

# 강제진동을 받는 강판 콘크리트 (SC) 벽체에서 스테드의 성능평가를 위한 해석적 연구

이성태<sup>1\*</sup>

## Analytical Study for Performance Evaluation of Studs for Steel Plate Concrete (SC) Walls subjected to Forced Vibration

Seong-Tae Yi<sup>1\*</sup>

**Abstract:** This study analytically reviewed the behavior of steel plate concrete (SC) walls subjected to forced vibration to investigate the effects of shape and arrangement spacing of studs on the behavior spacing of studs in SC wall were carried out. From the analyses, it was noted that the damping ratio obtained from the time history analyses showed overall high value in Half-power Bandwidth method and the lowest value in Fitted Exponential Curve method. And, in half of the design strength, the damping ratio presented approximately 3.0~4.2% and, in the design strength, it was approximately 4.1~5.2%. When the developed studs were used, the damping ratio was reduced slightly and it did not show consistent results between DS1 and DS2. When the distance between the studs increases more than necessary, it was also confirmed that the natural frequency was reduced and the damping ratio was increased.

**Keywords:** Steel plate concrete (SC) wall, Stud performance evaluation, Forced vibration, Nonlinear finite element analysis, KEPIC-SNG

### 1. 서 론

강판 콘크리트 구조(이하 SC 구조)는 얇은 강판 사이가 두꺼운 콘크리트로 채워진 합성구조체로, 기존 철근콘크리트 구조(이하 RC 구조)에서 사용하던 철근 대신에 강판을 사용함으로써 부재에 필요한 면내 및 면외강도를 확보하고 거푸집의 역할까지 기대하는 구조이다. 특히, 이 구조는 지진하중과 같은 반복하중에 대하여 전단 벽체로서의 초기강성이 크고 표면강판은 항복과 파단에 이르기까지의 연성능력이 RC 구조의 약 1.5배에 이른다(Akiyama et al., 1989). 그러나 현재까지도 RC 및 강구조에 비하여 SC 구조에 대한 연구(Lee and Kim, 2010; Cho et al., 2014; Lim et al., 2015)는 상대적으로 적으며, 국내·외에서 수행된 SC 벽체에 대한 연구의 대부분도 정적거동에 관한 것이고, 동적거동에 대한 연구는 많이 부족한 실정이다.

RC, 강구조 및 SC 구조에서 강재가 항복점에 도달하면 설계하중을 저감하기에 충분한 비선형성이 존재한다. 하지만 기존의 선형해석에 기반한 내진설계는 그 특성을 반영하지

못하므로 이들 구조에는 비합리적인 보수성이 포함되어 있다고 할 수 있다. 이 때문에 선형해석에 따른 설계 시, 에너지 흡수를 감쇠비의 향으로 고려하는 것이 합리적이며 이에 대한 다양한 연구가 반드시 필요하다.

Akiyama et al.(1989)은 1/10 축소모형의 SC 구조(RC 구조 포함)를 대상으로 다양한 실험을 수행하였다. 수평방향으로 반복하중을 가한 정적실험에서 얻어진 이력곡선으로부터 등가점성감쇠비를 산정하였는데 표면강판이 항복하는 시점까지는 약 5%의 값을 나타내지만 표면강판이 항복한 후에는 이비가 급격히 증가하는 경향이 있음을 확인하였다. Lee and Kim(2010)은 항복응력보다 낮은 수준에서의 인장을 가한 후 하중을 제거하는 진동실험을 수행하였다. 그리고 이를 기반으로 운전기준지진(OBE)의 수준에서 4% 그리고 안정정지지진(SSE)의 수준에서 6%로 감쇠비를 제안하였다. Cho et al.(2015)은 진동대를 이용한 강제진동 실험을 통해 SC 구조체의 감쇠비가 4.02~4.22%임을 확인하였다. Chung et al.(2013)은 외연적 비선형 유한요소 해석방법(explicit nonlinear finite element analysis method)을 사용하여 기존의 진동시험을 모사했으며 그 결과, 해석적으로 동적특성을 충분히 모사 가능성을 확인하였다. Lim et al.(2015)은 외연적 비선형 유한요소 해석 방법을 사용하여 준정적의 반복하중을 받는 SC 구조에 대한 수치해석을 수행하였고, 이력곡선을 통해 등가점성감쇠비를 설계강도보다 낮은 수준에서부터 높은 수준까지 산정하였다.

<sup>1</sup>정회원, 인하공업전문대학 토목환경과 교수, 교신저자

\*Corresponding author: yist@inhac.ac.kr

Inha Technical College

•본 논문에 대한 토의를 2016년 6월 1일까지 학회로 보내주시면 2016년 7월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

본 연구에서는 비보강된 SC 벽체에 강제진동의 하중이 가해질 때, 스티드의 형상 및 배치가 구조물 거동에 미치는 영향을 해석적으로 검토하기 위한 기초자료를 제시하고자 하였다. 이를 위해 기존의 연구(Lim et al., 2015)를 참조하여 외연적 유한요소해석 모형을 구축하였고, 진동실험(Lee and Kim, 2010)의 결과와 비교/검토하여 해석모형의 타당성을 검증하였다. 그리고 이를 기반으로 다양한 스티드의 연결 상태에 대한 고유진동수와 감쇠비의 특성을 검토하였다.

## 2. SC 전단벽의 비선형 유한요소해석

강제진동 하중을 받는 SC 전단벽의 거동을 해석적으로 평가하기 위한 유한요소해석 모형을 구축하기 위해 Lim et al.(2015)에 의한 유한요소 해석모형을 참조하였다. 그리고 해석모형의 검증을 위한 실험결과는 Lee and Kim(2010)의 연구 결과를 이용하였다. 본 연구에서는 강제진동 하중에 대한 시간이력해석, 재료의 비선형성, 접촉 등을 고려하기 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS/Explicit를 사용하였다.

### 2.1 해석모형의 형상 및 요소

본 연구에서는 기존의 실험적 연구에서 얻어진 연구결과와의 비교를 위해서 복잡한 형상의 실대형 구조물이 아닌, 실내 실험에서 고려한 크기와 단순한 형상의 벽체를 해석모형으로 선택하였다. 즉, Lee and Kim(2010)의 실험체 중, Fig. 1에 나타난 바와 같은 SC-S 실험체(전단이 지배하는 SC 구조 실험체)를 참조하였다.

선택된 SC-S 실험체는 H 모양의 평면 구조를 가지는 SC 벽체로 벽두께는 240 mm이다. 벽체의 높이는 1,650 mm이며 상부와 하부에는 두께 100 mm의 강판이 용접되어 있다. 또한 강판의 두께는 3 mm이고, 지름 6 mm와 길이 36 mm의 스티드가 100 mm 간격으로 설치되어 있다. 그리고 상부에는 500 kN의 중량이 가해지도록 80 mm 두께의 강판 13장을 추가적으로 배치하였다.

외연적 비선형 유한요소해석을 수행한 기존 연구(Lim et al., 2015)를 참고하여 강판과 콘크리트로는 C3D8R 요소를 사용하였고 기존 연구와 유사한 수준으로 요소를 분할하였다. 스티드는 전체 모형에 비하여 그 크기가 상대적으로 작으므로 단순한 보요소(B31)로 모델링하였다. Fig. 2는 본 연구에서 모델링한 SC 구조의 유한요소해석 모형을 나타낸 것이다.

### 2.2 부재의 연결과 접촉면의 정의

스티드와 강판은 ABAQUS의 interaction 모듈인 “structural

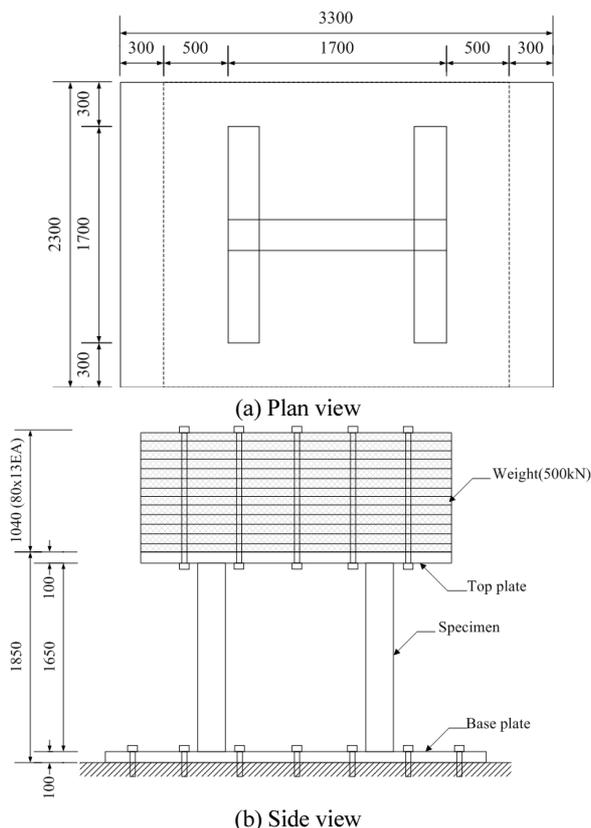


Fig. 1 Vibration test specimen(Lee and Kim, 2010) (unit: mm)

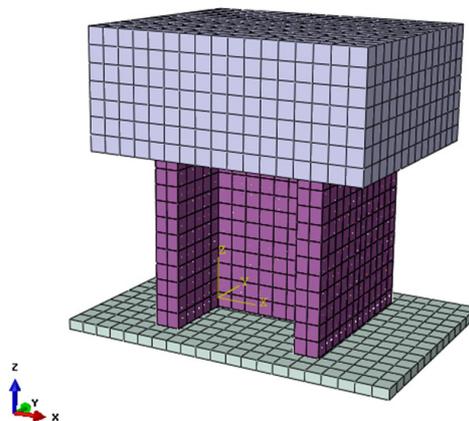


Fig. 2 Overall shape of FE model

coupling”방법으로 연결하였다. 그리고 콘크리트 내부에 매설된 스티드를 모사하기 위해 삽입요소방법(embedded element method)을 사용하였다. 강판과 콘크리트 사이의 접촉거동에 대한 해석을 위해 접촉방법(contact method)을 사용하였으며, 콘크리트와 강판의 부착력은 미비하다고 가정하여 무시하고 마찰계수만 고려하였다. 여기서, 마찰계수( $\mu$ )로는 0.5를 사용하였다(Baltay and Gjelsvik, 1990).

## 2.3 재료의 물성치

### 2.3.1 콘크리트

SC 전단벽의 콘크리트에 대한 정의는 압축 및 인장에 대한 비선형 거동을 위해 Concrete-damaged-plasticity 모델을 적용했다. 콘크리트의 일축압축강도와 포아송비는 각각 35 MPa와 0.18로 가정했고, 콘크리트구조기준(KCI, 2012)을 참고하여 탄성계수를 식 (1)에 따라 29,779 MPa로 결정하였다.

$$E_c = 0.077m_c^{1.5} \sqrt[3]{f_{cu}}, \text{ MPa} \quad (1)$$

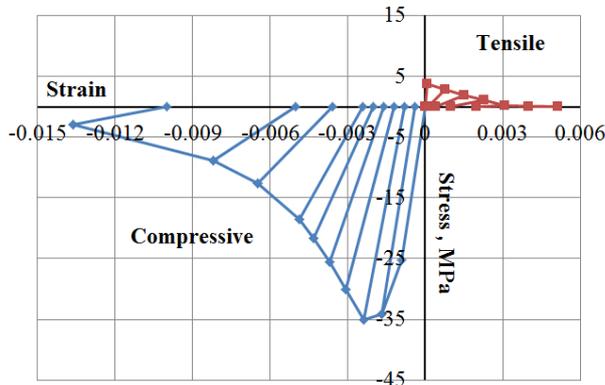
여기서,  $f_{cu}$ 는 콘크리트의 평균압축강도(MPa),  $m_c$ 는 콘크리트의 단위질량(kg/m<sup>3</sup>)이다. Concrete-damaged-plasticity 모델의 소성관련 매개변수로는 Prakash et al.(2011)의 연구를 참고하여 Table 1에 나타난 값을 사용하였다.

콘크리트의 압축응력-변형률 관계는 Carreira and Chu(1985)가 제안한 모델에 근거하여 산정하였고, 콘크리트의 인장응력-변형률 관계는 Evans and Marathe(1967)의 실험결과를 참고하였다. 응력-변형률과-손상에 대한 관계는 Jankowiak and

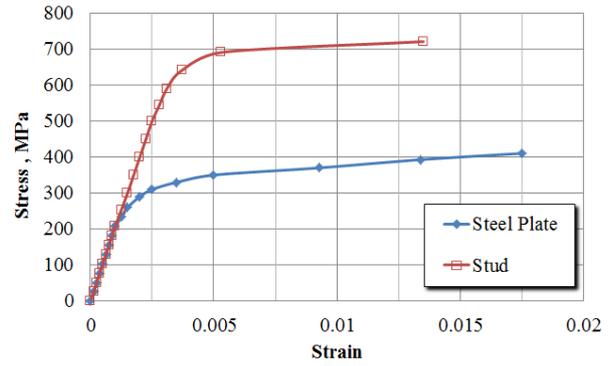
**Table 1** Parameters of the concrete plastic model

Parameters	Input value
Dilation angle	35.0
Eccentricity	0.1
K*	0.667
Viscosity Parameter	0.0
Ratio of the ultimate biaxial compressive stress to the ultimate uniaxial compressive stress	1.12
Ratio of the uniaxial tensile to the uniaxial compressive strength	0.1

\*Ratio of second stress invariant on the tensile meridian to that on compression meridian at the initial yield for any given value of the pressure invariant



**Fig. 3** Stress-strain-damage relationship of the concrete



**Fig. 4** Uniaxial stress-strain relationship of steels(Prakash et al., 2011)

Lodygowski(2005)의 반복재하에 대한 연구를 참고하여 결정하였다. 해석에 사용된 콘크리트의 응력-변형률-손상 관계는 Fig. 3에 보인 바와 같다.

### 2.3.2 강판과 스티드

강판과 스티드의 재료특성으로 탄성계수와 포아송비는 각각 207,000 MPa와 0.3을 사용하였고 탄소성 거동은 von Mises의 파괴기준을 따른다고 가정하였으며 강판과 스티드의 응력-변형률 관계는 Prakash et al.(2011)의 연구를 참고하여 Fig. 4를 사용하였다. 강판의 항복강도와 인장강도는 각각 240 MPa와 400 MPa이고 스티드의 경우, 이들 값은 각각 550 MPa와 710 MPa였다.

## 2.4 경계조건과 해석방법

Lee and Kim(2010)이 사용한 실험체는 하부 100 mm 강판이 완전히 구속된 상태에서 상부에 얹어진 500 kN 강판의 무게 중심에 노치가 있는 연결부재를 인장하여 연결부재가 원하는 하중의 크기에서 끊어지며 SC 구조가 진동하도록 설계되었다. 본 해석에서는 이와 유사하게 실험체를 모사한 해석 모형의 하부를 완전히 구속하였다.

해석에서는 정적해석과 동적해석을 수행하였다. 정적해석은 상부 강판 더미의 무게중심에 일정한 속도로 변위를 주어 이때 하부 고정단에서 발생하는 반력을 구한 후 반력-변위 관계를 살펴보기 위해 수행하였다. 그리고 동적해석에서는 실내실험(Lee and Kim, 2010)을 그대로 모사하기 위해 2 단계로 해석을 진행하였다. 우선 첫 번째 단계에서는 연결부재가 끊어지는 순간까지 구조체 상부의 무게 중심부에 일정한 속도로 변위를 주며 잡아당긴다. 그리고 두 번째 단계로는 이 변위 경계조건을 제거하여 복원되는 힘으로 진동하도록 하였다 (Fig. 5 참조).

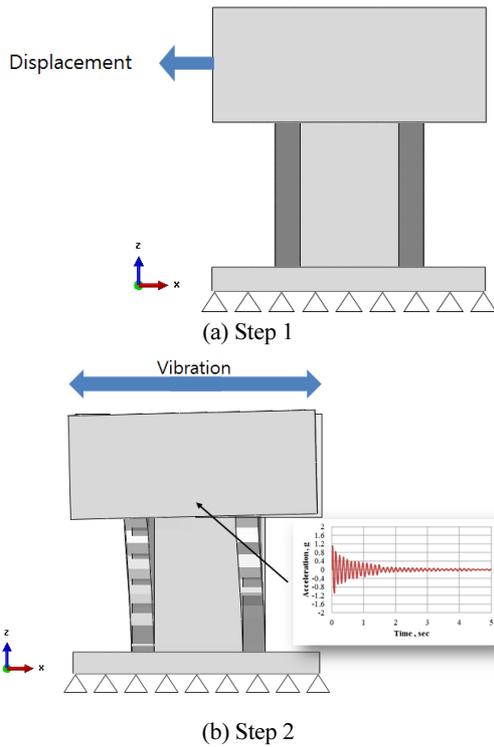


Fig. 5 Boundary conditions for numerical analyses

### 3. 해석결과 및 분석

#### 3.1 정적해석 결과

면내 전단하중을 가하기 위해 강관 전단항복변형률의 약 1.2배 수준까지 변위를 재하하였고, 벽체 상부의 평균변위와 벽체 하부의 반력을 검토하였다. Fig. 6은 수평변위에 대한 반력을 도시한 것이고, Fig. 7은 수평변위에 대한 콘크리트 요소의 강성저하를 나타낸 것인데 강성 들을 콘크리트에 균열이 없을 때를 1로 정규화하였다. 여기서, 콘크리트의 강성저하는 각 요소에서 발생한 강성저하 값들의 평균값이다.

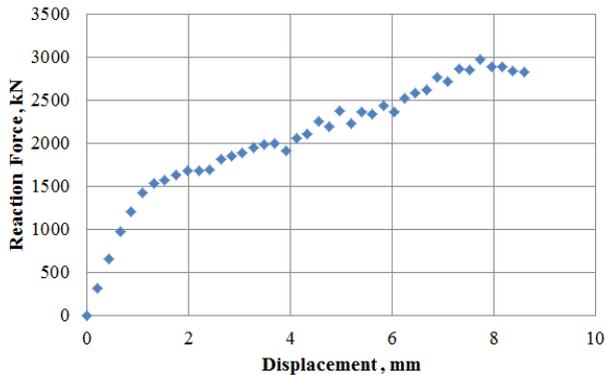


Fig. 6 Reaction force-displacement relationship curve

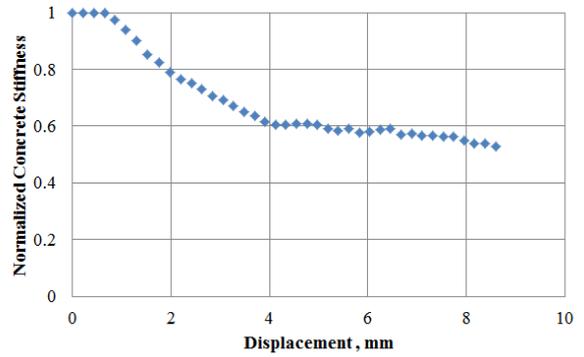


Fig. 7 Concrete stiffness-displacement relationship curve

Table 2 Results of static analyses

$V/V_d$	Force, kN	Displacement, mm	Concrete stiffness
0.25	630	0.43	1.00
0.5	1260	0.87	0.97
0.75	1890	3.06	0.69
1	2520	6.24	0.58
1.2	2974	7.73	0.55

Fig. 6에서 약 1 mm의 변위에서 강성이 크게 변화하는데 이는 이 점을 전/후로 콘크리트에 균열이 발생하기 때문이다. 하지만 1 mm 이후, 이 곡선의 기울기는 크게 변하지 않는데 이는 균열의 발생 후, 전단저항력의 대부분을 SC 구조의 강관이 부담하기 때문으로 판단된다. Fig. 7로부터는 균열의 발생 이후, 콘크리트의 강성은 변위 4.0 mm까지 급격히 변화하다가 그 후 강관이 항복하는 시점(약 7.7 mm)까지 점진적으로 저하됨을 알 수 있었다.

본 해석결과를 통해 얻어진 전단강도는 2,974 kN로, Lee and Kim(2010)이 KEPIC-SNG(2010)에 따라 산정한 설계강도( $V_d=2,520$  kN)의 약 1.2배로 나타났다. 동적해석에 앞서 정적해석을 수행하고 설계강도를 구한 이유는 설계강도를 기준으로 하여 각 하중수준( $V/V_d$ )에서의 동적해석을 수행하기 위함이다. 즉, Table 2와 같이 설계강도를 기준으로  $V/V_d$ 가 0.25, 0.5, 0.75 그리고 1인 경우와 해석을 통해 얻은  $V/V_d=1.2$ 에서의 반력과 변위 관계를 확인했으며 이 후 각 경우에서 동적해석을 수행하였다. 여기서,  $V$ 는 실험체에 가해진 전단력이다.

#### 3.2 동적해석 결과

##### 3.2.1 고유진동수

Fig. 8은  $V/V_d$ 가 0.5인 진동하중에 대한 SC 구조 실험체의 시간이력 가속도를 해석한 결과이고, Fig. 9는 FFT(Fast Fourier Transform)에 의한 진동수와 진폭간의 반응곡선을 나

타낸 것이다. 이로부터 실험체를 모사한 해석결과는 Lee and Kim(2010)의 실험에서의 동일하게 단자유도 거동을 하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 10은 Lee and Kim(2010)의 실험결과가 본 연구의 해석을 통해 얻은 각 하중 수준에서의 고유진동수와  $V/V_d$ 의 관계를 나타낸 것으로 실험결과와 해석결과가 13~15 Hz 범위에서 대체로 일치함을 확인할 수 있다.

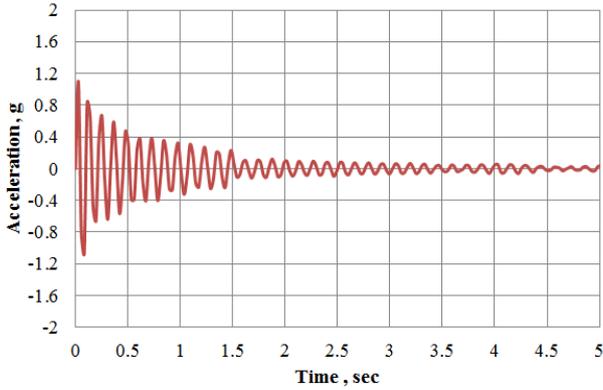


Fig. 8 Time history acceleration curve( $V/V_d=0.5$ )

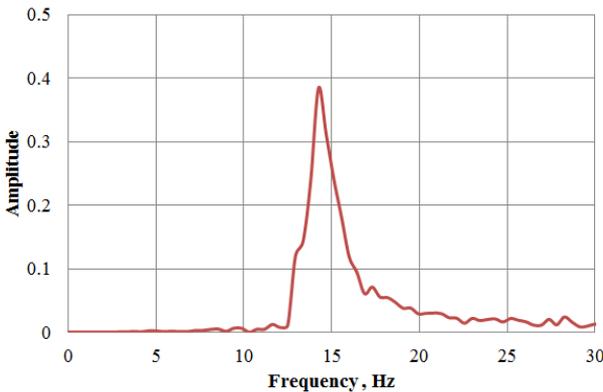


Fig. 9 FFT curve( $V/V_d=0.5$ )

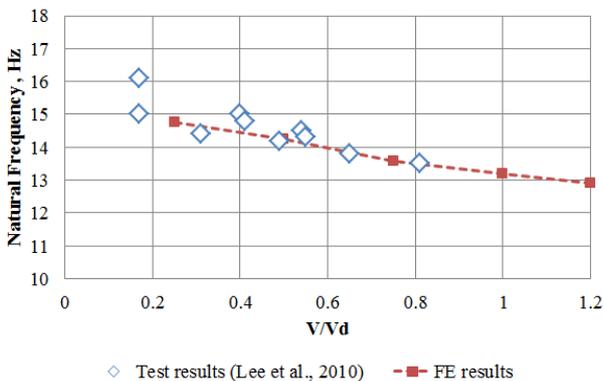


Fig. 10 Comparison of natural frequency with  $V/V_d$

### 3.2.2 감쇠비

진동신호로부터 구조물의 감쇠비를 계산하는 방법에는 대수감소(Logarithmic Decrement)법, 파워반감대역폭(Half-power Bandwidth)법, 적합지수함수(Fitted Exponential Curve)법 및 등가점성감쇠에 의한 방법 등이 있다(NRC, 2007).

대수감소법은 자유진동에서 연속되는 두 개의 가속도 최고점 값의 비를 이용하여 감쇠비를 구하는 방법이다. 연속적인 최고점들 사이의 비  $a_i/a_{i+1}$ 는 식 (2)과 같으며, 여기서  $\xi$ 는 감쇠비를 나타낸다.

$$\frac{a_i}{a_{i+1}} = \exp\left(\frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right) \quad (2)$$

여기서,  $a_i$  :  $i$ 번째 최고점에서의 가속도 값

식 (2)에 대한 자연대수를 대수감소( $\delta$ )라 정의하면 식 (2)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = \ln \frac{a_i}{a_{i+1}} = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (3)$$

따라서, 대수감소에 의한 감쇠비는 연속되는 가속도의 최대값들로부터 얻을 수 있다(Cho et al., 2015).

파워반감대역폭을 이용하는 방법에서 가속도 신호로부터 주파수영역에서의 PSD(Power Spectral Density) 함수를 구하면 해당 실험체의 고유진동수를 직접 구할 수 있고 감쇠비는 파워반감대역폭법을 적용하여 결정할 수 있다. 구한 PSD 함수에서 고유진동수에서의 진폭의 1/2 크기에 해당하는 진동수들을  $f_1$ 과  $f_2$ 라 하면 감쇠비 값은 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다(Cho et al., 2015).

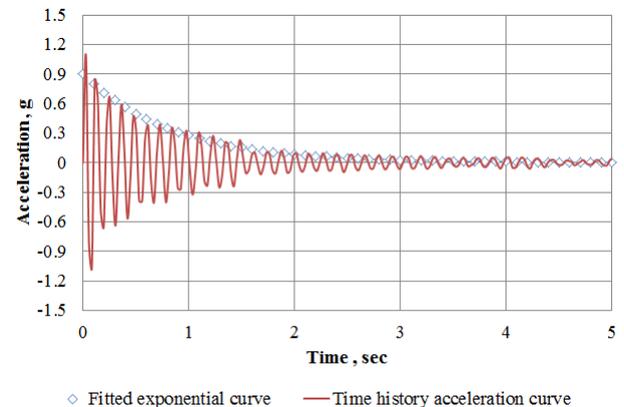


Fig. 11 Exponential curve fitted for acceleration( $V/V_d=0.5$ )

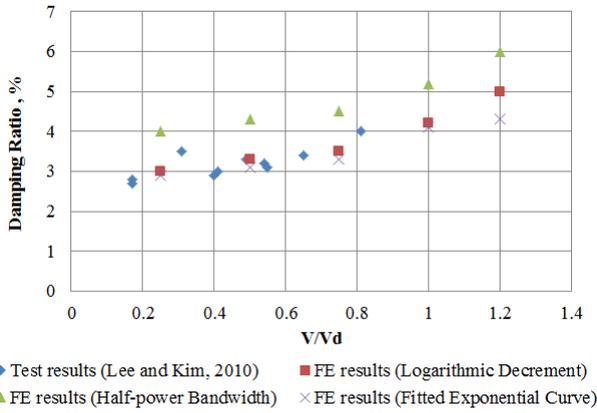


Fig. 12 Damping ratio with  $V/V_d$

$$\xi = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \quad (4)$$

적합지수함수법은 식 (5)와 같은 형태의 지수식을 진동결과와 각 주기에서의 최대값 혹은 최소값과 비교하여 최소자승법으로 Fig. 11과 같이 최적의 함수를 찾는 방법이다(Lee and Kim, 2010).

$$a(t) = Ce^{-\psi \omega t} \quad (5)$$

여기서,  $C$ 와  $\psi$ 는 최소자승법으로 오차를 최소화시키는 최적의 모형계수이다.

Fig. 12는 앞에서 설명한 감쇠비 산정방법들을 적용하여 구한 감쇠비 값들을 비교한 결과이다. 기존의 평가결과에 따르면 위의 세 가지 방법 중에서 파워반감대역폭법이 일반적으로 가장 큰 감쇠비의 산정결과를 나타내는 것으로 알려져 있으며(NRC, 2007), 본 연구에서도 동일한 경향이 나타났다. 세 가지 방법으로 평가한 감쇠비의 증가경향이 각 실험체에서 전반적으로 유사하게 나타났으며, Lee and Kim(2010)의 실험결과와도 대체로 일치하는 경향을 나타내었고 이를 통해 외연적 유한요소해석 방법을 사용한 SC 벽체의 동적해석 결과가 신뢰할 수 있는 수준임을 확인할 수 있었다. 설계강도의 절반정도에서 감쇠비는 3.0~4.2%로 나타났고, 설계강도에서는 4.1~5.2%로 나타났다. 이는 KEPIC-SNG(2010)의 감쇠비 기준(OBE 4%, SSE 6%)과 유사한 수준이다.

#### 4. 스테드의 형상과 배치에 대한 해석적 검토

이 장에서는 앞서 수행된 SC 구조체와 동일한 구조(Lee and Kim, 2010)에 대하여 스테드의 배치와 형상이 구조물의

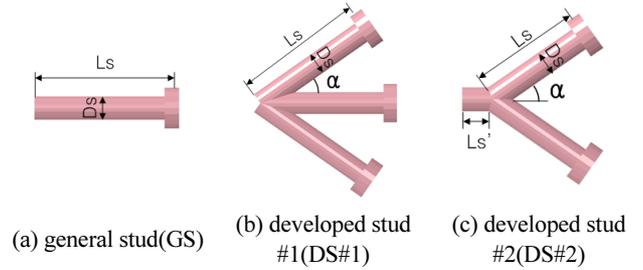


Fig. 13 Type of developed studs(Cho et al., 2014)

동적거동에 미치는 영향을 살펴보았다.

#### 4.1 스테드의 형상 및 배치

스테드의 배치간격으로는 세 가지(100 mm, 167 mm 및 250 mm) 경우가 고려되었다. 스테드의 크기는 콘크리트의 두께를 고려하여 결정했으며, 직경 6 mm(스테드 머리의 직경 10 mm), 길이 36 mm(스테드 몸체 31 mm+머리 5 mm)였다. 스테드의 형상은 Cho et al.(2014)에 의해 기 연구된 경사형 스테드인 DS#1과 DS#2 그리고 일반형 스테드인 GS로 구분하였다(Fig. 13 참조). 스테드는 강판에 용접되어 완전부착된 상태로 가정하였다.

Table 3은 각 해석모형에서 사용된 스테드의 형상과 배치간격을 나타낸 것이다.

#### 4.2 해석결과 및 분석

이 절에서는 Table 3의 경우에 대하여 앞서 Table 2에 나타난 바와 같은 5 종류의 하중수준에 대하여 해석을 수행하였다. 그리고 FFT를 통해 고유진동수를 산정했으며 이 값을 기반으로 각 스테드의 상태에 대한 감쇠비를 구하였다. Fig. 14와 Fig. 15는 각각 다양한 스테드의 형태 및 간격에 대하여 얻은

Table 3 Types and arrangement of the stud

Model No.	Arrangement of stud	
	Type	Spacing( x×y )
GS-100×100	General stud	100 mm×100 mm
GS-167×167	General stud	167 mm×167 mm
GS-250×250	General stud	250 mm×250 mm
DS#1-100×100	Developed stud #1	100 mm×100 mm
DS#1-167×167	Developed stud #1	167 mm×167 mm
DS#1-250×250	Developed stud #1	250 mm×250 mm
DS#2-100×100	Developed stud #2	100 mm×100 mm
DS#2-167×167	Developed stud #2	167 mm×167 mm
DS#2-250×250	Developed stud #2	250 mm×250 mm

\* 500 mm×500 mm(area considered in the evaluation)

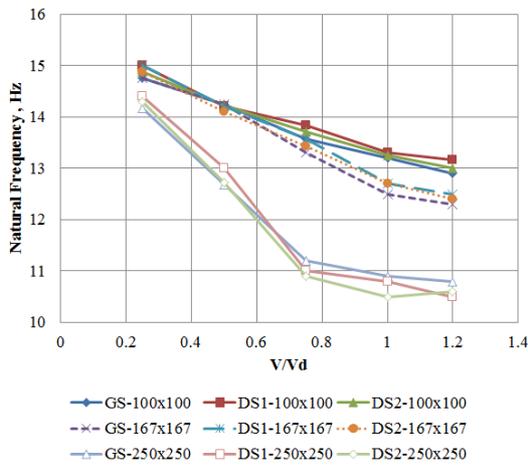


Fig. 14 Natural frequency with  $V/V_d$

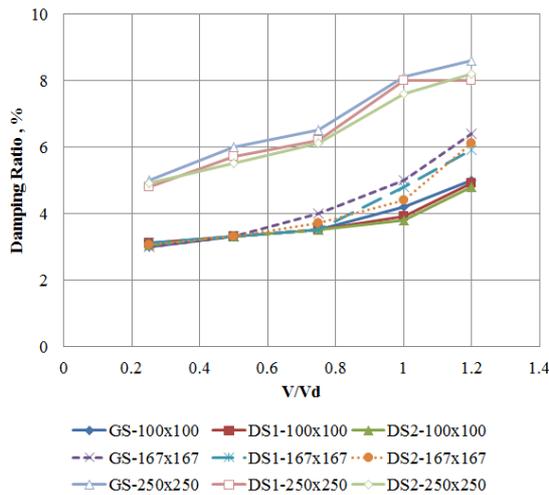


Fig. 15 Damping ratio with  $V/V_d$

고유진동수와 감쇠비의  $V/V_d$ 에 대한 관계를 나타낸다.

스터드의 종류는 일반 스테드(GS)를 사용한 경우보다 개선된 경사형 스테드(DS#1 및 DS#2)를 사용한 경우에 고유진동수가 다소 증가하였고, 감쇠비는 미소하게 감소하는 것으로 나타났으며, DS#1과 DS#2 사이에는 뚜렷한 경향을 보이지 않았다.

스터드의 간격 100 mm×100 mm와 167 mm×167 mm의 경우,  $V/V_d$ 가 0.5수준까지는 유사하였고 그보다 큰 하중상태에서는 167 mm×167 mm인 경우의 고유진동수는 다소 작게 나타났고, 감쇠비는 조금 증가하였다. 스테드의 간격이 250 mm×250 mm의 경우, 전 범위의  $V/V_d$ 에서 다른 스테드 간격에 비해 고유진동수가 낮은 수준으로 나타났으나 감쇠비는 확연히 증가하였다. 이것은 결국 스테드의 간격이 넓어질 경우 강판과 콘크리트의 결합이 불완전해져서 단계 1에서 가한

하중에 대하여 부재가 설계강도 이전에 항복하였기 때문에 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 개선된 스테드의 형상과 간격이 강제진동을 받는 SC 구조의 성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 유한요소방법으로 이를 해석하였고, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 외연적 비선형 유한요소방법을 사용하여 기존 SC 구조체의 실내실험을 모사하여 해석을 수행하였고 실험과 해석을 통해 얻은 고유진동수 및 감쇠비가 대체로 비슷하게 나타났다.
- 2) 진동에 대한 시간이력해석을 통해 얻은 결과에 대수감소법, 파워반감대역폭법 및 적합지수함수법을 적용하여 감쇠비를 산정한 결과, 파워반감대역폭법이 기존 연구와 동일하게 전반적으로 감쇠비가 높게 산정하였고 적합지수함수법이 가장 낮은 수준으로 산정하였다.
- 3) 강제진동에 대한 감쇠비는 설계강도의 절반정도와 설계강도에서 각각 3.0~4.2%와 4.1~5.2%로 나타났다.
- 4) 강제진동에 대한 해석을 통해서 일반 스테드(GS)를 적용할 경우보다 경사부재가 있는 개선된 스테드(DS#1, DS#2)를 사용할 경우, 감쇠비가 미소하게 감소함을 확인하였고 DS#1과 DS#2 간에는 일관된 결과가 나타나지 않았다.
- 5) 스테드의 간격이 필요이상 증가할 경우, 강판과 콘크리트가 불완전하게 합성되어 설계강도보다 낮은 수준에서 항복하며, 이로 인해 고유진동수가 감소하고 감쇠비가 증가함을 해석적으로 확인하였다.

## 감사의 글

이 논문은 2015년도 인하공업전문대학 교내연구비지원에 의하여 연구되었음.

## References

1. Akiyama, H., Sekimoto, H., Tanaka, M., Inoue, K., Fukihara, M., and Okuda, (1989), Y., 1/10th Scale Model Test of Inner Concrete Structure Composed of Concrete Filled Steel Bearing Wall", 10th SMiRT, 73-78.
2. Baltay, P. and Gjelsvik, A. (1990), Coefficient of Friction for Steel

- on Concrete at High Normal Stress” *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2(1), 46-49.
3. Carreira, D. J. and Chu, K. H. (1985), Stress-strain Relationship for Plain Concrete in Compression, *ACI Journal, American Concrete Institute*, 82(6), 797-804.
  4. Cho, S. G., Lim, J. S., Jeong, Y. D., and Yi, S. T. (2014), Analytical Study for Performance Improvement of Studs for Steel Plate Concrete(SC) Walls subjected to Bending Moment, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 18(2), 74-81. (in Korean, with English abstract).
  5. Cho, S. G., So, G. H., Kim, D. K., and Han, S. M. (2015), Structural Damping Ratio of Steel Plate Concrete(SC) Shear Wall at the Low Stress Level Identified by Vibration Test, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 35(2), 255-264 (in Korean, with English abstract).
  6. Chung, C. H., Kim, N. S., Lee, J. W., Moon, I. W., and Kim, T. I. (2013), Numerical Simulation of SC Shear Wall Vibration Test Using Explicit Dynamic Analysis Method, *Proceeding of The KSNVE 2013 Annual Conference*, 89-90 (in Korean, with English abstract).
  7. Evans, R. H. and Marathe, M. S. (1967), Microcracking and Stress-strain Curves for Concrete in Tension, *Materials and Structures*, 1(1), 61-64.
  8. Jankowiak, T. and Lodygowski, T. (2005), Identification of Parameters of Concrete Damage Plasticity Constitutive Model, *Foundation of Civil and Environmental Engineering*, No. 6, Poznan University of Technology, Poland, 53-69.
  9. Korea Concrete Institute(KCI) (2012), The Korean Concrete Structure Design Code, Korea Concrete Institute (in Korean).
  10. Korea Electric Association(KEA), (2010), Nuclear Safety Related Structures : Steel-Plate Concrete Structure, KEPIC-SNG, Korea Electric Association.
  11. Lee, S. J. and Kim, W. K. (2010), Damping Ratios for Seismic Design of SC Structures, *Korean Society of Steel Construction*, 22(5), 487-496 (in Korean, with English abstract).
  12. Lim, J. S., Jeong, Y. D., and Yi, S. T. (2015), Analytical Study for Performance Evaluation of Studs for Steel Plate Concrete(SC) Walls subjected to Cyclic Loads, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 19(4), 35-42 (in Korean, with English abstract).
  13. Prakash, A., Anandavalli, N., Madheswaran, C. K., Rajasankar, J., and Lakshmanan, N. (2011), Three Dimensional FE Model of Stud Connected Steel-Concrete Composite Girders Subjected to Monotonic Loading, *International Journal of Mechanics and Applications*, 1(1), 1-11.
  14. US NRC, Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants, Regulatory Guide 1.61, 2007.

Received : 01/15/2016

Revised : 02/12/2016

Accepted : 02/15/2016

---

**요 지** : 이 연구에서는 SC 전단벽의 전단 연결재인 스티드의 배치와 형상이 SC 전단벽의 거동에 미치는 영향을 살펴보기 위해 전단벽체가 강제진동을 받을 때의 거동을 해석적으로 검토하였다. 이를 위해 서로 다른 배치간격과 형상의 스티드가 배열된 SC 전단벽을 대상으로 유한요소해석을 수행하였다. 그 결과, 시간이력해석으로부터 구한 감쇠비가 파워반감대역폭법이 전반적으로 높게 그리고 적합지수합수법이 가장 낮은 수준으로 산정했으며 설계강도 절반정도에서의 감쇠비는 3.0~4.2%로, 설계강도에서는 4.1~5.2%로 나타남을 알 수 있었다. 또한, 개선된 스티드를 사용할 때, 감쇠비가 약간 감소하였고 DS1과 DS2 간에는 일관된 결과가 나타나지 않았다. 스티드의 간격이 필요이상 증가할 경우, 고유진동수가 감소하고 감쇠비가 증가함을 확인하였다.

**핵심용어** : 강판 콘크리트 벽체, 스티드 성능평가, 강제진동, 비선형 유한요소해석, KEPIC-SNG

---