

# 터빈 블레이드 진단을 위한 회전기계 마찰 진동에 관한 연구

## Study on Rub Vibration of Rotary Machine for Turbine Blade Diagnosis

유 현 탁\* · 안 병 현\* · 이 종 명\* · 하 정 민\* · 최 병 근†

Hyeon Tak Yu, Byung Hyun Ahn, Jong Myeong Lee,  
Jeong Min Ha and Byeong Keun Choi

(Received August 9, 2016 ; Revised September 26, 2016 ; Accepted September 26, 2016)

**Key Words** : Rubbing(마찰 진동), Blade(블레이드), Diagnosis(진단), Feature Analysis(특징 분석)

### ABSTRACT

Rubbing and misalignment are the most usual faults that occurs in rotating machinery and with them severe effect on power plant availability. Especially blade rubbing is hard to detect on FFT spectrum using the vibration signal. In this paper, the possibility of feature analysis of vibration signal is confirmed under blade rubbing and misalignment condition. And the lab-scale rotor test device provides the blade rubbing and shaft misalignment modes. Feature selection based on GA (genetic algorithm) is processed by the extracted feature of the time domain. Then, classification of the features is analyzed by using SVM (support vector machine) which is one of the machine learning algorithm. The results of features selection based on GA compared with those based on PCA (principal component analysis). According to the results, the possibility of feature analysis is confirmed. Therefore, blade rubbing and shaft misalignment can be diagnosed by feature of vibration signal.

### 1. 서 론

터빈의 블레이드는 유체의 유동 에너지를 기계적 에너지로 변환하는 역할을 담당한다. 가스 터빈 블레이드 문제는 가스터빈 결함의 42%를 차지하며, 블레이드의 손상에 의한 사고가 발생할 경우 터빈의 안정적인 운영과 보수비용에 매우 큰 손실을 발생시키기도 한다<sup>(1,2)</sup>.

접촉(rubbing)은 터빈과 같은 회전기계의 주요 손상 원인 중 하나이다. Rub의 발생 원인은 과도한 축 진동으로 인해 고정부와 회전부의 마찰을 야기시킬 수 있으며, 운전 중 케이싱의 열팽창이 비정상적일 경우에 간극이 협소해져 마찰이 발생할 가능성

이 있다<sup>(3)</sup>.

회전기계에서 rubbing은 과도한 질량 불평형(unbalance), 축 정렬불량(shaft misalignment), 운전 부주의 등에 발생하는 2차적 진동 현상이다<sup>(4)</sup>.

Rubbing의 진동 현상의 특징은 진동파형의 절단, 과도한 위상 변화, 진동주파수를 과도하게 성장시키거나, 조화성분을 발생시키는 등 비선형적이며 무질서하고 과도적인 진동 특징을 가지고 있으며, 이러한 특징들 때문에 정확한 진단에 많은 어려움을 겪고 있다<sup>(5,6)</sup>.

특히 블레이드의 의한 rubbing은 블레이드 끝단에서 발생하는 마찰력이 축 중량보다 작고, 일반적으로 진동 신호를 취득하는 베어링 부까지 진동 신호가 전달되는 도중 감쇠되기 때문에 축에 의한 rub-

† Corresponding Author; Member, Gyeongsang National University  
E-mail : bgchoi@gnu.ac.kr

\* Member, Gyeongsang National University

‡ Recommended by Editor Jae Hung Han

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

bing 보다 진단이 어렵다.

이 논문에서는 터빈 블레이드의 rubbing에 의한 결함 진단을 위해 lab-scale 블레이드 rubbing 실험 장치를 이용하여 rubbing 진동 신호를 취득하였고, 진동 신호의 특징을 추출하였다. 유전자 알고리즘(GA)<sup>(7)</sup>을 이용하여 추출된 특징을 선택하였으며, 이를 support vector machine(SVM)<sup>(8)</sup>을 이용해 특징을 분류하고 분류 성능을 평가하여 터빈의 블레이드 rubbing의 조기 진단 가능성을 연구하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 환경

실험은 Fig. 1과 같이 회전체 실험 장비인 RK4 rotor-kit을 사용하였다. 접촉 실험(rubbing test)을 위하여 Fig. 2와 같이 12개의 블레이드를 가지는 디스크를 사용하였으며, 케이싱을 모사한 지지대를 이용하여 디스크와 케이싱의 간격을 0.1 mm 단위로 조절하여 블레이드의 접촉 상태와 미 접촉 상태의 특징별 분산을 및 분류 성능을 평가하였다.

진동 신호의 취득 및 분석은 PULSE 3560C (B&K)와 ADRE 208(GE)를 사용하였다. 실험 장비의 구동축, 피구동축 지지부에 수직, 수평 방향으로

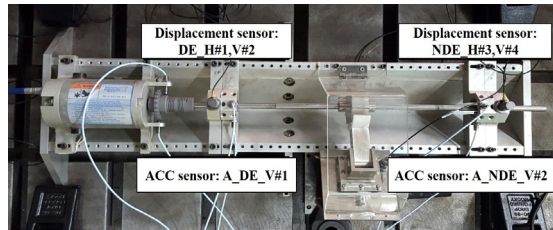


Fig. 1 Rubbing test rotor-kit system

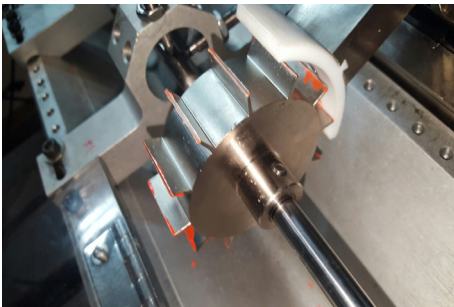


Fig. 2 Blade of rubbing test device

### 2.2 동특성 분석

이 실험에 앞서 실험 로터의 고유진동수 분석과 접촉 상태와 미 접촉 상태의 진동 신호 차이를 분석하였다.

고유진동수 분석은 impact hammering test를 통한 주파수 응답(FRF), 위상, 상관관계 분석을 하였다. Impact hammering test 결과, Fig. 3과 같이 1차 고유진동수 51 Hz, 2차 고유진동수 324 Hz로 나타났다. 로터가 운전 시 1차 고유진동수를 지나 운전하게 되면 1차 모드의 영향을 받아 bending mode가 발생할 수 있으며, 이 경우 접촉 상태와 미 접촉 상태를 정량적으로 판단하기 어려울 것으로 사료되기 때문에 이 실험에서는 미세 접촉에 의한 분류 성능 평가를 위해 bending mode의 영향을 받지 않는 1차 고유진동수 아래인 2400 r/min(40 Hz)를 운전 속도로 고정하여 정속으로 시험을 진행하였다.

특징 분석(feature analysis)에 앞서 축 진동 분석은 FFT spectrum과 polar 선도를 사용하여 확인 하

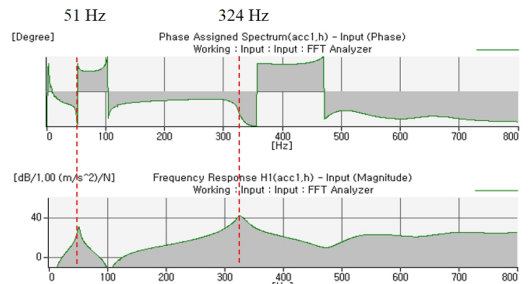
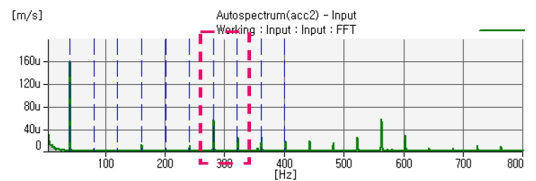
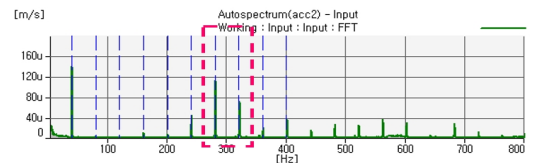


Fig. 3 Result of impact hammering test



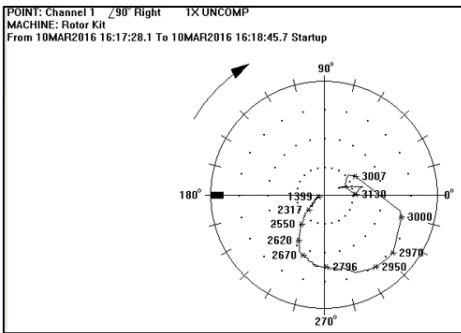
(a) Normal state



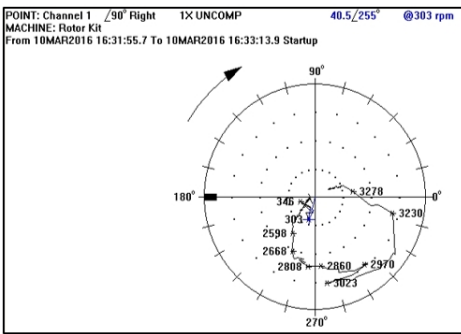
(b) Rubbing

Fig. 4 Result of FFT spectrum(2400 r/min)

였으며 정상과 비정상 상태의 결과를 비교분석 해보았다<sup>(9,10)</sup>. Fig. 4는 운전 속도에서 FFT spectrum을 비교한 것이며 그 결과, 블레이드의 비접촉상태(60 μm/s)와 접촉상태(120 μm/s)의 진폭을 나타내며, 미세하지만 성분 변화를 확인하였다. 이를 통해 블레이드 통과 주파수(vane passing frequency, VPF) 등의 성분 변화를 통해서 마찰진동의 특성을 확인 할 수 있었다. Fig. 5는 1차 고유치 이상인 3600 r/min까지 구동하였을 때의 접촉 상태와 미 접촉 상태의 polar 선도를 나타낸다.



(a) Normal state



(b) Rubbing

Fig. 5 Result of polar plot(3600 r/min)

Table 1 Case of experiment

Normal/rubbing (case 1)		Degree of rubbing (case 2)		Misalignment (case 3)	
		Offset distance(mm)			
1-1	Normal	2-1	7.0	3-1	Normal
		2-2	6.0		
		2-3	5.0		
1-2	Rubbing	2-4	4.0	3-2	3.25
		2-5	3.5	3-3	2.5
		2-6	3.0		
		2-7	2.5		

FFT spectrum을 분석한 결과, 접촉 상태와 미 접촉 상태의 큰 차이점을 찾기 어려운 것을 확인 할 수 있다. 이 원인은 블레이드 rubbing의 경우 마찰력이 축 중량보다 작고 진동 신호가 전달되는 도중 감쇠되기 때문이라고 사료된다. 하지만 2차 고유진동수 인근 대역(약 250 Hz ~ 350 Hz)에서 접촉 상태의 진폭이 상승하는 경향이 나타났으며, 상승 대역의 성분은 진폭 관련된 특징 값 추출 및 선택에 기여할 것으로 판단된다.

Polar 선도를 비교하여 접촉 및 미접촉 상태의 위상 변화를 확인하였다. 접촉 상태의 polar 선도에서 1차 고유진동수를 지나서 주기적인 위상 변화가 확인 되었으며, 이 원인은 고유진동수를 지나 bending mode가 발생하여 접촉이 심화되었기 때문으로 판단 된다.

### 2.3 실험 과정

실험은 Table 1과 같이 3개의 case로 나누어 수행하였다. Case 1의 경우 접촉 및 미 접촉 상태에서의 분류 성능을 평가하였으며, case 2는 7개의 이격 거리를 선정하여 미세 접촉 상태에서의 분류 성능을 평가하였다. 또한 터빈과 같은 회전기계의 rubbing은 다른 결함에 대한 부수적인 진동 현상으로 발생하는 경우가 많기 때문에 case 3과 같이 복합 결함 (misalignment, rubbing)을 고려한 특징 별 분산을 및 분류 성능을 평가하였다. Case 3의 경우 일반적인 대형 회전기계가 1차 고유진동수를 지나 운전 하는 것을 모사하여 3600 r/min(60 Hz)에서 실험이 수행 되었으며, misalignment는 3600 r/min의 최대 편각 허용 값<sup>(11)</sup>(0.5 μm/mm) 이상의 정렬 불량을 모사하였다.

### 3. 특징 추출 및 선택

Fig. 6은 유전자 알고리즘을 이용한 특징 선택 방법을 나타낸다. 신호는 4 채널의 변위 센서에서 취득된 진동 신호를 사용하였으며, 신호의 시간 영역 특징 14개를 추출하였다. 추출된 특징들의 선택은 유전자 알고리즘 기반 특징 선택 방법을 사용하였다. 유전자 알고리즘 기반 특징 선택은 클래스 내의 밀도와 클래스 간의 평균 거리를 목적함수로 설정하였으며, 이를 이용해 분류 성능이 좋은 특징들을 선택하였다.

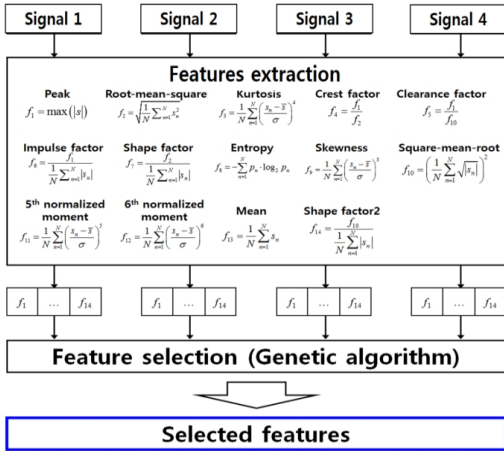


Fig. 6 Feature extraction and selection

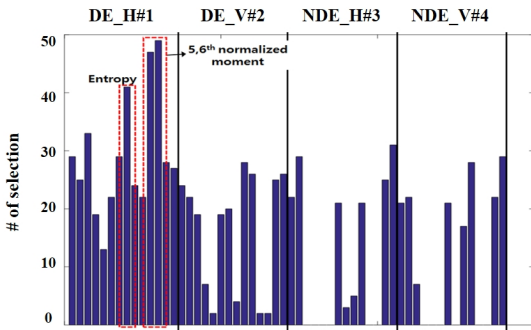


Fig. 7 Histogram of feature selection using genetic algorithm(case 1)

추출된 특징은 기계 학습 알고리즘 중 하나인 SVM을 이용하였으며, 미리 취득된 데이터를 이용해 SVM을 학습시켰으며, 그 후 취득된 데이터를 사용하여 분류 성능을 평가하였다.

접촉 정도 및 misalignment 상태에 따른 유용한 정보를 선택하기 위해서 시간 영역 56가지의 특징(채널 당 14개, 4채널)들 중에서 조합 가능한 경우의 수는 매우 많아 분석에 상당한 시간이 소요되며, 분석 대상의 클래스가 2가지일 경우, 그 경우의 수는 약  $2^{56} \approx 7.2 \times 10^{16}$ 로써 분류 처리 과정에 소요되는 시간 등에 비효율적이며 성능 저하를 초래할 수 있다.

Fig. 7은 수많은 데이터 중에 일반화를 시키기 위하여 60개씩의 데이터를 150번 반복하여 임의로 학습 데이터를 선택하여 유전 알고리즘을 통해 특징들

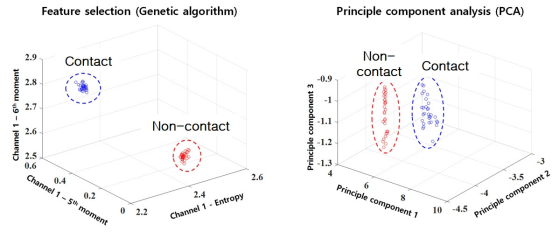


Fig. 8 Result of features extraction and selection(case 1)

을 선택하였을 때 각 특징별로 선택된 회수를 히스토그램(histogram)으로 나타낸 그래프이며 알고리즘 처리 속도 향상 및 분류 성능 향상을 위하여 유전 알고리즘을 기초한 확률 분포도에 따른 각 개체의 적응도가 높은 3개의 특징만을 사용하여 Fig. 7과 같이 case 1에서 추출된 특징들을 히스토그램으로 나타내었다. 히스토그램의 X축은 각 4개 센서(DE\_H, DE\_V, NDE\_H, NDE\_V)의 14개의 특징 종류 모두 56개의 특징을 나타내며, Y축은 선택된 특징 정보 개수를 나타낸다. Case 1에 대하여 유전자 알고리즘으로 가장 많이 선택된 3개의 특징은 구동 측 수평방향 센서의 엔트로피(entropy)와 정규 모멘트 5,6번(5,6th normalized moment)이다. 따라서 각 case별로 개체의 적응도가 높은 3개의 특징만을 선별하여 분류된 결과와 기존 차원 축소 방법인 principal component analysis(PCA) 결과를 비교 분석하였다.

Fig. 8은 case 1에 대한 유전자 알고리즘 기반 특징 선택과 PCA를 3차원 그래프로 비교한 것이다. 그래프를 확인하면 두 방법 모두 접촉 및 미 접촉을 확실하게 분류하는 것을 확인하였다. 하지만 PCA에 비해 유전자 알고리즘 기반 특징 선택의 변별성이 더 높은 것을 확인하였다.

Fig. 9는 접촉 정도 별 실험인 case 2의 결과를 비교한 것이다. PCA에 비해 유전자 알고리즘 기반 특징 선택이 변별성이 더 높은 것을 확인할 수 있었지만, 유전자 알고리즘 기반 특징 선택의 경우에도 접촉 정도가 낮을수록 클래스간의 분산율이 낮아지는 것을 확인하였다.

또한, shaft misalignment 상태에서 접촉과 미 접촉의 결과를 비교해본 Fig. 10은 misalignment 상태에서도 접촉 및 미 접촉을 분류할 수 있음을 확인할 수 있었다.

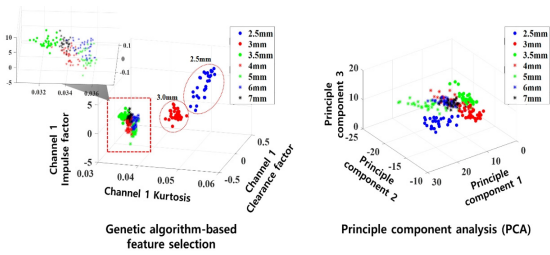


Fig. 9 Result of features extraction and selection(case 2)

5. 결 론

며, 이는 유전자 알고리즘의 목적함수는 클래스 내의 밀도와 클래스 간의 평균 거리로 설정하였는데 인접한 클래스의 경우 상태가 유사하여 분류 성능을 저하 시키는 것이라고 판단되며, 이는 클래스별 또는 클래스 내 밀도와 클래스 간 거리를 측정하여 특징을 선택하는 과정을 추가함으로써 분류 성능을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

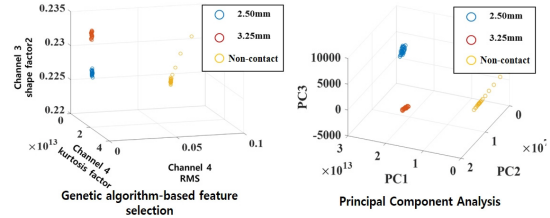


Fig. 10 Result of features extraction and selection (case 3)

블레이드의 rubbing 진동의 경우 마찰력이 축 중량보다 작고 진동 신호가 베어링까지 전달되는 도중 감쇠되기 때문에 진동 신호를 이용한 진단에 많은 어려움이 있다.

이 논문에서는 회전익 항공기 유압 터빈 블레이드의 rubbing 진단을 위하여 fault simulator(RK-4)에 적용 가능한 lab-scale 실험 장비(rubbing device)를 설계 제작하여 실험을 수행하였으며, 시간영역 CI(condition indicator)값을 기반으로 진동 신호의 특징을 추출, 선택, 분류하여 개발된 CI의 성능을 평가하여 회전익 항공기 유압 터빈 블레이드 상태의 건전성 평가 가능성을 확인하였다.

실험은 세 가지 case로 나누어 수행되었으며, 특징 분석의 시간 단축 및 분류 성능 향상을 위하여 GA 기반 특징 선택 방법을 사용하였다. GA 기반 특징 선택의 결과는 기계 학습 알고리즘 중 하나인 SVM을 사용하여 특징을 분류하였으며, 기존 차원 축소 방법인 PCA와 비교하여 분류 성능을 평가하였다. Case 1과 case 3의 경우 높은 분류 성능을 확인 하였지만, 블레이드 접촉 정도 별 실험인 case 2의 분류 성능이 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이 원인은 인접한 클래스의 경우 상태가 유사하여 분류 성능을 떨어뜨리기 때문이라고 사료된다. 유전자 알고리즘의 목적 함수는 클래스 내 밀도와 클래스 간의 거리이며, 이를 고려하여 클래스 내 밀도와 클래스 간 거리를 측정하여 특징을 선택하는 것을 통하여 분류 성능 향상이 가능할 것으로 사료된다.

향후 회전익 항공기 유압 터빈 블레이드 및 기어박스 리그 등의 적용 가능한 최적의 시간영역 주파수 영역의 CI를 개발 및 적용하여 진동특징 분류 성능을 향상시킬 계획이며, 기어박스의 misalignment, unbalance 등의 저속 환경에서 실험을 수행하여 특

Table 2 Result of features classification(case 2)

Algorithm Offset distance	GA based on feature selection	Principal component analysis	Using all features
2.5 mm	98.33 %	100 %	99.17 %
3 mm	89.17 %	93.33 %	88.33 %
3.5 mm	99.17 %	94.17 %	95.83 %
4 mm	93.33 %	87.50 %	97.50 %
5 mm	97.50 %	97.50 %	96.67 %
6 mm	100 %	99.17 %	100 %
7 mm	100 %	100 %	100 %
Ave.	96.79 %	95.95 %	96.79 %

4. 결 과

SVM을 통하여 각 case를 분류하였을 때 단순 접촉 유, 무에 실험인 case 1과 case 3은 100 %의 분류 성능이 보이는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 case 2의 경우는 Table 2와 같은 클래스 간의 분류 성능이 떨어지는 것을 확인 할 수 있었다.

분류 성능 결과에서 나타듯이 미세접촉 2.5 mm ~ 4 mm 구간에서 접촉 상태 분류 대략 90 % 이상의 높은 성능을 보였으나 그 한계를 확인할 수 있었으



정 분류 가능성을 확인 할 계획이다.

## 후 기

이 연구는 방위사업청과 방위산업기술지원센터의 지원(계약번호 : BS15, UC130028JD)하에 한국항공주식회사의 위탁연구와 산업통산자원부 전력산업융합 원천기술개발(201301010170D)에 의해 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

## References

(1) Yang, K. H., Song, O. S., Cho, C. H., Yun, W. N. and Jung, N. G., 2010, Fracture Mechanism of Gas Turbine Compressor Blades in a Combined Cycle Power Plant, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 11, pp. 1025~1032.

(2) Versicherungs-AG, A., 1978, Handbook of Loss Prevention, Springer Berlin Heidelberg.

(3) Al-Badour, F., Sunar, M. and Cheded, L., 2011, Vibration Analysis of Rotating Machinery Using Time-frequency Analysis and Wavelet Techniques, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 25, No. 6, pp. 2083~2101.

(4) Yang, S. H., Park, C. H., Kim, C. S. and Ha, H. C., 2002, Examination of the Periodic High Vibration by the Accumulated Carbide at Oil Deflector of a Steam Turbine for Power Plant, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 12, pp. 897~903.

(5) Chen, G., 2014, Study on the Recognition of Aero-engine Blade-casing Rubbing Fault based on the Casing Vibration Acceleration, Measurement, Vol. 65, pp. 71~80.

(6) Beatty, R. F., 1985, Differentiating Rotor Response Due to Radial Rubbing, Journal of Vibration and Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Vol. 107, No. 2 pp. 151~160.

(7) Huang, C. L. and Wang, C. J., 2006, A GA-based Feature Selection and Parameters Optimization for Support Vector Machines, Expert Systems with Applications, Vol. 31, No. 2, pp. 231~240.

(8) Widodo, A. and Yang, B. S., 2007, Support Vector Machine in Machine Condition Monitoring and

Fault Diagnosis, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, pp. 2560~2574.

(9) Muszynska, A., 1984, Partial Lateral Rotor to Stator Rubs, ImechEC281/84, pp. 327~335.

(10) Choi, Y. S., 2000, Experimental Investigation of Partial Rotor Rub, KSME International Journal, Vol. 14, No. 11, pp. 1250~1256.

(11) Essinger, J., Shaft Alignment, 1995 Proceedings of The International Pump Users Symposium. Texas A&M University System.



**Hyeon-Tak Yu** is unified master's and doctor's course degrees at the Department of Energy Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. Areas of research are dynamic analysis of the shaft through FEM analysis and measurement for diagnosis.



**Jeong-min Ha** is unified master's and doctor's course degrees at the Department of Energy and Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. Areas of research are dynamic analysis of the shaft through FEM analysis and measurement for diagnosis.



**Jong-Myeong Lee** is unified master's and doctor's course degrees at the Department of Energy Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. Areas of research are dynamic analysis of the shaft through FEM analysis and measurement for diagnosis.



**Byung-Hyun Ahn** is unified doctor's course degrees at the Department of Energy and Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. Areas of research are dynamic analysis of the shaft through FEM

analysis and measurement for diagnosis.



**Byeong-Keun Choi** is a Professor at the Department of Energy Mechanical Engineering at Gyeongsang National University in Korea. He received his Ph.D. degrees in Mechanical Engineering from Pukyong National University,

Korea, in 1999. Dr. Choi worked at Arizona State

University as an Academic Professional from 1999 to 2002. Dr. Choi's research interests include vibration analysis and optimum design of rotating machinery, machine diagnosis and prognosis and acoustic emission. He is listed in Who's Who in the World, among others.