

벌류트 펌프의 신뢰성 평가에 관한 연구 Study for the Reliability Evaluation of a Volute Pump

정동수^{1*} · 이용범¹ · 강보식¹

Dong Soo Jung, Yong Bum Lee and Bo Sik Kang

Received: 03 Sep. 2018, Accepted: 15 Oct. 2018

Key Words : Volute Pump(벌류트 펌프), Reliability(신뢰성), Acceleration Test(가속시험), Qualification Life(보증수명)

Abstract: The objective of this paper is to evaluate the reliability of a volute pump and presents test results through performance and life tests. The performance and life test methods were presented by analyzing the failure modes of the volute pump. Zero failure test time was calculated to evaluate the reliability of the volute pump and then, the test was performed under accelerated conditions. The test was also carried out to check the failure modes of the field conditions. This study can be provided to improve the product reliability through failure analysis of the volute pump. And failure cause of typical failure case has been investigated and improvement design has been presented. The performance test results of before and after the accelerated life test were presented to confirm the improved reliability of the volute pump.

기호 설명

t_n : zero failure test time, hr
 B_{100p} : qualification life(B_{10}), hr
 CL : confidence level
 n : number of samples
 p : out of reliability
 β : shape parameter
 AF : acceleration factor
 H_{test} : test head, m
 H_{field} : field head, m
 ω_{test} : test speed, rpm
 ω_{field} : field speed, rpm
 m, l : power index of acceleration model
 t_{na} : acceleration test time, hr

1. 서론

원심펌프는 여러 개의 임펠러를 밀폐된 케이싱 내에서 회전시킴으로써 발생하는 원심력을 이용하여 액체를 수송하거나 양정(또는 수두)에 필요한 압력을 발생시킨다. 펌프입구를 통하여 중심부에 흡입된 액체는 회전하는 임펠러를 지나 압력이 높아지고 임펠러의 바깥쪽에 위치한 스파이럴형의 케이싱을 지나 펌프출구로 토출된다. 원심펌프는 임펠러를 나온 액체가 안내 갭 사이를 지나 케이싱으로 나가는 터빈 펌프와 안내 갭을 가지지 않는 Fig. 1과 같은 벌류트 펌프로 분류된다.

벌류트 펌프는 낮은 양정에 적합하며 수명이 길고 안정적인 운전이 가능하여 상·하수도용, 일반 산업양수용 그리고 발전소 냉각수 순환용 등 주로 유량이 큰 곳에서 많이 사용된다. 기능 또는 작동에 관련된 고장을 저감하는 것이 제품의 신뢰성을 높이는 연구영역이지만 적용분야에 따라서 하루 24시간 가동하는 경우가 많아서 펌프 효율도 운용비용을 결정하는 중요한 요인이 되고 있다.

오늘날 벌류트 펌프는 표준화된 시험방법이나 판정기준이 없어 관련 기업들은 품질검사에 많은 어려

* Corresponding author: jds667@kimm.re.kr

1 Department of Reliability Assessment, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon 34103, Korea

Copyright © 2018, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

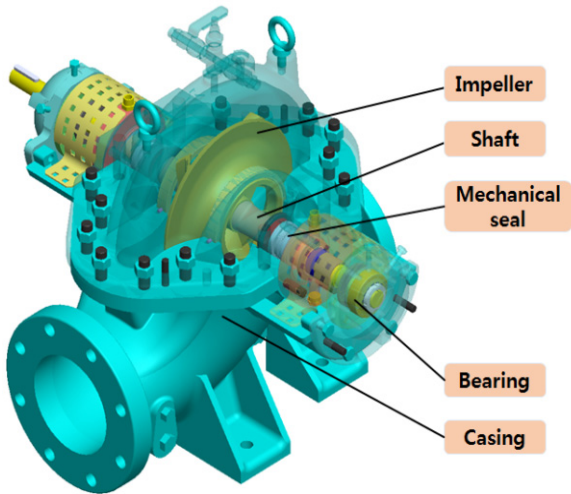


Fig. 1 The structure of a volute pump

움이 있었으며 더군다나 선진사 제품과의 비교시험을 통한 기술격차 확인도 쉽지가 않았다. 신뢰성 분석 및 시험을 위한 고급인력 및 장비 확보를 위해서는 많은 연구비용이 투자되어야 한다. 제품의 생산, 판매에만 주력하고 있는 중소기업들의 현실을 감안할 때 중소기업이 독자적으로 신뢰성 확보를 추진하기가 어려운 실정이다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 국내에서 생산되는 벌류트 펌프에 대한 신뢰성 평가에 관한 연구가 시급하다.

본 연구에서는 벌류트 펌프에 대한 고장모드를 분석하여 주 고장모드를 도출하고 성능 및 수명에 대한 시험방법들을 제시한다.¹⁻²⁾ 그리고 기존제품에 대한 설계개선 방안을 도출하고 수명시험 전·후 제품의 시험결과를 분석하여 개선된 제품의 신뢰성을 확보하고자 한다.

2. 벌류트 펌프의 고장분석

2.1 주요고장 사례

벌류트 펌프는 다른 급수 펌프에 비하여 가동 시간이 24시간 연속적인 것이 특징이며 노출된 환경 또한 열악하다. 슬러지와 유해물질 등이 발생하는 환경은 제품의 내부부식이 발생할 수도 있으며 심한 경우에는 효율을 저하시키는 원인이 되기도 한다. 주요고장 사례를 도출하기 위하여 Fig. 2와 같은 현장에서 발생된 고품들을 수집 및 분석한 결과 메커니컬 씰의 마모가 50%, 임펠러의 변형이 25%, 케이싱의 부식이 15%, 그리고 베어링을 포함한 기타의 고장 메커니즘이 10% 로 분석되었다.³⁻⁴⁾

이러한 고장 메커니즘들은 외부누유, 효율저하, 소음발생 그리고 수명단축 등과 같은 고장모드를 가져오며 궁극적으로는 신뢰성을 저하시킨다.

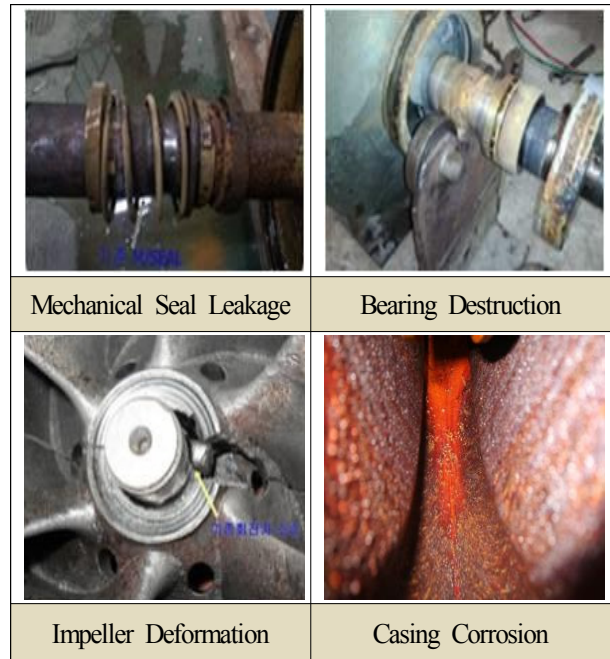


Fig. 2 Main failure samples of a volute pump

2.2 고장모드 분석

현장고장이 발생되어 사전에 수집된 또는 기록된 내용들을 근거로 고장모드를 조사하고 주 고장의 원인을 분석한다. 이는 제품의 설계, 제작, 조립 그리고 운용 등에서 제품의 불완전한 상태로 인한 잠재적 결함을 찾아내기 위하여 구성요소들의 고장형태와 그 상위 제품에 미치는 영향을 해석하여 설계개선으로 연결시키기 위한 중요한 과정으로써 반드시 필요한 사전 분석 작업이다.

벌류트 펌프의 주요 부품들은 임펠러, 케이싱, 메커니컬 씰, 축 그리고 베어링 등으로 구성되어 있다. Table 1에서와 같이 주요 고장모드는 외부누유, 양정 또는 유량감소로 인한 효율저하, 부식, 진동 그리고 파손 등이 있다. 그리고 Table 2는 구성품의 고장모드와 시험 항목들 간의 관계를 정리한 2단계 품질기능전개를 보여주고 있다. 1단계 품질기능전개에서는 2단계에 적용되는 고장모드들의 가중점수(weighting score)를 결정하게 된다. 2단계 품질기능전개는 주요 부품들의 고장모드를 재현하기에 적합한 시험항목들을 결정하고 각 시험항목들의 중요도를 판단하기 위하여 수행된다. 중요도 등급에 따라 대표성능 시험항목이 선정된다.

대표성능 시험항목은 중요도 최고점수 순위에 따라 성능시험 항목들 중에서 1개 이상이 선정되며 수명시험이 진행되는 중간에 성능열화에 대한 확인용으로 활용될 수도 있다.

Table 1 Failure modes and mechanisms analysis

Components	Function	Failure modes	Failure mechanisms	
Casing	Fluid Transport	Head Drop	1-1	Corrosion
		Corrosion	1-2	Oxidation
Impeller	Fluid Power Generation	Head Drop	2-1	Deformation
		Flow Decrease	2-2	Degradation
		Corrosion	2-3	Impurities
Shaft	Mechanical Power Translation	Vibration	3-1	Fatigue
		Destruction	3-2	Fixation
Mechanical Seal	Leak Prevention	Leakage	4-1	Wear
		Destruction	4-2	Aging
Bearing	Shaft Support	Destruction	5-1	Stress
		Noise	5-2	Fatigue

Table 2 Two stage quality function deployment

Component	Failure Modes	Weight Score	Test item					
			Flow & Head	Max. Flow	Max. Head	Eff.	External Leak	Life
Casing	Head Drop	14	●	●	◎	◎	▲	◎
	Corrosion	8	▲	▲	▲	●		●
Impeller	Head Drop	18	◎	◎	◎	◎		◎
	Flow Decrease	15	◎	◎	▲	◎		●
	Corrosion	6	●	▲	●	◎		●
Shaft	Vibration	8	▲	◎	●	●		◎
	Destruction	6	▲	●	▲		▲	●
Mechanical Seal	Leakage	16	◎	◎	●	▲	◎	◎
	Destruction	7	●	▲	●	●	◎	●
Bearing	Destruction	8	▲	●	●	◎		◎
	Noise	13	▲			▲		●
Test Effectiveness Score and Rank			369	390	324	403	135	485
			4	3	5	2	6	1

비 고

#1. 평가 척도 : ◎ 가장 중요(5점), ● 중요(3점), ▲ 보통(1점)

#2. 시험 항목별 유효성 점수 = ∑(중요도 점수 × 평가 척도)

3. 시험항목 및 판정기준

3.1 성능시험 방법

벨류트 펌프의 2단계 품질기능 전개로부터 6개의 시험항목들이 선정되었으며 이 중에서 효율시험이 대표성능 시험항목으로 결정되었다. Table 3은 6개의 시험항목들에 대한 시험방법 및 판정기준을 보여주고 있다. 수명시험을 제외한 5가지 성능시험 항목들은 수명시험 전에 먼저 수행하여 제품에 대한 초기 성능을 확인하고, 수명시험이 완료된 후에도 실행하여 수명시험 후 제품의 고장유무 및 성능 열화를 확인하게 된다.

수명시험 후에도 모든 시험항목들은 각각의 평가 기준들을 만족하여야 한다. 대표성능인 효율시험은 수명시험시간 25, 50, 75 % 가 진행된 후 성능열화를 확인하기 위하여 각각 수행된다.

Table 3 Test method and acceptance criteria for performance and life

Test Item	Test Method	Acceptance Criteria
Rated Flow & Head	The rated speed and head is consistently maintained.	Discharge flow must be more than 98 % of the rated flow.
Maximum Flow	Input speed is operated at the maximum speed without load.	Discharge flow must be more than 95 % of the maximum flow.
Maximum Head	The head is increased to over a maximum at the maximum speed.	The head must be more than a maximum
Efficiency	The head is increased up to the maximum at the rated speed.	Efficiency must be more than 65 % at the rated flow and head
External Leak	The samples are operated for 10 minutes under the maximum head.	The samples must be no leakage.
Life Test	The maximum speed and 95% of the head is maintained.	After the accelerated life test up to 1,300 hours, the test samples should pass the acceptance criteria of the performance test without a failure.

3.2 가속수명시험 시간

3.2.1 무 고장 시험시간

국내 기업들을 대상으로 조사한 결과 벨류트 펌프의 수명은 현장 사용 조건을 고려하여 신뢰수준 70% 로 B₁₀ 보증수명 9,000 시간을 보장하는 것으로 하였다.

또한 벌류트 펌프의 주 고장모드는 메커니컬 쉘의 마모로써 "Machinery Failure Analysis and Troubleshooting"에서 언급된 마모와 증가 되므로 형상 모수(β)가 3.0인 와이블 분포를 따른다.⁵⁾

그리고 현실적인 시험환경을 고려하여 동시에 수명시험을 수행해야하는 샘플을 2개로 선정하면 식(1)에 적용하면 무 고장 시험시간(t_n)은 약 16,000 시간이 된다.

$$t_n = B_{100p} \cdot \left[\frac{\ln(1-CL)}{n \cdot \ln(1-p)} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (1)$$

3.2.2 가속 시험시간

무 고장으로 산출된 시험시간은 시험시간이 너무 길어서 수명시험으로 채택하기에 곤란하다. 따라서 식(2)와 같이 주요 스트레스를 현장조건 보다 가혹하게 인가하면 시험시간을 줄일 수 있다. 벌류트 펌프의 주 고장모드는 마모이며 이와 관련된 주요 스트레스 인자는 양정과 속도로 선정된다. 양정과 속도에 대한 가속모델의 파워지수 m 과 l 은 "Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment"에서 제시된 파워지수를 인용하여 각각 2와 1을 적용하였다.⁶⁾

가속모델에 언급된 사용조건의 양정은 최대 양정의 30%이며, 시험조건의 양정은 최대 양정의 95%로 한다. 그리고 사용조건의 속도는 1,750rpm이며, 시험조건의 속도는 2,200rpm으로 하면 가속계수는 약 12.6이 된다.

$$AF = \left(\frac{H_{test}}{H_{field}} \right)^m \times \left(\frac{\omega_{test}}{\omega_{field}} \right)^l \\ = \left(\frac{0.95H_{max}}{0.30H_{max}} \right)^2 \times \left(\frac{2,200}{1,750} \right)^1 \quad (2)$$

마지막으로, 식(3)에 의하여 양흡입 벌류트 펌프의 가속 수명시험 시간(t_{na})을 산출하면 약 1,300 시간이 된다.

$$t_{na} = \frac{t_n}{AF} \quad (3)$$

4. 신뢰성 시험

4.1 시험품 사양

Table 4는 신뢰성 평가가 수행될 샘플의 제작 사양을 보여주고 있다. 이는 산업현장에서 가장 많이 활

용되고 있는 벌류트 펌프의 대표적인 사양이다. 본 펌프는 유동해석을 통하여 사전시험에서 효율이 저하된 원인을 규명하여 설계가 개선되었다. 그리고 현장에서 발생된 주요고장 사례들을 분석하여 재질이 변경되고 표면코팅으로 보완되었다.

Table 4 Specimen specifications

NO	Division	Specifications
1	Rated flow at rated head	2,000 L/min
2	Maximum flow in no Load	3,450 L/min
3	Rated head	20 m
4	Maximum head	24 m
5	Rated speed	1,750 rpm
6	Maximum speed	2,200 rpm
7	Discharge Diameter	80 mm
8	Suction Diameter	100 mm

4.2 시험장비의 구성

벌류트 펌프의 성능 및 수명시험을 진행하기 위해 구성한 시험장비의 전체 사진은 Fig. 3이며 시험장비의 사양은 Table 5와 같다. 본 시험장비에서 수명시험은 2대로 수행되며 이중 1대는 성능 시험으로 활용이 된다.

주요 구성부품들 중 다이내모메타는 입력속도를 제어하며 비레압력 제어밸브는 토출압력을 제어하여



Fig. 3 Test equipment for performance and life

Table 5 Test equipment specifications

NO	Division	Specification
1	Dynamometer	30 kW
2	Prop. Pressure Valve	5 bar
3	Torque sensor	300 Nm
4	Flow sensor	3,500 L/min
5	Controller	DAQ, Indicator, ect.

요구되는 양정을 얻는다. 토크센서와 유량센서는 성능시험 장비에만 탑재하였다. 제어반에서는 시험장비의 속도와 양정을 제어하며 결과분석에 필요한 데이터를 실시간으로 취득한다.

4.3 신뢰성 성능 시험결과

Fig. 4~7은 수명시험이 완료된 후에 얻어진 샘플 1의 성능시험에 관련된 시험결과이다. Fig. 4는 정격압력에서 토출유량이 1,968 L/min으로 정격유량의 기준치를 만족하고 Fig. 5는 최대속도에서 토출유량이 3,330 L/min으로 최대유량의 기준치를 만족하고 Fig. 6은 최대속도에서 양정을 최대로 상승시켰을 때 토출압력을 양정으로 변환하면 양정은 24.9 m로 최대양정을 초과함을 보여주고 있다. Fig. 7은 정격속도에서 무 부하에서 최대양정까지 양정을 증가시키면서 측정된 데이터를 기반으로 부드럽게 표현한 효율 결과이다. 정격유량에서 효율이 최대이며 78.1 % 임을 보여주고 있다.

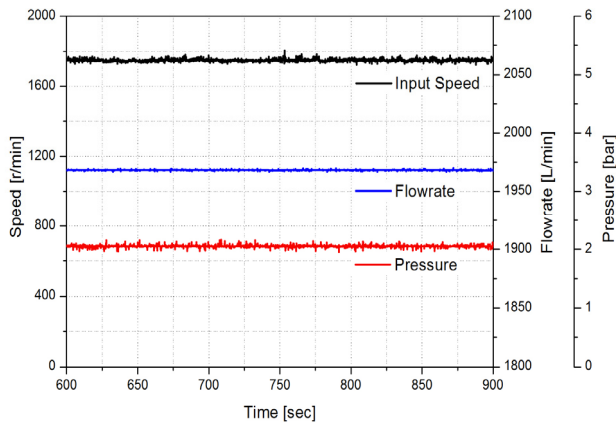


Fig. 4 Test result for rated flow & head

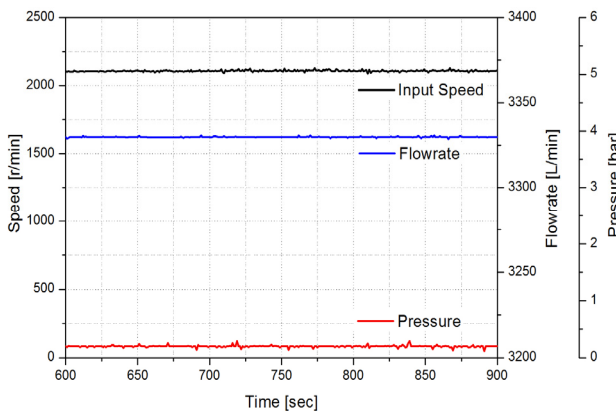


Fig. 5 Test result for maximum flow

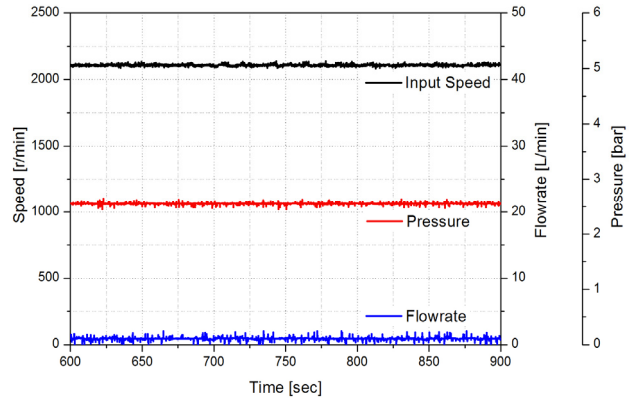


Fig. 6 Test result for maximum head

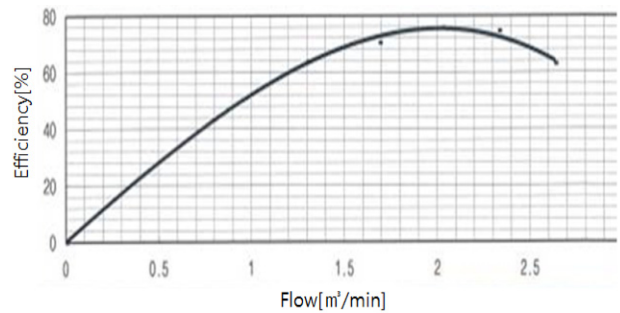


Fig. 7 Test result for efficiency

수명시험은 최대속도와 최대양정의 95% 인 가속 조건을 부여하여 샘플 2개에 대하여 1,300 시간이 수행되었다. 성능열화를 확인하기 위하여 수명시험 전·후에 성능시험을 수행하였으며 그 결과는 Table 6에서 나타내고 있다. 정리한 바와 같이 시료 2개 모두 수명시험 전·후의 시험결과가 Table 3의 평가기준을 만족함에 따라 시험시료는 보증수명 9,000 시간에 대한 신뢰성을 확보하였다.

Table 6 Test result for performance and life

		Division	Sample 1	Sample 2
Before Life test		Rated flow & head	98.6 %	98.7 %
		Maximum flow	96.7 %	96.8 %
		Maximum head	25.3 m	25.1 m
		Efficiency	78.5 %	78.4 %
After Life test		Rated flow & head	98.4 %	98.4 %
		Maximum flow	96.5 %	96.9 %
		Maximum head	24.9 m	24.6 m
		Efficiency	78.1 %	78.2 %
		External leak	non	non

4.4 개선을 통한 신뢰성 향상

4.4.1 임펠러 설계개선

펌프의 효율 및 양정을 향상시키기 위하여 전산유동해석(CFD)을 통해서 임펠러의 형상을 개선하였다. Fig. 8의 임펠러 받음각(β)을 기존의 53.28에서 54.78로 1.5° 증가시키고 두께를 1.5에서 1.7로 0.2 mm 증가시키는 것으로 설계를 변경하였다. Fig. 9는 유동해석에서 임펠러의 받음각을 기존보다 1.5° 증가함에 따라 시뮬레이션 결과에서 효율이 4.5 % 향상되었다. 이러한 개선은 효율시험에서 만족된 결과로서 나타났다.

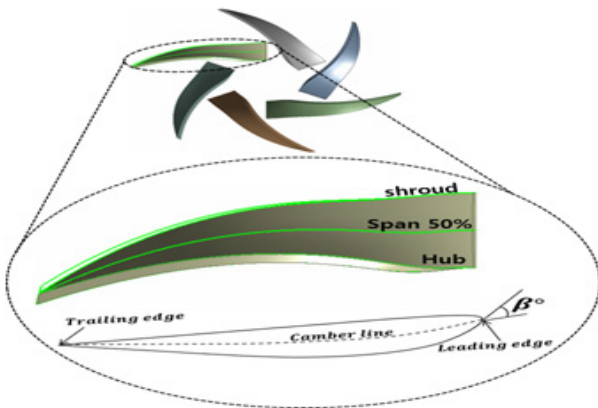


Fig. 8 Impeller design change of impeller

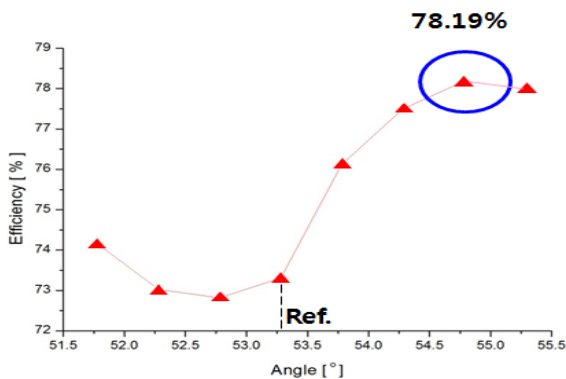


Fig. 9 Pump efficiency according to angle of impeller



Fig. 10 Life test equipment of mechanical seal

4.4.2 메커니컬 씰 강도개선

마모에 의한 외부누수를 개선하기 위해서 접촉면의 강도, 부식성, 그리고 표면조도의 균질을 이루었다. 접촉면의 강도를 개선을 위해 회전자의 재질을 충격에 약한 기존의 탄화규소에서 경도가 높은 탄화텅스텐으로 변경하였다. 또한 누수에 의한 부식성을 개선하기 위해서 용수철의 재질을 SUS 304에서 SUS 316L로 변경하였으며, 회전자 몸체도 SUS 304에서 내열성 니켈 합금으로 변경하였다.

개선된 내용을 검증하기 위하여 10대를 100시간 동안 마모시험을 수행한 결과 누수가 없음을 확인하고 벌류트 펌프에 탑재하였다. Fig. 10은 메커니컬 씰의 수명시험 장치를 보여주고 있다.

4.4.3 케이싱 라이닝

벌류트 펌프의 원활한 유동을 위하여 케이싱의 곡률반경을 기존에서 5 mm 증가시키고 폭을 6 mm 감소시키는 것으로 설계를 변경하였다. 또한, 케이싱 내부의 표면 거칠기에 따른 전산 유동해석을 통해 표면조도가 1 μm 이하이어야 효율이 향상되는 것을 Fig. 11과 같이 확인하였다.

표면조도 향상을 위해 폴리우레탄을 케이싱 내부에 라이닝 하였다. 케이싱의 설계변경과 폴리우레탄 라이닝을 수행한 개선품의 효율은 기존 제품 대비 2.6 % 향상되었으며 정격양정도 개선됨을 알 수 있었다.

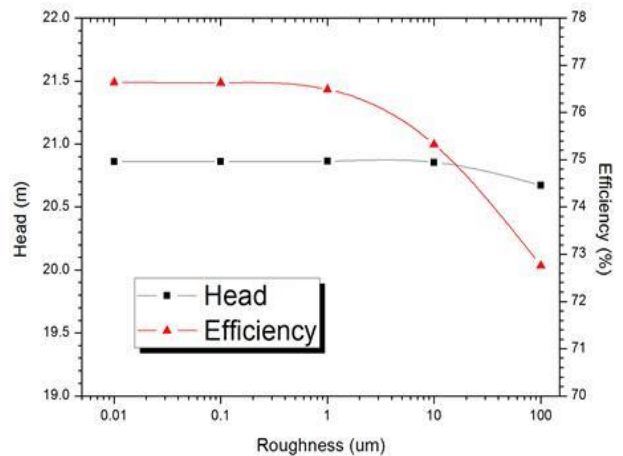


Fig. 11 Pump efficiency and head according to roughness

5. 결 론

일반적으로 해외의 유명 벌류트 펌프 제조 메이커

에서는 벌류트 펌프에 대한 실제 시험데이터 및 시뮬레이션 해석 등을 통해 현장에서 적용하여 사용할 때 기준이 되는 제품의 선정 자료를 제시하고 있으나 국내 제조기업에서는 이러한 시험데이터 등이 거의 전무한 실정에서 해외의 자료를 단순히 인용하는 것이 대부분이었다.

본 연구에서는 벌류트 펌프에 대한 주요고장, 품질 기능 등의 분석에 의하여 시험평가기준을 개발하고 사용자 요구사항을 반영한 신뢰성 평가를 통하여 제품의 신뢰성을 확보하는 전반적인 방법 및 절차를 제안하였다.

신뢰성 시험항목은 시험방법 및 평가기준이 정립된 성능에 관련된 5개의 시험항목과 1개의 수명시험으로 구성된다. 수명시험은 보증수명으로부터 산출된 무고장 시험시간을 수행하기가 현실적으로 어렵기 때문에 이를 단축시키기 위하여 GLL (General Log Linear) 모델을 적용하여 시험시간을 1,300 시간으로 단축시켰다. 그리고 성능 및 수명시험을 수행하여 도출된 시험결과를 분석하고 결과를 제시하였다.

본 신뢰성 평가기술은 벌류트 펌프의 요소부품에 대한 개발 및 신뢰성 확보에 필요한 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2015~2017년도 산업통장자원부에서 시행한 산업기술혁신사업 신뢰성기술확산사업(과제번호 : N0001528)에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

References

- 1) D. S. Jung, "Study on Reliability Evaluation for a Taper Grid Coupling", Journal of Applied Reliability, Vol.17, No.4, pp.343-354, 2017.
- 2) D. H. Lee et al., "Development and Evaluation of Automatic Steering System for Parallel Parking", Journal of Drive and Control, Vol.13, No.1, pp.18-26, 2016.
- 3) D. S. Jung and D. S. Kim, "Reliability Evaluation Method for Hydraulic Pump", Journal of Drive and Control, Vol.7, No.1, pp.16-21, 2010.
- 4) Y. B. Lee and J. J. Lee, "A Study on the Seal Life Improvement of the Hydraulic Servo Actuator for Steam Control of Power Plants", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.2, pp.32-37, 2018.
- 5) W. Nelson, "Weibull Analysis of Reliability Data with Few or No Failures", Journal of Quality Technology, Vol.17, No.3, pp. 140-146, 1985.
- 6) T. L. Jones, "Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment", NSWC-07, pp.17-18, 2007.