

볼루트의 형상 변화가 원심펌프 성능에 미치는 영향에 대한 수치해석

이정현,¹ 허남건,^{*2,3} 윤인식⁴

¹서강대학교 대학원 기계공학과
²서강대학교 다중현상 CFD 연구센터(ERC)
³서강대학교 기계공학과
⁴주식회사 두크 기술연구소

NUMERICAL STUDY OF A CENTRIFUGAL PUMP PERFORMANCE WITH VARIOUS VOLUTE SHAPE

J.H. Lee,¹ N. Hur^{*2,3} and I.S. Yoon⁴

¹Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Sogang Univ.
²Multi-Phenomena CFD Engineering Research Center(ERC), Sogang Univ.
³Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.
⁴Dooch R&D center, Dooch CO.

Centrifugal pumps consume considerable amounts of energy in various industrial applications. Therefore, improving the efficiency of pumps machine is a crucial challenge in industrial world. This paper presents numerical investigation of flow characteristics in volutes of centrifugal pumps in order to compare the energy consumption. A wide range of volumetric flow rate has been investigated for each case. The standard k- ϵ is adopted as the turbulence model. The impeller rotation is simulated employing the Multi Reference Frames(MRF) method. First, two different conventional design methods, i.e., the constant angular momentum(CAM) and the constant mean velocity(CMV) are studied and compared to a baseline volute model. The CAM volute profile is a logarithmic spiral. The CMV volute profile shape is an Archimedes spiral curve. The modified volute models show lower head value than baseline volute model, but in case of efficiency graph, CAM curve has higher values than others. Finally for this part, CAM curve is selected to be used in the simulation of different cross-section shape. Two different types of cross-section are generated. One is a simple rectangular shape, and the other one is fan shape. In terms of different cross-section shape, simple rectangular geometry generated higher head and efficiency. Overall, simulation results showed that the volute designed using constant angular momentum(CAM) method has higher characteristic performances than one by CMV volute.

Key Words : 전산유체역학(CFD), 원심펌프(Centrifugal pump), 볼루트 케이싱(Volute casing)

1. 서 론

외부로부터 동력을 받아 기계적 에너지를 유체의 운동에너지로 변환하는 유체기계인 원심펌프는 산업 현장이나 주거지에서 가장 많이 쓰인다. 그 이유로, 간단한 구조로 이루어져 있어 사용이 쉽고 효율이 비교적 높은 것이 장점이다. 최근

산업의 발달로 더욱 높은 펌프 성능을 얻기 위한 연구가 많이 진행되어 왔다. 일반적으로 임펠러의 경우 원심펌프의 성능에 가장 많은 영향을 주기 때문에 기존에 연구가 많이 진행되어 왔지만 볼루트에 대한 연구는 상대적으로 적은 편이다. 하지만 임펠러에서 토출된 유동을 모아 파이프로 연결하는 볼루트에 대한 설계는 임펠러만큼 중요하다. 최근까지 진행된 연구들을 살펴보면 다음과 같다. Kang and Hong[1]은 볼루트의 표면 거칠기와 단면적 분포에 대해 연구하였다. 볼루트의 내부를 매끄럽게 가공하여 양정과 펌프 효율이 증가하는 것을 확인하였고, 볼루트 유로 면적을 선형적으로 증가하도록 수정하였다. 결과적으로 유동의 운동에너지가 압력에너

Received: May 15, 2015, Revised: September 22, 2015,
Accepted: September 22, 2015.

* Corresponding author, E-mail: nhur@sogang.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.3.35>

© KSCFE 2015

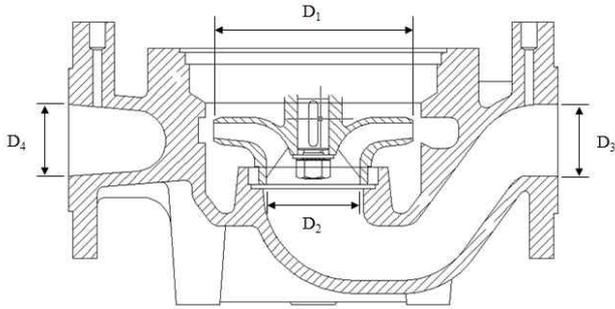


Fig. 1 General view of the designed pump



Fig. 2 Computational domain of centrifugal pump

지로 효율적으로 변환됐기 때문에 양정과 효율에 효과를 보았다. Thin et al.[2]은 펌프 내에서 일어나는 손실이 유량과 양정에 미치는 영향력에 대하여 평가하였다. Yang et al.[3]는 볼루트 설계의 중요한 변수인 볼루트 혀, 내부 면적 형상, 볼루트 곡선 설계 등을 전부 고려한다면 고 효율의 펌프를 설계할 수 있다고 나타내었다. Pyun et al.[4]은 반응표면기법을 사용하여 임펠러 날개를 설계하였으며 Stepanoff의 이론을 써서 volute를 설계한 후 수치해석을 통해 효율을 분석하였다. 여러 논문에서도 언급한 바와 같이 볼루트 설계를 통해 펌프의 효율 및 양정에 효과를 볼 수 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 목적은 원심펌프의 볼루트 곡선과 내부 단면 형상을 수정하여 펌프 성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 수치해석을 이용, 다양한 유량 조건에서의 양정과 효율을 비교 분석하였다. 이렇게 얻은 결과는 추후에 볼루트 최적화에 필요한 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 해석 방법 및 볼루트 설계

2.1 해석 모델 및 조건

본 연구에서 사용한 원심펌프의 형상은 Fig. 1과 같다. Table 1을 보면 입구와 출구의 직경은 같고 임펠러 블레이드 날은 5개, 슈라우드를 갖춘 형태로 일반적인 원심펌프의 형상을 갖고 있다. 수치해석을 위해 상용 프로그램 STARCCM+9를 사용하여 결과를 얻었으며, 실험 결과와 비교를 통해 해석의 타당성을 검증하였다. 격자는 STARCCM+9에서 제공하는 Auto-mesh를 사용하여 다면체(Polyhedral mesh) 격자를 Fig. 2와 같이 생성하였다. 격자 민감도를 조사하기 위해 임펠러 회전속도를 2400 rpm, 설계 유량(25 m³/hr)에서의 수두 값을 비교하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 격자가 늘어남에 따라 수

Table 1 Main geometric parameters of the designed pump

D1	D2	D3	D4	z
138 mm	65 mm	50 mm	50 mm	5

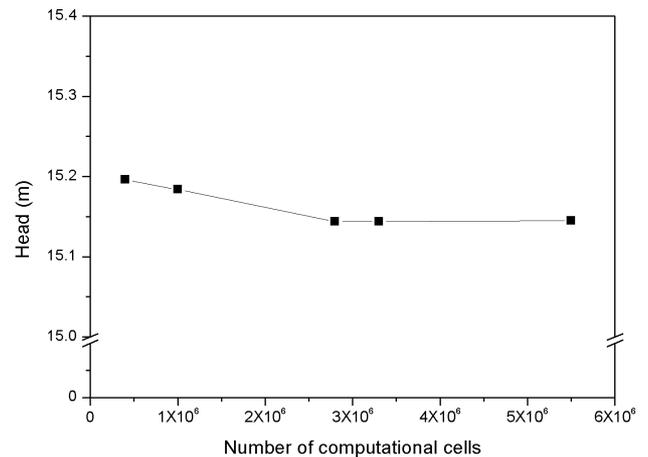


Fig. 3 Grid sensitivity graph(head versus mesh number)

두가 떨어지면서 총 격자의 수가 약 2백8십만 개 이상이 되었을 때 일정한 값을 갖는다. 따라서 위 결과를 토대로 해석 시간을 고려하여 모든 해석에 약 3백만 개 이상의 격자를 적용하였다.

임펠러의 회전 효과를 위해 MRF 방법을 적용하였고 벽효과를 크게 고려하는 해석이 아니기에 난류 모델은 일반적으로 사용되는 Standard $k-\epsilon$ 모델을 채택하였다. 이에 맞춰 임펠러 및 볼루트 지역의 y^+ 값을 100이상이 되도록 설정하였다.

2.2 볼루트 설계방법

2.2.1 곡선설계

볼루트는 임펠러로부터 토출된 고속의 유체가 가진 속도 에너지를 압력 에너지로 전환하는 기능을 가진 나선형 형태의 케이싱이다. 에너지를 최대한 잃지 않으면서 높은 압력으로 유체를 전달하는 것이 목적이기 때문에 그 곡선의 형태와 단면의 모양이 중요하다. 볼루트는 일반적으로 펌프의 임펠러와 굉장히 가깝게 붙어 있으며 형태가 단순하고 제작이 용이하기 때문에 원심펌프에 주로 사용된다. 본 연구에서는 볼루트 곡선 설계를 위해 Pump handbook[5]을 참고 하였다. 곡선

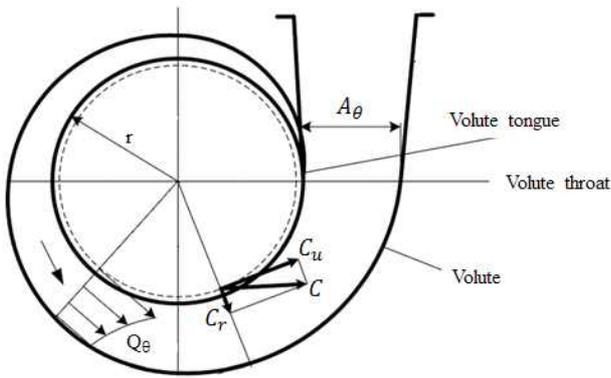


Fig. 4 Schematic diagram of volute

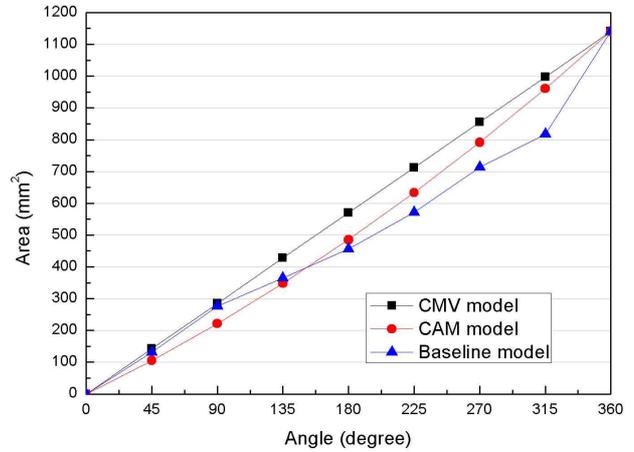


Fig. 5 Volute cross section area

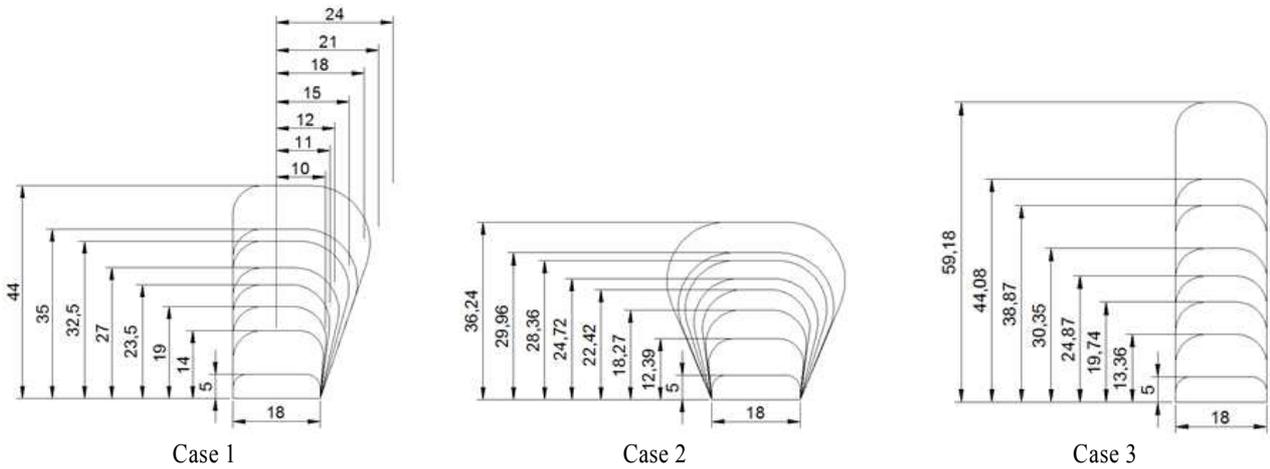


Fig. 6 Three type of volute cross-section shapes

을 그리는 여러 가지 방법 중 가장 많이 사용되는 Anderson의 CAM과 Stepanoff의 CMV으로 설계하였다. CAM은 볼루트 내부의 운동량이 일정하다고 가정하며(식 (1)), CMV는 속도가 일정(식 (2)) 하다고 가정하는 것이 가장 큰 차이점이다. 그 수식은 아래와 같다.

$$C_u r = K = const \tag{1}$$

$$A_\theta = \frac{Q_\theta}{C_m} \tag{2}$$

여기서 C_u 는 tangential velocity이고 r 은 radial distance, C_m 은 mean velocity 이다(Fig. 4). 설계 결과는 Fig. 5에 각도 별 면적으로 나타내었다[6]. 기존 모델의 각도 별 단면의 면적을 살펴보면 약 200° 근처에서 급변하는 것을 볼 수 있다. 볼루트는 각도에 따라 면적이 변화하기 때문에 압력의 변화로 펌

프 성능에 영향을 준다. 따라서 이렇게 단면적이 급변하는 부분이 있다면 유체의 역류 혹은 에너지 손실이 있을 것으로 예상하였다. 반면 설계한 모델의 경우 면적이 일정하게 증가하거나 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다[7].

2.2.2 단면설계

볼루트 설계에서 단면의 형상은 중요한 변수 중 하나이다. 볼루트 혀 부분의 면적을 약 1049 mm²으로 고정시켜 놓고 CAM과 CMV설계에서 구한 각도 별 면적의 값을 적용하였다. 이때 볼루트의 다른 변수들인 outlet의 직경과 볼루트 기초원의 직경 및 볼루트와 임펠러 사이의 간격 등은 전부 기초 모델과 같도록 유지하였다.

내부 단면적 형상은 Fig. 6에 나타내었으며 부채꼴 타입(Case 2)과 직사각형 타입(Case 3) 2가지 형상으로 수정하여 해석을 진행하였다. Case 1 모델은 기본 모델의 볼루트 단면 형상이다. 두가지 형태의 단면 모두 볼루트의 높이는 18 mm

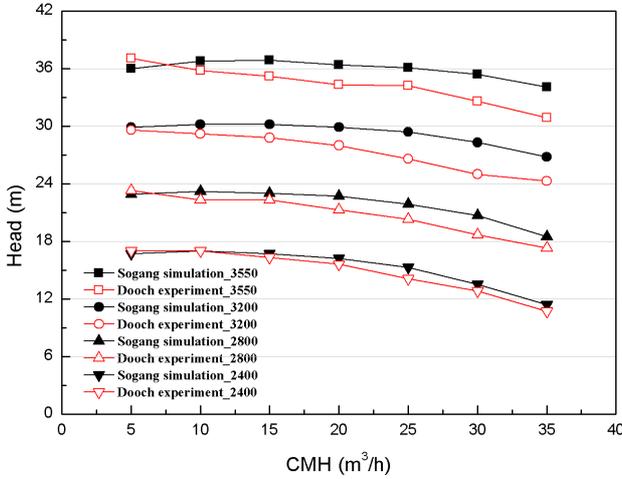


Fig. 7 Q-H curve about different rpm conditions

로 고정시킨 후 폭을 늘려 볼루트 곡선 설계에서 얻은 각도 변화에 따른 내부 단면적 분포를 만족시켰다. 각각의 모서리 부분의 원 반경은 직사각형 모양의 경우 기존 형상 첫 번째의 볼루트 단면 반경 값인 3 mm로 고정하였다. 부채꼴 모양의 경우는 모서리 부분의 원 반경을 기존 형상과 같게 설정하였고, 좌우 대칭이 되도록 설계하였다. 이렇게 설계한 볼루트는 Solidworks 2012를 이용하여 3D 모델링 작업을 하였다. 수치해석 시 해석 기법은 곡선 설계 할 때의 기법과 동일하다.

3. 결과 및 토의

3.1 해석 결과 검증

본 연구에서는 볼루트 형상이 펌프 성능에 미치는 영향을 알아보기 위해 볼루트 곡선의 설계를 먼저 진행 한 후에 단면 형상을 바꿔 가면서 해석을 진행하였다. 볼루트 곡선은 CAM과 CMV방법을 통해 설계하였다. 수치해석 결과를 살펴보면 실험값과의 차이가 크게 나는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 펌프의 Q-H curve는 고 유량으로 갈수록 하향하는 경향을 보이지만 본 연구에서는 그 감소폭이 적어 실험값과 오차가 큰 것을 확인할 수 있다. 이렇게 상대적으로 높게 나온 양정으로 인해 Q-η curve 또한 증가했다가 감소하는 형태를 띠는 것이 아니라 증가하는 형태를 보인다. 따라서 본 연구에서 사용하는 격자와 해석 조건의 타당성에 의심을 하였고 이를 위해 다양한 rpm에서의 해석 결과를 Fig. 7에서 볼 수 있다. 2400에서 3550까지 400 rpm 단위로 속도를 바꿔 가면서 해석을 진행하였고 기호가 채워진 것이 수치해석 결과이며, 비워져 있는 것이 실험 결과이다. 모든 해석은 같은 조건에서 실행되었으며 회전 속도만 변화를 주었다. 임펠러의

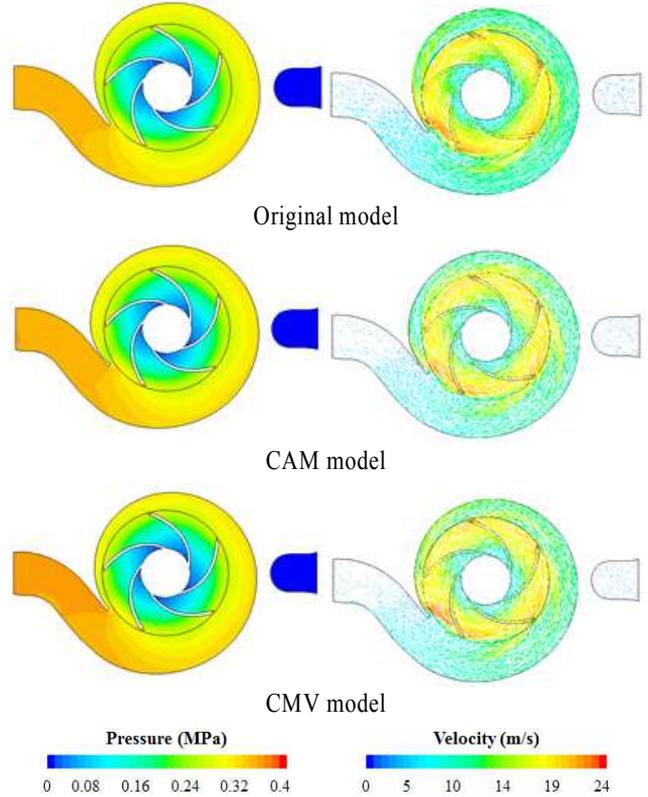


Fig. 8 Velocity and pressure plots about different volute curve models

속도가 고속일 때 실험값과 다소 차이가 있지만 유량이 증가함에 따라 양정 값이 낮아지는 경향을 보이며 특히 저속일 때, 해석 결과와 실험값의 경향이 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 따라서 위의 결과를 토대로 현재 설계 조건이 틀리지 않았다고 판단하였고 연구를 계속 진행하였다.

3.2 볼루트 곡선에 대한 영향

볼루트 곡선이 펌프 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해 먼저 압력 및 속도분포를 비교해 보았다. CAM과 CMV방법으로 설계한 볼루트 곡선과 기존 모델의 해석 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 설계 모델과 기존 모델의 속도 분포는 큰 차이가 없지만 압력 분포에서 약간의 차이를 보였다. 볼루트의 특성상 전체 영역에서의 압력은 같게 나와야 하고 볼루트 혀 부분부터 압력이 증가하는 경향을 보여야 한다. 3가지 모델 모두 이와 같은 경향을 보이거나 CAM곡선의 해석 결과를 보면 볼루트 혀 부분에서 압력분포가 다른 모델에 비해 일정하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 단면 면적의 각도 별 변화가 일정하게 증가하기 때문에 임펠러에서 나온 유동에너지를 에너지 손실을 최소화 하면서 압력 에너지로 변환시켜 주기 때문이다. 반면 CMV곡선의 경우 볼루트 혀 부분에서 압력이

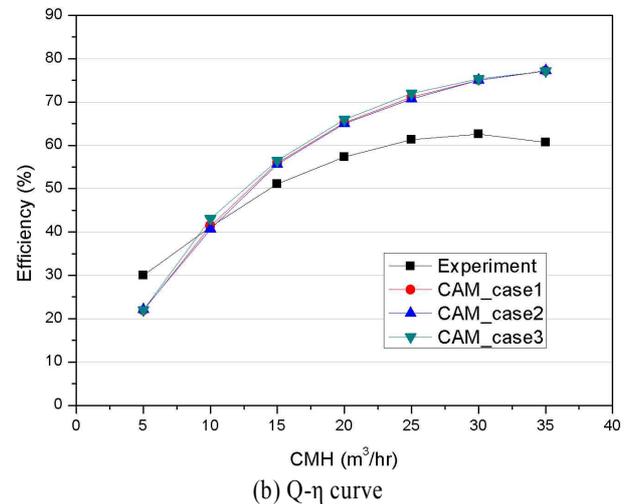
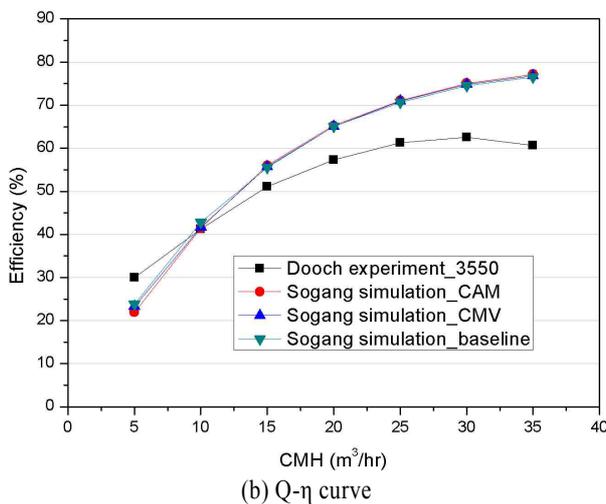
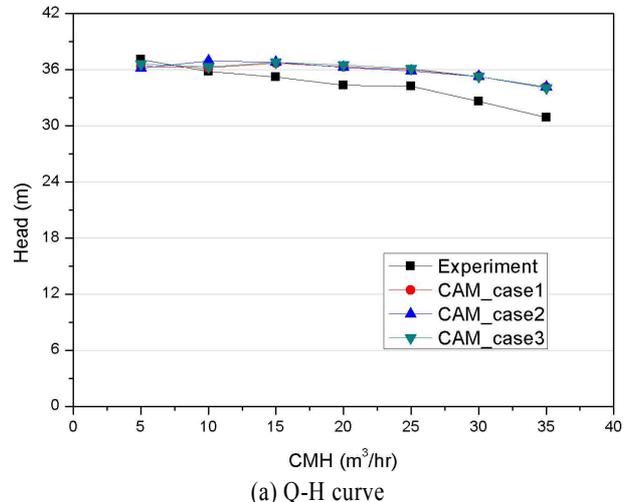
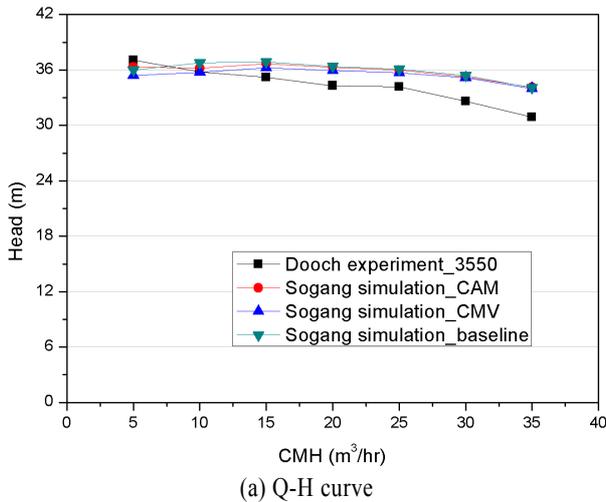


Fig. 9 The volute curve models simulation data

Fig. 10 The volute cross section models simulation data

가장 높게 나왔기 때문에 양정이 높을 것으로 예상되지만 볼루트 내부에서 유체가 토출되는 곳 까지의 압력분포가 고르지 못한 형태를 보여주고 있다. 볼루트 내부의 유동 특성을 먼저 파악해 본 결과 CAM 방법으로 설계한 볼루트의 성능이 가장 좋을 것으로 예상이 된다. 하지만 압력 분포만을 가지고 성능을 판단하기는 어렵기 때문에 펌프 특성 곡선인 여러 유량 조건에서의 Q-H curve와 Q-η curve를 비교해 보았다(Fig. 9). 전체적으로 큰 차이를 보이지 않지만 양정 값을 비교해 보았을 때에는 기존 모델의 성능이 가장 좋게 나온 것을 확인할 수 있다. 하지만 효율을 비교해 보았을 때에는 유량이 15 m³/hr 이상이 될 때 CAM 방법으로 설계한 볼루트를 가진 모델의 효율이 기존 모델보다 약 1 ~ 2% 정도 더 높게 나왔다. 이는 기존 모델이 각도 별 볼루트 면적이 다른 모델에 비해 상대적으로 작기 때문에 압력이 높게 측정된 것으로 보인다. 비록 CAM 볼루트 모델이 양정은 낮게 나왔으나, 임펠러에서 토출된 고속의 유체를 압력 에너지로 변환해 줄 때 임

펠러에 걸리는 토크가 작기 때문에 효율이 높다. 반면 CMV 곡선의 경우 양정이나 효율 두 가지 모두 가장 낮게 나온 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용한 펌프 모델의 설계 유량 및 rpm에서 CMV 방법으로 설계한 볼루트 곡선은 맞지 않는 것으로 판단된다. 따라서 볼루트 단면의 형상을 수정할 때 해석대상에서 제외하였다.

3.3 볼루트 단면에 대한 영향

앞에서 언급한 바와 같이 볼루트 단면은 총 3가지를 비교해 보았다. 단면 형상이 펌프 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 위해 CAM 방법으로 설계한 볼루트 곡선을 적용하였다. 3가지 형태로 설계한 볼루트 단면역시 곡선과 마찬가지로 효율 및 양정을 비교 분석하였고 수치해석 기법은 볼루트 곡선 수치해석과 동일하다. Fig. 10을 살펴보면 볼루트 곡선 설계와 마찬가지로 양정 및 효율이 큰 차이를 보이지 않는다. 먼저 양정을 따져 보았을 때 저 유량에서는 부채꼴 형태의 단면

(Case 2)의 성능이 더 좋은 것으로 보이거나 설계유량(25 m³/hr)에서는 가장 낮다. 효율에서도 모든 유량에서 비교적 낮게 나왔기 때문에 부채꼴 모양의 볼루트 단면은 해당 모델에 적합하지 않은 것으로 판단된다. 직사각형 형태(Case 3)의 경우 설계 유량부근(20 ~ 30 m³/hr)에서 양정과 유량 모두 가장 성능이 좋게 나왔다. 기존 모델의 볼루트 단면을 갖고 있는 Case 1과 비교를 해 보았을 때 약 1 ~ 2%의 효율 증가를 확인할 수 있다. 볼루트를 제작 시 단가 및 시간을 고려하면 형상이 간단할수록 좋다. 따라서 제작성과 효율 등을 고려해 보았을 때 직사각형 형태의 볼루트를 선택하는 것이 가장 적절하다.

기존 예상과는 달리 볼루트의 형상 변화가 펌프 성능에 큰 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기존 모델의 볼루트 단면 유동 특징에서 특별하게 누출현상이나 와류 등의 현상이 보이지 않았기 때문에 볼루트로 인한 에너지 손실이 크지 않은 것으로 보인다. 따라서 설계모델과 비교를 해 보았을 때 기존 모델 대비 성능이 크게 증가하지 않았다고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원심펌프의 볼루트 형상에 따른 펌프의 성능 특성을 수치해석 적으로 검토하였다. 해석 결과는 실험값과의 비교를 통하여 검증하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

볼루트 곡선은 기존 형상 대비 CAM 모델의 효율이 약 1% 증가함을 보였으며 3가지의 case의 단면 형상을 비교 분석해 본 결과 Case 3가 설계유량(25 m³/hr)부근에서 양정과 유량 모두 가장 성능이 좋게 나왔다. 기존 모델의 단면을 갖고 CAM 곡선을 갖는 모델인 Case 1과 비교 해 보았을 때 약 1%의 효율 증가를 보인다. 본 연구를 통해 볼루트의 곡선 및 단면 형상을 수정한 것만으로도 약 2 ~ 3% 효율의 증가를 확인할 수 있었다. 향후 CAM 방법이 적용된 직사각형 형태의 단면을 가지는 볼루트를 기본 모델로 하여 실험계획법을 적용, 단면적의 변화와 볼루트 허 부분의 연구를 진행하여 다양한 임펠러 회전수에 대한 최적 설계를 진행할 계획이다.

후 기

이 논문은 2015년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구

재단(No. 2009-0083510) 및 2013년도 산업통상부 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)(No. 20132010101870)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

Note

This paper is a revised version of a paper "Numerical Study of Flow Characteristic in a Centrifugal Pump at Different Shape of Volute" presented at the KSCFE 2015 Spring Annual meeting, Jeju, May 14-15, 2015.

References

- [1] 1997, Kang, S.H. and Hong, S.S. "Performance enhancement of centrifugal pump due to the improvement of volute," *KSME.*, pp.178-187.
- [2] 2008, Thin, K.C., Khaing, M.M. and Aye, K.M., "Design and Performance Analysis of Centrifugal Pump," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.36, ISSN.2070-3740.
- [3] 2011, Yang, S., Kong, F. and Chen, B. "Research on Pump Volute Design Method Using CFD," *Int. Agric. Eng. J.1*, Vol.20, pp.1-7.,
- [4] 2012, Pyun, K.-B., Kim, J.H., Choi, Y.S. and Yoon, J.Y., "Design Optimization of a Centrifugal Pump Impeller using RSM and Design of Volute," *Journal of Fluid machinery*, Vol.15(3), pp.39-45.
- [5] 1986, Karassik and Igor, J., "Pump hand book second edition," *McGraw-Hill*.
- [6] 2005, Chan, W.K., Wong, Y.W. and Wei, Hu., "Design Considerations of Volute Geometry of a Centrifugal Blood Pump," *Artificial Organs*, Vol.29, pp.937-948.
- [7] 2013, Oh, K., "Design optimization of a centrifugal pump impeller and volute casing using response surface method and computational fluid dynamics," *master's thesis*, hanyang univ., Seoul.