

풍력타워용 부스닥트 포설시스템 개발

On Installation of Bus Trunk System for Wind Tower

이준근† · 김봉석* · 박성희* · 안형준** · 이희남***

Joonkeun Lee, Bong-Seok Kim, Seong-Hee Park, Hyung-Joon Ahn and Hee-Nam Lee

Key Words : Wind Tower, Bus Trunk System, Seismic Test , Vibration Durability Test, Modal Analysis .

ABSTRACT

A Bus Trunk System for Wind Tower is introduced. A marine cable has been widely used in wind tower or other offshore structure. However, as the electric load capacity is getting increased, the large number of cable lines should be used to cover such a huge amount of electric capacities, which makes the installation make quite difficult due to the heavy weight and volume of the present cables. On the other hand, by using a single bus trunk system line, the power capacity amount of 16 number of cable can be delivered with significant compactness. However, unlike flexible cable, the bus trunk is relatively stiff which could arise resonance phenomenon in the operating condition of wind tower, therefore, the vibration characteristics of bus trunk should be investigated and verify its long-term reliability during the life time of the wind tower.

기 호 설 명

- a_p : Amplification factor
- h : Average roof height of structure
- I_p : Components importance factor
- F_p : Seismic Design Force
- f_R : Maximum rotational speed
- $f_{R,m}$: Blade passing frequency of m rotor blades
- $F_{a,v}$: Acceleration on based coefficients
- S_s : Mapped spectral response 0.2sec period
- S_l : Mapped spectral response 1sec period

1. 서 론

알루미늄 도체를 사용하는 부스닥트는 기존 케이블

대비 경량화 및 Compact성 그리고 포설 편의성을 확보할 수 있다는 장점이 있으므로 최근 산업현장에 활발하게 적용되고 있다. 그러나 수백m 이상의 연속성을 갖는 케이블과 달리 부스닥트는 일반적으로 3m 길이의 피더와 이를 연결하는 접속함으로 구성되므로 케이블 대비 진동 및 피로 등에 취약한 구조라고 할 수 있다. 특히 초고층 빌딩이나 풍력타워, 선박등과 같이 동적인 하중을 받는 현장에 포설을 위해서는 전기적인 안정성 확보 이외에 구조적인 진동 내구성을 동시에 검증해야 하며 이러한 구조/진동측면에서의 효율적으로 내구를 검증하는 방법을 도출하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 따라서 풍력타워에 본 부스닥트 시스템에 적용될 수 있도록 해석을 통해 사전 구조/진동적인 안정성을 확인하였으며 실제 실증시험을 통해 장기 내구를 포함한 구조/진동안정성을 검증하였다

2. 부스닥트 시스템

2.1 부스닥트 시스템의 특징

케이블은 통상 Fig. 1 처럼 케이블 트레이에 설치하게 되는데 전류 부하용량이 클수록 적층구조로 되므로 공간상의 제약이 있는 곳에는 포설에 어려

† LS 전선 생산기술센터 CAE 기술그룹

E-mail : ljk@lcs.com

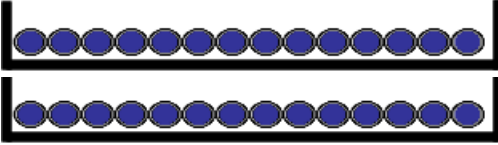
Tel : 031-450-8358, Fax :031-450-8331

* LS 전선 부스닥트사업부

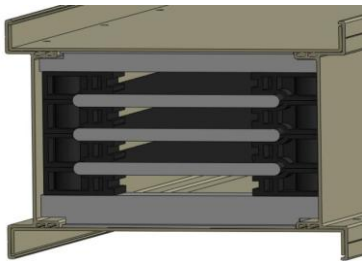
** 송실대학교 기계공학과

*** 순천대학교 기계공학과

움이 있게 된다. 반면 부스닥트 시스템을 적용할 경우에는 1개 라인으로 대전류 전송이 가능하므로 Compact 한 특성을 확보할 수 있음은 물론이고 동도체를 사용하는 케이블과는 달리 알루미늄 도체를 사용하므로 경량화는 물론이고 원재료비 상승에 대한 원가반영 비율을 최소화 할 수 있으므로 제품의 원가경쟁력도 확보 할 수 있는 장점이 있다.



(a) Cable Installation



(b) Bus Trunk Installation

Fig. 1 Cable & Bus Trunk Installation

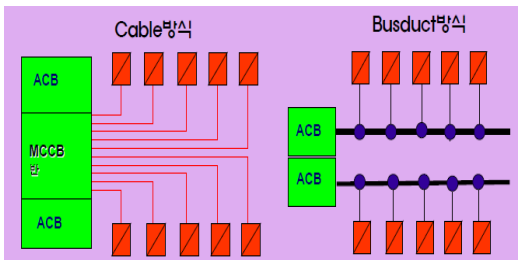


Fig. 2 Power Distribution for Cable & Bus Trunk

Fig. 2 처럼 케이블의 일반적인 전원 분기방식은 일대일 대응 방식을 적용하므로 대용량 전류 배전의 경우 많은 가닥수의 케이블이 필요하지만 부스닥트 시스템을 활용할 경우 메인라인 중간 중간에 Plug-in Box 를 분기시켜 배전하면 되므로 매우 편리한 시스템이라고 할 수 있다. Fig. 3은 부스닥트와 Plug-in Box 형상을 보여준다.

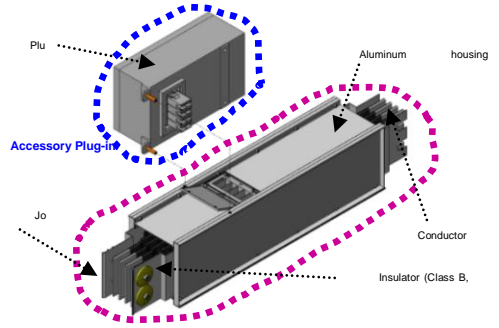


Fig. 3 Bus Trunk & Plug-in Box

2.2 풍력타워용 부스닥트 내진요건

풍력타워는 일반적으로 선급기준인 GL Guideline 2003의 규정을 준수하도록 설계되어야 하며 식(1)과 같이 로터의 운전주파수가 타워의 공진주파수의 95%수준보다 낮아야 하며 Blade Passing Frequency(BPF) 대비 각 n 차에 해당하는 타워의 고유진동수도 95% 이하가 되도록 설계되어야 한다.

$$f_R / f_{0,1} \leq 0.95$$

(1)

$$\text{and}$$

$$f_{R,m} / f_{0,n} \leq 0.95 \text{ or } f_{R,m} / f_{0,n} \geq 1.05$$

f_R : Maximum rotational speed of the rotor in normal operation

$f_{0,1}$: First natural frequency of the tower

$f_{R,m}$: Blade passing frequency of m rotor blades

$f_{0,n}$: n -th natural frequency of the tower

이것은 풍력타워에 대한 내구는 별도의 가진시험을 통해서 검증하기가 어려우므로 이러한 설계 Guideline을 통해 공진을 유발하는 직접적인 운전 조건에 놓여있지 않다는 것을 규정으로 정해놓았다고 이해하면 될 것이다. 그러나 풍력타워 내부에 장착된 전장품에 대한 내구검증은 주기적인 경계조건에 의해 지지되며 주로 풍하중 등 저주파 하중에

의한 가진력을 받는 것과는 달리 너셀부위에서 발생하는 중 주파수 대역의 가진력과 최근 국제적인 이슈가 되고 있는 지진과 성분도 가진력의 한 종류가 될 수 있으므로 이러한 사항을 고려한 타워 내부의 전장품에 대한 장기적인 내구검증이 필요하다고 할 수 있다. Fig. 4는 풍력타워에 부스닥트를 적용하는 일례이다. 풍력타워내에서 부스닥트를 적용할 수 있는 구간은 너셀 하단의 Loop 케이블과 지면 기초부의 변압기 구간이다. 부스닥트를 풍력타워에 부착하기 위해서는 Fig. 5와 같이 부스닥트 본체를 Support-Damper로 포설해야 풍하중 및 감쇠기능을 통해 진동에너지 흡수할 수 있으므로 장기적인 진동내구성을 확보할 수 있게 된다. Table 1은 내구시험에 적용되는 선급기준의 피로시험방법이다

Table 1 Vibration Durability Test for Bus Trunk System

<p>- IACS UR E10 test item No.7</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 2Hz to 13.2Hz – amplitude ±1mm ✓ 13.2Hz to 100Hz – acceleration ±0.7g • Amplification Factor (Q- Factor) should be less than → To prevent resonance damage ✓ 90 Mn. excitation at each resonance frequency
--

Fig. 6은 실제 풍력타워에 포설된 부스닥트 시스템이다. 케이블 포설시 너셀부위까지 케이블 드럼을 올려서 포설해야 하므로 타워 섹션별로 별개 포설하는 부스닥트에 비해 작업 난이도 및 설치시간이 매우 길어진다고 할 수 있으나 부스닥트를 풍력타워에 적용할 경우 용량별로 차이는 있으나 평균 50% 이상의 포설기간을 단축할 수 있는 장점이 있다.

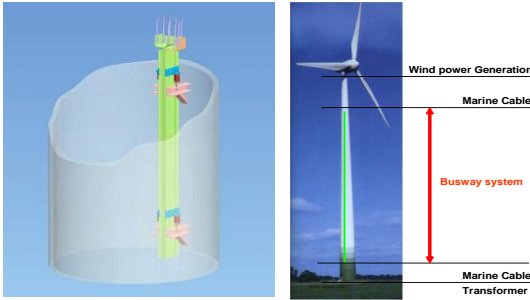


Fig. 4 Schematic Installation of Bus Trunk



Fig. 6 Bus Trunk Installation on Tower Section

2.2 부스닥트 내구검증

- IBC 2003/ASCE 7-02 Requirements

$$S_{DS} = \frac{2}{3} F_a S_s, \quad S_{D1} = \frac{2}{3} F_v S_1 \quad (2)$$

$F_{a,v}$: Acceleration on Based Coefficients

S_s : Mapped Spectral Response 0.2sec Period

S_1 : Mapped Spectral Response 1sec Period

식(2)에서 0.2sec 및 1sec 에서의 최대가속도는 2.56g와 1.24g 이고 지반계수를 각각 1과 1.5로 가정하면 식(2)를 다음의 값으로 표현 할 수 있다.

$$S_{DS} = \frac{2}{3} \times 1 \times 2.56g = 1.71g, \quad S_{D1} = \frac{2}{3} \times 1.5 \times 1.24g = 1.24g \quad (3)$$

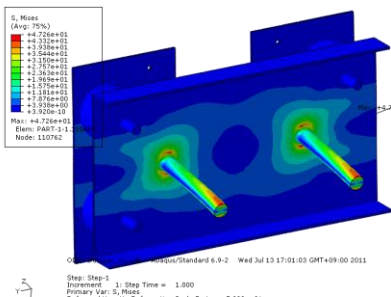
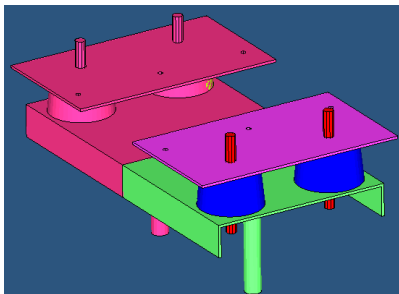


Fig. 5 Damper-Support Installation System

식(3)에서 보는 것처럼 IBC 2003 기준의 최대 지반 하중은 각각 1.71g와 1.24g로 구분할 수 있다. 다시 IBC Code 중 Section 1621.1에 보면 전장품에 대한 내진검증 기준이 제시되는데 이것은 다시 ASCE 7-02 와 연계되어 다음의 식으로 표현된다.

$$F_P = \frac{0.4a_P S_{DS} W_P}{R_P / I_P} \times (1 + 2 \frac{z}{h}) \quad (4)$$

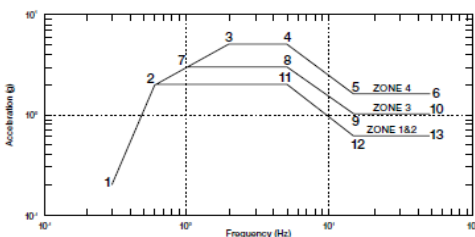
- F_P : Seismic Design Force
- a_P : Amplification factor (1~2.5)
- W_P : Components operating weight
- R_P : Response modification factor that varies from 1.0 to 5.0 (2.5)
- I_P : Components importance factor that is either 1.0 or 1.5 (1.5)
- z : Highest point of equipment in a structure relative to grade elevation
- h : Average roof height of structure relative to grade elevation

식(4)에 중요한 전장품이라는 가정하에 보수적인 계수를 대입하면 최고층에서의 응답가속도를 구할 수 있다.

$$F_P = \frac{0.4 \times 2.5 \times 1.7g}{2.5/1.5} \times (1 + 2) = 3.06g \quad (5)$$

따라서 IBC 기준과 ASCE 7-02 기준에 의거 최대 건물높이에 대한 증폭을 고려할 경우 최대 약 3g의 지진파를 적용하게 된다.

-GR-63 Requirement



Zone 4		
1	0.3	0.2
2	0.6	2.0
3	2.0	5.0
4	5.0	5.0
5	15.0	1.6
6	50.0	1.6

- IEEE 693 Seismic Requirement

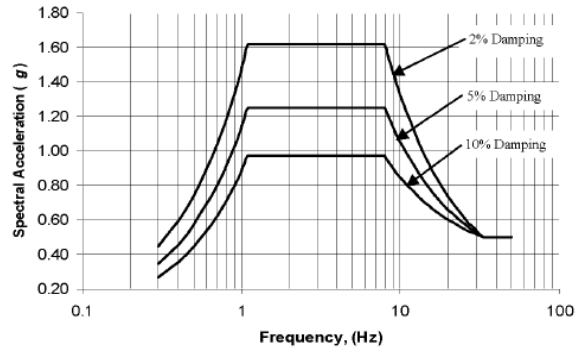


Fig. 7 GR-63 / IEEE 693 Seismic Standards

Fig. 7은 GR-63 및 IEEE 693 Code에서 제시하는 Seismic Load를 나타낸다. 특히 GR-63 미국 통신 설비에서 제시하는 지진파 요건은 최대 5g 값을 가지며 현재 세계적으로 적용되는 내진요건 중에 가장 높은 값이라고 할 수 있다. 앞서 말한 바와 같이 IBC 2003/ASCE 7-02/GR-63/IEEE 693을 포괄하는 지진파 스펙트럼을 모두 포괄하는 값을 만들어 내진신호를 만들어서 시험한다면 매우 유용한 값으로 광범위하게 적용할 수 있을 것이다. Fig. 8은 이러한 내진 Code를 모두 포괄하는 지진파 스펙트럼

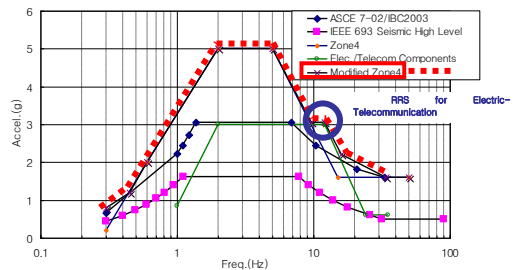
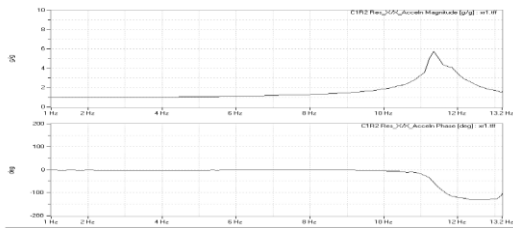


Fig. 8 Encompassed input data for seismic test

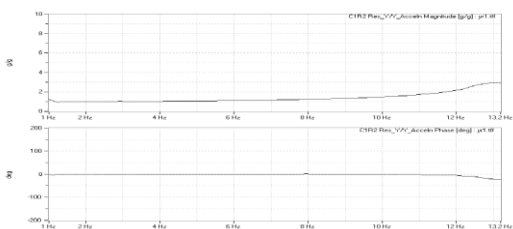
각 내진요구 Spectrum 중 GR-64 규정이 가장 높은 Peak 값을 지나 10Hz 이상의 주파수 대역에서는 IBC/ASCE 7-02 Spectrum 값이 상대적으로 높은 영역이 존재하므로 50Hz 이내 주파수 범위에서 가장 높은 값으로 포괄할 수 있도록 신호를 생성하였다. 특히 여기에는 2009년 10월부터 발표된 전기통신설비 내진검증 기준에 의거한 내진 Spectrum 도 포함하여 지진파 시험기준으로 하였다. 시험절차는 IEEE 693의 내진시험기준을 적용하며 다음의 Table 2와 같다.

Table 2 Seismic Test Procedures per IEEE 693

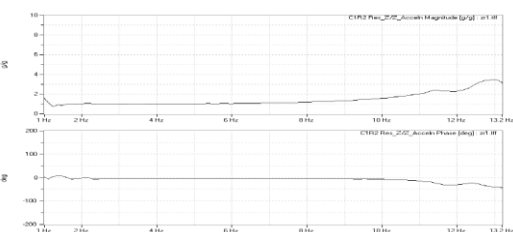
1 Receipt and inspection ; Visual Inspection
2.Hi-Voltage electrical testing ; (1000+ 2U) + 5V(RMS) for 60sec
3.Insulation Resistance Testing ; (IEC 60439)
4.Resonance Sine sweep test 1~50Hz
5.Seismic test of Zone 2/3/4 with 2% Damping ; Tri-axial random testing
6.Resonance search testing (Re) : Sine sweep
7.Hi-Voltage electrical testing (Re)
8. Insulation resistance testing (Re)
9.Final inspection : Structural failure, deformations etc.



(a) X-Direction



(b) Y-Direction



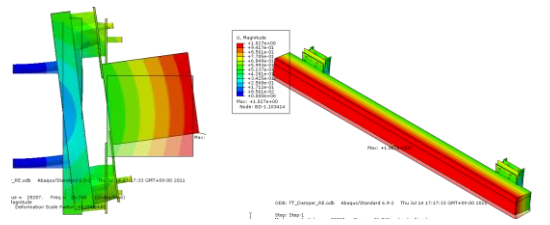
(c) Z-Direction

Fig. 9 FRF from Resonance Search Tests

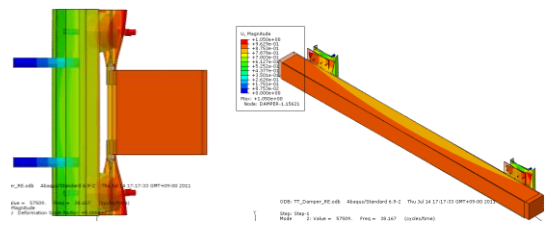
Table 3. Natural Frequencies for 3-Axis

구분	공진주파수(Hz)	댐핑계수(%)	공진비율
X-방향	11.35/31.98/42.11	3.23/5.34/2.32	5.75/3.29/3.20
Y-방향	14.16/16.36	8.19/8.58	4.18/4.30
Z-방향	14.16/57.86	6.03/0.74	6.99/2.34

Fig. 9는 Fig. 10과 같은 포설 조건하에서의 공진검색시험결과이다. 각각 X 방향으로 11.4, 31.9, 42.1Hz의 공진주파수를 가지며 Y방향으로는 14.2, 16.4Hz, Z방향으로는 14.2, 57.9Hz의 고유진동수를 확인하였다. 실험으로 구한 각 방향의 모드를 해석결과와 상관성을 본 결과 1,2차 모드는 26.7 / 38,1Hz로 마운트의 강체-벤딩/비틀림 모드임을 알 수 있으며 이것은 Damper-Support 조건을 사용하는 풍력타워용 부스닥트의 기본 모드 특성이라고 할 수 있다. 즉 풍력타워에서 발생하는 여러 진동을 결과적으로 Damper-Support 시스템이 흡수해주는 구조이기 때문에 발생하는 현상이다.



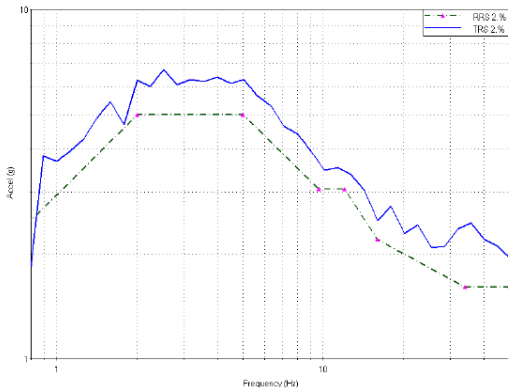
(a) Rigid-Bending Mode



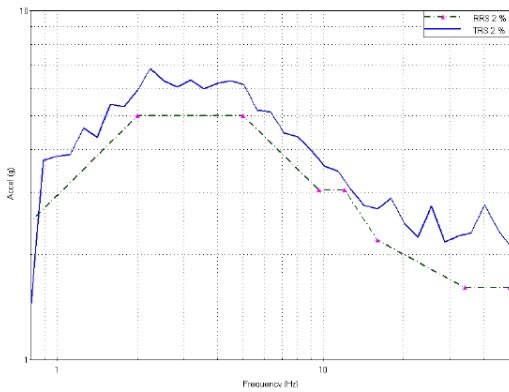
(b) Rigid-Torsion Mode

Fig. 10 Vibration Mode for Bus Trunk System

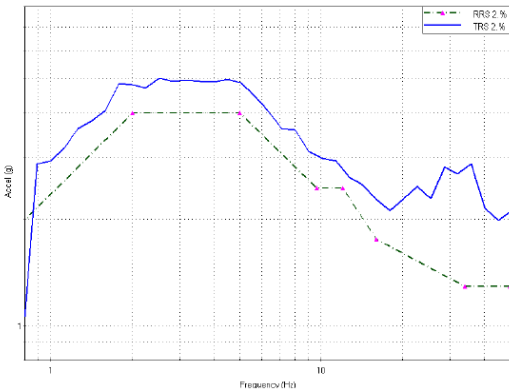
이러한 각 방향의 공진주파수를 기준으로 Table 1의 진동피로 내구 시험을 실시하게 된다. 이러한 피로시험 이후에는 Table 2의 내진시험 Procedure를 따라서 내진 Zone 2~4의 시험을 하게 되는데 가진 Table에서 각 3축 방향의 지진파 가진신호를 모니터링 하여 규정의 값 이상으로 가진 되었는지 확인하여야 한다. Fig. 10은 Seismic Zone 4 조건에서 시험이 성공적으로 수행하였는지 모니터링한 결과(TRS : Test Response Spectra)를 요구입력신호(RRS)와 비교한 결과이다. 그림에서 처럼 TRS가 RRS를 3축 조건에서 충분히 포괄하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) X-direction



(b) Y-direction



(c) Z-direction

Fig. 11 Comparison of TRS & RRS (Zone 4 Test)

Fig. 12는 풍력타워용 부스닥트를 포설조건을 모사하여 실증 가진 시험을 하기 위한 Set-up 이다. 시험절차는 Table 2를 절차를 따르며 Vibration fatigue 및 내진시험을 연속적으로 수행하여 피로 및 내진내구를 동시에 검증하도록 한다.

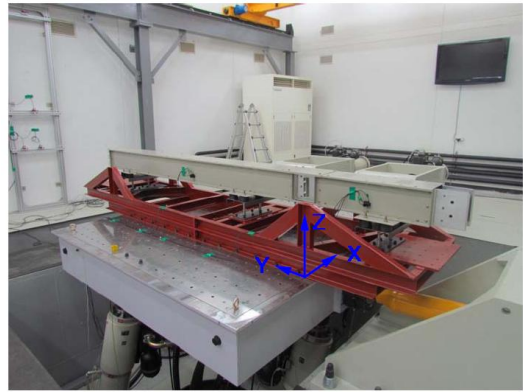


Fig. 12 Seismic & Vibration Fatigue Test Set-up

3. 결 론

본 연구에서는 풍력타워용 부스닥트 개발 및 풍력 타워에서 발생할 수 있는 진동피로 내구 및 최근 이슈가 되고 있는 내진 즉, 건축/토목/전기/통신에 대한 내진요건을 모두 포괄하여 검증시험을 진행하였다. 지진파에 의한 공진현상에 의한 파손을 최소화 하기 지진파 Peak 영역을 피할 수 있도록 지지부를 설계하였으며 가장 가혹한 내구조건으로 알려져 있는 선급피로기준을 적용하여 내진성능을 입증하였다.

후 기

본 과제는 2010년 전력산업원천기술개발사업 (녹색에너지전송 내진동형 전력전송 디바이스 개발)의 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, J and Kim, W.B., 2005, Seismic Qualification Using Modal Analysis and Experimental Techniques, Proceedings of the 12th ICSV, Lisbon, Portugal.
- (2) Lee, J and Beon, H.S, 2002, Seismic Qualification of Main Control Board for Nuclear Power Plant UCN 5&6, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering. Vol. 12, No. 11, pp. 856~863.
- (3) Nashif, A.D. and Jones, D.I., 1985 'Vibration Damping, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (4) IBC 2003/ASCE7-02/IEEE 693-1997/GR-63