

APR 1400급 원자로냉각재펌프의 회전체 진동평가에 관한 고찰

Introduction of Vibration Evaluation for APR 1400 Reactor Coolant Pump Shaft

김익중[†] · 임도현[‡] · 김민철* · 방상윤*

Ik Joong Kim, Do Hyun Lim, Min Chul Kim and Sang Youn Bang

Key Words : Reactor Coolant Pump(RCP), Vibration Evaluation, Nuclear Steam Supply System(NSSS), APR1400 type Nuclear Power Plant

ABSTRACT

The nuclear power plant was launched by Kori unit 1 in 1978 years. Currently, 23 nuclear power plants have been operating in Korea since 1978 years. The localization was completed for most of the reactor facility from Hanbit(Youngkwang) unit 3&4. However, RCP(Reactor Coolant Pump) and MMIS(Man Machine Interface System) is an important technology that has been excluded from the scope of the technical transfer has been dependent on a specific overseas vendor. Recent success in RCP development through co-operation with government and industries. Developed RCP will be applied to Shin-Hanul unit 1&2 nuclear power plants. The RCP operates in high speed and high pressure condition and only rotating component in the NSSS(Nuclear Steam Supply System). Therefore, the problem of vibration has arisen caused by the hydraulic forces of the working fluid. These forces can influence on the stability characteristics for entire RCS(Reactor Coolant System) loop, and can act as significant destabilizing forces. In this study, vibration evaluation of the pump shaft of development RCP estimated under normal operation and over speed conditions. In order to predict the vibration characteristics and dynamic behavior, modal analysis, critical speed analysis and unbalance response spectrum analysis were performed.

1. 서 론

1971년 원자력 불모지인 우리나라에 고리 1호기가 첫 삽을 뜨지 38년 만에 우리나라는 APR1400급 원전 4기를 UAE에 수출하는 쾌거를 이루었다. 이로써 한국은 미국, 프랑스, 러시아, 캐나다에 이어 세계 5번째의 원전 수출국이 되었다. 원전에 대한 기술도 인력도 전무했던 한국이 반세기만에 원전 수출국으로 성장한 가장 큰 원동력은 정부 주도하에 국내 원자력 산업계가 일관되게 추진해온 원자력 기술자립 계획 때문이라고 해도 과언이 아니다. 고리 1호기 착공과 함께 시작

된 원전 기술자립은 고리 1호기의 일괄발주방식(Turnkey)의 원전 도입 과정을 거쳐 분할발주 방식의 원전 도입으로 기반기술을 다져나갔고, 그 후 1984년 한빛(영광) 3,4호기 원전을 건설하면서부터 본격적인 기술자립이 이루어졌다. 그 경험을 바탕으로 최초의 한국형 원전인 100만 kW급 OPR1000이 국내 기술진의 설계 및 제작으로 건설되었고, 이후 1992년 정부주도로 140만 kW급 신형경수로(APR1400)의 개발이 착수되어 2002년 정부로부터 표준설계인가를 획득함으로써 세상에 그 모습을 드러내었다. 이처럼 한국은 원전도입 40여년만에 엄청난 성과를 일구어 내었다. 최근에는 미자립 원전 핵심기술이었던 원자로 냉각재펌프(RCP) 및 계측제어설비(MMIS)가 “Nutech-2012” 계획을 통해 개발 완료됨으로써, 1984년부터 추진해온 원전 기술자립이 완료되어 기술자립, 나아가 명실상부한 기술고유화를 선언하기에 이르렀다.^(1,2)

† 교신저자; 두산중공업 RCP 개발팀
E-mail : ikjoong1.kim@doosan.com
Tel : (055)278-5681, Fax : (055)278-8495
‡ 발표자; 두산중공업 RCP 개발팀
* 두산중공업 RCP 개발팀

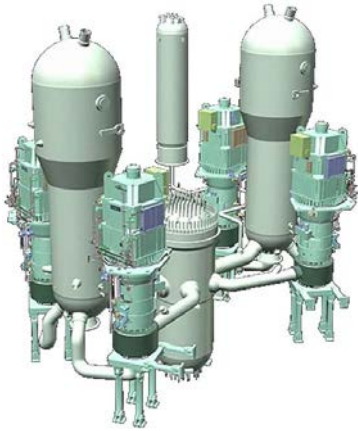


Figure 1 Configuration of Nuclear Steam Supply System

유한요소법(finite element method)을 사용하여 APR1400 급 RCP 의 고유진동수 분석을 수행하여, 기기의 특성을 파악하고, 캠벨선도(Campbell diagram)를 활용하여, 위험속도 분석을 수행하였다. 그리고 그 결과를 통해 APR1400 급 RCP 회전축계의 설계 적합성을 확인하였다. 마지막으로 ISO1940-1⁽⁶⁾에서 제시하고 있는 허용 잔류 불균형량(permissible residual unbalance)을 계산하여 회전체 설계 시 고려되어야 하는 불균형응답특성에 관한 분석을 수행하였다.

2. 진동평가 절차 및 이론적 고찰

2.1 원자로냉각재펌프의 진동평가 절차

회전기기 진동평가의 일반적인 방법은 구조물의 고유한 시스템 특성을 파악하기 위한 모드해석(modal analysis)과 회전이 고려되었을 때의 구조물의 동적 특성을 파악하기 위한 회전체 동특성 평가 해석(rotordynamics) 이 수행된다. 회전기기의 설계 시에는 가진력(excitation)이 발생하는 동안 진동을 줄이는 방향으로 설계하여, 안정된 회전 성능 및 기능 유지가 반드시 고려되어야 한다. 또한 위험속도(critical speed) 분석을 통해 계의 공진점에 있어서 현저한 응답이 발생하는 특정속도를 파악하여, APR1400급 RCP의 회전속도 영역이 위험속도 영역 내에 위치하지 않도록 설계하는 것이 매우 중요하다. 따라서 위험속도 분석을 수행하여 RCP의 설계 적합성을 평가하였다. 마지막으로 불균형하중에 대한 응답해석을 수행하여 구조물의 응답특성을 예측하고, 그 결과를 바탕으로 구조물의 건전성을 확인하였다. RCP 진동평가 절차는 Figure 3와 같다.



Figure 2 Development APR1400 type RCP

APR1400 급 원자력발전소에 적용되는 RCP(Reactor Coolant Pump) 는 높이 약 11m, 무게 약 155 톤에 이르는 대형 펌프로서 원자로 냉각재 계통 안에서 원자로를 거치며 뜨거워진 경수(냉각수)를 증기발생기로 강제 순환시키는 역할을 담당하며 원자로와 증기발생기 사이의 저온관루프에 설치되어 원자력발전소 1 기마다 총 4 대의 RCP 가 설치된다. Figure 1 은 원자력발전소의 1 차계통 구성도이며, Figure 2 는 실제 제작이 완료된 APR1400 급 원자로냉각재펌프의 모습이다. RCP 는 원자력발전소 1 차계통(NSSS) 내 유일한 회전기기로서, 지속적인 유체유동에 의한 수력하중을 받는 회전기기이다. 때문에 전체 계통의 진동특성에 영향을 줄 수 있고, 운전 중 유체유동에 의한 갑작스러운 하중의 변화는 회전기기의 동적 특성에 영향을 미칠 수 있으므로, 이에 대한 정량적인 평가가 요구된다.^(3~5) 따라서, 본 연구에서는

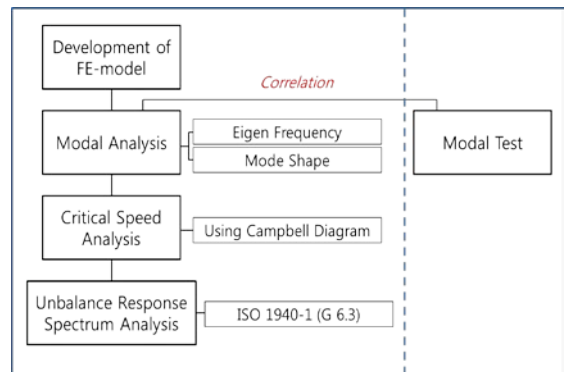


Figure 3 Study Flow for Analysis

2.2 회전기기의 운동방정식

전체 회전기기의 일반적인 운동방정식은 아래 식(1)과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f\} \quad (1)$$

여기서,

[M] : 구조물의 질량 요소(mass)

[C] : 구조물의 댐핑 요소(damping)

[K] : 구조물의 강성 요소(stiffness)

{u}와 {f}는 각각 일반화된 전체 변위 및 힘벡터를 나타낸다.

자이로스코픽요소는 [C]에 포함 되어진다. 자유진동해석을 위해 식(1)은 상태공간 형태로 변환하여 아래와 같이 식(2)로 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \dot{u}_2 \\ u_1 \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} u_2 \\ u_1 \end{Bmatrix} \quad \text{with } \{u_1\} = \{u\}, \{u_2\} = \{\dot{u}_1\} \quad (2)$$

이때 [A]는 다음의 시스템 다이내믹메트릭스로 정의되며,

$$[A] = \begin{bmatrix} -[M]^{-1}[C] & -[M]^{-1}[K] \\ [I] & [0] \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, [I] : Unit matrix

고유치 및 고유벡터는 시스템의 다이내믹메트릭스로부터 계산되어진다.⁽⁷⁾

불균형응답해석은 불균형 가진력과 가진된 해를 식(1)에 대입함으로써 식(4)와 같이 불균형응답 방정식이 유도된다.

$$\begin{bmatrix} [K] - \omega^2[M] & \omega[C] \\ -\omega[C] & [K] - \omega^2[M] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} (a) \\ (b) \end{Bmatrix} = \omega^2 \begin{Bmatrix} (U_c) \\ (U_s) \end{Bmatrix} \quad (4)$$

이때 불균형응답 해의 계수 {a}와 {b}는 식(4)로부터 계산된다.

3. 해석모델 및 조건

3.1 유한요소해석모델

본 연구의 해석대상인 RCP shaft assembly 는 크

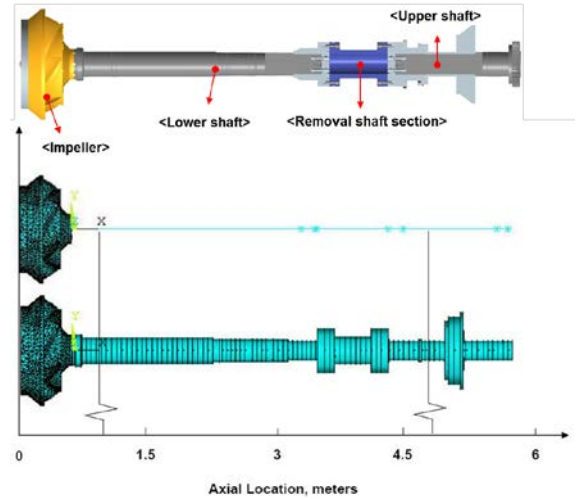


Figure 4 Finite Element Model of RCP Shaft Assembly

게 upper shaft, lower shaft, impeller 및 removal shaft section으로 구성되어 있다. Removal shaft section은 hydrodynamic seal의 교체 효율성을 높이기 위해 국산화 개발 RCP에 새롭게 설계 적용된 부분이다. 본 연구에서는 구조물의 진동특성을 파악하기 위하여 상용유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 활용하여 해석을 수행하였다.⁽⁸⁾ 유한요소해석모델은 solid 187요소와 pipe 16요소, mass 21요소 및 combine 14요소를 사용하여 작성하였다. Impeller 부분은 3차원 요소인 solid 187요소를 사용하여 모델을 작성하였고, shaft부분은 pipe 16요소를 사용하여 모델링 하였다. 그리고 removal shaft section과 upper shaft, lower shaft와 결합되는 hub 및 coupling half 부분은 집중질량요소인 mass 21요소를 사용하여 해석모델을 작성하였다. Figure 4는 RCP shaft assembly의 구성도 및 작성된 유한요소해석 모델이다.

3.2 해석조건

RCP shaft assembly는 상부의 오일 윤활 TBA(Thrust Bearing Assembly)와 함께 하부의 plain journal bearing이 RCP 운전에 의해 발생하는 radial force 및 thrust force를 지지하도록 설계가 되어 있다. 본 연구에서 bearing은 linear spring damper element를 사용하여 모사하였고, bearing stiffness 및 damping 값은 실험을 통해 얻은 결과를 사용하였다. RCP shaft는 토크전달 및 고압의 상태에서 운전되어 표면의 미세한 결함도 축 파단의

Table 1 Material Properties of Shaft

Temp. (°C)	Yield Stress (MPa)	Tensile Stress (MPa)	Elastic modulus (MPa)
20	635	780	20e+ 4
100	608	741	19e+ 4
150	592	717	19e+ 4
290.6	545	648	18e+ 4
300	542	644	18e+ 4
343.3	527	623	17e+ 4

원인이 될 수 있으므로 정삭(정밀)가공 후 표면경화 공정을 통해 표면의 미세한 결함을 없앤다. Shaft 소재의 기계적 물성 값은 Table 1에 정리하였다.⁽⁹⁾

4. 해석결과

4.1 고유진동수 분석

모드해석(modal analysis)은 구조물의 고유진동수 해석으로 고유진동수, 모드형상, 모드 기여도 등의 구조물 자체의 진동 특성을 구하기 위한 해석이다. 모드해석결과는 설계 엔지니어에게 가진 주파수에 대한 공진회피 설계에 대한 가이드를 제공해준다. 본 연구에서 모드해석은 Block Lanczos method를 사용하여 고유진동수 및 모드 형상을 추출하였다. 모드해석을 수행한 결과, Table 2와 같이 주요 모드들을 얻을 수 있었다. 첫 번째 모드는 35.2Hz에서 1차 굽힘 모드 형태로 나타났다. 2차 굽힘 모드는 57.8Hz에서 나타났으며, 비틀림 모드는 72.9Hz 영역에서 나타나는 것으로 분석되었다. 각 모드에 대한 설명은 Table 2에 자세히 나타내었으며, 대표적인 모드형상은 굽힘과 비틀림 모드임을 확인할 수 있었다. RCP shaft의 동기속도는 1200RPM(20Hz)이다. 모드해석결과 얻은 1차 고유진동수는 35.2Hz로 설계된 RCP의 운전속도와 가진 주파수 간 속도차가 상당히 큰 것을 확인할 수 있었다.

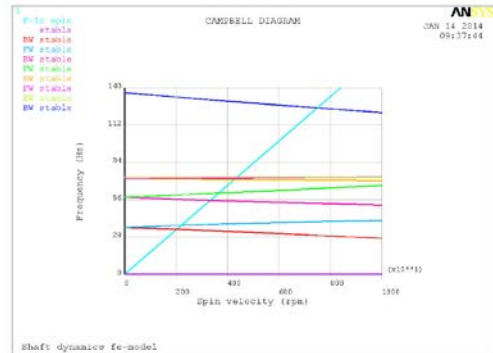
Table 2 Modal analysis result of RCP shaft assembly

Mode	Natural frequency (Hz)	Remark
1	35.2	1 st bending mode
2	57.8	2 nd bending mode
3	71.7	3 rd bending mode
4	72.9	Torsional mode
5	136.29	4 th bending mode

결과적으로, APR1400급 RCP의 설계요건인 “동기 속도 $\pm 25\%$ 이내에 가진 주파수가 존재하지 않아야 한다.”는 기준에 만족함을 확인하였다. 본 결과를 바탕으로 APR1400급 RCP의 운전영역에 고유진동 주파수가 포함되어 있지 않아, 당 회전기기의 공진 회피설계가 만족스럽게 되었다는 결론을 도출하였다.

4.2 위험속도 분석

국제규격 ISO1925에서는 위험속도를 “계의 공진점에 있어서 현저한 응답이 발생하는 특정속도”라고 정의하고 있다.^(10,11) 즉, 최대 휘돌림진폭(whirling amplitude)이 발생하는 회전체의 속도로서, 회전샤프트의 회전속도가 계의 고유진동수와 일치할 때 발생한다. 따라서 회전체에서는 계의 고유진동수 또는 그 정수배에 대응하는 회전속도를 의미한다. 본 연구에서는 위험속도를 예측하기 위해 캠벨선도를 사용하였다. 캠벨선도는 회전체의 공진 가능성을 확인하기 위해 일반적으로 사용되는 방법이며, 이는 운전속도의 함수로 고유진동수를 나타낸 평가기법이다. 이 선도에서는 가진력 주파수를 함께 나타내며, 가진력 주파수의 선은 좌표 원점으로부터 퍼지는 직선으로 표현된다. 1X 선은 1X운전속도를 나타내며, 불평형력과 같이 가진 진동수가 회전주파수가 된다. 운전속도영역 내에서 가진력 주파수의 선과 고유진동수가 교차하는 영역은 잠재적인 공진영역을 나타낸다.⁽¹²⁾ 캠벨선도 해석결과는 Figure 5에 나타났다. 평가결과, 위험속도는 1차 굽힘 모드의 BW Whirling과 1X선이 교차하는 2022.1RPM에서 나타나는 것을 확인하였다. RCP의 운전속도가 1200RPM(20Hz)인 점을 확인했을 때, 위험속도 구간과 RCP의 운전속도 구간이 상당히 떨어져 있는 것을 살펴볼 수 있다.

**Figure 5** Campbell Diagram for Critical Speed

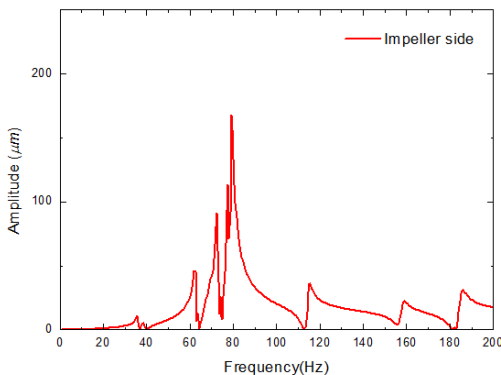
따라서 위험속도 분석을 통해 운전 중 RCP가 공진주파수 영역을 지나지 않음을 확인하였고, 이를 통해 개발 RCP의 공진회피설계가 이루어졌음을 확인할 수 있었다. Table 3에 RCP shaft의 위험속도 분석 결과를 자세히 나타내었다.

Table 3 Critical Speed of RCP shaft assembly

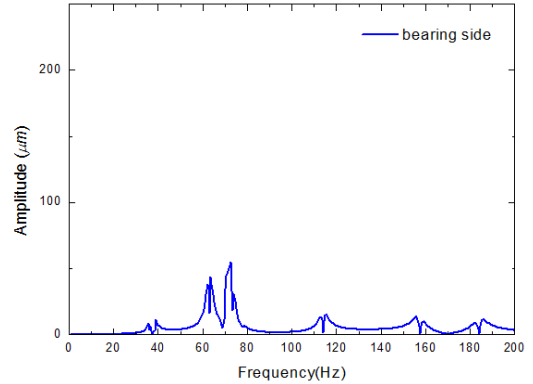
Mode	Critical Speed (RPM)
1 st BW Whirling	2022.1
1 st FW Whirling	2201.5
2 nd BW Whirling	3329.4
2 nd FW Whirling	3654.2
3 rd BW Whirling	4265.2
Impeller Torsional	4377.5
3 rd FW Whirling	4388.5

4.3 질량불균형 응답특성 분석

불균형응답해석은 ISO1940-1 Balance Quality G6.3을 적용하여 수행되었다. 위험속도와 질량불균형 응답특성 해석은 회전체 진동의 크기를 분석한 후, 회전축계와 베어링의 간극을 고려하여 구조물의 신뢰성을 확보하는데 그 목적이 있다. RCP 회전축계의 불균형응답해석 결과는 Figure 6에 나타났다. 측정위치는 실제 베어링이 위치하는 임펠러(impeller) 상부 radial bearing 축과 TBA(Thrust Bearing Assembly) 부분에서의 결과를 확인하였다. 분석결과, 운전영역인 20Hz에서의 진폭은 각각 10.3 μm , 1.5 μm 의 진폭으로 운전이 되는 것을 확인하였다. 최대진폭이 발생하는 주파수는 각각 80Hz, 73Hz 부근에서 최대 진폭을 갖는 것으로 확인됐다.



a) Unbalance Response at Impeller Side



b) Unbalance Response at TBA Side

Figure 6 Unbalance Response of the RCP shaft

두 경우 모두 회전축계와 베어링 사이의 간극보다 훨씬 작은 진폭 변화량을 갖는 것을 확인하였다. 결과적으로 모터가 과속을 하여 해당 속도영역을 지나더라도, 베어링과 축의 건전성 측면에는 별 문제가 없을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 2007년부터 개발에 착수하여 2012년에 개발 완료된 국산화 개발 APR1400급 원자로냉각재펌프의 진동특성과 질량불균형에 따른 회전체의 응답특성을 분석하였다. 본 연구의 주요 결과는 아래와 같다.

- 1) RCP 회전축계에 대한 모드해석결과, 1차 고유진동수가 35.2Hz로 운전속도인 20Hz의 $\pm 25\%$ 범위 내에 고유주파수가 존재하지 않음을 확인하였다. 이를 통해 개발 RCP가 운전 중에 공진점을 갖는 속도에서 운전되지 않음을 확인할 수 있었다.
- 2) 캠벨선도(Campbell diagram)를 사용하여 RCP 회전체의 위험속도를 분석한 결과, 1차 위험속도는 1차 굽힘 모드의 backward whirling 위치인 2022.1RPM에서 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 위험속도 구간 역시 실제 운전속도와 상당히 큰 속도차이가 발생함에 따라 운전중인 RCP가 위험속도 구간에 진입하여 큰 변위를 갖는 공진영역에서 운전되지 않음을 확인할 수 있었다.

3) ISO1940-1에서 제공하고 있는 불균형응답해석 절차를 따라 회전체의 불균형응답특성 해석을 수행한 결과, RCP 회전체의 최대 진폭은 70~80Hz 부근에서 발생하는 것을 확인하였고, 운전속도인 20Hz에서는 매우 작은 원주방향 진폭변화(radial displacement)를 갖는 것으로 확인되었다. 이를 통해 개발 RCP의 회전체 시스템의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부 주관의 “Nu-Tech 2012” 사업의 일환으로 수행된 “APR1400 냉각재펌프의 설계, 제작, 응용 및 핵심요소기술개발” 과제로 수행되었으며, 이와 관계된 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) “A Study on the Strategic Planning for NPP initiatives & exporting (for Revision of Nu-Tech 2015 to Nu-tech 2012)”, 2009, Korea Hydro & Nuclear Power.
- (2) “2012 White Paper on Nuclear Power Generation”, 2012, Ministry of Knowledge Economy.
- (3) I. J. Kim, M. C. Kim, G. H. Jang, D. H. Jeong, O. S. Kim, S. Y. Bang and S. H. Park, 2014, “Evaluation of Vibration Characteristics for Reactor Coolant Pump Considering Fluid Flow Effect”, Proceedings of the 22nd International Conference on Nuclear Engineering, ICONE22-30356.
- (4) I. J. Kim, Y. J. Choi, O. S. Kim, S. Y. Bang, 2013, “A Study on the Thermal Evaluation of Reactor Coolant Pump Casing for Shin-Ulchin 1&2 NPPs”, Proceedings of ICAPP2013, Paper KD054.
- (5) M. C. Kim, S. Y. Bang, K. W. Lee, Y. J. Choi, Y. S. Kim, 2010, “Structural Integrity Assessment of the Pump Shaft Assembly of the APR1400 Reactor Coolant Pump”, Proceedings of 2010 ASME Pressure Vessel & Piping Conference, PVP2010-25941.
- (6) ISO 1940-1 Standard, 2003, Mechanical Vibration-Balance Quality Requirements for Rotors in a Constant (Rigid) State-Part 1 ; Specification and Verification of Balance Tolerances 2nd Edition.
- (7) Lee, A. S., Kim, Y. C. and Park, J. K., 1996, The Ultra Centrifuge Rotordynamics, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 319~323.
- (8) ANSYS Inc., 2009, “ANSYS Release 12.0”.
- (9) American Society of Mechanical Engineers, 1998, ASME Code Sec.II – Materials Part.D.
- (10) Son, C. Y., Lee, C. S. and Ryu, Y. H., 2008, A Study on the Vibration Characteristics of Critical Speed for Rotor Shaft, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 18, No. 9, pp. 961~971.
- (11) ISO 1925 Standard, 2001, Mechanical Vibration-Balancing-Vocabulary.
- (12) Yang, Bo Suk, 2006, Vibration of Rotor Machinery, Interscience