

개구 저감률에 의한 원전 SC벽체의 내력 평가

정철현* · 정래영** · 문일환*** · 이정휘****

Chung, Chul-Hun*, Jung, Raeyoung**, Moon, Il Hwan***, Lee, Jungwhae****

Evaluation of Structural Capacity of SC Walls in Nuclear Power Plant accounting for the Area Lost to Openings

ABSTRACT

The shear wall with openings built with reinforced concrete(RC) have been elaborately studied by many researchers, whereas the steel plate concrete(SC) wall structure has not been investigated as much. Recent SC wall structures developed in Korea have been partly applied to nuclear power plant structures, although its design specification or guideline for the SC wall structure with openings has not been completed yet. This study based on the account for the area lost to openings evaluates the effects of opening on the structural capacity of the SC structure within nuclear power plant. The results obtained from the study on the area lost to openings have been compared with experimental and numerical studies.

Key words : Nuclear power plant, RC wall, SC wall, The area lost to opening, Structural capacity

초록

지금까지 수행된 개구부가 존재하는 벽체에 대한 연구는 대부분 RC 벽체에 대해서 수행되었으며, SC(Steel plate Concrete) 벽체에 설치되는 개구부에 대한 연구는 수행된 예가 적다. 최근에 국내에서 개발된 SC 벽체는 원전구조물에 일부 적용되고 있지만, 관련 설계기준인 KEPIC-SNG에서도 개구부를 갖는 SC 벽체에 대한 설계법은 명확하게 정의되지 않았다. 본 연구에서는 원전구조물내 벽체에 설치되는 SC 벽체를 대상으로 개구 저감률이 구조내력에 미치는 영향을 평가하였다. 개구 저감률을 고려한 구조내력 평가 결과는 실험 및 수치해석 결과와 비교분석하였다.

검색어 : 원전구조물, RC벽체, SC벽체, 개구저감률, 구조내력

1. 서론

최근들어 원자력발전소 안전관련 구조물에 공기단축을 목적으로 강판콘크리트구조(Steel-Concrete, SC구조)을 적용하기 위한 연구가 활발하게 진행되어(Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd., 2010), 원전구조물의 SC구조 기준인 KEPIC-SNG(2010)에 SC벽체의 설계법이 규정되었다. 원전구조물 중에서 지금까지 철근콘크리트구조(RC구조)로 시공되었던 벽체부에는 개구부가 존재하는데, 현재 국내외 관련 설계기준(KEPIC-SNG, 2010; ACI 318, 2008; CEB-FIP, 1999)에서는 전단벽에 대한 설계법은 제시하고 있으나, 개구부를 갖는 RC벽체에 대한 별도의 설계법은 명시되어 있지 않은 실정이다. 다만, 개개의 원전 설계사에서 각자의 독립적인 설계지침을 개발하여

* 정회원 · 교신저자 · 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Corresponding Author · Dankook University · chchung5@dankook.ac.kr)

** 정회원 · 한국원자력안전기술원 구조부지평가실 책임연구원, 공학박사 (k701jry@kins.re.kr)

*** 한국전력기술(주) 토건건축기술그룹(원자력) 책임기술원, 공학박사 (youmoon@kopec-enc.com)

**** 정회원 · 단국대학교 토목환경공학과 교수 (jwhee2@dankook.ac.kr)

Received January 23, 2013/ revised May 27, 2013/ accepted August 14, 2013

적용하고 있다. 최근에 국내에서 개발된 SC구조 기준인 KEPIC-SNG에서도 개구부를 갖는 SC구조에 대한 설계법은 명시되어 있지 않다. 한국수력원자력(Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd., 2010)에서는 SC구조의 규제현안을 해결하기 위한 연구를 수행하였다. 이 연구에서 개구부가 SC구조 벽체부의 구조내력에 미치는 영향을 실험적 방법에 의해서 평가하고, 그 결과를 토대로 SC벽체에 설치되는 개구부 주변의 보강방안을 제시하였다. 원전 보조건물의 벽체부에는 개구부의 형상, 크기, 위치 및 개수 등이 다양하게 존재하나 이 연구에서는 실험여건상 제한적인 범위내에서 실험이 수행되었다. 개구부가 설치된 RC 전단벽에 대해서 Ali and Wight(1990)는 개구부가 휨이 지배적인 벽체의 경계부재에 근접하여 설치된 경우 개구부가 벽체의 전단 압축과파괴에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험을 실시하였다. Taylor et al.(1998)은 벽체의 저면에 개구부를 갖는 휨 항복형 벽체에 대한 휨 거동 규명 및 변위기초설 계법에 따른 경계부재의 휨보강 철근량 산정방법을 검증하기 위한 실험 연구를 실시하였으며, Yanez et al.(1991)은 개구부 배열 및 개구부 크기 등을 주요 변수로 한 비정형 개구부를 갖는 RC 전단벽의 내진성능 평가를 수행하였다. Choi et al.(2008)은 개구부 크기, 위치, 형상 및 개구부 설치에 따른 연결부재에 관한 실험 및 해석적 연구를 수행하여 개구부를 갖는 RC 전단벽의 내력을 평가하였다.

개구부를 갖는 SC벽체의 전단성능을 평가하는 연구가 일본을 중심으로 진행되어 왔다. 이 연구결과를 근거로 일본건축학회(Architectural Institute of Japan, 이하 AIJ)의 철근콘크리트 구조계산 규준에서는 개구부의 면적비에 따라 개구부가 없는 벽체의 강성 및 내력을 저감시키는 저감률(reducing ratio)을 적용하여 개구부를 갖는 전단벽의 전단내력을 평가하도록 규정하고 있다. AIJ(2005)에서 규정하는 개구 저감률은 개구부의 면적에 따른 강도 저감률로서 RC구조에 대해서 제안되었다. 현행 AIJ의 철근 콘크리트 구조계산 규준에서 제안하고 있는 개구 저감률(RC 기준식)에서는 개구부 위치 및 개수의 영향을 고려하지 못한다. 이를 개선하기 위해서 Ishida(1999)는 개구부의 크기, 위치 및 개수의 영향을 고려하여 강도 저감률을 평가할 수 있도록 평가식을 제안하였다. Bae et al.(2010)은 AIJ(2005)에서 제시하고 있는 강도 저감률에 대하여 현재까지 진행된 실험결과에 대한 통계적 분석과 유한요소해석을 통한 변수 분석을 통해 개구부에 의한 강도 저감률 연구를 수행하였다. 연구결과로부터 강도 저감률이 실험결과보다 크게 나타남을 확인하였다. Chung and Lee(2012)는 원자력구조물 내 벽체에 설치되는 SC 벽체를 대상으로 개구부가 구조내력에 미치는 영향을 해석적 방법에 의해서 평가하였다.

지금까지 수행된 개구부가 존재하는 벽체부에 대한 대부분의 연구는 RC구조에 대해서 수행되었으며, SC구조 벽체부에 설치되는 개구부에 대한 연구는 극히 제한적이다. 또한, 개구 저감률

산정방법에 따른 내력평가는 산정방법에 따라 차이가 존재한다. 본 연구에서는 원전구조물내 벽체부에 설치되는 SC구조를 대상으로 개구부가 구조내력에 미치는 영향을 여러 제안된 개구 저감률 산정방법에 의해 평가하고, 이 결과를 기존 연구(Chung and Lee, 2012; Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd., 2010)에서 수행된 실험 및 해석결과와 비교분석하였다. 개구부가 존재하는 SC구조 벽체의 내력평가시 개구부의 형상, 크기, 위치 및 설치개수 등의 영향을 분석하였다. 연구결과를 통해서 여러 가지 방법으로 제안되어 있는 개구 저감률 산정방법들과 실험 및 해석결과와의 차이를 분석하였다.

2. 개구 저감률 산정방법

2.1 AIJ의 RC기준식(AIJ, 2005)

AIJ(2005) 규정에서는 개구부를 갖는 전단벽의 전단강도는 개구부가 없는 전단벽의 내력 산정식에 강성 및 내력을 저감하는 강도 저감률을 도입하여 개구부가 있는 벽체의 내력을 평가하고 있다. 개구부를 갖는 전단벽의 강도식의 경우 탄성 판이론 및 응력 분포상태를 대략적으로 가정하여 개구부의 면적에 따른 전단벽의 강도 저감을 추정한다. AIJ(2005)에서 규정하는 개구 저감률 r_a 는 Fig. 1에 나타난 개구부의 면적에 따른 강도 저감률로서 단일 개구부를 갖는 경우는 Eq. (1a), 2개 이상의 개구부를 갖는 경우에는 Eq. (1b)에 의해서 산정된다.

$$r_a = \min(r_1, r_2) \tag{1a}$$

$$r_1 = 1 - \frac{l_o}{l}$$

$$r_2 = 1 - \sqrt{\frac{h_o l_o}{hl}} \quad (\text{적용범위 } \sqrt{\frac{h_o l_o}{hl}} \leq 0.4)$$

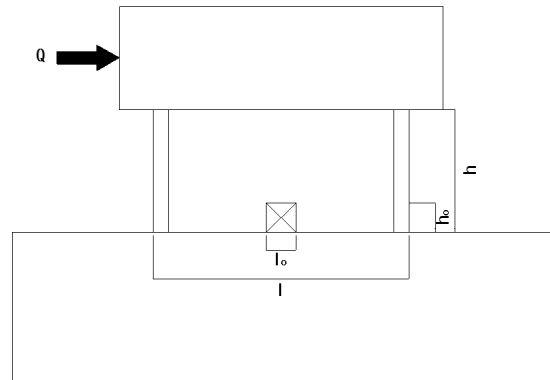


Fig. 1. Detail of SC Walls

$$r_a = \min(r_1, r_2) \tag{1b}$$

$$r_1 = 1 - \frac{2l_o}{l}$$

$$r_2 = 1 - \sqrt{\frac{2h_o l_o}{hl}}$$

l_o : 개구부의 폭
 h_o : 개구부의 높이
 l : 벽체의 폭
 h : 벽체의 높이

2.2 등가전단 스프링 상수에 의한 산정식

각 개구부가 포함되는 단면을 수평으로 Fig. 2와 같이 층 분할하고, 각 층에 대한 전단 스프링 상수를 이용해 등가전단 스프링 상수를 산정한다. 이 등가전단 스프링 상수를 이용하여 개구 저감률 r_b 를 산정하는데, Eq. (2)와 같다(Tokuhiro and Ono, 1987).

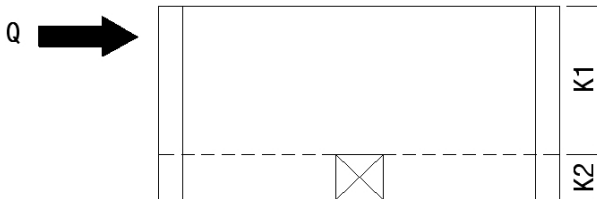


Fig. 2. Equivalent Shear Spring Constant

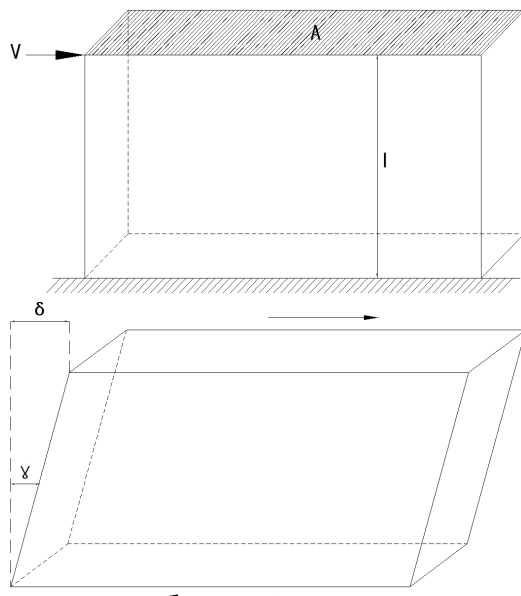


Fig. 3. Action of Shear Force

$$r_b = K_e / K \tag{2}$$

$$K_e = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_i}}$$

K_i : 개구부를 중심으로 분할한 각 층의 전단 스프링 상수 값
 K : 개구부가 없는 경우의 전체 벽체의 전단 스프링 상수 값
 여기서, 전단 스프링 상수는 전단력과 전단 변형량에 의해 유도할 수 있다. Fig. 3은 전단변형률(γ)과 전단력이 작용하는 면적(A)를 나타낸 그림이다. Eq. (4)에서 결정되는 전단 변형량(δ)을 Eq. (3)에 대입하면 전단 스프링 상수(K)는 Eq. (5)와 같다.

$$V = K \times \delta \tag{3}$$

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{\frac{V}{A}}{\frac{\delta}{l}} = \frac{Vl}{A\delta} \Rightarrow \delta = \frac{Vl}{AG} \tag{4}$$

$$K = \frac{GA}{l} \tag{5}$$

V : 전단력
 K : 전단 스프링 상수
 δ : 전단 변형량
 G : 전단 탄성계수
 τ : 전단 응력
 γ : 전단 변형률
 A : 전단력이 작용하는 면적
 l : 전단벽의 길이

2.3 유효한 스트럿 면적에 기초한 小野正行의 제안식

AIJ(2005)의 철근 콘크리트 구조계산 규준에서 제안하고 있는 개구 저감률(RC 기준식)에서는 개구부 위치의 영향을 고려하지 못한다. 이를 개선하기 위해서 Ishida(1999)는 개구부의 크기, 위치 및 개수의 영향을 고려하여 강도 저감률을 평가할 수 있도록 Eq. (6)를 제안하였다. 이 방법에서는 Fig. 4에서와 같이 균열은 45° 방향으로 발생하는 것으로 가정하고, 압력장을 형성하는 면적을 반영하여 개구 저감률 r_c 를 산정한다.

$$r_c = \sqrt{\frac{\sum A_c}{hl}} \tag{6}$$

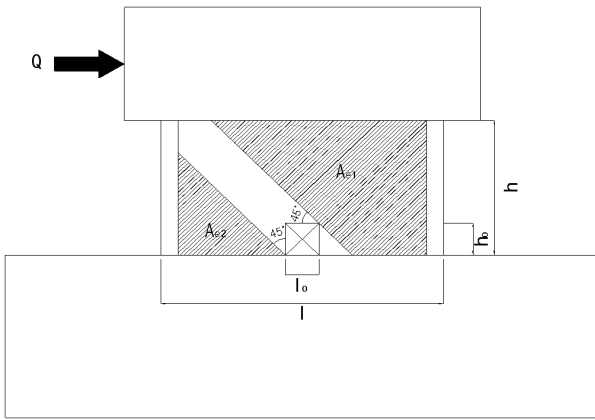
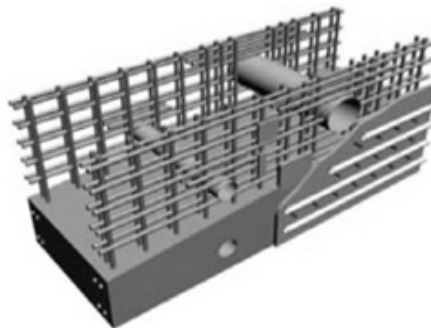


Fig. 4. Effective Area of Effective Strut Method

- A_e : 압력장을 형성하는 면적
- l : 벽체의 폭
- h : 벽체의 높이

3. SC구조 벽체부의 실험 및 해석결과

지금까지 원전구조물에 적용되는 RC구조의 벽체부는 Fig. 5의 (a)와 같은 단면형태를 갖고 있으며, 이를 대체하는 SC구조 벽체부는 Fig. 5의 (b)와 같은 단면형태를 갖고 있다. Korea Hydro



(a) RC Walls



(b) SC Walls

Fig. 5. Structural Characteristics of RC Wall and SC Wall

and Nuclear Power Co., Ltd.(2010)은 원전구조물에 적용하기 위한 SC구조 벽체부를 모사한 실험에서 벽체에 설치되는 개구부의 크기와 형태(구형, 원형), 개구부 주변의 보강판 유무에 따른 거동을 평가하였다. Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd.(2010)이 수행한 실험체의 수평단면은 SC구조 벽체와 직각방향의 벽체의 일부로 구성되는 H형 단면으로 구성되었다. 복부는 벽체, 플랜지는 전단실험시 지지점 역할을 수행하는데, 복부 벽체의 강판두께는 3.2mm, 플랜지 부분의 강판 두께는 6.0mm이다. 강판의 내면에는 콘크리트와의 일체성과 좌굴 방지를 위하여 종횡방향으로 스티드를 설치하였다. 실험체의 상하에는 하중을 재하기 위한 목적과 실험체에 균일한 변형을 가정하기 위해 대형 RC구조의 주두부와 주각부를 설치하였으며 매입 부분은 강판 외면에도 스티드를 밀실하게 배치하여 빠짐이 생기지 않도록 계획되었다. 개구부를 갖는 실험체에는 콘크리트 타설을 위해 개구부에 원형 또는 사각형의 슬라브(두께 3.2mm)를 설치하였다. 개구부 주위를 보강한 보강판은 복부 강판의 2배 두께(6.0mm)이며, 복부 강판과 태그 용접하였다. 보강판의 폭은 원형개구부 실험체의 경우, 직경의 0.75배이며, 구형 개구부 실험체의 경우에는 개구부 한 변의 길이의 0.8배이다 (Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd., 2010). 이 연구에서 개구부 주변의 표면강판의 두께를 2배로 보강하는 경우에 무개구부 SC벽체의 원래 강도를 유지하는 수준에서 결정되었다. 실험체의 주두부에 작용하는 수평하중에 의해 H형 단면의 실험체에 전단력과 휨모멘트가 발생하게 된다. 실험체는 전단 스펙비가 0.71이 되도록 계획하였으며 전단력이 거동을 지배하도록 하였다. Fig. 6은 실험체의 실험전경으로 2개의 3000kN의 Hydraulic Actuator를 이용하여 주두부에 하중을 수평방향으로 정적수준의 변위제어 방식으로 재하하였다. 이 실험에서 SC구조 벽체를 모사한 총 6개의 실험체에 대해 수평가력실험이 수행되었다. SC구조 벽체의 일반적인 형상은 Fig. 5와 같으며, 이를 모사한 개구부의 형상 및 크기를



Fig. 6. Details of Specimens

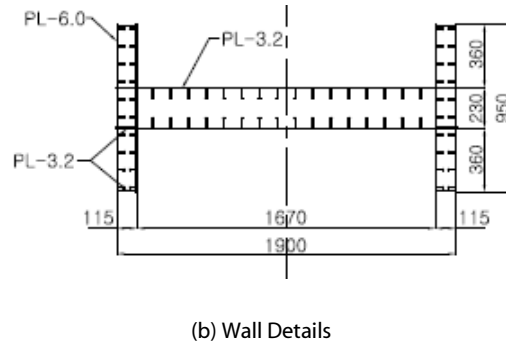
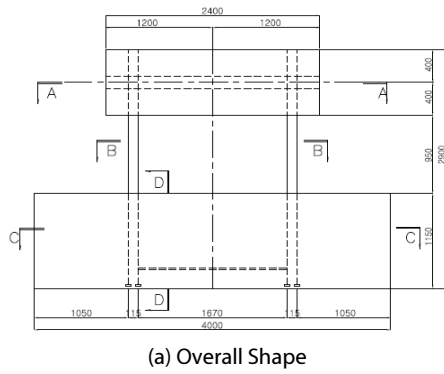


Fig. 7. Details of SOLID Specimen

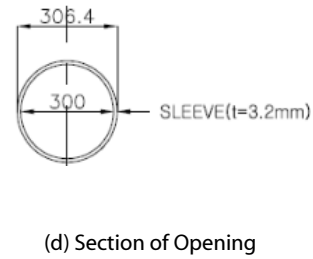
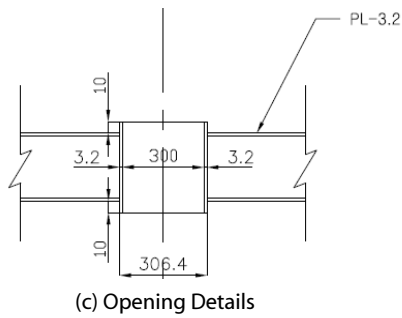
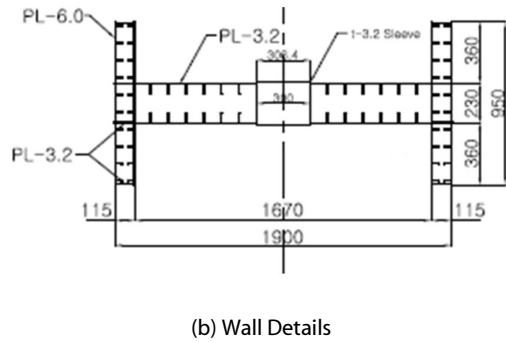
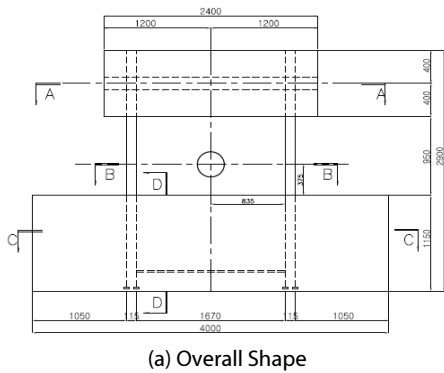


Fig. 8. Details of C300U Specimen

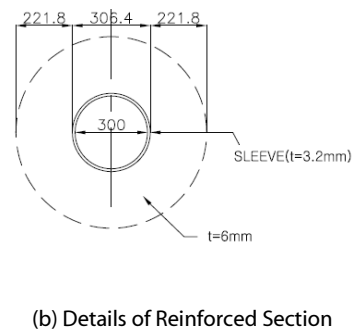
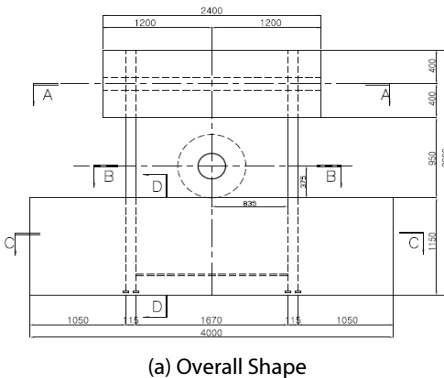


Fig. 9. Details of C300S Specimen

개구 저감률에 의한 원전 SC벽체의 내력 평가

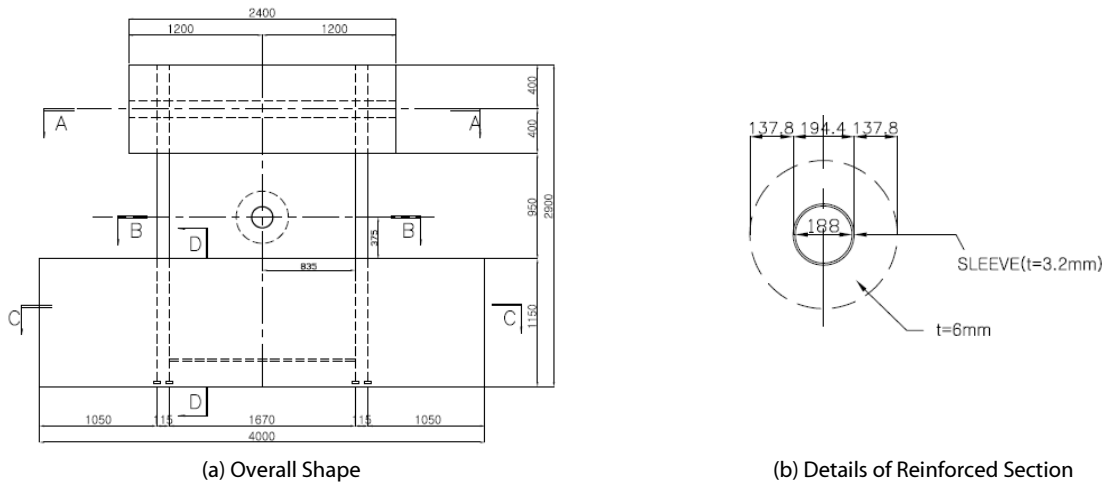


Fig. 10. Details of C188S Specimen

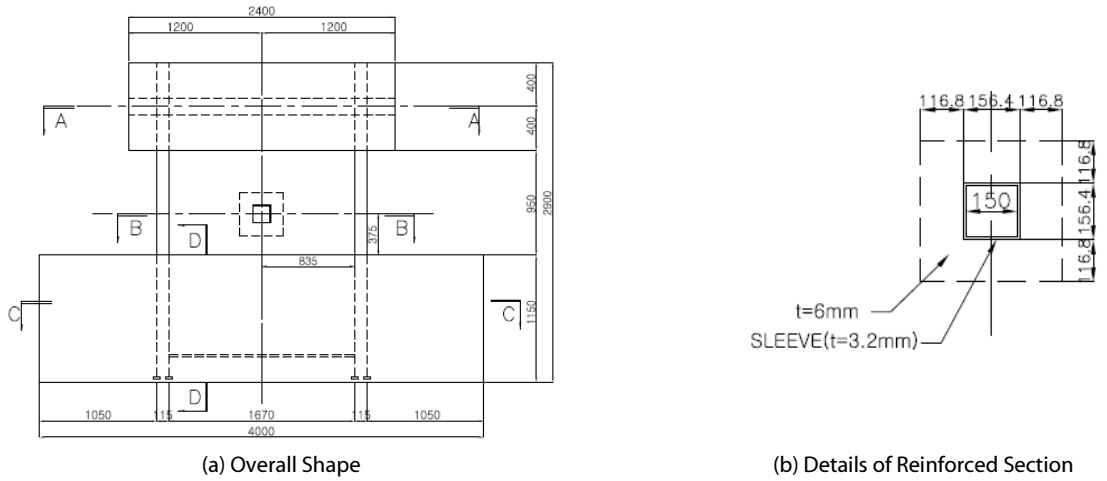


Fig. 11. Details of R150S Specimen

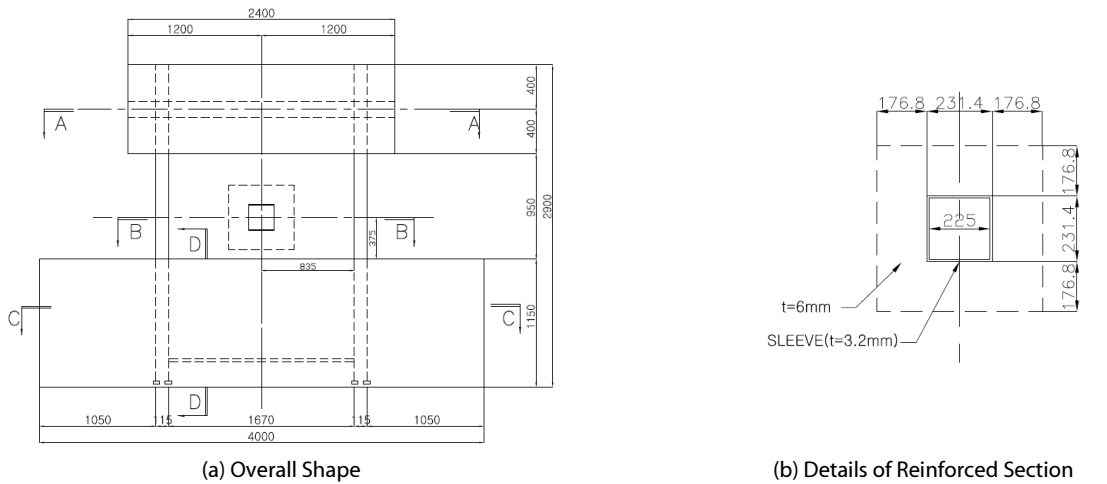


Fig. 12. Details of R225S Specimen

Table 1. Major Features of SC-Wall Numerical Models

Specimen Type	Model ID	Opening and Reinforcement	Comment
Specimen without opening	SOLID	• No opening applied	• Experiment and analysis results (Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd., 2010)
Specimen with circular reinforced opening	C300S	• Circular opening with 300mm diameter • Reinforcement applied to 750mm region around opening	
	C188S	• Circular opening with 188mm diameter • Reinforcement applied to 470mm region around opening	
Specimen with rectangular reinforced opening	R225S	• 255mm square opening • Reinforcement applied to 585mm region around opening	
	R150S	• 150mm square opening • Reinforcement applied to 390mm region around opening	
Specimen with circular non-reinforced opening	C300U	• Circular opening with 300mm diameter • No reinforcement applied	
Rectangular reinforced opening with various location	R225S-LU	• Opening at left upper corner	• Analysis results (Chung and Lee, 2010)
	R225S-RD	• Opening at right lower corner	
Rectangular reinforced opening with multiple, various location	R225S-LUC	• Opening at left upper corner and center	
	R225S-RDC	• Opening at right lower corner and center	
	R225S-LURD	• Opening at left upper corner and right lower corner	

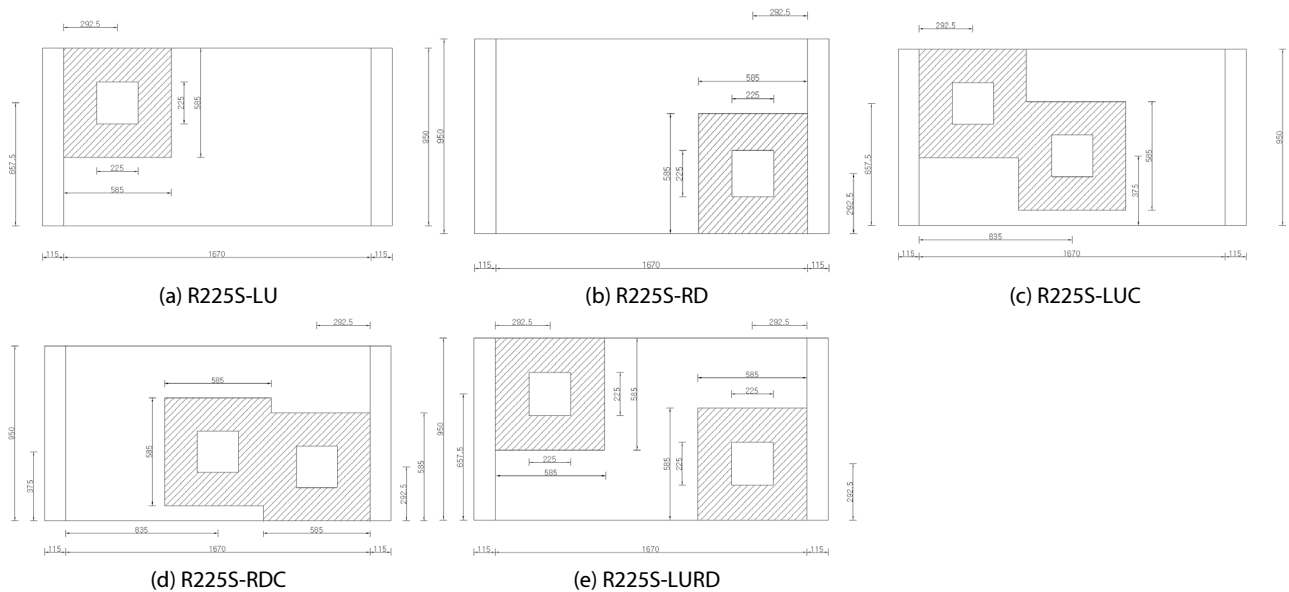


Fig. 13. Section Shapes Considering Various Opening Location and Quantity

변수로 한 각 실험체의 단면형상은 Figs. 7~12와 같다(Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd., 2010).

Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd.(2010)은 Figs. 7~12에 나타난 SC벽체 실험체 대한 비선형 해석을 수행하였는데, 실험에서 평가하지 못한 개구부의 위치 및 크기, 복수의 개구부

등이 SC벽체의 구조거동에 미치는 영향을 평가하였다. 비선형 해석이 수행된 SC벽체 실험체와 추가 해석모델에 대한 주요 특징을 Table 1에 정리하였다. 개구부의 위치를 변화시킨 R225S-LU와 R225S-RD 모델의 개구부 위치와 보강범위, 개구부를 복수(2개)로 설치한 R225S-LUC, R225S-RDC, R225S-LURD 모델의 개구부

Table 2. Maximum Resisting Forces of Experimental Test and Numerical Analysis

model ID	Max. resisting force (kN)	
	Experiment	Analysis
SOLID	4872.50	4746.39
C300S	4665.20	4836.04
C188S	4793.0	4823.49
R225S	4905.50	4716.79
R150S	4413.90	4629.96
C300U	4038.30	4346.97
R225S-LU	-	4774.62
R225S-RD	-	4681.83
R225S-LUC	-	4857.81
R225S-RDC	-	4682.61
R225S-LURD	-	4778.15

위치와 보강범위는 Fig. 13과 같다. Fig. 13에서 개구부 주변에 빗금친 부분이 보강범위에 해당한다.

Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd.(2010), Chung과 Lee(2012)는 SC구조 실험체 6개와 추가 해석모델 5개 등 총 11개 모델에 대해서 ABAQUS 6.8(2008)을 이용한 비선형 해석을 수행하였으며, 이 해석에서 산정된 각 모델의 최대내력은 Table 2와 같다.

4. 개구 저감률을 이용한 SC벽체의 내력 평가

4.1 개구부 크기 및 형상변화에 따른 내력 평가

Fig. 12와 Table 1에 제시된 SC벽체 모델을 Figs. 14~17과 같이 표현하여 2장에 기술된 개구 저감률 산정방법을 적용하여 내력을 평가하였다.

이상과 같이 RC기준, 등가전단 스프링 상수에 의한 산정식 및 유효 스트럿 면적에 의한 산정식을 적용하여 SC벽체 대한

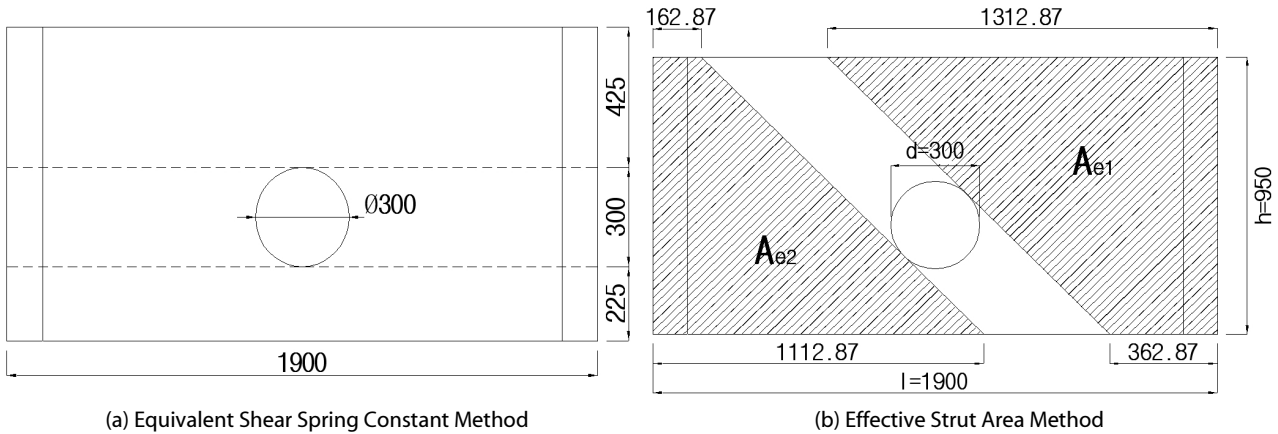


Fig. 14. C300U and C300S Model

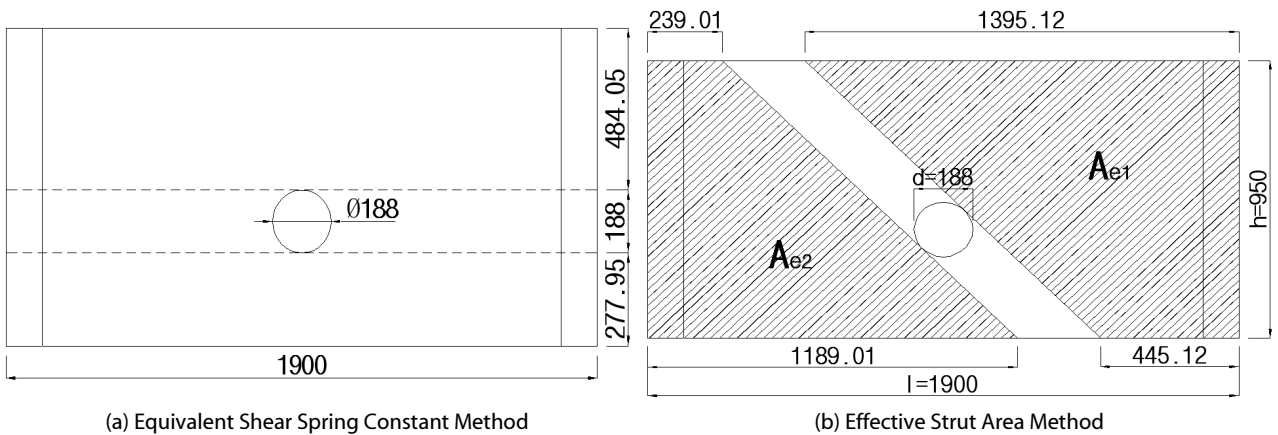


Fig. 15. C188S Model

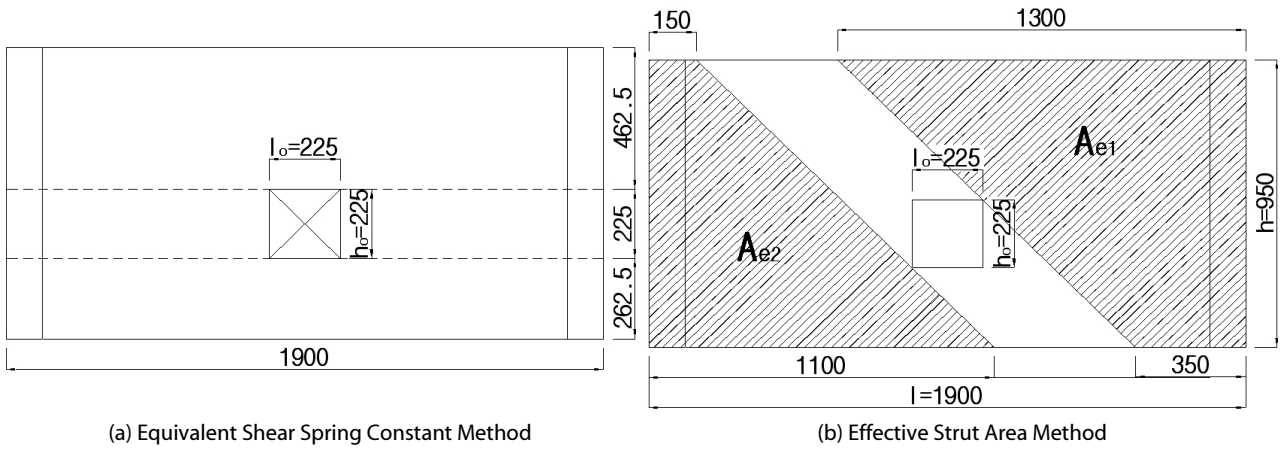


Fig. 16. R225S Model

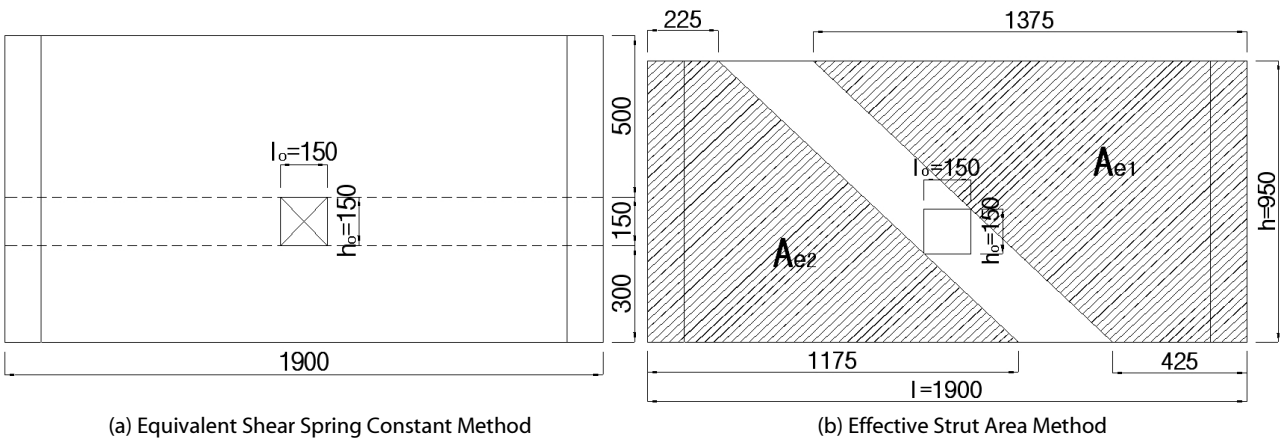


Fig. 17. R150S Model

Table 3. Strength Reduction Ratio of SC Walls According to Opening Loss Evaluation Methods

Model ID	Opening Area (mm ²)	Opening Ratio	Opening loss evaluation methods			FEM results (Model/SOLID)	Experiment results (Model/SOLID)
			RC method	Equivalent Shear Spring	Effective Strut		
C300S	70685.83	0.039	0.802	0.944	0.881	1.019	0.957
C188S	27759.11	0.015	0.876	0.979	0.927	1.016	0.984
R225S	50625	0.028	0.833	0.969	0.874	0.994	1.007
R150S	22500	0.012	0.888	0.987	0.918	0.975	0.906
C300U	70685.83	0.039	0.802	0.944	0.881	0.916	0.829

강도 저감률을 산정하여 Table 3에 정리하였다. Table 3에서 보면, 개구 저감률 평가법을 적용하는 경우에는 원형 및 구형 개구부 설치시 개구율이 증가할수록 강도 감소폭이 증가함을 알 수 있다. Table 3에서 FEM 및 실험결과(Model/SOLID)는 개구부가 존재하는 각 모델에 대한 FEM 및 실험결과를 개구부가 없는 모델(SOLID)에 대한 FEM 및 실험결과와 나눈 값이다. FEM 및 실험결과에

의해서 평가되는 강도는 개구율의 증가와 상관성이 없이 강도 저감률이 아주 작은 수준을 보이고 있다. 이는 개구 저감률을 평가하는 각 방법은 개구부 주변에 설치되는 보강판의 영향을 고려하지 못하는 반면에 FEM 및 실험결과는 보강판의 영향이 반영되었기 때문이다. 전반적으로 등가전단 스프링 상수를 이용하여 평가하는 방법이 해석 및 실험결과와 가장 유사한 결과를 보여주는 것으로 나타났다.

개구 저감률에 의한 원전 SC벽체의 내력 평가

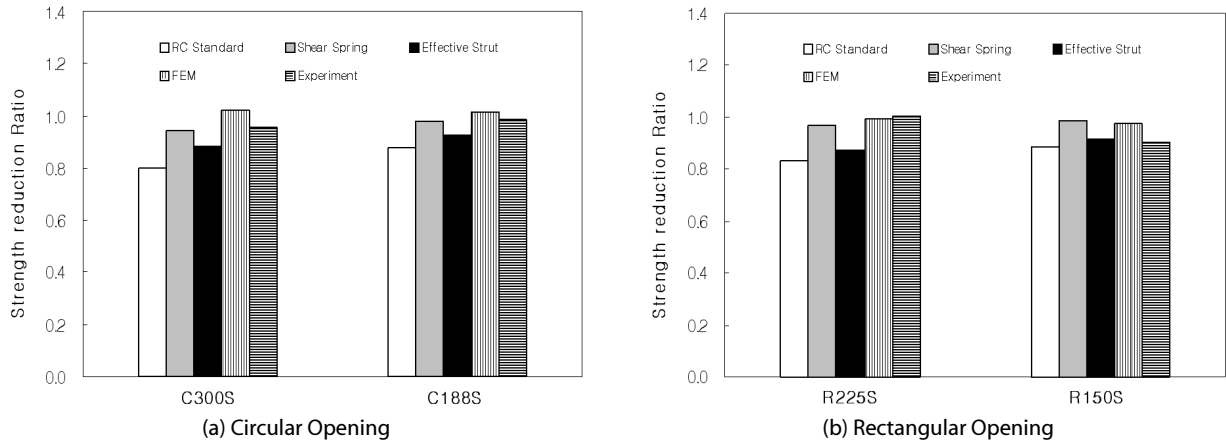


Fig. 18. Comparison of Strength Reduction Ratio with Different Opening Shapes

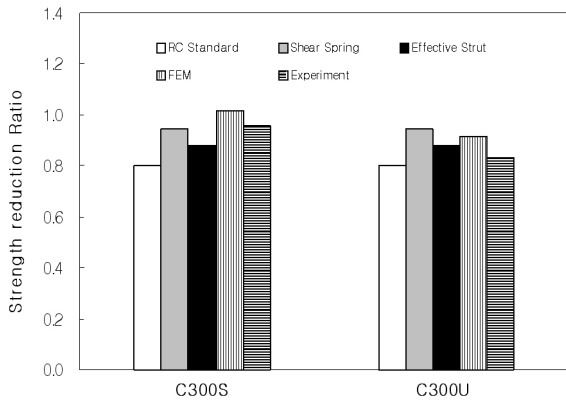


Fig. 19. Comparison of Strength Reduction Ratio with Different Reinforcement Condition

Fig. 18은 SC벽체에 설치된 원형 및 구형 개구부의 크기에 따른 강도 저감률을 비교한 것이다. 개구부 주변에 보강판이 설치되는 경우에는 개구 저감률에 의한 평가는 전반적으로 실험 및 해석결

과에 의한 경우보다 강도 저감효과가 크게 나타났다. 개구 저감률에 의한 평가에서는 등가전단 스프링 상수를 이용하는 평가법이 실험 및 해석결과에 가장 근접하는 결과를 보였다. Fig. 19는 원형 개구부 주변에 보강판 설치 유·무에 따른 강도 저감률을 비교한 것이다. 개구부 주변이 강판으로 보강되는 경우에는 개구 저감률에 의한 평가결과가 실험 및 해석결과보다 전반적으로 강도를 낮게 평가하는 결과를 보였다. 그러나 개구부 주변이 보강되지 않는 경우에는 개구 저감률에 의한 평가결과가 실험 및 해석결과보다 강도를 동등 이상의 수준으로 평가하는 결과를 보였다.

4.2 개구부의 위치 및 개수 증가에 따른 내력 평가

Fig. 13에 나타난 모델 중에서 개구부의 설치위치와 설치개수가 변화된 모델을 Figs. 22~24와 같이 표현하여 2장에 기술된 개구 저감률 산정방법을 적용하여 내력을 평가하였다.

R225S 모델에 설치된 개구부(225x225mm 구형)와 동일한 크기의 개구부를 설치위치와 개수를 변화시킨 각 모델에 대해서

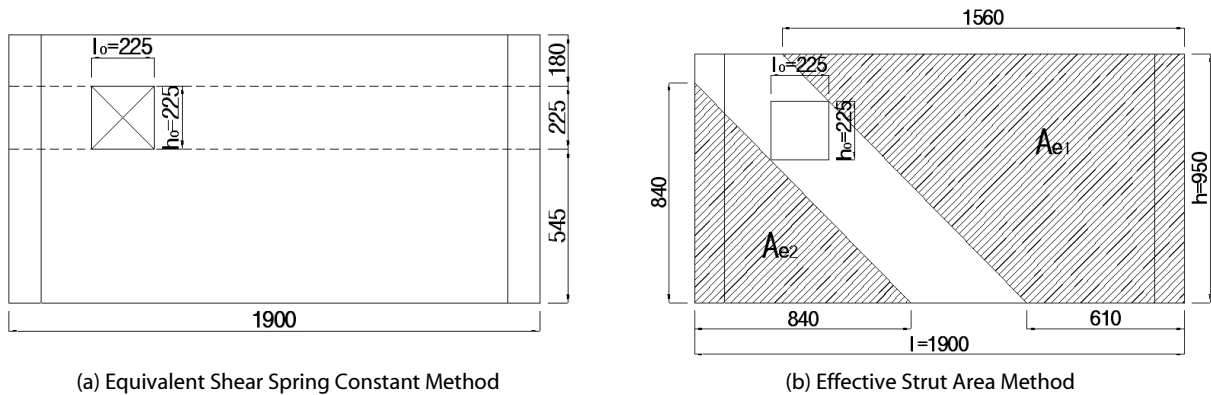


Fig. 20. R225S-LU Model

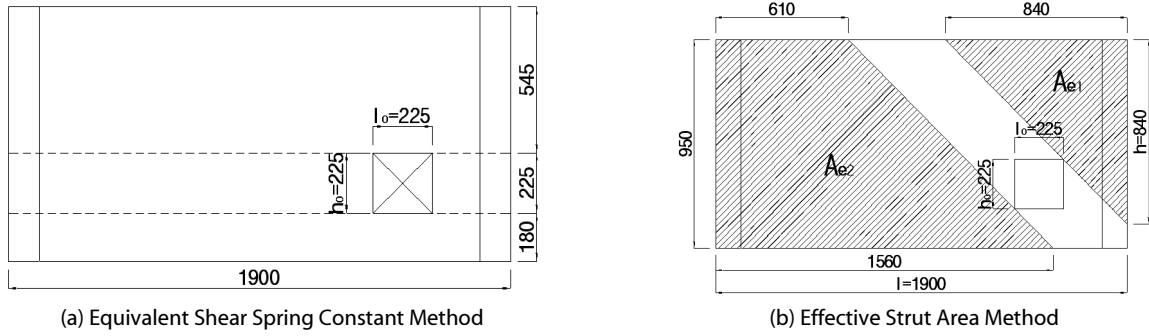


Fig. 21. R225S-RD Model

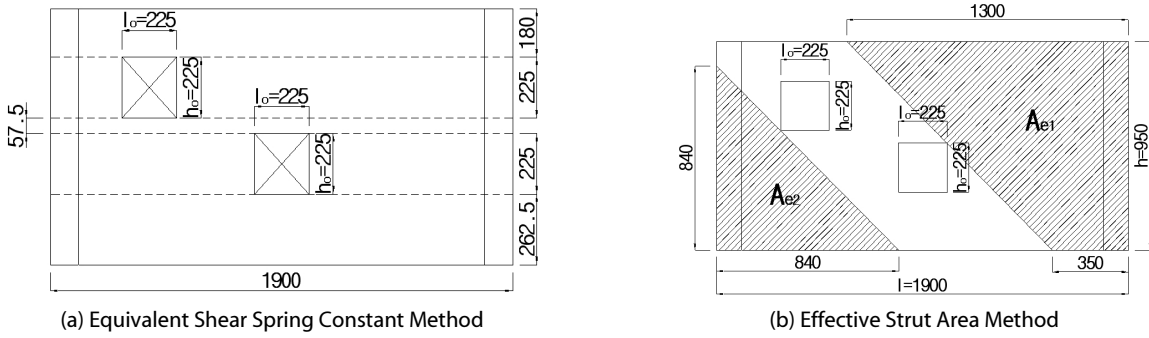


Fig. 22. R225S-LUC Model

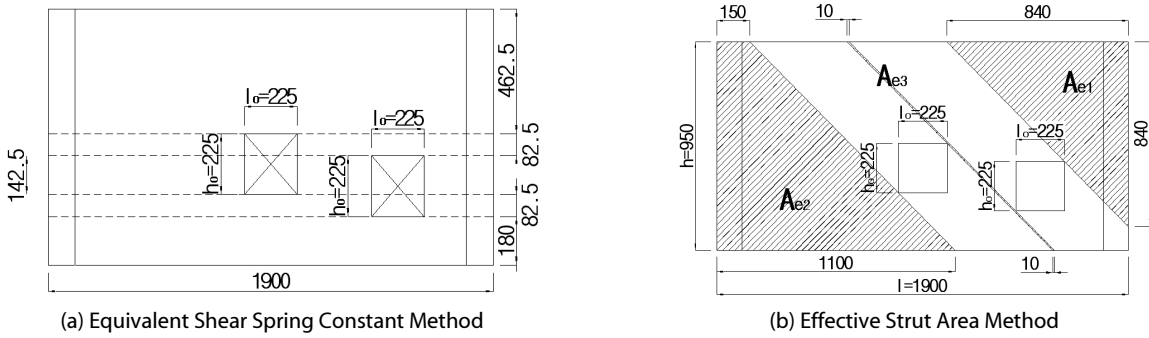


Fig. 23. R225S-RDC Model

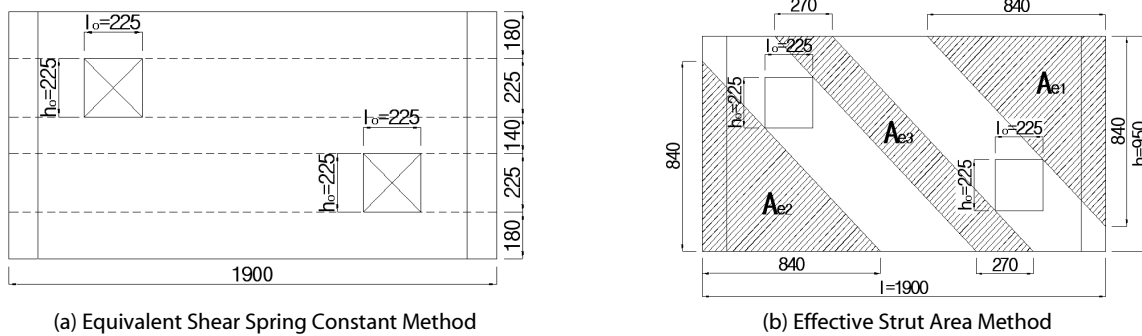


Fig. 24. R225S-LURD Model

Table 4. Strength Reduction Ratio According to Various Location and Quantity of Opening

Model ID	Opening Variable	Opening Area (mm ²)	Opening Ratio	Opening loss evaluation methods			FEM results (Model/SOLID)
				RC method	Equivalent Shear Spring	Effective Strut	
R225S	Location	50625	0.028	0.833	0.969	0.874	0.994
R225S-LU		50625	0.028	0.833	0.969	0.876	1.006
R225S-RD		50625	0.028	0.833	0.969	0.876	0.986
R225S-LUC	Location & Quantity	101250	0.056	0.763	0.940	0.794	1.023
R225S-RDC		101250	0.056	0.763	0.935	0.728	0.987
R225S-LURD		101250	0.056	0.763	0.940	0.730	1.007

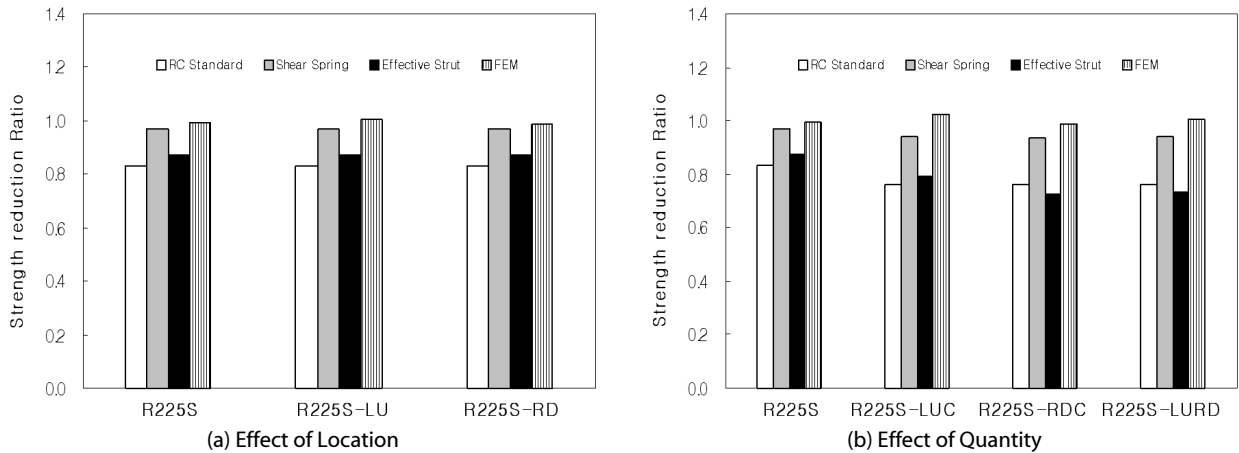


Fig. 25. Comparison of Strength Reduction Ratio According to Location and Quantity of Opening

평가한 강도 저감률을 Table 4에 정리하였다. Fig. 25의 (a)는 SC벽체내 개구부의 설치위치 변화에 따른 강도 저감률의 비교이다. 개구 저감률 평가방법에 의한 강도 저감률 평가시 평가 방법 간의 차이는 존재하지만, 동일 평가방법 적용시 개구부의 설치위치 변화에 따른 영향은 없는 것으로 나타났다. 개구 저감률에 의한 평가에서는 등가전단 스프링 상수를 이용하는 평가법이 FEM에 의한 평가결과에 가장 근접하는 결과를 보였다. FEM 해석결과에서도 개구부의 설치위치 변화에 따른 영향은 매우 작은 것으로 나타났다. Fig. 25의 (b)는 개구부가 SC벽체내에 2개 설치되었을 때 설치위치 변화에 따른 강도 저감률을 비교한 것이다. 복수의 개구부 설치시 위치변화에 따라 RC 기준식에 의한 저감률은 동일하지만, 등가전단 스프링상과 유효 스트럿 방법에 의한 저감률은 뚜렷한 경향은 아니지만 작은 차이를 보였다. FEM 해석결과에서도 복수 개구부가 설치위치가 변화하여도 내력에는 별다른 영향을 미치지 않는데, 이는 개구부 주변에 보강된 보강판의 영향으로 판단된다. 개구 저감률에 의한 평가에서는 등가전단 스프링 상수를 이용하는 평가법이 FEM에 의한 평가결과에 가장 근접하는 결과를 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 원전구조물내 벽체부에 설치되는 SC구조를 대상으로 개구부가 구조내력에 미치는 영향을 여러 제안된 개구 저감률 산정방법에 의해 평가하고, 이 결과를 기존 연구에서 수행된 실험 및 해석결과와 비교분석하였다. 개구부가 존재하는 SC구조 벽체의 내력평가시 개구부의 형상, 크기, 위치 및 설치개수 등의 영향을 분석하였으며, 주요 결론은 다음과 같다.

단일 개구부가 설치되는 경우, 개구 저감률 평가법을 적용하는 경우에는 원형 및 구형 개구부 설치시 개구률이 증가할수록 강도 감소폭이 증가하였다. 그러나 실험 및 FEM 해석에 의해서 평가되는 강도는 개구률의 증가와 상관성이 없이 강도 저감이 아주 작은 수준(해석 : 0.975~1.019, 실험 : 0.906~1.007)을 보이는데, 이는 개구 저감률을 평가하는 각 방법은 개구부 주변에 설치되는 보강판의 영향을 고려하지 못하는 반면에 실험 및 해석에서는 보강판의 영향이 반영되는 것이 주원인이다. 따라서 개구부 주변이 강판으로 보강되는 경우에는 개구 저감률에 의한 평가에서는 보강판의 영향이 무시되어 실험 및 해석결과보다 전반적으로 강도를

낮게 평가하는 결과를 보이는 것으로 판단된다.

개구부의 설치 위치가 변화하는 경우, 개구 저감률 평가방법에 의한 강도 저감률 평가시 평가 방법 간의 차이는 존재하지만, 동일 평가방법 적용시 개구부의 설치위치 변화에 따른 영향은 없는 것으로 나타났다. FEM 해석결과에서도 개구부의 설치위치 변화에 따른 영향은 매우 작은 것으로 나타났다. 복수의 개구부 설치시 위치변화에 따라 RC 기준식에 의한 저감률은 동일하지만, 등가전단 스프링식과 유효 스트럿 방법에 의한 저감률은 뚜렷한 경향은 아니지만 작은 차이를 보였다. FEM 해석결과에서도 복수 개구부가 설치위치가 변화하여도 내력에는 별다른 영향을 미치지 않는데, 이는 개구부 주변에 보강된 보강판의 영향으로 판단된다.

개구 저감률에 의한 평가방법 중에서 등가전단 스프링 상수를 이용하는 평가법(무개구부 SC벽체의 0.944~0.987 수준)이 다른 평가법에 비해서 해석(무개구부 SC벽체의 0.916~1.019 수준) 및 실험(무개구부 SC벽체의 0.829~1.007 수준) 결과에 가장 근접하는 결과를 보였다.

References

- ABAQUS User's Manual (2008). *Version 6.8*, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
- ACI Committee 318 (2008). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary*, American Concrete Institute, Michigan, pp. 160-168.
- Ali, A. and Wight, J. K. (1990). *Reinforced concrete structural walls with staggered opening configurations under reversed cyclic loading*, Report No. UMCE 90-05, Dept. of Civil Eng'g., Univ. of Michigan, Ann Arbor, Michigan, pp. 13-65.
- Architectural Institute of Japan (2005). *Recommendations for design and construction of reinforced concrete structures*, AIJ.
- Bae, B. I., Choi, Y. C., Ckoi, C. S. and Choi, H. K. (2010). "Shear strength reduction ratio of reinforced concrete shear walls with openings." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 4, pp. 451-460 (in Korean).
- CEB-FIP Model Code (1999). *Structural concrete*, pp. 141-184.
- Choi, Y. C., Choi, H. K. and Choi, C. S. (2008). "Influence of openings on the structural behavior of shear walls with slabs." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 1, pp. 3-11 (in Korean).
- Chung, C. H. and Lee, H. J. (2012). "Evaluation of structural behavior of sc walls in nuclear power plant with openings." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 5A, pp. 277-287 (in Korean).
- Ishida. (1999). "Experimental study on a concrete filled steel structure." *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting*, Architectural Institute of Japan, Vol. 25, pp. 1231-1232.
- Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd. (2010). *Topical report on steel-plate concrete structures: Experimental study on regulatory issues*, Final Report.
- Korean Electric Association (2010). *Structures in nuclear facilities: Steel plate concrete structures*, Korea Electric Power Industry Code, KEPIC-SNG-10 (in Korean).
- Taylor, C. P., Cote, P. A. and Wallace, J. W. (1998). "Design of slender reinforced concrete walls with openings." *ACI Structural Journal*, Vol. 95, No. 4, pp. 420-433.
- Tokuhiro, O. (1987). "Experimental research on elastic-plastic characteristic of aseismatic wall with eccentrically-located opening." *JCI Annual Journal 9-2*, pp. 385-390.
- Yanez, F. V., Park, R. and Paulay, T. (1991). "Seismic behavior of reinforced concrete structural walls with regular and irregular openings." *Pacific Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand, pp. 67-78.