

원자로 격납구조 콘크리트의 역학적 특성에 관한 고찰

정원섭, 권기주, 조명석, 송영철
전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

프리스트레스트(PS) 콘크리트 구조로 설계된 원자로 격납구조는 콘크리트의 역학적 특성으로 인해 프리스트레스트의 시간종속성 손실을 야기하며 격납구조의 설계, 시공 및 가동중 검사시에 이들을 고려함은 구조물의 안전성 확보에 매우 중요한 요소로 작용한다. 본 논문은 영광원자력 5, 6 호기 원자로 격납구조 콘크리트의 역학적 특성에 관한 고찰이다.

본 논문에서는 콘크리트의 역학적 특성을 규명하기 위해 5종 시멘트로 제작된 대상 콘크리트에 대해 ASTM 규정에 따라 압축강도, 탄성계수, 포아슨비 및 크리프 시험을 수행하였다. 또한 프리스트레스트의 시간종속성 손실을 가장 크게 유발시키는 역학적 특성 중 크리프에 대한 적용성 평가를 위해 측정치와 KSCE (건교부제정 콘크리트 표준시방서) JSCE (일본 콘크리트 표준시방서), Hansen 모델, ACI 모델 및 CEB-FIP(1990) 모델을 비교 제시함으로써 프리스트레스트 콘크리트 구조물에서의 시간에 따른 응력 손실을 고려한 유효 프리스트레스트 응력 산정 및 구조물의 건전성 평가에 도움을 주고자 하였다.

Abstract

Reactor containment structure of nuclear power plant designed by prestressed concrete causes time-dependent prestress loss due to the mechanical characteristics of concrete. Prestress loss strongly affects to the safety factor of structure under the circumstances of designing, construction and inspection. Thus, this study is to investigate the mechanical characteristics of reactor containment concrete structure of Yonggwang #5 and 6.

In this study, the compressive strength, modulus of elasticity, poisson's ratio and creep test followed by ASTM code are performed to investigate the mechanical characteristics of concrete made by V type cement. Additionally, since creep causes more time-dependent prestress loss than the other, the measurement value from the creep test is compared with the results from the creep prediction equations by KSCE, JSCE, Hansen, ACI and CEB-FIP model for the effective application.

Hereafter, the results of this study may enable to assist the calculation effective stress considering time-dependent prestress loss of the prestressed concrete structures.

1. 서 론

원자로 격납구조 대부분이 콘크리트 구조물에 긴장력을 도입한 프리스트레스트 콘크리트 구조물이다. 프리스트레스트 콘크리트의 역학적 특성에서 응력과 변형율은 장기간에 걸쳐 콘크리트 크리프와 건조수축 및 PS 강재에 리락세이션(relaxation)이 발생함에 따라 프리스트레스를 감소시키는 원인이 된다. 특히 역학적 특성 중 크리프는 그 복잡한 시간 의존성으로 인해 이 분야에 대한 연구가 계속되고 있으며 시험 및 경험에 의한 추정이 일반적이다. 프리스트레스트 콘크리트 구조로 설계된 원자로 격납구조는 설계시 콘크리트의 역학적 특성값들을 관련 코드 등으로부터 가정값을 설계에 반영하여 프리스트레스의 손실율을 결정하게 된다. 이렇게 반영된 가정값은 실제적인 콘크리트의 역학적 특성을 충분히 반영하였다고 볼 수는 없으므로 시공시에는 설계에 반영된 가정값과 측정값을 비교 분석하여 가정값이 허용범위를 벗어날 경우 구조해석을 통한 PS 강재의 재 긴장 작업을 하며, 가동중의 건전성 평가에도 역학적 특성을 반영한다. 따라서 시험을 통해 올바른 콘크리트의 역학적 특성을 평가하는 과정이 반드시 필요하다.

이에 본 논문에서는 원자로 격납구조 콘크리트의 역학적 특성을 규명하기 위해 5종 시멘트로 제작된 대상 콘크리트의 재령 7일, 28일, 90일, 180일, 365일차의 압축강도, 탄성계수 및 포아슨비를 측정하였으며, 크리프 시험은 재령 28일, 90일, 180일, 365일차에 대해 수행하였다. 또한 한국과 일본의 콘크리트 표준시방서의 크리프 예측모델을 비롯한 기존의 여러 크리프 예측모델에 의한 결과와 실험 결과를 비교, 분석하여 크리프 예측모델들의 적용 가능성을 검토하였다.

2. 콘리트의 역학적 특성 시험 방법

원자로 격납구조 콘크리트의 역학적 특성을 규명하기 위해 5종 시멘트를 사용하여 시공된 원자로 격납구조 콘크리트에 대해 시험을 수행하였다.

(1) 콘크리트의 배합비 및 압축강도

원자로 격납구조 건설에 사용된 콘크리트의 설계기준강도는 5500psi이며 배합표는 표 1과 같다. 압축강도의 재령은 7일, 28일, 91일, 180일, 365일로 3개씩의 표준 공시체($\phi 15 \times 30\text{cm}$)를 사용하여 측정하였다.

<표 1> 콘크리트 배합설계표

(lbs system : 1 cubic yard)

Max. Aggregate Size (inch)	W/C (%)	S/A (%)	Quantities (lbs)				Admixtures (oz)	
			W	C	S	G	WRA	AEA
3/4	44.4	44	285	642	1268	1621	61.6	0.26

(2) 탄성계수 및 포아슨비

구조재료인 콘크리트는 강도뿐 아니라 변형 특성을 예측하는 것이 매우 중요한 요소이며, 이러한 변형 특성을 평가하는데 필요한 물리량의 하나가 탄성계수 및 포아슨비이다. 즉 탄성계수 및 포아슨비를 알면 재료의 변형 특성을 예측할 수 있는데, 계측된 탄성계수는 원자로 격납구조 프리스트레싱 시스템의 변형 및 손실 예측에 매우 중요한 요소가 될 것이다. 일반적으로 탄성계수는 콘크리트 응력변형률도 상의 기울기로 정의되며, 소성재료인 콘크리트는 응력이 변형률에 비례하지 않으므로 응력변형률도의 원점과 극한강도의 약 40% 지점을 연결한 경사의 기울기인 할선탄성계수로 구하여 진다. 따라서 대상 콘크리트의 탄성계수 E와 포아슨비 μ 의 측정을 위해 측정 시편으로 각 재령별로 3개씩의 표준 공시체($\Phi 15 \times 30\text{cm}$)가 제작되었으며, 세로방향 변형률을 측정하는 Compressometer와 가로방향 변형률을 측정하는 Extensometer를 사용하여 ASTM C 469에 의해 세로방향 변형률이 0.00005배의 하중과 극한하중의 40% 하중에 대한 변형률을 측정, 아래식에 의해 탄성계수와 포아슨비를 결정하였다.

$$\text{탄성계수} : E = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\epsilon_2 - 0.00005)$$

$$\text{포아슨비} : \mu = (\epsilon_{h2} - \epsilon_{h1}) / (\epsilon_2 - 0.00005)$$

여기서, σ_1 = 세로 변형률 0.00005에 대한 응력 (kg/cm^2)

σ_2 = 극한하중의 40% 하중에 대한 응력 (kg/cm^2)

ϵ_2 = 응력 σ_2 로 생긴 세로방향 변형률

ϵ_{h1} = 응력 σ_1 로 공시체의 중앙에 생긴 가로방향 변형률

ϵ_{h2} = 응력 σ_2 로 공시체의 중앙에 생긴 가로방향 변형률

(3) 크리프

콘크리트가 일정한 지속응력하에서 재령의 변화에 따라 일으키는 소성변형을 크리프라 하며, 크리프 시험은 시간에 따른 하중과 압축변형률의 관계를 측정하는 것으로서 일반적으로 크리프는 콘크리트 압축강도의 0~40% 까지는 응력에 비례하며, 최초 하중 재하 조건에 따라 그 특성이 결정된다. 측정은 ASTM C512 규정에 따라 각 재령별로 표준 공시체($\Phi 15 \times 30\text{cm}$)를 5개씩 제작하여 습윤양생실에서 7일간 양생을 하였다. 양생 후 공시체의 표면 수분을 닦은 후 자체 흡수하고 있는 수분 증발을 막기 위해 겉 표면을 파라핀으로 도포하여 크리프 시험실에 각 시험 재령까지 보관 후 시험을 수행하였으며, 시험기간은 각 재령별 1년으로 하였다. 이중 2개의 공시체는 하중을 재하하여 총 변형률을 구하였고 나머지 2개는 하중 이외의 건조수축 변형률을 구하기 위하여 이용되었다.

각 표준 공시체는 크리프 시험이 완료될 때까지 온도 $23.0 \pm 2^\circ\text{C}$, 상대습도 $50 \pm 4\%$ 를 유지하였다. 크리프 재하 하중(Sustained Load)은 설계기준강도의 30%를 설정하였으며, 변형 측정은 재하 직전, 직후 및 2 ~ 6시간 후, 그리고 처음 1주일간은 매일, 처음 1개월간은 매주, 1년까지는 매달 주기로 측정하였다.

총 변형률은 초기 탄성변형률과 건조 수축 변형률 및 크리프 변형률의 합이므로 측정된 총 변형률에서 재하직후의 초기 탄성변형률과 건조수축 변형률을 제하여 크리프 변형률을 구하였다. 또한 임의의 재하 재령에서 단위 응력에 대한 크리프 변형률(비크리프 : Specific Creep)을 구하여 예측모델과 비교, 분석하였다.

3. 시험 결과 분석

(1) 압축강도, 탄성계수 및 포아슨비

측정된 압축강도, 탄성계수 및 포아슨비의 평균값을 표 2로 나타내었다. 표 2에서와 같이 압축강도는 재령에 따라 증가하여 28일 후에 5,600psi에 도달하였고 90일 압축강도는 6,700psi로서 설계기준 강도인 5,500psi보다 상회하는 안정된 값을 나타내고 있다. 탄성계수 또한 콘크리트 표준시방서에서 제안하고 있는 탄성계수 실험식 값과 비교 검토한 결과 모두 유사하게 일치함을 알 수 있었다. 포아슨비는 상대적으로 시간의 경과와 관계없이 일정한 값을 나타내고 있으며, 기준값 0.17를 크게 초과하는 것으로 나타났다.

<표 2> 압축강도, 탄성계수 및 포아슨비

Curing Ages (days)	7	28	90	180	365
Compressive Strength (psi)	3,100	5,600	6,700	7,700	7,800
Modulus of Elasticity (psi)	3,244,000	3,653,000	4,233,000	4,444,000	4,632,000
Poisson's Ratio	0.20	0.21	0.22	0.22	0.21

(2) 크리프

각 재령별 측정결과는 표 3과 같이 총 변형율은 건조수축, 크리프 변형율, 초기 탄성변형율의 합으로서 이중에서 크리프 변형율이 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 또한 크리프 계수에서 알 수 있듯이 크리프 변형율이 초기 탄성변형율의 1 배 이상으로 나타났으며, 재령이 클수록 작은 값을 보여 주었다. 재령별 크리프 계수 측정결과는 그림 1과 같다. 표 3과 같이 총 변형율, 건조수축 및 크리프 변형율은 콘크리트의 환경에 따라 큰 차이를 나타내고 있다.

<표 3> 크리프 계수 측정결과

Curing Ages (days)	Drying Shrinkage ($\times 10^{-6}$)	Creep Strain ($\times 10^{-6}$)	Instantaneous Strain ($\times 10^{-6}$)	Total Strain ($\times 10^{-6}$)	Creep Coefficient
	A	B	C	D=A+B+C	E=B/C
28	573	1849	453	2875	4.08
90	271	1174	448	1893	2.62
180	153	793	416	1362	1.90
365	23	435	374	850	1.16

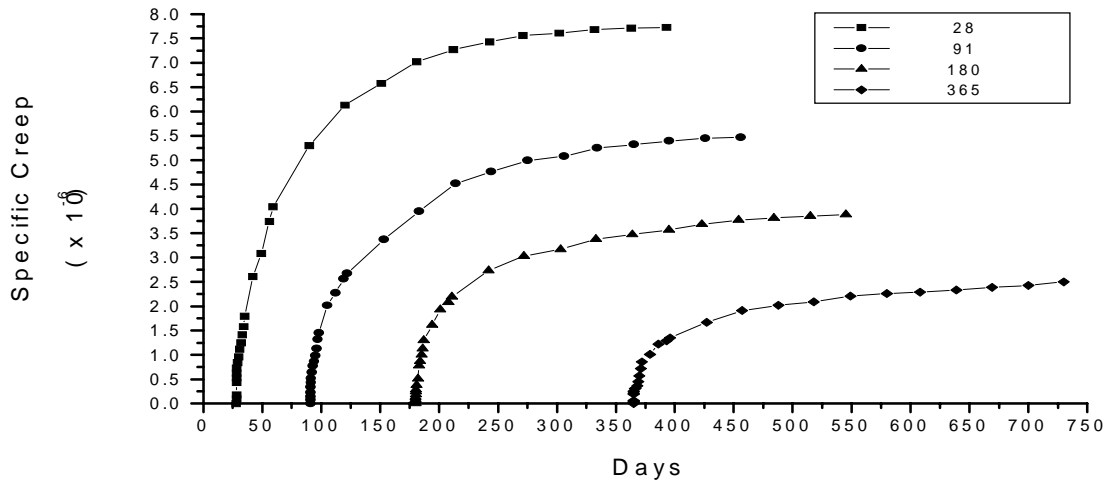


그림 1. 크리프 실험 결과

4. 예측모델에 의한 크리프 비교 분석

원자로 격납구조의 역학적 특성인 크리프는 원자로 격납구조 프리스트레싱 시스템의 손실량 산정시 구조물의 안전성에 직접적인 관계가 있으므로 구조 해석시 정확한 예측모델을 적용하여 크리프의 특성을 반영하는 것은 매우 중요하다. 따라서 시공시 시험 결과에 의한 구조물의 크리프 특성을 검증하는 과정이 반드시 필요하다. 크리프는 콘크리트의 거동이 매우 복잡하고 초기조건 및 환경변화에 따라 매우 다양한 양상을 보이므로 각 영향인자가 상수가 아닌 시간의존성에 의한 변수로 반영되어야 한다. 그림 2는 예측모델을 이용한 분석 결과이다. 원자로 격납구조 콘크리트의 역학적 특성 실험 결과를 이용하여 기존의 대표적인 예측모델인 KSCE, JSCE, Hansen, ACI 및 CEB-FIP 모델(1990)과 실측에 의한 비크리프를 비교하여 그 결과를 분석하였다.

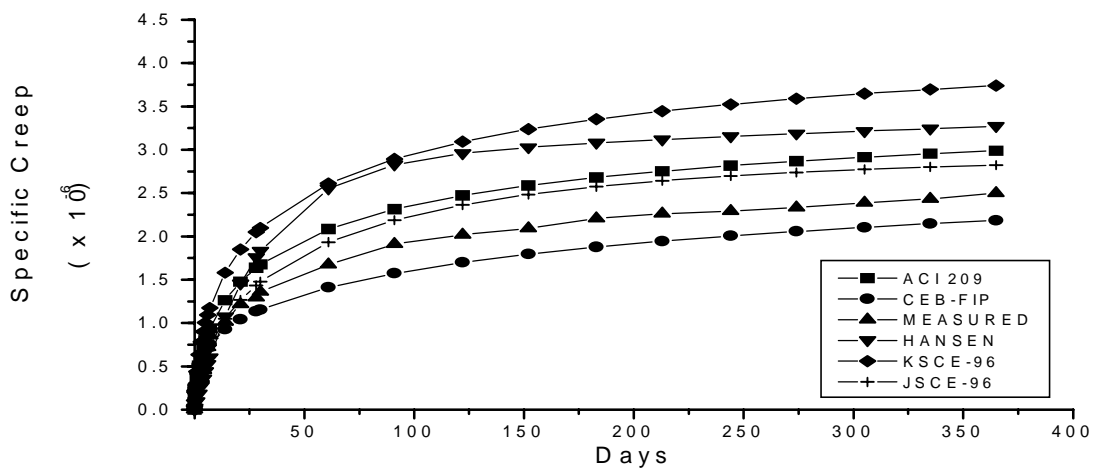


그림 2. 기존 예측모델 비교

5. 결론

원자로 격납구조 콘크리트의 역학적 특성 시험은 원전건설의 필수 시험 항목으로서 대상 콘크리트의 역학적 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 압축강도는 재령에 따라 증가하여 28일 후에 5,600psi에 도달하였고 90일 압축강도는 6,700psi로서 설계기준강도인 5,500psi보다 상회하는 안정된 값을 나타내고 있다.

(2) 콘크리트 탄성계수의 경우 재령 90일에서 완만한 증가추세로 기준값 4,227,000psi와 유사하였으며, 포아슨비는 재령에 관계없이 일정한 값으로 기준값 0.17 이내임을 알 수 있었다.

(3) 재하 재령 365일차의 크리프 시험 결과를 기존 예측모델과 비교 분석한 결과, CEB-FIP 모델을 제외한 비교대상 모든 예측모델들이 실측한 원자로 격납구조 콘크리트의 크리프 변형율보다 과대 평가함을 밝혔다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력중장기 연구개발사업의 지원하에 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. ASTM Committee C-9, "Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression," Annual book of ASTM Standard, Vol. 04. 02., C-512-82, 1983
2. ACI Committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structure," ACI-SP-76, 1982
3. Neville, A.M., Dilger, H.W., and Buooks, J.J., "Creep of Plain and Structural Concrete," Construction Press, London and NewYork, 1983, pp.182-206.Sons, NewYork, 1982, 362pp.
4. CEB-FIP, Model Code 1990, Comite' Euro-International du Be'ton, 1990.
5. JSCE, Japanese Standard Specification for Design of Concrete Structure, 1996
6. KSCE Korean Standard Specification for Design of Concrete Structure, 1996
7. Final report, Sergent & Lundy, "creep and concrete properties long term test program", for KEPCO, Younggwang nuclear power plant unit #3 & 4, Construction technology laboratories.