

초저온 산업용 액중펌프 임펠러 설계에 관한 연구

권병수*, 이치우**, 이중섭***,#

*경남과학기술대학교 대학원, **경남과학기술대학교 자동차공학과, ***경남과학기술대학교 산학협력단

A Study on the Impeller Design of a Submerged Cryogenic Pump

Byung Soo Kweon*, Chi-Woo Lee**, Chung-Seob Yi***,#

*Graduate School, Gyeonnam National University of Science and Technology

**Gyeongnam National University of Science and Technology, Automotive Engineering

***Gyeongnam National University of Science and Technology, Industry-Academic corporation foundation

(Received 5 November 2016; received in revised form 11 November 2016; accepted 22 November 2016)

ABSTRACT

The purpose of this study is to examine the basic design of a submerged cryogenic pump, which is a two stage impeller pump. We limited this study to the impeller design of the submerged pump. We calculated its velocity triangle based on the impeller blade configuration and, in order to check its natural frequency, we carried out a modal test using a finite element method (FEM) analysis. Basically, modal test results had quite similar to FEM analysis.

Key Words : LNG(액화천연가스), Cryogenic(극저온), Submerged Pump(액중펌프)

1. 서 론

육상의 Oil&Gas가 고갈됨에 따라서 해양에 있는 Oil & Gas로 자연스럽게 그 범위가 확대되고 있다. 특히 천연가스의 경우 점차 수요가 증대되고 있으며 이로인한 관련 장비에 대한 기술개발이 활발하게 이루어지고 있다. 초저온 유체에 대한 수요증대로 인해 선진국의 경우 고효율 및 내구성

과 신뢰성이 높은 액중펌핑 시스템을 개발하고 있으며, 미국 및 유럽 등을 중심으로 기술개발이 이루어지고 있다.

현재 국내의 경우 초저온 펌프는 왕복동식 펌프를 위주로 개발하고 있으며, 특히 원심식의 개발은 다소 미진한 상태이며, 초저온 액중펌프의 경우 거의 수입에 의존할 만큼 초저온 기자재 분야는 선진국에 비해 다소 미흡한 기술적 수준을 가지고 있다.¹⁻³⁾

초저온의 액화천연가스의 경우 이송을 위해 극한 환경에서의 작동이 가능한 액체펌프 기술이 필요하며, 동남아에 매장된 천연가스는 지리적인 이

Corresponding Author : csyi@gntech.ac.kr
Tel: 82-55-751-3865, Fax: 82-55-751-3631

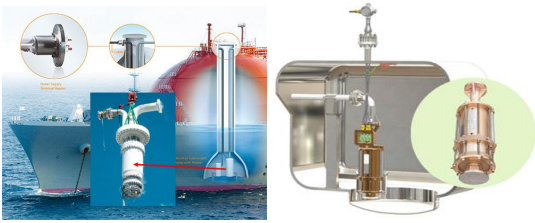


Fig. 1 Applications for cryogenic submerged pump

유로 운송 등의 어려움이 있으며, 액화천연가스의 이송을 위해 펌프기술의 적용이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구는 Fig. 1과 같이 초저온 액체시스템의 이송장치에 적용할 수 있는 액중펌프 기술개발을 위한 기초연구로서 초저온 액중펌프 개발에 따른 기초설계 자료를 확보하고자 한다.

2. 액중펌프 구조

본 연구에 적용되는 초저온 액중펌핑 시스템은 Fig. 2와 같이 구성되어 있으며, 그 구성요소는 Table 1과 같다. 일반적으로 초저온 유체를 이송할 때 사용되는 왕복동식이 아닌 원심식 펌프를 적용하고 있는 정유량 펌핑시스템이다.

초저온 액중펌프의 구조는 Fig. 3과 같으며, 대부분 2-Stage이상의 Multi stage로 구성되어있다. 또한 임펠러를 구동시켜주는 모터의 경우 초저온 액중에 잠겨있는 것이 일반펌프와 가장 차별화 되는 기술적 특징이다.

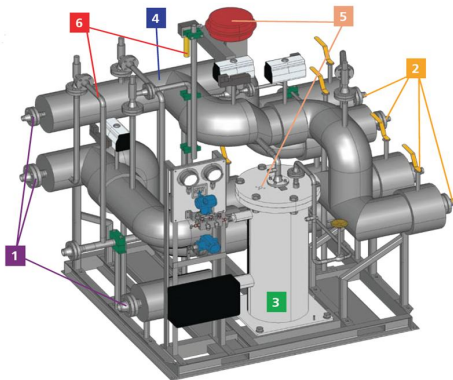


Fig. 2 Cryogenic fluid loading system

Table 1 Cryogenic fluid loading system parts name

Parts name	
1	Plug and play design compatible with standard storage tanks.
2	Possibility to run 2 LNG dispensers on 1 cryogenic pump module.
3	Integrated Cryogenic submerged pump
4	Possibility to run 2 LNG dispensers on 1 cryogenic pump module
5	Refueling of vehicles at constant flow and pressure by use of a pressure control valve and variable speed pump control
6	Safety Valves, Fitting, Gas detector, etc.

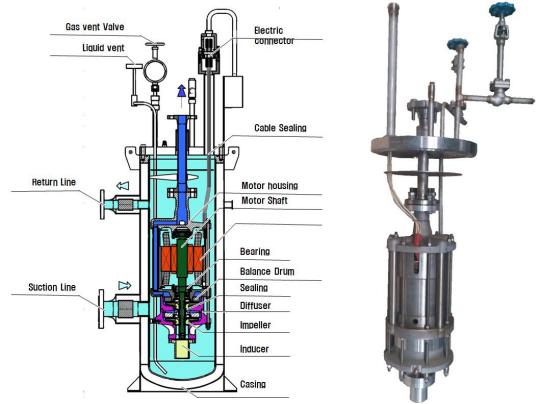


Fig. 3 Configurations of cryogenic submerged pump

Table 2 Specification of cryogenic submerged pump

	Division	Specification
1	Max. allowable suction pressure	25bar
2	Number of stage	2
3	Frequency	104Hz
4	Flow rate	200L/min
5	Differential head	266m
6	Differential pressure	11bar
7	Absorbed power	8.7kW
8	Pump speed	6,000rpm

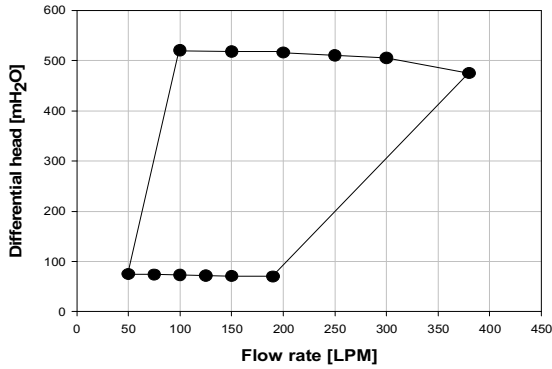


Fig. 4 Distribution of differential head at submerged pump

그 외 작동원리는 일반적인 액중펌프와 동일하다. 재질은 대부분 초저온 분야에서 널리 이용되고 있는 스테인리스 316L 계열 대신 알루미늄 합금을 적용하고 있었다.

본 연구 대상인 초저온 액중펌프의 성능은 Table. 2와 같으며 6,000rpm으로 고속 회전하는 펌프이다. 또한 Fig. 4와 같이 유량변화에 따른 수두차가 발생하는 성능을 가지고 있다.

3. 임펠러 구조 및 속도삼각형

Fig. 5는 임펠러에 대한 기본치수를 활용하여 속도삼각형을 Table 3과 같이 기초 설계식을 사용하여 Fig. 6과 같이 임펠러 입-출구에서의 속도삼각형을 구할 수 있었다.^{4,6)}

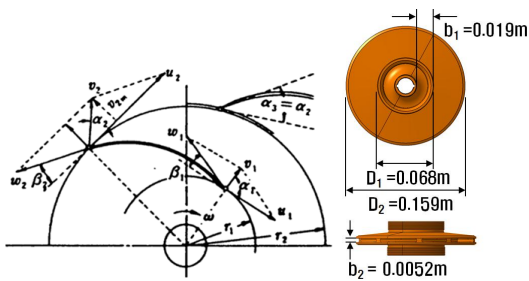


Fig. 5 Configuration of impeller and velocity triangle

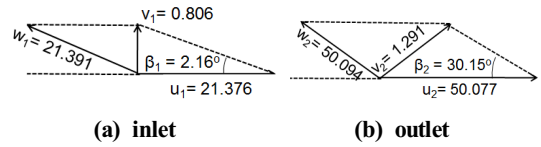


Fig. 6 Velocity triangle of blade inlet and outlet

Table 3 Comparison of velocity triangle on blade inlet and outlet

Design parameter	Equation	Result
Impeller inlet		
Absolute velocity	$v_1 = \frac{Q}{\pi \times D_1 \times b_1 \times 60}$	0.806m/s
Tip speed	$u_1 = \frac{\pi D_1 N}{60}$	21.376m/s
Relative velocity	$w_1 = \sqrt{v_1^2 + u_1^2}$	21.391m/s
Blade angle	$\beta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{v_1}{u_1}\right)$	2.159°
Impeller outlet		
Absolute velocity	$v_2 = \frac{Q}{\pi \times D_2 \times b_2 \times 60}$	1.291m/s
Tip speed	$u_2 = \frac{\pi D_2 N}{60}$	50.077m/s
Relative velocity	$w_2 = \sqrt{v_2^2 + u_2^2}$	50.094m/s
Blade angle	$\beta_2 = \tan^{-1}\left(\frac{v_{2m}}{w_{2u}}\right)$	30.15°
BPS	$BPS = \frac{Z \times N}{60}$	1,000Hz

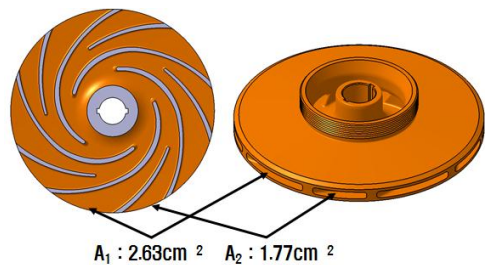


Fig. 7 Impeller blade shape and comparison of outlet area

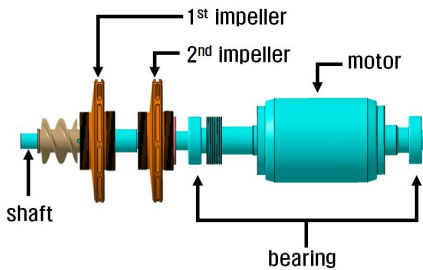


Fig. 8 Rotating parts in submerged pump and supporting bearing position

Fig. 7은 임펠러에 설치된 블레이드의 형상을 나타내고 있다. 블레이드 간격을 보면 등간격이 아닌 부등간격으로 설계되어 맥동이 발생하는 것을 억제하기 위한 목적으로 설계되어 있었다.⁷⁾ 또한 임펠러 토출구에서 유체가 빠져나가는 A1이 A2에 비해 48% 정도 크다. 이는 블레이드 두께 때문에 50%의 비율로 설계되지 못한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 초저온 액중펌프 내부에 설치되어 있는 모터와 축 그리고 임펠러에 대한 조립도를 나타내고 있다. 여기서 모터 축을 지지하는 곳은 총 2곳으로 모터 전-후단에 설치되어 있었다. 일반적으로 수평으로 펌프가 설치될 경우 펌프 입구쪽인 임펠러 전단에 베어링을 설치하여 처짐을 방지할 수 있는 구조가 되지만 본 연구 대상인 액중펌프의 경우 수직으로 설치되기 때문에 처짐이 발생되지 않는 구조를 가지고 있다. 따라서 최종적으로 모터 전-후단에만 베어링을 설치하여 펌프 하우징에서만 지지하고 있었다.

4. 임펠러 고유진동수 측정 및 해석

임펠러에 공진진동수를 확인하기 위해 모달 시험을 Fig. 9와 같이 구성하여 진행하였다. 모달 시험에 사용된 FFT 분석기는 'ONOSKKI'사를 사용하였고, 임팩트 헤머는 'DYTRAN'사의 5800B2 모델을 사용하였다. 또한 진동수 범위가 1.0~10,000Hz 범위의 'DYTRAN'사의 가속도계 3055B2 모델을 사용하여 임펠러에 대한 모달 시험을 수행하였다.⁸⁾

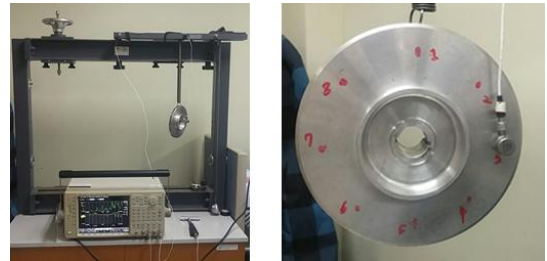


Fig. 9 Experimental setup for modal test

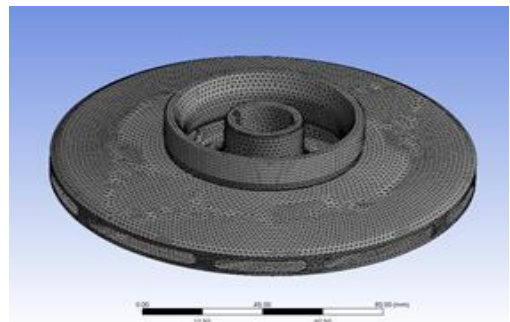


Fig. 10 FEM model for modal analysis

Fig. 10 모달해석을 위한 FEM 모델을 나타내고 있으며, Table 4는 재질을 알루미늄으로 가정 한 임펠러의 물성치를 나타내고 있다. 모달해석은 ANSYS W/B를 사용하여 각 모드에 대한 형상을 모달시험결과와 비교하였다.

Fig. 11은 모달시험과 해석에 대한 각각의 모드 별로 비교한 것이다. 그 결과 1차 모드형상은 시험의 경우 3,300Hz에서 Twist모드가 나타났고, 해석에서는 3,397Hz로 나타났다. 2차 모드의 경우 시험은 5,900Hz, 해석은 5,815Hz로 Whirl모드가 나타났고, 3차 모드의 경우 시험은 6,500Hz, 해석은 6,605Hz로 1차 국부 Bending모드가 나타났다.

마지막으로 4차 모드 형상은 시험의 경우 9,100Hz로 나타났고, 해석의 경우 9,304Hz로 2차 국부 Bending 모드가 나타남을 확인할 수 있었다.

Fig. 11는 모달 테스트와 FEM 해석결과를 비교한 것이며, 시험과 해석 결과가 거의 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다.

Table 4 Properties of impeller material

Item list	Value
Young's modulus	71,000 MPa
Poisson's ratio	0.33
Yield strength	280 MPa
Tensile strength	310 MPa
Density	2,770 Kg/m ³

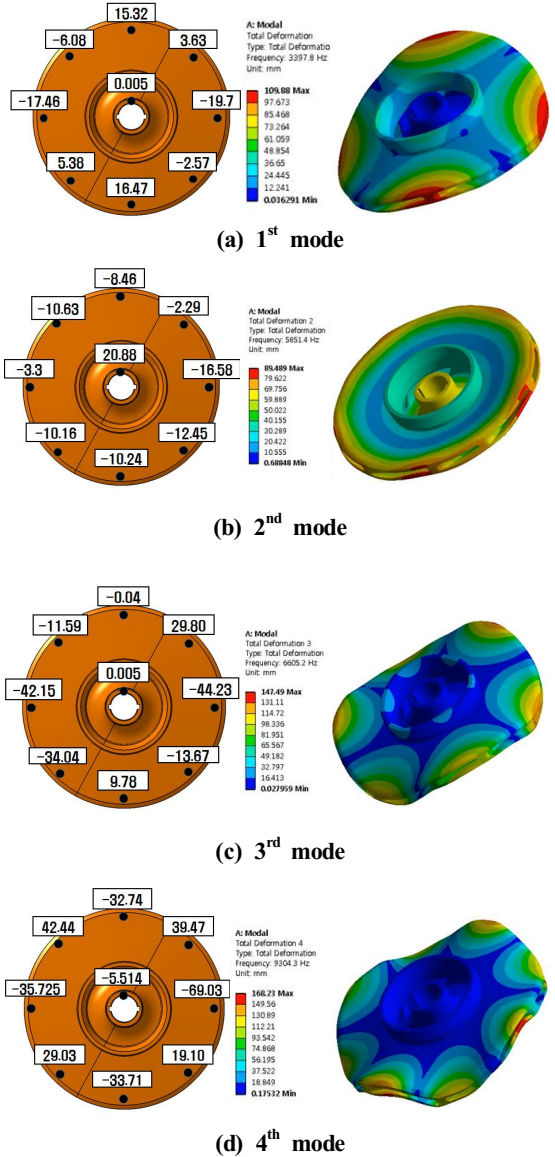


Fig. 10. Result of test and FEM mode shapes

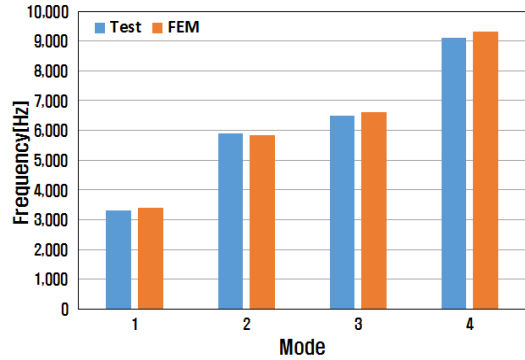


Fig. 11 Experimental setup for modal test

5. 결론

LNG 등 초저온 유체에 사용되는 액중펌프에 대한 국산화 개발을 위해 이탈리아 Vanzetti사 제품을 역설계하여 기초적인 설계자료를 확보하기 위해 본 연구를 수행하였으며 그 결과 기초설계를 통해 제품개발에 대한 각 요소부품에 대한 3D 모델링과 향후 기계가공 후 조립성을 검토할 수 있었다. 또한 임펠러에 대한 기본 설계를 이론을 통해 구할 수 있었고, 확보된 역설계 도면을 이용하여 최종적인 속도삼각형을 확보할 수 있었다.

임펠러에 대한 고유진동수를 확인하기 위해 모달 테스트를 수행한 결과 1차 모드에서 Twist, 2차 모드에서 Whirl, 3차 및 4차에서 Bending 모드가 나타남을 확인할 수 있었다. 또한 시험과 해석 결과가 유사한 경향을 보여주고 있었다.

후 기

본 연구는 2016년 산업통상자원부 제1차 에너지수요관리핵심기술개발사업(20162010103730)지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Jeong, H. S., Kim, Y. H., Cho, J. R., Kim, J. H., Kim, J. R., Park, J. H., "A Study on Structural Design of Cryogenic Miniature Globe Valve using Finite Element Method", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 31, No. 4, pp. 343-349, 2007.
2. Kim. Y. J, Kim. Y. H., Woo. N. S., Kwon. J. K., "Numerical Study for Development of Submerged Seawater Lift Pump", Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 25, No. 5, pp. 21-26, 2011.
3. Ahn. H. H., Yi. C. S., "Flip-Flap Valve-Type Breakaway Coupling through Reverse Engineering", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 4, pp. 16-22, 2016.
4. Kwon. S. M., Kang. M. J., Yoo. H. H., "Stability Analysis of a Wind Turbine Blade Considering Wind Force and Variation of Pitch Angle", Transactions of KSNVE, Vol. 22, No. 12, pp. 1164-1171, 2012.
5. Jeon. E. C., Youn. G. H., Kang. C. H., "A Study on Effect of Flow Characteristics for Turbine Impeller Shape" Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 13, No. 4, pp. 36-43, 2014.
6. Choi. D. S., "Structural Analysis and Design of Small Wind Turbine Blade ", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 14, No. 1, pp. 85-91, 2015.
7. Jeong. J. H., Yi. C. S. Lee. C. W., "Development of a Small Floating Outboard Type Water-Jet Propulsion System", Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 25, No. 1, pp. 42-47, 2016.
8. Jeong. J. H., Yi. C. S. Lee. C. W., "Experimental Study on Air Flow Characteristics of Axial Dual-blade Fan", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 13, No. 4, pp. 113-120, 2014.