

# RK4 다축 회전체 시스템의 동역학모델링 및 검증

## Modeling and Validation of RK4 Multi Axis Rotor system

권기범 · 한정삼†\* · 전병철 · 정준하 · 윤병동\*\*

Jeong Sam Han, Ki Beom Kwonn, ByungChul Jeon, Joonha Jung and Byeng D. Youn

**Key Words :** Rotordynamic Analysis(축계진동해석), Modal Analysis(고유치 해석), Finite Element Method(유한요소법), Impact hammer test(충격해머시험)

### ABSTRACT

In this paper, the finite element modeling of the RK4 rotor kit system (RK4) and then frequency analysis and transient analysis, and was compared with the actual experimental results. RK4 manufactured by General Electric for the purpose of education and research. It is composed of two shaft, Two shaft is connected using a flexible coupling, one disk is mounted. The analytical model is modeled by using the ANSYS finite element analysis program commercially available. Based on impact hammer test results, material properties and the stiffness of the bearing and coupling was tuned. Considering the operating conditions and the vibration response of the analytical model were compared with experimental results.

### 1. 서 론

회전체 시스템의 이상징후 감시기법 개발을 목표로, 회전체에서 자주 발생하는 몇 가지 파손메커니즘을 실험모델과 해석모델에서 각기 구현하고 상호 비교 분석하여 진단알고리즘 개발에 도움을 주기 위하여 연구가 수행되었다.

### 2. 회전체 유한요소모델링

Fig. 1은 GE(General Electric)사의 교육 및 연구용 장비인 RK4 rotor kit 회전체 시스템으로 축의 수에 따라 1-축과 2-축 모델로 구성하여 실험과 해석모델을 구축하였다.

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하여 회전체 해석모델을 생성하였으

며, 사용한 요소들은 다음과 같다.

RK4 rotor kit 시스템에서 축은 3차원 빔요소 (beam188 : beam element), 디스크는 집중질량요소 (mass21 : mass element), 베어링은 2차원 스프링 (combi214 : spring element), 유연성 커플링은<sup>(1)</sup> 1차원 스프링(combin14 : spring element) 요소 4개(병진자유도 2개, 회전자유도 2개)와 2개의 집중질량요소를 복합적으로 사용하여 모델링 되었으며 완성된 유한요소모델은 Fig. 2와 같다.

### 3. Impact hammer test

3.1 RK4 system with 1-Shaft & 1-Disc  
기본적으로 해석모델의 정확도를 향상시키기 위

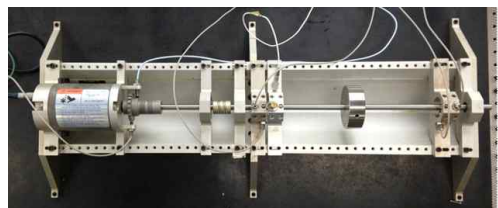
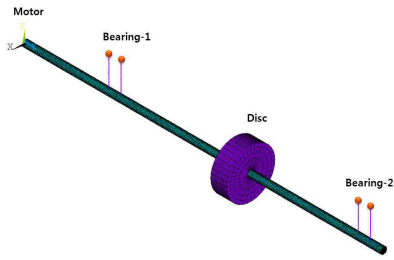


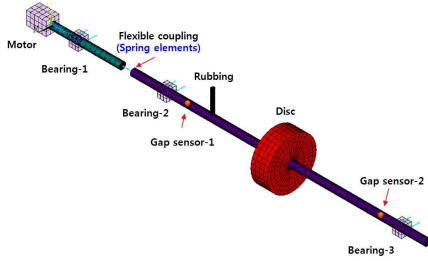
Fig. 1 Configuration of RK4 rotor kit system

† 교신저자; 정희원, 안동대학교 기계설계 공학과  
E-mail : jshan@anu.ac.kr  
Tel : 054-820-6218, Fax : 054-820-5167

\* 안동대학교 기계설계공학과  
\*\* 서울대학교 기계항공공학부



(a) RK4 1-shaft & 1-disc



(b) RK4 2-shaft & 1-disc

Fig. 2 FEM model of RK4 rotor kit system

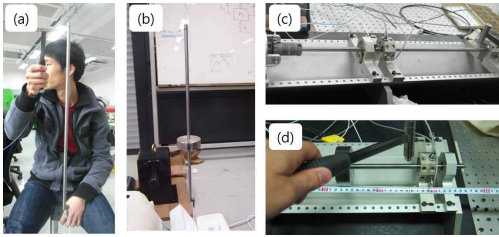
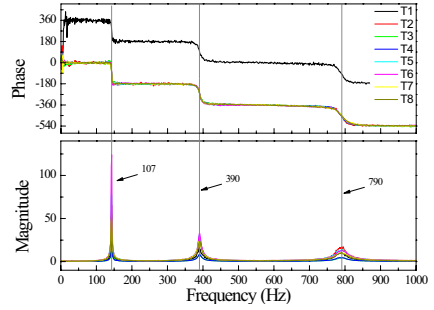


Fig. 3 Impact hammer test cases

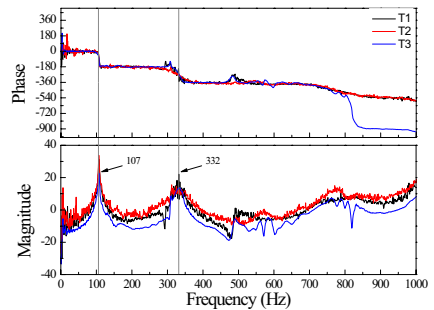
하여, 우선적으로 실제 축의 물성과 해석적으로 고려한 물성의 차이가 존재하므로 실제 축의 질량을 측정된 결과를 토대로 해석모델에서의 재질 밀도를 보정하였다.

Fig. 3에 표시된 바와같이 총 4가지 조건으로 (a) 축, (b) 축에 1개의 디스크 장착, (c) RK4 실험장치 위에 축을 배치한 경우, (d) RK4 실험장치 위에 축에 1개의 디스크를 장착하여 배치한 경우에 대하여 각각 임팩트 해머 시험을 수행하였다.

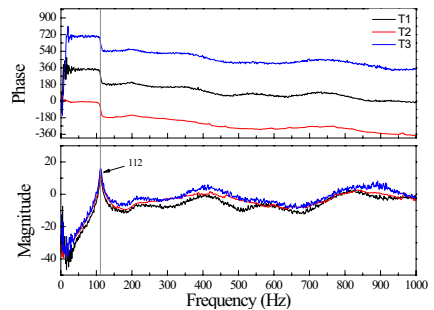
자유단 조건에서 실험한 (a)~(b)에서 축의 고유진동수를 측정할 수 있었으며, 해석모델에서는 재질의 탄성계수를 변경하여 1~2차 고유진동수를 실험과 유사한 결과를 내도록 재질 강성을 보정을 하였다.



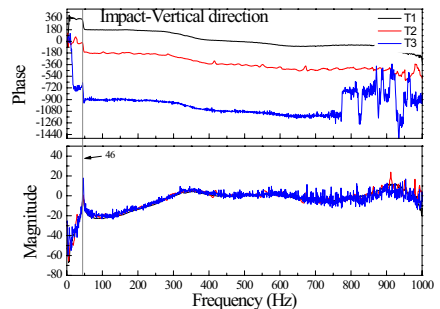
(a) Shaft only



(b) Shaft with 1-disc



(c) RK4 system with shaft



(d) RK4 system with shaft & 1-disc

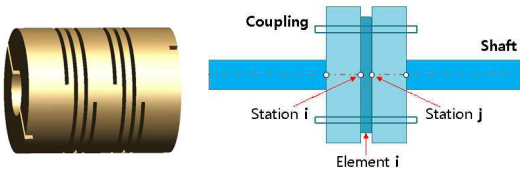
Fig. 4 Impact hammer test result of RK4 1-shaft & 1-disc system

**Table 1** Impact hammer test result of RK4 1-shaft & 1disc system

Experiment model		(a)	(b)	(c)	(d)
Natural frequency [Hz]	1 <sup>st</sup>	143	107	112	46
	2 <sup>nd</sup>	390	332	-	-
	3 <sup>rd</sup>	790	-	-	-

**Table 2** Modal analysis result of RK4 1-shaft & 1disc system

Analysis model		(a)	(b)	(c)	(d)
Natural frequency [Hz]	1 <sup>st</sup>	143.1	107.7	107.4	43.3
	2 <sup>nd</sup>	393.8	309.8	157.8	148.7
	3 <sup>rd</sup>	770.1	545.1	313.1	278.0



**Fig. 5** Flexible coupling

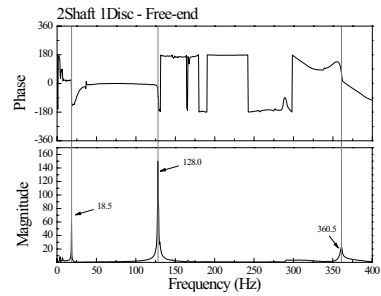
실험 (c)~(d)에서는 축을 RK4 시스템에 장착하였을 때 베어링의 지지강성이 시스템에 미치는 영향을 파악하고, 해석모델에서 구현될 베어링의 강성 값을 결정하는데 도움이 되었으며, 이 과정에서 베어링을 기존 1개의 스프링요소로 표현 시에는 베어링 강성을 아무리 높이더라도 RK4 시스템의 1차 고유진동수인 46 Hz를 해석적인 방법으로는 만족시키지 못하였다. 그러므로 본 연구에서는 베어링당 2개의 스프링요소를 사용하여 해석을 수행하였으며 합리적인 수준의 베어링강성으로 표현이 가능하였다.

최종적으로 보정된 해석모델의 고유진동수 해석 결과는 Table 2와 같으며 (a)~(d)의 4가지 실험 조건을 모두 만족하는 합당한 해석 모델 구축이 가능하였다.

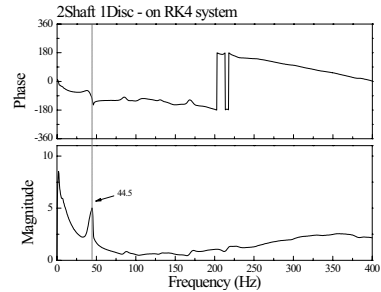
### 3.2 RK4 system with 2-Shaft & 1-Disc

3.1절에서의 모델과 달리 2개의 축을 사용한 모델로, 축과 축은 유연성 커플링으로 연결된다.(Fig. 5 참조)

커플링이 추가됨으로써 변화된 시스템의 성질을 파악하기 위하여 자유단 조건하에서 2-shaft & 1-Disc에 대하여 임팩트 해머실험을 수행을 한 결과

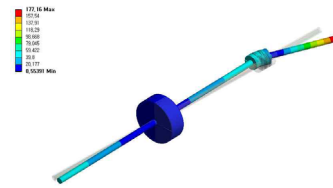


(a) 2-Shaft with 1-Disc

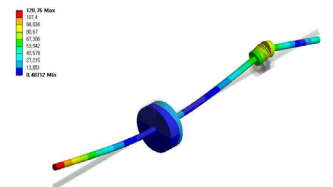


(b) RK4 system with 2-shaft & 1-Disc

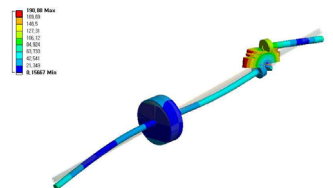
**Fig. 6** Impact hammer test result of RK4 2-shaft & 1-disc system



(a) 1<sup>st</sup> bending mode ( $f_1 = 18.2$  or  $18.5$ Hz)



(b) 2<sup>nd</sup> bending mode ( $f_2 = 136.5$  or  $137.3$ Hz)



(c) 3<sup>rd</sup> bending mode ( $f_3 = 345.5$  or  $346.4$ Hz)

**Fig. 7** Mode shape and natural frequency of 2-shaft 1-disc model

**Table 3** Comparison of natural frequency results (RK4 2-shaft & 1-disc system)

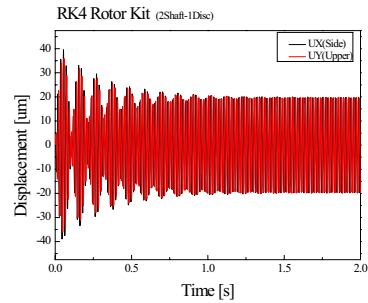
Model		Experiment		Analytical	
		(a) Free-end	(b) on RK4	(a) Free-end	(b) on RK4
Natural frequency [Hz]	1 <sup>st</sup>	18.5	44.5	18.2 18.5	46.4
	2 <sup>nd</sup>	128.0	-	136.5 137.3	82.8
	3 <sup>rd</sup>	360.5	-	345.5 346.4	331.9

는 Fig. 6(a)와 같다. 또한 같은 조건에서의 3-D 해석결과는 Fig. 7와 같으며, RK4 장치에 장착하였을 경우에는 Fig. 6(b)와 같다. 커플링의 경우 축대칭 형상이 아니기 때문에 해석결과에서는 같은 진동모드의 경우에도 상-하 방향 및 좌-우 방향으로 진동하는 모습으로 구분이 되며 1Hz 미만의 작은 진동수 차이를 보이고, Fig. 7와 같이 커플링 부분을 중점으로 1차 굽힘모드, 디스크와 커플링 부분을 중점으로 2차 굽힘모드 등 전체적으로 실험 결과와 유사한 고유진동수와 고유진동모드 형상을 가짐을 확인할 수 있었다.

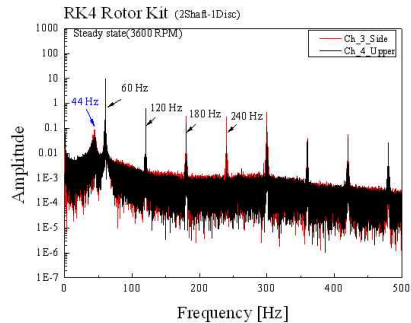
하지만, 회전체 동해석은 축대칭인 형상에 대해서만 해석이 지원되므로 비축대칭인 커플링을 축대칭 요소들로 변환하는 작업이 필요하다. 그러한 방법의 일환으로 커플링을 스프링 요소와 집중질량 요소로 모델링을 수행하고, 그에 합당한 스프링 강성을 찾아낼 필요가 있으며, 이때 앞서 수행한 실험에서 파악한 시스템의 고유진동수 정보를 토대로 축이 자유단 조건에서와 RK4 시스템에 장착된 조건에서의 고유진동수 실험결과를 모두 만족할 수 있도록 커플링의 강성계수( $k_T$ ,  $k_R$ )들을 결정할 수 있었다.

#### 4. 회전체 과도해석

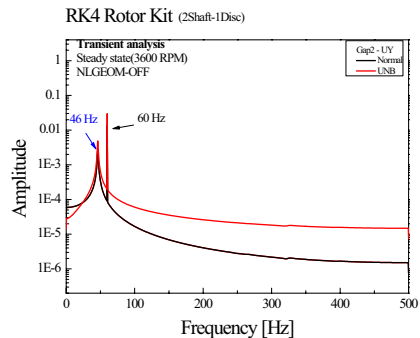
RK4 2-shaft & 1-disc 해석모델을 대상으로 디스크 장착부에서 불평형질량 0.4g이 회전축으로부터 30mm 이격된 상태로 가정하고 2%의 레일리 감쇠(rayleigh damping)를 적용, 3,600rpm으로 정속 회전하고 있을 때의 과도 진동응답은 Fig. 8와 같다. 해석모델의 경우 초기조건인 부재로 해석 시작 시에는 0 rpm에서 첫 증분구간을 지나고 3,600 rpm 급상승으로 인한 충격의 영향으로 0~1s 구간에서 오버슈트(overshoot)이 크게 나타나고 있지만 감쇠의 영



**Fig. 8** Analytical results of transient displacement response



**Fig. 9** FFT result of experimental data



**Fig. 10** FFT result of transient displacement response

향으로 점차 줄어들어 1s 이후구간에서는 점차 안정적인 정상상태 응답을 나타내고 있다.

Fig. 9는 실제 실험결과의 진동신호를 바탕으로 한 FFT결과이며, Fig. 10은 해석모델의 진동응답에 대한 FFT 결과이다. 실험과 해석모델 모두 시스템의 1차 고유진동수(45 Hz)와 운전속도(3,600 rpm)와 동일한 주파수에서(60 Hz) 불평형질량에 의한 가진으로 공진이 발생함을 확인할 수 있으며, 실험의 경우에는 미처 제어하지 못한 인자들과 노이즈 성분

들로 인해 운전속도의 하모닉스 성분(2X, 3X, ... 등)이 크게 발달하였지만, 해석모델의 경우 실험과 달리 제어된 환경에서 이상적인 조건으로 해석이 되다 보니 하모닉스 응답이 매우 작았으며 이 또한 감쇠에 상쇄되어 충분히 발달하지 못하였다.

Analysis of a Composite Roller for Large LCD Panel Manufacturing, Journal of Korean Society for Composite Materials. Vol. 19, No. 6, pp. 08~15.

(4) ANSYS, 2007, ANSYS Theory Reference 11.0. SASIP, Inc.

## 5. 결 론

이 논문에서는 유한요소해석 기법을 사용하여 RK4 rotor kit에 대한 회전체의 동역학 모델링을 수행하고, 단계별 임팩트해머 실험 결과를 바탕으로 해석모델을 보정하여 정확도를 향상 시켰다. 3,600 rpm으로 회전하고 있을시에 불평형질량 가진에 따른 과도해석을 수행하여 실제 실험결과와 비교하였다. 해석모델의 경우 이상적인 조건에서의 결과이다 보니 실제 실험모델에서 발생하는 고차 하모닉스 성분의 영향이 작고 노이즈가 나타나지 않았다. 향후 불평형질량의 다양한 이상상태(베어링 러빙 및 축 오정렬 등)의 조건을 인가하여 비교 분석할 예정이다.

## 후 기

This research was supported by Energy Technology Development Program of Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government's Ministry of Knowledge Economy (2012101010001C).

## 참 고 문 헌

(1) Chen W. J. and Gunter E. J., 2001, Introduction to Dynamics of Rotor-Bearing Systems, Trafford Publishing, Ltd., Milton Keynes.

(2) Kim B. O., Park M. R. and Choi B. S., 2013, Rotordynamic Analysis and Experimental Investigation of the Turbine-Generator System Connected with Magnetic Coupling, The KSFM Journal of Fluid Machinery. Vol. 16, No. 3, pp. 32~38.

(3) Park H. K., Kim D. H., Chio J. H., Kweon J. H., Lee Y. H and Yang S. U., 2006, Rotordynamic