

온라인 시스템에 의한 亂流의 統計學的 解析方法

盧秉俊* · Charles M. Kopp** · 崔維眞*

<*全北大學校 機械工學科 · **Strasbourg(1)大學校>

1. 머리 말

亂流에 對한 研究는 流體流動에 關한 研究中에서 큰 比重을 차지하고 있다. 비록 이 分野는 일반적인 分野가 아니고 專門性을 띠고 있으며, 實驗的으로나 理論的으로 매우 복잡성을 지니고 있기는 하나, 流體流動의 대부분이 亂流이기 때문에 큰 관심을 두어 다루지 않을 수 없다. 특히 精密産業의 一部分인 航空分野에서 뿐만 아니라 內燃機關의 燃燒問題도 亂流에 依한 混合過程이 燃燒에 큰 影響을 주고 있기 때문에 亂流의 正確한 解析이 要求되고 있다.

컴퓨터와 信號分析器(signal analyser)가 開發되어 활발하게 研究에 사용되기 전까지는 대부분이 亂流의 研究는 波動速度(fluctuating velocity) 測定의 범위에서 亂流強度를 計算하고 이것들의 分布를 몇가지 方法으로 圖示 및 分析하여 亂流를 解析하고 그의 特性을 考察하여 왔다. 뿐만 아니라 亂流는 대부분이 3次元의 波動速度成分들을 가지고 있기 때문에 各方向 波動速度成分들의 相關係數, 亂流應力, 亂流運動에너지 等도 測定分析하여 왔다.

그러나 最近에는 온라인 시스템(on-line system)에 의하여 亂流의 信號를 直接 信號分析器에서 받아 分析하여 컴퓨터에 의해 데이터를 처리하고, 플롯터(plotter)에 의해 圖示함으로써 流動의 特性을 統計學的인 方法으로 解析해 나가고 있다.

여기서 關聯하여 近間에 研究한 例를 보면 A. K. Gupta 등⁽¹⁾은 亂流境界層에서 레이놀즈應力(Reynolds stress)을 統計學的으로 考察하였으며, J.H. Whitelaw 등⁽²⁾은 同軸噴射(coaxial jets)에서, 確率密度的 分布(probability density distributions)를 2次元으로 測定圖示하여 그 特性을 實驗的으로 研究하였다. 나아가서 이들⁽³⁾은 亂流噴射에서 統計學的인 方法으로 測定位置에 따라 亂流의 形成의 變化를 考察하였으며, F.N. Frenkiel 등⁽⁴⁾도 亂流境界層에서 相關係數 測定과 함께 壁面으로 부터의 距離變化에 따라 亂流形成의 變化를 1次元 및 2次元으로 測定分析하였다. 따라서 本 解說에서는 온라인 시스템에 의한 亂流의 統計學的 測定方法과 基本的인 理論 및 測定圖示한 例를 제시하고자 한다.

2. 기본 이론

2.1. 確率密度 概念

亂流의 運動은 극히 不規則的인 流動을 하고 있기 때문에 어느 一定한 時間 동안에 通過하는 信號를 區間으로 나누어 分析하여 各 區間을 通過하는 빈도수(frequency)를 측정하여 統計學的인 確率로 解析하고 있다. 다시 말해서 그림 1에서 幅 $-A$ 에서 A 는 波動成分 u' 가 時間 t 동안 통과하는 流動幅이다. 그러므로 $-A$ 와 A 間을 임의의 區間(測定器에 따라 다르다)으로 나누어 各 區間을 通過하는 信號의 빈도수를 累積하여 圖示한 것이 右편의 히스토그램(histogr-

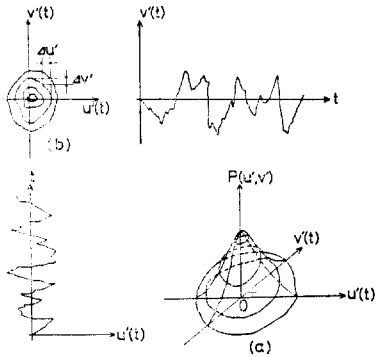


그림 1 히스토그램 (histogram)

aph)이며, 전 구간내에 발생하는 총 빈도수에 대한 각 구간의 빈도수를 비로 나타낸 그래프가 확률밀도선도이다.

1차 확률밀도를 $p(x)$ 라 하면 x 의 값은 x 와 $(x+dx)$ 사이에 존재하므로 샘플(samples)의 분수는 $p(x)dx$ 이다. 그러므로 전체 평균치를 E 로 표시하면, x 의 1차 평균치는

$$E[x] = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx \quad (1)$$

x 의 2차 평균치는

$$E[x^2] = \int_{-\infty}^{\infty} x^2p(x)dx \quad (2)$$

이는 x 의 제곱평균치이며 이의 근을 r.m.s (root-mean-square)라고 부른다. 統計學的으로 파라미터(parameter)는 x 의 베리언스(variance) 값이다. $g(x)$ 를 불연속 평균(discrete average)이라 하여 $g(x) = (x - E[x])^2$ 이라 놓고, σ 를 표준편차(standard deviation)라 하면

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= E[(x - E[x])^2] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - E[x])^2 p(x) dx \end{aligned} \quad (3)$$

式 (3)을 재 정리하면

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx - 2E[x] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} xp(x) dx + (E[x])^2 \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx \\ &= E[x]^2 - (E[x])^2 \end{aligned} \quad (4)$$

亂流의 波動成分이 平均値에 對해 +, - 方向으로 對稱을 이루고 있을때에 確率密度分布曲線은 中心軸을 기준하여 完全對稱을 이루는 拋

物線으로 나타나게 된다. 그리하여 數學的으로 平均値, 偏差, 標準偏差 등의 關係式을 구하여 亂流의 分布 및 確率密度를 解析하는데 Gauss의 式을 利用하고 있다.

Gauss의 式

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-(x-E[x])^2/2\sigma^2} dx \quad (5)$$

$$\text{또는 } p(q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-q^2/2} \quad (6)$$

(여기서 $q = (x - E[x])/\sigma$)

이상에서 1次元 方向에 대해서만 기술하였으나 실제 유체의 유동은 2次元 및 3次元 流動을 하고 있으므로 이에 대한 개념을 다음과 같이 설명할 수 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 波動成分 u', v' 즉 2次元에 대하여 確率密度線圖를 組合하여 立體的으로 圖示한 것이 (a)이며, (b)는 (a)를 절단하여 圖示한 윤곽 투영

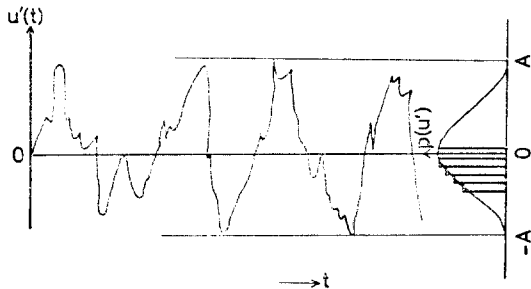


그림 2 결합확률 밀도

도이다. 여기에서 2次元 확률밀도 $P(u', v')$ 를 結合確率密度(joint probability density)라고 하며 이를 式으로 나타내면 다음과 같다.

$$P(u', v') = \iint_{-\infty}^{\infty} p(u', v') du' dv' \quad (7)$$

2.2. 亂流모우멘트(Turbulent Moment)의 概念

亂流成分에 의한 모우멘트의 概念은 確率密度 函數式에서 유도되므로 m 次의 모우멘트式은

$$\overline{u'^m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n u'^m = \int_{-\infty}^{\infty} u'^m \cdot p(u') du' \quad (8)$$

로 나타낸다. 그러므로 1次 및 2次 모우멘트

■ 解 說

식 (1)은, 식 (2)와 同一하며 3次 모우멘트는 다음과 같은 식으로 표기된다.

$$\overline{u^3} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u^3 = \int_{-\infty}^{\infty} u^3 \cdot p(u) du \quad (9)$$

식 (9)를 2次모우멘트의 3/2승으로 除한 값을 S라 하면

$$S = \overline{u^3} / (\overline{u^2})^{3/2} \quad (10)$$

로 나타내어 이값을 非對稱度(skewness factor)라고 부른다. 이는 確率密度 分布曲線이 Gaussian 分布曲線과 같이 中心軸을 기준으로 對稱을 이룰때는 非對稱도가 零(zero)이 되며, 非對稱인 경우는 그 程度에 따라 값을 갖게 됨을 의미한다. 다시말해서 亂流의 波動成分이 어느 方向으로 强하게 發生하고 있는가를 나타내고 있는 것이다. 4次모우멘트는 식 (8)로부터 간단하게 계산할수 있으며, 이값을 2次모우멘트의 제곱으로 除한 값을 扁平度(flatness factor)라 하며 다음과 같이 表記한다.

$$F = \overline{u^4} / (\overline{u^2})^2 \quad (11)$$

이는 各方向別로 측정한 값의 分布가 대칭을 이루는 경우 扁平度는 3에 수렴하게 된다.

다음에 2次元 以上の 모우멘트에서 2方向에 대한 結合모우멘트(joint moment or cross product moment)를 생각할 수 있다. 이는 2方向의 亂流成分의 結合에 의하여 계산되는 모우멘트로서 2次에서 4次까지의 結合모우멘트는 다음과 같은 식들로 나타낼수 있다.

$$\overline{u'v'} = \iint_{-\infty}^{\infty} u' \cdot v' \cdot P(u', v') du' dv' \quad (12)$$

$$\overline{u'^2v'} = \iint_{-\infty}^{\infty} u'^2 \cdot v' \cdot P(u', v') du' dv' \quad (13)$$

$$\overline{u'v'^2} = \iint_{-\infty}^{\infty} u' \cdot v'^2 \cdot P(u', v') du' dv' \quad (14)$$

$$\overline{u'^2v'^2} = \iint_{-\infty}^{\infty} u'^2 \cdot v'^2 \cdot P(u', v') du' dv' \quad (15)$$

$$\overline{u'^3v'} = \iint_{-\infty}^{\infty} u'^3 \cdot v' \cdot P(u', v') du' dv' \quad (16)$$

$$\overline{u'v'^3} = \iint_{-\infty}^{\infty} u' \cdot v'^3 \cdot P(u', v') du' dv' \quad (17)$$

3. 測定시스템 의 소개

전 절에서 논한 각종 亂流成分에서 發生하는 특정치들의 측정은 레이저시스템(lazer system)이나 熱線風速計시스템(hotwire anemometer system)등 여러 方法이 있으나, 본 해결에서는 열선풍속계시스템과 信號分析器 그리고 컴퓨터에 의해 測定分析 할수 있는 시스템을 소개 하고자 한다.

亂流는 亞音速風洞을 利用하여 두 噴流를 45°로 衝突噴射시켜 發生시켰다. 發生된 亂流는 그림 3에서 보는 바와 같이 2셋트의 熱線風速計에 의하여 2次元 亂流成分을 포착하였다.

본 測定에서 사용한 열선풍속계는 美國 Tsi社의 제품이며 열선풍속계에서 받은 非線形化된 값은 線形器(linearizer)에 보내져 여기에서 對數積算回路에 의해 線形化된 값을 얻게된다. 즉 流速과 出力電壓과의 線形關係를 얻게된다.

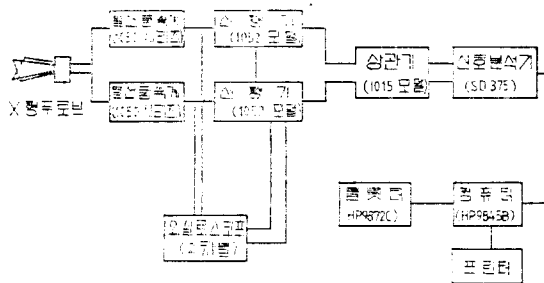


그림 3 측정 시스템

線形器에서 나온 값은 相關器(correlator)에 의해 各方向으로 發生하는 난류들의 相關係數를 測定하게 된다. 信號分析器에서 받은 信號는 컴퓨터 프로그램에 의해 一定時間 동안 通過한 信號를 通過幅과 時間에 따라 統計學的으로 分析하여 데이터를 누적하게 되며, 이자료는 컴퓨터에 의해 테이프에 저장하게 된다. 누적된 데이터는 信號分析器에서 히스토그램(histogram)으로 나타낼수 있으므로 여기에서 직접 亂流의 流動特性을 考察할 수도 있다. 또 저장된 데이터를 플롯터에 의해 圖示하고, 프린터에 의해 프

린팅 할수 있도록 하였다. 온라인 시스템에 의한 측정도시과정의 계통도는 그림 4와 같다.

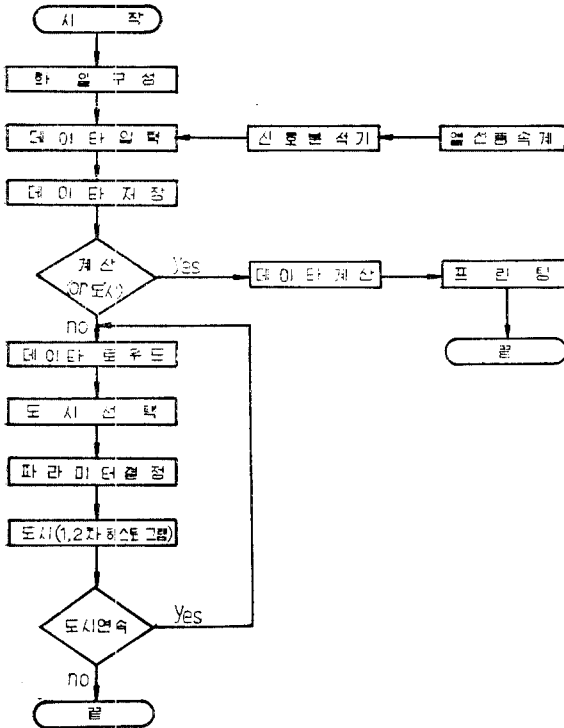


그림 4 온라인 시스템

4. 測定值의 解析過程

45° 원형충돌난류유동은 그림 5에서 보는 바와 같이 충돌유동력이 완전히 사라지기 전까지는 타원을 형성하게 된다. 그리하여 유동단면이 타원을 형성하고 있는 지점 $X=434.6\text{mm}$ (노즐 출구로부터 X 방향으로의 거리)인 지점에서 유동단면의 中心인 O 점과 Y 방향으로 60mm 인 A 점, Z 방향으로 110mm 인 B 점들을 택하여 온라인 시스템에 의하여 測定分布하여 보기로 하자. 여기서 분류의 속도는 $40\text{m}/\text{초}$ 로 하였다.

먼저 $X=434.6\text{mm}$, $Y=Z=0$ 인 中心에서 X 방향으로의 波動速度成分 u' 와 Y 방향으로의 파동속도성분 v' 의 신호를 포착하여 기록한 것이 그림 6이다.

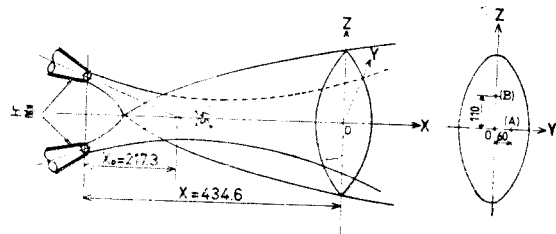


그림 5 45° 원형 충돌 분류

이들은 각각 확률밀도선도를 도시하기 위하여 각 구간을 통과하는 신호의 일부를 기록한 것이며 記錄計의 記錄紙의 速度는 $60\text{cm}/\text{분}$ 이고 u' 의 기록볼트 범위는 기록지 1cm 폭당 0.5 볼트로 하였고, v' 에 대하여는 0.25 볼트로서 동시에 기록한 것이다.

그림 7은 그림 6의 신호를 100개의 구간(class number)으로 나누어 768초 동안 통과한 각 구간의 빈도수를 도시한 히스토그램이다.

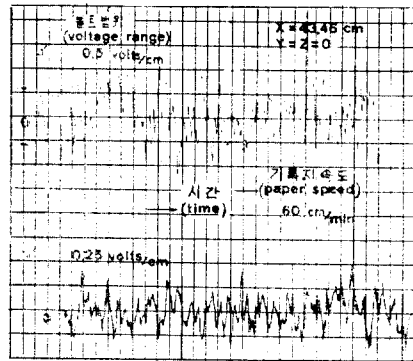


그림 6 u' , v' 의 유동 신호 ($X=43.46\text{cm}$, $Y=Z=0$)

圓形自由噴流나 定常流動의 中心線上에서는 원래 곡선은 좌우대칭을 이루어야 되나 본 45° 충돌유동의 中心에서의 u' , v' 의 빈도누적수에 대한 구간의 함수곡선은 정확한 대칭을 형성하고 있지 않다. 이는 이론과 실제의 차이이며 또 동일한 유동에서도 신호를 받는 시간에 따라 다르게 나타나고 정확한 원형자유분류의 中心에서도 完全한 對稱曲線을 얻기가 극히 어렵다. 또 하나

解 說

의 難點은 大氣中의 流動이므로 流動斷面의 中心點을 잡기가 어렵고 분자장치인 노즐도 기하학적으로 수평 및 수직을 정확하게 설치하기가 어려운 점이다.

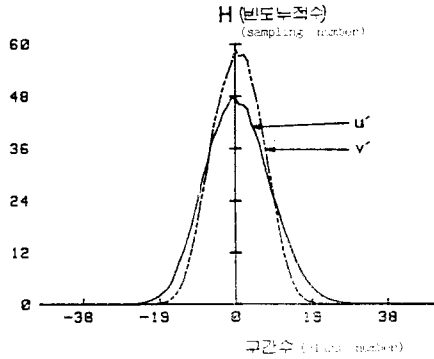


그림 7 u', v' 의 히스토그램 ($X=43.46\text{cm}$, $Y=Z=0$)

그림 7은 빈도수의 누적을 그대로 도시한 것이며 이를 無次元化하여 도시한 것이 확률밀도선도로서 그림 8에 나타나 있다.

그림에서 2점체선으로 도시한 것이 Gauss의 分布曲線이며, 실선은 u' , 점선은 v' 의 分布曲線을 나타내고 있다. 일반적으로 亂流流動에서는 Gauss의 分布曲線과는 많은 편차를 보이나 본 그림에서는 우측으로 약간 편향된 경향만 보일뿐 큰차이를 나타내지 않음은 流動의 中心에서 測定한 값이기 때문이다. 정확히 장치된 실험장치에서 측정상의 오차가 없는 경우에는

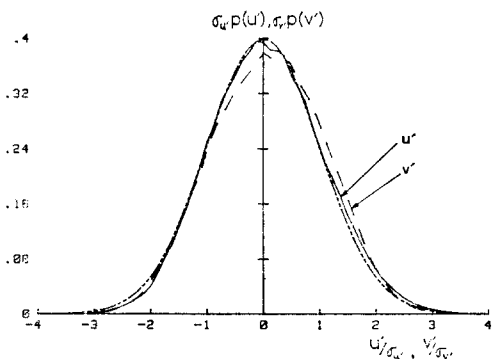


그림 8 u', v' 의 확률 밀도 선도 ($X=43.46\text{cm}$, $Y=Z=0$)

u', v' 曲線은 Gauss 曲線과 一致하여야 하나 실제적으로 복잡한 난류유동에서 一致된 결과를 얻기는 극히 어렵다.

그림 9는 u', v' 의 유동을 동시에 측정된 값을 2次元으로 도시한 것이다. u' 의 流動信號에 대한 채널(channel)을 A로 하여 64구간으로 나누어 각 구간을 통과하는 빈도누적수[그림에서 Samples(HISTOGRAM)으로 표시하였음]와 확률밀도를 나타냈으며, v' 에 대해서도 채널 B에 u' 와 同一한 방법으로 나타내었다. u' 와 v' 의 측정볼트의 범위는 -7V 에서 7V 로 하였으며 구간을 나타내는 좌표축에는 출력을 나타내는 볼트와 그에 해당하는 파동속도의 크기를 나타내었다.

총 측정된 샘플수가 131072개이며 이에 대한 u' 와 v' 의 분할구간의 結合點에 누적된 샘플수를 비로 나타낸 것이 結合確率密度로서 橫軸에 $P(u', v')$ 로 도시하였다.

그림 10의 경우는 結合確率密度分布線圖의 垂直높이를 水平으로 10等分하여 水平面에 투영한 것이다. 이는 2次元波動速度 u', v' 들의 流動形成의 特性을 考察할수 있는 자료이며 全體의 인 非對稱性도 分析할 수 있다. 유동분포가 완전히 대칭이고 u' 와 v' 의 분포의 크기가 同一한 경우에는 각 절단한 부분들의 윤곽선은 원형을 이루어야 하나 본 그림에서 보는 바와 같이 u' 와 v' 가 각각 다르기 때문에 임의의 타원형을 이루

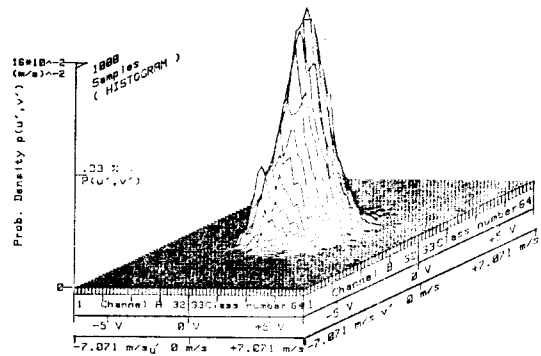


그림 9 u', v' 의 결합확률밀도선도 ($X=43.46\text{cm}$, $Y=Z=0$)

고 있다. 또한 점선으로 표시되어 있는 두 直交軸은 u' 와 v' 에 의해서 발생하는 剪斷應力(shear stress)이 零이 되는 점들로 이루어진 軸이다. 流動이 完全대칭인 경우의 非回轉流動에서는 u' 軸과 v' 軸이 水平과 垂直을 이루어야 되나 본 그림에서는 약간 반시계 方向으로 회전되어 있음을 알 수 있다. 이는 두 분류의 中心線이 정확하게 수평으로 장치되어 있지 않거나 두 분류의 속도의 차이, 또는 中心線에 대한 두분류의 각도가 同一하지 않은 경우임을 알 수 있다.

그림 9의 頂點은 그림 10에서 한 中央위치와 일치하고 두 직교축의 中心點에 위치하여야 하나 좌측으로 편심되어 있는 것도 난류의 성분 u' , v' 가 좌측으로 편향되어 발생하고 있음을 보여 주고 있다.

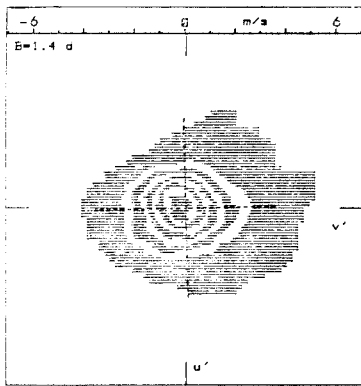


그림 10 u' , v' 의 결합확률 밀도의 수평등분 윤곽선도($X=43.46\text{cm}$, $Y=Z=0$)

그림 5에서 보인바와 같이 두 원형분류의 충돌유동의 단면은 타원을 형성함으로 Y 方向의 亂流成分 v' 와 Z 方向의 亂流成分 w' 의 값이 크게 다르다. 따라서 中心點 0에서 이루어져야 할 Gauss의 分布曲線에 대한 A와 B점에서 형성되는 分布曲線의 차이를 비교 검토하여 보기로 한다.

그림 11은 $Y=60\text{m}$ 인 A점에서 u' 와 v' 의 流動信號를 기록한 것이다. 中心에서와 同一한 條件下에서 測定하였으나 信號의 波動빈도의 집중폭은 中心에서의 경우에 비하여 半정도로 좁

아져 있음을 알 수 있다. 이는 그림 7과 그림 12를 비교하여 보면 명확히 알 수 있으며 幅이 半으로 좁아지는 반면에 집중된 곳의 빈도수적 수는 中心에서의 값의 2倍 이상을 나타내고 있다. 또 A점에서의 u' 는 그림 11에서 표시한 陰(-)의 方向으로 치우쳐 發生하고 있음을 보여주고 있다. 이를 無次元하여 도시한 그림 13에서 Gauss 分布曲線과 비교하여 보면 u' 의 分布는 좌측 즉 陰의 方向으로 크게 기울어져 (skew) 있으며 右側 즉 陽의 方向으로 상당량 扁平(flat) 現象을 보여주고 있다.

그림 14는 u' 와 v' 의 結合確率密度線圖이며 그림 9에 비하면 u' 와 v' 의 形成의 幅이 크게 감소하고 非對稱性和 扁平도가 크게 증가하였음을 보여주고 있다. 이의 보다더 정확한 비교를

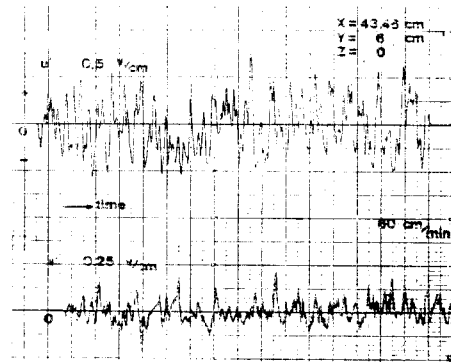


그림 11 u' , v' 의 波動信號($X=43.46\text{cm}$, $Y=6\text{cm}$, $Z=0$)

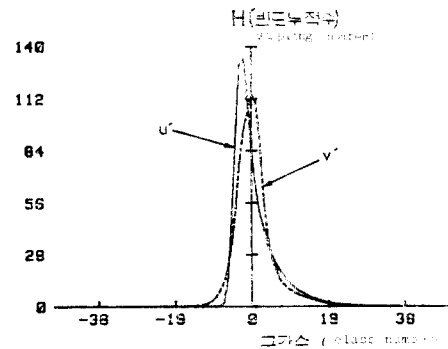


그림 12 u' , v' 의 히스토그램($X=43.46\text{cm}$, $Y=6\text{cm}$, $Z=0$)

解 說

위하여 그림 10의 경우와 同一하게 10간으로 절단하여 투영한 것이 그림 15이다. 전단응력이 쉰 수직 및 수평선의 회전각도가 그림 10

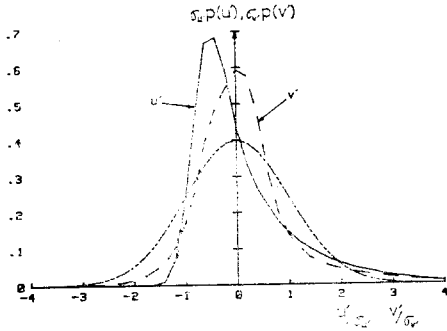


그림 13 u' , v' 의 확률밀도선도($X=43.46\text{cm}$, $Y=6\text{cm}$, $Z=0$)

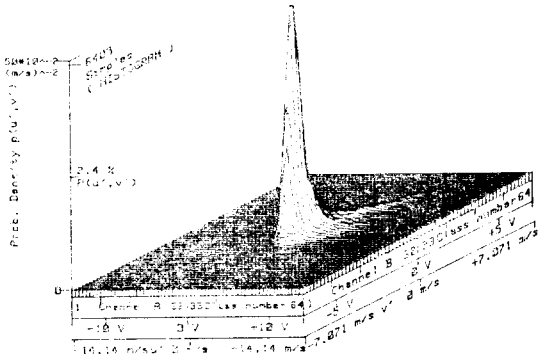


그림 14 u' , v' 의 결합확률밀도($X=43.46\text{cm}$, $Y=6\text{cm}$, $Z=0$)

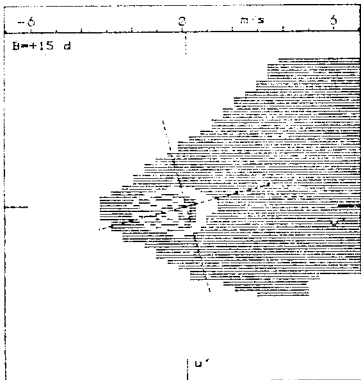


그림 15 u' , v' 의 결합확률밀도선도의 수평등분 윤곽선도($X=43.46\text{cm}$, $Y=6\text{cm}$, $Z=0$)

에서는 1.4° 임에 비해 15° 로 나타나 있어 유동이 상당량 비틀림(torsion)을 받고 있음을 보여주고 있다.

그림 16은 유동단면이 타원인 부분에서 타원의 長徑方向에 해당하는 Z 方向으로 $Z=11\text{cm}$ 되는 점에서 測定한 u' 와 w' 의 流動信號이다. Z 軸上에서는 Y 方向의 성분 v' 는 存在하지 않으므로 u' 와 w' 만을 測定한 것이다.

u' 와 w' 의 流動幅에 대한 各分割구간에 누적빈도수(샘플수)를 도시한 것이 그림 17이다. 同一한 條件으로 도시한 그림 7과 그림 12와는 상이하게 나타나 있으며 특히 w' 의 분포는 陽의 方向에 치우쳐 유동되고 있는 것으로 나타나 있다.

그림 18은 히스토그램으로 도시된 그림 17의 데이터를 無次元으로 圖示한 確率密度線圖이다. 2점체선으로 도시한 Gauss의 分布曲線에 비하여 u' 는 陰의 方向으로 w' 는 陽의 方向으로 集中되어 流動이 形成되고 있음을 알 수 있다.

그림 19는 u' 와 w' 의 成分을 結合確率密度로 圖示한 것으로서 $Y=6\text{cm}$ 에서 측정된 u' , v' 의 선도(그림 14)보다 結合流動斷面이 全體的으로 크게 形成되고 있으며 扁平性은 적게 나타나 있다.

그림 20은 그림 19를 10等分하여 투영한 것으로서 中心에서 圖示한 것(그림 10)과 $Y=6\text{cm}$ 에서 圖示한 경우(그림 15)와는 달리 전단응력이 쉰 軸의 형성의 수평수직축에 대하여 시계 방향으로 회전되어 있음을 알 수 있다. 이는 u' 와 v' 에 의해 形成되는 전단력과 u' 와 w' 에 의해 形成되는 전단력이 다르기 때문이나 두 경우 공히 u' , v' , w' 의 各 성분들의 크기가 다르기 때문이며, 특히 v' 와 w' 의 값이 크게 다르기 때문에 나타나는 현상으로 간주된다. v' 와 w' 의 값이 다른것은 층돌분류의 유동단면이 타원으로 形成된 지점인 $X=43.46\text{cm}$ 에서 측정하였기 때문이며 층돌영향이 완전히 소멸된 流動域 즉 유동단면이 圖形을 이루는 영역에서는 크게 다른 현상이 나타나지 않는다.

이상 세 측정점을 임의로 정하여 亂流成分들

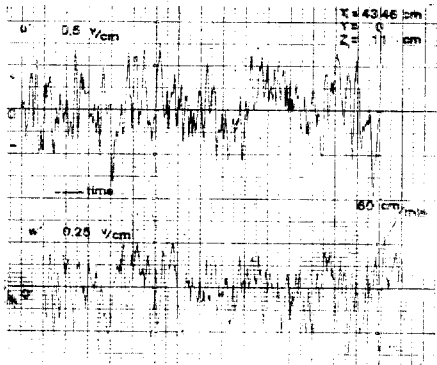


그림 16 u' , w' 의 유동 신호($X=43.46\text{cm}$, $Y=0$, $Z=11\text{cm}$)

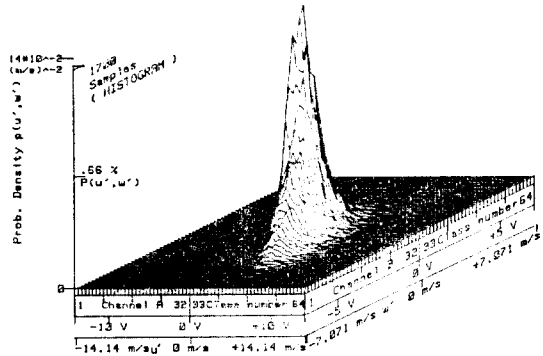


그림 19 u' , w' 의 결합확률밀도선도 ($X=43.46\text{cm}$, $Y=0$, $Z=11\text{cm}$)

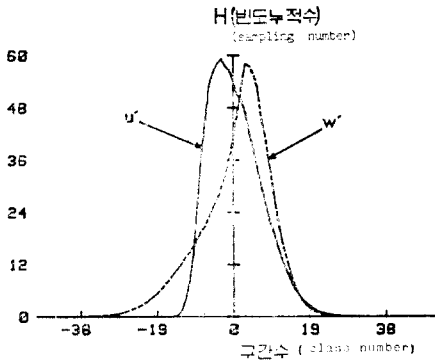


그림 17 u' , w' 의 히스토그램($X=43.46\text{cm}$, $Y=0$, $Z=11\text{cm}$)

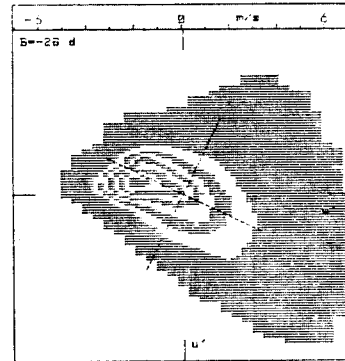


그림 20 u' , w' 의 결합확률밀도선도의 수평등분윤곽선도($X=43.46\text{cm}$, $Y=0$, $Z=11\text{cm}$)

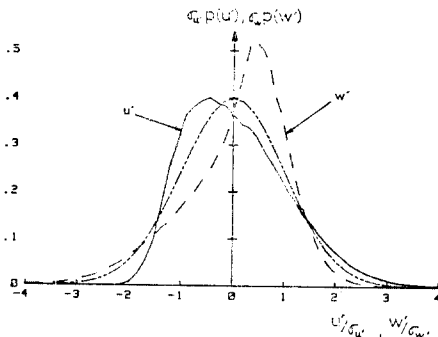


그림 18 u' , w' 의 확률밀도선도 ($X=43.46\text{cm}$, $Y=0$, $Z=11\text{cm}$)

ness)와 전단응력으로 측정된 2차모우멘트 값은
 零이 되어야 하나, 장치의 부정확성, 측정오차,
 층돌분류의 경우 두 분류의 유속과 유량이 다른
 점등으로 약간의 값을 나타내고 있으며 扁平度
 (flatness)도 역시 정확한 Gauss 分布曲線이 되
 며 그 값이 3이 되어야 하나 다른 값을 나타내
 는 것도 同一한 오차에서 오는 결과라 볼 수
 있다.

5. 맺음 말

을 圖式的으로 분석하였으나 그에 대한 실제 데
 이타를 정리하여 보면 표 1과 같다. 이론적으
 로 流動斷面의 中心에서 測定한 非對稱度(skew-

이상 본 해설에서 記述한 사항들은 現在 國內
 에서 研究되고 있는 各樣의 亂流研究에 조금
 이라도 도움이 되고자 하여 온라인 컴퓨터시스템에
 大韓機械學會誌 / Vol. 25, No. 3, 1985 / 223

표 1

측정 종류 측정 위치 (cm)	波動速度 (m/s)			非對稱度 (skewness)			扁平度 (flatness)		
	$\sqrt{u'^2}$	$\sqrt{v'^2}$	$\sqrt{w'^2}$	$\frac{\overline{u'^3}}{(\sqrt{u'^2})^3}$	$\frac{\overline{v'^3}}{(\sqrt{v'^2})^3}$	$\frac{\overline{w'^3}}{(\sqrt{w'^2})^3}$	$\frac{\overline{u'^4}}{(\sqrt{u'^2})^4}$	$\frac{\overline{v'^4}}{(\sqrt{v'^2})^4}$	$\frac{\overline{w'^4}}{(\sqrt{w'^2})^4}$
X=43.46 Y=Z=0	2.542	2.143	—	0.2556	0.0464	—	2.8289	2.3878	—
X=43.46 Y=6 Z=0	1.389	0.7246	—	1.8559	1.5720	—	8.0001	8.6794	—
X=43.46 Y=0 Z=4	1.784	—	1.189	0.5775	—	-0.7551	3.0672	—	3.6609

측정 종류 측정 위치 (cm)	2次 모우멘트		3次 모우멘트				4次 모우멘트					
	$\overline{u'v'}$	$\overline{u'w'}$	$\overline{u'^2v'}$	$\overline{u'v'^2}$	$\overline{u'^2w'}$	$\overline{u'w'^2}$	$\overline{u'^2v'^2}$	$\overline{u'^3v'}$	$\overline{u'v'^3}$	$\overline{u'^2w'^2}$	$\overline{u'^3w'}$	$\overline{u'w'^3}$
X=43.46 Y=Z=0	0.0238	—	-0.0333	0.1174	—	—	0.8602	0.0812	0.0051	—	—	—
X=43.46 Y=6 Z=0	0.3978	—	0.9763	1.4194	—	—	4.4031	3.6991	4.8499	—	—	—
X=43.46 Y=0 Z=4	—	-0.5272	—	—	-0.4424	0.6661	—	—	—	1.8082	-1.6480	-1.9745

의한 統計學的 解析方法을 例를 들어 說明한 것이다. 亂流의 강한 非對稱發生과 扁平現象을 分明하게 알아보기 위하여 두 圖形층돌분류의 混合域에서 3測定點을 澤하였던 것이다.

本測定方法을 적용하기 위하여 本校의 유체공학연구소에서 컴퓨터 프로그램을 자체 시스템에 맞게 개발하였으며 본 프로그램 개발에 불란서 스트라스부르크(1)대학교에서 本校에 재원 교수로 와 있는 C. KOPP 교수가 적극 참여하였다. 프로그램을 수록하여 동분야 연구자들에게 도움이 되도록 하고자 하였으나 지머관계상 수록하지 못함을 유감스럽게 생각하는 바이다.

참 고 문 헌

(1) A.K. Gupta and R.E. Kaplan, Statistical Characteristics of Reynolds Stress in a Turbulent Boun-

dary Layer, The Physics of Fluids, Vol. 15, No. 6, 1972

(2) J.H. Whitelaw and M.M. Ribeiro, Coaxial Jets with and Without Swirl, J. Fluid Mech, Vol. 96, Part 4, pp.769~795, 1980

(3) J.H. Whitelaw and M. M. Ribeiro, Statistical Characteristics of a Turbulent Jet, J. Fluid Mech, Vol. 70, Part 1, pp.1~15, 1975

(4) François N. Frenkiel and Philip S. Klebanoff, Probability Distributions and Correlations in a Turbulent Boundary Layer, The Physics of Fluids, Vol. 16, No. 6, 1973

(5) 盧秉俊, 熱線風速計에 의한 測定方法, 大韓機械學會誌, 第23卷, 第5號, pp.344~348, 1983

(6) 盧秉俊, 金張權, 45° 自由衝突噴射의 亂流流動에 關한 實驗의 研究, 大韓機械學會論文集, 第8卷, 第5號, pp.442~449, 1984

(7) 盧秉俊, 鄭材鍊, Cross Jet에서 Reynolds No. 變化에 따른 亂流成分 分布에 關한 實驗의 研究, 全北大學校 工學研究, 第14輯, pp.95~103, 1983