

개수로형 재생펌프의 성능특성에 관한 실험적 및 수치해석적 연구

신동윤* · 최창호**† · 홍순삼** · 김진한**

Experimental and Numerical Study on the Performance Characteristics of an Open Channel Type Regenerative Pump

Dong-yun Shin*, Chang-Ho Choi**, Soon-Sam Hong**, Jinhan Kim**

Key Words : Regenerative pump (재생펌프), Performance test (성능시험), CFD (전산유체역학), Leakage flow (누설 유동)

ABSTRACT

Open channel type regenerative pump has been used in various industrial fields. It generates high pressure with low flow rate. However, it has low efficiency because of its complex flow pattern, We studied performance experiments and 3D numerical flow analysis of a regenerative pump. Through the numerical analysis, we could get the internal flow pattern and profile of a regenerative pump. Also, we examined leakage flow effects due to the gap between casing and impeller and stripper clearance. For the numerical analysis verification, we performed experiments and they had similar tendency at the design point.

1. 서론

재생펌프(Regenerative Pump)는 유동이 케이싱의 수로와 임펠러의 베인 사이를 반복적으로 순환하며 에너지를 공급받는 구조이다. 일반 펌프들에 비해 상대적으로 적은 유량에서 고압을 얻는데 적합한 특징을 가지고 있으며, 구조가 단순하고 내구성이 좋기 때문

에 가솔린 자동차의 연료펌프, 소화전용 펌프, 일반 산업용 등에 널리 사용된다. 그러나 복잡한 유동으로 인한 마찰 손실이 크기 때문에 소음이 크고 효율은 낮은 편이다. 개수로형 재생펌프의 3차원 개념도를 Fig. 1에 나타냈다. 입/출구가 회전축과 수직인 면에 위치하며 펌프의 압력이 임펠러의 접선 방향을 따라 선형적으로 상승하기 때문에 축 추력이 거의 없는 것이 특징이다.

재생펌프와 관련된 연구는 1950년대부터 활발히 수행되어 왔다. Wilson 등⁽¹⁾은 재생펌프의 임펠러와 케이싱 사이의 유동을 순환류로 가정하고 성능해석과 다양한 시험을 수행했으며, Senoo⁽²⁾는 기존의 성능해석 이

* 과학기술연합대학원대학교 발사체시스템공학

** 한국항공우주연구원 터보펌프그룹

† 교신저자, E-mail : cch@kari.re.kr

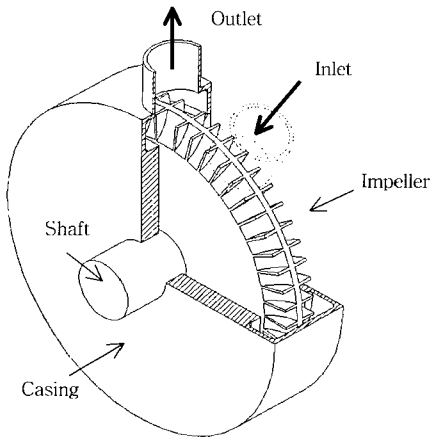


Fig. 1 3D view of the regenerative pump

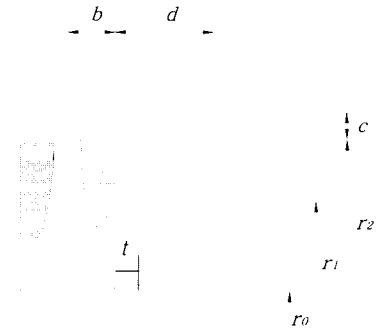


Fig. 3 Cross section of impeller and open channel

방지하는 스트리퍼 간극의 누설영향도 확인할 수 있었다. 유동해석 결과를 성능시험 결과와 비교/검증하였고 운전 점에서의 유동해석과 기존의 1D 해석⁽⁶⁾ 및 시험값이 잘 일치함을 확인하였다.

2. 시험

본 시험은 재생펌프의 성능특성을 측정하는데 목적을 두고 있다. Fig. 2는 측정설비의 개략도이며, 펌프 및 모터, 작동 유체의 공급 및 회수를 위한 물탱크, 계측을 위한 각종 센서(유량계, 압력센서, 토크미터, 타코미터), 유량조절을 위한 글로브밸브 등으로 구성되어 있다. 본 시험에 사용된 재생펌프의 단면형상을 Fig. 3

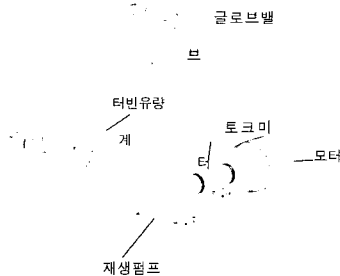


Fig. 2 Regenerative pump test facility

론들을 시험결과와 비교/검증했다. 또한 국내에서는 이찬등⁽³⁾이 개수로형 재생펌프의 설계 최적화에 관한 연구를 수행하였으며 심창열과 강신형⁽⁴⁾은 개수로형 재생펌프의 수치적 유동해석을 수행하였다. 그리고 이경용과 최영석⁽⁵⁾은 사이드 채널형 재생 블로워의 성능시험 및 유동해석을 수행하였다.

본 연구에서는 개수로형 재생펌프의 성능시험과 3차원 유동해석을 수행했다. 성능시험을 통해 운전 점에서의 성능 데이터를 얻었고 유동해석을 통해 재생펌프 내부의 복잡한 유동특성을 파악할 수 있었다. 또한 기존의 유동해석에서는 고려되지 않았던 케이싱과 임펠러 사이의 간극을 고려하여 해석함으로써 누설에 의한 효과를 확인했고, 입출구의 압력차로 인한 누설을

Table 1 Specification of regenerative pump

Operating condition (at Design Point)	
Working fluid	Water
Rotating speed (N)	1780 rpm
Flow rate (Q)	$0.04 \text{ m}^3/\text{min}$
Head (H)	80 m
Break Horse Power (P)	2.95 kW
Detail dimension	
Inlet and Outlet Diameter	40 mm
b	4.5 mm
r_2	72 mm
r_0	59 mm
Number of Impeller groove	48
Angle of stripper	10.05°
c/b	0.5
d/b	1.5
t	0.09 mm

에, 규격을 Table 1에 나타내었다.

물탱크는 시험에 필요한 물을 시험 시간 동안 충분히 공급할 만큼의 용량을 감안하여 설계했으며 펌프 흡입구와 물탱크 사이에 유량계를 설치하였다. 또한 유량을 조절하기 위한 밸브는 토출구 뒤쪽에 설치했으며 양정을 측정하기 위한 압력센서는 흡입구와 토출구에 각각 1개씩 설치했다. 그리고 펌프 내부에서의 압력 상승을 확인하기 위해서 수로를 따라 원주방향으로 8개의 압력 센서를 설치했고, 펌프의 축 동력과 회전수를 측정하기 위해 모터와 펌프 사이에 토크미터와 타코미터를 설치했다. 측정된 값은 A/D Converter(NI PCI-6220)를 이용하여 획득하였으며 측정된 값을 모니터링하고 PC에 저장할 수 있도록 NI Labview를 이용하여 프로그래밍 하였다. 시험설비는 KS 규격에 의거하여 만들어졌다.

양정 및 효율을 구하는 식은 다음과 같다.

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{P} \quad (2)$$

여기서, Q 는 유량이고 P 는 펌프의 축 동력을 나타낸다. 본 시험 설비의 양정측정, 효율측정의 상대 불확실도는 각각 0.24%, 0.74%이다. 본 시험은 재생펌프의 작동점 성능특성 측정에 주안점을 두었기 때문에 RPM을 고정하고 작동유체의 유량을 조절해 가면서 시험을 수행했다. 유량 변화는 단힘 밸브 상태에서 약 10단계 간격으로 밸브를 열면서 조절했다.

3. 유동해석

본 연구에서는 유동해석에 널리 사용되는 상용 전산유체해석 프로그램인 FLUENT⁽⁷⁾로 해석을 수행하였다. 정확한 유동해석을 위해서는 3차원 점성유동의 비정상 해석이 필수적이지만 이러한 해석 방법은 많은 시간과 계산 자원을 필요로 한다. 따라서 정상상태로 가정하고 계산을 수행하게 되는데 본 연구에서는 정지해있는 채널영역과 회전하는 임펠러 영역의 상대운동을 모사하기 위해 MRF(Multiple Reference Frame)를 적용했으며, 케이싱 벽면과 임펠러와의 간극에 의한 누설영향을 살펴보기 위해 시험펌프와 동일한 0.09 mm

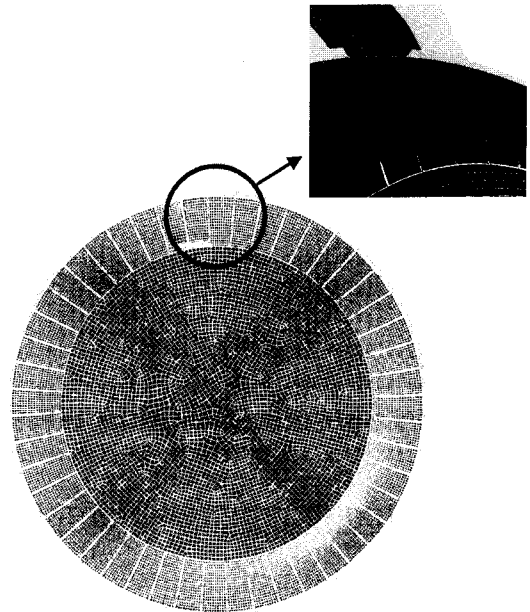


Fig. 4 Geometry and computational grid of regenerative pump

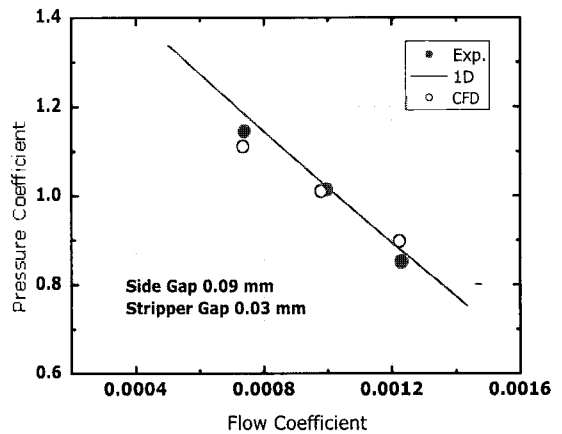


Fig. 5 Performance comparison at design point

의 간극을 고려하였다. 그리고 재생펌프 성능에 큰 영향을 미치는 스트리퍼 간극변화에 따른 영향을 모사하기 위해 0 mm, 0.03 mm, 0.1 mm, 0.5 mm, 1 mm 의 다섯 가지 종류를 생성했다. 입구경계조건은 속도가 균일하다고 가정했고 출구경계조건은 일정한 압력을 부여했다. 난류조건은 RNG $k-\epsilon$, 벽면에서는 벽 함수를 적용하였다. 유동해석을 위한 재생펌프의 형상 및 격자 분포를 Fig. 4에 나타냈다.

4. 결과 및 검토

4.1. 성능비교

시험결과와 1D 해석결과⁽⁶⁾, 그리고 유동해석결과를 비교하였다. Fig. 5에 유량계수($\phi = Q/ND^3$)와 압력계수($\psi = \Delta p/\rho N^2 D^2$)를, Fig. 6에 유량계수와 효율을 비교하여 각각 나타내었는데 운전 점 부근에서의 시험 값, 1D 그리고 유동해석결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6에서 유동해석과 시험 값이 차이를 보이는 것은 기계효율, 디스크 마찰손실 등이 고려되지 않았기 때문이다. 하지만 개략적인 경향은 잘 반영하고 있는 것으로 확인된다.

4.2. 스트리퍼 간극 영향 분석

재생펌프에는 출구에서의 높은 압력의 유동이 상대적으로 낮은 압력의 입구 쪽으로 역류되지 않도록 출구와 입구사이의 케이싱 유로가 협소해지는 영역인 스트리퍼(Stripper)가 존재한다. Fig. 7에 스트리퍼의 개념도를 나타냈다. 재생펌프는 스트리퍼의 간극 변화가 성능에 미치는 영향이 매우 크다고 알려져 있다.⁽⁵⁾ 본 연구에서도 간극 변화에 의한 성능 변화를 확인하기 위해 5가지의 스트리퍼 간극을 변화시켜가며 해석을 수행했다. 스트리퍼 간극 0mm는 임펠러 깃과 스트리퍼 영역의 케이싱과의 간극이 존재하지 않는 이상적인 상태를 의미한다. Fig. 8에 1D 해석결과와 유동해석 결과를 비교해 보았다. 1D 결과 값과 유동해석을 통해서 확인할 수 있듯이 0.1mm 변화에도 매우 민감한

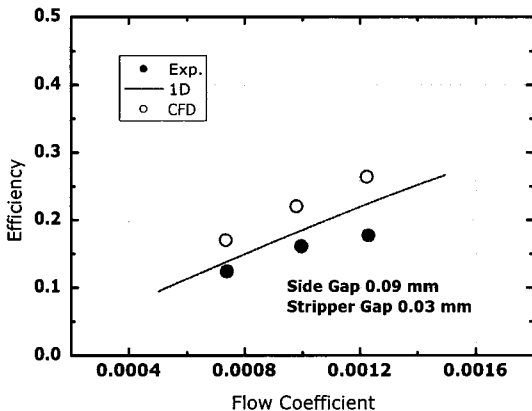


Fig. 6 Efficiency comparison at design point

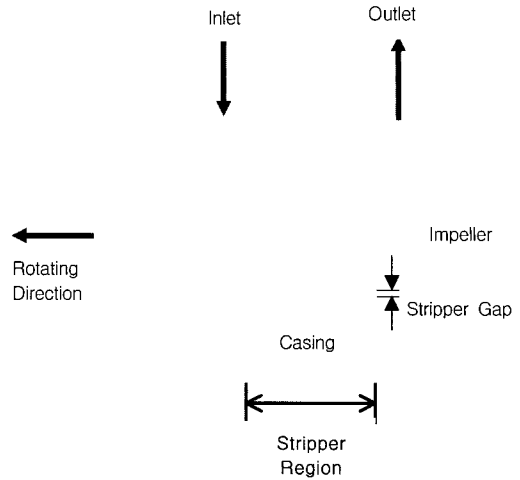


Fig. 7. Schematic of stripper

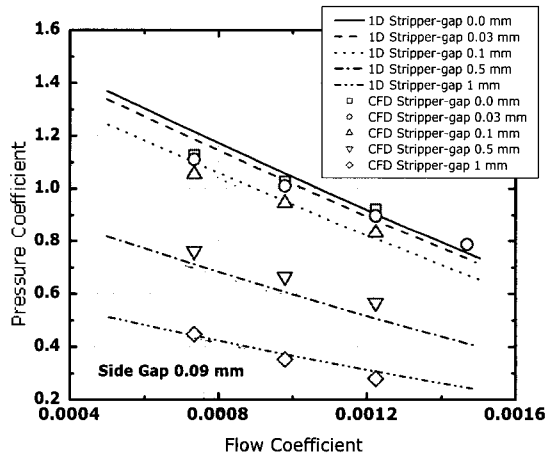


Fig. 8 Performance characteristics of various stripper gap

성능 변화를 초래함을 확인할 수 있다. 저 유량으로 고압을 내는 재생펌프에 있어서 고압인 출구 유량의 저압인 입구 쪽으로의 누설을 막아주는 역할을 하는 스트리퍼의 적절한 설계는 전체 성능에 있어서 매우 중요하다고 할 수 있다.

4.3. 원주 방향의 입력 상승

시험 값과 유동해석을 통해서 얻은 재생펌프의 원주 방향 압력 상승 값을 비교해 보았다. 입구를 기준으로 해서 스트리퍼까지 각도변화에 따른 압력 측정 위치를

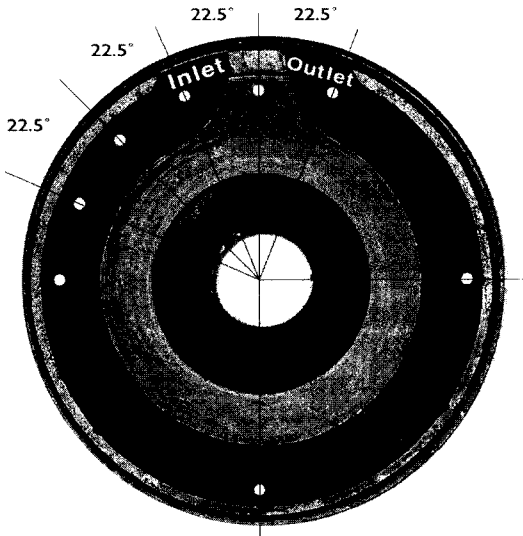


Fig. 9 Position of Pressure sensor

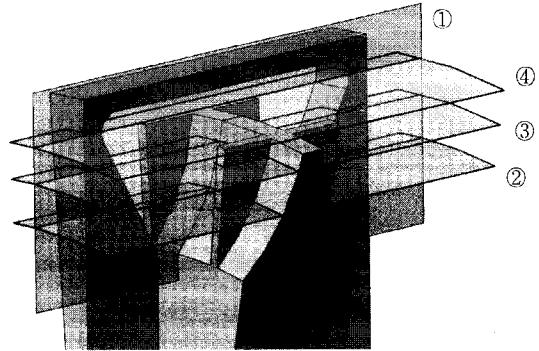


Fig. 11 Positions of section

재생펌프 내부의 유동은 정지해있는 케이싱과 회전하는 임펠러와의 상대운동으로 인해 복잡한 와류를 형성한다. 유동구조를 분석하고 이해하는 것이 임펠러와 케이싱의 수로설계에 중요하다. 본 연구에서는 유동해석을 통해 내부유동을 확인하였고 유동가시화를 위한 단면의 위치는 Fig. 11에 나타났다. Fig. 12 (a)는 임펠러와 케이싱 단면의 정압력분포를 나타낸 것이다. 임펠러 중심부에서 순환유동으로 인한 저압영역이 형성되어 있음을 확인할 수 있다. 임펠러를 통해 상승된 압력이 케이싱의 개수로 영역을 통과하면서 낮아지고 다시 임펠러로 유입된다. Fig. 12 (b)는 접선 속도분포를 나타낸 것으로서 임펠러의 끝단에서 가장 빠른 속도를 나타내는 것을 확인할 수 있다. Fig. 12 (c)의 속도 벡터분포를 통해서 순환유동의 와류 중심 위치를 확인할 수 있다. Fig. 13 (a)는 임펠러 하단 원주방향 단면의 정압력 분포를 나타낸 것으로 임펠러 압력면에서 흡입면으로 유동이 유입되고 이로 인해 와류가 형성되어 흡입면에 저압영역이 발생함을 확인할 수 있다. 압력면이 하나의 배인 영역에서 상대적으로 가장 높은 압력을 나타내고 있다. Fig. 13 (b)는 임펠러 상단 원주방향 단면의 정압력 분포로서 와류의 크기가 좀 더 발달하였으며 와류의 중심부가 흡 중앙 쪽으로 이동했다. Fig. 13 (c)는 임펠러 끝단과 케이싱 위쪽 벽면 사이의 단면 영역으로서 상대적으로 가장 높은 압력분포를 가진다. 와류의 중심이 흡의 중앙으로 이동하였음을 확인할 수 있다. 유동구조의 분석을 통해서 재생펌프 유동의 3차원 구조를 개념적으로 나타내면 Fig. 14과 같다. 이는 Hübel 등⁽⁸⁾이 레이저빔을 이용해 실험적으로 관측한 사이드 채널형 재생펌프의 유동구조 모델과도 유사한 형태를 띤다.

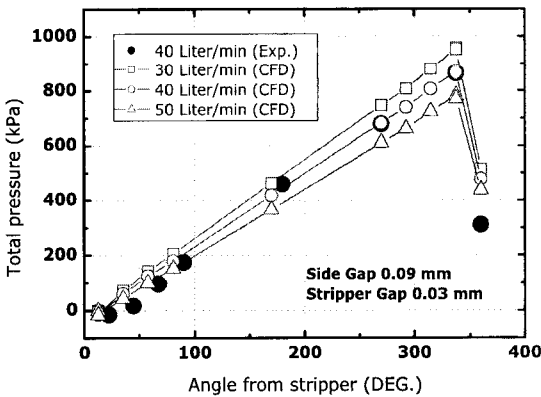
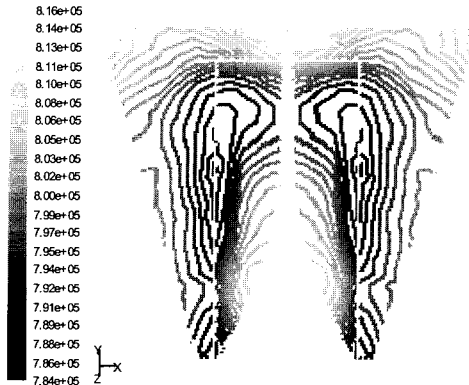


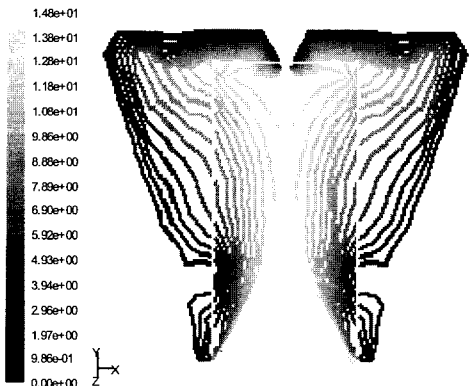
Fig. 10 Pressure distribution along the casing

Fig. 9에 나타냈고 압력 값을 Fig. 10에 나타냈다. 입구부터 출구까지 원주방향으로 압력이 선형적으로 상승하는 것을 확인할 수 있다. 임펠러의 흡을 통과하면서 임펠러의 회전에 의해 에너지가 유체에 전달되고 이것이 입구부터 출구까지 지속적으로 반복되면서 압력상승의 원인이 된다. 입, 출구사이 (360°)의 스트리퍼 영역은 임펠러 흡 내부의 남겨진 유체의 영향으로 압력이 여전히 높다. 이는 입구유동의 저항 역할을 하여 성능저하를 초래한다.

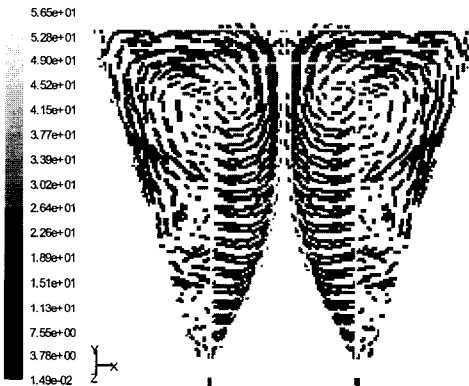
4.4. 임펠러와 개수로 내부유동



(a) Static pressure distribution

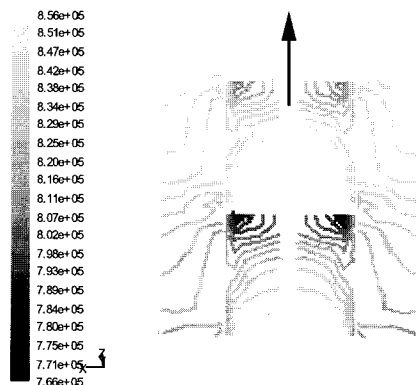


(b) Velocity distribution

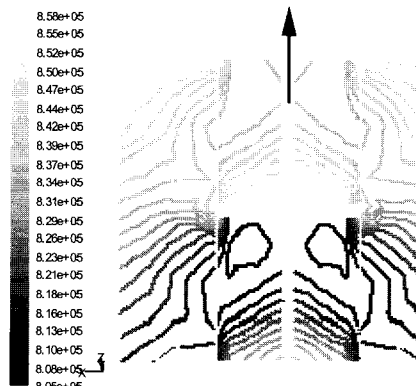


(c) Velocity vector distribution

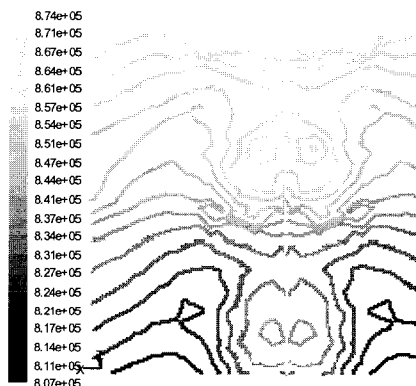
Fig. 12 Flow distribution at meridian section ①



(a) Section ②



(b) Section ③



(c) Section ④

Fig. 13 Static pressure distribution at cylindrical section

4.5. 케이싱과 임펠러 간극을 통한 누설 유동

본 연구에서는 유동해석 계산의 정확도를 향상시키기 위해 기존의 유동해석 연구에서는 고려되지 않았던

임펠러와 케이싱의 간극을 통한 누설 영향을 고려했다. 간극의 길이는 0.09 mm를 반영하였다. 간극을 고려하지 않고 유동해석을 수행한 결과와 비교결과를 Fig. 15에 나타냈다. 간극을 고려하지 않은 해석 결과는 시

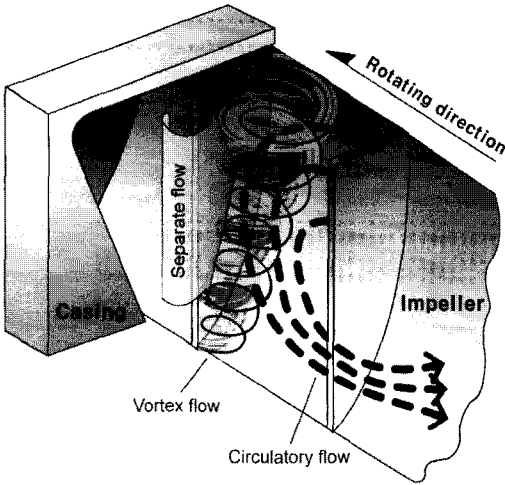


Fig. 14 Schematic of the flow structure

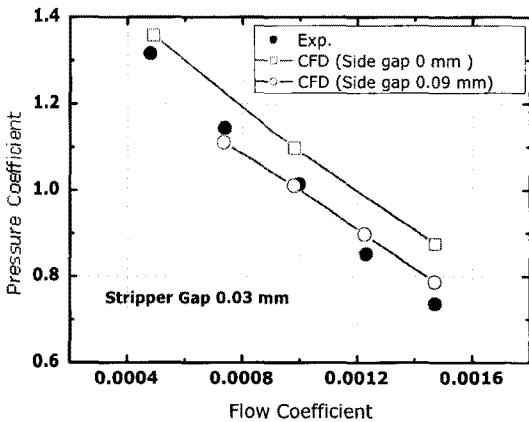


Fig. 15 Comparison of side-gap effect

험 값과 비교 했을 때 운전 점에서 약 6%의 오차를 나타냈으나 간극을 고려한 경우엔 약 0.35%로 시험 값에 더 근접하게 예측함을 확인할 수 있었다.

4.6. 입구 재순환 영역

스트리퍼의 설치를 통해 출구에서 입구로의 누설을 최소화하지만 임펠러 홈 내부에 남겨진 고압의 유체는 여전히 입구 쪽으로 흘러들어가게 된다. 이 때문에 입구의 유동이 저항을 받게 되어 역류가 발생하게 되는데 이는 재생펌프의 성능저하의 원인으로 작용한다. 유동해석을 통해 이를 가시적으로 확인했다. Fig. 16은 유량 변화에 따른 입구 유동의 유선을 나타낸 그림들이다. Fig. 16(a)는 분당 20 l/min의 저 유량 영역인데 낮은 유동속도와 상대적으로 높은 역 압력구배로 인해 입구에서 역류가 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 16(b)는 40 l/min의 운전점 유량인데 저 유량 보다는 정도가 감소했지만 여전히 역류를 확인할 수 있다. Fig. 16(c)는 60 l/min의 고 유량 영역으로서 유속이 증가하고 양정이 작아지면서 입구유동이 부드럽게 채널로 유입되고 있음을 확인할 수 있다. 초음속 재생형 압축기의 경우 입구 유동을 방해하는 재순환 영역을 줄이고자 스트리퍼에서 상대적으로 낮은 압력의 채널 쪽으로 관을 연결하여 임펠러 홈의 압력을 저감 시키려는 시도도 있지만 아직 상용화 되지는 않았다.⁽⁹⁾

5. 결론

본 연구는 개수로형 재생펌프의 성능시험 및 유동해석을 수행했으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

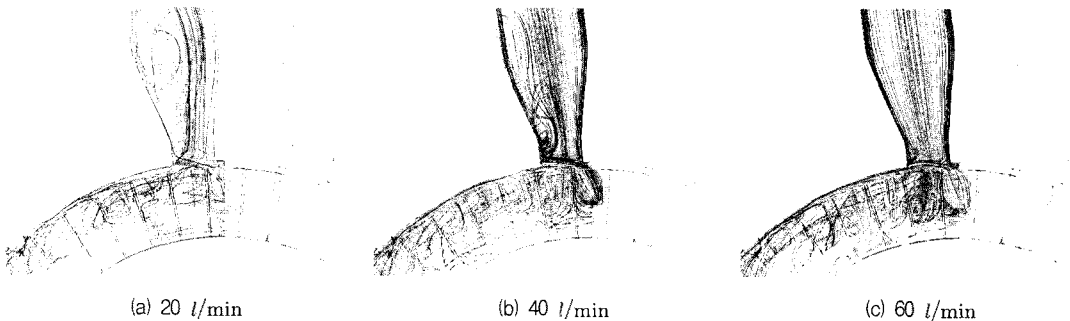


Fig. 16 Streamline at inlet region

- 1) 운전 점에서의 성능시험 결과와 1D, 유동해석 결과가 잘 일치함을 확인했다.
- 2) 유동해석을 통해 스트리퍼 간극의 영향을 확인했고 1D 시험결과와 유사한 경향을 나타냈다.
- 3) 유동해석을 통한 내부 유동구조 분석을 통해 복잡한 3차원 유동구조를 확인했다.
- 4) 스트리퍼를 통과한 임펠러 홈 내부의 유동으로 인해 입구유동이 방해를 받고 재생펌프의 성능 저하가 유발됨을 확인했다.
- 5) 케이싱과 임펠러 측면의 간극에 의한 누설유동을 유동해석을 통해 확인했으며 간극을 고려한 유동해석의 결과가 시험 값에 더 근접하게 예측하였다.
- (3) 이찬, 성형진, 권장혁, 정명균, 1991, “재생펌프의 성능해석 및 최적화에 관한 연구,” 대한기계학회논문집, 제15권, 제2호, pp. 661~667.
- (4) 심창열, 강신형, 2003, “재생펌프의 유동해석 및 누설유동에 관한 연구,” 대한기계학회논문집B, 제27권, 제8호, pp. 1015~1022.
- (5) 이경용, 최영석, 2005, “사이드채널형 재생블로워의 성능평가,” 2005 유체기계 연구개발 발표회 논문집, pp. 378~383.
- (6) 신동윤, 최창호, 김진한, 2006, “개수로형 재생펌프의 특성해석에 관한 연구,” 유체기계저널, 제9권, 제6호에 게재예정
- (7) “FLUENT User’s Guide,” FLUENT Inc., 1998.
- (8) Hübel, M., Blättel, B. and Strohl, W., 1995, “Investigation on Fluid Mechanics of the Regenerative Pump Used in Gasoline Injection Systems,” SAE Technical paper series, 950077, pp. 131~139.
- (9) Song, J. W., Raheel, M., Engeda, A., 2003, “A Compressible Flow Theory for Regenerative Compressors with Aerofoil Blades,” Proc. Instn Mech. Engrs, Part C: J. Mechanical Engineering Science, Vol. 217, No. 11, pp. 1241~1257.

참고문헌

- (1) Wilson, W. A., Santalo, M. A. and Oelrich, J. A., 1955, “A Theory of the Fluid-dynamic Mechanism of Regenerative Pumps,” Trans. ASME, Vol. 77, pp. 1303~1316.
- (2) Senoo, Y., 1954, “Researches on the Peripheral Pump,” Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyusku University, Vol. 3, No. 10, pp. 53~113.