원형관 내에서 유동가시화 기법을 이용한 선회유동에 관한 연구고찰

장태현[†] · 도덕희^{*} · 이권수^{**}

A Review on Swirling Flow by Using Flow Visualization Techniques in the Circular Tubes

Tae-Hyun Chang, Deog-Hee Doh and Kwoon-Soo Lee

Abstract. Swirling flows are found in very wide range of applications, for examples, cyclone separators, spraying machines, heat exchangers and jet pumps, ect. Relatively, little work has been done on the swirl flow using flow visualization techniques. This study deals with many visualization techniques to study on swirling flow. These techniques are related to oil films methods, smoke, dye liquids, liquid crystal, stroboscope light, smoke wire, white light, naphthalene sublimation, LDV(lase doppler Velocimetry) and PIV(particle image velocimetry). The present work has handled single, annular, carved tube, swirl expansion and swirl wake using several visualization methods in the vertical and horizontal circular tube.

Key Words: Swirling Flow(선회유동), Flow Visualization (유동가시화), Vortex Breakdown(소용돌이 붕괴), Swirl Wake(선회후류)

1. 서 론

지난 50여년간 선회유동은 학문적이나, 기술적으로 중요하여 광범위하게 연구가 계속되어왔다. 선회유동은 관내 유동에서 열전달을 향상시킨다는 것은 잘 알려져 왔고, 이와 같은 장점을 이용하여, 이 유동은 각종 열교환기, 엔진, 선회 제트, 사이클론 분리기, 분사기 분무기 그리고 각종 연소장치에 이용되었다. 선회유동의 특징을 연구하기 위하여 많은 가시화기법이 사용되었다. Nuttall(1)은 수직관에서 염색액을 사용하여 세 개의 역유동현상을 관찰하였고, Binnie 등(2)은 깔대기형 수직관에서 lycopodium 분말을 이용하여 선회유동을 연구하였다.

최근에 Shyy 등(3)은 수직관에서, 공기-물의 슬러그류를 사용하여 기공율과 Nusselt 수를 계산하였다.

근래 입자영상유속계기법(PIV)의 발달과 함께, Make

등(4)은 2D-PIV 기법을 이용하여 수직관에서 선회유동의 급팽창 특성을 연구하였다.

액정은 처음으로 1888년 오스트리아 식물학자인 프레드리히 라이니처(Friedrich Reinitzer)가 발견하였고, 그는 합성물 코레스테릴 벤조에이트(Cholesteryl benzoate)가 두 개의 분명한 용융점들을 갖는 것을 관찰하였다. 섭씨 145도의 첫 용융점에서 고체상이 흐린 액체상으로 바뀌었고 그리고 섭씨 179도의 두 번째 용융점에서 흐린 액체가 투명하게 바뀌었다. 이와 같은 특성을 이용하여 유동의 가시화 및 열전달해석에 사용되었다.

이 고찰연구에서는, 최근까지 선회유동에 사용된 여러 가시화기법을 원형관내유동에 국한하여 고찰하여, 이 분야의 학문적 그리고 기술적 발전에 기여하고자 한다.

2. 연구 고찰

2.1 수직관 및 수평 관에서 선회유동

Nuttall(1)은 염색액을 이용하여 수직관 내에서 역류유동을 관찰하였다. 그러나 그는 속도 분포에 대하여는 논하지 않았다. Binnie 등(2)은 깔대기형 수직관에서 볼류트(volute)를 이용하여 선회를 발생시키고,

[†]한국과학기술정보연구원, RESEAT, 전문연구 위원
E-mail : changtae@kyungnam.ac.kr

^{*}한국해양대학교 기계정보공학부 교수

^{**}한국국제대학교 기계자동차공학부 교수

Fig. 1. Snapshots of air-water slug flow at AW=0.003 and 0.008 with Re=(a) 4000 (b) 6000 (c) 8000 (d) 10000.

lycopodium 분말을 사용하여 나선형으로 변하는 선회유동을 관찰하였다.

Escudier 등(5)은 LDA와 붉은 염색액을 사용하여 수직관에서 실험하고, 선회유동이 난류소용돌이 구조에 강한 영향을 나타냄을 알 수 있었다.

최근 대만의 Shyy Wei Chang 등(3)은 수직관에서 비틀림 테이프를 사용하여 선회를 발생시키고, 공기-물의 슬러그류를 이용하여, Fig. 1과 같이 비디오카메라 촬영술(videography)로 측정된 테일러 기포속도(Taylor bubble velocity), 공극률(void fraction) 그리고 Nusselt 수를 계산하였고, 압력저하계수에 대한 상관식을 식(1) 및 (2)와 같이 비 선회 및 선회유동에서 얻었다.

$$C_{fp} = [0.314(1 - e^{-43.1 \times AW})] \times Re^{(0.1909 + 1.79e^{-200 \times AW})} \quad (1)$$

$$C_{fs} = [0.00154(1 - e^{-43.1 \times AW})] \times Re^{(0.652 + 1.44e^{-1195 \times AW})} \quad (2)$$

Sparrow 등(6)은 수평원통관에서, 램프 검정과 오일(lamp black oil)을 혼합하여 테스트 튜브 내에 선회유동에 주입하여 집착테이프에 남긴 Fig. 2와 같은 궤적을 얻었다. 그 궤적은 선회 강도가 증가 할수록 선회각이 증가하였고 선회 강도가 저하 할 때, 선회각은 감소하였다. 이 관계를 선회각이라 부르고 식(3)과 같은 상관식을 유도하였고, 선회 발생기는 접선방향 슬롯(tangential slot)을 사용하였다. Fig. 2에서 선회각(swirl angle) 분포를 X-축을 따라서 나타내었다. 이 각도는 식(3)과 같이 Reynolds 수의 증가에 따라서 증가

Fig. 2. Flow visualization result with swirl using lampblack-oil.

하였고, Reynolds와 X/D의 함수로 나타내었다.

$$\text{Swirl angle} = C \exp[-b(X/D)], \quad b = 483(Re)^{-0.97} \quad (3)$$

2.2 이중 관에서 선회유동

Clayton 등(7)의 이중관에 관한 연구에서, 선회발생기로서 가이드베인을 사용하고, 테스트 튜브의 직경은 109 mm 그리고 91.5 mm의 두 가지를 사용하였다. 열선풍속계를 이용하여 공기의 축방향속도와 접선방향속도를 $Re=28,700$ 에서 측정하였다. 가시화 실험에서는 실(truft)을 사용하여 선회유동의 소멸 현상을 측정하였다.

Wan 등(8)은 외경 114.3 mm, 내부관은 97.0 mm의 투명 관을 이용하여 Shell Tellus oil을 알루미늄 페인트와 함께 사용하여 가시화 실험을 하였다. Taylor 수(Ta)가 $20,000 \leq Ta \leq 40,000$ 에서, 토크는 점진적으로 증가하고 나선형 소용돌이가 붕괴되어 혼란된 파가 정착됨을 관찰하였다.

Chang 등(9)은 오목한 관(concave tube)의 직경이 150 mm, 볼록한 관(convex tube)의 직경이, 50 mm인 이중관에서, 스모크와 염색액을 사용하여 $Re=60000 \sim 80000$ 에서 실험하고, 투명관을 사용하여 각위치에서 Fig. 3과 같이 선회각을 측정하여 식(4)의 상관식을 유도하였다. 이 선회각은 Re, X/D 그리고 L/D의 함수임을 알 수 있었다.

$$\theta = 64.285 + (7.216 \times 10^{-5}) \times Re - 0.633 \frac{L}{D} - 0.504 \frac{X}{(D-d)} \quad (4)$$

Fig. 3. Swirl angle distributions along the tube using dye liquid for $Re=80,000$ at $L/D=4$.

2.3 곡관의 가시화

곡관에 대한 초기의 연구는 Binnie(10)에 의해서 수행되었고, 그는 선회발생기로 불류트를 사용하고 곡관 내에서 물이 역류됨을 알 수 있었다.

Chang 등(11)의 연구에서, 그들은 직경 50 mm의 투명 관에서 물을 사용하여 2D PIV기법으로 속도 분포를 계측하였다. Fig. 4는 속도 벡터를 90° 곡관에서 나타내고, 선회유동에서 속도 분포는 관 입구에서는 부속 속도를 관 중심에서 나타내었지만, 곡관의 굽힘 각을 따라서 소멸되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4. Time mean velocity vector distribution with swirl for $Re=10,000$ at $0^\circ \sim 20^\circ$.

Fig. 5. Ranque-Hilsh effects.

2.4 유동의 급팽창

선회유동의 특허 중 초기에 등록된 것은 1932년 프랑스의 특허청에 등록된 Ranque-Hilsh의 효과로 생각된다. Fig. 5는 그들의 특허에 명시된 결과이고, 접선 방향 슬롯을 사용하여 선회를 발생시킨다. 선회 유동을 팽창시키기 위하여, 오리피스를 사용하였고, 선회 강도에 대한 속도 분포는 설명되지 않았다. 선회 강도 혹은 선회수(swirl number)가 증가하면, 테스트 튜브 중심부에 재순환 영역이 나타나고, 부속 속도를 보이고, 만약 오리피스 전후가 단열 유동이면, 공기의 온도는 저하할 것이다. 그러나 특허권자는 속도분포에 대하여는 논하지 않았다.

Hallett 등(12)은 화학 반응 조에서 유동과 혼합물의 선회 강도를 연구하기 위하여 공기유동의 급팽창 실험을 스모크(smoke)를 이용하여 수행하였고, 높은 선회 강도에서 중심부에 재순환 영역이 형성되었다. 선회수 2.06에서 와류 붕괴(vortex breakdown) 현상을 관찰하였다.

Mak 등(4)과 Chang 등(35)은 PIV 기법을 사용하여 선회 팽창을 연구하였고, Mak 등(4)은 팽창비 2.5의 축대칭 급팽창에서 선회유동의 특징을 연구하였다. 그들의 선회수는 0, 0.17, 그리고 0.65와 Re 수는 10,000이었다. 약 선회는 유동에 큰 영향을 미치지 못하였지만, 강선회($s=0.65$)는 중심부에 재순환 영역의 형성을 가져왔고, 소용돌이 붕괴(vortex breakdown)의 특이한 현상을 나타내었다. 그들은 유동을 특성화하기 위하여 고유직교함수 전개법(POD : proper orthogonal decomposition)을 사용하였다.

Fig. 6에서 선회수가 증가 할수록 유선은 벽 쪽으로 이동하고 있다. 이것은 선회강도가 증가 할수록 재순환 거리가 짧아짐을 의미한다. 특이한 것은 선회강도=0.65

Fig. 6. Sectional streamline of the flow past the expansion for (a) $S=0$, (b) $S=0.65$ for $Re= 10,000$.

에서 또 다른 재순환 영역이 나타남을 볼 수 있다.

2.5 선회유동의 붕괴

소용돌이의 붕괴(vortex breakdown) 혹은 소용돌이의 파열(vortex bursting)은 소용돌이 핵의 공간에서 급팽창이다. 이 소용돌이 붕괴는 1961년 Lambourne 등(13)에 의해서 처음으로 발견되었다.

Hartmut(14)은 비압축성의 회전하는 소용돌이 흐름에서 Navier-Stokes 식을 적용하였고, 소용돌이 붕괴에 대한 네 가지 제안을 하였다.

(i) 소용돌이 붕괴는 Strecheletzky의 연구와 Garts hore의 경계층 유추에서 원심력의 이탈 현상이다.

(ii) 소용돌이 붕괴는 유체유동의 불안정상태이다.

(iii) 소용돌이 붕괴는 하나의 정재파(standing wave)이다.

(iv) 소용돌이 붕괴는 수력도약(hydraulic jump)과 유사한 두 개의 결합한 유동 상태 사이의 하나의 천이의 특징을 나타낸다.

(v) 소용돌이 붕괴는 임계상태에 접근하는 강선회 유동을 가지는 초임계유동의 하나의 필연적인 특징이다.

John J. Cassidy(15) 등은 투명관 실험 장치에서 담배 연기를 사용하여 소용돌이 붕괴 현상을 연구하였다.

Grabowski 등(16)은 Navier-Stokes 식을 사용하여

Fig. 7. (a) Axisymmetric bubble flowed by spiral breakdown and (b) comparison of stream function contours.

수치 해석적으로 소용돌이 붕괴를 연구하였다. 소용돌이 핵으로부터 소용돌이의 확산 항과 대류 항을 제거하고 계산하였다. 강선회 유동에 대한 수치해석 결과는 2차축방향 유동의 방해를 나타내었고, 만약 첫 방해가 안정적이면, 2차유동은 불안정하였다. Fig. 7에서 그들의 계산결과를 나타낸다.

Sidney(17)은 dye filament를 사용하여 소용돌이 붕괴를 연구하였고, 소용돌이 붕괴 영역을 세 개의 그룹으로 분류하였다.

(i) 유동에 존재하는 소용돌이 핵은 거의 비 회전상태로 존재하고, 축방향거리가 있는 접근유동에서 변화는 느리고 예측할 수 있다. 그 유동은 층류이거나 혹은 상대적으로 약한 난류강도를 가진다.

(ii) 축방향에서, 소용돌이 붕괴 영역은, 길이에서 그것은 소용돌이 핵 직경의 5배 크기의 축간 간격을 점유하고, 거의 동등한 거리로 세부분으로 세분된다. 첫 세분에서, 접근유동은 감속되고, 정체점은 소용돌이 축에 형성된다. 두 번째 세분에서, 역류흐름이 기포(bubble)와 같은 붕괴가 소용돌이 축 근처에서 발생한다. 기포와 같은 붕괴의 반경은 소용돌이 핵의 것과 거의 같다.

(iii) 확산된 핵(core)을 가진 새로운 소용돌이 구조는 소용돌이 붕괴의 하류영역에 형성된다. 축방향 속도

Fig. 8. Photographs of vortex breakdowns with the flow generally from left to right (a) bubble forms; (b) spiral form.

분포는 고체 장애물의 후류와 유사하다.

Lamboune 등(13)과 Sidney(18)은 Fig. 8에서 소용돌이 붕괴의 두개의 중요한 형태를 나타내었다. 기포 형태를 B-소용돌이 붕괴, “소용돌이 선 붕괴”를 S-소용돌이 붕괴라 부르고, Fig. 9에서 다른 삼각 날개(delta wing) 위의 선단에서 연속적으로 나타내고 있다.

2.6 선회 후류

후류(wake)에 관한 연구는 구조물 주위의 유동현상 해석이나, 유체역학적 그리고 산업 현장에서 열교환기 설계에 매우 중요하여 고전적인 관심의 대상이 되어왔다. 국내에서도 많은 연구가 수행되었고, 최근에 3차원

Fig. 9. Vortex breakdown in leading edge vortices over a model delta wing.

Fig. 10. Local axial velocity profiles without swirl for $Re=10,000$ behind the round cylinder.

Fig. 11. Local axial velocity profiles with swirl for $Re=10,000$ behind the round cylinder.

PIV 기법을 사용하여, 원형 실린더의 후류에 대한 연구가 발표된바 있다.

Fig. 10은 비 선회의 경우로 Chang 등(19)에 의해서 2D PIV 기법으로 계측된 결과이다. 이 연구는 2D PIV 기법을 이용하여 선회유동의 후류를 연구하기 전에 계측한 결과로 지금까지 발표된 결과와 유사한 현상을 나타내고 있다. Fig. 11은 선회가 있는 경우 $Re=10,000$ 에서 계측한 결과이고, Fig. 12는 $Re=15,000$ 에서 얻은 결과이다. 모두 비 선회유동과 달리 후류는 짧아지고, 비대칭으로 한 방향으로 기울어짐을 볼 수 있었다.

Fig. 13에서 축방향 속도를 유동방향 중심선에서 선회가 있는 경우와 없는 경우를 상호 비교하였다. 선회가 있는 경우는 비 선회 유동에 비하여 $\frac{U}{U_\infty}$ 가 0.2 ~ 0.86으로 높게 나타났고, 비 선회의 경우는 0.0 ~ -0.4로 낮게 나타났다. 이것은 접선방향 속도의 소멸에 인한 것으로 생각된다.

Fig. 12. Local axial velocity profiles with swirl for $Re=15,000$ behind the round cylinder.

Fig. 13. Comparisons of axial velocity with and without swirl behind a round cylinder and a square.

Fig. 14. Time - mean local Reynolds stress profiles without swirl behind the round cylinder for $Re = 30,000$.

Fig. 14와 Fig. 15는 난류전단 응력을 비 선회와 선회가 있는 경우에 나타내고 있다. 비 선회의 경우는 지

Fig. 15. Time - mean local Reynolds stress profiles with swirl behind the round cylinder for $Re = 30,000$.

금까지 실린더의 중심선을 기준으로 음의 난류 전단 응력을 나타내었지만, 선회가 있는 경우에는 실린더의 벽 근처에서부터 음의 값을 보이고, 비대칭을 나타내고 있다. 이 것은 선회유동의 접선방향 속도에 기인된 것으로 보여진다.

2.7 액정을 이용한 열전달 연구

액정 물질(Liquid crystals)들은 액체와 결정의 두 가지 물리적인 특성을 갖는다. 이 물질들은 실험실에서 쉽게 합성되는 200여 유기 화합물들이므로 희귀한 물질들은 아니다. 기계적 특성으로는 이 액정물질들은 흐르는 아교로부터 고체 유리까지의 점성을 갖는 액체를 닮았다. 그것들은 광학적으로 결정의 물리적 특성을 많이 가지고 있다.

최근 감온 액정(TLC: thermo-sensitive liquid crystal)을 이용하여 온도장을 측정하는 기술이 개발되어, 온도

Fig. 16. Mean temperature distributions along the test tube using R. Fig. Mean temperature distributions along the test tube using R. G. G. B. at 36.0 without swirl.

Fig. 17. Mean temperature distributions along the test tube using R. G. G. B. at 36.5 with swirl.

장 및 속도장 해석에 활용하고 있다. Chang 등(20)은 감온 액정을 이용하여 선회유동에서 온도분포를 계측하였다.

Fig. 16과 Fig. 17은 감온액정을 사용하여 비 선회와 선회유동에서 온도장을 계측한 결과이다. Fig. 16은 비 선회유동의 36.0°C에서 온도 분포이며, 관 벽 근처에서 최댓값을 그리고 관 중심에서 최댓값을 나타내고 있다. Fig 17은 선회유동의 경우, 36.5°C에서 온도 분포는 전 영역에서 거의 동일한 값을 보이고 있다. 이것은 선회유동의 접선방향 속도에 의해서 혼Dd에 의한 것으로 보인다.

Bakirci 등(21)은 선회가 있는 충돌제트(free impinging jet)에서 감온 액정을 사용하여 온도 분포를 계측하였다. 그들은 Fig. 18의 비틀림 테이프형 선회발생기를 사용하여 선회유동을 발생시켰다. 카메라로는 3000M Panasonic video 카메라를 사용하였다.

Fig. 19에서 액정의 색을 $Re=20,000$ 의 (a)에서 계측한 결과와 (b)에서 일정한 열전달 율을 나타내고 있다. 이 결과로부터 Fig. 20의 Nusselt 수를 나타내고 있다. 가열 표면거리와 노즐직경비($H/D=8$)에서, 선회충돌분무(SIL: swirl impinging jet)가 전통적인 충돌분무, CIJ (conventional impinging jet)보다 표면주위에서 높은 값을 나타내나, 중심부에서는 선회유동의 재순환영역의 발생으로 낮은 열전달계수를 나타내고 있다.

3. 결 론

선회유동의 연구에 이용된 가시화 기법을 Table 1에 열거하고 다음과 같이 요약하였다.

1) 전통적인 가시화방법인, 스모크, 염색액 등이 선회각의 계측에 주로 사용되었다. 선회각은 Re 수와 $X/$

Fig. 18. Swirl generators with different angles.

Fig. 19. For CIJ(conventional impinging jet), $H/D=8$ and $Re=20000$ (a) map of constant temperature contours (b) contours of the constant Nusselt number.

Fig. 20. Effect of swirl angle on the local Nusselt number distributions, $Re=20,000$, $H/D=8$.

D 의 함수로 나타났고, 선회강도의 저하는 테스트 튜브의 길이를 따라 감소하였다.

2) 선회붕괴(vortex breakdown)에 대하여 많은 연구가 수행되었고, 스모크, 염색액 그리고 수치해석 기법이 이용되었다. 초장기에는 수치해석에서, Navier-Stokes 식을 풀었고, 최근 Large-eddy-simulation(LES) 방법이 사용되었다.

3) LDV를 이용한 연구는 그 수가 적었고, 2000년도

Table 1. Overview of visualization techniques for swirling flow in circular tube

Author	Dia meter	Re	Swirl method	Swirl umber	Visualization technique
Nuttall(1953)	vertical tube, 2.875inch	30,000	guide vanes	-	dye liquid, axial velocity
Binnie et al. (1956)	vertical trumpet, 6in	-	volute	-	lycopodium, reversal flow
Shyy et al., (2009)	vertical tube, 20mm	4,000-10,000	twisted tape	-	air-water mixer void fraction
Sparrow et al, (1984)	horizontal tube, 23.6mm	9,000-43,500	tangential slot	-	oil-lampblack, swirl angle
Cyayton et al., (1984)	annular tube, $r_i/r_o=0.61$	28700	guide vanes	-	turf, swirl angle
Chang et al., (2010)	annular tube, $r_i/r_o=0.33$	20,000-60,000	tangential slot	-	smoke, dye liquid, swirl angle
Wan et al., (1982)	annular tube, $r_i/r_o=0.848$	250-500	tangential slot	-	Shell Tellus oil, vortex breakdown
Chang et al., (2003)	circular bend, 50 mm	10,000-25,000	tangential slot	-	2D PIV, velocity
Mak et al., (2007)	flow in expansion	10,000	guide vanes	-	2D PIV, velocity
Huang et al.,(2005)	flow in expansion	-	-	0.44-0.10	Large-eddy-simulation(LÉS) vortex breakdown
Harvey (1962)	horizontal tube, 3.5 inch	-	swirl vane	-	titanium smoke swirl angle, vortex breakdown
Cassidy et al. (1970)	horizontal tube, 15.24, 8.73 cm	-	swirl vane	-	Tobacco smoke, vortex breakdown
Grabowski (1976)	horizontal tube	200	Chorin's technique	-	Numerical, vortex breakdown
Escudier et at. (1985)	Vertical tube, 60 mm	-	guide vanes	-	LDA, fluorescent dye, vortex breakdown
Chang et al.,(2005)	horizontal tube, 90 mm	10,000 - 25,000	tangential slot	-	2D PIV, swirl wake
Chang et al.,(2003)	horizontal tube,	2436 - 2724	tangential slot	-	liquid crystal, temperature profile
Bakiric et al.(2007)	impinging swirl	10,000 - 20,000	twisted tape	-	liquid crystal, Nusselt number

이후 입자영상유속계(PIV)를 사용한 예 또한 적었다. 특히 3D PIV기법을 이용한 예는 극히 드물다.

4) 액정을 사용한 연구 또한 그 수가 적었고, 속도분포와 온도분포를 동시에 계측한 경우는 없었다.

후 기

본 논문 자료는 교육과학기술부의 기금사업으로 한국과학기술정보연구원 고경력과학기술인을 활용한 성과를 발표합니다.

참고문헌

- 1) John B. Nuttall, 1953, "Axial flow in a vortex", NATURE, Vol. 172, No. 4378, pp. 582-583.
- 2) A. M. Binnie and J. D. Teare, 1957, "Experiments on the flow of swirling water through a pressure nozzle and open trumpet", Quart J. of Mech. And applied Math., Vol. X, part. 3, pp. 78-89.
- 3) Shy Woei Chang, Tsun Lirng Yang, 2009, "Forced convective flow and heat transfer of upward cocurrent air-water slug flow in vertical plain and swirl

- tubes", *Experimental Thermal and Fluid Science* 33, pp. 1087-1099.
- 4) H. Mak and S. Balahani, 2007, "Near field characteristics of swirling flow past a sudden expansion", *Chemical engineering science* Vol. 62, pp. 6726-6746.
 - 5) M. P. Escudier and J. J. Kellert, 1985, "Recirculation in swirling flow: A manifestation of vortex breakdown", *AIAA J.*, Vol. 23, No. 1, pp. 111-116
 - 6) E. M. Sparrow and A. Chaboki, 1984, "Swirl-affected turbulent fluid flow and heat transfer in a circular tube", *J. of heat transfer*, Vol. 106, pp. 766-773.
 - 7) B. R. Clayton and Y. S. M. Morsi, 1984, "Determination of principal characteristics of turbulent swirling flow along annuli", *J. Heat & fluid flow*, Vol. 5, No. 4, pp. 195-203.
 - 8) C. C. Wan and J. E. R. Coney, 1982, "An investigation of adiabatic spiral vortex flow in wide annular gaps by visualization and digital analysis", *J. Heat & fluid flow*, Vol. 3, No. 1, pp. 39-44.
 - 9) Tae-Hyun Chang, 2009, "Experimental studies on heat transfer enhancement with swirling flow in the circular tubes using uniform heat flux", *The Int. Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion* pp. 17-24.
 - 10) A. M. Binnie, F. R. S., 1962, "Experiments on the swirling flow of water in a vertical pipe and a bend", *Proc. Roy. Soc. A*. Vol. 270, pp. 452-465.
 - 11) Chang T. H. and Lee H. S., 2003, "An experimental study on swirling flow in a 90 degree circular tube by using particle image velocimetry", *J. of Visualization*, Vol. 6, No. 4, pp. 343-352.
 - 12) W. H. Hallett and R. Gunther, 1984, "Flow and mixing in swirling flow in a sudden expansion", *The Canadian J. of chemical engineering*, Vol. 62, pp. 149-155.
 - 13) Lamboune, N. C. and Bryer, D. W., 1961 "The bursting of leading edge vortices; Some observations and discussion of the phenomenon", *Aeronautical research council*, R&MM3282.
 - 14) Hartmut H. Bossel, 1968, "Vortex breakdown flow field", *The Physics of Fluids*, Vol. 12, No. 3, pp. 498-508.
 - 15) John J. Cassidy and Henry T. Falvey, 1970, "Observations of unsteady flow arising after vortex breakdown", *J. Fluid Mech.* Vol. 41, part 4, pp. 724-736.
 - 16) W. J. Grabowski and S. A. Berger, 1976, "Solution of Navier-Stokes equations vortex breakdown", *J. fluid mechan.* Vol. 75, part 3, pp. 525-544.
 - 17) Sidney Leibovich, "Vortex stability and breakdown: Survey and extension", *AAIA, J.*, Vol. 22, No.9, 1983, pp. 1192~ 1206
 - 18) Sidney Leibovich, 1978 "The structure of vortex breakdown", *Ann. Rev. Fluid Mech.* pp.221~246.
 - 19) Tae-Hyun Chang, 2005, "An experimental study on the wake behind a round cylinder with swirling flow in the horizontal circular tube", *J. of the Korean Society of Marine Engineers*, Vol. 29, No. 4, pp. 417-425.
 - 20) Tae-Hyun Chang and Deog-hee Doh, 2003, "An experimental study on temperature velocity fields of the turbulent flow horizontal cylindrical tube by using thermo-sensitive liquid crystal", *J. of the Korean Society of Marine Engineers*, Vol. 27, No. 7, pp. 921-929.
 - 21) K. Bakirci, K. Bilen, 2007, "Visualization of heat transfer for impinging swirl flow", *Experimental thermal and fluid science* 32 pp. 182-191.
 - 22) W. S. Lewellen, 1962, "A solution for three-dimensional vortex flows with strong circulation", *J. of fluid mechanics*, Vol. 14, pp. 420-432.
 - 23) J. N. Cannon, W. M. Kays, "Heat transfer to a fluid flowing inside a pipe rotating about its longitudinal axis", *J. of heat transfer*, pp. 135-139.
 - 24) J. M. Khodadadi, and N. S. Vlachos, 1987, "Computation of confined swirling flow: effects of boundary conditions and turbulence model", *Numerical methods in laminar and turbulent flow*, pp. pp. 458-461.
 - 25) K. C. Cheng and F. P. Yuen, 1987, "Flow visualization experiments on secondary flow patterns in an isothermally heated curved pipe", *J. of heat transfer*, Vol. 109, pp. 55-61.
 - 26) K. C. Cheng and F. P. Yuen, 1987, "Flow visualization studies on secondary flow patterns in straight tubes downstream of a 180 deg bend and in isothermally heated tubes", *J. of heat transfer*, Vol. 109, pp. 49-54.
 - 27) J. K. Harvey, 1962, "Some observations of the vortex breakdown phenomenon", *J. of fluid mechanics*, Vol. 14, pp. 585-593.

- 28) Smith Eiamsa-ard, Pongjet Promvonge, 2005, "Enhancement of heat transfer in a tube with regularly-spaced helical swirl generators", Solar energy Vol. 78, pp. 483-494.
- 29) Z. Zhao, D. W. Yuen, C. W. Leung, T. T. Wong, 2009, "Thermal performance of a premixed impinging circular flame jet array with induced-swirl", Applied Thermal engineering, Vol. 29, pp. 159-166.
- 30) Tae-Hyun Chang, 2009, "Experimental studies on heat transfer enhancement with swirling flow in the circular tubes using uniform heat flux", The Int. Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion pp. 17-24.
- 31) D. L. Rhode and D.G. Lilley, D. K. McLaughlin, "Mean flow fields in axisymmetric combustor geometries with swirl", AIAA J. , Vol. 21, No. 4, 1983, pp. 593-600.
- 32) R.J.K. Wood, T.F. Jone, N.J. Miles, J. Ganeshalingam, 2001, "Upstream swirl-induced for reduction of erosion damage from slurries in pipeline bends", Wear 250, pp. 770-778.
- 33) D. L. Rhode, D. G. Lilley and D. K. McLaughlin, 1983, "On the prediction of swirling flow field found in axisymmetric combustor geometries", J. of fluids engineering, Vol. 104, pp. 378-384.
- 34) A. K. GUPTA, D. G. LILLEY and N. SYRED, 1984. SWIRL FLOWS, Tunbridge Wells, Kent & Cambridge, Mass,
- 35) Tae-Hyun Chang, 2008, "An experimental study on swirling flow in a sudden expansion tube using the 3D PIV technique", Proceeding of 12th Asian congress of fluid mechanics, 17-21 August, Daejeon, Korea
- 36) 可視化情報學會 編, 2002년 7월, PIV 핸드북, 森北出版株式會社.