

가동원전 포스트텐서닝 계통의 주기적안전성평가 방안 연구

Development of Periodic Safety Review Plan for Post-tensioning System in Operating Nuclear Power Plants

주광호, 김병섭, 노명섭
한국수력원자력(주) 원자력환경기술원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력법은 국내 모든 가동중인 원자력발전소에 대하여 10년 주기로 안전성평가를 이행하도록 요구하고 있다. 그러나 원전의 건전성 평가를 위하여 지금까지 많은 연구와 노력이 있었지만 대부분 특정 구조물, 계통, 기기 또는 현상에 국한되어 원전의 전반적인 평가에 있어서 부족한 점이 없지 않았다. 이에 가동원전의 종합적 안전에 대한 신뢰 구축의 필요성이 제기되어 주기적안전성평가를 통하여 가동원전의 전반적인 건전성 및 안전성 평가를 하게 되었다. 본 논문에서는 원전 격납건물의 포스트텐서닝 계통의 주기적안전성평가 방안 및 절차를 수립하여 가동원전 구조물의 안전성 확보에 기여하고자 한다.

Abstract

According to the Korean nuclear code, the safety review should be performed for operating nuclear power plants every 10 years. Although there have been studies and efforts of many scientists and engineers for integrity evaluation in NPPs, they were limited to most specific structures, systems, components and phenomena. Therefore they were insufficient for integrated evaluation in NPPs. By reason that the need of making confidence for the integrated safety in operating NPPs was raised, the overall integration and safety evaluation in NPPs have been performed through the periodic safety review (PSR). In this paper, plan and procedure of PSR will contribute to the enhanced safety of structures for post-tensioning system in containment building of operating NPPs.

1. 서론

원자력발전소(이하 원전)를 가동하고 있는 세계 각국은 원전 운영의 안전성에 관한 전반적인 점검을 통하여 원전 안전에 대한 신뢰를 구축해야 한다는 공감대가 형성되어 1996년 IAEA(International Atomic Energy Agency, 국제원자력기구)가 원자력안전협약(Nuclear Safety Convention)을 통해 가동원전에 대한 주기적안전성평가의 수행을 결의하게 되었다.¹⁾ 이에 주요 원전 운영국 중의 하나인 우리나라도 관련 법령의 개정을 통하여 2000년 5월 고리 1호기에 대한 주기적안전성평가를 시작으로 월성 1호기와 고리 2호기의 주기적안전성평가를 수행하였으며 현재 고리 3,4호기 및 영광 1,2호기의 주기적안전성평가를 수행하고 있다. 본 논문에서는 국내에 처음 도입된 고리 3,4호기 격납건물의 비부착식 포스트텐서닝 계통에 대한 주기적안전성평가의 방법 및 절차를 수립하고 기술적 해결 방안을 제시하고자 한다.

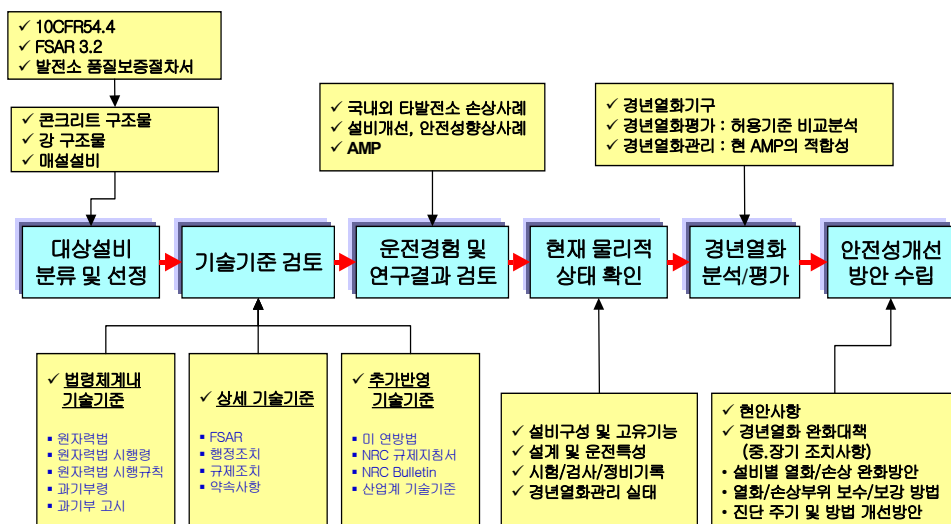
원전 격납건물의 포스트텐서닝 계통에 대한 경년열화평가의 목적은 첫째, 포스트텐서닝 계통의 물리적 상태를 확인하여 현재 유효한 기록이 포스트텐서닝 계통의 상태를 정확히 나타내고 있는지를 확인하는 것이며 둘째, 요구되는 안전 여유도를 유지하기 위해 포스트텐서닝 계통의 경년열화가 효과적으로 관리되고 있는지를 분석하고 향후 설비의 안전운전을 위해 적절한 경년열화 관리계획이 확립되어 있는지를 확인하는 것이다.

2. 격납건물 포스트텐서닝 계통

국내 원전은 일반적으로 40년의 인허가 수명을 가지고 있으며 상업운전을 개시한 이래 약 20여년 이상 경과하여 사용연수의 증가에 따른 효율적인 주기적안전성평가 기법의 개발은 원전의 안전성에 대한 국민적 신뢰감의 제고는 물론 에너지원의 확보 및 경제성 측면에서 매우 중요한 과제라 할 수 있다. 격납건물과 포스트텐서닝 계통의 주요 기능은 방사능피폭으로부터 발전소 종사자와 인근 주민을 보호하기 위한 생물학적 차폐역할과 운전 및 냉각재상실사고시 방사성물질의 누설방지 등이다. 따라서 격납건물과 포스트텐서닝 계통은 설계기준인 ASME Code에 명시된 설계기준사고에 대하여 구조적 건전성을 유지하도록 설계단계부터 안전성 확보를 위해 다중방어 개념, 심층방어 개념, 방사선방어 개념 등을 적용하고 있다. 또한 설계기준사고 및 온도의 결정, 내진안전성, 수소연소 등을 고려한 충분한 자유체적의 결정 및 예비 구조해석 등 다양한 변수 연구를 진행하고 있다. 이렇듯 건설시에는 수많은 검토와 절차를 거쳐 안전성을 확보하고 있으나 가동원전에 대한 안전성 확보에 있어서는 좀 더 많은 투자가 필요한 실정이다. 포스트텐서닝 계통은 시간제한 경년열화평가(TLAA, Time-Limited Aging Analysis)를 수행해야 하는데 재료의 특성상 일반 기계 설비와는 달리 안전성에 영향이 있을 경우 교체 등의 근원적 해결 방법의 적용이 매우 어려운 실정이다.²⁾

3. 주기적안전성평가 수행절차

원전 구조물은 일반 구조물에 비하여 안전성 확보가 보다 중요한 구조물로서 주기적안전성평가에 있어서도 일반 구조물과는 다르게 안전성 개념에서 접근을 해야 한다. 원전 구조물은 크게 콘크리트 구조물, 강 구조물, 매설설비 등으로 분류할 수 있으며 본 논문에서 언급하고 있는 격납건물의 포스트텐서닝 계통은 강 구조물의 한 범주에 포함하여 평가할 수 있다. 원전 구조물에 대한 건전성 평가 방법에 있어서 그동안 가동중검사, 누설률시험, 원전 구조물 수명관리연구, 원전 구조물 열화현상 연구 등 많은 점검 방법과 연구 결과가 발표되었으나 정작 이를 통합하고 보다 체계적으로 정리된 안전성평가 방법 및 절차가 부재한 실정이다. 이러한 이유로 무엇보다도 안전성 확보가 중요한 구조물이라고 할 수 있는 원전 구조물에 대한 주기적안전성평가 방안 및 절차를 연구하게 되었으며 그 수행절차는 다음 그림과 같다.³⁾



<그림 1. 가동원전 구조물의 주기적안전성평가 흐름도>

그림 1에서 보는 바와 같이 원전 구조물에 대한 주기적안전성평가를 위해서는 대상 구조물을 적절한 기준에 근거하여 선정하여야 한다. 선정된 구조물에 대해서는 관련 자료 및 기술기준을 검토한 후 과거 이력 및 운전경험과 연구결과 반영여부를 조사한다. 이러한 검토 결과를 토대로 현재 물리적 상태를 판단하고 향후 구조물에 영향을 미칠 수 있는 경년열화기구를 분석하여 분석된 경년열화기구에 대해서 평가를 수행하게 된다. 경년열화평가에 있어서는 현재 발전소에서 운영하고 있는 경년열화관리 프로그램과 해외에서 요구하고 있는 경년열화관리 프로그램과의 비교 및 검토를 통하여 운영중인 경년열화관리 프로그램의 적절성을 판단하고 최종적으로 안전성개선 방안을 수립하는 과정을 통하

여 구조물에 대한 주기적안전성평가를 수행하게 된다. 이러한 각각의 일련의 평가 절차에 대한 세부 내용은 다음과 같다.

가. 대상설비 분류 및 선정

가동원전 구조물의 주기적안전성평가와 관련하여 평가대상 구조물을 선정하기 위해서는 10CFR54.4, 최종안전성분석보고서(FSAR, Finally Safety Analysis Report), 품질보증절차서 등을 검토하여 안전성 관련 계통, 기기, 구조물과 안전에 영향을 주는 비안전 계통, 기기, 구조물을 선정하게 된다. 이러한 선정절차에 근거하여 선정된 평가대상 구조물로는 격납건물, 안전관련 콘크리트 구조물, 포스트텐서닝 계통, 인양설비 및 핵연료취급 관련 설비, 매설설비가 있으며 기타구조물로는 방수문과 방호문, 안전관련 탱크의 콘크리트 기초 등이 있고 구조물의 재질별로는 크게 콘크리트 구조물과 강 구조물로 나눌 수 있다.

나. 기술기준 검토

포스트텐서닝 계통의 평가를 수행하기 위해서는 먼저 설계 및 시공에 적용된 각종 기술기준의 검토가 선행되어야 한다. 이러한 기술기준의 검토 사항으로는 법령체계내의 기술기준으로서 원자력법, 원자력법 시행령, 원자력법 시행규칙, 과기부령, 과기부 고시 등이 있으며 상세기술기준으로는 최종안전성분석보고서(FSAR), 행정 및 규제조치, 사업자 약속사항 등이 있다. 또한 추가반영 기술기준으로 미국 연방법, NRC 규제지침서, 산업계 기술기준 등이 있다.⁴⁾

다. 운전경험 및 연구결과 활용

포스트텐서닝 계통의 운전경험 및 연구결과의 활용에 대한 검토 사항으로서 국내·외 타 발전소의 손상사례가 조사되어야 하며 해당 발전소의 설비개선 및 안전성 향상 사례 등을 파악하여 평가에 반영하여야 한다. 이를 위해서 대상 포스트텐서닝 계통에 대한 시험, 검사, 운전 및 정비기록 등 과거 이력에 대한 조사 및 평가가 수행되어야 하며 아울러 현재 발전소에서 진행하고 있는 포스트텐서닝 계통에 대한 경년열화관리 프로그램의 현황 파악이 이루어져야 한다.

라. 현재 물리적 상태 확인

포스트텐서닝 계통에 적용된 기술기준의 검토와 과거 운전경험 및 연구결과의 활용에 대한 검토가 완료되면 이를 토대로 하여 현장점검을 실시하고 포스트텐서닝 계통의 물리

적인 상태를 확인한다. 현장점검시 확인사항은 포스트텐서닝 계통의 구성 및 고유기능 유지 여부, 설계 및 운전특성, 시험/검사/정비기록, 경년열화관리 실태 등이며 이러한 자료들이 대상 포스트텐서닝 계통의 현재 물리적 상태에 반영될 수 있도록 하여야 한다.

마. 경년열화분석 및 평가

격납건물 포스트텐서닝 계통의 구성요소는 크게 텐돈 정착부(Tendon Anchorage)와 텐돈(Tendon Wire)으로 분류할 수 있다. 포스트텐서닝 계통은 시간이 경과함에 따라 텐돈의 부식과 프리스트레스트 손실로 인해 성능저하를 초래할 수 있다.⁵⁾

1) 부식

시간이 경과함에 따라 프리스트레싱 텐돈에 발생할 수 있는 부식은 공식, 응력부식균열 및 수소취성 등으로 분류할 수 있으며 개별 혹은 이들의 조합에 의해 부식이 발생하게 된다. 포스트텐서닝 계통에 있어서 텐돈의 부식방지를 위한 일반적인 방법은 쉬스 내부를 그리이스로 충전하는 방법과 시멘트로 충전하는 방법이 있다. 현재 국내 원전에는 쉬스내 충전재로서 월성 1~4호기, 울진 1,2호기는 시멘트를, 그 외 모든 원전은 그리이스를 사용하고 있다.

○ 공식

점식이라고도 하며 강철, 알루미늄 등에서 볼 수 있는 국부적으로 금속에 작은 구멍이 생기는 형태이다. 금속표면이 일부 파괴되어 새로운 표면이 노출되면 그 일부가 용해하여 국부적으로 부식이 진행되는 데 이러한 부식형태를 공식이라 한다.

○ 응력부식균열

인장응력하에 있는 금속재료에서 재료와 부식환경의 특징적인 조합으로 발생하는 균열이다. 응력부식균열이 발생하는 동안 금속 또는 합금의 대부분의 표면은 거의 손상을 받지 않으며 단지 매우 가느다란 균열이 금속표면을 통과하게 된다. 응력부식균열의 형태는 입계균열과 입내균열이 있는데 입계균열은 입계를 따라 균열이 발생하는 반면에 입내균열에서는 균열이 입계에 우선적으로 발생하지 않고 결정립 내를 통과해서도 발생할 수 있다. 응력부식균열 발생에는 다음과 같은 일반법칙이 적용된다.

- 응력부식균열은 주로 합금에서 발생하며 순금속에서는 발생하지 않는다.

- 어떤 합금의 응력부식균열을 일으키는 환경은 그 합금에 특유한 것이며 모든 합금에 대해서 응력부식균열을 일으킬 수 있는 환경은 없다.
- 금속 또는 합금의 응력부식균열에 대한 감수성은 열처리로 인한 조직변화에 의해 영향을 받는다.
- 응력부식균열은 양극분극에 의해서는 오히려 촉진되고 음극분극에 의해서 효과적으로 방지된다.

○ 수소취성

수소약화라고도 하며 금속 안에 수소가 흡수되어 금속의 기계적 성질이 약해져 부서지기 쉽게 되는 현상으로서, 여러 가지 이유로 수소가 금속에 흡수되면 금속의 격자에 변화가 생기면서 결정이 약해진다. 강철 등의 금속 재료에 수소약화가 일어나면 큰 기계나 구조물이 파괴되는 등 심각한 안전사고의 원인이 되기도 한다. 금속의 부식과 함께 진행되기도 하는데 부식을 일으키는 전기화학적인 반응이 수소취성의 원인이 되기도 한다.

또한 수소취성은 특히 응력부식을 촉진한다. 수소기체와 접촉하는 금속의 표면을 통과하여 원자로 나누어진 수소가 들어 갈 수도 있고 수분과 접촉된 금속 표면에서 전기화학적 환원반응으로 수소가 발생하여 내부로 들어가는 경우도 있다. 수소는 금속원자와 결합하여 수소화물을 만들기도 하고 격자의 틈새에 들어가기에도 하는데 금속의 약화를 일으키는 메커니즘은 확실하게 밝혀지지 않았다.

2) 프리스트레스트 손실

프리스트레스트 콘크리트에서 텐돈이 프리스트레스트를 잃게 되면 그 기능이 상실되며 프리스트레스트 손실의 원인은 다음과 같이 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 정착단계의 초기에서 발생하는 손실로 정착부에서의 미끄러짐, 접촉부에서 텐돈과 쉬스 사이의 마찰 및 탄성수축과 텐돈의 긴장순서에 의한 영향을 들 수 있다. 두 번째는, 경년손실에 의한 것으로 콘크리트의 수축, 콘크리트의 크립 및 텐돈가닥의 응력이완에 의해 발생한다. 마지막으로, 재료의 결함으로 인한 텐돈가닥이 파손되는 경우나 온도변화에 의한 영향을 들 수 있다.

○ 프리스트레스의 손실량 결정

프리스트레스의 손실량은 Regulatory Guide 1.35.1의 요건을 따라 초기손실, 경년손실 등의 요소를 고려하여 격납건물의 수명기간(보통 40년)동안에 계산되어진다.

• 초기손실

텐돈설치시의 초기 정착력은 정착부에서의 슬립량, 긴장순서에 의한 효과를 포함한 탄성수축 및 텐돈의 파손영향을 허용하여 조정되어야 한다. 특정한 방향(수평, 수직)에서의 모든 텐돈이 동시에 프리스트레싱 되고 있다면 탄성수축으로 인한 프리스트레스의 손실량은(F_{LES}) 식 ①과 같이 구할 수 있다.

$$F_{LES} = \frac{F_0}{A_{cn}E_c + A_sE_s + A_pE_p + A_lE_l + A_dE_d} \times E_p A_p \quad ①$$

F_{LES} : 탄성수축에 의한 프리스트레스력의 손실

F_0 : 초기 정착력

A : 면적

E : 탄성계수

c(concrete), cn(net concrete), s(reinforcing steel), p(prestressing steel), l(liner), d(duct)

그러나 텐돈이 긴장되는 순서에 따라 탄성수축량이 차이가 나게 된다. 즉, 처음 긴장되는 텐돈은 구조물의 탄성수축을 많이 받겠지만 마지막에 긴장되는 텐돈은 탄성수축을 전혀 일으키지 않는다. 따라서 실제적인 탄성수축으로 인한 프리스트레스의 손실은 다음과 같은 선형관계식 ②와 같이 계산될 수 있다.

$$F_{LES}^n = \frac{n_r}{N} F_{LES} \quad ②$$

F_{LES} : 탄성수축에 의한 프리스트레스력 손실

N : 특정방향(수평 및 수직)의 텐돈의 전체 수

n : 임의 선정된 긴장되어질 텐돈의 순차

n_r : N-n

따라서 텐돈의 긴장순서, 초기 정착력 및 정착부에서의 슬립 등의 모든 기록들이 반드시 문서화되어 있어야 한다. 긴장 후 변형된 초기 프리스트레스력(Initial Prestressing Force, F_i)은 다음 ③과 같이 계산된다.

$$F_i^n = F_0^n - F_{LES}^n - F_{LSA} \quad ③$$

F_i : 초기 프리스트레스력

F_0 : 정착력

F_{LES} : 탄성수축에 의한 프리스트레스력의 손실

F_{LSA} : 정착부에서 슬립에 의한 프리스트레스력의 손실

n : 임의 선정된 긴장되어질 텐돈의 순차

- 경년손실에 의한 영향

경년손실에 의한 영향은 크게 세 가지로 구분된다. 먼저, 손실에 기여하는 구조물의 수축범위를 고려해야 한다. 예상되는 수축의 많은 부분은 그 구조가 프리스트레싱 되기 전에 발생하기 때문에 수명기간동안의 수축은 단순한 실험값으로 적용할 수 있다. 실제로 여러 발전소에서는 40년 수명기간동안 100×10^{-6} 의 값을 사용하고 있다. 그러나 Regulatory Guide 1.35.1에서는 이 값이 낮은 습도환경에서의 더 많은 수축과 높은 습도환경에서의 더 적은 수축을 설명하도록 보정되어야 한다고 요구한다.

두 번째 고려사항은 프리스트레스력에 대한 크립 변형의 효과이다. 이는 경년손실을 계산할 때 가장 중요하면서 변화가 다양한 요소 중의 하나로 건조 크립(Drying Creep or Stress Induced Creep)과 염기성 크립(Basic Creep)으로 구분된다. 건조 크립은 구조물과 환경 사이에서 일어나는 수분교환으로 야기되며 그것의 특성은 구조물의 인장상태로부터 야기되는 부가적인 수분의 교환이 일어난다는 점 외에는 수축의 특성과 유사하다. 건조 크립의 양은 주로 구조의 부피 대 표면 비와 환경의 평균상대습도에 의존한다. 염기성 크립에 영향을 주는 주요인자는 콘크리트의 혼합물, 수화열, 스트레스의 평균크기 및 온도를 들 수 있다.

마지막 고려사항은 텐돈가닥의 응력이완효과이다. 텐돈가닥의 응력이완효과는 텐돈가닥의 화학성분과 금속학적 처리에 따라 변한다. Regulatory Guide 1.35.1은 적어도 세 번의 1,000시간 이완시험의 최소값을 보여주는 텐돈가닥의 사용을 요구하고 있다. 일반적으로 텐돈가닥으로 사용되는 재료는 ASTM A416으로 이 재료는 인장강도 대 항복강도의 비가 97%에 달하는 고강도 재료이다.(극한인장강도 : 184KN, 항복강도 : 165KN, 연신율 : 3.5%)

○ 기타손실

기타손실로는 텐돈가닥의 열화에 의한 손실과 온도의 영향이 있다. 온도 영향의 특별한 중요성은 텐돈설치 기간과 검사기간 동안 구조물의 평균온도차에 대한 효과이다. 국소화된 고온 균열(Hot Spot)과 온도변화에 따라 텐돈의 길이에 걸쳐 다른 응력상태를 야기할

수 있다. 또한 콘크리트와 철의 팽창계수 및 수축계수 변화도 텐돈 인장력의 보정을 야기한다. 따라서 이러한 효과들은 가동전 및 가동중점검에서 측정된 인장력과 경년열화를 고려하여 예상된 인장력 값을 비교하는데 중요한 영향을 준다.

미국내 원전의 운전경험으로부터 통상 설계시 40년 후의 인장력 감소값이 20℃ 근처에서 전체 프리스트레스력의 4~12%로 계산되는데 비해서 평균온도 32℃의 환경하에서는 40년 후의 인장력 감소값이 전체의 15.5~20%에 달함을 알 수 있었다. 그 결과 USNRC는 실제 미국 내의 많은 원전이 부분적 혹은 1년 평균 텐돈 주위의 온도가 32℃이상인 환경에서 운전되고 있으나 측정상 오차 등의 여러 이유로 이러한 사실을 간과할 수 있음을 지적하였다.⁶⁾

바. 안전성 개선방안 수립

앞서 기술된 일련의 평가절차가 완료되면 수집된 평가 자료를 근거로 하여 현 상태에서 평가대상 포스트텐서닝 계통의 안전성 개선방안이 도출되어야 한다. 안전성 개선방안을 도출함에 있어서 현재 해당 발전소에서 수행되고 있는 경년열화관리 프로그램과 해외에서 규정하고 있는 경년열화관리 프로그램과의 비교, 검토를 통하여 현재 진행되고 있는 관리프로그램의 적절성 여부를 평가하는 절차가 필요하다. 현재 발전소에서 진행되고 있는 경년열화관리 프로그램이 해외에서 요구하고 있는 경년열화관리 프로그램의 모든 항목을 만족하고 있다면 문제가 없다. 그러나 해외 경년열화관리 프로그램에서 규정된 항목에 대해서 불만족 사항이 도출된다면 이 부분에 대한 시정조치 및 개선방안이 수립되어야 할 것이다.

4. 향후 기술적 해결과제

국내 원전은 해외의 기술 선진국에 비하여 원자력 산업의 역사가 짧아 아직까지 가동원전 격납건물 포스트텐서닝 계통의 주기적안전성평가에 대한 확고한 체계가 성립되어 있지 못한 실정이다. 물론 국내 원전 격납건물 포스트텐서닝 계통의 안전성 평가를 위하여 1990년대 초반부터 원전 수명평가 및 열화관리방안 수립과 같은 다양한 분야의 수명관리 연구를 추진해오고 있다. 특히 원전 안전성관련 콘크리트 구조물에 대해서는 수명관리 시스템(SLMS : Structure Life Management System)을 개발하여 고리 1호기를 포함한 가동원전에 대한 모든 수명관리 이력사항을 D/B화하여 운영 관리하고 있다. 그러나 이러한 일련의 연구 및 노력은 안전성 관련 구조물에 편중되어 있는 면이 없지 않고 지중 매설물, 영구사면 및 부속 구조물, 해양 구조물에 대한 검토는 부족한 면이 있다. 향후에는 현재 운용되고 있는 수명관리 체계의 지속적 개선 및 보완을 통해 가동원전 격납건물 포스트텐서닝 계통의 평가에 대해서 기술 선진국보다 우수한 시스템을 구축하여 원전 안전에

대한 신뢰성을 높이고 국가의 원전 기술 경쟁력 향상에도 크게 기여할 필요가 있다.

5. 결론

지금까지 가동원전 격납건물의 포스트텐서닝 계통의 주기적안전성평가 방안 및 절차에 대한 연구 결과를 기술하였다. 현재 국내 원전 격납건물의 포스트텐서닝 계통의 건전성 평가와 관련된 많은 연구와 논문이 발표되었으나 그 대부분은 일부 혹은 특정 경년열화 기구에 대한 내용이 대부분으로 가동원전 격납건물의 포스트텐서닝 계통의 전반적인 안전성 평가에는 부족한 면이 없지 않다고 판단된다. 이에 본 논문을 통하여 기존에 발표된 원전 격납건물 포스트텐서닝 계통의 건전성 평가와 관련된 연구를 종합하고 이를 근거로 하여 가동원전 격납건물 포스트텐서닝 계통의 주기적안전성평가 방안 및 절차를 체계적으로 수립하여 향후 이와 관련된 업무 수행시 예상되는 각종 시행착오를 미연에 방지하고 시간적, 경제적 손실을 최소화 하고자 하는 취지에서 본 논문을 발표하게 되었다. 더구나 우리나라는 이러한 가동원전 격납건물의 포스트텐서닝 계통의 주기적안전성평가를 법제화하여 지속적으로 수행해야 함에도 불구하고 아직까지 이러한 원전 격납건물의 주기적안전성평가와 관련된 체계적인 방법 및 절차가 수립되어 있지 못하다. 이에 본 연구를 시발점으로 하여 원전 종사자 및 관련 기술자의 많은 관심과 지속적인 연구를 통하여 국내 원전의 안전성 확보와 설비개선에 초석이 되고자 한다.

참고문헌

1. IAEA Safe Series No. 50-SG-O12, Periodic Safety Review of Operational Nuclear Power Plants, A Safety Guide, IAEA, Vienna, 1994.
2. NUREG-1801, Vol. 2, Generic Aging Lessons Learned(GALL) Report, USNRC, July 2001.
3. 최현 외, “가동중 원전 콘크리트 구조물의 주기적안전성평가 방안 연구”, 2003 한국 원자력학회 추계학술발표회 논문집, 2003.
4. ASME Section XI, Subsection IWL, “Requirements for Class CC Concrete Components of Light-Water Cooled Power Plants”, 1992.
5. 송영철 외, 96전력연-단61, “원전 안전성관련 콘크리트 구조물의 열화에 관한 연구”, 한국전력공사 전력연구원, 1996.
6. USNRC, Information Notice 85-10, 91-80, 99-10

표 1. 가동중점검 일정

절차서 및 기술시방서 내용	관련근거
구조물 건전성 시험후 1, 3, 5년(이후 매 5년마다)차에 실시	- Reg. Guide 1.35(Rev. 3) Regulatory Position 1.3 - ASME Section XI, Subsection IWL-2410(a), 2420(a)
1, 3, 5년차 검사는 정해진 검사일로부터 ±6개월 이내에 착수, 완료하여야 함.(단, 발전소 가동에 의한 검사 불가 부위는 정상적으로 계획된 차후 발전소의 가동정지시까지 연기 가능)	- ASME Section XI, Subsection IWL-2410(b), 2420(b)
10년차 이후의 검사는 정해진 검사일로부터 ±1년 이내에 착수, 완료되어야 함.	- ASME Section XI, Subsection IWL-2410(c), 2420(c)
한 부지에 2개의 동일한 격납건물이 있을 경우, 구조물 건전성 시험이 2년 이내에 완료되었다면 선행호기의 5, 15, 25, 35년차 검사와 후행호기의 3, 10, 20, 30년차 검사는 텐돈 정착부(지지판 주위 및 정착부품) 육안검사와 그리이스 재료시험, 그리이스 캡내의 자유수에 대해서만 검사 실시	- Regulatory Guide 1.35(Rev. 3) Regulatory Position 1.5 - ASME Section XI, Subsection IWL-2421
* Regulatory Guide 1.35의 Figure 1에서는 이와 같은 동일부지의 2개 격납건물 경우 Position 1.5와는 다르게 2개의 격납건물에 대한 3년차 가동중점검에서 Full Inspection이 요구되지 않고 2개 격납건물 모두 1년차 및 5년차에서 Full Inspection을 수행하는 것으로 되어 있음.	

표 2. 콘크리트 표면 육안검사

검사부위	절차서 및 기술 시방서 내용	관련근거
격납건물 외벽	깊이 20mm, 폭 150mm이상의 피상 박리나 2.32m ² 이상의 D-균열, 심한 균열 및 기타 표면변형 등은 보고서에 기록	- Regulatory Guide 1.35(Rev. 3) Regulatory Position 3.1 (Ref. ACI 201. 1R-92) - ASME Section XI, Subsection IWL-2510
텐돈 지지판 주위	폭 0.254mm(0.01in)미만의 콘크리트 균열은 허용하며 그 이상은 균열 발달양상을 파악하여 원인 규명(단, 건설기간 중 콘크리트 표면의 보수작업으로 발생한 것이 명백하고 구조적 영향을 미치지 않는 것으로 판명되면 허용)	- Reg. Guide 1.35(Rev.3) Regulatory Position 3.4 - ASME Section XI, Subsection IWL-2524.1, 3221.3

표 3. 포스트텐서닝 계통 검사

검사종류	절차서 및 기술 시방서 내용				관련근거
검사 텐돈의 선정방법	검사텐돈은 이전에 검사받지 않은 텐돈 중 각 그룹(수평, 수직)에서 무작위 선정함.				- Regulatory Guide 1.35(Rev. 3) Regulatory Position 2.1 - ASME Section XI, Subsection IWL-2521(a), 2521(b)
	첫 해 선정된 텐돈 가운데 형태별로 1개를 제어 텐돈(control tendon)으로 선정함.				
검사 텐돈의 수	검사시기	그룹별 비율(%)	최소수	최대수	- Regulatory Guide 1.35(Rev. 3) Regulatory Position 2.1, 2.2 Figure I - ASME Section XI, Subsection IWL-2521(a)
	1, 5년차	4	4	10	
	10년차 이후	2	3	5	
검사 전. 후의 재검정	텐돈응력 측정에 사용된 장비는 정밀성의 확보를 위해 매 검사시마다 최초 텐돈의 측정전과 마지막 텐돈의 측정후 검정을 실시하며 텐돈의 최소 극한강도의 1.5% 이내의 정확성 요구				- ASME Section XI, Subsection IWL-2522(b)
그리이스 캡 및 정착부품 육안검사	앵커헤드, 지지판, 끼움판의 균열은 보고서 기록 후 원인을 규명하며, 탈인장 텐돈의 변형이 발견된 앵커헤드, 지지판, 끼움판은 새 것으로 교체 후 정밀조사를 수행함.				- Regulatory Guide 1.35(Rev. 3) Regulatory Position 3.2,3.3 - ASME Section XI, Subsection IWL-2524.1, 3221.3
부식검사	등급	내용		대책	- Regulatory Guide 1.35(Rev. 3) Regulatory Position 3.2 - ASME Section XI, Subsection IWL-2524.1, 3221.3
	I	육안으로 붉은색 녹을 볼 수 있으나 철술로 간단히 제거 가능한 상태		허용(추후 검사자료로 기록)	
	II	약간의 점부식이 발견되었으나 철술로 어렵지 않게 제거할 수 있는 상태		지지판, 그리이스 캡은 부식제거 후 재도장(허용), 앵커헤드, 끼움판, 텐돈가닥은 원인규명	
	III	심각한 점부식으로 철술로 제거하기 어려운 상태		사용 불가능, 대책수립	
텐돈 응력측정	내용			허용기준	- Regulatory Guide 1.35(Rev. 3) Regulatory Position 7.1 - ASME Section XI, Subsection IWL-3221.1
	그룹별 평균값이 규정된 최소 허용인장력 이상이고 각각의 개별 값이 최소 허용인장력의 95% 이상인 경우			허 용	
	개별 값이 최소 허용인장력의 90~95% 이상인 경우			인접한 텐돈 2개를 추가로 측정하여 최소 허용인장력의 95% 이상이면 허용되지만 95% 이하이면 추가 응력검사 실시	
	개별 값이 최소 허용인장력의 90% 이하인 경우			추가 응력검사	

표 3 포스트텐서닝 계통 검사(계속)

검사종류	절차서 및 기술 사양서 내용		관련근거
탈인장	텐돈 가닥의 인장시험을 위해 각 그룹에서 한 개의 검사용 텐돈을 인장해제하며 텐돈가닥 및 소선의 파단 및 손상여부를 검사함		- Reg. Guide 1.35(Rev. 3) Regulatory Position 4.1 - ASME Section XI, Subsection IWL-2523.1
재인장	텐돈 재인장력은 시험 시점에서의 텐돈 예상 정착력 이상이 어야 하나, 유효 텐돈가닥수에 대하여 텐돈 극한 인장강도의 70%를 초과하지 않아야 함. 재인장시 측정된 신장량이 최근 시험 기록치와 10% 이상 차이가 알 경우 원인규명		- Reg. Guide 1.35(Rev. 3) Regulatory Position 4.2, 7.2 - ASME Section XI, Subsection IWL-2523.3, 3221.1(d)
그리이스 되채움	내용	허용기준	- Reg. Guide 1.35(Rev. 3) Regulatory Position 6, 7.4 - ASME Section XI, Subsection IWL-3221.4
	되채움 조건	기한 : 제거 후 3주 이내 온도 : 150~220°F 유지 압력 : 수평/수직(100/150psig)	
	되채움량 파악(*)	쉬스 이외의 곳으로 그리이스가 유입되거나 (되채움량-제거량)이 쉬스 순체적의 5%를 초과하면 발주자에게 통보 후 원인 규명	
	* IWL-3221.4의 경우, 제거된 그리이스량과 되채움된 그리이스량의 차이(절대값)가 쉬스 내부 순체적의 10%를 초과할 경우에는 발주자에게 통보하여야 함.		

표 4. 포스트텐서닝 계통 재료시험

검사종류	절차서 및 기술 사양서 내용				관련근거
텐돈가닥 인장시험	전 길이에 걸쳐 부식 및 손상여부를 검사하며, 중간에서 한 개씩 시료를 채취, 인장시험을 실시하녀 ASTM A416 Grade 270, 텐돈 가닥의 최소 인장 강도인 18.74ton (41.31kips)을 만족하고 항복강도는 극한인장강도의 90% (=37.18kips)이상, 신장률(텐돈가닥의 유효단면적=0.153in ²)은 3.5% 이상일 때 적합한 것으로 판정				- Reg. Guide 1.35(Rev. 3) Regulatory Position 5 - ASME Section XI, Subsection IWL-2523.2, 3221.2
그리이스 화학성분 분석	분석 종류	시험 방법	허용 기준	채취	- Reg. Guide 1.35(Rev. 3) Regulatory Position 6, 7.4 - ASME Section XI, Subsection IWL-2525, Table IWL-2525-1
	수분량	ASTM D95	중량의 최대 10%	각	
	수용성 염화물	ASTM D512	최대 10 ppm	검	
	수용성 질산염	ASTM D992	최대 10 ppm	사	
	수용성 황화물	ASTM 427	최대 10 ppm	텐	
	염기도	ASTM D974	초기값의 50%이상	돈 의 끝 단	

표 5. 격납건물 포스트텐서닝 계통 관리프로그램(ASME Sec. XI, IWL)

항 목	설 명	비 고
격납건물 포스트텐서닝 계통	○ 격납건물 콘크리트 요소 ○ 격납건물 포스트텐서닝 계통	
경년열화기구/경년 열화영향	○ 텐돈 부식 ○ 텐돈 프리스트레스력 손실	
프로그램범위	○ 격납건물 콘크리트 표면 육안검사 ○ 포스트텐서닝 계통 육안검사 및 유효인장력 검사 ○ 재료 시험(텐돈가닥 및 그리이스)	
감시/검사	○ 격납건물 콘크리트 면과, 텐돈앵커 주위의 콘크리트 면을 대상으로 육안검사 방법에 근거를 두어 경년열화의 단서를 검사 ○ 포스트텐서닝 계통에 대하여 텐돈의 인장력 측정 및 텐돈앵커와 장선 또는 가닥들도 항복강도, 극한강도 및 연신율에 대해 시험	
경년열화영향 탐지	○ 모든 콘크리트 면에 대하여 육안 VT-3C 검사를 실시함. 의심가는 지역과 텐돈앵커로 둘러싸인 지역은 더 엄격한 VT-1 또는 VT-1C 검사를 실시 ○ 샘플텐돈의 사전응력을 측정하고 각 형태 중 샘플 텐돈 하나씩 인장력을 풀어줌. 검사와 시험을 위해 각 인장제거 텐돈의 개별 장선 및 가닥을 제거함.	
감시경향	○ 검사주기는 구조건전성 시험 후 1, 3, 5년째 실시하며 그 후는 5년 주기로 실시 ○ 텐돈검사에는 랜덤 샘플링과 함께 각 형태의 한 개 텐돈씩을 첫째 검사 샘플로부터 선정하여 공동 텐돈으로 지정. 그리고 검사시에 각 공동텐돈을 검사하여 발전소 수명기간동안 감시 및 경향정보를 제공 ○ 모든 검사샘플 텐돈의 사전응력에 대해 인양시험을 통해 측정하고 전 수명기간에 걸쳐 해당 형태의 텐돈에 대한 예상하중을 고려한 허용기준과 비교	
허용기준	○ 콘크리트 면에 대한 허용기준은 추가적 평가나 수리가 필요할 것으로 단정하기에 충분한 손상이나 경년열화의 존재여부 판단에 대한 “책임기술 담당자”(ASME 코드에 정의된)의 결정에 따름. 그러나, ACI349.3R 5장의 “평가기준”에 근거한 허용기준은 가능 ○ 포스트텐서닝 계통에 대한 허용기준은 원래 정량적으로 텐돈하중, 텐돈장선 또는 가닥 샘플 및 부식방지제에 대한 정량적인 허용기준을 제시하고 있음. 예상 텐돈하중은 규제지침 (Regulatory Guide 1.35.1)에 따라 계산	
조치사항	○ 허용기준을 만족하지 못하는 항목을 평가하여 수리 없이 괜찮은지 여부와 수리가 필요하다면 수리 및 교체의 범위, 방법, 완료일을 기술평가보고서에 설명하고 상태의 원인과 추가검사의 범위, 특성 및 빈도를 나타냄. ○ IWL-4000에서 후속 수리절차를 제시하고 있으며 여기에는 콘크리트 수리 및 후인장 계통의 수리요건을 포함	
확인절차 및 행정사항	○ 발전소 품질보증 절차, 검토 및 승인 절차, 10CFR50, 부록 B의 요구사항에 따라 이행	

표 6. 포스트텐서닝 계통 경년열화관리 프로그램 적합성 비교(예)

경년열화 기구	대상설비	주요내용	고리 3,4호기 관리프로그램	해외 관리프로그램	비 고
균 열	○ 격납건물 외부 ○ 텐돈 정착부 주위	- 육안검사 방법으로 경년열화 징후 검사	- 격납건물 포스트텐서닝 계통 가동중 점검 (5년 주기) - 안전성 관련 구조물 특별점검 (5년 주기)	- ASME Section XI, Subsection IWL - ACI 349.3R	
부 식	○ 텐돈 ○ 텐돈 정착부	- 텐돈 정착부 및 텐돈 가닥 육안 검사 - 텐돈 재료시험 - 그리이스 육안 검사 및 재료 시험	- 격납건물 포스트텐서닝 계통 가동중 점검 (5년 주기)	- ASME Section XI, Subsection IWL	
프리스트레스력 손실	○ 텐돈	- 랜덤 샘플링에 의한 인장력 측정 - 제어 텐돈을 이용한 인장력 추세분석	- 격납건물 포스트텐서닝 계통 가동중 점검 (5년 주기, 동일부지 위치시 10년 주기)	- ASME Section XI, Subsection IWL	