

연료전지용 터보압축기 회전축의 동특성 해석에 관한 연구

김흥건*, 나석찬+, 김성철++, 강영우++, 양균의***, 이희관****, 최문창*****

(논문접수일 2003. 8. 18, 심사완료일 2003. 10. 15)

A Study on the Dynamic Analysis in the Shaft of Turbo-Blower for Fuel Cell

H. G. Kim*, S. C. Nah+, S. C. Kim++, Y. W. Kang++,
G. E. Yang***, H. K. Lee****, M. C. Choi*****

Abstract

A 3-D FEM (Finite Element Method) analysis of the turbo-blower shaft attached to a fuel cell was performed using Lanczos algorithm. The modal analysis was analyzed in order to investigate natural frequency and maximum displacement for 10 times. It was found that the first mode of natural frequency is 109.1Hz with the maximum displacement of 0.16mm while the tenth mode of natural frequency is 2464Hz with the maximum displacement of 0.25mm. Consequently, the results of modal analysis of the turbo-blower for a fuel cell system show good dynamic responses.

Key Words : Fuel Cell(연료전지), Turbo-Blower(터보 압축기), Natural Frequency(고유진동수), Modal Analysis(모드해석), Finite Element Method(유한요소법), Lanczos Algorithm(란초스 알고리즘)

1. 서론

1980년대에 들어오면서 대기 중의 CO₂ 가스에 의한 온실효과에 의해 지구온난화 문제가 전 세계적인 문제로 인식되어지기 시작하면서 국제적인 환경회의 및 기후변화 협약

에 의하여 화석에너지 사용이 규제되기 시작하였다. 이러한 규제는 해가 거듭될수록 점차적으로 강도가 더해가고 있으며 국제 무역규제로까지 이어지고 있다. 또한 SO_x, NO_x, VOC 물질 등과 같은 유해 가스의 배출에 의한 대기환경 오염문제가 인류의 생존을 위협하는 전 세계적인

* 주저자, 전주대학교공학부(기계공학전공) (hkim@jeonju.ac.kr)
주소: 560-759 전북 전주시 완산구 효자동 3가 1200
+ 전북대학교 대학원 기계공학부
++ 전주대학교 대학원 기계공학과
+++ 전북대학교 기계공학부 교수
++++ 전북대학교 자동차·금형 TIC센터 선임연구원
***** (주)엔틀 사장

문제로 대두되면서 환경문제 해결을 위해 내연기관 사용을 줄임과 동시에 이를 대체할 수 있는 새로운 에너지를 개발하고자 투자와 노력을 아끼지 않고 있다. 이에 대응하기 위하여 저공해 자동차의 개발을 통한 공해 발생을 줄이기 위하여 전기자동차, 축전지와 내연기관의 하이브리드 자동차, 연료전지 자동차 등이 개발되고 있는데, 전기 자동차는 운행거리를 충분히 확보할 수 있는 축전지 기술의 실용화에 한계를 갖고 있다⁽¹⁾.

이러한 내연기관과 전기자동차의 문제점을 해결할 수 있는 유망한 기술이 연료전지를 이용한 전기자동차이다. 일반적으로 수소 연료 전지는 수소(H₂) 및 공기 중의 산소(O₂)를 발전기에 공급하여서 전기를 발생시키는 장치로서 무공해 자동차의 동력원, 청정 목적의 산업용 무공해 발전소 등의 용도를 포함하여, 전 세계적으로 지구의 환경 문제가 중요한 관심사로 떠오르고 있고, 이를 해결하기 위한 여러 가지 규제들이 국제적으로 제정되어 환경 보호를 위해 시행되고 있다. 미국의 캘리포니아주에서는 새로운 에너지 기술개발을 유도함과 동시에 환경오염문제의 해결을 위한 노력으로 1998년을 기준으로 하여 새로 제작되는 자동차의 2% 이상을 현재 시장형성이 거의 되어있지 않은 무공해 자동차로 제작하도록 법안을 제정하여 현재 인류가 당면한 환경오염 문제가 얼마나 심각한가를 보여주었다. 또한 이러한 무공해 자동차의 비율을 더욱 증가시켜, 2003년까지는 신 제작 자동차의 10% 이상을 무공해 자동차로 제작하도록 규제할 방침이다.

현재 미국 내의 다른 주들은 물론 캐나다지역에서까지 캘리포니아 주의 방침을 적용하는 것에 대해서 적극 검토하고 있는 실정이다. 이는 유럽의 여러 선진국에서도 마찬가지이다. 이에 가장 중요한 환경 공해는 주로 석유 연료의 사용에 의해서 발생되고 있는데, 국내에서 수송수단이 차지하는 석유 에너지 소모량은 97년 현재 약 22%를 상회하고 있으며, 전체 공해 발생량 중 차량 및 수송 수단에서 발생하는 것의 약 50.3%를 차지하고 있으며 해마다 계속 증가하고 있는 추세이기 때문에 차량에 의한 공해 발생을 절감시키는 것이 매우 중요하다⁽²⁾.

연료전지 자동차는 Time지가 선정한 2000년대 초반에 개발되어야 할 10대 기술 중의 하나로 현재 선진 각국이 실용화를 위해 연구가 추진 중에 있다. 그러나 상용화를 위해서는 몇 가지 해결해야 할 선결과제가 있는데 그 중에서 연료전지 자동차의 성능을 기존 내연기관 자동차 수준으로 높이기 위하여 고효율의 연료전지 성능 발휘를 위한 고효율 고속터보 압축기의 개발이 필요하다.

베어링 고속모터(Motor)에 관한 것이다. 현재 연료전지 자동차는 상용화 단계로서 부품효율 및 가격을 개선시키는 국제 기술 경쟁시기이며, 특히 공기 압축기를 이용하여 연료전지 내부에 공기를 공급시키기 위한 공기압축기의 전력 소모가 15kW 정도 소모됨으로서, 전체 발생 동력의 20% 정도 소요되는 실정으로 연료전지 자동차를 상용화함에 있어서 제일 큰 애로기술이다.

또한 연료전지로 들어가는 압축공기는 특성상 오일이 없어야 하는데 수소연료전지자동차 표준(Prototype)에 현재 쓰이고 있는 스크류(Screw)압축기는 오일 분리장치를 거쳐도 완전히 오일이 없는 것은 어렵고 자동차용이라는 것을 고려할 때 여전히 너무 무겁고 고가이다. 따라서 본 연구에서는 자동차용 터보압축기의 회전축에 동압 가스베어링을 이용한 고속모터의 개발의 위한 과도응답해석을 위하여, Lanczos 알고리즘을 활용하여 3차원 유한요소법(FEM)^(3,4) 중 회전축의 고유진동수(frequency)의 모드해석(Modal Analysis)을 수행하여 동적 특성을 확인하고자 한다.

2. Lanczos 알고리즘

일반적으로 사용되는 모드추출 방법에는 란초스(Lanczos) 축차해법, 부공간(Subspace Iteration) 축차해법, 축소(Reduced) 해법, 감쇠(Damped) 해법, 비대칭(Unsymmetric) 해법 등이 있다. 고유치 해석은 근본적으로 축차에 의해 이루어지고 있으며, 전 시스템의 고유치 보다는 그중 극히 작은 수의 일부 고유치들에 관심이 있는 경우가 대부분이며, 이에 적합한 부공간 축차법(Subspace Iteration Method)이나 Lanczos 축차 해법이 가장 많이 사용되고 있다.

본 연구에서 사용된 부공간축차법⁽⁵⁾은 공학해석에서 가장 많이 이용되고 있는 고유치 해법이며, 대형 시스템의 일부 고유치와 해당 고유벡터를 구하는 방법이다. 부공간 축차법은 근본적으로 다음 세 과정을 반복하여 고유치를 계산한다. 구하고자 하는 고유치 수보다 적당히 큰 부공간 크기를 정하고 초기벡터를 근사한다. 동시 역축차기법을 이용하여 현재 근사공간에서 가장 좋은 근사 고유치와 고유벡터를 구한다. 최근 수렴을 가속화시키기 위한 연구, 초기벡터를 효율적으로 구하는 연구, 란초스 방법과의 복합을 위한 연구 등도 이루어지고 있다. 란초스 방법⁽⁶⁾은 변환에 의해 행렬을 삼대각 행렬(Tri-Diagonal Matrix)로 만들고, 이로부터 고유치와 고유벡터를 계산하는 방법이다. 실제 이용 시에는 컴퓨터 실수표현의 한계로 인해 란초스 벡터의 수치성이 훼손된다는 것이 난점으로 이를 해결하기 위한 여러 가

지 방법들이 제안되었다. 또 증근 고유치를 놓칠 가능성이 있다는 점, 증근 아닌 고유치가 복사될 수 있다는 점 등이 이 방법의 단점으로 언급되고 있다. 대각 질량행렬의 문제에 대해 란초스 방법과 부공간 축차법의 효율을 비교한 연구에서는 란초스 방법의 효율이 상대적으로 우수하고 구하는 고유치 개수가 많아질수록 그 차이가 커지는 것으로 나타났다. 따라서 신뢰성과 효율성을 만족시키기 위해서 본 논문에서는 란초스 알고리즘을 사용한 모드추출방법을 사용하였으며, 이 알고리즘은 다음과 같다.

란초스(Lanczos) 알고리즘은 시스템 행렬을 삼대각 행렬(Tridiagonal Matrix)로 변환시킴으로써 모드 형상벡터가 최초의 두 벡터와 직교성을 만족시키도록 하는 것이다. 해석에 이용하기 위하여 하중벡터{P}는 하중분포를 나타내는 하중분배벡터(Load Distribution Vector) {R}과 시간의 함수(Amplitude Function) f(t)로 분리한다. 첫 번째 벡터는 시스템의 정적 평형방정식으로부터 다음과 같이 만들어진다.

$$[K]\{q_1\}=[R] \quad (1)$$

여기서, $\{q_1\}=[K]^{-1}\{R\}$ 이다. 만들어진 벡터는 질량행렬에 대해 직교하도록 정규화 된다.

$$\{\psi_1\}=\frac{1}{\beta_1}\{q_1\} \quad (2)$$

여기서, $\beta_1=\sqrt{\{q_1\}^T[M]\{q_1\}}$ 이다.

두번째 이후의 모드 형상들은 시스템이 바로 앞에서 만들어진 모드형상으로 진동할 때 발생하는 관성력에 의해 생기는 정적 처짐으로부터 다음과 같이 만들어진다.

$$[K]\{q_2\}=[M]\{\psi_1\} \quad (3)$$

$$\{\tilde{q}_2\}=\{q_2\}-\alpha_1\{\psi_1\} \quad (4)$$

여기서 α_1 은 두 번째 벡터가 앞의 벡터와 질량행렬에 대해 직교성을 갖기 위한 계수로서 Gram-Schmidt의 직교화 과정에서 만들어진다.

$$\alpha_1=\{\psi_1\}^T[M]\{q_2\} \quad (5)$$

$$\{\psi_2\}=\frac{1}{\beta_2}\{\tilde{q}_2\} \quad (6)$$

여기서

$$\beta_2=\sqrt{\{\tilde{q}_2\}^T[M]\{\tilde{q}_2\}} \text{ 이다.}$$

그리고 세 번째 벡터는 다음과 같다.

$$[K]\{q_3\}=[M]\{\psi_2\} \quad (7)$$

$$\{\tilde{q}_3\}=\{q_3\}-\alpha_2\{\psi_2\}-\beta_2\{\psi_1\} \quad (8)$$

$$\text{여기서 } \alpha_2=\{\psi_2\}^T[M]\{q_3\}$$

$$\beta_2=\{\psi_1\}^T[M]\{q_3\}$$

이 되며, 세 번째 벡터가 첫 번째 벡터와 직교성을 갖기 위한 계수 β_2 가 두 번째 벡터의 표준화 요소와 일치한다.

$$\{\psi_3\}=\frac{1}{\beta_3}\{\tilde{q}_3\} \quad (9)$$

여기서 $\beta_3=\sqrt{\{\tilde{q}_3\}^T[M]\{\tilde{q}_3\}}$ 이 된다. 네 번째 벡터는 다음과 같다.

$$[K]\{q_4\}=[M]\{\psi_3\} \quad (10)$$

$$\{\tilde{q}_4\}=\{q_4\}-\alpha_3\{\psi_3\}-\beta_3\{\psi_2\}-\gamma_3\{\psi_1\} \quad (11)$$

$$\text{여기서 } \alpha_3=\{\psi_3\}^T[M]\{q_4\}$$

$$\beta_3=\{\psi_2\}^T[M]\{q_4\}$$

$$\gamma_3=\{\psi_1\}^T[M]\{q_4\}$$

$$\{\psi_4\}=\frac{1}{\beta_4}\{\tilde{q}_4\} \quad (12)$$

여기서, $\beta_4=\sqrt{\{\tilde{q}_4\}^T[M]\{\tilde{q}_4\}}$ 이다.

β_3 는 세 번째 벡터의 표준화 요소(Normalization Factor)와 동일하다. 여기서 이 방법의 중요한 장점이 나타나는데 그것은 γ_3 가 0(Zero)이 됨을 간단한 행렬 연산에 의해 확인할 수 있다는 것이다. 이는 세 번째 벡터가 첫 번째 벡터와 자동적으로 직교조건을 만족함을 의미하며, 따라서 Gram-Schmidt 과정을 다시 적용할 필요가 없음을 보여준다.

계속하여 추후에 만들어지는 벡터는 앞의 절차와 같이 단지 두 벡터에 대하여만 직교하도록 만들어지며, 그렇게 만들어진 벡터는 그 이전의 모든 벡터들과는 자동적으로 직교조건을 만족하는 매우 편리한 형태의 모드 형상 벡터가 만들어지게 된다.

3. 회전체의 유한요소 모델링

자동차 연료전지 터보 압축기를 개발하기에 앞서 개념설계를 위하여 작성한 터보 압축기의 3D 모델은 Fig. 1과 같다.

또한 터보 압축기의 회전축 고유진동수의 CAE 해석을 위한 유한요소해석⁽⁷⁾을 위해서 유한요소해석 프로그램Ansys를 사용하였고 여기서 사용된 모델의 절점 수는 33,072개이며, 요소 수는 21,835개이다. 회전체의 재질은 일반강으로 설정하고 그에 대한 재료의 물성치는 Table 1과 같다. 앞에서 언급한 바와 같이 축차해법은 Lanczos 축차해법을 사용하였으며 0-5kHz의 범위 내에서 총 10개의 모드 수를 도출하였다.

4. 터보 블로워 회전체의 모드해석결과

Fig. 2(a)는 유한요소해석(FEM)을 위한 회전체의 모델이며, 회전체는 축 대칭이므로 대칭 구조물만 모델링하여 해석하였다⁽⁸⁾. 회전체의 요소 설정은 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같다.

터보압축기 회전축의 구속조건으로는 양쪽 축의 끝단을 고정하였다. 이 때 나타난 1차 모드에서 10차 모드해석결과는 Fig. 3~12와 같은 결과를 나타내었다. 이 때 점선 부위는 변형 전의 형상을 보이고 있으며 실선부위는 변형 후의 형상을 보이고 있다. 또한 컴퓨터를 이용한 유한요소해석

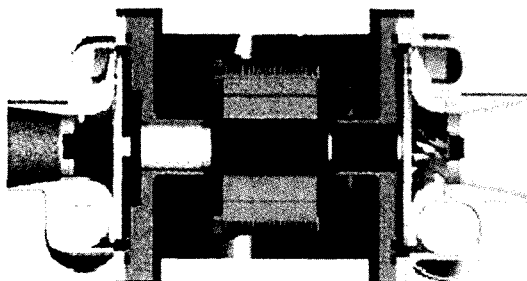
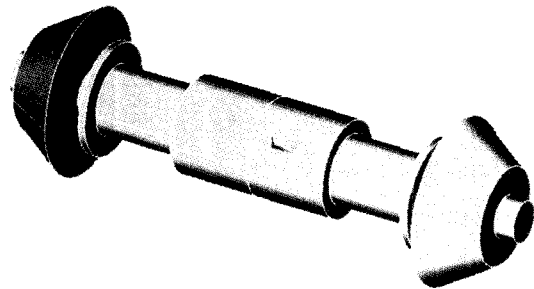


Fig. 1 The 3-D model of turbo-blower

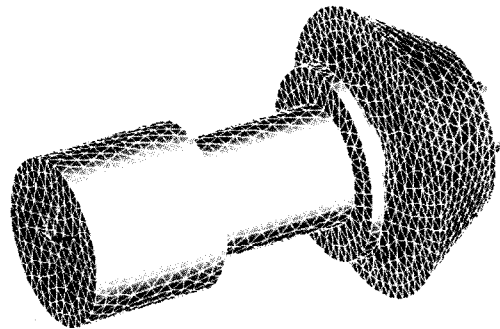
Table 1. The Material properties of the turbo-blower rotor shaft

Young's Modulus(E)	210E9 N/m ²
Density(ρ)	7820 kg/m ³
Poisson's Ratio(ν)	0.29

결과 10차모드에서 최대 변형량이 0.25mm를 보이고 있으며 3차 모드에서 최소 변형량 0.14mm를 보인다. 10차까지의 총 모드해석 결과와 최대 변형량은 Table 2에서 보는 바와 같고 각각 모드에서 최대변형량이 큰 차이를 보이지 않는다.



(a) The 3-D model of the rotating turbo-blower Shaft



(b) The symmetric FEM model of turbo-blower rotor shaft

Fig. 2 The model of rotor used in the turbo-blower

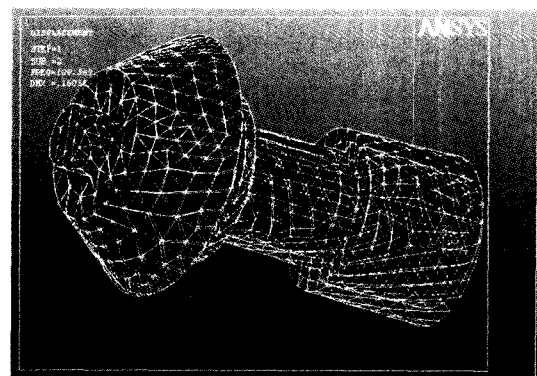


Fig. 3 The 1st mode shape of turbo-blower rotor shaft

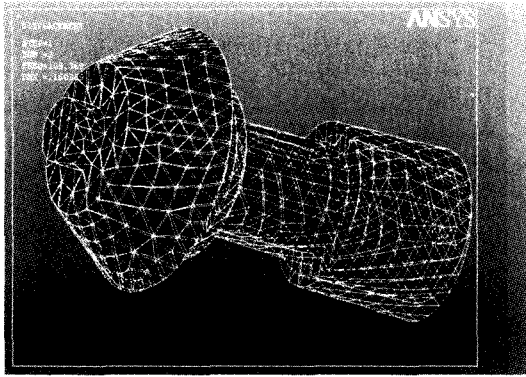


Fig. 4 The 2nd mode shape of turbo-blower rotor shaft

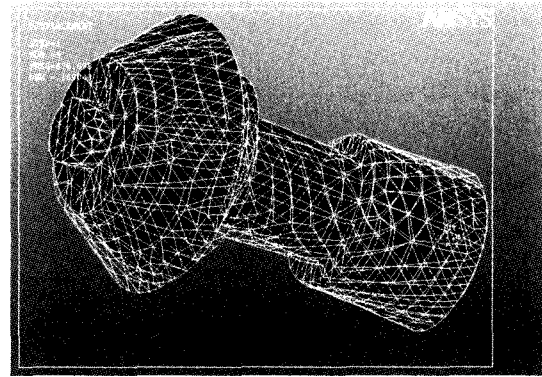


Fig. 7 The 5th mode shape of turbo-blower rotor shaft

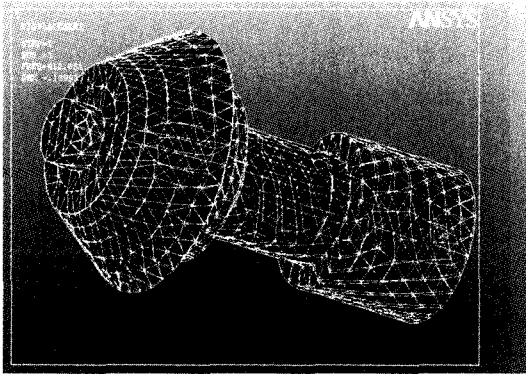


Fig. 5 The 3rd mode shape of turbo-blower rotor shaft

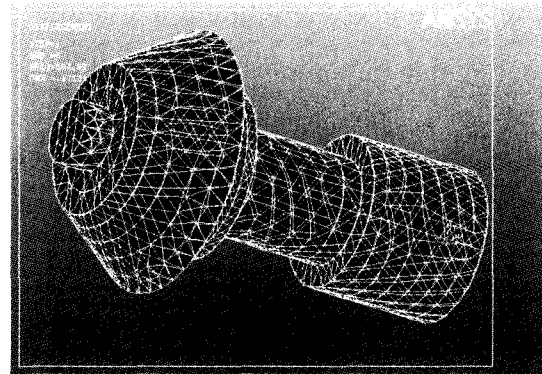


Fig. 8 The 6th mode shape of turbo-blower rotor shaft

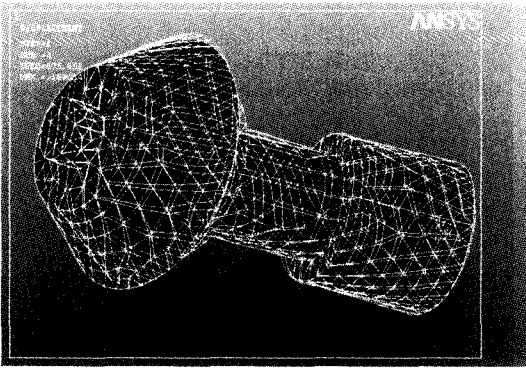


Fig. 6 The 4th mode shape of turbo-blower rotor shaft

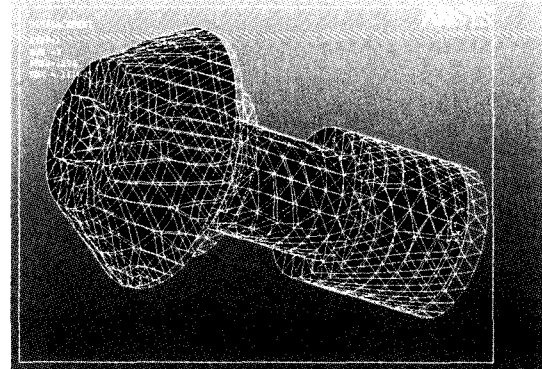


Fig. 9 The 7th mode shape of turbo-blower rotor shaft

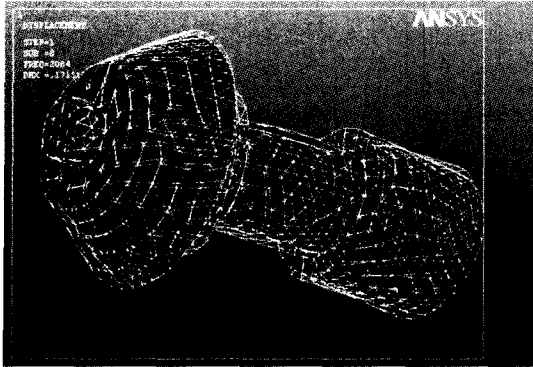


Fig. 10 The 8th mode shape of turbo-blower rotor shaft

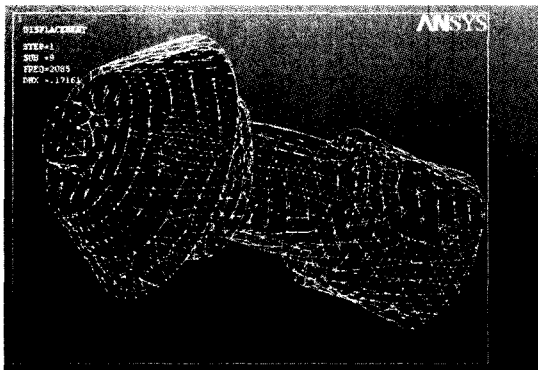


Fig. 11 The 9th mode shape of turbo-blower rotor shaft

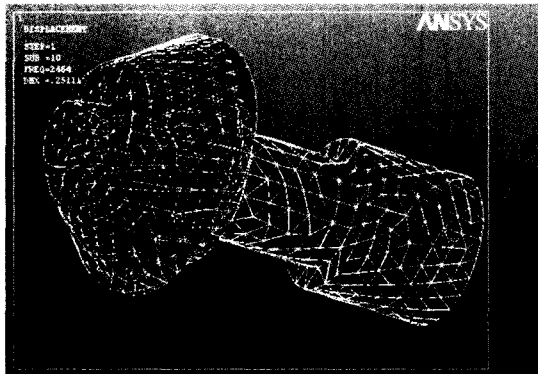


Fig. 12 The 10th mode shape of turbo-blower rotor shaft

Table 2 The natural frequencies an max-displacements for 10 modes

Mode Number	frequencies(Hz)	max-displacements(mm)
1st Mode	109.1	0.16
2nd Mode	109.3	0.16
3rd Mode	412.6	0.14
4th Mode	675.6	0.17
5th Mode	676.6	0.17
6th Mode	884.3	0.17
7th Mode	1294.0	0.17
8th Mode	2084.0	0.17
9th Mode	2085.0	0.17
10th Mode	2464.0	0.25

5. 결론

본 논문에서는 자동차 연료전지에 사용되는 터보압축기의 초기개념설계를 위하여 유한요소법을 활용한 모드해석을 수행함으로써 회전체의 고유진동수를 알기 위해서 일반적으로 많이 사용되는 란초스 축차해법을 통하여 10차에 걸친 모드 해석을 수행하였다.

- (1) 유한요소법(FEM)을 이용한 해석결과 회전체의 주된 응답은 109-2464Hz(1-10차 모드) 범위 내에서 발생하였다.
- (2) 최대 변형량의 크기는 0.25mm로서 설계 및 제작 시 공차 0.35mm보다 적게 나타나므로 동적으로 큰 문제를 발생시키지 않는 범위 내에 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

후기

본 연구의 일부는 2003년도 지역전략사업 석·박사 연구인력사업(KOTEF)의 연구결과입니다.

참고문헌

- (1) Yang, W. C., 2000, "Fuel Cell Electric Vehicles: Recent Advances and Challenges-Review," *KSAE*, Vol. 1, No. 1, pp. 9~16.

- (2) Kim, H. G., Kang, Y. W., Kim, Y. S., Hwang, S. W., and Yoo, K. H., 2003, "Fuel Cell Technology Development and Practicality," *KSMTE*, Vol. 12, No. 3, pp. 30~39.
- (3) Kim, H. G. and Yang, S. M., et. al., 2003, "A Study on the Optimal Shape Design of 2-D Structures," *KSMTE*, Vol. 12, No. 2, pp. 9~16.
- (4) Cook, R. D., Malkua, D. S., and Plesha, M. E., 1989, *Concept and Applications of Finite Element Analysis*, Third Edition, John Wiley and Sons, New York, pp. 163~295.
- (5) Lee, B. C., and Oh, S. H., 1996, "A Study on the Development of an Efficient Subspace Iteration Method," *KSME (A)*, Vol. 21, No. 11, pp. 1852~1861.
- (6) Shim, J. S, Hwang, E. S., and Park, T. H., 1995, "Structural Dynamic Analysis by Ritz Vector Method Modified with Lanczos Algorithm," *COSEIK*, Vol. 8, No. 4, pp. 181~187.
- (7) Im, H. B., Kim, K. S., Heo, J. W., and Chung, J. T., 2002, "Seismic Analysis of an Axial Blower Using a Commercial FEM Code," *KSNVE*, Vol. 12, No. 3, pp. 181~186.
- (8) Park, J. H., and Yoo, H. H., 1997, "Vibration Analysis and Experimental Study for Rotating Structures," *KSME (A)*, Vol. 21, No. 2, pp. 272~280.