

영상처리 기법을 이용한 원통형 용기내의 회전유속의 측정

Image Processing Technique for Rotational Velocity Measurements in a Circular Cylinder

김재원*, 엄정섭**, 임태규***
 J. W. Kim, C. S. Eum, T. G. Lim

Abstract

An experimental investigation has been made for flow in a circular cylinder with a rotating bottom disk. Flow system considered in this paper is a characteristic model of interior flows of an electric washing machine. Flows in a tub of an electric washing machine are driven by a rotating bottom disk called a pulsator. The simple and characteristic model was composed of a circular cylinder with impulsively rotating endwall disk and a viscous fluid in it. Rotational motion of the pulsator is periodic and alternative in rotation direction. The flow field in the interior region is governed by a horizontal boundary layer forms on the impulsively rotating disk. Experimental approach was accomplished by adopting an image processing technique for velocity measurements. Comprehensive details of the flow structure are presented. Also a meridional circulation is obtained by tracking image particles suspended in the fluid. Flow structure and data are successfully procured for this complex rotating flow field.

1. 서론

이 연구에서는 전자동 세탁기의 세탁조(洗濯槽, 혹은 탈수조) 내부에서 이루어 지는 유동을 연구 대상으로 하여 회전하는 펄세이터에 의한 유체 내부의 이차유동(secondary flow) 속도를 측정하였다. 방법론으로는 속도 측정을 위해 정량적 영상처리 기법을 활용하였다.

세탁조 내부의 유동은 잘 알려진 대로 세탁조 내부 바닥에 위치된 펄세이터(pulsator)의 갑작스런 회전운동에 의해 생성된 각운동량(angular momen-

tum)이 내부 유체로 전달되면서 형성되는 유동 형태이며, 매우 복잡하면서도 독특한 유동 양상을 나타낸다.

세탁조 내부의 유동을 포함한 회전유동의 시초적 연구는 1940년에 Bödewadt¹⁾가 그의 논문에서 제기한 유한한 크기의 회전 평판이 무한 영역의 유체내에 존재하는 경우의 경계층 문제에서 비롯되었다. 그 후 회전유동에 관한 연구는 최근까지 많은 실험연구²⁻⁴⁾와 수치계산이 수행되어져왔다.⁵⁻⁷⁾ 그러나 회전유동과 관련된 많은 선행연구 중 실험적 연구는 문제영역인 회전계가 전체적으로 회전 운동을 하고 있으므로 적절한 측정용 탐침(probe)의 설치가 극히 제한되는 매우 까다로운 작업이 된다.

일반적으로 유동장의 유속을 측정하기 위해 제안되는 방법은 동압(dynamic pressure)과 속도와의

* 대우전자 주식회사 가전연구소
 ** 유한전문대학 기계설계과
 *** 한국과학기술원 기계공학과

관계를 이용하는 피토크(Pitot-tube)에 의한 방법, 열선유속계(hot-wire anemometer), 그리고 레이저 유속계(Laser doppler velocimetry)를 이용하는 방법들이 있다. 그러나 세탁조 내부의 유동과 같이 유동이 등근 원통조 내부에서 이루어지며 더욱이 이 원통조의 일부 또는 전부가 회전하는 경우에 대해서는 속도 측정용 광선의 투과 및 정보 전달이 매우 영향을 받게되어 정확한 속도 측정이 불가능하게 된다. 또한 계측용 탐침의 사용은 고려한 실험계가 전체적으로 회전 운동을 하고 있기 때문에 더욱 곤란하다. 이 연구에서는 비접촉 방식이면서 정보전달이 회전운동과 독립적일 수 있는 측정 기법인 영상처리 기법을 이용하여 세탁조 내부의 순시속도를 성공적으로 측정하였다.

일반적으로 영상처리 기법의 공학적 개념은 화상의 인식에 관한 정보를 수치화하여 공학적 연구의 기초정보로 활용하는 일련의 컴퓨터 응용 방법론이며, 최근의 유체역학 연구자들에게 좋은 속도측정 도구로 각광받고 있는 분야이다.⁸⁻¹¹⁾

이 연구의 궁극적인 목표는 세탁기의 모델 유동장에 영상처리 기법을 적용하여 회전유동장의 속도분포를 획득하는 데 있다.

2. 본 론

이 논문에서 고려하고 있는 유동영역의 실제 기하학적 모습은 다음의 Fig. 1에 도시되어 있다. 문체 영역은 원통형 세탁조 (반경=R, 높이=h)와 반경 0.8R의 필세이터, 그리고 동점성계수 ν 의 작동유체인 물이 원통형 조를 채우고 있다. 유동장은 초기에 정지상태이며, 임의의 순간 부터 필세이터가 갑자기 회전하기 시작하여 일정한 각속도를 유지하게 된다. 이때의 회전 각속도는 Ω 로 일정하며 160 rpm으로 고정된다. 이 논문에서는 비정상상태(unsteady state)에서의 유동 상태에 관심을 두고 속도를 측정하였는데 갑자기 회전운동이 시작된 직후 부터 어느 일정시간 까지의 이차유동 속도를 측정하였다.

유동의 변수중 관심있는 것은 3방향 유속이다. 그림 1에서 표현되었듯이 좌표계는 (r, θ , z)이며, 대응되는 속도 성분은 (u, v, w)이다. 여기서 θ 는 회전방향의 접선을 따르는 좌표계이다.

2.1 실험

실험을 통해 측정할 유동 변수는 자오평면상(meridional plane)에서는 u, w 속도이다. 이를 위해 속도는 정량적 개념의 영상처리 기법을 활용하였다. 다음의 Fig. 2는 실험장치의 구성과 영상처리장치의 실험 장비 구성도를 보인다.

영상처리 기법을 사용하여 속도를 측정하는 경우에는 영상에 의존하는 방법이므로 정밀한 유동 가시화를 통해 기초적인 영상이 획득되어야 한다. 이를 위해 Fig. 3과 같은 실험 장치가 사용되었다. 유동의 가시화는 세탁조의 원통형 벽을 투명 아크릴(plexiglass)로 개조한 후 그 투명벽을 통해 평행광(slit-beam)을 사용하여 관심있는 범위의 영향을 제한적으로 획득할 수 있게 준비하였다. 부유입자(buoyant particles)는 폴리스틸렌이라는 수지중 형상이 구형에 가까우며 크기가 균일한 것을 선택하여

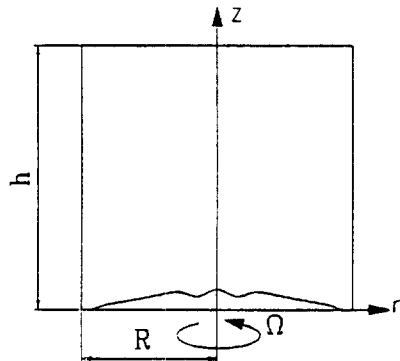


Fig.1 Schematic diagram of the present flow system

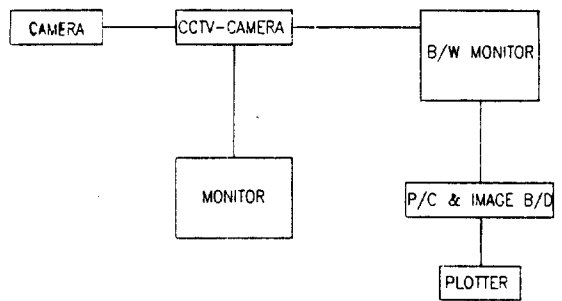


Fig.2 Arrangement of the image processing system

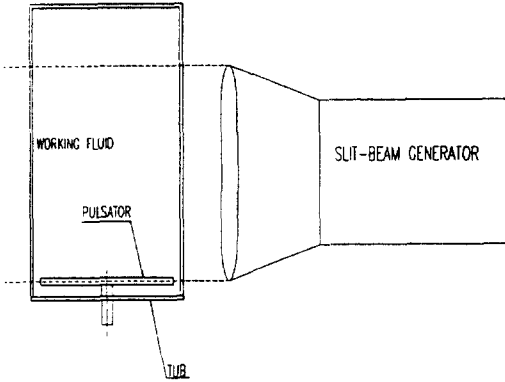


Fig.3 An experimental rig for image capture

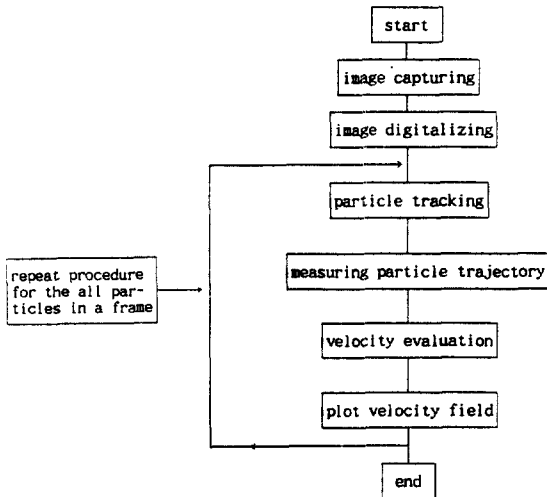


Fig.4 Flow-chart showing the used image process



Fig.5 Typical photograph displaying a meridional flow above the rotating pulsator

사용하였다.

영상처리 기법을 사용하여 유속을 측정할 때 가장 중요한 것들중의 하나가 부유입자의 선정인데 이 실험에서는 W. Merzkirch¹²⁾의 논문에서 제안된 입자 선택 방법에 의해 부유입자를 선정하였다. 부유입자의 선정시 항상 대립되는 두가지의 요구조건은 입자의 가시도(visibility)와 입자의 침전 속도가 반비례하기 때문에 나타난다. 부유 입자의 성격중 가장 중요한 것은 중립 부유성(neutral buoyance)인데 이는 입자의 침전 속도에 의해 가장 크게 방해 받게된다. W. Merzkirch가 정의한 입자의 침전 속도는 입자 직경의 3승에 비례하므로 입자가 크면 클수록 가시정도는 향상되나 침전속도가 증대되어 정도 높은 데이터의 획득이 불가능 해지게 된다. 사용된 부유 입자의 직경은 대략 10-200 μ m 이며, 비중은 1.02 정도 였다.

부유입자의 영상을 획득하기 위해 사용된 장비는 CCTV(Closed Circuit Television) 카메라를 사용하였으며, 획득된 영상은 영상처리용 보드를 사용하여 수치화(digitalizing)시킨 후 전산기의 하드 디스크에 저장하였다. 획득된 영상은 영상처리기법을 이용하여 로-패스 필터(Low-pass filter), 하이-패스 필터(High-pass filter)를 통해 노이즈를 줄인 후, 영상의 흑백대비를 극대화 시켜 작동유체 (이 경우에는는 물)와 부유입자만의 영상인 두값(binary digit)영상으로 전환시켰다. Fig. 4는 영상처리 과정을 표현하는 흐름도이다.

이와 같은 방법으로 획득된 유동의 가시화 사진을 Fig. 5에 나타내었다. 점선으로 표시된 선들은 연속된 복수개의 영상을 통해 구해진 입자의 궤적을 나타내며, 밝게 보이는 부분은 회전 수류관을 보이고 있으며, 어두운 부분은 유동 유체인 물이다.

부유입자에 의한 세탁조 내부 유동의 가시화는 자오평면(meridional plane)에서는 2차유동(secondary circulation)을 관측하고 이를 정량적으로 측정하기 위해 수행되었다. 이를 위해 투명한 세탁조 내부로 높이 20cm의 평행광을 측정하기 위해 수행되었다. 이를 위해 투명한 세탁조 내부로 높이 20cm의 평행광을 측면에서 두께 1mm 정도로 투과시켜 영상 획득을 위한 관심 영역을 제한하였다. 입자의 직경이 0.01mm 부터 0.2mm 이므로 한개의 영상에 이차원 속도를 나타내는 다수의 입자가

존재하게 된다. 이 경우 팽행관은 세탁조의 중심을 지나면서 일정한 두께의 밝은 띠 영역을 만든다. 이 때 밝아진 영역 내부에서 산란을 하는 부유 입자의 위치는 원통용기내의 물과 공기의 굴절률 차이에 의해서 확대되어 보이며 실제로 두 물질(물과 공기)의 굴절율비인 1.33배로 영상이 확대되어 보인다. 원통용기와 접하는 곳(중심축에서부터 용기 반경의 95%인 지점)에서의 입자는 거의 관측이 불가능 해진다.

부유 입자의 속도 측정은 두개 또는 여러개의 연속적인 영상에서 입자가 이동한 위치의 비교를 통해 이루어진다. 이 실험에서는 4개의 서로 연속된 영상에서 두값영상(binary image)을 중첩하는 기법에 의해 입자가 이동한 경로 및 거리를 추적하였다. 특히 모든 영상의 획득은 일정한 시간 간격을 갖고 이루어졌기에 입자가 이동한 거리를 측정함으로써 순시속도를 결정할 수 있었다. 실제로 이 실험에서의 영상사이의 시간간격은 1/30sec이며, 이개념의 속도 측정 방법은 CCTV 카메라의 노출 시간이 250msec이고, 한화상의 최대 실제길이가 28.3cm이므로 최대 약 100cm/sec까지는 유속의 측정이 가능하다. 아울러 광원의 두께가 1mm이고 최초, 최후 촬영 시간의 간격이 1/10초 이므로, 측정계 자체의 최대 측정 가능 속도는 1cm/sec이다. Fig. 6은 연속적인 영상사이의 시간에 대한 입자의 이동경로(trajecory path)를 나타내고 있다. 즉, 시간 t_0 에서의 입자위치 p_0 로부터 시간 t_3 에서의 입자위치

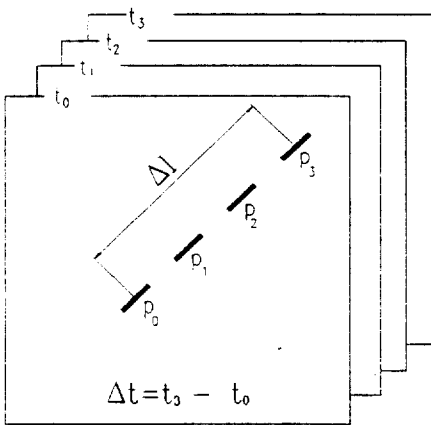


Fig.6 Particle trajectory in consecutive image frames

p_3 까지의 거리 l 을 측정하므로써 유동의 유속을 측정할 수 있었다.

유속의 측정을 위해 사용되는 영상 처리 기법에서는 유동장에 부유중인 입자의 인식 및 추적이 어려운 작업이다. 여기서 인식이라 함은 어느 임의의 영상에서 부유입자간의 구별이며, 추적이라 함은 연속된 복수개의 영상에서 고려하고 있는 어느 특정입자의 위치 파악을 의미한다. 따라서 입자의 인식이 한 개의 영상에서 이루어지며, 입자의 추적은 획득 시간이 다른 연속된 복수개의 영상에서 이루어진다. 이 실험에서 사용된 입자의 추적방법은 입자의 밝기를 이용하여 수행 되었다. 이 방법에서는 각각의 화소(畫素, Pixel)가 256가지의 밝기 구분을 가지며 또한 한 개의 영상에는 524×524 개의 화소로 그 해상도를 유지시켰다. 따라서 하나의 영상에서 부유입자 한개의 다수의 화소에 걸쳐 존재하게된다.

다음의 Fig. 7은 몇개의 화소에 걸쳐 존재하는 부유입자의 밝기를 표시하고 있다.

이와 같이 대부분의 입자는 복수개의 화소에 걸쳐 존재하기 때문에 입자의 평균크기와 가중 평균의 밝기를 가지고 입자를 구분·추적할 수 있었다. 그러나 어느 임의의 순간을 나타내는 영상이 항상 다수개의 입자를 포함하고 있고 입자의 추적에서도 4개의 연속된 영상이 사용되었으므로 많은 비교와 산술 연산이 필요했다. 입자의 평균 크기의 비교는 Fig. 7에 나타내었듯이 부유입자의 X방향과 Y방

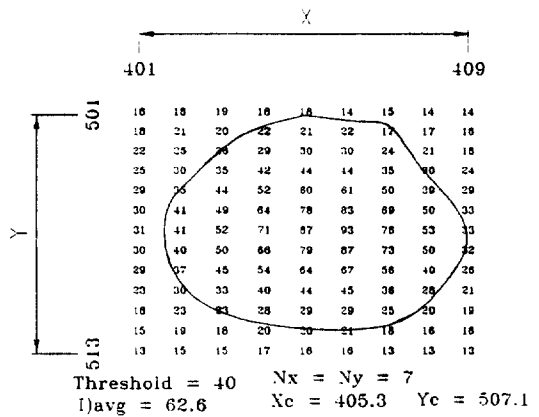


Fig.7 Brightness level around a suspending particle and its size on the pixel net

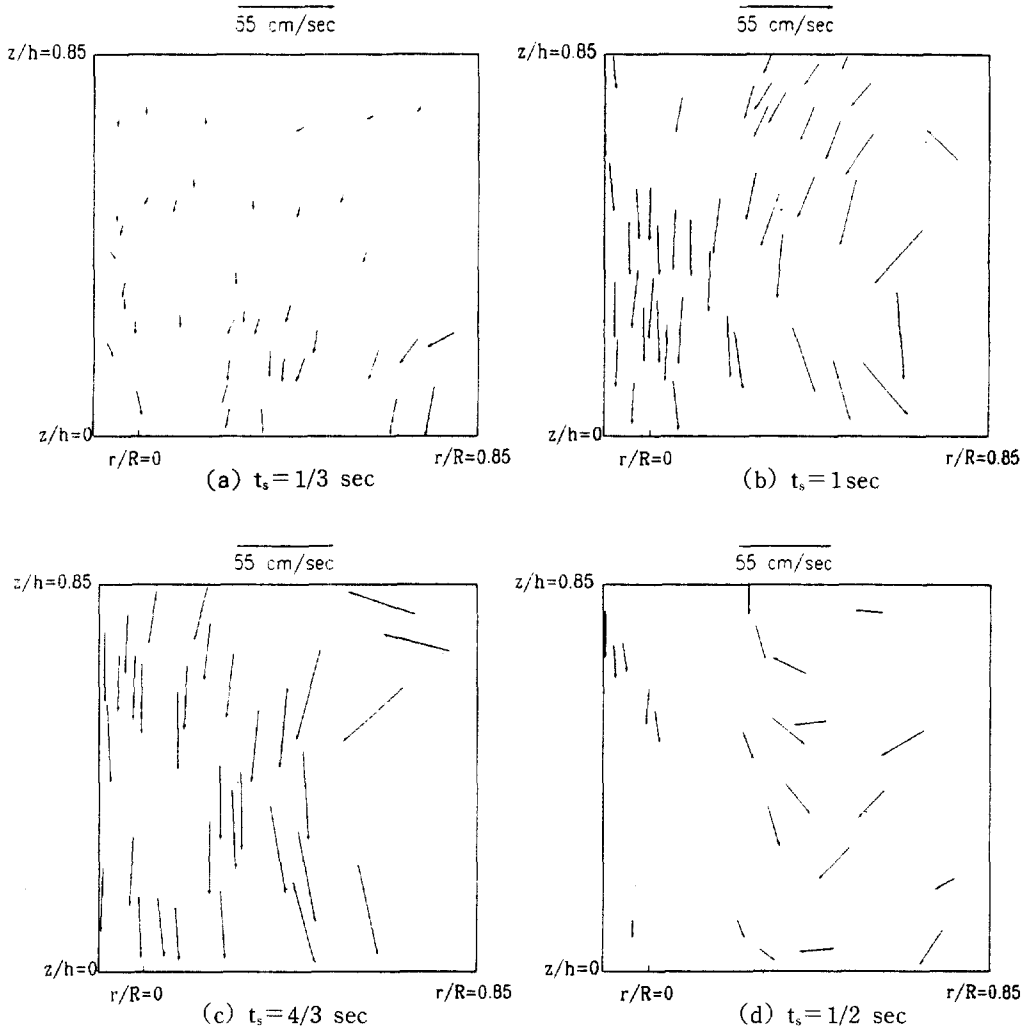


Fig.8 Velocity vector plots in the meridional plane in a rotating container. Times, t_s , present elapsed time from starting of the rotation. (Uncertainty in the velocity = $\pm 0.42\%$, in time = $\pm 0.05\%$)

향에 걸친 화소의 갯수를 비교하여 동일 입자의 확인에 사용되었다. 또한 입자의 밝기 비교를 통해 같은 크기의 입자를 다시 한번 더 확인하여 입자의 동일성 확보에 정도를 향상시켰다. 입자 구별시 이용된 전산처리는 수치화된 영상의 밝기를 읽어 들여 동일 밝기의 입자의 위치를 추적하는 개념을 사용하여 입자의 이동 거리(속도의 크기)와 이동 방향(속도의 방향)을 정도(精度)있게 결정할 수 있었다.

2.2 실험결과

유동장이 정량적 가시화를 통해 자오평면상의 이차유동장의 속도 분포를 시간에 따라 Fig. 8에 표시하였다. 그림에 표시된 속도벡터는 자오평면상에서의 이차원속도 u 와 w 의 합성속도이다. 그림에서 (a), (b), (c), (d)는 필세이터의 회전직후부터의 시간에 따른 자오평면상의 유동장의 변화 모습을 나타낸다. 그림에 표시된 무차원좌표 r/R 이

0인 위치는 회전축이며, z/h 가 0인 위치는 펄세이터의 고체면을 나타낸다. 펄세이터의 고체면은 편평한 면이 아니라 굴곡을 가진 곡면인데 그림의 $z/h=0$ 인 위치는 펄세이터의 가장 높은점을 나타내고있다.

그림에서 알수 있듯이 유동은 중심축에 가까울수록 축방향 속도(w)가 커지고 축에서 멀수록 반경방향 속도(u)가 영향을 크게 미치는 이차 유동을 형성한다. 물론 시간이 무한히 경과한 상태를 가정해 보면 자오평면상의 이차유동은 소멸되고 전 유동장의 각속도가 일정해 지는 고체 회전(solid-body rotation)이 나타날 것이다. 그러한 경향을 반영하듯 그림 8에 나타난 자오평면상의 이차유동의 크기는 회전후 4/3초에서 가장 왕성하여 시간이 더 경과한 회전후 2초(Fig. 8의 d)에서는 차츰 소멸되어감을 알수 있다.

자오평면상의 이차유동에 대해 시간에 따른 변화를 자세히 알아보기 위해 어느 특정 위치($r/R=0.45$, $z/h=0.45$)에서의 이차속도의 크기를 시간에 따라 측정해 보았다. 측정시간은 펄세이터의 회전 직후 1/3초 부터 2초까지 1/3초 간격으로 측정하였다. 위의 Fig. 9는 시간에 따른 이차속도의 크기를 나타낸다. 이차속도의 측정치는 차압계(Differential Pressure Transducer)를 이용하여 검출되었다. 차

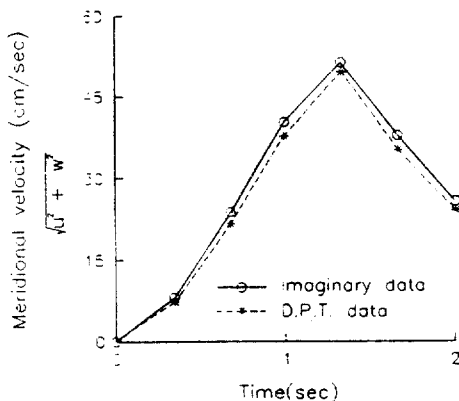


Fig.9 Transient behaviour of the meridional velocity at a point, Symbol, \circ show the velocity from imaginary data and symbols, $*$ from pressure transducer. (Uncertainty of the imaginary data in the velocity = $\pm 0.42\%$, in time = $\pm 0.05\%$)

압계의 양 끝단은 정지중인 유체와 운동중인 실험장치에 관설하여 순수 동압만을 측정하였다. 자오평면상에서 이차유동을 형성하는 것은 반경방향 속도(u)와 축방향 속도(w)이므로 Fig. 9에서는 그 두속도의 합성 속도로 표시하였다. 자오평면상의 이차유동의 크기는 펄세이터의 회전 직후 부터 증가된다. 실제로 Greenspan¹³⁾은 그의 저서에서 회전관위의 수평 경계층이 형성되기 까지의 시간을 회전 수류관이 1바퀴 회전하는 동안의 시간으로 제시하였는데, 그 시간이 우리의 문제 조건에서는 1/3초 정도이다. Fig. 9에서 1/3초에 해당하는 시간에 이차유동 속도가 급격히 증가됨을 알수 있는데 이는 경계층이 형성되어 경계층내에서 펌핑운동(pumping motion)이 시작되었기 때문이다. 따라서 우리의 속도 측정이 정도 있게 이루어졌음을 알수 있다. 시간에 따른 이차유동의 관찰에서 이차유동의 크기는 4/3초와 5/3초 사이에서 감소되기 시작하였는데 이는 Warn-vanas¹⁴⁾등의 논문에서 제시된 Propagating Velocity Shear Front의 위치와도 잘 일치되는 것이다. Warn-vanas 등에 의하면 비정상 회전 유동의 경우 shear front의 위치, R_s 는 다음 의식으로 주어진다. 즉, $R_s = \exp(-T)$, 이고 여기서 T 는 무차원 시간으로 실제 물리 시간 t_s 의 함수로 다음과 같이 표시된다. $T = E^{1/2} t_s (R/h) \Omega$ 이다. 이 식에서 E 는 Ekman수로 $E = \nu / \Omega R^2$ 로 정의된다. 이 식에서도 shear front의 위치는 시간의 지수함수로 초기시간에는 그 위치가 회전축쪽으로 빠르게 전진하는 것으로 나타난다. 또한 그림 9의 기울기도 초기시간에도 큰값이나 점차 그 기울기가 작아지는 것으로 나타나 Warn-vanas의 표현식과 일치함이 밝혀졌다.

3. 결 론

영상처리 기법을 사용하여 유동장의 순시 속도 분포를 알아냈다. 본 연구에서 고려하고 있는 유동장이 전체적으로 큰 레이놀드수(Reynolds number)로 회전하는 유동이므로 유동속도의 측정이 레이저속도측정법이나 피토관등의 방법으로는 성공적이지 못했다. 따라서 본 논문에서는 유동장에 영향을 거의 미치지 않는 영상처리 기법을 이용하여 선택조 모델 유동장에 대한 자오평면상의 이차유

동속도를 측정하였다. 실제적으로 유동의 속도에 교란을 적극적으로 배제한 가시화 입자를 사용하여 비정상적(unsteady)인 과정에서의 자오평면상의 이차유동 속도를 획득하였다. 이 논문에서 고려한 회전유동의 주요 특징은 회전하는 고체면에서 생성된 각운동량이 Ekman 경계층을 통해 내부 유체로 전달되는 것이다. 이 과정에서 운동량의 전달이 점성확산(viscous diffusion)에 의하지 않고 velocity shear front의 전파에 의존하므로 매우 빠르게 각운동량이 내부 유체로 전달된다.

본 논문에서는 회전하는 고체면에 의해 발생된 자오평면상의 이차유동의 크기를 비정상 상태에서 정량적으로 측정하였다. 자오평면상의 이차유동은 세탁효과에 큰 영향을 미치는 인자로 등장하므로¹¹⁾ 펄세이터의 급회전 직후부터의 이차 유동 측정은 매우 의미있는 측정이다. 측정결과에 의하면 Ω 로 회전하는 회전 수류관의 경우 $O(1/\Omega)$ 정도의 시간정도, 물리적으로 회전 수류관이 1바퀴 회전 하는 시간정도에서 Ekman 경계층이 형성되고 그 경계층에 의해 이차유동이 시작된다. 또한 이차유동은 회전후 4내지 5주기 후 가장 왕성하게 되며 그 이후로는 소멸되기 시작한다. 본 연구를 통한 유동자료는 mixing 효과 극대화에 관심이 있는 세탁 수류 연구에 기여할 수 있는 함축적 자료라 판단 된다.

후 기

논문의 내용이 보다 충실해지도록 감수해 주신 공기조화 냉동공학회 심사위원 여러분께 깊이 감사드립니다. 또한 본 논문은 유한전문대학 부설 산업과학기술연구소의 연구비 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

1. Bödewadt, U.T., 1940, "Die Drehströmung über festem Grund", ZAMM, Vol.20, pp.214-253.
2. Choi, S., Kim, J.W., and Hyun, J.M., 1991, "Experimental investigation of the flow with a free surface in an impulsive rotating cylinder", ASME J. Fluids engineering, Vol.113, pp.245-249.
3. Weidman, P.D., 1976, "On the spin-up and spin-down of a rotating fluid. Part II : Measurements and stability", J. Fluid Mechanics, Vol.77, pp.685-735.
4. Dijkstra, D., and Heijst, G.J.F., 1983, "The flow between two finite rotating disks enclosed by a cylinder", J. Fluid Mechanics, Vol.128, pp.123-154.
5. Kitchen, C.W. Jr., 1980, "Navier-stokes equations for spin-up in a filled cylinder", AIAA Journal, Vol.18, pp.929-934.
6. Weidman, P.D., 1976, "On the spin-up and spin-down of a rotating fluid. Part I : Extending the Wedemeyer model", J. Fluid Mechanics, Vol.77, pp.685-735.
7. Hyun, J.M., and Park, J.S., "Spin-up from rest of a compressible fluid in a rapidly rotating cylinder", J. Fluid Mechanics, Vol.237, pp.413-434.
8. Hesselink, L., 1988, "Digital image processing in flow visualization", Ann. rev. Fluid Mech., Vol.20, pp.421-485.
9. Adrian, R.J., 1991, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", Ann. rev. Fluid Mech., Vol.23, pp.261-304.
10. Adamczyk, A.A. and Rimai, L., 1988, "2-Dimensional particle tracking velocimetry technique and image processing algorithm", Experiments in Fluids, Vol.6, pp.373-380.
11. 한국과학기술원, 1993, "최종보고서, Ekman layer가 존재하는 세탁수류내의 무작위 현상도출의 영상 처리 기법에 의한 연구", pp.1-72, (연구책임자 : 현재만)
12. Merzkirch, W., 1987, *Flow visualization*, 2nd edition, Academic press.
13. Greenspan, H.P., 1968, *Theory of rotating fluids*, Cambridge university press.
14. Warn-varnas A., Fowles W.W., Piacsek S., and Lee, S.M., 1978, "Numerical solutions and laser-Doppler measurements of spin-up", J. Fluid Mechanics, pp.609-639.