

재생형 유체기계의 개발 과제 소개

최영석* · 이경웅*

1. 서론

재생형 유체기계(regenerative type turbo-machinery)는 작은 유량에서 큰 양정을 낼 수 있는 유체기계로서 고압을 필요로 하는 자동차 연료공급 장치의 연료펌프, 가정용수용 펌프 및 산업용 고압 송풍기로 널리 사용되고 있다. 송풍기 분야에서는 링블로워(ring blower)로 알려져 있으며 원주를 따라 방사형으로 파여진 임펠러 홈(impeller groove)이 케이싱(casing) 안에서 회전하면서 발생하는 유체의 마찰에 의한 압력변화로 양정을 상승시키는 원리이다. 링블로워를 포함하여 재생블로워는 일반적으로 소음이 적다는 장점이 있으나 여러 개의 날개깃(impeller vane)에서 발생하는 마찰손실과 유체가 임펠러와 수로(channel) 사이에서 순환유동(circulatory flow)을 하면서 발생하는 손실의 영향으로 효율은 낮은 편이다.

일반적으로 재생형 유체기계는 수로의 형태와 위치에 따라 분류되는데 링블로워와 같이 수로가 반경방향에 위치한 개수로형(open channel type)과 수로가 축방향에 위치하여 임펠러 홈과 유동장을 형성하는 사이드채널형(side channel type)이 있으며 사이드채널형은 주로 재생펌프에 널리 사용되고 있다. 최근 저유량, 고압력을 요구하는 소형장비에서 공기 과급용으로 재생블로워의 사용 빈도가 높아지고 있는데, 사이드채널형이 주를 이루고 있다. 그러나 자동차 연료펌프 등에 주로 사용되는 재생펌프가 효율 등에 있어서 어느 정도 최적화가 이루어진 것에 비하면, 재생블로워의 경우는 관련된 연구 및 특허 발표 건 수가 매우 미흡한 상태이며 현재 상용화된 제품을 살펴보면 매우 단순한 형상을 가지고 있어 앞으로 성능 및 효율 향상을 위해 개선할 요지가 많다고 할 수 있다.

보다 고성능의 재생형 유체기계를 개발하기 위해서는 재생형 유체기계의 성능을 예측하고 설계에 활용할 수 있는 성능예측 프로그램의 개발과, 일반 터보기계에서의 성능향상을 위한 설계 도구로서 많이 사용되고 있는 3차원 CFD 해석의 적용, 그리고 설계된 형상에 대한 제작 및 성능시험 등의 체계적인 접근이 필요하다. 성능예측, CFD, 제작 및 성능시험은 상호 보완적으로 발전되어야 한다. 본 기고에서는 현재 한국생산기술연구원에서 수행되고 있는 재생형 유체기계의 성능향상을 위한 연구 중 특히 사이드 채널형 재생블로워/펌프에 대한 내용을 소개하고자 한다.

2. 재생형 블로워 개발

2.1 개요

연구 대상 재생블로워는 사이드채널형으로써 Fig. 1과 같이 채널과 임펠러 홈이 반원형을 이루고 있으며 임펠러 홈은 축방향 기준으로 임펠러의 앞면과 뒷면에 원주방향을 따라 파여져 있으면서 서로 독립적인 유동장을 형성한다. 임펠러 홈과 채널간의 내부순환유

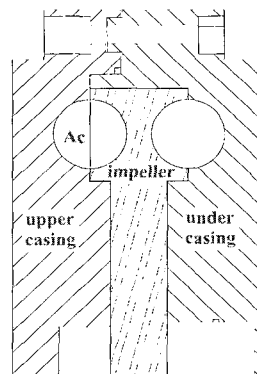


Fig. 1 Schematic and geometric symbols of the side channel type regenerative blower

* 한국생산기술연구원 에너지용팀
E-mail: yschoi@kitech.re.kr

동이 재생블로워의 성능에 직접적인 영향을 미치고 있으므로, 임펠러 깃 개수, 채널 확장각(θ_c), 채널 면적(A_c), 임펠러 깃 각도, 임펠러 반경(R) 및 채널 폭(h) 등이 성능에 영향을 미치는 중요한 형상 인자가 된다.

성능예측 방법 및 CFD해석을 통하여 기존 모델(model 1)에서 개선된 모델을 제안하였고, 제작 및 시험을 수행하였다. 소형 송풍기 성능시험장치 (small fan tester)를 사용하여 유량에 따른 압력상승을 측정하였으며, 성능시험, 성능예측 결과 및 CFD 결과를 비교 분석하여 성능예측 프로그램을 수정하였으며 수정된 성능예측 프로그램을 통해 새로운 model 2 및 3을 설계하였다. 새로운 모델에 대해서는 CFD를 통해 설계목표의 달성여부를 확인하였다.

2.2 성능시험

저유량, 고압력의 재생블로워의 성능시험을 위해 제작된 소형 송풍기 성능시험장치를 Fig. 2에 나타내었다. 크기는 $0.3 \times 0.3 \times 1.0$ m이고 측정유량범위는 0.08~3 CMM, 최대정압은 1000 mmAq이며 유량측정을 위해 직경이 9, 15, 20, 30 mm인 노즐을 유량범위에 따라 선택하여 사용하도록 되어 있다. 성능예측 및 CFD에서는 재생블로워의 임펠러 및 채널 부분에 한정되었으나 실험에서는 재생블로워의 입출구 유동소음을 낮추기 위해 소음기를 장착한 상태로 유량변화에 따른 압력변화를 측정하였다.

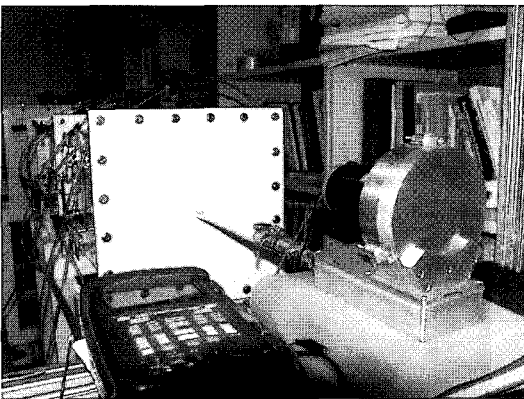


Fig. 2 Photograph of the small fan tester and model 1

2.3 성능예측 및 설계인자

재생형 유체기계의 성능은 임펠러 홈과 채널이 형

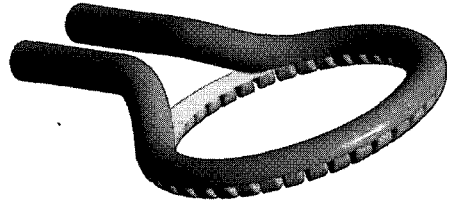


Fig. 3 Simulation region of model 1

성하는 내부영역에서 얼마나 효과적인 순환유동을 형성하는가에 달려있다. 재생형 유체기계의 성능예측은 내부의 순환유동에 대해 얼마나 정확한 모델을 사용하느냐에 달려 있으며 그동안 많은 연구자에 의해 연구되어 왔다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 본 연구에 사용된 성능예측 프로그램은 사이드채널형 연료펌프의 수로와 임펠러 홈의 순환유동을 고려하여 펌프의 성능해석을 수행하고 새로운 수로의 형상을 제시하면서 검증된 프로그램⁽⁴⁾을 손실계수의 보정을 통하여 블로워에 적용하였다.

새로운 모델(model 2, 3)의 설계는 재생형 유체기계의 성능과 관련 있는 인자들 중 채널 폭(h), 채널 면적비(A_c/A_{cir}) 및 채널 확장각(θ_c)을 변화시켰다.

2.4 CFD

재생블로워의 CFD는 회전하는 매우 많은 여러 개의 임펠러 홈과 정지하고 있는 사이드 채널 및 입출구부, 그리고 고압부에서 저압부로의 누설 유동을 고려해야 하는, 매우 복잡한 유동영역을 포함하고 있다.

본 연구에서는 Fig. 3과 같이 임펠러 홈과 채널 사이의 축방향 간극(axial gap), 임펠러 홈 및 채널을 유동영역으로 선정하여 상용 전산유체해석 프로그램인 CFX-10으로 해석을 수행하였다. 임펠러 홈과 채널은 상용 격자생성 프로그램인 ICEM CFD 10을 사용하였고 수십 마이크로미터(μm)의 축방향 간극은 CFX mesher의 2D 격자계를 이용하여 격자를 생성하였다. 총 격자수는 146만개이며 해석시간을 단축하기 위해 7대의 컴퓨터를 병렬 연결하여 해석을 수행하였다.

2.5 성능평가 및 유동장 분석

성능시험, 성능예측 및 CFD 결과의 비교를 위하여 유량계수($\phi = Q/(ND^3)$) 및 수두계수($\psi = \Delta P/(\rho N^2 D^2)$)로 무차원화 하여 성능곡선을 Fig. 4에서 비교하였다.

model 1의 결과를 비교해보면 설계점 기준으로 고유량 영역에서는 1차원 성능예측 결과와 CFD 결과가 거의 일치하고 성능시험 결과가 낮게 측정된 경향을 보이고 있으나 저유량 영역에서는 CFD 결과와 성능시험결과가 유사한 경향을 보이는데 반해 1차원 성능예측 결과는 낮게 예측되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 차이를 분석해 보면 우선적으로 성능시험 결과에서 회전수 측정 오차로 인한 무차원값의 차이 및 실제 성능분석 영역의 차이라고 판단된다. 또한 성능시험 결과는 모든 영역을 포함하고 있으나 CFD는 소음기 영역 및 간극의 일부가 제외되었고 1차원 성능예측에서는 채널에 대한 평가만을 수행하였기 때문에 근본적으로 차이의 여지는 있다. 하지만 이를 감안하더라도 무차원 헤드의 값이 큰 차이를 보이고 있지는 않으며 전반적이 경향은 일치하고 있다.

성능향상을 위하여 형상변수를 변화시킨 model 2, model 3의 경우 Fig. 5의 효율 곡선을 살펴보면 설계점 근처에서 성능예측 및 CFD 해석 결과에 의해 효율이 향상됨을 보이고 있다. 추후 정밀한 실험을 통하여 확인할 예정이다. 효율에 대한 model 1의 시험결과는 축방향 간극의 영향을 많이 받고 있으며 간극의 영향에 대해서도 추후 연구될 예정이다.

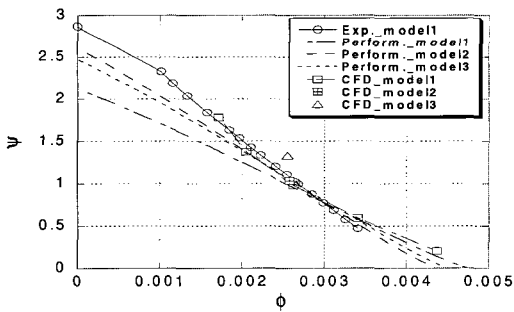


Fig. 4 Performance curve (head coefficient)

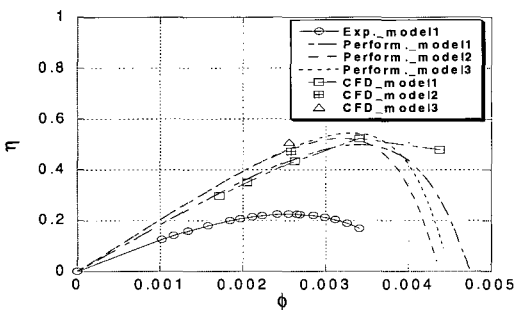


Fig. 5 Performance curve (efficiency)

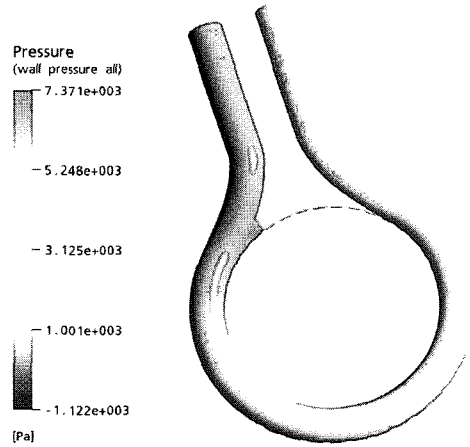


Fig. 6 Pressure distribution at blower wall

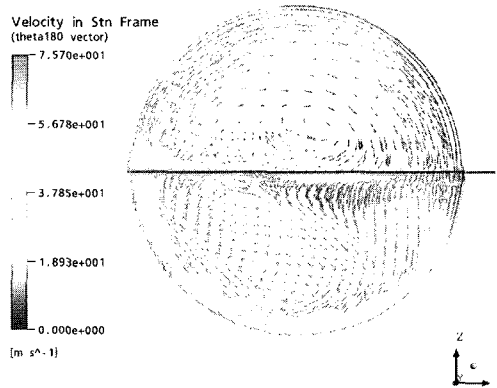


Fig. 7 Vector plot at cross section ($\theta=180^\circ$)

재생형 유체기계의 내부유동장 평가는 일반적인 유체기계와 다른 유동장을 형성하기 때문에 정량적인 비교에 어려움이 있어 주로 내부순환유동을 분석하는데 중점을 둔다. Fig. 6은 해석영역 가운데 벽면에서의 압력분포이다. 상대적으로 압력이 작은 부분이 입구부이고 입구부 이후에 출구부까지 압력이 상승되는 경향을 볼 수 있다.

Fig. 7은 스트리퍼의 정중앙을 0로 설정하였을 때 원주방향으로 180인 위치의 단면 속도벡터이다. 단면에서 상부 반원은 채널영역이고 하부 반원은 임펠러 홈 영역이며 우측 방향이 중심방향이다. 단면 속도벡터를 분석해보면 전체적으로 임펠러 홈의 반경이 작은 부분에서 유동이 채널로부터 유입되어 반경이 큰 부분에서 채널쪽으로 토출되는 순환유동을 확인할 수 있다.

3. 재생형 펌프 개발

3.1 개요

재생펌프는 재생블로워와 형상 및 원리는 유사하나 자동차 산업의 발전과 더불어 연료펌프 등의 분야에 적용되어 활발한 연구가 수행 중이며 관련된 특허 건수도 매우 많은 특징이 있다. 재생펌프에 대한 연구는 기본적인 성능향상을 위한 연구가 주를 이루며 임펠러 흡의 형상, 임펠러 깃 각도, 입출구 형상, 내부유로 형상 및 임펠러 흡의 배열 등 재생펌프의 형상 및 성능을 결정하는 거의 모든 인자에 대한 분석 및 특허 출원이 이루어지고 있다고 해도 과언이 아니다.

연구대상은 자동차용 연료펌프로 사용되어지는 사이드 채널형 연료펌프이며 성능예측과 CFD를 통해 성능을 분석해 보았다.

3.2 성능예측

재생펌프의 성능에 대해 재생블로워의 성능예측에 사용된 성능예측 프로그램을 동일하게 적용하여 예측하였다. 앞서 재생블로워의 성능예측에서 언급한 바와 같이 성능예측에 사용된 프로그램은 사이드채널형 연료펌프의 성능분석을 통해 검증된 성능예측 프로그램⁽⁴⁾이므로 손실계수의 보정 없이 성능과 관련된 인자의 영향을 분석하였다.

3.3 CFD

기존의 재생펌프에 대한 CFD는 한 개의 임펠러 흡에 대한 해석 및 간략화된 유동영역에 대한 해석이 주를 이루어 왔으나 최근 상용 CFD 프로그램 및 컴퓨터 사양의 발전으로 인하여 최근에는 간극을 포함한 전체 유동장에 대한 해석이 시도되고 있다. Fig. 8은 해석에 사용된 재생펌프의 유동장 형상이며 입구부를 포함하고 있는 하우징 (housing), 출구부를 포함한 케이싱 (casing), 임펠러, 축방향 간극 및 반경방향 간극 (radial gap)으로 이루어져있다. 재생블로워와 달리 재생펌프는 하우징의 입구를 통해 유입된 유체가 임펠러가 회전함에 따라 원주방향으로 이동하고 케이싱의 출구로 토출되는 흐름을 가지며 임펠러 흡은 축방향으로 연결되어 있다. 또한 임펠러 깃은 회전방향을 향하는 V형 패들 (V type paddle) 형태이다.

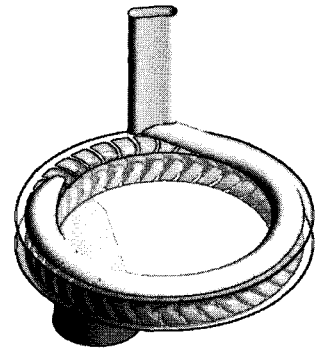


Fig. 8 Simulation region of fuel pump

격자생성 및 해석은 재생블로워와 동일한 프로그램 및 방법을 사용하였으며 총 격자점 수는 98만개이다.

3.4 성능평가 및 유동장 분석

재생펌프의 유량증가에 따른 정압상승에 대한 성능평가 결과를 Fig. 9에 나타내었는데 유량이 감소함에 따라 정압이 증가하는 경향 및 기울기는 매우 유사하나 동일한 유량 조건에서 정압 상승량은 CFD 결과가 더 높게 예측되었다. 재생펌프의 성능예측에 있어서 주요한 성능인자를 제외한 다른 손실에 관련된 인자들을 손실계수를 통해 모델링하는 과정에서 발생한 차이라고 판단된다. 따라서 손실계수를 특별히 고려하지 않고 유동장을 기반으로 해석을 수행한 CFD 결과가 여러 가지 손실이 복합적으로 고려된 성능예측 결과보다 더 크게 예측되었다고 분석을 할 수 있다. 이러한 분석을 뒷받침하기 위해서는 성능시험 결과와의 비교 및 분석이 필요하다.

유량 및 수두계수의 비교에서 성능예측과 CFD 결과가 서로 차이를 보이고 있으나 비슷한 경향으로 예

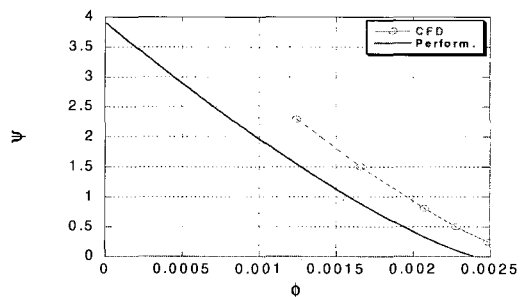


Fig. 9 Performance curve (head coefficient)

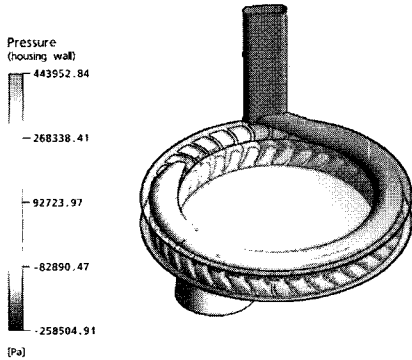


Fig. 10 Pressure distribution at pump wall

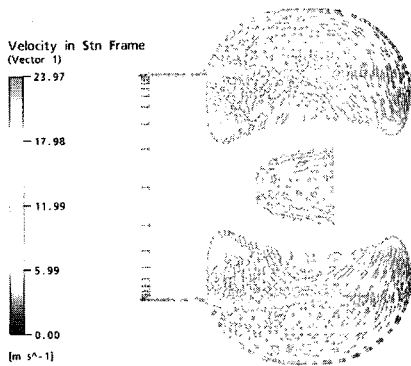


Fig. 11 Vector plot at cross section

측하고 있어 재생펌프의 성능향상을 위한 성능인자들의 적절한 조합을 통한 재생펌프의 설계 및 수정에 활용이 가능하다고 판단된다. Figs. 10과 11에 재생펌프의 내부유동장에 대한 CFD 결과 중 압력분포 및 속도벡터를 정성적으로 나타내었다. Fig. 10의 압력 분포 결과를 보면 입구로 유입된 유체가 압력이 상승되어 출구로 토출되는 현상을 확인할 수 있으며 축방향 간극에서의 누설에 의한 압력변화 현상도 확인이 가능하다. Fig. 11의 속도벡터 결과는 입출구부 사이를 기준으로 180가 되는 위치의 결과인데 임펠러가 V형 패들 형태이므로 단면 형상이 조금 복잡하게 나타난다. 속도벡터에서 우측이 중심방향이며 아래쪽이 하우징, 위쪽이 케이싱 영역인데 재생블로워의 속도벡터에서 확인하였던 임펠러 홈과 채널 사이의 내부순환

유동의 형태를 재생펌프에서도 확인할 수 있었다. 본 연구에 사용된 재생펌프와 같이 임펠러에 각도를 가지며 홈이 형성된 경우에 내부순환유동에 대한 분석을 위해서는 특정한 각도면에서의 속도벡터에 대한 정성적인 분석뿐만 아니라 특정 위치에서의 정량적인 속도벡터 비교를 통해 속도 성분의 변화에 대한 분석이 필요하다.

4. 결론

지금까지 한국생산기술연구원에서 수행되고 있는 재생형 유체기계(블로워, 펌프)에 대한 연구내용을 간략하게 소개하였다. 지면상 수행된 결과를 상세히 언급하지는 못하였다. 재생형 유체기계에 대한 주요 연구 분야는 성능예측 및 기본설계, CFD 해석, 제작 및 성능시험 등이며, 각각의 과정들이 서로 상호 보완적으로 협력되어야 목표인 효율 및 헤드의 향상을 이룩할 수 있다. 앞으로 설계점에서의 성능 향상을 위한 최적설계 과정 및 특이현상에 대한 연구가 보다 중점적으로 수행될 예정이다.

참고 문헌

- (1) Badami, M., 1997, "Theoretical and Experimental Analysis of Traditional and New Periphery Pumps," SAE Technical Paper Series, n.971074.
- (2) 유일수, 박무룡, 정명균, 2004, "비압축성 재생형 기계에 대한 개선된 운동량 교환 이론(I) - 수력학적 모델-, " 대한기계학회논문집 B권, 제28권 제10호, pp. 1238~1246.
- (3) 유일수, 박무룡, 정명균, 2004, "비압축성 재생형 기계에 대한 개선된 운동량 교환 이론(II) - 손실 모델 및 성능 예측-, " 대한기계학회논문집 B권, 제28권 제10호, pp. 1247~1254.
- (4) 최영석, 이경용, 강신형, 2003, "사이드채널형 연료펌프의 성능예측," 유체기계저널 제6권 제2호, pp. 29~33.