신뢰성응용연구
제14권, 제4호. pp.236-242, 2014

영구자석 커플링의 신뢰성 향상

정 동 수†

한국기계연구원 신뢰성평가센터

Reliability Evaluation of a Permanent Magnetic Coupling

Dong Soo Jung†

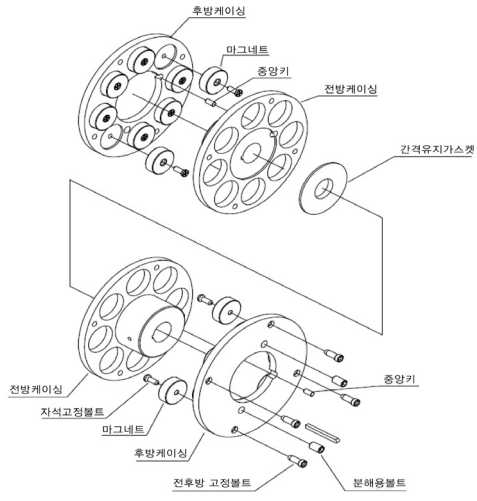
Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery & Materials

Since permanent magnet coupling transfers power by magnetic force without contact, it has little shock, vibration, noise. In case of overload, it protects a pump or a motor which is relatively important by slipping internally. In this study, failure analysis and test evaluation on the permanent magnet coupling 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 plan has been presented. Finally, reliability improvement is established by analysis of the test results of before and after acceleration test.

Keywords: Permanent Magnet, Coupling, Reliability, Acceleration Test, Qualification Life

1. 서 론

영구자석 커플링은 접촉하지 않고 자력으로 동력을 전달하기 때문에 충격, 진동, 소음이 거의 없고 연결되는 축들의 조립 공차가 어느 정도 허용되므로 기계장비에 적용이 확대되고 있다. 영구자석 커플링은 비접촉식이기 때문에 기존의 체결방식의 커플링보다 내구수명이 우수하고 교체비용에 대한 절감효과가 매우 크다. 또한 예측하지 못한 갑작스런 과부하가 발생되면 커플링 자체에서 슬립을 일으켜 커플링의 양단에 위치한 펌프나 전기모터를 보호하기도 한다. <그림 1>은 후방 케이싱, 영구자석, 전방 케이싱으로 구성된 동일한 구조의 두 개의 커플러들이 간격유지 가스켓에 의하여 일정한 간격을 유지하여 결합되는 영구자석 커플링의 전개도를 보여주고 있다. 영구자석 커플링은 구동축과 종동축에 연결된 부품들의 고장과 수명에 영향을 미치기 때문에 부품들을 포함하는 기계시스템의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 자신의 신뢰성 확보가 선행되어야 한다. 신뢰성은 연구개발이 진행되고 있는 시작품이 아닌 실차에 적용되는 상용화 제품을 시험평가하며 사용자의 요구조건들을 반영하고 있다, 따라서, 공급자와 수요자의 절충된 판정기준이 제시되고 있어 국내외 규격 또는 사내규격들과 차별화되고 있다. 신뢰성 시험규격은 제품의 기능과 성능에 따라 시험방법과 판정기준이 다를 수 있기 때문에 커플링의 종류에 따라 다양하게 개발되고 있다. 상대적으로 널리 보급된 디스크 커플링, 유체 커플링 등에 대한 신뢰성 시험규격은 개발되어 있지만 영구자석 커플링에 대한 시험규격은 최근에 수요가 급증함에 따라 필요성이 부각되고 있다.



〈그림 1〉 영구자석 커플링의 전개도

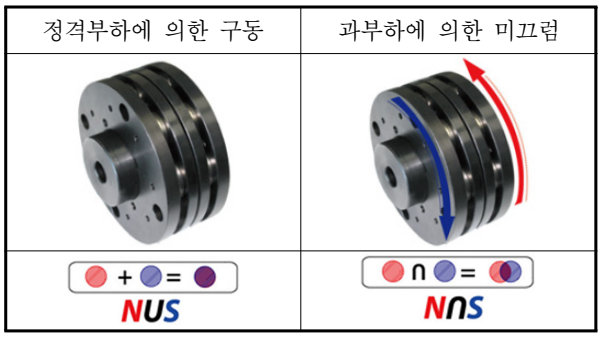
† jds667@kimm.re.kr
2014년 9월 13일 접수; 2014년 11월 8일 수정본 접수; 2014년 11월 15일 게재 확정.

본 연구에서는 영구자석 커플링에 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 제품의 신뢰성을 입증한다.

2. 영구자석 커플링의 작동원리 및 고장분석

2.1 작동원리

영구자석 커플링은 구동축에 연결되는 제 1 커플러와 종동축에 연결되는 제 2 커플러에 존재하는 전방 케이싱들이 서로 영구자석으로 결합되는 구조이다. 각 커플러들의 전방 케이싱 몸체에 자석이 설치되는 구멍이 다수 개 형성되어 있고 그 구멍으로 자석이 설치되어 있는 후방 케이싱이 체결나사로 결합되어 있다. 제 1 커플러의 영구자석은 N, S순서로 배치되며 제 2 커플러의 영구자석은 제 1 커플러의 영구자석에 대응되도록 S, N순서로 배치된다. <그림 2>와 같이 정격부하 이하에서는 상대극인 N극과 S극에 의하여 두 개의 커플러가 밀착되어 정상상태의 동력이 전달된다. 그러나 자기력 이상의 과부하가 발생되어 슬립이 일어나면 동일한 자극에 놓이게 되어 서로 밀어내는 힘에 의하여 두 개의 커플러가 분리되어 동력이 전달되지 않게 된다. 이때, N극과 S극이 반복적으로 교차되면서 동일한 자극일 때는 서로 밀어내고 다른 자극일 때는 당기면서 미끄러짐 현상이 지속적으로 발생된다.



〈그림 2〉 영구자석 배치

2.2 주요고장

영구자석 커플링은 주로 급수용 원심펌프에 많이 사용된다. 이러한 원심펌프는 주로 주거용 건물, 호텔, 학교 등의 지하에 많이 설치하며 기계실에 위치하고 있다. 지하가 없는 건물에서는 물탱크의 위치에 따라서 옥상에 설치되는 경우도 있다. 동력이 전달되는 과정에서 영구자석 커플링에 불규칙적인 과부하가 생성되면 커플링의 슬립현상으로 충격과 진동이 발생되며 이로 인하여 영구자석을 체결하고 있는 볼트는 마열과 유격이 야기된다. 그리고 영구자석들 간의 자력이 불균형하게 작용하여 전방 케이싱과 후방 케이싱의 간격을 유지하지못하고 영구자석들이 진동에 의한 피로누적으로 파손되는 현상이 발생한다.

2.3 고장모드 분석

<표 1>와 같이 영구자석 커플링의 신뢰성 향상을 위한 평가에 앞서, 제품의 고장 모드를 조사하고 잠재적인 고장을 확인하였다. 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.

〈표 1〉 영구자석 커플링의 고장모드

주요 부품	기능	고장 모드
케이싱	동력전달	피로 파괴
		변형
		부식
볼트	고정	피로 파괴
		구멍 마열
		구멍 부식
영구자석	변위 미세조정	균열
		변형
		부식

2.4 품질기능 분석

<표 2>는 주요 부품들의 각 고장모드들에 대하여 사용자들이 필요로 하고 중요시 하는 요구조건들을 반영한 1단계 품질기능 전개를 보여주고 있다. 평가된 중요도 점수로부터 고장모드들의 우선순위와 심각성을 판단할 수 있다(여기서, ◎ : 5, ● : 3, ▲ : 1). <표 3>은 주요 부품의 고장모드와 시험항목들 간의 관계를 정리한 2단계 품질기능 전개의 결과를 보여주고 있다. 2단계 품질기능 전개는 시험항목들을 선정하고 시험항목들의 중요성을 판단하기 위하여 수행된다. 시험 유효성 점수로 판단할 때 수명시험이 가장 중요하다.

〈표 2〉 영구자석 커플링의 1단계 품질기능 전개

주요 구성품	케이싱			볼트			영구자석		
고장 모드 / 요구사항	피로 파괴	변형	부식	피로 파괴	구멍 마열	구멍 부식	균열	변형	부식
전달 토크	●	▲		◎	◎		◎	●	
고속 회전	●	▲		◎	◎		▲	●	
효율	●	●		●	◎		▲		
부하 변위	▲	▲		▲	▲		▲		
조립 변위	●	●		●	●				
정비	▲	●	●	●	●	▲			●
수명	◎	◎	◎	◎	◎	◎	●	◎	◎
중요도 점수	19	17	8	25	27	6	11	11	8

〈표 3〉 영구자석 커플링의 2단계 품질기능 전개

주요 부품	고장 모드	중요도 점수	시험 항목				
			전달 토크 시험	평행 변위 시험	각도 변위 시험	축 변위 시험	수명 시험
케이싱	피로 파괴	19	◎	▲	◎	●	◎
	변형	17	◎	●		●	◎
	부식	8					◎
볼트	피로 파괴	25	●	▲	●		◎
	구멍 마열	27	◎	●	●	▲	◎
	구멍 부식	6					◎
영구자석	균열	11	◎	●	●		◎
	변형	11	◎	●	●	▲	●
	부식	8					◎
유효성 점수			2	4	3	5	1
및 순위			500	242	317	146	638

3. 시험평가기준 개발

3.1 시험평가기준

영구자석 커플링의 시험방법과 평가기준은 2단계 품질기능 전개로부터 선정된 시험항목들에 의하여<표 4>에 정리하였다. 수명시험을 제외한4가지 성능시험 항목들은 수명시험 전에 먼저 수행되며 수명시험이 완료된 후에도 실시된다. 성능시험 항목들은 수명시험이 완료된 후에도 다소 열화현상이 발생하더라도 각각의 평가기준들을 만족하여야 한다.

3.2 가속 수명시험 시간

3.2.1 무고장 시험시간

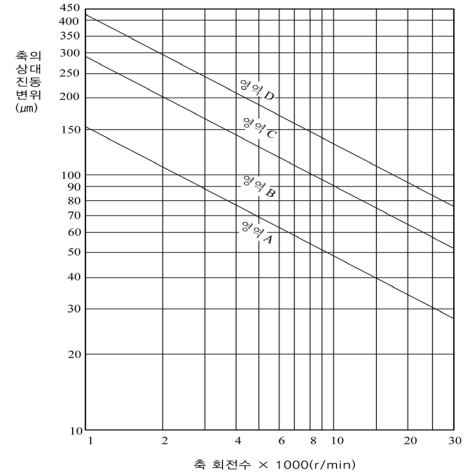
연 평균 근로일250일을 기준으로 하고 영구자석 커플링이 비 접촉임을 감안하여 하루 24시간을 가동한다고 가정하면 5년 사용수명이 3.0×10^4시간이 된다. 이를 근거로 생산업체와 수요업체의 절충된 의견을 수렴하여 영구자석 커플링은 B_{10} 보증수명이 3.0×10^4시간으로 설정되었다. 또한 커플링의 주고장 모드는 커플링의 구동축과 종동축의 슬립 또는 어긋남으로 인한 반복부하로 발생되는 피로와 마열이므로 와이블 분포의 형상모수(β)는 Barringer and Associates의 "Weibull Database"에서 언급된 커플링의 형상모수 2.0을 사용한다. 이러한 형상모수는 사용조건, 제품구조, 설계용량 등에 따라 달라질 수도 있으므로 유효성 검증에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 다음의 신뢰성 목표를 식(1)에 적용하면 무고장 시험시간(t_n)은 약 50,716시간이 된다.

- 수명 분포 : 형상모수(β)가 2.0인 와이블(Weibull) 분포
- 보증 수명 : B_{10} 수명 3.0×10^4시간
- 신뢰 수준 : 70%
- 시 료 수 : 4개
- 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

〈표 4〉 영구자석 커플링의 시험방법 및 평가기준

시험항목	시험방법	평가기준
전달토크	정격 속도를 설정한 후 10분간 정격 토크를 인가한다.	진동 레벨이 B영역 이내이어야 한다. 
평행변위	최대 허용 평행 변위를 부여하고 정격 속도의50%를 설정한 후 10분간 정격토크를 인가한다.	
각도변위	최대 허용 각도 변위를 부여하고 정격 속도의50%를 설정한 후 10분간 정격토크를 인가한다.	
축 변위	최대 허용 축 변위를 부여하고 정격 속도의 50%를 설정한 후 10분간 정격토크를 인가한다.	
수명시험	정격 속도를 설정하고 정격 토크의 80%를 인가하면서 750시간 동안 가속수명시험을 수행한다.	4개의 시료가 모두 750시간 동안 고장이 없어야 하며 성능시험의 평가기준을 만족하여야 한다.

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. 영구자석 커플링의 주 고장 모드는 피로에 의한 파손이므로 가속모델을 역승모델로 선정되었으며 피로에 영향을 주는 주요 스트레스는 토크로 선정되었다. 현장 조건에서 사용되는 일반적인 토크는 정격토크의 50% 정도이므로 가속시험에서는 이보다 더 가혹한 정격토크의 80%를 인가한다.

영구자석 커플링의 가속계수(AF)는 식 (2)에 의하면 약 68.7로 산출된다. 역승모델의 가속지수는 Wayne Nelson의 "Accelerated Testing"에서 언급된 커플링의 가속지수 9.0을 사용한다.

$$AF = \left(\frac{T_{test}}{T_{field}}\right)^m = \left(\frac{0.8\,T_{\max}}{0.5\,T_{\max}}\right)^m \qquad (2)$$

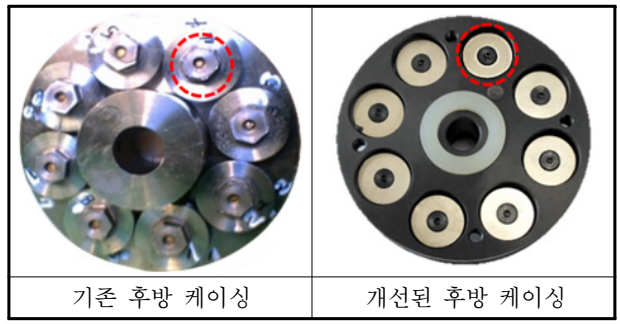
여기서 AF : 가속 계수, T_{test} : 가속 조건 토크
T_{field} : 사용 조건 토크, $T_{\max}$: 정격 토크
m : 가속 지수

영구자석 커플링의 무고장 가속수명 시험시간(t_{na})은 상기에서 얻어진 무고장 시험시간과 가속계수로부터 식(3)에 의하여 약 750시간이 된다.

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

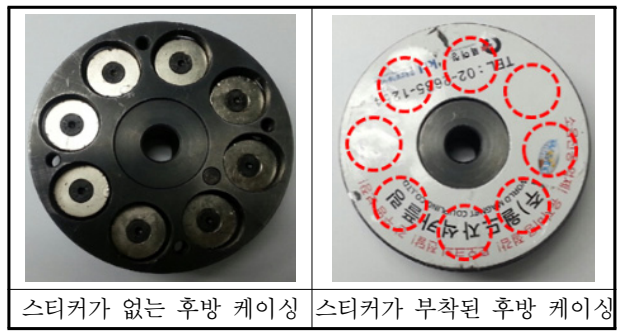
4. 신뢰성 개선

<그림 3>은 개선 전과 후의 후방 케이싱 시작품을 보여주고 있다. 기존 제품은 마그네트 위에 육각수나사로 자동 고정하는 방식이었으나 육각수나사의 비용이 고가인 데다 외형 보수가 큰 제품은 가공하는 데 어려움이 있다. 또한, 노출 요소가 많은 만큼 위험요소가 많으므로 이에 개선 제품은 이동식 볼트를 사용하여 원가를 절감하였고 위험요소를 축소했다. 또한 기존 제품의 재질은 SC 450으로 착색이 안 된 상태였으나 이럴 경우, 단기간에 녹이 슬고 흠집이 생긴다. 이와 같은 단점을 보완시키기 위해 개선 제품은 흑색으로 착색시켜 녹이 쓸거나 흠집이 생기는 부분을 방지하였다. <그림 4>는 수명시험이 약 25% 정도 진행된 상태에서 영구자석 부위에 철가루 등의 이물질이 확인되어 이를 해소하기 위하여 후방 케이싱에 스티커를 붙인 시작품을 보여주고 있다. 스티커는 자력에는 영향을 미치지 않고 영구자석에 이물질 부착을 방지하였다. 스티커를 부착한 결과 이물질 부착이 약 80% 정도 감소하였고 미세하게 남아있는 이물질 등은 회전력에 의해 이탈되었다.



기존 후방 케이싱 | 개선된 후방 케이싱

<그림 3> 개선 전・후의 후방 케이싱 시작품



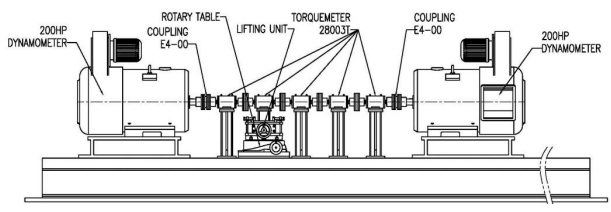
스티커가 없는 후방 케이싱 | 스티커가 부착된 후방 케이싱

<그림 4> 후방 케이싱에 부착된 스티커

5. 신뢰성 시험장비 구성 및 시험평가

5.1 시험장비

<그림 5>는 영구자석 커플링의 성능시험 및 수명시험을 수행하는 시험장비이다. 성능시험은 1개의 샘플씩 진행되며 수명시험은 4개의 샘플이 동시에 수행된다. 본 시험장비는 현장 작동조건을 최대한 반영하였으며 평행변위, 각도변위, 축변위가 한 장비에서 구현이 가능하도록 제작되었다. 그리고 수동운전에 의하여 시험장비 Calibration이 가능하며 자동운전에 의하여 시험장비 제어 및 실시간 데이터를 취득하도록 LabView 3.0 프로그램에 의하여 운영된다.



<그림 5> 종합성능 및 수명시험장비

5.2 신뢰성 평가 결과분석

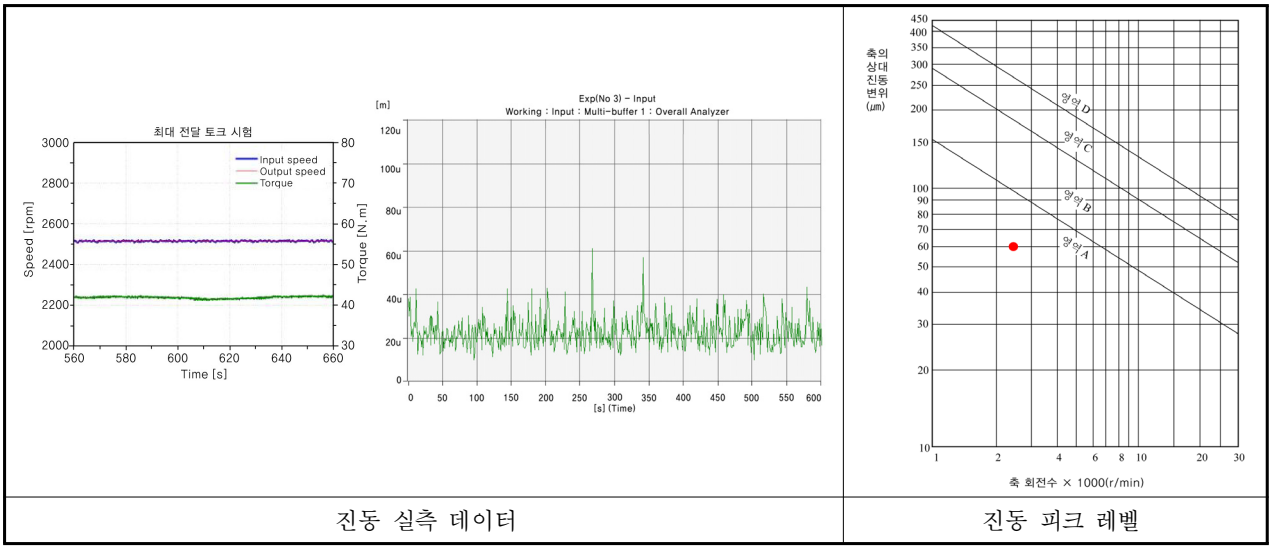
영구자석 커플링의 신뢰성을 확보하기 위하여<표 5>와 같이 4개의 시료들에 대하여 성능시험 및 수명시험을 수행하였다. 영구자석 커플링의 정격속도는 2,500 rpm이며 정격토크는 41

Nm이다. 4개의 시료들은 수명시험 전에 성능시험이 수행되었으며 성능열화를 확인하기 위하여 수명시험이 완료된 후에도 성능시험이 수행되었다. 4개의 시료들은 모든 시험항목들에 대하여 매우 안정적으로 진동레벨 A 영역이내에 있으며 수명시험이 완료된 후에도 열화현상이 아주 적었다. 이는 당초 진동레벨 B 영역보다 훨씬 양호하므로 기대수명이 보증수명보다 클 수 있다는 것을 미루어 짐작할 수 있다.

<그림 6>~<그림 9>은 시료 1에 대하여 수명시험이 완료된 후에 수행된 성능시험(전달 토크, 평행 변위, 각도 변위, 축 변위)의 결과들을 보여주고 있다. 각 시험결과에서 좌측 그래프를 진동 실측 데이터를 나타내고 있으며 우측에 있는 그래프는 실측 데이터의 피크 값을 표현하고 있다. 이러한 피크 값들은 <표 5>에 기록된다. <그림 7>의 평행 변위의 진동레벨은 인가 속도가 정격속도의 50%인데도 불구하고 <그림 6>의 전달 토크의 진동 레벨보다 크다. 이상변위 중에서 <그림 7>의 평행변위가 <그림 8>의 각도 변위와 <그림 9>의 축 변위보다 진동레벨에 보다 큰 영향을 미치고 있음을 보여주고 있다.

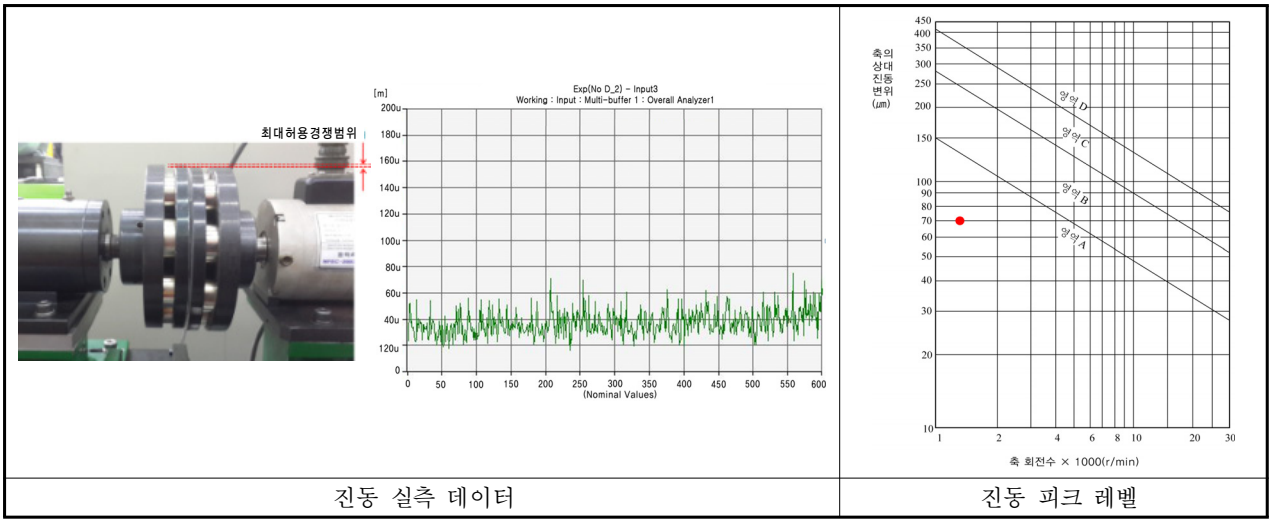
〈표 5〉 시험 평가 결과 요약

구 분		진동 피크 레벨 [μm]			
		시료 1	시료 2	시료 3	시료 4
전달 토크 시험	수명시험 전	60.7	60.6	60.5	60.4
	수명시험 후	61.1	61.2	60.9	61.3
평행 변위 시험	수명시험 전	72.1	72.3	72.5	72.4
	수명시험 후	72.4	72.4	72.7	72.6
각도 변위 시험	수명시험 전	64.8	64.7	64.9	65.1
	수명시험 후	65.3	65.8	65.2	65.4
축 변위 시험	수명시험 전	63.1	62.8	63.2	63.3
	수명시험 후	63.5	63.3	63.5	63.8



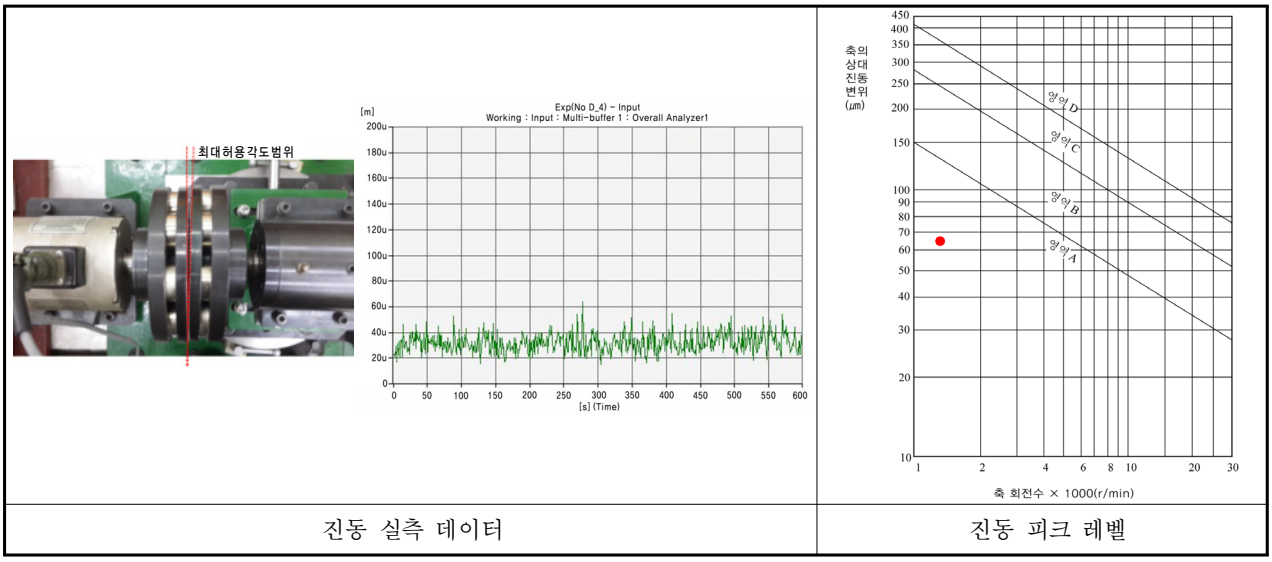
진동 실측 데이터 | 진동 피크 레벨

〈그림 6〉 전달 토크 시험결과



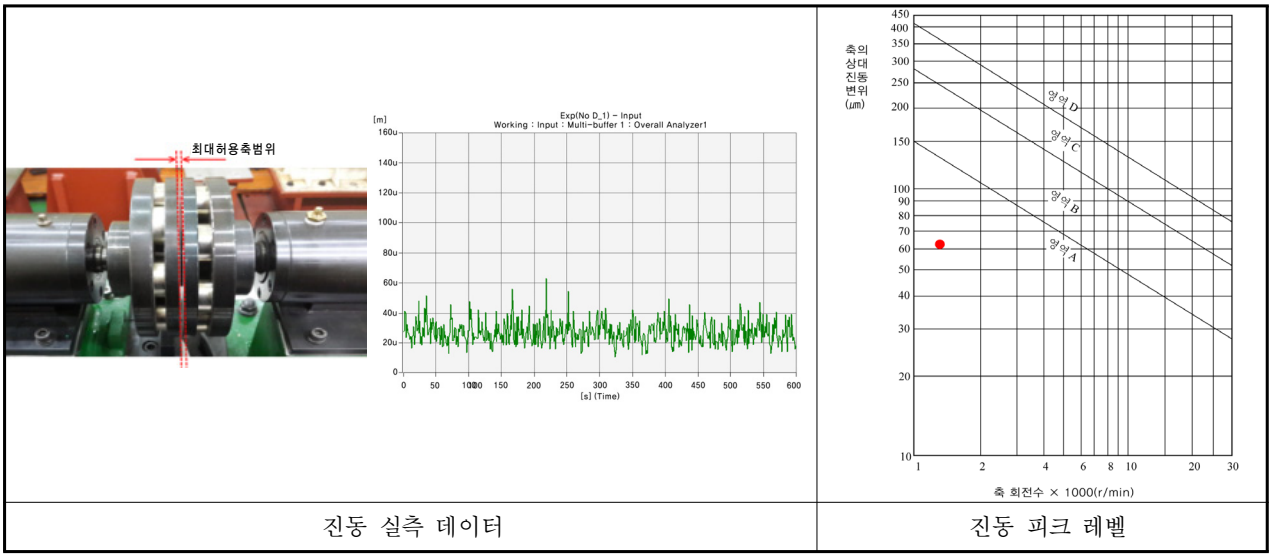
진동 실측 데이터 | 진동 피크 레벨

〈그림 7〉 평행 변위 시험결과



진동 실측 데이터 | 진동 피크 레벨

〈그림 8〉 각도 변위 시험결과



진동 실측 데이터 | 진동 피크 레벨

〈그림 9〉 축 변위 시험결과

6. 결 론

영구자석 커플링에 대한 작동원리, 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 관련된4개의 시험항목과 1개의 수명시험으로 구성되어있다. 수명시험에서는 신뢰성 목표로부터 산출된 무고장 시험시간이 너무 길어서 이를 단축시키기 위하여 역승모델을 적용하여 시험시간을 750시간으로 단축시켰다. 현장고장 및 시험평가를 통하여 영구자석을 고정하는 볼트의 체결방식을 개선하고 후방 케이싱의 표면에 이물질 방지용 스티커 부착함으로써 원가절감 및 신뢰성을 향상시켰다. 개선된 시료들은 성능시험 항목들에 대하여 진동레벨A의 영역이내에 위치함으로 매우 안정적이며 수명시험 후에도 열화현상이 거의 없음이 시험결과로부터 확인되었다. 따라서, 4개의 시료 모두 성능시험 및 수명시험을 무고장으로 완료함으로써 신뢰수준70%에서 B_{10}보증수명 30, 000시간을 확보하였다.

참고문헌

[1] Hobbs, G. K. (2000), *Accelerated Reliability Engineering HALT and HASS*, John Wiley & Sons Ltd.

[2] Jhon, W. Evans and Jillian Y. Evans (2001), *Product Integrity and Reliability in Design*, Springer.

[3] Kim, S. K. and Lee, J. M. (1995), Dynamic Analysis of Spindle

System with Magnetic Coupling(Ⅱ), *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 12, No. 7, pp. 107-113.

[4] Kim, S. K., Lee, S. J., and Lee, J. M. (1994), Dynamic Analysis of Spindle System with Magnetic Coupling (Ⅰ), *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 99-105.

[5] Wayne Nelson (1985), Weibull Analysis of Reliability Data with Few or No Failures, *Journal of Quality Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 140-146.

[6] Wayne Nelson (1990), *Accelerated Testing; Statistical models, test plans, and data analysis*, Wiley.

[7] Weibull Database, Barringer & Associates, Inc.