개구부를 갖는 원전 SC구조 벽체의 구조거동 평가

Evaluation of Structural Behavior of SC Walls in Nuclear Power Plant with Openings

정철현* · 이한주**

Chung, Chul-Hun · Lee, Han-Joo

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. The 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 numerical analysis evaluates the effects of opening on the structural resistance of the SC structure in nuclear power plant. As a result from nonlinear analysis, since the strengthening for openings significantly affect the overall strength of SC wall, the openings should be considered to strengthen them around adjacent area. It is also proved that the strengthened openings have the sufficient resistance and ductility regardless their size, shape, location, and quantity.

Keywords : nuclear power plant, RC wall, SC wall, opening, structural behavior

요 지

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 개구부가 구조내력에 미치는 영향을 해석적 방법에 의해서 평가하였다. 비선형 해석 결과, 개구부가 설치되는 SC 벽체는 개구부 주변의 보강 여부가 내력에 미치는 영향이 크기 때문에 개구부 주변에 일정범위 이상의 보강이 이루어져야 하며, 개구부 주변이 보강된 경우는 개구부의 형상, 크기, 위치 및 설치개수에 관계없이 충분한 내력 및 연성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 원전구조물, RC벽체, SC벽체, 개구부, 구조거동

1. 서 론

최근 들어 원자력발전소 안전관련 구조물에 공기단축을 목적으로 강판콘크리트구조(Steel-Concrete, SC구조)를 적용하기 위한 연구가 활발하게 진행되어(김원기 등, 2010), SC구조를 원전구조물에 적용하기 위한 설계기준인 KEPIC-SNG(2010)이 발간되었다. 원전구조물의 벽체에는 특성상 많은 배관이 관통하게 되므로 개구부가 필연적으로 발생하게 된다. 그러나 철근콘크리트(RC)구조 설계에 대한 기술기준인 ACI 318(2008), ACI 349, KEPIC-SNG(2010) 등에서는 개구부가 존재하는 RC벽체의 설계법이 명시되어 있지 않다. 따라서 이러한 벽체는 각 원전 설계사에서 개발된 설계지침을 적용하여 설계를 수행하고 있다. 최근에 국내에서 개발된 SC구조 기준인 KEPIC-SNG에서도 개구부를 갖는 SC구조에

대한 설계법은 명시되어 있지 않다. 김원기 등(2010)은 한국수력원자력(주)와 공동으로 SC구조의 규제현안을 도출하기 위한 연구를 수행하였다. 이 연구에서 개구부가 SC구조 벽체의 구조내력에 미치는 영향을 실험적 방법에 의해서 평가하고, 그 결과를 토대로 SC벽체에 설치되는 개구부 주변의 보강방안을 제시하였다. 원전구조물의 벽체에는 개구부의 형상, 크기, 위치 및 개수 등이 다양하게 존재하나 김원기 등(2010)의 연구에서는 실험여건상 제한적인 범위내에서 실험이 수행되었다. 개구부가 설치된 RC 전단벽에 대해서 Ali and Wight(1990)는 개구부가 휨이 지배적인 벽체의 경계부에 근접하여 설치된 경우 개구부가 벽체의 전단 압축파괴에 미치는 영향을 평가하기 위한 실험을 실시하였다. Taylor et al.(1998)은 벽체의 저면에 개구부를 갖는 휨 항복형 벽체에 대한 휨 거동 규명 및 변위기준설계법에 따른 경계부

*정철현 · 단국대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : chchung5@dankook.ac.kr)

**정철현 · 교신저자 · 단국대학교 토목환경공학과 연구원 · 공학박사 (E-mail : jungwoo3@dankook.ac.kr)

재의 휨보강 철근량 산정방법을 검증하기 위한 실험 연구를 실시하였으며, Yanez *et al.*(1991)은 개구부 배열 및 개구부 크기 등을 주요 변수로 한 비선형 개구부를 갖는 RC 전단벽의 내진성능 평가를 수행하였다. 최윤철 등(2008)은 개구부 크기, 위치, 형상 및 개구부 설치에 따른 연결부재에 관한 실험 및 해석적 연구를 수행하여 개구부를 갖는 RC 전단벽의 내력을 평가하였다.

지금까지 수행된 개구부가 존재하는 벽체에 대한 연구는 모두 RC구조에 대해서 수행되었으며, SC구조 벽체에 설치되는 개구부에 대한 연구는 수행된 예가 거의 없다. 본 연구에서는 원전구조물내 벽체에 설치되는 SC구조를 대상으로 개구부가 구조내력에 미치는 영향을 해석적 방법에 의해서 평가하였다. 김원기 등(2010)의 SC구조 벽체를 모사한 전단 실험체에 대하여 비선형 유한요소해석을 수행하고, 실험 및 해석결과의 비교분석을 통해서 해석방법 및 비선형 재료모델의 적용 타당성을 검증하였다. 최종적으로 비선형 해석을 통해서 SC구조 벽체에 설치되는 개구부의 형상, 크기, 위치 및 설치개수 등이 구조내력에 미치는 영향을 평가하였다.

2. SC구조 벽체의 형상 및 해석모델

지금까지 원전구조물에 적용되는 RC구조의 벽체는 그림 1의 (a)와 같은 단면형태를 갖고 있으며, 이를 대체하는 SC구조 벽체는 그림 1의 (b)와 같은 단면형태를 갖고 있다. 김원기 등(2010)은 원전구조물에 적용하기 위한 SC구조 벽체를 모사한 실험에서 벽체에 설치되는 개구부의 크기와 형태(사각형, 원형), 개구부 주변의 보강판 유무에 따른 거동을 평가하였다. 김원기 등(2010)이 수행한 실험체의 수평단면은 SC구조 벽체와 직각방향의 벽체의 일부로 구성되는 H형 단면으로 구성되었다. H형 단면의 실험체 웹 벽체의 강판두

께는 3.2 mm, 플랜지 부분의 강판 두께는 6.0 mm이다. 강판의 내면에는 콘크리트와의 일체성과 좌굴 방지를 위하여 종방향 및 횡방향으로 스티드를 설치하였다. 따라서 유한요소모델 구성시 강판과 콘크리트는 완전합성으로 가정하였다. 실험체의 상하부에는 하중을 재하하고 실험체 단면의 변형이 평면을 유지할 수 있도록 RC구조의 대형 블록을 설치하였다. 개구부를 갖는 실험체에는 콘크리트 타설을 위해 개구부에 원형 또는 사각형의 슬리브를 설치하였다. 슬리브의 두께를 3.2 mm로 제작하여 슬리브에 의한 보강효과를 최소화하였다. 개구부 주위를 보강한 부분의 표면강판 두께는 6.0 mm로 웹에 적용된 표면강판 두께의 2배에 해당한다. 보강판의 폭은 원형개구부의 경우 직경의 0.75배, 사각형 개구부의 경우 한변의 길이의 0.8배로 결정하였다. 실험체의 상부에 작용하는 수평하중에 의해 H형 단면의 실험체에 전단력과 휨모멘트가 발생하게 된다. 실험체는 전단 스패닝이 0.71이 되도록 계획하였으며, 전단력이 거동을 지배하도록 하였다. 그림 2는 실험체의 실험전경으로 2개의 3000 kN의 Hydraulic Actuator를 이용하여 상부에 하중을 수평방향으로 정적수준의 변위제어 방식으로 재하하였다. 이 실험에서 SC구조 벽체를 모사한 총 6개의 실험체에 대해 수평기력실험이 수행되었으며, 실험체의 전체형상은 그림 1과 같다. 개구부의 형상 및 크기를 변수로 한 각 실험체의 단면형상은 그림 3~그림 8과 같으며, 각 실험체별 주요 특징은 표 1에 정리하였다(김원기 등, 2010).

그림 3~그림 8에 나타난 SC구조 실험체에 대한 비선형 해석을 수행하였다. 실험 및 해석결과의 비교분석을 통해서 보다 정확한 해석결과를 보여주는 비선형 해석을 위한 재료

(a) RC구조 (b) SC구조

그림 1. 원전구조물 벽체의 단면형상

그림 2. SC구조 실험체의 형상

(a) 전체 형상

(b) 벽체 상세도

그림 3. SOLID 실험체의 형상

(a) 전체 형상

(b) 벽체 상세도

(c) 개구부 상세도

(d) 개구부 단면도

그림 4. C300U 실험체의 형상

(a) 전체 형상

(b) 보강단면 상세도

그림 5. C300S 실험체의 형상

(a) 전체 형상

(b) 보강단면 상세도

그림 6. C188S 실험체의 형상

모델을 결정하였다. 여기서 결정된 재료모델을 적용하여 실험에서 평가하지 못한 개구부의 위치 및 크기, 복수의 개구

부 등이 SC벽체의 구조거동에 미치는 영향을 평가하였다. 비선형 해석이 수행된 SC구조 실험체와 추가 해석모델에 대

(a) 전체 형상

(b) 보강단면 상세도

그림 7. R150S 실험체의 형상

(a) 전체 형상

(b) 보강단면 상세도

그림 8. R225S 실험체의 형상

표 1. SC구조 해석모델의 주요 특징

해석 대상 SC 구조	모델 명칭	개구부 및 보강 유·무	비 고
무 개구부 시험체	SOLID	· 개구부 없음	· 실험결과 (김원기 등, 2010)
보강 원형 개구부 시험체	C300S	· 직경 300 mm 원형개구부 · 개구부 주변 750 mm 보강	
	C188S	· 직경 188 mm 원형개구부 · 개구부 주변 470 mm 보강	
보강 사각형 개구부 시험체	R225S	· 225 mm 정사각형 개구부 · 개구부 주변 585 mm 보강	
	R150S	· 150 mm 정사각형 개구부 · 개구부 주변 390 mm 보강	
무보강 원형 개구부 시험체	C300U	· 직경 300 mm 원형개구부 · 개구부 주변 보강 없음	· 해석 (본 연구)
사각형 개구부 위치 변화 영향(보강)	R225S-LU	· 좌측 상단에 개구부	
	R225S-RD	· 우측 하단에 개구부	
사각형 개구부 복수, 위치 변화 영향(보강)	R225S-LUC	· 좌측 상단+중앙부 개구부	
	R225S-RDC	· 우측 하단+중앙부 개구부	
	R225S-LURD	· 좌측 상단+우측 하단 개구부	

한 주요 특징을 표 1에 정리하였다. 추가 해석을 위한 해석 모델에서 개구부 주변의 보강범위는 실험이 수행된 실험체에 설치된 개구부와 동일한 방법을 적용하였다. 개구부의 위치를 변화시킨 R225S-LU와 R225S-RD 모델의 개구부 위

치와 보강범위, 개구부를 복수(2개)로 설치한 R225S-LUC, R225S-RDC, R225S-LURD 모델의 개구부 위치와 보강범위는 그림 9와 같다. 그림 9에서 개구부 주변에 빗금친 부분이 보강범위에 해당한다.

그림 9. 개구부 위치 변화 및 개수를 고려한 단면의 형상

3. 비선형 유한요소해석

3.1 유한요소모델

기존 연구자(김원기 등, 2010)의 SC구조 실험체 6개와 추가 해석모델 5개 등 총 11개 모델에 대해서 ABAQUS 6.8(2008)을 이용한 비선형 해석을 수행하였다. 유한요소모델은 실제 실험체의 크기와 동일하게 모델링하였으나 구조벽체 하부의 콘크리트 기초부는 유한요소모델에서 고려하지 않았다. 실험체 하단의 콘크리트 기초는 실험체를 반력상에 고정하기 위한 것으로 구조적인 거동에 영향을 미치지 않는다. 따라서 유한요소모델에서 벽체 하단부에 고정단 경계조건을 부여하였다. 또한 모든 해석모델이 대칭인 점을 고려하여 그림 10과 같이 전체 형상의 1/2을 모델링한 후, 대칭 경계조건을 부여하여 해석의 효율성을 도모하였다. 유한요소해석

그림 10. 유한요소모델의 형상

에 적용한 요소는 콘크리트와 하중 재하판은 8절점 감차적분 SOLID 요소(C3D8R), 강판은 4절점 감차적분 SHELL 요소(S4R)를 기본으로 하였다. 하중 재하는 강성을 매우 크게 부여하여 변형이 발생하지 않도록 만든 재하판에 그림 10에서와 같이 등분포 하중을 적용하여 정적해석을 수행하였다. 개구부 변수를 고려한 각 해석모델의 단면형상은 그림 11과 같다.

3.2 재료모델

3.2.1 콘크리트

콘크리트 비선형 재료모델은 ABAQUS 6.8(2008)에 내장되어 있는 Concrete Damaged Plasticity 모델을 적용하였다. 콘크리트의 압축응력-변형을 관계는 Hognestad(1951)가 제안한 콘크리트 응력-변형률 곡선을, 콘크리트 인장응력-변형률 관계는 완전 탄소성 모델을 적용하였다. Hognestad(1951)가 제안한 콘크리트 압축응력-변형을 관계와 인장에 사용한 완전 탄소성 모델의 형상은 그림 12의 (a)와 같다. Hognestad는 콘크리트가 압축상태에서 최대 압축강도의 30%까지 선형 탄성으로 고려한 것을 참고하여 본 해석에서도 압축강도의 30%인 10.5 MPa까지 선형 탄성 상태로 고려하였다. Hognestad가 제안한 콘크리트 비선형 재료모델의 응력-변형률 관계 계산은 최대 압축강도 이전과 이후로 나누어 계산한다. 식 (1)은 최대 압축강도 이전의 응력-변형률 계산식이며,

그림 11. 개구부 형상, 크기, 위치 및 개수를 변수로 한 유한요소모델 형상

그림 12. 콘크리트 응력-변형률 곡선

식 (2)는 최대 압축강도 이후의 응력-변형률 계산식이다. 식 (1)과 식 (2)에서 ϵ_0 는 0.002, ϵ_{cu} 는 0.005를 적용하여 계산하였다.

그림 12에서 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 강재가 콘크리트를 둘러싸고 있는 합성단면의 구속효과로 인한 최대내력 도달후 유지되는 연성거동을 반영한 모델이다.

$$f = 2 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \left(1 - \frac{\epsilon}{2\epsilon_0} \right) f_{cu} \quad (0 < \epsilon < \epsilon_0) \quad (1)$$

$$f = \left\{ 1 - 0.15 \left(\frac{\epsilon - \epsilon_0}{\epsilon_{cu} - \epsilon_0} \right) \right\} f_{cu} \quad (\epsilon_0 < \epsilon < \epsilon_{cu}) \quad (2)$$

표 2. 콘크리트 재료특성

압축강도 (MPa)	35(설계강도), 35.1(실린더강도)
인장강도 (MPa)	2.86
탄성계수 (MPa)	32141.55
단위질량 (kg/m ³)	2400
포아송비	0.17

콘크리트 최대 인장강도는 Gintaris *et al.*(1999) 이 제안한 식 (3)에 의해서 결정하였다. 150 mm 정육면체 공시체는 $\phi 150 \times 300$ mm 공시체의 압축강도에 1.25배라는 점을

표 3. 강재의 재료특성 (김원기 등, 2010)

강재 두께 (mm)	3.2	6.0
항복강도 (MPa)	310	268
인장강도 (MPa)	392	433
탄성계수 (MPa)	210000	
단위질량 (kg/)	7850	
포아송비	0.3

그림 13. 강재의 응력-변형률 곡선

고려하여 식 (3)에 따라 콘크리트 최대 인장강도를 계산하면 2.86 MPa 수준이다. R_{15} 는 150 mm 정육면체 공시체로부터 측정된 압축강도이다.

$$f_{fu} = 0.23 \sqrt[3]{R_{15}^2} \quad (3)$$

표 2는 SC구조 실험체에 적용된 콘크리트의 주요 재료특성이며(김원기 등, 2010), 이를 식 (1)~식 (3)에 적용하여 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 산정하면 그림 12의 (b)와 같다. 강재와 콘크리트가 합성되는 설계강도와 28일 실린더 공시체 측정강도가 거의 유사하여 해석시 설계강도를 적용하였다.

3.2.2 강재

SC구조 실험체에 적용된 벽체의 강판은 각각 3.2 mm와 6.0 mm 두께 두 가지 종류로 구성되어 있다. 강재의 인장 시험 결과, 두께에 따라 항복강도 및 최대인장강도가 차이를 보였는데, 강재 시편에 대한 인장시험에서 측정된 강재의 두께별 재료특성은 표 3과 같다. 유한요소해석에서 강재의 응력-변형률 관계는 그림 13과 같은 완전 탄소성 모델을 적용하였다.

4. 해석결과

4.1 실험 및 해석결과의 비교

김원기 등(2010)이 수행한 SC구조 실험체의 실험에서 측정된 실험체 상단부에서의 하중-변위 곡선은 그림 14와 같다. 실험체에는 그림 2에서와 같이 수평하중이 가해졌고, 변위는 실험체의 벽체 상단부에서의 수평변위이다. 김원기 등(2010)이 실험을 수행한 6개의 실험체에 대한 해석 및 실험 결과를 그림 15에 비교하였으며, 실험 및 해석에서 평가된 각 실험체의 최대내력 및 최대내력시 변위를 표 4에 정리하

그림 14. 각 실험체의 구조실험에서 측정된 하중-변위 곡선

였다. 해석결과에서 평가된 최대내력은 실험에서 측정된 최대내력 발생시점에서의 변위와 동일한 변위가 발생 할 때의 내력으로 평가하였다.

직경이 300 mm이고 무보강 원형 개구부인 C300U 실험체의 최대내력의 경우, 해석결과가 약 7.6% 크게 평가되어 전체 실험체 중에서 가장 오차가 크지만 표 4에서 보면, 최대내력의 해석/실험의 비가 0.962~1.076 사이로 전반적으로 해석 및 실험결과가 잘 맞는 결과를 보였다.

4.2 하중-변위 곡선

4.2.1 원형 개구부 크기에 따른 영향

개구부가 설치되지 않은 실험체(SOLID)를 기준으로 원형 개구부(C188S, C300S)가 설치되고 개구부 주변이 강판으로 보강된 경우, 개구부의 크기 증가가 최대내력 및 연성거동에 미치는 영향을 평가하였다. 그림 16은 실험 및 해석에서 평가된 하중-변위 곡선의 비교로서 최대내력 및 연성거동이 유사한 수준을 보여 비선형 해석에 의해서도 개구부 유·무에 상관없이 SC 구조의 내력 및 연성거동을 정확하게 평가할 수 있는 것으로 판단된다. 원형 개구부 크기에 따른 최대내력은 표 5와 같다. 실험결과에 따르면, 개구부가 없는 SOLID 모델을 기준으로 원형 개구부의 크기가 증가하면 작은 수준이기는 하지만 내력이 약간 감소하는 경향을 보였다. 그러나 해석결과에서 보면 SOLID 모델을 기준으로 원형 개구부의 크기가 증가하여도 내력 변화의 크기는 약 2% 정도로 매우 적다. 이는 원형 개구부 주변에 보강된 강판의 범위가 1.5D로 개구부 주변에서 충분한 강성증가효과가 있기 때문인 것으로 판단된다. 실험결과에서 개구부 크기 증가에 따라 내력이 약간 감소하는 것은 일반적인 경향이라고 보기 보다는 해석에서 고려하지 못한 개구부 주변 용접부 및 개구부 설치, 보강시 시공오차에 의한 차이로 판단된다. 따라서 SC구조에 설치되는 원형 개구부는 개구부 주변에 대한 보강이 이루어진다면 개구부가 없는 경우와 비교하여 내력 및 연성의 저하는 없는 것으로 판단된다.

4.2.2 사각형 개구부 크기에 따른 영향

개구부가 설치되지 않은 실험체(SOLID)를 기준으로 사각형 개구부(R150S, R225S)가 설치되고 개구부 주변이 강판으로 보강된 경우, 개구부의 크기 증가가 최대내력 및 연성

(a) SOLID 실험체

(b) C300S 실험체

(c) C188S 실험체

(d) R225S 실험체

(e) R150S 실험체

(f) C300U 실험체

그림 15. SC구조 실험체의 하중-변위 곡선 비교

표 4. 실험 및 해석에서 평가된 최대내력

모델명	실험결과		해석결과		최대내력 비 (해석/실험)
	최대내력 (kN)	최대내력시 변위(mm)	최대내력 (kN)	최대내력시 변위(mm)	
SOLID	4872.50	10.712	4746.39	10.819	0.974
C300S	4665.20	11.385	4836.04	11.275	1.036
C188S	4793.0	11.993	4823.49	11.503	1.006
R225S	4905.50	10.587	4716.79	10.786	0.962
R150S	4413.90	6.749	4629.96	6.779	1.048
C300U	4038.30	6.930	4346.97	6.886	1.076

표 5. 보강된 원형 개구부 크기에 따른 최대내력 비교

모델명	최대내력(kN)			최대내력 비 (C***S/SOLID)	
	실험	해석	해석/실험	실험	해석
SOLID	4872.50	4746.39	0.974	1.0	1.0
C188S	4793.0	4823.49	1.006	0.984	1.016
C300S	4665.2	4836.04	1.036	0.957	1.019

거동에 미치는 영향을 평가하였다. 그림 17은 실험 및 해석에서 평가된 하중-변위 곡선의 비교로서 사각형 개구부 크기

에 따른 최대내력을 표 6에 정리하였다. 실험결과에 따르면, 개구부가 없는 SOLID 모델을 기준으로 사각형 개구부의 크기가 증가하면 작은 수준이기는 하지만 원형 개구부의 경우와 달리 내력이 약간 증가하는 경향을 보였다. 해석결과에서는 SOLID 모델을 기준으로 사각형 개구부의 크기가 증가하면 내력이 증가하지만, 거의 변화가 없는 수준이다. 이상의 결과에서 원형 개구부의 경우와 마찬가지로 SC구조 벽체에 설치되는 사각형 개구부는 개구부 주변에 대한 보강이 이루어진다면 개구부가 없는 경우와 비교해 내력 및 연성의 저하는 없는 것으로 판단된다.

그림 16. 보강된 원형 개구부 크기 증가에 따른 하중-변위 곡선 비교

그림 18. 보강판 유무에 따른 하중-변위 곡선

그림 17. 보강된 사각형 개구부 크기 증가에 따른 하중-변위 곡선 비교

표 6. 보강된 사각형 개구부 크기에 따른 최대내력 비교

모델명	최대내력(kN)			최대내력 비 (R***S/SOLID)	
	실험	해석	해석/실험	실험	해석
SOLID	4872.50	4746.39	0.974	1.0	1.0
R150S	4413.90	4629.96	1.048	0.906	0.975
R225S	4905.50	4716.79	0.962	1.007	0.994

4.2.3 보강판 유무에 따른 영향

개구부가 설치되지 않은 실험체(SOLID)를 기준으로 원형 개구부(C300S, C300U)가 설치되고 개구부 주변이 강판으로 보강된 경우와 보강되지 않은 경우, 개구부 주변 보강 유·무가 최대내력 및 연성거동에 미치는 영향을 평가하였다. 그림 18은 실험 및 해석에서 평가된 하중-변위 곡선의 비교로서 개구부 주변에 강판에 의한 보강 유·무가 최대내력에 미치는 영향을 표 7에 정리하였다. 실험결과에 따르면, 개구부 주변이 강판으로 보강되지 않는 경우, 개구부가 없는 실험체(SOLID)에 비해서 약 17.1% 내력이 저하되고, 개구부 주변이 강판으로 보강된 실험체(C300S)에 비해서는 약 13.4% 내력이 저하되는 것으로 나타났다. 해석결과에서는 개구부 주변이 강판으로 보강되지 않는 경우, 개구부가 없는 실험체(SOLID)에 비해서 약 8.4% 내력이 저하되고, 개구부 주변이 강판으로 보강된 실험체(C300S)에 비해서는 약 10.1% 내력이 저하되는 것으로 나타났다. 따라서 개구부가 설치되는 SC구조는 개구부 주변에 보강 여부가 내력에 미치

표 7. 보강판 유·무에 따른 최대내력의 비교

모델명	최대내력(kN)			최대내력 비 (C****/SOLID)	
	실험	해석	해석/실험	실험	해석
SOLID	4872.50	4746.39	0.974	1.0	1.0
C300S(보강)	4665.20	4836.04	1.036	0.957	1.019
C300U(무보강)	4038.30	4346.97	1.076	0.829	0.916

는 영향이 크기 때문에 개구부 주변에 일정 범위 이상의 보강이 반드시 이루어져야 한다.

4.2.4 개구부 위치 변화에 따른 영향

SC구조 벽체에 설치되는 개구부 주변이 모두 강판으로 보강된 225×225 mm 크기의 사각형 개구부를 대상으로 개구부의 위치 변화에 따른 구조거동을 평가하였다. 그림 11에 나타난 모델 중에서 R225S 모델은 구조실험(김원기 등, 2010)이 수행된 실험체이고, 이를 중심으로 상단 좌측(R225S-LU)과 하단 우측(R225S-RD)에 개구부를 설치하는 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 그림 19는 개구부 위치 변화에 따른 해석에서 평가된 하중-변위 곡선의 비교로서 개구부 위치가 최대내력에 미치는 영향을 표 8에 정리하였다. 그림 19에서 보면 SC구조 벽체에 설치되는 동일한 크기의 개구부 위치가 변화하더라도 최대내력 및 연성거동에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 SC구조 벽체에 설치되는 개구부는 개구부 주변에 일정범위의 강판이 보강되는 경우에는 개구부의 위치가 변화하더라도 충분한 내력과 연성거동을 확보할 것으로 판단된다.

4.2.5 개구부 개수 증가에 따른 영향

SC구조 벽체에 설치되는 개구부 주변이 모두 강판으로 보

표 8. 개구부 위치 변화에 따른 최대내력의 비교

모델명	최대내력(kN)			최대내력 비 (R***S/SOLID)	
	실험	해석	해석/실험	실험	해석
SOLID	4872.50	4746.39	0.974	1.0	1.0
R225S	4905.50	4716.79	0.962	1.007	0.994
R225S-LU(FEM)		4774.62			1.006
R225S-RD(FEM)		4681.83			0.986

그림 19. 개구부 위치변화에 따른 개구부의 하중-변위 곡선

그림 20. 복수 개구부의 위치변화에 따른 하중-변위 곡선 비교

표 9. 복수 개구부 위치변화에 따른 최대내력의 비교

모델명	최대내력(kN)			최대내력 비 (R****/SOLID)	
	실험	해석	해석/실험	실험	해석
SOLID	4872.50	4746.39	0.974	1.0	1.0
R225S	4905.50	4716.79	0.962	1.007	0.994
R225S-LUC(FEM)		4857.81			1.023
R225S-RDC(FEM)		4682.61			0.987
R225S-LURD(FEM)		4778.15			1.007

강된 225×225 mm 크기의 사각형 개구부를 대상으로 개구부의 개수 증가 및 위치 변화에 따른 구조거동을 평가하였다. 그림 11중에서 구조실험이 수행된 1개의 사각형 개구부가 설치된 모델(R225S)과 사각형 개구부가 2개 설치된 3개의 모델(R225S-LUC, R225S-RDC, R225S-LURD)에 대해 해석을 수행하였다. 그림 20은 2개의 사각형 개구부가 설치되는 경우, 이들 개구부의 위치변화에 따른 해석에서 평가된 하중-변위 곡선의 비교로서 개구부 개수 증가 및 위치변화가 최대내력에 미치는 영향을 표 9에 정리하였다. 그림 20에서 보면 SC구조 벽체에 설치되는 동일한 크기의 개구부가 2개로 증가한 상태에서 개구부의 설치 위치가 변화하더라도 최대내력 및 연성거동에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 표 9에서 보면, 복수로 개구부가 설치된 상태에서 개구부 위치 변화에 따른 최대내력이 개구부가 없는 모델(SOLID)의 최대내력과 비교하여 약 -1.3%~2.3% 정도의 작은 변화를 보였다. 따라서 SC구조 벽체에 설치되는 개구부는 개구부 주변에 일정범위에 강판이 보강되는 경우에는 개

구부의 개수가 2개로 증가하거나, 복수 개구부의 위치가 변화하더라도 개구부가 없는 경우와 유사한 수준의 내력을 확보할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 원전구조물내 벽체에 설치되는 SC구조를 대상으로 개구부가 구조내력에 미치는 영향을 해석적 방법에 의해서 평가하였다. 김원기 등(2010)이 실험적 연구를 수행한 SC구조 벽체에 대한 비선형 유한요소해석을 수행하고, 실험 및 해석결과와 비교분석을 통해서 해석방법 및 비선형 재료모델의 적용 타당성을 검증하였다. 최종적으로 비선형 해석을 통해서 SC구조 벽체에 설치되는 개구부의 형상, 크기, 위치, 설치개수 및 개구부 주변 보강판의 보강 유·무등이 구조내력에 미치는 영향을 평가하였다.

개구부 주변이 강판으로 보강되지 않는 경우, 개구부가 없는 SC벽체 비해서 약 8.4% 내력이 저하되고, 개구부 주변이 강판으로 보강된 SC벽체에 비해서는 약 10.1% 내력이 저하되는 것으로 나타났다. 따라서 개구부가 설치되는 SC벽체는 개구부 주변의 보강 여부가 내력에 미치는 영향이 크기 때문에 개구부 주변에 일정 범위 이상의 보강이 반드시 이루어져야 한다. 개구부 주변이 보강된 경우는 개구부가 없는 경우와 비교하여 원형 및 사각형 개구부가 존재하여도 내력에는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 개구부 주변에 보강된 강판의 범위가 0.75D(원형)와 0.8B(사각형) 정도 확보되면 충분한 강성증가효과가 발휘되기 때문인 것으로 판단된다. SC벽체에 설치되는 동일한 크기의 개구부는 위치가 변화하더라도 최대내력 및 연성거동에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 SC구조 벽체에 설치되는 개구부는 개구부 주변에 일정범위의 강판이 보강되는 경우에는 개구부의 위치가 변화하더라도 충분한 내력과 연성거동을 확보할 것으로 판단된다. SC벽체에 설치되는 동일한 크기의 개구부가 2개로 증가한 상태에서 개구부의 설치 위치가 변화하더라도 최대내력 및 연성거동에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 SC벽체에 설치되는 개구부는 개구부 주변에 일정범위의 강판이 보강되는 경우에는 개구부의 개수가 증가하거나 복수 개구부의 위치가 변화하더라도 개구부가 없는 경우와 유사한 수준의 내력을 확보할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 R&D정책인프라사업(11기술표준화09-01)에 의한 성능기반 강-콘크리트 합성구조 설계기준개발의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 또한, 본 연구를 지원해주신 한국전력기술(주)와 한국수력원자력에 감사드립니다.

참고문헌

김원기, 이승준, 정철현, 지남용(2010) SC구조 특정주제기술보고서: 규제현안에 관한 실험적 연구 최종보고서, 한국수력원자력,

- 한국전력기술주식회사, 한국강구조학회.
- 대한전기협회(2010) KEPIC SNG 강관콘크리트구조, SN 원자력 구조, 전력산업기준 (KEPIC).
- 최윤철, 최현기, 최창식 (2008) 슬래브가 있는 전단벽의 구조적 거동에 대한 개구부의 영향, **대한콘크리트학회 논문집**, 대한 콘크리트학회, 제20권 제1호, pp. 3-11.
- 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 (1966) *Recommendations for design and construction of reinforced concrete structures*, AIJ.
- Hognestad, E. (1951) *A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members*, Bulletin 399, University of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, Ill.
- Gintaris, K. and Jamshid, G. (1999) Stress-strain relations for cracked tensile concrete from RC beam tests, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 1, pp. 64-73
- 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.
- 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.
- (접수일: 2012.6.29/심사일: 2012.8.3/심사완료일: 2012.8.19.)