

# 회전판을 이용한 레이저 도플러 유속계 측정체적 내의 줄무늬 간격 측정

## Fringe Divergence Measurement in the Measuring Volume of a Laser Doppler Anemometer Using a Rotating Wheel

\*전세종<sup>1</sup>, 강웅<sup>1</sup>, #최용문<sup>1</sup>

\*S. Chun<sup>1</sup>, W. Kang<sup>1</sup>, #Y. M. Choi (ymchoi@kriss.re.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국표준과학연구원 기반표준본부 유동음향센터

Key words : Anemometer Calibration, Fringe Divergence, Laser Doppler Anemometer, Rotating Wheel

### 1. 서론

기체유속 표준의 소급체계(traceability chain)를 유지하기 위해서는 레이저 도플러 유속계(laser Doppler anemometer, LDA)를 기준 유속계로 하는 소급체계가 필요하다. LDA 에 사용되는 레이저 빔을 평행 빔으로 가정하면, 두 레이저 빔이 교차하여 생성되는 측정체적 내의 줄무늬 간격은 일정하다. 그러나, 실제로 사용되는 레이저 빔은 가우스 빔으로서, 측정체적 내의 줄무늬 간격은 일정하지 않다. 따라서, 이상적인 가정을 전제로 한 유속 측정이론과는 달리, LDA 에서 측정되는 유속은 줄무늬 간격의 변화에 의해 정확도와 불확도가 결정된다.

LDA 를 이용한 유속 측정에 가장 큰 영향을 끼치는 불확도 요소로는 레이저 빔 교차각도와 줄무늬 간격을 들 수 있으며, 이 중 줄무늬 간격에 의한 불확도 기여도는 전체 LDA 유속측정 불확도 중에서 약 20 %를 차지한다. 그러므로, LDA 측정체적 내의 줄무늬 간격의 변화율을 고려하여 불확도를 계산하면, LDA 유속측정 불확도를 더 정확하게 산출할 수 있다.

본 연구에서는 기체유속 표준의 소급체계 유지를 위해 도입된 LDA 의 줄무늬 간격을 측정하였고, 줄무늬 간격에 대한 이론식과 비교함으로써, LDA 의 줄무늬 간격이 이상적인 조건에 부합하는지를 살펴보았다. 레이저 빔의 진행 방향을 따라, LDA 프로브에서 측정된 도플러 신호의 수집 속도를 바탕으로 가중

계수를 구해서 줄무늬 간격에 의한 LDA 불확도 요소를 더 정확하게 측정할 수 있는 방법을 제시했다.

### 2. 본론

회전판을 이용하여 LDA(BSA F60, Dantec) 와 LDA 프로브(60X41, Dantec)로 형성된 측정체적 내의 줄무늬 간격을 측정했다. 회전판은 직경 199.65 mm, 확장 불확도 14.1  $\mu\text{m}$  ( $k = 2.78$ )인 광학 유리로 제작되었고, 커플링으로 AC 서보모터(HF-KP73, Mitsubishi)에 연결되어 (200 ~ 3,000) rpm 의 회전속도로 일정하게 회전하였다. 회전속도의 확장 불확도는 0.02 % ( $k = 1.98$ ) 이내였다. Fig. 1 에 나타낸 것처럼, 회전판과 LDA 프로브에는 3 축 이송장치와 마이크로 미터를 설치하였고, LDA 프로브의 측정체적을 회전판 옆면에 위치 시켰다. 이 때, 회전판의 위치와 LDA 프로브의 설치 각도를 조절하였고, 회전판의 회전축과 LDA 프로브의 중심축이 동일선상에 놓이도록 했다. 수평면에 대한 LDA 프로브의 설치 각도는 0.04° 이내가 되도록 조절했다.

회전판 속도가 200 rpm 과 2,000 rpm 의 두 가지 경우에 대해 실험했고, 이 때 회전판 옆면의 속도는 약 2.1 m/s 와 20.9 m/s 로 계산되었다. 이 때 측정된 LDA 속도 분포는 2 차 곡선의 모양을 나타냈고, 회전속도가 200 rpm 일 때 (2.089 ~ 2.092) m/s, 2,000 rpm 일 때 (20.86 ~ 20.91) m/s 였다.

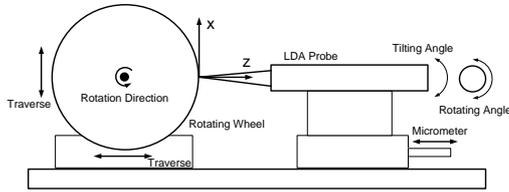


Fig. 1 Schematic diagram of LDA calibration

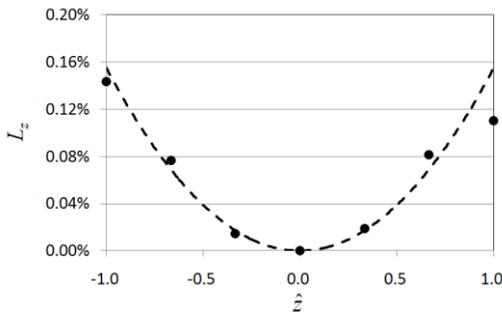


Fig. 2 Fringe divergence distribution in the measurement volume of a LDA probe (rotating speed = 200 rpm)

레이저 빔을 가우스 빔으로 가정하고, 레이저 빔 허리가 측정체적의 중심에 위치한 상태에 대한, LDA 줄무늬 간격의 변화율을 나타내면 다음 식과 같다.

$$L_z = \hat{z}^2 (\cos(\theta/2))^4 \left(\frac{d}{L}\right)^2 \quad (1)$$

단,  $L_z$  는 줄무늬 간격의 변화율,  $\hat{z}$  는 [-1, 1]로 무차원화된  $z$  축 방향 좌표 (Fig. 1),  $\theta$  는 두 레이저 빔의 교차각도 (5.44°),  $d$  는 전달렌즈 (transmitting lens)를 통과하기 전의 레이저 빔의 직경 mm,  $L$  은 전달렌즈를 통과하기 전의 두 레이저 빔의 거리 (38 mm) 이다.

Fig. 2 에 측정된  $L_z$  와 식 (1)에 의해 계산된 결과를 점(solid circle)과 점선(dotted line)으로 각각 나타냈다. 이 때,  $d$  는 회전속도 200 rpm 일 때, 1.5 mm 를 가정한 다음, 커브피팅하여 구했다. 실험 결과로부터 줄무늬 간격은 두 레이저 빔의 허리가 LDA 측정체적의 중심에 위치되는 이상적인 LDA 셋팅을 나타냄을 알 수 있었다.

줄무늬 간격 변화율을 고려하여 LDA 측정 불확도를 계산하기 위해서는  $z$  축 방향의 위치에 따라 가중 계수(weighting factor)를 곱하여 평균을 구해야 한다. 본 연구에서는

Table 1 Comparison of averaged velocity by LDA

Rotating speed [rpm]	200	2,000
Average [m/s]	2.0907	20.8885
	0.030 %	0.022 %
Weighted average [m/s]	2.0903	20.8818
	0.025 %	0.021 %

샘플 수집 속도 (sampling rate)를 기준으로 가중 계수를 계산했다.

Table 1 에 나타난 결과로부터, 가중 계수를 고려한 속도 측정에 대한 정확도는 가중 계수를 고려하지 않은 경우와 크게 차이가 없었다. 그러나, 줄무늬 간격에 의한 표준 불확도 성분에 있어서는 회전속도 200 rpm 일 때 0.030 % 에서 0.025 % 로 감소하여 약 17.4% 의 불확도 향상 효과가 나타났고, 2,000 rpm 일 때는 0.022 % 에서 0.021 % 로 감소하여 약 4.1 % 의 불확도 향상 효과가 나타났다. 따라서, 측정체적 내의 줄무늬 간격을 고려하여 평균 속도와 표준 불확도를 계산하면, 평균 속도에 있어서는 큰 차이가 발견되지 않았으나, 표준 불확도에 있어서는 향상 효과가 나타남을 알 수 있었다.

### 참고문헌

1. Yeh, T. T., and Hall, J. M., "Uncertainty of NIST Airspeed Calibrations," Technical document of Fluid Flow Group of NIST, 2008
2. ITTC, "Recommended Procedures and Guidelines: Uncertainty Analysis - Laser Doppler Velocimetry Calibration," International Towing Tank Conference, 7.5-01-03-02, 2008
3. Miles, P. C., "Geometry of the Fringe Field Formed in the Intersection of Two Gaussian Beams," Applied Optics, **35**, 5887-5985, 1996
4. Terao, Y., van der Beek, M., Yeh, T. T., and Müller, H., "Final Report on the CIPM Air Speed Key Comparison (CCM.FF-K3)," Metrologia, **44**, 07009, 2007
5. Dantec Dynamics, "Calibrated LDA Probes," (<http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=693>)