

## 터보압축기의 과도동적해석에 관한 연구

김홍건\*, 양성모\*\*, 노홍길\*\*\*, 나석찬\*\*\*, 강영우\*\*\*\*

# A Study on the Transient Response in Turbo-Blower

H. G. Kim, S. M. Yang, H. G. Noh, S. C. Nah, and Y. W. Kang

### Abstract

*An analysis of the turbe-blower shaft attached to fuel cell using 3-D FEA (Finite Element Analysis) is proposed by Lanczos algorithm. The modal analysis was performed in order to investigate natural frequencies for 10 times. It is found that the first mode of natural frequency is 111.243 and the maximum displacement is 0.16mm. Consequently, It is found that the dynamic design of turbo-blower shows a good responses transiently.*

의(COP3)]. 이러한 규제는 해가 거듭될수록 점차적으로 그 강도가 더해가고 있으며 국제 무역규제로 까지 이어지고 있다. 또한 SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, VOC 물질 등과 같은 유해 가스의 배출에 의한 대기환경 오염 문제가 인류의 생존을 위협하는 전 세계적인 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 자동차등이 개발되고 있는데, 전기 자동차는 운행거리를 충분히 확보할 수 있는 축전지 기술의 실용화에 한계를 갖고 있다.

### 1. 서론

1980년대에 들어오면서 대기 중의 CO<sub>2</sub> 가스에 의한 온실효과에 의해 지구온난화 문제가 전 세계적인 문제로 인식되어지기 시작하면서 국제적인 환경회의 및 기후변화협약에 의하여 화석에너지 사용이 규제되기 시작하였다 [기후 변동 협약 조약국 회

이러한 내연기관과 전기자동차의 문제점을 해결할 수 있는 유망한 기술이 연료전지를 이용한 전기 자동차이다. 일반적으로 수소 연료 전지는 수소(H<sub>2</sub>) 및 공기 중의 산소(O<sub>2</sub>)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 새

\* 전주대학교공학부(기계공학전공)교수(hkim@jeonju.ac.kr)

\*\* 전북대학교 기계항공시스템공학부 교수

\*\*\* 전북대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\*\*\* 전주대학교 대학원 기계공학과

로운 에너지기술개발을 유도함과 동시에 환경오염 문제의 해결을 위한 노력으로 1998년을 기준으로 하여 새로 제작되는 자동차의 2%이상을 현재 시장 형성이 거의 되어있지 않은 무공해 자동차로 제작하도록 법안을 제정하여 현재 인류가 당면한 환경 오염문제가 얼마나 심각한가를 보여주었다. 또한 이러한 무공해 자동차의 비율을 더욱 증가시켜, 2003년까지는 신 제작 자동차의 10%이상을 무공해 자동차로 제작하도록 규제할 방침이다 [美 캘리포니아주 초저공해 차 의무판매규정].

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

본 논문은 자동차 연료전지 압축기를 위한 gas 베어링 고속 Motor에 관한 것이다. 현재 연료전지 자동차는 상용화 단계로서 부품효율 및 가격을 개선시키는 국제 기술 경쟁시기이며, 특히 공기 압축

기를 이용하여 연료전지 내부에 공기를 공급시키기 위한 공기압축기의 전력소모가 15kW정도 소모됨으로서, 전체 발생 동력의 20% 정도 소요되는 실정으로 연료전지 자동차를 상용화함에 있어서 제일 큰 애로기술이다.

또한 연료전지로 들어가는 압축공기는 특성상 완전 No Oil이어야 하는데 수소연료전지자동차 Prototype에 현재 쓰이고 있는 Screw압축기는 오일 분리장치를 거처도 완전 No Oil은 어렵고 자동차용이라는 것을 고려할 때 여전히 너무 무겁고 고가이다. 따라서 이 연료전지 자동차용 압축기에는 동압 Gas Bearing을 채용하여 Oil을 전혀 쓰지 않는 터보압축기가 가장 적합하며, 동압 Gas Bearing을 이용한 고속 Motor를 개발하기 위한 동적 과도응답해석에 초점을 맞추었다. 즉, 유한요소법을 활용하여 터보압축기에 사용되는 축의 고유진동수를 모달(Modal) 해석을 수행하여 동적 특성을 확인하고자 한다.

## 2. Lanczos Algorithm

일반적으로 사용되는 모드추출방법에는 란초스(Lanczos) 축차해법, 부공간(Subspace Iteration) 축차해법, Reduced 해법, Damped 해법, Unsymmetric 해법 등이 있다. 고유치 해석은 근본적으로 축차에 의해 이루어지고 있으며, 전 시스템의 고유치보다는 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.

부공간축차법<sup>(1)</sup>은 공학해석에서 가장 많이 이용되고 있는 고유치 해법이며, 대형 시스템의 일부 고유치와 해당 고유벡터를 구하는 방법이다. 부공간축차법은 근본적으로 다음 세

과정을 반복하여 고유치를 계산한다. 구하고자 하는 고유치 수보다 적당히 큰 부공간 크기를 정하고 초기벡터를 근사한다. 동시역축차기법을 이용하여 현재 근사공간에서 가장 좋은 근사고유치와 고유벡터를 구한다. 최근 수렴을 가속화시키기 위한 연구, 초기벡터를 효율적으로 구하는 연구, 란초스 방법과의 복합을 위한 연구 등도 이루어지고 있다. 란초스 방법<sup>(2)</sup>은 변환에 의해 행렬을 삼대각행렬(Tri-Diagonal Matrix)로 만들고, 이로부터 고유치와 고유벡터를 계산하는 방법이다. 실제 이용 시에는 컴퓨터 실수표현의 한계로 인해 란초스 벡터의 수지성이 훼손된다는 것이 난점으로 이를 해결하기 위한 여러 가지 방법들이 제안되었다. 또 중간 고유치를 놓칠 가능성이 있다는 점, 중간 아닌 고유치가 복사될 수 있다는 점 등이 이 방법의 단점으로 언급되고 있다. 대각 질량행렬의 문제에 대해 란초스방법과 부공간 축차법의 효율을 비교한 연구에서는 란초스방법의 효율이 상대적으로 우수하고 구하는 고유치 개수가 많아질수록 그 차이가 커지는 것으로 나타났다. 따라서 신뢰성과 효율성을 만족시키기 위해서 본 논문에서는 란초스 알고리즘을 사용한 모드추출 방법을 사용하였으며, 이 알고리즘은 다음과 같다.

란초스 알고리즘은 시스템행렬을 삼대각행렬(Tridiagonal Matrix)로 변환시킴으로써 모드 형상벡터가 최초의 두 벡터와 직교성을 만족시키도록 하는 것이다. 해석에 이용하기 위하여 하중벡터(P)는 하중분포를 나타내는 Load Distribution Vector {R}과 시간의 함수(Amplitude Function) f(t)로 분리한다. 첫번째 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 정규화된다.

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

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.

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

$$\left\{ \begin{array}{c} \sim \\ q_2 \end{array} \right\}=\{q_2\}-\alpha_1\{\psi_1\} \quad (4)$$

여기서  $\alpha_1$ 은 두 번째 벡터가 앞의 벡터와 질량행렬에 대해 직교성을 갖기 위한 계수로서 Gram-Schmidt의 직교화 과정에서 만들어진 다.

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

$$\{\psi_2\}=\frac{1}{\beta_2}\left\{ \begin{array}{c} \sim \\ q_2 \end{array} \right\} \quad (6)$$

여기서  $\beta_2=\sqrt{\left\{ \begin{array}{c} \sim \\ q_2 \end{array} \right\}^T[M]\left\{ \begin{array}{c} \sim \\ q_2 \end{array} \right\}}$ 이다. 그리고 세번째 벡터는 다음과 같다.

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

$$\left\{ \begin{array}{c} \sim \\ q_3 \end{array} \right\}=\{q_3\}-\alpha_2\{\psi_2\}-\beta_2\{\psi_1\} \quad (8)$$

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

$$\beta_2=\{\psi_2\}^T[M]\{q_3\}$$

이 되며 세번째 벡터가 첫 번째 벡터와 직교성을 갖기 위한 계수  $\beta_2$ 가 두번째 벡터의 Normalization Factor와 일치한다.

$$\{\psi_3\} = \frac{1}{\beta_3} \left\{ \begin{matrix} \sim \\ q_3 \end{matrix} \right\} \quad (9)$$

여기서  $\beta_3 = \sqrt{\left\{ \begin{matrix} \sim \\ q_3 \end{matrix} \right\}^T [M] \left\{ \begin{matrix} \sim \\ q_3 \end{matrix} \right\}}$  이다. 네번째 벡터는 다음과 같다.

$$[K]\{q_4\} = [M]\{\Psi_3\} \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{matrix} \sim \\ q_4 \end{matrix} \right\} = \begin{matrix} \{q_4\} - \alpha_3\{\psi_3\} \\ -\beta_3\{\psi_2\} - \gamma_3\{\psi_1\} \end{matrix} \quad (11)$$

여기서  $\alpha_3 = \{ \psi_3 \}^T [M] \{ q_4 \}$   
 $\beta_3 = \{ \psi_2 \}^T [M] \{ q_4 \}$   
 $\gamma_3 = \{ \psi_1 \}^T [M] \{ q_4 \}$   
 $\{ \psi_4 \} = \frac{1}{\beta_4} \left\{ \begin{matrix} \sim \\ q_4 \end{matrix} \right\} \quad (12)$

이 되며  $\beta_4 = \sqrt{\left\{ \begin{matrix} \sim \\ q_4 \end{matrix} \right\}^T [M] \left\{ \begin{matrix} \sim \\ q_4 \end{matrix} \right\}}$  이 된다.

이 때  $\beta_3$ 는 세번째 벡터의 Normalization Factor와 동일하다. 여기서 이 방법의 중요한 장점이 나타나는데 그것은  $\gamma_3$ 가 0(Zero)이 됨을 간단한 행렬 연산에 의해 확인할 수 있다는 것이다. 이는 세번째 벡터가 첫번째 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 직교조건

을 만족하는 매우 편리한 형태의 모드 형상 Vector가 만들어지게 된다.

### 3. 회전체의 유한요소 모델링

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

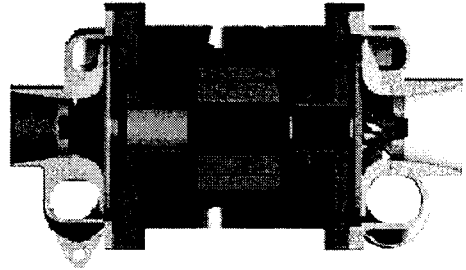


Fig. 1 터보 압축기의 3D 모델링.

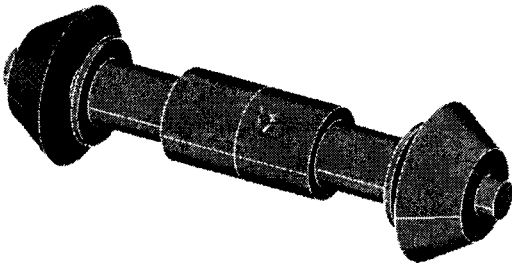
또한 터보 압축기의 회전축 고유진동수의 CAE 해석을 위한 유한요소해석<sup>(3)</sup>을 위해서 사용된 절점 수는 33,072개이며, 요소 수는 21,835개이다. 회전체의 재질은 일반강으로 설정하고 그에 대한 재료의 물성치는 Table 1과 같다. 앞에서 언급한 바와 같이 축차해법은 Lanczos 축차해법을 사용하였으며 0-5 kHz의 범위 내에서 총 10개의 모드 수를 도출하였다.

Table 1. Material properties of the turbo-blower shaft

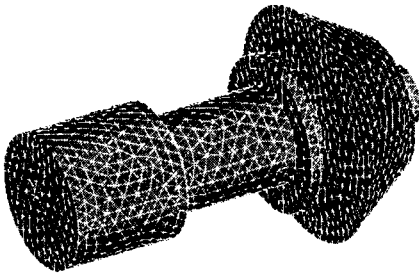
Young's Modulus(E)	210E9 N/m <sup>2</sup>
Density( $\rho$ )	7820 kg/m <sup>3</sup>
Poisson's Ratio( $\nu$ )	0.29

#### 4. 터보블로워 회전체의 모드해석결과

그림 2(a)는 FEM 해석을 위한 회전체의 모델이며, 그림 2(b)는 회전체의 요소 설정을 도시하였다. 회전체는 축 대칭이므로 대칭 구조물만 모델링하여 해석하였다<sup>(4)</sup>.



(a) 터보 압축기 회전체의 3D 모델.



(b) 터보 압축기 회전체의 유한요소모델

Fig. 2 터보압축기에 사용되는 회전축의 모델

터보압축기 회전축의 구속조건으로는 양쪽 축의 끝단을 고정하였다. 이 때 나타난 1차 모드 해석결과는 Fig. 3과 같은 결과를 나타내었다. 이 때 점선 부위는 변형 전의 형상을 보이고 있으며 실선부위는 변형 후의 형상을 보이고 있다. 또 고유진동수는 111.243Hz이며 최대변형은 0.16mm를 보이고 있으며 10차까지의 총모드해석 결과는 Table 2에서 보이는

바와 같다.

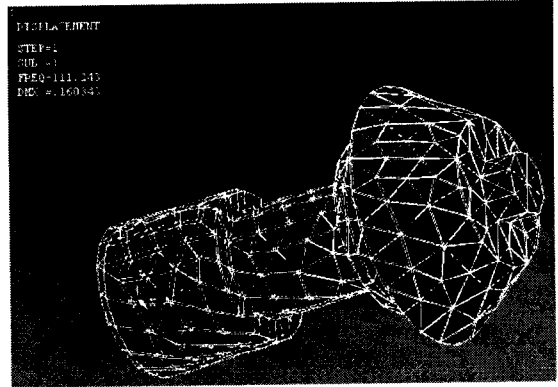


Fig. 3 터보블로워 회전축의 1차모드 해석결과

Table 2 터보압축기의 모드차수별 고유진동수

Mode Number	FEM 해석결과(Hz)
1차 Mode	111.243
2차 Mode	111.413
3차 Mode	418.519
4차 Mode	686.803
5차 Mode	687.430
6차 Mode	897.799
7차 Mode	1304.809
8차 Mode	2106.904
9차 Mode	2109.799
10차 Mode	2531.423

#### 6. 결론

본 논문에서는 자동차 연료전지에 사용되는 터보압축기의 초기개념설계를 위하여 유한요소법을 활용한 모드해석을 수행함으로써 회전체의 고유진동수를 알기 위해서 일반적으로 많이 사용되는 란초스 축차해법을 통하여 10

차에 걸친 모드 해석을 수행하였다. 해석결과 회전체의 주된 응답은 100-2500Hz(1-10차 모드) 범위 내에서 발생하였으며 최대 변형량의 크기는 0.16mm로서 동적으로 큰 문제를 야기시키지 않는 범위내에 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

### 참고문헌

- (1) 이병채, 오승환, “부공간축차법의 효율향상을 위한 연구”, 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제11호, pp. 1852-1861, 1996.
- (2) 심재수, 황의승, 박주경, “Lanczos 알고리즘을 도입한 Ritz Vector법에 의한 구조물의 동적해석”, 전산구조공학회지, 제8권, 제4호, pp. 181-187, 1995.
- (3) 임형빈, 김강성, 허진욱, 정진태, “상용 유한요소해석 프로그램을 이용한 측류송풍기의 내진해석”, 한국소음진동공학회논문집, 제12권, 제3호, pp. 181-186, 2002.
- (4) 박정훈, 유흥희, “회전구조물의 진동 해석 및 실험”, 대한기계학회논문집(A), 제21권, 제2호, pp. 272-280, 1997.