

한국마린엔지니어링학회지 제33권 제5호, pp. 672~678, 2009. 7 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

웨이블릿변환이 접목된 포락처리를 이용한 저속 회전하는 구름요소베어링 결함 진단

김병수* · 김원철** · 구동식* · 김재구* · 최병근†

(원고접수일 : 2009년 월 일, 원고수정일 : 2009년 월 일, 심사완료일 : 2009년 월 일)

Low Speed Rolling Bearing Fault Detection Using AE Signal Analyzed By Envelop Analysis Added DWT

Byeong-Su Kim* · Won-Cheol Kim** · Dong-Sik Gu* · Jae-Gu Kim*
and Byeong-Keun Choi†

Abstract : Acoustic Emission (AE) technique is a non-destructive testing method and widely used for the early detection of faults in rotating machines in these days, because the sensitivity of AE transducers is higher than normal accelerometers. So it can detect low energy vibration signals. The faults in the rotating machines are generally occurred at bearings and gearboxes which are the principal parts of the machines. It was studied to detect the bearing faults by envelop analysis in several decade years. And the researches showed that AE had a possibility of the application in condition monitoring system(CMS) using the envelope analysis for the rolling bearing. And peak ratio (PR) was developed for expression of the bearing condition in condition monitoring system using AE. Noise level is needed to reduce to take exact PR value because the PR is calculated from total root mean square (RMS) and the harmonics peak levels of the defect frequencies of the bearing. Therefore, in this paper, the discrete wavelet transform (DWT) was added in the envelope analysis to reduce the noise level in the AE signals. And then, the PR was calculated and compared with general envelope analysis result and the result of envelope analysis added the DWT. In the experiment result about inner fault of bearing, defect frequency was difficult to find about only envelop analysis. But it's easy to find defect frequency after wavelet transform. Therefore, Envelop analysis added wavelet transform was useful method for early detection of default in signal process.

Key words : Acoustic emission(음향방출), Envelope analysis(포락처리), Discrete wavelet transform(이산웨이블릿 변환), Peak ratio(피크비), Rolling element bearing(구름요소베어링)

† 교신저자(경상대학교 정밀기계공학과 / 해양산업연구소, E-mail: bgchoi@gnu.ac.kr, Tel: 055-640-3186)

* 경상대학교 대학원

** 경상대학교

1. 서 론

오늘날 우리 일상에서는 수많은 기계 설비들이 사용되고 있다. 이러한 기계 설비들을 대상으로 하여 설비 진단 기술이나 상태감시에 근거하여 설비 부품의 상태를 정확히 파악하고, 부품에서 발생하는 결함을 조기에 감지하여, 그 경과를 추적하여 금후의 진전을 예측하고, 적절한 시기에 적절한 보전을 수행하는 방식이 상태기준보전(CBM : Condition Based Maintenance)이다.^[1]

하지만 CBM 역시 기계 설비에 결함이 발생된 이후에 취해지는 정비 형태로, 설비 관리자는 더욱 빨리 결함에 대한 정보를 얻고자 한다. CBM 보다 더욱 빨리 결함을 검출하고, 결함의 진행을 파악하여 미리 정비 계획을 수립하고자 하는 것이 예후정비(Prognosis Maintenance)이다.

예후정비를 이루기 위해서는 무엇보다 우선 되어야 하는 것은 결함의 조기 검출이다. 결함을 조기에 검출함으로써 진행 상태를 예측하고, 그에 맞추어 정비 계획을 수립함으로써 보다 안전하고 정확한 기계 설비 상태 감시 및 진단을 하고자 하는 것이 그 목적이다.^[2]

AE(Acoustic Emission)을 이용한 결함의 조기 검출을 위해 많은 연구들이 진행되고 있다. AE는 재료의 내부에서 외력 또는 내력에 의해 발생하는 탄성파를 검출함으로써 결함 진단에 사용된다. 이 탄성파를 검출하기 위해 고안된 것이 AE Technique 으로 고주파수 대역의 신호를 검출할 수 있는 능력을 가지고 있다. AE Technique 을 이용한 상태 감시 분야에서 주로 진행된 부분은 베어링 결함 검출이다.^[3]

본 논문에서는 기어의 결함 검출에 유용한 신호처리 기법인 웨이블릿 변환을 포락처리에 적용하여 베어링 결함 검출에 적용해 보았다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

구름요소 베어링의 결함에 대한 베어링 결함 진

단을 AE 변환기를 이용하여 알아보기 위하여 Fig. 1과 같은 실험 장치를 제작하여 실험하였다. 본 실험에서는 SKF · NF307 베어링을 사용하였으며 베어링을 고정해주는 하우징위에 AE센서와 센서를 고정하기 위한 마그네틱 장치가 부착되었다. 결함베어링 하우징 뒤쪽으로는 하중을 가해주는 load장치가 위치해 있으며 축의 끝단에는 속도를 조절해주는 기어박스가 설치되어 있다.



Fig. 1 Experiment installation

축 회전 속도를 기어 박스(감속비 10.1:1)를 사용하여 20, 50, 80, 110, 140 rpm으로 구분하고, 베어링에 가해지는 하중을 500 N, 2 kN, 5 kN 으로 설정하여 회전 속도와 하중의 변화에 따른 베어링 결함 신호를 알아보려고 하였다.

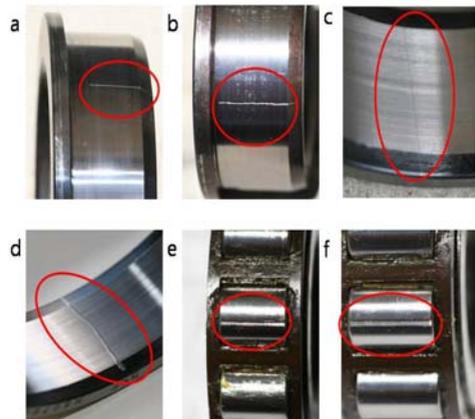


Fig. 2 Seed defects on the bearing : (a)IFC (b)IFC (c)OFC (d)OF (e)RF1 (f)RF2

실험 장치 작동 시에 회전 속도와 베어링에 가해지는 하중에 대한 베어링의 결합 신호를 얻기 위하여 Fig.2와 같이 베어링의 외륜 · 내륜 및 롤러에 인위적으로 결합을 Diamond bit와 air hand tool을 사용하여 일직선으로 폭을 각각 0.1mm (crack)와 1mm (fault)로 하여 혼한 고장과는 무관한 인공결합 6가지 [(a)Inner race Fault Crack(0.1mm), (b)Inner race Fault(1mm), (c)Outer race Fault Crack(0.1mm), (d)Outer race Fault(1mm), (e)Roller Fault1 (0.1mm), (f)Roller Fault2(1mm)] 생성하였으며, 윤회상태는 일정하게 하여 윤회 상태에 의한 외력을 최소화 하였다.

2.2 베어링 결합 신호와 주파수

베어링의 결합은 회전에 의해 충격을 일으키고, 이는 진동을 유발한다. 베어링의 응답에서 주요 주파수는 반응 주파수와 주변 주파수 대역이다. 충격과는 볼이 결합 부분을 지나는 동안에 나타나는데 제조의 특성상 수 kHz 이상에서 나타난다.

베어링의 결합 주파수인 외륜의 볼 통과 주파수 (Ball Passing Frequency of Outer race: BPFO)와 내륜의 볼 통과 주파수 (Ball Passing Frequency of Inner race: BPFi) 그리고 볼 자전 주파수 (Ball Spin Frequency : BSF)를 구하는 방법은 알려진 바와 같이 식 (1)과 같다.^[4]

$$\begin{aligned} BPFO &= \frac{Nb}{2} \left(\frac{1 - Bd \cos \theta}{Pd} \right) \times RPM & (1) \\ BPFi &= \frac{Nb}{2} \left(\frac{1 + Bd \cos \theta}{Pd} \right) \times RPM \\ BSF &= \frac{Pd}{2Bd} \left(\frac{1 - Bd^2 \cos^2 \theta}{Pd^2} \right) \times RPM \end{aligned}$$

Bd: 볼의 직경 Pd: 피치직경 Nb: 볼의 수 θ : 접촉각

2.3 신호 취득

AE 신호를 취득하기 위해 사용된 변환기, 증폭기, 데이터 수집 보드 및 소프트웨어는 미국의 PAC (Physical Acoustics Corporation)사의

것을 사용하였으며, 그 상세 정보는 Table 1과 같다. AE 센서로부터 검출된 신호는 각 결합별로 15 초간 15회 이상으로 저장하였으며, MATLAB을 이용하여 불필요한 성분이나 잡음을 제거하기 위한 신호의 전처리과정을 수행하였다. 그리고 포락선 처리와 웨이블릿 변환된 주파수 영역에서 계산된 PR값을 이용하여 결합의 유무를 알아보았다.

Table 1 Specifications of AE system

2 Channel AE System on PCI-Board	18-bit A/D conversion 10 M Samples/sec rate (on one channel, 5 M Samples/second on 2 AE channels).
AE Sensor (Wideband Type)	Peak Sensitivity V/(m/s)[V/ μ bar] : 55 [-62] dB Resonant Freq. V/(m/s)[V/ μ bar] : 125 [650] kHz
Preamplifier 20/40/60db Gain	Wide dynamic range < 90dB Single power/signal BNC or optional separate power/signal BNC

2.4 평가 방법

본 논문에서는 PR값을 중심으로 평가 하였다. PR값이란 식(2)과 같이 결합 주파수와 조화성분 (harmonic)의 피크 값(peak value)의 합을 전체 값의 평균으로 나누어 dB(decibel)로 나타낸 값을 말한다.

$$PR = 20 \log_{10} \frac{\sum_{j=1}^n (P_j - A_s)}{A_s} \quad (2)$$

P: 피크값, As: 스펙트럼 평균값, n: 갯수

3. 신호처리

3.1 포락처리(Envelop Analysis)

포락처리는 베어링의 결합이 나타내는 주파수를 찾는데 이용되는 대표적인 분석 방법이다. 베어링 결합이 발생한 경우, 볼이 결합 부위를 통과할 때 마다 충격력이 가진되어 베어링의 고유 진동수에

대응하는 진동이 발생한다. 이 경우 결함 주파수와 베어링의 고유진동수는 크게 다르게 된다. 즉 얻어진 진동 파형은 베어링의 고유 진동에 의한 파형을 결함에 의한 반복 주파수로 진폭 변조된 것이 된다. 설비 진단에 필요한 정보는 베어링의 고유 진동이 아니고 결함에 의해 발생한 진동 성분이다. 이와 같이 변조 주파수와 피 변조 주파수 사이의 비가 큰 신호로부터 변조 주파수 성분의 정보를 얻는데 효과적이다.^[5]

포락처리 과정은 일반적으로 Fig. 3과 같이 대역 통과 필터(band-pass filter), 변조(demodulation), 저역 통과 필터(low-pass filter)의 순서로 진행이 된다. 본 연구에서 대역 통과 필터는 선행연구에서 베어링 결함 검출에서 효과적으로 입증된 5 ~ 15 kHz, 15 ~ 25 kHz, 25 ~ 35 kHz, 35 ~ 55 kHz, 55 ~ 75 kHz, 75 ~ 100 kHz 6개의 단계로 나누어 처리를 하였다.

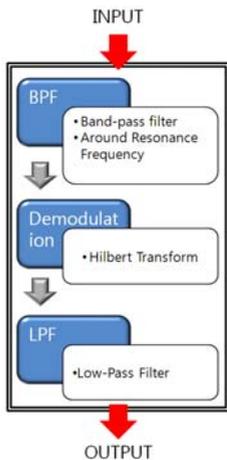


Fig. 3 Procedure of envelope analysis

대역 통과 필터는 기계적 진동 요소에 의해 발생하는 저주파·고진폭의 신호를 제거할 수 있으며, 대역 통과 밖의 랜덤 노이즈(random noise)를 제거하는 역할을 하기 때문에 그 범위의 설정은 매우 중요하다고 할 수 있다.^[6]

3.2 웨이블릿 변환(Wavelet transform)

웨이블릿 변환은 기어 결함을 검출하기 위한 연

구에서 많이 사용되고 있는 방법으로, 신호 내에 포함되어 있는 충격파를 찾는 데 효과적인 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 Matlab의 Wavelet Tool Box에 포함되어 있는 함수를 사용하였으며, 사용된 웨이블릿 변환 함수는 도비치(Daubechies)로 레벨은 최초 4로 설정을 하여 신호 처리를 하였다. Matlab의 Wavelet Tool Box에서 수행되는 웨이블릿 변환은 Fig. 4와 같다. 웨이블릿의 레벨이 증가 될 때 신호는 중심 주파수를 기준으로 저주파와 고주파로 나뉘게 된다.^[7]

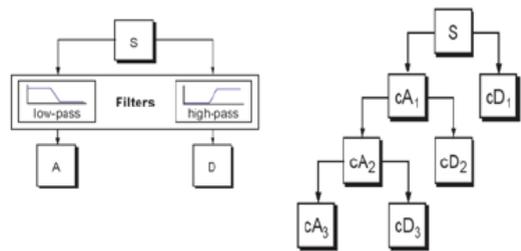


Fig. 4 Wavelet transform procedure

4. 실험 결과

실험 결과 6가지 결함들에 대한 그래프 중 crack결함에 대한 결과는 결함의 크기가 미세하여 주파수 스펙트럼 상에서 결함 주파수와 노이즈 성분을 구분할 수 없었기 때문에, 본 논문에서는 fault(1mm)결함에 대한 결과만을 사용하여 비교 분석 해 보았다. 각 그림에서 나타나는 빨간색 점선은 베어링의 결함 주파수 성분과 조화성분(2X,3X,4X)들을 나타내며 각 그래프의 y축은 각 스펙트럼에서 최대값을 1로 보고 최대값에 대한 비를 표시했기 때문에 값의 단위는 무차원이며 x축은 주파수 값이다.

그림 Fig. 5와 Fig. 6은 내륜에 결함을 가진 베어링을 회전속도 140 rpm, 하중을 2 kN을 가하여 검출된 신호를 BPF를 75 ~ 100 kHz로 설정하여 신호 처리한 결과이다. 그림 Fig. 5는 신호처리 과정 중 포락처리만 수행한 경우로 결함 주파수와 조화성분들이 검출되지 않음을 볼 수 있다. 하지만

웨이블릿을 변환을 한 결과 그림 Fig. 6에서와 같이 결함주파수인 14.51Hz 와 그에 따른 조화성분(2X,3X,4X)들이 검출됨을 알 수 있고 PR값 또한 Fig. 5에 비하여 소폭 상승함을 알 수 있다.

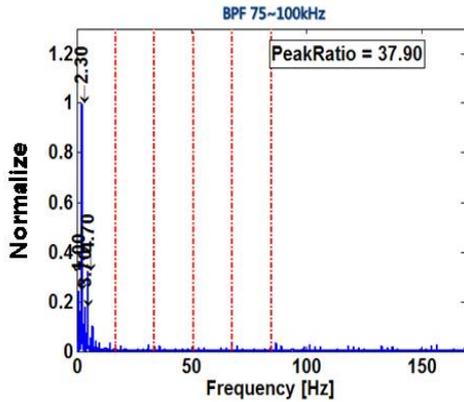


Fig. 5 Result of inner fault bearing (non-wavelet)

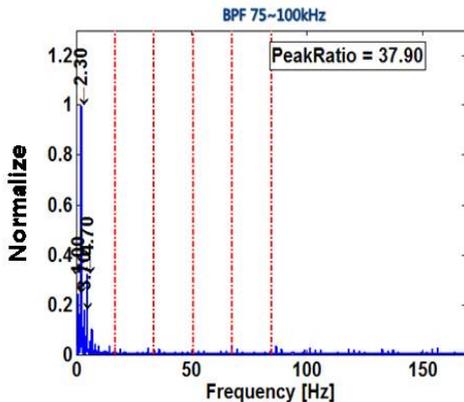


Fig. 6 Result of inner fault bearing (wavelet)

이러한 경향은 외륜 결함을 회전속도 140rpm, 하중 2kN, 대역통과 필터 범위를 35~55kHz로 설정하여 실험한 결과인 그림 Fig. 7과 Fig. 8에서도 나타나게 되며 포락처리만 했을 경우 결함 주파수와 조화성분이 잡음과 측대역파(Sideband)로 인하여 파악하기 매우 힘들다. 하지만 웨이블릿 변환 후 잡음 및 불 자전 주파수에 의한 측대역파(Sideband)또한 제거됨에 따라서 결함 주파수인 11.21 Hz 및 조화성분(2X, 3X, 4X) 검출이 용이하게 되며 PR값 또한 웨이블릿 변환 전 30.55 dB

에서 변환 후 46.19 dB로 높게 나타났다.

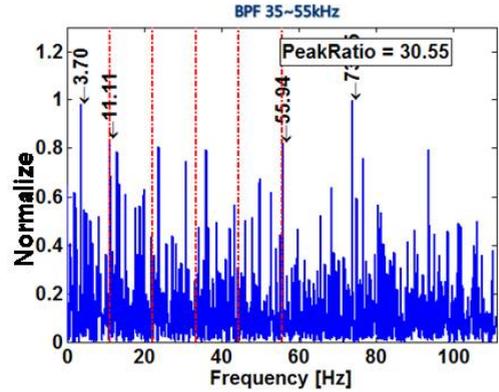


Fig. 7 Result of outer fault bearing (non-wavelet)

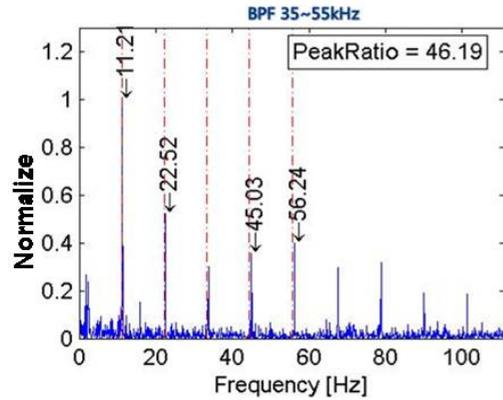


Fig. 8 Result of outer fault bearing (wavelet)

그림 Fig. 9와 Fig. 10은 롤러 결함인 베어링을 속도 140 rpm, 하중 2kN을 가하여 측정된 값을 33 ~ 55 kHz로 대역통과필터 범위를 설정하여 신호 처리한 결과이다. 내륜 및 외륜 결함의 경우와 유사한 경향을 보이고 있으며 웨이블릿 변환 후에 베어링 결함 유무를 나타내는 결함주파수(11.21Hz)와 조화성분(2X,3X,4X)의 검출이 용이하며 PR값 또한 상승함을 확인 할 수 있다.

Table 2는 베어링 롤러 결함에 대한 PR값을 포락처리만 수행한 결과(N)와 포락처리와 웨이블릿 변환을 한 결과(Y)를 비교한 것이다. 웨이블릿으로 신호처리를 실행한 경우에 전체적으로 PR값들이 상승함을 나타낸다.

5. 결 론

본 연구에서는 신호처리 과정 중 기어 결함 검출에 유용한 웨이블릿 변환을 베어링 결함 검출에 적용해 보았다. 실험결과 내륜 결함의 경우 포락처리만 했을 경우 결함검출이 미비했으나 웨이블릿변환 후에는 결함주파수가 검출됨을 알 수 있었다. 또한 전반적으로 내륜과 외륜 및 롤러의 결함 등에도 결함 주파수 검출에 효과를 보였으며 베어링의 결함 평가 방법인 PR값 또한 상승함을 알 수가 있었다.

따라서 기어와 베어링의 결함 검출을 위해 사용된 두 가지 방법을 접목함으로써, 두 기계요소의 결함을 기존의 방법에 비해 더욱 빨리 검출할 수 있음을 확인하였다. 그러므로 본 연구에 적용된 신호처리 방법은 예후정비를 수행함에 있어 중요한 부분을 차지하고 있는 결함의 조기 검출을 위한 하나의 수단으로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부(MEST) 및 한국산업기술재단(KOTEF)의 지역혁신인력양성사업과 경상대학교 2단계 BK21 친환경냉열에너지기계 연구사업팀의 지원으로 수행되었다.

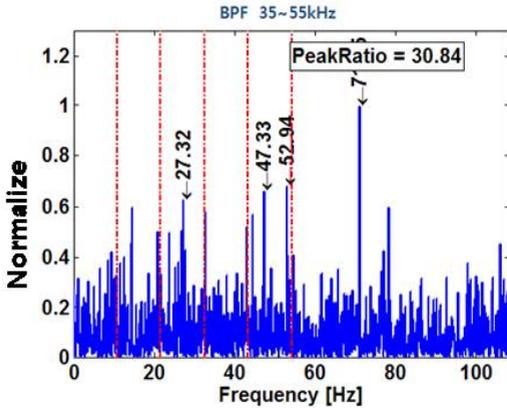


Fig. 9 Result of roller fault bearing (non-wavelet)

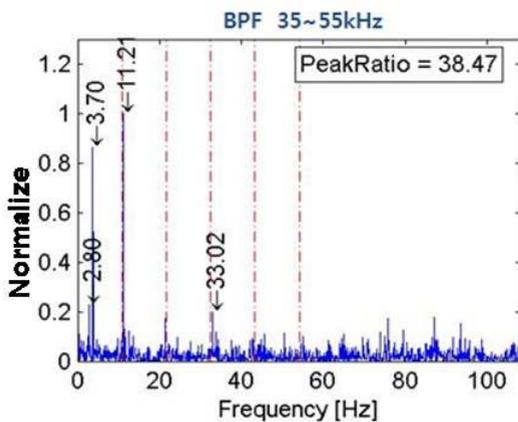


Fig. 10 Result of roller fault bearing (wavelet)

Table 2 Comparison non-wavelet and wavelet about the PR of Roller fault bearing

rpm	Load (N)	BPF Ranger (kHz)							
		25-35		35-55		55-75		75-100	
		N	Y	N	Y	N	Y	N	Y
50	500	36.23	38.25	38.12	38.72	39.66	38.83	29.79	37.31
	2k	28.86	32.56	32.26	38.09	32.12	32.83	26.16	30.06
	5k	28.27	32.56	25.77	30.71	30.69	31.48	27.75	41.42
80	500	28.54	31.40	31.14	37.97	39.21	38.80	33.73	38.30
	2k	29.18	31.76	28.44	30.02	29.81	30.29	25.65	29.78
	5k	25.13	28.05	25.13	31.71	31.81	33.17	28.32	38.74
110	500	29.11	29.72	27.46	29.50	29.95	34.74	32.37	34.74
	2k	28.54	28.76	28.32	35.48	35.49	35.33	36.01	37.22
	5k	30.84	30.60	29.96	35.67	36.45	38.60	37.18	38.23
140	500	28.58	30.39	27.50	30.57	31.37	33.91	31.28	34.82
	2k	31.02	32.25	30.84	38.47	39.01	38.31	40.56	41.55
	5k	31.65	31.79	32.08	38.11	39.28	39.67	32.22	39.59

참고문헌

- [1] KIM, Y. H., Tan, Andy, C. C., MATEW, J., and YANG, B. S., "Experimental study on incipient fault detection of low speed rolling element bearings: time domain statistical parament", 12th Asia-Pacific Vibration Conference (APVC2007), August 6-9, Hokkaido University, Sapporo, Japan. 2007.
- [2] Kim, Y. H., Andy, C. C. Tan, Joseph, M., Vadis, K. and Yang, B. S., "A comparative study on the application of acoustic emission technique and acceleration measurements for low speed condition monitoring," Proceedings of the 12th Asia-Pacific Vibration Conference, 2007.
- [3] S. A. McInerney and Y. Dai., "Basic vibration signal processing for bearing fault detection", IEEE Trans, Education, Vol. 46, pp. 149-165, 2003.
- [4] 양보석, 기계설비의 진동상태 감시 및 진단, 인 터비전, pp. 328-338, 2006.
- [5] Kim, H. J., Gu, D. S., Jung, H. E., Andy Tan., Kim, E., Choi, B. K., "The comparison of AE and Acceleration transducer for the early detection on the low-speed bearing", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Annual Spring Conference, pp. 324-328, 2007.
- [6] Jung, H. E., Gu, D. S., Kim, H. J., Andy Tan., Kim, Y. H., Choi, B. K., "The application of AE transducer for the bearing condition monitoring of low-speed machine", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Annual Spring Conference, pp. 319-323, 2007.

- [7] Math work, "Signal processing toolbox user's guide", Math Work, Inc., 1999.

저 자 소 개



김병수(金昺秀)

2007년 경상대학교 기계항공공학부 졸업. 경상대학교 대학원 정밀기계공학과 (석사과정).



구동식(具東植)

2005년 경상대학교 기계항공공학부 졸업. 경상대학교 대학원 정밀기계공학과 (석박사통합과정).



김재구(金載九)

2008년 경상대학교 기계항공공학부 졸업. 경상대학교 대학원 정밀기계공학과 (석사과정).



최병근(崔柄謹)

1967년 12월생, 1990년 부경대학교 기계공학과 졸업. 1999년 부경대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사). 2002년-현재 경상대학교 기계항공공학부 정밀기계공학과 부교수



김원철(金源喆)

1950년 2월생, 1972년 부경대학교 기관공학과 졸업. 1993년 부경대학교 대학원 기관공학과 졸업(박사). 1882년-현재 경상대학교 기계항공공학부 기계시스템공학과 교수.