

원전 구조물의 내구연한 및 공기단축

Service Life and Shortening the Construction Period of Nuclear Power Plants



조윤구*
Yun-Gu Cho



김대성**
Dae-Sung Kim



하주형***
Ju-Hyung Ha

1. 서론

원자력의 도입은 1954년 유엔총회에서 원자력의 평화적 이용에 대한 국제협력에 관한 결의안이 통과되어 1956년 유엔 산하 기관으로 국제원자력기구(IAEA; international atomic energy agency)가 설립된 것으로 시작되었다. 이후 대한민국은 국내에서 고리원자력 1호기를 필두로 총 20여 기의 가동원전 보유국으로 성장하였다. 해외 원전의 경우 2030년까지 400기가 추가 건설될 것으로 보이며 추정 공사금액은 700조원에 이른다. 국내 원전의 경우도 국가에너지 기본계획에 2030년까지 총 10기가 건설될 예정이어서 그 어느 때보다 기술개발을 통한 원가절감 및 공기단축 노력이 절실하다고 할 수 있다.

국내의 원전 구조물은 냉각수, 취배수가 용이한 해안가 지역에 주로 위치하고 있으므로 원전 구조물의 사용 상태에 있어서 염화물, 황산염 및 중성화 등에 의한 내구성 저하가 발생할 수 있어 내구연한 확보를 위한 대응책 마련이 시급하다. 또한 원전 콘크리트는 일반 토목공사와 달리 배합설계, 배치플랜트의 운용, 타설 및 양생에 이르는 전 과정이 엄격한 품질관리를 통해 운용되며, 균열방지과 내구성 확보를 위한 대응방안을 마련해 시공에 철저함을 기한다.

원전 구조물에 있어서 주요 콘크리트 기술은 다음과 같다.

- (1) 콘크리트의 장기 내구성 확보
- (2) 콘크리트의 수화열 제어
- (3) 염해 및 황산염해 저항
- (4) 방사선 차폐 콘크리트
- (5) 품질/시공관리 및 계측모니터링
- (6) 내화성능 확보
- (7) 고온/고압시 SC구조 콘크리트 특성

* 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 첨단산업기술연구부 차장
ilschyk@hdec.co.kr

** 현대건설(주) 신고리원자력 1,2호기건설현장 차장

*** 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 첨단산업기술연구부 차장

(8) 방호 콘크리트

(9) SC구조 콘크리트 시공/충진성

특히 SC(steel plate concrete)구조가 한국수력원자력 주도로 혁신적인 공기단축을 위한 연구개발이 진행되고 있으며, 현대, 대우 등 국내 메이저 건설사의 기술연구소 등에서도 발맞춰 원전에 사용되는 재료 및 구조시스템에 대한 원전 전담팀을 운영하고 있다.

이러한 국내의 녹색성장 트렌드, 온실가스 배출제한 및 고유가에 대한 시대적 상황과 부합하여 원자력발전이 각광받고 있는 이 시기에 원전 구조물의 공기단축 및 수명관리에 대한 콘크리트 분야에 대해 공기단축 및 내구연한 확보에 대한 기술 동향을 소개하고자 한다.

2. 원전 구조물의 환경과 콘크리트

콘크리트가 원전 구조물 열화요인의 40% 이상이라고 할 수 있을 정도로 원전 구조물에서는 매우 중요하고 많이 쓰이는 재료라 할 수 있다<그림 1>.

원전 구조물의 특수 환경은 <그림 2>와 같이 해안가 등의 취배수가 용이한 위치에 놓여 있는 경우가 많다. 특히 해외 수출원전 1호인 아랍에미리트(이하 UAE)원전의 경우에도 해안가에 위치하고 있으며 높은 염소이온 및 황산염 이온에 노출되어 있다. 따라서 UAE원전의 경우도 내구연한 확보를 위한 내구성대책 마련이 시급하다. 또한 원전 구조물은 매우 중요한 구조물이며, 특히 정치적으로 불안정한 곳인 경우에는 대형 참사를 막기 위한 방호 콘크리트 및 방폭설계도 필수적으로 고려할 필요가 있다.

3. 원전 구조물의 공기단축과 내구연한

3.1 공기단축

원전 구조물의 공기단축을 콘크리트 분야에 한정지어 고려해 보면 크게 설계, 재료, 시공으로 나눌 수 있다.



그림 1. 원전구조물 열화요인

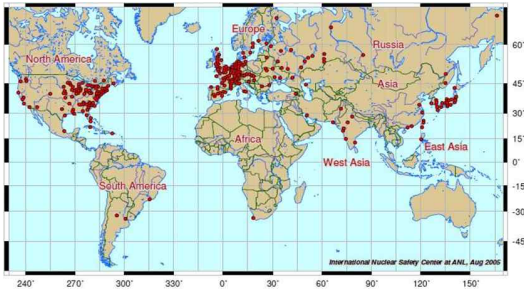


그림 2. 원자력 발전소 현황
(International Nuclear Safety Center at ANL)

- 1) 설계
 - 혁신적인 공기단축을 이끌어 낼 수 있는 SC구조
 - 2) 재료
 - 고유동 저발열 특성 및 조기강도 확보
 - 3) 시공
 - 철골 빔 모듈화 공법<그림 3>
 - 바닥 판(deck plate) 슬래브 처짐 개선 공법
 - 대구경 철근의 기계적 정착공법
 - 균열제어 및 콘크리트의 수밀성 확보 촉진양생공법
- 원전 구조물은 주로 철근콘크리트와 강구조로 구성되는 것이

일반적이나 최근에는 철골철근 콘크리트 또는 강판 콘크리트(SC)도 주요 구조물에 적용되고 있다. 특히 강판 콘크리트, SC 구조는 한국수력원자력이 전략적으로 기술개발을 추진하고 있으며 기존 원전구조물의 주요구조를 대체하여 혁신적인 공기단축(18개월)이 가능한 모듈 공법이다.

신고리원자력 1 & 2호기에서는 시공개선 사례로써 공기단축 및 비용절감 등의 효과가 있는 철골 빔 모듈화 공법을 적용하였으며 다음과 같은 장점이 있다<사진 1>.

- 1) 지상조립을 통한 작업성, 안전성 및 편의성 확보
- 2) 양중횟수 저감 및 장비사용시간 절감
- 3) 공기단축 및 비용절감

Mock-up 실험을 거쳐 바닥 판의 처짐 개선, 구조내력 및 작업 안전성을 확보하고 공기단축이 가능한 일체화 공법도 적용하였다<사진 2>.

원전 구조물의 과밀배근에 따른 시공의 어려움을 해소하기 위



사진 1. 모듈부재 양중 사진



사진 2. 바닥 판 슬래브 처짐 개선을 위한 Mock-up

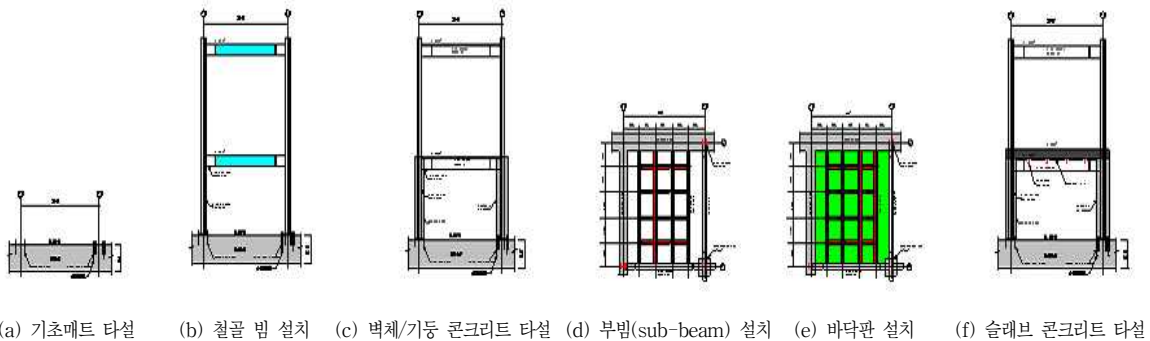


그림 3. 철골 빔 모듈화 공법

한 방법으로써 대우건설에서는 원전 구조물용 대구경 철근의 기계적 정착을 위해 유한요소 해석을 통한 과밀배근 해소 및 철근 작업을 간소화로 공기단축 및 품질개선 효과를 위한 정착관의 최적 형상을 제안하기도 하였다. 원전 콘크리트의 수화열 저감을 위해 국내 원전에서 주로 사용하였던 플라이 애쉬뿐만 아니라 국내에서 사용하지 않았던 고로 슬래그에 대해서도 충분한 검토를 통하여 활용성을 극대화 시켜 해양환경에 대한 내구성 확보에 기여할 수 있도록 하는 것도 필요할 것으로 판단된다. 또한 콘크리트 타설 후 내외부 온도차를 줄여주어 콘크리트의 균열제어를 할 수 있으며, 온수양생을 통해 품질관리가 가능한 촉진양생공법의 적용도 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다<그림 4, 사진 3>.

특히, UAE원전과 같이 주변 환경이 열악하고 30 ~ 40°C에 이르는 대기 온도하에서도 균열제어 및 품질 확보를 위해 도입하는 것도 의미 있을 것으로 판단된다.

3.2 내구연한

원전 구조물의 내구연한은 UAE원전의 경우 60년으로 되어 있다. 그러나 실제로 구조물의 중요성을 고려할 때 100년 내외의 내구연한 수준을 확보하는 것이 바람직할 것이다(철근부식의 경우, 부식개시+전과 포함, <그림 5>).

이러한 원전 구조물의 내구연한을 확보하기 위해서 주변 환경 조건(평균 2,800 ppm 이상의 황산염, 28,000 ppm 이상의 염소 이온농도, 일평균 온도 35°C를 상회), 기후조건에도 견딜 수 있는

콘크리트의 설계가 무엇보다 중요하다고 할 수 있다<그림 6>. 또한 원전 콘크리트는 고온, 고압시에도 견딜 수 있어야 하며, 중대사고가 발생하여도 재료적으로 안정해야 한다. 또한 수화열 해석, 염해저항성 실험/해석 및 내구연한 해석과 장단기 내구성 실험을 통한 내구성 설계 시스템이 필요하다<사진 4>.

일반적으로 많이 사용하는 내구연한 예측 프로그램으로는 미국 ACI에서 프리웨어로 내놓은 Life 365가 있다. 다만 복잡한

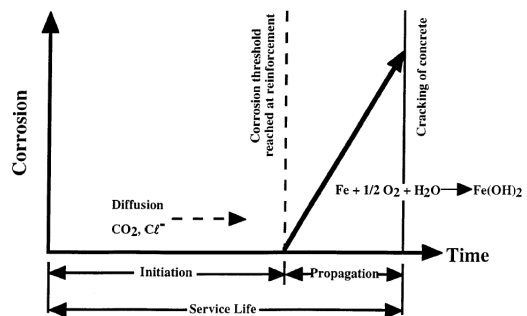


그림 5. 철근부식에 의한 내구연한 개요

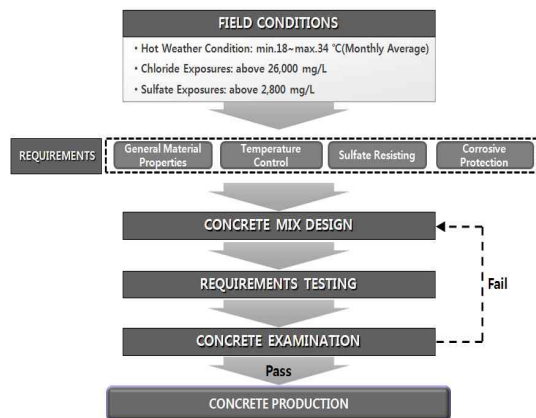


그림 6. UAE원전 콘크리트 개발 모식도

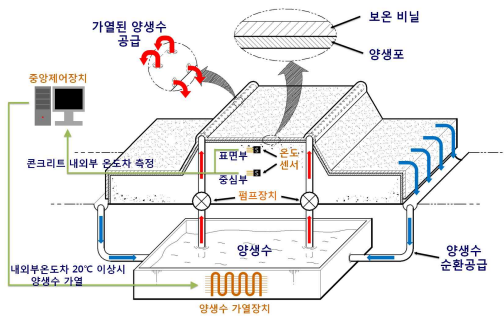


그림 4. 콘크리트 온수양생시스템



사진 3. 콘크리트 온수양생/펌프



사진 4. 콘크리트 염해저항성 실험 (NTbuild 492)

내구수명 변수를 전부 고려하고 있지는 않아 다소 아쉬운 점이 있다. 그러나 사용하기 간편하고 쉽게 내구수명 예측을 할 수 있으므로 내구성 실험과 해석을 통하여 상호보완 한다면 현장에서 내구수명관리를 위해 쉽게 적용하기에는 유용할 것으로 판단된다<그림 7, 8>.

아울러 개발된 원전용 콘크리트는 주변환경을 고려한 Mock-up 실험 및 계측을 통해 그 적합성을 확인하는 것이 바람직할 것으로 판단된다<그림 9>.

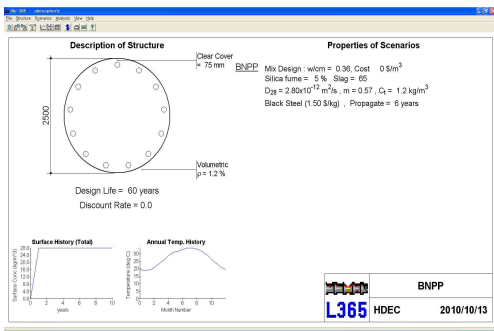


그림 7. 원전구조물 환경조건 (Life365 :목표수명 60년)

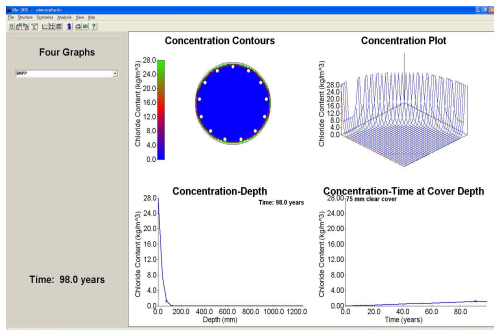


그림 8. 원전구조물 내구연한 추정 (예상 내구연한 98년)

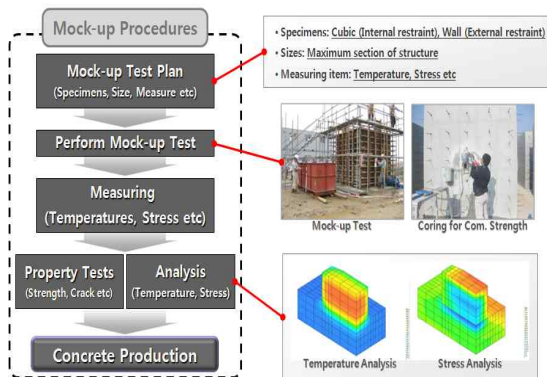


그림 9. 원전 콘크리트 Mock-up 모식도

4. 맺음말

1971년 국내 최초의 원전인 고리 1호기부터 시작된 원전산업이 잠시 침체를 견디고, 국내외의 녹색성장 트렌드, 온실가스 배출제한 및 고유가에 대한 시대적 상황과 부합하여 원자력발전이 친환경 에너지원으로 주목받고 있는 이 시기에 원전구조물의 공기단축 및 수명관리에 대한 콘크리트 분야의 현황과 방향에 대해 논의하였으며, 향후 원전구조물의 내구연한을 확보하고 공기단축을 위한 핵심기술들이 개발되어 경제적이고 안전한 원전구조물의 새로운 트렌드와 변화가 있기를 기대한다.

특히, 원전 콘크리트의 경우 공기단축, 내구연한 확보를 위해 재료의 선정, 콘크리트의 생산, 타설, 양생의 각 단계별로 철저한 품질관리를 통해 콘크리트의 품질변동을 줄이는 노력을 하는 것이 무엇보다도 중요할 것으로 판단된다.☑

참고문헌

1. 최중권, 하주형, 조윤구, 현태양, '콘크리트 케이스 기초의 수화열 해석 및 온도균열 제어', 한국콘크리트학회 학술발표논문집, 2010.
2. 이용권, 김근경, 문태엽, 선원상, '원자력발전소 건설과 SC구조 기술', 한국강구조 학회지, 2009.
3. 김대성, 원자력발전소 시공품질 개선사례, 합성구조 TFT, 2007.
4. 최홍식, 이시우, 허권, 이상민, '콘크리트 표면밀도 증가에 의한 원전구조 성능개선연구', 한국콘크리트학회 학술발표 논문집, 2006.
5. 박광필, 김성수, 정호섭, 김종필, 이용광, '플라이애시를 혼합한 원전구조물 콘크리트의 기초물성', 한국콘크리트학회 학술발표 논문집, 2010.
6. 원민식, 최윤석, 신정호, 양은익, 김호진, 김도겸, '원전구조물 콘크리트 열화에 따른 내구성 평가', 한국콘크리트학회 학술발표 논문집, 2010.
7. 이성호, 천성철, 오보환, 박형철, 나환선, 김상구, '원전구조물용 대구경 철근의 기계적 정착을 위한 정착판 설계', 한국콘크리트학회 학술발표 논문집, 2003.
8. 윤의식, 백용락, 임재호, 정영석, 최강룡, '원전 콘크리트 구조물의 장기내구성능 평가', 한국콘크리트 학술발표 논문집, 2006.
9. 이호재, 김도겸, 이장화, 김재환, '원전콘크리트의 물리적 특성변화', 한국콘크리트학회 학술발표 논문집, 2010.
10. 변형균, 이제방, 조용복, '방사선차폐용 고밀도 콘크리트에 관한 연구', 현대건설 기술연구소 연구보고서, 1995.
11. US Department of energy, Application of advanced construction technologies to new nuclear power plants, 2004.

담당 편집위원 : 권기주(한국전력공사) kyeunkjoo@kepco.co.kr