

# 재생형 연료펌프의 채널 면적 변화가 성능 특성에 미치는 영향에 대한 수치해석적 연구

이경용\* · 최영석\* · 손광은\*\*

## Numerical Study of Channel Area Effects on the Performance Characteristics of Regenerative Type Fuel Pump

Kyoung-Yong Lee\*, Young-Seok Choi\*, Kwang-Eun Son\*\*

*Key Words* : Side channel type(사이드 채널형), Regenerative fuel pump(재생 연료 펌프), Loss coefficient(손실계수),  
Performance prediction(성능예측)

### ABSTRACT

The effects of channel area on the performance of regenerative type fuel pump were numerically studied by commercial CFD code (ANSYS CFX-10). To examine the effects of channel area, the shapes of the side channel and blade were simplified. The channel area affected the flow characteristics of the internal recirculation flow between the side channel and the blade groove and also made a difference in the overall performance. These loss mechanism with circulation flow were adopted as a loss coefficient in the performance prediction program. The loss coefficient was newly derived from the results of calculations with different channel area, and compared with the experimental results in the reference paper and used to modify the performance prediction program. The circulation flow characteristics with different channel area, which is related with loss mechanism, were also discussed with the results of 3-dimensional flow calculations.

### 1. 서론

자동차의 연료공급장치에 사용되는 연료펌프 (fuel pump)는 고압의 실린더에 소량의 연료를 공급해야 하는 작동조건을 만족하기 위해 비속도 (specific speed)가 낮은 재생형 유체기계 (regenerative type turbomachi-

inery)가 주로 사용된다. 재생형 유체기계는 자동차용 연료펌프뿐만 아니라 가정 및 소방용수용 펌프, 링 블로워 (ring blower), 연료전지용 블로워 및 수소재순환 장치에도 적용되고 있으며 작동 원리 및 성능 향상을 위한 연구가 꾸준히 수행되고 있다.

재생형 유체기계의 채널 (channel) 형상은 전체 성능에 영향을 미치는 주요한 변수중 하나이며 성능예측 및 설계에 있어 고려해야 할 인자이다. Wilson 등<sup>(1)</sup>은 개수로형 (open channel type) 재생펌프의 개수로 형상을 변

\* 한국생산기술연구원 열유체시스템팀

\*\* 이노스웰(주) 기술연구소

E-mail : yschoi@kitech.re.kr

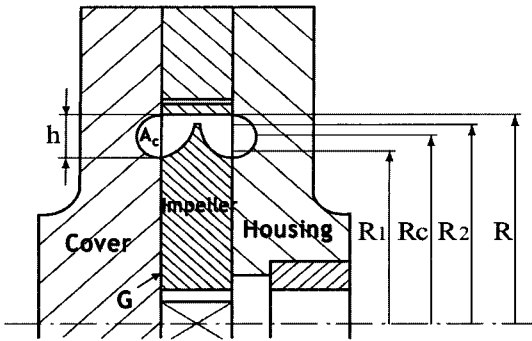


Fig. 1 Schematic geometry of side channel type pump

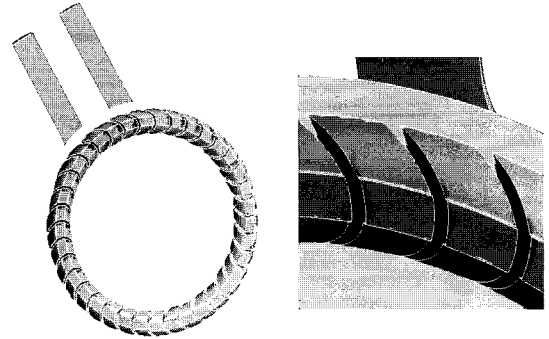


Fig. 3 Simulation domain of side channel type pump

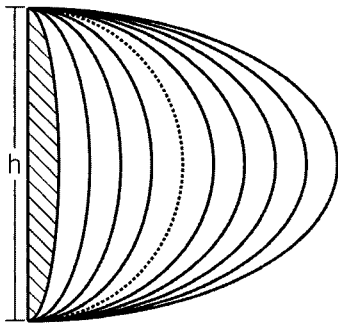


Fig. 2 Variation of cross section area of the side channel

화 시키며 성능시험을 수행하고 개수로의 형상이 전체 성능에 미치는 영향을 손실계수로 정의하여 성능예측을 하였다. Badami<sup>(2)</sup>는 사이드 채널형 (side channel type) 재생펌프의 성능예측을 수행하고 재생펌프의 성능과 관련이 있는 축방향 간극 (axial clearance), 채널 단면적 (cross section area of channel), 날개 개수 및 날개 각도 (blade angle)를 변화시킨 실험결과와 비교하여 성능예측의 타당성을 검증한 후, 2단 (double stage) 및 새로운 수로 형상에 대한 성능해석 및 실험을 통해 재생펌프의 설계에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 사이드 채널형 연료펌프의 채널 단면적 변화가 펌프의 전체 성능에 미치는 영향을 수치해석적으로 알아보기 위해 채널과 임펠러 홈 (impeller groove)을 단순화하여 상용 전산유체역학 (CFD) 프로그램인 ANSYS CFX-10으로 성능예측을 수행하였다. 채널 단면적 변화가 성능에 미치는 영향을 분석하고 그 상관관계를 도출하기 위해 성능예측<sup>(3)</sup> 결과와 비교하였으며 수정된 순환유동 손실계수 (circulatory flow loss coefficient, Km)의 상관관계를 제시하였다.

## 2. 채널 단면적 변화

재생펌프는 채널과 임펠러 홈 사이의 내부 순환유동에 의해 양정이 상승되는 원리로 작동하기 때문에 채널 및 임펠러 홈의 형상은 성능에 영향을 주는 주요한 인자로 알려져 있으며, 그 효과는 성능예측을 하는데 있어 정확히 반영되어야 한다. Wilson 등<sup>(1)</sup>은 개수로 형상 (폭, 간극)의 6가지 조합으로 실험을 수행하여 성능변화를 측정하였고 개수로 형상과 성능간의 상관관계를 최적값이 존재하는 2차곡선으로 규명하였으며 현재까지 개수로형 재생펌프의 성능분석에 그대로 적용되고 있다. 본 연구의 대상인 사이드 채널형 재생펌프에 대한 연구로는 Badami<sup>(2)</sup>의 연구결과에 사이드 채널의 단면적 변화에 대한 성능분석이 포함되어 있으나 단면적 변화 범위가 좁아 성능예측을 위해 도출한 순환유동 손실계수가 선형적인 분포를 갖고 있다. 최영석 등<sup>(3)</sup>은 Wilson 등<sup>(1)</sup>의 연구결과를 바탕으로 순환유동 손실계수를 2차곡선으로 추론하고 Badami<sup>(2)</sup>의 연구결과에 적용하여 성능예측이 가능하다는 것을 보였으나 2차곡선으로 추론한 근거에 대해 추가적인 연구가 필요하다.

본 연구에서 대상으로 한 사이드 채널형 연료펌프의 일반적인 구성도를 Fig. 1에 나타내었다. 사이드 채널형 연료펌프는 임펠러가 커버 (cover)와 하우징 (housing) 사이에 위치하고 있으며 임펠러 홈과 동일한 위치에 채널이 원주방향으로 형성되어 있다. Fig. 1에서 h는 채널 폭, Ac는 채널 단면적, R은 임펠러 외경, R1과 R2는 각각 채널 입출구 반경이며 Rc는 평균 채널 반경이고 G는 축방향 간극이다. 채널 단면적에 대한 정의 및 변화량을 Fig. 2에 비교하였다. 일반적인 채널 단면적 형상은 제작을 고려하여 곡선 및 직선부가 조합된 형상이나 본 연

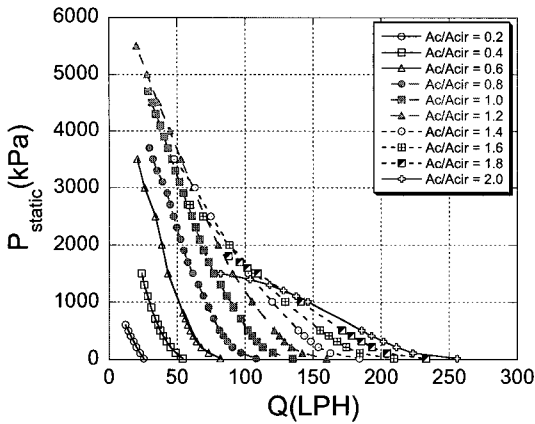


Fig. 4 Comparison of performance curve with various channel area ratios(CFD)

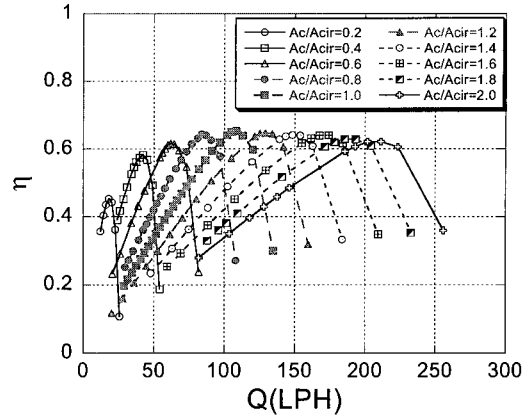


Fig. 5 Comparison of efficiency curve with various channel area ratios(CFD)

구에서는 이상적인 타원으로 설정하였다. 타원의 면적은  $h$ 를 지름으로 하는 반원과의 단면적비 ( $Ac/Acir$ ) 정의<sup>(3)</sup>를 사용하여 정의하였는데 단면적비를 0.2부터 2.0까지 0.2 간격으로 변화시켜 10가지 채널 면적을 갖도록 설정하였으며 형상은  $h$ 를 고려하여 채널의 깊이를 변화시켜 Fig. 2와 같이 모델링하였다. Fig. 2의 점선은 채널 단면 형상이 반원인 경우로써 채널 단면적비가 1.0이다.

### 3. 해석 영역 및 CFD

연료펌프의 구성은 Fig. 1에 나타난 펌프부와 임펠러를 구동하는 모터부로 나눌 수 있으며 펌프 내부는 복잡한 유로를 형성하고 있다. 본 연구는 채널의 단면적 변화에 대한 효과를 알아보는 것이 목적이므로 채널 및 임펠러 홈 형상을 단순화시켜 유동해석을 수행하였고 Fig. 3에 전체 해석영역 및 임펠러 홈 형상을 나타내었다. 본 연구의 대상펌프는 입출구부가 축방향으로 위치하고 있어 축방향으로 대칭을 이루고 있는 임펠러 홈 사이에 유로가 있으며 채널 형상도 변화가 많은 편이다. 단순화된 채널 및 임펠러 홈은 대칭성을 고려하여 한쪽만 해석할 수 있도록 수정하였으며 채널은 입출구가 평행을 이루는 사이드 흡입/배출 형태이고 임펠러 홈은 실제 사용되는 임펠러 형상을 그대로 적용하였다. 또한 성능에 영향을 미치는 축방향 간극을 포함시켜 입출구 사이의 스트리퍼 (stripper)의 영향을 고려하였다. 날개 개수는 37개이고 회전방향으로 50도의 전향각 (forward angle)을 가지고 있다.

유동장 해석을 위해 상용 CFD 프로그램인 ANSYS CFX-10을 사용하였다. 격자계는 임펠러 홈과 채널은 비정렬 격자계 (unstructured grid system)를, 수심  $\mu\text{m}$ 의 축방향 간극은 2차원 격자계 (2D grid system)를 사용하여 생성하였으며 약 60만개의 격자계로 수치해석을 수행하였다. 작동유체는 가솔린 (gasoline)의 물성치 (밀도 및 점성계수)를 반영하였고 해석영역의 입구에는 대기압, 출구에는 평균된 정압조건을 부여하여 유량을 산출해 내었다. 임펠러의 회전수는 5,800 rpm이며 회전하는 임펠러와 정지하고 있는 채널의 경계조건은 Frozen rotor 방식을 사용하였다.

본 연구는 특정한 작동점 (operating point)에 대한 성능분석이 아니라 전체적인 성능을 분석하는데 목표를 두고 있으므로 출구 정압을 변화시키며 설계점 (design point) 및 탈설계점에 대한 해석을 모두 수행하였다.

### 4. 성능분석 결과

연료펌프의 채널 단면적 변화에 따른 성능분석은 유량 변화에 따른 정압상승과 효율변화를 통해 알아보았다. Fig. 4에 유량변화에 따른 정압 상승을 단면적 변화에 따라 구별하여 나타내었다. 각각의 채널에 대한 완전도출유량 (fully delivery flow rate)에서부터 출구 정압을 높이며 수렴에 문제가 없는 영역까지 수치해석을 수행하였다. 채널 단면적비가 증가함에 따라 완전도출유량은 증가하나 저유량 영역에서는 복잡한 경향을 보이고 있다. 채널 단면적비가 1.2 이하인 경우에는 전반적으로 채널 단면적비의 증가에 따라 정압도 상승하는 경

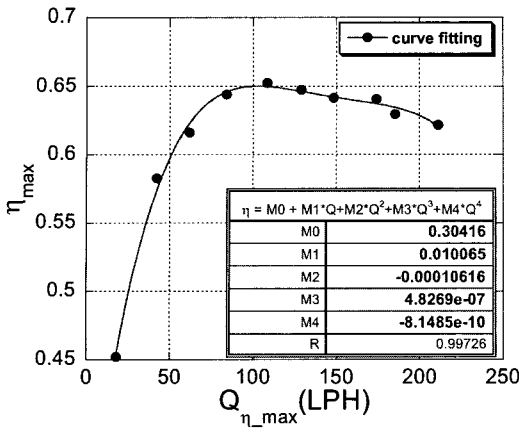


Fig. 6 Correlation between flow rate and efficiency at design point

항을 보이거나 채널 단면적비가 1.4 이상인 경우에는 유량이 100 LPM (Liter Per Minute) 이하인 부분에서 채널 단면적비의 증가에도 불구하고 정압이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 개수로형에 대한 연구결과 (Wilson 등<sup>(1)</sup>)와 유사하며 채널 단면적의 최적값이 존재한다는 사실을 확인할 수 있는 결과이다.

유량에 따른 효율변화는 Fig. 5에 비교하였다. 채널 단면적비가 증가함에 따라 최고 효율점 유량은 식 (1)과 같이 선형적으로 증가하나 최고 효율은 채널 단면적비가 1.0인 경우를 기준으로 증가하였다가 감소하는 경향을 보인다.

$$Q_{\eta_{max}} = -0.82266 + 106.51 \times (A_c / A_{cr}) \quad (1)$$

최고 효율점 유량과 최고 효율에 대한 상관관계와 관계식을 Fig. 6에 나타내었다. 최고 효율점 유량과 채널 단면적비가 선형성을 갖기 때문에 Fig. 6의 결과에서 최고 효율점 유량의 변화를 채널 단면적비의 변화라고 가정하면 채널 단면적비에 따라 최고 효율이 증가하다가 감소하는 경향을 그대로 확인할 수 있다. 따라서 식 (1)과 Fig. 6의 상관관계식을 조합하여 특정 채널 형상에서의 최고 효율점 정보를 알아낼 수 있다. 그러나 이러한 상관관계는 작동조건 및 범위에 따라 정량적으로 차이를 보이기 때문에 설계 및 수정에 적용하기 위해서는 위와 같은 상관관계에 대한 연구가 우선적 선행되어야 하며, 특정한 채널에서의 최고효율에 대한 연구는 다른 주요한 형상 변수와의 상호작용에 대한 분석이 뒷받침 되

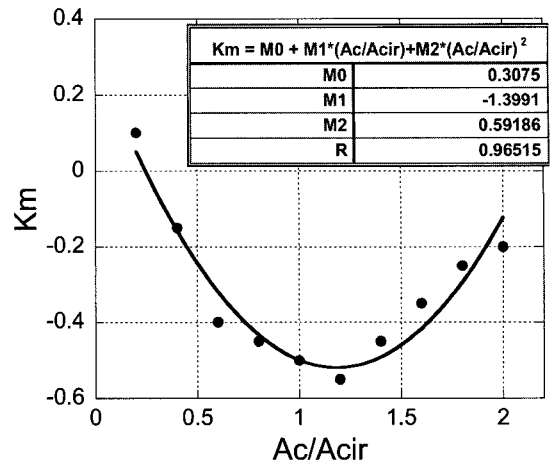


Fig. 7 Variation of circulatory flow loss coefficient with Ac/Acir

어야 한다.

### 5. 성능예측 및 순환유동손실계수 수정

성능예측은 실험이나 수치해석적인 방법을 적용하지 않고 성능에 영향을 미치는 주요한 인자들에 대한 평가를 통해 성능을 예측할 수 있어 초기 설계단계 및 모델 수정단계에서 널리 사용되고 있다. 이경용 등<sup>(4)</sup>은 재생 펌프의 성능예측에 사용된 프로그램<sup>(3)</sup>을 재생블로워의 개발에 적용하여 성능예측을 수행하고 설계점 조건 (유량 및 압력)을 만족하면서 높은 효율을 갖는 재생블로워를 설계하였다. 설계결과는 CFD를 통해 검증되었으며 채널과 임펠러 홈 사이의 내부 유동장을 분석하여 설계 근거를 확립하였다.

본 연구에서는 기존의 재생펌프의 성능예측 프로그램<sup>(3)</sup>을 적용하여 연구대상 모델들의 성능을 예측하고 CFD 결과와 비교하여 발생하는 차이를 순환유동 손실계수의 차이로 규정하고 성능예측 및 CFD 결과가 유사하도록 순환유동 손실계수를 수정하였다. 채널 단면적비의 변화에 따른 수정된 순환유동 손실계수의 분포와 상관관계식을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7의 2차 곡선으로 근사시키는 과정에서 발생한 오차는 CFD 결과와 성능예측 결과의 기울기가 정확하게 일치하지 않아 순환유동 손실계수를 변화시키며 CFD 결과와 일치시키는 과정에서 발생하는 오차이며 전체적인 경향을 분석하는데 문제가 없다고 판단된다. Fig. 7의 결과를 기존의 상

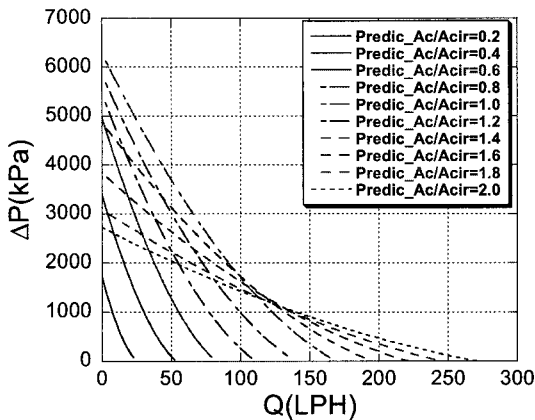


Fig. 8 Comparison of performance curve with various channel area(performance prediction)

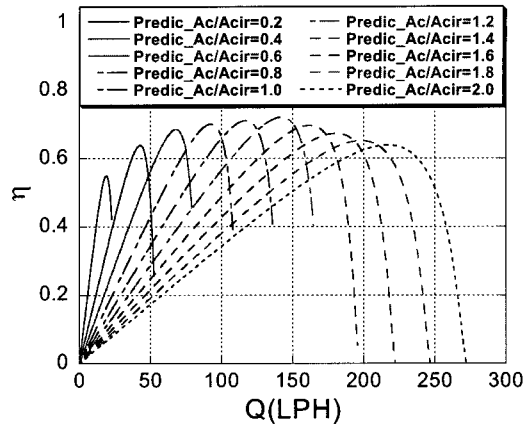


Fig. 9 Comparison of efficiency curve with various channel area(performance prediction)

관관계<sup>(3)</sup>와 비교하면 최적값이 존재하는 2차 곡선으로 근사되는 경향은 비슷하나 전체 값의 크기는 큰 차이를 보이고 있다. 실험으로부터 정의된 순환유동 손실계수는 채널 단면적 형상에 대한 효과뿐만 아니라 채널 전반적인 손실까지 포함하고 있기 때문에 유동영역이 단순화된 본 연구결과와 순환유동 손실계수가 더 작은 값으로 수정되었다고 판단된다. 따라서 본 연구결과를 재생 펌프의 설계 및 수정에 적용하는 경우에 적용하려는 실제 모델과의 차이를 분석하여 채널 설계에 고려해야만 실제 모델과 대상 모델의 성능차를 줄일 수 있다.

Figure 8에 예측된 유량 및 압력 상승량 결과를, 그리고 Fig. 9에는 예측된 유량 및 효율 결과를 각각 나타내었다. Fig. 8의 채널 단면적비 변화에 따른 유량과 압력 상승관계를 보면 Fig. 4의 결과와 잘 일치하는 것을 확인할 수 있으며 Fig. 9의 효율에 대한 결과 역시 Fig. 5의 결과와 동일한 경향을 보이고 있어 Fig. 7의 수정된 순환유동 손실계수의 타당성을 확인할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구는 사이드 채널형 연료펌프의 채널 단면적 변화가 펌프의 전체 성능에 미치는 영향을 수치해석적으로 알아보았으며 다음과 같은 결론을 내렸다.

- 1) 수치해석결과로부터, 사이드 채널형 재생펌프의 성능 및 효율은 채널 단면적에 따라 변화하며 채널 단면적

변화에 따른 최고 효율점 유량 및 최고 효율은 채널 단면적과 상관관계를 이룬다.

- 2) 채널 단면적 변화와 설계점 유량 (최고효율점 유량)은 선형적인 관계를 가지며, 효율이 최대가 되는 채널 단면적이 존재한다.
- 3) 성능예측 프로그램에 사용되는 순환유동 손실계수는 해석결과로부터 2차 곡선으로 근사하여 적용할 수 있으며, 적용된 성능예측결과는 해석결과와 일치된 경향을 보이고 있다.

## 참고문헌

- (1) Wilson, W. A., Santalo, M. A., and Oelrich, J. A., 1955, "Theory of the Fluid-Dynamics Mechanism of Regenerative Pumps," Trans. ASME, Vol. 77, pp. 1303~1316.
- (2) Badami, M., 1997, "Theoretical and Experimental Analysis of Traditional and New Periphery Pumps," SAE Technical Paper Series, n. 971074.
- (3) 최영석, 이경용, 강신형, 2003, "사이드채널형 연료펌프의 성능예측," 유체기계저널, 제6권, 제2호, pp. 29~33.
- (4) 이경용, 최영석, 2005, "사이드채널형 재생블로워의 성능평가," 2005 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 378~383.