

<論 文>

Dual Beam LDV 의 數密度에 관한 研究†

李 起 白* · 朱 恩 選**

(1985年 9月 16日 接受)

A Study on the Number Density in a Dual Beam LDV

Ki Baik Lee and Eun Sun Ju

Key Words; Dual Beam(2 광속), LDV(유속계), Number Density(수밀도), Fringe(간섭무늬)

Abstract

A study on the number density in a dual beam LDV is carried out with moving particles of various irregular arrangements. Ratious of the particle diameter to the fringe Spacing are $D/\delta=0.3, 0.5, 1.0$ and 1.5 . In the case of the small number of moving particles($N<10$), the visibility is influenced much by the difference of the phase of particles for one side fringe and the change in visibility is shown remarkable. In the case of the large number of particles, the decreasing rate for visibility on the graph is smooth because the effect of the phase difference of particles is decreased by more unitorm distribution of particles over fringes. And the formula of the number density on the basis of probability is fairly compared with experimental values.

記 號 說 明

- | | |
|--|---|
| <p>A_D : Doppler 信號의 진폭(=2I_D)</p> <p>D : 粒子的 직경</p> <p>g : 어두운 간섭무늬속으로 들어가는 粒子數</p> <p>I_D : Doppler 信號의 최대 強度</p> <p>\bar{I}_D^1 : 전체 平均된 1개 粒子的 I_D</p> <p>\bar{I}_D^N : 전체 平均된 N개 粒子的 I_D</p> <p>I_P : 臺(pedestal) 成分의 최대 強度</p> <p>\bar{I}_P^1 : 전체 平均된 1개 粒子信號의 I_P</p> | <p>\bar{I}_P^N : 전체 平均된 N개 粒子信號의 I_P</p> <p>l : 粒子間의 거리의 半($=\frac{L}{2}$)</p> <p>L : 粒子間隔</p> <p>m : Doppler 信號진폭을 결정하는데 가담하는 散亂粒子的 數</p> <p>n : 粒子間의 간섭무늬 數</p> <p>N : Probe volume 에 동시에 같은 속도로 횡단하는 粒子的 數</p> <p>p : 밝은 간섭무늬 속으로 들어가는 粒子的 數</p> <p>P : 확률(probability)</p> <p>r : Probe volume 의 粒子的 횡단거리(Δy)의 半</p> <p>V : 可視度(visibility)</p> <p>\bar{V} : 전체 平均된 한 粒子的 可視度</p> |
|--|---|

† 1985년도 대한기계학회 춘계학술대회(6.28)에서 발표

*正會員, 釜山大學校 工科大學

**正會員, 慶尙大學校 農科大學

- \bar{V}_N : 전체 平均된 N 개 粒子의 可視度
- Δy : Probe volume의 y 軸幅 즉 散亂粒子의 횡단거리 ($=2r$)
- β : $\cos\pi(n-\Delta)$
- δ : 간섭무늬 간격
- Δ : 한쪽 간섭무늬에 대한 두 粒子間의 位相差

1. 序 論

Probe volume 증상으로 한개의 流動粒子가 통과할 때에는 한 散亂子에 의한 信號가 나타나며 이 信號에 의해 流動粒子의 크기 및 速度等の 정보를 얻게 된다. 信號의 特性으로서의 可視度는 粒子의 크기에 대한 중요 파라메타(parameter)로서 많은 연구가 있다. 간섭무늬 (fringe)의 간격에 대한 粒子의 크기比와 可視도에 대한 공식이 Farmer^(1,2,3)에 의해 얻어 졌고 같은 모델이 Durst⁽⁴⁾에 의해 제시되었다. Robinson⁽⁵⁾ 등은 회절이론에 의해 위의 관계를 재 증명했고 구경 (aperture)이 可視도에 관계있음을 밝혔다. Chu⁽⁶⁾ 등은 Maxwell 방정식의 정확한 해에 의해 굴절율이 可視도에 관계있음을 보였다. Adrian⁽⁷⁾ 등은 굴절율과 입체각이, Roberts⁽⁸⁾는 beam stop가 역시 可視도에 관계있음을 고찰했다. Gaussian beam 성질의 영향에 관한 상세한 고찰과 二相흐름에 대한 연구는 Durst^(9,10,11) 등에 의해 이루어졌다. 여러 流動粒子가 probe volume을 동시에 지나갈 때에는 여러 粒子의 散亂光에 의한 合成

된 信號가 나타난다. 이때의 信號分析은 流動粒子의 數密度에 대한 자료를 제공한다. 微細流動粒子의 分布狀態를 파악하는 데 대한 지식은 流體工學의 여러分野에서 필요하다. μm 크기 정도의 粒子들에 대한 數密度의 측정에는 dual beam LDV에 의해 그 가능성이 시도 되고 있다. 공간에서 간섭무늬 격차를 이루므로 형성된 probe volume속으로 流動粒子들이 지나갈 때 나타나는 信號에 의한 可視도로 부터 數密度에 대한 정보를 얻는다. 可視度の 數密度에 대한 관계식이 Farmer^(1,2)에 의해 확률적 이론으로부터 주어지고 있다. 이때는 流動粒子가 간섭무늬의 간격보다 작고 그 수가 20 이상이어야 하는 제한성이 주어지고 있다. 본 연구에서는 流動散亂粒子들을 1個에서 35個까지 불규칙 상태로 배열한 13가지의 모델을 만들어 probe volume속으로 횡단시키므로 나타나는 信號를 分析하여 數密度와 可視도에 대한 실험적 관계를 파악하고 이를 이론식과 비교검토하고자 했다. 또한 두 粒子의 간격을 좁혀가면서 실험하므로 간섭무늬에 대한 두 粒子의 位相差가 合成信號特性에 重要 파라미터임을 확인했다.

2. 理 論

Fig. 1의 (a)는 probe volume내의 실제 간섭무늬 強度이고 (b)는 수학적으로 간략화하기 위한 모델 간섭무늬 강도를 나타내고 있다.

한개의 流動散亂粒子가 간섭무늬의 밝은 부분을 지날 때에는 빛을 散亂시키나 어두운 부분을 지날 때에는 그렇지 못하므로 임의의 순간에서 한 散亂粒子의 散亂可能 확률은 1/2 이고 N 개 粒子일 때에는 $(1/2)^N$ 이다. 上記 probe volume내의 밝은 간섭무늬속으로 들어가는 粒子의 數를 p 라하고 동시에 같은 속도로 어두운 간섭무늬속으로 들어가는 粒子數를 g 라 할때 N 는

$$N = p + g \tag{1}$$

로 쓸수 있다.

$$p > g \text{ 때 } m = p - g > 0 \tag{2}$$

로 나타내어지는 m 는 散亂된 파워 (power)가 Doppler 信號를 주는데 가담하는 散亂子들의 전체 유효수이다. N 개 散亂子가 m 를 주기 위해 배열되어 질수 있는 全方法은

$$N! / p!g! \tag{3}$$

로 주어진다. m 에 기인하는 효과적인 信號를 얻는데 가담하는 N 개 散亂子들의 全 확률은⁽¹²⁾

$$P_{N,m} = N! / (p!g!) \left(\frac{1}{2}\right)^p \left(\frac{1}{2}\right)^g \tag{4}$$

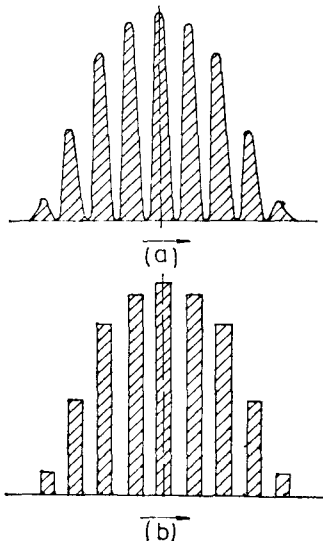


Fig. 1 Comparison of (a) actual and (b) model fringe intensity at the geometric center of a dual beam LDV

로 주어진다. $N \geq 20$ 에서 Stirling 近似式은

$$N! \approx (2\pi N)^{1/2} \left(\frac{N}{e}\right)^N \quad (5)$$

식 (5)로 주어지므로 이를 식 (4)에 대입하면

$$P_{n,m} \approx \frac{1}{\left(1 + \frac{m}{N}\right)^{p+1/2} \left(1 - \frac{m}{N}\right)^{q+1/2}} \left(\frac{2}{\pi N}\right)^{1/2} \quad (6)$$

식 (6)을 얻는다. 식 (6)의 양변에 자연대수를 취하고 $\ln(1 \pm m/N)$ 형을 급수로 2차까지 전개하면

$$P_{n,m} \approx \left(\frac{2}{\pi N}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{m^2}{2N}\right), \quad m \ll N \quad (7)$$

식 (7)을 얻는다. m 와 $m+dm$ 사이에 놓이는 m 의 확률은 $P_{n,m} dm$ 이므로 m 의 평균자승치 $(\bar{m})^2$ 은

$$(\bar{m})^2 = \int_0^\infty m^2 P_{n,m} dm \quad (8)$$

식 (8)로 주어진다. 식 (7)을 식 (8)에 대입하면

$$\bar{m} = \sqrt{N} \quad (9)$$

식 (9)의 관계를 얻을 수 있다. 그러므로 Doppler 信號의 1개 粒子때의 平均強度 I_D^1 과 N 개 粒子때의 平均強度 I_D^N 는 식 (9)에 의해^(1,3)

$$I_D^N = \sqrt{N} I_D^1 \quad (10)$$

식 (10)의 관계로 나타난다. 한편 臺 (pedestal) 成分의 信號에서는 1개 粒子때의 平均強度 I_P^1 와 N 개 粒子때의 平均強度 I_P^N 는 N 배 관계로 주어지므로

$$I_P^N = N I_P^1 \quad (11)$$

으로 주어진다.

식 (10)과 (11)을 可視度의 정의식

$$V = \frac{I_D}{I_P} \quad (12)$$

식 (12)에 대입하므로

$$\bar{V}_N = \frac{1}{\sqrt{N}} \bar{V} \quad (13)$$

식 (13)의 관계식을 얻는다. 여기서 \bar{V} 는 전체 평균된 한 粒子의 可視度이고 \bar{V}_N 는 전체 평균된 N 개 粒子의 可視度이다. Fig. 2는 信號의 合成을 이론적으로 나타낸 그림이다. Fig. 2 (a)는 合成되는 두 信號의 重첩을 보이고 (a')는 合成된 결과의 信號를 나타내며

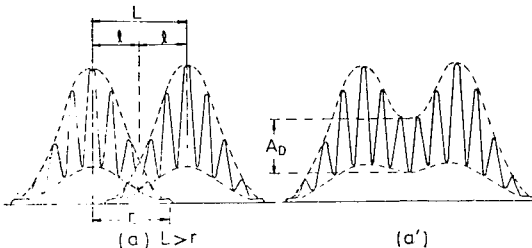


Fig. 2 The resultant combination of two signals

合成 Doppler 信號진폭 A_D 를 重첩되는 두 信號의 中央部에서 볼 수 있다. 同一한 크기의 粒子가 同一한 조건에서 probe volume 中央을 y 軸上으로 연이어 통과할 때 오실로스코프상에서는 上記의 同一한 信號가 연이어 나타난다. 같은 속도와 方向으로 流動하는 두 粒子間의 간격이 작아져 횡단거리 ($\Delta y = 2r$)와 같을 때 오실로스코프상에 나타나는 信號의 양끝이 접촉하게 되고 粒子間隔이 더 작아질수록 이론상 重첩되는 부분은 더 커지고 따라서 그 부분만큼 強度의 合成이 이루어진다. 이때의 信號波는 단순파가 아니고 直流性인 臺의 成分에 交流性인 Doppler 信號波가 실려 있으므로 겹치는 部分의 合成은 단순한 波의 重첩으로 나타나는 合成波보다 복잡하게 나타난다. 두 粒子에 의한 두 信號의 合成中央部の Doppler 信號진폭 A_D 의 크기의 절대값은 다음과 같이 나타내어진다⁽¹⁴⁾.

$$A_D = 2 \left| \left\{ [I_P \pm \beta I_D] \exp\left[-\frac{2l^2}{r^2}\right] - [I_P \mp \beta I_D] \cosh\left(\frac{2l\delta}{r^2}\right) \exp\left[-\frac{2\left(l^2 + \frac{\delta^2}{4}\right)}{r^2}\right] \right\} \right| \quad (14)$$

여기서 $\beta = \pm \cos \pi(n - \Delta) = \mp \cos \pi(n - \Delta \pm 1)$ 이며 n 는 粒子間의 간섭무늬數이고 Δ 는 한쪽 간섭무늬에 대한 두 粒子의 位相差이다. 또 l 는 두 粒子間의 간격 L 의 半이고 δ 는 간섭무늬의 간격이다. Fig. 3에서 L, Δ, δ 의 기하적 관계를 볼 수 있다. r 는 probe

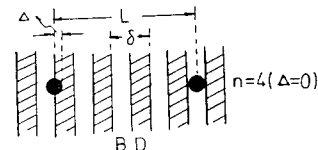
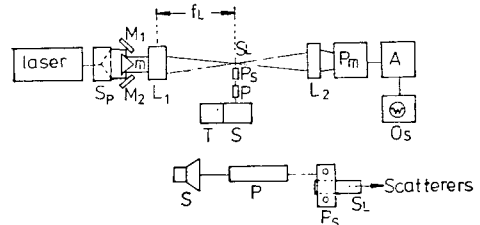


Fig. 3 The phase difference Δ of two particles for one side fringe



- A : Amplifier
- L_1, L_2 : Lens
- M_1, M_2 : Mirror
- m : Rectangular mirror
- O_s : Oscilloscope
- P : Piston
- P_m : PM tube
- P_s : The attachable plate of a cover glass
- S : Speaker
- S_L : Cover glass for scatterers
- O_s : Oscilloscope
- T : Three axial device

Fig. 4 Experimental arrangement

volume 속으로 통과하는 粒子들의 횡단거리인 Δy 의 半이다. 台成分의 최대강도 I_D 와 Doppler 信號진폭의 최대강도 I_b 및 上記의 n, r, δ 가 정해지면 A_b 는 L 과 Δ 만의 함수로 나타내어 진다.

$$\text{즉 } A_b = f_1(L, \Delta) \quad (15)$$

여기서 Doppler 合成信號진폭 A_b 는 $2 I_b$ 로서 式(12)에 의해 $V = f_2(L, \Delta)$ 로 나타내어 질수 있으므로 可視度는 粒子間的 거리 L 과 한쪽 간섭무늬에 대한 두 粒子間的 位相差 Δ 에 의해 결정된다.

3. 實驗裝置 및 方法

Fig. 4는 dual beam LDV의 개략도이다. 15mW Helium-Neon 레이저와 스토리지(storage) 오실로스코프(2090-11)를 사용했다. 流動粒子에 의한 Doppler 信號를 얻기 위해 스피커의 진동을 구동장치로 사용했다. 받침기의 성능에 의한 속도, 진폭의 조절은 용이했으며 30~40Hz에서 信號포착은 간편했다. m 는 직각거울이고 M_1 과 M_2 는 그것에 평행히 놓인 거울이다. M_1 과 M_2 는 레이저로 부터 나오는 광선을 직각거울 m 에 직각으로 반사시키며 m 는 이 반사광선을 入射光線方向에 나란하게 나아가게 한다. probe volume 中央으로 모델을 통과시키기 위해 μm 로 움직이는 3축 장치를 설치하고 여기에 스피커 s 를 부착하였다. p 는 다른 진동을 방지하는 피스톤이며 s_z 은 散亂粒子들을 부착시키는 커버글라스(cover-glass)이다.

粒子는 15.8 μm 의 폴리스틸렌 디비닐벤젠(polystyrene divinyl benzene)球를 사용했다. Fig. 5는 粒子들의 불규칙농음을 보이고 있다. 粒子가 한개에서 35개까지의 13 모델을 만들어 사용했다.

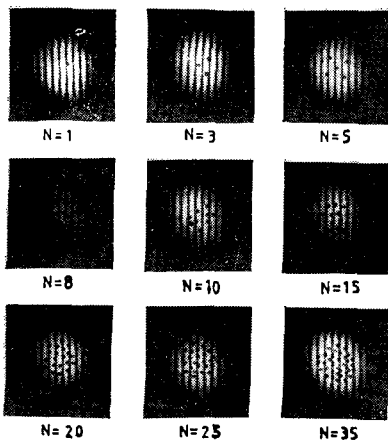


Fig. 5 Irregular arrangements of particles ($D/\delta=0.5$)

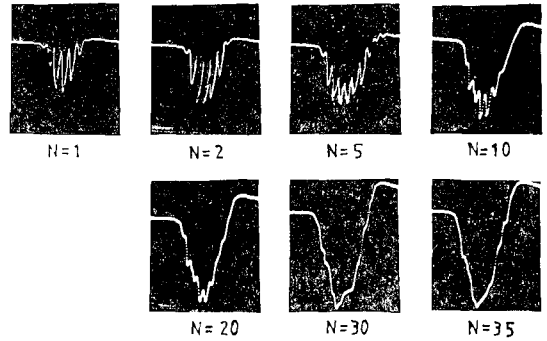


Fig. 6 Signals in the case of $D/\delta=0.3$

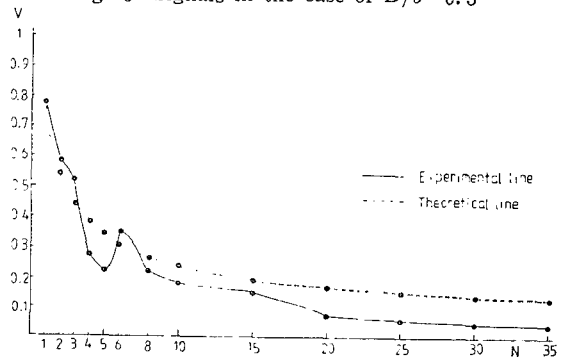


Fig. 7 The relation of V and N in the case of $D/\delta=0.3$

D/δ (D 는 粒子의 직경)가 0.3, 0.5, 1.0, 1.5의 4가지 경우가 되도록 하여 실험하였다. D/δ 의 변화는 δ 의 값을 변경시킴으로 얻었다. 上記직각거울 m 을 레이저 시스템의 일렬선상에서 앞뒤로 번위시키므로 평행한 레이저광선의 간격을 임의로 조절할수 있고 따라서 간섭무늬의 간격 δ 는 필요한 크기로 만들어졌다. 커버글라스위에 粒子들은 놓기위해 4~500배의 현미경을 이용했다. 놓인 粒子들은 30~40Hz의 진동에도 떨어지지 않는 부착력으로 유리판에 붙어 있었다. 모델들을 probe volume 中央으로 통과시키기 위해 magnifier optics를 통하여 粒子들의 位置를 확인한 후에 스피커를

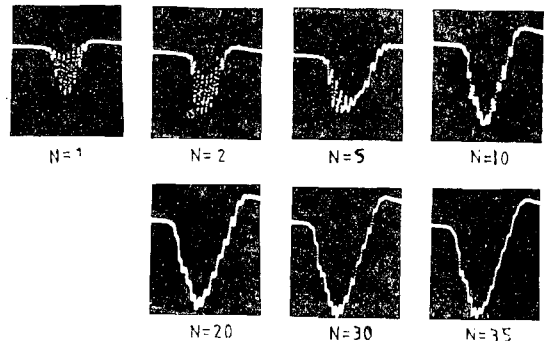


Fig. 8 Signals in the case of $D/\delta=0.5$

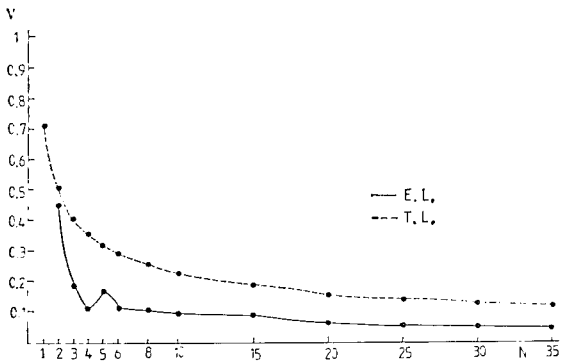


Fig. 9 The relation of V and N in the case of $D/\delta=0.5$

진동시켰다.

流動粒子들에 의한 散亂光은 PM 管을 통해 전기적 信號로 바뀌고 이 信號가 오실로스코프상에 信號波로 나타내어진다.

4. 結果 및 考察

Fig. 6은 $D/\delta=0.3$ 일때 모델들이 probe volume 中央을 횡단하므로 오실로스코프상에 나타난 信號사진의

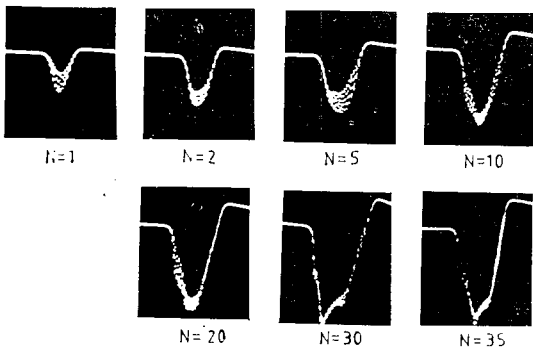


Fig. 10 Signals in the case of $D/\delta=1.0$

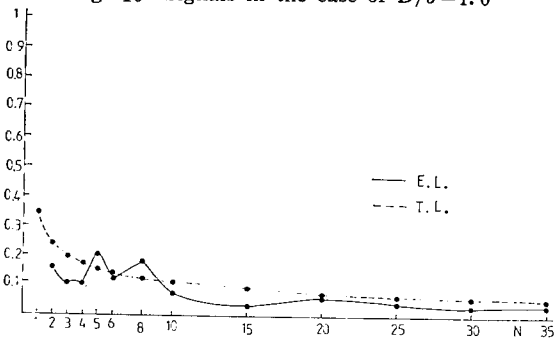


Fig. 11 The relation of V and N in the case of $D/\delta=1$

일부이다. 粒子의 數가 많을 수록 散亂強度는 물론 커지나 Doppler 信號合成진폭 A_b 는 작게 나타나고 있다 Fig. 7은 Fig. 6에 나타난 信號들에 의한 粒子數와 可視度와의 관계를 나타낸 그래프로서 이론치와 비교하고 있다.

粒子數가 적은 $N < 10$ 의 경우에는 可視度の 증감 변화가 크게 나타났으며 $10 < N < 20$ 에서는 비교적 변화가 작아지고 $N \geq 20$ 에서는 이론치와 可視度크기의 차이는 있으나 변화감소율은 비슷하게 나타나고 있다. Fig. 8은 $D/\delta=0.5$ 일때의 粒子數의 증가에 따라 나타난 信號로서 간섭무늬 수는 $D/\delta=0.3$ 보다 많아졌음을 볼수 있다. 역시 粒子數가 많을 수록 強度는 커지나 A_b 는 작아지고 있다. Fig. 9는 그 그래프로서 이것 역시 上記와 같이 $N < 10$ 에서는 可視度の 증감의 변화가 크게 나타났고 $N \geq 20$ 에서는 可視度の 크기의 차이는 있으나 이론곡선과 비슷한 감소율을 나타내고 있다. Fig. 10은 $D/\delta=1.0$ 즉 粒子의 직경이 간섭무늬의 간격과 같을 때 나타난 信號로서 $D/\delta=0.5$ 에 비해 Doppler 진폭 A_b 은 작게 나타나고 간섭무늬의 수는 많이 나타남을 볼수 있다. 이것 역시 上記의 경우와 같이 粒子數가 많을 수록 強度는 커지나 A_b 는 작아지고 있음을 볼 수 있다. Fig. 11은 그 결과 그래프로서

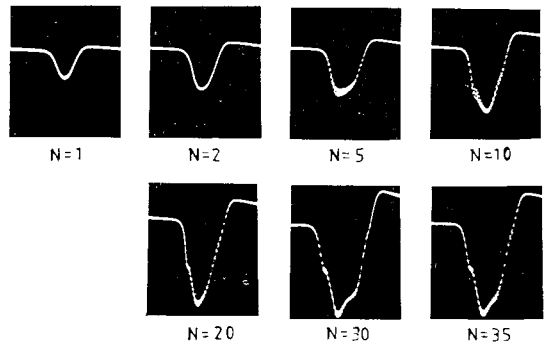


Fig. 12 Signals in the case of $D/\delta=1.5$

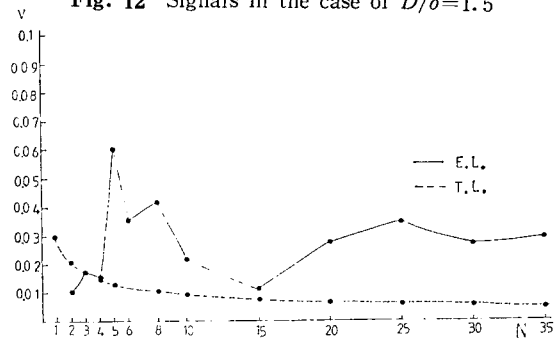


Fig. 13 The relation of V and N in the case of $D/\delta=1.5$

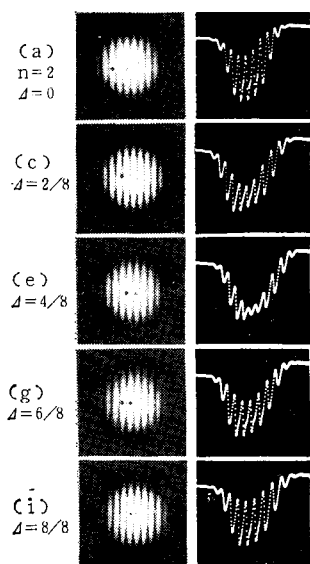


Fig. 14 Consecutive changes of A_D in the signal resultant combination in the case of $n=2$, $\Delta=0\sim 1(8/8)$. ($L\leq r/2$)

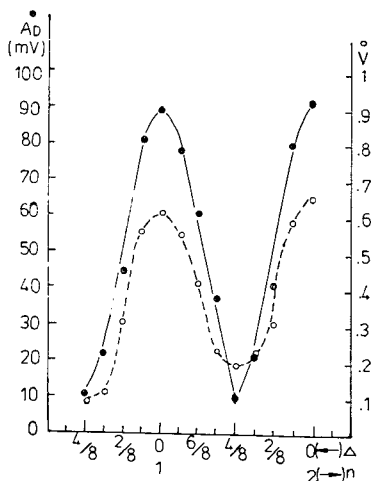


Fig. 15 The relation of A_D and V vs. the phase difference Δ for one side fringe in the case of $n=2$, $\Delta=0\sim 1(8/8)$
 $n=1$, $\Delta=0\sim 4/8$

$N < 10$ 에서는 上記의 두 경우와 같이 가시도 변화의 증감이 크게 나타났으며 可視度の 크기 값은 비교적 차가 적게 나타났다. Fig. 12는 $D/\delta=1.5$ 일때 즉 粒子의 크기가 간섭무늬의 간격보다 큰 때 나타난 信號로서 粒子數가 많아 질에 따라 強度는 역시 커지고 있으나 A_D 는 대단히 작게 나타나고 있으며 $N=5$ 일 때는 A_D 가 좀 커지는 등 上記의 3가지 경우와는 상이

한 난조현상을 보이고 있다. Fig. 13은 그 결과 그래프로서 粒子數에 따른 可視度の 변화가 이론치와는 전혀 일치하지 않는 현상을 나타내고 있다. 이것은 散亂粒子가 간섭무늬의 간격에 비해 작아야 한다는 근본가정의 한계를 크게 벗어났기 때문으로 후방산란등 요인에 의한것으로 해석된다.

Fig. 14는 Fig. 2의 이론도에서 나타낸 바와 같이 두 粒子에 의한 信號의 合成을 연속적으로 나타낸 사진의 일부로서 粒子間隔 L 이 횡단거리 Δy 의 半인 r 보다 작은 $L\leq r/2$ 인 경우이다. 이 때에는 合成強度가 최대강도로 나타나므로 合成可視度が 算定되어 질수 있다. 두 粒子에 의한 두 信號의 中央접촉부의 合成 Doppler와 信號진폭의 크기는 前述한 式(14)에 의해 나타나어 질수 있으며 또한 式(15)에 의해 간섭무늬에 대한 두 粒子間의 位相差 Δ 에 의존함을 알 수 있다.

Fig. 15는 Fig. 14에 의해 나타내어진 그래프로서 粒子間의 간섭무늬 數와 한쪽 간섭무늬에 대한 두 粒子間의 位相差 Δ 에 대한 A_D 의 변화관계를 보이고 있다. A_D 는 $\Delta=0, 1$ 때 최대로 나타나고 $\Delta=1/2$ 때 최소로 나타나고 있다. A_D 에 의해 결정되는 可視度 또한 $\Delta=0, 1$ 때 최대로 되고 $\Delta=1/2$ 때 최소로 나타나며 최대와 최소는 많은 차이를 나타내고 있다. 前述한 Fig. 6~11에서 粒子數가 적을 때 ($N < 10$) 可視度の 증감의 변화가 크게 나타났는데 이것은 粒子數가 적을수록 간섭무늬에 대한 粒子들의 位相差 Δ 가 合成 Doppler 信號진폭 A_D 와 可視도에 더욱 많은 영향을 끼침을 알 수 있다. Fig. 16은 上述한 D/δ 의 네가지 경우 즉 $D/\delta=0.3, 0.5, 1.0, 1.5$ 경우를 동시에 비교하여 나타낸 그래프로서 D/δ 의 값이 클수록 밝은 부분에서 散亂되는 光이 많아 可視度の 값이 이론치와 같이 작아짐을 볼 수 있다. 粒子數가 적을 경우 ($N < 10$) 可視度の 증감의 변화가 크게 나타나는 데 비해 粒子數가 많은

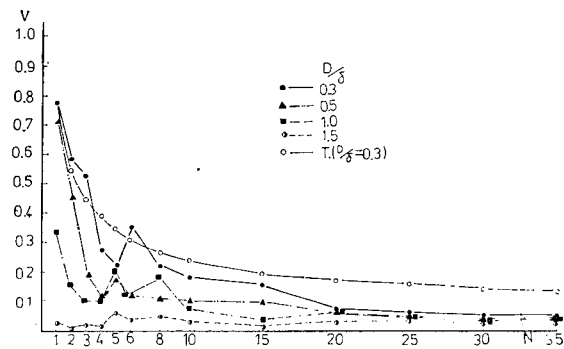


Fig. 16 Comparison of 4 cases (i.e., $D/\delta=0.3, 0.5, 1, 1.5$)

경우 ($N \geq 20$) 可視度の 감소 변화 곡선이 可視度값이 1~0.5 사이에 모여져 나타나고 있음을 볼수 있다. 이것은 上述한 바와같이 粒子가 많을 수록 粒子들의 간섭무늬에 대한 확률적 고른 분포로 位相差의 영향이 감소되기 때문으로 해석된다. 上記에서 언급한 바와같이 粒子數에 따른 可視度の 변화감소율은 이론치에 비슷하게 주어지는데 비해 可視度の 크기에 대한 차이가 나타났음은 粒子들이 y 대상에서 떨어져 분포한 粒子들에 의한 원인도 있겠으나 확률적 이론에 의해 제한적 조건에서 유도된 數密度公式에 대한 더욱 정확한 검토와 실제적인 보정이 요망된다.

5. 結 論

Probe volume 을 통과하는 流動散亂粒子의 數가 dual beam LDV 의 信號特性에 미치는 영향은 다음과 같다.

(1) 粒子數가 많을 수록 強度는 커지나 Deppler 信號진폭은 작아지고 있다.

(2) D/δ 의 값이 클수록 可視度は 작아지나 이론적 한계를 벗어날 경우(예 : $D/\delta=1.5$)는 이론치와는 관계가 먼 현상을 나타낸다.

(3) 粒子數가 적은 경우에는 간섭무늬에 대한 粒子間의 位相差의 영향을 많이 받아 可視度の 증감의 변화폭이 크게 나타난다.

(4) 粒子數가 많은 경우에는 位相差에 대한 영향이 작아지므로 可視度の 감소변화율은 이론치에 근사하게 나타났으며 D/δ 의 변화에 관계없이 수렴적 현상을 보이고 있다.

參 考 文 獻

- (1) W.M. Farmer, "Measurement of Particle Size, Number Density and Velocity using a Laser Interferometer", Applied Optics, Vol. 11, No. 11, pp. 2603~2612, 1972
- (2) W.M. Farmer, "Observation of large Particles with a Laser Interferometer", Applied Optics, Vol. 13, No. 3, pp. 610~622, March 1974
- (3) W.M. Farmer, "The Interferometric Observation of Dynamic Particle Size, Velocity and Number Density", Ph. D. Thesis, U. Tennessee, 1973
- (4) F. Durst, Z. Angew. Math Phys. 24, 619, 1973
- (5) D.M. Robinson and W.P. Chu, "Diffraction Analysis of Doppler Signal Characteristics for a Cross-Beam Laser Doppler Velocimeter", Applied Optics, Vol. 14, No. 9, pp. 2177~2183, 1975
- (6) W.P. Chu and D.M. Robinson, "Scattering from a Moving Spherical Particle by Two Crossed Coherent Plane Waves", Applied Optics, Vol. 16, No. 3, pp. 619~626, 1977
- (7) R.J. Adrian and K.L. Orloff, "Laser Anemometer Signals: Visibility Characteristics and Application to Particle Sizing", Applied Optics, Vol. 16, No. 3, pp. 677~684, 1977
- (8) D.W. Roberds, "Particle Sizing using Laser Interferometry", Applied Optics, Vol. 16, No. 3, pp. 619~626, 1977
- (9) F. Durst and W.H. Stevenson, "Influence of Gaussian Beam Properties on Laser Doppler Signals", Applied Optics, Vol. 18, No. 4, pp. 516~524, 1979
- (10) F. Durst and M. Zäre, Proceedings of the LDA Sympo. Copenhagen, 403, 1975
- (11) F. Durst, "Review-Combined Measurements of Particle Velocities, Size Distribution, and concentrations", Trans. of the ASME, Vol. 104, pp. 284~296, 1982
- (12) W.M. Farmer and D.B. Brayton, "Analysis of Atmospheric Laser Doppler Velocimeters", Applied Optics, Vol. 10, No. pp. 2319~2324, 1971
- (13) 李起白, 朱恩選, 權永吉, "Dual-Beam LDV 의 Probe Volume 의 構造에 關한 研究", 大韓機械學會論文集, 第8卷, 第4號, pp. 343~350, 1984
- (14) 李起白, 朱恩選, 權永吉, "Dual Beam LDV 의 信號合成에 關한 研究", 한국물리학회, "새물리" Vol. 24, No. 4, December 1984