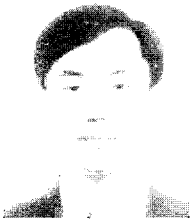
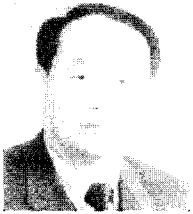


신형경수로 1400의 모듈화 설계 · 시공에 대한 연구



임재희 · 한국전력기술(주), 토목기술처, 책임기술원



박상욱 · 한국전력기술(주), 사업책임자실, 수석기술원



최일남 · 한국전력기술(주), 사업책임자실, 수석기술원

1. 들어가며

최근 과학기술부는 제 20차 원자력안전위원회를 개최하여 28개월에 걸친 원자력안전기술원과 원자력안전전문위원회의 심사결과 원자력법령의 관련기술기준에 적합함을 확인하여 국내에서 독자적으로 개발된 『신형경수로1400(APR1400) 표준설계 인가』를 심의·의결하였다. 이러한 표준설계인가 제도는 2001년도에 신규 제정된 이래 “신형경수로 1400”에 최초로 적용되었으며 표준설계인가로 인하여 우리나라는 안전성과 경제성 측면에서 세계적으로 우수한 최신형 원전의 설계기술 보유국이 되었다. 또한 표준설계를 참조한 원전을 신고리 3,4호기(2010.9, 2011.9 각각 준공예정)부터 반영하여 2015년까지 4기를 건설할 예정이다. 이러한 표준설계인가를 통해 국내 원전의 안정적인 전력공급에 기여함과 동시에 한 차원 향상된 안전성과 기술성을 바탕으로 독자적인 설계능력을 확보함으로써 향후 원전의 해외수출에도 크게 기여할 것으로 전망된다.

신형경수로1400은 지난 1992년부터 약 10년간 국가 선도기술개발사업을 통해 개발되었으며 한국수력원자력(주), 한국전력기술(주), 한국원자력연구소, 두산중공업(주) 등 산·학·연의 연 인원 약 2,300여명이 참가하였고 총 2,346억원의 개발비가 투입되었다. 특히, 한국전력기술(주)은 차세대원자로기술개발(I, II, III)사업을 통하여 신형경수로1400의 설계개발은 물론 표준설계인가 취득에 주도적인 역할을 수행하였다.

국내 원전산업은 세계 10위권 내의 원전설비 보유국으로 성장·발전하였으며, 한국표준형 원전의 반복건설로 원전기술 자립 및 표준화를 통한 수출 기반이 구축되어 있으나 석탄화력대비 원전의 경쟁력이 점차 약화됨에 따라 원전 건설에 대한 경쟁력제고가 절실히 요구되고 있다. 또

한 원자력발전소는 엄격한 규제요건과 품질요건으로 인하여 일반 발전설비에 비하여 건설공기가 상당히 길며, 건설공기가 시공비용 및 발전원가에 미치는 영향이 매우 크다. 원자력발전소의 건설공기는 초기투자비용의 막대함에 비추어 볼 때 경제성에 미치는 영향이 매우 크다. 건설공기가 짧아질수록 전력회사의 전력수요 예측에 신축적으로 대응할 수 있으므로 전력회사의 투자비회수 뿐만 아니라 전력시설의 안정성 측면에서 상당한 효과가 있다. 따라서 해외 개량형원자로의 경우 공기단축을 위한 모듈화 건설공법과 기술을 개발하고 프로젝트에 적용하기 위한 노력을 계속하고 있다.

본 연구는 차세대원자로 기술개발을 통하여 공동매트기초 철근모듈, 원자로건물 벽체/돔라이너 철판모듈, 원자로건물 내 재장전수조 모듈, 이차 차폐벽 철판거푸집 모듈 등 차세대원자로사업의 모듈적용성 검토를 수행하면서 연구된 모듈화에 대한 설계·시공개념과 설계절차, 모듈화를 위한 주요 설계 및 시공기술에 대해 기술하고자 한다. 모듈화 설계·시공의 지속적인 연구는 원자력발전소 건설시장 개방 등의 외적인 환경변화에 능동적으로 대처할 수 있는 역량을 강화하고 원전의 국제경쟁력 확보를 위한 기본전략으로 채택할 수 있을 것으로 예상된다.

2. 신형경수로 1400의 모듈화 설계 및 시공 계획

2.1 모듈화의 개념 및 역사

화석연료의 과다 사용으로 인한 온실효과 등으로 지구의 온난화 현상등 기상환경악화에 대한 우려가 날로 증대되고 있다. 이에 따라 세계적으로 원자력 발전에 대한 관심이 증대되고 있다. 원자력발전의 많은 장점에도 불구하고 주요 문제점 중의 하나는 건설공기가 다른 프로젝트에 비해 매우 길어 건설중이자(Allowance

for funds used during construction : AFUDC) 및 간접공사비의 상승으로 총 공사비용이 증가하여 건설단가가 높다는 것이며, 발전원으로써 원자력의 경쟁력 확보에 주요 장애요인이다. 이에 따라 건설 공기단축의 필요성이 더욱 절실히 요구되고 있으며, 원전건설 공기단축의 한 방법으로써 모듈화에 의한 설계·시공이 추진되고 있다.

모듈은 최종설치장소 이외의 장소(건설 현장 내부 또는 외부)에서 대상부분 전체 또는 일부분을 사전제작(Prefabrication), 조립하여 최종위치에 설치하는 일련의 과정으로 정의한다. 모듈은 계통, 기능 및 설치기술에 관계없이 구조물, 마감 및 기기·부품 등을 조립하여 하나의 공간에 배치하도록 한 것이다. 사전제작된 부품이나 사전조립을 포함한 대부분의 모듈은 설치현장 밖에서 제작된다. 차세대원자로 사업에서는 원전의 경제성 확보를 위하여 설계와 시공성검토(Constructability Review)를 비롯하여 건설공기 단축을 위한 노력을 지속적으로 수행하였으며, 원전건설 공기단축의 일환으로 조선업체와 석유화학 플랜트의 모듈화 기법을 도입하여 건설공기 단축 및 건설비용의 절감, 품질의 향상, 불확실한 시공의 감소, 현장시공인력 밀도의 감소 등을 이룩하였다.

구조모듈(Structural Module)은 초기 발전소 건설에서부터 사전제작 및 조립되어 모듈공법이 적용되어 왔으며 발전소의 규모와 발전용량이 커지고 복잡성이 증가함에 따라 일반산업에서 발전되어온 철근사전조립 등의 구조모듈이 확대 적용되고 있다. 1960년대부터 1970년대 초기까지의 원자력발전소에서는 보강철근의 사전조립이 소형 슬래브, 기초, 트렌치(Trench)에 대하여 주로 적용되었으며, 케이지(Cage)에 의한 철근조립은 케이슨 및 기둥에 대해서 적용되었다. 최근에는 터빈발전기초 기둥철근, 기초매트철근, 사용후핵연료저장조용 벽체 등 대형 벽체

및 슬래브가 모듈화 되고 있다.

철근모듈 공법은 국내 기존원전 건설시 적용한 터빈발전기초 기둥철근모듈, 해외 원전건설시 적용된 사용후핵연료저장조 벽체, 증기발생기주위 격벽 등의 벽체, 원자로건물 벽체 등의 벽체용 철근모듈, 취배수로 구조물 암거용 철근모듈 등 다양한 형태로 적용된 바 있다. 철근모듈공법의 적용은 설계, 시공 및 공정상 기존 건설관행과 약간의 차이는 있으나 다음과 같은 사항을 고려하여 모듈항목을 선정하고 계획되어야 한다.

- 철근모듈 제작작업과 작업현장에서의 준비작업이 병행 시공할 수 있어 건설공기 상 기대효과가 큰 경우 즉, 철근설치작업이 발전소 건설공정상 주공정에 해당하는 경우
- 철근작업 현장으로의 접근이 어려워 작업원 및 검사원의 현장접근에 소요되는 시간이 많은 경우
- 작업현장이 높은 곳에 있어 건설안전면에서 기대효과가 큰 경우
- 철근이 밀집하여 배치되어 있으며, 각종 매설물이 복잡하게 설치되어 철근시공에 정확성을 기해야 할 필요성이 있

는 경우

- 암거용 철근모듈과 같이 주공정단축 이외의 경제성, 시공성 관점에서 기대효과가 큰 경우

기기모듈(Equipment Module)은 선박 및 해양플랜트의 시공에서 비롯되었다. Stearns-Rogers는 1938년 가스압축기 모듈을 개발하였으며 2차 세계대전 동안에는 해군선박을 건조하기 위하여 블록건조방법을 사용하였다. 1950년대에는 석유정제소를 휴스턴에서 제작하여 과테말라로 운송하였으며 엑스도 1962년 벨기움에서 바지선 위에 정제소를 제작하여 리비아로 운송·설치하였다. 1970년대 와서 북극의 석유저장설비 개발과 중동에서의 산업 기반시설 건설에 의한 공장조립의 양적인 증가는 모듈화 기술개발의 추진력이 되었다.

선박건조분야는 모듈화에 의한 생산성 향상과 이에 따른 경제적 이득이 가장 많은 분야중 하나이다. 그림 1은 모듈화 선박의 건조절차 및 개념도로 어떻게 선박을 건조하는지를 잘 나타내고 있다. 이러한 개념은 일반산업플랜트에서의 시공과 매우 유사한 면이 있다. 선박건조는 1945

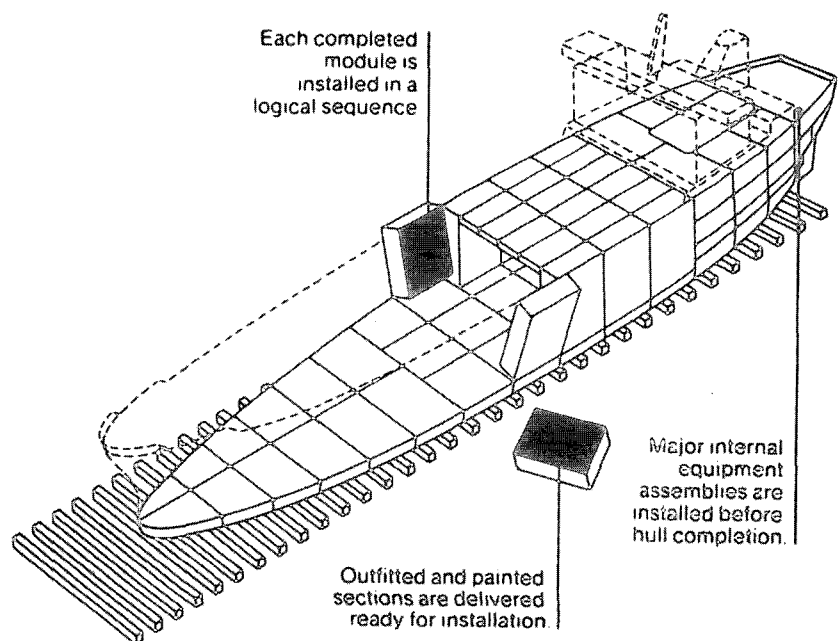


그림 1. 모듈화 선박의 건조절차 및 개념

년대부터 용접기술이 발달함에 따라 1950년대 중반부터 모듈공법이 적용되었다. 모듈기술이 발달한 것은 용접기술의 영향이 매우 크며, 모듈공법 적용으로 선박 건조에 필요한 시간은 절반 수준으로 축소할 수 있었다.

원자력발전소의 모듈화에 대한 본격적인 연구는 1980년대 미국전력연구소(Electric Power Research Institute : EPRI)의 개량형원전 프로그램(Advanced Light Water Reactor Program)에 대한 연구에서 시작되었다. 이 연구에는 종합 설계사, 주기기공급사, 연구소, 에너지성 및 12개의 발전회사(Utilities)가 참여하였으며, 이 연구의 결과는 원자력발전소의 설계요건으로 시공성프로그램(Constructability)을 만들었으며, 미국의 개량형원자전의 하나인 System 80+도 이러한 프로그램을 반영하여 개발한 것으로 알려지고 있다.

2.2 원자력발전소의 건설특징

원자력발전소 건설은 점차 강화되는 환경규제, 안전성보장과 품질확보를 전제로 경제성제고와 전력수급계획 목표달성을 위한 건설공기 준수 등의 필수요소가 복합적으로 반영되어야 한다. 최근 산업계에 급속도로 확산되고 있는 기계화 및 자동화의 확대개념은 건설업체 장비의 첨단 기계화 및 설비의 정밀화로 고품질의 시공성을 확보하고 있으나, 원전건설분야의 경우 설계요건 및 각종 규제사항 등의 제약조건에 대한 시공사의 독자적인 대책 수립이 미약하여 종래의 재래식 공법에 한정되고 안정성 및 품질요건에 대한 한계를 극복치 못하고 있는 상황이다. 원자력발전소의 건설특징을 살펴보면 다음과 같다.

• 원전건설 작업자는 엄격한 품질검사과정에 따라 작업의 연속성 부족으로 대기시간이 길어진다고 볼 수 있다. 즉, 원전현장은 다양한 품질등급, 다양한

조직의 검사참여, 다단계의 검사제도를 적용하기 때문에 품질검사체계 속에서는 관련 서류준비 및 체계적인 검사관리 업무를 위해 많은 관리 인력이 필요하다. 즉 원전 건설현장의 특성상 검사관리인력과 노무자가 수행할 수 있는 작업량과의 균형이 유지되어야 대기시간을 줄일 수 있다. 그러나 원전건설의 입지여건, 처우 등의 제약으로 적정수준의 기술인력을 확보하기가 어려운 실정이다. 따라서 선진화된 건설관리 기술이 필요하다.

- 원자력발전소는 설계와 시공을 병행하여 진행하며(Fast Track 공법) 구조가 매우 복잡하고 까다로운 설계와 시공요건 등으로 인하여 많은 설계변경 요인이 발생하게 되고 이를 해결하기 위한 많은 노력과 작업중단으로 인한 노무인력 낭비 등이 나타나고 있다. 따라서 설계완성율을 제고와 더불어 설계를 조기에 착수하여 설계와 시공의 병행기간 단축과 원자력발전소의 구조를 보다 단순화하여야 한다. 또한 사전에 철저한 설계검토(Design Review)를 통해 시공단계에서의 설계변경 요인을 최소화해야 한다.
- 국내원전건설에서 적용하고 있는 시공법은 주로 재래식공법을 적용하고 있기 때문에 시공생산성이 선진국에 비해 낮은 것으로 나타나고 있다. 시공생산성이 저조한 원인으로서는 근로의식의 부족, 부적절한 설계 및 도면발행 지연, 시공사의 관리책임 및 공법개선의지 부족, 노무 및 품질관리 미흡으로 나타났다. 따라서 시공생산성을 향상시키기 위해서는 모듈화와 같은 새로운 건설공법의 개발과 신 장비의 활용이 필요하다. 주요시공법들은 프로젝트의 설계방향을 결정하기 때문에 초기에 확정되어야 하며, 새로운 건설공법을 적용하기 위해서는 사업의 초기단계부터 설계반영 사항을 검토하는 것이 필요하다. 또

한 표준원전의 설계·시공경험이 후속 사업에 충실히 반영될 수 있는 시스템 개발이 필요하다.

2.3 모듈화 설계의 요건

모듈화 시공을 위한 설계요건은 미국의 전력연구소에서 발행한 URD(Utility Requirement Document)에 잘 나타나고 있으며, 이러한 요건은 국내에서의 모듈화 설계 및 시공개념을 정립하는데도 많은 도움이 될 것이다. 주요 기술요건은 모듈화 시공의 개념, 모듈공법 적용계획, 모듈설치순서로 구성되어 있다.

(1) 모듈화 시공의 개념

- 시공계획에는 적용하고자 하는 개량시공기술과 시공실적에 대한 설명이 포함되어야 한다. 시공자는 적용하고자 하는 시공기술이 설계내용과 일치하는지를 확인하기 위해 사업초기에 설계자와 협력하여야 한다.
- 원자력발전소는 모듈화 시공기술을 사용함으로써 최대의 이익을 얻을 수 있도록 설계되어야 한다. 설계, 구매, 시공단계에서 모듈을 준비하기 위하여 시공기술 중 실제적용이 가능한 분야의 모듈화계획을 프로젝트 초기에 수립하여야 한다. 발전소 설계의 초기단계에 발전소건설 시 적용할 수 있는 모듈에 대한 목록이 정해져야 한다. 모듈의 형태는 모듈전부를 소외 제작장에서 제작할 것인지, 주요 부분만을 소외제작장에서 제작하여 소내제작장 혹은 설치위치에서 조립할 것인지, 또는 모듈전부를 소내의 모듈조립장에서 제작할 것인지에 따라 분류해야 한다.
- 모듈 적용시에는 작업의 단순화를 위해 표준화된 요소와 부품 등을 최대한 이용하여야 한다. 설계시에는 설치 및 조립, 보수, 운전, 부품의 제거·교체 등을 위한 충분한 접근공간이 마련되도록 해야 한다. 모듈이 제작되는 시점에는

“보류(Hold)” 되는 부분이 없이 설계가 100% 완료되어야 한다.

- 소외제작자에 의해 공급되는 복합모듈의 설계는 제작자를 포함하도록 해야 한다. 선적 시 고려사항, 모듈 연결구간에서의 제작오차, 설비에 대한 운전보수시의 접근성 문제 등이 고려되어야 한다. 모듈의 크기는 현장에서의 대용량 크레인의 능력, 선적시의 한계중량 등을 고려하여 정해야 한다.

(2) 모듈공법 적용계획

- 영구구조물, 복합적인 부품 또는 자재 등과 같이 복잡한 간섭사항을 포함하고 있는 주요 패키지(Package)들을 소외공급자에 의해 제작할 것인지, 현장 내 제작을 위해 부분조립 할 것인지 등에 대한 모듈화계획이 수립되어야 한다.
- 공급자에게 자재구매책임을 부여하는데 따른 비용손익판단을 위한 구매, 감리 절차에 대한 평가를 시행하여야 한다. 또한 대형모듈의 운반계획에 내재하고 있는 위험성에 대해 운송지연에 따른 설치작업공정의 유연성 영향 및 전후공정에 대한 구속 가능성 등을 소형모듈의 경우와 비교 검토하여야 한다.

(3) 모듈설치순서

- 설치순서에 따른 제작 및 운반요건을 설정하기 위해 모듈설치통로 및 순서에 대한 세부계획이 수립되어야 하며, 시운전 시험계통 공정요건도 고려되어야 한다.
- 모듈설치순서 및 모듈의 크기를 고려하여 벽이나 바닥에 설치되는 건물외부개구부 및 임시개구부의 크기 및 위치를 정해야 한다.
- 대형모듈에 대한 취급 및 설치가 가능하도록 하며, 수직설치공법을 이용하여 설치할 수 있도록 크레인의 인양능력이 충분하여야 한다.

- 소외 모듈제작자는 자재 및 기기, 설계, 구매, 제작, 검사단계에서 발전소건설에 참여하는 관련회사들이 사용하는 공통된 사업데이터베이스(Project Data Base)를 사용하여야 한다.
- 모듈의 공장제작 및 현장조립 또는 설치를 담당하는 모든 조직이 사용하는 절차 및 양식을 표준화해야 한다. 즉, 소외모듈 제작자 및 시공자의 절차와 양식을 표준화해야 한다.

2.4 모듈화 설계를 위한 절차

모듈화 설계에 대한 일반적인 절차는 국내원전의 설계과정에서 반영되지 않았다. 이러한 절차를 반영하기 위해서는 조직간 공동의 노력이 필요하며, 사업관리 측면에서 파트너링(Partnering) 또는 시공성검토(Constructability Review) 조직의 구성이 전제되어야 한다.

그러나 국내원전의 발주형태가 전통적인 설계, 시공 분리발주에 의존하고 있다는 점과 프로젝트가 설계-구매-제작-시공-시운전의 순서로 병행하여 추진되고 있으며, 주요 시공은 현장중심의 업무추진팀(Task Force Team)에 의하여 운영되고 있다. 초기의 설계단계과정에서부터 모듈의 기본적인 개념을 정립되어야 한다는 관점에서 본다면 모듈화 사업을 추진하는 데는 상당한 어려움이 예측된다. 그러나 기기모듈을 제외한 철근모듈, 강구조물 사전조립 등과 같은 구조모듈의 개념은 설계변경없이 현장 적용 가능성이 높으므로, 시공사가 주도적으로 모듈화를 추진할 수 있다.

모듈설계의 절차는 설계, 구매, 제작, 시공의 통합된 절차와 계획이 필요하다. 이러한 통합의 필요성은 모듈의 특성상 설계변경을 할 수 없다는 점을 고려한 것이며, 모듈설계에 다양한 조직이 참여해야 하는 이유도 여기에 있다. 모듈화 프로그램의 핵심은 설계, 건설계획, 건설공정, 기기공급자 및 규제기관의 밀접한 협

의가 요구되며, 사업초기에 각 관련사의 유기적인 참여가 중요하다.

또한 모듈화의 목표를 달성하기 위해서는 설계평가의 제도적인 절차가 요구되며, 충분한 사전계획과 3-D CAD모델의 활용이 필요하다. 모듈 제작전 완전한 설계가 이루어져야 한다는 전제조건은 필수적인 요건으로 작용한다. 모듈설계를 위한 발전소 설계기초가 되는 상위자료는 발전소 가동 및 성능요건, 인허가기준 및 요건, 계약요건, 모듈 적용코드 및 기준 등이며 기기구매, 배치, 시공용 문서를 준비하기 위하여 사업초기에 결정되어야 한다. 모듈설계를 위한 절차는 다음과 같이 7단계로 구분되나 사업 특성에 따라 일부 과정을 생략할 수 있다.

1단계 : 설계문서 번호체계

모든 설계문서 및 도면의 표준번호체계는 구역·높이에 대한 위치정보, 계통, 문서형식, 일련번호로 구성되어야 한다.

2단계 : 모듈대상항목 선정

기기모듈 대상은 배관계장도(P&ID) 및

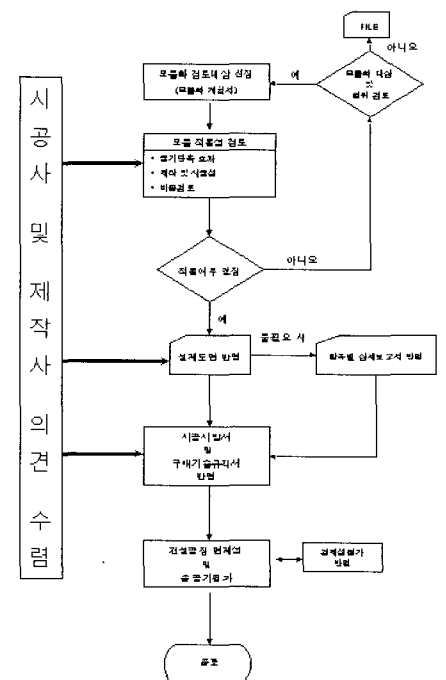


그림 2. 모듈화 설계 및 평가 흐름도

일반배치도를 활용하여 사업초기에 선정하며, 근접한 기기와 배관설치 지역을 우선적으로 선정한다. 부지의 설비에서의 제작을 고려하여 노무비 절감과 공기단축 측면을 고려하여 선정한다. 전기기기 모듈은 전기단선도, 설비도(Block Diagram), 일반배치도를 기준으로 선정한다. 배관계통은 배관배치도면을 검토하고, 인접한 전기배선(Raceway)과 공기조화설비를 고려하여 결정한다. 사업에서 모듈화를 체계적으로 시행하기 위해서는 모듈화에 대한 분야별 설계, 제작 및 시공지침의 개발이 필요하다.

모듈화 계획서 및 분야별 설계지침서는 사업 설계지침으로 활용하며, 선정된 예비대상 항목은 각 항목별 세부 적용성 검토를 그림2와 같은 적용성검토 절차에 의하여 적용범위 및 설계방안이 최종적으로 결정되어야 한다.

3단계 : 모듈화계획서 및 설계지침

모듈화계획서는 모듈의 종류, 설계지침, 모듈선정 시 고려사항, 모듈의 운송 및 설치, 품질보증계획 등을 검토하여 작성한다. 모듈화 설계는 사업목표 달성의 중요한 요소가 된다. 따라서 이 모듈화계획서에서는 모듈설계가 체계적으로 수립되어, 사업에서 철저히 이행될 수 있도록 모듈화 설계와 관련한 사업주, 공급·제작사, 시공사 및 설계사간의 공통적 이해와 노력을 위한 개념에 대해 기술한다.

모듈화 설계의 대상과 범위선정 시 반드시 사업 설계 현황을 최우선적으로 파악하여 사업 공정에 미칠 수 있는 영향이 최소화될 수 있어야 하며 경제성 향상, 건설공기 단축, 건설 사업비 절감, 표준화를 통한 인허가의 단순화 효과 등이 있어야 한다. 모듈화 시공은 기존 시공방식에 비해 많은 현장노무인력을 줄일 수 있을 것으로 예상되며, 모듈 제작은 제작 공장의 설비를 이용할 수 있어 보다 효과적으로 수행될 수 있다. 적정 수준의 모듈 설계

표준화를 위해서는 기기에 대한 정보를 사전에 입수할 수 있어야 하며, 표준화된 기기 사양은 모듈 설계 및 제작자로 하여금 호환성 있는 기자재를 사용할 수 있게 할 수 있다.

모듈화의 중요 변수 중의 하나는 모듈의 적정 크기 및 관리에 있으며, 이를 위해서는 3-D CAD 프로그램이 활용되어야 한다. 3-D CAD에 나타난 모듈 배치도면은 모듈의 적정 크기 선정을 비롯한 모듈 설계 최적화에 활용된다. 모듈 설계가 완료된 후 일부 설계변경이 발생하는 경우 이러한 설계변경 사항을 처리할 수 있는 절차가 반드시 필요하다. 모듈설계 기준은 공종별 모듈 설계 및 제작에 관한 기준과 사업주, 공급·제작사 및 설계사간의 업무 범위와 설계 요건 등을 기술하는데 있다. 또한 플랜트 종합설계사(A/E), 모듈 기기 공급사 및 발주자간의 모듈화 설계에 대한 책임 범위를 구분한다.

4단계 : 모듈설계

모듈설계의 주요절차는 자료준비, 응력해석, 도면작성의 과정이 필요하며 각 항목별 검토사항은 다음과 같다.

(1) 배관계장도 : 모듈화 항목에 대한 주계통 또한 하부계통의 배관계장도(Piping and Instrumentation Diagram : P&ID)를 마련하여야 하며, 다음과 같은 정보가 포함되어야 한다.

- 유로(Flow Paths)
- 계통경계
- 설계압력 및 온도
- 기기계통 계측장비
- 연결위치
- 연결계통에 간섭사항
- 안전등급
- 정상기기 상태

(2) 복합기기 배치도면 작성 : 모든 배관, 기기를 볼 수 있는 모듈에 대한 복합도면을 작성하여야 하며, 복합배치도면은 모듈경계, 간섭요건 및 배관지지구조물을

표시하여야 한다.

(3) 기기배치도면 : 기기배치도면은 기기의 3-D CAD모형을 활용한다.

(4) 간격 결정 : 모듈과 구조물, 모듈간의 간격을 결정한다.

(5) 예비응력해석 : 모듈인양, 운송, 건설하중을 포함한 하중조합에 의한 예비응력해석을 수행한다.

(6) 예비 일반배치도 작성 : 일반배치도에는 다음과 같은 사항이 포함되어야 한다.

- 기준점 및 경계
- 모든 설비계통의 배치
- 배관지지구조물
- 발전소 좌표 상 모듈위치

(7) 최종 응력해석 및 응력해석보고서 작성

(8) 조립도면(Assembly drawing) : 조립도면은 기술검토의견을 반영하여 작성하며, 필요시 일반배치도를 수정할 수 있다. 조립도면에 제공된 정보는 발전소 설계자로 하여금 독립된 기술평가를 수행할 수 있도록 제시되어야 한다. 조립도면에 포함될 주요 사항은 아래와 같다.

- 조립품 각 부분의 고유 번호
- 조립품의 제원
- 조립품 각 부분의 크기, 재료, 형식
- 상세 조립도면의 번호
- 용접위치, 형식, 크기
- 볼트위치, 형식, 크기
- 기타 부착품의 위치, 형식, 크기

(9) 콘크리트 구조물 도면 : 철근상세와 조립/설치를 위한 설치도면 일체가 제공되어야 한다. 구조모듈을 위한 콘크리트 도면은 아래와 같이 구성된다.

- 도면은 설치계획 및 높이, 모듈계획서와 단면, 모듈조립 및 지지상세, 조립용 강구조, 철근지지구조, 철근재료표, 굽힘상세도, 철근과 모듈의 연결상세도
- 각 모듈에 대한 조립상세도 준비
- 매입철물 위치 및 오차표기

- 철근상세도는 ACI 315, 318, 349와 ACI 상세메뉴얼 SP-66과 일치
- 도면에 사용되는 모든 기호와 부호는 ACI Section31을 따르고, 철근 상세도면은 철근조립자에 제공되어 조립됨
- 철근모듈은 모듈을 조립에 필요한 매입철물, 지지물을 포함
- 설계는 모든 관통부, 개구부, 덕트관통부, 전기관통부 등 포함
- 구조용지지대 설계는 시공용 인양구조물 또는 영구구조물에 대하여 모듈설계에 포함하도록 함

(10) 기기받침대(Equipment Skid) : 기기받침대는 소형펌프, 탱크, 열교환기, 밸브, 관련배관을 포함하는 기기공급자 패키지 기기에 적용할 수 있으며 플랜트종합설계 또는 상용화된 패키지로 구분된다. 상용화된 기기받침대 패키지는 기기공급자가 사양서 요건에 따라 제작·공급될 수 있다. 기기받침대는 기계, 구조, 전기경계를 나타내는 배관계장도, 전선 배선도, 일반배치도를 포함하는 도면일체로 제공되어야 한다.

5단계 : 모듈관련 설계정보 입력

데이터베이스의 설계정보 및 정보위치는 다음과 같으며 3-D CAD로 작성된다.

- 모듈배치도면
- 콘크리트/철골배치도
- 기타 플랜트모듈
- 기기배치도(주요 기기의 재원을 포함)
- 공기조화계통의 덕트, 케이블트레이, 전기 및 계측배선
- 배관 및 배관지지구조 : 대구경 배관 지지계통은 설계변경이 최소화되고 운송 및 인양조건에 대한 추가적인 지지재가 필요한 경우에 모듈을 설치한 후 제거되는 형식으로 설계
- 배관 ISO도면 : ISO도면과 배관정보는 3-D CAD모델에 저장하고 ISO도

- 면은 다음과 같은 정보를 포함
- 배관 및 배관지지 배치도
 - 배관 번호
 - 배관등급 및 등급
 - 배관모듈의 경계
 - 배관모듈 연결부
 - 배관 단열요건
 - 배관, HVAC 덕트 및 케이블 연결부
 - 경계부의 기기중심에 대한 X,Y,Z 발전소좌표
 - 자재식별
 - 현장접합부 형식을 표기
 - 특수 연결부요건
 - 현장배치 되는 배관의 모듈 내 관통부
 - 모듈지지위치
 - 부재크기의 한계
 - 공간 한계
 - 모듈설치용 지지형식
 - 배관해석 결과

6단계 : 모듈설계자료

(1) 모듈 일반배치도 : 모듈의 일반배치도면은 아래사항을 포함하여야 한다.

- 플랜트 기준점 및 경계조건
- 기전 설비계통 배치도 및 모듈용 임시지지 강구조물
- 번호체계에 따른 모듈연결부의 위치
- 모듈연결부 항목
- 연결부 번호
- 연결부 설명서
- X, Y, Z의 플랜트 좌표
- 연결부 형식
- 연결부에 사용되는 예비품목
- 배관지지 구조물
- 플랜트 좌표상의 모듈 위치
- 재료 명세표
- 모든 기기
- 사업번호체계에 따른 배관, 덕트, 전선로, 계측기기의 번호
- 중량 및 무게중심
- 모듈별 운송 및 설치용 임시지지구조
- 선적, 운송, 인양 및 설치에 필요한

- 요건
- 운송중 충격감지기의 형식 및 위치
 - 조립용볼트 배치도 및 요건
- (2) 조립용 모듈 : 주요 모듈기기의 범위는 다음과 같다.

- 구조용 강재지지 골조
 - 배관
 - 공기조화계통의 덕트
 - 전선 케이블
 - 전기 및 계측
- 위와 같은 범위의 계통은 조립도면에 동시에 표기 될 수도 있으며 다음과 같은 정보를 제공한다.
- 모듈 부품의 고유항목 번호
 - 조립품의 제원
 - 조립품의 각 부품에 대한 크기, 재료, 형식
 - 상세조립용 도면의 번호
 - 용접, 볼트 및 부착물의 위치, 형식, 크기

(3) 상세조립용 도면 : 필요시 작성

(4) 모듈도면 패키지의 구성

- 모듈배치도
- 각 분야별 상세조립도면
- 인양 및 취급도면
- 계산서 및 재료표

7단계 : 종합분석 및 평가

(1) 비용분석 : 초기 비용분석자료가 필요하며, 모듈설계를 확정하기 위하여 제작, 운반, 현장설치에 필요한 상세 비용분석을 실시하여야 한다.

(2) 공정분석 : 조립 및 현장설치공정을 분석하여 기존공법 대비 모듈공법의 공정을 비교한다.

2.5 모듈화 설계 · 시공의 장단점

모듈설계의 궁극적인 목적은 건설공기와 시간과 관련된 간접공사비의 단축에 의한 시공비 절감효과를 극대화하는데 있다. 모듈화 공법의 장단점을 비교하면 표 1과 같다.

표 1. 모듈화시공의 장단점 비교

구분	내	외
장점	<ul style="list-style-type: none"> • 건설주공정의 단축 • 노무자의 혼잡도 감소 및 시공생산성 향상 • 노무비용의 절감 • 지역사회에 미치는 영향 감소 • 품질향상 • 부지조건에 따른 위험도(Risk) 감소 	
단점		<ul style="list-style-type: none"> • 초기투자비 증가 • 추가적인 운반비용의 증가 • 설계의 복잡 및 비용 증가 • 자재관리의 증가 • 모듈간섭 관리 증가 • 옥외 제작설비 필요 • 설계변경에 대한 취약성

3. 모듈화 추진을 위한 설계·시공 기술

3.1 시공용 대용량크레인의 활용

모듈화 설계를 위한 전제조건으로는 대형 모듈에 대한 취급과 설치가 가능하고 수직설치공법(Over-the-Top)을 이용하여 모듈 및 기기를 설치할 수 있도록 시공용크레인의 인양능력은 충분한 것으로 선정하여야 한다.

또한 효과적인 모듈화공법의 적용을 위해 시공자는 건설과정의 여러 단계별로 크레인의 접근성 및 인양범위에 대해 첫 콘크리트타설 18개월 전에 상세하게 검토하여야 하며 대용량 크레인의 구매기간이 지연되지 않도록 사전에 철저한 계획을 세워야 한다. 신형경수로 1400의 경우 모듈화공법을 효과적으로 수행하기 위해서는 1,000톤 이상의 인양능력을 갖는 크레인을 활용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

대용량크레인은 원자력발전소의 시공성을 개선하고 일반플랜트 건설에서 활용된 모듈화를 촉진할 수 있는 계기가 되었다. 최근에는 상당한 인양능력을 갖춘 크레인이 등장하고 있으며, 건설산업의 요구에 따라 대형화되고 있는 추세이다. 상용화된 크레인의 인양능력을 비교하면 그림 3과 같으며 비교대상크레인은 다음과 같다.

- Lampson LTL-2600 Transi-lift

- Lampson LTL-1200 Transi-lift
- Manitowoc M1200
- Demag CC12600

시공용크레인의 용량을 결정하기 위해서는 최소요건과 최대요건에 대한 기준을 정립하고 부지배치 등을 고려한 적용성 검토를 통하여 결정된다. 신형경수로 1400은 기존원전과 달리 안전성을 강화하기 위하여 사분면(Quadrant) 배치로 인해 보조건물이 원자로건물을 둘러싸고 있으며, 원자로건물의 접근성에 많은 제한이 있다. 원전건설을 위한 시공용크레인의 최소조건은 원자로건물 천장크레인(Polar Crane)을 인양할 수 있는 능력을 갖추어야 하며, 최대요건은 모듈화에 따른 중량물 또는 핵증기공급계통설비인 증기발생기를 인양할 수 있는 능력이 있

는 크레인을 선정하는 것이 일반적이다.

발전소건설계획중 가장 중요한 사항 중 하나는 상용화된 크레인을 기준으로 최대 중량물인 모듈 또는 증기발생기를 인양하기 위한 상세검토를 수행하는 것이다. 신형경수로 1400과 같은 배치형태에서는 건물-시공용주크레인 간의 간섭과 건설 공정 상 문제점이 없는지 확인해야 한다. 시공용크레인에 따른 기본적인 검토사항으로는 중량물운송로 또는 크레인 이동로의 확보, 부지배치도(Plot Plan)에서의 제작장 배치와 크레인의 적정 배치, 배치공간에 따른 옥외설비 및 구조물의 공정제한 요인 분석, 본관건물(Power Block) 굴착에 따른 영향, 지반설계하중 결정 및 도로의 폭 결정 등을 들 수 있다.

신형경수로 1400에서는 보조건물의 높이, 건설공정과의 연계성과 구조물-시공용크레인의 간섭을 최소화하고 수직설치공법을 적용하기 위해서 그림 4와 같은 대용량크레인의 활용계획을 검토하였으며, 크레인 인양능력은 62.5m에서 819.5Ton이다.

수직설치공법을 적용하기 위해서는 작업반경에 따른 인양능력이 우수하고, 시공용크레인-구조물간의 간섭을 최소화할 수 있는 형태가 신고리 3,4호기의 배치형태를 고려할 때 가장 효과적인 것으로 검토되었다.

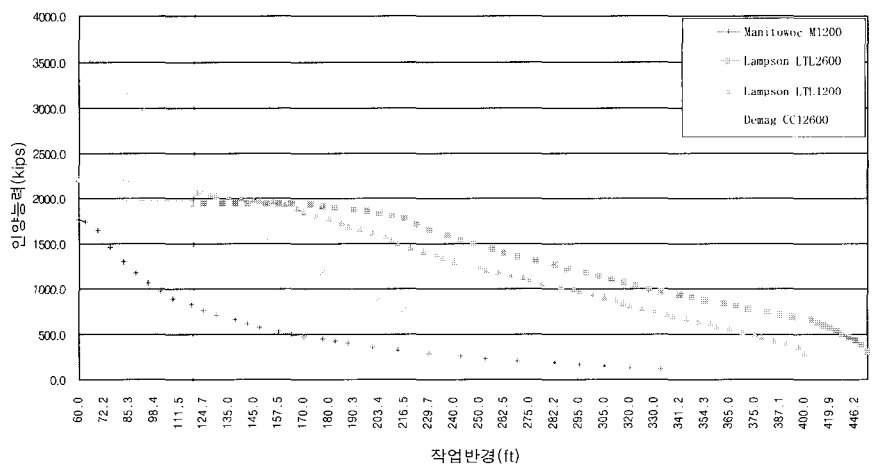


그림 3. 상업용 대용량크레인별 인양능력 비교

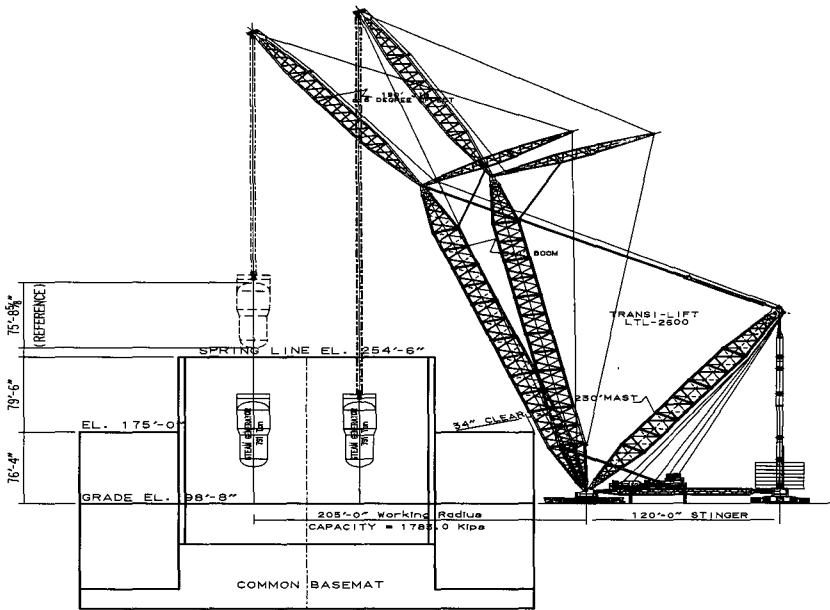


그림 4. 대용량크레인에 의한 중량을 인양 검토

3.2 모듈화를 위한 SC구조의 설계기술 개발

일반적으로 원자력발전소의 건물은 방사선차폐를 목적으로 콘크리트 구조물을 많이 사용하고 있다. 이러한 구조물은 시공시 철근조립, 거푸집 설치, 콘크리트 타설, 거푸집의 해체 순서로 작업이 진행된다. SC(Concrete Filled Steel Structure) 구조는 그림 5와 같이 두 강판 사이에 철근콘크리트를 채워서 샌드위치식 구조체를 형성하고 철근을 사용하지 않으므로 스테드볼트, 전단철근(Shear Bar), 복부플레이트(Web Plate) 등이 강판에 부착되어 강판과 콘크리트가 일체로 작용하는 합성구조로 되어있다. 이러한 구조개념은 철근조립과 거푸집 조립 및 해체 공정의 삭제로 공기단축이 가능하며, 또한 모듈화의 이점인 구조물공사와 기전공사의 병행작업으로 건설주공정의 단축효과가 있는 것으로 평가하고 있다.

이러한 모듈화 시공개념은 일본의 Turuga원전 3,4호기 원자로 내부구조물 시공계획에 포함되어 있으며, 미국의 개량형원전인 AP-600/1000모델의 설계에도 적용되고 있다. AP600/1000에서는 핵연료재장전수조, 증기발생기 격실, 가

압기 격실 등이 SC구조모듈로 설계되었다. SC구조모듈 역시 발전소 부지밖에서 사전제작 및 사전조립되어 하나의 완전한 조립체 혹은 현장에서 최종적으로 조립을 할 수 있는 부분조립체(Sub-assembly)로 제작되어 선적된다. SC구조모듈은 수직 및 수평보강재로 보강된 철판으로 제작되며, 모듈의 설치 및 고정작업이 완료된 후에 내부콘크리트를 타설된다.

모듈은 콘크리트타설시 하중을 지지할

수 있도록 철재로 설계되며, ACI Code에 규정된 최소변형량 이내로 유지할 수 있도록 콘크리트타설시 수평압력에 견딜 수 있도록 설계되며, 거푸집의 변형방지를 위하여 1시간당 1.8 m(6 ft) 높이까지의 타설속도로 콘크리트를 타설하도록 규정한다. 콘크리트 펌프, 흡퍼, 슈터 등과 같은 재래식 콘크리트 타설장비를 사용할 수 있으며 벽체단면은 콘크리트타설공이 작업하기에 충분한 폭으로 설계되어 있다.

SC구조모듈을 적용하기 위해서는 구조물 및 기기설계의 전반적인 변경이 요구되며, 기존설계 및 건설경험과는 상당한 차이가 있으므로 장기적 기술개발계획이 필요하다. SC구조모듈을 적용하기 위해서는 모듈 상호간의 연결, 기존 건설구간과 모듈과의 연결 등 상세설계시 심층적 분석이 요구되며 SC구조 모듈의 장점은 다음과 같다.

- 현장과 모듈조립장소에서 콘크리트 구조물 공사의 병행작업
- 구조물과 계통 기기의 일체화를 위한 복합모듈 구성
- 원자로건물 격실내에 설치되어야 할 기기의 조기설치 가능
- 공기단축을 비롯한 생산성 향상, 작

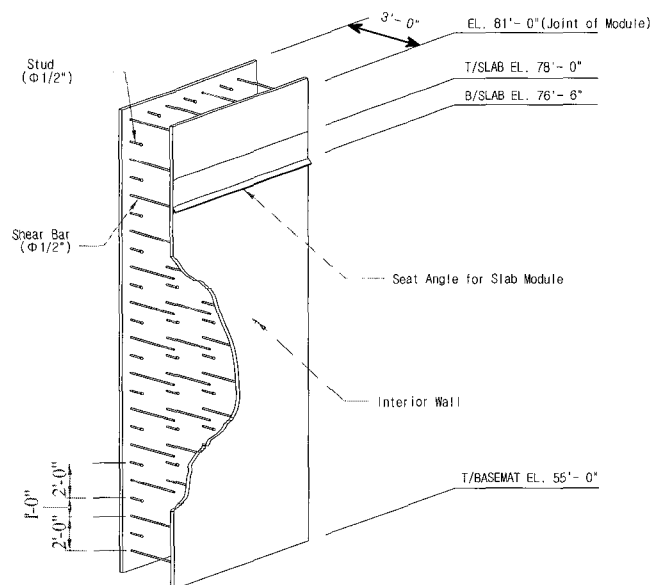


그림 5. SC(Concrete Filled Steel Structure) 구조의 개념

업환경의 안전성, 품질향상, 인건비 절감, 혼잡성 해소 등과 같은 모듈화 공법 적용에 의한 효과

국내 원자력발전소에서의 적용은 기술 기준이 정립되지 않아 원전설계에 직접 적용할 수 없으나 2002년도부터 시작되는 정부의 제 2차 원자력종합진흥계획에 “원자력발전소 구조물과 계통설비의 모듈화 연구” 항목이 포함되어 산·학·연의 유기적 협력하에 장기적 기술개발을 통한 모듈화의 적용성 확대에 기여할 수 있는 계기가 마련된 것으로 평가된다.

4. 맺는글

국내원전의 모듈화 설계 및 시공은 기술도입단계에서 습득한 기술을 바탕으로 체계적으로 발전시켜 나아가 할 단계에 이르렀다. 또한 사업관리 측면에서 내적 역량을 키워나가는 것이 중요하며, 모듈화를 효과적으로 추진하기 위해서는 관련 사들의 유기적인 협조체계 구축과 SC구조의 기술개발이 가장 중요한 과제로 평가된다. 이를 위해서는 다음과 같은 사항을 제시하고자 한다.

- 국내원전은 초기 도입기부터 최근에 이르기까지 사업주의 강력한 의지를 반영하여 계약방식을 분리발주방식으로 결정하였다. 최근 건설사업관리는 통합관리개념의 도입이 요구되고 있으며, 생산성향상을 통한 원전의 경제성을 향상

시키기 위해서는 선진화된 건설관리기법의 적극적인 도입이 필요하다. 논문에서 제기한 바와 같이 현재의 계약체계에서는 시공단계에서의 공기단축 및 비용절감에는 많은 한계가 있다. 따라서 모듈화 설계·시공을 사업의 목표로 설정하는 것이 가장 효율적인 방안이며 이를 위해서는 사업의 초기단계에서부터 설계사·제작사·시공사·사업주 등이 참여하는 ‘모듈화추진팀’의 운영이 필요하다.

- 설계기술은 많은 투자를 통해서 습득하는 것으로 한국형 표준원전의 기술자립은 수많은 기술자들의 노력에 의해서 이룩한 것이다. 구조적인 관점에서 SC구조는 원전건설을 획기적으로 향상시킬 수 있는 가능성이 가장 높은 구조형태이며, 발전소배치의 단순화와 더불어 모듈화를 촉진할 수 있는 계기가 될 것이다. SC구조에 대한 기술개발은 학계, 산업, 연구원, 인허가기관 등이 유기적인 협조체계를 바탕으로 연구를 수행하여야 한다. SC구조에 대한 기술기준정립이 최우선의 과제이며 이를 바탕으로 신형경수로 1400의 모듈화 설계·시공 기술을 획기적으로 향상시킬 수 있는 중요한 전환점이 될 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. 임재희, 김원태 “ 차세대원전 건설성

프로그램”, 전력기술, 한국전력기술(주), 1999. 12

2. “차세대원자로 기술개발(Ⅲ) 건설성평가 보고서(SI)”, 한국수력원자력(주), 2002. 2.
3. “원자력발전소 구조물과 계통설비의 모듈화공법에 대한 타당성 연구용역(최종보고서)”, 한국수력원자력(주), 2002. 3.
4. “Constructability Review Task 1 Modularization(Phase II)”, Westinghouse Electric Company, 2001. 5
5. Christopher W. Lapp, Michael W. Golay, “Modular Design and construction techniques for nuclear power plants”, Nuclear Engineering and Design Volume 172(1997) No. 3, 1997. 10
6. “Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document-Chapter 1 & 6”, EPRI, 1990. 8
7. “US DOE, Technology Program In Support of Advanced Light Water Reactors Design for Constructability Program”, Duke Power Company, 1990. 3.
8. James H. Cottrell, “Modularization as an Avenue to Economic Competitiveness”, MIT, 1990. 10.