

3D PIV 기법을 이용한 선회유동의 급팽창에 관한 실험적 연구

장태현† · 길상철*

(원고접수일 : 2008년 12월 1일, 원고수정일 : 2009년 3월 10일, 심사완료일 : 2009년 3월 31일)

An Experimental Study on Swirling Flow in a Sudden Expansion Tube using 3D PIV Technique

Tae-Hyun Chang† and Sang-Cheol Kil*

Abstract : The effect of swirl on the flow characteristics in a sudden expansion tube was examined experimentally by using 3D PIV (particle image velocimetry) to capture the velocity profiles. The swirling flow of water through a sudden 1:2 axisymmetric expansion has previously been studied experimentally within a horizontal round tube. A kind of tangential slot is used as a swirl generator for swirling flow and a honey comb is used for without swirl flow. The work with the swirl and without swirl results are compared to each other at the same Reynolds number. **Liquid crystal was employed to measure temperature profiles and heating coil used for heat transfer with and without swirl flow. And then the Nusselt number ratios (Nu/Nu_{db}) are calculated along the test section.**

Key words : PIV (입자영상유속계), Swirling flow (선회유동), Flow sudden expansion (유동 급팽창),

1. 서 론

과거 반세기 동안 선회유동 (swirling flow) 은 공학적이거나 기술적인 유동의 특성 때문에 많은 연구의 대상이 되어왔고, 산업현장에서 각종 열교환기에 이용되어왔다.

1948년 경 Boelter 등^[1]은 관로 내에서, 박리되고 재부착된 공기유동의 열전달 계수에 관하여 실험적 연구 결과가 재 부착 부근에서 최대 열전달 계수는 충분히 발달된 유동에서의 값의 약 4배임을

보고하였다.

에너지의 효율적인 사용이 날로 강조되고 있는 현 시점에서, 선회유동이 각종 열교환기에서 열전달 계수를 증가시키고, 많은 연소장치에서 안정적인 연소를 기할 수 있다는 장점으로 이 분야에 대한 연구가 활발하게 진행되어왔다.

Dellenback 등^[2], Habib와 McEligot^[3] 그리고 Sultanian^[4]은 선회 유동의 급팽창을 통한 유동장의 계측과 함께 열전달 특성을 수치해석적 및 실험적으로 연구였다.

† 교신저자 (한국과학기술정보연구원 전문연구위원, E-mail : changtae@kyungnam.ac.kr, Tel: 055)246-1279)

* 한국과학기술정보연구원 유망기술분석팀

근래에 와서, 감온성 액정(TLC, Thermo-sensitive liquid crystal)을 이용하여 온도장을 측정하는 기술이 개발되어, Kimura^[5], Doh^[6] 그리고 Lee 등^[7]은 이 기법을 사용하여 열유체 유동에서 온도 및 작동물질의 해석에 활용하였다. 또한, Dabiri 등^[8]은 hue 값을 캘리브레이션의 변수로 사용하는 것을 제안하였다. hue 캘리브레이션 기술은 Kobayashi 등^[9], Ozawa 등^[10] 그리고

Nozaki 등^[11]에 의해 온도장 해석에 적용하였고, 다른 연구 방법으로 Kimura 등^[5]과 Fujisawa 등^[12]은 R, G, B와 H. S. I를 신경망의 입력 값으로 사용하여 온도를 계산하였다.

강제대류에 관한 연구로는 Wiezbowski 등^[13]은 핀 튜브형 열 교환기 모델을 이용하여 대류열전달 계수와 Nusselt 수를 구하였다. 이와 같은 연구들은 대부분이 자연 대류열전달 상태에서 온도와 작

Table 1 Overview of experimental studies axisymmetric sudden expansion swirl flow

Author	EX.	Step height	ReD.	Swirl method	Swirl number	EXP. technique
Yang and Yu (1983)	2.7	44 (mm)	64000	-	0	LDA
Hallett and Gunther(1984)	2.7	-	67000	Swirl chamber	1.1-2.06	HWA, Smoke Infrared gas
Khezzar et al (1984)	1.75	18	120, 1000	-	-	LDA
Hallett and Toewg(1987)	1.25 1.63	varied	1-1.6x 10 ⁴	Tangential Swirler	.3-0.66	Five holes pitot tube
Durrett et al (1988)	1.9	22.7	8.4x10 ⁴	-	0	LDA
Drllenback et al	1.94	23.86	30,000,60,000,100,000	Tangential entry	0-1.23	LDA
Sommerfeld and Qiu(1991)	2.8	62	52400	Radial Swirler	0.47	PDPA
Nejad and Ahmed(1992)	1.5	25.4	-	Vortex Swirler	0, 0.4	LDA
Dwvenport and Sutton(1993)	1.88	35	80000	-	0	PWA, HWA
Ahmed(1998)	1.5	25.4	1.3x10 ⁵	Vortex Swirler	0.04	LDA
Cole and Glauser(1998)	3.0	76.2	40,000	-	0	HWA
Khezza(1998)	1.82	-	15000	Radial Swirler	1.5	LDA
Hammad et al (1999)	2.0	6.35	20,110,210	-	0	PIV
Zhou et al (2000)	2.0	32	47600	Tangential Entry	1.0,1.5, 2.1	PDPA
Furuichi et al (2003)	1.8	10	500-15000	-	0	UVP
Wang et al (2004)	1.94	23.8	10000-20000	Guide vanes	0, 0.33, 0.43	LDA
Tney et al (2006)	3	76	54000	-	0	FHWA
Femandes et al (2006)	2.8	30	3.5-.8x 10 ⁴	Variable angle blade	0.5-1.5	LDA, visualization Pressure
Mak et al (2007)	2.5	30	10000	Guide Vanes	0.65	2D PIV
Chang T. H. (2008)	2.0	20	1500	Tangential Entry	0.6	3D PIV

동물질 쌍장에 관한 연구들이었다. Table 1에서와 같이 선회유동의 급팽창을 테스트 튜브의 팽창비, 튜브 직경, Reynolds 수, 선회유동 발생 방법, 선회 수(swirl number) 그리고 사용된 계측기 등을 지난 20년 간에 걸쳐 조사하였고, Mak 등^[19]의 결과를 참고하였다. 특이한 것은 대부분은 열선풍속계, LDA 그리고 PDPA(phase Doppler Particle Analyzer)를 사용하고 있다.

입자영상기의 경우는 1999년 Hammad 등에 의해서 처음 선회강도 "0"에서 사용되었다. 이 연구는 선회 발생기법이 명확하지 않고, Reynolds 수가 20, 110 그리고 210인 경우다. 2007년도에 Mak 등^[19]은 2D PIV기법을 사용하여 Reynolds 수 10,000에서 선회 유동을 계측하였다. 최근, Chang^[20]은 3D PIV 기법을 사용하여 팽창비 2.0에서 속도 분포를 계측하였다.

상기의 저자들의 연구 결과는 한 점에서 점측정이 많았다. 따라서 작동물질 쌍이나, 온도의 계측 시 많은 시간이 소요되고 연속적인 측정이 되지 못했다. 본 연구에서는 입자영상 유속계(PIV, particle image velocimetry)를 사용하여 3차원으로 속도를 계측하였고, 열전달의 경우는 액정(liquid crystal)을 사용하여 한 영역에서 온도분포를 계측하였다. 그러나 온도 계측의 경우는 아직 Nusselt 수를 계산하기에는 어려움이 있었, 공기에서 균일 가열 기법(uniform heating method)을 이용한 점 측정 기법을 사용하였다. 이와 같은 두 가지의 결과로부터 상호 비교함으로써 열교환기나 연소장치 등의 설계에 기여하고자 한다.

2. 실험 장치

Fig. 1에서 실험장치의 상세도를 나타내고 있다. 실험장치의 전체의 길이는 약 1330mm이고, 테스트 튜브의 입구직경은 20mm, 확대부의 직경은 40mm이로 확대비가 2.0이다. 그 길이는 각각 325mm 그리고 1005mm이고, 실험장치의 전체의 재료는 투명 아크릴을 사용하였다. 실험실 내에 압실을 만들어 실험 장치를 설치하고, 항온조를 80mm 정도 높게 설치함으로써 액정이 포함된 온

수의 순환을 증가시켰다.

또한, 테스트 튜브의 끝 연결부 양단에는 두께 5mm의 스테인리스 후랜지를 부착하였다. 선회 챔버의 전체 길이는 205mm이고 재료는 투명 아크릴을 사용하였다.

선회를 발생시키는 부위의 직경은 50mm이고, 길이는 152mm로 아크릴을 사용하여 제작하였고, 특히, 선회를 발생시키기 위하여 원주를 따라 45도 간격으로 3mm 직경의 구멍을 관외부에서 내부로 접선방향을 따라 가공하였다. 이와 같이 접선 방향을 따라 유입된 액정을 포함한 온수는 테스트 튜브 입구 단면으로 유입되어 확대 관으로 유동되도록 제작하였다.

본 선회발생기는 선회 챔버(swirl chamber)내에서 이동할 수 있도록 설계하였다. 즉, 선회발생기를 이동함으로써 테스트 튜브 내에서 선회강도를 조절할 수 있었다.

그러나 비 선회를 이용한 실험인 경우는 선회발생기를 제거하고 테스트 튜브입구에 직경이 작은 허니컴을 사용하였다.

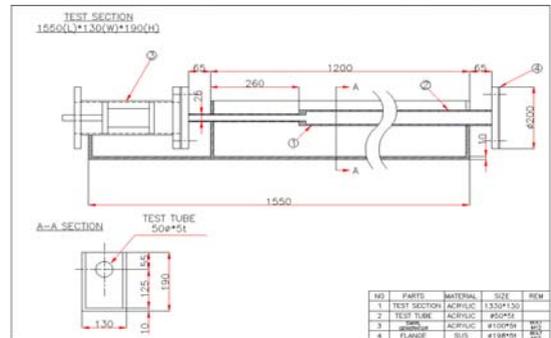


Fig. 1 Schematic diagram of experiment apparatus

2.1 PIV(Particle Image Velocimetry) 시스템

실험 장치는 테스트 튜브, 항온수 순환장치, CCD 디지털 카메라, 백색등, 열전대, 레이저 그리고 컴퓨터로 구성된다. 실험 부는 20mm 관에서 40mm로 급팽창되게 설계되었고, 레이저와 백색광의 굴절을 막기 위하여 테스트 튜브 외부에 수조(120mm^b×200 mm^h×1300 mm^l)를 설치하였다. 실험부의 영상 획득을 위해 투명아크릴로 제작되었

으며 반사광에 의한 해상도의 손실을 막기 위해 영상 획득 부분을 제외한 실험부의 촬영전면에 검정색 종이를 부착하였다.

Fig. 2는 본 논문에 사용된 실험 장치와 3D PIV 시스템 혹은 백색광 및 계측장치를 나타낸 실험장치의 사진을 제시하였다. 광원으로는 레이저 (2W)와 일본의 스가와라사의 모델 DSX-240Bc의 백색광원(Stroboscope, 60W) 2대와 광원이 송 프롭(Probe) 및 PIV 드라이버 1대, 유동장의 획득을 위해서 1초에 30장의 이미지를 획득할 수 있는 쇼니사의 CCD 카메라 2대와 이미지 그래픽이 사용되었다.

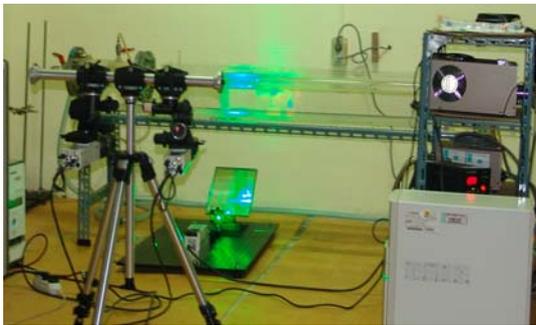


Fig. 2 Experiment rig and 3D PIV system

입자영상유속계를 이용한 실험과 액정을 이용한 실험은 상온 15°C에서 실행하였다. 입자영상유속계의 경우, 입자는 나일론을 사용하였고 입자의 크기는 120 μm 이고 순수를 사용하였다. 실험전 두대의 카메라를 제작된 검정 표적을 이용하여 검정하였다. 액정을 이용한 실험은 미국의 Hallcrest Inc. 사의 재품을 사용하였다. 검정선도(calibration chart)는 액정의 온도 30°C ~ 40°C사이에서 매 1°C 간격으로 액정온도와 참고온도(열전대 온도)를 계측하여 작성하였고, 그 결과를 온도 계산에 사용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 속도 분포

Fig. 3은 선회 유동의 속도 벡터를 나타낸다. 재

순환 영역 근처에서 재순환되는 벡터 분포와 전체적으로 심한 혼합 현상을 볼 수 있다.

Fig. 4는 이들 벡터로부터 계산한 비 선회 유동의 축방향 속도를 나타낸다. X=-6 근처에서 축방향 속도는 급속하게 증가하는 현상을 나타내고 있고, 그 후 테스트 튜브를 따라 점차적으로 감소하는 현상을 보이고 있다. 특히, 부의 속도를 나타내는 것은 재순환 영역에 관계된 것으로 생각된다.

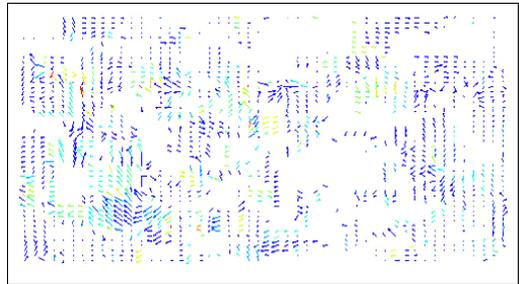


Fig. 3 Velocity vector profiles with swirl along the test section.

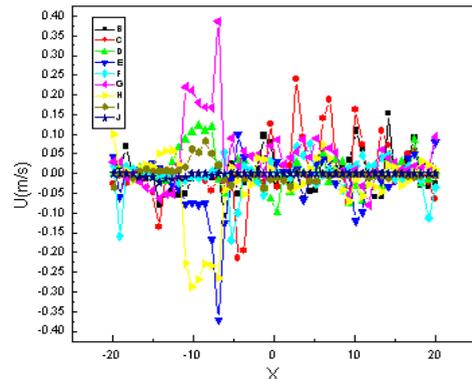


Fig. 4 Axial velocity without swirl along the test section

Fig. 5는 접선방향 속도로, X=-6 근처에서 팽창하여 테스트 튜브를 따라 점차적으로 소멸하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6은 선회 팽창의 축 방향 속도를 나타낸다. 이 속도 분포는 X=20 근처에서 팽창하는 것을 볼 수 있다. 그러나 X=-10~20 사이에서 부의 속도 분포를 볼 수 있다. 이것은 재순환 영역 내에서 유입되는 입자에 의한 결과로 생각된다. 또한, 선회 유동의 특성에 관계된 것으로 보인다.

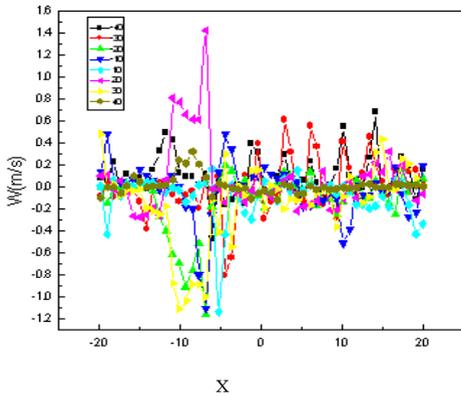


Fig. 5 Tangential velocity without swirl along the test section

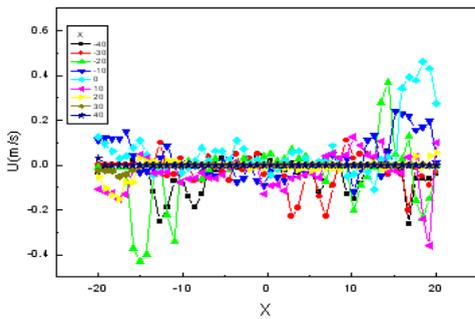


Fig. 6 Axial velocity with swirl along the test section

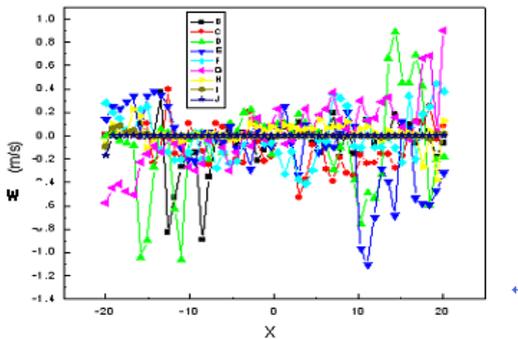


Fig. 7 Tangential velocity with swirl along the test section

Fig. 7은 선회유동이 급 팽창시의 접선방향 속도를 나타낸다. 축 방향 속도와 유사하게 X= 20 근처에서 팽창하는 것을 볼 수 있다. 또한, X= -6

근처에 접선 방향 속도 분포를 볼 수 있다. 이것은 위에서와 같이 재순환 영역에서 입자의 유입으로 생각된다. 이 네 개의 결과로부터 특이한 것은 비선회의 경우는 X=-6 부근에서 유동이 팽창하고 있지만, 선회의 경우는 X=20 부근에서 급팽창하는 것을 볼 수 있다. 이 현상은 선회유동의 경우 유동의 회전으로 인하여 팽창이 늦어지는 것으로 생각 되고, 또한, 팽창 시간이 비선회 보다 선회 유동이 길어진다는 것을 알 수 있다.

즉, 재순환 영역에서 선회 팽창의 경우, 축 방향 속도와 접선 방향 속도의 출현은 선회 유동에서 입자가 재순환 영역으로 유입되는 것으로 접선방향 속도에 기인되는 것으로 생각된다.

3.2 온도 계측

온도 계측은 같은 실험 장치에서 한 대의 칼라 카메라를 사용하여 액정의 온도 분포를 계측하였다. Fig. 8은 각 온도, 34.5℃, 36.5℃ 그리고 37.5℃에서 액정의 색깔을 촬영한 것이다. 이 결과들로부터 검정 선도(calibration chart)를 만들어 실험을 시작하였고, 각 온도에서 온도 분포를 계산하였다. 온도 34.5℃에서 액정은 적색을 나타내었고, 36.5℃에서 녹색 그리고 37.5℃에서 청색이 시작되었다.

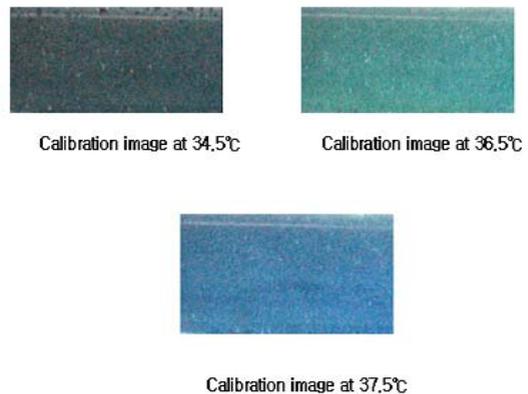


Fig. 8 Calibration images for 34.5℃ ~ 37.5℃

Fig. 9는 36.0℃에서 테스트 튜브를 따라 온도 분포를 계측한 결과이다. 예측한 결과와 같이 벽 근

처에서는 저온을 나타내었고 튜브의 중심부에서는 고온을 보였다.

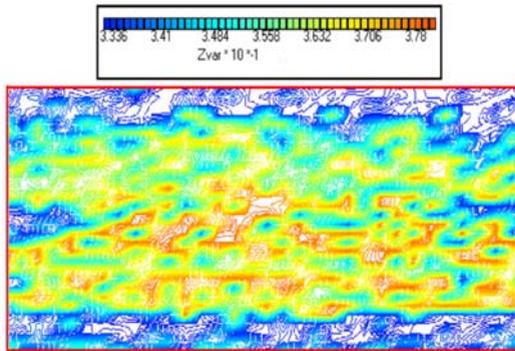


Fig. 9 Mean temperature distribution along the test tube using R. G. B. at 36.0°C without swirl

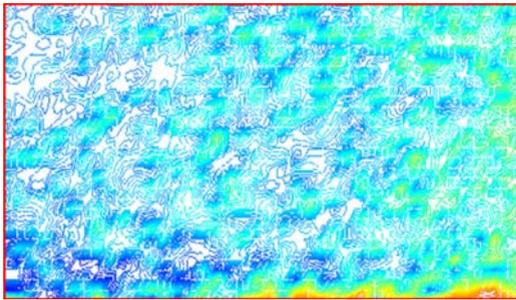


Fig. 10 Mean temperature distribution along the test tube using R. G. B. at 36.5°C with swirl

Fig. 10은 선회유동에서 온도 분포를 나타낸다. 여기서 R은 red, G는 green 그리고 B는 blue이다. 비선회 유동과 달리, 튜브 전체에서 온도가 거의 일정한 결과를 나타내고 있다. 이것은 선회유동의 접선방향 속도에 의해서 유동이 혼합된 결과로 보인다. 그러나 테스트 튜브의 끝 부분에서 높은 온도 분포를 나타내고 있다. 이 현상은 액정의 입자가 테스트 튜브의 끝부분에서 바닥에 가라앉아 높은 온도를 나타내는 것으로 생각된다.

3.3 열전달 계측

열전달 실험 장치는 내경이 150mm, 두께가 5mm, 길이가 3000mm인 동관을 사용하였고, 길이 80m의 열선(BICC Pyrotenax Ltd)의 직경

이 4mm를 균일한 간격(17.5mm)로 감고, K형 열전대를 이용하여 관벽 온도와 내부 공기의 온도를 선회 및 비선회에서 계측하였다. 팽창 비는 1:3으로, 입구관의 직경이 50mm, 테스트 튜브의 직경이 150이다. 관 끝에서 Reynolds 수를 결정하기 위하여 멀티-피토크관을 사용하였다.

이 실험은 상온에서 실험하였고, 실험조건은 열플럭스(heat flux)가 220vx1274kW이다. 실험장치 끝에 있는 multi-pitot 튜브에서 Reynolds 수를 결정하는 공기의 평균압력에 따라서 송풍기를 가동하고 열전대에 전원을 연결한 후 충분히 열평형에 도달한 열전대와 온도기록계를 이용하여 연속적으로 유체의 온도를 계측하였다. 가열된 공기는 실험실 외로 배출시켜 실험실 온도의 상승을 막았다.

Fig. 11은 비선회에서 체적 온도(bulk temperature)를 나타낸다. 이온도는 $X/d=10$ 까지 점차적으로 감소하다, 점진적으로 증가하는 것을 보이고 있다. 즉, $X/d = 0 \sim 10$ 까지 재순환 영역이 포함된 것으로 보인다. $X/d=10$ 이후부터는 비선회 유동의 체적온도와 유사한 분포를 보이고 있다.

Fig. 12는 선회유동의 체적온도를 $Re=80,000$ 에서 계산한 값이다. 이 체적온도의 분포는 선형적으로 증가하고 있고, 선회 강도($L/d=0, 8, 16$)에 따라 변하고 있는 것을 알 수 있다. 즉, 선회 강도(L/d)가 증가할수록 체적온도가 증가하는 것은 가열된 벽면으로부터 더 많은 에너지를 내부의 유체(공기)로 이동시키는 것으로 생각된다.

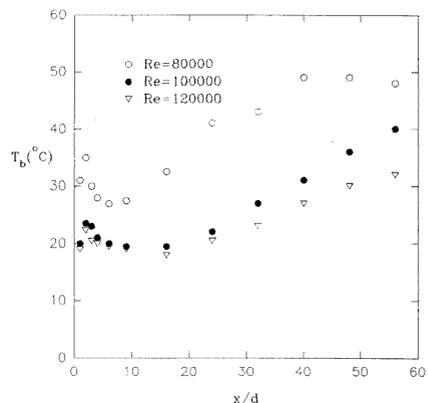


Fig. 11 Distribution of bulk temperature profiles without swirl along the test tube.

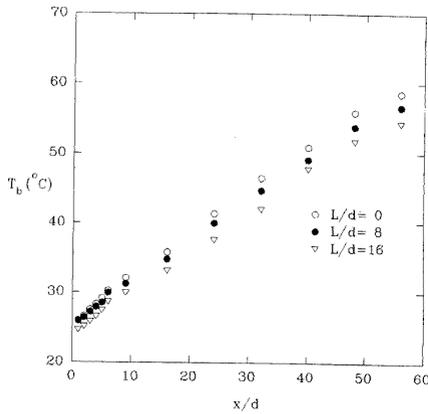


Fig. 12 Distribution of bulk temperature profiles with swirl along the test tube for $Re=80,000$.

Fig. 13은 비 선회 유동에서 Nusselt 수의 비 (Nu/Nu_{db})를 나타낸다. 여기서, Nu 는 선회 유동의 Nusselt 수이고, Nu_{db} 는 Dittus-Boelter 식으로 구한 Nusselt 수이다. 이 Nusselt 수의 비는 $X/d=5$ 에서 최고치(약 5.0)를 나타내고 그 후 가파르게 감소하여 관 끝에서는 1에 접근하고 있다. Boelter 등^[1]이 발표한, 재순환 영역에서 4배의 Nusselt 수를 나타낸다는 결과와 일치하는 것으로 생각 된다. 또한, 관 끝에서 1에 접근한다는 것은 공기 유동이 충분히 발달된 상태임을 알 수 있다.

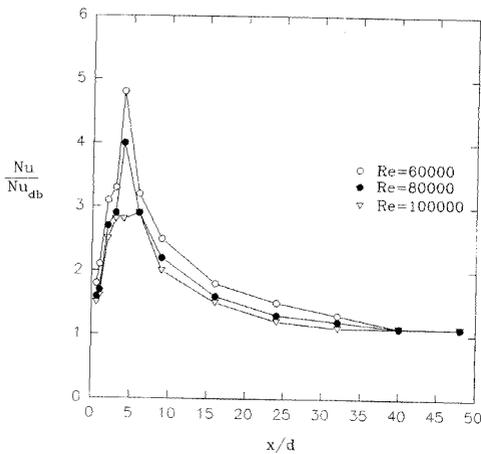


Fig. 13 Distribution of Nu/Nu_{db} along the test tube without swirl

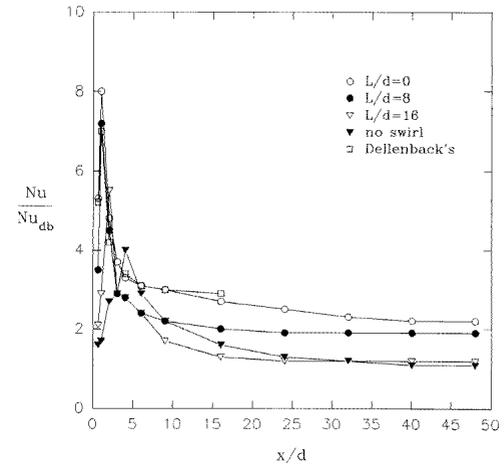


Fig. 14 Distribution of Nu/Nu_{db} along the test tube with swirl for $Re=80,000$.

Fig. 14는 선회 유동에서 Nusselt 수의 비 (Nu/Nu_{db})를 나타낸다. 최솟값은 약 9로 비 선회의 경우의 약 2배임을 알 수 있고, $X/d=1 \sim 2$ 에서 발생하고 있다. 또한 이 Nusselt 수의 비 (Nu/Nu_{db})는 선회 강도(L/d)가 증가하면 증가하는 현상을 나타낸다. 중요한 현상은 선회 유동에서 최고 Nusselt 수의 비가 발생하는 위치가 테스트 튜브의 앞쪽으로 이동하고, 재순환 영역이 짧아진다는 것을 알 수 있다. 전체적인 Nusselt 수의 비를 Dellenback^[2]의 결과와 비교하여 잘 부합함을 알 수 있었다.

4. 결 론

1. 선회유동의 경우 유동의 회전으로 인하여 팽창이 늦어지는 것으로 생각 되고, 팽창 시간이 비 선회보다 선회 유동이 지연된다는 것을 알 수 있다.

2. 액정을 이용하여 선회유동의 온도계측의 경우는, 비 선회 유동과 달리, 튜브 전체에서 온도가 거의 일정한 결과를 나타내고 있다. 이것은 선회유동의 접선방향 속도에 의해서 유동이 혼합된 결과로 보인다. 그러나 테스트 튜브의 끝 부분에서 높은 온도 분포를 나타내고 있다. 이 현상은 액정의 입자가 테스트 튜브의 끝부분에서 바닥에 가라 앉아 높은 온도를 나타내는 것으로 생각된다.

3. 열전달 실험에서, Nusselt 수의 비(Nu/Nu_{db})는 선회 강도(L/d)가 증가하면 증가하는 현상을 나타내었고, 비 선회 유동에 비교하여 약 2 배로 높게 나타났다. 중요한 현상은 선회 유동에서 최고 Nusselt 수의 비가 발생하는 위치가 테스트 튜브의 앞쪽으로 이동하였고, 재순환 영역이 짧아진다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 논문 자료는 교육과학기술부의 기금사업으로 한국과학기술정보연구원 고경력 과학기술인을 활용한 기술정보분석사업의 성과를 발표합니다.

참고문헌

- [1] Boelter, L.M.K, Young, G. and Iversen, H.W., "An investigation of aircraft heaters XXVII - Distribution of heat transfer rate in the entrance section of a circular tube", NACA-TN-1451, 1948.
- [2] Dellenback, P., Metzger, D. E. and Neitzel G. P., "Heat transfer to turbulent swirling flow through a sudden axisymmetrix expansion", ASME J. of Heat Transfer, Vol. 109, pp. 613-620, 1987.
- [3] Habib, M. A. and McEligot, D. M., "Turbulent heat transfer in a swirl flow downstream of an abrupt pipe expansion", Proc. of the 7th Int. Heat Transfer Conf., Washington, D.C, pp. 159-165. 1982.
- [4] Sultanian, B. K., "Numerical Modeling of turbulent swirling flow downstream of an abrupt pipe expansion", Ph.D. Dissertantion, Arizona State University, 1984.
- [5] Kimura, R., "Visualization of temperature fields of water by liquid crystals". In Proceedings of 2nd symposium of Flow visualization in Japan, pp. 99~102, 1974.
- [6] Doh, D. H., Kobayashi, T., Saga, T. and Segawa S., "A new consideration for measuring for measuring temperature and velocity", Particle Imaging Thermonetry and Velocimetry, Proc. the 3rd JSME-KSME Fluid Engineering Conference, pp. 154~159, 1994.
- [7] Lee, S. J., Yoon, J. H. and Doh, D. h., "Simultaneous Velocity and temperature measurement of thermo-fluid flows by using particle imageing technique." KSme(B), Vol. 20, No.10
- [8] Dabiri, D. and Gharib, M., "Digital particle image thermometry: the method implementation", Experiments in Fluids, Vol.11, pp.77~86, 1991.
- [9] Kobayashi, T., Saga, T. and Doh, D., "A three-dimensional simultaneous scalar and vector tracking method". Proc. Intl. workshop on PIV. Fukui, Japan, pp. 33~43, 1995.
- [10] Ozawa, M., Muller, U., Kimura, I. and Takamori, T., "Flow and temperature measurement of natural convection in a hele-shaw cell using a thermo-sensitive liquid-crystal tracer". Exp. Fluid, Vol.12, pp.213~222, 1992.
- [11] Nozaki, T., Mochizuki, T., Kaji, N. and Mori, Y. H., "Application of liquid-crystal thermomerty to drop temperature measurements", Exp. Eluids, Vol.18, pp. 137~144, 1995.
- [12] Fujisawa, N., Adrian, R. J., "Three-dimensional temperature measurement in turbulent thermal convection by

- extended range scanning liquid crystal thermometry", *J. of Visualization*. Vol. 1, No.4, pp. 355~364, 1986.
- [13] Wiezbowski, M. and Stasiek, J., "Liquid crystal technique application for heat transfer investigation in a fin-tube heat exchanger element", *J. of Visualization*, Vol. 5, No. 2, pp. 161~167, 2002.
- [14] Kimura, I., Takamori, T., and T., "Image processing instrumentation of flow by using correlation technique", *Flow Visualization*, Vol. 6, No. 22, pp. 105~108, 1986.
- [15] Utami, T., Blackwelder, R., "A cross correlation technique for velocity field extraction from particulate visualization", *Experiments in Fluids*, Vol. 10, pp. 213~223, 1991.
- [16] Pollard, A., "Entrance and diameter effects on the laminar flow in sudden expansions", In *momentum and heat transfer processes in recirculating flows* (Edited by Launder, B.E. and Humphrey, J.A.C.), pp. 21~26. ASME, New York, 1980.
- [17] Sparrow, E. M. and Chaboki, A., "Swirl-Affected turbulent fluid flow and Heat Transfer in a circular Tube", *ASME Trans., J. of Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 766~773, 1984.
- [18] 장태현, PIV 기법을 이용한 선회유동의 급팽창에 관한 실험적 연구, 대한기계학회 경남지부 추계학술대회논문집, pp. 1~8, 2008.
- [19] H. Mak and S. Balabani, "Near field characteristics of swirl flow past a sudden expansion", *Chemical engineering science* Vol. 62, pp. 6726~6747, 2007.
- [20] Tae-Hyun Chang, "A experimental study on swirling flow in a sudden expansion tube using the 3D PIV technique", *Proceedings of the 12th Asian congress of fluid mechanic*, August, 2008.
- [21] Yang, B.T. and Yu, M. H., "The flow field in suddenly enlarged combustion chamber", *AIAA Journal* Vol. 21, pp. 92~97, 1983.
- [22] Hallett, W.L.H. and Gunther, R. "Flow and mixing in swirl flow in a sudden expansion". *Canadian Journal of Chemical Engineering* Vol. 62, pp. 149~155, 1984.
- [23] Khezzer L., Whitelaw, L. H. and Yianneskis, M., "An experimental study of round sudden-expansion flow", *Proceedings of the Fifth Symposium on Turbulent Shear Flows*. Cornell University, Ithaca, New York, USA, 7-9 August 1985.
- [24] Hallett, W.L.H. and Toews, D.J. "The effect of inlet conditions and expansion-ratio on the onset of flow reversal in swirling flow in a sudden expansion", *Experiments in Fluids* Vol. 5, No. 2, pp. 129~133, 1987.
- [25] Durrett, W.J., and Sutton, W.H., "An experimental study of two flows through an axisymmetric sudden-expansion air flow", *Transaction of ASME-Journal of Fluids Engineering* Vol. 110, pp. 367~372, 1988.
- [26] Summerfeld, M. and Qiu, H.-H. "Detailed measurements in a swirling particulate two-phase flow by a phase-Doppler anemometer", *International Journal of Heat and Fluid Flow* Vol. 12, No. 1, pp. 20~28, 1991.
- [27] Nejad, A.S. and Ahmed, S.A. "Flow

- field characteristics of an axysymmetric sudden-expansion pipe flow with different initial swirl distribution", International Journal of Heat and Fluid Flow Vol. 13, pp. 314~321, 1992.
- [28] Deveport, W.J. and Sutton, E.P. "An experimental study of two flows through an axysymmetric sudden-expansion", Experiments in Fluids Vol. 14, pp. 423~432, 1993.
- [29] Ahmed, S.A., "Velocity measurements and turbulent statics of a confined isothermal swirling flow", Experimental Thermal and Fluid Science Vol. 17, pp. 256~264, 1998.
- [30] Cole D.R. and Glauser M.N. "Flying hot-wire measurements in axysymmetric sudden-expansion". Experimental Thermal and Fluid Science Vol. 18, pp. 150~167, 1998.
- [31] Khezzer, L., "Velocity measurements in the field of a radial swirler", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 16, pp. 230~236, 1998.
- [32] Hammad, K.J., Qtugen, M.V. and Arik, E.B., "A PIV study of laminar axysymmetric sudden-expansion flow", Experimental Thermal and Fluid Science Vol. 26, No. 3, pp. 266~272, 1999.
- [33] Zhou, L.X. and Li, Y., Chen, T. and Xu, Y., "Studies on the effect of swirl numbers on strongly swirling turbulent gas-particle flows using a phase-Doppler particle anemometer", Power Technology Vol. 112, pp. 79~86, 2000.
- [34] Furuichi, N., Takeda, Y. and Kumada, M., "Spatial structure of the flow through an axysymmetric sudden-expansion", Experiments in Fluids, Vol. 34, pp. 643~650, 2003.
- [35] Wang P., Bai, X.S., Wessman, M. and Klingmann, J., "Large eddy simulation and experimental studies of a confined turbulent swirling flow", Physics of Fluid Vol. 16, No. 9, pp. 3306~3324, 2004.
- [36] Tinney, C.E., Glauser, M.N., Eaton, E.L. and Taylor, J.A., "Low dimensional azimuthal characteristics of suddenly expanding axysymmetric flows", Journal of Fluid Mechanics Vol. 567, pp. 141~155, 2006.
- [37] Fernandes, E.C., Heitor, M.V. and Shtork, S.I., "An analysis of unsteady highly turbulent swirling flow in a model vortex combustor", Experiments in Fluids Vol. 40, No. 2, pp. 177~187, 2006.

저 자 소 개



장태현(張泰鉉)

1942년 2월생, 1969년 동아대학교 기계공학과 졸업, 1971년 동대학대학원 기계과수료(공학석사), 1991년 12월 University of Wales(U.K) 대학원 기계공학과 수료(Ph.D), 2001년 5월 제6차 ASV'6(Asian Symposium on Visualization) 조직위원장 역임, 공조·냉동기계 기술사, 2005년 5월 마산시 문화상(학술부문) 수상 경남대학교기계자동화공학부 명예교수 현재, 한국과학기술정보연구원 전문연구위원



길상철(吉相哲)

1958년 7월생, 1981년 인하대학교 금속공학과 졸업, 2008년 중앙대학교 국제경영대학원 졸업(경영학 석사), 금속(재료)기사 1급, 기업·기술가치 평가사, KIET 책임연구원, KINITI 책임연구원 KISTI 부연구위원, 현재 KISTI ReSEAT 프로그램 학술부문 총괄