

휨모멘트를 받는 강판 콘크리트(SC) 벽체에서 스티드의 성능개선을 위한 해석적 연구

Analytical Study for Performance Improvement of Studs for Steel Plate Concrete(SC) Walls subjected to Bending Moment

조 성 국¹⁾ 임 진 선²⁾ 정 영 도³⁾ 이 성 태^{4)*}
Sung-Gook Cho Jin-Sun Lim Young-Do Jeong Seong-Tae Yi

Abstract

In this study, it was conducted to improve the performance of stud of Steel Plate Concrete(SC) walls subjected to bending moment. Non-linearity of contact interface, connection, and material properties were considered in finite element modeling of SC wall. In order to validate the analytical model, furthermore, a foregoing laboratory experiment was simulated by FEM, so that comparison between the measured result and the analysis result have be done. The size of the analytical model was determined by reflecting various references and the analyses were performed according to various shapes and arrangements of stud. Additionally, the validity of the model considering the related provisions in the KEPIC SNG standard was also considered. As a result, the optimal shape and spacing of studs was proposed through this numerical analysis and standard verification.

Keywords : SC wall, Stud, Nonlinear finite element analysis, KEPIC SNG

1. 서 론

강판 콘크리트(이하 SC) 구조는 기존의 철근콘크리트(이하 RC) 구조에서 구조재로 사용되는 철근과 시공재로 사용되며 거푸집의 역할을 강판이 대신함으로써 그에 따르는 작업을 줄일 수 있으며, 모듈화가 가능하여 경제적이고 품질향상을 극대화할 수 있다(Choi, 2007). 또한 SC 구조는 전단벽(shear wall)에 적용 시 RC보다 구조적 성능향상에 효과가 더 있어 원자력발전소(이하 원전) 구조물의 내진안전성 향상에 기여할 것으로 알려져 있다(Cho et al., 2012).

일본의 경우 1980년부터 SC 구조에 대한 연구가 수행되어, 이 분야에 대한 매우 다양한 결과물이 존재하며, 원전구조물의 내진설계에 대한 JEAG 4618(JEA, 1991) 지침을 가지고 있다. 미국의 Westinghouse 사는 원자로건물 2차 차폐벽과 보조건물의 일부 벽체에 SC 모듈을 적용한 AP600/AP1000(Advanced Pressurized Reactor)에 대한 설계인증을 받았고,

General Electric 사는 ABWR과 SBWR(Simplified Boiling Water Reactor)에 대형모듈의 현장조립과 기기와 구조에 대한 모듈화기술을 적용하였다(Kim, 2008). 국내의 경우 2000년대 중반 이후부터 SC 구조의 거동특성에 관한 기초연구(Moon et al., 2006)를 시작으로 관련 연구가 활발히 진행되었고, 원전 SC 구조용 설계기준인 KEPIC SNG(KEA, 2010)을 제정하기에 이르렀다.

SC 구조는 전단연결 장치인 스티드로 강판과 콘크리트를 연결하는데, 시공 시 콘크리트의 블리딩 수(bleeding water)가 상승하다 스티드를 만나면 저면에 고일 수 있다. 이는 결국 콘크리트와 스티드 사이에 공극을 발생시키고, 콘크리트와 강재 사이의 부착능력을 설계 시 예상하였던 값 이하로 떨어지게 할 수 있다. 또한 강판 구조물이 외력 혹은 내력을 받아 휨 혹은 전단거동을 할 경우, 길이방향에 수직하게 배치된 스티드는 머리 부분에서 국부적으로 과도한 지압응력 및 인장응력이 집중되어 결국에는 다음 Fig. 1과 같이 콘크

1) 정회원, (주)제이스코리아 기술연구소 소장
2) 정회원, 서울연구원 안전환경연구실, 초빙부연구위원
3) 정회원, 포스코건설 R&D센터 기술연구소 Manager
4) 정회원, 인하공업전문대학 토목환경과 교수, 교신저자

* Corresponding author : yist@inhatec.ac.kr
• 본 논문에 대한 토의를 2014년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2014년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

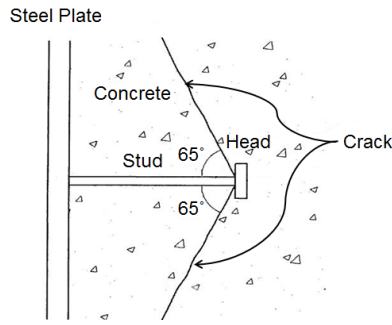
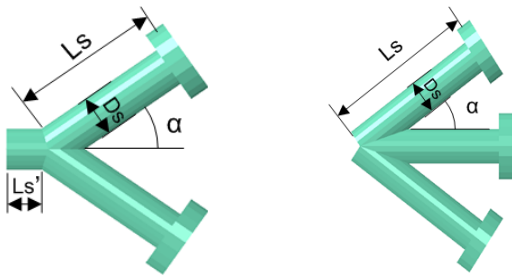


Fig. 1 Localized concrete crack at the stud



(a) developed stud #1(DS#1) (b) developed stud #2(DS#2)

Fig. 2 Type of developed studs

리트에 균열이 발생할 수 있다. 특히 SC 구조가 휨모멘트를 받을 경우, 강성이 다른 두 부재를 스티드가 결속하다 콘크리트 항복이후 혹은 국부적 강판의 좌굴로 인해 스티드가 뽑히는 과정에서 이와 같은 균열이 두드러질 수 있다.

본 연구는 휨모멘트를 받는 SC 구조에서 스티드의 성능을 개선하기 위해 이를 해석적으로 평가할 수 있는 3차원 유한요소모형을 제안하였고, 실물 시편에 대한 실험결과와의 비교/검증을 수행하였다. 그리고 SC 구조의 휨거동 시, 스티드에 가해지는 인발력을 분산시키기 위해 기존 스티드를 Fig. 2와 같이 개선하여 이에 대한 해석적 평가를 수행하였다.

개선된 스티드 1(이하 DS#1)은 일반 스티드의 상·하부에 추가 스티드를 배치한 형태로 총 3개의 스티드로 구성된 것이고, 개선된 스티드 2(이하 DS#2)는 2개 경사진 스티드로 구성되었다. 시공 시, 스티드와 강판의 체결법에는 용접, 볼트연결 등이 있으나, 이 연구의 해석에서는 스티드가 강판과 완전히 부착되었다고 가정하였다.

2. 해석모형의 검증에 사용된 구조실험

휨모멘트를 받는 SC 구조에 대한 비선형 유한요소모형의 개발과 검증을 위해 사용된 구조실험 결과로 Cho et al.(2012)의 연구를 활용하였다.

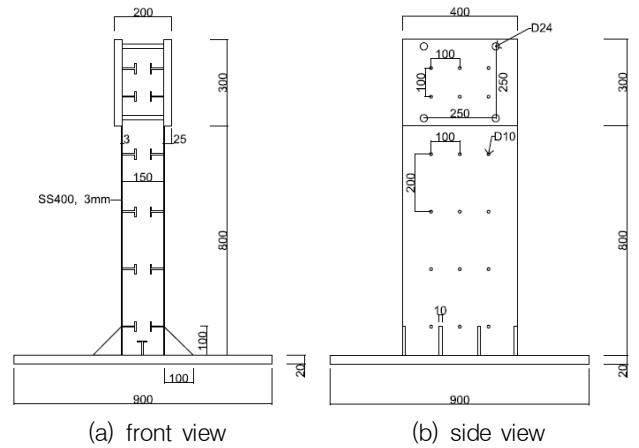


Fig. 3 Configuration of test specimens(Cho et al., 2012)

2.1 실험체의 형상 및 재료

실험체는 비보강 SC 벽체에 대한 시편으로 KEPIC SNG 규정을 반영하여 제작되었다. 시편의 크기는 높이 1,100mm, 길이 400mm, 두께 150mm로 두 강판 사이에 콘크리트가 타설된 형태로 제작되었다. 강판의 두께는 3mm였고, 하단은 두께 20mm 강판으로 기초판을 형성하였으며, 강판과 기초판은 각 면에 4개의 리브로 보강하였다. 강판과 콘크리트를 연결하는 스티드로 45mm 길이에 직경 8mm의 스티드가 사용되었고, 좌우측 강판에 벽체 길이방향으로 100mm 간격으로 3개씩 배치하였으며 벽체의 높이를 따라 200mm 및 100mm 간격으로 6줄로 배치하였다. 또한 콘크리트 저면과 기초판을 결속하기 위해서 3개의 스티드를 기초판에 배치하고 용접하였다. 다음 Fig. 3은 실험체의 정면도 및 측면도이다.

실험에 사용된 강재는 SS400 일반 구조용 강재로 초기항복강도는 약 200MPa이며, 항복인장강도는 400MPa이다. 콘크리트는 설계강도가 35MPa이 되도록 KS F 2402 규정에 따라 제작되었다.

2.2 실험방법

정적 가력실험에서는 벽체의 길이방향 및 벽체의 두께방향으로 500kN 용량의 서보식 가력장치를 사용하여 단조하중을 가하였고, 변위계와 변형률게이지를 설치하여 실험체의 하중-변위 관계와 하중에 대한 국부적 위치에서의 콘크리트 및 강재의 변형률을 계측하였다.

3. SC 구조의 해석을 위한 유한요소모형

휨모멘트를 받는 SC 구조의 거동을 합리적으로 모사하기

위해 비선형 해석이 가능한 범용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS를 사용하였고, 해석에 사용된 요소와 해석방법은 다음과 같다.

3.1 해석모델의 형상 및 요소

개선된 스티드가 적용된 해석모델을 구성하여 이를 해석적으로 평가하기에 앞서 유한요소모델의 적절성을 검증하기 위해 기 소개한 실내시험(Cho et al., 2012)을 유한요소방법으로 모사하였다. 해석모형은 3차원으로 구성하였고, 콘크리트, 강판, 리브 및 기초판에는 3차원 고체요소인 C3D8 요소를 적용하였다. 스티드는 전체 해석 구조물에 비하여 그 크기가 미소하므로 3차원 요소가 아닌 빔요소(B31)로 모델화하였다. Fig. 4는 유한요소법으로 시편을 모사한 모델을 나타낸 것이다.

3.2 부재간 연결 및 접촉면의 해석방법

3차원 보요소의 자유도는 한 절점에서 자유도가 6인 반면, 3차원 고체요소는 절점에서의 모멘트에 대한 자유도는 없고 축방향 자유도만 3개를 가진다. 따라서 보요소와 고체요소를 직접 연결할 경우 수치오류가 발생할 수 있는데 이를 해결하기 위해 ABAQUS의 interaction 모듈의 ‘structural coupling’ 방법을 사용하였다.

보요소로 모델화된 스티드는 콘크리트로 정의된 3차원 고체요소 속에 삽입 요소 방법(Embedded element method)을 사용하여 표현하였다. 삽입 요소 방법은 모체가 거동할 때, 삽입체의 요소가 모체의 변형에 대응하여 변형하도록 정의

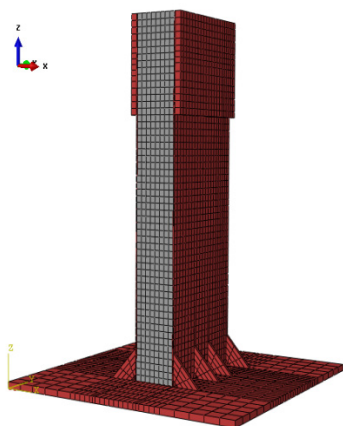


Fig. 4 Finite element analytical model of laboratory test specimen

한 서로 다른 부재간의 연결방법으로 철근콘크리트와 같은 구조물 해석에 적용 가능한 방법이다. 삽입요소 방법은 두 부재간의 상대변위로 수치해의 정밀도를 조정하는데 본 해석에서는 스티드가 거의 뽑힐 수도 있는 극한상황까지도 모사할 수 있도록 상대변위를 상당히 크게 설정하였다.

강판과 콘크리트의 사이의 접촉거동을 위한 해석은 에너지 방법 기반인 접촉(Contact) 방법을 사용하였다. 접촉 방법으로 부차거동 및 마찰거동을 모사할 수 있는데, 강판과 콘크리트의 부착력은 크지 않으므로 부착은 무시하였다. 그리고 국부적인 마찰만 존재한다고 가정하였고, 강재와 콘크리트의 마찰계수(μ)는 0.5로 가정하였다. 접촉 방법은 주부재(Master)면과 부부재(Slave)면을 설정해야하는데 본 연구에서는 강성이 크고 요소의 체논 크기가 더 큰 강판의 면을 주부재면으로 정의하였다. Fig. 5는 부재 간 연결 및 접촉면 해석 방법을 설명한 개념도이다.

3.3 각 재료의 물성치

3.3.1 콘크리트

ABAQUS는 콘크리트의 탄소성 및 균열거동을 모사할 수 있는 다양한 구성모형을 제공한다. 본 논문에서는 콘크리트의 인장 및 압축에 대한 준-취성거동을 모사할 수 있는 Concrete-Damaged-Plasticity 구성모형을 사용하였다.

콘크리트의 탄성계수는 Cho et al.(2012)의 실험에서 35.2MPa의 평균압축강도를 지니는 콘크리트를 사용한 것을 바탕으로 식 (1)과 같은 콘크리트구조기준(KCI, 2012)을 참고하여 29,779MPa로 산정하여 사용하였고, 포아송비는 0.18로 하였다.

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

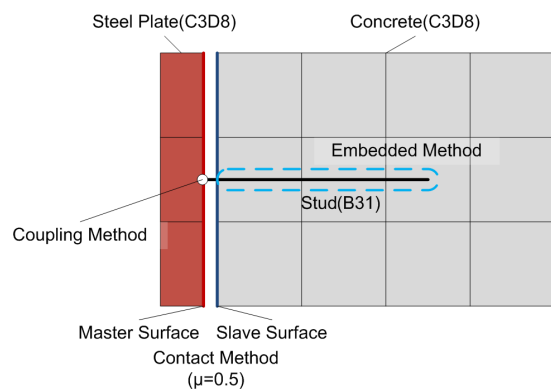


Fig. 5 Interaction between steel and concrete

여기서, f_{cu} 는 평균압축강도(MPa), m_c 는 콘크리트의 단위질량(kg/m^3)이다. Concrete-Damaged-Plasticity 모형의 소성관련 매개변수로는 Prakash et al.(2011)의 연구를 참고하여 다음의 Table 1에 나타난 값을 적용하였다.

콘크리트의 압축거동 시 응력-변형률 관계는 Carreira and Chu(1985)가 제안한 모형 식 (2)를 기반으로 산정하였다.

$$\sigma_c = \frac{f'_c \gamma \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right)}{\gamma - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right)^\gamma} \quad (2)$$

여기서, σ_c 는 콘크리트의 압축응력 (MPa), ϵ_c 는 콘크리트의 압축변형률, f'_c 는 압축강도, ϵ'_c 는 압축강도시 콘크리트의 변형률, γ 는 식 (3)과 같다.

$$\gamma = \left(\frac{f'_c}{32.4} \right) + 1.55 \quad (3)$$

콘크리트의 인장거동 시 응력-변형률 관계는 Evans and Marathe(1967)의 실험결과를 참고하여 Fig. 6과 같이 결정하였다.

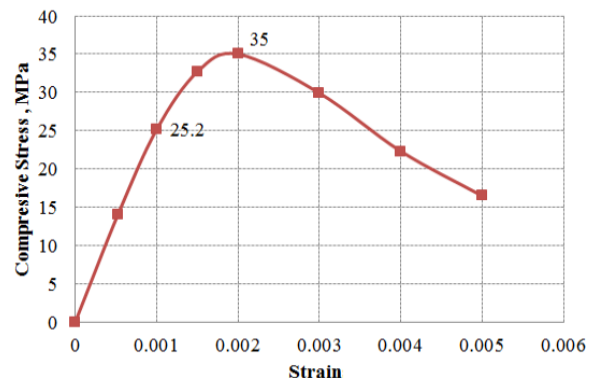
한편, 손상에 대한 입력값은 Jankowiak and Lodygowski (2005)의 반복재하 연구를 바탕으로 결정하였다. Fig. 7은 압축 및 인장에 의한 손상과 소성변형률과의 관계를 도시한 것이다.

3.3.2 강판과 스티드

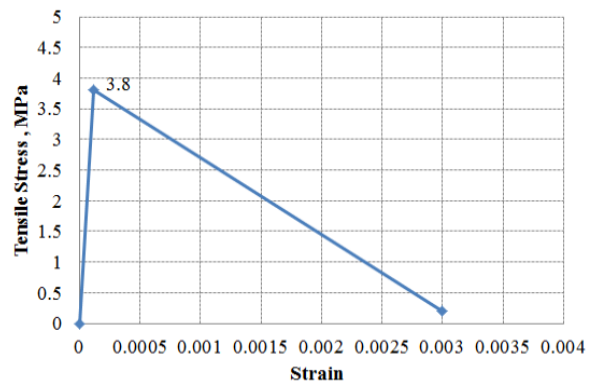
강재의 탄소성 거동은 소성 비압축성거동에 적합한 Von-mises 파괴기준을 따른다고 가정하였고, 탄성계수와 포아송비로는 각각 207,000MPa와 0.3을 사용하였다. 강판과 스티드의 응력-변형률 관계는 Prakash et al.(2011)의 연구를 참고하였다.

3.4 하중 및 경계조건

실험을 통해 횡방향으로 단조하중이 재하된 실험체의 거동을 보다 현실에 가깝게 모델화하기 위해 앞서 언급한 바와 같이 부재와 부재사이의 연결 및 접촉면에 비선형 조건을 정의하였고, 콘크리트 및 강재의 재료를 비선형으로 정의하였다. 비선형 문제를 풀기위해 arc length 방법을 사용하는 static riks 해석모듈을 사용하였다. 또한, 하중을 재하한 방향으로 변위가 발생함에 따라 경계조건에서 반대방향으로



(a) compressive behavior



(b) tensile behavior

Fig. 6 Stress-strain curve of concrete

Table 1 Parameters of concrete plastic model

Parameters	Input value
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
Dilation angle	35
Eccentricity	0.1
K^*	0.667

* : 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

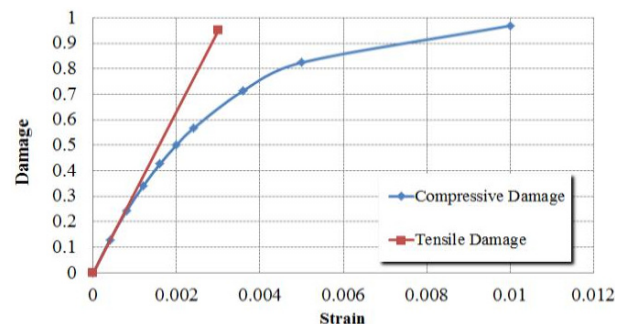


Fig. 7 Relationship between damage and plastic strains

발생하는 반력의 합을 다음 식 (4)와 같이 나타내었다. 그리고 해석을 통해 얻어진 하중-변위곡선과 실험을 통해 얻은 하중-변위곡선을 비교하여 해석모형의 타당성을 검토하였다.

$$P = F_r = \sum_{i=1}^n f_i \quad (4)$$

여기서, P 는 외력, F_r 는 경계조건 영역에서의 총반력 그리고 f_i 는 경계조건 중 절점 i 에서의 반력이다.

4. 유한요소모델의 검증

Fig. 8의 (a)와 (b)는 Cho et al.(2012)이 실내에서 SC 벽체 구조의 길이방향 및 두께방향으로 단조하중을 재하한 실험의 하중-변위 곡선과 유한요소해석을 통해서 얻은 결과를 비교한 것이다. 범례에서 SXP는 벽체의 두께방향으로 하중을 재하한 실험체를, SYP는 벽체의 길이방향으로 하중을 재하한 실험체를, 그리고 FEM은 유한요소해석을 각각 나타낸다.

벽체 두께방향 거동의 경우 실험결과와 매우 유사한 결과를 나타내었고, 벽체 길이방향의 경우 해석 모형의 강성이 실험결과에 비하여 다소 크게 나타났다. 이러한 이유는 벽체 길이방향으로 하중을 가할 경우 SC 부재 내부의 콘크리트가 전체에 걸쳐 전단파괴가 발생하고 균열의 발생 및 진전과 이로 인한 에너지가 소산으로 재료의 이방성 특성이 나타나기 때문이다. 또한 실험실에서는 기초판과 강판을 지지하는 리브가 파괴되어 떨어졌으나 해석에선 이를 고려하지 않았다.

해석결과와 실험결과를 비교해 보았을 때, 본 연구에서 적

용한 비선형 접촉면의 정의와 재료의 구성방정식 그리고 입력변수가 해당 구조 시스템의 비선형 거동을 충분히 묘사할 수 있음을 알 수 있다.

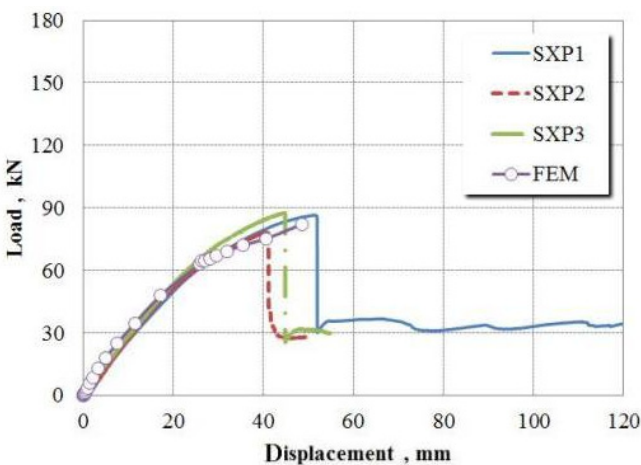
5. 개선된 스티드의 구조적 성능평가

5.1 해석 모형의 형상

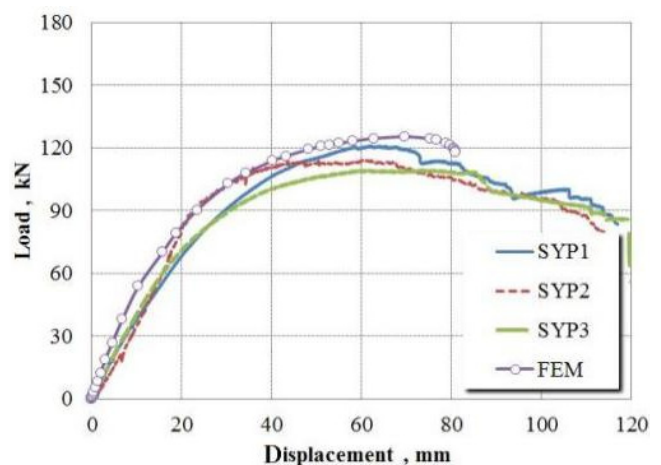
실험을 검증하기 위해 수행한 수치해석 모형의 크기는 실내에서 구조실험이 가능한 크기에 대한 것으로, 다양한 스티드와 설치간격이 적용된 SC 구조의 휨모멘트에 대한 성능을 평가하기엔 다소 그 크기가 작다. 수치해석 또한 실제 구조물의 크기로 앞 절에서 수행한 방법을 적용하기에는 무리가 따른다. 따라서 개선된 스티드의 성능을 충분히 확인할 수 있는 적절한 해석 모형의 크기를 결정해야 한다.

해석에 앞서, 모형의 크기를 결정하기 위해 SC 벽체 실험, 수치해석에 관한 문헌조사(Kim, 2008; Ozaki et al., 2004; Varma et al., 2011, 2012)를 수행하였고, 컴퓨터 해석가능 용량을 검토하였다.

이를 통해 최종적으로 개선된 스티드의 성능을 평가하기 위한 해 SC 벽체 해석 모형의 크기를 다음의 Fig. 9와 같이 결정하였다. 즉, 높이 1,600mm, 길이 1,400mm, 두께 206mm (강판 두께 3mm, 콘크리트 두께 200mm)로 결정하였다. 그리고 SC 구조의 하부는 앞에서 설명한 바와 같이 두께 20mm의 기초판으로 구성하였고, 강판과 기초판을 리브로 연결하였으며, 콘크리트와 기초판을 스티드로 연결하였다.



(a) thickness direction of SC wall



(b) length direction of SC wall

Fig. 8 Comparison of P-Δ curve between tests and FE analyses

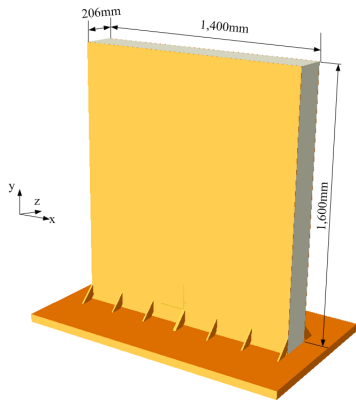


Fig. 9 Analytical model of SC wall for FE analyses

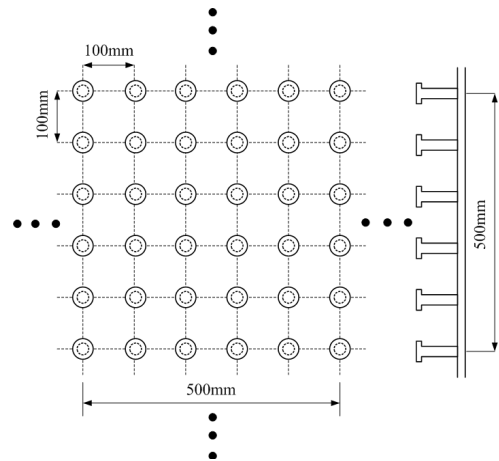


Fig. 10 Location of general studs

5.2 스테드의 배치

스테드는 SC 벽체의 휨 및 전단거동 시 강판과 콘크리트가 일체로 거동하기 위해 배치되는데, 개선된 스테드의 경우 소요되는 스테드의 양이 기존 것 보다 2배 이상이 되기 때문에, 보다 경제적으로 배치하기 위해서는 기존 스테드 보다 배치간격을 더 멀리할 필요가 있다(Fig. 2 참조).

일반 스테드를 사용한 해석모델에서의 스테드 배치간격은 결정된 해석모델 내에 충분히 배치될 수 있도록 Fig. 10과 같이 벽체의 길이방향(이하 x방향)과 벽체의 높이방향(이하 y방향)을 동일하게 100mm로 하였다. 그리고 500mm×500mm의 면적을 기준 배치면적으로 결정하였고 이를 기준으로 하여 개선된 스테드의 배치에 변화를 주었다. 다음 Table 2는 각 해석모델에 사용된 스테드의 형식과 배치간격을 설명한 것이다. 해석에서 스테드의 길이(Ls)는 50mm, 직경(Ds)은 8mm로 하였고, 경사각(α , Fig. 2)은 일반 스테드 인발 시의 균열각을 고려하여 35°로 하였다.

5.3 해석 및 검토방법

휨모멘트를 받는 SC 구조에 사용된 각 스테드의 성능을 평가하기 위한 해석에서는 앞에서 언급한 비선형 유한요소법을 사용하였고, static riks 해석모델에서 변위제어방식으로 수행되었다. 수치해석을 통해 경계조건에서 얻어진 힘과 변위로부터 모멘트 및 곡률을 역산하였고 KEPIC SNG에서 제시하고 있는 휨기준과 비교/검토하였다.

5.4 검토결과 및 개선된 스테드의 제안

Fig. 11은 각 모형의 모멘트-곡률(M- ϕ)에 대한 해석결과를

Table 2 Stud type and spacing

Model case	Stud type	Stud spacing (x×y)	Number of studs
GS-100×100	General stud	100mm×100mm	36
DS#1-500×500	Developed stud #1	500mm×500mm	12
DS#1-500×250	Developed stud #1	500mm×250mm	18
DS#1-250×250	Developed stud #1	250mm×250mm	27
DS#1-167×167	Developed stud #1	167mm×167mm	48
DS#2-250×250	Developed stud #2	250mm×250mm	18
DS#2-250×167	Developed stud #2	250mm×167mm	24

* 500mm×500mm

나타낸 것이다. 개선된 스테드의 상하 배치간격이 가장 넓은 모형인 DS#1-500×500이 최대 모멘트에서 기존 스테드 능력의 50%정도 밖에 안 되는 것으로 나타났고, DS#1-500×250의 경우에도 최대모멘트가 기존 스테드 능력의 2/3 수준으로 나타났다. 개선된 스테드 1을 사용한 모형은 DS#1-250×250과 DS#1-167×167이 기존 스테드를 사용한 모델과 유사한 거동을 보였다. 그리고 개선된 스테드 2를 사용한 모델 DS#2-250×250과 DS#2-250×167의 경우, 두 모델 모두 기존 스테드를 사용한 모델과 유사한 곡선을 나타냈다.

SC 구조에서 스테드의 수직배치에 대한 좌굴강도를 검토한 결과, 스테드의 수직간격이 250mm와 500mm인 모델들의 경우 Fig. 12에서 보여주는 바와 같이 KEPIC SNG의 기준을 만족하지 못하였다.

이들 두 그림에서 알 수 있는 바와 같이, GS-100×100을 기준으로 개선된 스테드 1은 DS#1-250×250과 DS#1-167×167이 KEPIC SNG의 휨모멘트 기준을 만족하였다. 하지만 DS#1-250×250은 좌굴강도 기준을 만족하지 못하였고, DS#1-167×167의 경우에는 기존 스테드보다 많은 양의 스테드가 필요하며 따라서 경

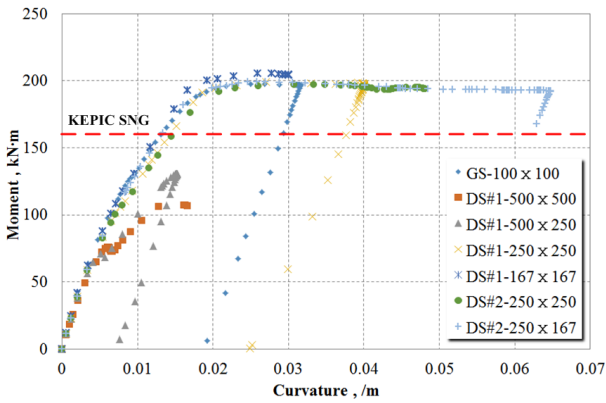


Fig. 11 M-φ curve from FE analyses

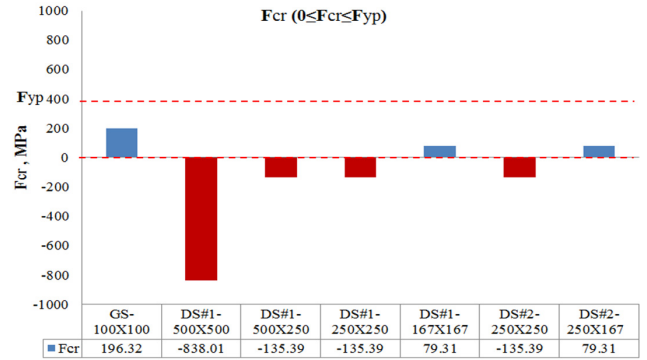


Fig. 12 Comparison results with buckling strength from KEPIC SNG

Table 3 Analysis results according to stud type and spacing

	GS-100×100	DS#1-500×500	DS#1-500×250	DS#1-250×250	DS#1-167×167	DS#2-250×250	DS#2-250×167
Maximum force, kN	131.71	71.56	87.81	132.85	136.99	131.50	132.93
Mn*, kN·m	161.30	161.30	161.30	161.30	161.30	161.30	161.30
Mu**, kN·m	197.57	107.34	131.72	199.27	205.48	199.66	200.82
Mu/Mn	1.22	0.67	0.82	1.24	1.27	1.24	1.25
Fcr***, MPa	196.32	-838.01	-135.39	-135.39	79.31	-135.39	79.31
Number of stud	36	12	18	27	48	18	24

* Nominal moment of by KEPIC SNG (general stud of 100mm×100mm spacing)

** Maximum moment from the FE analysis

*** Buckling strength of steel plate (0 ≤ Fcr ≤ Fyp), (-) value means not to be allowable.

제적이지 못하였다. 개선된 스티드 2는 DS#2-250×250과 DS#2-250×167이 KEPIC SNG의 휨모멘트에 대한 기준을 만족하였다. 하지만 DS#2-250×250은 좌굴강도에 대한 기준은 만족하지 못했다.

Table 3에서는 휨강도 설계기준, 스티드 배치에 따른 좌굴강도 설계기준 및 경제성을 고려하여 스티드의 적용성을 평가하였다. 최종적으로 KEPIC SNG의 휨모멘트 및 좌굴강도 기준을 만족하면서, 기존 스티드가 사용된 모델과 유사한 능력을 나타내는 모델은 DS#2-250×167임이 밝혀졌으며, 일반 스티드 모델에 비하여 본 연구에서 정의한 기준 면적 당 총 스티드의 사용이 약 33.3% 절약되는 효과가 나타났다.

6. 결론

이 논문에서는 SC 구조에 적용하기 위하여 새로이 제안하는 스티드의 최적의 형식 선정, 배치 간격 결정 및 스티드의 제원을 결정하기 위한 유한요소해석을 수행하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) SC 구조에 대한 기존 실험결과를 모사하는 유한요소 모델을 3차원으로 구성하고 재료와 접촉면에 대한 비선형성을 고려하여 해석한 결과, 실험결과를 비교적 잘 모사하는 합리적인 수준의 결과가 도출됨을 확인하였다.
- (2) 개선된 스티드 1과 2의 최적의 배치를 결정하기 위하여, 개선된 스티드를 다양하게 배치하여 해석을 수행하였고, 그 각각의 결과를 KEPIC SNG 기준과 일반 스티드 형상의 결과와 비교하였다. 이를 통해 개선된 스티드 1보다는 개선된 스티드 2의 성능이 우수함을 확인하였고, 최적의 배치는 개선된 스티드 2가 벽체 길이방향(x방향)으로 250mm와 벽체 두께방향(y방향)으로 167mm의 간격을 가질 때, 일반 스티드가 x와 y 방향으로 100mm 배치될 경우와 동등한 성능을 지니며 KEPIC SNG의 설계기준을 만족함을 확인하였다.
- (3) 개선된 스티드 1과 2에 대하여 동일한 배치에 대한 해석적 검토를 수행한 결과, 개선된 스티드 1보다 개선된 스티드 2가 적은 수의 스티드를 사용하면서도 휨거

동 시 더 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다. 향후 실험을 통해 이에 대한 검증작업이 수행된다면, 이 논문의 결과는 SC 벽체 구조에 다양하게 응용 및 사용될 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2010년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(과제 번호: 20101620100230)의 결과로 저자 일행은 지원에 감사드립니다.

References

1. Carreira, D. J., and Chu, K. H. (1985), Stress-strain relationship for plain concrete in compression, *ACI Journal*, 82(6), 797-804.
2. Cho, S. G., So, G. H., Kim, D. K., and Kwon, M. H. (2012), Experimental Investigation of the Lateral Load Capacity and Strength Characteristics of a Steel Plate Concrete (SC) Shear Wall, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 16(15), 23-32 (in Korean).
3. Choi, M. S. (2007), A Study on the Structural Behavior of Steel Plate-Concrete Wall System, Master Thesis, Ajou University (in Korean).
4. Evans, R. H., and Marathe, M. S. (1967), Microcracking and stress-strain curves for concrete in tension, *Materials and Structures*, 1(1), 61-64.
5. Jankowiak, T., and Lodygowski, T. (2005), Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model, Foundation of civil and environmental engineering, Poznan University of Technology, Poland, No. 6, 53-69.
6. Japan Electric Association (JEA) (1991), Technical Guidelines for A Seismic Design of Nuclear Power Plants, JEAG-4601, Japan Electric Association, Tokyo, Japan (in Japanese).
7. Kim, T. G. (2008), Behavior of Steel plate-concrete composite wall under shear and bending moment, Master Thesis, Ajou University (in Korean).
8. Koera Electric Association (KEA) (2010), Nuclear Safety Related Structures : Steel-Plate Concrete Structure, KEPIC-SNG, Koera Electric Association.
9. Korea Concrete Institute (2012), Concrete Design Code (in Korean).
10. Moon, I. H., Yoo, S. T., Kim, T. Y., and Lee, H. W. (2006), Fundamental Study of Steel Plate Reinforced Concrete (SC) Structure, *KSCE Conference & Civil Expo*, KSCE, Gwangju, 429-432 (in Korean).
11. Ozaki, M., Akita, S., Oosuga, H., Nakayama, T., and Adachi, N. (2004), Study on Steel Plate Reinforced Concrete Panels Subjected to Cyclic In-Plane Shear, *Nuclear Engineering and Design*, 228(1-3), 225-244.
12. 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.
13. Varma, A. H., Malushte, S. R., Sener, K. C., and Booth, P. N. (2012), Analysis Recommendations for Steel-Composite (SC) Walls of Safety Related Nuclear Facilities, *Structures Congress of ASCE*, ASCE, Chicago, 1871-1880.
14. Varma, A. H., Zhang, K., Chi, H., Booth, P. N., and Baker, T. (2011), In-Plane Shear Behavior of SC Walls: Theory Vs. Experiment, *Trans. of the Internal Assoc. for Struct. Mech. in Reactor Tech. Conf.*, SMiRT-21, New Delhi, India, Paper No. 764.

Received : 10/17/2013

Revised : 11/05/2013

Accepted : 12/10/2013

요 지

본 연구에서는 휨모멘트를 받는 SC 벽체 스티드의 성능을 최적화시키기 위해 비선형 유한요소법을 사용한 해석적 연구를 수행하였다. SC 벽체에 대한 유한요소모형에서는 접촉, 연결, 그리고 재료에 대한 비선형성을 고려하였다. 그리고 해석모형의 검증을 위해 선행된 실내 실험을 모사하여 계측결과와 해석결과를 비교하였고, 제안된 해석방법의 타당성을 검증하였다. 문헌조사를 통해 해석 대상물의 크기를 결정하였고, 다양한 스티드의 형식과 배치간격을 고려한 해석을 수행하였다. 또한, KEPIC SNG를 만족하는지에 대한 추가적인 검토를 수행하였다. 최종적으로 수치해석과 기준의 검토를 통하여 개선된 스티드의 최적 형식 및 배치안을 제시하였다.

핵심 용어 : 강판 콘크리트 벽체, 스티드, 비선형 유한요소해석, KEPIC SNG