

<응용논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2010.34.11.1773

ISSN 1226-4873

응답스펙트럼법을 이용한 지진하중을 받는 원전용 주냉각수펌프의 내진 건전성 평가[§]

정 철 섭^{*†}

* 건양대학교 기계공학과

Seismic Evaluation of Structural Integrity of Main Cooling-Water Pump by Response Spectrum Analysis

Chul Sup Chung^{*†}

* Dept. of Mechanical Engineering, Konyang Univ.,

(Received July 5, 2010 ; Revised September 10, 2010 ; Accepted September 13, 2010)

Key Words: Natural Frequency(고유주파수), Mode Participation Factor(모드참여계수), Modal Analysis(모달 해석), Response Spectrum(응답스펙트럼)

초록: 본 논문은 원자력 내진등급 원전용 주냉각수 펌프의 지진하중에 대한 구조 건전성을 코드에 따라 평가하였다. 펌프 구조물을 3차원 모델링하여 유한요소법을 사용하여 모달 해석 및 응답스펙트럼 해석을 수행하였다. 모달 해석 결과 고유진동수, 모드형상 및 모드참여계수를 얻을 수 있었다. 응력해석에서 구한 응력들을 조합하여 원자력 규격집에서 제시한 허용응력과 비교하여 펌프의 구조 건전성을 판단하였다. 모든 지진하중에 대한 펌프 구조물에서의 응력은 허용값 보다 작게 분포하므로 구조적 건전성을 유지한다고 평가할 수 있다.

Abstract: To evaluate the structural integrity of the main cooling-water pump of a nuclear power plant under different seismic conditions, the seismic analysis was performed in accordance with IEEE-STD-344 code. The finite element computer program, ANSYS, was used to perform both mode frequency analysis and response spectrum analysis for the pump assembly. The natural frequencies, the mode shapes, and the mode participation factors were obtained from the results of the mode frequency analysis. The stresses resulting from various loadings and their combinations were within the allowable limits specified in the above-mentioned IEEE code. The results of the seismic evaluation fully satisfied the structural acceptance criteria of the IEEE code. Thus, it was proved that the structural integrity of the pump assembly was satisfactory.

1. 서 론

2008년 5월 12일 중국 쓰촨성 부근 지하 27 km 지점에서 리히터 규모 7.82의 강진이 발생하여 수만 명이 사망하는 지진재난이 발생하였고, 2005년 8월 16일 일본 미야기(宮城) 현 앞바다에서도 리히터 규모 7.2의 지진이 발생하는 등 우리나라 주변에서 지진 발생이 빈번하게 일어나고 있는 실정이다. 이에 따라 우리나라는 과연 지진으로부터 안전한지에 관심이 높아지고 있다. 최근 원자력 발전의 의존도가 증가하는 만큼 원자력

발전소의 안전성에 대한 국민적 관심도 비례적으로 증대되고 있으므로 안전성을 확보하기 위해 지진하중을 받는 원자력 관련 기기에 대한 구조 건전성을 확보하는 것이 중요하므로 정부에서도 원자력 안전 법규와 같은 관계 법령을 제정하여 이를 준수할 것을 요구하고 있다.⁽¹⁾ 캔드윈심펌프는 고압의 유체를 공급하는 유체기계로서 원자력 발전소에서 발전설비 냉각계통 기기로 널리 사용되고 있다. 특히, 항상 일정한 압력의 유량을 지속적으로 공급해야 하며, 외부 가진에 대해 유량 공급기로서의 기능이 정상적으로 유지되어야 한다. 만일, 원자력 발전소 냉각계통에 설치된 냉각수펌프가 지진하중에 취약하여 구조적 건전성을 상실하면 냉각재 누수와 같은 엄청난 피해를

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 총칭지회 춘계 학술대회(2010. 5. 14., KIMM) 발표논문임

† Corresponding Author, cschung@konyang.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Properties of structural materials

Matl	Yield strength (Sy) [MPa]	Modulus of elasticity (E) [GPa]	Poisson's ratio	Allowable stress [MPa]
SCS14	130.8	196	0.3	104.4
STS316	225.7	186	0.3	180.1
STS420	171.7	196	0.3	137
SCM4	428.3	201	0.3	341.8
SS41	168.3	196	0.3	134.3

초래할 수 있어 지진하중에 대한 구조 건전성의 확보가 중요하다. 원자력발전소에 설치된 기기의 내진 검증에 관한 연구로서, 이준근 등은 공조기의 내진 해석을 응답스펙트럼 해석법을 사용하여 내진검증을 하였고,⁽²⁾ 정명조는 지진하중을 받는 연료집합체에 대한 구조 건전성을 시간이력해석을 통하여 검증하였다.⁽³⁾ 조진래 등은⁽⁴⁾ 다단원심펌프에 대하여 정적 내진해석을 수행하였으나, 본 논문에서 다루는 원심펌프와 유도 모터를 하나의 유닛 내에 결합시킨 펌프 구조물에 대한 내진해석은 수행된 바가 없었다. 따라서 본 논문에서는 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 모달해석을 통해 고유 거동특성을 구하고, 응답스펙트럼 기법을 수행하여 지진하중에 대한 위험단면에서의 막 응력과 굽힘 응력을 구하여 IEEE(Institute of Electrical and Electronic Engineers)-STD-344에서 제시하는 절차에 따라 펌프 구조물의 구조적 건전성을 평가하였다.⁽⁵⁾

2. 펌프구조물의 내진해석

2.1 해석모델

냉각수펌프에 사용되는 캔드모터펌프는 하나의 밀봉된 유닛 내에 원심펌프와 유도 모터를 하나로 결합시킨 펌프이며, 회전자와 임펠러가 결합된 어셈블리만이 움직이며 유도모터의 자장에 의해 운전된다. 해석 모델은 펌프 케이싱, 임펠러, 축, 고정자 어셈블리 및 노즐 결합부로 구성되었고, 이들 구조물을 바닥에 장착시키는 지지대(support)도 모델에 포함시켰다. 펌프 케이싱내의 설계 압력은 17.5 MPa 이며, 펌프 구조물의 질량은 980 kg이다. 펌프 구조물 구성품에 대한 재질, 재료상수 및 허용응력은 Table 1과 같다.

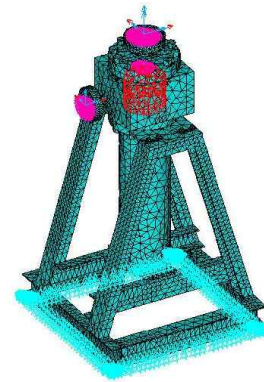


Fig. 1 Boundary and load condition for the FEM model

펌프 구조물을 모델링하기 위하여 3차원 구조물고체 (structural solid) 요소인 "SOLID 185" 를 사용하였고 부품과 부품 사이의 접촉상태를 정의하기 위해 면 대 면 접촉 요소인 "CONTACT 173" 및 "TARGET 170"을 사용하였으며 절점 수 및 유한 요소는 각각 21,617개, 83,735개 이다.⁽⁶⁾

해석을 효율적으로 수행하기 위해 각 부품간 상태를 단순화 시켰고 부품과 부품사이의 접촉상태를 정의하여 벌칙 강성(penalty stiffness)을 고려하였다. 펌프 지지대는 앵커 볼트에 의해 바닥면에 고정되므로 볼트 위치에 병진 및 회전 자유도를 구속시키고, 바닥면과 접하는 나머지 부분은 수직방향 자유도를 구속시키는 변위 경계조건을 사용하였다. 축과 임펠러는 완전 접촉(bond)으로, 케이싱의 볼트 결합은 접촉면 방향의 약간의 미끄럼(sliding)이 허용되는 접촉 상태(no separation)로 정의하였다. 축-임펠러 어셈블리와 펌프케이스-지지대 결합체의 연동을 위해 베어링 장착부위의 절점을 공유하였다. 펌프의 흡입구와 배출구에는 노즐 하중 조건을 적용하였다. 펌프 구조물 해석 모델에 사용된 경계조건 및 하중조건은 Fig. 1과 같다.

2.2 내진해석

지진하중에 대한 구조물의 동적 거동을 나타내는 데 사용되는 운동방정식은 (1)과 같다.⁽⁷⁾

$$[M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = -[M] \{I\} \ddot{u}_g \quad (1)$$

여기서, $\{u\}, \{\dot{u}\}, \{\ddot{u}\}$ 는 지반운동에 대한 구조물의 상대변위, 속도, 가속도 벡터이며, $[M], [C], [K]$ 는 각각 질량행렬, 감쇠행렬 및 강성도 행렬이며, \ddot{u}_g 는 지반가속도, $\{I\}$ 는 단위벡터이다. 식 (1)의

우변은 지반운동에 의해 야기되는 지진하중을 표시한다. 모달 해석은 선형 탄성 구조물의 고유진동수와 모드형상을 계산하는데 사용된다. 감쇠효과를 무시하고, 일단 고정 타단 자유인 경계 조건을 가질 때 비감쇠 자유진동에 대한 지배방정식은 (2)와 같다.

$$[M] \{\ddot{u}\} + [K] \{u\} = \{0\} \quad (2)$$

선형 구조물에 대하여 변위 벡터가 식 (3)와 같은 조화형태를 갖는다 가정하고 지배방정식 (2)에 대입하면 고유치 방정식 (4)을 얻는다.

$$\{u\} = \{q\} \exp(i\omega t) \quad (3)$$

$$([K] - \omega^2 [M]) \{q\} = \{0\} \quad (4)$$

식 (4)에서 $|[K] - \omega^2 [M]| = 0$ 의 조건으로부터 ω 를 구할 수 있다. 이 때 얻어지는 ω 는 구조물의 고유진동수(natural circular frequency)이고, i 번째 고유 진동모드 $\{\phi_i\}$ 는 ω_i 를 알 수 있을 때 식 (5)로부터 구할 수 있다.

$$([K] - \omega_i^2 [M]) \{\phi_i\} = \{0\} \quad (5)$$

질량, 감쇠, 강성행렬의 직교성을 이용하여 운동방정식 (1)을 독립된(uncoupled) 방정식으로 유도할 수 있다. 먼저, 비감쇠 자유진동 해석으로부터 구한 모드형상 $[\Phi]$ 를 사용하여 아래와 같은 선형 좌표변환을 한다.

$$\{u\} = [\Phi] \{q\}, \quad \{\dot{u}\} = [\Phi] \{\dot{q}\}, \quad \{\ddot{u}\} = [\Phi] \{\ddot{q}\} \quad (6)$$

식 (6)을 식 (1)에 대입하고, 다시 $[\Phi]^T$ 를 각 항에 곱하여 식 (7)을 얻는다.

$$[\Phi]^T [M] [\Phi] \{\ddot{q}\} + [\Phi]^T [C] [\Phi] \{\dot{q}\} + [\Phi]^T [K] [\Phi] \{q\} = -[\Phi]^T [M] \{D\} \ddot{u}_g \quad (7)$$

모드형상 $[\Phi]^T$ 는 $[M]$, $[C]$ 및 $[K]$ 에 대해서도 직교할 것이므로 식 (7)은 각 모드 좌표계에 대한 독립된 1 계 상미분 방정식 (8)로 변환된다.

$$m_i \ddot{q}_i + c_i \dot{q}_i + k_i q_i = Q_i \quad (8)$$

윗 식에서 양변을 일반질량 m_i 로 나누어 정리하면 i 번째 모드의 자유진동수와 감쇠율로 나타낼 수 있다.

$$\ddot{q}_i + 2 \zeta_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -\Gamma_i \ddot{u}_g(t) \quad (9)$$

여기서 Γ_i 는 i 번째 모드의 모드 참여계수(modal participation factor)라 한다. 응답스펙트럼 해석법으로 구조물의 지진하중에 대한 동적 해석을 수행하고 진동주기(주파수)에 따른 응답의 최대치를 아래 식(10)과 같이 각 모드별로 모드 참여계수로 조정하여 전체 모드에 대해 중첩함으로써 최종해를 구할 수 있다.⁽⁷⁾

$$\{u\}_{i, \max} = \{\phi_i\} q_{i, \max} = \{\phi_i\} \Gamma_i \frac{SV(\zeta_i, \omega_i)}{\omega_i^2} \quad (10)$$

여기서, $SV(\zeta_i, \omega_i)$ 는 가속도의 응답스펙트럼이다.

본 해석에서 설계 지진으로 표시되는 설계 가진에 따라 반응하는 구조물의 동적 응답을 구하기 위해 내진 해석이 사용된다. 대부분의 지진파는 33 Hz 미만의 성분을 갖는데 만일 구조물의 자유진동 해석 결과 저주파모드의 주파수 값이 33 Hz 부근에 존재한다면 공진에 의한 과대응력이 발생할 수 있다. 이 경우 등가정적 내진해석 방법 대신 응답 스펙트럼을 입력하중으로 사용하는 응답스펙트럼 해석방법을 통해 내진해석을 수행한다.^(8,9) 지진파는 랜덤(random) 형태의 시간영역 함수로 주어지는 것이 일반적이며, 시간영역에서 지진파에 대한 구조응답을 계산하기 위해서는 많은 시간과 노력을 필요로 하기 때문이다. 이 경우 전술한 응답 스펙트럼 해석법 (response spectrum analysis)을 이용하면 지진파의 주파수 스펙트럼상에서 값을 읽어 어떤 모드에 어떻게 응답을 조합하느냐만 결정하면 되므로 매우 편리하고 많이 쓰이는 해석기법이다.⁽⁹⁾ 자유진동 해석을 통해서 구한 고유진동수에 해당하는 가속도 값을 입력값으로 하여 ANSYS상의 응답 스펙트럼 해석법에서 구조물에 작용하는 지진하중으로 입력하여 식 (11)과 같은 SRSS(square roots of sums of square)법에 따라 지진하중에 의한 응력값을 얻는다.

$$\sigma = \sqrt{\sum_{n=1}^N \sigma_n^2} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_N^2} \quad (11)$$

여기서, N 은 해석에 필요한 전체 고유진동수 개수이다. 이들 지진하중에 의한 응력과 운전하중에 의한 응력을 조합하여 얻은 등가응력을 코드에서 규정한 허용응력 값과 비교하여 구조 건전성을 평가하였다. 식 (12)로 표현되는 미세스(Von Mises) 응력을 등가응력으로 사용하여 허용 응력과 비교하게 된다.

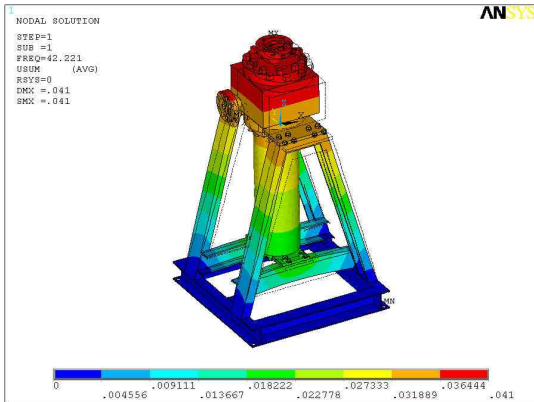


Fig. 2(a) 1st mode shape (42.2 Hz)

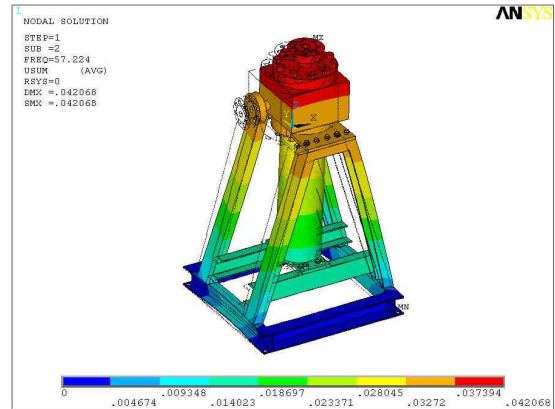


Fig. 2(b) 2nd mode shape (57.2 Hz)

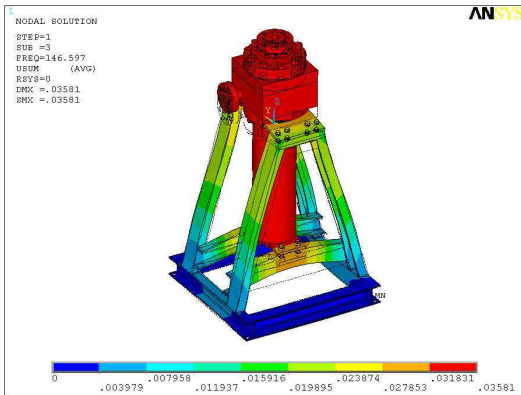


Fig. 2(c) 3rd mode shape (146.6 Hz)

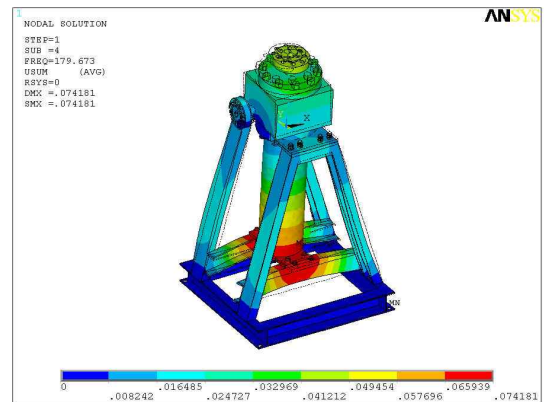


Fig. 2(d) 4th mode shape (179.7 Hz)

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (12)$$

여기서 σ_1 , σ_2 및 σ_3 은 주응력이다.

3. 구조건전성 평가결과

3.1 모달해석 결과

전체 펌프 구조물의 자유진동 해석을 수행하였고 Fig. 2(a)~2(d)는 펌프 구조물의 고유진동수와 이에 해당하는 모드형상을 나타낸 것이다. 각 방향별 모드 참여계수는 표 2와 같으며, 장비의 구조적 특성상 각 방향으로 기여도의 차이가 나타남을 알 수 있다.

최저차 모드 및 두 번째 모드는 횡 방향으로 진동을 하며, 3차 모드는 축 방향으로 진동을 한다. 4차 이상의 고차 모드에서는 모드의 형태가 굴곡이 심하여서 모드 참여계수가 저차 모드에 비하여 작은 값이 되며, 결과적으로 변위 응답의 크기가 작게 된다.

3.2 내진해석 결과

펌프 구조물에 대한 응력해석의 목적은 설계 요건, 설계 문서 및 설계 명세서에 기술된 하중조건에 의해 펌프 구조물이 과응력(overstressed)상태에 도달하지 않음을 보여주는 데 있다. 즉, Table 4에 보인 바와 같이, 여러 하중조합 조건에서 얻은 등가 응력이 코드에 규정한 허용 값 이내에 있음을 입증해야 한다.⁽⁵⁾

해석에서 사용하는 Fig. 3의 요구응답 스펙트럼(RRS: Required Response Spectrum)곡선은 3%의 댐핑이 적용된 SSE(Safe Shutdown Earthquake)인 경우의 지진가속도 곡선이다. 수직 방향의 가속도는 중력가속도 1g를 포함시켜 사용하였다. 지진 가속도 외에 흡입구 및 배출구에 Table 3의 노즐 하중이 작용하며, 787 N·m의 운전토크가 작용한다. 하

Table 2 Modal participation factor in each direction

Mode	Freq. (Hz)	modal participation factor		
		X-dir	Y-dir	Z-dir
1	42.2	0.00137	1.0	0.0014
2	57.2	1.0	0.0012	0.000002
3	146.6	0.00324	0.0048	1.0
4	179.7	0.00023	0.2	0.017

Table 3 Nozzle end load

	Nozzle end load					
	F _x	F _y	F _z	M _x	M _y	M _z
	[N]			[N · m]		
Suction	5,273.9	4,394.9	5,273.9	1,601.0	2138.6	1,601.0
Discharge	3,602.2	3,001.9	3602.2	912.3	1216.4	912.3

Table 4 Loading combination and calculated equivalent stresses

Loading combination	Item	Material	Stress value (MPa)	Allowable stress (MPa)
Dead weight + Operation load + SSE load	Casing	STS 316	52.5	180.1
	Shaft	STS 316	22.7	180.1
	Discharge	STS 316	77.8	180.1
	Support	STS 316	72.3	180.1
	Bolt	SCM 4	26.8	341.8

3% damping SSE (Horizontal)

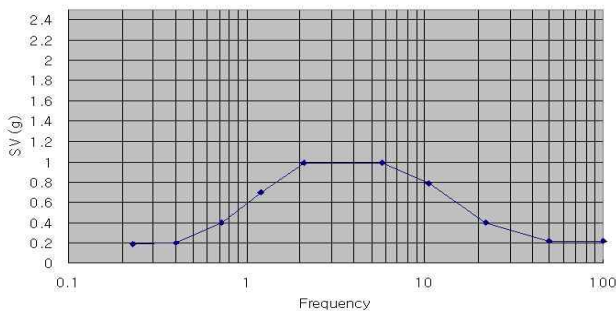


Fig. 3(a) SSE horizontal RRS with 3% damping

3% damping SSE (Vertical)

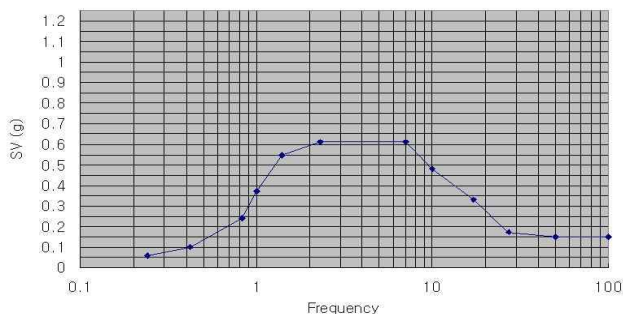


Fig. 3(b) SSE vertical RRS with 3% damping

중조합에 대한 내진 해석 결과로부터 얻은 각 부품별 응력은 Table 4와 같다. 안전정지 지진조건에서 최대 등가응력은 펌프 배출구 노즐 부위에서 발생하지만, 그 크기는 77.8 MPa로 허용값 180.1 MPa의 43% 정도이다. 축-임펠러 어셈블리에서 최대 등가응력은 22.7 MPa이며 허용값 180.1 MPa의 12.6% 정도이다.

4. 결론

본 연구에서는 펌프 노즐 하중과 지진하중을 받는 캔드모터 방식의 주냉각수 펌프 구조물에 대하여 구조 건전성 평가를 하였다.

(1) 모달 해석에 의해 산정된 참여계수에 따르면 각 방향별로 기여도가 다르며 처음 3개 저차모드가 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

(2) 지진하중을 포함한 조합하중에 의해 발생하는 응력 수준은 코드에 규정된 허용값 이내에 있으므로 구조적 건전성을 유지할 수 있다고 평가할 수 있다.

(3) 유한요소법을 바탕으로 코드에 따른 기준을 정립하였다. 이러한 해석 및 기준은 설계변경등 기기변경이 있을 경우 해석을 통하여 추가 내진실험을 대체할 수 있는 수단으로 사용이 가능하다.

참고문헌

- (1) Chung, C. S., 2000, "Seismic Evaluation for Strainer in the Primary Cooling System," *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 13, No. 3, pp. 295-304.
- (2) Lee, J. K., Kim, J. Y., Chung, P. J. and Chung, J. H., 1999, "Seismic Qualification of the Air Conditioning Equipment for Nuclear Power Plant," *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 19, No. 3, pp. 535-543.
- (3) Jung, M. J., 1998, "Integrity Evaluation of Fuel Assembly for Earthquake," *Nuclear Engineering and Design*, No. 185, pp. 97-108.
- (4) Cho, J. R., Lee, H. W., Kim, M. J. and Ha, S. Y., 2003, "Seismic Analysis of Horizontal-Type Multi-Stage Centrifugal Pump Using Finite Element Method," *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*, Vol. 27, No. 6, pp. 790-796.

- (5) IEEE-STD-344, 1987, "Recommended Practice for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Station," IEEE Inc., New York, pp.
- (6) ANSYS User's Manual Ver. 10.0, 2005, ANSYS Inc., Canonsburg, pp. 913~960.
- (7) Lee, D. K., 1991, Earthquake Resistant Design by Dynamic Analysis Method, The Computational Structural Engineering Institute of Korea, Seoul, pp. 32~45.
- (8) Lee, J. K., Kim, J. Y. and Lee, H. N., 2002, "Seismic Qualification of the Air Cleaning Units for Nuclear Power Plant Ulchin 5&6," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 26, No. 7, pp. 1376~1383.
- (9) 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," *Journal of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 181~186.