

유동장의 이동속도측정을 위한 가시화 및 영상처리 방안

안은영[†], 김재원^{**}, 한상훈^{***}

요 약

점성 유체를 담고 있는 실린더가 회전운동을 시작하면 회전 원판의 원심력과 에크만 펌핑 효과에 의해 실린더 외벽의 각운동량이 유체에 전달되는 과정에서 자오면상의 유동이 생기게 되고, 이 때 유체의 특성에 따라 유동장의 운동량 획득 특성이 다르게 나타나게 된다. 본 연구에서는 뉴턴 유체와 비-뉴턴 유체의 유동장 획득에 대한 정보를 가시화 영상에서 검출하고 이를 기반으로 유체의 특성을 분석하는 방법을 제안한다. 영상으로부터 운동량이 가장 크게 변화하는 전단면(shear front)의 위치를 알아내기 위해서, 유체의 운동량이 영상에서의 밝기정보로 나타나도록 실험환경을 구성한다. 입력 영상으로부터 유체의 운동량과 흐름을 가시화 할 수 있도록 가시화 매개 물질을 사용하여 영상을 획득하고, 영상에서 에크만 경계층의 전단면을 찾아내어 이동거리를 계산함으로써 유체의 특성을 분석하는 방안을 제시한다. 또한 유동장에 대해, LDV(Laser Doppler Velocimetry)로 측정된 값과 영상으로부터 얻은 값을 비교함으로써 제안된 방법에 대한 정확성을 검증하고, 검증된 데이터를 기반으로 비-뉴턴 유체와 뉴턴 유체에 대한 특성을 분석한다.

Visualization and Image Processing for Measurement of Propagational Velocity of Shear Front

Eun-Young Ahn[†], Jae-Won Kim^{**}, Sang-Hoon Han^{***}

ABSTRACT

The circulation flows passing through the Ekman boundary layer on the rotating disk and transfer the angular momentum into the interior region of the container. Consequently, the circulation enhances the momentum transfer and the interior fluid is divided by a propagating shear front. This investigation focuses on computer vision and image processing technique for analysis of Non-Newtonian Fluids. To visualize marching velocity shear front for the transient flow, a particular shaped particles and light are used. To validate the proposed method, quantitative image are compared with the optical data acquired by a direct measurement of LDV (Laser Doppler Velocimetry).

Key words: Visualization of Shear Front(유동장 가시화), Segmentation(영역분리), Spot Detection(입자검출), Snell's Law(스넬의 법칙)

※ 교신저자(Corresponding Author) : 안은영, 주소 : 충남 천안시 안서동 115번지(740-330), 전화 : 041)550-0506, FAX : 051)550-9017, E-mail : ahnyoung@cheonan.ac.kr
접수일 : 2005년 3월 11일, 완료일 : 2005년 5월 14일

[†] 종신회원, 천안대학교 정보통신학부 교수

^{**} 선문대학교 기계공학부 교수

(E-mail : jwk@sunmoon.ac.kr)

^{***} 정회원, 한국재활복지대학 정보보안과 조교수

(E-mail : shhan@hanrw.ac.kr)

1. 서 론

회전 유체와 관련된 해석적 연구는 1964년 Wedemeyer에 의하여 본격적으로 논의되기 시작되었다. 그의 모델은 반경이 R인 원통형 용기에 점성 계수가 ν 인 유체가 채워진 단순한 형태이다. 어떤 시간에서 갑작스런 용기만의 회전 각속도의 변화 ($\Omega \rightarrow \Omega + \Delta$

Ω)가 일어날 때, 용기 내부의 유동 유체는 용기 고체면의 회전에 의해 회전운동을 얻게 되는데 이러한 과도적(transient) 현상을 스핀-업(spin-up)이라고 한다. 스핀-업 유동의 가장 큰 특징 중의 하나는 그 과도 유동이 진전되어 강제 운동으로 귀결되는 과정에서 유동장에는 매우 강력한 Ekman층(또는 shear layer)이 존재하며 이 Ekman층이 각 운동량(angular momentum) 전달의 주요 역할을 담당한다는 사실이다. 이와 같은 물리 현상은 기상학과, 지구물리학 그리고 천체물리학에서 중요하게 다뤄지고 있을 뿐만 아니라 유체기계를 포함한 산업현장에서도 흔히 관찰할 수 있다.

페인트나 윤활유 등의 비-뉴턴 유체들은 뉴턴 유체들과 달리 전단응력 강도(shear stress)와 유체의 전단률(shear rate)과의 관계가 비선형적인 특성을 갖는다. 다시 말해서, 유동 조건에서 비-뉴턴 유체는 매우 극적인 점성력의 변화를 보이게 되는데 그림 1에서 보는 바와 같이 전단률이 증가할수록 점성도가 빠른 속도로 감소하는 성질의 유체를 Shear-Thinning Fluid라 하고, 전단률의 증가에 따라 전단응력이 감소하는 유체를 Shear-Thickening Fluid라 한다.

이러한 비-뉴턴 유체의 성질을 고려하여 스핀-업 유동에 대한 연구는 매우 드문 반면, 유턴 유체에 대한 스핀-업 유동에 관한 연구는 계속 진행되어 왔다. 유턴 유체를 작동 유체로 스핀-업에 대한 관련 연구로, 선형 문제에 대한 해석은 1965년 Greenspan & Weinbaum으로부터 시작되어 1975년의 St. Maurice & Veronis에 까지 이어졌으며, 비선형 또는 준 비선형 (weakly non-linear) 문제는 Greenspan & Howard (1963)부터 Konijnenberg & Heijst(1995)에 까지 방법론을 달리하거나 또는 연구의 초점을 변화 시키면서 연구가 진행되었다[5,6,7]. 그러나 이들 선행 연구들의 관심은 뉴턴 유체의 스핀-업에 관한 선형/비선형 연구와 비교될 뉴턴 유체의 스핀-업 문제에 대한 연구로 모두 귀결되며 비-뉴턴 유체의 스핀-업 문제에 대한 연구는 지극히 미비하여 가정된 점성 유체 모델에 대한 근사해석이 Siginer(2004)에 의해 보고되고, Kazakia & Rivlin(1981)에 의해 수학적 근사해가 제안된 점성 모델에 대해 보고된 정도이다. 또한, 이들 선행 연구의 문제점은 대부분이 제한된 환경을 가정하여 수치 해석적 방법으로 해를 구하기 때문에 유체의 물리현상을 완전하게 반영하지 못한다는 것이다. 따라서 그 결과를 실제 산업분야에 적용하기에 어려움이 있다.

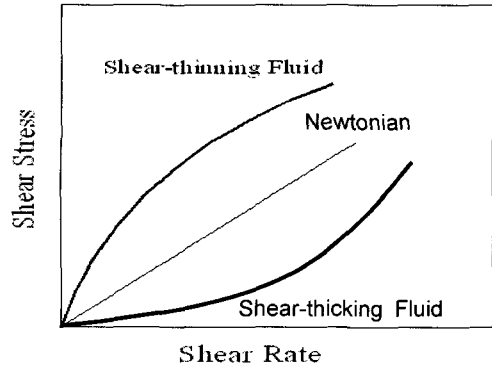


그림 1. 유체의 전단률에 따른 점성도 변화

본 연구에서는 이러한 선행연구의 제약점을 보완하기 위해 실험적 방법을 이용하여 비-뉴턴 유체에 대한 물리적 특성을 규명하고자 하며, 이를 위해 유동영역을 영상정보로 획득하고 획득된 영상에서 유체의 전단 경계면의 모습과 그 전진 속도를 측정함으로써 유체의 특성을 분석하는 새로운 방안을 제안하고자 한다. 영상으로부터 전단경계면의 위치를 알아내기 위해서는 유체의 운동량의 변화가 영상의 밝기 정보로 표현되도록 하면 된다[1]. 따라서 본 연구에서는 유체의 흐름에 대한 이러한 통찰을 기반으로 입력 영상으로부터 유체의 운동량과 흐름을 가시화할 수 있도록 특수 부유물을 사용하여 영상을 획득하고 영상에서 전단면을 찾아내어 이동거리를 계산함으로써 유체의 특성을 분석한다.

비-뉴턴 유체 중에서도 산업계에 광범위하게 사용되어 유용성이 높은 shear- thinning 유체 중 폴리머(polymer) 용해액을 대상으로 운동량 전달 특성을 분석 한다. 2장에서는 폴리머(polymer) 용해액을 실험대상으로 하여 영상의 획득과 처리 방법에 대해 설명한다. 또한 정확한 측정값을 얻기 위해서 빛의 굴절로 생기는 영상의 왜곡을 보정하기 위한 방안을 제시한다. 영상처리로부터 얻은 비-뉴턴 유체의 전단 경계면(shear front)의 거동에 대한 분석결과와 LDV 장비를 이용하여 얻은 결과를 비교하여 타당성을 검증하고 끝으로 영상정보로부터 얻은 결과를 기반으로 유체의 특성을 분석한다.

2. 유동장의 전단경계면 검출

2.1 실험환경

일반적으로 영상의 음영값은 광원의 종류와 표면

의 성질 및 이들간의 상호작용 등 다양한 요소에 의해 결정된다[9]. 그러나 실험에서는 영상으로부터 전단경계면의 위치를 알아내기 위해서 유체의 운동량 변화가 영상의 밝기정보로 표현되도록 영상의 음영을 결정짓는 요소를 단순화하기 위해 그림 2와 같은 실험조건을 구성한다[1].

회전용기와 유체를 담은 실린더, 카메라 장치, 그리고 컴퓨터를 위치시킨다. 회전판은 정밀하게 제어 가능한 AC 서보(servo) 모터로 구동된다. 제어기는 모터로부터 인버터를 통해 들어오는 신호를 감시해서 회전속도를 일정하게 제어한다. 회전판은 ± 0.1 퍼센트 범위 안에서 속도를 유지하며, 회전을 시작하지 0.012초안에 설정한 회전속도에 도달한다. 회전판위에 투명한 아크릴 재질의 실린더를 고정시킨다. 정밀한 측정을 위해 회전판은 수평을 유지하고 실린더는 회전판의 중앙에 회전판과 수직으로 위치하게 한다.

레이저 빔은 왼쪽에 카메라와 수직방향으로 놓이도록 한다. 폴리머 유체는 전단 경계면의 전파가 빠르게 일어나기 때문에 촬영속도를 높이기 위해 빛을 강하게 조사하도록 한다. 전단 경계면을 가시화 하기 위해 Greenspan(1968)이 제안한 디스크 모양(disk-like particles)의 알루미늄 재질 부유물을 사용하여 기초 영상을 획득한다. 부유물들은 회전운동이 전혀 없을 때에는 임의의 방향을 향하고 있지만 전단 경계층에 놓이게 되면 전단력에 의해 입자들은 일정한 방향으로 정렬하게 된다. 따라서 유체의 움직임이 없는 곳에서는 빛을 산란시키지만 유체의 움직임이 있는 곳은 부유물이 빛과 수직방향으로 놓이게 됨으로써 들어오는 빛을 차단하게 되고 그 결과, 영상에서 어둡게 나타나게 된다.

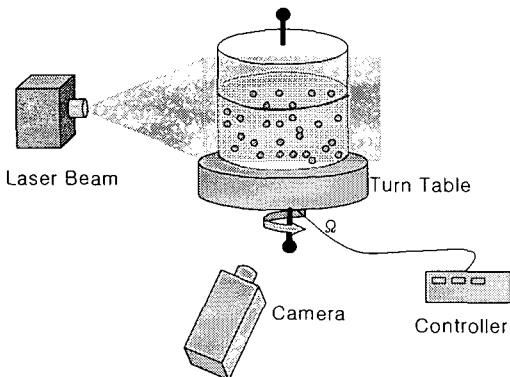


그림 2. 유체분석 시스템의 개요도

2.2 전단면 이동속도의 가시화

그림 3-(b)에 보이는 바와 같이 회전운동이 전달되는 유동장내의 부유물은 유체가 회전하고 있는 방향을 향하게 된다. 획득된 영상은 부유물의 정렬 상태변화로 인해, 유체의 움직임이 일어나는 구간과 움직임이 없는 구간 간의 밝기의 차이가 발생한다. 따라서 영상의 밝기가 급격하게 변화되는 위치를 찾아냄으로써 시간에 따른 전단 경계면의 전파 특성을 분석할 수 있게 된다.

영상에서 전단 경계면을 찾기 위해서는 먼저 영상에서 입자(spot)를 분리하는 과정이 필요하다. 영상으로부터 유용한 정보를 추출하기 위하여 필터링 과정과 경계면 검출(edge detection)과정을 수행하는 것이 일반적이다[8]. 그러나 이 과정에서 정보의 손실이 불가피하며 여전히 잡음도 남아 있게 된다. 본 연구에서는 영상의 채널분리를 통해 얻어진 여러 개의 채널 중에서 신뢰성 있는 대역에서 필요한 정보를 전처리 과정 없이 검출함으로써 정보의 손실을 최소화한다. 유동장에 관한 영상에서는 빛의 반사량이 많아 밝게 빛나는 부분들이 입자들의 위치가 되는데 입자들의 분포로부터 전단경계면을 구하기 때문에 입자들을 분리하는 초기 과정이 중요하다. 그림 4는 영상으로부터 전단 경계면을 찾아내기 위한 과정을 설명한 것이다.

획득된 영상의 밝기정보만을 단순히 이용하는 경우에는 입자정보를 효과적으로 추출할 수 없다. 컬러 정보는 Red, Green, Blue의 세 개의 대역에서 각각 입자분리가 가능하므로 영상을 획득할 때 RGB중 하나의 색을 배경광으로 사용하면 RGB 채널 분리를 통해 효과적으로 잡음과 배경광을 제거하고 입자영상만을 얻을 수 있다. 그러나 실험대상으로 사용된

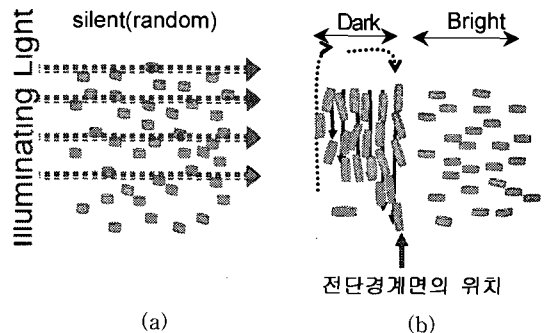


그림 3. 유동장의 변화에 따른 입자 상태: (a)초기상태, (b) Δt 이후 유체상태.

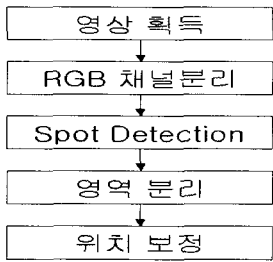


그림 4. 전단 경계면의 검출 과정

폴리머 용해액은 매우 빠르게 움직이기 때문에 촬영 속도를 감안하여 배경광으로 강한 빛을 사용하게 된다. 따라서 채널분리만으로는 배경이나 잡음을 제거하기 힘들다. 본 연구에서는 컬러 영상에서 RGB 채널을 분리하고 분리된 채널을 각각 쌍으로 하여 AND 연산한 결과 값이 높게 나타나는 컬러대역에서 입자를 추출함으로써 잡음이나 배경광을 효과적으로 제거한다[2].

실린더 내에서 입자들의 움직임을 포착하기 위하여 밝게 빛나는 입자들을 찾아 그 입자들의 누적 그래프를 이용하여 입자들이 분포되어 있는 영역을 검출한다. 그림 5-(a)는 실린더에 회전운동이 전혀 없을 때의 영상이다. 입자들이 실린더 안에 고르게 분포되어 있음을 볼 수 있다. 그림 5-(b)는 회전운동이 어느 정도 진행된 상태에서 획득된 영상물로서, 회전운동량이 유체에 전달되는 과도적 현상에서 생기는 전단층(shear layer)이 영상의 경계면으로 나타남을 확인할 수가 있다.

입자 검출(Spot Detection)

유동장의 흐름을 분석하기 위해서는 부유물의 움직임을 살펴보면 되는데 부유물은 빛을 강하게 반사하는 알루미늄 입자이기 때문에 입력 영상에서 밝은 부분만을 검출하면 된다. 그림 6에서처럼 한 픽셀을 중심으로 일정한 반경안의 밝기 값이 임계치를 넘는 화소들의 뭉치(blob)를 입자(spot)로 정의하며, 영상에서 입자를 찾아냄으로써 부유물들의 움직임 정보를 검출한다[3].

입자의 위치는 (1)에 의해 구하게 된다. $S(x,y)$ 는 일정 영역안의 픽셀들의 밝기평균이 되며, 그림 7은 $S(x,y)$ 각 임계치 이상이 되는 입자정보를 구한 결과이다.

$$S(x, y) = \frac{1}{NM} \sum_{x=0}^N \sum_{y=0}^M f(x, y) \quad (1)$$

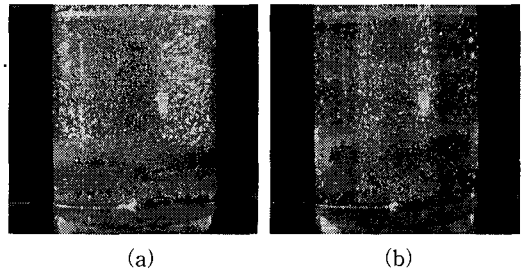


그림 5. 입력 영상: (a) 초기영상, (b) Δt 이후 영상.

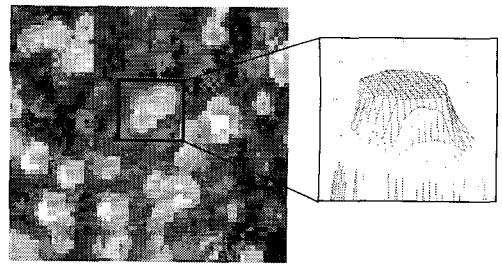


그림 6. 입자에 해당하는 화소

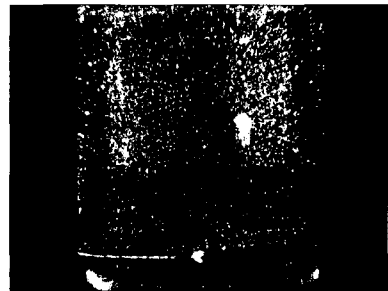


그림 7. 입자 검출 결과

영역 분리

앞에서 구해진 S 영상에서 (2)와 같이 수평, 수직 투영(projection)을 이용하여 실린더의 경계면을 추출하고, 수직 누적 그래프를 이용하여 전단면의 후보 영역을 추출한다.

$$P(x) = \sum_y S(x, y), \quad P(y) = \sum_x S(x, y) \quad (2)$$

회전하는 실린더의 특성상 전단면의 위치는 반드시 대칭적으로 나타나는 성질을 가지므로 두 개의 영역의 시작점과 끝점이 실린더의 중심에서 대칭이 아니면 전단면의 위치정보로 사용될 수 없다. 따라서 횡축 투영에서 실린더 중앙에 대칭으로 나타나는 두 개의 영역이 있는지를 검사한다[3].

그림 8과 같이 하단에 표시된 그래프가 횡축으로의 누적 값을 나타낸 것이며 이것은 실제로 전단면을 찾는 정보로 사용된다.

영역 분리는 실린더의 경계면을 찾아 경계면 사이의 누적 값의 평균을 구하여 평균을 초과하는 지점의 영역을 추출한다. 이 때 추출되는 영역들에 대하여 근접한 영역은 병합하고 작은 영역은 제거한다. 그리고 서로 실린더의 중심에서 대칭되는 영역의 쌍을 찾는다.

그림 9(a)에 보이는 바와 같이 여러 개의 후보 영역 중에서 대칭이 되는 영역 쌍 들이 여러 개 나오는 경우에는 왼쪽 영역의 수평 누적 값의 분포가 균일한 영역을 선택한다. 이는 빛을 왼쪽에서 조사하기 때문이다. 그리고 그림 9(b)에서도 왼쪽 영역의 시작점 위치를 전단면의 위치를 나타내는 경계로 삼는다. 회전의 이동거리는 실린더의 경계에서 피크의 시작 위치까지의 거리가 바로 이동거리가 된다. 수평 누적 값은 입자가 고르게 분포되어 있는 영역에 대해서만 횡축 투영을 취하도록 함으로써 측정값의 신뢰도를 높이는데 사용된다.

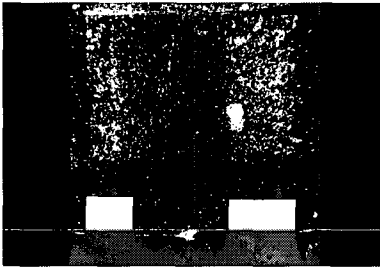


그림 8. 후보 영역의 검출

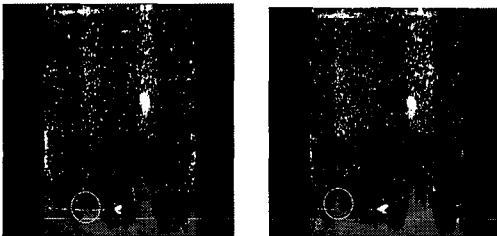


그림 9. 실린더의 경계와 전단면 검출 결과

3. 위치보정

영상처리로부터 찾아낸 이동거리 I 는 실제 전단면

(shear front)과는 차이가 있다. 빛이 실린더 밖의 공기로부터 실린더를 통과해 유체까지 가는 동안 굴절이 일어나기 때문인데, 이를 보정하여야만 정확한 이동거리 X 를 얻을 수 있다. 그림 10에서 α 는 실린더로 들어가는 조명광선의 입사각을 의미하는데, 실린더 안의 유체에 의해 굴절이 발생한다. ρ 와 $\rho+k$ 는 각각 굴절 없이 빛이 투과되었을 때와 굴절되어 투과되었을 때의 기울기를 나타낸다.

영상으로부터 얻은 위치 I 로부터 보정된 전단면의 정확한 위치는 다음과 같은 방법으로 계산한다. 공기 중의 광선의 방향은 $\rho = \alpha = \sin^{-1}(\frac{I}{R+\delta})$ 이며 실린더 안의 유체가 무엇인지 알고 있으므로 Snell의 법칙 $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n = 1.53$ 에서의 n 값을 알 수 있다. 이에 따라 β 각은 (3)에 의해 구할 수 있다.

$$\beta = \sin^{-1}(\frac{I}{n(R+\delta)}) \tag{3}$$

또한, $\gamma = \beta + k$ 이며 $k = \sin^{-1}(\frac{\delta \tan \beta}{R})$ 이다. 추가적으로 실린더 재질인 표면 강화 유리(plexyglass)는 폴리머보다 밀도가 높기 때문에 유체로 들어가는 입사각은 굴절각 θ 보다 작으며, 관계식 $n \sin \gamma = m \sin \theta$ 이 성립한다. 여기서 n 은 플렉시 유리의 굴절률이며 m 은 폴리머의 굴절률이다. 여기서 θ 는 (4)에 의해 구할 수 있으며 이로부터 수정된 전단면의 위치 X 를 (5)에 의해 구한다.

$$\theta = \sin^{-1}(\frac{n}{m} \sin \gamma) \tag{4}$$

$$X = \frac{R \sin \theta}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha + k - \theta)} \tag{5}$$

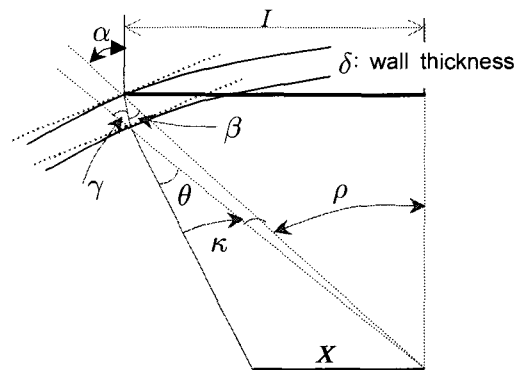


그림 10. 굴절률에 의한 굴절면의 위치보정

4. 실험 및 고찰

영상처리를 통한 유체의 운동량 이동 속도 측정시스템의 성능을 검증하기 위해 LDV로부터 직접 얻은 데이터와 비교분석을 수행하였다. LDV는 매우 정교한 유속 측정 장치로 모든 영상 데이터는 LDV 데이터와의 일치여부로 정확성을 검증할 수 있다. LDV의 실험환경을 위해, 레이저 빔이 실린더의 밑바닥을 통과하도록 하고 레이저 빔이 실린더의 측벽을 통과하지 못하도록 설정한다[4]. 그림 11은 영상처리에 의한 전단면의 위치와 LDV로부터 직접 얻은 데이터를 비교한 결과이다. 이는 LDV 측정치를 나타내고 ◊는 영상처리를 통해 얻은 측정치를 나타낸다. 그림 11의 (a)는 실린더 반지름의 0.5의 위치에서 유동장의 이동과 그로 인한 영상의 밝기 변화를 표시한 것이다. 이로써 유체내의 어느 한 위치에서 볼 때, 유체내의 회전운동량의 전과가 영상에서 밝기가 변화로 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 11의 (b)는 반지름 영역내의 모든 범위에서 전단면에 대한 LDV 데이터와 영상으로부터 얻은 데이터가 일치하는 것을 보이는데, 이로써 영상의 밝기가 급격하게 변화하는 경계를 찾아냄으로써 유동장의 전단면을 정확하게 구분해 낼 수 있음을 알 수 있다.

그림 12는 제안된 방법의 유용성을 보이기 위한 것으로, 비뉴턴 유체와 뉴턴 유체에 대해 각각의 특성을 분석한 결과이다. 비-뉴턴 유체인 폴리머 용해액은 회전운동이 진전됨에 점성도가 현저하게 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 점성도가 물에 비해 높기 때문에 회전운동이 내부까지 완전히 전달되기 위해서는 물보다 많은 시간이 필요함을 알 수 있다.

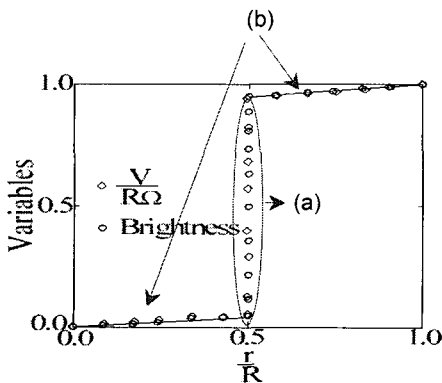


그림 11. 측정치 비교

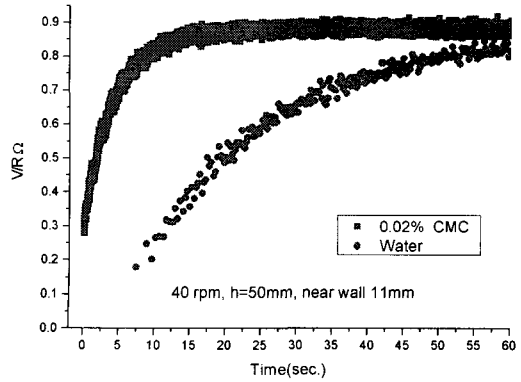


그림 12. 뉴턴 액체와 비-뉴턴 액체의 비교

5. 결 론

본 논문에서는 영상을 통해 유체의 특성을 분석하기 위한 가시화 및 영상처리 방안을 제안하였다. 영상으로부터 회전 운동하는 유체의 전단면 위치를 알아내기 위해서는 유체의 운동량의 변화를 영상의 밝기정보로 표현되도록 하면 된다. 따라서 본 연구에서는 유체의 흐름에 대한 이러한 통찰을 기반으로 입력 영상으로부터 유체의 운동량과 흐름을 가시화할 수 있도록 특수입자를 사용하여 영상을 획득하였다. 전단면에서 입자들은 조사되는 빛을 차단하게 됨으로써 운동량이 가장 많은 전단면의 위치에서 밝은 영역과 어두운 영역으로 이분되는 특성을 갖는다. 따라서 영상의 밝기 정보를 기반으로 하여 전단면의 이동거리를 계산함으로써 회전운동에 대한 유체 특성을 분석할 수 있었다. 또한 스넬의 법칙을 이용하여 굴절로 인한 왜곡을 보정함으로써 전단면의 정확한 위치를 찾아낼 수 있었다. 제안된 방법의 유용성을 입증하기 위하여 영상으로부터 얻어낸 정보에 기반하여 유체의 특성을 분석하였다. 분석결과, 비-뉴턴 유체인 폴리머 용해액에 대한 유용한 정보를 획득할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] J.W. Kim and E.Y. Ahn, "Propagating Velocity Shear Front in a Rotating Cylinder," *Int'l Conf. on Advanced Optical Diagnostics in Fluids, Solids and Combustion*, Tokyo, Japan, V0302, 2004.
 [2] John C. Russ, *The Image Processing Handbook*

3rd Ed., CRC Press, 371-394. 1999.

- [3] Luciano da Fontoura Costa, Roberto Marcondes Cesar Jr. *Shape Analysis and Classification Theory and Practice*, CRC Press, pp. 421-466. 2001.
- [4] Choi, S., Kim, J. W., and Hyun, J. M., "Transient free surface shape in an abruptly-rotating, partially-filled Cylinder," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 11, pp. 431. 1990.
- [5] Wedemeyer, E.H., "The unsteady flow within a spinning cylinder," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 20, pp. 338. 1964.
- [6] Greenspan, H.P., *The Theory of Rotating Fluids*, Cambridge University Press, Cambridge. 1968.
- [7] Greenspan, H.P. and Howard, L.N., "On a time dependent motion of a rotating fluid," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 17, pp. 385. 1963.
- [8] Olivier Faugeras, *Three-Dimensional Computer Vision*, MIT Press. 2001.
- [9] Philip Dutre, Philippe Bekaert, and Kavita Bala, *Advanced Global Illumination*, AK Press, pp. 273-284. 2003.
- [10] Rafael C. Gonzalez, *Digital Image Processing Using MATLAB*, Prentice Hall, pp. 484-498. 2004.



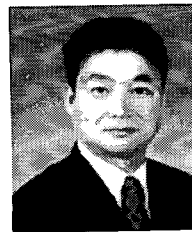
안 은 영

1989년 동국대학교 전자계산학과 졸업(학사)
 1991년 동국대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(공학석사)
 1999년 동국대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(공학박사)
 1994년~1999년 사람과 기술 대표
 2000년~현재 천안대학교 정보통신학부 교수
 관심분야: 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 비전, 게임프로그래밍, 컴퓨터 애니메이션



김 재 원

1985년 항공대학교 항공기계공학과 졸업(학사)
 1987년 KAIST 기계공학과 졸업(공학석사)
 1991년 KAIST 기계공학과 졸업(공학박사)
 1990년~1995년 대우전자(주) 선임연구원
 1991년~1992년 스웨덴 왕립공대 초빙연구원
 1995년~현재 선문대학교 기계공학부 교수
 관심분야: 영상처리, 회전유동, 수치해석, 유체기계



한 상 훈

1990년 동국대학교 전자계산학과 졸업(학사)
 1995년 동국대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(석사)
 2002년 동국대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(박사)
 2003년~현재 한국재활복지대학 정보보안과 조교수
 관심분야: 정보보호, 형태인식, 컴퓨터 비전, 멀티미디어