

# 철강회사에서 기계 고장 진단 사례연구

홍태용\* · 박수홍\*\*

A Case Study of the Breakdown Evaluation to the Machine at the Steel Company

Tae-Yong Hong\* · Soo-Hong Park\*\*

## 요약

회전기계에서는 예후 신호 없이 고장되는 경우는 거의 없으며, 따라서 설비고장은 신호를 감시함으로써 고장을 예측, 회피할 수 있다. 본 연구에서는 회전기계에서 발생할 수 있는 고장에 대한 안전진단에 대한 사례 연구이다. 각각의 회전기계에 대하여 진동분석을 통한 고장발생유무를 각종의 측정 데이터를 이용하여 분석하여 향후에 발생할 수 있는 고장에 대한 안전진단에 대한 방법을 연구하였다. 결과에서 보는 바와 같이 제안된 측정방법으로 안정한 상태 감시 및 진단 결과를 보여준다.

## ABSTRACT

Rotating equipment seldom fails without notice, so breakdowns can usually be predicted and avoided by watching for signs of failure. In this paper, We study case for rotary machine with a breakdown analysis. Also We analyze the solution of the safety and the future breakdown of the each rotary machine through vibration analysis using measurement data. The implementation of the measurement and the test results are discussed. The result with suggested method showed netter stable Condition Monitoring & Diagnostics.

## 키워드

Vibration Analysis, Rotary Machine, Plant Maintenance, Predictive Maintenance  
진동분석, 회전기계, 설비진단, 설비보전, 예지보전

## 1. 서론

생산공장에서는 다수의 주요설비를 보유하고 그 보유 설비를 가동하여 각종 생산제품을 생산하고 있다. 이때 사용되는 각종 장비 중에서 고가의 회전기계들이 다수 포함되어 있고 이러한 주요 설비는 각종 고장에 대비한 지속적인 안전진단이 필요하다.

회전 장비는 예고 없이 고장을 발생하는 경우는 거의 없고, 고장징후에 대하여 여러 가지로 미리 신호를 보내주고 있다. 진동모니터링은 이러한 신호를 통하여 기계진단 기능을 가지고 생산시설 설비에 대한 이상 유무를 추적하는데 유용하다. 이러한 고장진단은 당연히 기계설비 유지에 도움이 될뿐더러 필수적인 기어, 펌프, 커플링, 컴프레서 등이 고장을 발생하기

\* (주) VMS(tyhong@vmsco.co.kr)

\*\* 교신저자 : 동서대학교 메카트로닉스공학과(shpark@dongseo.ac.kr)

접수일자 : 2014. 11. 29

심사(수정)일자 : 2015. 01. 16

게재확정일자 : 2015. 02. 09

전에 고장의 징후를 검출하고 파악하기 위한 올바른 모니터링 장비와 훈련받은 인력과 소프트웨어 패키지가 요구된다. 연구에 따르면 산업유지관련 50%이상 고장발생이후 장비수리에 소요되는 반면 장비의 고장가능성 판별과 적절한 대응에는 18%미만의 시간만을 투자되고 있다고 조사되었다. 이는 유지보수부서에서 중점적으로 기계이상 유무의 모니터링 설비를 구축할때만이 개선될 것이다. 발전형 현장 진동분석과 온라인 및 무선 진동모니터링 공정제어시스템과 통합하여 고신뢰성 생산에 필수적인 회전장비 상태 향상에 실현할 수 있다.

모든 공정설비에서 높은 생산 수준의 유지를 위해 특정 회전 장비가 연속적인 성능을 유지해야 하며, 해당 장비의 실시간 상태의 모니터링이 존재하여야만 일부 위험한 상황을 예방할 수 있다[1], [2].

이러한 회전기계에 대한 고장안전을 진단하는 방법을 설명하고 실제로 어떻게 고장진단에서의 데이터를 이용하여 그 처리방법과 미래 예측을 하는 실제적인 사례중심으로 연구하였다[3].

## II. 고장진단을 위한 측정방법

진동 분석을 통한 설비 상태 감시는 아래 그림과 같은 개념으로 측정되며 이는 주파수는 결함의 원인 요소이며 진폭은 결함 심화의 정도를 판단할 수 있다 [5].

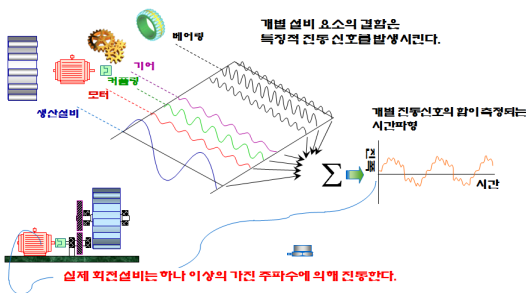


그림 1. 측정 개념도  
Fig. 1 Measurement concept

진동 모니터링 시스템은 기본적으로 변위, 속도, 가속도의 기본 원리에 의해 파악할 수 있다.

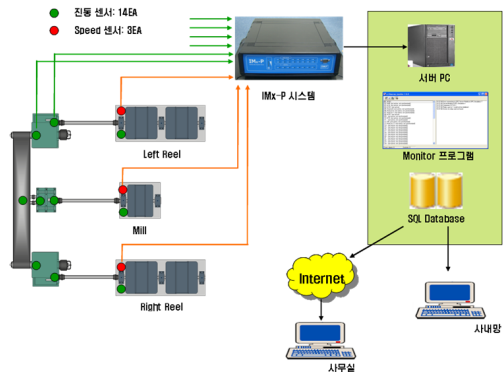


그림 2. 측정장소  
Fig. 2 Measurement point

변위는 고정된 기준(통상 베어링 하우징)에 대한 상대위치 변화로서 통상 0.025[mm]에서 수[m]단위 측정하고 저널 베어링에만 적용한다.

속도(변위 변화율)는 변위의 시간에 대한 1차 미분으로 피로 파손과 직접적인 연관이 있어 예지정비에 적합하며 불균형, 축정렬 불량, 풀림등 기계적 결함을 감지하는 일반적인 가이드라인을 제공한다.

가속도(속도 변화율)는 변위의 시간에 대한 2차 미분으로 힘과 직접적인 연관이 있고 베어링 결함, 기어치 합, 펌프 캐비테이션과 같은 고주파 특성에 민감하다

이를 회로화한 PCB를 통하여 보드를 제작하고, 센서신호를 통해 들어온 신호를 분석하였다. 또한 진동 모니터링 시스템에 사용되는 센서들은 아래의 특징들을 가지는 센서를 사용한다.

변위 센서(Non-Contact Pickup)는 상대진동 측정하고 주파대역 0[Hz]에서 1[kHz]에서 정밀하게 반응하고 변위값 직접측정하며 고주파대역에서 제한된 반응한다. 속도센서는 베어링의 하우징 또는 케이스의 진동을 측정하고 중/저 주파수 대역 10[Hz]에서 1.5[kHz]에 사용하며 거친 환경이나 강한 자기장 형성 지역에 적합하지 않기 때문에 선별적 사용한다.

가속도센서는 설치 환경에 영향을 덜 받고, 넓은 주파수 대역 0[Hz]에서 400[kHz]에 사용하고, 넓은 주파수범위에 걸쳐 연속적인 선형반응을 가지며, 고주파대역에서 민감하게 반응하고, 대부분의 휴대형 장비에 사용되며 적분해서 속도 값으로 변형한다[3], [4].

공장에서 측정하는 포인트는 철강회사에서의 밀링

머신은 좌우측 회전체에서 진동센서 14군데, 스피드센서 3군데를 측정하여 서버PC를 통하여 사무실에 있는 프로그램으로 분석을 실시하였다.

분석 보고서는 감속기 교체 전 후의 진동 데이터를 분석하여 설비의 상태 점검 및 신형 감속기의 초기 데이터 수집에 의해 작성되었다. 감속기의 데이터 수집 기간은 감속기 교체 전은 2013년 10월 10일에서 25일까지이며, 감속기 교체 후는 2014년 9월 18일에서 30일까지이다. 주요설비는 DC모터, 기어박스이고 회전속도는 0[RPM]에서 400[RPM] 정도의 가변속의 저속설비이다.

속도 진동 측정 범위는 10[Hz]에서 1[kHz]이며, 속도 진동 전체 범위는 1[mm/sec]이고, 가속도 엔빌로핑 진동 범위는 500[Hz]에서 10[kHz]까지이며, 가속도 엔빌로핑 최대 주파수는 100[Hz]이다[6], [7].

베어링에서는 베어링 형상과 운전속도에 따라 결정되는 특이한 베어링 특징 주파수가 검출되며, 이때 측정된 진동의 크기로 베어링의 상태를 알 수 있다. 진동분석기술은 베어링의 상태를 결정하고, 이들 주파수를 감지하기 위해 폭 넓게 사용되며, 손상이 발생된 베어링은 기본적으로 다음과 같은 5개의 결함 주파수를 발생한다.

베어링 내륜의 회전주파수는

$$f_r = \frac{rpm}{60} (rps) \text{ 이다.}$$

기본 열주파수(Fundamental Train Frequency : FTF), 케이지 주파수는

$$FTF = f_c = \frac{f_r}{2} \left[ 1 - \frac{BD}{PD} \cos\phi \right] [Hz] \text{ 이다.}$$

여기서 BD는 볼 직경(Ball Duameter)이며, PD는 피치 직경(Pitch Diameter)이다.

볼 자전 주파수(Ball Spin Frequency : BSF)는

$$BSF = f_s = \frac{PD}{2BD} f_r \left[ 1 - \left( \frac{BD}{PD} \right)^2 \cos\phi \right] [Hz] \text{ 이다.}$$

외륜 통과주파수(Ball Pass Frequency of Outer race : BPFO) 는

$$BPFO = f_o = N(FTF) = \frac{f_r}{2} N \left[ 1 - \frac{BD}{PD} \cos\phi \right] [Hz]$$

이다. N은 볼의 수이다.  $\phi$ 는 접촉각을 나타낸다.

내륜 통과주파수(Ball Pass Ffrequency of Inner race : BPFi)는

$$BPFO = f_o = N(f_r - FTF) = \frac{f_r}{2} N \left[ 1 + \frac{BD}{PD} \cos\phi \right] [Hz]$$

이다[8].

### III. 측정 데이터 획득 및 내용

#### 3.1 우측 휠 측정

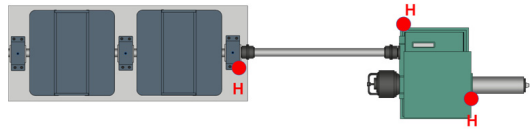


그림 3. 우측 휠 측정포인트  
Fig. 3 Measurement point of the right wheel

DC 모터(슬리브 베어링)로서 모터 회전속도: 최대 600 rpm이며, 기어박스(1단 감속기, Double 헬리컬 기어, 구름 베어링)와 진동 센서 3개, 모터 스피드 센서 1개로 구성하였다.

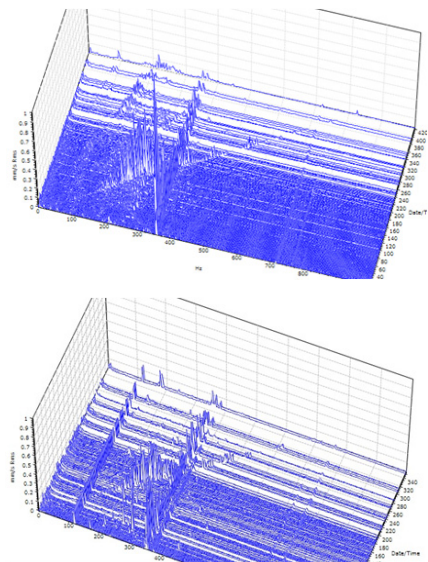


그림 4. DC모터 속도진동(교체전후)  
Fig. 4 RMS velocity overall trend

그림 4는 DC모터의 교체전후의 속도 진동을 표현한 것이다.

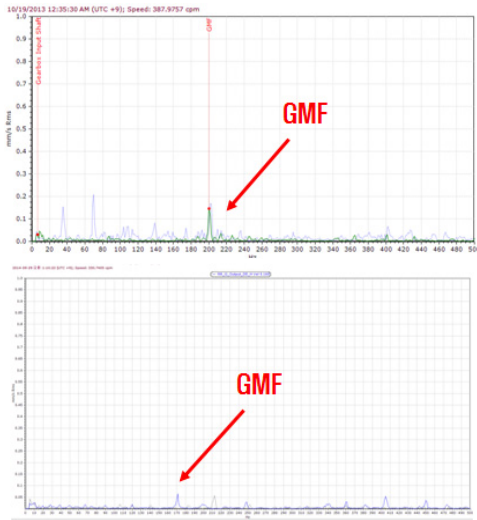


그림 5. 모터 출력축 속도 전체 추이 FFT  
Fig. 5 Motor velocity overall trend FFT

그림 5는 그림 4 모터의 파동을 측정된 데이터를 FFT(Fast Fourier Transform) 처리 한 결과로서, 모터 교체 전에는 200Hz에서 피크 치를 보인 반면, 교체 후에는 전 영역에서 거의 피크 치를 보여주지 않고 있어 사고위험이 현저히 줄어들었다고 판단된다.

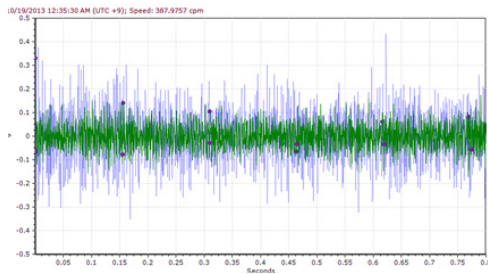


그림 6. 모터 출력축 속도 전체 추이 FFT 해석  
Fig. 6 Motor velocity overall trend FFT analysis

측정결과를 분석하면 DC 모터는 기어박스 교체 전후의 진동 값을 비교 결과 크게 변경되지 않았으며 전체적으로 진동 상태는 양호한 것으로 나타났고, 기어박스는 기어박스 신형으로의 교체 이후, 입력축과 출력축의 속도 진동이 다소 감소하였고, 특히 과거 의심되는 진동 값이 사라졌음을 알 수 있어 고장진단의 효율성을 볼 수 있었다.

표 1. 우측 휠 진동분석결과  
Table 1. Vibration analysis of the right wheel

Right Reel		교체 전	교체 후	
1	모터 회전속도	155 CPM	210 CPM	
	작업 조건	304	304	
	진동 속도	0.5	0.5	
2	감속기 입력축	387 CPM	350 CPM	
	작업 조건	304	304	
	진동 속도	0.15	0.05	
3	감속기 출력축	진동 속도	0.21	0.11

### 3.2 좌측 휠 측정

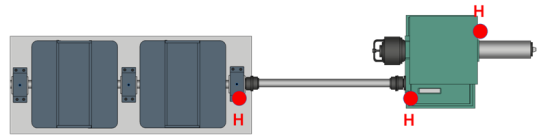
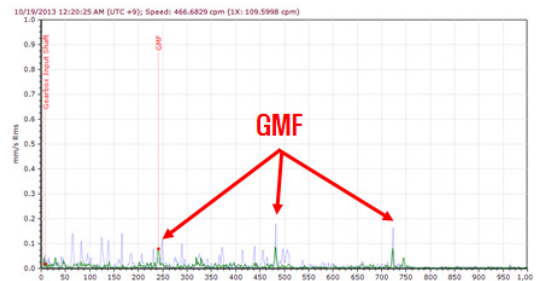


그림 7. 좌측 휠 측정포인트  
Fig. 7 Measurement point of the left wheel

DC 모터(슬리브 베어링)로서 모터 회전속도: 최대 600 rpm이며, 기어박스 (1단 감속기, Double 헬리컬 기어, 구름 베어링)와 진동 센서 3개, 모터 스피드 센서 1개로 역시 구성하였다.



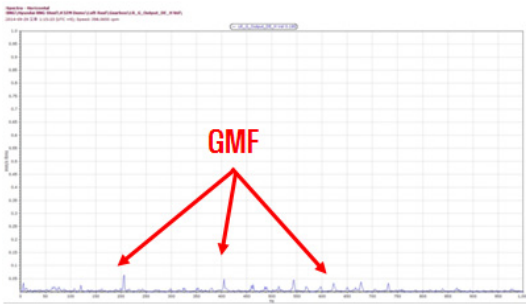


그림 8. 모터 출력축 속도 전체 추이 FFT  
Fig. 8 Motor velocity overall trend FFT

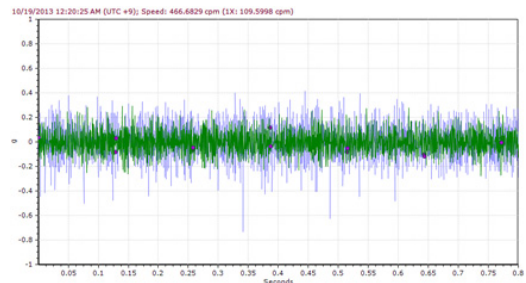


그림 9. 모터 출력축 속도 전체 추이 FFT 해석  
Fig. 9 Motor velocity overall trend FFT analysis

측정결과를 분석하면 DC 모터는 기어박스 교체 전 후의 진동 값을 비교 결과 크게 변경되지 않았으며 전체적으로 진동 상태는 양호한 것으로 나타났고, 기어박스는 기어박스 신형으로의 교체 이후, 입력축 & 출력축 속도 진동 다소 감소하여 특히 과거 GMF로 의심되는 진동값이 낮아졌다. 또한 과거의 입력축 가속도 엔빌로핑 진동은 다소 높았지만 신형 교체 이후 낮아졌다. 참고로 가속도 엔빌로핑 진동은 높은 주파수의 진동을 추출한 것으로서 국부적인 베어링 결함 혹은 조립 상태, 윤활 상태와 관련된 파라미터이다.

표 2. 좌측 휠 진동분석결과  
Table 2. Vibration analysis of the left wheel

Right Reel		교체 전	교체 후
1	모터 부하		
	모터 회전속도	134 CPM	148 CPM
	작업 조건	304	304
2	검속기 입력축		
	모터 회전속도	446 CPM	398 CPM
	작업 조건	304	304
3	검속기 출력축		
	진동속도	0.13	0.06

### 3.3 Mill 측정

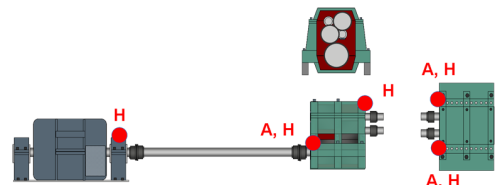


그림 10. Mill 측정포인트  
Fig. 10 Measurement point of the Mill

밀링머신의 설치 정보는 DC 모터, 기어박스, 밀 스탠드, 진동센서 8개, 그리고 모터의 속도 센서 1개로 구성된다. DC모터는 슬리브 베어링이 있으며 최대 회전속도는 700 [RPM]이다. 그리고, 기어박스는 2단 기어와 헬리컬 기어 그리고 구름 베어링으로 구성되었다.

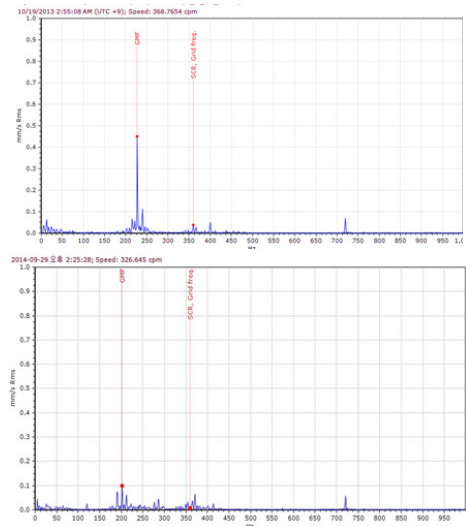


그림 11. Mill 속도 교체 전후 전체 추이 FFT  
Fig. 11 Mill velocity overall trend FFT

DC 모터는 모터진동과 피니언 스탠드에서 전달된 기어 진동이 가장 우세하게 나타나고, 전체적으로 진동 상태는 양호하다.

피니언 스탠드는 기어 맞물림 진동(GMF)이 설비 대비 높게 나타나지만, 사이드밴드 진동이 없는 것을 볼 때 치면 상태는 양호한 것으로 판단된다.

밀 스탠드는 전체적으로 진동 상태는 양호하다.

#### IV. 분석 요약 및 평가방법

##### 4.1 분석내용 요약

본 연구는 국내의 모 기업 생산설비에서 CMS (CMS : Condition Monitoring System) 설비들의 초기 상태를 점검하고자 위함이며 측정된 진동 데이터를 근거로 정리하였다..

측정한 속도 총진동 값에 대한 평가 기준은 ISO 10816-1 의 Class1 및 Class2에 해당하는 설비로 평가하였다.

해당 설비를 평가하는 것에 있어 설비의 설비정보(MDS)는 불평형 및 축정렬 불량 및 베어링 결함 주파수를 확인하는 것에 있어 중요한 부분이며 설비정보(MDS)가 없는 경우 설비에 대해 진동 분석이 어려우며, 따라서 보다 정밀한 진동분석을 위해서는 설비정보(MDS)가 필요하다[2], [3].

기계의 전체 진동을 나타내는 실효치 레벨을 취득하고 경향을 제시하는 기능은 대부분의 상태 감시 및 진단프로그램에서 제공되므로, 필요한 관련 정보를 얻을 수 있다. 구성요소의 열화로 인하여 발생하는 각종 결함의 근본 원인과 대책을 위한 고장모드를 파악하기 위해서는 실효치 정보만으로는 부족하고, 진폭과 주파수 및 위상 등의 보다 다양한 정보가 필요하다[8].

##### 4.2 설비상태 평가

아래 표는 고장안전진단 설비회사에서의 하나의 샘플로서 진동분석에 의하여 발생하는 진동을 통하여 기계가 안전한지 추후 불량이 생길지를 예측할 수 있는 것이다.

표 3. 속도범위와 기계 구분  
Table 3. Velocity range limits and machine class

Velocity Range Limits and Machine Classes					
ISO Standard 10816-1					
Vibration Velocity (mm/sec)		Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
Peak	RMS				
0.40	0.28	Good	Good	Good	Good
0.64	0.45				
1.00	0.71	Satisfactory	Satisfactory	Satisfactory	Satisfactory
1.58	1.12				
2.55	1.8	Unsatisfactory (Alert)	Unsatisfactory (Alert)	Unsatisfactory (Alert)	Unsatisfactory (Alert)
3.96	2.8				
6.36	4.5	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)
10.04	7.1				
15.84	11.2	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)
25.45	18				
39.59	28	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)
63.63	45				

Class 1	일반 소형 진동기로 출력이 15Kw 이하나 소형 설비를 나타낸다.
Class 2	특별한 기초가 없는 중형 기계로 출력이 15 ~ 75Kw 사이의 설비를 말하며, 기초가 튼튼한 설비는 300Kw 이하 까지 설비를 나타낸다.
Class 3	대형 원동기, 대형 회전기계로서 강 기초 또는 진동의 측정 방향에는 상당히 높은 강성을 가진 무거운 기초에 설치된 설비를 나타낸다.
Class 4	대형 원동기, 대형 회전기계로서 진동의 측정 방향에는 비교적 유연한 기초 위에 설치된 설비를 나타낸다. 10MW 이상의 터보 발전기나 가스터빈

##### 4.3 평가 결과

좌측 릴과 우측 릴 기어박스 교체 작업 이후, 기어박스 속도 진동이 모두 감소하였고, 특히 좌측 릴쪽의 입력축의 가속도 엔벨로핑 진동이 큰 폭으로 낮아졌으며 이는 국부적인 베어링 결함이 교체 작업으로 사라진 것으로 볼 수 있었다.

기어박스의 대표적인 결함을 나타내는 기어 맞물림 주파수(GMF)의 진동 값이 좌측 릴과 우측 릴 양측 모두 사라지거나 낮아진 것으로 나타났다.

#### V. 결론

생산현장에서의 산업 설비 중에서 특히 회전기계에서의 지속적인 고장관리를 위해서는 기기가 작동할 경우, 센서를 이용하여 측정된 데이터를 처리하여 추후에 고장유무를 예측하는 고장진단프로그램이 정제화가 필요하다. 본 연구는 이에 따른 회전기기의 고장진단의 실제 국내 생산설비에서의 측정 데이터를 처리하여 그 고장가능 유무를 판별하였다.

이러한 고장진단프로그램은 진동 모니터링 시스템의 한 방식으로 진동센서에서 신호를 데이터 수집 장치에서 간략히 모니터링하고, 알람/경고신호를 주고 외부에 진동 값을 통신으로 보낼 수 있는 장치로서 필수적인 기기이다.

추후 다채널의 경제성 있고 더 정밀한 기기 개발과 그 응용을 위한 소프트웨어를 자양한 예를 통하여 개발할 예정이다.

**감사의 글**

본 논문은 중소기업청 창업성장 기술개발사업인 “다채널 설비 자가진단 및 모니터링 장치 개발”의 내용으로 (주)VMS 지원으로 이루어졌습니다. 또한 동서대학교 2013년도 연구지원으로 이루어졌습니다.

**References**

- [1] Dan Nower, *The Signal of Failer*, REM Fall, 2010.
- [2] KTM Enginering , *Evaluation to the Rotary Machine*, <http://blog.naver.com/vs72/10019907666>, 2012
- [3] VMS, *Method of Evaluation to the Rotary Machine*, 2014.
- [4] D.C. Chun, *Research of a Diagnostic monitoring System Utilizing Vibration Sensor Data for Rotational Equipments*, Ulsan University, Master Thesis, Ulsan, 2014.
- [5] H.C. Kim, “Development of Monitoring System for Safety Operation of Crane,” *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 11, 2014, pp. 1305-1310.
- [6] Y. C. Bae, “Development of Monitoring System for Safety Operation of Crane,” *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 11, 2014, pp. 1305-1310.
- [7] S.H. Bae ,J. G. Han “Object Oriented Fault Detection for Fault Models of Current Testing,” *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 4, 2010, pp. 443-449
- [8] B.S.Yang, *Condition monitoring & Diagnostics*, Intervision Co. Press, 2006.

**저자 소개**



**홍태용(Tae-Yong Hong)**

1989년 2월 부산대학교 정밀기계공학과 졸업(공학사)  
2004년 2월 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사)

현재 (주)VMS 대표이사

※ 관심분야 : 센서응용, 진동분석



**박수홍(Soo-Hong park)**

1986년 2월 부산대학교 정밀기계공학과 졸업 (공학사)  
1989년 2월 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사)

1993년 2월 부산대학교 기계공학과 졸업(공학박사)  
동서대학교 메카트로닉스공학과 교수

※ 관심분야 : 제어 자동화, 로봇공학

