'2000 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

비부착식 격납건물 포스트텐션 계통의 가동중검사 기준 분석

Analysis of In-Service Inspection Guides for Post-Tensioning Systems in Containment Structures with Greased Tendons

배 인 환, 최 인 길, 서 정 문

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

프리스트레스 콘크리트 격납건물(PCC)은 구조건전성을 확보하기 위하여 규제지침서에 따라 정기적인 가동중검사(ISI)를 받는다. 외국의 경우 규제지침은 가동중경험의 증가와 기술의 발전으로 계속 수정, 보완되어져 왔다. 본 논문에서는 미국원자력위원회(NRC)의 규제지침과 ASME 규준을 비교, 검토하고 수집된 일부 국내 가동중검사 자료와 비교하였다. 검토결과, 기존 격납건물을 Reg. Guide 1.35 Rev.3(Reg. Guide 1.35.1)로 평가할 경우 텐돈 허용범위 결정 및 평가에 대한 주의가 요구된다. 상한치를 넘거나 극한강도의 70%를 넘는 텐돈에 대한 평가방법을 개발하는 것이 필요하다. 이론적인 텐돈거동과 상이한 텐돈의 거동을 평가하기 위하여 콘크리트 크리프와 건조수축 등 프리스트레스 손실인자들에 대한 연구가 필요하다. 또한 쉬스내 텐돈부식을 평가하기 위하여 그리스 성능에 미치는 불순물의 장기간 영향에 대한 연구가 요구된다.

Abstract

Prestressed concrete containments(PCC) are inspected periodically to ensure structural integrity and to identify and correct problems before they come critical. These inspections are conducted in accordance with the Nuclear Regulatory Committee(NRC) Regulatory Guide. As experience with the surveillance mounts, the guide is revised to keep pace with technological advances in containment design and to reflect the knowledge obtained experience. In the study, an analysis of the available utility surveillance data and an evaluation of the NRC Regulatory Guide and the ASME Code are conducted. The results indicate that the average value of the lower bound defined in Regulatory Guide 1.35.1 can be less than the minimum required force level at 40 years for the existing containment and thus an acceptable alternative has to be presented to meet the allowance of the guide. Tendons in excess of the upper bound or 70% of the ultimate tensile strength of the tendon are observed. Such an occurrence indicates tendon behavior outside the tolerance band that expected, and the cause of such behavior has to be investigated. It is shown that the behavior of the predicted prestressing force with time based on assumed losses does quite different from that of the measured tendon force with time and, therefore, studies for the significant factors, such as shrinkage and creep of concrete, that influence the time-dependent losses in PCC are needed. Additional research on the long-term effects of the impurity

levels on the effectiveness of the grease seems justified.

1. 서 론

국내에서 운영 중인 원전 격납건물은 대부분 프리스트레스트 콘크리트구조로 되어있으며, 이들 격납건물의 대부분은 그리스와 같은 부식방지재를 쉬스내에 주입하는 비부착식 포스트텐션닝 시스템을 사용하고 있다. 프리스트레스 콘크리트 격납건물은 외부 비산물로부터 원자로계통을 보호하고 냉각재상실사고(loss-of-coolant accident :LOCA)시 방사능 유출을 방지하는 역할을 한다[1]. 이와같은 구조적 기능과 방사능 차폐기능이 구조물의 안전성과 연관되어 있기 때문에, 미연방규제코드(Code of Federal Regulations)에서는 원전 격납건물에 대한 정기적인 검사와 적절한 검사 프로그램의 개발을 요구하고 있다[2].

선진 외국의 경우, 가동중검사 경험이 증가함에 따라 경험으로부터 얻은 지식을 반영하고 규제지침의 해석 및 적용시 모호한 점을 제거하기 위하여 계속적인 규제지침의 보완이 이루어졌다. 미원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Committee, NRC)의 규제지침인 Regulatory Guide 1.35 Rev.1은 1974년에 만들어졌으며 그 이후 Rev.2 는 1976년[3], 그리고 proposed Rev.3는 1979년에 제안되었으며, 1990년에 Rev.3[4]로 개정되었다. 시간에 따른 프리스트레스의 허용범위를 계산하기 위하여 Regulatory Guide 1.35.1이 1990년에 함께 제안되었다[5]. 또한 산업계 규준은 ASME Boiler and Pressure Vessel Code내 Section XI의 형태로 1986년에 출간되었으며, 이후 개정판을 출판하여 1995년 개정판이 출간되었다[6,7].

국내의 경우 가동중검사를 위한 규제지침이 아직 확립되어 있지 않아 외국의 규제지침 및 규준을 준용하고 있는 실정이다. 국내 격납건물의 사용연한과 가동중검사 경험이 증가함에 따라 가동중인 격납건물의 안전성과 건전성을 확보하기 위하여 국내 환경에 적합한 가동중검사 지침의 개발이 필요하다.

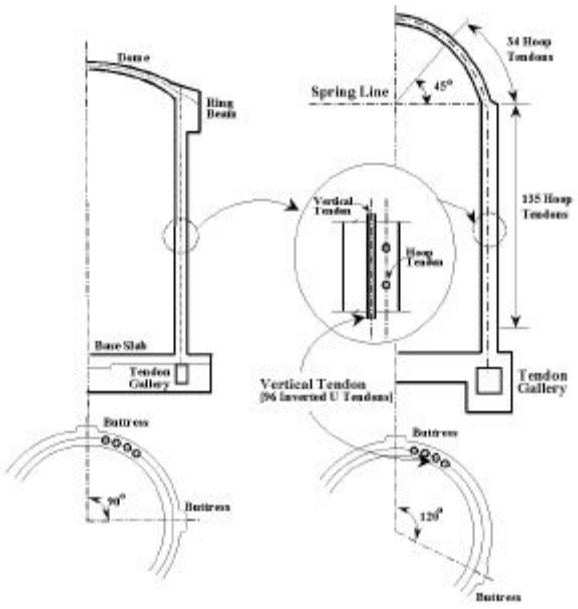
본 논문의 목적은 규제지침 및 관련규준을 비교·검토하고 실측결과와 비교함으로써 국내환경에 적합한 가동중검사 기준을 위한 기초자료를 제공하는 것이다. 가동중검사 규제지침에서는 검사를 위한 텐돈 시료 선정 및 검사주기, 텐돈 인장력 모니터링, 텐돈 재인장 및 신장량 측정, 그리스내 불순물 측정, 육안조사 그리고 스트랜드 재료시험과 각 항목에 대한 허용기준 등이 제시된다. 본 연구에서는 먼저 가동중검사 규제지침과 관련규준을 비교· 검토하고, 국내 가동중검사 보고서 일부를 수집하여 이들 자료를 검토하였다. 적용된 규제지침으로는 Regulatory Guide 1.35의 Rev.2와 Rev.3이며, 관련규준으로는 ASME Section XI의 1989와 1995년 개정판을 적용하였다

2. 규제지침 및 관련규준

2.1 텐돈 선정 및 검사주기

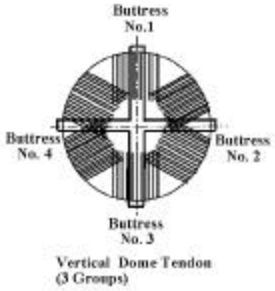
격납건물은 전형적인 형태와 반구형 돔 형태로 분류할 수 있다. 그림 1(a)와 같이 전형적인 격납건물은 지름이 약 46m(150 ft) 벽체 위에 얇은 돔 지붕을 가지며 전체 높이가 약 61m(200 ft) 이다. 돔 텐돈은 그림 2 에서처럼 3개 그룹(60 °) 또는 2개 그룹(90 °)에서 약 200개이며, 벽체의 수직텐돈은 200개 정도이고 벽체의 수평텐돈은 500개 정도이다. 그림 1(b)와 같은 반구형 돔 격납건물은 지름이 약 46m(150 ft) 벽체 위에 반구형 돔 지붕을 가지며 높이가 약 61 73m(200 240ft)이다. 2

개 수직 텐돈그룹(90°)에서는 역 U형 텐돈이 70 96개이며 수평텐돈은 벽체와 돔에서 150 180개이다[8]. 국내에서 현재 운영중인 원전은 16기이며 비부착식 격납건물은 8기로서 모두 반구형돔 형식이다. 검사 주기는 건설 후 수행하는 구조건전성시험(structural integrity test:SIT) 부터 1, 3, 5년 그리고 그 이후에는 공용수명까지 매 5년 마다 수행된다. 검사를 위하여 선정해야할 텐돈 개수를 요약하면 표 1과 같다. Reg. Guide Rev.2에서는 전형적인 형태와 반구형 돔 형태의 격납건물에 따라 텐돈 개수를 결정하였으나, Reg. Guide Rev.3와 ASME에서는 격납건물의 형식에 관계없이 일정하게 선정하도록 하였다. 또한 각 그룹에서 텐돈의 이력을 확보하고 개별 텐돈과의 연관성을 얻기

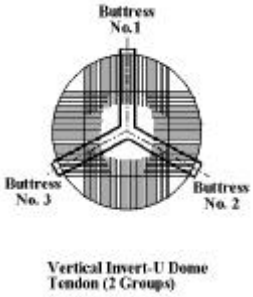


(a) 전형적인 형태 (b) 반구형 돔

그림 1. PSC 격납건물



(a) 60。



(b) 90。

그림 2. 돔 텐돈배치

표 1. 텐돈 시료 선정

항목 / 규준	SIT후 첫 세 번검사 (1, 3 ,5 년)	첫 세번 검사부터 공용수명까지(매 5년검사)
Rev.2	■전형적인 격납건물: - 돔텐돈 : 6개 - 수직텐돈 : 5개 - 수평텐돈 : 10개 ■반구형돔: - 역U형 수직텐돈: 4%(최소 4개) - 수평텐돈 : 4%(최소 9개)	■전형적인 격납건물: - 돔 텐돈 : 3개 - 수직텐돈 : 3개 - 수평텐돈 : 3개 ■반구형돔: - 역U 형수직텐돈: 2% (최소 3개) - 수평텐돈: 2% (최소 3개)
Rev.3 및 ASME	■격납건물의 형식에 무관 (각텐돈그룹) -4%(최소4개,최대10개)	- 2% (최소 3개, 최대 5개)

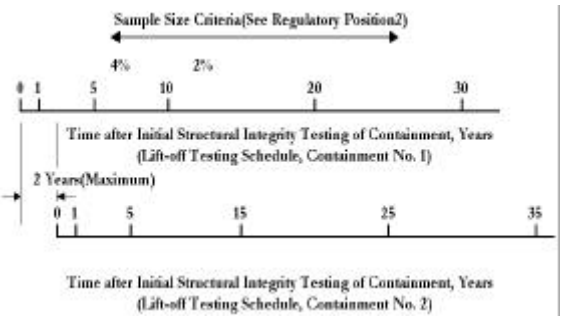


그림 3. 동일부지내 2기에 대한 검사주기

위하여 하나의 텐돈을 선정하여 공용수명동안 기본 텐돈(control tendon)으로 사용한 다. 동일 부지 내에 2개 호기가 있는 경우, Rev.2에서는 1호기에 대해서만 1, 3, 5년 그리고 그 이후에는 매 5년 주기로 유효응력을 측정하고, 2호기는 육안검사만 시행하도록 하였으나, Rev. 3 및 ASME 규준에서는 그림 3과 같이 두 호기의 텐돈력을 모두 측정하도록 하였다.

2.2 텐돈 인장력 모니터링

텐돈의 유효 인장력은 유압장치로 텐돈을 긴장시켜 그림 4의 정착장치에서 심(shim)이 떨어질 때의 인장력(lift-off력)으로서 feeler gage를 사용하여 측정한다. Reg. Guide Rev.2에서는 lift-off력이 허용범위 이내에 들도록 규정하고 있으나, 구체적인 허용범위는 제시하지 않았다. Reg. Guide Rev.3

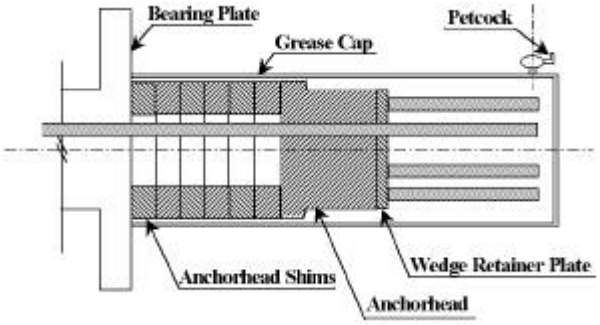


그림 4. 탈인장 텐돈의 정착시스템

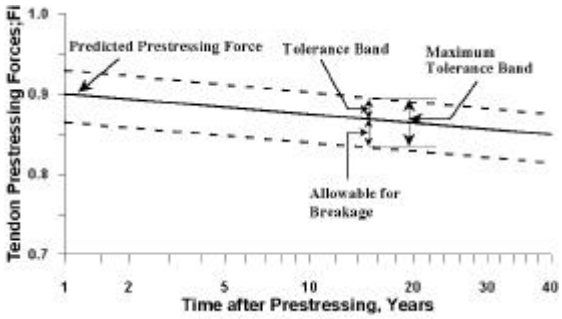


그림 5. Reg. Guide 1.35.1에 따른 텐돈의 허용범위

표. 2 관련기준에 따른 lift-off 력의 허용조건 및 기록조건

조건 / 지침	허용조건 및 기록조건
Rev. 2	■ 허용조건: Lift-off 력이 허용범위 이내 ■ 기록조건: 오직 한 텐돈의 liff-off 력 만이 예측치 이하인 경우, 인접한 두 텐돈을 추가로 측정. 이중 하나의 텐돈력이 예측치 이하
Rev.3 및 ASME	■ 허용조건 : 1. Lift-off 력이 하한치의 95% 이상 (7.1.2) 2. 임의 lift-off 력이 하한치의 90 95%인 경우, 인접한 두 텐돈을 추가로 측정. 두 텐돈의 lift-off 력이 하한치의 95% 이상 (7.1.2) (필요 수준까지 3개의 텐돈을 재인장) ■ 기록조건: 1. Lift-off 력이 하한치의 90% 이하 (7.1.4) 2. 위의 2에서, 인접한 두 텐돈의 lift-off 력이 하한치의 95% 이하 (7.1.3) (추가로 lift-off 실험을 실시하여 원인규명) 3. 각 그룹에서 측정된 텐돈의 평균치가 tech. spec. 에 따른 정착부에서의 최소 프리스트레스력 이하인 경우 (7.1.5) 4. 동일 텐돈이나 임의 텐돈의 손실량이 예측치보다 커서 다음 주기 검사 전에 그 그룹의 최소 프리스트레스력 보다 작게 될 경우. (추가로 lift-off 실험을 실시하여 원인규명) (7.1.6)

의 주요사항은 텐돈의 유효인장력 및 허용범위에 대한 결정방법(Reg. Guide 1.35.1)을 제안한 것과 lift-off력의 평가기준을 수정한 것이다. 각 기준에 따른 텐돈의 허용조건 및 기록조건은 표 2와 같다. Reg. Guide 1.35.1는 그림 5와 같이 텐돈의 즉시 손실량과 콘크리트 크리프, 건조수축 및 텐돈 이완으로 인해 수명 40년까지 감소하는 텐돈 인장력과 허용범위를 제안하였다. 그림 5의 F_i는 유효긴장력이다. Reg. Guide Rev.2에서는 오직 개별 텐돈력만을 평가하였으나, Reg. Guide Rev.3 와 ASME 규준은 개별 텐돈력과 평균 텐돈력을 모두 고려하여 격납건물의 안전성을 평가하도록 규정하였다.

2.3 재인장 및 신장량

가동중검사시 lift-off실험을 위하여 탈인장한 텐돈은 원래의 긴장력까지 재인장되어야 한다. Reg. Guide Rev. 2와 Rev. 3의 재인장 규정은 거의 유사하며 재인장력의 상한치에 대한 규정은 없으나, ASME 규준에서는 텐돈 극한응력(F_{pu})의 70%를 초과하지 않도록 재인장력을 제한하였다. 신장량에 대한 Reg. Guide 1.35 Rev.3 및 ASME의 규정은 동일하다. 재인장시 마찰효과, 장비조정, 측정절차 및 계측장비 등에 기인하여 발생하는 신장량과 건설초기에 기록된 신장량과의 차이는 10% 이내인 경우에 허용된다. 10%이상 차이가 발생하였을 경우 그 원인이 스트랜드의 파단이나 미끄러짐에 의한 것인지를 조사해야 한다.

2.4 충진재 검사

Reg. Guide Rev.2는 텐돈 정착단부에서 채취한 그리스를 건설시 주입한 초기 그리스 성분과 비교한다. 그리스는 ASME 규준에 따라 분석되며, 수용성 염화물과 질산염 등 불순물은 각각 10ppm 이하로 제한하였다. Reg. Guide Rev.3와 ASME Section XI에서는 표 3과 같이 Reg. Guide Rev.2에 비해 수분함유, 염기수 및 자유수 존재에 대한 항목이 더해졌다. 허용기준을 넘는 경우는 기록되어야 한다.

또한 Rev. 3는 그리스누출에 대한 규정을 신설하여 덕트내 그리스 되채움량과 제거량의 차이가 덕트 순체적의 5%이상이면 기록조건이다. ASME(1989) 규준에서는 그리스의 되채움량에 대한 규정이 없었으나 1992년에 되채움량에 대한 혀용조건을 덕트 순체적의 10%이하로 신설하여 Rev.3보다 완화된 규정을 제안하였다.

표 3. 부식방지재료의 허용범위

기준	점검항목	실험방법	기록조건
Rev. 3	수분함유량	ASTM D 95	중량비로 10 % 이상
	수용성 염화물	ASTM D 512	10 ppm 이상
	수용성 질산염	ASTM D 992	10 ppm 이상
	수용성 황산염	APHA 427	10 ppm 이상
	잔존 알카리성 (염기수)	ASTM D 974	· 총 염기수가 5이하 · 초기 총 염기수의 50% 이하
	되채움량/제거량	-	덕트 순체적의 5% 이상

3. 검토 및 분석

3.1 텐돈 선정 및 검사주기

그리스로 채워진 쉬스관 내에서의 PC텐돈의 부식확률은 극히 낮기 때문에 텐돈부식에 대한 관점에서는 규제지침의 처음 세 번의 검사시 4%와 그 이후 2%의 텐돈 선정은 많은 것이나[9], 격납건물이 설계에 따라 적절하게 시공되었는지 또는 시간의 경과에 따라 텐돈이 예측한대로 거동하는지를 확인하기 위한 텐돈의 구조적 기능의 관점에서는 적절한 것으로 판단된다[14].

3.2 텐돈 인장력 모니터링

3.2.1 규제지침의 적용범위

개별 텐돈력을 평가하기 위한 규제지침 Reg. Guide Rev.3는 이 기준이 적용된 1990년 8월 이후 시공 및 설계된 격납건물에 적용되므로 국내의 영광 5, 6호기(93.12)와 울진 5, 6호기(94.12) 이외의 격납건물에 이 규준의 모든 규정을 적용하기 위해서는 특별한 주의가 필요하다. 기존 격납건물의 텐돈력을 Reg. Guide 1.35.1로 평가할 경우, 시간에 따른 손실량이 증가하여 수명 40년에서 임의 텐돈 그룹의 하한치의 평균값이 설계시 요구되는 최소 프리스트레스력보다 작게 될 수 있다. 이는 손실인자의 적용차이와 단기간의 크리프 시험결과를 근거로 가정한 분산이 큰 장기 크리프 계수 적용 등에 기인한다. 1979년에 설계 시공되고 Reg. Guide 1.35 Rev.3(Reg. Guide 1.35.1 Rev.0)를 사용하여 텐돈의 허용범위를 결정한 가동중검사 계획서를 검토한 결과, 그림 6 및 7과 같이 수직 및 수평텐돈의 설계수명 40년에서 예측한 프리스트레스력(실선)은 설계 값을 만족하지만, 하한치값(점선)이 설계 프리스트레스력 보다 작게 나타났다. 이와같이 기존 격납건물을 이 규제지침으로 평가할 때 허용조건을 만족하지 못하는 경우가 발생하므로, 텐돈의 긴장력 허용범위 결정을 포함한 수정된 가동중검사 계획서를 작성하여 적용해야 한다[14].

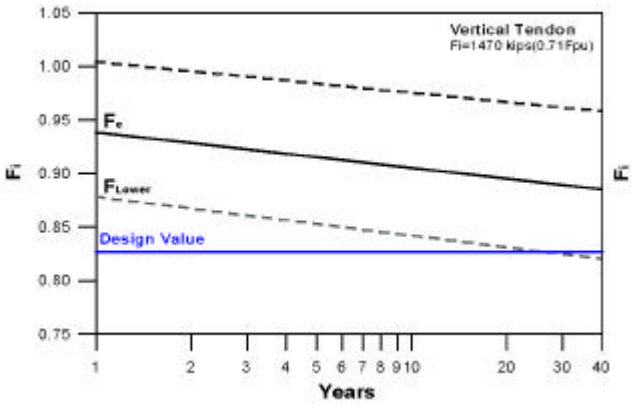


그림 6. 설계수명동안의 수직텐돈의 허용범위

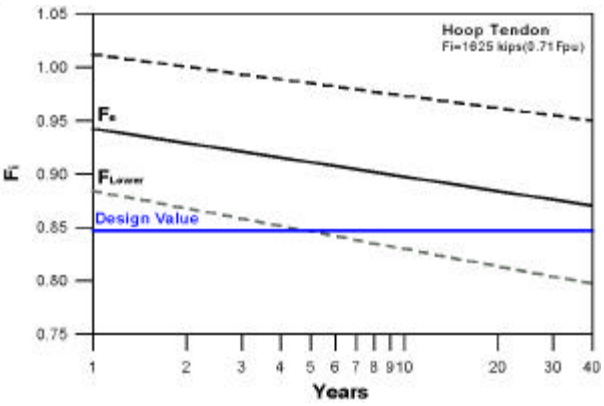


그림 7. 설계수명동안의 수평텐돈의 허용범위

3.2.2 개별 텐돈력

측정된 개별 텐돈력은 Reg. Guide 1.35.1의 허용범위와 비교함으로써 시간에 따른 텐돈의 비정상적인 성능저하 여부를 결정하게 된다. 여기서 텐돈의 비정상적인 성능저하는 임의 시점에서 측정

된 lift-off력이 기준에 따라 예측된 텐돈력의 허용범위인 상한치와 하한치(그림. 4)를 벗어나는 것으로 정의한다. 수집된 일부 국내의 가동중검사 자료를 검토한 결과, lift-off력이 평균 정착력인 극한강도의 70%를 넘는 경우가 발견되었다. 이와 같은 경우 구조적 안전성에는 문제가 없으나 상한치 또는 극한강도의 70%를 넘는 텐돈은 예상대로 거동하고 있지 않음을 나타내는 것이다. 따라서 적절한 평가방법을 적용하여 그 원인이 구조물내의 과도한 응력발생에 의한 것인지, lift-off 력 측정 또는 손실량 계산시 오류인지를 조사할 필요가 있다.

3.2.3 평균 텐돈력

NRC 규제지침 및 ASME 규준에 따르면 가동중검사시 수직, 수평 및 돔의 각 그룹에서 측정된 평균 lift-off력과 수명 40년에서 하한치의 평균값이 설계시 가정한 최소 프리스트레스력보다 커야 한다. 이 규정은 가동중검사 시점과 설계수명동안 대상 격납건물이 설계 최대 하중에 안전하게 저항하고 있는지를 확인하기 위한 것이다. 만일 이와 같은 조건이 만족되지 않으면 그 그룹의 모든 텐돈 시스템을 조사하여 그 원인을 밝혀야 한다. 규제지침의 적용범위에서 검토한 것과 같이 기존 격납건물을 Reg. Guide 1.35.1에 따라 손실량을 계산할 경우 40년 시점에서 각 그룹에서 하한치의 평균 인장력이 최소 프리스트레스 력보다 작게 될 수 있으므로 이에 대한 검토가 요구된다.

3.2.4 시간에 따른 텐돈의 거동

Reg. Guide 1.35.1에서는 콘크리트의 크리프와 건조수축, 텐돈의 이완 등에 의하여 프리스트레스력이 시간이 지남에 따라 log 좌표에서 선형적으로 저하된다고 가정하였다(그림 5). 국내 일부 가동중검사 자료를 근거로 격납건물내 텐돈의 거동을 살펴보면 그림 8 및 그림 9와 같다. 그림 8과 그림 9는 역 U형 수직 및 수평 그룹내 기본텐돈의 시간에 따른 lift-off력의 추이를 나타낸 것이다. 일반적으로 텐돈은 0.67 F_{pu} 0.73 F_{pu} 범위내에서 정착된다. 그림 8에서 보는 바와 같이 수직 기본텐돈은 시간이 지남에 따라 긴장력은 저하되지 않는 경향을 보이고 있으며, 특히 정착단 B의 유효 긴장력 F_B는 평균 정착력인 0.7 F_{pu}를 넘는 것으로 나타났다. 반면 F_A는 대체로 적절하나 규제지침과 다른 손실 거동을 보였다. 그림 9의 수평그룹에서 buttress 2는 즉시손실이후 미소하게 감소하는 것으로 나타났으나, buttress 3에서는 손실이 발생하지 않았으며 5년째 가동중검사에서부터 오히려 증가하였다. 각 그룹에서 F_A와 buttress 2는 시간에 따라 대체로 예상된 거동을 보이고

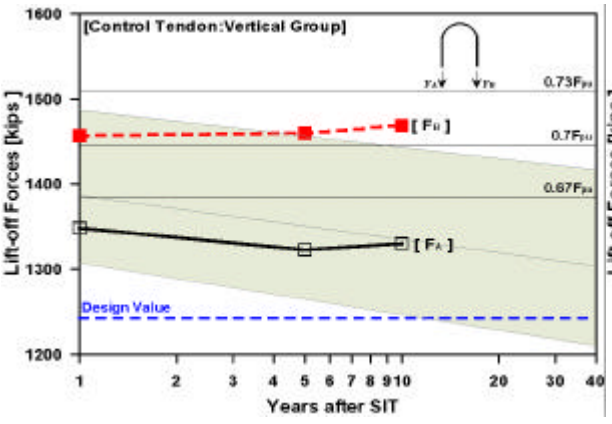


그림 8. 수직텐돈의 유효 프리스트레스력

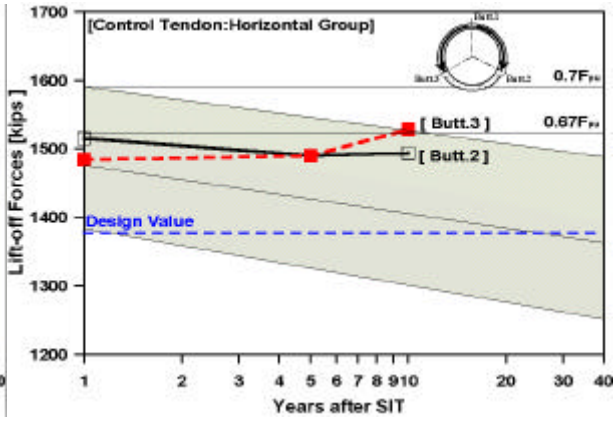


그림 9. 수평텐돈의 유효 프리스트레스력

있으나, Reg. Guide 1.35.1에 따른 예측치보다 훨씬 적은 손실량을 보여주고 있는데, 이같은 경향은 외국의 다른 가동중검사 결과에서도 유사하게 관찰되었다[10]. 이것은 Reg. Guide 1.35.1이 시간에 따른 텐돈의 긴장력 손실을 실제보다 과다하게 평가하고 있다는 것을 보여주는 것이며, 손실인자에 대한 검토가 요구된다[14].

일반적으로 텐돈 양단 정착부에서의 초기 긴장력은 내부마찰로 인해 차이가 발생하며, 그 차이는 시간에 따라 일정하게 된다. 그림 8에서 양단의 유효긴장력 F_A와 F_B의 차이는 시간에 따라 다소 증가하였다. 수집한 일부 가동중검사 자료로부터 도입된 정착부 양단의 정착력의 차이는 평균 2.7%이며, 최대 8%로서 ASME의 정착범위(평균 4.1%, 최대 8.2%)내에 드나 그림 8의 F_A와 F_B의 차이는 9.5%로서 다소 크게 나타났다.

3.3 재인장 및 신장량

NRC 규제지침에서는 재인장력의 상한치를 규정하고있지 않으나, ASTM 규준에서는 재인장시 정착력을 극한강도의 70%이하로 제한함으로써 과응력 발생을 방지하고 최초 텐돈의 평균 정착력 ($0.7F_{pu}$)을 초과하지 못하도록 하였다.

규제지침의 신장량에 대한 항목은 정착부의 미끄러짐이나 스트랜드의 파단을 찾기 위한 것이다. 외국의 경우 가동중검사시 텐돈의 하중-신장량 관계를 얻기 위하여 적용되는 하중을 $0.7F_{pu}$, lift-off 력 또는 $0.8F_{pu}$ 등으로 각각 다르게 적용하고 있다. 국내의 경우에는 건설시 jacking력인 0.8 F_{pu}을 적용하고 있으며, 이 하중을 100%로 하여 80% 하중(100%-20%)에서의 신장량의 차이를 규제지침의 허용 신장량과 비교하고 있다. 그러나 하중-신장량 관계를 얻기 위하여 적용되는 $0.8F_{pu}$는 다소 큰 하중이다. 텐돈이 $0.7F_{pu}$ $0.8F_{pu}$ 정도까지 선형거동 하는 재료특성과 정착단 콘크리트의 열화 등을 고려할 때, $0.8F_{pu}$대신 lift-off력을 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

또한 규제지침에서는 가동중검사시 측정한 텐돈신장량을 건설 초기 신장량과 비교하도록 하였으나, 가동중검사시 측정한 텐돈 양쪽 정착단에서의 하중-신장량 관계로부터 텐돈의 이상유무를 판단할 수 있다. 가동중검사시 동일 텐돈 양단에서의 하중-신장량 관계를 살펴보면 그림 10 및 그림 11과 같다. 동일 텐돈이라도 내부 마찰저항의 차이, 스트랜드의 미끄러짐 이나 정착부의 slip 등으

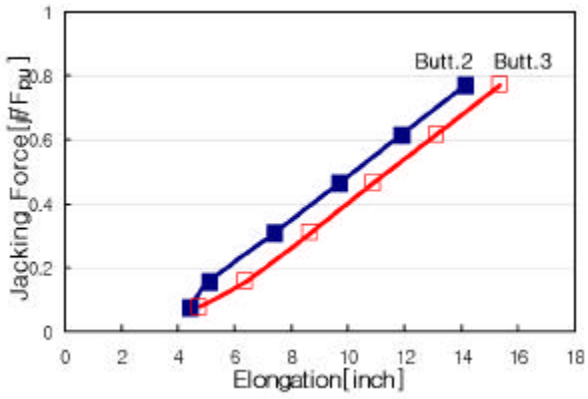


그림 10. 수평텐돈의 하중-신장량 관계

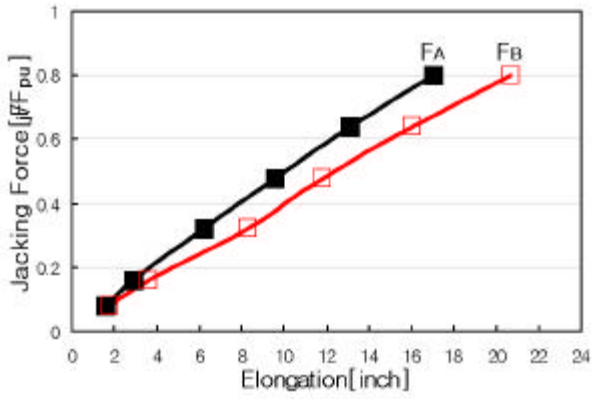


그림 11. 수직텐돈의 하중-신장량 관계

로 인하여 양단에서의 하중-신장량 관계가 옆으로 이동하는 현상을 보인다. 그림 10은 수평텐돈의 하중-신장량 관계이며, 80%하중에서의 신장량의 상대적인 차이는 0.3%로서 스트랜드내에 이상이 발견되지 않았으나, 수직텐돈인 그림 11의 80%하중에서의 신장량의 차이는 17.5%로서 크게 나타났다. 이것은 초기 하중수준에서 정착부의 미끄러짐과 스트랜드의 파단에 기인하는 것으로서 이에 대한 조사가 요구되는 결과이다. 국내 수집된 가동중검사 자료로부터 임의 시점에서 측정된 신장량과 건설시 기록된 신장량의 차이는 5% 이내로서 Reg. Guide 1.35.1(1990)에서 제안한 신장량의 제한치인 5% 수준으로 나타났다. NRC 규제지침과 ASME 규준의 허용오차 10%는 다소 넓은 범위로서 이에 대한 검토가 요구된다.

3.4 충진재 검사

그리스의 가장 큰 역할은 알카리성을 유지함으로써 텐돈의 부식을 방지하는 것이다. 수집된 일부 국내 가동중검사 자료로부터, 염기수는 충분히 확보되어 알카리성을 유지하고 있었으며, 수용성 염화물, 질산염 및 황산염 등이 0.15ppm 정도로서 허용기준인 10ppm 이하였다. 또한 그리스내 수분은 검출되지 않았다. 그리스의 상태가 양호하였으며 텐돈의 심각한 부식은 보고되지 않아 그리스가 텐돈을 효과적으로 보호하고 있는 것으로 나타났다. 외국에서 수행한 그리스성분에 대한 자료[9]에서도 조사항목의 불순물들이 2ppm 이하이며 수분함유량이 1%정도로서 규제지침의 허용치보다 적게 나타났으나, 덕트내에 알카리성이 유지되는 조건에서 10ppm의 불순물과 10%의 수분에 장기간 노출된 스트랜드가 부식할 확률에 대한 신뢰성 있는 자료는 아직까지 부족한 실정이다. 따라서 그리스내에 존재하는 불순물의 양에 따라서 텐돈의 부식을 정량적으로 추정하는 것은 어려우며 이에 대한 연구가 필요하다.

4. 결 론

비부착식 격납건물의 가동중검사 절차서 및 경험을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

이전 규제지침에 따라 설계된 기존 격납건물에 이 규제지침을 적용할 경우에는 설계수명 40년에서 텐돈의 인장력 하한치가 최소프리스트레스력보다 작게 될 수 있으므로, Regulatory Guide 1.35 Rev.3는 Regulatory Guide 1.35.1의 허용조건에 따라 설계된 격납건물에만 적용하도록 그 적용범위를 제한할 필요가 있다. 따라서 Reg. Guide 1.35 Rev.3(Reg. Guide 1.35.1)를 적용하여 기존 격납건물의 가동중검사를 계획할 때, 설계수명에서 허용조건을 만족시키도록 텐돈의 허용범위 결정에 대한 수정된 가동중검사 계획을 작성하여, 그에 따라 추후 가동중검사가 수행되어야 한다.

텐돈력이 극한강도의 70% 또는 상한치를 넘는 경우, 그 원인이 구조물내 과도한 응력발생이나 측정오류에 기인하는지를 적절한 평가기법을 사용하여 조사할 필요가 있다.

개별텐돈의 유효인장력 범위를 결정하기 위한 Reg. Guide 1.35.1은 시간에 따른 손실량을 실제보다 과다하게 평가하고 있는 것으로 나타났으며, 실제 격납건물의 텐돈거동을 예측하기 위하여 콘크리트의 건조수축, 크리프 등 긴장력 손실인자들에 대한 연구가 요망된다.

국내·외 가동중검사 경험으로부터 부식방지재인 그리스는 알카리성을 유지하고 있었으며, 불순물 역시 허용범위 이하로 나타나 그리스가 텐돈을 효과적으로 보호하고 있는 것으로 나타났다. 그

러나 아직까지 그리스의 염기수와 그리스내 불순물의 양에 따라 텐돈의 부식을 정량적으로 추정하기 위한 자료가 부족하기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Dougan,J.R,"Structural Model Testing for Prestressed Concrete Pressure Vessels:A Study of Grouted vs Nongrouted Posttensioned Prestressing Tendon Systems," ORNL/TM-6478, 1979
2. Sammataro, R.F., "Inservice Requirements for Containments in the United States," Int'l conference on containment design and operation. Toronto, Canada, Oct. 1990, pp.14 17
3. U.S.Nuclear Regulatory Commission, "Inservice Inspection of Ungrouted Tendons in Prestressed Concrete Containment Structures," Regulatory Guide 1.35 Rev.2, 1976
4. U.S.Nuclear Regulatory Commission, "Inservice Inspection of Ungrouted Tendons in Prestressed Concrete Containment Structures," Regulatory Guide 1.35 Rev.3, 1990
5. U.S.Nuclear Regulatory Commission, "Determining Prestressing Forces for Inspection of Prestressed Concrete Containments," Regulatory Guide 1.35.1, 1990
6. American Society of Mechanical Engineers, "Rules for Inservice of Nuclear Power Plant components," Section XI, Subsection IWX, 1989
7. American Society of Mechanical Engineers, "Rules for Inservice of Nuclear Power Plant components," Section XI, Subsection IWX, 1992 & 1995
8. Ashar,H.,& Naus,D.J.,"Overview of the Use of Prestressed Concrete in U.S. Nuclear Power Plants," Oak Ridge National Lab., TN,1983
9. Dougan,J.R,"Evaluation of Inservice Inspections of Greased Prestressing Tendons, "ORNL/TM-8278, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, Sep., 1982
10. Yuko Watanabe, Asao Kato, Ikuro Kawai, Tsuneo Yamauchi and Mikro Yamam, "Results of the 10th year PCCV ISI at Tsuruga Unit No.2", Transanctions of the 15th Int'l Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT- 15), Seoul, Korea, Aug. 15-20, pp. VI-211 VI-217
11. Americam Concrete Institute,"Building Code Requirements for Reinforced Concrete,"ACI 318-95, Section 18.18.1, 1996
12. 한국전력공사,"영광원자력1호기 격납건물 포스트텐션닝 시스템 5년차 가동중검사," 1991. 3
13. 한국전력공사,"고리원자력3호기 격납건물 Post-Tensioning System 10년차 가동중검사,"1994.12
14. 한국원자력연구소,"격납건물 가동중검사 절차서 분석",KAERI/TR-1504/2000