

## ‘S’ 형상의 연속형 임펠러를 갖는 재생형 펌프의 성능 비교평가

전석윤<sup>1,2</sup> · 이상문<sup>2</sup> · 윤준용<sup>1</sup> · 장춘만<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>한양대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>한국건설기술연구원

### Performance Comparison Evaluation of a Regenerative Pump with S-Shaped Continuous Impeller

SEOK-YUN JEON<sup>1,2</sup>, SANG-MOON LEE<sup>2</sup>, JOON-YONG YOON<sup>1</sup>, CHOON-MAN JANG<sup>2,†</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan 15588, Korea

<sup>2</sup>Division of Environmental and Plant Engineering, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283 Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang 10223, Korea

†Corresponding author :  
jangcm@kict.re.kr

Received 5 April, 2018  
Revised 21 April, 2018  
Accepted 30 April, 2018

**Abstract >>** Performance evaluation of a regenerative pump has been compared with a conventional open channel impeller and a S-shaped continuous impeller designed newly. To analyze flow field for both pumps, analysis code, CFX, is employed. Unstructured grids are used to represent a composite geometry including blade, casing and ducts. Throughout the comparisons between numerical simulation and experiments, the predicted efficiency has a good agreement with the experimental one. It is noted that the pump having a S-shaped continuous impeller is about 4.8 percent more efficient than conventional one, which is due to the relatively large pressure increase. Detailed flow field inside the pump is also analyzed and compared.

**Key words :** Regenerative pump(재생형 펌프), Performance curve(성능곡선), Numerical simulation(수치해석), Pump impeller(펌프 임펠러), Efficiency(효율)

## 1. 서론

재생형 펌프는 일반적으로 고압, 정유량 특성을 갖으며, 연료전지용 balance of plant (BOP)를 비롯하여 환경용 펌프 등으로 널리 사용되고 있다. 재생형 펌프는 물 공급용 펌프뿐 만아니라, 펌프 입구 측에 물 공급 장치와 함께 기체를 흡입하는 흡기포트를 장착하여 미세버블을 생성하는 장치(미세버블펌프 또는 마이크로버블펌프)로 사용되기도 한다. 이러한

재생형 임펠러를 갖는 미세버블펌프는 하수처리, 산업폐수처리를 비롯하여, 축산, 페인트, 어업 등 여러 산업 분야에 걸쳐 다용도로 사용되고 있다<sup>1,2)</sup>.

재생형 펌프의 임펠러는 지금까지 주로 개방채널형 및 사이드채널형(open channel & side channel)의 형태로 사용되어 왔다. 산업계에서는 사이드채널형보다 구조가 간단하여 제조비용이 상대적으로 저렴한 개방채널형 임펠러가 많이 사용되고 있다. 각각의 임펠러 날개(impeller blade)는 45-50여 개로 구성

되며, 임펠러가 회전하는 동안 각 날개와 고정식 측면 채널(케이싱)과의 상호작용으로 발생하는 helical-toroidal 운동 및 선회유동(circulation flow)으로 인하여 점진적으로 압력이 증가하는 원리이다. 이 중 재생형 펌프의 선회유동은 2가지 이상의 유체를 사용하는 경우 강력한 혼합을 유도할 수 있는데, 미세버블펌프는 이러한 믹싱과 함께 펌프의 고압특성을 응용하여 유입된 기체를 잘게 분해(또는 용해)하는 과정을 거쳐 마이크로 단위의 미세버블이 생성하기도 한다<sup>3)</sup>.

재생형 펌프의 기본설계에 관한 연구는 1950년대부터 시작되었다. Wilson 등<sup>4)</sup>과 Iversen<sup>5)</sup>은 실험을 기반으로 하여 펌프내부 유동 및 손실모델을 개발하였다. Meakhal과 Park<sup>6)</sup>은 재생형 펌프의 서로 다른 날개형상에 대하여 분석하였다. 이를 통하여 날개 비틀림 효과에 따른 선회유동 증가 양상을 확인하였다. Karanth 등<sup>7)</sup>은 재생형 펌프의 다양한 날개형상에 대하여 수치해석을 통한 비교분석을 수행하였다. 즉, 날개 수가 증가할수록 압력이 증가하는 양상 및 이와 관련된 해석적인 결과를 분석하였다.

최근 들어 수치해석 및 컴퓨터 기술의 발전으로 고효율 설계를 위하여 실험과 함께 수치 최적설계를 이용한 설계방법이 도입되고 있다. 이와 관련된 선행 연구들은 내부의 선회유동 특성을 최적화하고 펌프의 성능 개선을 위하여 임펠러 날개의 꺾임각도 및 날개 수를 변화시켜 그 효과를 분석하였다<sup>8,9)</sup>. 아울러 개방채널형 임펠러를 갖는 재생형 펌프는 개별 날개가 외팔보 형태로 지지되는 구조이므로, 펌프 내부의 고압을 생성하고 그 상태를 견디기 위한 날개 두께 및 날개 수의 제한이 요구되기도 한다.

본 연구에서는 개방채널형 펌프의 날개를 구조적으로 안전하게 설계하기 위해 외팔보 날개를 하나로 연결하는 'S' 형상의 연속형 임펠러를 개발하여, 기존 임펠러와의 성능을 수치적으로 비교분석하였다.

## 2. 재생형 펌프

### 2.1 펌프 운전조건

본 연구에서는 재생형 펌프를 대상으로 하여, 펌프 전체의 외형을 Fig. 1과 같이 구성하였다. Table 1은 재생형 펌프의 설계점에서의 유량 및 압력 그리고 임펠러 회전수를 나타낸다. 여기서 유량계수( $\Phi$ ), 압력계수( $\Psi$ ) 및 효율( $\eta$ )은 무차원 변수로서 나타내며, 각각의 정의는 다음의 식 (1)-(3)과 같다.

$$\Phi = \frac{Q}{AU_i} \quad (1)$$

$$\Psi = \frac{2\Delta P}{\rho U_i^2} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{Q\Delta P}{T\omega} \quad (3)$$

여기서,  $Q$ ,  $A$ ,  $U_i$ ,  $\Delta P$ ,  $\rho$ ,  $T$ ,  $\omega$ 는 유량, 입구 덕트 단면적, 임펠러 끝단의 회전방향 속도, 압력, 작동

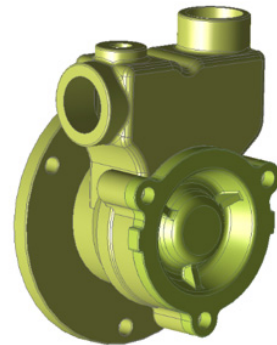


Fig. 1. Perspective view of a regenerative pump

Table 1. Specification of a reference regenerative pump at operation condition

Name	Value
Flow coefficient	0.13
Pressure coefficient	2.16
Rotational frequency of impeller	3,550 rpm

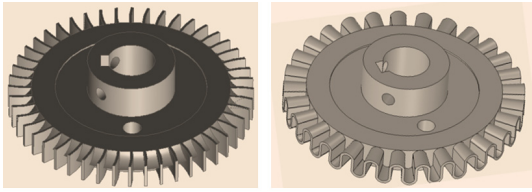


Fig. 2. Perspective view of reference (left) and S-shaped continuous impeller (right)

유체인 물의 밀도, 토크 및 임펠러 각속도를 각각 의미한다.

## 2.2 기존 및 ‘S’ 형상의 연속형 임펠러 설계사양

재생형 펌프의 케이싱 및 내부 채널의 형상을 동일하게 고정된 상태에서 임펠러의 형상 변화에 따른 성능특성을 수치해석적 방법을 이용하여 비교, 분석하였다. 개방채널형 임펠러를 갖는 재생형 펌프의 임펠러는 고압의 내부압력에 의한 변형을 방지하고 구조적인 안정성을 확보하기 위하여 모든 임펠러 날개가 하나의 일체형으로 연결되는 방식의 형상설계를 적용하였다<sup>10)</sup>.

본 연구에서 새롭게 설계된 ‘S’ 형상의 연속형 임펠러의 제원 및 형상을 기존 임펠러와 비교하여 Fig. 2 및 Table 2에 각각 나타내었다.

각각의 임펠러 날개의 곡선 부분은 임펠러 폭의 1/2을 곡률반경으로 하여 설계하였다. 기존 임펠러 날개에 비하여 두께는 줄이고, 날개 수는 10개 증가 시킴으로써, 임펠러의 회전에 의한 각 날개 사이에서의 압력 증가 및 유로 확장을 유도하였다.

## 3. 실험 및 수치해석

### 3.1 실험장치 및 방법

재생형 펌프의 성능특성을 평가하기 위한 실험장치를 설계, 제작하였다. Fig. 3은 펌프성능 실험장치의 구성을 나타내며, 실험방법 및 절차는 기 발표 논문<sup>11)</sup>에 상세히 기술하였다. 성능시험을 통하여 도출

Table 2. Design specification of impeller

Name	Impeller type	
	Reference	S-shaped continuous
Number of blade, ea	48	56
Outer diameter of impeller, mm	72.6	72.6
Inner diameter of impeller, mm	59	59
Blade thickness, mm	0.82	0.8



Fig. 3. Picture of an experimental apparatus<sup>11)</sup>

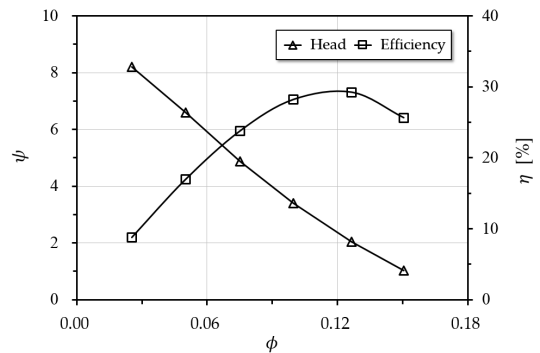


Fig. 4. Performance curve of reference regenerative pump

된 기존 형상의 임펠러를 갖는 재생형 펌프의 성능곡선은 Fig. 4와 같다.

### 3.2 수치해석 조건 및 방법

기존 및 ‘S’ 형상의 연속형 임펠러를 적용한 펌프 내부 유동장 및 성능특성을 평가하기 위하여 상용해석 소프트웨어인 CFX 16.0 (ANSYS사)<sup>12)</sup>을 사용하

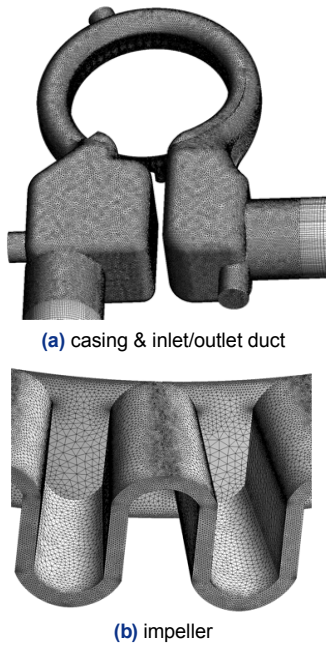


Fig. 5. Computational grids for S-shaped continuous impeller

였다.

비압축성 삼차원 정상유동에 대한 연속방정식 및 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식 등의 지배 방정식은 유한체적법으로 이산화되며, 대류항과 확산항의 이산화 방법으로는 각각 수정된 상류차분도식과 중심차분법을 적용하였다. 난류모델로는 SST 모델(shear stress transport)<sup>13)</sup>을 적용하였다.

펌프 임펠러와 케이싱 그리고 좁은 틈 간격을 갖는 재생형 펌프의 복잡한 형상을 고려하여 Fig. 5와 같이 임펠러부와 케이싱부로 분리하여 각각에 계산 격자를 생성하였다. 임펠러 및 케이싱 내부는 사면체를 이용한 비정렬격자로 구성하였으며, 입구 및 출구 덕트는 육면체 격자로 형성하였다. 비대칭형 펌프 형상을 고려하여 임펠러를 포함하는 내부 유동장 전 영역에 걸쳐 격자를 형성하였다. 재생형 펌프의 케이싱과 임펠러 사이의 간극은 0.1 mm로 하여, 실제 펌프의 형상을 모사하였다. 최종 계산격자 수는 격자의존성평가를 통하여 결정하였다<sup>9)</sup>.

펌프 출구에서 발생하는 강한 wake flow를 고려하여 입구 및 출구에 각각 덕트 직경의 5배 및 10배

Table 3. Computational grids and boundary conditions

Name	Value
Nodes number of grids	6,500,000
Duct length at inlet	5D*
Duct length at outlet	10D*
Boundary condition at inlet	pressure
Boundary condition at outlet	mass flow
Boundary condition at interface between impeller and casing	Frozen rotor interface

D\*: outer diameter of impeller

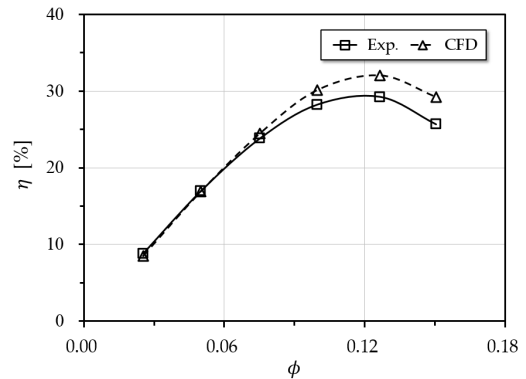


Fig. 6. Comparisons of pump efficiency between experiment and numerical simulation for reference pump

의 직관길이를 확보하여 계산영역을 설정하였다.

수치해석 경계조건으로 입구 단면에 0 Pa의 압력을, 출구 단면에 질량유량을 각각 적용하였다. 벽면은 점착 조건(no-slip condition) 및 단열 조건(adiabatic condition)을 사용하였으며, 해석격자 및 경계조건은 Table 3에 나타난다.

## 4. 결과 및 고찰

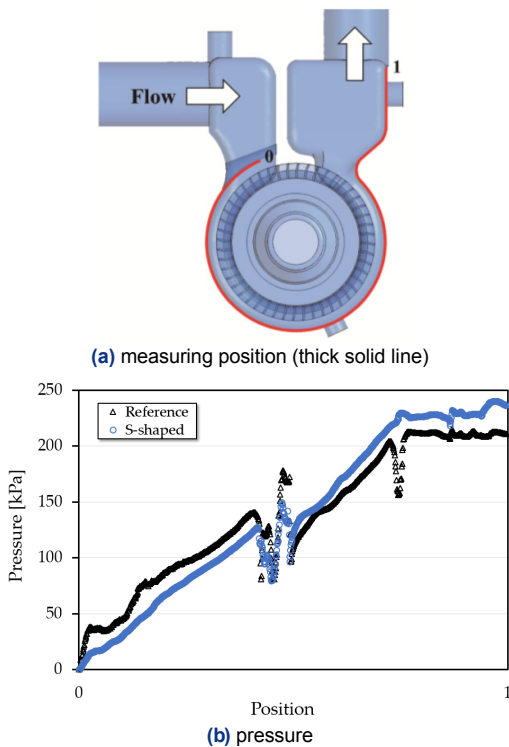
### 4.1 재생형 펌프 성능 비교검증

해석 결과의 유효성을 검증하기 위하여 수치해석을 통해 계산된 기존 재생형 펌프의 효율을 실험값과 비교하여 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서와 같이 실험 및 수치해석을 통하여 도출된 펌프효율은 전반적으로 유사한 경향을 보이며, 설

**Table 4.** Comparisons of pump performance between reference and “S” continuous impeller at the operating flow condition

Name	Impeller type	
	Reference	S-shaped
Pump efficiency, %	32.07	33.63
Pressure coefficient	2.17	2.49
Torque, Nm	1.43	1.53

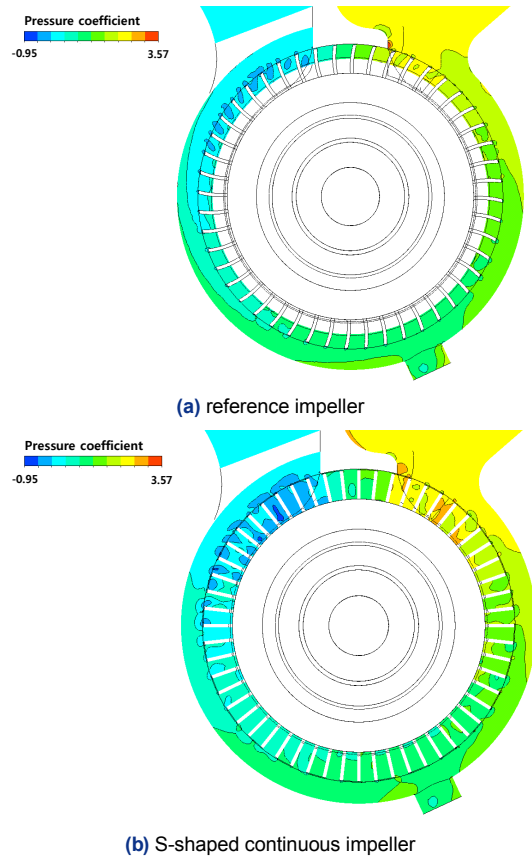


**Fig. 7.** Pressure distributions along the casing wall

계점 유량계수인 0.13에서 약 8%의 편차를 나타낸다.

#### 4.2 펌프 내부 유동장 특성 분석

운전 유량조건(유량계수: 0.13)에서의 기존 및 ‘S’ 형상의 연속형 임펠러에 대한 펌프 성능값을 Table 4에 나타낸다. 표에서 알 수 있듯이 ‘S’ 형상의 연속형 임펠러는 기존 임펠러에 비하여 토크값은 다소 증가하지만 압력의 상승폭이 더 큰 특성을 보여 결과적



**Fig. 8.** Comparisons of pressure on the mid-height of the impeller blade between experiment and numerical

으로 전체적인 기계적 효율은 기존 대비 약 4.8% 향상됨을 알 수 있다.

기존 및 ‘S’ 형상의 연속형 임펠러가 펌프 케이싱을 따라 압력이 증가하는 양상을 알아보기 위하여 후처리를 통해 계산된 각각의 압력값을 펌프 케이싱의 동일한 선상에서 비교하여 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7(a)는 압력 측정점의 위치를 나타낸다. Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 압력은 케이싱 입구에서부터 출구방향으로 점진적으로 증가되는 것을 알 수 있다. 또한 전 영역에서 ‘S’ 형상의 연속형 임펠러의 압력이 기존 임펠러에 비하여 향상됨을 확인할 수 있다. 두 종류의 임펠러 형상에 따른 펌프 성능 특성을 비교하기 위하여 임펠러 날개의 중간 높이의 단면에

대한 압력분포를 비교하여 Fig. 8에 나타낸다. 두 경우 모두 유체가 임펠러의 회전에 의하여 입구에서부터 출구 방향으로 유동하는 과정에서 각 날개 사이의 선회유동에 의하여 점진적으로 압력이 증가하는 것을 알 수 있다.

이상의 연구를 통하여 본 연구에서 설계하여 적용한 'S' 형상의 연속형 임펠러는 기존 임펠러에 비해 구조상의 장점뿐만 아니라 효율 측면에서도 유리함을 알 수 있다. 다만 임펠러에 작용하는 토크가 다소 증가한 것은 추후 후속 연구를 통하여 임펠러 날개의 두께를 줄여 날개 수를 증가시키면 개선될 여지가 있다고 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 개방채널형 펌프의 날개를 구조적으로 안전하게 설계하기 위해 외팔보 날개를 하나로 연결하는 'S' 형상의 연속형 임펠러를 고안하여 성능 시험을 수행하고, 기존 임펠러와의 성능 및 유동특성을 수치적으로 비교 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 기존 임펠러의 성능특성을 파악하고 수치해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 재생형 펌프의 성능 시험을 수행하였으며, 이를 통한 펌프 효율의 실험 값은 수치해석 결과와 최대 상대오차 8% 이내의 값으로 유사한 경향을 나타냈다.

2) 설계점의 유량조건(유량계수: 0.13) 하에서의 기존 및 'S' 형상의 연속형 임펠러에 대한 유동 수치 해석을 수행하였다. 'S' 형상의 연속형 임펠러는 기존의 임펠러에 비해 토크값은 다소 증가하지만 압력의 상승폭이 더 큰 특성을 보여 결과적으로 전체적인 기계적 효율은 기존 대비 약 4.8% 향상될 것으로 예측되었다.

3) 기존 및 'S' 형상의 연속형 임펠러에 대하여 펌프 케이싱의 동일 선상에서 수치적으로 계산된 각각의 압력값을 비교한 결과, 펌프 내부의 압력은 케이싱 입구에서부터 출구방향으로 점진적으로 증가하고, 전 영역에 걸쳐 'S' 형상의 연속형 임펠러의

압력이 기존 임펠러에 비해 다소 높은 것을 확인할 수 있었다.

4) 'S' 형상의 연속형 임펠러에 있어 임펠러에 작용하는 토크가 기존보다 다소 증가할 것으로 예측된 부분은 추후 날개 두께 및 날개 수에 대한 연구를 수행함으로써 충분히 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

## 후기

본 연구는 국토교통부 플랜트연구사업(Project No. 16IFIP-B067108-04)의 연구비 지원으로 수행되었다.

## References

1. M. Takahashi, "Effect of shrinking microbubble on gas hydrate formation". J. of Physical Chemistry B, Vol. 107, No. 10, 2003, pp. 2171-2173.
2. M. Takahashi, "Potential of Microbubbles in Aqueous Solutions: Electrical Properties of the Gas-Water Interface". J. of Physical Chemistry B, Vol. 109, 2005, pp. 21858-21864.
3. A. Agarwal, W. Jern Ng, and Y. Liu, "Principle and application of microbubble and nanobubble technology for water treatment", Chemosphere, Vol. 84, 2011, pp. 1175-1180.
4. W. A. Wilson, M. A. Santalo, and J. A. Oelrich, "A theory of the fluid dynamic mechanism of regenerative pump", Trans. of the ASME, Vol. 77, 1955, pp. 1303-1316.
5. H. W. Iversen, "Performance of periphery pump", Trans. of the ASME, 53-A-102, 1955, pp. 19-28.
6. T. Meakhail and S. O. Park, "An Improved theory for regenerative pump performance", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: J. of Power and Energy, Vol. 219, No. 3, 2005, pp. 213-222.
7. K. V. Karanth, M. S. Manjunath, S. Kumar, and N. Y. Sharma, "Numerical Study of a Self Priming Regenerative Pump for Improved Performance using Geometric Modifications", Inter. J. of Current Engineering and Technology, Vol. 5, No. 1, 2015, pp. 104-109.
8. C. M. Jang and G. Y. Han, "Enhancement of performance by blade optimization in two-stage ring blower", J. of Thermal Science, Vol. 19, No. 5, 2010, pp. 383-389.
9. S. Y. Jeon, C. K. Kim, S. M. Lee, J. Y. Yoon, and C. M. Jang, "Performance enhancement of a pump impeller using optimal design method", J. of Thermal Science, Vol. 26, No. 2,

- 2017, pp. 119-124.
10. C. M. Jang, "Micro bubble pump for water treatment and biogas purification system", Korean Intellectual Property Office, 2017, KSP 10-1811334.
  11. S. M. Lee and C. M. Jang, "Evaluation for the numerical model of a micro-bubble pump", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 27, No. 1, 2016, pp. 121-126.
  12. ANSYS 16.0 user manual, 2015.
  13. D. C. Wilcox, "Turbulence modeling for CFD", 1998, La Canada, CA: DCW industries.