

원전구조물의 열화현황 및 열화사례 분석

State-of-the-art on aging of Nuclear power plant Containment Structures

정철현*, 최장규*, 이상국**, 이계현**

*대우건설기술연구소, 경기도 수원시 장안구 송죽동 산 60번지

**한국원자력안전기술원, 대전시 유성구 구성동 19번지

요 약

원전 구조물의 안전과 관련하여 수명기간중 내·외부 환경 및 운전 이력에 의해 강재 부식, 침식, 피로, 균열, 크리프 및 프리스트레스 손실 등의 각종 열화 요인에 의해 장·단기적으로 콘크리트의 재료물성 및 구조 건전성이 저하하게 된다. 이러한 콘크리트 구조 열화 요인은 운전년수가 증가되면 건설시 발생된 균열, 방수처리 미비 등의 경미한 시공결함 부위 등을 통한 열화현상을 발생시키며, 열화현상의 진전속도가 원전 구조의 안전성 및 경제성에 중대한 영향을 미칠수 있다. 격납구조는 원전 안전과 관련된 총체적인 구조로서 국내 가동중인 원전의 경우 이러한 각종 구조열화 요인과 안전관련 콘크리트 구조물의 재료 및 구조특성, 시공특성과 관련된 경험자료 및 기술자료가 체계적으로 분석되어 있지 못하다. 따라서, 본 연구에서는 국내 원전구조물에서 발생된 열화자료를 종합적으로 정리하여 각 요인 별로 발생원인을 분석하였다.

Abstract

During the life time of nuclear power plants, the concrete properties and structural integrity of safety related concrete structures are degraded due to various aging mechanism such as steel corrosion, erosion, fatigue, concrete cracking, creep and loss of prestress and other effects depending on the internal and external environmental stressors and operating history. These concrete structural aging mechanism can increase the probability of initiation of age-related degradation with the passage of operating time through minor construction defects, such as cracks and inadequate water proofing, accelerate the potential age-related degradation, and significantly affect the safety and economics of structures. The containment is a vital engineering safety feature of a nuclear power plant. In domestic plant case, it is not sufficient that operating experienced-based information and reports which contain aging factors, safety-related concrete structural material and constructive characteristics considered the various age-related degradation. The objective of this research is to identify for a state-of-the-art on aging issues, aging examples of NPP structures.

1. 서 론

지금까지 국내에서 콘크리트 구조물에 대한 열화조사, 열화의 확인방법, 열화의 원인규명

및 열화영향 평가, 보수·보강방법, 내구성 진단방안 등에 대한 연구는 지속적으로 진행되어 왔으나, 이들 연구는 사용중 구조물에서 열화가 발생한 이후에 초점이 맞추어 진행되었다. 또한, 국내에서 원전 격납구조물에 대한 열화 연구도 상당한 진전이 있었으나, 이들 연구결과들에 대한 종합적인 평가 및 분석이 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 일반적으로 콘크리트 구조물은 열화가 발생한 이후에는 보수·보강이 수행되어도 내구년한이 급격히 감소하기 때문에 설계수명이 60년으로 증가되는 차세대 원전 구조물의 안전성 및 사용성을 확보하기 위해서는 설계 및 시공단계부터 열화가 억제될 수 있는 저감화 방안이 도입되어 사용 중 열화발생을 최대한 억제 또는 지연시키는 것이 바람직하다.

그러나, 차세대 원전 구조물 설계 및 시공시 열화저감화 방안을 도입하기 위해서는 그동안 국내 원전 구조물에서 발생된 주요 열화에 대해서 재료, 설계, 시공별로 구조부위, 발생원인, 구조물에 미치는 손상정도 등에 대한 종합적인 평가가 선행되어야 할 것으로 판단된다. 이와 같이 발생된 열화현상에 대한 종합적 평가결과를 통해서 차세대 원전 건설시 재료, 설계, 시공단계에서 보다 현실적인 열화저감화 대책이 병행됨으로서 향후 차세대 원전 안전관련 구조물의 장기 안전성 확보 및 유지관리 비용의 최소화를 달성할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 원전 격납구조물의 설계수명 증가시 설계수명 증가에 따른 설계 및 시공상의 내구성 향상 방안이 도출되면 이를 토대로 차세대 원전에 대한 안전심사 및 검사지침 작성을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 위와 같은 목적의 일환으로 지금까지 가동중 이거나 시공중인 국내 원전 구조물의 열화현황 및 내구성에 영향을 미치는 문제점 등을 종합적으로 수집하여 분석 및 평가를 수행하였다.

본 연구결과는 향후 설계수명이 60년으로 증가되는 차세대 원전의 내구성 향상을 위하여 반드시 요구되는 설계 및 시공시 열화저감화 방안, 콘크리트 구조물과 관련된 안전규제 방안 등을 도출하는데 필요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 국·내외 연구현황

원전과 관련된 국·내외 연구개발 동향 및 기술현황 분석을 위해서 USNRC, DOE (Department of Energy), ORNR, INEL, EPRI, NEI 등 미국의 정부기관 및 원자력 산업체를 비롯하여 프랑스, 영국, 일본, IAEA, OECD/NEA 등에서의 원전구조물의 열화 및 수명연장과 관련된 규정정비 현황과 연구동향을 분석하여 그 결과를 국가별로 표에 수록하였다.

<표 1> 인허가 갱신을 위한 규정 관련 연구현황

국 명	연구기관	주요내용	수행년도
미 국	USNRC	· 원전 열화와 관련된 안전성 및 규제정책에 관한 규정 →원전의 유지관리/점검/보수/교체 등을 수행하는 프로그램 운영	1987
		· 인허가 갱신에 관한 규정(안) 제정	1988
		· 인허가 갱신을 위한 절차 및 기술적인 요건에 관한 규정(안)	1990
		· 인허가 갱신 신청에 관한 구체적인 규제지침 초안 작성	1990
		· 원전 유지관리의 필요성 제기 →유지관리 규정의 이행 공표	1991 1992
		· 인허가 갱신 절차 개정안 개발	1994
		· Lessons Learned from Early Implementation of the Maintenance Rule at Nine NPP's 작성	1995
		· Status of the Maintenance Rule 작성 및 공표	1995
		· Development of the Regulatory Guide for the License Renewal Rule 작성 및 공표	1995

<표 1> - 계속 -

국 명	연구기관	주요내용	수행년도
미 국	USNRC	· Activities Associated with the Implementation of 10 CFR Part 54 작성 및 공표	1996
		· Standard Format and Content for Applications to Renew Nuclear Power Plant Operating License 발표	1996
	INEL	· LWR의 주요 기기 및 구조물의 잔존수명 평가를 통한 기술기준 개발 →LWR의 경년열화와 관련한 안전성 확인·분석 →기동중 원전의 인허가 갱신을 결정하기 위한 정책 및 지침 개발	1987
한 국	원자력 안전 기술원	· 원자력 안전관련 구조물 사용전 검사에 관한 연구 · 원자로 격납건물 텐던시스템 가동중 검사지침서 개발	1996 1997
	원자력 연구소	· 격납건물 가동중 검사 절차서 분석	2000

<표 2> 원전구조물의 열화 관련 국외 연구동향

국 명	연구기관	주요내용	수행년도
독 일	원자력 중앙 연구소	· 원전에서의 열화진단 적용상의 문제점 연구 →기기의 신뢰성 해석 →경년열화 과정의 진단방법 →경년열화의 억제 및 보수방법 →열화학인방법의 개발	1987
		· 원전의 경년열화에 관한 안전성과 보수에 관한 연구	1987
아르헨티나	원자력 규제국	· 규제요건의 전반적인 문제점 분석에 관한 연구	1987
	원자력 에너지 위원회	· 경년열화에 의한 기기의 신뢰성 및 안전성에 미치는 영향 평가에 관한 연구	1987
인 도	원자력 연구센터	· 격납건물의 시간의존적 누설율에 관한 해석 모델링에 관한 연구 →열화 메카니즘의 확인 →누설저항성의 유지를 위한 보수기준의 확립	1995
	Taps	· 원전에서의 경년열화 및 보수방법에 관한 연구	1987
체 코	원자력 연구소	· 원전 경년열화의 측정을 위한 컴퓨터 관리 프로그램 개발	1987
	Czech Tech.대학	· 원전 콘크리트 구조물의 재료 특성 및 경년열화에 관한 연구	1995
핀란드	기술 연구소	· 원자로 압력용기의 방사선 조사에 의한 손상에 관한 Monitoring의 개선방법에 대한 연구	1987
영 국	Taywood Eng.Ltd	· 원전의 운전조건의 최적화 연구 · 원전의 경년열화 및 수명평가에 대한 연구	1993~ 1997
캐나다	AECL AECB	· 원전의 수명을 50년으로 연장하기 위한 연구 진행중	1996
	AECB	· 신뢰성 이론을 이용한 콘크리트 격납구조물의 검사방법 및 수명에 측에 관한 연구 · 원전구조물의 열화에 관한 연구	1996

<표 2> - 계속 -

국 명	연구기관	주요내용	수행년도
미 국	USNRC	<ul style="list-style-type: none"> • 열화에 의한 원전 성능저하 관련 NPAR (Nuclear Plant Aging Research) 프로그램 개발 →열화 및 수명평가에 관한 연구 수행 →보수/보강 방법 	1987~1991
		<ul style="list-style-type: none"> • 구조열화 프로그램 SAG (Structural Aging) →구조성능저하 과정 규명 →원전 수명연장시 문제점 분석 →가동중 구조평가 프로그램 	1988~1993
		<ul style="list-style-type: none"> • 격납건물의 성능저하에 대한 프로그램 개발 	1994~
		<ul style="list-style-type: none"> • 경년열화를 일으킨 구조물 및 기기의 지진에 의한 Safety Margin 및 Seismic Risk 평가와 규제 지침 개발 	1997~
		<ul style="list-style-type: none"> • 라이너 플레이트 부식에 관한 연구 	1997~
	ORNL	<ul style="list-style-type: none"> • LWR 안전관련 콘크리트 구조물의 장수명화 및 수명연장에 관한 연구 →원전 및 일반 콘크리트 구조물의 성능비교 →잠재 열화요인 확인 및 검토 →열화 탐사기법의 기술현황 분석 및 비교검토 →보수·보강 재료 및 방법 평가 →열화·손상 평가 및 잔존수명 고려시의 상호관계 규명 	1986~1992
	INEL	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 콘크리트 구조물의 열화요인, 잠재 열화위치 및 열화 메카니즘, 잠재 파괴모드 및 가동중 검사방법에 대한 연구(I) 	1987
		<ul style="list-style-type: none"> • 원전 콘크리트 구조물의 열화요인, 잠재 열화위치 및 열화 메카니즘, 잠재 파괴모드 및 가동중 검사방법에 대한 연구(II) 	1989
		<ul style="list-style-type: none"> • 철근, 콘크리트 및 텐돈에 대한 열화의 확인 및 정량화를 위한 표준 ISI 프로그램 개발 	1994
	EPRI	<ul style="list-style-type: none"> • LWR 원전 수명연장에 관한 타당성 평가 	1980
		<ul style="list-style-type: none"> • LWR 수명연장 프로젝트 수행(3단계 연구) →1단계 : 기술적, 경제적 측면에서의 수명연장의 타당성 평가 →2단계 : 수명연장을 위한 데이터의 수집, 해석 및 보존방법, 가동 중인 원전에 대한 수명연장 추진방법 확립, 수명연장과 관련된 규제요건, 콘크리트 구조물의 구조건전성 평가 및 경년열화 등 재료 및 기기에 관련된 기술적 사항에 대해서 연구 →3단계 : 가동중 원전에 대한 수명연장 프로그램 확립 및 적용 	1985~1995
		<ul style="list-style-type: none"> • 원전 장수명화에 대한 프로젝트의 중심이 되어 기술적, 경제적인 검토 및 평가에 관한 연구를 주도 	
	DOE	<ul style="list-style-type: none"> • 수명연장에 관한 기술적인 문제의 해결을 위한 연구, 관련 법률 및 규제 측면에 관한 연구 및 원전 운전개선에 관한 연구 수행 	
		<ul style="list-style-type: none"> • LWR 안전성 및 인허가 프로그램, APWR 프로그램, TMI 프로그램을 통한 경수로 경년열화 및 수명연장에 관한 연구 수행 	
	USAIF	<ul style="list-style-type: none"> • 원전 수명연장을 위한 규제기준 및 방향에 대해서 법규 및 규제기준에 관한 연구 수행 →기존의 관련 규제기준의 조사 및 수명연장 관련 	1985~1987
	Westinghouse사	<ul style="list-style-type: none"> • 수명연장 측면에서의 발전소 기기 개선을 통한 이용률 향상을 위한 연구 	
	CE 사	<ul style="list-style-type: none"> • 발전소 성능향상 및 수명연장 프로그램 개발 	
<ul style="list-style-type: none"> • 발전소 성능개선과 경년열화 및 수명연장에 관한 연구 			
GE사	<ul style="list-style-type: none"> • 장수명화를 위한 경제성, 법규제면 및 기술성에 대한 연구 		
S&W사	<ul style="list-style-type: none"> • 기기 및 구조물에 대한 수명평가 		

<표 2> - 계속 -

국 명	연구기관	주요내용	수행년도
프랑스	EDF, 운영업자, 설계사 공동수행	· 원전 Lifetime Project 수행 (4 단계) →재료의 경년열화 평가 →운전조건 변경에 관한 영향평가 →안전성 및 경제성 평가	1986~1991
	EDF	· 열화를 고려한 시험, 검사 및 유지계획 수정, 안전기능의 신뢰성 향상, 열화 메카니즘 연구 · 열화 예측 및 열화 발생 재료의 해석 및 평가에 관한 연구 · 60년 운전기간을 상정한 Pilot Unit 선정 관련 연구	1992
	원자력 중앙 안전국	· 원전의 장수명화에 의해서 발생하는 안전상 문제의 취급방법에 대한 연구 · 인허가시 안전해석, 정기점검, Surveillance 및 Monitoring 등 경년 열화 관점에서의 Critical 기기의 결정방법에 관한 연구	1987
일 본	통산성	· 원전의 수명연장을 위한 기술개발 진행중	1985~
	JAPEIC	· 콘크리트 구조물의 열화 및 구조건전성 평가 →미국 Westinhouse사, GE사, Bechtel사와 공동 수행	
		· PWR 및 BWR의 수명연장에 관한 타당성 연구 →미국 Westinhouse사, GE사, Bechtel사와 공동 수행 · 장기적인 열화· 손상상태 분석 및 대책수립에 관한 연구 수행중	
	關西電力	· Mihama-1 원전의 60년 수명연장에 관한 연구 →Westinhouse사와 공동 수행	
	東京大學	· LWR의 장수명화에 관한 연구 →Phase 1 : 1985~1986년 →Phase 2 : 1985~1989년 →Phase 3 : 1989~1992년	
	기 타	· 콘크리트 구조물의 열화평가 및 수명평가에 관한 연구 진행중	
국제기구	IAEA	· 원전의 경년열화 평가 및 관리방법 관련 5개 보고서 작성 →원전의 경년열화 →원전의 장수명화에의 확률론적 안전성평가의 적용 →원전의 경년열화 관리를 위한 데이터 수집과 기록 보존 →원전의 안전 관련 기기의 경년열화 관리방법 →원전의 안전상 주요 4개 기기에 대한 경년열화의 Monitoring 및 열화 방지방법	1990
		· 콘크리트 격납건물에 대한 2단계 연구 →현재의 열화관리 절차와 경험 요약 →콘크리트 보수기술 및 재료에 대한 기술수준보고서 작성 →균열도 작성 및 허용/보수기준 개발 →콘크리트 격납건물의 열화감시를 위한 실질적인 계측기 및 기준 개발	

국내에서는 그 동안 콘크리트 구조물의 열화 및 유지관리에 대해서 큰 관심을 기울여 오지 않았으나, '90년대 초 성수대교 및 삼풍백화점 붕괴이후 구조물의 안전에 대한 사회적 관심이 고조되면서부터 구조물의 유지관리에 관한 연구가 시작되었다. '90년대 중반 이후부터 공공구조물에 대한 안전진단 기술, 유지관리 시스템 구축 등에 대한 연구가 활발히 추진중에 있으나, 이들 결과를 일반구조물과는 설계·시공형상 및 환경조건이 다른 원전구조물에 직접 적용하는데는 제약이 있다. 원전구조물의 경우 1978년 고리 1호기가 가동된 이래 가동

경험이 약 20년에 불과하므로 그 동안 원전 안전관련 콘크리트 구조물의 유지관리 및 수명연장에 대한 관심이 거의 없었으나, 1980년대 중반부터 세계적으로 원전의 경년열화 및 수명연장에 관한 연구가 활발히 수행되고 있고, 고리 1호기의 경우 인허가 수명의 종료가 가까워짐에 따라 국내에서도 이에 대한 연구의 필요성에 점차 관심을 가지기 시작했다.

국내에서 개발한 차세대 원전의 수명은 60년 설계수명으로 설계되어 시공될 예정이나, 현재 국내에 가동중인 원전의 수명은 법적으로 명확하게 규정되어 있지 않아 FSAR에 제시된 설계수명을 근거로 운영허가를 발급하고 있으며, 대부분 40년의 설계수명을 갖고 건설된 것으로 평가하고 있다(고리 1호기 및 월성 1호기는 30년). 지금까지 국내에서 수행된 원전구조물의 열화 및 수명연장에 관한 연구는 원전 관련 기관인 원자력안전기술원(KINS), 한국원자력연구소(KAERI) 및 한국전력연구원(KEPRI)에서 주도적인 역할을 담당해 왔고, 원전 관련 시공사 연구소 및 대학에서 일부 연구를 수행하였으며, 그 결과를 기관별로 <표 3>에 수록하였다.

<표 3> 원전구조물 열화 관련 국내 연구동향

연구기관	주요내용	수행년도
원자력안전기술원 (KINS)	· 콘크리트 비파괴 검사기술 개발 (KEPRI와 공동 연구)	1987
	· 콘크리트 강도 측정을 위한 비파괴 검사의 신뢰도 향상에 대한 연구 (KEPRI와 공동 연구)	1988
	· 원전 콘크리트 구조 열화안전성 평가기술 개발(I) →서울대학교와 공동 연구 →콘크리트 구조물 열화발생기구 조사 및 실험연구 →가동중 원전의 수명연장	1993
	· 원전 콘크리트 구조 열화안전성 평가기술 개발(II) →서울대학교와 공동 연구 →열화 메카니즘 규명, 열화요인별 손상평가 방법 →비파괴 시험방법, 보수방법 →구조열화에 대한 신뢰성 평가 및 가동중 원전의 수명연장	1994
	· 격납건물의 누설저항성 평가에 관한 연구 (KAIST와 공동 연구)	1998~
	· 원자력 안전 관련 구조물 사용전 검사에 관한 연구	1998
	· 원전구조물 열화 및 잔존수명 평가기술 개발 →원전 구조물 열화요인 및 사례조사 →열화 및 잔존수명 평가기술 →열화관련 필수 시험 항목	1998
	· 해수의 영향을 받는 콘크리트 구조물의 수명증가에 따른 영향 연구(II)	1999
	· 설계수명 증가에 따른 원자로 격납구조물 포스트텐션닝계통 및 주요구조요소의 성능검증 평가에 관한 연구 →대우건설기술연구소와 공동 연구 수행중	2000~
	한국전력연구원 (KEPRI)	· 원자력 발전소 수명기간 연장방안 조사연구 →원전 수명연장에 관한 타당성 조사
· 콘크리트 비파괴 검사기술 개발		1987
· 콘크리트 강도 측정을 위한 비파괴검사의 신뢰도 향상에 대한 연구		1988
· 원자로 건물 구조해석기술에 관한 연구 →서울대학교와 공동 연구 →포스트텐션닝 계통의 설계 최적화 →열응력 구조해석 기술		1992
· 원전 안전성 관련 콘크리트 구조물의 열화에 관한 연구 →미국 INEL, KICT와 공동 연구		1996
· 원전 수명관리연구(I)		1996
· 열화관리시스템 User's Manual		1996
· 발전소 구조재 및 내외장재의 열해방지 방안		1997
· 구조건전성 및 잔존수명 평가를 위한 데이터베이스 시스템 구축		1997
· 원전 콘크리트 구조물 잔존수명 예측에 관한 연구		1998~

<표 3> - 계속 -

연구기관	주요내용	수행년도
한국원자력연구소 (KAERI)	<ul style="list-style-type: none"> · 격납건물의 열화특성 및 민감도 분석 → 격납건물의 열화요인 및 특성분석 → 열화수치모델 개발 → 격납건물의 열화성능 평가코드 개발 	1998
	<ul style="list-style-type: none"> · 격납건물 가동중검사 절차서 분석 → 가동중검사를 위한 규제지침과 관련규준 비교분석 → 가동중 검사결과 검토 → 국내환경에 맞는 가동중 검사지침서 개발을 위한 기초자료 	2000
	<ul style="list-style-type: none"> · 격납건물 안정성 향상 기술 개발(1차년도 최종보고서) → 원전 격납건물 구조재료의 열화실험 및 열화모델개발(I) 	2000
대우건설기술연구소	<ul style="list-style-type: none"> · CANDU형 원자로 격납구조물의 극한내압해석 기술 · CANDU형 원자로 격납구조물의 충격해석 및 평가기술 	1997 1997
서울대학교	<ul style="list-style-type: none"> · 철근콘크리트 벽체의 충격거동 및 충격해석연구 	1992
연세대학교	<ul style="list-style-type: none"> · 원자로 격납구조 콘크리트의 크리프 특성에 관한 연구 	1997

3. 국내 원전 열화현황 분석 및 평가

현재 국내에 가동중이거나 시공중인 원전 구조물의 열화현황 및 내구성에 영향을 미치는 문제점 등을 종합적으로 수집하여 분석 및 평가를 수행하였다. 그 동안 국내에서는 국내 원전 구조물에서 발생하는 각종 열화에 대한 자료가 체계적으로 정리되거나 평가되지 못했던 것이 현실이다. 따라서, 본 연구에서는 국내 원전구조물의 각종 열화현상에 대한 분석 및 평가를 수행하였다. 국내 원전 열화현황은 크게 설계, 재료, 시공, 사용중 열화 및 기타 주요 항목으로 분류하였으며, 조사된 각 열화를 열화원인, 열화형태, 발생위치 등으로 분석하였다. 국내 원전에서 조사된 각 열화를 <표 4>와 같은 형태로 분류하였다.

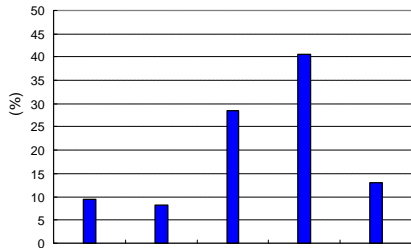
<표 4> 열화의 분류항목

열화항목 분류		열화원인	열화형태	발생위치	발생원인	비고
대분류	소분류					
재료	텐돈	건조수축	균열	부벽		
	콘크리트	동결융해				
설계	골재	수화열	탈락	텐돈		
	시멘트	크리프	부식	텐돈갤러리		
시공	앵커	염해	침식	앵커볼트		
	라이너	성능시험불량	팽창	격납건물 벽체		
사용중 열화	에폭시	시공불량	변형/만곡/부풀림	라이너		
	방수	타설불량	베어링플레이트 함몰	개구부		
기타	지수판	용접불량	파단	공동매트기초		
	도장	공정불량	bolt절단	베어링플레이트		
	공정	철근밀집	공극/공동	철근		
	강재	시공이음부불량	이격거리미확보	정착헤드		
		인력/숙련도부족	seismic gap 미확보	텐돈스트랜드		
		품질의식 결여	Pitting	텐돈가스켓		
		부식	콜드조인트	벽체현기부		
		침식/풍화	누수	리치몬드앵커		
		응력부식	그리스 누출	바닥층		
		텐돈응력감소	품질저하	슬래브		
		콘크리트팽창	공기지연			
		파단				
		설계미흡				

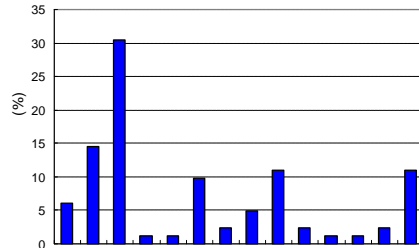
3.1 열화에 대한 종합분석 및 평가

조사된 열화사례를 재료, 설계, 시공, 사용중 열화 및 기타 항목으로 열화요인별로 분류하면 <그림 1>과 같다. <그림 1>에서 보면 발생한 전체 열화중 사용중 열화가 약 40% 이상으로 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 또한 시공상 원인으로 발생한 열화도 약 28% 정도 차지하였다. 재료상 원인으로 발생한 열화는 대부분 성능시험이 미흡한 것이 주 원인이며, 기타 항목은 주로 원전 공정상의 이유로 발생한 열화이다.

<그림 2>에 열화의 발생빈도를 항목별로 분류하였으며, 그림에서 콘크리트와 관련된 열화 발생빈도가 30% 이상으로 가장 높은 것으로 나타났다. 이외에도 텐돈, 철근, 라이너 및 공정 등의 항목에서도 발생빈도가 평균 이상인 것으로 나타났다.



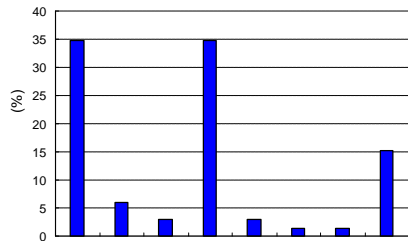
<그림 1> 요인별 열화의 발생빈도



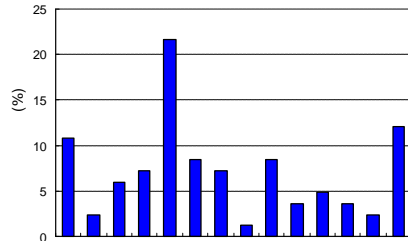
<그림 2> 항목별 열화의 발생빈도

<그림 3>은 원전구조물에서 발생한 열화를 열화형태별로 분류한 그림으로서, 국내 원전 구조물에서는 균열 및 공동, 부식 등이 발생빈도가 가장 높음을 알 수 있다.

조사된 열화발생 자료를 열화원인별로 분류하면 <그림 4>와 같다. 그림에서 보면, 시공시 부주의로 인해 가장 많은 열화가 발생되었으며, 이외에도 염해, 설계미흡, 누수 등으로 인한 열화도 발생빈도가 높은 것으로 나타났다.



<그림 3> 열화형태별 발생빈도



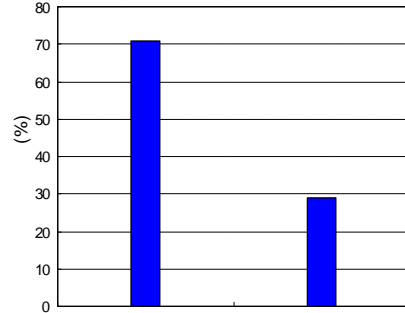
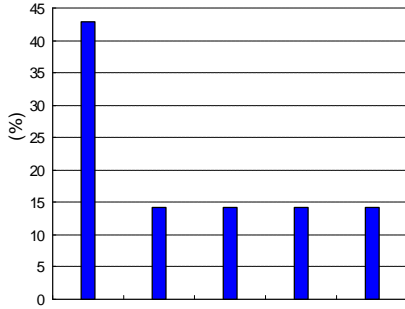
<그림 4> 열화원인별 발생빈도

3.2 설계 원인에 의한 열화

본 절에서는 조사된 열화현황 중 설계상 원인으로 발생한 열화만을 분석하여 열화현황에 대한 분석 및 평가를 수행하였다. <그림 5>는 설계상 원인으로 발생한 열화를 열화항목별로 분류한 것으로서 그림에서 보면 설계시 콘크리트와 관련된 항목에서의 설계미흡으로 인

해 발생한 열화가 가장 발생빈도가 높은 것으로 나타났다.

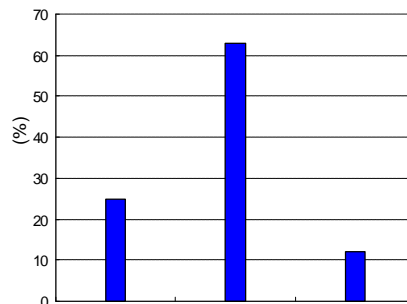
<그림 6>은 설계상 원인으로 발생한 열화를 열화원인별로 나타낸 그림으로서 열화원인은 크게 설계미흡과 시공성이 결여된 설계 등으로 분류된다. 이와 같은 열화를 저감시키기 위해서는 국부적인 부위에서의 상세설계, 시공성 등을 고려한 설계 등에 관심을 기울여야 할 것으로 판단된다.



<그림 5> 열화항목별 열화의 발생빈도(설계상 원인) <그림 6> 열화원인별 열화의 발생빈도(설계상 원인)

3.3 재료 원인에 의한 열화

본 절에서는 조사된 열화현황 중 재료상 원인으로 발생한 열화만을 분석하여 열화현황에 대한 분석 및 평가를 수행하였다. 본 연구에서 수집된 재료와 관련된 열화자료가 부족하여 전체적인 정확한 평가를 내리기는 어려운 것으로 판단되지만, 수집된 자료에 의해서 재료상 원인으로 인한 열화발생 현황은 <그림 7>과 같다. <그림 7>에서 보면, 원전구조물 설계 및 시공시 일부 재료에 대한 성능시험 규정이 미흡하여 열화의 발생 가능성이 있는 것으로 판단되며, 일부 재료의 품질불량도 열화의 원인이 되는 것으로 나타났다. 지방기준 미흡으로 인한 열화는 골재 규격과 관련하여 현재 국내 원전에 적용되는 ASTM 분류법과 KS 규격으로 생산되는 국내 규정과의 차이로 인해 발생한 것으로 이에 대한 규정을 합리적으로 조정함으로써 열화발생 원인을 제거할 수 있을 것으로 판단된다.



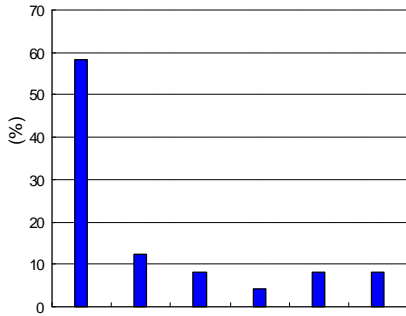
<그림 7> 열화원인별 열화의 발생빈도(재료상 원인)

3.4 시공 원인에 의한 열화

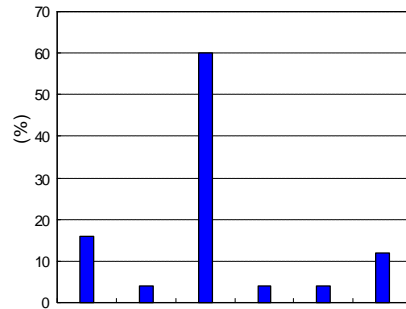
<그림 1>에서 보면, 시공상 요인으로 발생하는 열화는 사용중 발생하는 열화 다음으로 발생빈도가 높다. 조사된 자료를 통해서 시공상 요인으로 인해 발생한 열화를 열화항목별로

분류하면 <그림 8>과 같다. 그림에서 보면, 시공상 요인으로 인한 열화는 콘크리트와 관련해서 발생하는 열화가 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 이는 <그림 3>에 나타난 원전구조물에서의 균열 및 공동의 열화형태의 발생빈도가 높은 것과 관련이 깊다.

시공상 요인으로 인해서 발생한 열화를 열화원인별로 분류하면 <그림 9>와 같다. 시공시 여러 가지 원인에 의해서 열화가 발생되지만, 대부분의 열화는 시공불량으로 인해서 발생하는 것으로 나타났다.



<그림 8> 열화방향별 열화 발생빈도(시공상 요인)



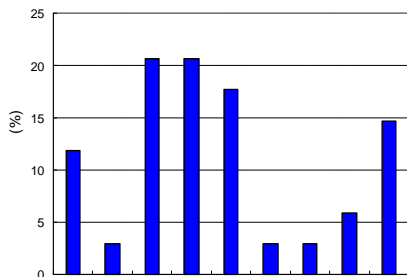
<그림 9> 열화원인별 열화의 발생빈도(시공상 요인)

3.5 사용중에 발생한 열화

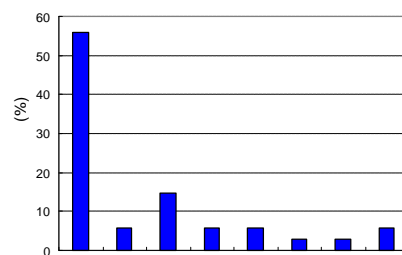
<그림 1>에서 보면, 본 연구에서 조사된 국내 원전구조물에서 발생한 열화는 사용중에 발생하는 열화가 가장 빈도수가 높음을 알 수 있다. 사용중 발생하는 열화는 명확하지는 않지만 건설 초기에는 열화의 흔적이 발견되지 않는다고 설계, 재료 및 시공상의 요인으로 인해서 원전 운전 중에 발생할 수도 있으며, 각 구성재료의 성능부족 및 설치 미흡 등으로 인해서도 발생 가능하다. 또한, 모든 것이 정상적으로 시공되고, 품질을 만족하여도 공용중에 발생 가능한 열화도 있다.

<그림 10>은 사용중 발생하는 열화를 열화방향별로 분류한 그림으로서 사용중 열화는 라이너 플레이트, 콘크리트, 텐돈, 강재, 철근 등에서 많이 발생하는 것으로 나타났다.

사용중 발생하는 열화를 열화형태별로 분류하여 <그림 11>에 나타내었다. 그림에서 보면, 사용중 발생한 열화는 부식이 가장 빈번하며, 균열도 약간 발생빈도가 높은 것으로 나타났다.



<그림 10> 열화방향별 열화의 발생빈도(사용중 열화)



<그림 11> 열화형태별 열화의 발생빈도(사용중 열화)

4. 결 론

본 연구는 설계수명이 60년으로 증가되는 차세대 원전 격납구조물의 열화저감화 방안 및 내구성 향상방안 도출, 안전규제방안 도출 등을 위한 1 단계 연구로 수행되었다. 본 연구에서는 현재 국내에 가동중이거나 시공중인 원전에서 발생하는 각종 열화의 D/B화를 통해서 국내 원전 구조물의 열화현황 및 내구성에 영향을 미치는 문제점 등을 종합적으로 수집하여 분석 및 평가를 수행하였으며, 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 국내 원전 구조물에서 발생된 열화는 사용중 열화가 전체의 약 40% 정도로 가장 발생빈도가 높으며, 그 다음으로 재료, 설계, 시공 등의 원인 순서로 발생빈도가 높은 것으로 나타났다. 이와 같은 사용중 열화는 원전 구조물의 사용중 점검 및 유지관리시 조기에 발견하여 대처함으로써 내구성 향상을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 열화의 발생빈도를 항목별로 분류하면 콘크리트와 관련된 열화가 약 30%로 가장 큰 비중을 차지하고 있으며, 이외에도 텐돈, 라이너, 철근 및 건설공정 등에 의한 열화의 발생빈도도 높은 것으로 나타났다. 따라서, 향후 차세대 원전 구조물의 건설 및 운영시 콘크리트와 관련된 항목에 대해서 보다 적극적인 열화저감화 대책이 필요한 것으로 판단된다.
- 3) 원전 구조물에서 발생된 열화를 형태별로 분류하면 콘크리트의 균열 및 공동, 부식 등이 가장 발생빈도가 높았으며, 따라서, 차세대 원전 설계 및 시공시 콘크리트의 품질관리와 부식 억제를 위한 방청 분야에서 보다 적극적인 열화저감화 대책이 수립되어야 할 것으로 판단된다.
- 4) 열화의 발생빈도를 원인별로 분류하면 시공시 부주의로 인한 열화의 발생빈도가 가장 높으며, 이외에도 염해, 설계미흡, 누수 등으로 인한 열화의 발생빈도가 높은 것으로 나타났다. 따라서, 차세대 원전 건설시 콘크리트의 타설 및 품질관리, 재료의 성능검증 등의 시공분야에서 보다 현실적인 열화저감화 대책이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국원자력안전기술원(KINS), 원전 콘크리트 구조 열화안전성 평가기술 개발(Ⅱ), 1994.
2. 한국원자력안전기술원(KINS), 원자력 안전 관련 구조물 사용전 검사에 관한 연구, 1998.
3. 한국원자력안전기술원(KINS), 원전구조물 열화 및 잔존수명 평가기술 개발, 1998.
4. 한국원자력안전기술원(KINS), 원전 건설안전성 향상을 위한 WORKSHOP, 1996.
5. 한국전력연구원(KEPRI), 원자력 발전소 수명기간 연장방안 조사연구, 1987.
6. 한국전력연구원(KEPRI), 원전 수명관리연구(Ⅰ), 1996.
7. 한국원자력연구소(KAERI), 격납건물의 열화특성 및 민감도 분석, 1998.
8. 한국원자력연구소(KAERI), 격납건물 가동중검사 절차서 분석, 2000.
9. 한국전력연구원, 차세대 원자로 기술개발(Ⅱ) 건설성 분야 시공사 설계검토 보고서, 1999.