철근 콘크리트와 강판 콘크리트 간 이질접합부로 구성된 구조물의 휨 및 전단거동 특성 연구

A Study on Flexural and Shear Behavior of the Structure with Steel Plate Concrete to Reinforced Concrete Member's Connection

황경민* · 이경진** · 이종보*** · 원덕희****

Hwang, Kyeong Min · Lee, Kyung Jin · Lee, Jong Bo · Won, Deok Hee

Abstract

This paper describes the experimental study on the structural behavior of the joint plane between a RC(Reinforced Concrete) wall and a SC(Steel Plate Concrete) wall under out-of plane flexural loads and in-plane shear loads. The test specimens were produced with L and I shape to assess efficiently flexural and shear behavior of the structures. In order to consider dynamic loads such as earthquake, cyclic loading tests were carried out. As results of the out-of plane flexural tests, ductile failure mode of vertical bars was shown under a push load and the failure load was more than nominal strength of the specimen. And the latter test was performed to verify the variation which was composition presence of horizontal bars in the SC member. The test results showed that capacity of the specimens was more than their nominal strength regardless of composition presence of horizontal bars.

Keywords : steel plate concrete, out-of-plane flexural behavior, In-plane shear behavior, cyclic loads, vertical bars, horizontal bars, non-contact lap splice

요 지

본 연구에서는 철근 콘크리트 벽과 강판 콘크리트 벽이 이질접합 형태로 만나는 구조물의 휨 및 전단거동 특성을 검토하기 위하여 L형과 I형 타입의 실험체를 제작하고 구조실험을 수행하였다. 실험 시, 지진하중 등에 대한 실험체의 동적특성을 확인하기 위하여 Push 및 Pull을 반복하는 싸이클 하중을 구현하고자 하였다. L형 실험체에 대한 면외 휨 실험결과, 실험체의 공칭강도를 초과하는 휨 성능을 발휘하였으며, 이에 따라 설계에 적용된 수직철근의 미결침 이음길이의 타당성을 확인할 수 있었다. 한편, 강판 콘크리트 벽 내에 수평철근의 배근 유무를 변수로 구성한 두 개의 I형 실험체에 대한 면내 전단 실험결과, 수평철근의 배근 유무에 상관없이 공칭강도를 초과하는 전단 성능을 보였다.

핵심용어 : 강판 콘크리트, 면외 휨 거동, 면내 전단 거동, 반복하중, 수직철근, 수평철근, 미결침 이음길이

1. 서 론

최근들어, 국내 APR+ 신형 원자력발전소 구조물에 대한 설계가 이루어지면서, 건설공기를 단축시키고 건설단가를 절감시키기 위해 철근 콘크리트(Reinforced Concrete, RC) 구조 대신에 강판 콘크리트(Steel plate Concrete, SC) 구조를 일부 적용하는 방안이 검토되고 있다. SC 구조는 구조체의 양면에 강판을 설치하고 내부에 콘크리트를 타설하는 구조 형식으로, 강판과 스티드를 이용하여 콘크리트와 일체화시키는 구조로서, 강판과 스티드가 RC 구조의 거푸집과 구조재의 역할을 동시에 수행하는 개념이다. 시공성 측면에서 SC

구조와 RC 구조를 비교해 보면, 단순벽체 구조인 경우 RC 구조는 철근 조립에서 거푸집 제거까지 소요되는 기본공기가 28일이고, SC 구조는 14일로서 SC 구조가 RC 구조에 비해 공기단축 면에서 큰 장점을 가진 것으로 알려져 있다.

기존의 RC 구조로 된 원전 구조물에 SC 구조를 일부 적용하게 되면, RC 구조와 SC 구조 간의 연결부위에서 이질접합부가 발생하게 되지만, 접합부의 파괴거동이나 강도분석에 대한 연구가 미비한 상태이기 때문에 이를 설계에 반영시키기 위해 이질접합부에서의 구조적 거동 특성을 상세히 검토할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 원전 구조물 내 RC벽과 SC벽이 이질접합 형태로 만나는 경우에 대하여, 이

*정회원 · 교신저자 · 한국전력공사 전력연구원 선임연구원 (E-mail : hkm316@kepeco.co.kr)

**한국전력공사 전력연구원 책임연구원

***한국수력원자력(주) 중앙연구원 선임연구원

****정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학부 박사 (E-mail : thekeyone@naver.com)

를 모사한 L형 및 I형의 실험체를 제작하고 면외 휨 및 면내 전단실험을 통해 이질접합 구조물의 거동 특성을 확인하고자 하였다.

관련 선행논문인 “이경진, 황경민, 함경원, 김우범 (2012.04), ‘강판 콘크리트 구조 이질접합부의 면외 휨/면내 전단 하중 특성에 관한 실험연구’, 한국강구조학회 논문집 제 24권 제 2호”에서도 RC벽과 SC벽이 이질접합 형태로 만나는 L형 및 I형 실험체에 대한 면외 휨 및 면내 전단실험을 수행한 결과를 기술하고 있다. 그러나 이 논문에서는 L형 실험체의 경우 철근 정착길이가 짧아 이론내력 대비 96% 수준에서 정착철근 인발파괴 모드가 발생하였고, I형 실험체의 경우 콘크리트 기초부 설계 오류로 원하는 전단파괴 모드를 얻을 수 없었다. 따라서, 본 연구에서는 L형 실험체의 정착철근에 대한 상세안을 변경하여 정착부의 연성 항복 거동을 유도하고자 하였으며, I형 실험체에서는 콘크리트 주두부 및 주각부의 충분한 보강을 통해 원하는 접합부의 전단파괴 모드를 확인하고자 하였다. 또한, I형 실험체를 SC부 수평철근의 배근 유무에 따라 변수를 설정함으로써 미접침 이음길이 구간의 수평철근의 필요성을 추가적으로 검증하고자 하였다.

2. 실험개요

2.1 실험체의 구성

2.1.1 면외 휨 L형 실험체

RC벽과 SC벽이 수직방향 이질접합 형태로 만나는 구조물을 모사하기 위하여 L형 타입의 실험체를 제작하였다. 상부 수직방향의 RC부는 1,500 mm×1,800 mm×450 mm(길이×높이×두께)로, 하부 수평방향의 SC부는 2,000 mm×1,800 mm×450 mm(길이×높이×두께)로 구성하였다. 한편, L형 실험체 이질접합부의 내측 수직철근 D25는 정착되는 콘크리트의 양이 충분하기 때문에 철근 콘크리트 설계기준에서의 정착길이 개념으로 l_{dh} 길이와 같고리 길이 h 를 적용하였으며, 외측 수직철근은 SC부 마감부이므로 연성 미접침 이음길이의 개념을 적용함으로써 면외 휨 하중에 대한 접합부 철근 길이의 타당성을 확인하고자 하였다.

그림 1. 면외 휨 L형 실험체의 구성

SC 구조의 접합부에 관한 설계식으로는 벽체와 기초부가 접합할 경우, 대한전기협회에서 제정한 KEPIC(Korea Electric Power Industry Code)-SNG에서 이형철근을 사용하는 정착철근의 SC 벽체 내부 정착길이가 l_d 는 300 mm 이상이어야 하며 다음과 같다.

$$l_d = \left[\frac{F_{yr} \Psi_e \Psi_s \Psi_{sc}}{1.1 \sqrt{f_{ck}} \frac{c_b + K_{tr}}{d_b}} \right] d_b \quad (1)$$

(가) 연직방향 정착철근이 스테드 몸체길이의 2/3 구간 외에 배치된 경우 :

$$\frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \leq 2.5 \quad (2)$$

(나) 연직방향 정착철근이 스테드 몸체길이의 2/3 구간 내에 배치된 경우 :

$$\frac{c_b + K_{tr}}{d_b} \leq 3.0 \quad (3)$$

여기서, F_{yr} : 상부철근의 설계기준 항복강도(MPa)

f_{ck} : 콘크리트의 설계기준 압축강도(MPa)

Ψ_e : 에폭시 도막계수, Ψ_s : 철근의 크기 계수

Ψ_{sc} : 콘크리트 파단에 대한 강판콘크리트 벽체계수

c_b : 철근간격, K_{tr} : 횡방향 철근자수

$$\left(K_{tr} = \frac{0.8 A_{tr} F_{ytr}}{10 s n} \right) \quad (4)$$

A_{tr} : 정착보강재와 스테드의 전채단면적

F_{ytr} : 정착보강재 또는 스테드의 설계기준 항복강도 중에서 최소값(MPa)

s : 스테드 중심 간격(mm)

n : 한 그룹의 스테드 수

d_b : 철근 공칭지름(mm)

식 (1)에 의해 이질접합부의 외측 철근 D25에 대한 연성 미접침 이음길이를 계산하면 730 mm이며, 이를 다시 정착길이 l_{dh} =408 mm, 같고리 길이 h =322 mm로 구성하였다.

한편, 수평철근은 D13@150으로 배근하였으며, SC부의 상하부 표면강판은 SM490 6t 강판을 사용하였고, 스테드는

표 1. 면의 휨 L형 실험체의 제원

구분	제원
RC부 길이, 높이, 두께	(1,550 × 1,800 × 450)mm
SC부 길이, 높이, 두께	(2,000 × 1,800 × 450)mm
강판 두께(SM490)	6 mm
스터드	φ13@140(길이방향), φ13@150(높이방향)
수직철근	D25@150
횡철근	D13@150
연성 미접침 이음길이	730 mm (l_{dh} =408 mm, h=322 mm)

φ13을 SC부 길이방향으로 140 mm 간격으로, 높이방향으로 150 mm 간격으로 배치하였다. 실험체의 구성 및 제원은 그림 1 및 표 1에 나타내었다.

2.1.2 면내 전단 I형 실험체

RC벽과 SC벽이 수평방향 이질접합 형태로 구성되어 있는 경우, 이질접합부에서 면내 전단강도를 평가하고 파괴형상을 검토하기 위하여 I형 타입의 실험체를 제작하였다. RC벽체와 SC벽체가 이질접합부로 접합된 구조를 모사한 부분(웹부)의 제원은 1,080 mm×240 mm×1,600 mm(길이×두께×높이)로서, 상부(높이 1,000 mm)가 SC벽체이고, 하부(높이 600 mm)가 RC벽체이다. 한편, 웹부에 면내 전단하중을 효율적으로 가력하기 위하여 웹부 양쪽에 플랜지 부 및 상단 주두부를 구성하였으며, 실험체의 지지를 위한 하단 주각부를 설계하였다.

RC벽체 내부에는 수직철근이 D16@120, 수평 전단근이 D16@200으로 배근되어 있고, RC부에서 올라온 수직철근 D16은, 식 (1)에 의하여 상부에 위치한 SC부에 연성 미접침 이음길이 620 mm로 구성하였다. 한편, 본 실험에서는 SC부 수직철근의 연성 미접침 이음길이 부분에 수평철근 배근 유무에 따른 실험체의 전단거동을 확인하기 위하여, 이를 변수로 한 두 가지 실험체를 설계하였다.

즉, 그림 2와 같이 SC부 수평철근 배근 실험체는 미배근 실험체에 비해 연성 미접침 이음길이 부분에 수평 전단근

D16이 3단 더 배열되었다. 따라서, 실제 SC벽체 제작 시 시공성 확보가 어려운 SC부의 수평철근을 변수로 선정함으로써 수평철근이 없는 경우에도 본 구조물이 전단 내력을 확보하는 지를 확인하고자 하였다.

웹부 SC벽체 부분은 전단하중 가력 시 콘크리트의 균열 양상을 직접 확인하기 위하여, 양쪽 표면강판 3 mm(두께) 두 개를 벽체 내부 중앙 SM490 6 mm(두께)로 치환 배치하였다. 플랜지부는 표면강판 SM490 4.5 mm로 구성하였다. 실험체의 구성 및 제원은 그림 2 및 표 2에 나타내었다.

실험에 앞서, 실제 재료강도를 반영한 실험체의 공칭강도를 산정하기 위하여 재료실험을 수행하였으며, 이 재료실험에 의한 항복 강도값을 설계 시 사용했던 설계강도와 비교하면 표 3과 같다.

표 2. 면내 전단 I형 실험체의 제원

구분	제원
벽체(웹부) 길이, 높이, 두께	(1,080 × 1,600 × 240)mm
플랜지부 길이, 높이, 두께	(960 × 1,600 × 240)mm
상단 주두부 너비, 폭, 두께	(1,800 × 1,800 × 600)mm
하단 주각부 너비, 폭, 두께	(3,400 × 1,600 × 800)mm
벽체 높이의 구성	SC부 1,000 mm, RC부 600 mm
강판 두께(SM490)	벽체 내부 6 mm, 플랜지 및 주두부 4.5 mm
스터드	φ8@120
수직철근	D16@120
횡철근	D16@200
연성 미접침 이음길이	620 mm

표 3. 실험체의 재료강도

실험 재료	규격	설계 항복강도 (MPa)	재료 항복강도 (MPa)
콘크리트	28일 압축강도	35	44.8
강판(SM490)	6 mm	325	463
철근(SD40)	D25	420	489.2
	D16	420	444.3

(a) SC부 수평철근 배근 실험체

(b) SC부 수평철근 미배근 실험체

그림 2. 면내 전단 I형 실험체의 구성

2.2 이론 파괴강도 산정

표 3의 설계강도와 재료강도 및 이론식을 이용하여 각 실험체의 공칭 파괴강도를 산정하였으며, 예상 파괴모드는 각각 RC부 휨 파괴 및 RC부 전단 파괴이다.

2.2.1 면외 휨 L형 실험체

먼저, 설계강도를 이용하여 실험체의 공칭 파괴강도를 산정하기 위해, 강도설계법에 의해서 a 값을 구하면,

$$a = \frac{A_{st} \times F_{yr}}{0.85 f_{ck} b} = \frac{12 \times 506.7 \times 420}{0.85 \times 35 \times 1,800} = 47.7 \text{ mm}$$

RC부의 공칭 모멘트는

$$M_n = 0.85 f_{ck} a b \left(d - \frac{a}{2} \right) = 946.3 \text{ kN-m}$$

$$P_n = \frac{M_n}{l} = \frac{946.3}{1250} = 757 \text{ kN}$$

따라서, 이 모멘트를 유발할 수 있는 면외 휨 강도는 757 kN이다.

위와 동일한 방법으로 표 3의 재료강도에 의해 실험체의 공칭 파괴강도를 계산하면 설계강도 로 계산한 값보다 17.2% 증가한 약 887 kN이다.

2.2.2 면내 전단 I형 실험체

먼저, 설계강도를 이용하여 실험체의 공칭 파괴강도를 산정하기 위해, 콘크리트 면내 전단 강도를 구하면

$$V_c = 0.16 \times \sqrt{f_{ck}} \times b \times l = 0.16 \times \sqrt{35} \times (1,080 + 2 \times 240) \times 0.8 \times 240 = 283.5 \text{ kN}$$

철근 면내전단 강도는

$$V_s = \frac{A_s F_y d}{s} = \frac{(2 \times 198.6) \times 420 \times (0.8 \times 1,560)}{200} = 1,041.0 \text{ kN}$$

따라서, 총 콘크리트 면내 전단 강도는 1,324 kN이다.

마찬가지 방법으로 표 3의 재료강도에 의해 실험체의 공칭 파괴강도를 계산하면 설계강도로 계산한 값보다 7.4% 증가한 약 1,422 kN이다.

2.3 실험방법

2.3.1 면외 휨 L형 실험체

실험체의 면외 휨성능을 평가하기 위한 하중가력 위치는

그림 3. 면외 휨 L형 실험체 실험장치의 구성

표 4. 하중가력 계획

가력단계		목표 최대하중	반복횟수
1	Push	591 kN	2cycle
	Pull	-591 kN	
2	Push	887 kN	2cycle
	Pull	-887 kN	
3	Push	파괴 시까지	-

그림 3과 같이 실험체 SC부 바닥으로부터 높이 1,700 mm 지점으로 정하고 981 kN 용량의 유압가력기 2대를 이용하여 면외 휨 하중을 구현하고자 하였다. 한편, 실험체 하부에는 200 mm 높이의 강성받침대를 H형강으로 구성하여 RC 벽과 SC벽 사이 접합부의 실제 거동을 반영하고자 하였다. 그리고, 실험체와 하부 기초를 강봉 6개 및 하이드로 너트로 고정하였으며, 하중 가력 시 실험체 하단의 밀립을 방지하기 위한 장치를 구성하였다.

하중가력 방법은 표 4와 같이 실험체의 동적거동을 평가하기 위하여 좌우 수평방향으로 실험체가 항복할 때까지 반복하중을 가력하는 방법을 선정하였다. 즉, 1단계에서는 파괴강도의 약 2/3의 하중을 가력하여 탄성 범위 내에서의 반복하중에 따른 강성 및 강도 저하를 확인하고자 하였으며, 2단계에서는 실험체의 항복 시점에서의 거동을 분석하고자 하였다. 각 하중가력 단계마다 실험체의 콘크리트 균열을 확인하였으며, 실험체 내부 및 외부에 설치한 변형률 게이지와 변위계를 이용하여 실시간으로 실험체의 변형율과 변위를 측정하였다. 변형률 게이지는 RC부 내부의 수평철근 및 수직 철근과 SC부 내부의 강판 및 스티드에 부착하였다.

2.3.2 면내 전단 I형 실험체

RC벽-SC벽 이질접합부의 면내 전단실험에서는 그림 4와 같이 SC벽체 상단의 주두부에 4개의 강봉을 관통시키고 이를 981 kN 유압가력기 2대와 결합하여, 주두부(바닥면으로부터 2,700 mm 높이)에 동적하중을 모사한 양방향 반복하중을 가력함으로써, 실험 대상인 웹부 벽체의 면내 전단거동을 유도하고자 하였다. 또한, 바닥 홀(12개) 직경(60 mm)과 강봉용 볼트(12개 각 55 mm) 간의 유격을 없애고 하중가력 시 기초부의 밀립을 방지하기 위해 실험체를 한 쪽으로 민

그림 4. 면내 전단 I형 실험체 실험장치의 구성

표 5. 하중가력 계획

가력단계		목표 최대하중	반복횟수
1	Push	883 kN	2cycle
	Pull	-883 kN	
2	Push	1,373 kN	2cycle
	Pull	-1,373 kN	
3	Push	파괴 시까지	-

다음, 유격이 발생한 쪽에 밀림방지 장치를 설치하였다.

이 실험에서도 표 5와 같이 좌우 수평방향으로 실험체가 항복할 때까지 반복하중을 가력하는 방법을 선정하였으며, 각 단계별로 탄성 범위와 항복 부근에서의 반복하중에 따른 강성 및 강도 저하를 확인하고자 하였다.

3. 실험결과

3.1 면외 휨 실험 결과

그림 3과 같이 구성한 실험체에 면외 휨 하중을 가력한 결과, 1단계 최대하중 581kN 가력(Push) 시 가력부 위치에서 10.2 mm의 변위가 발생하였으며, -321 kN 가력(Pull) 시 접합부 부근 SC부 패널 존에 의한 전단균열이 발생하여 계속 Pull 하중 가력이 진행되지 못 하였다. 따라서, 계획하던 양방향 반복하중 가력을 중단하고, 접합부 외측 수직철근의 연성 미접침 이음길이의 검증을 위한 Push 하중 단조가력 실험을 진행하였으며, Push 하중에 의한 휨 파괴 후 다시 Pull 하중 파괴실험을 진행하였다.

2단계 Push over 단조가력 실험결과, 804 kN 가력 시 접합부 부근 SC 구조에 전단균열이 발생하기 시작하였고, 892 kN 가력 시 접합부 압축부에서 콘크리트 압괴 파괴가 발생하였다. 이후 실험체는 이론값에 의한 예상 파괴하중인 3.2.1절의 887 kN을 초과하는 최대하중 922.8 kN에서 파괴되었으며, 수직철근 인발파괴 모드가 아닌 연성 항복파괴 거동을 보였다.

따라서, 식 (1)의 연성 미접침 이음길이(730 mm)에 의해 이질접합부에 $l_{dl}=408$ mm, $h=322$ mm의 정착길이를 외측부 수직철근을 구성하였을 경우, 연성거동을 통하여 충분한

그림 6. 면외 휨 L형 실험체의 하중-변위 곡선

그림 7. 2단계 Push over 하중에 의한 실험체 파괴형상

내력을 확보하고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 이질접합부에서 Pull 하중 작용 시 전단패널 존에 의한 전단균열을 방지하기 위한 보강이 필요함을 확인할 수 있었다.

실제 실험 시 적용되었던 하중가력 이력곡선 및 하중-변위 곡선은 그림 5 및 6과 같다.

그림 7은 2단계 Push over 단조가력 실험에 대한 파괴형상을, 그림 8은 Pull 하중 가력 시 이질접합부의 패널 존에 의한 전단균열 형상을 보여주고 있다.

실험체 최종 파괴 후 균열도를 그림 9에 나타내었다. 그림 9에서 패널 존에서의 전단균열이 두 수직철근(내측 및 외측) 사이의 공간을 통해서 진행된 것을 확인할 수 있으며, 따라

그림 5. 하중가력 이력곡선

그림 8. 1단계 Pull 하중에 의한 접합부 전단파괴 형상

서 이질접합부 수직철근 사이에 이 전단균열을 방지하는 보강이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

실험체의 하중전이를 파악하기 위해 RC부 수직철근 및 수평철근, SC 상하부 표면장판, SC 내부 스테드, 콘크리트 표

면에 변형을 게이지를 각각 설치하여 실험 시 변형율을 계측하였다. 2단계 Push over 하중에서 최대 922.8 kN에서 실험체가 파괴되었을 때 하중 분담이 가장 큰 부재는 RC부 수직철근(D25)이다. 이질접합부 외측부 및 내측부에 설치된 대표적인 수직철근에 대한 하중-변형률 실험결과를 그림 10에 나타내었다.

이질접합부 외측부에 설치한 수직방향 철근 중 RC부 중앙부에 위치한 R-VO-52 게이지(최대 변형률 $16,918 \times 10^{-6}$)와 측면에 위치한 R-VO-51 게이지(최대 변형률 $19,881 \times 10^{-6}$)에서 변형률값이 가장 크게 측정되었다. 수직철근은 항복강도인 489.2 MPa를 초과하여 항복변형이 계속 진행되면서 실험체가 최종적으로 파괴되었다.

이질접합부 내측부에 설치한 대표적인 수직철근의 하중-변형률 관계를 그림 11에 나타내었다. 이질접합부 내측부에 위치한 수직철근 중 이질접합부에 인접한 R-VI-41 게이지 부위의 철근에서 항복을 초과하는 최대 변형률($5,514 \times 10^{-6}$)이 발생하였으며, 그 다음으로는 R-VI-43 게이지에서 항복에 근접한 큰 변형률값($2,418 \times 10^{-6}$)이 계측되었다.

그림 9. 면외 휨 L형 실험체의 균열도

그림 10. 수직철근(외측부) 하중-변형률 계측 결과

그림 11. 수직철근(내측부) 하중-변형률 계측 결과

3.2 면내 전단 실험 결과

그림 4와 같이 구성한 실험체에 면내 전단 하중을 가력한 결과, SC부 수평철근 배근 및 미배근 실험체 모두 이론에 의한 공칭 전단내력인 3.2.2절의 1,422 kN을 초과하는 내력을 보였으며, 유압가력기 두 대의 최대용량인 1,962 kN까지 가력했음에도 실험체가 파괴되지 않았다.

표 6은 두 실험체의 각 하중 단계별 가력부에서의 최대변위를 비교한 것을 나타내고 있으며, 두 실험체의 변위를 비교한 결과, 큰 차이는 보이지 않는 것을 알 수 있다. 8단계까지는 SC부 수평철근 미배근 실험체의 경우, 8단계까지는 RC부 벽체에서 전단균열이 진전되다가, 그 이후에는 SC부 벽체에서도 전단균열이 발생하였다. 또한 마지막 단계에서도 모든 RC부 철근이 항복하지 않는 거동을 보였다. 한편, SC부 수평철근 배근 실험체의 경우에는 SC부에 수평철근이 보강되어 있음에도 불구하고 미배근 실험체보다 빠른 단계인 4단계부터 SC부 벽체에 전단균열이 발생되기 시작하였으며, 일부 수직철근은 마지막 단계에서 항복에 도달하는 경향을 보였다.

두 실험체 모두 이론값에 의한 전단내력을 크게 상회하는

것은 이론식이 수평철근과 콘크리트의 전단내력만으로 전체 전단내력을 예측하는 데 기인한 것으로 판단되며, 따라서 수직철근이 일정부분 전단에 대한 내력을 발휘함으로써 큰 실험하중 값을 나타낸 것으로 판단된다. 또한, 45도 각도의 전단파괴선을 가정하면 RC부 수평철근들이 일정한 간격으로 배열되어 전단보강 역할을 하고 있으며, SC부 강판과 RC부 수평철근이 일정한 간격으로 떨어져 있어도 이들 모두 전단보강 역할을 하는 것을 알 수 있었다. 따라서, SC부 미접침 이음 구간에서 수평철근이 없어도 실험체는 면내 전단내력을 확보하는 것으로 판단된다. 실제 실험 시 적용되었던 하중-변위 곡선은 그림 12와 같으며, 두 실험체의 변위에 대한 가력하중의 기울기가 유사함을 알 수 있다.

그림 13은 SC부 수평철근 미배근 실험체와 배근 실험체에 대한 웹부(SC부 및 RC부)의 최종 콘크리트 표면 균열형상을 보여주고 있다.

면내 전단 I형 실험체의 하중전이를 파악하기 위해 내부 철근에 스트레인 게이지를 설치하여 계측하였다. 우선 SC부 수평철근 미배근 실험체의 경우, 실험체가 약 1,962 kN의 하중을 받을 때까지 모든 내부철근들은 항복강도인 444.3 MPa에 도달하지 못하고 있었다.

우선 SC부 수평철근 미배근 실험체에 대하여, 실험체의 웹부 벽체 내부 수평철근 게이지로 계측된 하중-변형률 관계를 그림 14에 나타내었다. 모든 수평철근은 항복에 도달하지

표 6. 주두부에서의 하중 단계별 변위 비교

하중가력 단계	SC부 수평철근 미배근 실험체		SC부 수평철근 배근 실험체	
	가력 최대 하중(kN)	상단부 최대 변위(mm)	가력 최대 하중(kN)	상단부 최대 변위(mm)
1단계, Push	866.9	2.7	868.9	2.6
2단계, Pull	-858.1	-2.6	-870.8	-2.2
3단계, Push	865.9	2.9	869.8	2.8
4단계, Pull	-875.7	-2.7	-891.4	-2.5
5단계, Push	1,356.3	5.3	1,343.5	5.2
6단계, Pull	-1,360.2	-5.4	-1,405.3	-5.1
7단계, Push	1,371.0	5.4	1,349.4	5.3
8단계, Pull	-1,325.9	-5.4	-1,344.5	-5.0
9단계, Push	1,940.7	8.8	1,962.3	9.2
10단계, Pull	-1,704.4	-6.9	-1,962.3	-8.7
11단계, Push	1,929.0	9.3	-	-

그림 12. 면내 전단 I형 실험체의 하중-변위 곡선

그림 13. 면내 전단 I형 실험체의 균열 형상 : 수평철근 미배근(좌) 및 배근(우) 실험체

그림 14. SC부 수평철근 미배근 실험체의 웹부 수평철근 하중-변형률

그림 15. SC부 수평철근 배근 실험체의 웹부 수평철근 하중-변형률

않았으며, 접합부 부근의 우측 게이지 W-H33의 최대 변형률($2,130 \times 10^{-6}$)이 항복에 도달하기 직전의 양상을 보였다. 그 다음으로는 접합부 부근 중앙 게이지 W-H32의 최대 변형률($2,030 \times 10^{-6}$) 및 좌측 게이지 W-H31의 최대 변형률

($1,885 \times 10^{-6}$)이 크게 계측되었다. 즉, 접합부 부근인 최상부 수평철근의 변형률이 가장 크게 계측되었다.

한편, SC부에 수평철근이 배근된 실험체의 경우에도 그림 15와 같이 수평철근이 항복에 도달하지 않았으며, 최상부의

좌측 게이지 W-H61의 최대 변형율($2,209 \times 10^{-6}$)이 가장 크고 항복에 근접한 것으로 나타났다. 그 다음으로는 중앙부 좌측 게이지 W-H41의 최대 변형율($2,085 \times 10^{-6}$) 및 하부 좌측 게이지 W-H21의 최대 변형율($1,890 \times 10^{-6}$)이 크게 계측되었다. 즉, 수평철근 미배근 실험체에서의 수평철근의 최대변형율과 유사하거나, 오히려 이보다 상회하는 결과가 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 원전 구조물 내 RC벽과 SC벽이 이질접합 형태로 만나는 경우에 대하여, 이를 모사한 L형 및 I형의 실험체를 제작하고 면외 휨 및 면내 전단 실험을 통해 이질접합 구조물의 거동 특성을 확인하였다.

수직방향 이질접합 형태인 L형 실험체를 대상으로 동적하중을 모사한, Push 및 Pull 반복하중에 의해 면외 휨 하중을 구현하고자 하였으나, 1단계 Pull 하중가력(321 kN) 시 이질접합부의 전단패널 존 내 콘크리트 전단균열 파괴가 발생하면서 반복하중 가력이 중단되었다. 따라서, 수직방향 이질접합 구조물 설계 시 접합부의 전단패널 존에 대한 보강이 검토되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 수직철근의 접합부의 연성 미접침 이음길이의 검증을 위해, KEPIC-SNG 설계기준식에 따른 730 mm 길이($l_{dh}=408$ mm, $h=322$ mm)로 실험체를 설계하고 실험을 수행한 결과, Push 하중 가력에 의한 외측부 수직철근의 최종 파괴모드가 정착길이에 의한 인발파괴가 아닌, 연성 항복거동을 보였다. 따라서 설계기준식의 접합부 철근의 연성 미접침 이음길이의 적정성을 확인할 수 있었으며, 730 mm의 길이를 $l_{dh}=408$ mm, $h=322$ mm로 반영하여 설계가 가능함을 알 수 있었다.

한편, 수평방향 이질접합 형태인 두 개의 I형 실험체를 대상으로 SC부 수평철근의 유무를 변수로 하여 실험을 수행한

결과, 하중의 크기에 따른 변위의 크기가 유사하였으며, 두 실험체 모두 예상 파괴하중인 1,422 kN을 초과하는 면내 전단내력을 발휘하는 것으로 나타났다. 이는 이론식이 수평철근과 콘크리트의 전단내력만으로 전체 전단내력을 예측하는 데 기인한 것으로 판단되며, 따라서 수직철근이 일정부분 전단에 대한 내력을 발휘함으로써 큰 실험하중 값을 나타낸 것으로 판단된다. 또한, 45도 각도의 전단파괴선을 가정하면 RC부 수평철근들이 일정한 간격으로 배열되어 전단보강 역할을 하고 있으며, SC부 강판과 RC부 수평철근이 일정한 간격으로 떨어져 있어도 이들 모두 전단보강 역할을 하는 것을 알 수 있었다. 따라서, SC부 미접침 이음 구간에서 수평철근이 없어도 실험체는 면내 전단내력을 확보하는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부 기반기금과제인 ‘원전기기/구조물 복합모듈화 기술개발’의 일부로서 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 대한전기협회(2010) 전력산업기술기준(KEPIC), SN 원자력구조 - SNG 강판콘크리트구조.
- 이경진, 황경민, 함경원, 김우범(2012.04) 강판콘크리트 구조 이질접합부의 면외 휨/면내 전단하중 특성에 관한 실험연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제24권 제2호(통권 117호), pp.137-147.
- 지식경제부(2010.06) 원전기기/구조물 복합모듈화 기술개발, 공통 핵심기술개발(세부 2과제), 1단계 보고서 Vol.7/7.

(접수일: 2012.5.10/심사일: 2012.7.17/심사완료일: 2012.8.20)