

# 원자로 격납건물 콘크리트의 크리이프 변형 특성

## Creep Strain of Containment Concrete Structure

방기성\*                      정원섭\*\*                      조명석\*\*\*                      송영철\*  
Pang, gi sung              Jeoung, won seoup              Cho, myung suk              Song, young chul

---

### Abstract

Creep, drying shrinkage, modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete are influenced by a number of factors such as mix type, member thickness, curing condition and loading cases. Particularly, creep and shrinkage in concrete have yet to be studied due to its complicated time-dependent properties. In this study, the concrete creep tests were carried out at various ages of loading - 7, 28, 90, 180 and 365 days in order to investigate and quantify its long-term properties. The test procedures and analysis of the test results were also described herein. The results of this study will enable A/E to calculate effective prestressing forces considering time-dependent prestressing loss and evaluate the structural integrity of the prestressing system using the representative values derived from this property test.

---

### 1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트 격납건물의 설계시 콘크리트의 장기거동 특성치들은 관련 코드등으로 부터 가정된 특성치를 사용하고 있으나 이러한 가정된 특성치들이 실제적인 콘크리트의 장기거동 특성을 충분히 반영하였다고 볼수는 없으며 구조물의 실제 거동해석에 사용 하기에는 부족한 점이 많다. 따라서 원자력 발전소의 경우에는 건설초기 및 배합이 변경될 때 마다 콘크리트 특성치시험을 시행하고 그 결과가 설계가정치의 허용폭을 벗어난 경우에는 설계회사(A/E)의 검토를 받고 있다. 본 연구의 대상인 월성3, 4호기는 캐나다의 AECL에 의해 설계된 CANDU형식의 원자로로서 다음과 같은 설계가정치를 사용하였다.

---

\* 정회원, 한국전력공사 전력연구원 일반연구원  
\*\* 정회원, 한국전력공사 전력연구원 일반연구원  
\*\*\* 정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원  
\*\*\*\* 정회원, 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

- ▶ 28일 압축강도 : 340 (kg/cm<sup>2</sup>)
- ▶ 탄성 계수 : 290,000 (kg/cm<sup>2</sup>)
- ▶ 포아손비 : 0.15
- ▶ 열팽창 계수 : 5.2 × 10<sup>-6</sup> (°F)
- ▶ 크리이프 : DIN 4227
- ▶ 건조수축 : DIN 4227

위와같은 콘크리트의 특성치들은 배합조건, 부재의 크기, 양생 및 재하조건 등 많은 요소들의 영향을 받고 있다. 특히 크리이프와 건조수축은 그 복잡한 시간의존성 특성 (time-dependent properties)으로 인해 아직까지도 이 분야에 대한 연구가 계속 되고 있으며, 시험 및 경험에 의한 추정치에 일반적이다. 따라서 본 연구에서는 불확실성이 많은 콘크리트의 장기거동에 따른 물리적 특성을 규명하고자 재하재령을 변화 (7, 28, 90, 180, 365일)시키면서 크리이프, 탄성계수, 포아손비 등을 측정, 분석하여 콘크리트 장기거동 예측식을 제시함으로써 프리스트레스트 콘크리트 구조물에서의 시간에 따른 응력 손실을 고려한 유효 프리스트레스 응력 산정 및 구조물의 건전성 평가에 실질적 도움을 주고자 한다.

## 2. 시험방법

### 2.1 콘크리트 배합비 및 압축강도

월성3.4호기 건설에 사용된 콘크리트 28일 설계기준강도인 5000 psi (35 MPa)의 배합표는 표1과 같으며, 각 재령별 (7, 28, 90, 180, 365일)로 3개씩의  $\phi 15 \times 30$ cm 표준공시체를 사용하여 압축강도를 측정하였다.

표 1 콘크리트 배합설계표

배합 종류	시멘트 (kg)	물 (kg)	자갈 (kg)	모래 (kg)	감수제 (ml)	AE제 (ml)	비고
352C	393	165	983	762	1,572	40	Peri-Wall용

### 2.2 탄성계수, 포아손비

탄성계수와 포아손비는 콘크리트에 가해지는 응력산정 및 포스트텐션닝 시스템의 변형 및 손실예측에 매우 중요한 요소로서, 각각 변형률에 대한 응력의 비 및 횡방향 변형률의 종방향 변형률에 대한 비로서 정의된다. 측정 시편으로는 각 재령별로 3개씩의  $\phi 15 \times 30$ cm 표준공시체가 제작되었으며, 세로방향 변형률을 측정하는 Compressometer와 가로방향 변형률을 측정하는 Extensometer를 사용하여 ASTM C469에 의해 세로방향 변형률이 0.00005때의 하중과 극한하중의 40%하중에 대한 변형률을 측정, 아래식에 의해 탄성계수와 포아손비를 결정하였다.

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

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

여기서,  $\sigma_2$  = 극한하중의 40% 하중에 대한 응력 (kg/cm<sup>2</sup>)

$\sigma_1$  = 세로 변형률 0.00005에 대한 응력 (kg/cm<sup>2</sup>)

$\epsilon_2$  = 응력  $\sigma_2$ 로 생긴 세로방향 변형률

$\epsilon_{h2}$  = 응력  $\sigma_2$ 로 공시체의 중앙에 생긴 가로방향 변형률

$\epsilon_{h1}$  = 응력  $\sigma_1$ 로 공시체의 중앙에 생긴 가로방향 변형률

### 2.3 크리이프

크리이프 시험은 시간에 따른 하중과 압축변형률의 관계를 측정하는 것으로서 일반적으로 크리이프는 콘크리트 압축강도의 0 - 40% 까지는 응력에 비례하며, 최초 하중재하조건에 따라 그특성이 결정된다. 측정은 ASTM C512 규정에 따라 각 재령별로  $\phi 15 \times 30$ cm의 표준공시체 6개씩을 제작 하였으며 시험기간은 1년으로 하였다. 이중 2개의 공시체는 압축강도를 측정하였고, 2개의 공시체는 하중을 재하하여 총 변형률을 구하였으며, 나머지 2개는 하중 이외의 변형요인(건조수축)을 구하기 위하여 이용되었다.

각 공시체는 크리이프 시험이 완료될 때까지 온도  $23.0 \pm 2^\circ\text{C}$ , 상대습도  $50 \pm 4\%$ 를 유지하였으며, 크리이프 공시체에 재하직전에 압축강도를 측정하였다. 크리이프 재하하중(Sustained Load)은 각 재령에서 측정한 3개 공시체의 압축강도 평균값의 40% 이내로 설정하였으며, 변형 측정은 재하직전, 직후 및 2-6시간 후, 그리고 처음 1주일 간은 매일, 처음 1개월간은 매주, 1년까지는 매달 측정하였다.

총 변형률은 초기탄성변형률과 건조 수축 변형률 및 크리이프 변형률의 합이므로 측정된 총 변형률에서 재하직후의 초기탄성 변형률과 건조수축 변형률을 제하여 크리이프 변형률을 구하였다. 또한 임의의 재하재령에서 단위 응력에 대한 크리이프 변형률(비크리이프 : Specific Creep)을 구하기 위하여 반대수 방안에 가로축 대수눈금을 시간으로, 비크리이프를 세로축으로 하여 크리이프 예측식을 비교 분석하였다.

## 3. 시험결과

### 3.1 압축강도, 탄성계수 및 포아슨비

측정된 압축강도, 탄성계수 및 포아슨비의 평균치를 표 2에 나타내었다. 표에서와 같이 압축강도는 재령에 따라 증가하여 90일후에  $483 \text{ kg/cm}^2$ 에 도달하였고 28일 압축강도는  $470 \text{ kg/cm}^2$ 으로서 설계기준 강도인  $350 \text{ kg/cm}^2$ 보다 상회하는 안정된값을 나타내고 있다. 탄성계수 또한 콘크리트 표준시방서에서

표 2 압축강도, 탄성계수 및 포아슨비

Curing Ages (days)	7	28	90	180	365
Compressive Strength( $\text{kg/cm}^2$ )	366	470	483	600	811
Modulus of Elasticity( $\text{kg/cm}^2$ )	301,330	346,704	351,857	406,218	466,190
Poisson's Ratio	0.1987	0.1982	0.2139	0.2367	0.2350

제안하고 있는 탄성계수 실험식 값과 비교 검토한 결과 모두 유사하게 일치함을 알 수 있으며 설계기준치인  $290,000 \text{ kg/cm}^2$ 를 모두 상회한다. 포아슨비는 상대적으로 시간의 경과와 관계없이 일정한 값으로 나타내고 있으며 설계기준치인 0.15를 크게 초과 하는 것으로 보아 설계시 안전측의 값을 적용한 것으로 볼 수 있다.

### 3.2 크리이프

각 재령별 크리이프 측정결과인 표3에서 총 변형률은 초기 탄성변형률, 건조수축 및 크리이프 변형률의 합으로 나타내었으며, 이 중에서 크리이프 변형률이 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 또한 크리이프 계수에서 알 수 있듯이 크리이프 변형률이 초기 탄성변형률의 1.2배 이상을 나타내고 있으며, 총 변형률, 건조수축 및 크리이프 변형률은 재하 후 한달까지는 급격히 증가하다가 그 후에는 점차적으로 증가율이 둔화되는 경향을 나타내고 있다. 재령별 크리이프 변형은 그림 1과 같다.

표 3 크리이프 측정결과

Curing Ages (days)	Drying Shrinkage ( $\times 10^{-6}, A$ )	Creep Strain ( $\times 10^{-6}, B$ )	Instantaneous Strain ( $\times 10^{-6}, C$ )	Total Strain ( $\times 10^{-6}, D=A+B+C$ )	Creep Coefficient ( $E=B/C$ )
7	687	956	582	2225	1.64
28	639	749	616	2004	1.21
90	537	669	528	1734	1.27
180	605	716	490	1811	1.46
365	465	563	417	1445	1.35

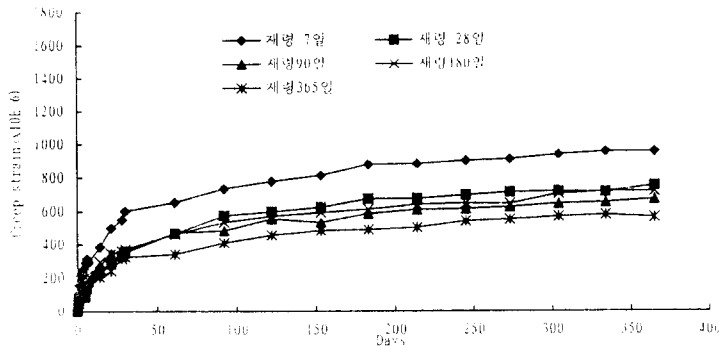


그림 1 재령별 creep 변형률

### 4. 기존 장기거동 예측모델과의 비교

원자력 발전소 격납건물의 장기거동은 안전성과 직접적인 관계를 가지므로 장기거동을 예측하여 구조해석에 반영하고 실험에 의하여 검증하는 과정이 반드시 필요하며 따라서 초기 구조해석시 정확한 예측모델을 적용하여 장기거동을 반영하는 것은 매우 중요하다. 이러한 장기거동의 예측은 콘크리트의 거동이 매우 복잡하고 초기조건 및 환경변화에 따라 매우 복잡한 양상을 보이므로 각 영향인자가

상수가 아닌 시간에따른 변수로 반영될 수 있어야 한다. 따라서 본고에서는 원자력 발전소 프리스트레싱 시스템의 손실량 산정시 가장 구조물에 크게 영향을 미치는 크리이프에 대한 대표적인 예측 모델인 Hansen모델, ACI모델 및 CEB-FIP모델(1990)에 따른 비크립(Specific creep)치를 실측에 의한 비크립치와 비교 분석하였다. 그결과 그림 2와 같이 원자력 발전소의 가동중 검사시 적용규정인 REG.GUIDE의 권고 모델인 Hansen모델 보다는 안정된양의 비크립 변형률을 보여주고 있으나 ACI모델 및 CEB-FIP모델(1990)보다는 높은양의 비크립 변형률이 나타남에 따라 이 예측모델을 실측에 의한 검증없이 구조해석에 사용하기에는 다소 문제가 있음을 알 수 있다.

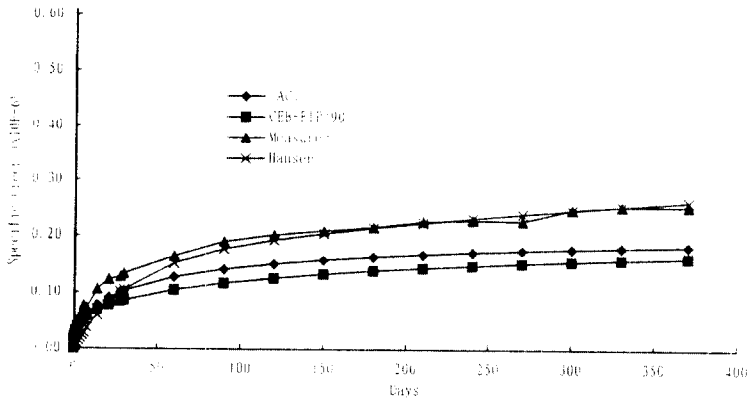


그림 2 기존 예측모델비교

## 5. 시험결과의 활용

### 5.1 설계시공시의 활용

원자로격납건물은 내부 압력상승에 대처하기 위하여 외벽에 도입한 긴장력(Prestressing force)을 산정하기 위하여 콘크리트의 장기거동 특성시험을 수행하고 있으며 이는 ASME Section III, Division 2, CC-2230에 따라 공사 시방서에 명시되어 있으며 크리이프 시험은 텐돈의 긴장전에 완료되어야 함을 기술하고 있다. 따라서 원전 격납건물의 설계 초기 단계에서 콘크리트의 특성치들은 이론 경험에 의한 가정값을 활용하여 텐돈의 손실율, 유효응력 및 수량을 결정하게 된다. 이후 실사용 재료에 대한 배합이 결정되면 물리적 특성치 시험을 수행하여 앞서의 가정치들과 비교분석 하므로써 적정성을 판정한다. 이때 실측값이 설계가정치의 허용 범위를 벗어날 경우 구조해석을 통한 텐돈의 재긴장 작업이 이루어지게 된다. 본 연구 논문에서 얻어진 실측값은 향후 A/E사에 제공되어 분석 평가가 이루어질 예정이며 가동중 검사시 기본자료로도 활용된다.

### 5.2 가동중 검사시의 활용

가동중 검사는 발전소 운전중 격납건물의 건전성을 평가할 목적으로 정기적으로 수행하고 있으며 검사주기는 발전소의 종류에 따라 다소 다르나 프리스트레스트 콘크리트 격납건물의 경우 일반적으로 초기 인장력 도입 후 또는 최초 구조물 건전성 시험 (ISIT: Initial Structural Integrity Test) 후 1, 3(2), 5년에 그 이후는 5년 또는 10년 주기로 발전소 수명기간 동안 수행토록 하고 있다. 검사항목은

견갑건물 외부 콘크리트의 육안검사, 포스트 텐션닝 계통의 육안검사, 텐돈과 그리이스의 재료시험 및 텐돈의 응력검사등이다. 국내 원자로 격납건물의 경우 구조체내에 쉬스관을 매설하며 텐돈 긴장후 쉬스관내의 채움 형태에 따라 부착형(Bonded type)과 비부착형(Unbonded type)으로 구분한다. 월성 원자로 격납건물의 경우는 부착형에 해당하며 가동중 검사를 위해 18개의 시험보(Test Beam)를 제작하였다. 그중 14개는 그라우팅으로 부착시켜 휨 실험과 파괴 시험에 사용되고 4개는 그리이스를 채워 넣어 시간의 경과에 따른 손실(건조수축, 크리이프, 강재이완등)량을 산정, 유효인장력을 확인하고 이론치와 실측치를 비교분석하여 구조물의 건전성을 평가하는데 활용된다.

## 6. 결 론

콘크리트의 장기거동 특성시험은 원전건설의 필수시험 항목임에도 불구하고 지금까지 외국 기술에 의존하여 왔으나 본 연구를 통해 기술의 자립화를 기하였고 향후 건설될 후속 원전에 본 기술을 적용, 경제적 효과 및 다수호기의 원전 건설에 따른 시험의 적기수행에 기여할수 있게 되었으며 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 콘크리트 장기거동 특성시험의 국내외 관련 코드 및 기준을 조사분석하여 향후 원전에 적용될 시험절차서를 작성하여 제시하였다.
2. 장기거동 특성시험의 대상은 월성원전 3,4호기의 격납건물 콘크리트를 선정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

가. 압축강도는 재령에 따라 증가하여 28일 압축강도는 360kg/m<sup>2</sup>, 90일 강도는 500kg/m<sup>2</sup>에 이르러 설계기준강도 340kg/m<sup>2</sup>을 훨씬 상회하며 탄성계수의 경우 초기재령에서는 급격히 증가하나 180일 이후 재령에서는 완만한 증가세를 나타내고 있으며 설계기준강도보다 큰 값을 보임

나. 포아손비는 시간에 따라 거의 변화를 보이지 않고 있으며 설계 가정치 0.15보다 훨씬 큰 값을 보이고 열팽창계수는 설계가정치 값  $5.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ 보다 작은 값을 나타내고 있음

다. 크리이프는 월성 3,4호기의 경우 DIN 4227에 따라 설계가정되었으며 입력자료가 없어 비교 분석이 곤란하나 ACI 모델, Hansen모델 등의 기존 이론 경험식과 비교한 결과 유사한 경향과 값들을 보임.

## ● 참고문헌 ●

1. 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.
2. Bazant, Z.P., "Creep and Shrinkage of Concrete: Mathermatical MODELING," 4th RILEM International Simposium, Northwestern Univ., 1986, 909pp.
3. Final report, Sergent & Lundy, "creep and concete properties long term test program" for KEPCO, Younggwang nuclear power plant unit #3 & 4., Construction technology laboratories.