

# 원전 격납건물 Containment Liner Plate 공법

박지홍, 김우성 · 재료연구소

## [요약문]

원자력발전소의 구조건전성 및 안전성을 확보하는데 있어서 격납건물의 중요한 목적은 방사성물질의 유출을 방지하는 최후의 보루 역할을 한다는 것이다. 또한 원전의 격납건물 건설에 있어서 고려해야 될 가장 중요한 인자는 안전성과 경제성이다. 이러한 목표를 달성하기 위해, 최근 국내에서 첨단 CLP(Containment Liner Plate) 공법이 개발되어 신월성 원전 2호기에 적용되었다. 이 공법은 기존의 CLP 2단 모듈화 공법에서 한 단계 발전한 CLP 3단 모듈화 공법으로 건설기간 단축, 비용 절감 및 구조건전성을 확보하는 계기가 되었다. 그리고 이러한 공법을 바탕으로 국내건설 뿐만 아니라 원전 수출에 커다란 기여를 하게 되었다. 이 글에서는 국내 원자력발전소 CLP 설치에 있어서, 기존의 방법과 새로운 공법에 대한 비교/분석, 공정, 장/단점 등을 연구, 조사해 보았다.

## 1. 서 언

세계적으로 에너지 관련 사항은 항상 중요한 이슈로 대두되고 있다. 중국을 위시한 개발도상국 및 모든 산업국가에서 이를 해결하기 위해 꾸준히 노력하고 있다. 특히 지구온난화의 주범으로 지목되는 탄소배출을 줄이기 위해 기존의 화력발전을 대체하는 연구개발을 하고 있으나, 그 중에서도 가능성이 있는 대체 에너지 자원으로는 원자력, 풍력, 태양광/태양열, 지열, 조력, 수소에너지 등을 꼽을 수 있다. 그러나 현재 경제성 및 현실성의 관점에서 원자력에너지 개발이 가장 선두에 있으며, 각 나라마다 원자력발전소의 건설에 박차를 가하고 있는 실정이다. 세계적으로 원자력발전소 건설을 추진하고 있는 국가를 살펴보면 다음과 같다. 중국의 경우 2020년 까지 32기, 2050년 까지 150기를 건설할 예정이고, 미국도 2020년 까지 10기를 건설할 계획이다. 또한 한국에서 현재 가동중인 원전 20기 이외에 신고리 3, 4호기, 신월성 1, 2호기가 건설 중이며, 계속해서 신울진 1, 2호기 및 신고리 5, 6호기가 건설 준비 중에 있다.<sup>[1-3]</sup> 특히 고리 한 지역에서만 향후 기존의 4호기를 포함해 1, 2호기가 건설되는 세계적으로 유래 없는 원자력발전소 타운이 생기게 되는 것이다. 국제원자력기구(IAEA)에서는 앞으로 25년 이내에 300기 정도의 새로운 원자력발전소를 기대한다고 한다.<sup>[4]</sup> 가히 원자력 르네상스가 도래하고 있다고 말할 수 있겠다. 세계에서 가장 많은 원자력발전소를 보유하고 있는 미국에서도 최근 수십 년 동안 원자력발전소 건설을 한 사례가 없는 반면에 한국에서는 계속해서 원전건설을 추진하고 있었다. 더구나 국내의 경우는 미국, 프랑스(Framatome) 및 캐나다(CANDU) 시스템의 다양한 원전이 건설 및 운영되고 있어 세계적으로 주목받고 있는 실정이다. 국내의 원자력발전소는 초기에 고리 원전을 시작해 다양한 원전형태의 건설 및 운영 경험으로 인해 많은 기술이 축적되어 있으며, 최근에 이러한 기술이 세계적으로 인정되어 UAE에 한국형 원자력발전소가 진출하게 되는 쾌거를 이룩하게 되었다.

원자력발전소 건설은 안전을 최우선으로 확보하기 위한 설계 및 운전이 필수적인 과제이다. 체르노빌 및 TMI 사고 이후, 특히 원전격납건물(nuclear containments building)의 중요성이 한층 주목받고 있는 상황이다. 원자력발전소의 격납건물은 압력유지 및 방사성물질의 유출을 방지하는 마지막 보루이다. 원전의 격납건물 건설에 있어서 안전성뿐만 아니라 경제성을 고려하지 않을 수 없다. 특히 원전 수출 및 국내 건설에 있어서 가장 중요한 건설 공기 단축



및 비용 절감은 반드시 해결해야 할 과제이다. 그러나 원자력발전소는 좁은 공간속에 많은 구조물이 밀집해 있는 특성으로 인해 시공의 복잡성과 공종별 간섭이 발생하게 된다. 따라서 시공에 많은 어려움이 발생하게 되어 공기단축이 매우 어려운 문제로 대두되고 있다. 최근 국내에서 신월성원자력 2호기를 건설하면서 가장 넓은 공간을 차지하는 CLP(containment liner plate)를 대상으로 공기 단축을 위해 3단 모듈화 공법이 제시되었다. 이러한 모듈화를 통해서 원전 건설공기 단축 및 지상 작업 확대를 통한 용접품질 향상과 작업의 안전성을 확보하는데 기여하게 되었다. 이 글에서는 국내 원자력발전소 CLP 설치에 있어서, 기존의 방법과 새로운 공법에 대한 장/단점 및 공정 등을 살펴보기로 한다.

## 2. 원전격납건물(nuclear containment building)

국내 원자력발전 기술의 점진적 발전에 따라 전력용량의 증가가 이루어 졌고 격납건물의 크기와 형태도 변화를 가져왔다. 첫째 단계에서 고리 1, 2호기의 격납건물은 금속격납구조(metal containment structure)로 되어 있다. 이는 격납건물 외부형상은 원통형 외벽(cylindrical wall)을 가지는 몸체건물(shell)과 얇은 돔(shallow-dome) 형태의 지붕(roof)으로 구성되며, 내부에 1½ inch 두께의 금속구조물(metal structure)과 외부의 콘크리트구조로 이루어져 있다.<sup>[1-3]</sup> 주로 금속구조물이 격납건물의 압력유지(pressure retaining) 및 방사성물질의 누출을 방지하는 역할을 하고 있다. 둘째 단계에서 월성 1, 2, 3, 4호기 및 울진 1, 2호기는 접착식 텐돈시스템(grouted tendon system)인 프리스트레스 콘크리트 격납건물(prestressed concrete containment building)이다. 프리스트레스 콘크리트는 콘크리트 구조가 압축응력에는 강하나 인장응력에 약한 단점을 보완할 수 있는 방법이다.<sup>[1-3]</sup> 외부형상은 원통형 외벽으로 된 몸체건물과 얇은 돔 형태의 지붕으로 구성되며, 금속격납건물과 달리 내부에 금속구조물이 없고 외부의 콘크리트 구조물이 압력유지 및 방사성물질의 누출을 방지하는 역할을 하고 있다. 셋째 단계에서 격납건물구조는 비접착식 텐돈시스템(ungroated tendon system)인 프리스트레스 콘크리트 격납건물이다. 이것은 접착식 텐돈시스템과 비교하여, 시공 및 유지비가 많이 드는 단점이 있으나 가동중에 텐돈(tendon)의 프리스트레스(prestress) 손실을 측정할 수 있고 필요시 텐돈의 교체도 가능하여 격납건물의 수명연장이나 안정성 확보 측면에서 매우 뛰어난 장점을 가지고 있다.<sup>[1-3]</sup> 콘크리트 구조물 안쪽에 1/4 inch 두께의 라이너플레이트(liner plate)가 있으며, 형상은 원통형 외벽(cylindrical wall)으로 된 몸체건물(shell)과 반구형 돔(hemispherical-dome) 형태의 지붕(roof)으로 구성된다. 바깥의 콘크리트 구조물과 라이너플레이트(liner plate)가 격납건물의 압력유지 및 방사성 누출 방지 역할을 한다. 그러나 이 단계에서도 원전 가동중 검사에서 무작위 텐돈 선정의 어려움 등과 같은 해결되어야 할 과제가 여전히 존재하였다. 마지막 단계에서 앞에 열거한 많은 단점을 보완한 한국표준형 원자력발전소(KSNP: Korea standard nuclear power plant)가 개발되었다.<sup>[1-3]</sup>

## 3. CLP(Containment Liner Plate) 설치

원자력발전소는 특성상 파이프, 밸브 및 다양한 기기들이 매우 협소한 공간에 상호 연결되어 밀집되어 있는 관계로 인해 시공의 복잡성과 공종별 간섭이 발생하게 된다. 따라서 시공의 많은 어려움이 발생하게 되어 공기단축이 매우 어려운 문제로 대두되고 있다. 이러한 어려움을 해결하기 위한 방안으로 Open top installation 건설공법 및 Modularization with pre-fabrication and pre-assembly 건설공법과 같은 시공기법이 세계적으로 주목받고 있는 실정이다.<sup>[4]</sup> 국내에서는 최근에 월성원전 2호기에서 건설기간 및 비용 단축이라는 관점에서 새로운 CLP 설치 기법인 3단 모듈 인양기법(three stage based modularization of the containment liner plates)이 도입되었다. 이러한 설치 공법인 3단 모듈 인양의 성공적인 개발을 위해서, 기존 원자력발전소에서 적용했던 2단 모듈(two stage based

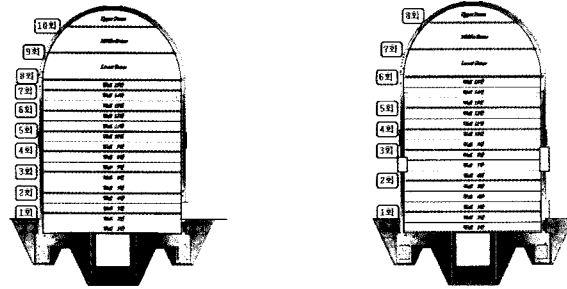
modularization)의 인양에 대한 구조해석 및 검토가 뒷받침되어 구조적으로 변경 및 개선이 필요한 부분들이 수정 및 보완되었다. 3단 모듈 공법 개발의 성공여부는 직경 43m, 높이 10m, 두께 6mm 얇은 원통형 Shell을 어떻게 변형 없이 안전하게 인양하느냐가 관건이었다. 따라서 CLP의 각 부분에 접합되는 수많은 Plate 및 Sleeve 등과 같은 기기에 대한 편심하중, 응력 및 변형과 같은 기계적인 역학구도가 면밀히 연구되었다. 또한 안전한 설치를 위한 새로운 설치 장비의 개발이 필요하였고, 컴퓨터 시뮬레이션으로 CLP 인양 시 기후조건과 인양 속도 및 설치순서 등이 최적화되었다. 이러한 과정을 통해 인양러그(lifting lug) 접합부에 응력이 집중되는 현상을 방지하게 되었다. 인양러그 수량 및 인양각(lifting angle) 등의 설계 변경은 CLP 변형을 방지하는 중요한 변수(parameter)였다. 또한 기존의 2단 모듈 인양용 와이어(lifting wire)의 가닥수와 길이는 3단 모듈 인양 공법에서 재구성되었고, 집중하중 분산을 위해 Multi Device가 적용되었다. 이러한 연구결과를 바탕으로 신월성원전 2호기에 CLP 3단 모듈화 인양 기법은 성공적으로 수행될 수 있었다. 특히 3장에서는 새로운 공법의 중요한 인자인 3단 모듈 CLP 설치방법, 인양능력, 변형방지를 위한 설계 등을 살펴보기로 한다.

### 3.1 2단 및 3단 모듈(2 & 3 stage based modularization) CLP 설치

원전격납건물(nuclear containment building) 벽체의 내측에 설치하는 CLP는 총 15단으로 구성되어 있다. 기존의 CLP 설치 방식은 다음과 같다. 첫째, 1단 및 2단 plate ring은 원자로 위치에서 개별적인 형태(piece by piece method)로 설치되고, 둘째, 3단부터 14단 plate ring까지는 2단 조립형(2-stage-based plate rings)으로 설치되며, 셋째, 15단 plate ring은 1단 조립형(1-stage-based plate ring)으로 설치된다. 마지막으로 그 위에 3개의 dome plate(lower, middle & upper dome)가 차례로 설치된다. 새로이 개발된 3단 모듈 CLP 인양기법에서는 1단 및 2단 plate ring 설치의 기존 기법과 동일하다. 그러나 9단 및 10단 plate ring과 11단 및 12단 plate ring을 제외하고는 3단에서 15단 plate ring까지 3단 조립형(3-stage-based plate rings)으로 설치된다. 그 위에 3개의 dome plate(lower, middle & upper dome)는 기존의 기법과 동일하다. 표 1과 그림 1에서 기존의 2단 모듈 및 새로이 개발된 3단 모듈 CLP 인양 설치를 비교하여 나타내었다.

표 1. CLP 설치의 적층 단계 (lifting steps)<sup>[5]</sup>

단계	기존의 설치 기법	새로운 설치 기법
1	1단 plate ring	1단 plate ring
	2단 plate ring	2단 plate ring
2	3단 + 4단 plate ring (2 stage modularization)	3단 + 4단 + 5단 plate ring (3 stage modularization)
3	5단 + 6단 plate ring (2 stage modularization)	6단 + 7단 + 8단 plate ring (3 stage modularization)
4	7단 + 8단 plate ring (2 stage modularization)	9단 + 10단 plate ring (2 stage modularization)
5	9단 + 10단 plate ring (2 stage modularization)	11단 + 12단 plate ring (2 stage modularization)
6	11단 + 12단 plate ring (2 stage modularization)	13단 + 14단 + 15단 plate ring (3 stage modularization)
7	13단 + 14단 plate ring (2 stage modularization)	Lower dome
8	15단 plate ring	Middle dome
9	Lower dome	Upper dome
10	Middle dome	
11	Upper dome	



(가) 기존의 2단 모듈 CLP 인양 공법

(나) 3단 모듈 CLP 인양 공법

그림 1. CLP 설치<sup>[5]</sup>

### 3.2 모듈 인양을 위한 Ringer crane 능력(lifting capability)

3개의 plate ring을 인양하기 위해서는 우선적으로 인양장비 개선이 해결되어야 하였다. 3단 모듈로 구성된 plate ring의 최대 인양중량과 인양장비 등의 능력이 검토, 분석되었다. 3-4-5단을 3단 모듈로 구성하였을 경우 총 중량이 196 ton으로 계산되었고 작업반경은 52m가 필요한 것으로 분석되었다. 이러한 조건을 만족시키기 위한 Ringer Crane은 M-1200(Manitowoc, USA)이 사용되었는데 이 Ringer Crane의 최대 capacity는 1,300 ton이며 최대 작업반경은 152 m로 안전한 인양능력이 확인되었기 때문이다. M-1200 R/C의 장비내역 및 작업조건 등은 표 2에 나타내었다.

표 2. M-1200 R/C의 인양능력 검증<sup>[5]</sup>

작업 조건	장비 내역	결과								
<ul style="list-style-type: none"> <li>3-ring 조립물의 최대 중량 = 196 Tons</li> <li>작업반경 = 52 meter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>M-1200 R/C</li> </ul> <table border="1"> <tr> <td>Main Boom + Jib</td> <td>77.1 meter + 38.1 meter</td> </tr> <tr> <td>Capacity</td> <td>238.4 Tons</td> </tr> <tr> <td>Radius</td> <td>52 meter</td> </tr> <tr> <td>Ratio</td> <td>82%</td> </tr> </table>	Main Boom + Jib	77.1 meter + 38.1 meter	Capacity	238.4 Tons	Radius	52 meter	Ratio	82%	만족
Main Boom + Jib	77.1 meter + 38.1 meter									
Capacity	238.4 Tons									
Radius	52 meter									
Ratio	82%									

### 3.3 모듈 인양에서 편심하중(eccentric load)에 의한 변형(deformation) 방지

기존의 CLP 2단 인양에 적용되었던 인양용 와이어(lifting wire)의 수량은 32가닥, 길이는 48.13m 및 인양각(lifting angle)은 62.9도(degree)이다. 이를 CLP 3단 모듈 인양에 적용할 경우, 러그(lug) 부착부에서 응력 값이 자재의 항복강도를 초과하는 부분이 발생되고, 러그 부착부 변형이 편심하중으로 작용하여 CLP의 변형이 발생하게 된다. 따라서 CLP 3단 모듈 인양에 적합한 인양 와이어 및 러그의 개선과 CLP 인양 시 수평을 유지하기 위한 Multi Device 적용이 필요하였다. 이는 와이어(wire) 간의 간섭을 최소화하기 위해 반드시 해결되어야 하는 사항이었다. CLP 3단 인양용 와이어(lifting wire) 모델 해석을 그림 2에 나타내었고, Multi Device의 형상은 그림 3에서 설명했다. 인양용 와이어(lifting wire)의 개선된 수량 및 러그의 형상에 대한 항복강도 대비 적용 응력값에 대한 결과는 표 3에 요약되어 있다. 표 3에 의하면 CLP 6, 7, 8단을 모듈화 할 경우에는 발생하는 하중의 응력비가 0.87로 나타나 기존의 방법을 적용하더라도 만족함을 알 수 있었으나



그림 2. CLP 3단 모듈 인양용 와이어(lifting wire) 모델 해석<sup>[5]</sup>

CLP 3, 4, 5단의 경우는 CLP에서 가장 큰 하중을 나타나는 것으로 조사되었으며, 이때 발생하는 하중의 응력비가 1을 초과하는 값으로 나타나 기존의 방법에 대하여 개선이 필요함을 알 수 있었다. 따라서 이를 만족시키기 위해 인양각을 62.9°에서 65°로 변경한 새로운 인양러그(lifting Lug)의 형상이 개발되었다. 그 결과 하중에 대한 응력비는 모두 만족되었다.



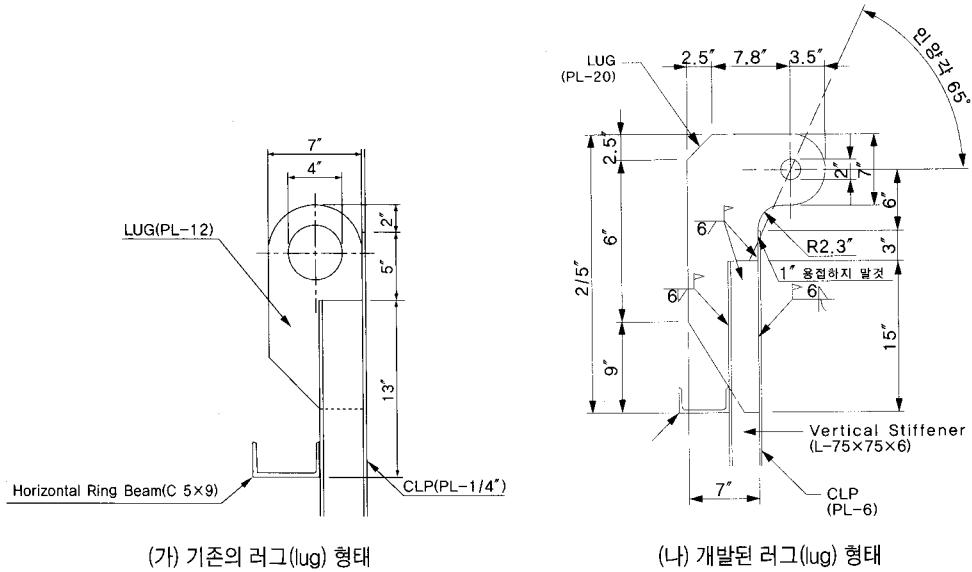
그림 3. Multi Device 형상<sup>[5]</sup>

표 3. CLP Assembly 인양의 인양각(lifting angle) 및 러그(lug) 개선<sup>[5]</sup>

문제점			수정/보완			결과
<ul style="list-style-type: none"> <li>Sleeve 및 Embed Plate에 의한 편심하중</li> <li>수평 Stiffener에서 허용응력 초과</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>인양각(lifting angle) 개선 : 62.9° → 65°</li> <li>인양러그(lifting lug) 개선</li> </ul>			
Layer	응력비	결과	Layer	응력비	결과	
3+4+5	1.03	불만족	3+4+5	0.75	만족	만족
6+7+8	0.87	만족	6+7+8	0.79	만족	

### 3.4 인양러그(lifting lug) 설계

그림 4는 기존의 러그와 3단 모듈을 위해 새롭게 개발된 러그의 설계 도면을 비교하여 나타낸 것이다. 기존의 인양러그(lifting lug)의 경우는 1자형으로 CLP보다 바깥쪽에 슬링(sling; ringer crane의 철선)을 연결하도록 구멍(hole)을 뚫었다. 기존의 러그(lug) 모양을 그대로 CLP 3단 모듈 인양에 적용할 경우, 구조해석을 수치적으로 한 결과 슬링(sling)에 축력 및 편심으로 인해 부가 모멘트가 걸리는 것으로 나타나 러그 형상의 개선이 필요하였다. 이를 위해 인양러그(lifting lug)의 형상을 7자형으로 변경할 필요가 있었다. 러그(lug)의 중심을 이동시켜 기존 러그(lug)의 편심에 의한 부가모멘트를 해소시켰고, 러그(lug)의 구멍 직경(hole diameter)을 조정하고 연단거리를 늘여서 Shackle의 핀에 의한 지압 및 전단 저항능력이 향상되었다. 또한 러그(lug)의 두께를 20mm로 조정하여 러그(lug)의 하부 접합 포인트를 늘려 응력의 국부 집중 현상이 방지되었다. 이러한 인양러그(lifting Lug)의 형상 설계로 CLP의 편심하중(eccentric load)에 의한 변형이 방지될 수 있었다.



(가) 기존의 러그(lug) 형태

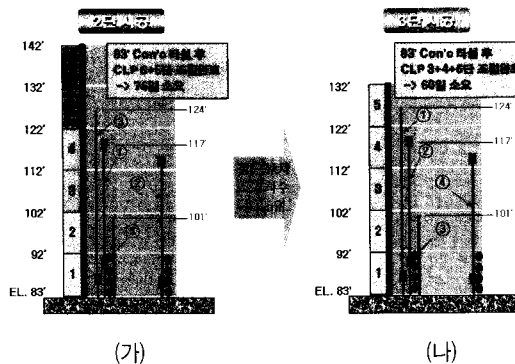
(나) 개발된 러그(lug) 형태

그림 4. 인양러그(lifting lug) 설계<sup>[5]</sup>

## 4. 3단 모듈 설치의 개발 성과

### 4.1 건설기간 단축

그림 5(가)는 기존의 2단 모듈 공법으로 설치하는 경우를 나타낸 것이고, (나)는 3단 모듈 공법으로 설치하는 경우이다. 그림에서 실선으로 나타낸 것은 RCB(reactor containment building) 외벽 콘크리트 타설을 위해 설치되는 철근(rebar)을 나타낸 것이다. 그림 5(가)에서 보는바와 같이, 기존의 CLP Assembly 설치 방식은 CLP 1단과 2단을 RCB 위치에서 설치 후 CLP 3, 4단을 1개의 모듈로 현장에서 인양 설치한다. 1, 2번 철근 설치 후 3번 철근의 설치에는 CLP 5, 6단 인양 시 간섭이 발생되므로 CLP 5, 6단이 현장 설치 완료된 후 수행할 수 있었다. 그러나 그림 5(나)에서 나타낸 바와 같이 3단 모듈 공법을 적용할 경우에는 CLP 3, 4, 5단 모듈로 2단 위에 설치 후 1번 철근은 CLP 6단과의 간섭이 전혀 발생하지 않을 뿐만 아니라 CLP 6단 인양 시기와 상관없이 설치할 수 있으므로 기존의



(가)

(나)

그림 5. CLP Assembly 설치<sup>[5]</sup>

(\* ①, ②, ③, & ④ : 콘크리트 타설을 위한 철근(Rebar) 설치 순서)

공법보다 조기에 착수할 수 있었다. 또한 기존의 2단 모듈 공법 설치에는 CLP 5, 6단 인양 완료 후 작업 발판을 해체 하여야만 수직철근을 시공할 수 있는데 반해, CLP 3단 모듈 설치 후에는 작업발판 해체 없이 수직철근을 시공할 수 있다. 따라서 기존의 CLP 2단 모듈 공법에 비해, 원자로 격납건물 외벽 콘크리트 타설 대비 CLP 3단 모듈 공법은 외벽 콘크리트 타설 기간을 24일 단축시킬 수 있다. 그리고 CLP 인양 횟수를 상당히 줄여, 전체 CLP 건설 기간을 충분히 단축시키고 있다. 그림 5는 CLP 2단 모듈과 3단 모듈 공법에서 외부 콘크리트 타설을 위한 철근(Rebar)설치의 차이점을 보여주고 있다.

#### 4.2 품질, 안전성 및 경제적 효과

CLP 3단 모듈화 공법은 인양횟수를 대폭 감소시킴으로 인해, 고소 지역에서의 용접작업을 상당히 줄이고 지상에서의 용접 작업을 증가시킴으로써 작업자의 안정성을 확보할 수 있었다. 또한 이로 인하여 용접품질이 향상되어 원자력발전소의 구조건전성을 높이는 계기가 되었다. 기존의 공법과 대비하여 실제, 고소 용접량은 54%의 감소 효과를 얻게 되었다. 경제적 비용으로는 건설기간 단축 등으로 인해 1호기 당 약 \$10,000,000의 비용절감을 얻게 된 것으로 관련업계는 분석하고 있다.

### 5. 맺음말

원자력발전소의 격납건물은 압력유지 및 방사성물질의 유출을 방지하는 마지막 보루로 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 또한 원전의 격납건물 건설에 있어서 고려해야 될 가장 중요한 인자는 안전성과 경제성이다. 이러한 목표를 달성하기 위해 최근에 신월성 원전 2호기 현장에서 성공적으로 시행된 첨단 CLP 3단 모듈화 공법에 대하여 소개하였다. 이러한 CLP 3단 모듈인양 공법은 새롭게 건설되는 원전에는 모두 적용할 예정이어서 건설기간 단축, 비용절감 및 구조건전성을 확보하는데 커다란 기여를 할 것으로 전망된다. 이를 바탕으로 4단 이상의 모듈화 공법이 연구 개발되고 있으며, 이러한 개발이 원전 수출확대 및 국내 원전건설에 커다란 도움이 될 것으로 기대된다.

### ✽ 참고 문헌

- [1] Jihong Park and Jaekeun Hong, "Present Status of Nuclear Containments and ISI in Korea", Progress in Nuclear Energy, Volume 51 Number 8 November 2009, ISSN 0149-1970, p761-768, (2009).
- [2] Jihong Park, Jaekeun Hong, and Banuk Park, "Nuclear containment systems and inservice inspection status of Korea nuclear power plants", Proceedings of ICAPP 2077 Nice, France, May 13-18, (2007).
- [3] Jihong Park, Jaekeun Hong, Byunghoon Lee and Youngho Son, "Present status of nuclear containments in Korea", 15th International Conference On Nuclear Engineering Nagoya, Japan April 22-26 2007 ICONE15-10201 (2007).
- [4] Nuclear Technology Review, Annex IV, IAEA (2009)
- [5] Hyun Chul Kim, "Development of the SC Module Construction for NPP", in private communication, (2009).



박 지 흥

- 재료연구소 산업기술지원본부 원자력공인검사단 책임연구원
- 관심분야 : 원자력재료, 태양전지재료, 원자력격납용기 등
- E-mail : jhpark@kims.re.kr



김 우 성

- 재료연구소 산업기술지원본부 원자력공인검사단 선임연구원
- 관심분야 : 비파괴검사, 용접기술, 용접재료 등
- E-mail : kws@kims.re.kr