

극저온 잠액식 펌프의 국산화를 위한 융합 기술 개발

황규완, 배태용*
경남정보대학교 기계계열

The Development of Convergent Technique for Localization of the Cryogenic Submerged Pump

Gyu-Wan Hwang, Tae-Yong Bae*

Division of Mechanical Engineering, Kyungnam College of Informattion & Technology

요 약 온실가스 배출규제에 따라 국내 조선소를 중심으로 LNG연료로 추진되는 친환경 선박기술 도입에 박차를 가하고 있는 실정이다. 그러나, 선박의 LNG 연료공급을 위한 극저온 펌프 (Cryogenic Pump) 제작의 국내 기술력은 매우 미흡한 현실로서 핵심 부품의 설계와 제작기술이 절실한 시점이다.

그리하여, 본 연구는 선박용 LNG 공급시스템용 극저온 잠액식 원심펌프의 핵심부품인 로터에 대하여 기술하고자 한다. 따라서, 재료선정을 위한 실험적 및 해석적 방법을 통한 최적결과를 도출하여 기술개발의 기초자료로 활용하고자 한다.

주제어 : 액화 천연가스, 연료공급시스템, 모달해석, 극저온, 로터

Abstract Because of emission control of greenhouse gas, shipbuilders, especially those in Korea, are pushing forward to introduce eco-friendly ship-building technology utilizing LNG. However, Technical skills of domestic shipbuilders in manufacturing the cryogenic pump designed to supply LNG for vessels are so low that technical skills for design and manufacturing of core parts are in urgent need.

Therefore, This study described about the Rotor as a core part of cryogenic submerged centrifugal pump for ship LNG supply system.

We wish to utilize for the basic data to develop the technology for the Rotor as deducing the optimal outcome with the experimental and the analytical methods in material selection.

Key Words : LNG, Fuel Supply System, Modal Analysis, Cryogenic, Rotor

1. 서론

2016년부터 적용되는 IMO TierⅡ에 대응하여 현재 사용하는 선박의 연료를 대체하기 위해 LNG 이외의 다른 에너지원은 찾기 어려운 실정이며, 천연가스는 저렴한 가격과 친환경적 연료 사용권장 등의 이유로 급성장이 예상된다[1].

세계적으로 온실가스 배출규제에 따라 청정연료로 대체하는 기술개발이 활발히 이루어지고 있고, 시대적 흐름에 따라 정부는 녹색 성장기조에 맞춰 선박에 대한 기술개발 로드맵을 추진하고 있으며, LNG 연료를 사용하는 친환경 선박 건조 기술을 도입하기 위하여 대형 조선소를 중심으로 활발한 연구개발을 진행하고 있다[2].

2050년까지 전 세계적으로 노후 선박이 퇴출되고, 새로운 선박이 대체하여 투입되는 과정을 거치게 될 것이다. 이 중 대부분의 선박이 청정연료인 LNG를 사용하게 될 것으로 전망되고 있으며, 선박 선진국에서는 이에 부응하여 LNG 연료추진 시스템에 대한 개발에 박차를 가

를 위하여 LNG 연료추진 시스템에 대한 개발에 박차를 가

*Corresponding Author : Tae-Yong Bae(danteby@eagle.kit.ac.kr)

Received May 6, 2018

Accepted July 20, 2018

Revised May 24, 2018

Published July 28, 2018

하고 있으므로, 국내에서도 선박용 LNG 연료공급시스템의 개발에 대한 연구 활동이 필요한 시점이다[3].

한편, 선박용 LNG 연료공급시스템용 펌프는 석유화학제품 운반선, 벌크선과 같은 중형 LNG 추진 선박의 펌프가 주종을 이루고 있다. 더구나, 선박용 LNG 연료공급시스템의 핵심품목인 펌프 설계 및 제작 관련한 국내 기술력은 선진국에 비해 매우 부족한 상황이므로, LNG 펌프 개발과 관련한 제작기술, 핵심 수력부품 설계 등의 기술개발은 필수적이다.

따라서, 본 논문에서는 국내 기술력 향상을 목표로 잠액식 펌프의 로터(Rotor)를 설계하고, 실험적 방법과 해석적 방법을 통하여 결과를 도출하여 향후 국산화 기술개발의 기초 설계 데이터로 활용할 목적으로 연구를 실시하였다.

2. 재료 선정

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 선박용 LNG 연료공급을 위한 초저온 잠액식 원심형(Cryogenic submerged Centrifugal)의 저압용 펌프(Low-Pressure Pump)의 개념도이다. 펌프 자체가 초저온 유체 LNG 안에 들어가는 잠액식 타입이므로, 임펠러(Impeller) 소재는 저온에 적합한 3가지 소재 SUS304, SUS316L, Al 등에 대하여 각각 인장시험, 표면조도 시험, 입도분석 등을 실시하여 적합한 소재를 선정하였다[4].

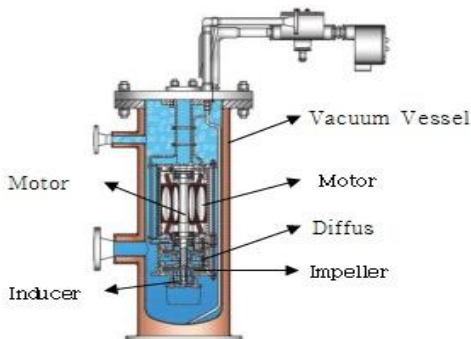


Fig. 1. Layout of the submerged cryogenic cargo pump

2.1 인장시험 결과

Fig. 2는 상온(25°C)을 유지한 상태의 실험실에서

Zwick사 Universal Tensile Strength Tester를 이용하여 각 시편에 대한 인장시험을 통해 얻은 하중-변위 그래프(SS Curve)를 나타내고 있다. SUS304, SUS316L, Al 모두 최대 응력에서 진단되는 현상을 나타내고 있으며, 가공 경화 현상이 강하게 발생하면서 일어나는 전형적인 현상으로 보인다[5,6].

Table 1은 SUS304, SUS316L, Al 등 3가지 소재에 대한 인장시험에 의한 항복강도와 최대인장강도를 나타내었다. SUS304와 SUS316L의 경우, 항복강도가 약 33kg/mm²이고, 인장강도는 약 64kg/mm²로 서로 유사하다. 그러나, SUS316L의 연신율이 54%이므로, SUS316L은 강도가 높고 연신이 잘되는 고인성 재료임을 보이고 있다.

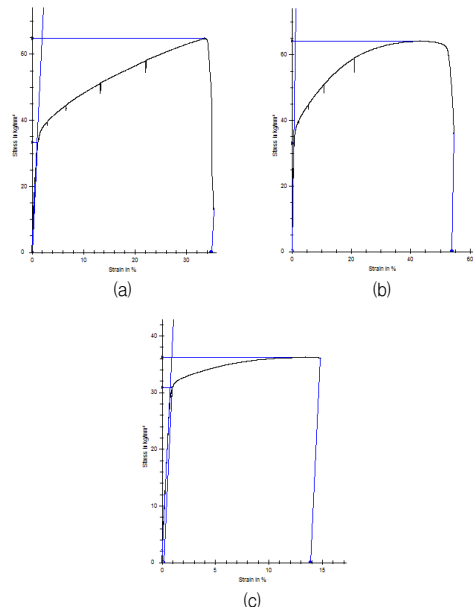


Fig. 2. Results of tensile test : (a)SUS304, (b)SUS316L, (c)Al

Table 1. Tensile test values of each specimen

Material	Y.P (kg/mm ²)	T.S (kg/mm ²)	EI (%)
SUS304	33.28	64.73	34.99
SUS316L	32.95	64.14	53.99
Al	30.09	36.2	13.94

2.2 표면조도 측정 결과

Fig. 3은 VECCO사의 3D 입체 표면조도 측정기를 이용하여 측정된 결과를 나타내었다. 3가지 소재의 표면을

육안으로 관찰하면, Al 소재는 미세한 Hair Line이 보이고, SUS304와 SUS316L은 Dull 표면 처리한 것이 보인다.

Table 2에서와 같이 3가지 소재에 대한 중심선평균거칠기 Ra값을 비교해 보면, SUS304와 SUS316L은 $0.3\mu\text{m}$ 이하의 값을 보이고 있어 표면조도가 Bright를 보이고 있고, Al은 약 $0.4\mu\text{m}$ 의 값을 보이고 있어 SUS보다는 약간 거칠기가 있는 표면 조도를 보이고 있다. 또한, SUS316L의 십점평균거칠기 Rz값은 $5.13\mu\text{m}$ 이고, 전체 최대거칠기 Rt값은 $6.7\mu\text{m}$ 로 3가지 소재 중 가장 높은 수치를 보이고 있다. 따라서, 수치값이 μm 단위라는 점을 고려하면 SUS304와 SUS 316L은 거의 유사한 표면으로 Bright 표면이라고 할 수 있고, Al 소재는 인위적으로 Hair Line을 만든 표면이라고 볼 수 있다.

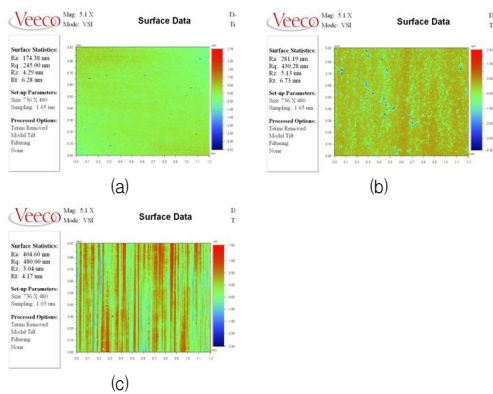


Fig. 3. Results of surface roughness : (a)SUS304, (b)SUS316L, (c)Al

Table 2. Surface roughness of each specimen

Sample	Ra (μm)	Rz (μm)	Rt (μm)
SUS304	0.174	4.29	6.28
SUS316L	0.281	5.13	6.73
Al	0.404	3.04	4.17

2.3 입도 분석 결과

Fig. 4는 광학현미경으로 측정된 3가지 소재의 결정구조 사진이다. SUS304의 조직은 전형적인 SUS304 조직을 나타내고 있으며, 조대한 결정립에 Bend가 보이는 결정립을 일부 함유하는 상으로 나타났다. 이 Bend를 함유하는 결정립의 존재는 XRD 분석상에서 나타났듯이 α -Fe의 형성과 연관성이 있을 것으로 추정된다. SUS316L

은 결정립 내 Bend상이 거의 없는 조직을 나타내고 있으나, SUS316L 대비 작고 특히 SUS304처럼 균일 조직이 아닌 결정립이 작은 것과 결정립이 큰 것이 혼재하는 혼합형 조직으로 나타났다.

Table 3에 3가지 소재에 대한 결정의 크기와 단위면적당 결정의 개체수를 나타내었다. Al은 결정립도 분포가 균일하며, 결정립이 가장 큰 면적을 보여 주고 있다. 또한, Al의 합금 성분으로 인하여 석출물이 결정립 내에 흑점의 형태로 넓게 분포하고 있는 것을 볼 수 있다.

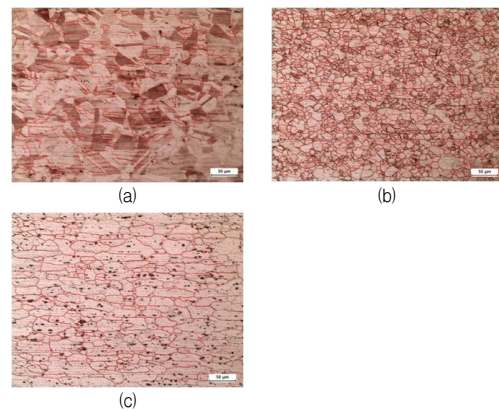


Fig. 4. Photo graphs of crystal structure using the optical microscope : (a)SUS304, (b)SUS316L, (c)Al

Table 3. values of crystal area and number of crystal

Sample	평균면적 (μm^2)	최대 (μm^2)	최소 (μm^2)	개체수
SUS304	249	7035	8	405
SUS316L	60	1263	3	2125
Al	416	4075	3	228

Al의 결정립 모양은 압연 방향으로 결정립이 연신되어 있는 Pancake 조직 형태를 보이고 있다[7,8].

3. 해석적 검토

잠액식 펌프의 로터(Rotor)는 5000rpm으로 빠른 속도로 회전을 하기 때문에 동적 검토가 반드시 필요하다[9-11]. 따라서 개발 제품의 동적 특성 검토를 하기 위해

서 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하여 고유진동수 해석을 실시하였다[12].

Fig. 5(a)는 3D 모델링을 작업한 것이고, Fig. 5(b)는 유한요소 해석을 위해 유한요소 모델링을 실시한 것이다. 요소의 크기는 5mm로 제어하였고, 형태는 Hexa로 설정하였다. 그리고 베어링 고정부에 스프링으로 강성을 표현해주었다.

해석은 정확한 결과를 도출하기 위하여 10개의 모드를 추출하였고, 그 중 강성형태로 나타나는 주파수를 제외한 6개의 모드를 다음과 같이 나타내었다.

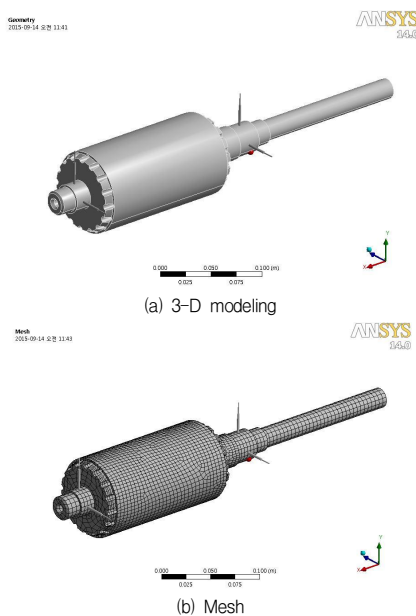


Fig. 5. 3-D model about Rotor pump

Fig. 6은 각 모드 별로 고유진동수 형상과 진동수 값을 나타내었다. 1~6차 모드까지 각각, 259.8Hz, 316.8Hz, 589.2Hz, 687.7Hz, 2345.3Hz, 2380.3Hz로 나타났다. 형태는 1차와 2차 모드에서 굽힘 형태로 각각 Y축과 Z축 방향으로 변형이 일어나는 형태이고, 3차와 4차 축과 로터 몸체에서의 밴딩이 각각 Y축과 Z축 방향으로 일어나는 형태이다. 5차와 6차 모드에서는 로터 몸통을 제외한 축 부분에서의 밴딩 형태를 보이고, 다른 주파수들에 비해 매우 큰 값을 보이기 때문에 공진영역과 관련이 없을 판단하여 이후 주파수에 대해서는 무시하기로 한다.

로터 작동속도 중 최고속도인 5000rpm을 Hz로 환산을 하게 되면 83.3Hz로 나타낼 수 있다. 여기에 API 규격

에 의거하여 안전설계를 하기 위하여 공진분리여유 $\pm 20\%$ 를 해주게 되면 위험 주파수는 66.64Hz~99.96Hz가 된다[13-15]. 고유진동수와 비교하였을 때, 작동 주파수에 비해 고유진동수가 크게 높은 것을 알 수 있다.

따라서, 작동 주파수 내에서는 공진 영역대가 존재하지 않게 되고, 본 연구에서의 로터 설계는 공진 영역대를 회피하여 설계되었음을 알 수 있다.

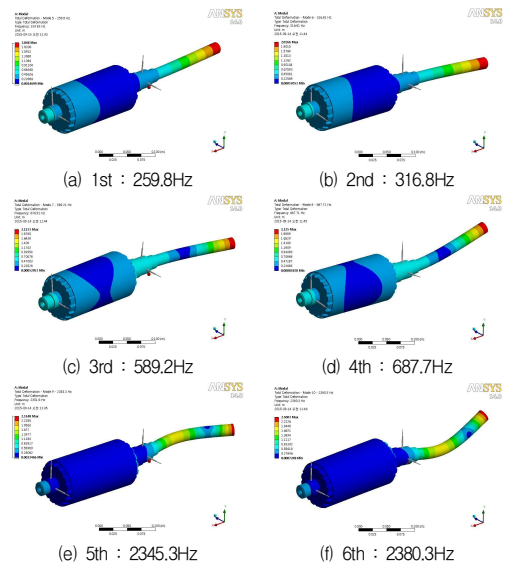


Fig. 6. Results of modal analysis of each mode

4. 결론

본 연구에서 잠액식 펌프의 국산화를 위한 기초설계 연구로 소재검토를 위한 재료시험(인장시험: UTST, 표면조도 측정: 3D입체 표면조도 측정기, 입도분석: 광학현미경)과 모달해석을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 강도와 부식 측면에서 고내식성의 특징을 가지고 있으며, 연신율과 강도가 가장 높게 나온 SUS 316L이 적합한 것으로 나타났다.
2. 조도와 입도 분석결과 역시 SUS316L이 Bright면과 단위면적당 결정수가 가장 높게 측정되어 본 연구에 적합한 소재로 판단한다.
3. 공진분리여유를 적용한 66.64~99.96Hz에 비해 1차 모드의 주파수가 더 높게 나타났으며, 공진영역을

완전히 회피한 것으로 판단한다.

향후, 시제품 제작을 통하여 예비성능평가 및 Field test 수행과 성능평가 결과에 따른 Feed-back 등 지속적인 연구개발이 절실히 필요하다.

REFERENCES

- [1] Ebara Newsletter, No.213, p.18-19
- [2] Ebara Newsletter, No. 138, *Terashima, Matsumura*, pp. 39-44.
- [3] T. J. Um. (2012). *The status of industry and the analysis of growth for Pump & Valve applied to LNGC*, AMENEWS.
- [4] (2009). A study of the thrust dynamic balance of ultra low temperature pump, 12, 17-32.
- [5] J. U. Cho. (2014). Structural Safety Analysis on Crack Propagation in Compact Tension Specimen. *Journal of the Korea Convergence Society*, 5(1), 23-27.
- [6] J. U. Cho. (2015). Study on Convergence Technique through Strength Analysis of Stabilizer Link by Type. *Journal of the Korea Convergence Society*, 6(1), 57-63.
- [7] J. B. Ma & J. I. Lee. (2011). Mechanical Characteristics Analysis of Structural Light-weight Aluminum Foam. *Journal of the Korea Convergence Society*, 2(3), 1-6.
- [8] S. Y. Kang. (2016). Convergent Study of Texture on the Mechanical Properties of Electrodeposits. *Journal of the Korea Convergence Society*, 7(6), 193-198.
- [9] Axial Balancing system for motor driven pump, USA Patent
- [10] J. W. Park. (2017). Structural Analysis of a Tractor Cabin Considering Structure Production Error. *Journal of the Korea Convergence Society*, 8(5), 155-160.
- [11] J. W. Park & J. Y. Heo. (2017). Analysis of Dynamic Characteristics for a Tapered Roller Bearing Cage. *Journal of the Korea Convergence Society*, 8(5), 179-184.
- [12] J. U. Cho. (2015). Study on Convergence Technique through Structural Analysis on the Axle of Railway Vehicle. *Journal of the Korea Convergence Society*, 6(1), 93-101.
- [13] CRYOGENIC PUMP DIV., NIKKISO Co., Ltd
- [14] Ebara Newsletter, No.124, Nakamura, Kawasaki, Kobayashi
- [15] Operating & maintenance manual, Cryodynamics division

황 규 완(Hwang, Gyu Wan)

[정회원]



- 1995년 3월 ~ 현재 : 경남정보대학교 기계계열 교수
- 관심분야 : 공장자동화, 유연생산 시스템, 해양공학
- E-Mail : gwhwang@eagle.kit.ac.kr

배 태 용(Bae, Tae Yong)

[정회원]



- 2002년 3월 ~ 2015년 1월 : 경남정보대학교 신발패션산업과 교수
- 2015년 1월 ~ 현재 : 경남정보대학교 기계계열 교수
- 관심분야 : 기계자동화기술, 자동화기계, 금형

▪ E-Mail : danteby@eagle.kit.ac.kr