

진동시험을 통한 강판콘크리트(SC) 전단벽의 저응력수준에서의 구조 감쇠비 규명

조성국* · 소기환** · 김두기*** · 한상묵****

Cho, Sung Gook*, So, Gihwan**, Kim, Doo Kie***, Han, Sang Mook****

Structural Damping Ratio of Steel Plate Concrete(SC) Shear Wall at the Low Stress Level Identified by Vibration Test

ABSTRACT

Steel plate concrete (SC) structure has been developed as a new structural type. Rational damping value shall be determined for the seismic design of SC structure. This study evaluated damping ratio of SC structure through experiments. For the study, a SC shear wall specimen was constructed and dynamically tested on the shaking table. Acceleration time history responses measured from testing were converted to the transfer functions and analyzed by using experimental modal analysis technique. The structural damping ratio of the specimen was identified as 4% to critical. Considering the shaking table test was performed at the excitation level corresponding to the low stress level of the specimen, 4% could be suggested as a structural damping for design of SC structure for operating basis earthquake.

Key words : Steel plate concrete, Damping ratio, Shear wall, Vibration test, Seismic design, Operation basis earthquake

초 록

SC (steel plate concrete)구조는 새로운 구조형식으로서 SC구조물의 내진설계에 적용할 수 있는 감쇠비의 규명이 필요하다. 이 연구에서는 실험적 방법을 통해 SC구조의 감쇠비를 분석하였다. 연구를 위하여 SC 전단벽 시편을 제작하고, 대형 진동대를 이용하여 진동시험을 수행하였다. 시험에서 측정한 가속도응답신호는 전달함수로 변환한 후 동적실험모드분석기법을 적용하여 분석하였다. 구조물의 감쇠비는 입력운동의 수준에 따라 달라질 수 있으며, 이 연구의 실험에서 적용한 입력운동의 수준은 시편의 항복강도의 절반보다 낮은 수준으로서 여기서 분석된 구조감쇠비는 약 4%정도이다. 이 연구결과를 고려하여 SC구조물의 운전기준지진에 대한 내진설계에는 4% 감쇠비를 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

검색어 : SC구조, 감쇠비, 전단벽, 진동시험, 내진설계, 운전기준지진

1. 서론

현재 가동 중이거나 건설 중인 원전의 안전관련 구조물은 대부분 철근콘크리트(reinforced concrete, 이하 RC)구조로서 거푸집 설치 및 해체, 철근배근, 양생 등의 공정을 거쳐야 하기 때문에 건설기간이 길어지게 된다. 원전의 건설공기를 감축하고 시공품질의 향상을 기대할 수 있는 공법으로서 모듈화 공법이 관심을 받고 있다. 모듈화 공법은 원전에 포함된 구조물, 기기, 계통을 일체화 시켜서

* 정회원 · 이노스기술(주) 기술연구소장 (Innose Tech co. LTD · sgcho@innosetech.com)

** 정회원 · 교신저자 · 이노스기술(주) 과장 (Corresponding Author · Innose Tech co. LTD · ghso@innosetech.com)

*** 정회원 · 군산대학교 토목환경공학과 교수 (Kunsan National University · kim2kie@kunsan.ac.kr)

**** GS건설연구소 연구원 (GS Engineering & Construction Corp. · smhan01@gsconst.co.kr)

Received August 13, 2014/ revised September 26, 2014/ accepted January 16, 2015

공장제작 한 후, 현장에서 조립하는 공법을 말한다. 모듈화 공법의 핵심 기술 중의 하나는 기존의 RC구조를 대신하여 강판콘크리트 (steel plate concrete, 이하 SC)구조를 적용하는 것이다.

SC구조는 콘크리트의 외벽에 강판을 부착하고 내부 콘크리트에 접하는 강판의 내면에 스티드 볼트를 부착함으로써 강판과 콘크리트를 일체화시킨 것이다. 이로써 SC구조에서는 강판이 구조재의 기능을 수행하면서 동시에 거푸집의 역할도 수행하는 구조이다. 원전 구조물의 설계에 적용된 각종 방법과 정보는 확실한 근거를 토대로 검증되어야 한다. SC구조는 원전에 적용하는 새로운 구조 형식으로서 정적하중에 대한 성능뿐만 아니라 동적하중에 대한 성능도 반드시 입증되어야 한다. 동적설계에서 구조물의 감쇠비는 중요한 설계변수이다.

현재까지 진행된 SC구조에 관한 연구는 대부분 SC구조 부재의 역학 특성분석에 관한 것으로서 SC구조의 정적거동 분석(Lee et al., 2009a; Han et al., 2011), 부재의 강성과 강도 특성 연구(Lee et al., 2008), 접합부의 구조거동 연구(Kim et al., 2008), SC구조의 스티드 연결(Choi et al., 2008a; Choi et al., 2008b), SC구조의 특성실험(Lee et al., 2009b; Lee et al., 2010; Lee et al., 2012) 등이 있다. 이런 기존의 연구들은 정적실험을 통하여 구조물의 한변위 관계를 분석하고, 구조물의 내력성능 평가에 집중한 것들이다. 지진에 대한 안전성이 중시되는 원전에 SC구조를 적용하기 위해서는 구조물의 강도설계에 관한 연구뿐만 아니라 동적특성과 내진설계에 대한 연구가 요구된다.

구조물의 내진설계에서 감쇠비는 구조물의 지진응답을 지배하는 중요한 설계인자이므로 구조 재료와 형식에 따라 실험을 통하여 규명되어야 하는 정보이다. 최근에 Cho et al. (2012; 2013)은 SC 벽체의 모형 시편을 대상으로 반복가력 실험을 수행하고, 하중 이력곡선으로부터 SC부재의 감쇠비를 분석하였다. 그러나 이는 정적실험을 통한 연구로서 동적시험을 통하여 SC구조에 대한 진동 특성이나 감쇠비를 분석한 연구는 사례가 매우 부족한 실정이다.

이 연구는 SC구조의 감쇠 특성을 분석하기 위하여 SC구조 벽체의 시편을 제작하고, 진동대를 이용하여 진동시험을 수행하였다. 그리고 시험에서 계측된 가속도 신호와 하중-변위 관계를 분석하여 시편의 진동특성과 감쇠비를 규명하였다.

2. 원전 구조물의 감쇠비 규정

진동하는 동적시스템은 시간이 지남에 따라 진동이 점차 감소하고 에너지가 발산하는 현상이 생긴다. 공학에서 동적시스템의 에너지 발산 현상을 감쇠로 정의하고, 해석의 편의상 감쇠는 임계감쇠에 대한 비율인 감쇠비로 표현한다. 구조물의 감쇠비는 진동시스템의 지진응답을 지배하기 때문에 관련 설계기준에서 추천 값을 규정하

고 있다. 일반적으로 내진설계에서 구조물의 감쇠비는 모드감쇠비의 형태로 정의하고, 동일한 재료로 구성된 모든 구조의 진동모드에 적용한다. 두 가지 재료 또는 그 이상의 조합으로 이루어진 구조 즉, 콘크리트와 철판, 토양시스템 등의 구조는 합성감쇠(composite damping) 또는 합성모드감쇠(composite modal damping)를 적용해야 한다.

국내 원전 구조물 및 설비에 대한 감쇠비 규정은 미국의 원자력규제위원회에서 발간한 규제기준(2007)을 적용하고 있다. 원전의 설계에 적용되는 감쇠비는 구조의 형식과 설계지진의 수준인 운전 기준지진(Operating-Basis Earthquake, OBE)과 안전정지지진(Safe-Shutdown Earthquake, SSE)에 대하여 각각 구분하고 있다. Table 1에 우리나라의 전력산업기술기준(2010), 미국 NRC의 안전심사지침(2007), 미국토목공학회 설계기준인 ASCE 4-98 (2000) 및 일본의 강판콘크리트구조 설계기준인 JEAC-4618 (2009)에서 제시하고 있는 구조형식별 감쇠비를 각각 비교하였다.

Table 1에서 보는 바와 같이 미국의 NRC와 ASCE에서는 SC구조에 대한 설계감쇠비를 제시하고 있지 않다. 대신에 ASCE의 기준에서는 규정하지 않은 구조형식에 적용하는 감쇠비는 점성감쇠에 의해 소산되는 에너지를 추정하여 정하도록 권고하고 있다. 우리나라의 전력산업기술기준인 KEPIC-SNG (KEPIC, 2010)는 OBE에 대한 내진설계에 대하여 4% 그리고 SSE에 대한 내진설계에 대하여 6%로 규정하고 있다. 이 값은 USNRC에서 RC구조의 OBE설계에 대하여 규정하는 4% 값과 동일하고, SSE 수준의 설계에 대해서는 1% 정도 작은 값이다. 이에 대하여 KEPIC-SNG는 단지 SC구조에서 발생하는 균열이 RC구조에 비해 적기 때문이라고 설명하고, 실험결과와 같은 구체적 근거를 제시하고 있지는 않다. 일본의 JEAC-4618에서는 SC구조의 감쇠메커니즘은 RC구

Table 1. Damping Values for Nuclear Power Plant Components

CODE	Damping ratio to critical damping		
	TYPE	OBE	SSE
USNRC (KEPIC STB)	RC	4%	7%
	PSC	3%	5%
	Welded Steel & Bolted Steel with Friction Connections	3%	4%
KEPIC-SNG	SC	4%	6%
ASCE 4	TYPE	Stress level 1	Stress level 2
	Welded & friction-bolted steel structures	2%	4%
	PSC	2%	5%
	RC	4%	7%
JEAC-4618	SC	5%	

조와 유사하기 때문에 SC구조의 감쇠비를 RC구조와 동일한 값인 5%로 규정하고 있고, 지진하중의 크기에 따라 구분하고 있지 않다.

3. 진동시험

3.1 SC구조 벽체 시편

이 연구에서는 SC구조의 감쇠비를 규명하기 위하여 대형 진동대를 이용한 진동시험을 수행하였다. 시험을 위하여 Fig. 1과 같은 SC구조 벽체 시편이 제작되었다. 제작된 시편은 KEPIC-SNG와 JEAC-4618의 설계기준의 규정에 따라 설계되었다. Fig. 1에 보인 바와 같이 시편은 두 개의 벽체와 상부슬래브 및 기초슬래브로 구성되어 있다. 시편의 벽체 부분은 SC구조이고, 슬래브는 RC구조이다.

시편 벽체의 높이는 2,500mm, 길이는 1,500mm, 두께는 300mm이다. 시편 벽체의 상부와 하부에 연결된 슬래브의 두께는 500mm이다. 벽체와 슬래브 연결부의 강성 확보를 위하여 시편 벽체의 상부와 하부는 500mm씩 각각 상부슬래브와 기초슬래브에 매립되었다. 벽체의 강판 두께는 6mm이다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이, 시편 벽체의 강판 내면에는 직경 14mm의 스티드가 용접으로 부착되었다. 슬래브에 묻히는 부분은 추가로 강판의 외면에도 스티드가 부착되었다. 벽체의 중간 부분에 배열된 스티드의 간격은 280mm이고, 슬래브에 매립된 부분의 배열 간격은 160mm이다.

시편에 사용된 강판의 강종은 SM490이고, 내부에 타설된 콘크리트의 압축강도는 45MPa이다. 벽체 내부에는 스티드를 제외한 다른 보강은 없으며, 상부와 하부의 슬래브에는 철근을 배근하였다.

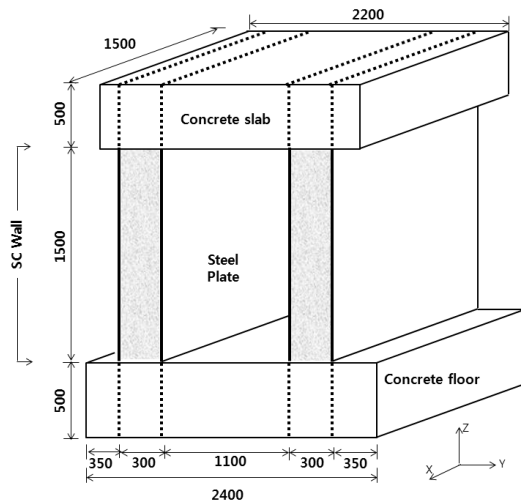


Fig. 1. Dimension of Specimen



Fig. 3. Steel Plate Form Work

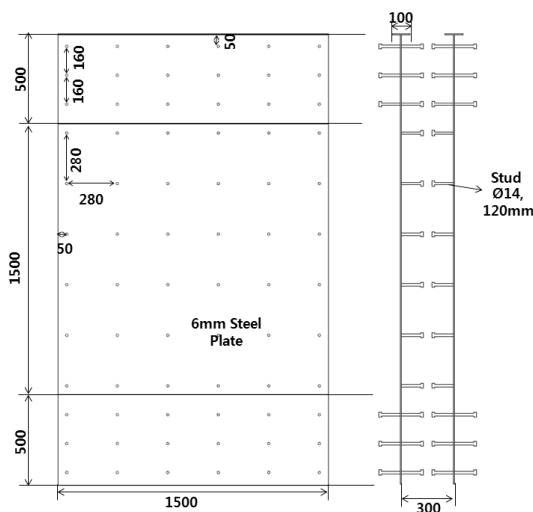


Fig. 2. Arrangement of Studs



Fig. 4. Specimen

Figs. 3 and 4에 시편의 거푸집 형상과 완성된 시편의 형상을 각각 나타내었다. 중량저울을 이용하여 계량한 시편의 총 중량은 12.1ton이다.

3.2 시험 방법 및 종류

SC 벽체 시편의 감쇠비를 규명하기 위하여 대형 진동대를 이용한 진동시험을 수행하였다. 이 연구에 이용된 시험설비는 국내의 현대건설 기술연구소에서 보유하고 있는 30톤 용량의 1축 방향 진동대이다.

진동시험은 백색잡음(white noise) 랜덤파형(random wave)을 입력운동으로 하여 Table 2에 보인 5가지의 진동수준에 대하여 벽체의 길이방향(x축 방향)으로만 실시되었다. Table 2에 보인 입력운동의 수준은 신호의 RMS(root mean square) 평균 가속도와 이때의 최대 가속도이다. Figs. 5 and 6에 입력운동의 시간이력가속도와 파워스펙트럼가속도 그래프의 대표적인 형상을 나타내었다. Fig. 6에서 입력운동은 대체로 1Hz~30Hz 구간에서 모든 진동수 성분을 지니고 있음을 알 수 있다.

Table 2. Excitation Levels of Input Motion

	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Averaged acceleration (RMS, g)	0.045	0.07	0.10	0.13	0.17
Peak acceleration(g)	0.36	0.49	0.76	0.96	1.25

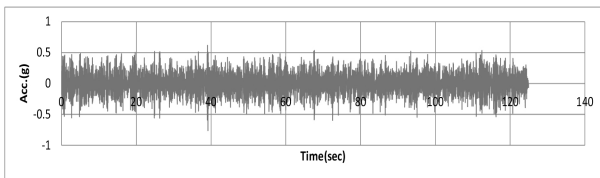


Fig. 5. Time History of Input Motion (Level 3)

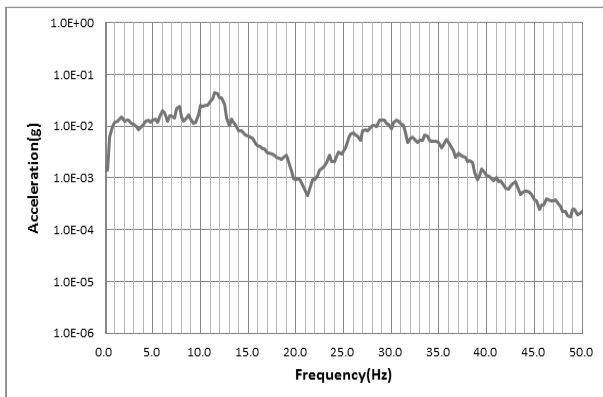


Fig. 6. PSD of Input Motion (Level 3)

3.3 계측 및 시편의 설치

진동시험에서 입력운동과 진동응답의 계측을 위하여 가속도계가 사용되었다. 가속도계는 시편 벽체의 길이방향으로 하나의 벽체 당 4개씩 상, 중, 하의 위치에 부착하였다. 진동대에 1개의 가속도계가 내부에 고정적으로 설치되어 있으므로 시험에는 총 9개의 1축 가속도계가 사용되었다. 벽체에 부착한 계측기의 번호와 위치는 Fig. 7에 보인 바와 같다. 시험에서 가속도시간이력 신호는 나이퀴스트(Nyquist) 진동수를 고려하여 초당 256개로 계측하였다.

시험 직전에 진동대에 설치된 시편의 준비 상황을 Fig. 8에서 볼 수 있다. Fig. 8에서 보는 바와 같이, 시편과 진동대 사이에는 강재 블록 받침을 삽입하고, 시편은 50mm 직경의 PC 강봉 6개를 이용하여 진동대에 고정하였다.

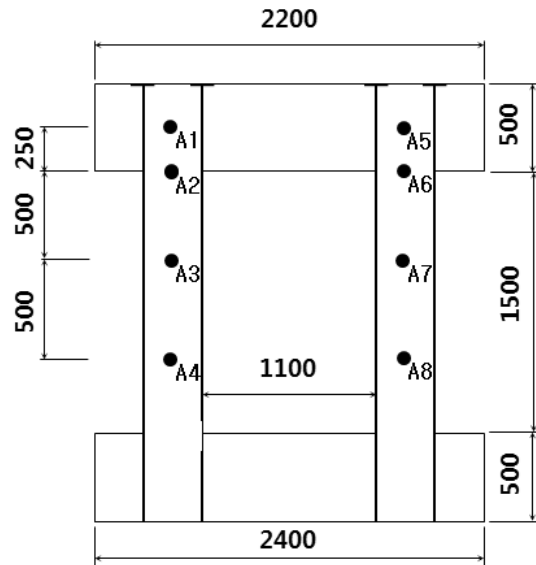


Fig. 7. Location of Accelerometers



Fig. 8. Test Set Up

3.4 계측 신호

진동대운동과 시편의 각 위치에서 계측한 가속도응답 신호 중에서 대표적으로 Level 3 입력운동 수준에 대한 가속도시간이력을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에 보인 신호의 최대 가속도 값을 Table 3에 정리하였다. 시편의 동적 증폭을 의미하는 입력운동에 대한 상부 슬래브응답의 최대 가속도 비는 약 1.44~1.81까지 입력

운동의 수준에 따라 증가하였다.

계측된 가속도시간이력 신호는 진동수영역의 전달함수로 변환되었으며, 이를 Fig. 10에 나타내었다. 계측 신호의 전달함수의 진폭함수는 공통적으로 약 20Hz 부근에서 꼭지점이 발생하며, 이 진동수 부근에서 위상함수의 위상각도 확실히 변화한다. 이로써 시편의 기본모드에 대한 고유진동수가 20Hz임을 알 수 있다.

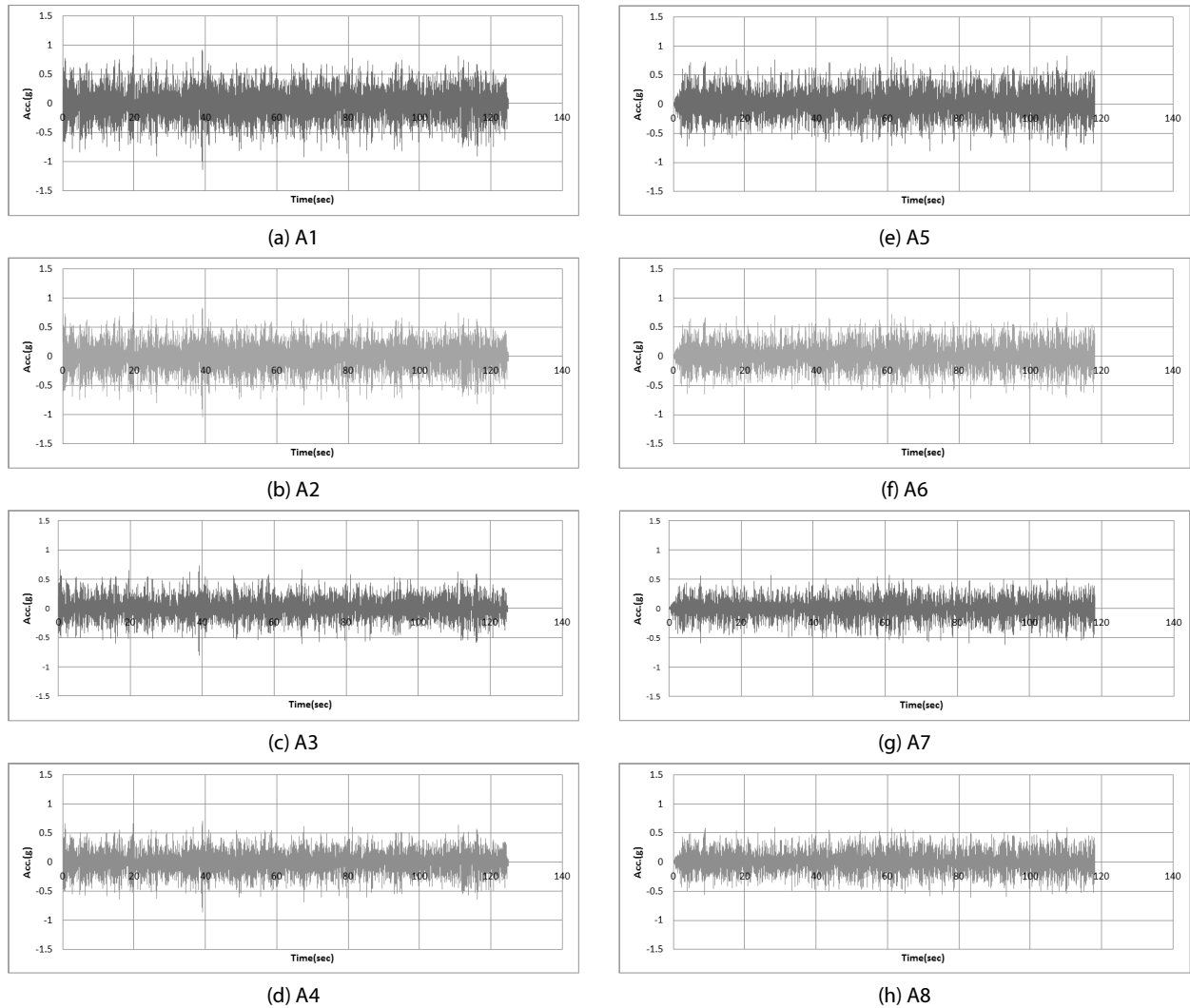


Fig. 9. Time History Acceleration

Table 3. Test Results–Acceleration (unit : g)

Sortation		Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Input motion	RMS acceleration	0.045	0.07	0.10	0.13	0.17
	Peak acceleration	0.36	0.49	0.76	0.96	1.25
Response	Peak acceleration at Mid (A3)	0.36	0.49	0.81	1.2	1.51
	Peak acceleration at Top (A1)	0.52	0.71	1.14	1.52	2.26
Amplification ratio (A1 / input)		1.44	1.45	1.50	1.58	1.81

진동시험을 통한 강판콘크리트(SC) 전단벽의 저응력수준에서의 구조 감쇠비 규명

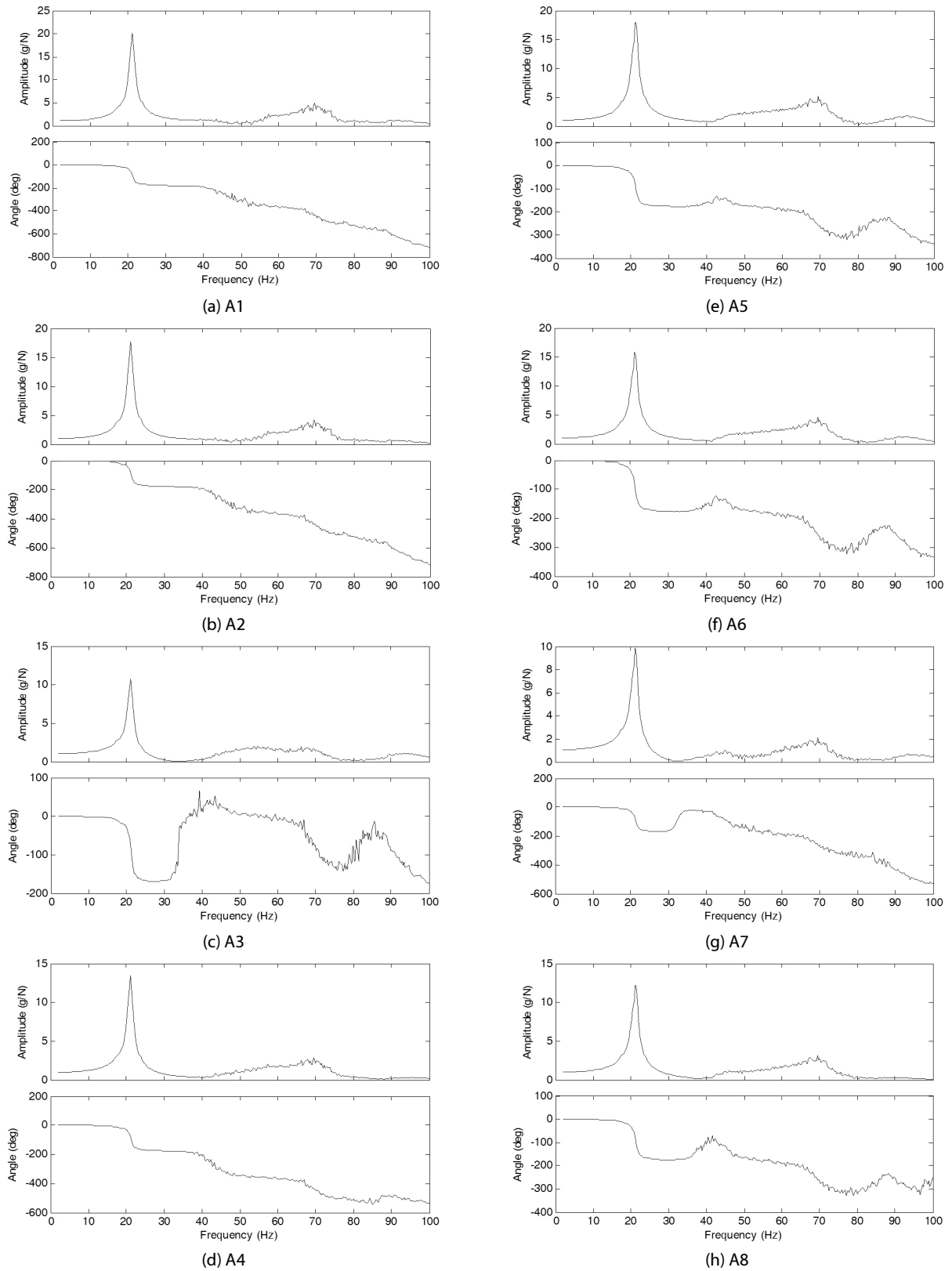


Fig. 10. Transfer Functions

4. 감쇠비 분석

4.1 감쇠비 규명 기법

실험을 통하여 구조시스템의 진동특성 즉, 진동모드, 진동수 및 감쇠비를 규명(identification)하는 실험모드분석은 시간영역방법과 진동수영역방법으로 구분할 수 있다. 진동수영역방법은 구조물의 진동수응답함수를 이용하여 모드특성을 추출해 내는 방법으로서 선형 정상 거동을 분석하는 경우에 보다 유용한 결과를 얻을 수 있고 시간영역방법보다 더 쉽게 적용이 가능하다. 이를 고려하여 이 연구에서는 진동수영역방법을 이용하여 구조물의 진동특성을 분석하였다. 진동수영역방법은 선형시스템의 운동방정식을 라플라스변환(Laplace transform)을 이용하여 다음 Eq. (1)과 같이 변환한다(Maia and Silva, 1997).

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

여기서, $\{x(s)\}$ 는 변위응답의 라플라스변환, $\{F(s)\}$ 는 가진력의 라플라스변환, $\{x(0)\}$ 는 초기변위벡터, $\{\dot{x}(0)\}$ 는 초기속도벡터, s 는 라플라스 변수($= \sigma + i\omega$)이다.

Eq. (1)에 자유진동의 초기값 $\{x(0)\} = 0$, $\{\dot{x}(0)\} = 0$ 을 적용한 결과는 다음과 같다.

$$[B(s)]\{x(s)\} = \{F(s)\} \quad (2)$$

여기서, $[B(s)] = [M]s^2 + [C]s + [K]$ 이다

Eq. (2)의 $[B(s)]$ 는 구조물의 동특성을 나타내는 시스템행렬(system matrix)이고, 이의 역행렬 $[H(s)]$ 는 전달함수행렬(transfer function matrix)로 부른다.

전달함수행렬은 다음과 같은 부분분수(partial fraction)의 형태로 전개할 수 있다(Maia and Silva, 1997).

$$[H(s)] = \sum_{k=1}^N \left(\frac{[r_k]}{(s-p_k)} + \frac{[r_k^*]}{(s-p_k^*)} \right) \quad (3)$$

여기서, N 은 전체 모드의 수이고, k 는 k 번째 모드번호이다. $p_k = -\sigma_k + i\omega_k$ 는 k 번째 모드의 극(pole)의 위치, σ_k 는 k 번째 모드의 감쇠계수, ω_k 는 k 번째 모드의 고유진동수, *은 공액복소수(complex conjugate), i 는 $\sqrt{-1}$ 이다.

Eq. (3)의 $[r_k]$ 는 k 번째 모드의 유수행렬(residue matrix)로 모드분석을 위하여 Eq. (4)로 나타낼 수 있다.

$$[r_k] = A_k \{u_k\} \{u_k\}^T \quad (4)$$

여기서, A_k 는 비례상수이며 $\{u_k\}$ 와 $\{u_k\}^T$ 는 모드행렬이며 공액복소수 쌍을 의미한다.

운동방정식의 감쇠행렬 $[C]$ 는 질량행렬 $[M]$ 과 강도행렬 $[K]$ 의 선형조합으로 나타냄으로써 상호독립으로 표현할 수 있다. Eq. (1)에서 초기조건, 즉 $s=0$ 일 경우 감쇠행렬은 Eq. (5)로 표현된다.(Richardson, 2000)

$$[C] = [K] \left[\sum_{k=1}^m \text{Im} \left(\frac{[r_k]}{(p_k)^2} \right) \right] [K] \quad (5)$$

Eq. (5)의 유수행렬 $[r_k]$ 와 극의 위치 p_k 를 전개하면 Eq. (6)과 같다.

$$[C] = [K] \left[\sum_{k=1}^m \left(\frac{2\sigma_k \omega_k A_k \{u_k\} \{u_k\}^T}{(\sigma_k^2 - \omega_k^2)^2 + (2\sigma_k \omega_k)^2} \right) \right] [K] \quad (6)$$

Eq. (6)에서 감쇠계수(σ_k)는 감쇠고유진동수(ω_k)에 비하여 매우 작아 무시할 수 있다는 가정을 적용하면, Eq. (7)이 되며, 이에 대해 모드형상행렬로 정리를 하면 Eq. (8)과 같이 정리된다.

$$[C] = [K] \left[\sum_{k=1}^m \left(\frac{2\sigma_k A_k \{u_k\} \{u_k\}^T}{\omega_k^3} \right) \right] [K] \quad (7)$$

$$[C] = [K] [\phi] \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & \frac{2\sigma A}{\omega^3} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \end{bmatrix} [\phi]^T [K] \quad (8)$$

Eq. (8)의 양변에 모드형상행렬을 선승하면 Eq. (9)와 같은 모드감쇠에 대한 식으로 정리된다.

$$[\phi]^T [C] [\phi] = \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & c & & \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & \frac{2\sigma}{A\omega} & & \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \end{bmatrix} \quad (9)$$

이로부터 모드감쇠 c_k 는 다음과 같이 얻어진다.

$$c_k = \frac{2\sigma_k}{A_k \omega_k} \quad k=1 \text{ to } m \quad (10)$$

4.2 모드감쇠비 추출

진동신호로부터 구조물의 감쇠비를 계산하기 위하여 대표적으로 다음의 4가지 방법이 이용된다(Cho et al., 2013). 파워반감대역폭(half-power bandwidth)을 이용하는 방법, 대수감소를 이용하는 방법, 다항식회귀분석방법, 등가점성감쇠에 의한 방법 등이다(U.S.NRC, 2007a).

이 연구에서는 진동실험을 통해 계측한 전달함수를 다항식으로 전개하고 회귀분석방법을 적용하여 시편의 고유진동수와 감쇠비를 규명하였다. 다항식회귀분석방법을 이용한 분석에서는 Eq. (3)의 전달함수를 다항식으로 전개하고 다항식곡선적합(curve fitting)을 실시하여 다항식의 계수와 상수를 결정한다.

시험에서 계측된 신호의 진동수합수와 다항식곡선적합법을 적용하여 얻어진 곡선의 형상을 Fig. 11에 나타내었다. 선정된 구간에서 두 곡선은 거의 일치하도록 곡선적합되었음을 알 수 있다. 곡선의 다항식 계수로부터 추출된 모드형상을 Fig. 12에 보이고 있다. 입력운동 수준에 대한 실험자료를 분석하여 구한 시편의 고유진동수와 감쇠비 값을 Table 4에 정리하였다.

진동수준에 따라 약간의 차이는 있으나 Table 4의 값을 평균하여 구하면 시편의 기본모드에 대한 고유진동수는 20.6Hz이며, 감쇠비는 약 4.11%이다. 입력운동의 진동수준이 증가하더라도 시편의 고유진동수와 감쇠비에는 큰 차이가 없다. 이것은 이 연구의 시험이 시편의 항복강도보다 낮은 응력 상태의 힘이 작용하도록 저진동수준의 시험으로서 시편이 탄성한도 이내에서 거동하였기 때문이다.

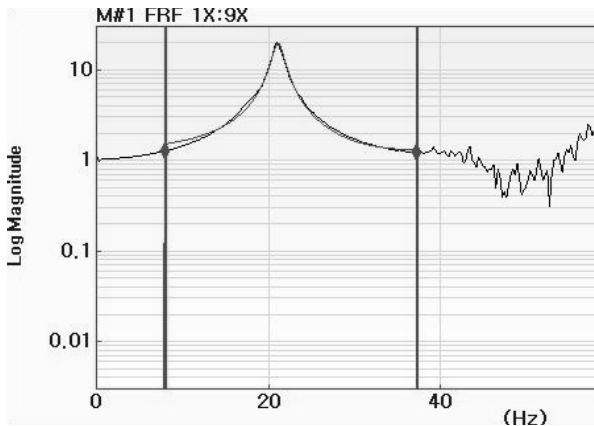


Fig. 11. Polynomial Curve Fitting

4.3 정적 가력 해석

앞서 Table 1에서 설명한 바와 같이, 미국 NRC와 ASCE 4에서 지진해석에 적용하는 모드감쇠비 값은 두 가지 응력수준(stress level)으로 구분하여 제시하고 있다. USNRC에서 규정하는 SSE 수준과 OBE 수준에 상응하는 ASCE 4의 입력운동의 하중 수준은 각각 stress 2와 stress 1이다. SSE 수준 즉, stress 2 수준은 콘크리트 구조 부재의 극한강도의 1/2을 초과하는 응력을 유발하는 하중에 해당하는 지진수준이며, OBE 즉, stress 1은 극한강도의 1/2 미만의 구간에 해당하는 응력을 유발하는 지진하중이다.

이 연구에서 사용된 입력운동으로 인한 하중의 수준을 판단하기 위하여 시편에 대한 성능곡선과 지진으로 인하여 작용한 하중을 비교하였다. 시편의 성능곡선을 작성하기 위하여 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 비선형 푸쉬오버해석(push over analysis)을 수행하였다. 푸쉬오버해석에서 시편 상부슬래브의 중앙점에 집중하중을 재하하고 점진적으로 하중의 크기를 증가시켰다. 해석을 통하여 얻어진 시편의 하중-변위 성능곡선과 진동시험에서 발생한 지진응답가속도에 상응하는 하중의 크기를 Fig. 13에 함께 표시하였다.

진동시험에서 시편에 발생한 응력의 수준을 판단하기 위하여 지진으로 인하여 발생한 응력에 상응하는 집중하중의 크기는 다음의 식을 적용하여 결정하였다. 시편의 상부슬래브에 작용한 집중하중(P_0)으로 인하여 벽체의 하단에 발생한 휨응력(σ_p)과 지진의 관성력(F_p)으로 인하여 벽체 하단에 발생한 휨응력(σ_b)은 각각 다음 식과 같다.

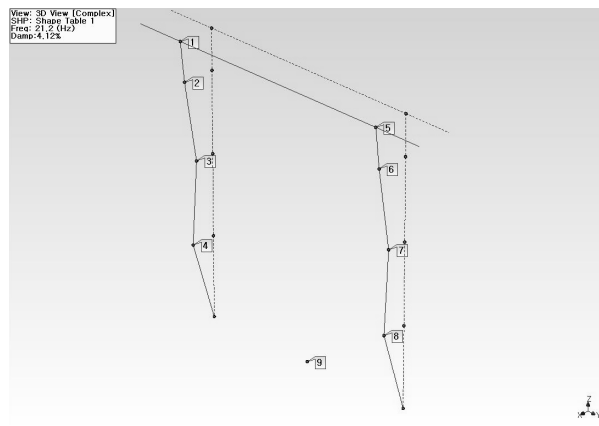


Fig. 12. Mode Shape

Table 4. Summary of Test Results

Modal property	Input level	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Average
	Natural frequency (Hz)		20.6	20.7	21.1	20.3	20.3
Damping ratio (%)		4.14	4.02	4.12	4.06	4.22	4.11

$$\sigma_p = \frac{P_o \cdot h_p}{I} y \quad (11)$$

$$\sigma_E = \frac{F_E \cdot h_E}{I} y \quad (12)$$

여기서, I 는 벽체 단면의 단면2차모멘트이고, y 는 중립축으로부터의 거리이다. 그리고 h_p 는 기초 하단으로부터 하중 작용점까지의 높이이고, h_E 는 기초 하단으로부터 지진 관성력의 작용점까지의 높이이다.

지진으로 인하여 벽체에 작용하는 관성력은 구체 중심에 작용한 응답가속도와 시편 중량(W)의 곱이므로 Eq. (12)는 다음 Eq. (13)과 같다.

$$\sigma_E = \frac{\left(\frac{a}{g}\right) \cdot W \cdot h_E}{I} y \quad (13)$$

여기서, a 는 벽체 중심에서 기록되는 최대응답가속도, g 는 중력가속도이다.

해석으로 얻은 성능곡선 상에서 지진하중의 크기를 판단하기 위하여 Eqs. (11) and (13)을 등치시키면 다음과 같이 등가하중 값이 얻어진다.

$$P_o = \left(\frac{a}{g}\right) \cdot W \cdot \frac{h_E}{h_p} \quad (14)$$

지진의 관성력은 벽체 높이의 중심에 작용한다고 가정할 수 있으므로 기초 하단으로부터 지진의 작용점까지의 높이(h_E)는 전체 시편 높이(h)의 절반 즉, $h_E = h/2$ 이다.

Fig. 13에서 보는 바와 같이, 푸쉬오버해석으로 구한 시편의

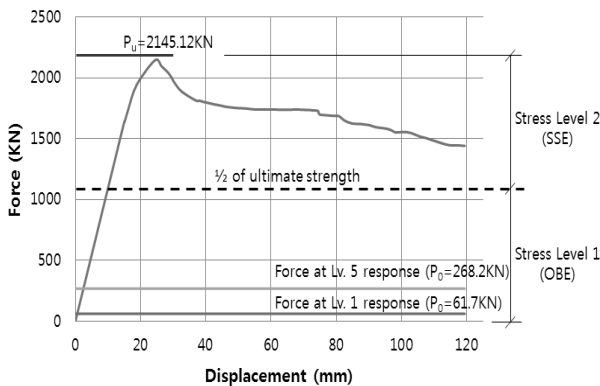


Fig. 13. Damping Ratio Change According to Input Level

성능점 하중은 2145.12kN이다. 그리고 진동대시험에서 시편에 작용한 등가하중의 크기는 Level 5인 경우에도 268.2kN에 불과하다. 그럼에서 알 수 있는 바와 같이, 진동대시험에서 시편에 작용한 등가하중의 크기는 시편의 최대강도의 1/2 수준보다 훨씬 낮고, 최대 성능하중의 약 7%에 해당하는 수준이다. 그러므로 본 연구의 시험에서 시편항복강도의 1/2 이하에서 거동하고 있다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

이 연구에서는 관련 설계기준에 따라 SC구조 벽체의 시편을 제작하고, 진동대시험을 수행하였다. 시험에서 측정한 신호를 분석하여 SC구조의 동적 특성을 분석하였으며, 특히 감쇠비 값을 원전의 규제기준에 명시한 규정과 비교하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) SC구조 벽체 시편의 고유진동수는 20.6Hz, 감쇠비는 4.11%로 계산되었다. 이는 KEPIC 설계기준에서 제시하는 OBE 수준의 감쇠비와 유사한 값이며, 규제기준에서 제시하는 RC구조의 OBE 수준에 대한 감쇠비를 약간 상회하는 수준이다. 이것은 합성구조인 SC구조의 감쇠비 특성은 강재보다는 콘크리트의 영향을 받기 때문으로 판단된다.
- (2) 우리나라의 전력산업기술기준에서는 SC구조에 대하여 SSE 수준에서 미국 NRC의 규제기준이나 ASCE의 설계기준에서 규정하는 RC구조의 감쇠비 7%보다는 더 작은 6%의 감쇠비를 규정하고 있으며 이에 대한 근거로 SC구조의 균열이 RC구조에 비해 적기 때문이라고 설명하고 있다. 하지만 이번 실험에서 강관으로 덮여있지 않은 벽체의 전면부에서 미세한 균열이 발견되기는 하였지만 강관 내부에 발생하는 콘크리트의 균열을 확인할 수 없었다. 따라서 균열 발생 정도에 따라 감쇠비를 판단하기 보다는 정확한 실험과 해석적 연구를 통하여 명확하게 분석되어야 할 필요가 있다.
- (3) 본 연구의 실험은 구조물의 항복강도의 1/2 이하인 응력수준에서 수행되었으므로 이 연구에서 규명된 감쇠비는 원전의 내진설계에서 SC구조의 운전기준지진(OBE)에 대한 수준의 감쇠비로 판단할 수 있다. 현재까지 국내외에서 SC구조에 대한 감쇠비 규명을 위한 실험적 연구는 없었으므로 이 연구결과는 실무에서 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다.
- (4) 향후에 안전정지지진(SSE) 수준의 감쇠비를 규명하기 위하여 보다 큰 규모와 높은 응력수준의 실험연구가 추가로 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가(KETEP)의 원전기술혁신사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2010620100020).

References

- American Society of Civil Engineers (ASCE) (2000). *Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary*, ASCE 4-98, pp. 10-13.
- Cho, S. G., So, G. H. and Park, W. K. (2013). "Investigation of damping ratio of steel plate concrete (SC) shear wall by lateral loading test & impact test." *J. of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol. 17, No. 2, pp. 79-88 (in Korean).
- Cho, S. G., So, G. H., Kim, D. K. and Kwon, M. H. (2012). "Experimental investigation on lateral load capacity and strength characteristics of steel plate concrete (SC) shear wall." *J. of the Earthquake Engineering Society of Korea*, EESK, Vol. 16, No. 5, pp. 23-32 (in Korean).
- Choi, B. J., Han, H. S., Kim, W. K., Lee, S. J. and Kim, W. B. (2008). "Compression tests for stiffened steel plate-concrete structures with variation of B/t ratio." *J. of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 20, No. 4, pp. 549-559 (in Korean).
- Choi, B. J., Han, H. S., Kim, W. K., Lee, S. J. and Kim, W. B. (2008). "Compression tests for unstiffened steel plate-concrete structures with variation of B/t ratio." *J. of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 20, No. 4, pp. 561-570 (in Korean).
- Han, H. S., Choi, B. J. and Han, K. G. (2011). "Compression behavior of steel plate-concrete structures with the width-to-thickness ratio." *J. of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 23, No. 2, pp. 229-236 (in Korean).
- Japan Electric Association Code (2009). *Seismic design of steel plate concrete technical regulations*, JEAC 4618-2009 (in Japanese).
- Kim, H. G., Kim, W. B. and Kim, W. K. (2008). "Behavior and strength of wall-slab connection in SC structure." *J. of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 20, No. 2, pp. 347-354 (in Korean).
- Korea Electric Association (2010). *KEPIC-SNG steel-plate structure* (in Korean).
- Lee, K. J., Ham, K. W. and Park, D. S. (2009). "An experimental study on mechanical properties of SC beam structure under temperature load." *J. of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 21, No. 5, pp. 443-450 (in Korean).
- Lee, K. J., Ham, K. W., Park, D. S. and Kim, W. B. (2010). "An experimental study on flexural properties of SC (Steel Plate Concrete) beam structure with reinforced concrete joint." *J. of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 22, No. 5, pp. 455-467 (in Korean).
- Lee, K. J., Hwang, K. M., Ham, K. W. and Kim, W. B. (2012). "An experimental study on flexural/shear load properties of SC (Steel Plate Concrete) structure with reinforced concrete joint." *J. of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 24, No. 2, pp. 137-147 (in Korean).
- Lee, M. J., Lee, H. W. and Jin, S. C. (2008). "Evaluation of steel plate reinforced concrete panels under in-plane shear." *J. of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 20, No. 4, pp. 571-581 (in Korean).
- Lee, S. J., Choi, B. J. and Kang, S. K. (2009). "An analytical study on the structural behavior of SC walls with opening." *J. of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 21, No. 3, pp. 233-243 (in Korean).
- Maia, N. M. M. and Silva, J. M. M. (1997). *Theoretical and experimental modal analysis*, Research Studies Press LTD., England.
- Richardson, M. (2000) *Modal mass, stiffness and damping*, Vibrant Technology, Inc., Jamestown, CA, January.
- U. S. Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC) (2007). *Regulatory guide 1.61. damping values for seismic design of nuclear power plants*, U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- U. S. Nuclear Regulatory Commission (U.S.NRC) (2007). *U.S.nuclear regulatory commission standard review plan 3.7.1*, NUREG-0800.