

원전 SC구조 벽체-지지대 접합부의 거동특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Behavior of the SC Structure's Wall-Support Joint for Nuclear Power Plants

김강식, 김갑순, 강태경, 서용표
한전 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

본 연구에서는 원전 구조물 적용성이 검토되고 있는 SC(강판-콘크리트) 합성구조 벽체-지지대 접합부의 거동에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 9개의 실규모 실험체에 대하여 접합부에 일축 모멘트를 유발시키도록 수평 단조가력실험을 수행하였다.

본 연구에서의 주 관심사는 SC 합성구조 접합부 시스템의 거동성능을 규명하는 것이다. 그러기 위해서 지지대의 위치, 강판의 두께, 지지대의 단면높이의 변수가 접합부의 거동성능에 미치는 영향을 검토하였다. 시스템의 거동을 평가하기 위해 횡하중-변위관계, 강판의 변형률, 강판의 변형, 지지대의 플렌지, 웨브에서의 변형률 등을 계측하고 분석하였다.

Abstract

An experimental study on the behavior of SC(steel plate - concrete) structure's wall-support joint for nuclear power plants was performed. Nine full scale specimens were tested with horizontal monotonic load, all acting in the same plane causing uni-axial moment on the SC structure's wall-support beam joint.

The major focus relates to the identification of the behavior and capacity of the SC composite joint system. The effects of variations of the location of support, the thickness of steel-plate and the depth of support were studied.

The horizontal force-displacement relationship, steel-plate strains, plate deformation, support strains were observed and analyzed in order to evaluate the behavior of the system.

1. 서론

최근 해외의 원전에 적용되고 있는 SC(강판 콘크리트, Steel Concrete)구조는 샌드위치식 합성구조의 일종으로 일반적인 SRC(Steel Reinforced Concrete)구조와는 다르게 외부 설치되는 강판은 구조재로서의 기능뿐만이 아니라 거푸집으로도 사용이 가능하여 기존의 철근콘크리트 구조에서 주공정인 철근가공조립 및 거푸집설치·해체 공정이 생략됨으로써 획기적인 공기 단축이 가능한 공법이다. 해외에서는 일본 및 미국을 중심으로 30여년 전부터 원자력구조물에 이러한 SC구조를 사용한 모듈화공법 적용에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 그러나 현재 국내 원전의 건설기술은 모듈화 설계기준, 설계기법 및 시공기술 기반이 상대적으로 취약하고 구조물을 제외한 가설, 설비 및 운반 등에 제한적으로 적용됨으로써 건설공기 단축에는 한계성을 갖고 있으므로 국내에서도 대외 경쟁력 확보를 위해 복합구조 분야에 대한 연구가 시급한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 원자력발전소 건설시장에서 국제경쟁력을 확보하고 건설공기를 획기적으로 단축하기 위하여 제안된 SC 합성구조의 거동특성을 파악하고자 SC구조 벽체-지시대 접합부의 거동에 대한 기초실험 연구를 수행하여 원자력발전소 구조분야에 SC(강판-콘크리트)합성구조의 적용성 평가를 위한 기초자료를 확보하고자 하였다.

2. SC 구조의 특징 및 거동

원전에 적용할 SC구조는 그림 1에서 보는 바와 같이 다양한 형태로 구성되고 있으나 SC구조의 기본형식은 그림 2와 같이 강판과 스테드 볼트를 용접으로 연결하고 콘크리트를 채워 강판과 콘크리트의 합성작용으로 외력에 저항하도록 하는 합성구조이다.

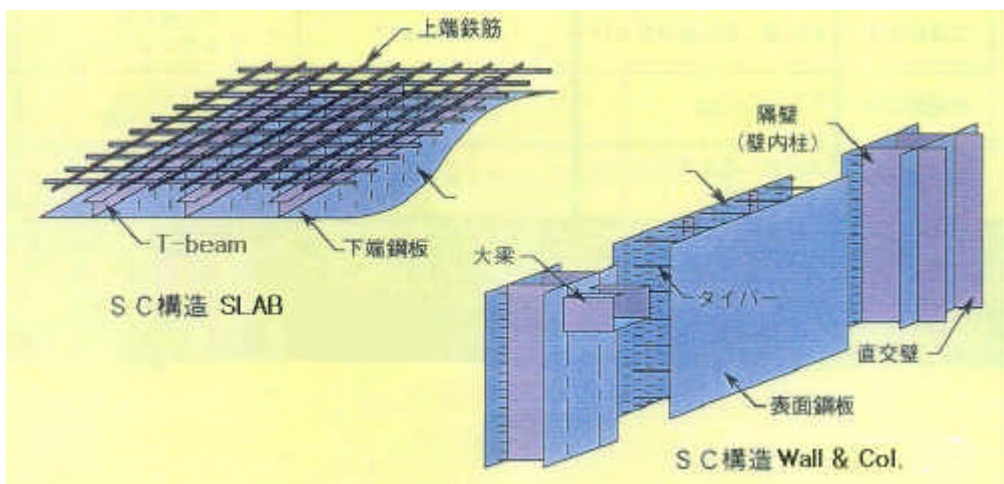
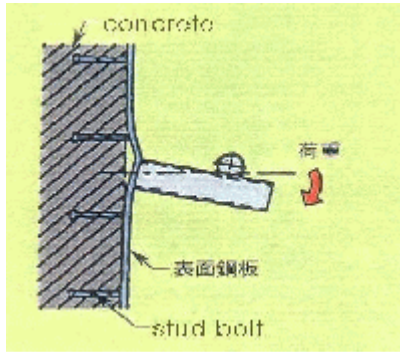
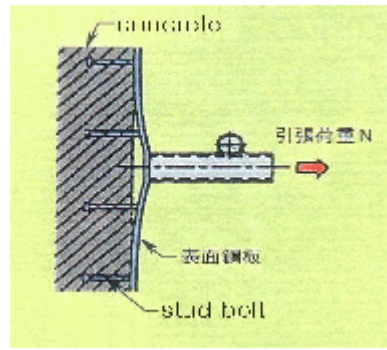


그림 1. 원전 적용 SC 구조

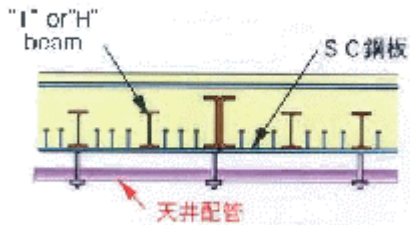


(a) 벽체-Support 접합부

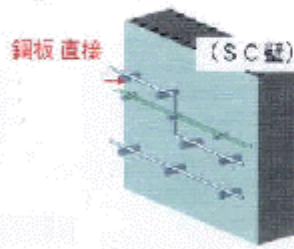


(b) 천장-Support 접합부

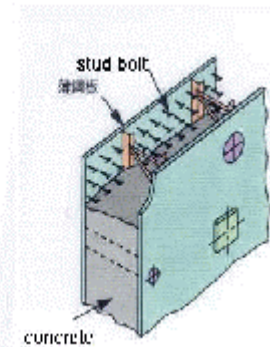
그림 2. 지지대(Support) 접합부 형상



(a) 슬래브



(b) 벽체 경량물용



(c) 벽체 중량물용

그림 3. 지지대의 형태 및 용도

2.1 SC구조 벽체-지지대(Support) 접합부의 설계

SC구조에서 지지대 설치를 위해서는 그림 3(c)에서와 같이 노출된 강판에 별도의 보강판(Embed Plate)등을 설치하여야 한다. 그러나 일정규모 이하의 경량물용 지지대의 경우는 SC구조 벽체의 외부 강판에 직접설치가 가능할 것으로 검토되었다. SC구조의 외부 강판에는 기본설계 당시 계획된 부착물외에도 발전소 운영 기간동안 수도배관 증설, 전선관 증설 등 추가적인 부착물이 설치될 가능성이 많을 것으로 판단된다. 또한 이들 부착물은 강판의 어느 위치에라도 설치될 가능성이 있으므로 부착물의 설치위치에 따른 강도의 영향을 평가하여 부착물의 규모를 결정하는 것이 바람직하다.

2.2 SC구조 벽체-지지대(Support) 접합부의 형상 및 거동

SC구조에서 외부 강판은 내부 콘크리트와 양방향으로 배열된 스터드 볼트에 의해 일체화된 합성구조로, 강판은 압축과 인장력을, 콘크리트는 압축력을 받는 시스템으로 구성되어 있으며, SC구조 벽체와 지지대의 접합부는 그림 3과 같이 단순화 할 수 있다.

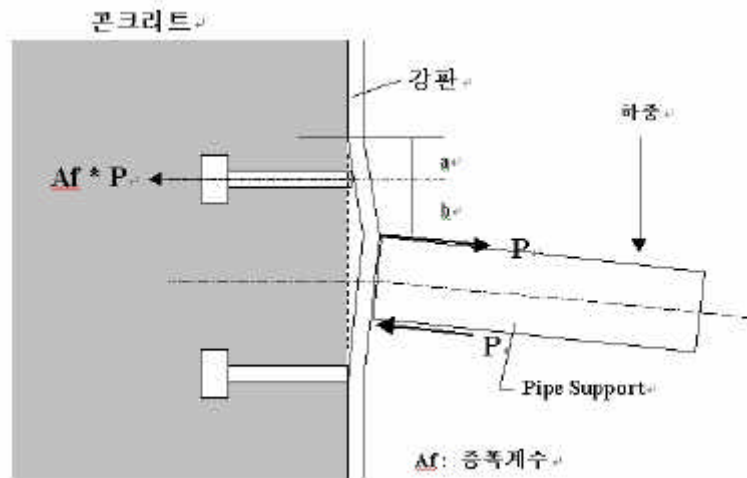


그림 4. SC구조 벽체-Support 접합부 거동

그림 2(a)와 같은 경우 지지대에 배관재 또는 전선 등의 하중이 작용하여 벽체와 지지대의 접합부에 모멘트가 발생되고 이는 강판 및 매입 철물에 재분배 되는 거동을 예측할 수 있다. 이러한 과정에서 강판의 휨강성, 스테드 볼트의 축강성의 변화에 따라 접합부의 거동이 변화하게 되고 강판, 매입 스테드 볼트 등으로 분배되는 응력이 상황에 따라 증감하는 현상을 보인다. 즉, 이러한 벽체-지지대 접합부의 거동은 그림 4에서 보는 바와 같이 배관재, 전선 등의 하중이 켈틀레버형 지지대에 작용하게 되면 SC 벽체-지지대 접합부에 시계방향의 우력이 발생되며 인장력 P와 압축력 P로 변환되어 강판의 수직방향으로 휨변형을 유도하게 된다. 이때 도입된 인장력 P가 강판의 b 구간 끝을 들어올리는 힘으로 작용하게 되면 스테드 볼트를 중심으로 떨어진 지점거리 a와 b 그리고 작용하중 P의 역학관계에서 지렛대 효과(Prying Effects)가 발생하여 스테드 볼트에는 Af*P의 하중이 도입됨을 유도해 볼 수 있다.(Af: 하중증폭계수)



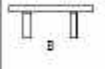





이와 같이 스테드 볼트에 도입되는 하중의 증폭은 SC 구조 접합부의 전체적인 거동에 복잡한 영향을 미치므로 이에 대한 세밀한 평가가 요구된다.

3. SC구조 벽체-지지대(Support) 접합부의 거동 실험

3.1 실험체 계획

벽체-지지대 접합부의 구조성능은 크게 지지대의 강도, 벽체-지지대 접합부 강도, 강판의 강도, 강판-스테드 볼트 용접부 강도, 스테드 볼트 강도 및 콘크리트 파괴강도, 지대의 부착위치에 따라 결정된다. 따라서 각각의 변수가 접합부의 거동에 미치는 영향을 파악하고 전반적인 벽체-지지대 접합부의 거동을 규명하기 위해 SC구조 벽체-지지대 접합부의 거동실험을 수행하였다.

표 1. 실험변수 및 실험체 일람표

연구내용	실험체명	강관의 굽힘성 (B/S Ratio)	Anchor Stiffness		Support Depth	Support의 위치에 의한 영향					비고
			 D	 L		Stud 사이			Stud 내외		
형상			Dia.	Length							
B/S Ratio (강관의 굽힘성)	PS-36-D1-B	36 (9' / 0.35')	0.75%(19mm)	8'(150mm)	4'(100mm)		○				
	PS-18-D1-A, B, C, D, E	18 (9' / 0.5')	0.75%(19mm)	8'(150mm)	4'(100mm)	○	○	○	○	○	기준실험체
	PS-12-D1-B	12 (9' / 0.75')	0.75%(19mm)	8'(150mm)	4'(100mm)		○				
Support Depth의 영향	PS-18-D2-B	18 (9' / 0.5')	0.75%(19mm)	8'(150mm)	5'(125mm)		○				
	PS-18-D3-B	18 (9' / 0.5')	0.75%(19mm)	8'(150mm)	6'(150mm)		○				
속허중 상정에서의 내력		18 (9' / 0.5')	0.75%(19mm)	8'(150mm)	4'(100mm)		○				

시험체는 SC구조 벽체-지지대 접합부의 구현을 위하여 원전에 적용된 사례를 조사하여 미국 AP-600원전의 SC구조 상세를 적용하였으며, 지지대의 부착위치, 강관두께, 지지대 단면높이(Depth)를 변수로하여 총 9개의 실험체를 제작하였다. 각 실험체의 상세 제원은 표 1에 나타내었다.

3.2 사용재료 및 재료의 기계적 성질

3.2.1 강재

본 실험에 사용한 강재의 재질은 지지대(H형강)와 강관은 SS400, 스테드 볼트는 ASTM A108 Gr. 1010-1020으로, 강재의 기계적 성질을 평가하기 위해 시험편은 KS B 0801에 따라 제작하여 인장실험을 수행하였다. 소재의 인장강도 실험으로부터 평가된 각 시험편의 항복강도는 강관의 경우 두께에 따라 3130~3440kgf/cm² 정도로 평가되었다.

3.2.2 콘크리트

본 실험에서 사용한 콘크리트는 콘크리트에 매입되는 스테드 볼트의 축방향 강성이 구조성능 평가시 영향인자로 고려되고 있어 콘크리트 28일 압축강도를 5500 PSI(385kgf/cm²)가 되도록 설계하여 사용하였다.

3.3 실험방법 및 측정방법

실험장치는 그림 5~6과 같으며 전력연구원 소재 구조시험동에서 25tonf 용량 유압가력기(Actuator)를 이용하여 파괴모드가 확인 될 때까지 단조가력 실험을 수행하였다. 지지대의 가력방향 변위를 측정하기 위하여 지지대의 1/2지점, 1/4지점에 LVDT(변위 측정기)

를 설치하였으며, 지지대의 접합부 부근 플랜지의 국부좌굴과 항복여부를 확인하기 위하여 스트레인 게이지를 부착하였다.

실험체는 강판에 직경 19mm, 길이 150mm의 스테드 볼트를 230mm 간격으로 배치하여 용접하였고, 실험시 스테드 볼트에 걸리는 축하중을 계측하기 위해서 강재용 스트레인 게이지를 부착하였다. 또한 실험시 강판에 발생하는 복잡한 응력분포와 변형현상을 파악하기 위해 강판의 수직방향에 LVDT(변위 측정기)를 설치하였고, 지지대 접합부 주위의 응력집중 예상부위에 1축, 3축 탄-소성 스트레인 게이지를 부착하였다. 그림 7에 기준 실험체에 대한 실험체 형상 및 측정위치를 나타내었다.

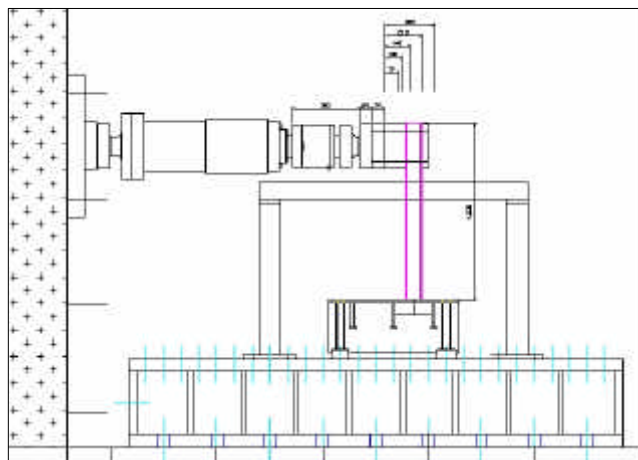


그림 5. 실험체 장치 및 가력조건



그림 6. 실험전경

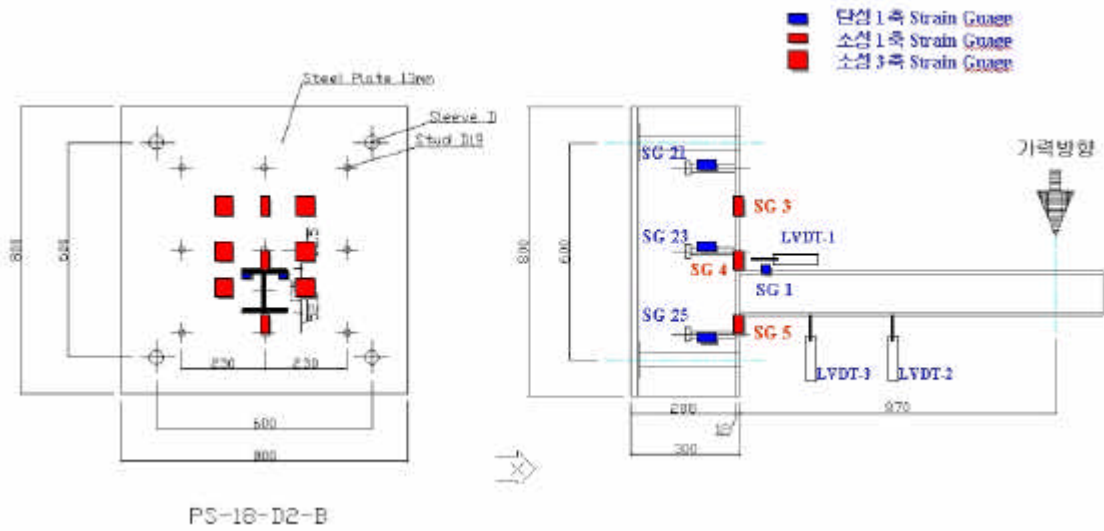


그림 7. 실험체 형상 및 가력조건, 측정위치

4. 실험결과 분석

4.1 실험체의 파괴거동 및 내력산정

표2에 실험체의 지지대 항복시 가력하중, 강판 항복시 가력하중, 극한하중(Pu) 및 파괴 형태를 정리하여 나타내었고, 그림 8에는 실험 시 접합부의 변형사진을 나타내었다.

표 2. 벽체-지지대 접합부 실험결과

구 분	Support 항복시 P (ton)	강판항복시 P (ton)	극한하중 Pu (ton)	파괴상황
PS18D1-A	2.05	0.938	3.5	강판항복-Stud파단
PS18D1-B	2.11	1.357	2.8	강판항복-Stud파단
PS18D1-C	2.09	1.628	2.9	강판항복-Stud파단
PS18D1-D	2.28	1.299	2.8	강판항복-Stud파단
PS18D1-E	2.18	1.112	2.6	강판항복-Stud파단
PS18D2-B	3.8	2.921	3.9	강판항복-Stud파단
PS18D3-B	5.07	-	4.6	강판항복-Stud파단
PS36D1-B	2.18	1.745	2.4	강판항복-Stud파단
PS12D1-B	2.14	3.069	3.2	지지대항복-강판항복

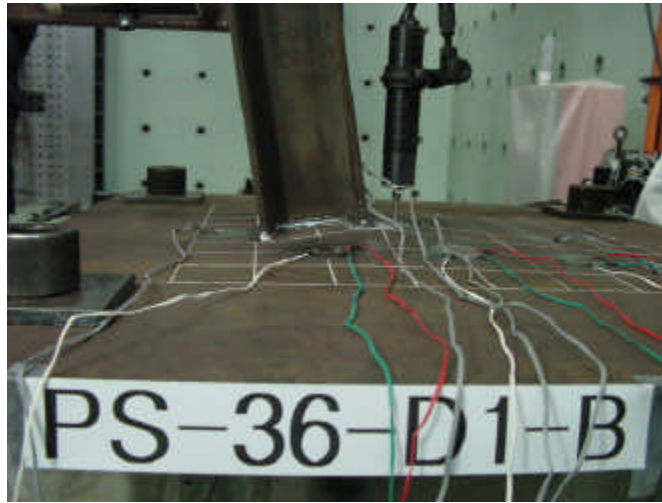


그림 8. SC구조 벽체-지지대 접합부 변형형상

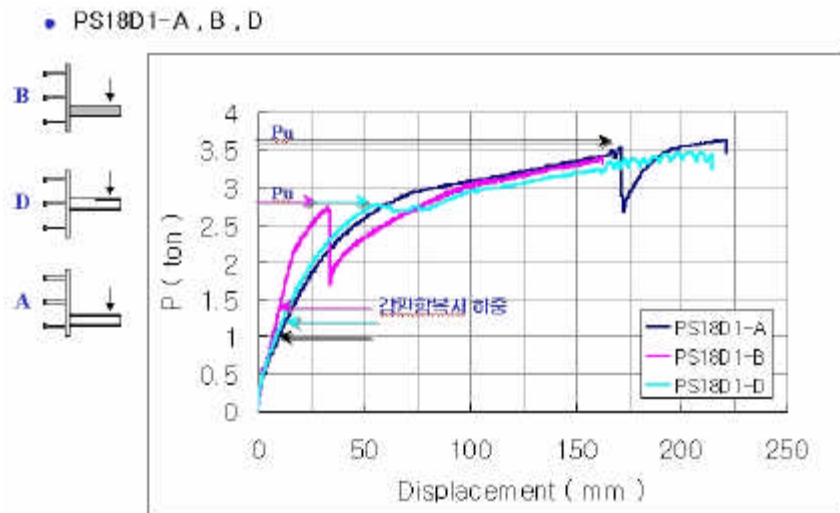
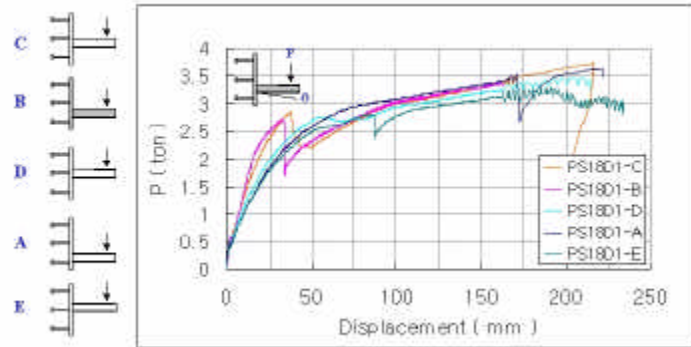


그림 9. SC구조 벽체-지지대 접합부의 하중-변위 관계곡선

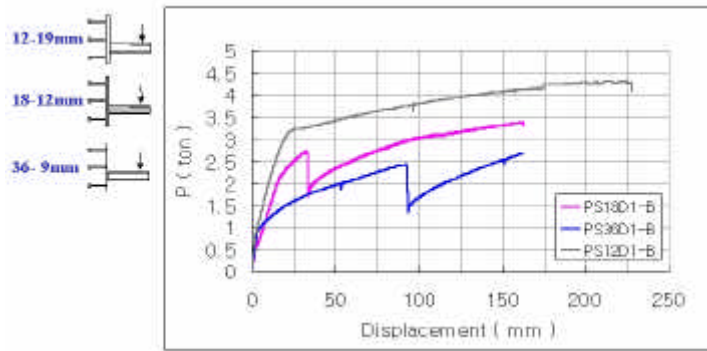
SC구조 벽체-지지대 접합부의 전반적인 파괴모드를 나타내기 위해 실험체의 하중-변위 관계곡선을 그림 9에 나타내었다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 SC구조 벽체-지지대 접합부의 파괴모드는 일반 구조형식과는 다르게 접합부에 모멘트가 걸리면서 강판이 면외 방향으로 변형되고 이에 따라 강판, 스테드 볼트, 지지대의 일부분이 응력집중에 의해 항복에 이르는 복잡한 파괴양상을 나타내었다. 또한 실험체는 강판의 두께가 19mm인 경우를 제외하고는 모든 경우에 대하여 강판의 항복이 스테드 볼트의 항복보다 선행하여 진행되었기 때문에, 이와 같이 강판을 구조재로 고려하는 SC구조에서는 접합부의 내력은 강판의 항복시점을 기준으로 함을 알 수 있었다.

● Pipe Support의 설치위치 따른 내력의 변화



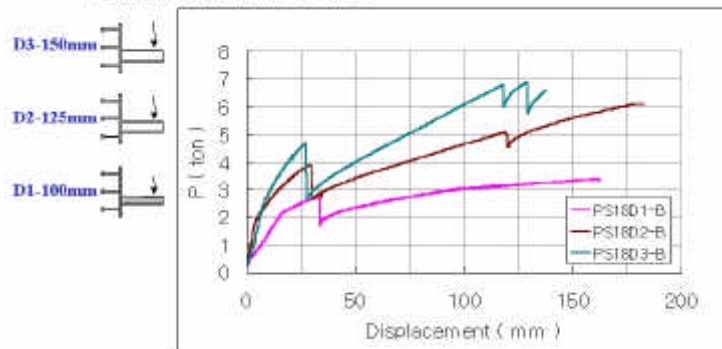
(a) Support의 설치 위치에 따른 내력의 변화

● 강판의 두께에 따른 내력의 변화



(b) 강판의 두께에 따른 내력의 변화

● Support Depth에 따른 내력변화



(c) Support의 Depth(춤)의 변화에 따른 내력의 변화

그림 10. 접합부 하중-변위 관계곡선

4.2 지지대(Support)의 설치 위치에 따른 접합부 내력평가

지지대의 설치위치에 따른 영향을 평가하기 위하여 그림 10(a)와 같이 지지대의 위치를 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 지지대의 설치 위치를 변수로 하는 경우는 실험계획에서 알 수 있듯이 지지대가 스테드 볼트의 사이에 설치된 것과 지지대의 웹 내에 스테드 볼트가 설치된 것으로 구분하여 볼 수 있다. 우선 지지대가 상하 스테드 볼트 사이에 있으면서 위치 변경을 변수로 한 PS18D1-A,B,C 실험체의 강판 항복시 하중을 보면 PS18D1-C의 경우가 내력이 가장 큰 것으로 나타났으며 기준시험체인 PS18D1-B보다 약 18%정도의 내력상승 효과가 있음을 알 수 있었다. 이는 지지대 접합부의 인장 플랜지에 스테드 볼트가 설치된 실험체로 인장력이 스테드 볼트에 직접 작용하면서 스테드볼트에는 지렛대 효과에 의한 축하중 증폭현상이 발생하지 않고, 스테드 볼트의 구속에 의한 인장축 강판의 응력집중이 완화되어 강판의 면외 강성이 증가하였기 때문으로 파악된다. 다음으로 지지대의 웹 내에 스테드 볼트가 설치되어 위치 변경을 변수로 한 PS18D1-C,D,E의 경우에는 PS18D1-C 실험체의 접합부 내력이 가장 큰 것으로 나타났는데, 이 또한 PS18D1-C의 경우가 스테드 볼트의 인장축 강판 구속효과가 가장 크기 때문으로 파악된다.

4.3 강판의 두께에 따른 접합부 내력평가

강판의 두께변화에 따른 실험결과를 그림 10(b)에 나타내었다. 강판의 두께변화에 의한 접합부 내력(강판항복 시점)은 강판의 두께가 가장 두꺼운 PS12D1-B가 가장 크게 나타났고 PS36D1-B, PS18D1-B 순으로 나타났다. 여기서, 특이하게 강판의 두께가 가장 얇은 PS36D1-B 실험체가 기준시험체인 PS18D1-B 시험체보다 다소 높게 나타나는데 이는 강판의 휨강성이 낮아 전단연결재에 작용하는 조합응력이 감소함에 따른 것으로 분석되었다.

4.4 지지대의 단면높이(Depth)에 따른 접합부 내력평가

지지대의 단면높이(Depth)에 따른 실험결과를 그림 10(c)에 나타내었다. 지지대의 단면높이의 변화에 따른 접합부 내력은 단면높이(Depth)가 가장 큰 PS18D3-B가 가장 큰 것으로 나타났다. PS18D3-B의 경우 강판 항복시 하중을 예측할 수 없는 경우이기 때문에 기준시험체인 PS18D1-B와 PS18D2-B와 비교하여 보면 단면높이(Depth)가 1.25배 증가하는 경우 약 210% 정도 내력이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 접합부에 동일한 모멘트가 작용할 경우, 지지대의 단면높이가 증가할수록 모멘트 팔 길이가 증가하므로 지지대 플랜지에서 강판에 작용하는 인장, 압축하중이 감소하기 때문으로 파악된다.

따라서 지지대의 단면크기는 SC구조체의 내력에 큰 영향을 미치므로, SC 구조체의 항복이전에 지지대의 단부항복, 국부좌굴 등이 일어나지 않도록 SC구조의 설치상황에 따른 적절한 크기의 지지대를 사용해야 될 것으로 판단되었다.

5. 결론

지지대의 부착위치, 강판두께, 지지대 단면크기(Depth)에 따른 원전 SC구조 벽체-지지대 접합부의 거동특성실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SC구조 실험체의 파괴모드는 접합부에 모멘트가 발생하면서 강판이 면외 방향으로 변형되고 이에 따라 강판, 스테드 볼트, 지지대의 일부분이 응력집중에 의해 항복에 이르는 복잡한 파괴양상을 나타내었으며, 강판을 구조재로 고려하는 SC구조에서는 접합부의 내력은 강판의 항복시점을 기준으로 함을 알 수 있었다.

(2) 지지대의 부착위치에 따른 실험체의 내력은 스테드 볼트가 지지대의 인장플랜지에 위치할 때 가장 크게 나타났는데, 이는 인장력이 스테드 볼트에 직접 작용하면서 스테드 볼트에는 지렛대 효과에 의한 축하중 증폭현상이 발생하지 않고, 스테드 볼트의 구속에 의한 인장축 강판의 응력집중이 완화되어 강판의 면외 강성이 증가하였기 때문으로 파악된다.

(3) 강판의 두께에 따른 실험체의 내력은 강판의 두께가 두꺼울수록 크게 나타났는데, 이는 강판 두께의 증가에 따라 강판의 면외방향 강성이 증가하였기 때문으로 파악된다.

(4) 지지대의 단면높이에 따른 실험체의 내력은 단면높이(Depth)가 증가할수록 크게 나타났는데, 이는 접합부에 동일한 모멘트가 작용할 경우, 지지대의 단면높이가 증가할수록 모멘트 팔 길이가 증가하므로 지지대 플랜지에서 강판에 작용하는 인장, 압축하중이 감소하기 때문으로 파악된다.

본 실험결과는 SC구조의 설계기준이 명확히 정립되지 않은 상태에서 수행한 기초실험 결과로서, 이를 부착물 설계분야의 설계기준 수립을 위한 자료로 활용하기 위해서는 다음과 같은 추가적인 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

- 부착물 설치부위의 국부좌굴이 구조부재 극한강도에 미치는 영향 검토
- 부착물 보강설계 방법 검토
- 용접 접합부의 응력집중으로 인한 강재의 항복 여부 검토
- 용접 접합부의 강판 항복이 부재의 휨강도에 미치는 영향 검토
- 부착물의 접합부 응력집중 방지를 위한 지지대(Support) 시스템 개발 및 검토
- 스테드 볼트 양단지지형 지지대 접합부의 콘크리트 파괴 강도 검토
- SC구조 구조성능 상세규명을 위한 유한요소 해석모델 개발

감사의 글

본 연구는 “원자력 발전소 구조물과 계통설비의 모듈화공법 타당성 연구”의 일환으로 한수원(주)의 지원금에 의해 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. NUREG/CR-6486 "Assessment of Modular Construction for Safety-related Structures at Advanced Nuclear Power Plant", Brookhaven National Laboratory, 1997
2. SC공동연구그룹 : 원자력발전소건물의 강판콘크리트구조에 관한 연구<소개서>
3. 秋山他, 鋼コンクリートサンドッチ構造部材強度に關する實驗的研究, 鹿島建設技術研究所年報 vol. 34, 1986
4. 강판-콘크리트 구조설계 및 고유동 콘크리트 시공지침, 해양, 일본, 1994
5. Ramesh c. Mishra, Experimental investigation of embedded steel plates in reinforced concrete structures, Engineering Structures 20 (1998), 105-112.