

〈논 문〉

## 증기터빈 · 발전기축계의 지진응답해석 (제 1 보, 로터 · 베어링시스템만을 고려한 경우)

Seismic Response Analysis of Steam Turbine-Generator Rotor System  
(1st Report, In case of rotor-bearing system only)

양 보 석\* · 김 용 한\*\*

Bo-Suk Yang and Yong-Han Kim

(1999년 1월 30일 접수 ; 1999년 3월 18일 심사완료)

**Key Words** : Steam Turbine-Generator(증기터빈 · 발전기), Seismic Response Analysis(지진응답해석), Response Spectrum(응답스펙트럼), Time Domain Analysis(시간영역해석), Aseismatic Performance(내진성능)

### ABSTRACT

This paper presents the analytical method to evaluate the seismic responses on steam turbine-generator rotor system. Deterministic analytical methods, such as response spectrum approach, modal superposition method and direct integration method, are used to calculate the seismic response. The computer software is also developed based on the methods then can be applied to estimate the seismic safety of turbine-generator rotor system for power plants. Numerical example of a steam turbine-generator rotor system of 1007MW nuclear power plant is presented. The aseismatic performance are checked by comparing maximum seismic deflection at bearing positions with bearing clearance.

### 1. 서 론

원자력발전소에 설치되어 있는 수직형 또는 수평형 펌프, 터빈 · 발전기 시스템 등과 같은 중요회전기계는 전력 공급에 필수적이므로, 지진이 발생하는 동안에도 안정된 운전과 정상적인 기능을 발휘할 것이 반드시 요구된다.

대부분의 경우, 가진대(shaking table)위에 장치를 설치하고 요구되는 내진성능을 만족하는가를 시험하여야 하지만, 통상적으로 이들 장치는 대단히

무겁고 크기 때문에 내진시험이 불가능하고 따라서 이론적인 지진응답해석에 의존할 수 밖에 없다<sup>(1)</sup>.

지진응답해석의 주요 목적은 지진시에 구조물이나 기계설비의 지진응답을 계산하고 설계한계의 관점에서 중요 부분의 변형(seismic deflections)과 응력을 조사하는 것이다. 회전축계에는 반드시 여러 지지베어링위치에서 회전체(rotor)의 변형정도를 조사하여 베어링의 유막틈새(oil film clearance)가 항상 최소 두께를 유지해서 회전체와 베어링 표면이 서로 마찰(rubbing)을 일으키지 않도록 해야한다. 아울러 베어링에 가해지는 부가적인 지진력과 변형 그리고 기초부에 가해지는 힘도 계산해서 해당하는 허용한계에 대하여 조사해야한다. 지진응답해석에서는 실제적인 수학모델을 구성하기 위하여 베어링의 강성과

\* 정회원, 부경대학교 공과대학 기계자동차공학부

\*\* 부경대학교 대학원

감쇠, 베어링지지대(pedestal)의 질량과 강성 및 기초(foundation)의 유연성이 고려되어야 한다.

Villasor<sup>(2)</sup>, Soni<sup>(3)</sup>, Srinivasan<sup>(4)</sup>은 결정론적 방법으로 응답스펙트럼 기술이나 시간응답법을 이용하여 지진응답을 예측하는 방법을 발표하였으며, Rao<sup>(5)</sup>은 70 MW급 터빈·발전기축계의 지진응답 해석을 수행하였고, 고속회전기계의 지진해석<sup>(6)</sup>에 관한 포괄적인 검토를 수행한 바 있다. 그러나 국내에서는 회전기계에 대한 지진응답해석에 관한 연구가 거의 없고, 최근 한반도에서의 지진활동이 활발하게 이루어지고 있어 체계적인 연구가 시급한 실정이다.

일반적으로 구조물이나 수직형 회전기계와 달리 수평형 회전기계는 지진의 탁월 진동수에 비해 고유진동수가 비교적 높기 때문에 응답스펙트럼 해석법으로는 근사적인 해석이 될 수 밖에 없으며, 더우기 증기터빈·발전기와 같은 대형의 복잡한 회전기계에 대해서는 보다 정도높은 응답해석 방법인 시간응답 해석법에 의존해야 한다. 따라서 본 논문에서는 증기터빈·발전기의 지진응답해석에 대한 체계적인 연구의 제 1보로써 먼저 베어링 지지대와 기초부의 특성을 무시한 경우에 대해, 응답스펙트럼해석법, 모드중첩법 및 직접적분법의 3가지의 결정론적 방법을 이용하여 대지진파의 지진외력에 대한 증기터빈·발전기 축계의 지진응답해석을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 내진성능을 만족하는 지를 검토하였다.

## 2. 지진응답해석

구조물이나 기계설비의 내진설계서 가장 먼저 고려해야 할 것은 설치 지역에서 예상되는 지진특성을 산정하는 것이다. 이를 위해서는 먼저 그 지역에서 발생한 모든 과거 지진들의 특성이 분석되어야 하며, 지반조건에 대한 연구도 선행되어야 한다. 그러나 이러한 부분은 지진학의 분야에 치중되며 공학적 차원에서는 지진에 대한 구조물이나 기계설비의 응답에 대해 관심을 갖게 되므로, 본 논문에서는 지진응답해석분야 중에서 결정론적 방법에 초점을 맞추어 연구를 수행하였다.

지진하중에 대한 회전기계의 동적 거동을 해석하는 방법으로는 직접 수치해석을 수행하는 직접적분법(direct integration method), 각 모드별로 비연성화된(decoupled) 미분방정식으로 변환하고 각 모드별 해를 구하여 이를 중첩하는 모드중첩법(mode superposition method)등이 있다. 그리고 후자의 경

우는 시간영역해석(time domain analysis)과 주파수영역해석(frequency domain analysis)이 있으며 시간영역해석에서는 Duhamel적분을 사용하고, 주파수 영역에서는 Fourier 변환이나 Laplace 변환 등에 의하여 응답을 구한다<sup>(7)</sup>.

내진설계를 위한 동적 해석법은 이상과 같이 여러 가지가 있으나 실용적으로 사용되고 있는 방법으로 본 논문에서는 다음의 3가지 방법을 이용하여 지진응답해석을 수행한다.

- (1) 응답스펙트럼 해석법(response spectrum analysis method)
- (2) 시간이력 해석법(time history analysis method)
  - (i) 모드중첩법(mode superposition method)
  - (ii) 직접적분법(direct integration method)

응답스펙트럼해석법은 임의 지진 혹은 설계용 지진에 대한 응답스펙트럼으로부터 근사적으로 최대치만을 구할 때 사용되는 방법으로, 간단하고 신속히 응답을 평가할 수 있으나, 계산 정도는 해석대상이 복잡할수록 많이 떨어진다. 반면 시간이력해석법은 지진에 의한 지반운동의 시간이력이 있을 때 사용하는 정확한 방법이지만, 기존의 지진기록을 사용하거나 합성된 지진기록을 사용하여야 하는 번거로움과 막대한 계산량이 요구되는 등의 단점이 있으므로 중요한 설비나 구조물의 설계, 비선형해석 등 정밀해석을 요하는 경우나 구조물에 의해 지지되어 있는 기계의 응답을 구할 때 이용되는 층 응답스펙트럼(floor response spectrum)을 구하기 위해 이용된다.

해석방법의 선택은 해당 회전기계의 설계에 대한 요구사항, 내진설계의 수준 및 경제적인 이유 등을 고려하여 선택하며<sup>(8)</sup>, 일반적으로는 대형·복잡한 기계, 중요한 기계일수록 더 정밀한 해석 방법을 사용해야 한다.

### 2.1 모드중첩법

지진가진을 받는 선형 N자유도계의 운동방정식은 일반적으로 다음과 같이 표현된다<sup>(7)</sup>.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -Mp\ddot{v}_g(t) \quad (1)$$

여기서  $\ddot{v}_g(t)$ 는 시간에 종속하는 지면(ground)의 지진 가속도이다.  $p$ 는 지지부 운동에 평행한 모든 방향에서 1의 성분을 갖고 그 외에는 0인 벡터이다.

$M$ ,  $K$ ,  $C$ 는 각각 크기가  $N \times N$ 인 계의 질량행렬, 강성행렬 및 감쇠행렬이며,  $\ddot{x}$ ,  $\dot{x}$  및  $x$ 는 각각 시간에 종속되는 상대가속도, 속도, 변위 벡터를 나타

낸다.

식 (1)은 연성방정식에 대한 수치적분을 직접 계산할 수 있지만, 선형구조물의 지진해석에서는 지지점운동들이 가장 낮은 진동모드에서만 강력하게 가진되는 경향이 있으므로 보통 정규좌표계로 변환하는 것이 훨씬 더 효율적이다. 그러므로 수십, 수백개의 자유도를 갖는 선형계에 대한 지진응답의 근사치는 단지 몇 개의 정규좌표계에 대한 해석을 수행함으로써 얻어진다.

식 (1)에서 변위  $x(t)$ 는 정규화된 모드  $\phi_i$ 와 일반화 좌표  $q_i(t)$ 의 선형결합으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$x(t) = \sum_{i=1}^N \phi_i q_i(t) \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하고,  $\phi_i^T$ 를 왼쪽에서 곱하여, 질량행렬과 강성행렬의 직교성(orthogonality)을 이용하면, 다음과 같은 독립된 모드의 1자유도계 운동방정식의 집합을 얻는다.

$$m_i \ddot{q}_i + c_i \dot{q}_i + k_i q_i = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

여기서,

$$m_i = \phi_i^T M \phi_i, \quad k_i = \phi_i^T K \phi_i,$$

$$c_i = \phi_i^T C \phi_i, \quad Q_i(t) = -\phi_i^T M p \ddot{v}_g(t) \quad (4)$$

윗식을  $m_i$ 로 나누어 정리하면, 다음의 보다 일반화된 방정식을 얻는다.

$$\ddot{q}_i + 2\omega_i \xi_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -\nu_i \ddot{v}_g(t) \quad (5)$$

여기서,  $\omega_i$ 는  $i$ 차 모드의 고유진동수,  $\nu_i = \frac{\phi_i^T M p}{m_i}$

는  $i$ 차 모드의 모드참여계수(mode participation factor),  $\xi_i$ 는 모드 감쇠비이다. 정의된 지반가속도  $\ddot{v}_g(t)$ 에 대한 1자유도계에 대응하는 식 (5)의 모드 응답은 직접적분 혹은 Duhamel적분을 이용하여 구할 수 있으며,  $i$ 차 모드응답에 기인하는 상대변위벡터는 다음과 같다.

$$x_i(t) = \phi_i q_i(t) \quad (6)$$

마지막으로 모든 모드 응답에 기인한 상대변위벡터는 다음과 같이 각 모드성분의 중첩에 의해 얻어진다.

$$x(t) = \sum_{i=1}^N \phi_i q_i(t) = \Phi q(t) \quad (7)$$

식 (7)에서 영향이 적은 고차의 모드를 생략하므로써 대폭적인 자유도의 축소가 가능하며 계산시간을 훨씬 절감할 수 있다.

## 2.2 응답스펙트럼 해석법

응답스펙트럼이란 해당 외력(지진)에 대한 1자유도계의 응답의 최대치를 감쇠비를 파라미터로 하여 주기에 대해서 나타낸 그래프이다. 응답스펙트럼은 내진설계의 관점에서 아주 중요한 개념이다<sup>(9)</sup>. 즉, Fourier 스펙트럼은 지진파 자체의 주파수 특성을 나타낼 뿐 해당 해석 대상의 개념은 전혀 포함되지 않은 반면, 응답스펙트럼은 지진파가 1자유도계로 표시되는 구조물에 미치는 최대의 영향을 나타내는 것으로 Fourier 스펙트럼보다는 훨씬 공학적이라고 할 수 있다. 또한, 가속도 응답스펙트럼은 전단력의 계산에 이용될 수 있고, 속도 응답스펙트럼은 에너지를 나타내며, 변위 응답스펙트럼을 통해 최대변위뿐만 아니라 응력 등의 계산이 가능하다. 이러한 응답스펙트럼은 원래 간단한 1자유도계에 대한 개념이지만, 모드중첩법의 개념을 도입하면 간단하게 지진에 대한 최대응답을 계산할 수 있다.

앞 절의 비연성화된 모드 방정식 (5)에서  $q_i$ 의 최대값은  $\omega_i, \xi_i$ 에 대응하는 주어진 변위응답스펙트럼  $S_d$ 를 이용하여 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$q_{i, \max} = \nu_i S_d(\xi_i, \omega_i) \quad (8)$$

$q_{i, \max}$ 가 결정되면,  $i$ 차 모드에 대한 최대변위는 다음과 같이 주어진다.

$$x_{i, \max} = \phi_i q_{i, \max} = \phi_i \nu_i S_d(\xi_i, \omega_i) \quad (9)$$

식 (9)에 의해 구해진 최대모드변위벡터에 근거하여, 요소력, 절점변위와 반력은 각 모드에 대하여 계산된다. 일반적으로 이들 최대응답은 동시에 발생하지는 않기 때문에, 근사적인 최대값을 구하기 위해 다음의 SRSS법(square root sum of squares)이 주로 이용된다.

$$x_{\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^N x_{i, \max}^2} \quad (10)$$

## 2.3 직접적분법

직접적분법은 식 (1)의 미분방정식으로 나타내어

지는 운동방정식을 수치적인 방법으로 직접 적분하여 해를 구함으로써 구조물이나 기계의 동적 거동을 알아내는 방법이다. 이 방법은 외력하중이 지반운동의 가속도 시간이력인 계의 운동방정식을 매우 짧은 시간 간격에 대하여 단계적으로 구조물의 시간에 따른 거동을 구하는 방법이다. 직접적분법에는 여러가지 방법이 있으나 Newmark  $\beta$ 법, Runge Kutta법이 비교적 많이 이용되고 있다.

해의 정도는 일반적으로 Runge Kutta법이 좋으나 지진입력과 같이 가속도의 시간증분이 정해지는 경우 및 진동계의 고유주기가 지진의 시간증분보다 훨씬 짧은 경우는 발산하는 경우가 발생하므로 본 논문에서는 Newmark  $\beta$ 법( $\beta = 1/4$ )을 이용하였다.

### 3. 증기터빈·발전기축계의 지진응답해석

#### 3.1 해석모델

본 해석의 대상모델은 원자력발전소용 1,007 MW급 터빈 발전기로서, 고압터빈(HP), 3대의 저압터빈(LPA, LPB, LPC) 및 발전기(GEN)로 구성되어 있으며 각 로터에 2개씩 총 10개의 베어링으로 지지되어 있다<sup>(10)</sup>. 전체 로터 구성의 개략도를 Fig.

1에 나타내었다.

축요소는 회전관성과 전단변형을 고려한 Timoshenko보 이론을 이용한 유한요소모델<sup>(11)</sup>로 운동방정식을 유도하였다. 각 터빈 로터의 블레이드는 집중질량과 관성모멘트를 가지는 원판으로서 모델링하였으며, 각 로터의 연결부 커플링은 강결합으로 고려하였다. 각 로터의 요소수는 HP단 50개, LP단 60개, GEN단 60개로 전체 로터는 총 290개의 요소로 이루어진 대규모의 multi-span, multi-bearing시스템이다. 시스템의 총 길이는 약 57 m이고, 총중량은 약 700 t이다.

대상 터빈·발전기는 모두 타원형베어링으로 지지되었으며, 각 베어링의 사양을 Table 1에 나타내었으며, Table 2에 운전속도 1800 rpm에서의 각 베어링의 동적계수를 나타내었다. 또한 터빈·발전기는 지반에 직접 설치되지 않고 기초구조물 위에 설치되어 있기 때문에, 설치지점에서의 층응답스펙트럼(floor response spectrum)에 상응하는 가진가속도를 이용하여야 한다. 따라서 베어링지대의 질량과 강성 그리고 기초부의 유연성을 함께 고려하여야 하지만, 일련의 연구에 대한 제 1보로써 이들의 특성을 무시한 강기초지지로 가정하여 연구를 수행하였

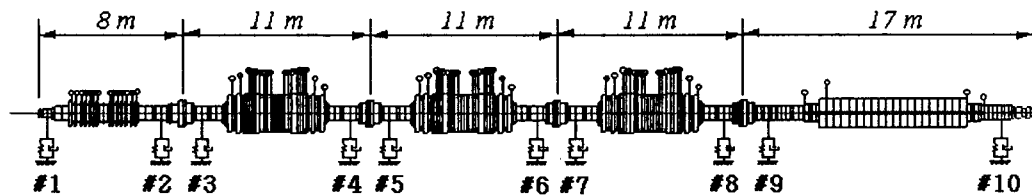


Fig. 1 Modeling for turbine-generator rotor system

Table 1 Specification of journal bearing

Bearing No.	Radius (mm)	Length (mm)	L/D	Clearance (mm)	Viscosity of lubricant ( $N \cdot s/m^2$ )	Load (kN)	Remarks
1	254	457	0.9	0.711	0.027	212	HP
2	381	457	0.6	0.914	0.027	366	
3	381	559	0.73	1.100	0.027	775	LPA
4	381	559	0.73	1.100	0.027	799	
5	381	559	0.73	1.100	0.027	728	LPB
6	381	559	0.73	1.100	0.027	796	
7	381	559	0.73	1.100	0.027	713	LPC
8	381	559	0.73	0.871	0.027	604	
9	381	610	0.8	0.762	0.027	1068	GEN
10	254	660	1.3	1.016	0.027	819	

Table 2 Bearing stiffness and damping coefficients at operating speed(1800 rpm)

Bearing No.	Stiffness (GN/m)				Damping (MN · s/m)			
	$k_{xx}$	$k_{xy}$	$k_{yx}$	$k_{yy}$	$C_{xx}$	$C_{xy}$	$C_{yx}$	$C_{yy}$
1	3.45	-1.29	0.042	0.435	9.07	1.27	-2.66	2.00
2	3.12	-1.18	0.070	0.391	8.57	1.20	-2.38	1.88
3	8.68	-3.14	-0.315	1.140	18.20	2.58	-7.06	4.06
4	8.77	-3.17	-0.322	1.150	18.40	2.60	-7.13	4.09
5	8.68	-3.14	-0.315	1.140	18.20	2.58	-7.06	4.06
6	8.78	-3.17	-0.323	1.150	18.40	2.60	-7.14	4.09
7	8.69	-3.14	-0.316	1.140	18.20	2.58	-7.07	4.06
8	8.69	-3.14	-0.316	1.140	18.20	2.58	-7.06	4.06
9	11.0	-3.95	-0.483	1.460	22.20	3.14	-9.02	4.95
10	11.4	-4.09	-0.514	1.510	22.80	3.24	-9.36	5.10

( $x$  : vertical direction,  $y$  : horizontal direction)

으며 이들 특성의 고려는 향후의 연구과제로 수행할 계획이다.

3.2 고유진동수 및 감쇠비

터빈 발전기 모델은 총중량에 비해 축의 길이가 길고 축강성이 유연한 상태로 비교적 탄성지지되어 있으므로, 운전속도 1800 rpm이하에 많은 고유진동수를 가지고 있다. Table 3은  $N=1800$  rpm에서의 유한요소법(FEM)을 이용하여 계산된 저차 5차까지의 시스템의 고유진동수(고유주기)와 감쇠비를 나타낸다<sup>(10)</sup>.

3.3 입력 지진동

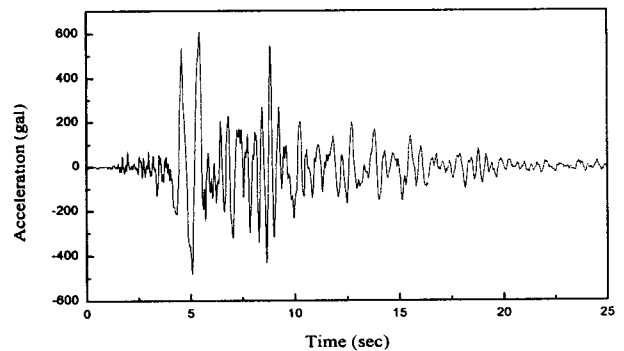
입력되는 지진파로는 El Centro(1940), Olympia(1949), Taft(1952), Hachinohe Habor(1968), Pacoima Dam(1971) 등이 널리 이용된다. 그러나 이들 지진의 최대 지반가속도가 설계용 지진과 일치하지 않는 점을 보완하기 위하여, 사용하는 지진이

속도의 최대값을 지역계수의 1.2배에 중력가속도를 곱한 값 정도가 되도록 조정하여 사용하거나, 일반적인 엄밀한 내진설계에서는 설계용 응답스펙트럼의 특성에 맞게 제안된 인공지진파를 사용한다.

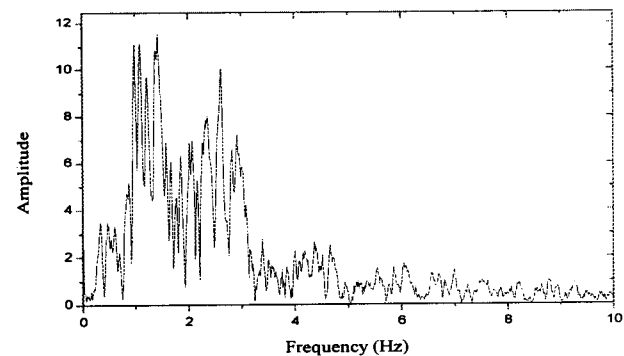
본 논문에서는 입력 지진파로서 비교적 최근(95.1.17)에 일본 고베해양기상대에서 계측된 고베

Table 3 Natural frequency and damping ratio of steam turbine-generator rotor system ( $N=1800$  rpm)

Mode	Natural frequency (cpm)	Natural period (sec)	Damping ratio
1st	696	0.086	0.0022
2nd	883	0.068	0.0012
3rd	984	0.061	0.0084
4th	1010	0.059	0.0078
5th	1086	0.055	0.0065



(a) Seismic wave



(b) Fourier spectrum

Fig. 2 Kobe earthquake (EW)

지진 가속도파형<sup>(12)</sup>의 동서방향성분(EW)과 수직방향성분(UD)을 이용하였으며, Fig. 2에 고베지진(EW)의 시간파형과 푸리에 스펙트럼을 나타내었다. 이 관측파는 샘플링간격 0.02초, 2048점(40.96초간)의 데이터로서, 이 데이터를 이용하여 해석하였다. 이 지진은 일본기상청(JMA)진도 VII, 규모 7.2의 격진이었으며, 최대가속도가 NS 818 gal, EW 617 gal, UD 332 gal이었고, 탁월주기는 수평진동이 0.8~1.0초, 상하진동이 0.9~1.5초 및 0.2초정도로 파악되었다. 고베지역의 75년 및 100년간 발생가능성이 있는 지진의 최고진도기대치는 0.2 g로 되어 있었으나, 1000년 정도의 재래기 수준인 0.82 g의 격진이 발생된 점은 지진의 위험도 작성에 역사지진의 정확한 고려가 뒷받침되어야 한다는 것과 한반도의 역사지진 자료에 비추어볼 때 우리나라의 경우도 이러한 격진의 재래 가능성을 고려해야 한다. 고베지진의 특성 중 특기하여야할 사항은 수직방향성분(UD)이 지금까지의 지진보다 매우 크다는 점이다.

### 3.4 응답스펙트럼과 최대응답의 평가

Fig. 3은 고베지진에 대한 응답스펙트럼을 나타내

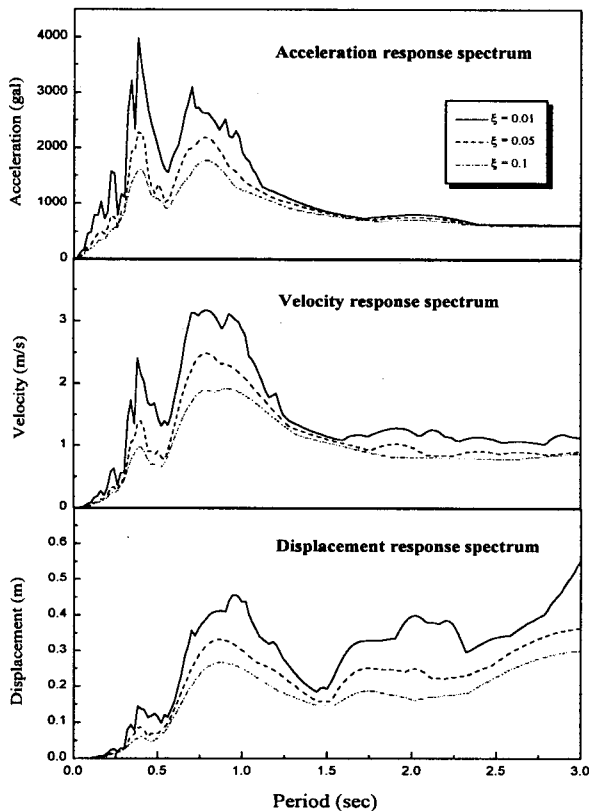


Fig. 3 Response spectrum for Kobe earthquake(EW)

며, 식 (5)에 대해 Newmark  $\beta$ 법을 이용하여 3개의 감쇠비( $\xi=0.01, 0.05, 0.10$ )에 대해 계산한 결과이다. 최대치를 나타내는 주기는 가속도응답스펙트럼은 0.3 sec 주위, 속도와 변위응답스펙트럼은 0.7~1 sec이다. 일반적으로 가속도응답스펙트럼은 주기가 길어질수록, 즉 진동수가 작아질수록 스펙트럼치는 낮아지고, 속도응답스펙트럼은 일정하며, 변위응답스펙트럼은 주기가 길어질수록 스펙트럼치가 커지는 경향이 있다. 이는 속도응답스펙트럼을 기준으로 할때 가속도, 속도 및 변위의 상호관계로부터 알 수 있다.

응답스펙트럼해석시에 채용모드수의 결정은 계산정도를 해치지 않는 범위내에서 계산시간과 노력을 최소로 하는 방향에서 결정되어야 할 것이다. 본 연구에서는 채용모드수를 5개에서 200개까지 변형시키면서 최대응답을 검토하였으나, 약 1%이내의 오차를 보였으므로, 채용모드수를 5개로 하여 응답스펙트럼해석을 수행한 결과를 아래에 설명한다.

Fig. 4에 Table 3에 나타난 저차 5개 모드의 감쇠비에 대한 변위응답스펙트럼을 이들 모드의 고유주기 범위내에서 나타내었다. 통상적으로 응답스펙트럼선도는 불균일하므로 평활화(smoothing)하여 사용하며, 본 논문에서는 전후 5개 데이터의 평균을 사용한 adjacent smoothing법을 채용하였다. 해석모델의 저차 5개의 고유주기는 Table 3에 나타내듯이 0.055~0.086초로서, 지진파의 탁월고유주기인 0.3~1.2초에 비해 훨씬 짧기 때문에 모든 모드에 대해서도 입력지진에 대해 특징적으로 응답이 증폭되지는 않음을 알 수 있다. 저차 5개 모드의 고유주기와 감쇠비에 대응하는 변위응답스펙트럼의 최대치를 Table 4에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 주기가 지진파

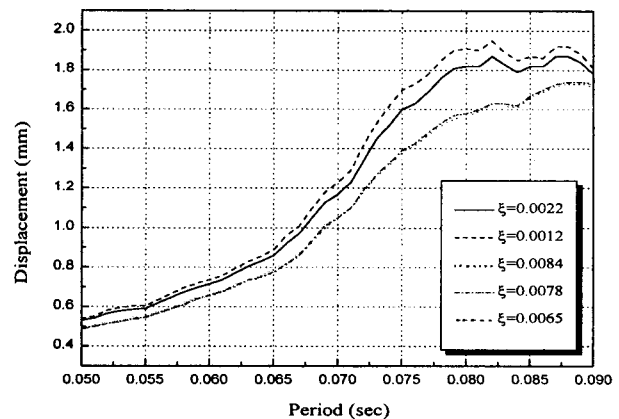


Fig. 4 Smoothed displacement response spectrum

**Table 4** Value of displacement response spectrum

Mode	Period $T$ (sec)	Modal damping ratio, $\zeta$	Displacement response spectrum, $S_d$ (mm)
1st	0.087	0.0022	1.90
2nd	0.068	0.0012	1.10
3rd	0.061	0.0084	0.65
4th	0.059	0.0078	0.62
5th	0.056	0.0065	0.55

의 탁월고유주기에 근접할수록 최대치가 증가하는 것을 알 수 있다.

이 값들이 식 (8)의  $S_d(\xi_i, \omega_i)$ 가 되며, 모드참여계수  $\nu$ 와 정규모드  $\phi$ 를 아래와 같이 구하고 식 (9)를 이용하여 저차 5개의 모드에 대한 최대변위를 아래와 같이 구할 수 있다. 여기서  $\phi$ 는 구하고자 하는 대표적인 HP 로터의 우측베어링(No. 2 베어링), LPB 로터의 좌측베어링(No. 5 베어링) 및 GEN 로터 좌측베어링(No. 9 베어링)의 3개 베어링의 절점(46, 117, 239)에 대하여 5차 모드까지를 이용하여 나타내었다.

$$x_{i, \max} = \phi_i q_{i, \max} = \phi_i \nu_i S_d(\xi_i, \omega_i)$$

여기서

$$\nu = \begin{pmatrix} 5.1954 \\ 0.2538 \\ -12.4650 \\ -2.7644 \\ 2.4412 \end{pmatrix}, \quad S_d = \begin{pmatrix} 0.00190 \\ 0.00110 \\ 0.00065 \\ 0.00062 \\ 0.00055 \end{pmatrix}$$

$$\phi = \begin{pmatrix} 0.0000 & 0.0000 & -0.0453 & 0.0499 & 0.0550 \\ 0.0000 & -0.0000 & -0.0675 & -0.0037 & -0.0637 \\ 0.0584 & 0.0006 & -0.0071 & -0.0174 & 0.0180 \end{pmatrix}$$

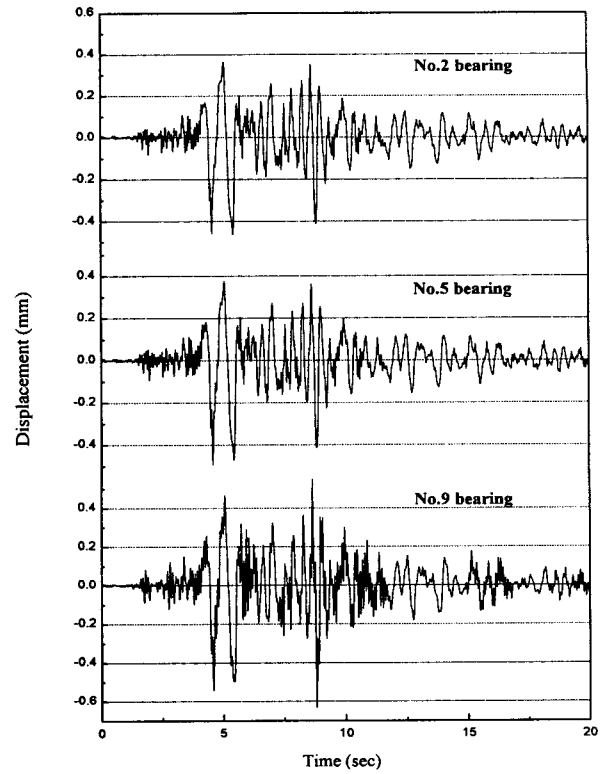
다음으로 3개 베어링절점에 대한 최대응답은 아래와 같이 SRSS법을 이용하여 구할 수 있다.

$$x_{\max} = \sqrt{x_{1, \max}^2 + x_{2, \max}^2 + \dots + x_{5, \max}^2}$$

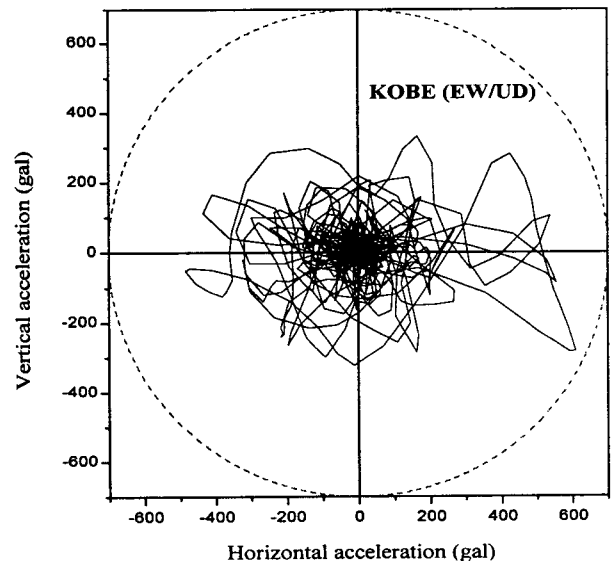
$$= \begin{pmatrix} x_{46} \\ x_{117} \\ x_{239} \end{pmatrix}_{\max} = \begin{pmatrix} 0.00038436 \\ 0.00055363 \\ 0.00058058 \end{pmatrix}$$

### 3.5 직접적분법에 의한 시간응답해석

Fig. 5는 고베지진파의 EW성분을 수평으로 가진 했을 경우의 터빈·발전기축계의 각 베어링절점에서의 수평방향의 변위응답을 Newmark  $\beta$ 법을 이용



**Fig. 5** Displacement response wave by direct integration method



**Fig. 6** Lissajous plot of seismic wave for EW and UD components

하여 구한 결과이다. 이 방법은 기계의 지진응답을 구하는 가장 엄밀한 방법이지만, 본 대상모델과 같은 대형 시스템에 대해서는 방대한 계산시간이 소요

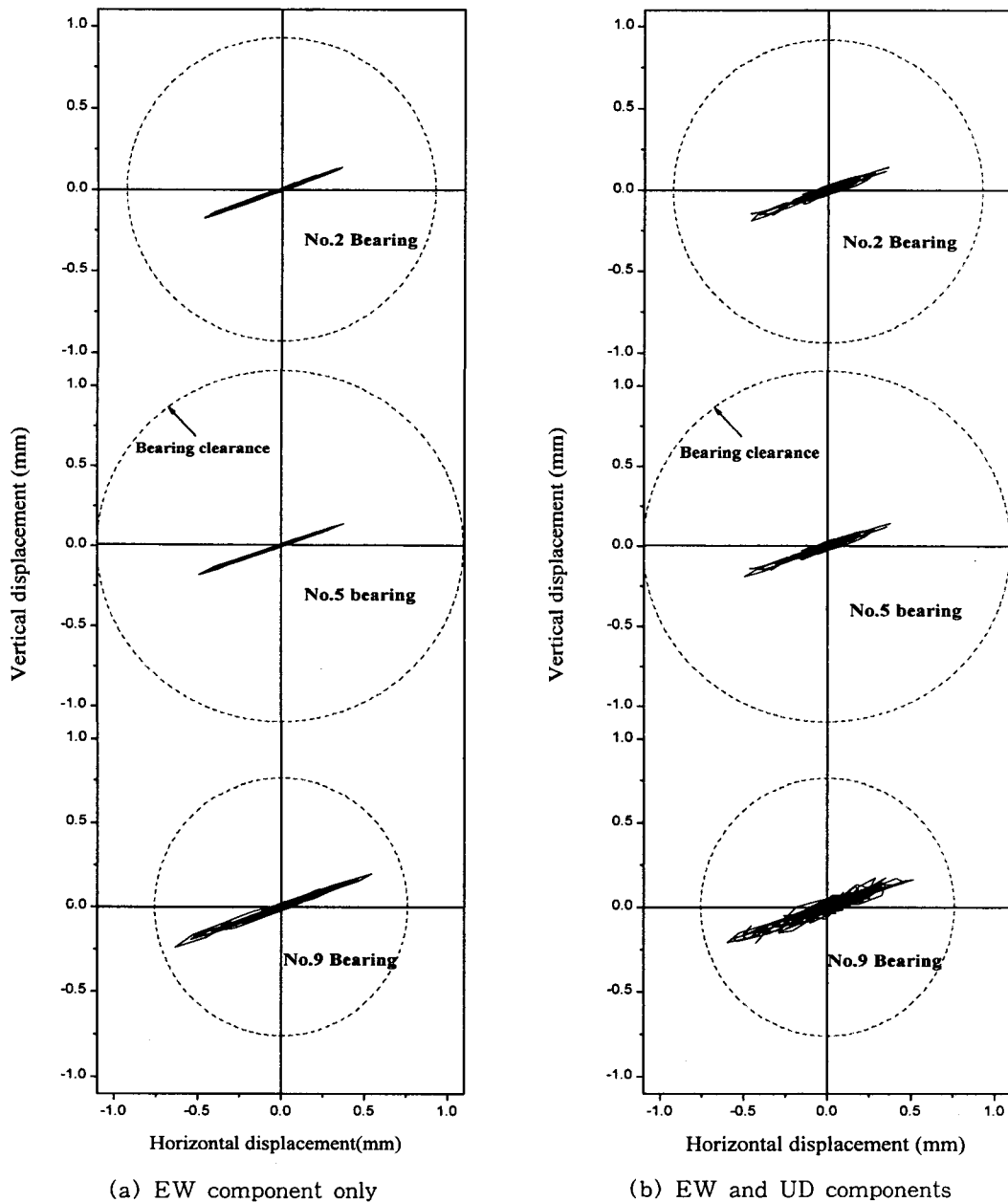


Fig. 7 Lissajous plot of response wave

되는 단점이 있기 때문에 아주 엄밀한 평가를 필요로 할 때만 사용된다. 여기서는 대표적인 3개의 베어링(No. 2, 5 및 9 베어링) 절점의 응답변위를 나타낸다. 최대응답은 각각  $461 \mu\text{m}$ ,  $496 \mu\text{m}$ ,  $634 \mu\text{m}$ 로서, Table 1의 베어링 데이터를 참조하면 모두 베어링 틈새(clearance)이내 임을 알 수 있다.

고배지진파의 동서방향(EW)과 상하방향(UD)의 지진파형을 합성하여 나타낸 Lissajous선도를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 7(a)는 수평방향만을 EW성분

으로 가졌시, 그리고 Fig. 7(b)는 수평과 수직방향으로 동시에 가졌시켰을 경우에 대한 수직과 수평방향의 2차원 응답변위의 궤적을 Lissajous선도로 나타낸 것이다. 수직방향의 베어링강성이 수평방향에 비해 8배정도 크고, 수평방향에 비해 수직방향의 지진가속도가 비교적 작기 때문에 수평방향의 응답진폭이 큰 것을 알 수 있고, 한 방향으로 가졌했을 경우에도 수직과 수평의 연성효과는 적음을 그림을 통해 알 수 있다.



### 3.6 모드중첩법에 의한 시간응답해석

Fig. 8은 EW성분에 의한 수평가진시 모드중첩법을 이용하여 계산한 3개 베어링(No. 2, 5 및 9 베어링) 절점에서의 변위응답의 시간파형이다. 저차 20개의 모드를 채용하였으며, 직접적분법과 마찬가지로 3개의 베어링절점에서의 변위응답을 나타내었다.

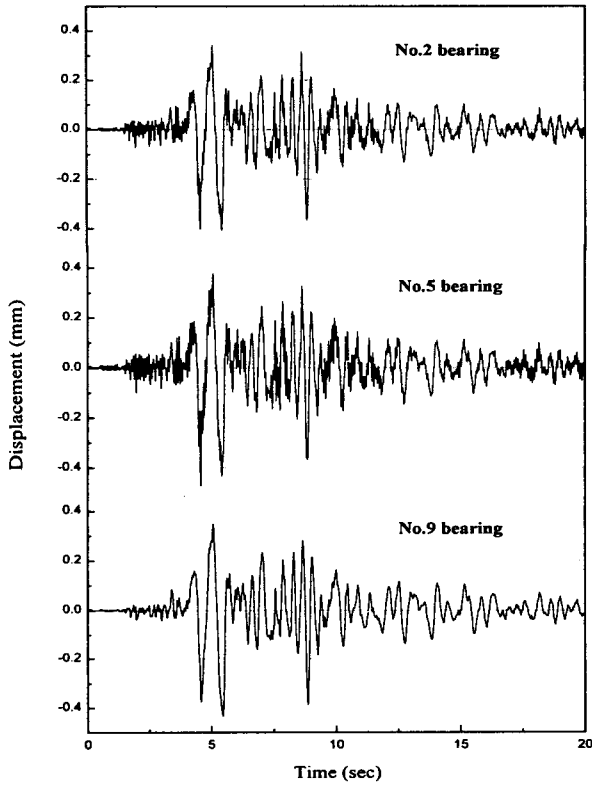


Fig. 8 Displacement response wave by modal superposition method

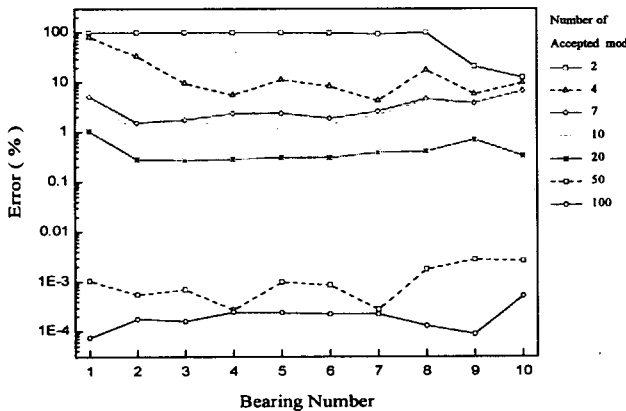


Fig. 9 Percentage error according to number of accepted mode

최대응답은 각각  $406.9 \mu\text{m}$ ,  $470.6 \mu\text{m}$ ,  $428.7 \mu\text{m}$  로써, 직접적분법과 비교할 때 No. 9 베어링에서는 많은 오차를 나타낸다. 이는 본 연구의 모델이 비교적 복잡하며, 감쇠항과 자이로스코픽항을 무시한 고유치와 고유모드를 이용하였기 때문이다.

Fig. 9는 채용모드수의 영향을 검토하기 위하여 채용모드수에 따른 베어링절점에서의 최대응답을, 전체 모드를 채용하였을 때의 최대응답에 대한 비로 오차를 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 채용모드수가 20개일 때 0.3% 정도로써, 채용모드수를 20개 이상으로 할 때 채용모드수에 의한 오차는 미소함을 알 수 있다. 또한 채용모드수를 전체로 하였을 때 직접적분법과는 최대 30% 정도의 오차를 나타내고, 따라서 본 시스템과 같은 대형의 복잡한 회전기계에 대해서는 직접적분법으로 응답을 구하는 것이 신뢰성이 높음을 알 수 있다.

### 3.7 최대응답의 비교와 내진성능의 평가

이상의 세가지 방법에 의한 3개 베어링절점에서의 최대변위를 Table 5에 정리하였다. 직접적분법과 모드 중첩법에 비해 응답스펙트럼해석법은 비교적 큰 차이를 나타내는데, 이는 응답스펙트럼해석법이 모드중첩법을 기반으로 하고 있는 방법인데다 평균화처리, 최대값의 근사방법인 SRSS법, 채용모드수 등의 오차요인을 포함하기 때문이다.

통상적으로 회전기계에 대한 지진응답의 평가는 크게 두 부분으로 나누어 볼 수 있다. 첫번째는 지진시에 회전성능이 유지될 수 있는가하는 것이며, 이는 임펠러부, 블레이드부, 시일부 그리고 베어링부분과 같은 회전체와 고정부가 마찰을 일으킬 가능성이 있는 부분에 대해서 최대응답을 계산하여 틈새와 비교하므로써 회전성능을 평가한다. 두번째는 재료강도화적인 측면에서 임의 예상되는 지진에 대해 축계가 충분한 강도를 유지하는가 하는 것이다. 이는 모든 절점에 대해서 최대 굽힘응력을 계산하여 허용응력과 비교하므로써 평가할 수 있다.

Table 5 Comparison of maximum displacement (unit: mm)

Bearing No.	Direct integration method	Modal superposition method	Response spectrum method
2	0.461	0.406	0.384
5	0.496	0.470	0.554
9	0.634	0.429	0.581

먼저, 회전성능 유지의 측면에서 평가하기 위해 직접적분법으로 구한 각 베어링절점에서의 최대변위와 불평형응답의 변위를 베어링틈새와 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 여기서 불평형응답은 각 로터의 허용잔류불평형을 평가하고, 이를 각 로터양단에 등분하여 계산하였다. 전체 변위가 모두 틈새 이내에 들고 있고, 따라서 회전성능의 측면에서 안정하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 시일부에 대한 자료를 구하지 못하여 성능평가에 포함시키지는 못하였다. 그러나 지진발생과 같은 과도상태에서는 통상적으로 시일부의 마찰(rubbing)은 운전에 큰 영향을 미치지 않지만, 베어링부의 마찰은 운전 전체에 치명적인 영향을 미칠 수 있으므로 회전성능의 평가에는 큰 무리가 없으리라 생각된다.

다음으로, 강도적 측면에서의 평가를 위해서 지진에 대한 최대굽힘응력이 발생하는 시간에서의 굽힘

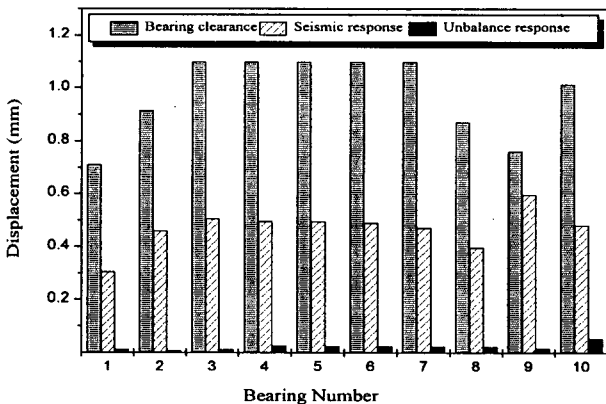


Fig. 10 Comparison of seismic response and bearing clearance

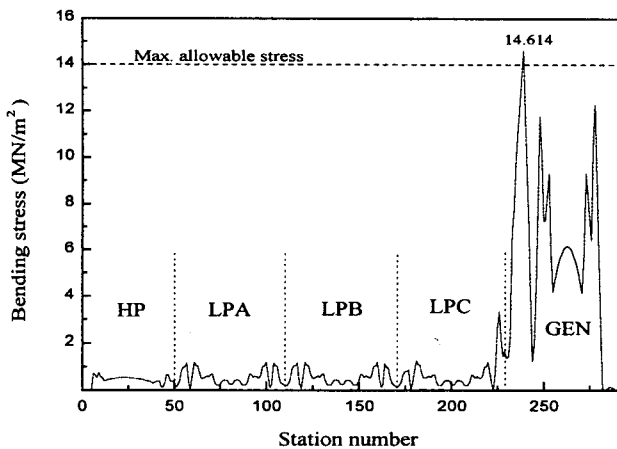


Fig. 11 Distribution of bending stress at maximum displacement

응력의 축방향 분포를 Fig. 11에 나타내었다. 최대굽힘응력은 9번 베어링에서 발생하고, 크기는 14.614 MN/m<sup>2</sup>이며, 허용응력을 약 4% 정도 초과하고 있으므로, 발전기로터의 설계시에는 이를 충분히 고려해야 할 것으로 생각된다.

증기터빈 · 발전기에 사용되는 축의 허용응력은 항복응력의 60%정도를 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 실제의 설계현장에서는 피로항복까지 고려하므로 각 로터 마다 다른 값을 사용하며, 본 증기터빈 · 발전기의 경우는 가장 큰 값으로 14 MN/m<sup>2</sup>으로 제시하고 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 고베 지진파를 입력지진동으로 하여, 응답스펙트럼해석법, 모드중첩법, 직접적분법의 세가지의 결정론적 해석방법으로 증기터빈 · 발전기 축계에 대한 지진응답을 계산하였으며, 각 방법에 의한 최대치를 비교 분석하였다. 지진에 대한 회전성능을 평가하기 위해서 지진에 의한 각 베어링에서의 변위응답의 최대치와 운전속도에서의 불평형응답의 진폭을 더해서 베어링 틈새(clearance)와 비교하여 본 결과 모두 베어링 틈새보다 적었으며, 회전성능을 유지할 수 있음을 알 수 있다. 또한 지진시의 응답변위로부터 굽힘응력을 구하여 재료강도화학적 측면에서 검토하였다.

향후의 연구로는 베어링지지대와 기초구조물의 특성을 고려하므로써 보다 정확한 내진해석이 가능하도록 할 예정이다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 日本機械學會編, 1985, 耐震設計と構造動力學, 日本工業出版.
- (2) A. P. Villasor, 1976, "Seismic Analysis of a Reactor Coolant Pump by the Response Spectrum Method," Nucl. Engrg. Des., Vol. 31, pp. 527~542.
- (3) A. H. Soni and V Srinivasan, 1983, "Seismic Analysis of a Gyroscopic Mechanical System," Trans. ASME, J. Vib. Acc. Str. and Reliab. in Design, Vol. 105, pp. 489~455.
- (4) V. Srinivasan and A. H. Soni, 1984, "Seismic Analysis of a Rotor Bearing System," J. Earthq. Engrg. and Str. Dyn., Vol. 12, pp.

- 287~311.
- (5) C. K. Rao and P. M. L. Prasad, 1986, "Seismic Analysis 70MW Turbogenerator Rotor-bearing System," Proceedings Nat. Symp. on Vibration of Power Plant Equipment Bombay, DAE:86:02, II 9.1~9.9.
- (6) C. K. Rao and S. Mirza, 1989, "Seismic Analysis of High-speed Rotating Machinery," Nuclear Engineering and Design, Vol. 111, pp. 395~402.
- (7) R. W. Clough and J. Penzien, 1993, Dynamics of Structures, McGraw-Hill.
- (8) 건설교통부, 1996, 내진설계 기준연구( I ), 한국 건설기술연구원.
- (9) 이희현 외 공역, 1996, 지진파의 스펙트럼해석 입문, 도서출판 골드.
- (10) 양보석, 1998, 터빈·발전기 축계진동해석 소프트웨어 「TGROTOR」 개발, 한국전력연구원 위탁연구보고서.
- (11) H. D. Nelson, 1980, "A Finite Rotating Shaft Element Using Timoshenko Beam Theory," Trans. of the ASME, Journal of Mechanical Design, Vol. 102, pp. 793~803.
- (12) 日本氣象廳, 1995, 平成7年(1995年)兵庫縣南部地震の氣象廳87形電磁式強震計の記録.
- (13) 김용한, 1998, 부분구조합성법을 이용한 증기 터빈·발전기 축계의 지진응답해석, 부경대학교 석사학위논문.
- (14) 양보석, 김용한, 최병근, 이현, 1999, 구분모드 합성법을 이용한 증기터빈·발전기축계의 진동해석, 한국소음진동공학회지, 제 9 권, 제 2 호, pp. 401~408.