

사이드 채널형 재생블로워의 내부 유동 가시화

양현모^{*†} · 이경용^{**} · 최영석^{**} · 정경석^{***}

Visualization of Flow inside the Side Channel Type Regenerative Blower

Yang Hyeonmo^{*†}, Lee Kyoung-yong^{**}, Choi Youngseok^{**}, Jeong Kyungseok^{***}

Key Words : Regenerative Blower(재생형 블로워), Circulatory Flow(순환 유동), Flow Visualization(유동가시화), Direct Injection(직접 분사), Tracer Method(색소유맥법)

ABSTRACT

Visualization of internal flow of a regenerative blower has been made by injecting a tracer directly into the flow. For the convenience of visualization, working fluid has been replaced by water and marbling color oil has been used as a tracer. Oil droplet has been injected near the inlet of the blower and the streak has been recorded using a high speed camera with the illumination of high power light sources. At first, droplets have irregular motion in the near inlet area and enter into a groove of the impeller. Then the droplets circulate inside the groove while translated by the rotational motion of the impeller. When the droplets get out of the impeller groove, their speed is lower than that of impeller. And the droplets repeatedly enter into the groove and circulate inside the grooves. Then the droplets either flow to the outlet or reenter into the inlet area through stripper. Through this experimental study, internally circulating motion of the flow inside a regenerative blower has been characterized.

1. 서 론

낮은 유량범위에서 높은 압력상승을 얻는데 유리한 방식의 재생형 유체기계(regenerative turbomachinery)는 유체기계를 구분하는 비속도(specific speed)로 보면 저비속도에 해당된다. 재생형 유체기계는 고압/저유량으로 대표되는 용적형(displacement type)과 원심형(centrifugal type)의 중간에 해당되며 작동방식은 원심형에 가깝다. 따라서 재생형 유체기계는 용적형과 같이 작동유체를 고압으로 이송하는 것이 가능하며 동시에 유지보수, 유체의 맥동 및 기계의 수명과 같이 용적형에서 발생하는 단점을 보완할 수 있다. 재생형 유체기계는 원심형과 비교하면 효율적인 측면에서 부족한 면이 있으나 동일 성능(유량 및 압력)에 대해 저회전수로 구현이 가능하다는 장점이 있어 신뢰성과 내구성이 중요시되는 우주항공, 자동차 및 신재생에너지 분야에 광범위하게 적용되고 있다.

최근까지 진행된 연구는 대부분 재생형 유체기계의 성능향을 위해 임펠러(impeller) 및 채널(channel) 형상을 변화하고 이로 인한 성능변화를 분석하는 연구가 대부분이었다.^(1~2) 단지 대상의 차이(개수로형 또는 사이드 채널형)나 분석 방법(실험 또는 CFD)의 차이가 있을 뿐 재생형 유체기계의 핵심이라고 할 수 있는 내부 순환 유동(inner circulatory flow)에 대한 정밀한 실험적 분석은 부족한 상황이다. 특히 사이드 채널형(side channel type)에 대해서는 개수로형(open channel type)과 유사한 원리로 작동 될 것으로 알려져 별도의 연구결과가 부족한 현실이다.

본 연구에서는 재생형 유체기계 중 사이드 채널형 재생블로워 내부에서의 내부 순환 유동의 관찰을 위해 색소유맥법(direct injection tracer method)을 적용한 유동가시화(flow visualization)를 수행하였다. 연구에 사용된 재생형 블로워는 연료전지의 공기공급용으로 사용되는 것으로 가시화를 위해 투명 재질로 케이스를 제작하였고 효과적인 가시

* 한국기술교육대학교 대학원 (Graduate School, Korea University of Technology and Education)

** 한국생산기술연구원 그린에너지설비센터 (Green Energy System Technology Center, Korea Institute of Industrial Technology)

*** 한국기술교육대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea University of Technology and Education)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : yhm0430@kitech.re.kr

화를 위해 작동유체를 기체에서 액체로 대체하였으며, 블로워 입구 상류에서 색소 액적을 주입하고 그 거동을 고속카메라를 이용하여 기록하였다.

2. 실험

실험에 사용한 재생형 블로워는 사이드 채널형으로서 연료전지의 공기공급용 블로워이다. 재생형 블로워의 유량범위는 유량계수(ϕ) 0~0.76이다. 이때 유량계수(ϕ)는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi = \frac{Q}{A_c u} \quad (1)$$

여기서 Q 는 유량, A_c 는 채널의 단면적, u 는 임펠러의 접선속도이다.

유동가시화를 위해 작동유체를 물로 대체하였고 임펠러와 케이싱 사이의 간극을 넓혔다. 또한 고속카메라와 실험장비, 액적의 주입시기 등을 고려하여 펌프의 회전속도는 약 400 rpm으로 정했다. Fig. 1은 개략적인 실험장치 구성도이고 Fig. 2는 전체적인 실험장치 사진이다.

내부유동의 가시화를 위해 재생형 블로워의 케이스는 투명한 아크릴로, 임펠러는 검정색으로 제작하였다. Fig. 3은 모델 블로워의 모습이고 임펠러의 회전방향과 블로워의 입출구 방향을 나타낸다. Fig. 4는 재생형 블로워의 단면을 나타낸 것으로, 단면 A-A는 스트리퍼(stripper)와 채널, 그리고 임펠러의 형상을 보여준다.

실험 시 임펠러 내부에 캐비테이션(cavitation)이나 벽면 온도 상승으로 인해 생성된 공기방울이 잔류하지 않도록 입구와 출구의 방향을 위로 향하게 하였으며 모터에 물이 유입되는 것을 방지하기 위하여 실링을 추가하였다. 입구와 출구는 물이 가득 찬 탱크와 폐회로(closed loop)로 연결하였다. 유량의 측정을 위해 출구 영역에 마그네틱(magnetic) 유량계를 설치하였으며, 유량계의 하류에 유량조절을 위한 밸브를 설치하였다.

유동가시화에 사용된 액적은 물과 잘 섞이지 않고 색이 있으며 유동의 흐름을 잘 표현하는 성질을 지녀야하기 때문에 잉크와 여러 종류의 물감을 비교하여 마블링(marbling)물감(유성물감)을 선택하였다.

액적의 거동을 촬영하기 위해 사용된 고속카메라(high-speed camera)는 임펠러의 회전속도와 앨리어싱(aliasing)이 일어나지 않도록 하기 위해 충분히 빠른 촬영속도를 구현 가능해야 한다. 실험에 사용된 고속카메라는 최대 1,000 fps로 2.05 sec 동안 촬영이 가능하다. 본 연구에서는 임펠러가 약 400 rpm으로 회전하고 임펠러의 날개 개수가 39개임을 고려하여 고속카메라의 촬영속도는 17/200 fps 이상으로 설정하였다.

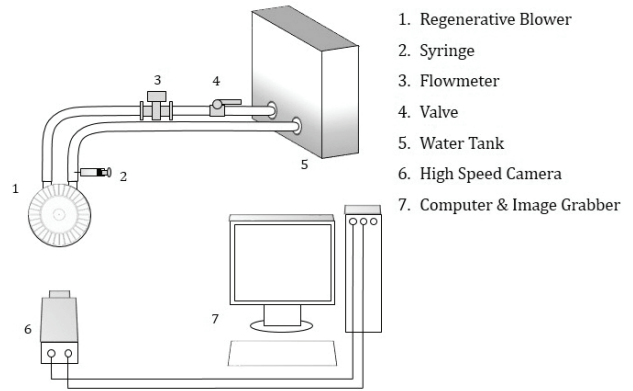


Fig. 1 Schematic arrangement of flow visualization

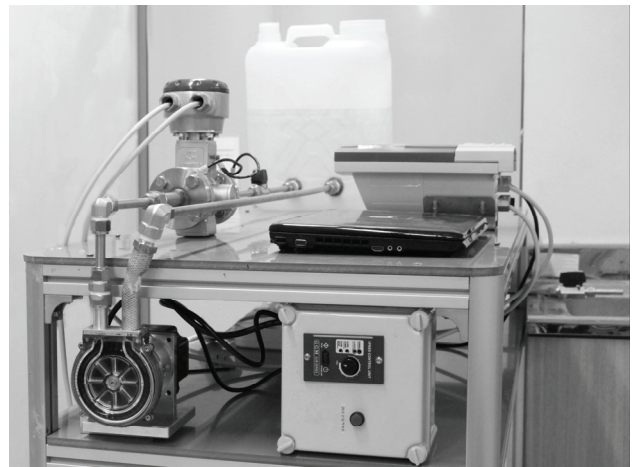


Fig. 2 View of experimental equipment

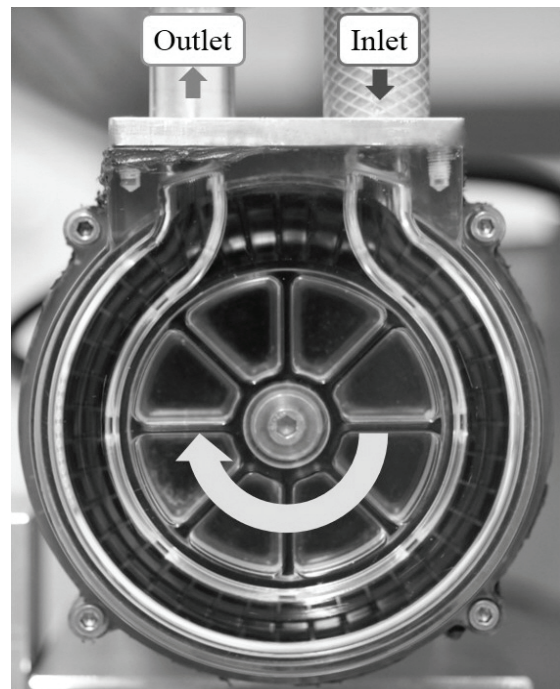


Fig. 3 Rotation direction and direction of inlet and outlet

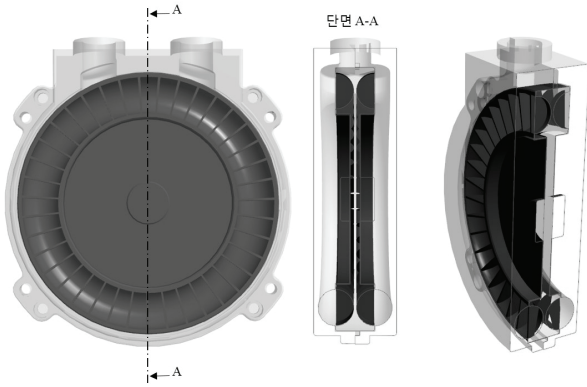


Fig. 4 A cross section of regenerative blower

실험 당시 임펠러의 회전수는 377.4 rpm으로 측정되었고, 유량조절용 밸브는 최대로 개방하였다. 이때 유량은 6.75 lpm이고 유량계수(ϕ)는 0.33이다. 정확한 작동조건을 분석하기 위해서는 블로워 입출구 근처에서의 차압 측정이 추가로 필요하다. 실험에 사용한 액적은 노란색이며 입구 상류 영역에서 주사기를 통해 주입하였다. 촬영에 사용된 고속카메라의 조건은 1000 fps, 1/8000 sec, 512×512 pixels 이다.

3. 결과 및 고찰

임펠러의 날개 개수와 고속카메라의 촬영 사진수를 조합하면 누적된 액적의 위치를 표현 할 수 있다. 임펠러가 대략 4개의 프레임을 지나면 인접한 임펠러의 위치로 이동하는 사진의 결과를 얻을 수 있다. Fig. 5는 액적의 위치를 누적하여 표시한 유맥선이다.

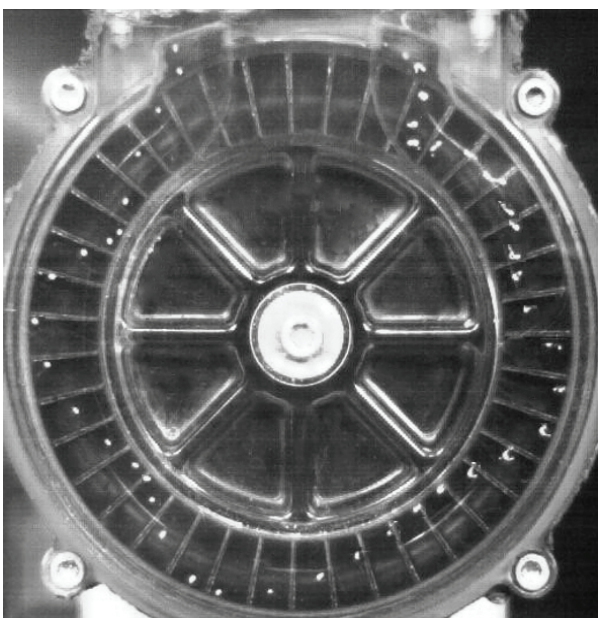


Fig. 5 Internal circulation flow of regenerative turbomachinery

액적의 위치를 추적하면 임펠러의 정면에서 관측할 때 내부 순환 유동은 시계방향의 주유동을 따라 나선형 형태로 이루어짐을 알 수 있다. 비록 2차원에 해당되는 결과이나 촬영된 동영상을 반복하여 검토하면 임펠러의 축방향으로 이동하는 유동을 구분할 수 있다. 가시화 실험조건에서 임펠러가 한 번 회전하는 동안 순환 유동은 3~4회 발생한다. 순환 유동은 비슷한 형태를 가지고 있으며, 주기적으로 반복되므로 다음과 같이 임펠러 내부 유동과 채널 내부 유동, 그리고 입구 영역, 출구 영역, 스트리퍼 영역으로 구분하여 설명할 수 있다.

3.1. 임펠러 내부 유동

재생형 블로워 내부의 유체는 회전하는 임펠러 날개에 의해 회전방향으로 이송되며 동시에 임펠러의 중심으로부터 원심력을 받아 바깥쪽으로 이동하게 된다. 실험조건에서 액적은 적게는 4개, 많게는 8개의 임펠러 날개 폭 만큼 이동한 후 채널로 토출된다.

임펠러 내부에서 순환 운동을 하는 유체는 입구를 통해 유입되는 경우와 스트리퍼를 통해 재유입되는 경우로 나눌 수 있으며 각각의 경우 임펠러 홈 안에서 순환 운동이 시작되는 기점이 다르다.

3.1.1 유체가 입구를 통해 유입된 경우

입구로부터 유입된 유체는 임펠러 홈으로 들어가기 위한 시간이 필요하다. Fig. 6(a)에서 액적이 임펠러 홈에 위치한 경우가 입구로부터 조금 떨어져 있다. 일반적으로 입구의 유동이 불균일한 이유도 있지만 스트리퍼를 지나는 임펠러 홈에 차있는 유체가 우선적으로 내부 순환 유동을 시작하기 때문이다. 이와 관련된 내용은 이후 입구 유동에 대한 비교 및 분석의 내용에서 다루었다.

3.1.2 유체가 스트리퍼를 통해 유입된 경우

스트리퍼는 채널이 존재하지 않는 구간이므로 출구로 토출되지 못한 유체는 스트리퍼를 통과해 임펠러 홈에 갇혀 입구로 다시 이동하게 된다. Fig. 6(b)에서 스트리퍼를 통해 입구로 유입되는 액적은 입구 영역의 채널과 만나는 지점부터 임펠러 내부 순환유동을 시작하여 임펠러 회전방향으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)를 비교 관찰하면 Fig. 6(b)의 액적이 스트리퍼를 통과하여 임펠러 영역에서 순환 운동을 마친 위치에서 Fig. 6(a)의 액적이 임펠러 홈으로 유입되는 것으로 보인다. 이처럼 유체가 임펠러 홈에서 순환 운동을 시작하는 위치는 크게 두 가지 경우로 나눌 수 있으며 두 가지 경우 모두 약 3~4회의 순환 운동을 한다. 또한 임펠러 홈 안에서의 액적은 채널로 토출되기 전까지 임펠러의 회전속도와 반경방향으로 이동하는 속도를 가진다.

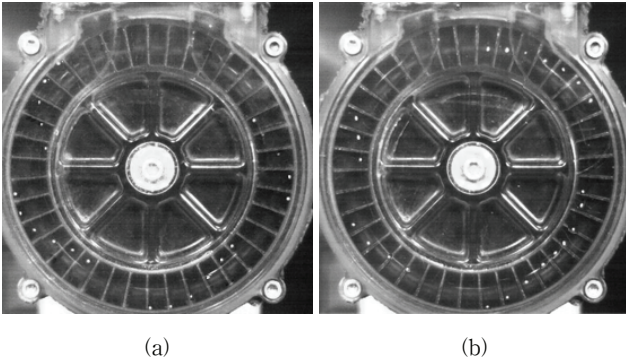


Fig. 6 Impeller internal flow field: (a) flow from the inlet (b) flow from the stripper

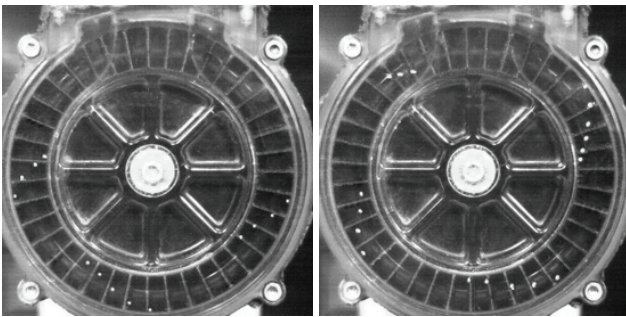


Fig. 7 Channel internal flow field

3.2. 채널 내부 유동

임펠러 홈을 따라 순환 이동한 유체는 채널로 토출된다. 이 때 유체는 임펠러 날개에 의해 공급된 에너지를 가지고 토출되며 채널의 내부에서 순환 운동을 한다.

Fig. 7은 채널에서 액적의 움직임을 보인 것으로 채널 내부에서 유체의 순환 운동 형태를 알 수 있다. 채널 내부에서 액적은 임펠러 내부 유동과는 반대로 임펠러의 최대 반경부에서 최소 반경부로 이동하며 반원 형태의 단면을 가진 채널을 따라 이동한다. 이때 채널에서는 임펠러 영역에서와 마찬가지로 약 3~4회의 순환 운동을 한다.

일반적으로 유체는 움직이는 물체의 속도와 동일하게 움직일 수 없다. 재생형 블로워의 경우 회전하는 임펠러의 속도보다 채널을 따라 흐르는 유체의 속도가 느리다. 이는 임펠러 내부 유동을 분석한 방법과 동일하게 임펠러가 인접한 임펠러의 위치로 이동하는 시간을 고려한 누적 사진결과(Fig. 7)를 보면 확인이 가능하다. Fig. 6과 비교해보면 1개의 액적이 1개의 임펠러 홈에 위치하고 있는 것과 달리 Fig. 7은 다수의 액적이 액적의 수보다 적은 임펠러에 걸쳐 있다. 또한 액적이 회전방향으로 이동하는 과정에서 액적사이의 거리가 짧아지는 것 역시 마찰 및 난류에 의한 손실로 인하여 속도가 감소되는 현상을 나타내고 있다.

실험에서 채널로 토출된 유체는 채널에서 순환 운동을 마친 후 동일한 임펠러로 재유입되거나 뒤따라오는 임펠러로

유입되었다. 이는 채널에 흐르는 주유동의 속도가 임펠러의 회전속도와 근접하기 때문이고 상대적으로 유량이 많은 경우에 해당한다. 앞서 유량계수의 비교에서는 최대유량값과 차이를 보였으나 임펠러와 케이스 사이의 간극 증가로 인하여 최대유량값이 감소하였고, 실험은 최대유량근처에서 수행되었다고 판단된다.

3.3. 입구 영역

앞서 임펠러 내부 유동을 구분하며 대략적인 언급을 했듯이 입구 영역은 유체가 입구를 통해 들어온 경우와 스트리퍼를 통해 들어온 경우로 나눌 수 있다.

3.3.1. 유체가 입구를 통해 유입된 경우

재생형 블로워의 입구는 임펠러의 축방향을 기준으로 앞, 뒤로 나뉘는 형상을 가진다. 유체는 유입되면서 회전하는 임펠러와 채널을 만나게 되며 항상 동일한 경로로 유입되기 어렵다. 임펠러 홈으로 유입되기 전까지 유체는 안정화되기 위한 어느 정도의 시간이 걸리는데 이는 과도 영역으로 구분할 수 있다.

Fig. 8(a)는 액적이 입구로부터 유입되어 채널을 따라 이동하다가 임펠러 홈의 최소 반경부로 유입되는 단계를 나타낸다. Fig. 8(b)를 살펴보면 임펠러 홈으로 유입되기 전까지 액적의 움직임이 상당히 불규칙함을 알 수 있다. 이러한 과도 영역은 실제 양정 상승에 영향을 주지 못하는 손실 영역으로 설명되므로 재생형 유체기계 설계와 해석에 참고할 요소이다.

3.3.2. 유체가 스트리퍼를 통해 유입된 경우

임펠러 홈이 스트리퍼를 지나 입구의 채널과 만나는 시점부터 액적은 임펠러 홈을 따라 최대 반경방향으로 이동하여 우선적으로 내부 순환 유동을 시작한다. 스트리퍼를 통해 입구로 이동한 유체는 입구로 유입된 경우와 달리 안정적인 유동 형태를 보인다(Fig. 8).

3.4. 출구 영역

입구 영역과 마찬가지로 출구 영역도 유체가 블로워 밖으로 토출되는 출구와 스트리퍼를 통해 입구로 재이동하는 경우로 나눌 수 있다. 스트리퍼를 통해 이동하는 경우는 '3.5. 스트리퍼 영역'으로 따로 구분하였다.

채널과 임펠러 사이에서 순환 운동을 마친 유체는 출구를 만나게 된다. 이 때 출구를 통해 밖으로 토출되기 위해서는 임펠러 홈에서 순환 운동이 끝나는 지점이 출구 영역의 채널과 만나야 한다. Fig. 9는 출구로 토출되는 액적의 움직임을 나타낸다. 임펠러의 최대 반경부에서 순환 운동을 마친 액적은 출구 영역의 채널과 만나 토출된다.

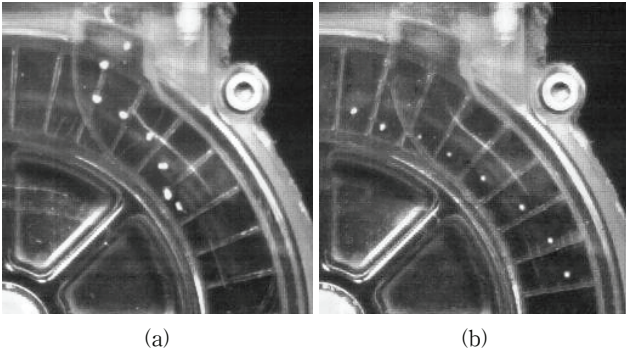


Fig. 8 Inlet region flow field: (a) flow from the inlet (b) flow from the stripper

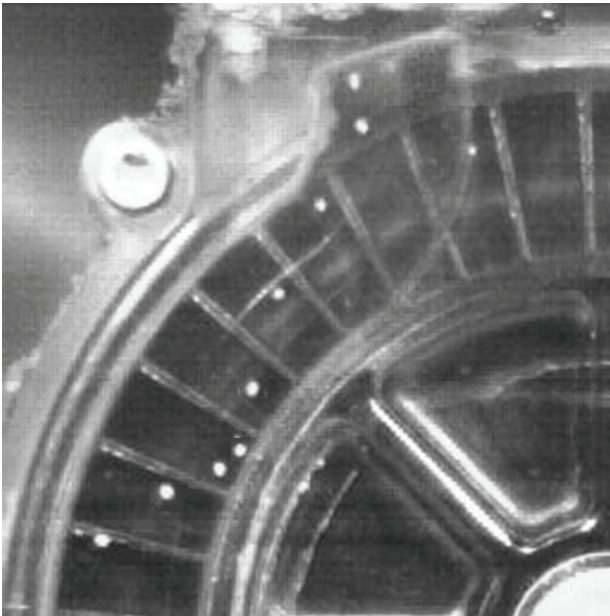


Fig. 9 Outlet region flow field

3.5. 스트리퍼 영역

출구로 유출되지 않은 유체는 임펠러 홈 안에 정체된 상태로 스트리퍼에 갇혀 다시 입구 영역으로 이동하게 된다. 스트리퍼 영역에는 채널이 존재하지 않기 때문에 액적은 순환 운동을 하지 못하고 임펠러 홈의 같은 위치에 머물러 있을 것으로 예상된다. 하지만 임펠러와 케이스의 간극으로 인해 약간의 교란이 일어나는 것을 확인할 수 있다(Fig. 10).

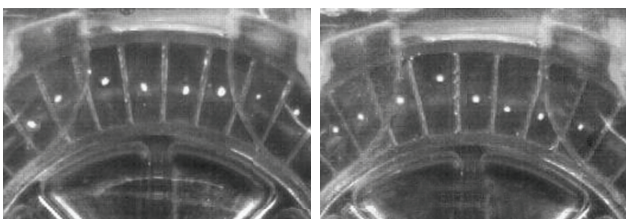


Fig. 10 Stripper region flow field

4. 결론

본 연구에서는 색소유택법을 이용하여 재생형 블로워의 내부 유동을 가시화하였다. 이를 통해 임펠러와 채널부에서 내부 순환 유동을 확인할 수 있었다. 관찰된 재생형 블로워의 내부 순환 유동은 다음의 특징을 갖는다.

- 1) 입구 부근에는 유동이 불규칙한 과도 영역이 존재한다.
- 2) 임펠러 홈으로 유입된 유체는 임펠러 회전방향으로 주운동을 하며 동시에 임펠러의 최소 반경부에서 최대 반경부로 이동한 후 채널로 토출된다.
- 3) 채널로 토출된 유체는 채널의 주유동을 따라 임펠러의 최소 반경부를 향해 감속하며 이동한다.
- 4) 채널에서 순환 운동을 마친 유체는 임펠러 홈으로 재유입되는 순환 운동이 반복적으로 일어난다. 유량이 많은 경우 채널의 주유동은 임펠러의 회전속도와 근접하게 이루어지므로 채널로 토출된 유체는 기존의 임펠러 홈으로 재유입되거나 뒤따라오는 임펠러 홈으로 유입된다.
- 5) 내부를 순환한 유체는 출구로 토출되거나 또는 스트리퍼를 통과하여 입구 영역으로 재유입되어 반복 운동을 한다.

참고문헌

- (1) 이경용, 최영석, 2005.12., “사이드채널형 재생블로워의 성능평가,” 유체기계공업학회, 유체기계공업학회 2005 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 378~383.
- (2) 송재욱, 2003.11., “재생형 유체기계의 성능해석에 관한 연구,” 한국과학기술원 박사학위논문.
- (3) Shimosaka Minoru, Yamazaki Shinzo, 1960, “Research on the Characteristics of Regenerative pump(1st Report),” Bulletin of JSME, Vol. 3, No. 10, pp. 185~190.