

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.11.1757

ISSN 1226-4873

2차원 유한요소법을 적용한 플라이휠 에너지 저장 장치 동특성 해석 프로그램 개발

구동식* · 배용채** · 이육륜** · 김재구* · 김효중* · 최병근***†

* 경상대학교 대학원, ** 한국전력연구원, *** 경상대학교 에너지기계공학과, 해양산업연구소

Development of Rotordynamics Program Based on the 2D Finite Element Method for Flywheel Energy Storage System

Dong Sik Gu*, Yong Cae Bae**, Wook Ryun Lee**, Jae Gu Kim*,
Hyo Jung Kim* and Byeong Keun Choi***†

* Dept. of Precision and Mechanical Engineering, Gyeongsang Nat'l Univ.

** Plant Integrity Group, Korea Electric Power Research Institute

*** Dept. of Energy and Mechanical Engineering, Institute of Marine Industry, Gyeongsang Nat'l Univ.

(Received June 1, 2010 ; Revised September 7, 2010 ; Accepted September 13, 2010)

Key Words: Flywheel Energy Storage System(플라이휠 에너지 저장 장치), Rotor Dynamics(회전체 동역학), Finite Element Method(유한요소법), Natural Frequency(고유진동수)

초록: 플라이휠 에너지 저장 장치는 잉여 전기를 회전관성을 통해 운동 에너지로 저장하는 장치로, 회전의 중심이 되는 축과 외부의 플라이휠로 구성이 된다. 수치해석을 위한 일반적 프로그램들은 3차원의 모델을 통하여 구조해석 및 주파수 응답 등의 해석을 수행하게 된다. 허나 상용 프로그램을 이용한 동역학적 해석의 응용은 매우 어려운 실정이며, 사용자가 그 방법을 익히는 것 또한 쉽지 않다. 이러한 문제들을 보완하고자 동역학적 해석을 위한 프로그램을 2차원의 모델을 사용하여 구축하였다. 본 논문에서 제시한 모델링은 회전체를 2차원으로 표현함으로써 3차원에 비해 시스템의 표현을 보다 단순화하여 시스템의 구조를 쉽게 이해할 수 있도록 하였으며, 회전체를 서로 다른 재질의 다중 레이어로 모델이 가능하게 하였다. 또한 축계에 추가적 강성의 영향을 줄 수 있는 열박음 부분에 대하여, 그 영향 정도를 선택적으로 입력할 수 있게 하여 열박음에 대한 효과를 조절할 수 있도록 하였다. 따라서 본 논문에서 제시하는 2차원 모델을 이용한 동특성 해석 프로그램의 해석 오차를 알아보기 위해 상용 프로그램의 해석 결과와 비교하였으며, 모델링을 위한 시간과 해석 수행 시간 역시 비교하였다.

Abstract: Flywheel energy storage system (FESS) is defined as a high speed rotating flywheel system that can save surplus electric power. The FESS is proposed as an efficient energy storage system because it can accumulate a large amount of energy when it is operated at a high rotating speed and no mechanical problems are encountered. The FESS consists of a shaft, flywheel, motor/generator, bearings, and case. It is difficult to simulate rotor dynamics using common structure simulation programs because these programs are based on the 3D model and complex input rotating conditions. Therefore, in this paper, a program for the FESS based on the 2D FEM was developed. The 2D FEM can model easier than 3D, and it can present the multi-layer rotor with different material each other. Stiffness changing of the shaft caused by shrink fitting of the hub can be inputted to get clear solving results. The results obtained using the program were compared with those obtained using the common programs to determine any errors.

- 기호설명 -

E : 탄성계수
L : 길이

d₁ : 외경
d₂ : 내경
R : 반경
I : 관성모멘트
k : 베어링 강성
c : 베어링 감쇠

† Corresponding Author, bgchoi@gnu.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

1. 서론

플라이휠 에너지 저장 장치(Flywheel Energy Storage System, 이하 FESS)란 잉여 전기에너지를 회전 운동에너지로 저장한 후 필요 시 다시 전기 에너지로 변환하여 사용하는 장치로, 무정전 전원장치로 이용하거나 발전소에서 잉여전력 저장의 용도로 사용할 수 있다. 다시 말해, 전기에너지를 모터에 의해 에너지가 저장되는 원판의 회전을 돌려 회전운동에너지 상태로 저장해 두었다가 필요시 에너지가 저장되어 있는 회전체로부터 발전기를 작동시켜 전기에너지를 얻을 수 있게 되어 있는 에너지 저장 장치이다.⁽¹⁾

FESS는 에너지 저장법에 대한 분야에서 세계적으로 연구되어지고 있고, 그 저장 용량을 증대하기 위한 노력들이 진행되고 있다. FESS의 핵심 부분인 플라이휠은 큰 에너지를 저장하기 위해 높은 질량관성을 가지도록 설계되며, 높은 에너지를 저장하기 위해 회전속도 역시 상당히 높기 때문에 특수한 복합재를 사용하여 제작되고 있다.

또한 이중 축계 시스템의 형태이기 때문에, 일반 상용 프로그램을 이용한 동특성 해석은 쉽지 않은 일이다. 특히 MSC.Patran/Natran의 경우 Rotor Dynamic 해석을 위해선 축계를 단순 빔(Beam) 형태로 모델링을 하여야 하기 때문에, 본문에서 다루고자 하는 FESS와 같은 2중 축계 시스템(Fig.1) 해석은 매우 어렵다 할 수 있다. 그리고 상용 프로그램은 일반적으로 3D 모델을 기반으로 하기 때문에 모델의 수정 시 많은 시간과 노력이 필요하게 된다.

따라서, 본 논문에서 제시하는 프로그램은 모델링을 2D 유한요소법^(2,3)을 통하여 보다 간편하게 모델링을 수행할 수 있으며, 다중 재질 및 레이어(Layer)를 가지는 축계 또한 모델링 할 수 있도록 하였다. 그리고 다중 재질의 축계에서, 서로 다른 재질의 두 파트가 열박음에 의해 결합이 된다면 열박음에 대한 추가적인 강성이 축계에 발생하기 때문에, 그에 대한 영향 정도를 선택할 수 있도록 하여 보다 정확한 해석 결과값을 얻을 수 있도록 하였다. 게다가, 축과 플라이휠의 결합을 위한 허브(Hub)에서 발생하는 강성에 대한 평가를 할 수 있는 기능 또한 추가되었다.

그러므로 본 논문에서는 유한요소법 2D 모델

을 기반으로 FESS와 같이 2중 축계로 구성된 시스템의 동특성 해석을 위해 Matlab⁽⁴⁾ 기반으로 개발된 프로그램을 제시한다. 그리고 제시한 프로그램의 해석 결과 오차를 확인하기 위해 상용 프로그램인 Ansys Workbench⁽⁵⁾와 MSC. Patran / Nastran⁽⁶⁾의 결과와 비교하였다.

2. 본론

2.1 개발 프로그램 소개

DuRoDA(Dual Rotor Dynamic Analysis System, 이하 DuRoDA)는 단일 축계 또는 이중 축계 시스템의 동특성 해석을 위해 2차원 유한요소 모델을 기반으로 하는 FESS의 Rotor Dynamics를 위한 프로그램이다.

2차원 유한요소법을 기반으로 하기 때문에, 축계를 축 방향으로 일정 요소로 구분하고, 각 구분된 요소에 직경 정보 및 두께 정보를 입력하는 것으로 모델링을 마칠 수 있다. 또한 단일 축계라도 다중의 재질로 구성이 될 수 있기에, 그에 대한 정보를 입력할 수 있는 Layer 개념이 추가되어 있다. Fig. 1은 DuRoDA에 입력되는 2중 축계 형태 FESS 모델의 한 예를 보여준다.

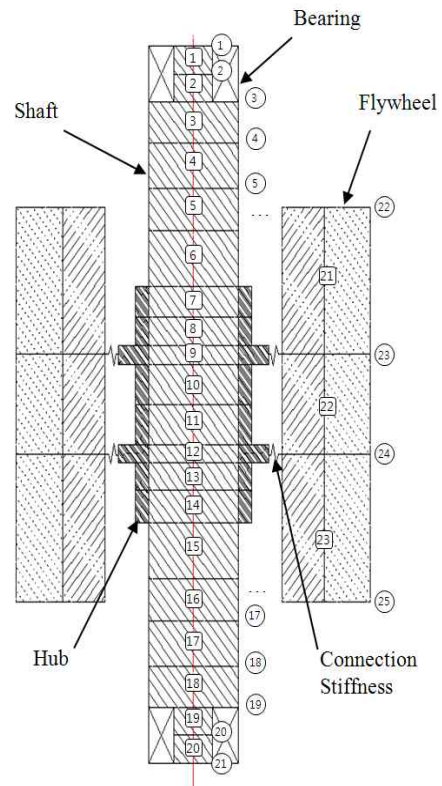


Fig. 1 Example of the 2D model for DuRoDA

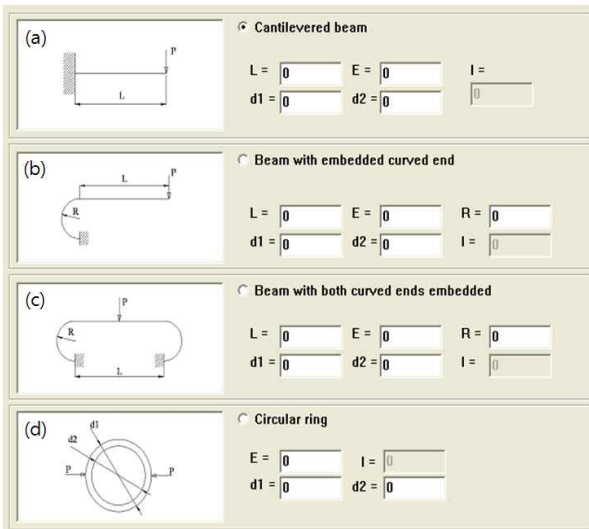


Fig. 2 Calculation window for connection stiffness, (a) Cantilevered beam, (b) Beam with embedded curved end, (c) Beam with both curved ends embedded, (d) Circular ring

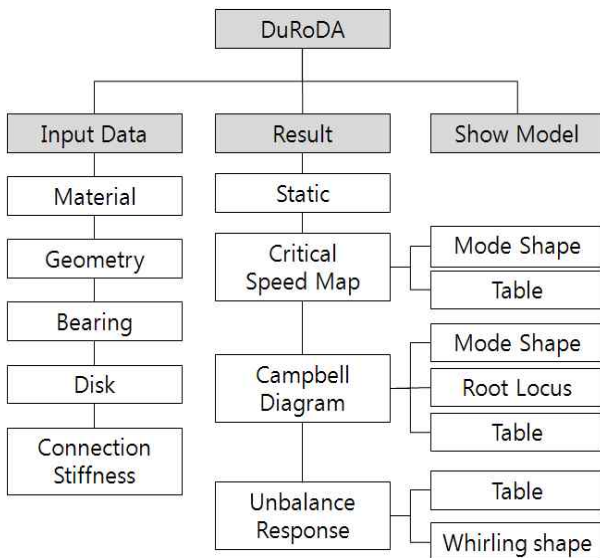


Fig. 3 Structure of DuRoDA program

Fig. 1에서 단일 재질로 구성된 Shaft는 총 20개의 요소로 구분이 되며, 이중 재질의 Flywheel은 3개의 요소로 구분이 된다. 이 두 축은 사이의 Hub와 Connection Stiffness로 연결이 되며, Hub는 Shaft에 열박음⁷⁾되는 형태로 본다.

여기서 Shaft와 Flywheel의 요소는 동일한 위치에 존재하더라도 각 요소가 같은 길이를 가지지 않는다. 단, Connection Stiffness가 입력되는 두 부분에 대한 위치 정보는 동일해야 한다.

Connection Stiffness란 두 축계가 결합되는 부분

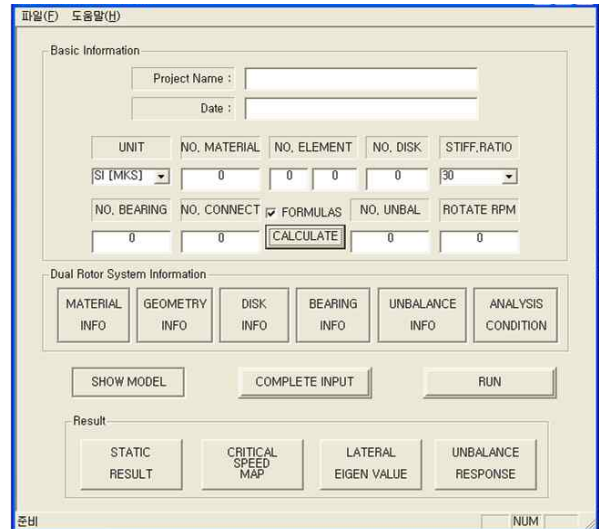


Fig. 4 Main window of DuRoDA

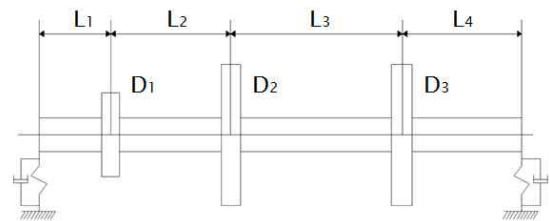


Fig. 5 Shaft & disk model for the verification of 2D program

의 강성을 입력하여 두 축계간의 간섭효과를 주기 위한 것으로 사용자의 기준에 따라 Fig. 2와 같이 4가지의 형태로 계산이 가능하며 임의로 입력이 가능하다.

Fig. 1과 같은 시스템에서 또 하나 고려될 사항은 자이로스코프 효과이다. 이 효과는 DuRoDA에서 시스템 전체의 질량 및 강성 행렬이 구성될 때 각 요소의 관성모멘트가 구해져 운동방정식에 자이스코프 항으로 입력이 되도록 작성되었다.

DuRoDA의 기능들은 Fig. 3과 같은 모듈로 구성되어 있으며 Fig. 4와 같은 메인 화면에 대해서 각 버튼으로 구동된다.

2.2 DuRoDA 해석 검증

DuRoDA를 검증하기 위해 인용된 모델은 Fig. 5와 같이 Lalanne & Ferraris 모델(3)로, 3개의 서로 다른 디스크를 가지는 단일 축계이다. 본 모델의 베어링 강성은 Table 1에 설명된 것과 같이 두 방향에 대해 서로 다른 값을 가지는 이방성 베어링임을 알 수 있다.

Table 2 Specifications of the verification model

Disk		D1	D2	D3
Thickness(H_i)		0.05 m	0.05 m	0.06 m
In Diameter		0.05 m	0.05 m	0.05 m
Out Diameter		0.12 m	0.20 m	0.20 m
Shaft	Length	$L_1 = 0.2$ m, $L_2 = 0.3$ m, $L_3 = 0.5$ m, $L_4 = 0.3$ m		
	Diameter	0.05 m		
Bearing		$k_{xx}=50$ MN/m, $k_{yy}=70$ MN/m, $k_{xy}=k_{yx}=0$, $c_{xx}=0.5$ kNs/m, $c_{yy}=0.7$ kNs/m, $c_{xy}=c_{yx}=0$		
Material		Elastic Modules = 200 GPa, Density = 7,800 kg/m ³ , Poisson Ratio = 0.3		

Table 3 The critical speed of the verification model in 25,000RPM

Mode	Critical speed (Hz)		
	TMM	FEM	DuRoDA
1B	55.39	55.41	55.43
1F	67.29	67.21	67.24
2B	158.01	157.90	158.06
2F	194.08	193.71	193.97
3B	248.82	249.90	250.01
3F	404.60	407.62	408.38

Lalanne & Ferraris 모델을 이용한 해석결과를 Table 2와 Fig. 6에 참고문헌의 결과와 비교하여 나타내었다. Table 2와 같이 운전속도 25,000rpm에서 얻을 수 있는 고유진동수는 문헌에서 제시된 결과와 매우 근접함을 알 수 있고, Fig. 6에 나타난 Campbell Diagram 역시 문헌과 동일함을 알 수 있다.

그러므로 본 해석 프로그램 DuRoDA의 단일축계에 대한 해석 결과의 신뢰성은 상당히 높다는 것을 알 수 있다.

2.3 FESS 적용

2.3.1 모델

본 연구에 사용된 FESS 모델은 샤프트, 허브, 2개 층의 플라이휠 및 전자기 베어링으로 구성되어 있다. 샤프트의 길이는 1,119mm이며, 플라이휠의 최대 직경은 594mm, 최소 직경 341mm, 길

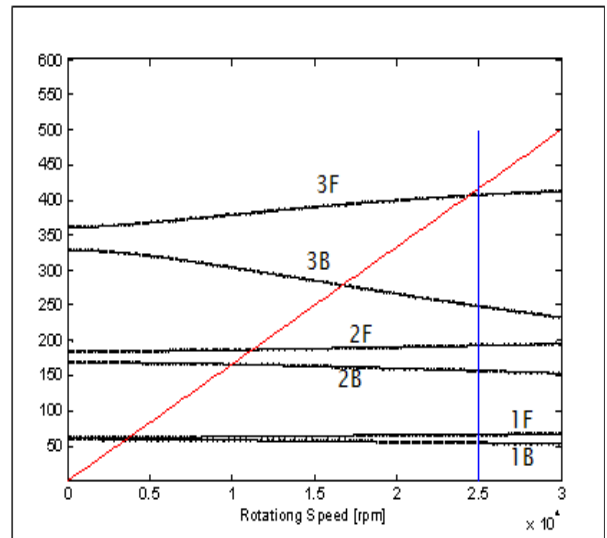
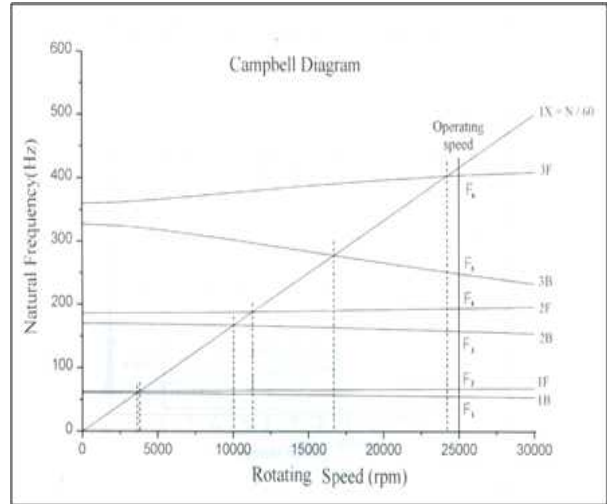


Fig. 6 Campbell diagram of verification model (top: reference, bottom: DuRoDA)

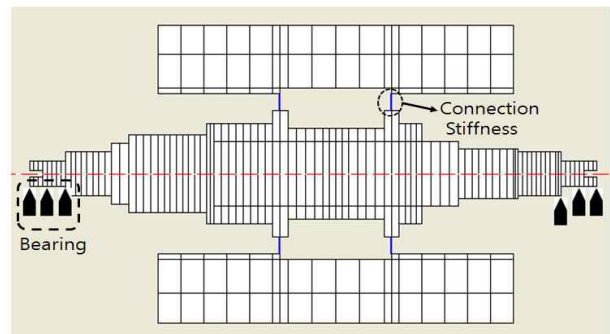


Fig. 7 2D FEM model for DuRoDA

이 700mm이다. 적용된 재질은 SUS304로 모든 부분에 동일하게 주어졌다.

본 모델의 축은 총 92개의 요소로 나뉘어졌으며, 축 요소에 Hub가 포함되었다. Flywheel은 18

Table 3 Modeling information

	MSC.Patran	Ansys	DuRoDA
No. Node	49592	81537	112
No. Element	45371	25594	110
Type	Hex	Tetra	Ract

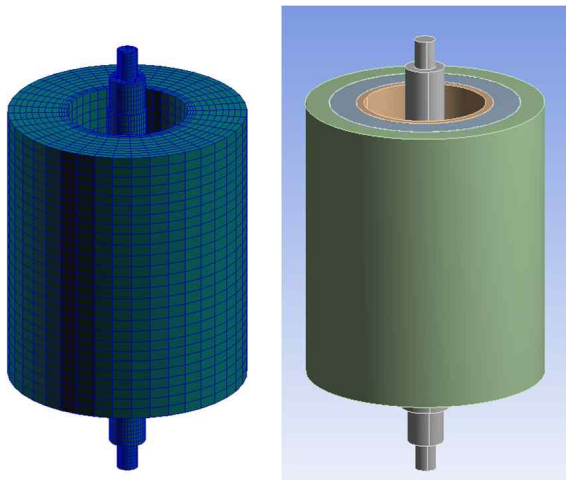


Fig. 8 3D model for common programs(left : MSC. Patran, right : Ansys)

개의 요소로 분할되었고, 총 2개의 노드에 체결 강성이 적용되었다(Fig. 7).

경계조건은 모든 프로그램에서 축의 양 끝단에 실제 베어링이 결합될 부분에 접선 방향을 제외한 세 변위에 대해 고정이 되었다.

DuRoDA의 검증을 위해 정지상태의 Modal 해석이 수행되었으며, 운전속도의 변화에 따른 Mode의 변화를 알아보기 위한 해석은 상용 프로그램의 모델링 방식이 일반적 구조해석 시와 상이하게 축계를 빔 요소로 단순화하여 수행하여야 한다. 따라서 실질적으로 플라이휠이 축의 모드 형상에 영향을 줄 수 있는 부분에 대해 표현을 할 수 없기 때문에 운전속도 변화에 따른 모드 형상 비교 및 고유진동수의 비교는 할 수 없다. 그러므로 본 모델을 이용한 해석은 Modal 해석만 수행하여 세 프로그램에 의한 결과 값을 비교하였다.

2.3.2 Modal 해석 결과

본 모델은 축의 양 끝단이 고정되었기 때문에 강체모드인 Palleral mode와 Conical mode는 나타나지 않았으며, 세 프로그램의 모드 형상 비교

Table 4 Comparison of the results (Unit : Hz)

	MSC.Nastran	Ansys	DuRoDA
1 st	98.2	107.5	96.2
2 nd	160.3	178.9	171.5
3 rd	1,413.1	1,598	1,434.7
Time	927 sec	1,360 sec	2 sec
error (%)			
MSC Nastran	-	1 st : 8.6 2 nd : 10.4 3 rd : 11.6	1 st : 2 2 nd : 6.5 3 rd : 1.5
Ansys	1 st : 8.6 2 nd : 10.4 3 rd : 11.6	-	1 st : 10.5 2 nd : 4.1 3 rd : 10.2

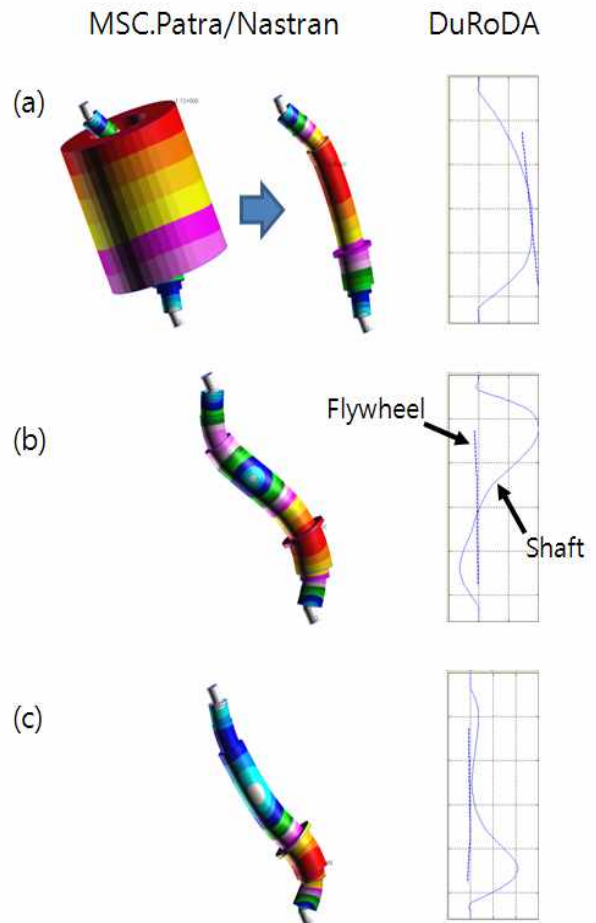


Fig. 9 Mode shape, (a) 1st Bend, (b) 2nd Bend, (c) 3rd Bend

결과 Fig. 9과 같이 모두 동일하게 나타남을 확인하였다.

MSC.Patran과 Ansys의 경우, 축의 모드 형상을 알아보기 위해 Fig. 9(a)와 같이 플라이휠을 숨기는 작업이 필요하였다. 하지만 DuRoDA의 경우 축(Fig. 9 우측의 실선)과 플라이휠의 모드(Fig. 9 우측의 점선)를 동시에 표현하기 때문에 모드 형상의 이해가 더욱 수월함을 알 수 있다.

Table 4는 세 프로그램에 의해 얻어진 모드 해석 결과로, DuRoDA와 상용 프로그램을 비교하였을 때 최소 1.5%, 최대 10.5%의 오차가 있음을 알 수 있다. 하지만 상용 프로그램의 결과를 서로 비교하였을 때 1차 굽힘 모드에서 8.6%, 3차 굽힘 모드에서 11.6%의 오차를 나타내었다. 따라서 DuRoDA가 가지는 오차는 일반적으로 가질 수 있는 오차로 사료되므로, 0 rpm에서의 해석 결과는 상당히 신뢰성이 높은 것으로 판단된다.

그러나 해석에 필요한 시간을 비교하였을 때, MSC.Patran/Nastran과 Ansys는 1,000 초 정도 또는 그 이상의 시간을 필요로 하였으나 DuRoDA는 단 2초 밖에 걸리지 않아 시간적으로 상당히 우월한 것으로 나타났다. 이는 기본적으로 해석을 위한 모델의 노드와 요소(Element)의 개수에 의해 영향이 있기 때문에 3차원 모델에 비해 상대적으로 수의 요소와 노드를 가지는 2차원 모델의 해석이 빠름을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서 FESS의 Rotor Dynamics를 위한 2D FEM 방식을 응용한 해석 프로그램을 개발하였다. FESS는 크게 축과 플라이휠로 구성된 이중 축계로 볼 수 있으며, 두 축은 허브를 통하여 서로 체결되어 있는 구조이다. 이러한 구조에 대한 해석을 위해 크게 아래의 3 가지 정보를 입력할 수 있는 기능을 적용하였다.

- (1) 허브의 열박음 간섭량에 대한 정보를 입력
- (2) 두 축을 연결하기 위한 Connection Stiffness
- (3) 서로 다른 재질을 가지는 Multi-Layer

이 3 가지 기능을 추가한 DuRoDA의 해석결과를 검증하기 위해 Lalanne & Ferraris 모델을 사용하였으며, 그 결과는 참고문헌에서 제시한 결과와 매우 유사하였다. 따라서 DuRoDA의 단일 축계에 대한 해석결과 신뢰성은 상당히 높은 것을

알 수 있었다.

마지막으로 FESS의 모델을 이용한 해석결과를 상용 해석 프로그램인 MSC.Nastran과 Ansys Workbench를 통하여 모드해석을 수행하였다. 해석결과, 세 프로그램에서 얻어진 모드 형상은 모두 동일한 것을 알 수 있었으며, 결과값 사이의 오차는 최소 1.5%에서 최대 11.6%로 근사하게 나타남을 알 수 있었다.

하지만 해석 수행을 위해 사용된 시간적 측면에선 요소와 노드의 개수가 상용 프로그램에 비해 매우 적은 DuRoDA가 상당히 우월하다는 것을 알 수 있었다.

그러므로 FESS를 위해 개발된 DuRoDA는 해석 결과에 대한 신뢰성을 가지며, 단 시간에 해석을 수행할 수 있기 때문에 실질적인 해석 수행에 매우 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 경상대학교 BK21 친환경 냉열에너지기 연구 사업팀, 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원(과제번호: No. CX73-09-0046호)과 교육과학기술부 및 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Kim, J. S. and Lee, S. H., 1998, "A Study on Vibration Characteristics of Flywheel Energy Storage System Using Superconducting Magnetic Bearings," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 170~177.
- (2) Bloch, H. P., 1996, *A Practical Guide to Steam Turbine Technology*, McGraw-Hill, pp. 67~173.
- (3) Yang, B. S., 2002, *The Vibration of Rotating Machine*, InterVision Inc., pp. 510~519.
- (4) Lawrence, K. 2007, *ANSYS Tutorial Releas 11*, Schroff Development Corp., Kansas.
- (5) Schaeffer, H. G., 2006, *MSC/Nastran Primer Static and Normal Modes Analysis a Study of Computerized Technology*, Seattle Goodwill, Seattle.
- (6) Herniter, M. E., 2005, *Programming in Matlab*, Thomson Brooks/Cole, Centage Learning, Inc., Florence.

- (7) Kim, Y. C., Park, H. J., Park C. H. and Kim, K. W., 2003, "Stiffness Effect of Fitting Interference for a Shrunk Rotor," *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 319~324.
- (8) Rao, J. S., 1996, Rotor Dynamics, New Age International(P) LTD., 3rd Edition, pp. 232~142.
- (9) Adams, M. L., 2001, Rotating Machinery Vibration, Marcel Dekker, Inc.
- (10) Bolund, B., Bernhoff, H. and Leijon, M., 2007, "Flywheel Energy and Power Storage Systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, No.11, pp. 235~258.
- (11) Sung, T. H., Lee, J. S., Han, Y. H., Han, S. C., Kim, C. J., Hong, G. W., Choi, S. K., Kim, Y. C. and Kim, S. J., 2001, "Flywheel Energy Storage System with a Horizontal Axle Mounted on High Tc Superconductor Bearings," *Cryogenics*, No.41, pp. 461~467