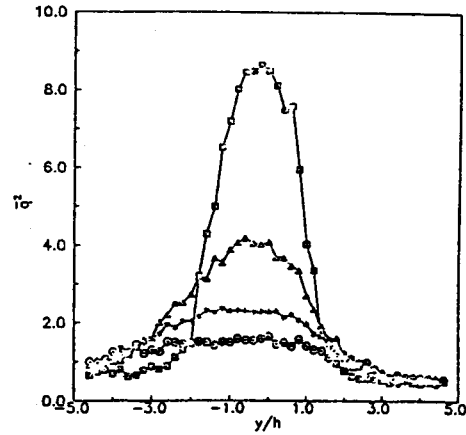


Fig. 7 (b). Distributions of turbulent kinetic energy q^2 of $d/h=2.79$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

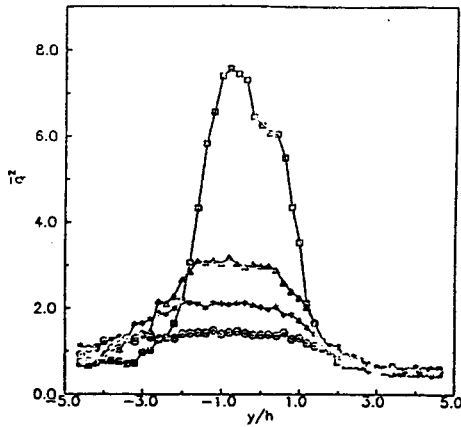


Fig. 7 (c). Distributions of turbulent kinetic energy q^2 of $d/h=3.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

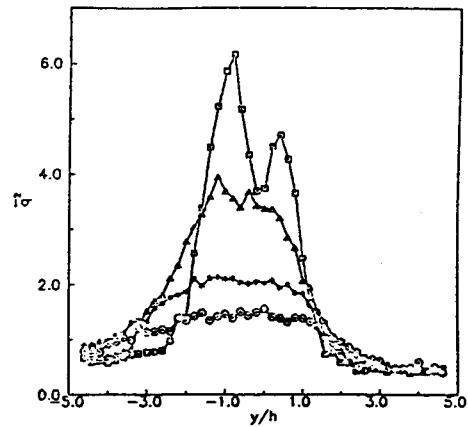


Fig. 7 (d). Distributions of turbulent kinetic energy q^2 of $d/h=4.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

서 雙峰形態의 特異性도 存在하지 않는다.

그리고 下部側에서의 피크值도 角柱 後緣에서 x 軸方向으로 멀어짐에 따라 下部側으로 移動하면서 漸次 減少하고 그 幅은 微弱하나마 넓어지고 있다.

이러한 事實은 均一流에서의 上下 對稱인 結果⁽²⁰⁾와 다른 差異点이다.

$d/h=2.79, 3.0, 4.0$ 의 경우도 그 傾向은 $d/h=2.0$ 의 경우와 비슷하나 邊長比가 增加함에 따라 上, 下部 側에서의 最大 亂流에너지 값의 크기가 後流 中心線에서의 亂流에너지의 8.3%와 4.0%, 7.8%와 4.5%, 7.2% 와 3.7%로 점차 減少하고 있다. 또 後流中心線上인 變曲点에서의 亂流에너지 값도 $d/h=2.0$ 인 경우에는 3.7%인데 比하여 邊長比 增加에 따라 2.8%, 2.6%, 1.4% 程度로 減少하고 있고 變曲点의 깊이도 점차 깊어지고 있다.

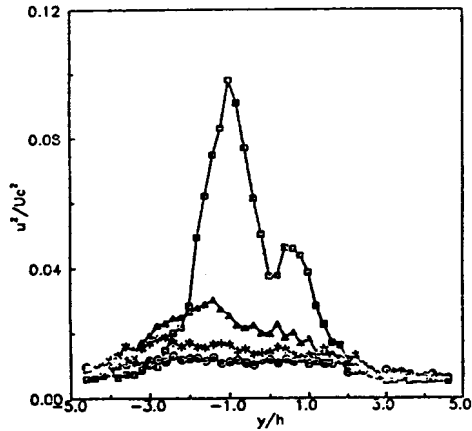


Fig. 8 (a). Distributions of turbulent kinetic energy U^2/U_c^2 of $d/h=2.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

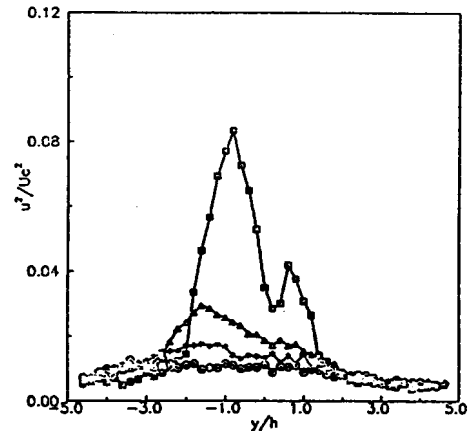


Fig. 8 (b). Distributions of turbulent kinetic energy U^2/U_c^2 of $d/h=2.79$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

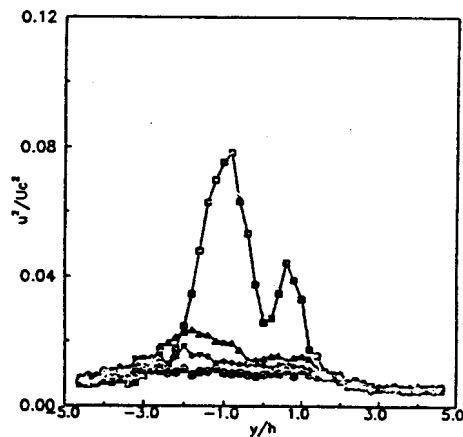


Fig. 8 (c). Distributions of turbulent kinetic energy U^2/U_c^2 of $d/h=3.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

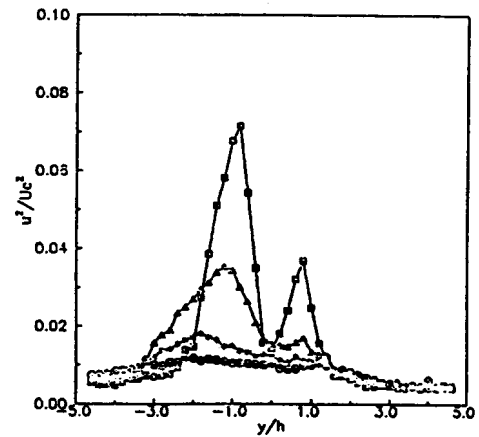


Fig. 8 (d). Distributions of turbulent kinetic energy U^2/U_c^2 of $d/h=4.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

이러한 사실은 角柱 前緣에서 剝離한 渦가 後緣에서의 影響을 받아, 後緣에 가까울수록 亂流에너지의 傳達이 더욱 活潑하게 進行되고 있다는 事實을 示唆한다. 그리고 後流中の 主流方向 亂流强度分布는 角柱에서 멀어짐에 따라 점차 速度가 낮은 下部側으로 기울고 있음을 에너지 分布圖에서 알 수 있다. 이것은 Kiya 等⁽²³⁾이 調査한 圓柱의 경우와는 相反된 結果이다.

Fig.9(a), (b), (c), (d)는 各各 $d/h=2.0, 2.79, 3.0, 4.0$ 의 x 軸方向의 位置에 따른 垂直方向인 v 成分의 2乘積을 나타낸다.

$d/h=2.0$ 의 경우 v 成分의 最大亂流運動에너지는 $x/h=5$ 에서는 後流中心線上인 $y/h=0$ 에서 13.4%이지만 x 軸方向으로 멀어짐에 따라서 그 값도 各各 5.6%, 3.0%, 1.9% 程度로 漸次 減少하고 있다. 한편 後流幅은 漸次 增加하는 反面에 垂直方向成分의 亂流運動에너지는 擴散되어 감을 알 수 있다. 이러한 事實은

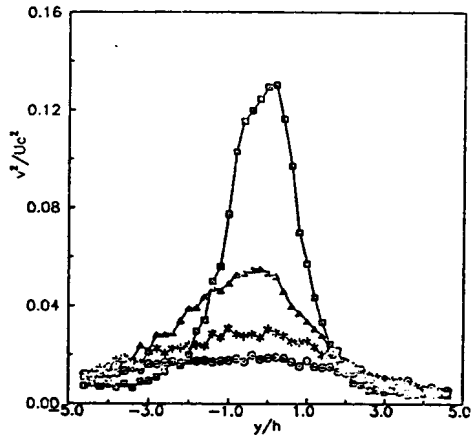


Fig. 9 (a). Distributions of turbulent kinetic energy v^2/U_c^2 of $d/h=2.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

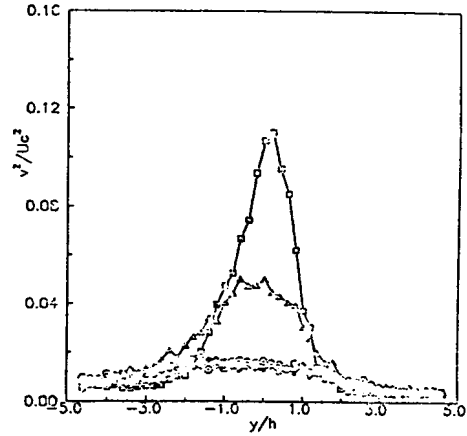


Fig. 9 (b). Distributions of turbulent kinetic energy v^2/U_c^2 of $d/h=2.79$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

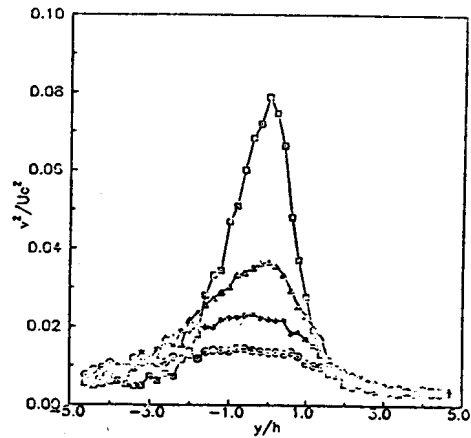


Fig. 9 (c). Distributions of turbulent kinetic energy v^2/U_c^2 of $d/h=3.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

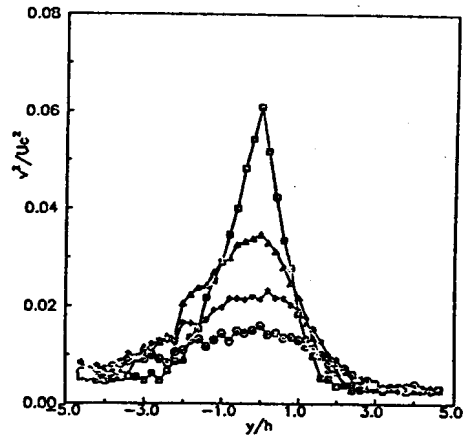


Fig. 9 (d). Distributions of turbulent kinetic energy v^2/U_c^2 of $d/h=4.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

x軸方向의 各 位置에서의 最大亂流運動에너지를 갖는 点의 位置가 점차 下部쪽으로 移動한다는 事實과 一致한다. 또 기울기는 角柱에 가까운 近接後流일수록 急激히 이루어지고 있으며 下流側으로 멀어질수록 기울기는 緩慢해지며, 또한 下部側에서보다 上部側에서 더 急激하다.

이것은 速度勾配의 影響으로 角柱後方에서는 上部側에서의 말려들어가는 現象이 下部側보다 强하게 일어난을 意味한다. 따라서 後流幅도 上部側보다 下部側이 크고 下流側으로 갈수록 넓어지고 있다.

$d/h=2.79, 3.0, 4.0$ 의 경우도 $d/h=2.0$ 의 경우와 비슷한 傾向을 나타내고 있으며 u 의 경우와 마찬가지로 邊長比가 增加함에 따라 最大亂流運動에너지 값은 11%, 7.9%, 6.2% 程度로 漸次 낮아지고 있다.

이러한 事實은 가장 큰 渦들의 構造는 流動이 發生하는 形態에 따라 다르며 後緣에서 가까운 位置에서 가장 큰 運動에너지를 갖는것이 아니고 그 發生된 渦가 充分히 發達한 位置에 있을 때 가장 큰 에너지를 갖는

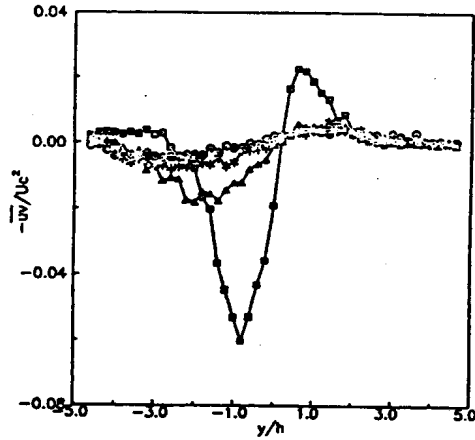


Fig. 10 (a). Distributions of turbulent kinetic energy $-uv/U_c^2$ of $d/h=2.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

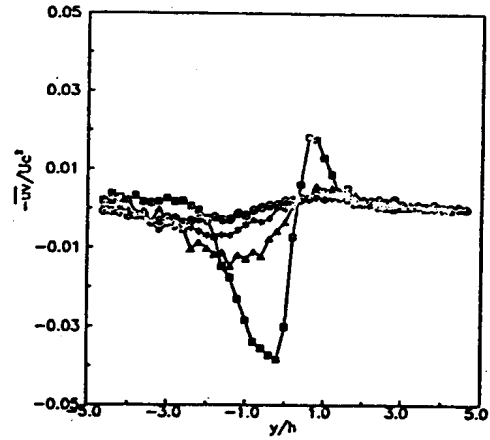


Fig. 10 (b). Distributions of turbulent kinetic energy $-uv/U_c^2$ of $d/h=2.79$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

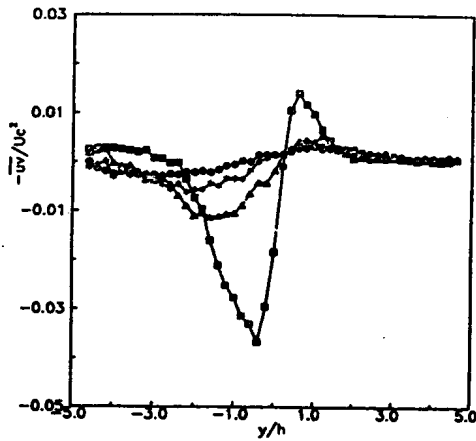


Fig. 10 (c). Distributions of turbulent kinetic energy $-uv/U_c^2$ of $d/h=3.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

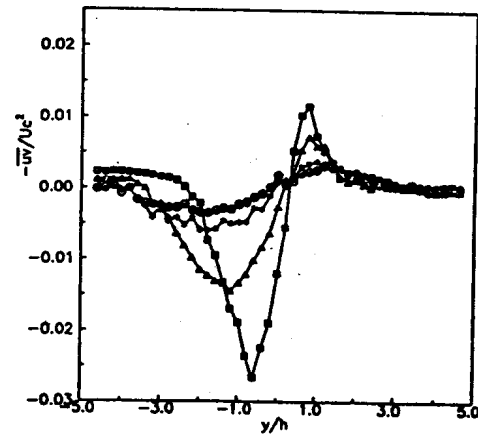


Fig. 10 (d). Distributions of turbulent kinetic energy $-uv/U_c^2$ of $d/h=4.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

다는事實을意味하는 것이다.

$-uv$ 는 레이놀즈剪斷應力이라 하며亂流運動에너지의生成에關係되는量이다. Fig.10 (a), (b), (c), (d)는邊長比가各各 $d/h=2.0, 2.79, 3.0, 4.0$ 일때의剪斷應力分布를 나타낸다. Fig.10(a)에서는時間平均에 의한速度變動相關으로 레이놀즈剪斷應力分布를 나타낸다. 剪斷應力の값은後流中心線에서 약간上部側인地點에서 0이되며上部인 $y/h > 0$ 에서는負, 下部인 $y/h < 0$ 에서는正이되고, 後流中心인 $y/h=0$ 附近에서 그값은負가된다. 이性向은剝離渦의回轉方向이後流中心線을基準으로 서로反對가되기 때문이다.

그리고 x 軸方向으로角柱後緣에서 멀어짐에 따라 그값은 점차減少하고 있음을 알 수 있다. 그런데速度가 큰上部側에서는 $x/h=10$ 以後에서는剪斷應力은減少되어 거의 나타나지 않고 있는데反하여速度가

작은 下部側에서는 剪斷應力의 減少趨勢가 x 軸 位置에 따라 서서히 이루어져 x/h=20 位置에서도 약간 나타나고 있다. 또 最大剪斷應力은 上部側에서 보다 下部側에, 그리고 角柱後緣에서 가까운 位置에 存在한다. 이와같은 剪斷應力의 上,下部 絶對值의 差異와 減少傾向의 差異는 剪斷流에서의 速度勾配에 의한 影響이다.

均一流의 경우 後流 中心線을 境界로 하여 剪斷應力의 크기는 上下 對稱이며, 단지 作用方向만 서로 反對가 된다⁽²⁰⁾는 事實과는 다른 点이다. 또 이러한 現象은 Kiya - Matsumura⁽²⁴⁾, Okude - Matsui⁽²⁵⁾의 圓柱 後流의 研究에서도 같은 結果를 밝히고 있다.

3-3. 亂流 擴散 特性

單純流動에서 亂流運動에너지는 亂動信號의 3次相關關係에 의하여 亂流運動에너지가 큰 地域으로부터 작

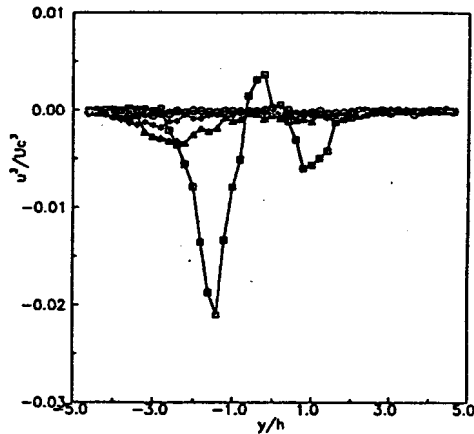


Fig. 11 (a). Distributions of third-order products $-u^3/U_c^3$ of $d/h=2.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

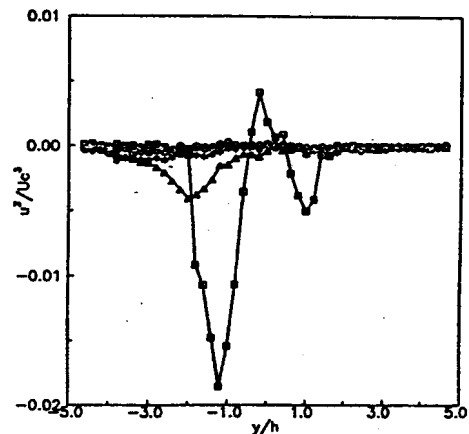


Fig. 11 (b). Distributions of third-order products $-u^3/U_c^3$ of $d/h=2.79$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

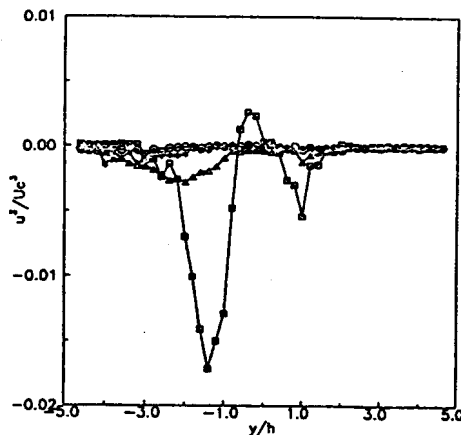


Fig. 11 (c). Distributions of third-order products $-u^3/U_c^3$ of $d/h=3.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

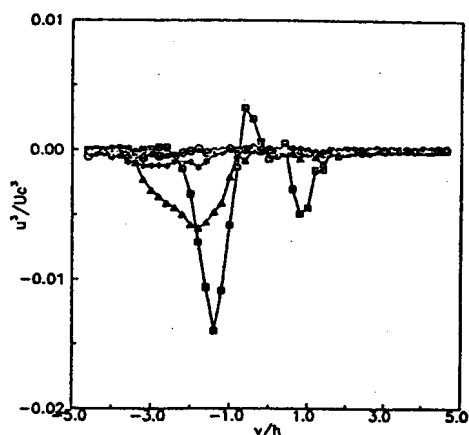


Fig. 11 (d). Distributions of third-order products $-u^3/U_c^3$ of $d/h=4.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

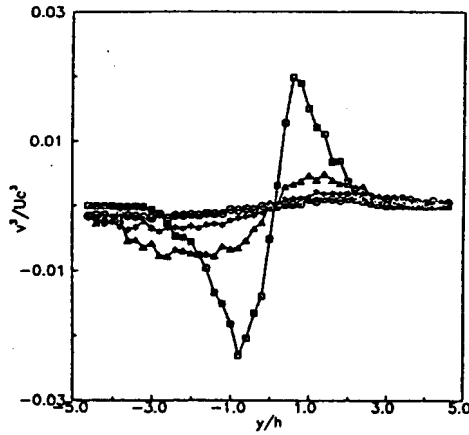


Fig. 12 (a). Distributions of third-order products v^3/U_c^3 of $d/h=2.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

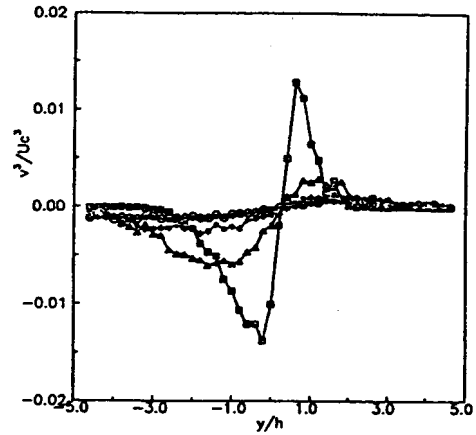


Fig. 12 (b). Distributions of third-order products v^3/U_c^3 of $d/h=2.79$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

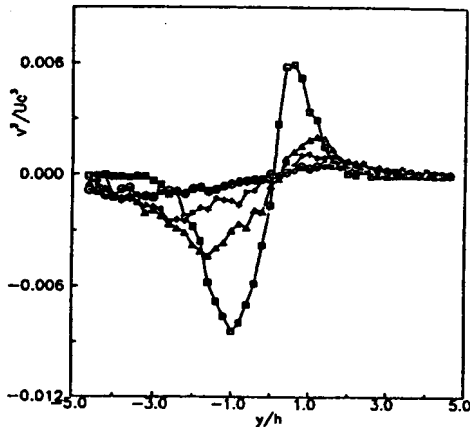


Fig. 12 (c). Distributions of third-order products v^3/U_c^3 of $d/h=3.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

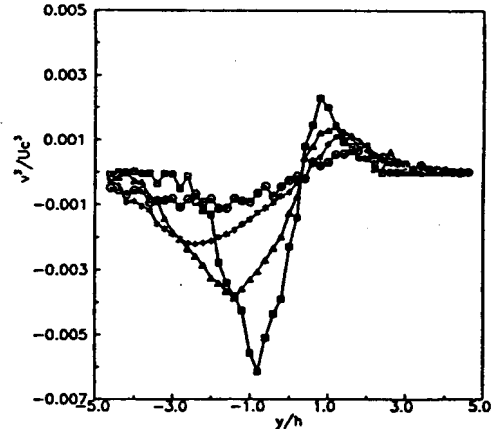


Fig. 12 (d). Distributions of third-order products v^3/U_c^3 of $d/h=4.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

은 地域으로 移動한다. 즉 亂流運動 에너지方程式의 擴散項에는 3次 相關關係가 나타나며, 이 3次 相關關係는 亂流運動에너지의 空間的 移動을 意味한다.

Fig.11(a), (b), (c), (d) 는 邊長比가 各各 $d/h=2.0, 2.79, 3.0, 4.0$ 일때의 主流方向成分의 3乘積 分布를 닥트 中心에서의 自由剪斷 流動方向 速度 U_c^3 으로 無次元化한 것을 나타낸다. 이들은 流動方向 運動에너지 成分의 流動方向 移動을 意味한다.

Fig.11(a)에서 보는바와 같이 $x/h=5$ 에서는 닥트 中心線을 境界로 하여 上部側에서는 $y/h=1$ 에서, 下部側에서는 $y/h=-1.4$ 에서 各各 亂流運動에너지의 最大値가 存在함을 볼 수 있다. 또 上部側보다도 下部側에서의 에너지量이 더 크며 下流方向으로 멀어짐에 따라서 그 값도 急激히 低下되고 있다. 이것은 上部側보다도 下部側에서의 有效剪斷力이 強하여 下部側에서 亂流運動에너지가 더 많이 生成되기 때문이라고 생

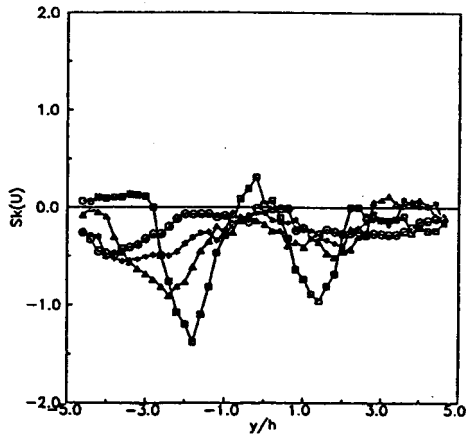


Fig. 13 (a). Distributions of skewness of u along the x direction of $d/h=2.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

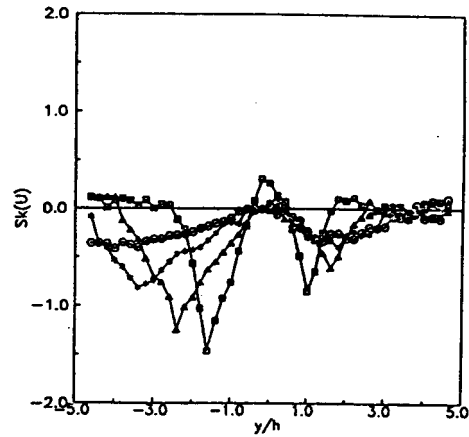


Fig. 13 (b). Distributions of skewness of u along the x direction of $d/h=2.79$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

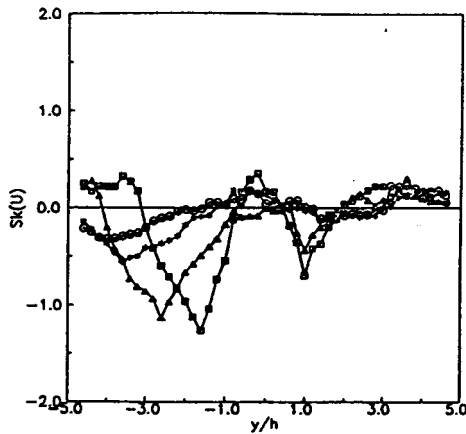


Fig. 13 (c). Distributions of skewness of u along the x direction of $d/h=3.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

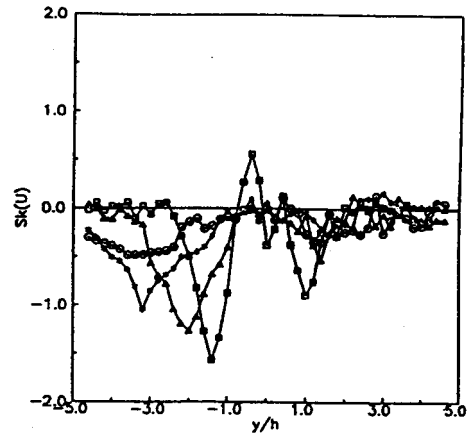


Fig. 13 (d). Distributions of skewness of u along the x direction of $d/h=4.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

각된다. 이와같은 現象은 上部側에서 보다도 下部側에서 熱과 같은 스칼라量의 擴散이 크게 일어남을 意味한다.

各 邊長比에 따라서 流動方向成分의 流動方向移動에 대한 傾向은 大體적으로 비슷한 形態를 보이고 있으나 下部側에서의 最大값은 角柱 後緣으로부터의 rolling에 의한 影響으로 因하여 점차 작아지고 있다. 즉 角柱의 邊長比가 2.0일 때는 完全剝離形으로 rolling의 影響이 가장 强하고 $d/h=2.79$ 가 되면 u 成分은 側面의 길이가 늘어남에 따라 점차 붙어서 흐르게 되고 邊長比가 더 크지면 側面에서 再附着이 일어나게 되어 前緣으로부터의 剝離剪斷層의 流動曲率이 작아지므로 rolling 影響이 弱하게 되어 最大값도 各各 2.2%, 1.8%, 1.7%, 1.4% 程度로 低下된다고 생각된다.

Fig12(a), (b), (c), (d) 는 邊長比가 各各 $d/h=2.0, 2.79, 3.0, 4.0$ 일때의 垂直方向成分의 3乘積 分布

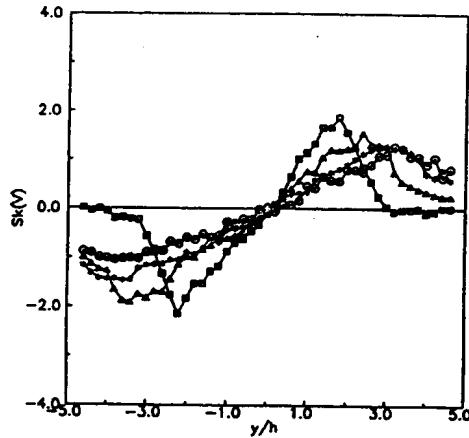


Fig. 14 (a). Distributions of skewness of v along the x direction of $d/h=2.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

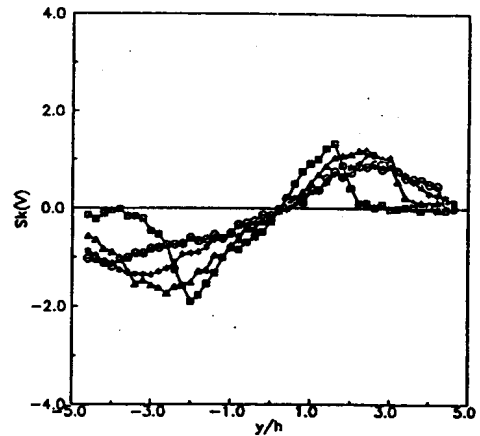


Fig. 14 (b). Distributions of skewness of v along the x direction of $d/h=2.79$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

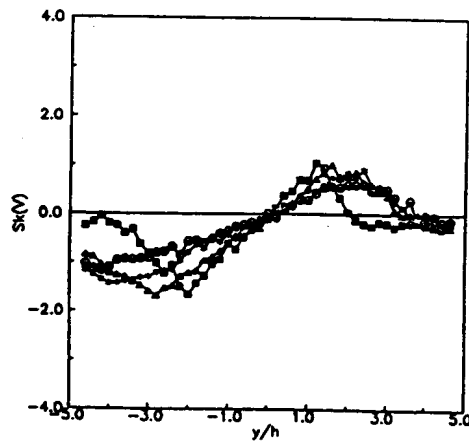


Fig. 14 (c). Distributions of skewness of v along the x direction of $d/h=3.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

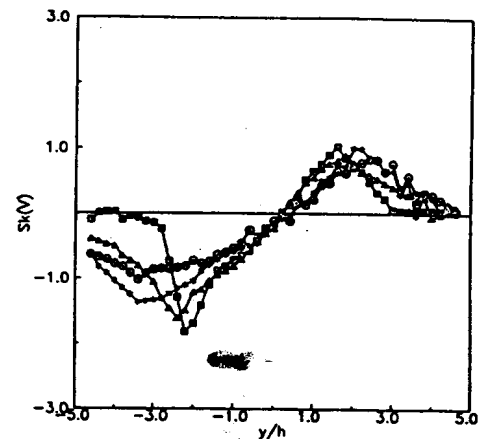


Fig. 14 (d). Distributions of skewness of v along the x direction of $d/h=4.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

를 나타낸다.

Fig.12(a)에서 보는바와 같이 v 成分의 3乘積分布는 닥트 中心線을 境界로 하여 그 方向이 바뀌어짐을 알 수 있으며 u 成分에 比하여 上部側과 下部側에서의 絶對值의 差異는 적지만 速度勾配의 影響으로 下部側에서의 값이 若干 크게 나타나며 下流側으로 멀어짐에 따라 그 값은 急激히 줄지만 y 軸方向幅은 점차 넓어지고 있음을 알 수 있다. 이러한 事實은 邊長比의 增加에 따라 角柱의 側面의 길이 가 길게되어 放出渦의 形成位置를 下流側으로 밀어내기 때문에 前緣으로부터의 剝離剪斷層의 曲率이 작게 되어 渦領域 즉 後流幅이 擴大되는 것이라고 생각된다.

Fig.13(a), (b), (c), (d)는 邊長比가 各各 $d/h=2.0, 2.79, 3.0, 4.0$ 일때의 x 軸方向 位置에 따른 u 成分의 非對稱度(skewness factor)分布를 나타낸다. 一般적으로 均一한 亂流變動은 가우스分布

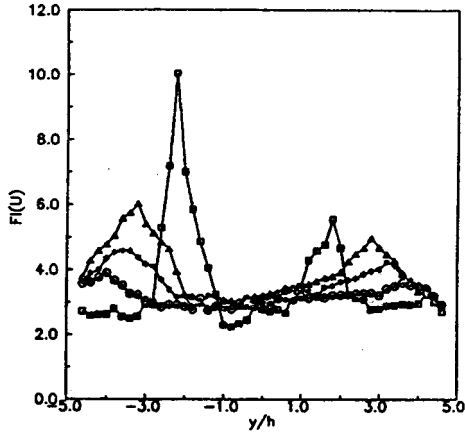


Fig. 15 (a). Distributions of flatness of u along the x direction of $d/h=2.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

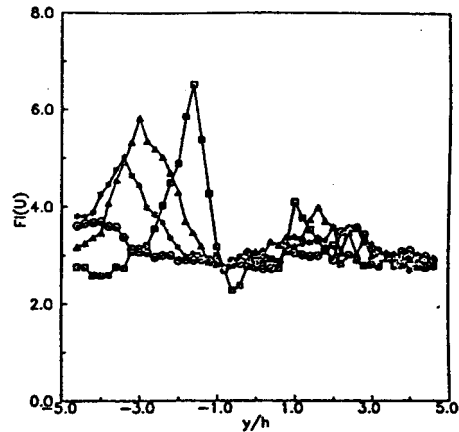


Fig. 15 (b). Distributions of flatness of u along the x direction of $d/h=2.79$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

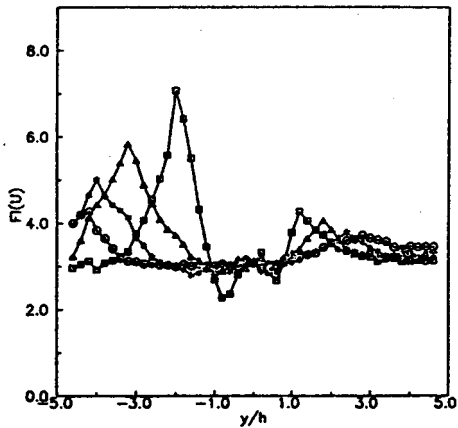


Fig. 15 (c). Distributions of flatness of u along the x direction of $d/h=3.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

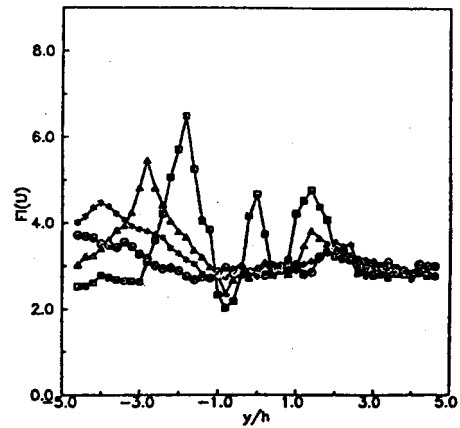


Fig. 15 (d). Distributions of flatness of u along the x direction of $d/h=4.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

(Gaussian distribution)를 갖는다고 假定하고 있으나 亂流性流體와 非亂流性流體가 共存하는 間歇的인 流動場에서는 亂流變動은 가우스分布를 크게 벗어나게 된다^{(26)~(28)}.

非對稱度는 變動成分에 대한 確率密度函數의 偏向程度를 나타내는 指標로서 가우스分布의 非對稱度는 0이다. 後流 中心線上에서 $Sk(u)$ 값이 0 에 가까운 것은 $P(u)$ 의 分布가 均一流의 경우에는 左右 對稱으로 되는 結果와 一致하며 이것은 正規分布의 非對稱度가 0 이라는 事實과 一致하며 後流中心線上에서는 偏向이 없음을 나타낸다. 또 後流 中心線을 境界로 하여 上部側에서는 $y/h=1.5$, 下部側에서는 $y/h=2.0$ 附近에서 最大値가 存在하며 上部側에서 보다 下部側에서의 값이 더 크음을 알 수 있다. 그리고 x 軸方向으로 멀어짐에 따라 그 傾向은 $x/h=5$ 의 경우와 비슷하며 단지 後流幅만 比例하여 增加하고 있다.

$d/h=2.79, 3.0, 4.0$ 의 경우도 $d/h=2.0$ 의 경우와 大體的으로 비슷한 結果를 보이고 있다.

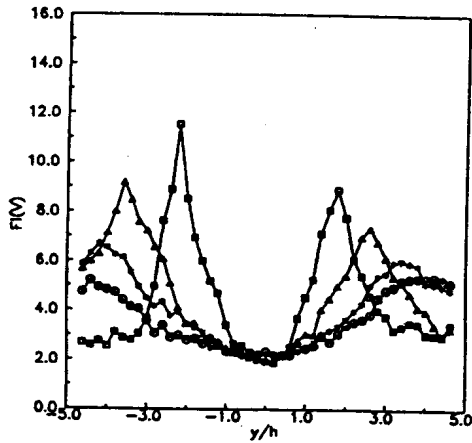


Fig. 16 (a). Distributions of flatness of v along the x direction of $d/h=2.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

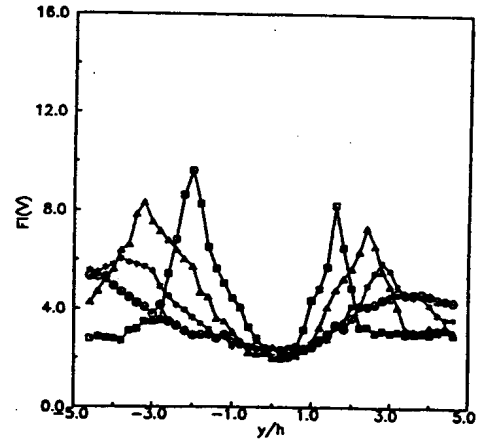


Fig. 16 (b). Distributions of flatness of v along the x direction of $d/h=2.79$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

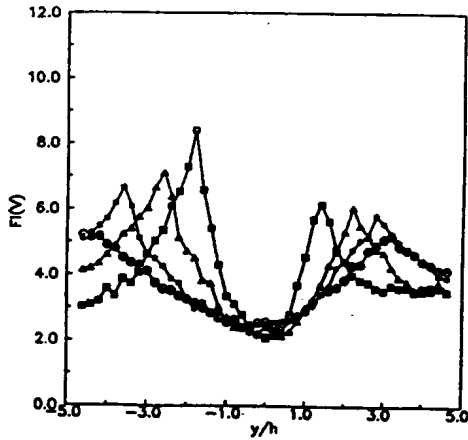


Fig. 16 (c). Distributions of flatness of v along the x direction of $d/h=3.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

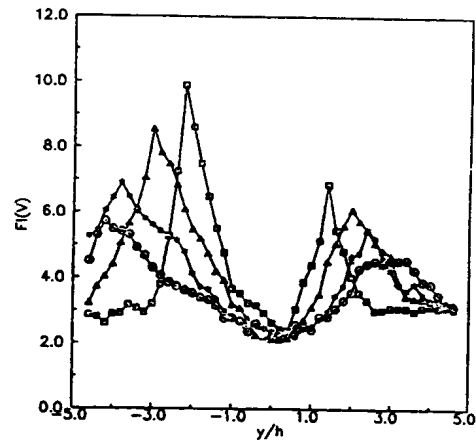


Fig. 16 (d). Distributions of flatness of v along the x direction of $d/h=4.0$. Symbols are the same as in Fig. 4 (a).

Fig.14(a), (b), (c), (d)는 邊長比가 各各 $d/h=2.0, 2.79, 3.0, 4.0$ 의 x 軸 方向位置에서의 v 成分의 非對稱度 (skewness factor) 分布를 나타낸다.

$Sk(v)$ 의 경우 後流中心線을 境界로 하여 그 값은 180° 回轉시킨 것과 비슷하고 後流中心에서는 $Sk(u)$ 의 경우와 마찬가지로 0 이다. $Sk(v)$ 값은 上部側에서는 正, 下部側에서는 負를 나타내는데 이것은 渦의 回轉方向이 上部側에서는 時計方向으로 回轉하고, 下部側에서는 反時計方向으로 回轉하고 있음을 意味한다. x 軸方向으로 멀어짐에 따라 그 값의 크기는 줄어들고 頂点의 位置도 後流 中心線에서 점차 멀어진다.

$d/h=2.79, 3.0, 4.0$ 의 結果도 $d/h=2.0$ 의 경우와 大體的으로 비슷한 結果를 보이고 있다.

Fig.15(a), (b), (c), (d)는 邊長比가 各各 $d/h=2.0, 2.79, 3.0, 4.0$ 인 경우의 x 軸方向 位置에서의 u 成分의 偏平度 (flatness factor) 分布를 나타낸다. 偏平度는 確率密度分布의 偏平한 程度를 나타내는 指標이

며 가우스分布의 偏平度는 3 이다.

또 偏平度の 값이 크다는 것은 實效值보다도 振幅이 큰 變動이 存在하는 頻度數가 높다는 것을 意味한다. 偏平도가 큰 경우는 스파이크 모양의 變動成分의 全變動에너지에 대한 寄與가 增大한다.

Fig.15(a)는 $d/h=2.0$ 인 경우의 u 方向 速度成分의 偏平도를 x 軸 方向 距離에 따라 나타낸 것이다. 偏平度の 分布는 後流中心線上에서는 x 軸 거리에 관계없이 3에 가까운 값을 가지고 있지만 中心線으로부터 벗어나게 되면 非亂流性 流體때문에 가우스 分布에서 벗어나게 되는 것이다. 또 上部側에서보다 下部側에서의 偏平度の 값이 크게 나타나고 있으며 下流側으로 멀어질수록 크기는 減少하나 그 幅은 약간씩 넓어지고 있음을 알 수 있다. 이것은 速度가 낮은 下部側에서 非亂流性 流體의 流入이 上部側에서 보다 强하고 또 角柱에 가까울수록 强하게 일어나고 있다는 것을 意味한다.

$d/h=2.79, 3.0, 4.0$ 의 경우도 大體적으로 비슷한 傾向을 보이고 있다.

Fig.16(a), (b), (c), (d)는 邊長比가 各各 $d/h=2.0, 2.79, 3.0, 4.0$ 의 x 軸 方向으로의 距離에 따른 v 成分의 偏平度(flatness factor) $Fl(u)$ 의 分布를 나타낸다.

Fig.16(a)는 u 成分과 마찬가지로 後流 中心線上에서는 x 軸 方向 距離에 關係없이 3에 가까운 값을 가지지만 中心에서 벗어나면 漸次 그 값이 增加하여 上部側에서는 $y/h = 1.7$ 位置에서 最高値를 가지며, 下部側에서는 $y/h = 2.2$ 位置에서 最高値를 가진 다음 다시 下降하고 있다. 上, 下部側 頂点位置에서 非亂流性 流體의 流入이 가장 强하게 일어나고 있음을 類推할 수 있으며 頂点의 位置가 바로 後流幅의 境界線이 된다. 또 近接後流에서는 u 變動成分 보다 v 變動成分이 各 頂点에서 偏平度の 값이 크게 나타나고 있다. 이것은 v 變動成分의 값이 u 變動成分의 값 보다 近接後流에서는 크다는 것을 意味하며 앞에서 說明한 速度分布에서의 結果와 一致한다. $d/h=2.79, 3.0, 4.0$ 의 경우도 그 傾向은 大體로 $d/h=2.0$ 의 경우와 비슷하다.

4. 結 論

速度勾配가 一定한 均一 剪斷流 속에 長方形 角柱가 놓여 있을 때 邊長比를 2.0, 2.79, 3.0, 4.0으로 變化시키면서 比較的 近接後流領域에서의 速度 變動成分을 測定하여 各 邊長比에 따른 亂流後流 特性을 調査하고, 特히 亂流運動에너지 分布形狀의 把握과 亂流에너지의 空間的인 移動을 意味하는 擴散에 대하여 3次 모멘트까지 統計處理하여 考察한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 後流에서의 擴大幅은 速度가 빠른 上部側 보다도 느린 下部側에서 크게 나타나며, 邊長比가 2.0일 때 後流幅은 最大가 되며 邊長比가 3.0을 넘으면 그 幅은 다시 작아진다.
2. 最大速度缺損位置는 下流로 갈수록 速度가 느린 下部側으로 移動하며, 本 研究의 範圍內에서는 다음과 같은 實驗式을 얻었다.

$$y=K \ln x+C$$

여기서 K 와 C 는 邊長比가 2.0, 2.79, 3.0, 4.0 일때 각각 $-0.421 \ 0.512, -0.641 \ 1.116, -0.586 \ 1.009, -0.421 \ 0.712$ 이다.

3. 亂流運動에너지의 最大位置는 後流中心線을 境界로 하여 低速側에 存在하며 下流로 감에 따라 漸次 아래쪽으로 移動한다.
4. 非對稱도와 偏平도는 流動의 間歇性으로 因하여 自由剪斷流와 後流와의境界에서 더 높은 값을 가지며

速度가 빠른 上部側보다 速度가 느린 下部側이 더 크게 나타난다.

參考文獻

- 1) H. B. Awbi, Wind-tunnel-wall constraint on two-dimensional rectangular-section prisms, Journal of Industrial Aerodynamics, vol.3, pp.285-306, 1978.
- 2) Y. Otsuki, K. Washizu, H. Tomizawa and A. Ohya, A note on the aeroelastic instability of a prismatic bar with square section, Journal of Sound and Vibration, vol. 34-2, pp.233-248, 1974.
- 3) Y. Nakamura and T. Mizota, Unsteady lifts and wakes of oscillating rectangular prisms, Proc. Am. Soc. Civ. Eng., J. Eng. Mech. Div. 101-EM6, pp.855-871, 1975.
- 4) 溝田武人, 岡島 厚, 角柱まわりの時間平均 流れに関する實驗的研究, 土木學會論文報告集, 312, pp.39-48, 1981.
- 5) 溝田武人, 岡島厚, 角柱まわりの時間平均 流れに関する實驗的研究, 土木學會論文報告集, 312, pp.49-57, 1981.
- 6) J. A. Peterka and J. E. Cermak, Wind pressure on buildings-Probability densities, proc. Am. Soc. Civ. Eng., Journal of the engineering mechanics division, vol. 101-EM6, pp.855-871, 1975.
- 7) G. V. Parkinson and N. P. H. Brooks, On the aeroelastic instability of bluff cylinders, Trans. ASME J. Appl. Mech., vol. 28-2, pp.252-258, 1961.
- 8) E. D. Obasaju, An investigation of the effects of incidence on the flow around a square section cylinder, vol. 133, pp.243-259, 1983.
- 9) Muneshige Okude and Tatsuya Matsui, Correspondence of velocity fluctuations to flow patterns in a Karman Vortex streets at low Reynolds numbers, Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., vol.30 No.88, 1987.
- 10) 中口博, 橋本貴久, 武藤眞理, 矩形断面の柱の抗力に関する實驗, 日本航空宇宙學會誌 16-168, pp.1-5, 1968.
- 11) Bearman P. W. and Trueman D. M., An investigation of the flow around rectangular cylinders, Aeronautical Quarterly, vol.23, pp.229-237, 1971.
- 12) 五十風保, 長方形断面柱まわりの 流れ特性, 日本機械學會論文集, B 50-460, pp.3185-3192, 1984.
- 13) 岡島 厚, 彬谷賢一郎, 溝田武人, 長方形断面柱のストロハル數と 背壓係數(断面邊長比が 1-9の 場合) 日本機械學會論文集, 49-447, pp.2551-2558, 1983.
- 14) K. Ayukawa, S. Takabatake and T. Honguh, Numerical simulation on the flow around a rectangular cylinder in a uniform shear flow, proc. of THE SECOND KSME-JSME Fluids engineering conference, pp.446-449, 1990.
- 15) S. Taniguchi, et al., The wake structures of two-dimensional rectangular cylinders having different length-to-width ratios, Trans. JSME, vol.54-498, pp.256-264, 1988.
- 16) Atsushi Okajima, Strouhal numbers of rectangular cylinders, J. Fluid Mech., Vol.123, pp.379-398, 1982.
- 17) 添川恭杉, 川崎則和, 大倉 充, 淺野 亮, せん断流中にある角柱まわりの流れ, 日本機械學會論文集, B 51-472, pp.3887-3895, 1985.
- 18) Champagne F. H., Harris V. G. and Corrsin S., Experiments on nearly homogeneous turbulent shear flow, J. Fluid Mech., vol.41, pp.81-139, 1970.
- 19) 南青都, 趙爽昊, 夫禎淑, 長方形柱 後流의 2次元 亂流特性, 韓國船用 機關學會誌, 第14卷 1號, pp.62-71, 1990.
- 20) 南青都, 長方形柱 後流에 관한 實驗的研究, 韓國船用 機關學會誌, 第15卷 3號, pp.227-238, 1991.
- 21) F. Diaz, J. Gavalda, J. G. Kawall and Francesc Giralt, Interpretation of the complex turbulent flow generated by a rotating circular cylinder, Structure of complex turbulent shear flow IUTAM sym-

- posium Marseille, 1982.
- 22) 夫 禎淑, 圓柱後流の2次元亂流構造. 慶北大學校 大學院 博士學位 論文, 1985.
 - 23) 木谷 勝, 田村尙敬, 有江幹男, 一樣せん断流の中におかれた二次元物體の亂流後流, 日本機械學會論文集 B, 41-347, pp.2011-2019, 1985.
 - 24) Kiya M. and Matsumura M., Turbulent structure in intermediate wake of a circular cylinder, JSME, vol.51-463, pp.775-782, 1985.
 - 25) Okude and Matsui T., Karman 渦列の構造, 亂流 symposium 研究成果 報告集, pp.207-211, 1982.
 - 26) LaRue, J.C. and Libby, P.A., Statistical properties of the interface in the turbulent wake of a heated cylinder, Phys. Fluids, vol.19 No.12, pp1864-1875, 1976.
 - 27) Fabris, G., High-Order statistics of turbulent fluctuations in the plane wake, Phys. Fluids, vol. 26, pp.1437-1445, 1983(28) Wygnanski, I. and Fiedler, H.E., Some measurements in the self-preserving jet, J. Fluid Mech., vol.38, pp.557-612, 1969.
 - 28) Wygnanski, I. and Fiedler, H.E., Some measurements in the self-preserving jet, J. Fluid Mech., Vol. 38, pp.557-612, 1969.

