


레이저 도플러 속도계의 속도편의

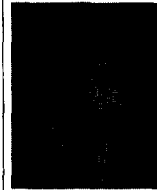
이도환·성형진

Velocity Bias of Laser Doppler Velocimeter

Do-Hwan Lee and Hyung-Jin Sung



- 이도환(한국과학기술원 기계공학과)
- 1966년생
- 유체공학을 전공하고 있으며, LDV를 이용한 측정 및 통계적 처리에 관심을 가지고 있다.



- 성형진(한국과학기술원 기계공학과)
- 1954년생
- 유체공학을 전공하였으며, 난류유동의 실험 및 해석에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

1960년대 중반에 등장한 광학적 유체유속 측정기기인 레이저 도플러 속도계(LDV; laser Doppler velocimeter)는 기존 탐침(probe)들의 문제점으로 지적되어온 삽입으로 인한 유동의 교란, 1차 측정에 의존한 보정의 필요, 측정위치까지 긴 파워선의 필요로 인한 원거리 측정의 어려움 등 많은 문제점을 극복하여 지금까지 계측이 불가능했거나 실험결과와 신뢰성이 의문시되어 왔던 많은 유체역학적 현상에 통찰을 줄 수 있는 새로운 방법으로 제공되어 왔다.⁽¹⁾

LDV는 신호처리의 형태에 따라 많은 산란입자의 광전류 정보로부터 준연속신호(quasi-continuous signal)를 만들어내는 주파수복조형(frequency demodulator type)(예; frequency tracker)과 단일 산란입자가 측정체적을 통과할 때 유효 버스트당 한 개의 속도추출치를 공급하는 버스트형(burst type)(예; LDV counter)으로 나눌 수 있다.⁽¹⁾

현재 대부분의 LDV가 신호처리의 형태로 채택하고 있는 후자의 버스트형 또는 단일실현형(individual realization mode)은 하나의 유효한 산란입자가 측정체적(measuring volume) 안을 지날 때 발생하는 도플러 주파수로부터 한 개의 속도추출값을 얻도록 하여 전자의 연속신호형이 갖는 드롭아웃(drop-out)과 도플러 앰비규어티(Doppler ambiguity) 등의 문제점들을 극복하였다. 그러나 이 버스트형태의 신호처리는 산란입자의 공간적 분포가 균일한 경우에도 추출확률과정(sampling process)이 비주기적이고 순간 추출간격이 유동장의 영향을 받게 되어 산란입자의 검출확률은 속도가 높을수록 커지게 되므로 속도장의 추출함수는 순간속도가 높은 쪽으로 편중된다. 이를 추출편의(sampling bias)라 하며 이 현상으로 말미암아 추출함수의 통계적 처리시 일반적인 산술평균의 사용은 통계치에 “속도편의(velocity bias)”라고 알려진 오차를 야기시킨다. 이 문제는 McLaughlin과 Tiederman⁽²⁾에 의해 처음으로 인식되었으며 지금까지 난류유동장의 정확한 계측을 위해 이 속도편의를 보상하는

많은 방법들이 개발되어 왔다.

광학적 수차(optical aberration)가 없고 산란 입자와 유체와의 속도지연이 없는 이상적인 조건하에서도 이 속도편의와 더불어 측정체적의 유한함으로 인해 속도구배가 급격한 곳에서 발생하는 속도구배편의(velocity gradient bias)나 분사류(jet)에서와 같이 주위 유체와의 혼합에 의해 산란입자의 공간적인 분포가 불균일하게 되어 발생하는 현상 등에 의해 LDV의 통계치는 편의를 갖는다. 후자의 두 경우는 유동장의 국부적 영역이나 특성 유동형태에서 나타나고 일반적인 보상방법이 잘 알려져 있지 않다.

이 글에서는 후자들의 부차적인 오차원인에 대한 해석을 차후의 기회로 미루고 LDV 단일실현 데이터의 통계 추정시 가장 지배적이며 일반적인 오차의 근원이라고 알려진 속도편의를 소개하고 지금까지 알려진 가장 일반적인 보상방법과 이들의 사용가능영역을 살펴보는 것을 목적으로 한다.

2. 속도편의

2.1 속도편의

난류유동 측정시 산란입자와 유동장에 대한 공간적 분포가 균일한 경우에도 유체의 속도가 평균보다 클 때 측정체적을 통과하는 유체의 체적유속은 평균 체적유속보다 증가하게 되며 유체의 속도가 작을 때에는 이 통과 체적유속이 작아지게 된다. 그러므로 평균보다 큰 속도에서 측정 추출확률은 증가하게 되고 평균보다 작은 속도에서 추출확률은 감소하게 된다. 결과적으로 단일하게 추출한 속도추출함수의 분포곡선은 큰 속도영역으로 기울어져 나타나며 이를 추출편의라고 한다. 만약 산란입자의 공간적 분포가 균일하지 않다면 추출 확률과 유동속도와와의 관계는 더욱 증가하게 되므로 통계 추정치(estimates)의 왜곡은 더욱 심해지는데 이 왜곡을 일반적으로 "속도편의"라고 한다.

그림 1은 McLaughlin과 Tiederman⁽²⁾이 사인파 형태로 변동하는 속도장에 대해 단일실현형을 사용하여 얻은 결과이다. 그림에서 보여지는 바와 같이 LDV의 속도 추출치는 낮은 속도보다 높은 속도부분으로 편중되며 이 추출편의에 의해 보편적으로 사용되는 산술평균법으로 평균속도를 추정할 경우 진평균값(true mean value)보다 평균값은 높은 쪽에서 나타남을 알 수 있다. 이러한 속도편의 현상은 Dimotakis,⁽³⁾ Durao등⁽⁴⁾과 Johnson 등⁽⁵⁾의 실험들에서 확인된 바 있다.

그림 2는 가우시안 분포를 갖는 속도유동장에 대해 단일실현 추출로부터 구한 편의된 확률분포곡선과 McLaughlin과 Tiederman⁽²⁾이 제시한 보상기법에 의해 재생된 분포곡선

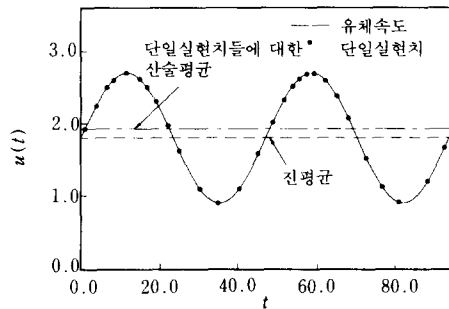


그림 1 정현파형 속도에 대한 시간평균과 단일실현치들에 대한 산술평균의 비교⁽²⁾

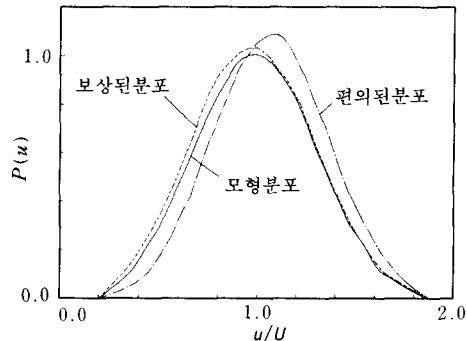


그림 2 추출편의를 보이는 2차원 속도성분의 속도확률분포와 McLaughlin-Tiederman의 보상결과⁽²⁾

을 나타낸 것이다. 그림을 보면 단일실현치의 추출편의에 의해 확률분포곡선의 비대칭도(skewness)가 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 추출편의에 의해 확률분포곡선이 속도가 큰 쪽으로 왜곡된다.

주어진 유동장에서 균일하게 공급된 산란 입자가 LDV 측정체적을 지나는 조건부 평균 추출률(conditional average sampling rate)은 측정체적안의 산란입자의 농도변화율이 작은 경우 주어진 유동장의 속도벡터와 속도벡터에 수직한 투사면적의 함수가 된다.^(2,3,6)

$$\lambda_t = C |V_t| A(V_t) \quad (1)$$

여기서, A 는 입자가 측정체적을 지날 때 유선에 수직인 측정체적의 단면적이고, C 는 단위 체적당 입자수이며, V_t 는 3차원 속도 벡터이다.

일반적으로 N 개의 입자가 어떤 지점에 주어진 시간 동안 도착할 확률은 포아송형태로 모형화되며 평균도착률이 일정하거나 그 시간변화율이 작은 경우에는 정상 포아송확률(homogeneous Poisson probability)로 귀착된다. 이러한 포아송과정은 광감지지에서 광전자가 계수(counting)되는 확률과정에 대한 대표적인 모형으로 사용되어 왔다. 유동장이, 섭동이 극히 작은 층류라면 식 (1)의 포아송 강도함수 $\lambda_t(V_t)$ 는 상수(λ_0)가 되어 입자의 도착확률분포는 정상 포아송과정으로 묘사될 수 있다.

$$Pr(N_t = n) = (n!)^{-1} (\lambda_0 t)^n \exp(-\lambda_0 t) \quad (2)$$

반면 유동장의 형태가 난류인 경우 λ_t 는 주어진 유동장 V_t 의 함수이고 유동장은 랜덤한 섭동성분을 갖는 확률과정의 한 추출함수이므로 측정체적에 도착하는 산란입자의 계수 과정(counting process) $\{N_t; t \geq t_0\}$ 은 강도확률과정(intensity process) $\{\lambda_t(V_t); t \geq t_0\}$ 을 갖는 2중확률과정(doubly stochastic Poisson process)이 된다.⁽⁷⁾ 이때 산란입자

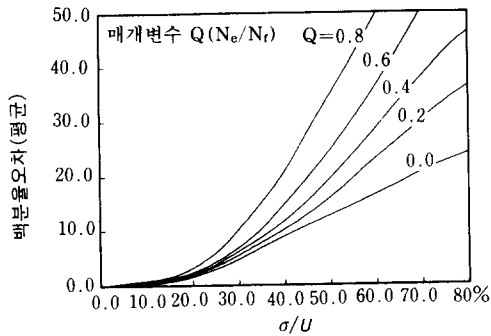
가 측정체적을 (t_0, t) 안에 n 개 통과할 확률을 수학적으로 표현해 보면 다음과 같다.

$$P(N_t = n) = \left\langle \left[(n!)^{-1} \left(\int_{t_0}^t \lambda_r(V_r) dr \right)^n \exp\left(-\int_{t_0}^t \lambda_r(V_r) dr\right) \right] \right\rangle \quad (3)$$

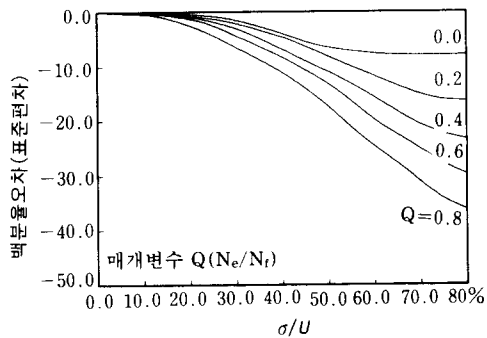
여기서, $\langle \rangle$ 는 모든 속도추출함수 $\{V_t; t \geq t_0\}$ 에 대한 앙상블평균을 의미한다. 유동장의 모든 형태가 일정한 층류에서는 식 (3)이 식 (2)와 같다는 것을 알 수 있다. 즉, 정상 포아송과정은 2중확률 포아송과정의 일종이다.

주어진 유동장에 대해 순간 포아송 강도는 단위 시간당 추출 수의 기대값으로 정의되므로 순간 포아송 강도함수가 클수록 추출 수의 순간 기대값은 커지게 되고 이 순간 포아송 강도함수는 순간 속도벡터의 절대값에 비례하므로 순간 속도벡터의 양에 비례하여 추출될 확률은 커진다. 즉, 섭동속도가 큰 부분에서 많은 추출 기회를 가지게 되어 통계치에 오차가 내포되는데 이 오차가 전술한 속도편의이다. 섭동속도의 변화가 작은 유동에서는 이 속도편의가 작아질 것이라 예측할 수 있다.

식 (1)에서 측정체적의 투사면적 A 는 간섭무늬 강도의 $1/e^2$ 경계로 정의된 탐색체적(probe volume)에서와는 달리 광학적 조건이나 신호처리에 따라 달라지게 된다. Buchhave 등⁽¹⁾은 이러한 신호처리 조건의 하나로서 LDV가 유효측정 신호로 처리하는 최소프린지 교차수(N_e 로 나타냄)에 대한 광학적 조건에 의해 결정되는 최대 프린지 교차수(N_f)의 비에 따라 통계량의 편의를 살펴봐왔다. 그림 3(a)와 (b)는 Buchhave 등⁽¹⁾이 3차원 등방성 난류에 대해 이 매개변수의 변화에 따라 도출한 결과이다. 여기서, 주목할 점은 $Q=0$ 인 곡선은 McLaughlin과 Tiederman⁽²⁾의 최초 해석결과와 일치한다는 것이다. 이 Q 의 효과는 적절한 주파수 변이를 사용하면 완화된다. $Q=0$ 인 곡선에서 평균추정치는 난류강도가 80%에서 약 20%의



(a) 평균에 대한 편의오차



(b) 표준편차에 대한 편의오차

그림 3 측정체적 단면의 영향을 고려한 가우시안 분포를 갖는 3차원 등방성 난류에 대한 속도편의⁽¹⁾

오차를 보이며 표준편차는 약 10%의 오차를 보인다. 보통 휴방계단 뒤의 유동은 평균속도가 0에 접근하는 고난류영역이 상당히 크게 존재하므로 통계치들의 오차는 약 100%까지 커지게 된다.

2.2 데이터밀도

버스트형 LDV에 있어 평균 추출률과 추출 속도함수에 포함된 중요한 에너지성분이나 유동특성시간과의 관계를 살펴보기 위해서는 차원을 갖는 데이터율(data rate)보다는 무차원의 데이터밀도를 정의하는 것이 필요하다.^(6,8) 즉, 이 데이터밀도는 LDV로부터 얻어진 추출속도함수가 표현할 수 있는 난류

의 유동척도와 깊은 관련이 있다. 데이터밀도에 있어 유동특성시간은 일반적으로 테일러의 미소척도나 적분시간척도로 정의된다.

유동특성시간을 테일러의 미소척도를 정의하면 데이터밀도는 측정점의 유동이 단일표준편차만큼 변하는 데 걸리는 평균시간과 추출점간의 평균시간 간격과의 비율이 된다.

$$d.d. = \lambda_{av} T_\lambda \quad (4)$$

여기서, λ_{av} 는 평균 추출률 또는 추출과정의 평균강도라 불러주는 양이고 T_λ 는 $T_\lambda = \sigma_u / \sqrt{\langle (du/dt)^2 \rangle}$ 로 정의된 테일러의 미소척도이다.

Edwards⁽⁸⁾는 추정법의 사용가능 영역을 기술하기 위해 데이터밀도에 대한 세 가지 영역으로 분류했다.

$$\begin{aligned} d.d. > 5 & \quad (\text{고데이터밀도}) \\ 5 \geq d.d. \geq 0.05 & \quad (\text{중데이터밀도}) \\ 0.05 \geq d.d. & \quad (\text{저데이터밀도}) \end{aligned} \quad (5)$$

3장에 논의될 보상방법들의 사용가능 영역은 별다른 언급이 없는 한 이 기준을 사용한다.

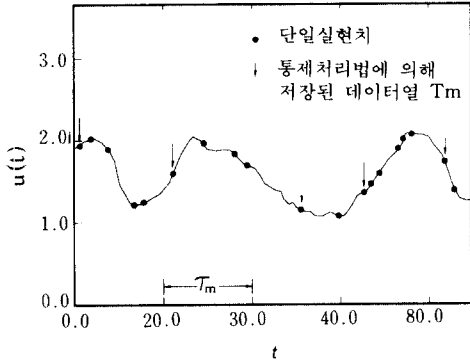
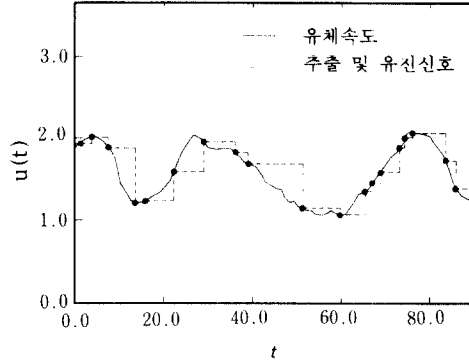
3. 속도편의에 의한 통계오차의 보상

1987년 Edwards⁽⁸⁾ 등 LDV의 제문제를 연구해온 전문가 일단은 단일실현형에서 나타나는 여러 통계적 편의현상과 보상방법에 대해 기존의 연구결과들을 토대로 지침을 마련하였다. 본절에서는 이글과 그 이후에 나온 연구들을 바탕으로 속도편의에 의한 통계오차 보상방법을 설명하고 사용 신뢰영역을 설명하기로 한다.

3.1 적률 보상방법

3.1.1 통제처리법

이 방법은 속도추출함수의 시간축을 측정시간 척도 τ_m 으로 균일하게 나누어 각각의 시간간격 τ_m 에 대해 첫번째 측정값만을 측정

그림 4 통계 처리법⁽⁸⁾그림 5 추출 및 유지법⁽⁸⁾

한 후 통계치를 계산하는 방법이다. 이 방법에 대한 자세한 설명을 그림 4에 나타내었다. 시간간격 τ_m 이 테일러의 미소척도보다 충분히 작고 데이터율이 관심영역의 모든 속도에 대해 크다면 이 방법은 시간척도 τ_m 으로 균일하게 추출한 이산 시계열에 접근한다. 이 처리방법은 2.2절에서 Edwards⁽⁸⁾가 테일러의 미소척도를 사용하여 정의한 데이터밀도의 영역중 높은 데이터밀도의 신호처리에 타당하다고 알려져 있다. 최근 Winter 등⁽⁹⁾은 확률모형과 분사류에서의 실험을 근거로 유동특성시간으로 적분시간척도를 사용한 데이터밀도의 정의에 대해 난류강도와 평균값의 추정가능영역을 평가했다. 이때 이 방법의 가능사용 기준은 다음을 동시에 만족해야 한다.

$$\lambda_{av} T_u > 5, \lambda_{av} \tau_m > 5 \quad (6)$$

여기서, T_u 는 적분시간척도이다.

3.1.2 추출 및 유지방법

추출 및 보간방법은 시간영역에서 계단형태의 재생성과정을 반복하여 수행한다. 즉, 각각의 데이터값은 측정체적에 다음 유효한 신호로 판단된 산란입자가 지날 때까지 유지된다(그림 5). 식 (1)에서 나타난 바와 같이 산란 입자의 유효 추출률이 충분히 큰 경우 순간속도의 절대량은 연속되는 산란입자의

도착시간 간격에 역비례하므로 이 방법은 높은 데이터 밀도에서 통계오차 보상방법으로 사용된다. 난류강도와 평균값은 유동구조가 갖는 난류의 거대척도의 운동에너지양과 직접적으로 관계되므로 Edwards⁽⁸⁾의 데이터밀도의 기준은 적분시간척도를 사용한 기준으로 완화될 수 있으며, Winter 등⁽¹⁰⁾은 평균값과 난류강도에 대하여 다음과 같은 사용 기준을 발표했다.

$$\lambda_{av} T_u > 5 \quad (7)$$

3.1.3 McLaughlin과 Tiederman 형태의 보상

식 (1)에서 나타냈듯이 공간적인 입자의 균일 살포(seeding)를 가정하면 주유동방향의 속도 섭동이 지배적인 경우 이 방향의 순간 속도성분에 의해 적률의 보상이 가능할 것이다. 만약 적률의 계산 추정법으로 보상인자를 고려한다면 다음과 같은 식이 가능하

$$\langle v^n \rangle = \left(\frac{\sum_k w_k v_k^n}{\sum_k w_k} \right) \quad (8)$$

여기서, w_k 은 적절한 보상인자이다. McLaughlin과 Tiederman⁽²⁾은 이 보상인자로서 $1/|v_k|$ 을 제안했으며, 이를 1차원 보상법이라 한다. 속도 보상에 대한 고려로 2차원 속도 성분을 사용한 2성분 보상방법이나 탐색체적

의 기하학적 형상을 고려한 보상이 제안되었으나, 이 방법들은 보상이 없는 경우보다 더욱 오차를 증가시킬 수 있다고 알려져 있다. ⁽⁸⁾ 1차원 보상법은 후방계단 뒤의 유동과 같이 속도가 0으로 되는 부분(즉, w_k 가 ∞ 이 되는 부분)이 존재하면 과대보상(overweighting)을 하므로 이 방법은 보상방법으로 적절하지 못하게 된다.

3.1.4 통과시간 보상방법

산란입자의 측정체적 통과시간은 속도가 높은 부분에서는 통계적으로 짧고 낮은 부분에서는 길게 나타난다. 이 측정체적 통과시간은 3차원 속도성분 모두에 관련되므로 1차원 LDV를 사용하는 경우에도 이 통과시간을 측정함으로써 3차원 속도성분에 의한 보상효과를 기대할 수 있다. ⁽¹¹⁾ 그림 6은 유동장 정보에 대해 단일실현 속도값과 이 통과시간을 나타낸 것이다. 이 방법은 데이터 밀도가 극히 낮은 경우에도 정성적으로 좋은 보상이 가능하다. 이 때 적률에 대한 보상인자 w_k 는 Δt_k 즉, 통과시간이 된다. 그러나 현재까지 정확히 통과시간을 측정할 수 있는 신호처리기가 개발되지 못했고 이 통과시간 Δt_k 가 다시 확률과정의 추출함수가 되므로 그에 대한 오차해석이나 정확한 실험결과가 많지 않다.

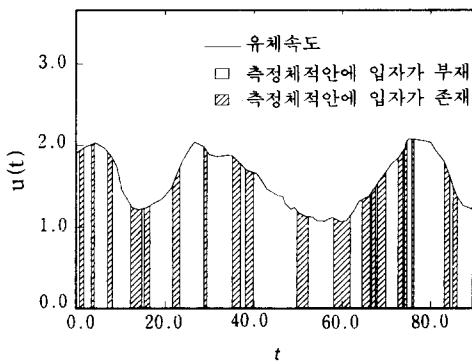


그림 6 통과시간 보상법⁽⁹⁾

3.2 스펙트럼 보상방법

3.2.1 정상 포아송 분포를 사용한 Roberts와 Gaster의 추정법(RG)

시간간격이 포아송 분포를 갖는다면 앨리어싱이 생기지 않은 스펙트럼의 추정이 가능하다는 이론을 바탕으로 Roberts와 Gaster⁽¹⁵⁾는 다음과 같은 스펙트럼 추정식을 개발했다.

$$\hat{E}_{uu}(f) = \frac{2}{\lambda_{av}^2 T} [|\sum_j u(t_j) D(t_j) \exp(i2\pi f t_j)|^2 - \sum_j u^2(t_j) D(t_j)^2], \quad i = \sqrt{-1} \quad (9)$$

여기서, $D(t_j)$ 는 적당한 원도우함수이다.

이 방법은 난류강도가 심하지 않아서 식 (1)로 표현된 추출물의 변화성분이 작을 때 정성적인 스펙트럼의 추정방법으로 사용된다. 모든 데이터밀도에서 Tropea⁽¹²⁾ 그리고 Lee와 Sung⁽¹³⁾은 난류강도가 30% 이하인 모든 데이터밀도에서 이 방법의 사용이 가능함을 발표했다. 반면 시간간격 분포의 랜덤함으로 인해 균일추출에서 사용되는 알고리즘보다 분산오차(variability)를 증가시킨다. 난류강도가 클 때 이 방법의 사용을 위해 Tropea⁽¹²⁾는 속도편의에 의한 스펙트럼편의를 줄이기 위한 시도로서 통제 처리법의 알고리즘을 사용하여 데이터를 재분포하고 이 방법을 사용해 보았으나 실패를 거두지 못했다.

3.2.2 George⁽¹¹⁾의 통과시간 추정법

George⁽¹¹⁾는 3.1.4항에서 언급한 통과시간 보상방법과 Roberts와 Gaster⁽¹⁵⁾의 생각을 이용하여 다음과 같은 불편의(unbiased)스펙트럼 추정식을 제안했다.

$$\hat{E}(f) = [2T |\sum_j u(t_j) \Delta t_j \exp(i2\pi f t_j)|^2 / (\sum_j \Delta t_j)^2], \quad i = \sqrt{-1} \quad (10)$$

여기서, T 는 총 레코드 길이이고 Δt_j 와 $u(t_j)$ 는 각각 통과시간과 단일실현치이다.

이 방법은 낮은 데이터 밀도에 대해서도

적용이 가능하며 Nyquist 기준을 따르는 앨리어싱이 생기지 않다고 알려져 있다. 반면 상술한 바와 마찬가지로 Δt_s 가 또 하나의 확률변수가 되고 그 정확한 측정이 어려우므로 결과적으로 스펙트럼의 분산오차는 심하게 증가한다. 이 분산오차를 감소할 수 있는 방법의 개발이 모색되어야 한다.

3.2.3 균일 재추출에 의한 방법(SH와 SR)

이 방법들은 비 주기적 추출간격을 갖는 단일실현치를 적절한 보간방법을 동원하여 균일 시간간격으로 데이터를 재추출하고 기존의 균일 간격 스펙트럼 알고리즘을 사용하는 방법이다. 이 방법들의 장점으로서는 균일 재추출에 의해 일반적으로 알려진 모든 신호 처리 알고리즘의 사용가능과 균일 추출간격에 따르는 큰 분산오차의 감소를 들 수 있다. 이에 대한 연구로는 Adrian과 Yao⁽⁶⁾의 추출 및 유지방법(SH)에 의한 이론적인 해석과 Shannon의 추출이론을 도입한 Vey-

nante와 Candel의 방법, 그리고 최근에는 Lee와 Sung⁽¹⁴⁾이 최적기법을 응용한 방법 등이 있다.

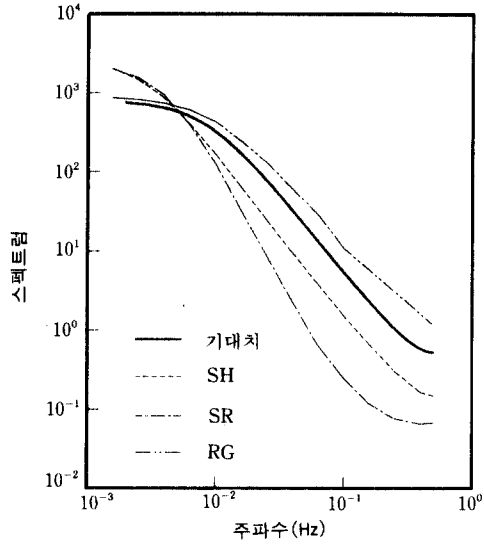


그림 8 d.d.=0.05와 t.i.=100%에 대한 스펙트럼 추정치들의 계산결과

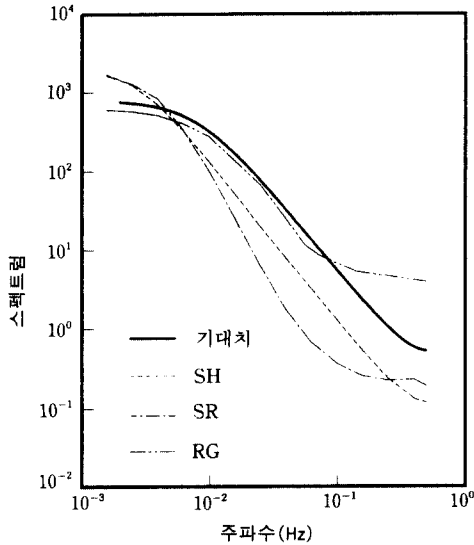


그림 7 d.d.=0.05와 t.i.=30%에 대한 스펙트럼 추정치들의 계산결과

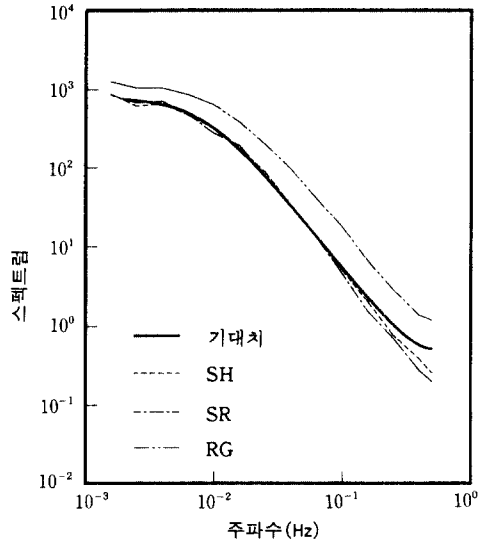


그림 9 d.d.=5와 t.i.=100%에 대한 스펙트럼 추정치들의 계산결과

Veynante와 Candel⁽¹⁶⁾은 고전적인 Shannon의 추출이론을 바탕으로 시간축의 신장-수축 변환(stretching-compression transform)을 이용하여 다음과 같은 시간영역 보간방법을 생각했다. (SR)

$$u(t) = \sum_n u(t_n) \frac{\sin[2\pi f_c(\gamma(t) - n\Delta t)]}{2\pi f_c(\gamma(t) - n\Delta t)} \quad (11)$$

여기서, $\gamma(t)$ 는 불균일 추출시간축에 대한 균일 추출시간영역으로의 함수이다. 이 $\gamma(t)$ 는 추출점 t_n 에서의 값들을 이용하여 보간한다.

그럼 7~9는 Lee와 Sung^(13,14)의 수치모사 결과를 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 30% 이하의 난류강도에서는 Roberts와 Gaster⁽¹⁵⁾가 제안한 직접변환법을 사용하면 모든 데이터 밀도에서 정성적인 스펙트럼의 추정이 가능하며 데이터 밀도가 1 이상인 점에서는 추출 및 유지보간 방법이 로버스트한 결과를 예측한다는 것을 알 수 있다.

4. 맺음말

이 글은 LDV의 단일실험형 데이터로부터 얻어지는 여러 통계치의 정확한 추정을 위해 기존에 발표된 논문들을 정리함으로써 난류 유동장에 대한 실험에서 정밀한 실험값을 얻고자 하는데 목적을 두었다. LDV로부터 얻어지는 데이터열로부터 추정되는 통계값은 머리말에서 언급되었듯이 다른 여러가지 편의들에 의해서도 영향을 받는다. 또한 속도편의의 존재여부에 대해 실험을 근거로 한 논란은 계속되어 왔는데 이는 가우시안 형태의 레이저 빔이 갖는 강도분포에 의해 나타난다고 알려져 있다.⁽¹⁷⁾ 즉, 측정체적을 지나 는 산란입자에 대한 광감지기에서 검출되는 산란광전자(scattering photon)는 속도편의와 상반되는 효과를 나타내며 이를 진폭편의(amplitude bias)라 한다. 이 속도편의와 진폭편의의 상대적인 양은 실험자가 입자 도차

시간간격에 대한 확률분포함수 등을 사용해서 결정해야 한다.⁽¹⁷⁾ 결론적으로 산란입자에 의한 여러가지 통계 추정량의 편의오차를 줄이기 위해서는 제편의문제에 대한 이해와 실험치를 바탕으로 한 실험연구인들의 적절한 판단이 필수적이다.

참고문헌

- (1) Buchhave, P., George, W. K. Jr. and Lumley, J. L., 1979, "The Measurement of Turbulence with the Laser-Doppler Anemometer," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 11, pp.443~503.
- (2) McLaughlin, D. K. and Tiederman, W. G., 1973, "Biasing Correction for Individual Realization of Laser Anemometer Measurements in Turbulent Flows, *The Physics of Fluids*, Vol. 16, pp. 2082~2088.
- (3) Dimotakis, P. E., 1976, "Single Scattering Particle Laser Doppler Measurements of Turbulence," *Applications of Non-intrusive Instrumentation in Fluid Flow Measurement*, AGARD CP-193, pp. 10. 1 ~10. 14.
- (4) Durao, D. F., Laker, J. and Whitelaw, J. H., 1979, "Bias Effects in Laser Doppler Anemometer," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, Vol. 13, pp. 442~445.
- (5) Johnson, D. A., Modarress, D. and Owen, F. K., 1984, "An Experimental Verification of Laser-Velocimeter Sampling Bias and Its Correction," *ASME J. Fluids Engng.*, Vol. 106, pp. 5~12.
- (6) Adrian, R. J. and Yao, C. S., 1987, "Power Spectra of Fluid Velocities Measured by Laser Doppler Velocimetry," *Exp. in Fluids*, Vol. 5, pp. 17~28.
- (7) Snyder, D. L., 1975, "Random Point Processes," John Wiley & Sons.

- (8) Edwards, R. V., 1987, "Report of the Special Panel on Statistical Particle Bias Problems in Laser Anemometry," *J. Fluids Eng.*, Vol. 109, pp. 89~93.
- (9) Winter, A. R., Graham, L. J. W. and Bremhorst, K., 1991, "Velocity Bias Associated with Laser Doppler Anemometer Controlled Processors," *ASME J. Fluids Engng.*, Vol. 113, pp. 250~255.
- (10) Winter, A. R., Graham, L. J. W. and Bremhorst, K., 1991, "Effects of Time Scales on Velocity Bias in LDV Measurements Using Sample and Hold Processing," *Exp. in Fluids*, Vol. 11, pp. 147~152.
- (11) George, W. K., 1988, "Quantitative Measurement with the Burst-Mode Laser Doppler Anemometer," *Exp. Therm. and Fluid Sci.*, Vol. 1, pp. 29~40.
- (12) Tropea, C., 1987, "Turbulence-induced Spectral Bias in Laser Anemometry," *AIAA Journal*, Vol. 25, pp. 306~309.
- (13) Lee, D. H. and Sung, H. J., 1992, "Assessment of Turbulent Spectral Estimators in LDV," *KSME Journal*, Vol. 16, pp. 1788~1795.
- (14) Lee, D. H. and Sung, H. J., 1993, "A Comparative Study of Three Reconstruction Methods for LDV Spectral Analysis," *Proc. KSME Spring Annual Meeting*, pp. 233~236.
- (15) Roberts, J. B. and Gaster, M., 1980, "On the Estimation of Spectra from Randomly Sampled Signals: A Method of Reducing Variability," *Proc. R. Soc. Lond.*, A 371, pp. 235~258.
- (16) Veynante, D. and Candel, S. M., 1988, "A Promising Approach in Laser Doppler Velocimetry Data Processing: Signal Reconstruction and Nonlinear Spectral Analysis," *Signal Processing*, Vol. 14, pp. 295~300.
- (17) Lee, D. H., Sung, H. J. and Chung, M. K., 1990, "Spectral Analysis of Randomly Bursted Data from an LDV in Turbulent Recirculating Flows," *Proc. 2nd KSME-JSME Fluids Engng. conf.*, pp. 2, 316~2, 320. 