신뢰성응용연구
제16권, 제4호. pp.263-271, 2016

슬러리 펌프의 신뢰성 향상

정 동 수†

한국기계연구원 신뢰성평가센터

Reliability Evaluation of a Slurry Pump

Dong Soo Jung†

Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery & Materials

Purpose: A slurry pump for flue gas desulfurization system performs a role that discharges the slurry of a plaster shape in a thermal power plant. Since a slurry pump transfers the slurry by the centrifugal force, it has the friction wear in the impeller and liner because of the slurry.
Methods: In this study, failure analysis and test evaluation on the slurry pump have been proposed and the process that reliability of the product improves through design improvement has been presented. And failure cause of typical failure case has been investigated and improvement design has been presented.
Results: Reliability improvement is established by analysis of the test results of before and after acceleration test.
Conclusion: This study can be provided to improve the product reliability through failure analysis of a slurry pump.

Keywords: Slurry, Pump, Reliability, Acceleration Test, Qualification Life

1. 서 론

석탄을 원료로 하는 화력발전소에는 발전을 하고 나면 생기는 배출가스를 정화시키는 탈황설비를 갖추게 되는데, 현재 사용 중인 탈황설비는 습식 탈황설비로 이산화황이 포함된 배기가스가 외부로 나가기 전에 산소와 접촉해 삼산화황이 되고 여기에 석회석이 함유된 물을 접촉시키면 이산화탄소와 석고가 되는 과정을 거쳐 밖으로 배출된다. <Fig. 1>은 삼산화황이 석회석 슬러리와 반응 후 발생하는 석고(탈황 슬러리)를 외부로 배출하기 위하여 사용되는 탈황 설비용 슬러리 펌프의 내부구조를 보여주고 있다.

일반 물 펌프는 물을 이송하므로 마모가 크게 발생되지 않지만 슬러리 펌프는 슬러리를 직접 원심력에 의해 이송하므로 마찰력은 회전수에 비례하게 되고 슬러리와 임펠러 또는 슬러리와 라이너의 마찰에 의해 내부 마모가 다소 크게 진행된다[1]. 슬러리 펌프는 주요 부품들의 재료선정, 형상설계, 그리고 조립상태 등에 의하여 수명을 저하시키는 마모의 가속정도가 결정되며 아울러 고장을 야기하는 기능과 성능에도 영향을 받는다.

국내 중소기업의 연구기반을 고려하고, 현실적으로 제품의 생산, 판매에만 집중하고 있는 업계의 현실로 볼 때, 신뢰성 분석 및 시험을 위한 고급 인력 및 장비 확보를 위해서는 많은 간접비용이 투자되어야 하므로 중소기업이 독자적으로 신뢰성 확보를 추진하

† 교신저자 jds667@kimm.re.kr
2016년 5월 16일 접수; 2016년 10월 12일 수정본 접수; 2016년 10월 23일 게재 확정.

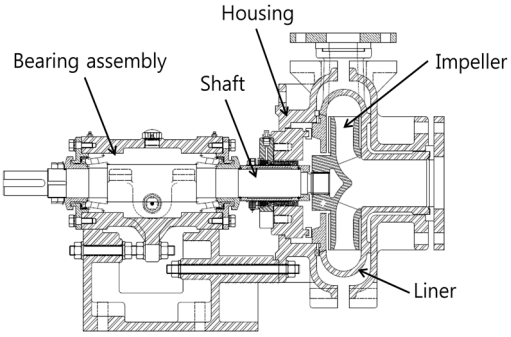


Fig. 1 The structure of slurry pumps

기가 어려운 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 국내 제품의 신뢰성 확보 문제가 필수적이며, 이러한 추세는 슬러리 펌프에도 해당되어 신뢰성 확보가 시급하다. 더 나아가 추후 유사한 제품을 개발할 때에도 확보된 신뢰성 평가기술을 바탕으로 생산원가의 절감과 개발시간을 단축할 수 있다.

본 연구에서는 슬러리 펌프에 대하여 고장분석 및 시험평가를 제안하고 설계개선을 통하여 제품의 신뢰성이 향상되는 과정을 소개한다. 대표적인 고장사례에 대한 고장원인을 규명하고 개선방안을 제시한다. 마지막으로, 수명시험 전・후의 시험결과를 분석하여 신뢰성 향상을 입증한다.

2. 슬러리 펌프의 고장분석

2.1 주요고장

슬러리 펌프는 슬러리를 함유하게 되어 슬러리에 의해 부품 마모가 일어나게 된다[2]. 실제 현장에서는 탈황슬러리의 영향으로 펌프부품이 <Fig. 2>와 같이 마모와 부식이 동시에 진행된다. 펌프 부품은 소모품이고 정기적으로 교환을 해야 하는데 10,000시간(약 1년 2개월)동안 중량감소 15% 이상일 경우 정기적으로 교환을 한다. 중량감소가 15% 이상이 되면 정상적이 성능이 나오지 않게 되므로 운용에 차질을 빚게 된다.

탈황 슬러리 펌프에 장착되는 금속 씰은 내부에 회전자와 고정자의 마찰로 인해 누수를 막는 장치인데 펌프 운반 및 설치 시 부주의로 인해 씰의 표면이 손상되어 누수가 되거나 오래 가동하다보면 회전자와 고정자가 맞닿는 부분에 스크래치로 인해 누수가 된다.

<Fig. 3>은 운반 및 설치 부주의로 인한 씰 표면이 손상된 사진으로 씰 표면이 완전히 깨져 새롭게 교환해야 되는 사진이고 오른쪽 사진은 씰이 누수 되는 사

Fig. 2 Corrosion and wear on the impeller

Fig. 3 Failure phenomena of mechanical seals

Table 1 Failure modes and mechanisms analysis

component	function	failure mode	failure mechanism
casing	housing construction	loosen	vibration/shock
		corrosion	surface weakness
impeller	centrifugal force	wear	fatigue
		adhere	contamination
liner	fluid pressure	wear	fatigue
		lift drop	deformation
main shaft	power delivery	broken	vibration/shock
mechanical seal	leakage prevention	leakage	wear
bearing	load support	broken	fatigue

진인데 처음 설치방법이 잘못되었거나 씰 수명이 다 되어 씰 표면에 스크래치로 인해 누수가 된다.

2.2 고장모드 분석

슬러리 펌프의 신뢰성 향상을 위한 평가에 앞서, 제품의 고장 모드를 조사하고 잠재적인 고장을 확인한다. 이는 제품의 설계, 제작, 조립, 운용 등에서 제품의 불완전으로 인한 잠재적 결함을 찾아내기 위하여 구성요소들의 고장 형태와 그 상위 제품에 미치는 영향을 해석하여 설계개선으로 연결시키기 위한 중요한 부분이다. 슬러리 펌프는 임펠러, 라이너, 케이싱, 메커니컬 씰, 베어링 하우징, 축 등으로 구성되어 있다. <Table 1>에서 언급된 바와 슬러리 펌프의 주요 고장 모드는 임펠러 및 라이너의 피로에 의한 마모, 메커니컬 씰의 마모에 의한 외부누설 등이 있다.

2.3 품질기능 분석

고장 심각과 발생 빈도로부터 치명적인 심각성을 도출하고 1단계 품질기능 전개를 수행하여 2단계 품질기능 전개에 이용되는 중요도의 점수를 구한다. <Table 2>는 슬러리 펌프에 대하여 구성품의 고장모드와 시험항목들 간의 관계를 정리한 2단계 품질기능

Table 2 2-Stage quality function deployment

component	failure mode	weighting score	testing item				
			rated flow	max. flow	max. pressure	efficiency	life time
casing	loosen	17	▲	▲	▲	●	●
	corrosion	8	▲	▲	▲	▲	●
impeller	wear	19	●	●	●	◎	◎
	adhere	20	●	●	◎	●	●
liner	wear	15	●	●	●	◎	◎
	lift drop	20	●	●	◎	●	●
main shaft	broken	14	▲	●	●	●	●
mechanical seal	leakage	15	●	●	◎	◎	◎
bearing	broken	11	▲	●	●	●	●
score & rank			317	367	477	499	515
			5	4	3	2	1

전개의 결과를 보여주고 있다(여기서, ◎ : 5, ● : 3, ▲ : 1). 2단계 품질기능 전개는 시험항목들을 선정하고 각 시험항목들의 중요성을 판단하기 위하여 수행된다. <Table 2>에 정리된 시험 유효성 점수로 판단할 때 수명시험이 가장 중요하다.

3. 시험평가기준개발

3.1 시험평가기준

슬러리 펌프의 2단계 품질기능 전개로부터 선정된 시험항목들에 대하여 시험방법과 평가기준을 정립하여 <Table 3>에 정리하였다. 수명시험을 제외한 4가지 성능시험 항목들은 수명시험 전에 먼저 수행되며 수명시험이 완료된 후에도 실시된다. 수명시험 후에 각 시험항목들은 다소 열화현상이 발생하더라도 각각의 평가기준들을 만족하여야 한다.

3.2 가속 수명시험 시간

3.2.1 무고장 시험시간

국내 산업체를 대상으로 조사한 결과 슬러리 펌프의 수명은 현장 사용 조건을 고려하여 신뢰 수준 70%로 B_{10} 수명 1.0×104시간 (평균 등가 수명 1년 1개월)을 보장하는 것으로 하였다. 또한 슬러리 펌프의 주고장 모드는 임펠라의 열화로써 Barringer & Associate의 “Weibull Database”에서 언급된 임펠러, 펌프와 등가되므로 형상 모수(β)가 2.5인 와이블(Weibull) 분포를 따른다[3]. 따라서, 다음의 신뢰성 조건을 식 (1)에 적용하면 무고장 시험시간(t_n)은 약 20,081시간이 된다.

- 수명 분포 : 형상모수(β)가 2.5인 와이블(Weibull) 분포
- 보증 수명 : B_{10} 수명 1.0×10^4시간
- 신뢰 수준 : 70%
- 시료 수 : 2개
- 무고장 시험 시간(t_n) :

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

여기서 t_n : 무고장 시험 시간 , B_{100p} : 보증 수명
CL : 신뢰수준(confidence level),
n : 시 료 수
p : 불신뢰도(B_{10} 수명이면 p = 0.1),
β : 형상 모수

3.2.2 가속 시험시간

무고장으로 산출된 시험시간은 시험시간이 너무 길어서 수명시험으로 채택하기에 비현실적이다. 따라서 식 (2)와 같이 시험조건을 가혹하게 인가함으로써 시험시간을 줄일 수 있다. 슬러리 펌프의 주고장 모드인 임펠라 열화의 가속수명시험을 위해 가속인자는 압력으로 선정한다. 가속모델은 역승모델로 선

Table 3 Test methods and evaluation criteria

test item	test method	test evaluation
rated flow	- rated speed - rated lift	above 95% of rated flow
max. flow	- rated speed - under 10% of rated lift	above 95% of max. flow
max. lift	- rated speed - raising lift to max.	- above max. lift
efficiency	- rated speed - raising lift from min. to max.	above 65%
life time	- rated speed - 90% of rated lift - 800 h	- Two samples must be no failure during life time of 800 hour - All of the test items must be satisfied from test evaluation after life time.

정하며, 사용조건의 압력은 정격 토출 압력의 60%이며, 가속조건의 압력은 정격 토출 압력의 90%로 하여 가속수명시험을 실시한다. 압력 가속인자에 대한 가속지수 m은 Academia Book International을 참고하여 8로 정한다[4, 5].

$$AF = \left(\frac{P_{test}}{P_{field}}\right)^m = \left(\frac{0.9P_{\max}}{0.6P_{\max}}\right)^{8.0} = 25.63 \quad (2)$$

여기에서 AF : 가속 계수
P_{test} : 가속 조건의 압력
P_{field} : 사용 조건의 압력
$P_{\max}$: 정격 토출 압력
m : 가속지수(m = 8.0)

마지막으로, 식 (3)에 의하여 슬러리 펌프의 가속수명시험 시간(t_{na})을 산출하면 약 800시간이 된다.

$$t_{na} = \frac{t_n}{AF} = \frac{20081}{25.63} = 783.50 \fallingdotseq 800\text{시간} \quad (3)$$

4. 신뢰성 개선

4.1 임펠러, 라이너 설계 변경

임펠러 베인 수를 8개에서 3개로 줄이고 형상을 달리하여 기존보다 적은 유량일 때 최고 효율시점이 나타나도록 설계했고 최소·최대 유량의 양정차이가 커서 추후 설치 시 배관 양정이 맞지 않을 때 토출밸브 조작만으로 유량과 양정 조절을 쉽게 할 수 있도록 설계했다.

기존의 임펠러는 나사부분에 SS400재질의 철심을 넣어 추후 가공성을 좋게 만들었었는데 이로 인해 철심과 주물이 만나는 부분에 두 재질 간 열팽창 계수가 달라 주조 후 식을 때 수축율 차이로 인해 크랙 발생 빈도가 높았으나 이를 개선하여 철심을 없애고 주조 후 소둔처리를 거쳐 경도를 낮춘 뒤 나사가공을 하고 마지막 경도 열처리를 하도록 공정을 변화시켜 더 이상 크랙은 볼 수가 없었다. 게다가 임펠러 외경을 가공을 하지 않도록 주조방안을 계획하여 제작시간을

old type - 8VANE　　new type - 3VANE

Fig. 4 Design changes in the number of impeller vanes

old type　　new type

Fig. 5 Design changes of the impeller screw

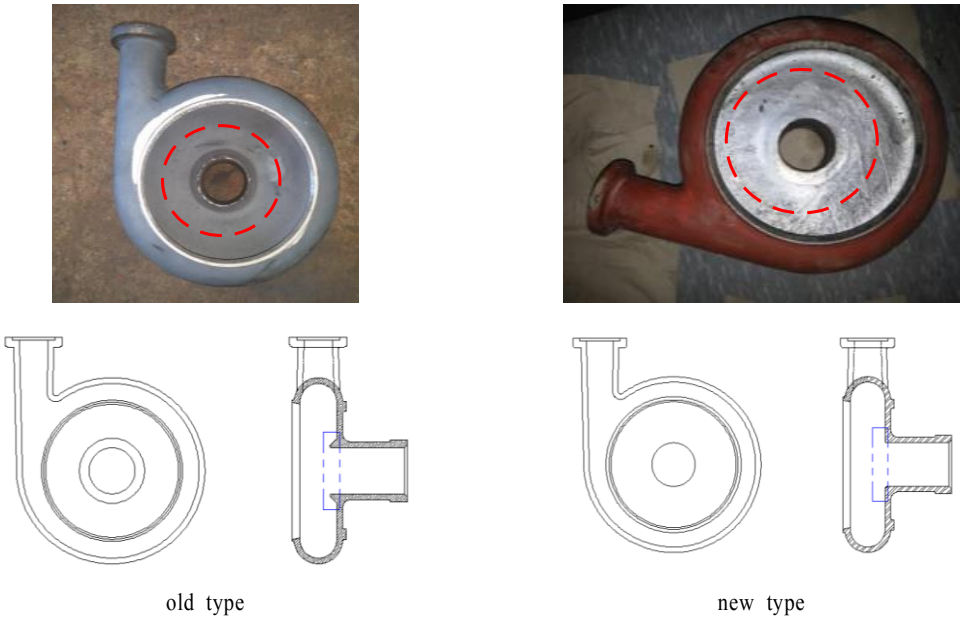


Fig. 6 Gap adjustment of impeller and liner

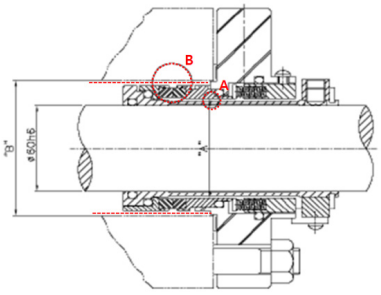
줄여 공정개선을 하였다.

임펠러 베인 설계개선과 라이너와 임펠러가 닿는 면을 일정하게 하였다. 이는 라이너와 임펠러의 유격을 최소화(0.4mm)하여 효율을 높이기 위함이다.

4.2 메커니컬 씰 구조개선

고속회전에 대한 메커니컬 씰의 보완점 발생 등으로 인한 슬리브와의 간섭으로 누출이 발생되고 씰 플레이트 공간의 협소로 인해 슬러리 유입 후 재 배출되

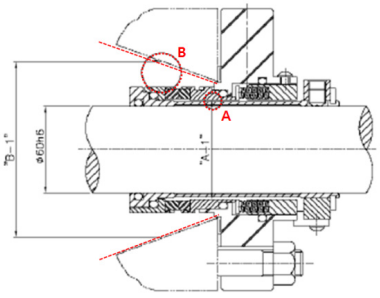
old



1. A : Seal Ring Dia. : ∅63.5
   Sleeve Dia. : ∅63
   Clearance : 0.5mm

2. B : Stuffing Box & Seal
   Clearance : 0.2mm

new



1. A : Seal Ring Dia. : ∅64.5
   Sleeve Dia. : ∅63
   Clearance : 1.5mm

2. B : Stuffing Box & Seal
   Taper : 20°

Fig. 7 Structural Improvement of the mechanical seal

지 않아 오링의 미끄러짐을 방해하여 씰 표면 누출에 영향을 준다. 운전 상 여러 가지 씰 누출의 원인이 발생하더라도 최소한의 영향을 주기위해 <Fig. 7>의 A-1 부분의 공간을 최대한 확보 하였다. 또한 슬러리 펌프 특성 상 점성 또는 이물질 등의 슬러리를 이송하기 때문에 메커니컬 씰의 최소한의 영향을 주도록 설계함으로써 슬러리의 유입 및 배출이 원활하도록 메커니컬 씰 플레이트 내의 공간을 최대화 하였다.

5. 신뢰성 시험장비 구성 및 시험평가

5.1 시험장비

<Fig. 8>은 슬러리 펌프의 성능시험 및 수명시험을 수행하는 시험장비이다. 본 시험장비는 현장 작동조건을 최대한 반영하여 수명시험을 동시에 2대를 진행할 수 있도록 구성하였으며, 성능시험은 별도로 진행할 수 있도록 하였다. 또한 압력조절밸브를 설치하여 자동으로 압력조절을 할 수 있도록 제작하였다. 또한 실제 현장 작동조건을 모사하기 위해 화력발전소에서 운용중은 슬러리가 포함된 유체를 수급하여 물탱크에 저장 후 시험을 진행하였다. 슬러리가 포함된 유체에 대한 구성성분은 <Table 4>와 같다.

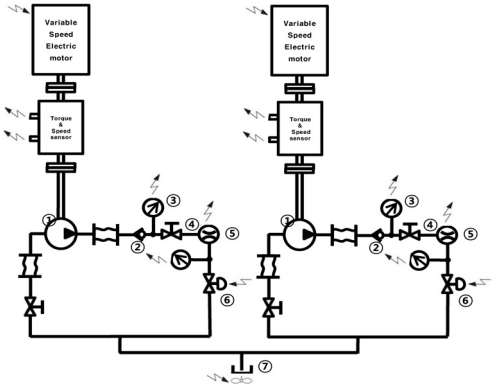
5.2 신뢰성 평가 결과분석

본 연구에서는 화력발전소 탈황설비용 슬러리 펌프의 발생 가능한 고장모드를 분석하고, 현장작동조

Table 4 Constituents of the slurry fluid

working fluid	PH	PH(5.2~5.8)
	slurry	26~30%
	chlorine	under 20,000 ppm

photograph



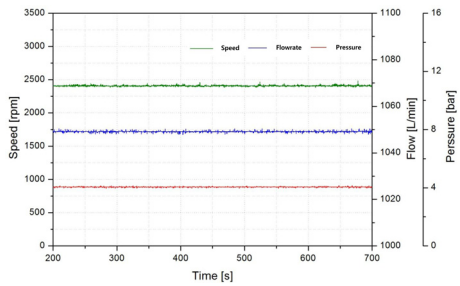
① test pump
② check v/v
③ pressure gauge
④ ball v/v
⑤ flow sensor
⑥ pressure v/v
⑦ mixing motor

circuit

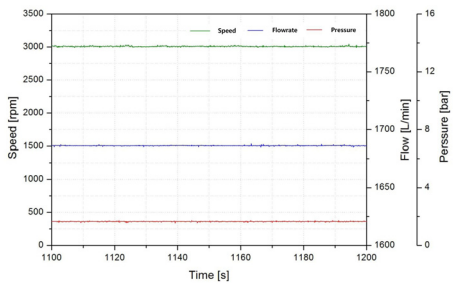
Fig. 8 Overall performance and life test equipment

Table 5 Test and evaluation summary

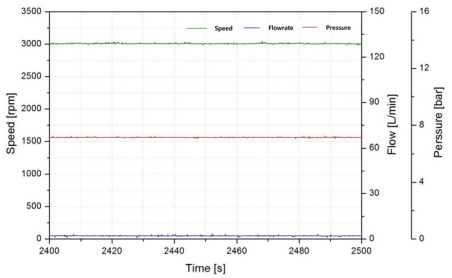
classification		test result	
		sample 1	sample 2
rated flow test	before life	1052 L/min (95.63% of rated flow)	1055 L/min (95.90% of rated flow)
	after life	1048 L/min (95.27% of rated flow)	1049 L/min (95.36% of rated flow)
max. flow test	before life	1692 L/min(96.7%)	1690 L/min(96.5%)
	after life	1685 L/min(96.2%)	1686 L/min(96.3%)
max. lift test	before life	7.3 bar(≒73m)	7.2 bar(≒72m)
	after life	7.2 bar(≒72m)	7.1 bar(≒71m)
efficiency test	before life	max. eff. 65.8%	max. eff. 65.7%
	half life	max. eff. 65.5%	max. eff. 65.6%
	after life	max. eff. 65.3%	max. eff. 65.2%
life test		no failure	



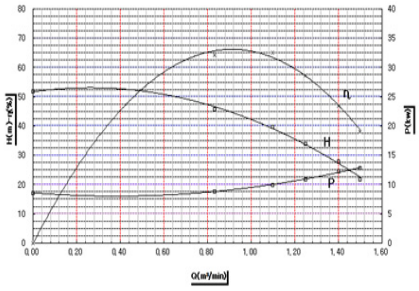
rated flow test



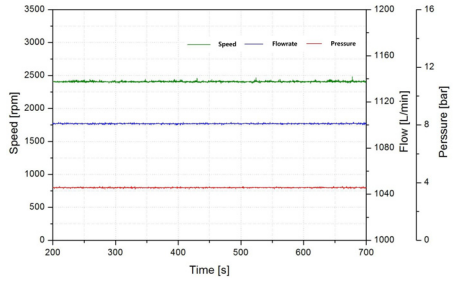
max. flow test



max. lift test



efficiency test



life test

Fig. 9 After life test performance test results

건과 고장메커니즘을 통하여 주요 영향 인자를 도출하였다. 또한 이를 바탕으로 종합 성능 시험 항목 및 수명 시험 항목으로 정하고 시험 중 발생된 고장을 분석하여 개선 활동을 통해 제품 설계 및 제작에 반영함으로써 제품의 신뢰성을 향상시키고 D/B를 확보하였다. 실제 현장 작동 조건에서의 고장현상을 조사하고 분석하여 FMMA, FMECA, QFD 등과 같은 단계를 거쳐 시험항목을 결정하였고 시제품에 대한 초기성능 시험과 분석된 고장원인과 성능향상을 위해 개선방안을 반영하여 기존 8베인에서 3베인으로 설계변경을 하였다. 이것은 임펠러 베인수를 8개에서 3개로 줄이고 형상을 달리하여 기존보다 적은 유량일 때 최고 효율시점이 나타나도록 설계했고 최소・최대 유량의 양정차이가 커서 추후 설치 시 배관 양정이 맞지 않을 때 토출밸브 조작만으로 유량과 양정 조절을 쉽게 할 수 있도록 설계하였다. 또한 라이너와 임펠러의 유격을 0.4mm로 개선하여 펌프 효율을 높였다. 유격은 임펠러 베인길이의 0.002배로 새로이 설계한 임펠러의 베인길이가 약 176.6mm이므로 유격을 0.35mm 즉 0.4mm로 개선을 한 것이다. 이를 위해 라이너가 임펠러와 밀착 될 수 있도록 라이너의 안쪽에 튀어나와 있는 형상을 없앴다. 신뢰성 시험 항목으로서는 정격토출양정-토출유량시험, 최대 토출 유량 시험, 최대 토출 양정 시험, 효율 시험, 외부 누설 시험, 가속수명시험을 수행하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 화력발전소 탈황설비용 슬러리 펌프에 대한 주요고장, 품질기능 등의 분석에 의하여 시험평가기준을 개발하고 사용자 요구사항을 반영한 신뢰성 평가를 통하여 제품의 신뢰성을 확보하는 전반적인 방법 및 절차를 제안하였다. 시험평가기준은 시험방법 및 평가기준이 정립된 성능에 관련된 4개의 시험항목과 1개의 수명시험으로 구성되어있다. 수명시험에서는 신뢰성 목표로부터 산출된 무고장 시험시간이 너무 길어서 이를 단축시키기 위하여 역승모델을 적용하여 시험시간을 800시간으로 단축시켰다. 현장고장 및 시험평가를 통하여 임펠러 베인 수를 8개에서 3개로 줄이고 베인의 형상을 개선하고 슬러리 펌프 특성 상 점성 또는 이물질 등의 슬러리를 이송하기 때문에 슬러리의 유입 및 배출이 원활하도록 메커니컬 씰 플레이트 내의 공간을 확보함으로써 신뢰성을 향상시켰다. 개선된 시료들은 성능시험 항목들에 대하여 평가기준을 만족하고 있으며 수명시험 후에도 열화현상이 거의 없음이 시험결과로부터 확인되었다. 따라서, 2개의 시료 모두 성능시험 및 수명시험을 무고장으로 완료함으로써 신뢰수준 70%에서 B_{10} 보증수명 10,000시간을 확보하였다.

References

[1] Kim, M. T., Jung, J. S., Jang, D. S., Kim, Y. H. and Park, H. W. (2002). “Development of slurry pumps for flue gas desulfurization system”. Journal of Korean Society for Materials and destruction department, pp. 236-241.

[2] Choi, C. R. (2007). “Numerical Analysis on the Flue Gas Flow and Slurry Behavior in the Absorber of a Flue Gas Desulphurization (FGD) System”. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, Vol. 23, No. 4, pp. 478-486.

[3] “Weibull Database”. Barringer & Associates, Inc.

[4] Jaroslav, I. and Monika, I. S. (2001). “Hydrostatic Pumps and Motors”. Academia Book International.

[5] Jones, T. L. (2007), “Handbook of reliability prediction procedures for mechanical equipment”. NSWC-07, pp. 17-8.