

확률론적 구조신뢰성해석을 이용한 터빈발전기 기초의 지진 안전성 평가

Seismic Safety Assessment of the Turbine-Generator Foundation using Probabilistic Structural Reliability Analysis

조양희¹⁾ · 김재석²⁾ · 한성호³⁾

Joe, Yang Hee · Kim, Jae Suk · Han, Sung Ho

국문 요약 >> 교량, 항만 및 각종 구조물과 산업설비에 대한 설계는 주로 결정론적 해석방법(Deterministic Analysis)에 의해 수행되고 있다. 그러나 구조물에 내재된 확률변수의 불확실성에 대한 영향을 보다 명확하게 평가할 뿐만 아니라 경제적인 설계를 위해서는 보다 개선된 평가방안이 요구된다. 이 연구에서는 터빈발전기 기초를 대상으로 합리적인 설계를 위해 확률유한요소법을 이용한 구조신뢰성해석을 수행하였다. 이를 위해 확률유한요소법을 신뢰성이론에 적합하도록 정식화하였으며, 대상 구조물의 부재강성 및 지진하중 등을 확률변수로 고려하여 동적응답해석 및 구조신뢰성해석을 효율적으로 수행할 수 있는 개선된 해석프로그램을 작성하였다. 작성된 해석프로그램을 이용하여 주요부재의 변위 및 부재력 응답에 대한 분산특성을 검토하였다. 아울러, 구조신뢰성해석에 따른 신뢰성지수 및 파괴확률을 제시함으로써, 대상 구조물의 구조 안전성을 정량적으로 평가하였다. 이 연구결과는 향후, 터빈발전기 기초의 개선된 설계방안을 설정함에 있어 기초자료를 제공할 것으로 기대된다.

주요어 터빈발전기 기초, 확률유한요소법, 확률변수, 지진안전성 평가

ABSTRACT >> Most of the civil structure - bridges, offshore structures, plant, etc. - have been designed by the classical approaches which deal with all the design parameters as deterministic variables. However, some more advanced techniques are required to evaluate the inherent randomness and uncertainty of each design variable. In this research, a seismic safety assessment algorithm based on the structural reliability analysis has been formulated and computerized for more reasonable seismic design of turbine-generator foundations. The formulation takes the design parameters of the system and loading properties as random variables. Using the proposed method, various kinds of parametric studies have been performed and probabilistic characteristics of the resulted structural responses have been evaluated. Afterwards, the probabilistic safety of the system has been quantitatively evaluated and finally presented as the reliability indexes and failure probabilities. The proposed procedure is expected to be used as a fundamental tool to improve the existing design techniques of turbine-generator foundations.

Key words Turbine-Generator Foundation, Stochastic Finite Element Method, Random Variables, Seismic Safety Assessment

1. 서론

발전소 내 주요 구조물 중의 하나인 터빈발전기 기초는 전력을 생산하기 위한 회전기계에 의하여 회전진동이 작용하는 구조물로서, 회전기계의 진동특성에 대한 적합한 진동특성을 제공하고 기계의 회전정렬을 유지하며, 회전기계의

지지 및 기계의 구성요소들을 정착시키는 역할 등을 하게 된다⁽¹⁻³⁾.

터빈발전기 기초는 다양한 동적하중에 의하여 진동이 발생하므로 허용범위 이상의 진동이 발생할 경우 기초자체의 안전성뿐만 아니라 인접구조물 또는 인접 주요기에 손상을 일으켜 전체적인 발전 시스템에 큰 피해를 줄 수 있다. 특히, 지진과 같은 동적하중을 고려할 경우, 터빈발전기 기초는 건설되는 지역의 특성과 산업적 중요도를 평가하여 구조물이 충분한 강도를 가질 수 있도록 설계가 수행되어야 할 것이다^(4,5).

이와 같은 구조설계 과정에서 가장 중요한 것은 구조물과 산업설비(계통, 기기 등)에 포함되어 있는 자연적인 위험요소와 인위적인 위험요소 등의 불확실성(Aleatory and Epistemic

¹⁾ 정회원·인천대학교 토목환경시스템공학과 교수
(대표저자: yhjoe@incheon.ac.kr)

²⁾ 정회원·(주)에스디이엔지 상무이사

³⁾ 충남대학교 토목공학과 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2008년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 3. 11 / 심사종료일 : 2008. 3. 25)

Uncertainties)과 무작위성(Randomness)이 구조물의 역학적 거동특성에 미치는 영향을 상세히 검토하는 것이다^(6,7). 그러나 터빈발전기 기초는 현재 결정론적 해석방법에 의하여 설계되고 있으며, 특히 지진하중과 같은 무작위성과 구조물 자체의 사용재료 및 기하학적 불확실성에 대하여 고려하고 있지 않으므로 동적 허용응답에 의하여 구조물 및 기기의 성능을 평가하는 데에 있어서는 합리적인 결과를 제공하지 못하고 있는 실정이다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위한 방안으로 확률변수의 불확실성을 논리적으로 고려하는 신뢰성해석 방법에 의한 안전성을 검토하는 것이 합리적일 것이다. 그러나 신뢰성해석 방법은 한계상태방정식의 구성과정이 매우 복잡하여 실용화하기에는 많은 어려움이 따른다. 또한 DMCS(Direct Monte Carlo Simulation) 방법을 이용한 신뢰성해석 방법은 매우 정확한 해석결과를 도출할 수 있으나 해석시간이 많이 소요되므로, 터빈발전기 기초와 같은 복잡한 구조물 및 동적해석 수행 시에는 적합하지 않으며, 주로 근사해석 방법의 검증방법으로 이용되고 있다. 따라서 확률론적 구조신뢰성해석을 보다 효율적으로 수행할 수 있는 개선된 방안이 요구되며, 최근 이 분야에 대한 많은 연구가 진행되고 있다⁽⁸⁻¹⁰⁾.

이 연구에서는 터빈발전기 기초의 구조안전성을 정량적으로 평가하기 위해 확률론적 구조신뢰성해석을 수행하였다. 확률유한요소법을 신뢰성이론에 적합하도록 정식화하여 부재강성 및 예기치 못한 지진하중 등을 확률변수로 적용하여 확률론적 구조신뢰성해석을 효율적으로 수행할 수 있는 개선된 해석프로그램을 작성하였다. 작성된 해석프로그램을 이용하여 주요부재에 대한 동적응답의 분산특성을 평가하였다. 또한 해석결과에 따른 신뢰성지수 및 파괴확률을 검토하여 대상 구조물의 구조 안전성을 정량적으로 제시하였다.

2. 확률유한요소해석

2.1 섭동법을 이용한 확률유한요소해석

구조물에 포함되어 있는 확률변수의 불확실성을 평가하기 위한 대표적인 수치해법인 섭동법(Perturbation Method)을 이용하여 강성행렬 $[K]$ 를 재료의 불확실성을 나타내는 확률변수 $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}^T$ 의 함수로 가정하여 Taylor 급수 전개를 수행하면 식 (1)과 같이 정리할 수 있다^(11,12).

$$[K] = [K_0] + \sum_{i=1}^N [K]_i^{(1)} \alpha_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [K]_{ij}^{(2)} \alpha_i \alpha_j + \dots \quad (1)$$

여기서, $[K_0]$ 는 $\alpha = 0$ 인 경우의 강성행렬이며, 강성행렬 $[K]$ 를 편미분한 $[K]_i^{(1)}$ 과 $[K]_{ij}^{(2)}$ 는 식 (2)와 같이 유도 할 수 있다.

$$[K]_i^{(1)} = \left. \frac{\partial [K]}{\partial \alpha_i} \right|_{\alpha=0} \quad [K]_{ij}^{(2)} = \left. \frac{\partial^2 [K]}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j} \right|_{\alpha=0} \quad (2)$$

하중벡터 $\{F\}$ 및 변위벡터 $\{U\}$ 또한 위의 식 (2)와 같이 전개하면 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\{F\} = \{F\}_0 + \sum_{i=1}^N \{F\}_i^{(1)} \alpha_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{F\}_{ij}^{(2)} \alpha_i \alpha_j + \dots \quad (3a)$$

$$\{U\} = \{U\}_0 + \sum_{i=1}^N \{U\}_i^{(1)} \alpha_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{U\}_{ij}^{(2)} \alpha_i \alpha_j + \dots \quad (3b)$$

위 식들을 평형방정식 $[K]\{U\} = \{F\}$ 에 대입하여 정리하면 다음 식과 같다.

$$\{U\}_0 = [K]_0^{-1} \{F\}_0 \quad (4a)$$

$$\{U\}_i^{(1)} = [K]_0^{-1} (\{F\}_i^{(1)} - [K]_i^{(1)} \{U\}_0) \quad (4b)$$

$$\{U\}_{ij}^{(2)} = [K]_0^{-1} (\{F\}_{ij}^{(2)} - [K]_i^{(1)} \{U\}_j^{(1)} - [K]_j^{(1)} \{U\}_i^{(1)} - [K]_{ij}^{(2)} \{U\}_0) \quad (4c)$$

변위에 대한 1차 섭동법(First Order Perturbation Method)은 식 (3)의 우변에서 1차 항만 고려한 것으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\{U\} = \{U\}_0 + \sum_{i=1}^N \{U\}_i^{(1)} \alpha_i \quad (5)$$

따라서 1차 섭동법에 의한 변위의 평균과 공분산 행렬은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$E^{(1)}[\{U\}] = \{U\}_0 \quad (6a)$$

$$COV^{(1)}[\{U\}, \{U\}] = E[(\{U\} - E^{(1)}[\{U\}]) (\{U\} - E^{(1)}[\{U\}])^T] \\ = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{U\}_i^{(1)} (\{U\}_j^{(1)})^T E[\alpha_i \alpha_j] \quad (6b)$$

또한 변위에 대한 2차 섭동법(Second Order Perturbation Method)은 1차 섭동법과 같이 식 (3)에서 2차 항까지 고려한 것으로 다음 식과 같다.

$$\{U\} = \{U\}_0 + \sum_{i=1}^N \{U\}_i^{(1)} \alpha_i + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{U\}_{ij}^{(2)} \alpha_i \alpha_j \quad (7)$$

2차 섭동법에 의한 변위의 평균과 공분산 행렬은 다음 식과 같다.

$$E^{(2)}[\{U\}] = E^{(1)}[\{U\}] + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{U\}_{ij}^{(2)} \alpha_i \alpha_j \quad (8a)$$

$$COV^{(2)}[\{U\}, \{U\}] = COV^{(1)}[\{U\}, \{U\}] + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \{U\}_{ij}^{(2)} (\{U\}_{kl}^{(2)})^T \cdot (E[\alpha_i \alpha_i] E[\alpha_j \alpha_k] + E[\alpha_i \alpha_k] E[\alpha_j \alpha_i]) \quad (8b)$$

각 절점에서 변위를 구한 후, 계산되는 부재력의 평균 및 공분산 행렬들은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$\{F\}_0 = [K]_0 \{U\}_0 \quad (9a)$$

$$\{F\}_i^{(1)} = [K]_i^{(1)} \{U\}_0 + [K]_0 \{U\}_i^{(1)} \quad (9b)$$

$$\{F\}_{ij}^{(2)} = [K]_{ij}^{(2)} \{U\}_0 + [K]_i^{(1)} \{U\}_j^{(1)} + [K]_j^{(1)} \{U\}_i^{(1)} + [K] \{U\}_{ij}^{(2)} \quad (9c)$$

대상 구조물의 부재강성을 확률변수로 고려하기 위해 구성하는 각각의 요소에 대한 편미분 강성행렬을 식 (10)~(12)와 같이 계산할 수 있다⁽¹³⁾.

- 단면적(A)가 확률변수인 경우;

$$\left[\frac{\partial K}{\partial A} \right] = \begin{bmatrix} \frac{E}{L} & 0 & 0 & -\frac{E}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{E}{L} & 0 & 0 & \frac{E}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

- 탄성계수(E)가 확률변수인 경우;

$$\left[\frac{\partial K}{\partial E} \right] = \begin{bmatrix} \frac{A}{L} & 0 & 0 & -\frac{A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12I}{L^3} & \frac{6I}{L^2} & 0 & -\frac{12I}{L^3} & \frac{6I}{L^2} \\ 0 & \frac{6I}{L^2} & \frac{4I}{L} & 0 & -\frac{6I}{L^2} & \frac{2I}{L} \\ -\frac{A}{L} & 0 & 0 & \frac{A}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12I}{L^3} & -\frac{6I}{L^2} & 0 & \frac{12I}{L^3} & -\frac{6I}{L^2} \\ 0 & \frac{6I}{L^2} & \frac{2I}{L} & 0 & -\frac{6I}{L^2} & \frac{4I}{L} \end{bmatrix} \quad (11)$$

- 단면이차모멘트(I)가 확률변수인 경우;

$$\left[\frac{\partial K}{\partial I} \right] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12E}{L^3} & \frac{6E}{L^2} & 0 & -\frac{12E}{L^3} & \frac{6E}{L^2} \\ 0 & \frac{6E}{L^2} & \frac{4E}{L} & 0 & -\frac{6E}{L^2} & \frac{2E}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12E}{L^3} & -\frac{6E}{L^2} & 0 & \frac{12E}{L^3} & -\frac{6E}{L^2} \\ 0 & \frac{6E}{L^2} & \frac{2E}{L} & 0 & -\frac{6E}{L^2} & \frac{4E}{L} \end{bmatrix} \quad (12)$$

2.2 동적확률유한요소해석

이 연구에서는 섭동법을 이용하여 터빈발전기 기초구조물을 대상으로 동적확률유한요소해석을 수행하였다. 터빈발전기 기초의 부재강성 및 입력지진동을 확률변수로 고려하였으며, 각각의 확률변수는 상호 비연성(무상관)관계로 가정하였다. 확률변수(α_i)의 불확실성이 비교적 작다고 가정하면 확률변수를 포함하는 터빈발전기 기초 구조물에 대한 확률론적 동적시스템에 대한 운동방정식은 식 (13)과 같이 정리할 수 있다.

$$[M(\alpha_i)]\{\ddot{X}(t, \alpha_i)\} + [C(\alpha_i)]\{\dot{X}(t, \alpha_i)\} + [K(\alpha_i)]\{X(t, \alpha_i)\} = \{F(t, \alpha_i)\} \quad (13)$$

식 (13)을 확률변수벡터의 평균에 대해 산정된 영차(Zeroth-Order)방정식은 식 (14)와 같이 유도할 수 있다.

$$[M]^{(0)}\{\ddot{X}\}^{(0)} + [C]^{(0)}\{\dot{X}\}^{(0)} + [K]^{(0)}\{X\}^{(0)} = \{F\}^{(0)} \quad (14)$$

여기서, $[M]^{(0)}$: 질량행렬 $[C]^{(0)}$: 감쇠행렬

$[K]^{(0)}$: 강성행렬 $\{F\}^{(0)}$: 입력지진동

$\{X\}^{(0)}, \{\dot{X}\}^{(0)}, \{\ddot{X}\}^{(0)}$: 변위, 속도, 가속도 응답벡터

확률변수벡터에 대한 식 (14)를 편미분 하면 식 (15)와 같은 1차 섭동(First-Order Perturbation)방정식을 산정할 수 있다. 식 (15)를 계산한 후, 다시 편미분 하면 식 (16)과 같은 2차 섭동(Second-Order Perturbation)방정식을 유도할 수 있다.

$$[M]^{(0)}\{\ddot{X}\}^{(1)} + [C]^{(0)}\{\dot{X}\}^{(1)} + [K]^{(0)}\{X\}^{(1)} = \{F\}^{(1)} - [M]^{(1)}\{\ddot{X}\}^{(0)} - [C]^{(1)}\{\dot{X}\}^{(0)} - [K]^{(1)}\{X\}^{(0)} \quad (15)$$

$$[M]^{(0)}\{\ddot{X}\}^{(2)} + [C]^{(0)}\{\dot{X}\}^{(2)} + [K]^{(0)}\{X\}^{(2)} = \{F\}^{(2)} - [M]^{(2)}\{\ddot{X}\}^{(0)} - [C]^{(2)}\{\dot{X}\}^{(0)} - [K]^{(2)}\{X\}^{(0)} - 2\{[M]^{(1)}\{\ddot{X}\}^{(1)} + [C]^{(1)}\{\dot{X}\}^{(1)} + [K]^{(1)}\{X\}^{(1)}\} \quad (16)$$

여기서, $(g)^{(0)} = (g)|_{\alpha=0}$, $(g)^{(1)} = \frac{\partial}{\partial \alpha_i}(g)|_{\alpha=0}$

$$(g)^{(2)} = \frac{\partial^2}{\partial \alpha_i \partial \alpha_j}(g)|_{\alpha=0}$$

이 연구에서 고려한 터빈발전기 기초 구조물의 확률변수는 부재강성과 입력지진동이므로 확률변수에 대하여 식 (15)의 1차 섭동방정식은 식 (17)과 같이 정리할 수 있다.

$$[M]^{(0)}\left\{\frac{\partial \ddot{X}}{\partial K}\right\} + [C]^{(0)}\left\{\frac{\partial \dot{X}}{\partial K}\right\} + [K]^{(0)}\left\{\frac{\partial X}{\partial K}\right\} = -\{X\}^{(0)} \quad (17a)$$

$$[M]^{(0)} \left\{ \frac{\partial \ddot{X}}{\partial F} \right\} + [C]^{(0)} \left\{ \frac{\partial \dot{X}}{\partial F} \right\} + [K]^{(0)} \left\{ \frac{\partial X}{\partial F} \right\} = \{1\} \quad (17b)$$

식 (16)의 2차 섭동방정식은 식 (18)과 같이 정리할 수 있으며 식 (18)을 간단하게 정리하면 식 (19)와 같이 유도할 수 있다.

$$[M]^{(0)} \left\{ \frac{\partial^2 \ddot{X}}{\partial K \partial F} \right\} + [C]^{(0)} \left\{ \frac{\partial^2 \dot{X}}{\partial K \partial F} \right\} + [K]^{(0)} \left\{ \frac{\partial^2 X}{\partial K \partial F} \right\} = 2 \left\{ \frac{\partial X}{\partial F} \right\} \quad (18)$$

$$[M]^{(0)} \{ \ddot{X} \}^{(2)} + [C]^{(0)} \{ \dot{X} \}^{(2)} + [K]^{(0)} \{ X \}^{(2)} = -2 \{ X \}^{(1)} \quad (19)$$

여기서, $\{ \cdot \}^{(2)} = \left\{ \frac{\partial^2 (\cdot)}{\partial K \partial F} \right\}$ 이다.

대상 구조물의 변위 및 부재력에 대한 평균은 식 (8)에 의해 산정할 수 있다. 아울러, 1, 2차 섭동법에 의한 동적확률유한요소해석 수행 시, 확률변수에 따른 변위 및 부재력에 대한 표준편차는 프레임요소의 구성 요소에 대한 편미분강성행렬과 입력지진동에 따른 편미분방정식 (18), (19)에 의해 평가할 수 있다. 입력지진동을 확률변수로 고려하기 위한 편미분은 가속도 시간이력과 시스템질량의 곱에 의한 지진하중 자체가 확률변수이므로 쉽게 계산할 수 있다.

3. AFOSM 방법을 이용한 구조신뢰성해석

신뢰성지수와 이에 상응하는 파괴확률은 각각 다음 식과 같이 쓸 수 있다^(14,15).

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (20a)$$

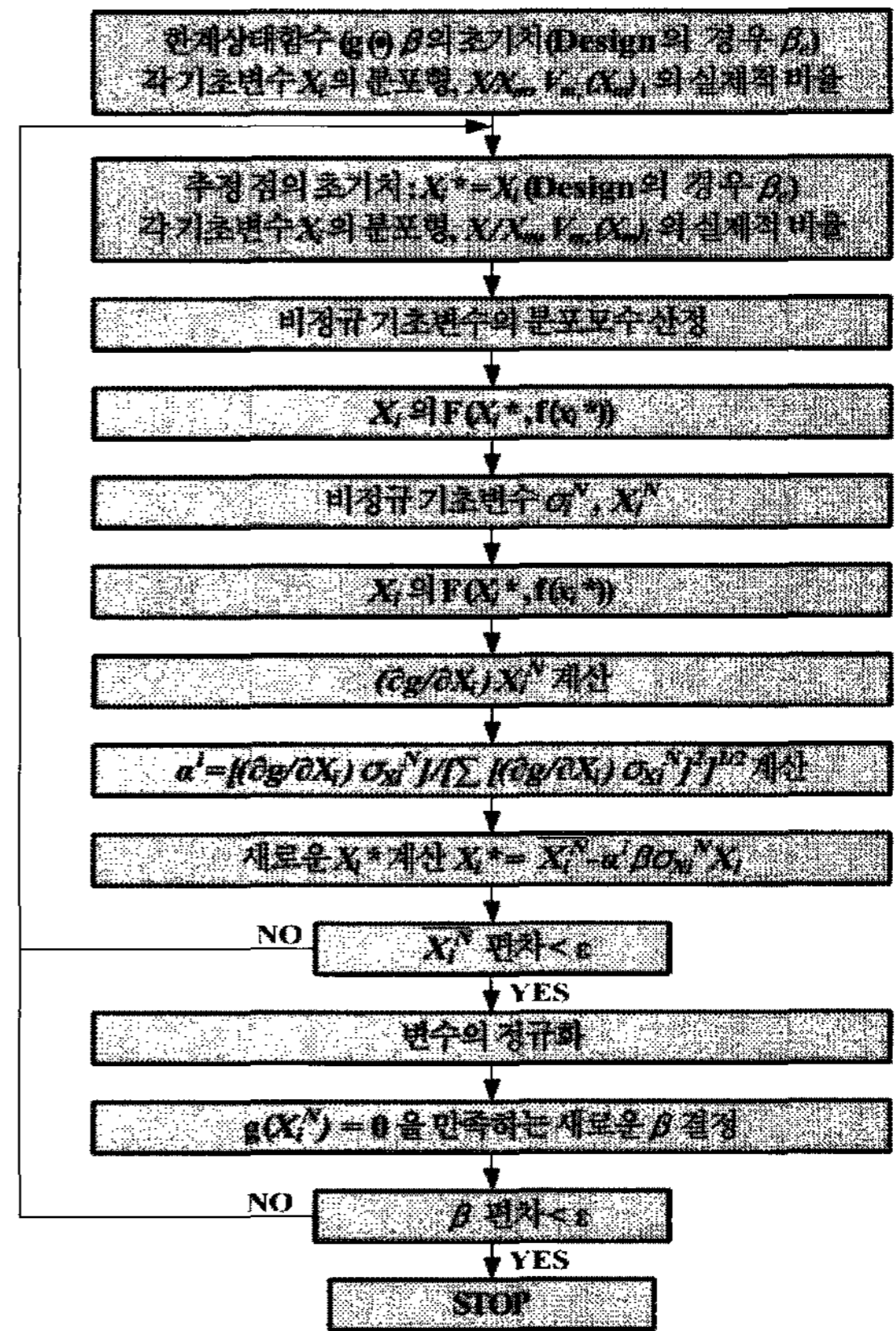
$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (20b)$$

여기서, P_f : Failure Probability, β : Reliability Index

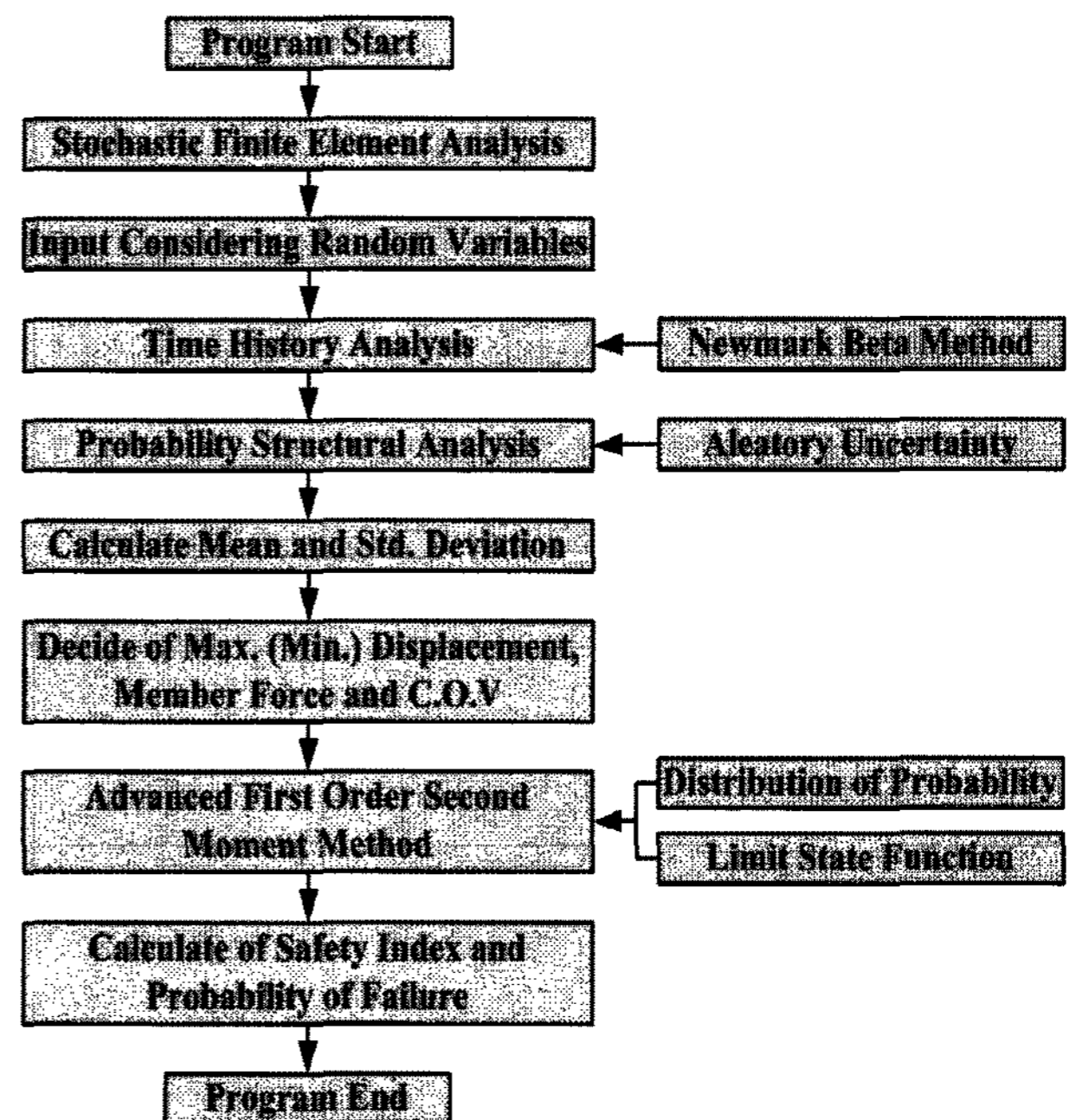
AFOSM방법은 불변성 결여 문제 및 연성(상관) 확률변수들을 비연성(비상관) 확률변수들로 바꾸어 연성을 해결할 수 있는 방법이다. Rackwitz-Fissler는 등가정규변환방법을 도입하여 연성 비정규분포를 갖는 기본변수들의 한계상태 방정식이 비선형 함수인 경우에도 정확한 해석결과를 구할 수 있는 신뢰성해석 방법을 제시하였다⁽¹⁶⁾. 신뢰성지수를 구하기 위한 반복시행 알고리즘은 그림 1과 같다.

이 연구에서는 확률유한요소 수식정식화 과정 및 신뢰성 이론을 바탕으로 터빈발전기 기초 구조물의 동적확률유한요소해석 및 구조신뢰성해석을 효율적으로 수행하기 위해 해석

프로그램(DSFEMP : Dynamic Stochastic Finite Element Method Program)을 FORTRAN으로 작성하였다[12,17]. DSFEMP는 기 제시된 연구에서 검증된 해석프로그램을 터빈발전기 기초의 해석을 위해 확장된 것으로서, DSFEMP의 알고리즘은 그림 2에 도시하였다^(8,17).



<Figure 1> Flow Chart for Reliability Index of Rackwitz-Fissler

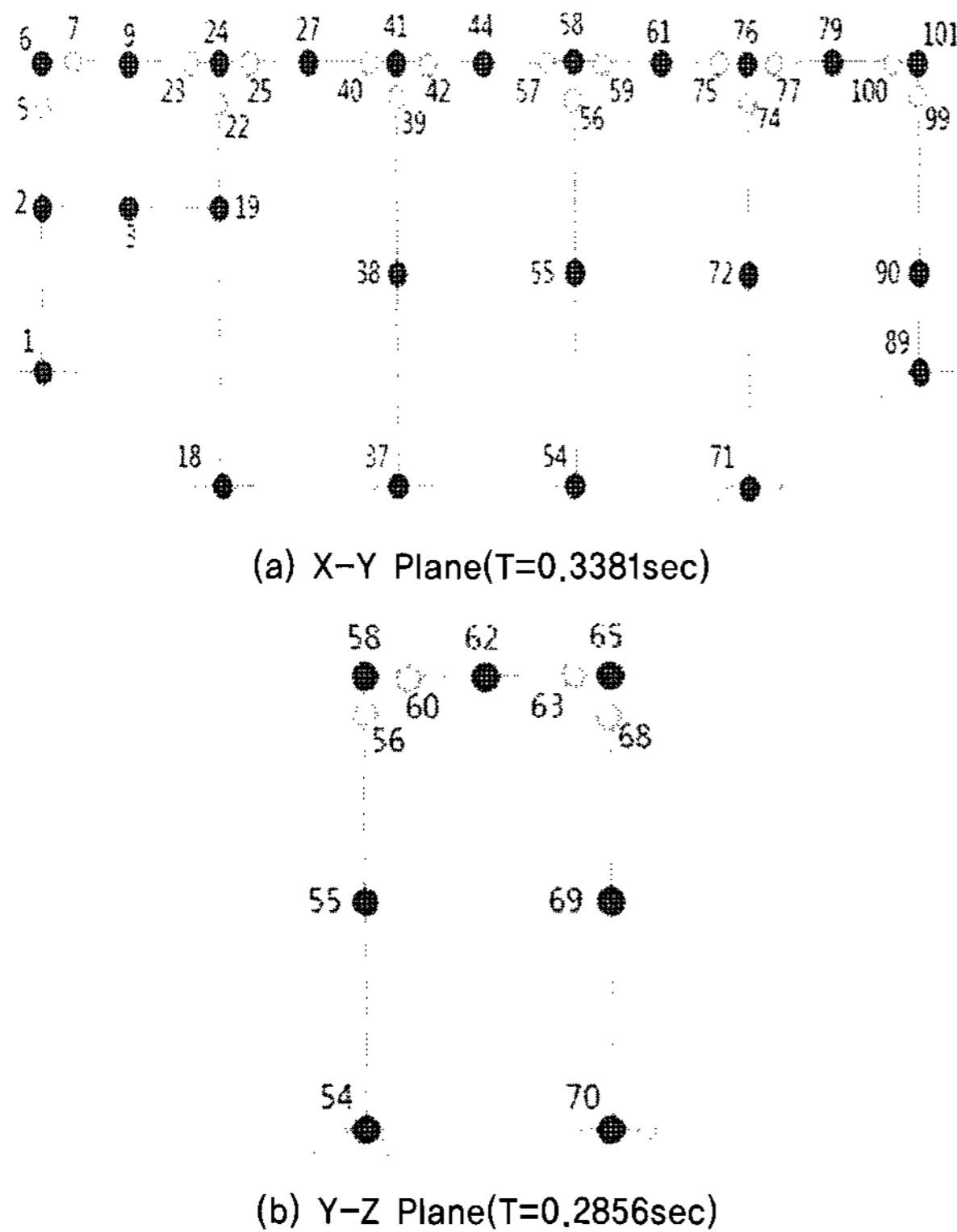


<Figure 2> Flow Chart of DSFEMP System

4. 터빈-발전기 기초의 확률유한요소해석

4.1 터빈-발전기 기초의 개요

터빈발전기 기초에 대한 확률론적 구조안전성 평가방법을 적용하기 위하여 기존에 건설되어 실제 운영·가동되고 있는 원자력발전소의 1000MW급 터빈발전기 기초 모델을 이용하였다. 그림 3은 각각의 방향별 수치해석을 위한 해석모델을 도시한 것이며, 표 1은 구성요소에 대한 제원을 정리한 것이다.

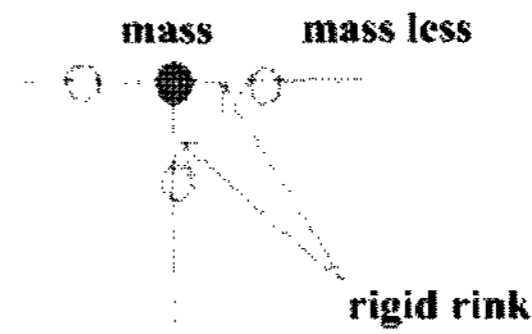


〈Figure 3〉 Numerical Model of the Objective Structure

〈Table 1〉 Properties of the Objective Structure

Properties	Area (m ²)	E (tonf/m ²)	I (m ⁴)	C.O.V.	
X-Y Plane	Column	9.2903	2.683×10 ⁶	0.147189	10.0%
		11.6129	2.683×10 ⁶	0.287440	
		7.4322	2.683×10 ⁶	0.045996	
		7.4322	2.683×10 ⁶	0.045996	
		7.6366	2.683×10 ⁶	0.088706	
		8.7459	2.683×10 ⁶	0.236879	
	Girder	9.2903	2.683×10 ⁶	0.147189	
		17.3692	2.683×10 ⁶	0.478119	
		10.5909	2.683×10 ⁶	0.291536	
		10.0335	2.683×10 ⁶	0.276190	
Y-Z Plane	Column	7.4322	2.683×10 ⁶	44.986800	
Girder	8.3613	2.683×10 ⁶	2.052934		

해석모델의 기둥상부와 종방향 및 횡방향거더 연결부는 부재의 부피로 인하여 강체거동이 이루어질 수 있도록 절점을 배치하였으며, 그림 4와 같이 질량이 없는 강결 요소를 이용하였다.

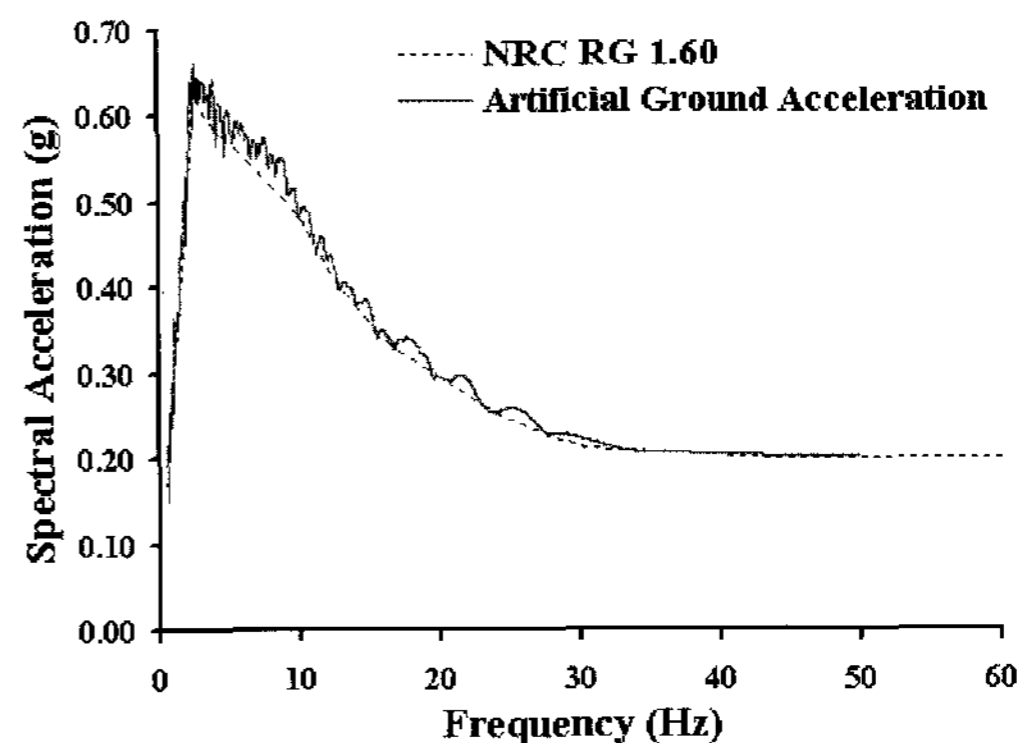


〈Figure 4〉 Connected Point Model of Beam-Column

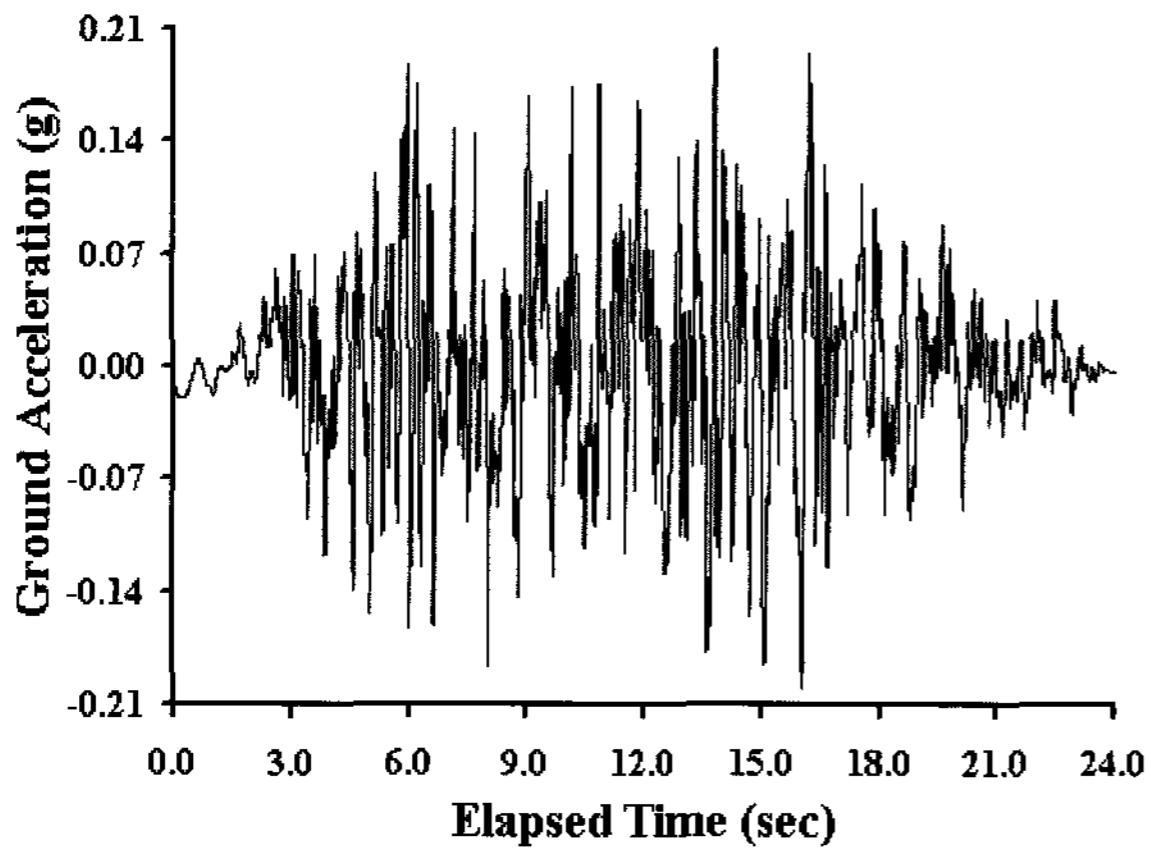
4.2 동적확률유한요소해석 결과

입력지진동과 시스템 인자의 불확실성이 구조응답에 미치는 효과가 거의 독립적이라는 성질로부터 구조응답에 대한 섭동모델을 유도하였다. 시스템 요소 중에서 질량과 감쇠는 시간에 대해 변화가 없는 확정적인 변수로 고려하였다. 부재강성과 가속도 시간이력에 의한 입력지진동이 갖는 불확정성을 모두 확률변수로 고려하였다. 부재강성의 변동계수는 10%를 고려하였으며, 입력지진동의 변동계수는 25%를 적용하여 수행하였다. 여기서 터빈발전기 기초의 부재강성에 영향을 주는 확률변수로는 단면적, 탄성계수, 단면이차모멘트 등을 확률변수로 고려하였다.

터빈발전기 기초의 시간이력해석을 위한 인공지진파를 생성하였다. 국내 원전구조물의 경우, 표준형 원전 구조물을 포함하여 대부분 원전 설계시, 미국 NRC에서 제시하고 있는 부지에 무관한 표준응답스펙트럼을 이용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 US NRC Regulatory Guide 1.60의 표준응답스펙트럼을 포괄하는 인공지진가속도 시간이력을 작성하였다. 이때, 인공지진가속도 시간이력 작성은 전용프로그램인 SIMQKE를 이용하였다^(18,19). 그림 5는 표준 및 설계 응답스펙트럼을 도시한 것이며, 그림 6은 작성된 인공가속도 시간이력을 도시한 것이다.



〈Figure 5〉 Acceleration Response Spectrum of Artificial Ground Motion



〈Figure 6〉 Acceleration Time History of Artificial Ground Motion

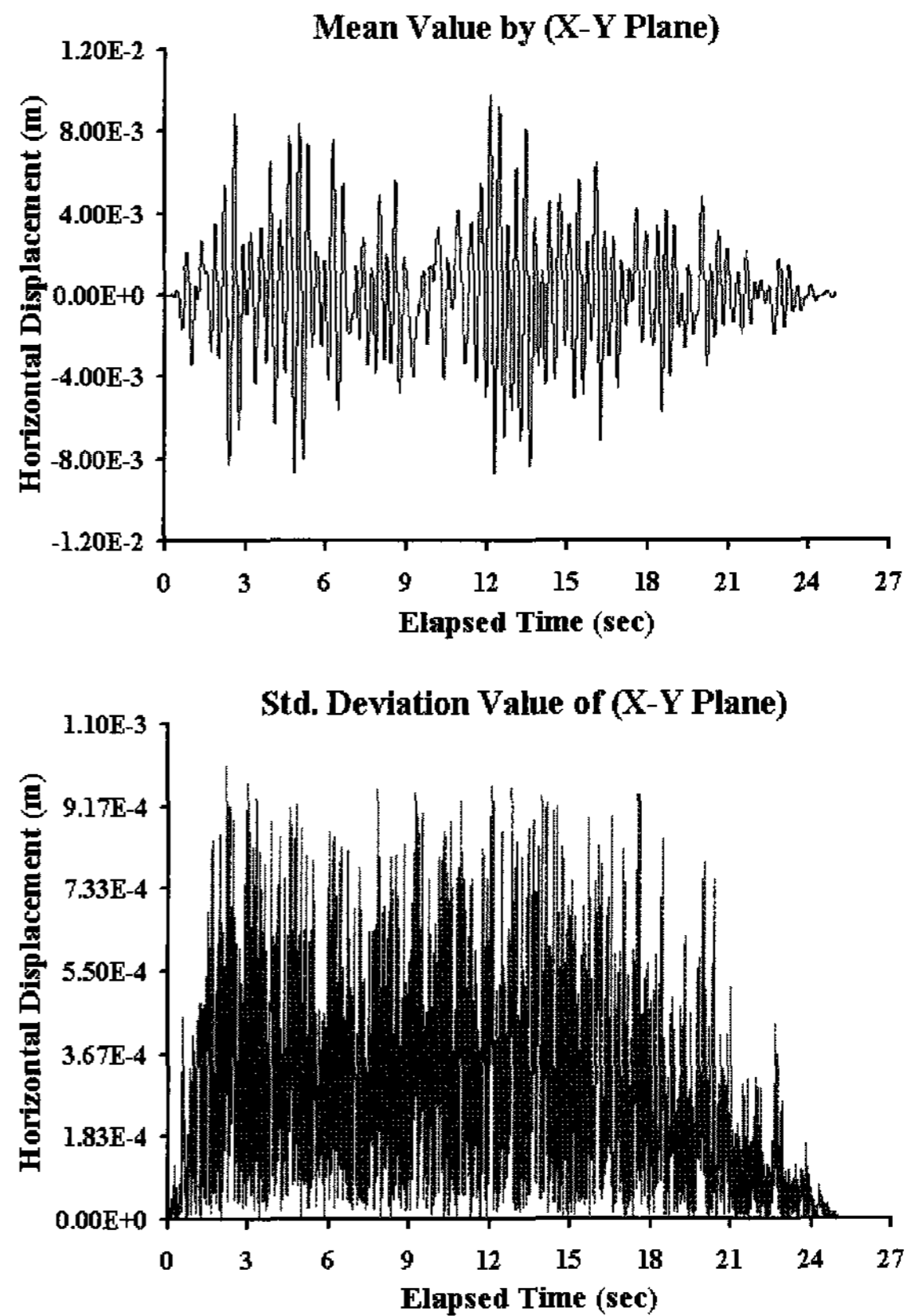
터빈발전기 기초의 안전정지지진에 대한 구조안전성을 검토하기 위해 동적확률유한요소해석을 수행하였다. 수평방향 최대설계지반가속도 0.2g(수직방향 0.13g)를 적용하여 평가하였으며, 감쇠비는 7%를 고려하였다. 이와 같이 조합된 해석과정을 효율적으로 수행하기 위해 DSFEMP 프로그램을 이용하였다. 터빈발전기 기초의 기둥에 대해 절점변위, 축력, 전단력 및 휨모멘트, 응답에 대한 최대(또는 최소) 평균, 표준편차 등을 검토하였으며, 절점변위 및 부재력응답에 대한 변동계수를 결정하였다. 이때 수치해법은 *Newmark-β* 방법을 이용하여 동적확률유한요소해석을 수행하였다.

4.2.1 절점변위응답

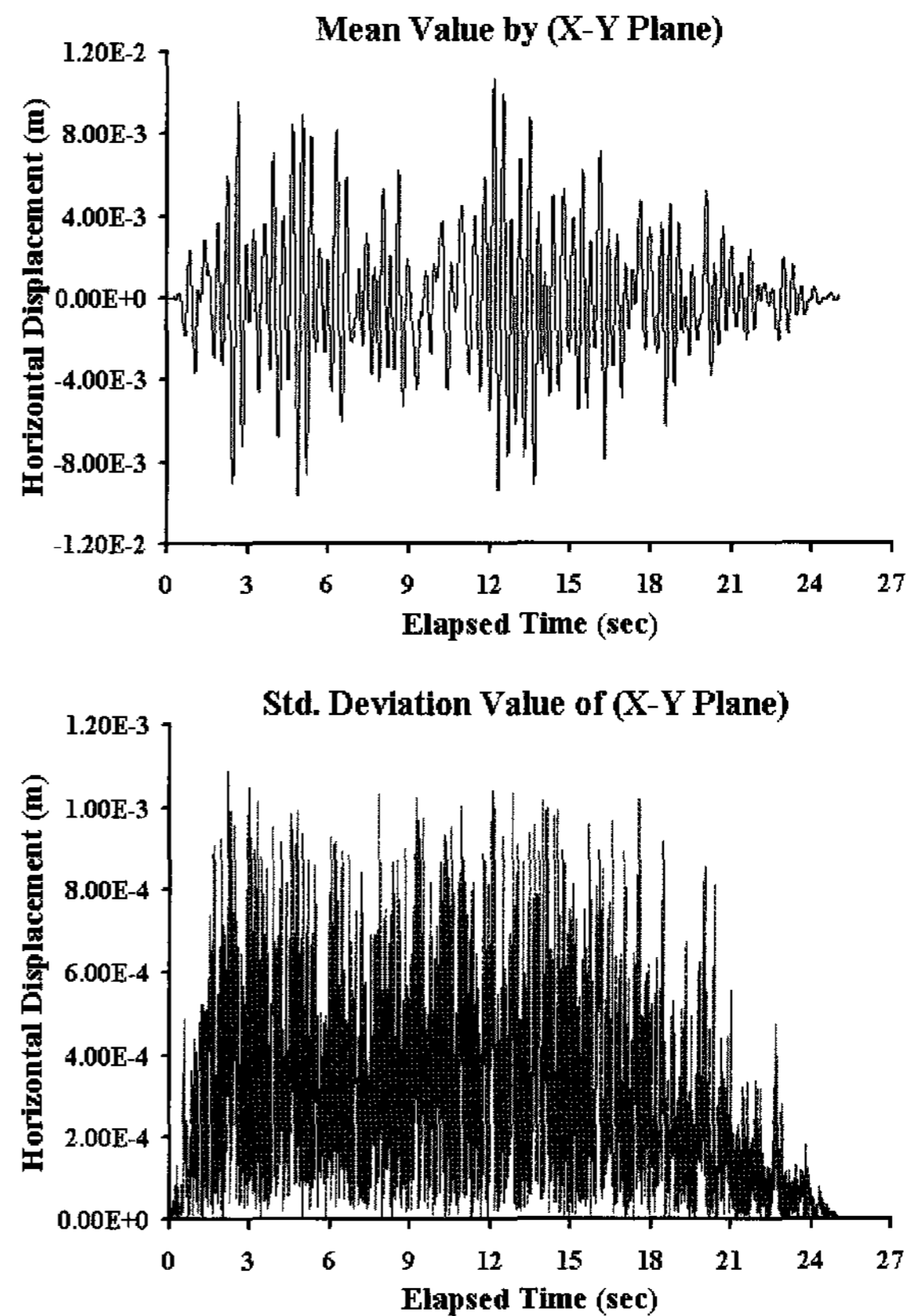
확률변수에 따른 터빈발전기 기초의 절점변위응답은 X-Y 평면의 경우, 좌, 우측 기둥 상단부에 대하여 검토하였으며, Y-Z 평면의 경우 대칭구조이므로 좌측 기둥 상단부에 대해 평가하였다.

각각의 방향별 수평변위응답에 대한 평균 및 표준편차를 그림 7~9에 도시하였으며, 전체적인 절점변위응답 결과는 표 2에 상세히 정리하였다.

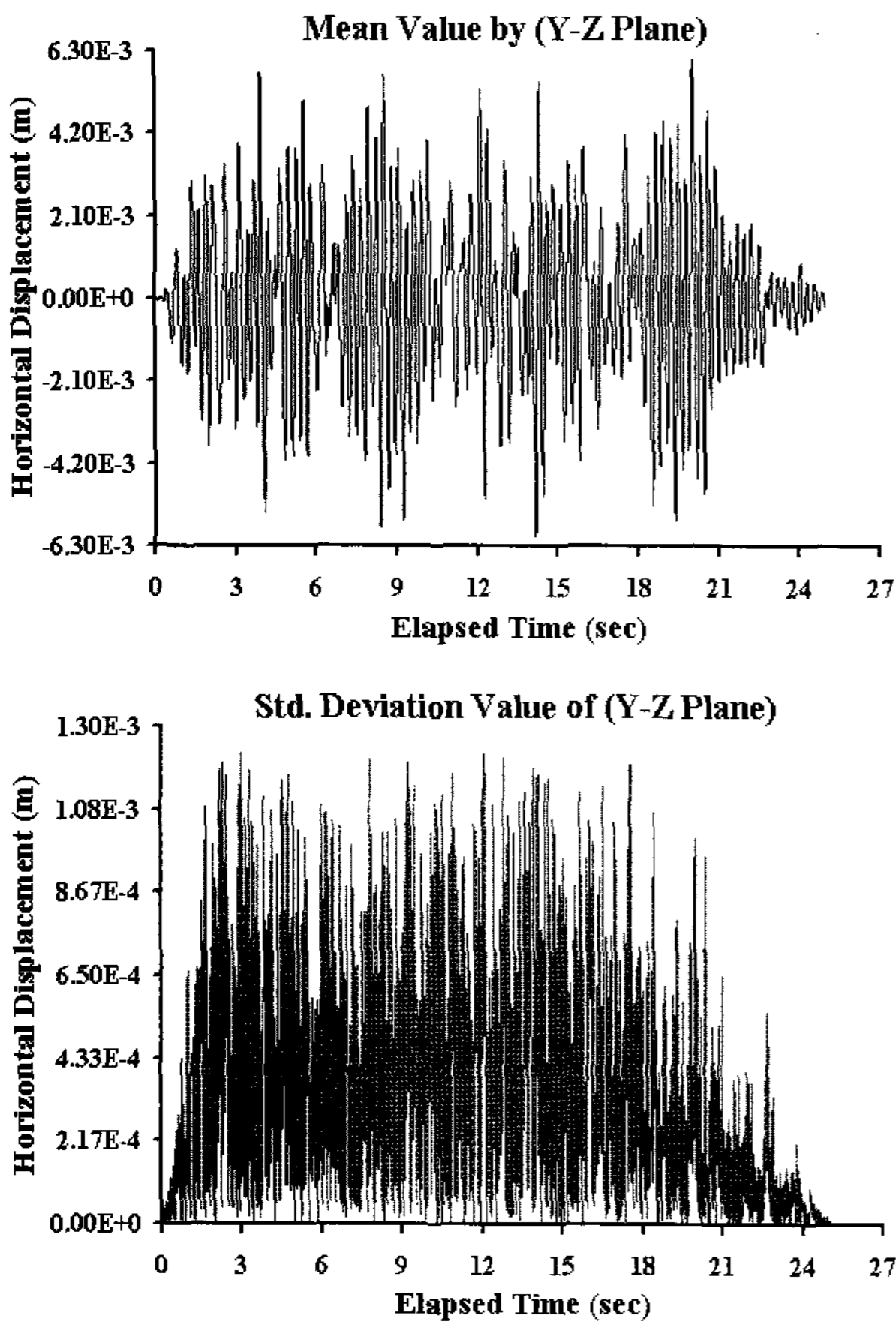
X-Y 평면에서 기둥 상단부의 최대, 최소 수평변위에 대한 평균 응답은 좌측 기둥의 경우 각각 0.977cm, -0.872cm로 나타났으며, 최대 표준편차 응답은 약 0.100cm로 산정되었다. 우측 기둥의 경우 최대, 최소 평균 응답은 각각 1.071cm, -0.961cm로 나타났으며 최대 표준편차 응답은 0.1083cm로 검토되었다. 절대최대 수평변위 응답에 대한 좌, 우측 기둥의 변동계수는 각각 10.241%, 10.114%로 평가되었다. Y-Z 평면에서 기둥 상단부의 최대, 최소 수평변위에 대한 평균 응답은 좌측 기둥의 경우 각각 0.608cm, -0.604cm로 산정되었으며, 최대 표준편차 응답은 0.1227cm로 검토되었다. 절대최대 수평변위 응답에 대한 변동계수는 21.667%로 평가되었다.



〈Figure 7〉 Comparison of Mean and Std. Deviation for DSFEMP Horizontal Displacement (Node 6)



〈Figure 8〉 Comparison of Mean and Std. Deviation for DSFEMP Horizontal Displacement (Node 101)



(Figure 9) Comparison of Mean and Std. Deviation for DSFEMP Horizontal Displacement (Node 58)

방향별 절점변위응답을 검토한 결과 X-Y 평면에 비해 Y-Z 평면의 변동계수가 비교적 큰 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다. 따라서 터빈발전기 기초 설계 시 구조응답특성을 보다 합리적으로 평가하기 위해 확률유한요소법 등을 이용한 확률론적 구조검토 과정이 필요할 것으로 판단된다.

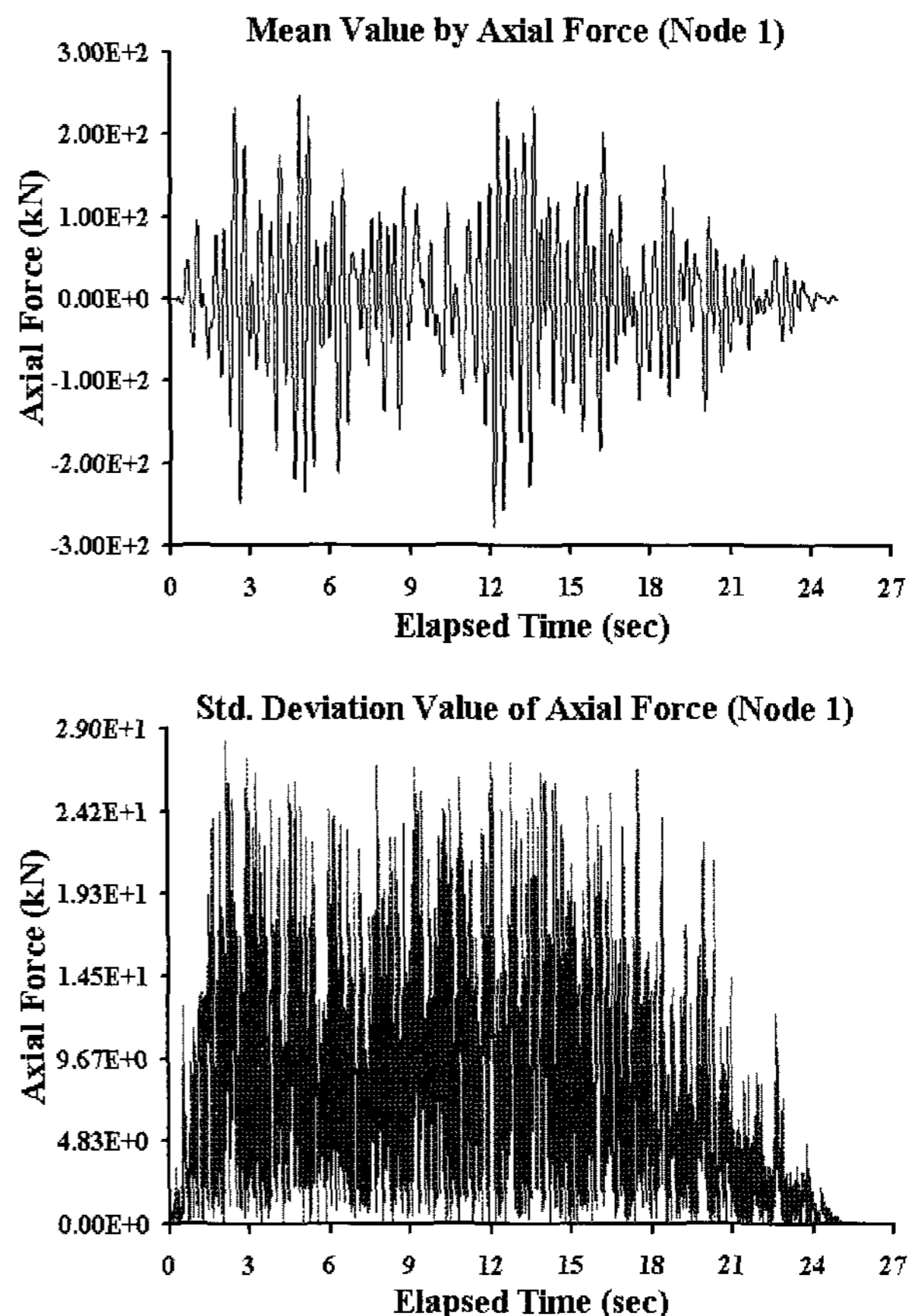
(Table 2) Mean and Std. Deviation of Displacement (cm, rad/sec)

Node No.		Horizontal	Vertical	Rotation	
X-Y Plane	6	Mean MAX.	0.977	0.1031	0.000198
		MIN.	-0.872	-0.0920	-0.000219
	Std. Deviation	0.100	0.0105	0.0000218	
	C.O.V(%)	10.241	10.1463	9.9666	
101	Mean	MAX.	1.071	0.0586	0.000363
		MIN.	-0.961	-0.0631	-0.000409
	Std. Deviation	0.1083	0.0063	0.0000407	
	C.O.V(%)	10.114	9.9790	9.9618	
Y-Z Plane	58	Mean MAX.	0.608	0.1491	0.000355
		MIN.	-0.604	-0.1390	-0.000360
	Std. Deviation	0.1227	0.0146	0.0000733	
	C.O.V(%)	21.667	9.8134	20.5983	

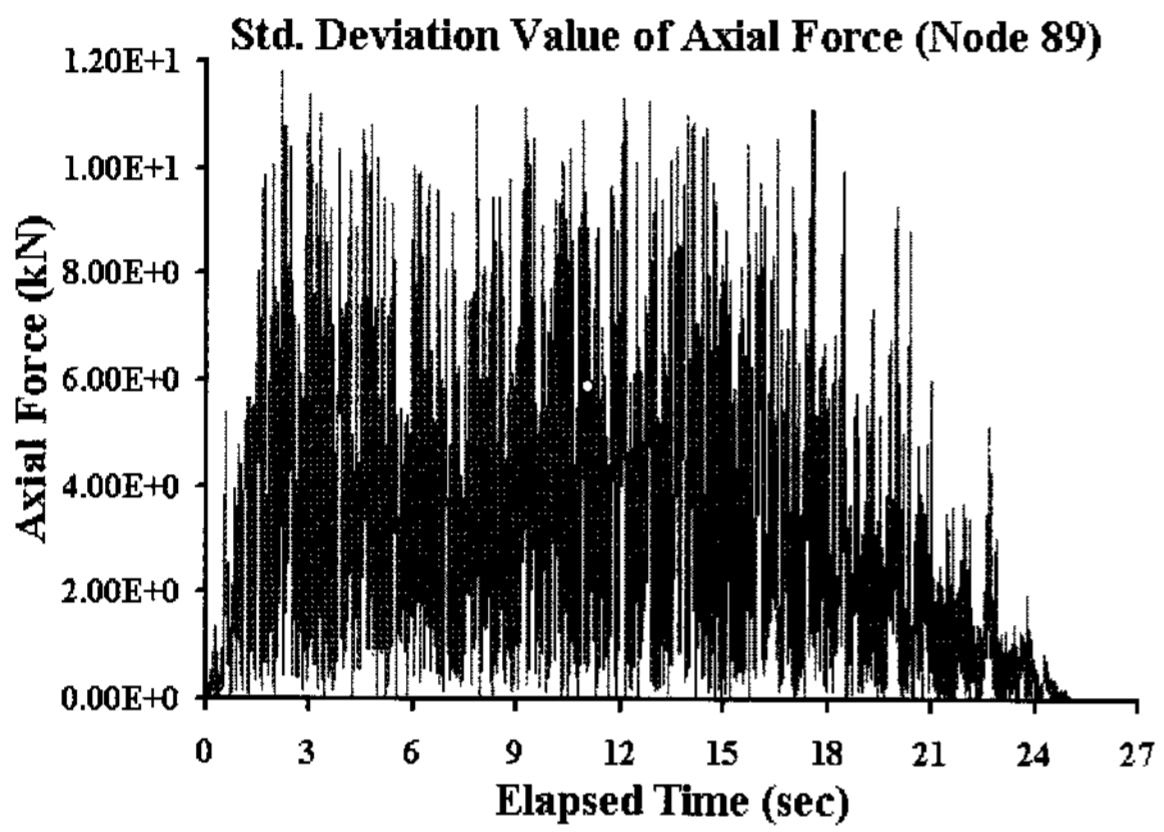
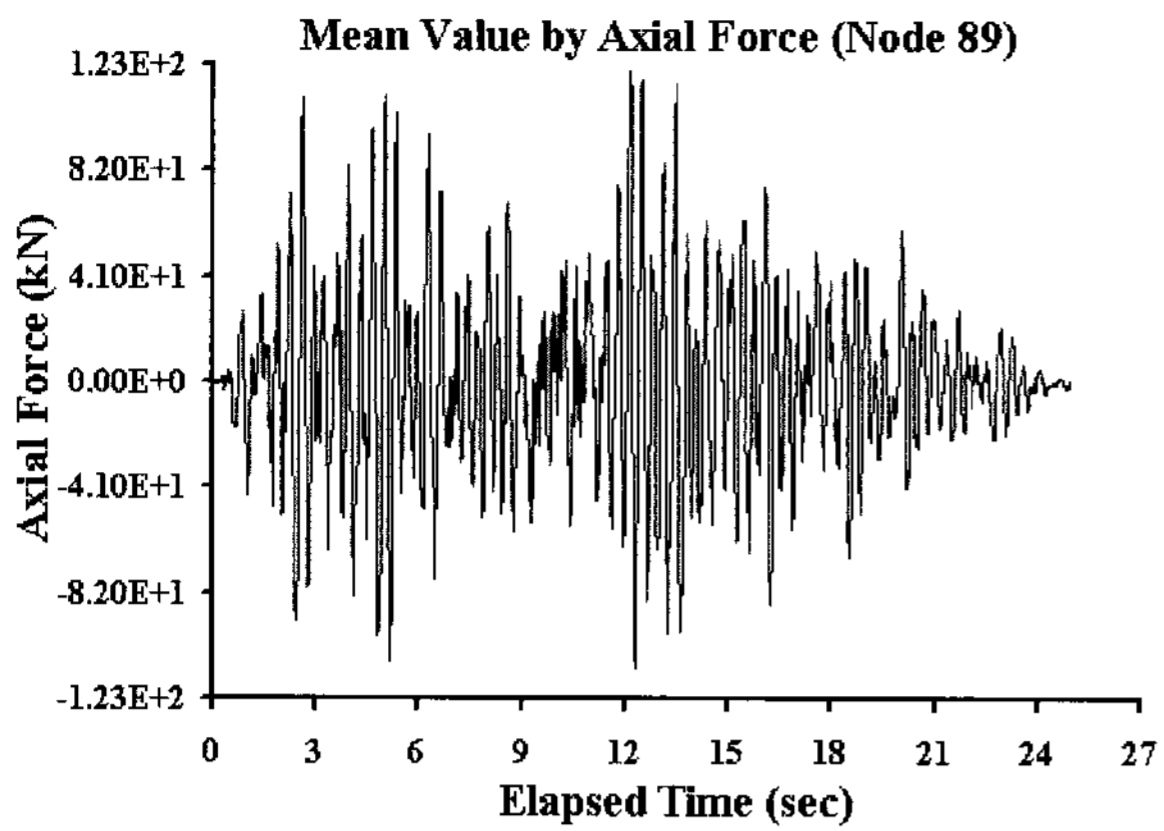
4.2.2 부재력응답

동적확률유한요소해석에 따른 부재력응답은 기둥 기초부의 축력, 전단력 및 휨모멘트로 구분하여 검토하였다. X-Y 평면의 경우, 6개의 기둥 기초부 부재에 대하여 평가하였으며, Y-Z 평면의 경우 대칭구조이므로 좌측 기둥 기초부에 대해 검토하였다. 주요부재에 대해 각각의 방향별 부재력응답에 대한 해석결과를 그림 10~18에 도시하였으며, 전반적인 부재력응답의 평균 및 표준편차는 표 3에 상세히 정리하였다.

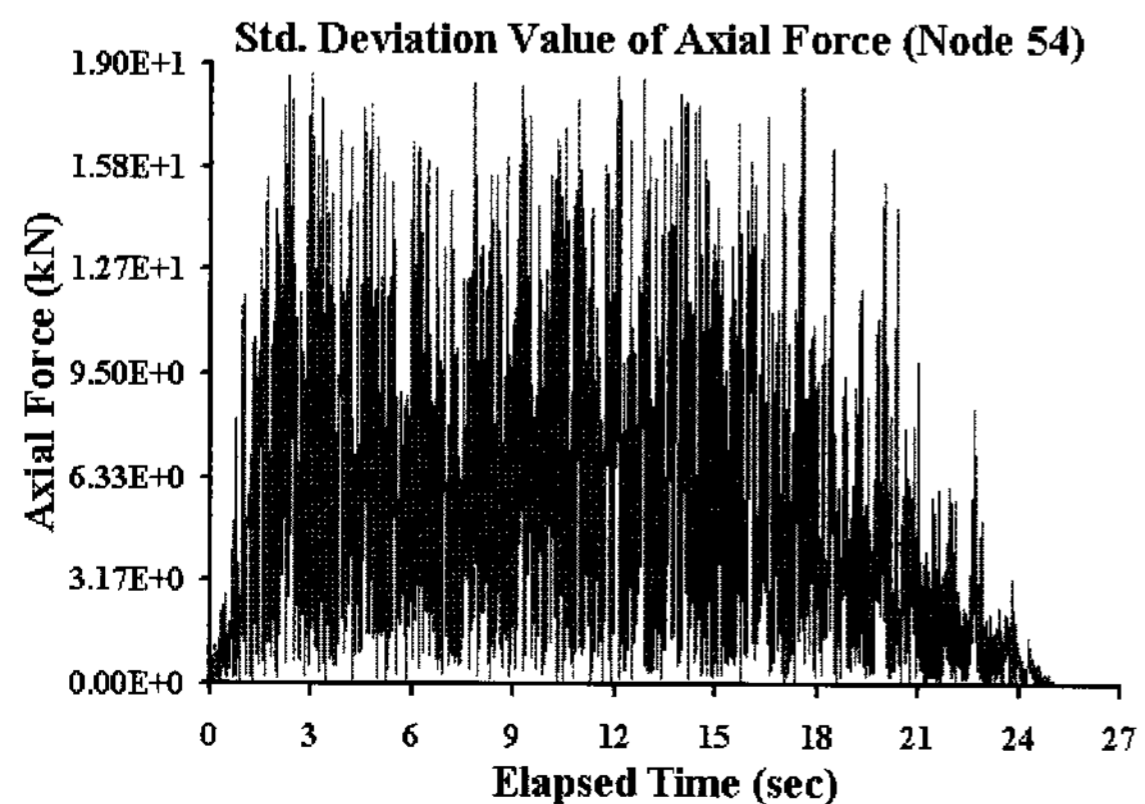
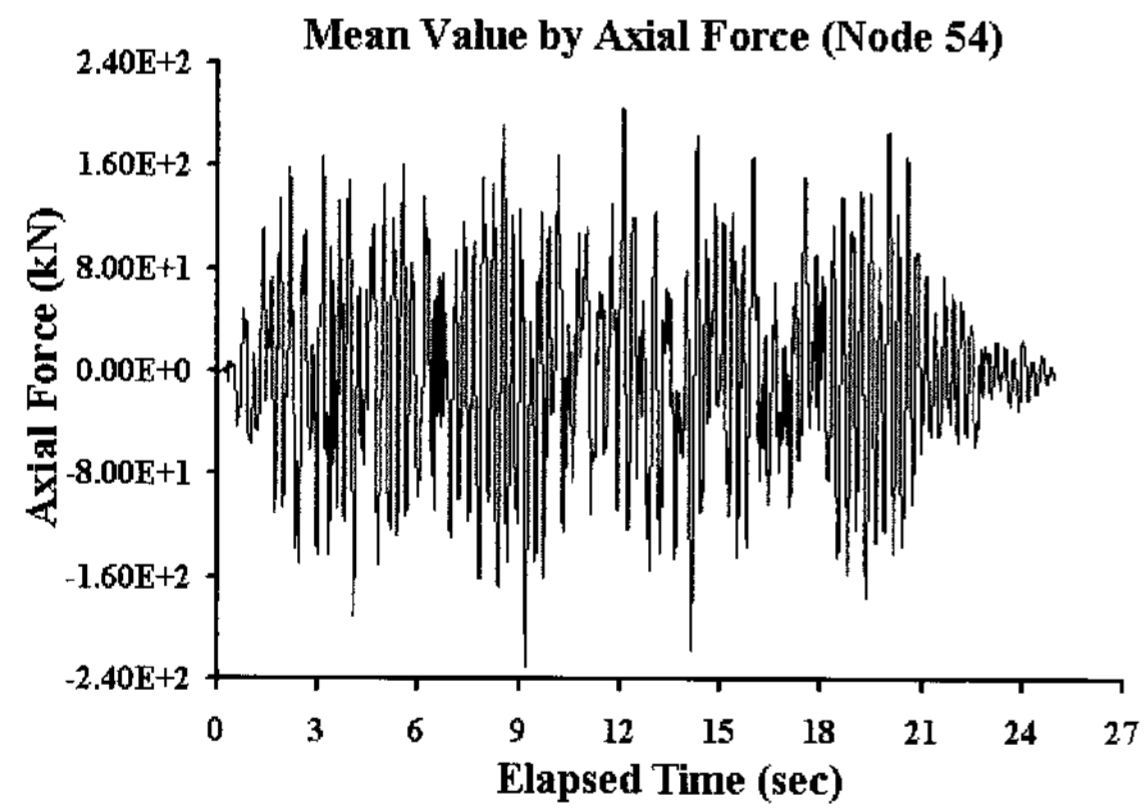
X-Y 평면에서 좌측 기둥 기초부의 최대, 최소 축력에 대한 평균 응답은 좌측 기둥의 경우 각각 248.20kN, -276.81kN로 나타났으며, 최대 표준편차 응답은 28.207kN로 산정되었다. 우측 기둥 기초부의 경우 최대, 최소 평균 응답은 각각 120.10kN, -110.90kN로 나타났으며 최대 표준편차 응답은 11.777kN로 검토되었다. 절대최대 축력에 대한 좌, 우측 기둥의 변동계수는 각각 10.190%, 9.806%로 평가되었다. Y-Z 평면에서 기둥 기초부의 최대, 최소 평균 응답은 좌측 기둥의 경우 각각 205.56kN, -230.70kN로 산정되었으며, 최대 표준편차 응답은 18.628kN로 검토되었다. 절대최대 축력에 대한 변동계수는 8.075%로 평가되었다.



(Figure 10) Comparison of Mean and Std. Deviation for DSFEMP axial force (Node 1)

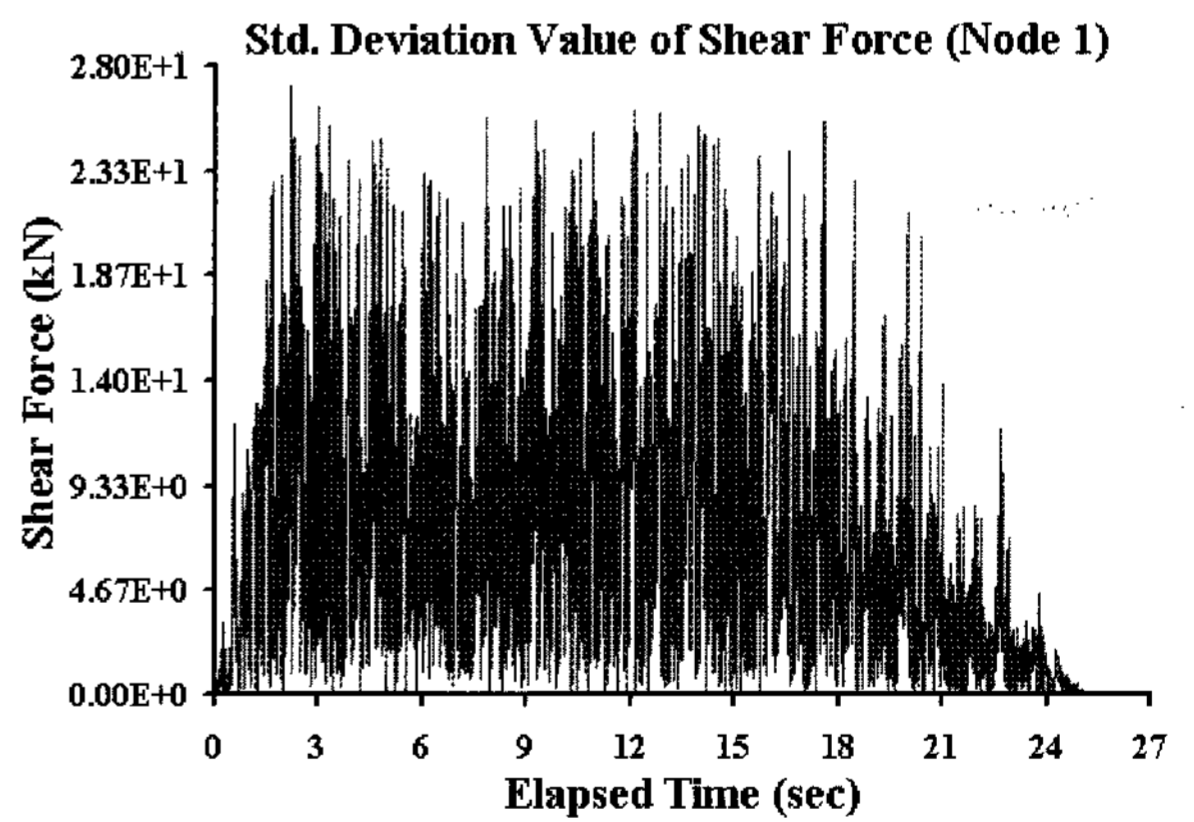
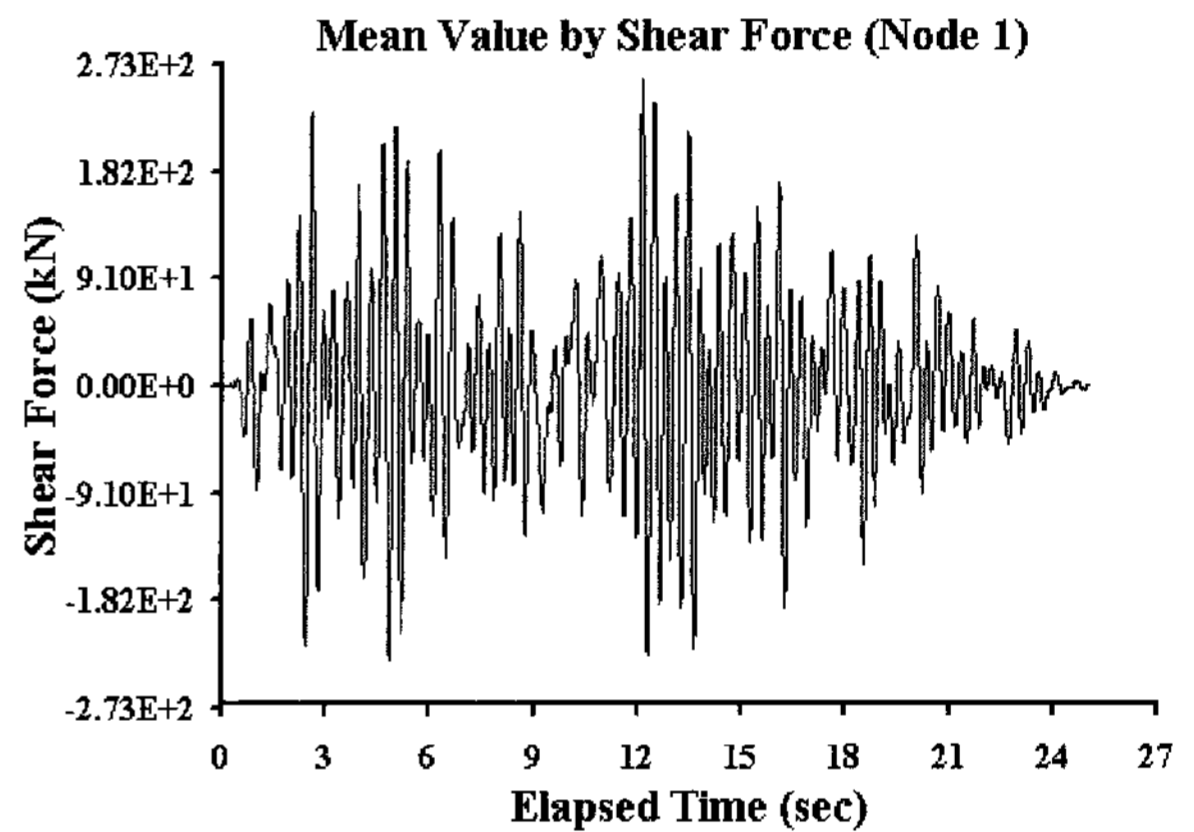


〈Figure 11〉 Comparison of Mean and Std. Deviation for DSFEMP axial force (Node 89)

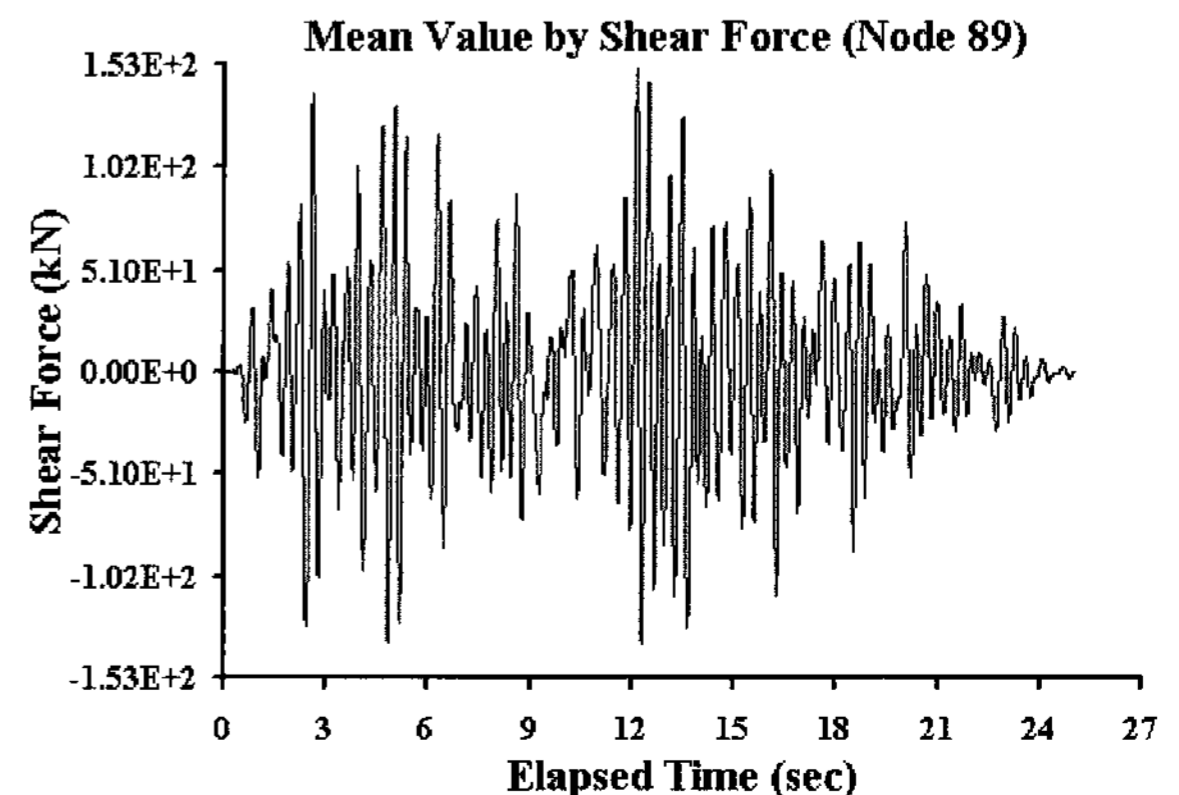


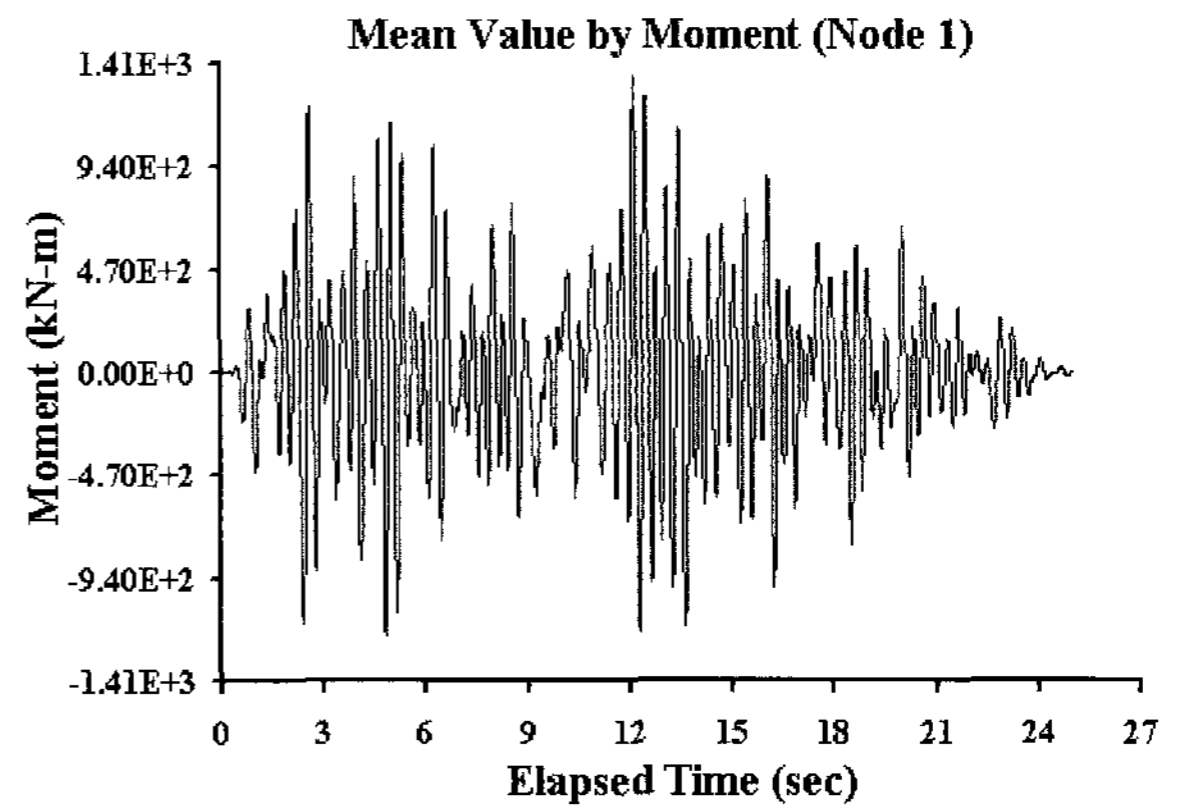
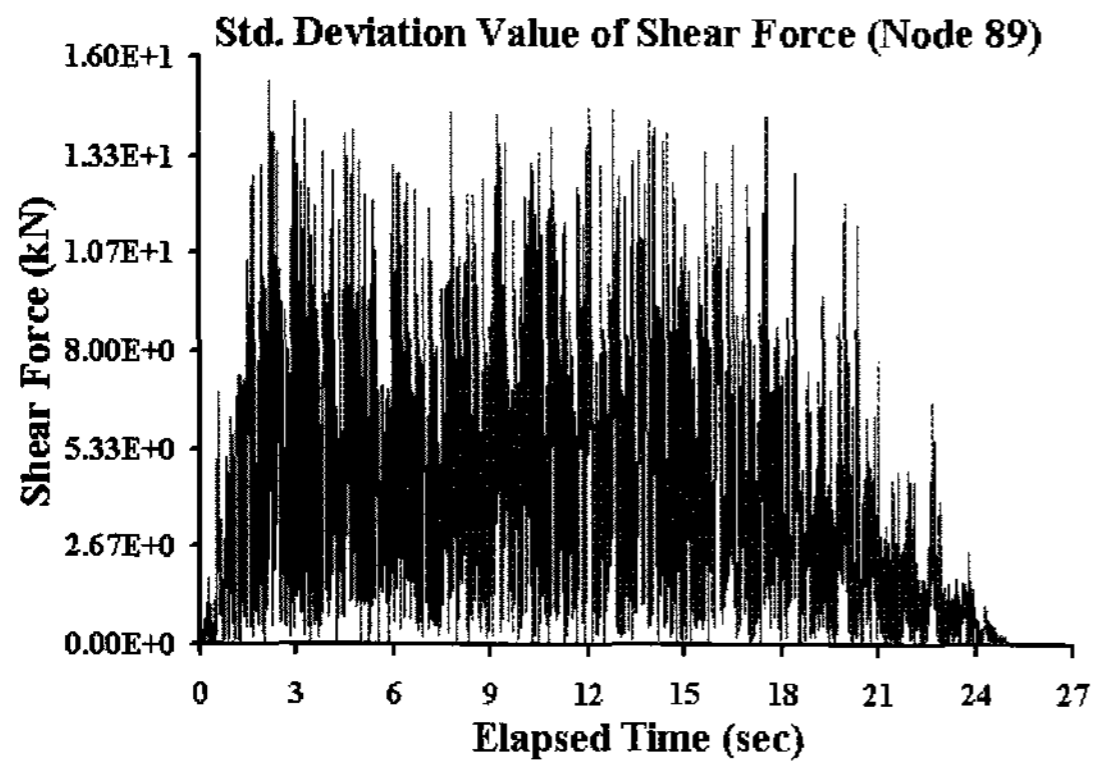
〈Figure 12〉 Comparison of Mean and Std. Deviation for DSFEMP axial force (Node 54)

X-Y 평면에서 좌측 기둥 기초부의 최대, 최소 전단력에 대한 평균 응답은 좌측 기둥의 경우 각각 259.27kN, -231.74kN로 나타났으며, 최대 표준편차 응답은 27.021kN로 산정되었다. 우측 기둥 기초부의 경우 최대, 최소 평균 응답은 각각 150.96kN, -135.81kN로 나타났으며 최대 표준편차 응답은 15.279kN로 검토되었다. 절대최대 전단력에 대한 좌, 우측 기둥의 변동계수는 각각 10.422%, 10.121%로 평가되었다. Y-Z 평면에서 기둥 기초부의 최대, 최소 평균 응답은 좌측 기둥의 경우 각각 146.80kN, -141.33kN로 산정되었으며, 최대 표준편차 응답은 26.233kN로 검토되었다. 절대최대 축력에 대한 변동계수는 17.870%로 평가되었다.

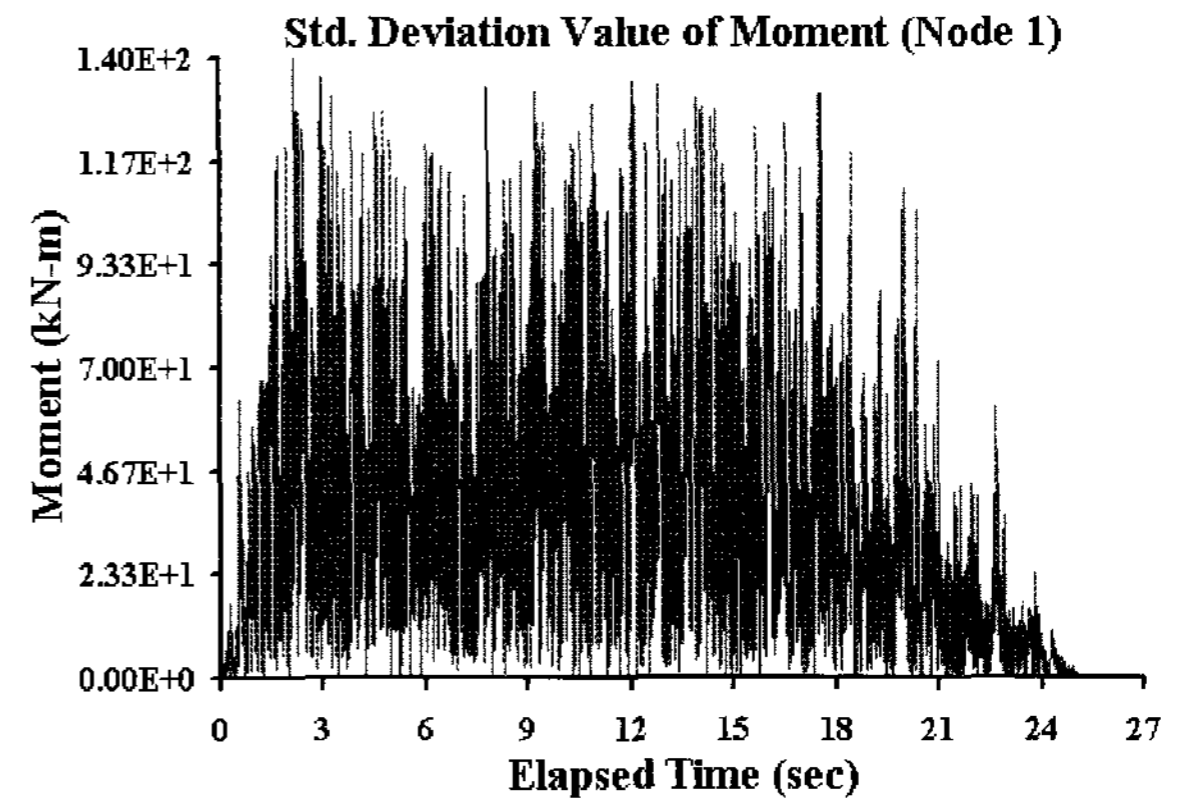
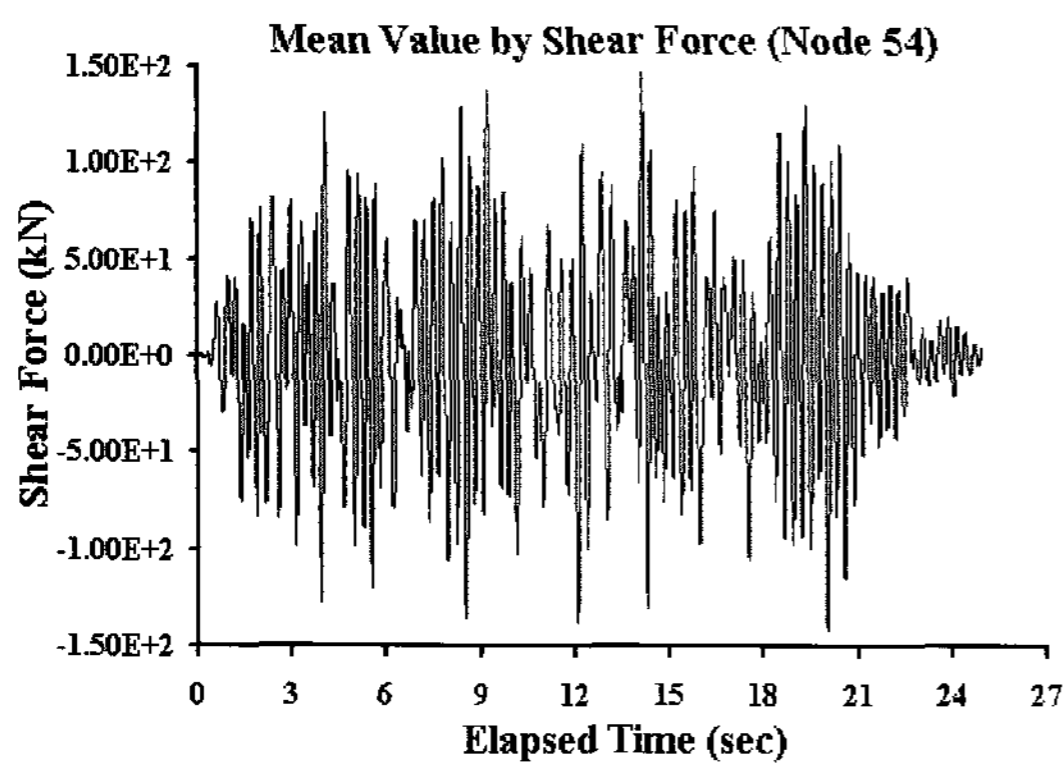


〈Figure 13〉 Comparison of Mean and Std. Deviation for DSFEMP Shear Force (Node 1)

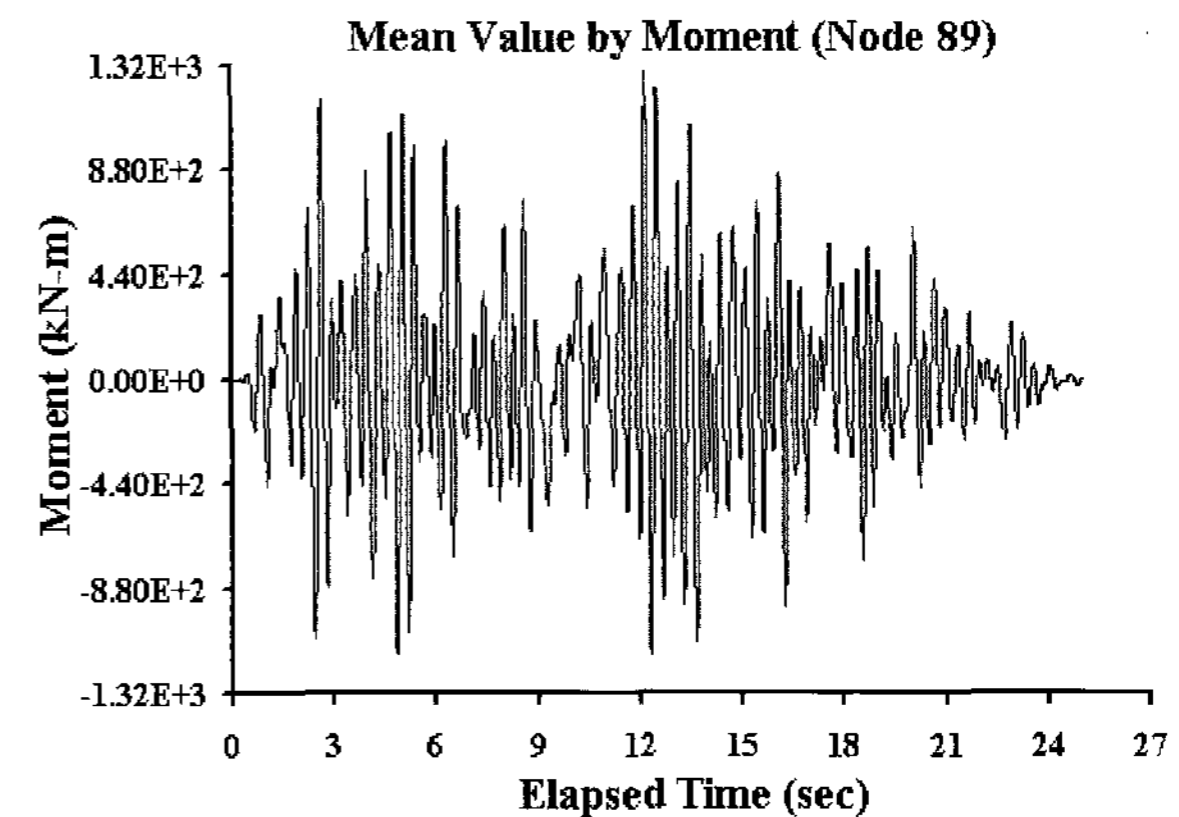
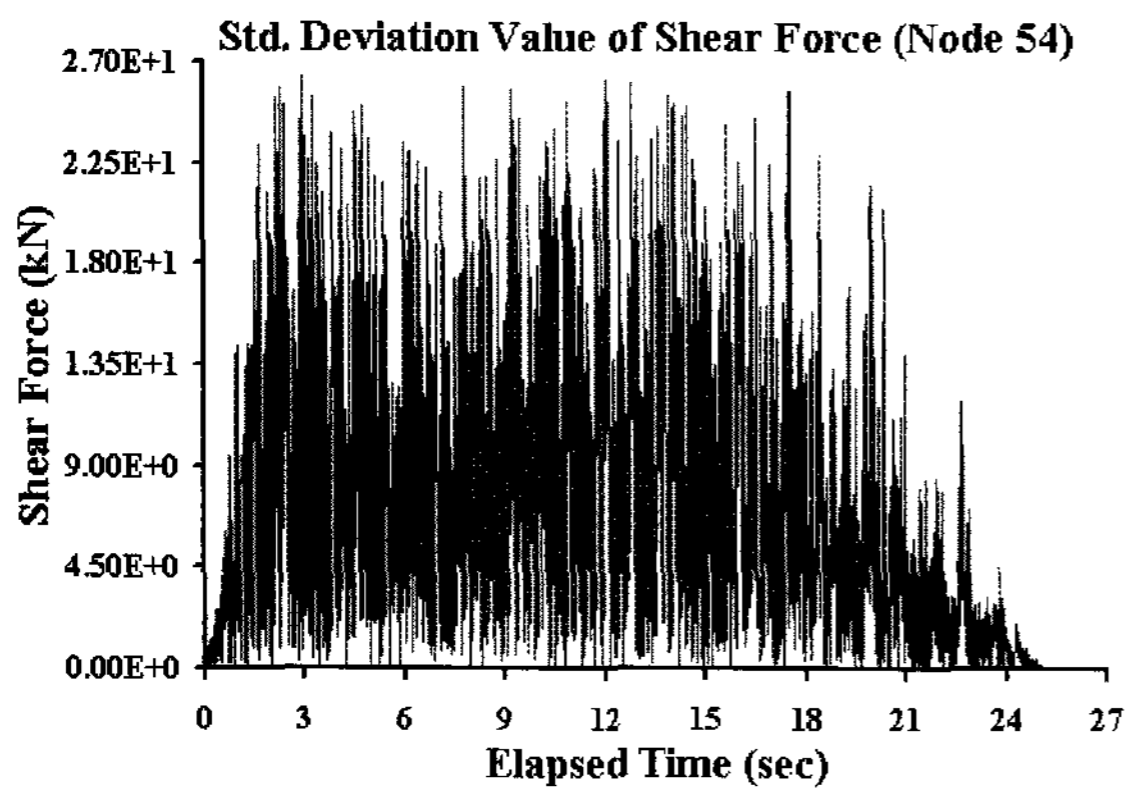




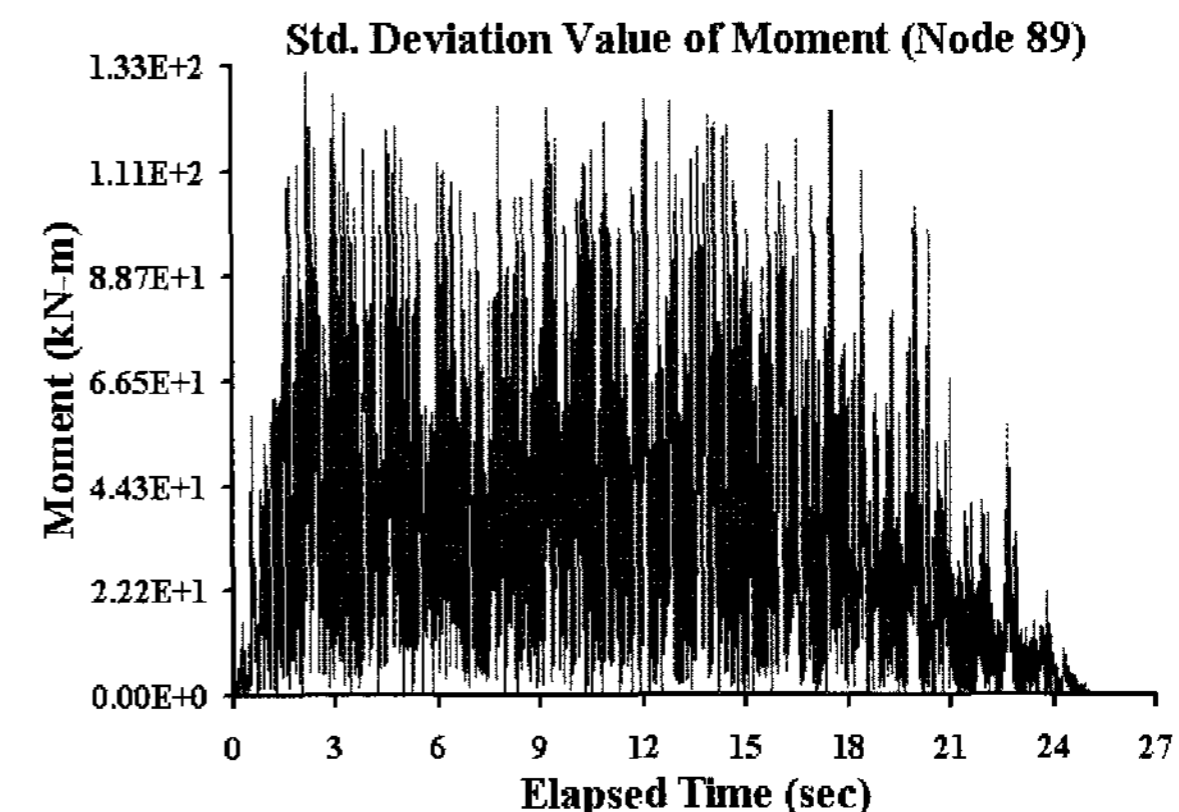
〈Figure 14〉 Comparison of Mean and Std. Deviation for DSFEMP Shear Force (Node 89)



〈Figure 16〉 Comparison of Mean and Std. Deviation for DSFEMP bending moment (Node 1)

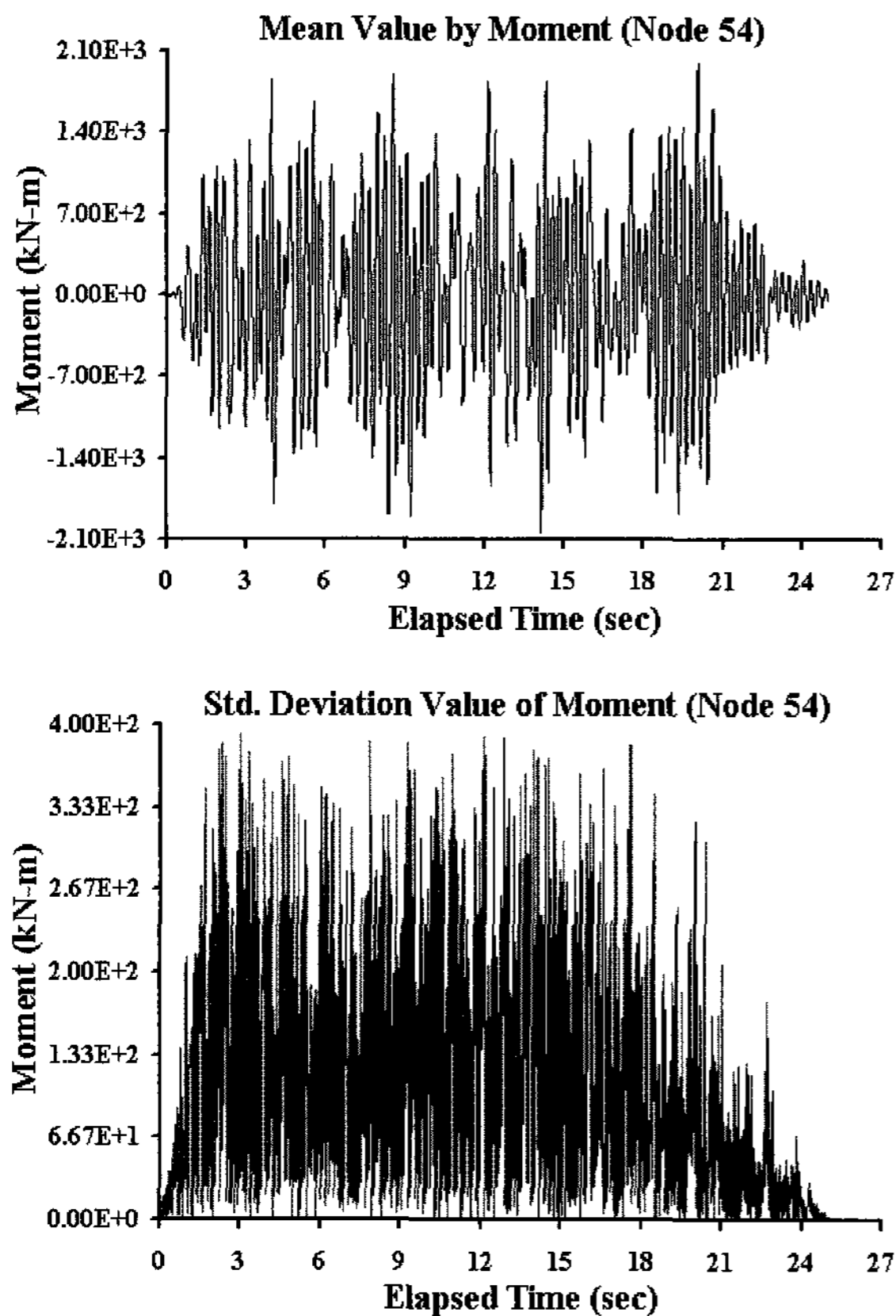


〈Figure 15〉 Comparison of Mean and Std. Deviation for DSFEMP Shear Force (Node 54)



〈Figure 17〉 Comparison of Mean and Std. Deviation for DSFEMP bending moment (Node 89)

X-Y 평면에서 좌측 기둥 기초부의 최대, 최소 휨모멘트에 대한 평균 응답은 좌측 기둥의 경우 각각 1347.63kN-m, -1204.14kN-m로 나타났으며, 최대 표준편차 응답은 139.902kN-m로 산정되었다. 우측 기둥 기초부의 경우 최대, 최소 평균 응답은 각각 1294.22kN-m, -1160.28kN-m로 나타났으며 최대 표준편차 응답은 131.052kN-m로 검토되었다. 절대최대 휨모멘트에 대한 좌, 우측 기둥의 변동계수는 각각 10.381%, 10.126%로 평가되었다. Y-Z 평면에서 기둥 기초부의 최대, 최소 평균 응답은 좌측 기둥의 경우 각각 1992.73kN-m, -2044.15kN-m로 산정되었으며, 최대 표준편차 응답은 390.891kN-m로 검토되었다. 절대최대 축력에 대한 변동계수는 19.122%로 평가되었다.



〈Figure 18〉 Comparison of Mean and Std. Deviation for DSFEMP bending moment (Node 54)

주요부재의 부재력응답에 대한 평균, 표준편차 및 변동계수를 검토한 결과, Y-Z 평면의 경우 확률변수의 영향이 전반적으로 크게 평가되었다. 아울러, 확률변수 중에서 지진하중에 의해 응답 및 변동계수는 대부분 영향을 받고 있는 것으로 나타났으나 구조해석 및 설계에 있어서 전체 강성을 구성하는 단면계수 등의 불확실량도 적절히 고려하여야 할 것으로 판단된다.

5. 구조신뢰성해석

터빈발전기 기초 구조물의 구조안전성을 정량적으로 평가하기 위해 DSFEMP에 의한 주요부재의 방향별 휨모멘트 결과를 확률변수로 고려하여 구조신뢰성해석을 수행하였다. 변위의 불확실량은 사용성에 대한 신뢰성해석이므로 생략하였다. 구조신뢰성해석 방법은 전 장에서 고찰한 AFOSM 방법을 이용하였다.

5.1 한계상태방정식 구성

대상 구조물의 공칭저항모멘트는 설계모멘트로 설정하였으며, 변동계수(C · O · V; Coefficient of Variance)는 10%

〈Table 3〉 Mean and Std. Deviation of Member Force (kN, kN-m)

Node No.		Axial Force	Shear Force	Bending Moment	
X-Y Plane	1	Mean	MAX. 248.20	259.27	1347.63
			MIN. -276.81	-231.74	-1204.14
		Std. Deviation	28.207	27.021	139.902
		C.O.V(%)	10.190	10.422	10.381
	18	Mean	MAX. 206.96	108.57	1013.35
			MIN. -191.95	-96.86	-904.70
		Std. Deviation	18.832	11.453	105.836
		C.O.V(%)	9.100	10.548	10.444
	37	Mean	MAX. 133.57	42.19	328.15
			MIN. -113.56	-37.65	-292.55
		Std. Deviation	4.979	3.909	31.402
		C.O.V(%)	3.727	9.265	9.569
54	Mean	MAX. 90.26	41.05	320.98	
		MIN. -111.71	-36.81	-287.93	
	Std. Deviation	9.691	3.843	30.882	
	C.O.V(%)	8.675	9.361	9.621	
71	Mean	MAX. 127.47	57.04	490.75	
		MIN. -148.41	-52.20	-446.58	
	Std. Deviation	14.646	4.833	44.385	
	C.O.V(%)	9.869	8.474	9.044	
89	Mean	MAX. 120.10	150.96	1294.22	
		MIN. -110.90	-135.81	-1160.28	
	Std. Deviation	11.777	15.279	131.052	
	C.O.V(%)	9.806	10.121	10.126	
Y-Z Plane	54	Mean	MAX. 205.56	146.80	1992.73
			MIN. -230.70	-141.33	-2044.15
		Std. Deviation	18.628	26.233	390.891
		C.O.V(%)	8.075	17.870	19.122

로 가정하였다. 또한 확률변수에 따른 휨모멘트의 변동계수는 DSFEMP에 의한 해석결과를 이용하여 구조신뢰성해석을 수행하였다. 공칭저항모멘트의 불확실량은 정규(Normal Distribution)분포로 가정하였으며, 확률변수에 따른 모멘트의 불확실량은 대수정규(Log-normal Distribution)분포를 갖는 것으로 가정하였다. 따라서 대상 구조물의 한계상태방정식은 식 (21)과 같이 정의할 수 있다.

$$g(\cdot) = M_N - M_S(\cdot) \tag{21}$$

여기서, M_N : 공칭저항모멘트

$M_S(\cdot)$: 주요부재의 휨모멘트

5.2 신뢰성해석 결과분석

DSFEMP의 응답해석 결과와 전 절에서 구성된 한계상태방정식을 이용하여 터빈발전기 기초 구조물의 주요 기둥부재에 대한 신뢰성지수 및 파괴확률은 표 4와 같이 검토되었다.

〈Table 4〉 Result of Reliability Index and Failure Probability

Node No.	Reliability Index	Failure Probability
X-Y Plane	1	7.361
	89	7.100
Y-Z Plane	54	4.047
		2.594e-05

터빈발전기 기초 구조물의 주요부재에 대한 구조신뢰성 해석결과는 X-Y평면의 좌측 기둥 기초부의 경우 신뢰성지수 및 파괴확률이 각각 7.361, 9.104e-14로 평가되었으며, 우측 기둥기초부의 경우, 각각 7.100, 6.224e-13로 산정되었다. Y-Z 평면 기초부 기둥의 경우, 각각 4.047, 2.594e-05로 검토되었다. 기둥의 파괴확률은 전반적으로 X-Y 평면에 비해 Y-Z 평면이 보다 큰 파괴확률 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 구조신뢰성해석 결과에 따르면 터빈발전기 기초의 파괴확률은 양상은 방향별로 매우 큰 차이를 보이고 있으므로, 보다 합리적인 구조설계 및 평가를 위해서는 구조신뢰성해석 과정이 필수적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

6. 결 론

이 연구에서는 터빈발전기 기초 구조물을 대상으로 동적 확률유한요소해석 및 구조신뢰성해석을 보다 효율적으로 수행할 수 있는 해석프로그램을 작성하였으며 작성된 프로그램을 이용한 해석결과를 비교, 검토한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

결정론적 평가 방법에 의한 구조안전성 평가방법에 비해 이 연구에서 작성한 프로그램 DSFEMP (Dynamic Stochastic Finite Element Method Program)는 터빈발전기 기초의 동적응답해석 시 확률변수의 불확실성에 따른 구조안전성 평가에 있어서 보다 합리적인 평가 수단인 것으로 판단된다. 구조해석의 각 단계마다 확률변수의 분산특성을 정량적으로 평가할 수 있는 장점을 가진 DSFEMP에 의해 터빈발전기 기초 구조물을 평가한 결과 확률변수 중에서 입력지진동에 의해 응답 및 변동계수는 대부분 영향을 받고 있는 것으로 나타났으나 구조해석 및 설계에 있어서 전체강성을 구성하는 단면계수 등의 불확실량도 적절히 고려하여야 할 것으로 판단된다.

터빈발전기 기초 구조물의 동적응답특성은 부재에 따라 변동계수 및 파괴확률 측면에서 상당한 차이를 나타내므로 이에 대한 적절한 대처가 필요하며, 평가된 신뢰성지수 및 파괴확률은 구조안전성을 정량적으로 평가할 수 있는 실질적 판단기준을 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 인천대학교 2006년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. GE Power System, Foundation Design and Construction Recommendations(Steam Turbine), Report No. GEK19331, 1981.
2. Small, R. J., Design of Large Steam Turbine-Generator Foundations, ASCE, 1987.
3. International Organization for Standardization, Mechanical Vibration-Balance Quality Requirements, Report No. ISO 1940-1, 2003.
4. Hadjian, A. H., Design Criteria for Turbine-Generator Foundations, Journal of the Power Division, ASCE, Vol 96, 1970, pp. 1-22.
5. Liu, W., Novak, M., Dynamics Behavior of Turbine-Generator Foundation Systems, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 24, 1995, pp. 339-360.
6. Ang, A. H-S., and Tang, W. H., Probability Concepts in Engineering, 2nd Edition, John Wiley&Sons, Inc, 2007.
7. Ranganathan, R., Reliability Analysis and Design of Structures, McGraw-Hill, 1990.
8. 한성호, 정인수, 신재철, 확률유한요소법을 이용한 알고리즘 개발 및 동적응답해석, 대한토목학회논문집, 제24권, 제65호, 2004, pp. 1245-1254.
9. 최규섭, 정영수, LHS기법을 이용한 불연속압반구조 물의 확률유한요소해석기법개발, 한국전산구조공학회 논문집, 제10권, 제4호, 1997, pp. 143-154.
10. Shinozuka, M., Monte Carlo Solution of Structural Dynamics, Computer & Structures, Vol. 2, 1972, pp. 855-874.
11. Handa, K., Application of Finite Element Method in the Statistical Analysis of Structures, Div. of Structural Design, Chalmers University of Technology, Sweden, 1975.
12. Kleiber, M. and Hien, T. D., The Stochastic Finite Element Method, John Wiley&Sons, Inc., 1991
13. 양영순, 김지호, 평면프레임 구조물의 확률유한요소해석, 한국전산구조공학회논문집, 제2권 제4호, 1989, pp. 89-98.
14. Cornell, C. A., A Probability-Based Structural Code, Journal of the American Concrete Institute, Vol. 66, No. 12, 1969, pp. 974-985.

15. Hasofer, A. M. and Lind, N. C., Exact and Invariant Second Moment Code Format, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 100, No. EM1, 1974, pp. 111-121.
16. Rackwitz, R. and Fiessler, B., Structural Reliability. Under Combined Random Load Sequences, Computers & Structures, Vol. 9, No. 5, 1978, pp. 489-494.
17. 한성호, 신재철, 지진하중을 받는 사장교의 확률유한요소해석 및 신뢰성해석, 한국전산구조공학회논문집, Vol. 18. No. 1, 2005, pp. 29-42.
18. US NRC Regulatory Guide 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants, 1973.
19. Massachusetts Institute of Technology, SIMQKE, A Program for Artificial Motion Generation, 1976.