

# 공사기간 단축을 위한 원자로 건물 외벽 거푸집 개발

조예림<sup>1</sup>, 신윤석<sup>2\*</sup>, 고영태<sup>1</sup>

<sup>1</sup>경기대학교 일반대학원 건축공학과, <sup>2</sup>경기대학교 플랜트·건축공학과

## Development of RCB Exterior Wall Form for Duration Reduction

Yerim Cho<sup>1</sup>, Yoonseok Shin<sup>2\*</sup>, Young-Tae Ko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Architectural Engineering, Graduate School, Kyonggi University

<sup>2</sup>Department of Plant&Architectural Engineering, Kyonggi University

**요약** 세계에서는 지구온난화 등에 따른 기후 변화에 대응하여 원전 건설을 금지해오던 국가들도 점점 허용하는 추세이다. 따라서 앞으로의 원전 건설이 늘어날 것이며 이에 대한 경쟁 또한 심화될 것이다. 원전 프로젝트는 일반 건설 공사와 비교하여 공사 기간이 매우 길다. 원전 건설 프로젝트에서 경쟁 우위를 확보하기 위해 원전 공사 기간을 줄일 수 있는 기술을 개발하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구의 목적은 원자로 건물 외벽 거푸집의 높이를 3m에서 4m로 증가시킴으로써 공사 기간을 감소시키기 위한 원자로 건물 외벽 거푸집을 개발하는 것이다. 개발된 거푸집을 원전 프로젝트에 적용하기 위해 구조적 안전성과 시공성 및 경제성을 분석하였다. 현장 적용 가능성을 평가한 결과 개발된 거푸집은 구조적으로 안전했다. 그리고 시공 단수가 감소함으로써 공사 기간이 단축되고 공사비 또한 절감되는 효과를 확인하였다. 본 연구의 결과는 향후 원자로 건물의 공사 기간 단축을 위한 지속적인 기술 개발을 위한 자료로 활용하여 한국의 세계 원전시장에서의 경쟁력 확보에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

**Abstract** Countries that have been banned from building nuclear plants are becoming more tolerant in response to global warming and climate change. Thus, the construction of future nuclear plants will increase, and the competition will also intensify. A nuclear power plant has a long construction period compared with conventional construction projects. In order to gain a competitive advantage in nuclear power plant construction, the construction period must be decreased. Therefore, the purpose of this study is to develop an exterior wall form for a reactor containment building to reduce the construction time by increasing the height of the form. The structural safety, constructability, and economic feasibility were analyzed to assess the applicability of the proposed form. The proposed form was determined to be structurally safe. Furthermore, the construction period was shortened by reducing the duration of the construction units, and the total construction cost and interest were also reduced. Therefore, the proposed form could contribute to reducing the construction period for nuclear power plants.

**Keywords** : Duration reduction, Nuclear power plant, Reactor containment building, Exterior wall form, Form development

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

산업통상자원부의 제7차 전력수급기본계획[1]에 따르면 우리나라의 국내 총 전력소비량은 2014년을 기준으로 477,592GWh로 지난 10년간 연평균 4.1% 증가하였으며 2029년에는 766,109GWh에 이를 것으로 예측되고

있다. 현재 우리나라는 고유가, 기후변화 협약 등으로 인하여 저탄소 에너지인 풍력 및 태양광 등의 신재생에너지에 대한 비중을 확대해야 한다. 그러나 경제적 및 기술적인 면을 고려하였을 때 화석에너지를 대체하는 것이 아직까지는 어려운 실정이다. 현재 정부에서는 원전을 줄이는 에너지 전환 정책을 시행하려 하고 있으나 신재생에너지가 화석에너지를 대체할 수 있을 때까지는 저탄

\*Corresponding Author : Yoonseok Shin(Kyonggi Univ.)

Tel: +82-31-249-9721 email: shiny@kyonggi.ac.kr

Received October 12, 2017

Revised (1st November 22, 2017, 2nd December 5, 2017)

Accepted January 5, 2018

Published January 31, 2018

소에너지원인 원자력 발전의 안정성을 강화하면서 이용을 늘려야 할 것이다[2].

지난 2009년 12월 아랍에미리트(UAE) 원전 수주 경쟁에서는 한국이 프랑스, 미국, 일본 등 원전 강국과의 치열한 경쟁 끝에 원전 건설 수주에 성공하였다[3]. 이에 한국의 최신 시공 기술과 원전 운영 능력 및 가격 경쟁력의 확보 등이 주효했던 것으로 보인다. 지구온난화에 따른 기후 변화에 대응하여 원전 건설을 금지해오던 국가들도 점점 허용하고 있기 때문에 앞으로의 원전 건설이 늘어날 것이며, 이에 대한 경쟁 또한 심화될 것으로 예상된다[4]. 따라서 향후 원전 강국과의 수출경쟁에서 한국이 우위를 점하기 위해서는 지속적인 기술의 개발로 원전 건설 경쟁력을 확보하여야 할 것이다.

2016년 10월 국제원자력기구(IAEA)가 발표한 보고서에 따르면, 최근 20년간 신규 완공된 원전이 있는 15개국의 원자로 건물(이하 RCB) 평균 공사 기간은 190개월이다[5]. RCB 공사는 일반 건물에 비하여 공정이 많고 초기 건설비의 비중이 매우 크다. 게다가 투자 자본에 대한 이자비용이 총건설비의 약 20% 내외를 차지하기 때문에 공사기간이 늘어날수록 경제적으로 불리해지게 된다[6]. 그렇기 때문에 RCB의 공사기간을 단축시키면서 건설비용 또한 절감시킬 수 있는 기술의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 원전 벽체 1단 타설 높이를 증가시킴으로써 공사기간을 단축할 수 있는 RCB 벽체용 슬라이딩 거푸집을 개발하고자 한다. 본 연구에서 제안된 거푸집 시스템을 원전 건설에 적용시켜 공사기간을 단축시킴으로써 한국의 원전 경쟁력 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

## 1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구는 RCB 외벽 1단 타설 높이를 증가시킬 수 있는 벽체용 거푸집에 관한 내용이다. 연구의 범위는 구조의 안전성, 시공성, 경제성을 분석하는 것과 거푸집의 현장 적용가능성을 확인하는 것으로 제한한다.

연구의 방법은 다음과 같다.

첫째, 본 연구에서 제안된 RCB 외벽 거푸집의 구조적 안전성 검토를 위하여 구조설계 및 해석 프로그램인 ‘MIDAS GEN 2015’를 이용하여 변위 및 부재의 응력을 검토하였다.

둘째, 시공성 분석은 현장 목업(mock-up) 실험을 통

한 단계별 시공절차 검토 후에 현재 실무에 종사하고 있는 시공경력 5년 이상의 현장 실무자들에게 자문을 구하였다. 실무자들과의 인터뷰 조사를 통해 거푸집의 공사기간을 예측하였으며 1단 타설 높이가 3m일 때와 4m일 때의 공사기간을 비교하였다.

셋째, 경제성 분석은 기존 원전 거푸집 공사 실적 자료를 기준으로 하여 거푸집 제작비, 임대비, 인건비, 기계경비로 나누어 원가 계산하였다. 비용을 분석하여 일위대가를 만들고 기존 거푸집 대비 가격에 대한 비율을 산정하였다. 기존 거푸집과 제안된 거푸집을 비교하여 공기단축 및 작업횟수 감소에 의한 이자 절감 및 원전 건설 전반에 걸친 경제적 효과를 확인하였다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 원자로 건물(Reactor Containment Building)

RCB는 원자로 및 그 주변의 관련 기기를 수용하는 건물이다. 원자로 냉각재 계통을 외부로부터 보호하고 원자로 사고 발생 시에 방사성 핵분열생성물질이 외부 대기 중으로 누출되는 것을 막아주는 역할을 한다. 따라서 냉각재 상실사고, 증기관 파열사고, 급수관 파열사고 등의 사고 발생 시의 압력 및 온도 조건에서도 그 기능을 유지해야 한다. 즉, 핵분열생성물의 누출에 대한 밀봉방벽으로서의 기능이 사고 조건에서 요구되는 기간 동안 유지되어야 한다[7].

RCB 벽체는 콘크리트 외벽과 내부 철판으로 구성되어 있으며 RCB 내부에는 원자로 용기(reactor core) 및 천장크레인 등이 있다. RCB의 주요 구성은 Fig 1과 같다.

### 2.2 RCB 외벽 공사기간

중동에 위치하고 있는 한 원전 1호기의 주요 마일스톤은 Fig 2와 같다. 원전 1호기의 공사기간은 2012년 7월 최초 콘크리트 타설 후 2017년 5월 준공까지 약 58개월이 소요된다. RCB의 외벽은 1단부터 18단으로 이루어져 시공되며, 2013년 4월 12일부터 2014년 1월 22일까지 총 282일이 소요되었다. 중동 프로젝트를 예로 계산하였을 때 원전 외벽 1단 시공에 소요되는 평균 공사기간은 15.7일이었다. Table 1과 같이 일반적으로 외벽 4단과 7단은 기기반입구(equipment hatch)를 설치하기 위한 추가 작업으로 인하여 공사기간이 증가하는 경향이 있다[8].

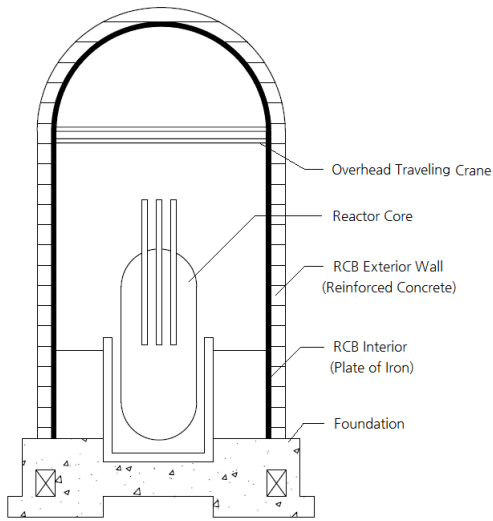


Fig. 1. RCB exterior wall cross section

Table 1. Construction duration of exterior wall

| Exterior Wall | Actual Duration (days) | Accumulated Duration (days) |
|---------------|------------------------|-----------------------------|
| 1st           | 24                     | 24                          |
| 2nd           | 13                     | 37                          |
| 3rd           | 12                     | 49                          |
| 4th           | 32                     | 81                          |
| 5th           | 12                     | 93                          |
| 6th           | 13                     | 106                         |
| 7th           | 42                     | 148                         |
| 8th           | 17                     | 165                         |
| 9th           | 9                      | 174                         |
| 10th          | 13                     | 187                         |
| 11th          | 9                      | 196                         |
| 12th          | 9                      | 205                         |
| 13th          | 24                     | 229                         |
| 14th          | 11                     | 240                         |
| 15th          | 12                     | 252                         |
| 16th          | 10                     | 262                         |
| 17th          | 10                     | 272                         |
| 18th          | 10                     | 282                         |
| Total         |                        | 282                         |
| Average       |                        | 15.7                        |

### 2.3 원전 관련 주요 연구 현황

국내 원전 건설과 관련한 주요 연구 현황은 Table 2 와 같다. Bang et al.[1]은 세계 원전시장 현황과 건설전 망을 알아보고 건설 경쟁력의 확보를 위한 기술 개발 전략에 대하여 논하였다. Yang et al.[6]과 Song et al.[8]은 국내외의 원전 공사에 대하여 사례 분석을 하였으나 RCB 벽체 거푸집과 관련된 내용은 언급되지 않았다. 또한 Song et al.[9]은 원전 건물 벽체 높이에 관한 이론 정립 및 RCB 거푸집 시스템의 1단 타설 높이별 시공성을 평가하였다. 그러나 이 연구에서는 RCB 벽체 거푸집의 실제 적용을 통한 분석이 아닌, 적용했을 때의 효과에 대한 예측에 불과하다.

본 연구에서는 이와 같은 선행 연구들의 한계점을 개선하기 위하여 RCB 외벽용 거푸집을 개발하여 현장 mock-up 실험을 통한 분석을 수행하고자 한다.

Table 2. Previous studies of form work and nuclear power plant

| Researcher         | Summary  |
|--------------------|--|
| Song et al. (2015) | Evaluation of constructability of RCB exterior wall according to placing height on nuclear power plant                                     |
| Song et al. (2010) | Case study of RCB exterior wall construction in nuclear power plant  |
| Bang et al. (2010) | Recent status and prospect of the nuclear power plant of the world and construction technology development strategy                        |
| Yang et al. (2009) | A case of shortening the construction period and internal and external trends and direction of improvement of foreign nuclear power plants |

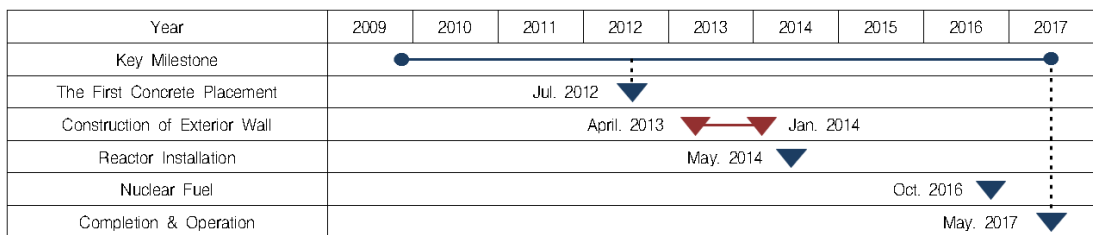
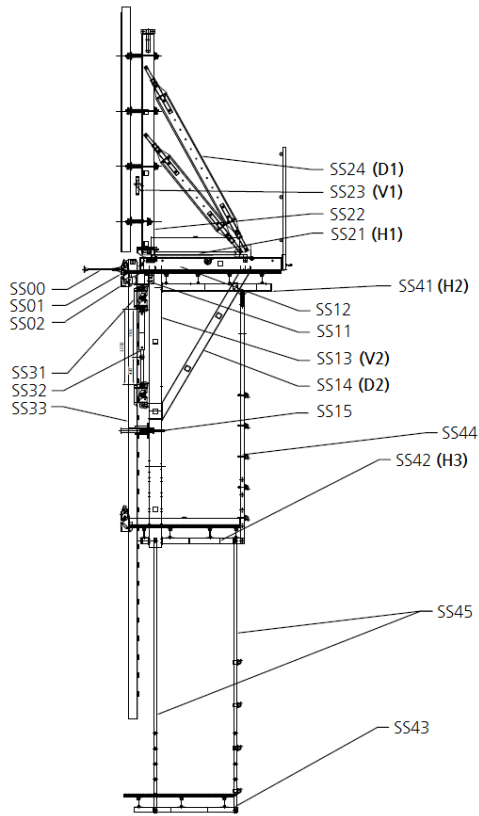


Fig. 2. Example of milestone of RCB

**Table 3.** A section of RCB exterior wall form & wall form component list



| Part            | ID   | Name                   |
|-----------------|------|------------------------|
| Anchor system   | SS00 | Climbing Anchor        |
|                 | SS01 | Wall Bracket           |
|                 | SS02 | Hook Bracket           |
| Lower Frame     | SS11 | Hook Arm               |
|                 | SS12 | Main Deck              |
|                 | SS13 | Vertical Beam          |
|                 | SS14 | Diagonal Beam          |
| Upper Frame     | SS15 | Frame Support          |
|                 | SS21 | Rollback               |
|                 | SS22 | Wallform Support       |
| Climbing System | SS23 | Form Leveler           |
|                 | SS24 | Wallform Support Brace |
|                 | SS31 | Up-Down Box            |
| Working Deck    | SS32 | Cylinder               |
|                 | SS33 | Rail Beam              |
|                 | SS41 | N Floor Support        |
| Working Deck    | SS42 | N-1 Floor Support      |
|                 | SS43 | N-2 Floor Support      |
|                 | SS44 | N-1 Post Pipe          |
|                 | SS45 | N-2 Post Pipe          |



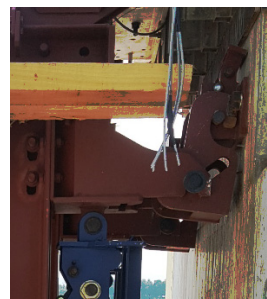
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

**Fig. 3.** Main components of hydraulic climbing system  
 (a) RCB exterior wall form installation  
 (b) hydraulic unit (c) hydraulic cylinder  
 (d) up-down box (e) rail beam

### 3. 제안된 RCB 외벽 거푸집 개요

#### 3.1 거푸집 구성 및 단면

현재 원전 건설에 일반적으로 사용하고 있는 슬라이딩 거푸집 시스템의 1단 타설 높이는 3m 정도이다. 이는 1단 4m 높이로 타설 시 약 30% 이상 증가되는 콘크리트 측압에 대한 구조적 안전성을 확보하기 어려워 시공 과정에서 문제가 발생할 수 있다. 이와 같은 문제의 해결을 위하여 본 연구에서는 기존 거푸집의 부재를 변형 및 개발하였다. 본 연구에서 제안된 RCB 외벽 거푸집은 벽체 타설 시 외부 크레인의 도움 없이 자체에 부착된 유압구동시스템에 의하여 자체적으로 인양되는 시스템 거푸집이다. 거푸집을 거치할 수 있는 월 브라켓(SS01)과 거푸집을 전, 후진시킬 수 있는 롤 백 브라켓(SS21), 거푸집의 자동 클라이밍 시스템 구성 요소인 업-다운(Up-Down) 박스(SS31) 및 레일 빔(SS33) 등으로 구성하였다. 월 브라켓과 롤 백 브라켓의 접합부에서는 약 20톤의 인장하중을 지지할 수 있도록 접합부와 앵커볼트를 설계하였다. 거푸집의 구성을 나타낸 그림 및 RCB 외벽 거푸집의 부재 목록은 Table 3과 같다. RCB 벽체용 거푸집의 높이는 4m이며 이론상으로는 1개 층(4m 기준)의 인양 최단 시간이 6.6분이다. 현장 상황을 고려할 때 실제 인양 시간은 최소 15분에서 최대 60분 정도 소요될 것으로 예상된다. RCB 벽체용 거푸집이 자동으로 인양될 수 있도록 하는 것은 거푸집 자체에 부착된

유압 클라이밍 시스템이다. 유압 클라이밍 시스템의 주요 부품은 유압 유니트(hydraulic unit), 유압 실린더(hydraulic cylinder), 업-다운 박스(up-down box), 레일 빔(rail beam)과 호스 및 부자재들로 구성되어 있다. 개발된 RCB 벽체용 거푸집의 실물과 주요 부품은 Fig 3과 같다.

### 4. RCB 거푸집 현장 적용성 평가

#### 4.1 거푸집 구조적 안전성 검토 결과

거푸집 시스템의 1단 타설 높이를 4m로 증가시켰을 때 증가된 타설 높이에 따른 거푸집의 허용 내력을 만족시킬 수 있는 지 알아보기 위하여 구조적 안전성을 검토하였다. 구조 검토는 구조설계 및 해석 프로그램 ‘MIDAS GEN 2015’를 이용하여 거푸집 변위, 부재 응력, 주요부재 내력, 거푸집 단위부재, 주요 접합부 내력 및 정착용 앵커 등을 검토하였다. 거푸집 모델에 콘크리트의 측압 및 하중을 입력하여 변위 및 부재응력을 검토한 결과 콘크리트 타설시 측압에 의한 거푸집의 수평변위는 최대 2.9mm인 것으로 나타났다. 이는 허용변위인 3.0mm보다 값이 작기 때문에 4m 벽체 거푸집의 수평변위는 적합한 것으로 나타났다. 골조를 구성하고 있는 주요부재의 내력을 검토한 결과 역시 충분한 안전을 확보한 것으로 확인되었다. 주요 접합부의 내력에 대하여 횡

Table 4. Analysis result of structure

|                  | Material     | Axial Force Pu(kN)  | Shear Force Vu(kN) | Design Shear Strength φRn(kN) | Design Tensile Strength φNn(kN) | Design Shear Strength φVn(kN) | Bending Moment Muy (kN.m) | Bending Moment Muz (kN.m) | Ratio (Pu/2φPn +Muy/φMny+ Muz/φMnz) | Result |
|------------------|--------------|---------------------|--------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------------------|--------|
| Form Unit Member | V1           | 143.6 (tension)     | -                  | -                             | -                               | -                             | 26.1                      | 0                         | 0.260                               | O.K    |
|                  | V2           | 179.9 (tension)     | -                  | -                             | -                               | -                             | 10.4                      | 0                         | 0.142                               | O.K    |
|                  | H1           | 192.6 (tension)     | -                  | -                             | -                               | -                             | 0.19                      | 0                         | 0.061                               | O.K    |
|                  | H2           | 0                   | -                  | -                             | -                               | -                             | 6.27                      | 0                         | 0.189                               | O.K    |
|                  | H3           | 0                   | -                  | -                             | -                               | -                             | 2.37                      | 0                         | 0.128                               | O.K    |
|                  | D2           | 200.1 (compression) | -                  | -                             | -                               | -                             | 10.8                      | 0                         | 0.168                               | O.K    |
| Joint Connection | D1 end joint | 120.6 (compression) | 0                  | 235.6                         | -                               | -                             | -                         | -                         | 0.51                                | O.K    |
|                  | V1,V2        | 248.4 (tension)     | 25.4               | 301.5                         | -                               | -                             | -                         | -                         | 0.82                                | O.K    |
|                  | H1           | 248.4 (tension)     | 25.4               | 301.5                         | -                               | -                             | -                         | -                         | 0.82                                | O.K    |
| Fixed Anchor     | Fixed Anchor | 248.4 (tension)     | 25.4               | -                             | 27.4                            | 108.5                         | -                         | -                         | 1.199 (Pu/φRn)                      | O.K    |

단면 접합 부재(D1)의 접합 볼트는 양면에 2면 전단 플레이트를 대고 M20(F10T) 볼트를 적용한 것으로 검토하였더니 안전한 것으로 나타났다. 수직재(V1, V2)와 수평재(H1)의 접합부는 1면 전단 M16(F10T) 볼트를 적용한 것으로 검토한 결과 적합한 것으로 나타났다. 또한 골조를 콘크리트에 정착시키는 정착용 앵커 역시 수평간격 0.9m마다 설치하고 M27 볼트 2개를 적용하면 휨 및 전단에 대하여 안전이 확보되는 것으로 확인되었다. 검토 결과는 Table 4와 같다. 거푸집을 지지하는 앵커는 고정하중, 작업하중, 풍하중 등의 하중에 대한 안전성을 확보하여야 한다. RCB 4m 벽체용 거푸집의 구조적 안전성을 검토한 결과 거푸집의 단위부재, 주요 접합부, 그리고 정착용 앵커 모두 만족하는 것을 알 수 있었다.

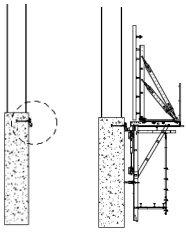
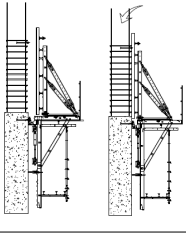
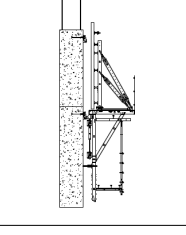
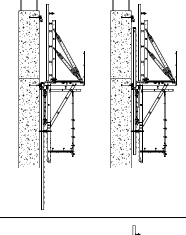
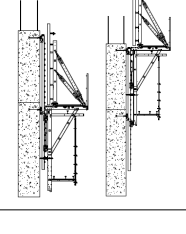
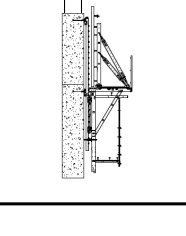
#### 4.2 거푸집 시공성 분석

RCB 외벽 거푸집의 시공성을 분석하기 위하여 현장 목업(mock-up) 실험을 통해 단계별 작업 절차를 검토하였다. 거푸집의 작업 절차는 Table 5와 같이 총 6단계로 나뉜다.

목업(mock-up) 실험을 통한 시공 절차 검토 후 RCB 공사기간을 분석하였다. RCB 공사기간에 대한 내용은 원전 공사 및 시설의 보안관계로 인하여 자료 수집에 대한 어려움이 있어 현재 실무에 종사하고 있는 시공경력 5년 이상의 현장 전문가들에게 원전 공사기간에 대한 자문을 구하였다. 기존 원전 거푸집 공사 실적 자료를 기준으로 하여 원자로 공사에서 개발된 RCB 외벽용 거푸집을 이용하였을 때의 공사기간을 예측하였다. 원자로 규모는 수직원통부 직경 47.38m, 외주길이 136.31m, 높이 53m, 벽체 두께는 1.39m로 가정하였으며 1단 타설 높이가 3m일 때와 4m일 때의 기본 구간 공정을 비교하여 공사기간의 단축이 가능한 부분을 추정하였다. 기본 구간은 비정형, 장비 설치구간 등을 제외한 일반적인 작업 사이클이 적용되는 구간 즉, 철근 작업(포스트-텐션 포함), 거푸집 작업, 점검 및 감독 작업, 검사 작업으로 정하였다. 또한 1단과 2단은 알폼 및 유로폼 등의 재래식 거푸집을 이용하고 3단 타설부터 개별 작업을 하는 것으로 한다. 기본 구간 단위공정표는 Fig 4와 같다.

원자로 공사의 기본 구간의 공정을 비교한 결과 1단 타설 기준으로 철근 작업, 점검 및 감독 작업, 검사 작업의 공사 기간은 동일하였고 거푸집 공사 기간은 2일이 단축되었다. 4m 거푸집을 이용하여 RCB를 시공 할 경

Table 5. Formwork procedure

|   | Diagram   | Work description   |
|---|---|--|
| 1 |    | ① install the wall bracket after reclaim the climbing anchor<br>② install frame and form panel   |
| 2 |    | ① moving the rollback backward, rebar placement, and install the climbing anchor<br>② moving the rollback forward and install the form panel<br>③ concrete placement |
| 3 |   | ① moving the rollback backward and form removal<br>② install the wall bracket  |
| 4 |  | ① install the rail beam  |
| 5 |  | ① preparations for climbing<br>② lifting the frame   |
| 6 |  | ① repetitive climbing in other section and concrete placement<br>* go in reverse when they are removed   |

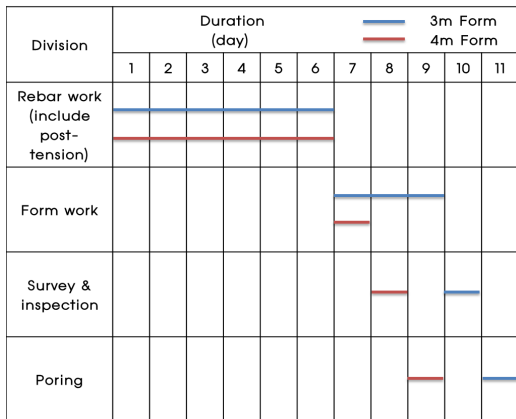


Fig. 4. One-cycle work schedule

우 1단 시공 높이가 기존 3m(18단)에서 4m(14단)으로 증가하여 4단에 해당하는 공사 기간이 절약되는 것이다. RCB 공사 기본 구간 공정 비교 내용을 근거로 하여 3m 거푸집과 4m 거푸집을 각각 RCB 공사에 적용하였을 때의 전체 공사 기간을 Table 6과 같이 산정 및 비교하였다. 3m 거푸집을 적용했을 때는 302일(약 10개월), 4m 거푸집을 적용했을 때는 239일(약 8개월)로 63일(약 2.1개월)이 단축되었다.

Table 6. Comparison with formwork process

| Division                  | 3m (A)               | 4m (B)            | Remark (A-B)       |
|---------------------------|----------------------|-------------------|--------------------|
| Whole construction period | 302days (10.1months) | 239days (8months) | 63days (2.1months) |

Table 7. Expense analysis

|                                       |                                   | 3m                   | 4m                   | Ratio |
|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|-------|
| Form Production Cost                  | Single-stage                      | 1,710,000,000KRW     | 2,688,000,000KRW     | 157%  |
|                                       | Single-stage(Month)               | 47,250,000KRW        | 74,340,000KRW        | 157%  |
|                                       | Lease Period                      | 9month               | 8month               | 89%   |
| Rent                                  | The number of stages              | 16stage (3-18stages) | 12stage (3-14stages) | 75%   |
|                                       | Rent                              | 425,250,000KRW       | 594,720,000KRW       | 140%  |
|                                       | Assembly+Installation+Disassembly | 739,957,680KRW       | 739,956,672KRW       | 100%  |
| Labor Cost                            | Raising                           | 171,688,320KRW       | 77,737,968KRW        | 45%   |
|                                       | Subtotal of Labor Cost            | 911,646,000KRW       | 817,694,640KRW       | 90%   |
|                                       | Assembly+Installation+Disassembly | 2,662,197,840KRW     | 2,662,197,528KRW     | 100%  |
| Machinery Cost                        | Raising                           | 216,096,480KRW       | 1,326,528KRW         | 1%    |
|                                       | Subtotal of Machinery             | 2,878,294,320KRW     | 2,663,524,080KRW     | 93%   |
|                                       | Labor Cost+Machinery Cost         | 3,789,940,320KRW     | 3,481,218,720KRW     | 92%   |
| Total(Rent+Labor Cost+Machinery Cost) |                                   | 4,215,190,320KRW     | 4,075,938,720KRW     | 97%   |

### 4.3 거푸집 경제성 분석

RCB 외벽 거푸집의 경제성을 분석하기 위해 시공성 분석 내용을 근거로 하여 기존 거푸집 시스템(3m)과 제안된 거푸집 시스템(4m)을 적용했을 때의 원가계산을 하였다. 원가계산은 거푸집 제작비, 임대비, 인건비, 기계경비로 나누었다. 인건비 및 기계경비는 조립, 설치 및 해체, 인양비로 나누어 구분하였다. 임대비는 제조원가에 근거하여 설정하였다. 비용 분석한 결과로 일위대가를 만들고 기존 거푸집 시스템 대비 비율을 계산하였다.

거푸집 제작비용 및 1단 기준 임대비용은 3m 거푸집에 비하여 4m일 때 57%가 증가하였다. 그러나 임대기간과 시공단수가 줄어들었으므로 임대비는 40% 증가하였다. 인건비는 조립, 설치 및 해체 작업에서는 차이가 거의 보이지 않았으며 인양 작업에서는 자체유압시스템 적용으로 인하여 인건비가 절반 이상 감소한 것으로 나타났다. 따라서 기계 경비 또한 3m 공법 대비 1%로 대폭 감소하였다. 제안된 RCB 외벽용 거푸집을 적용했을 때의 비용 분석은 Table 7과 같다.

공사 기간의 단축은 원전 경제성 제고에 가장 효과적으로 기여하는 요소로 알려져 있다. 본 연구에서 제안된 거푸집을 RCB 공사에 적용 시 공기 단축에 의한 이자 절감 효과를 산정하였다. 절감된 이자는 국제원자력기구(IAEA)에서 제시한 건설 이자율을 적용하여 계산하였으며 할인율은 7% 기준으로 한다. 건설 이자율 표는 Table 8과 같다[10].

건설비는 세계적으로 이용률이 가장 높은 한국표준형 원전(OPR1000)을 기준으로 하였으며, 현재 국내 건설 중인 원전의 건설기본계획(안)에 포함된 총 건설비 4조

9천억 원을 적용하였다. 적용된 총 건설비를 기준으로 기존 원전 공사 기간에 해당하는 53개월의 이자율과 4m 거푸집을 적용함으로써 단축된 공사 기간에 해당하는 51개월의 이자율을 적용하였다. 공기 단축에 의한 건설 중 이자 절감액을 산정하는 방법은 기존 공기에 해당하는 이자율 0.1404에서 단축된 공기에 해당하는 이자율 0.1347을 뺀 값을 총 건설비 4조 9천억 원이라는 값에 곱하여 계산하는 것이다. 계산 결과 53개월 공사 기간을 기준으로 2개월이 단축될 경우 원전 건설 이자 절감에 따른 건설비 절감효과는 279억 3천만 원으로 산정되었다[10]. 약 279억 원의 건설비 절감효과와 더불어, 조기 준공 및 원전의 조기 가동으로 인하여 2개월간 생산된 발전량으로 투자기금 회수 기간의 단축 효과를 볼 수 있다.

Table 8. Interest rate of construction

| month | Discount rate | 7%           | 8%    | 9%    |
|-------|---------------|--------------|-------|-------|
| 50    |               | 13.18        | 15.21 | 17.28 |
| 51    |               | <b>13.47</b> | 15.54 | 17.66 |
| 52    |               | 13.75        | 15.87 | 18.04 |
| 53    |               | <b>14.04</b> | 16.21 | 18.42 |
| 54    |               | 14.32        | 16.54 | 18.81 |
| 55    |               | 14.61        | 16.88 | 19.19 |

#### 4.4 분석 결과

개발된 RCB 외벽용 거푸집의 현장 적용성을 분석한 결과 RCB 공사에 거푸집을 이용할 경우 구조적으로 안전하며 공기단축 및 경제적 효과가 있을 것으로 보인다.

원전 공사 시 거푸집의 구조적 안전성을 확인하기 위해 구조설계 및 해석 프로그램을 이용하여 검토하였다. 검토한 결과 단위부재와 주요 접합부 및 정착용 앵커 모두 구조적으로 안전한 것으로 확인되었다. RCB 외벽 거푸집의 시공성을 분석하기 위하여 목업실험을 통해 시공 절차를 검토하였으며 제안된 거푸집을 적용하여 원전 외벽을 타설할 때의 공사기간을 예측하였다. 1단 타설 높이에 따른 공정을 비교하여 공기 단축이 가능한 부분을 추정하였다. 그 결과 기존 3m 거푸집을 적용하는 경우에 비하여 1단 타설 높이가 높아지기 때문에 단위작업량은 늘어나는 것처럼 보인다. 그러나 시공 단수 감소 및 공구별 동시 작업 진행으로 인하여 전체 공사 기간은 Table 6과 같이 10개월에서 8개월까지 약 2개월(63일)을 단축시킬 수 있다. RCB 공사 기간을 시공단계에서 단축함으로써 공기단축에 따른 공사원가 및 이자 또한

절감이 가능하다. 현재 국내에 건설 중인 OPR1000 건설비 4조 9천억원을 기준으로 단축된 공사기간의 이자율을 적용하여 이자 절감액을 산정한 결과 279.3억으로 나타났다. 이러한 정량적 효과 이외에도 인양방식 개선에 따른 크레인 운영비와 단축되는 기간에 해당하는 현장운영관리비 및 원전의 조기가동 등에 따른 비용의 절감이 가능하다. 따라서 추가적인 경제적 효과 및 이익을 얻을 수 있고 4m 높이의 거푸집을 적용하는 효과가 클 것으로 사료된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 세계 원전시장에서의 건설 경쟁력 확보를 위하여 원전 벽체 1단 타설 높이를 증가시킬 수 있는 RCB 외벽용 시스템 거푸집을 개발하여 현장 적용성에 대해 분석하였다. 개발된 거푸집을 RCB 공사에 적용함으로써 원전 벽체의 1단 타설 높이는 3m에서 4m로 기존 공법 대비 1m 증가되었고 시공단수는 18단에서 14단으로 감소되었다.

본 연구의 범위 내에서 중요한 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 개발된 거푸집을 적용하여 RCB 4m 벽체 콘크리트 타설 시 구조적으로 안전한지 검토하기 위해 'MIDAS GEN 2015' 프로그램을 이용하여 구조 해석을 하였다. 거푸집의 단위부재, 주요 접합부 및 정착용 앵커의 내력에 대하여 검토를 한 결과 축압과 하중에 대한 구조적 안전성이 확보된 것으로 나타나 실제 RCB 건설 적용이 적합한 것으로 사료된다.
- 2) 개발된 거푸집의 시공성을 분석하기 위하여 현장 목업(mock-up) 실험을 통한 거푸집의 단계별 작업 절차를 검토하였다. 또한 시공경력 5년 이상의 현장 전문가에게 자문을 구하여 타설 높이별 기본 구간의 공정을 비교하였다. 공정 비교 결과 4m 거푸집을 이용하여 RCB 공사를 진행할 경우 1단 타설 기준으로 거푸집의 공사 기간이 2일이 단축되는 것을 확인하였다. 또한, 자체유압시스템으로 인양하기 때문에 공사구간별 동시 작업이 가능하며, 1단 시공 높이가 증가함으로써 감소되는 시공단수에 해당하는 공기가 단축된다.
- 3) 개발된 거푸집의 경제성을 분석하기 위하여 순수 원자로 골조에 해당하는 수직 구간 공사 물량을



산출하였으며 시공성 분석 결과를 토대로 추정하였다. 분석 결과 4m 높이 거푸집을 적용하여 원자로 건물 시공 시 기존 3m 높이 거푸집을 적용하였을 때에 비하여 공사기간이 월등히 단축되었으며 단축된 공사기간에 해당하는 현장 경비 감소 등에 따른 공사비 절감 효과를 확인하였다.

본 연구를 통해 개발된 거푸집을 RCB 공사에 적용함으로써 RCB 외벽 벽체의 1단 타설 높이를 증가시킬 수 있으며 그에 따른 2개월의 공기 단축과 총 공사비 및 이자금액 절감 및 원전 조기가동으로 인한 이익을 얻을 수 있다. 원자로 건물의 공사 기간 단축을 위한 지속적인 기술의 개발로 한국의 세계 원전시장에서의 경쟁력 확보에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

## References

- [1] Ministry of Trade, Industry and Energy, The 7th power supply, Sejong-si (Korea): Ministry of Trade, Industry and Energy, p. 77, 2015.
- [2] G. S. Shin, S. D. Bang, K. S. Kim, H. K. Kim, Critical success factors for nuclear power plant construction projects, Korean Journal of Construction Engineering and Management, 2017.
- [3] B. H. Kim, "Won the UAE nuclear power plant - Is it the 'Second semiconductor myth' signal", The Journal of Construction & Economy Research Institute of Korea, Vol. 2, pp. 17-19, February, 2010.
- [4] J. H. Lee, "Approaching the nuclear renaissance, world power plant construction in fierce competition", Nuclear industry, Vol. 29, No. 7, pp. 63-75, 2009.
- [5] Newscj.com [Internet]. Seoul: Newscj; c2009-2016 [updated 2016 Oct; cited 2016 Nov 15]. Available from: <http://www.newscj.com/news/articleView.html?idxno=379898>.
- [6] M. D. Yang, M. H. Jang, D. H. Kwon, "The trends of construction duration reduction for nuclear power plant in domestic and foreign, and future prospects", KPMA 2009 Symposium, pp. 279-304, 2009.
- [7] Korea Institute of Nuclear Safety Regulatory Directives on Nuclear Power Safety Decree - Nuclear Power Safety Decree and Technical Standard - Regulatory Directives (Chapter 7.2 Containment Building-7.2.1 Design analysis of a containment building) 2015 Sep; 741(Regulatory standard and directives for the light-water reactor type nuclear power plant).
- [8] H. Song, S. Kim, Y. Shin, G. H. Kim, "Case Study of Reactor Containment Building Construction in Nuclear Power Plant", Journal of Building Construction and Planning Research, Vol. 2, No. 3, pp. 173-182, February, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4236/jbcpr.2014.23016>
- [9] H. M. Song, Y. J. Sohn, Y. S. Shin, "Evaluation of Construction RCB Exterior Wall Formwork according to

Placing Height on Nuclear Power Plant", Journal of the Korea Institute of Building Construction, Vol. 15, No. 6, pp. 653-660, 2015.

DOI: <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2015.15.6.653>

- [10] D. S. Lee, A study on the Competitiveness Improvement of the OPR1000 through Reduction of the Construction Period [Master's thesis], [Daejeon]: Korea Advanced Institute of Science and Technology, pp. 76, 2008.

### 조 예 림(Yerim Cho)

[정회원]



• 2016년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 일반대학원 건축공학과 (석사과정)

<관심분야>

건축시공, 건설관리, 안전관리

### 신 윤 석(Yoonseok Shin)

[정회원]



• 2005년 2월 : 고려대학교 대학원 건축공학과 (공학석사)  
 • 2010년 2월 : 고려대학교 대학원 건축공학과 (공학박사)  
 • 2012년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 플랜트-건축공학과 부교수

<관심분야>

건축시공 및 재료학, 건설관리, 안전관리

### 고 영 태(Young-Tae Ko)

[정회원]



• 2016년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 일반대학원 건축공학과 (박사과정)

<관심분야>

건축시공, 안전관리, 하자예방, 부동산개발