

극저온 잠액식 펌프 연구개발 프로세스에 관한 융합 연구

배태용^{1*}, 황규완²

^{1,2}경남정보대학교 기계계열

A Convergence study on the Research and Development process for the cryogenic submerged pump

Tae-Yong Bae^{1*}, Gyu-Wan Hwang²

^{1,2}Division of Mechanical Engineering, Kyungnam College of Information & Technology

요약 최근, LNG는 저렴한 가격과 친환경적 연료 등의 이유로 선박용 대체연료로 각광을 받고 있으며, 그 수요량도 급성장이 예상된다. 그러나, 선박의 LNG 연료공급을 위한 극저온펌프(Cryogenic Pump) 제작과 관련한 국내 기술력은 매우 미흡한 실정으로 핵심 부품의 설계와 제작 기술이 절실한 시점이다. 따라서, 본 연구는 선박용 LNG 공급 시스템용 극저온 잠액식 원심펌프(Cryogenic Submerged Centrifugal Pump)의 단계별 개발절차에 대하여 기술하였다. 그리하여, 각 단계별 특성 및 주요 개발항목을 공학적이고 관리적인 측면에서 접근함으로써 실질적이고 구체적인 개발방법을 제시하는데 연구 목적을 두었다.

• 주제어 : 액화 천연가스, 잠액식, 극저온, 진공용기, 임펠러, 성능평가

Abstract Recently, for such reasons as its inexpensive price and eco-friendliness, LNG has been under the limelight as an alternative fuel for vessels and is expected to grow rapidly in the industry. However, the technology level of domestic shipbuilders in manufacturing the cryogenic pump designed to supply LNG for vessels is so low that design and manufacturing technology of core parts are in urgent need. Therefore, this study describes the stepwise development procedure of cryogenic submerged centrifugal pump for ship LNG supply system. And it aims to suggest practical and specific development methods of the pump by approaching the characteristics of each step and major development items from the standpoint of engineering and management.

• Key Words : LNG, Submerged, Cryogenic, Vacuum Vessel, Impeller, Performance Evaluation

1. 서론

가스전에서 채취한 천연가스를 에너지원으로 사용하기 위해서 이송하는 방법에는 천연가스를 파이프라인으로 공급하는 PNG(Pipeline Natural Gas) 방법과 액화 천연가스를 해상으로 이송하는 LNG(Liquified Natural

Gas) 방법이 있다. 이러한 천연가스의 채취에서 소비까지 일련의 연결을 LNG 공급체인이라고 한다.

온실가스 배출규제에 따라 세계적으로 청정연료로 대체하는 기술개발이 활발히 이루어지고 있고, 시대적 흐름에 따라 정부는 녹색 성장기조에 맞춰 선박에 대한 기술개발 로드맵을 추진하고 있으며, 대형조선소를 중심으

*Corresponding Author : 배태용(dantebty@eagle.kit.ac.kr)

Received June 30, 2017

Accepted October 20, 2017

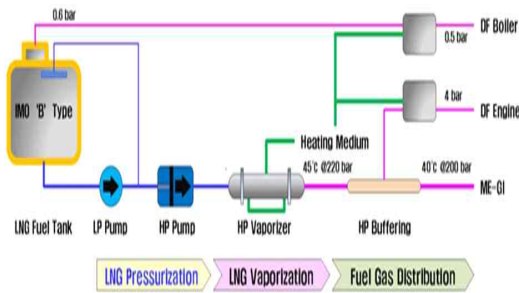
Revised September 29, 2017

Published October 28, 2017

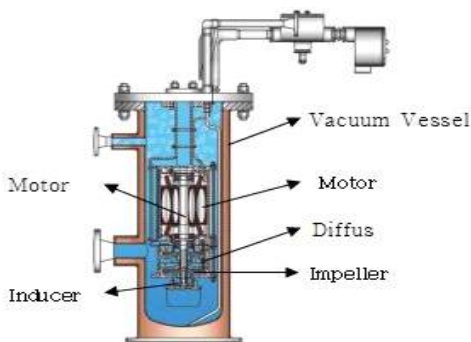
로 LNG 연료로 추진되는 친환경 선박의 기술을 도입하기 위하여 연구개발을 진행하고 있다.

천연가스를 액화하여 저장, 운반, 이송하는 과정에서 수많은 LNG 펌프, 익스팬더 터빈을 사용하고 있다. 저장 탱크에서 LNG를 출하하기 위한 불출용 펌프, 저장 탱크에서 저장 탱크까지 LNG를 이송하기 위한 이송 펌프, 가압하는 것을 주목적으로 하는 고압 펌프, 배관이나 저장 탱크를 상시 저온상태로 유지시키기 위한 순환 펌프 및 스프레이 펌프, 선박에서 지상의 수입기지에 반송하기 위한 하역 펌프 등 그 기능이나 용도에 따라 여러 가지로 나누어진다[1].

LNG 연료공급시스템용 펌프는 석유화학제품 운반선, 벌크선과 같은 중형 LNG 추진 선박에 사용하는 펌프가 주종을 이루고 있는데, LNG 연료공급시스템용 펌프의 설계 또는 제작과 관련한 국내 기술력은 선진국에 비해 매우 부족한 실정이다. 따라서, LNG 연료공급시스템용 펌프를 연구개발하기 위해서는 기초설계, 수력설계, 제작 및 평가 등 기술개발의 프로세스를 정립하는 것이 가장 우선적으로 필요하다.



[Fig. 1] LNG Supply System Layout for Marine



[Fig. 2] Layout of the submerged cryogenic cargo pump

[Fig. 1]과 같이 LNG 연료공급시스템은 극저온 유체인 LNG를 다루는 핵심 기관이며, 이 중에서 극저온 펌프(cryogenic pump)는 그 핵심 기자재로 사용된다.

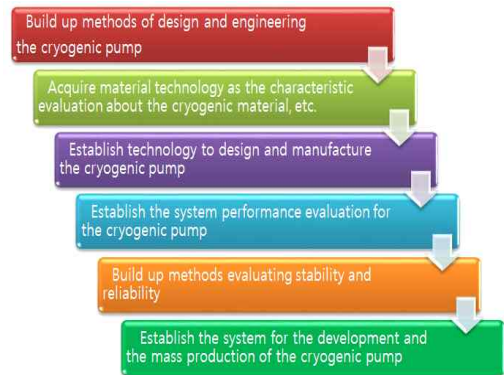
LNG의 이송을 담당하는 극저온 펌프는 [Fig. 2]에 나타난 것과 같이 잠액식 원심형 펌프(submerged centrifugal pump) 구조를 가지고 있으며, 높은 수준의 신뢰성과 안정성을 기초로 하여 극저온 환경에 맞추어 개발되어야 한다. 하지만, 극저온 펌프의 연구개발에 대한 기본 개념이나 연구방법이 알려져 있지 않으며, 선진 업체의 극저온 펌프를 수입하더라도 요구되는 성능에 적합하게 수정하는 것은 더욱 어려운 실정이다.

이에 본 연구에서는 극저온 유체인 LNG를 다루는 핵심 기자재인 극저온 잠액식 펌프(cryogenic submerged pump)의 연구개발 과정을 통하여 극저온 펌프의 연구개발 프로세스를 제시하고자 한다.

2. 극저온 펌프의 연구개발 방법

2.1 극저온 펌프 연구를 위한 추진방법

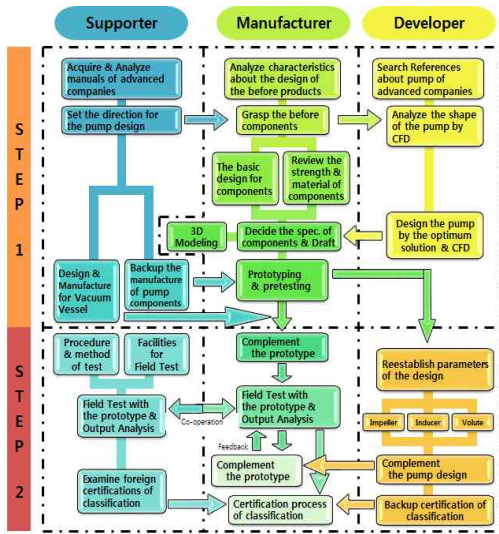
극저온 펌프를 설계하고 평가하기 위하여 요구되는 추진 업무를 단계별로 분류하여 [Fig. 3]과 같은 극저온 펌프의 연구개발 추진방법을 수립하였다.



[Fig. 3] Work flow for researching the cryogenic cargo pump

2.2 연구개발 프로세스의 추진체계

극저온 펌프를 설계하고 평가하기 위하여 구축되어야 할 업무 조직과 연구개발 내용을 2단계로 구분하여 [Fig. 4]와 같이 극저온 펌프 연구개발 프로세스의 추진체계를 완성하였다.



[Fig. 4] System process for researching the cryogenic cargo pump

3. 극저온 펌프의 연구개발 프로세스

3.1 설계 방향 설정

가. 해외 선진사 펌프설계 특성분석

1. 잠액식 극저온 펌프 Performance Map
2. 해외 선진사(ACD, Cyrostar, Ebara 등)의 펌프 조립도 입수 및 분석
3. 잠액식 극저온 펌프를 위한 LNG Application
4. 펌프 설계 기준 조사

나. LNG 펌프 구조분석 및 설계 메카니즘 검토[2]

1. 펌프 구조분석 및 설계
 - (가) 다단펌프의 흡입구측
 - (나) 다단펌프의 평형장치 주변
 - (다) 다단펌프의 모터 내부
2. 축추력 평형장치
 - (가) 펌프내부구조에 따른 LNG 흐름
 - (나) 임펠러(Impeller)를 축에 고정하는 방법
 - (다) LNG 펌프의 축추력 평형장치
 - (라) 축추력 평형을 저해하는 결함분석
3. 진공용기(Vacuum Vessel)
 - (가) 압력시험
 - (나) 진공도 측정
 - (다) 단열(Insulation) 방법

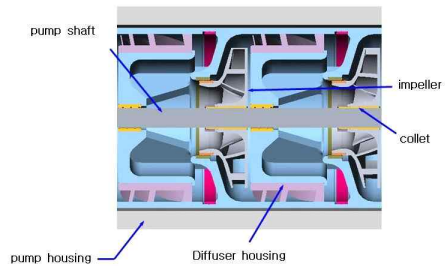
3.2 기초설계

가. 주요 구성품 재료선정

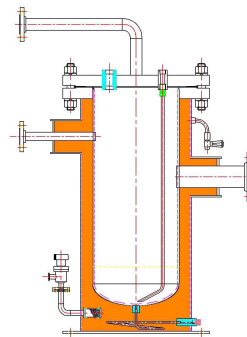
1. 연성취성 전이온도(DBTT)의 적절성
2. 분광 분석 결과의 적절성

나. 주요 구성품 설계

1. 축(Shaft) 기초설계
 - (가) 하중과 축경(Shaft Diameter) 설계
 - (나) 레일리(Rayleigh) 해석을 통한 위험속도 계산
 - (다) 축 비틀림 진동 검토
 - (라) API 610 규정에 적합한 축 스티스트하중 경감
 - (마) Balance-Drum과 동심도 측정
 - (바) 외륜이 자유로운 판스프링 삽입형 모터베어링[3]
2. 임펠러(Impeller) 기초설계
 - (가) 최소 LNG 누설량과 최대 효율을 만족하는 웨어링(Wear ring) 설계
 - (나) 임펠러와 웨어링의 콜릿(collet) 방법
3. 하우징(Housing) 축 정렬(동심화)
4. 특수 단열재를 사용한 진공단열 구조를 가진 진공용기(Vacuum Vessel) 설계



[Fig. 5] Impeller Section



[Fig. 6] Vacuum Vessel Section

5. 모터의 고정자(Stator)와 회전자(Rotor) 조립을 위한 축 정렬
6. 각 구성품 설계도면 작성

3.3 펌프 수력 설계

가. 기존 극저온 펌프 형상분석

1. 임펠러의 자오면과 전면에 대한 형상 분석
2. 3차원 CFD 해석
 - (가) 임펠러 날개 1개 영역(1 passage)
 - (나) 설계 유량 및 저/고유량 유동 해석
 - (다) 임펠러, 인듀서(Inducer), 벌류트(Volute) 등 1단 형상을 고려한 단단 펌프 해석
 - (라) 임펠러, 인듀서, 벌류트 등 전체형상을 고려한 다단 펌프 해석

나. 펌프 수력 최적설계

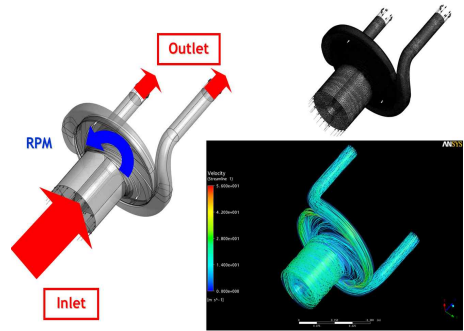
1. 임펠러(Impeller) 최적설계
 - (가) 자오면 형상 설계
 - (나) 날개형상 설계
2. 인듀서(Inducer) 최적설계
 - (가) 자오면형상 설계
 - (나) 날개형상 설계
3. 벌류트 설계
 - (가) 벌류트 단면적 설계
 - (나) 임펠러 출구 속도 설계

3.4 시제품 제작

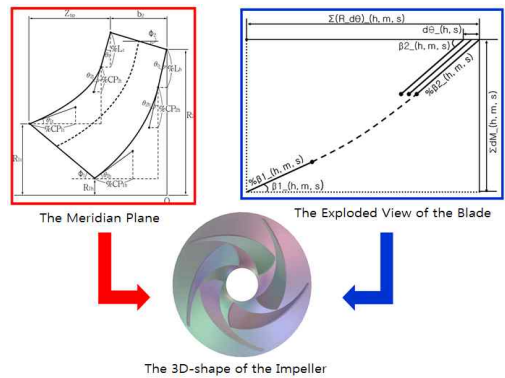
가. 수력부품 검증을 위한 3D Modeling

나. 주요 구성품 상세설계 및 제작

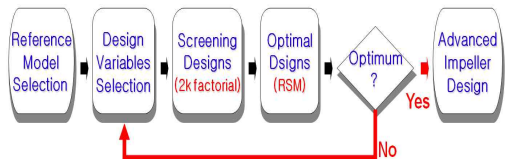
1. 축(Shaft)
 - (가) 금속조직 및 강도 유지를 위한 열처리와 외경부 연마
 - (나) 외관 및 치수검사, 비파괴검사 및 밸런싱 검사
2. 임펠러(Impeller)
 - (가) 열처리 후 내경부 연마
 - (나) 유로부분 Buffing
 - (다) 외관 및 치수검사, 비파괴검사 및 밸런싱 검사
3. 모터 베어링
 - (가) 베어링 발열 온도 예측에 의한 냉각구조 설계 및 평가
 - (나) 베어링 부하 지지능력 평가 및 해석 수행
 - (다) 베어링 안정성 평가



[Fig. 7] Numerical Analysis by using CFD



[Fig. 8] Impeller Blade Shape Design



[Fig. 9] Optimum Design Process



[Fig. 10] 3D Modeling

4. 진공용기(Vacuum Vessel)

- (가) 가공 및 용접후 풀림처리
- (나) 외관 및 치수검사, 비파괴검사 및 밸런싱 검사
- (다) 상온과 저온의 반복적인 온도변화에도 변형되지

지 않는 구조와 강도 유지

다. 주요 구성품 제작 및 구매품 검사 방안 수립

1. 재질 증명서
2. 성능 시험 DATA
3. 품질검사 성적서
4. 적용 코드 및 규정 등

3.5 시제품 예비 성능 평가

가. 회전체 밸런싱 시험(ISO1940규정 G2.5등급 이하)[4]

나. 펌프 단독 성능 및 운전시험[5]

1. 예비 시험(사용유체 : Water)
 - (가) 유량 시험 : API610 기준

<Table 1> Head at Rated point & Shut off point

Condition (Rated differential head)	Rated point %	Shut off point %
151~300 [m]	-2	+8
	+3	-8
Rated power	+4	-
Rated NPSH	0	-

(나) 진동 시험

<Table 2> Vibration Spec' of vertical pump

Vertically suspended		
Bearing housing	Overall	$v_u < 0.5 \text{ mm/s S}$
	Discrete frequencies	$v_f < 0.67 v_u$
Pump shaft	Overall	$A_u < 100 \mu\text{m}$ Peak to peak
	Discrete frequencies	$A_f < 0.75 A_u$ ($f < n$)

v_u : unfiltering velocity , v_f : filtering velocity

A_u : amplitude of unfiltering displacement

A_f : amplitude of filtering displacement

f : frequency , n : rev. count

3.6 예비 성능 평가를 통한 문제점 보완

3.7 시제품 Field Test 절차 검토

가. 펌프 성능검사 시험설비 구축방안 검토

나. Field Test 설비 적용

다. Field Test 절차 및 방법 수립

1. 성능평가 항목 및 평가기준 수립
2. Pump Inspection Point
3. 선진사례 및 기준검토
4. Pressure Vessel Code

3.8 시제품 Field Test 및 보완

가. 진공용기(Vacuum Vessel) 압력시험

나. 성능 시험(사용유체 : LN2)[6]

1. 펌프 성능평가
 - (가) 시동정지 및 정상운전에 의한 축변위
 - (나) Balance-Drum Clearance
 - (다) 축(Shaft) 진동
 - (라) 펌프 하우징 진동가속도
 - (마) 회전수, 토출압력, 유량, 효율 등
2. Field Test 수행
 - (가) 잠액식 극저온 펌프 Performance Map
 - (나) NPSH (m)
 - (다) Total Differential Head (m)
 - (라) Efficiency (%)
 - (마) BHP (KW)

3.9 펌프 수력 설계 보완

가. 임펠러 보완설계

1. 자오면형상
2. 날개형상

나. 인두서 보완설계

1. 자오면형상
2. 날개형상

다. 벌류트 단면적 보완설계

3.10 선급 인증 진행

가. 선급 인증을 위한 제반사항

1. 선급 형식 승인을 위한 준비
 - (가) 주요부품의 도면
 - (나) 제품의 조립 단면도 및 사양서
 - (다) 형식 승인 시험 방안
2. 운용 지침서 작성(Pump Hazard Table 포함)[7]
 - (나) 선급 형식 승인 진행
 - (다) 국제규격 인증 획득에 대한 검토

4. 결론

국제적인 환경규제에 따른 LNG 추진 선박의 수요는 세계적으로 크게 증가 추세에 있고, 국내의 수주 동향에 따르면 LNG 추진 선박은 세계 경제여건에 따라 향후 급속한 증가추세로 건조될 것으로 보여 국내 조선 산업 발전에 크게 기여할 것으로 판단된다. 또한, LNG 추진 선박의 관련 부품, 병커링 시스템, 소재 산업 등 국내의 기자재 산업과 가스 관련 산업 역시 동반성장의 가능성이 예상되지만, 안타깝게도 조선 기자재 품목 중 극저온 환경에서 사용되는 LNG 연료 공급 시스템 관련 기자재는 전량 수입에 의존하고 있기 때문에, 선박용 LNG 극저온 펌프 등의 기술개발이 더욱 절실한 입장이다.

따라서, 본 연구의 결과물인 극저온 잠액식 펌프의 연구개발 프로세스를 바탕으로 하여 LNG 선박 연료 공급용 극저온 펌프의 기술개발이 확산된다면 국내 극저온용 펌프 분야의 새로운 기술 창출과 아울러 독자적인 설계기술 능력 확보도 가능할 것이다.

REFERENCES

- [1] T. J. Um, The status of industry and the analysis of growth for Pump & Valve applied to LNGC, 2012, AMENEWS
- [2] Ebara Newsletter, No. 138, pp. 39-44.
- [3] "A study of the thrust dynamic balance of ultra low temperature pump", Vol. 12, pp. 17-32, 2009.
- [4] Axial Balancing system for motor driven pump, USA Patent
- [5] CRYOGENIC PUMP DIV., NIKKISO Co., Ltd
- [6] Ebara Newsletter, No.124
- [7] Operating & maintenance manual, Cryodynamics division
- [8] Y. W. kim, "A study on Convergent & Adaptive Quality Analysis using DQnA model", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 5, No. 4, pp. 21-25, 2014.
- [9] Qichen Gu, Yujia Zhai, "Adaptive Model Predictive Control for SI Engines Fuel Injection System", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 4, No. 3, pp. 43-49, 2013.
- [10] K. H. Kim, J. W. Youn, "A Study on the Analysis of Error Sources and Error Compensation in Machine Tools", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 8. No. 5, pp. 185-192, 2017.
- [11] J. I. Lee, "The Convergence Design for Stiffness and Structure Advancement of Automotive Body", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 8. No. 4, pp. 189-197, 2017.
- [12] J. H. Lee, J. U. Cho, "Convergence Technique Study of Durability Analysis due to the Track Pad Shape of Track Vehicle with Heavy Weight", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 7 No. 1, pp. 177-182, 2016.
- [13] J. H. Lee, J. U. Cho, "Convergent Study on Fatigue Life Analysis of Driving Shaft in Jet Engine", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 6, No. 6, pp. 279-284, 2015.
- [14] J. U. Cho, "A Flow Analysis on Wing Shape of Cooling Fan at Automobile", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 5, No. 4, pp. 75-79, 2014.
- [15] Y. J. Jang, K. W. Kang, "Simplified Load Calculation and Structural Test for Scale Down Model of Small Wind Turbine Blade according to IEC 61400-2", Journal of the Korea Convergence Society, Vol. 4, No. 3, pp. 1-5, 2013.

저자소개

배 태 용(Tae-Yong Bae)

[정회원]



• 2002년 3월 ~ 현재 : 경남정보대학교 기계계열 교수

<관심분야> : 기계자동화기술, 자동화기계, 로봇자동화, 금형

황 규 완(Gyu-Wan Hwang)

[정회원]



- 1995년 3월 ~ 현재 : 경남정보대학교 기계계열 교수

<관심분야> : FA(공장자동화), FMS(유연생산시스템), Marine Engineering(해양공학)