

원자로 격납구조 콘크리트의 크리프 특성에 관한 연구

A Study on the Creep Characteristics of Concrete for Reactor Containment Structure



송하원*

Song, Ha-Won



정원섭**

Jeoung, Won-Seoup



변근주***

Byun, Keun-Joo



송영철****

Song, Young-Chul

ABSTRACT

Since the biggest time-dependent prestress loss of reactor containment structure is due to creep of concrete, the creep is one of important structural factors to be considered for the safety maintenance in the containment structure during design, construction and maintenance. This paper is about the creep characteristics of concrete for the reactor containment structure.

In this paper, creep test was performed to show the creep characteristics of reactor containment concrete structure made of the type-V cement. Then, in order to evaluate the applicability of creep prediction equations of recently revised Korean Concrete Standard Specification(KSCE-96) and Japanese Concrete Standard Specification, ACI-209, CEB/FIP-90, and HANSEN, creep test results were compared with prediction results obtained from the equations.

From the comparisons, it was shown that the equation of the KSCE-96 predicts creep,

* 장희원, 연세대학교 토목공학과 부교수

** 한국전력공사, 전력연구원, 연구원

*** 장희원, 연세대학교 토목공학과 교수

**** 한국전력공사, 전력연구원, 책임연구원

• 본 논문에 대한 토의를 1997년 10월 30일까지 학회로 보내주시면 1997년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

for younger concrete than 1 year, better than the other equations and that all of the equations predicts creep, for older concrete than 1 year, smaller than test. From regression analysis, a creep prediction equation which effectively predicts creep of concrete due to loading after 1 year was proposed.

Keyword : concrete, creep, prestress loss, reactor containment structure, creep prediction equations

1. 서론

원자로 격납구조 대부분이 콘크리트 구조물에 긴 장력을 도입한 프리스트레스트 콘크리트 구조물이다. 프리스트레스트(PS) 콘크리트에서 응력과 변형률은 장기간에 걸쳐 콘크리트 크리프와 건조수축 및 프리스트레스트강재의 리락세이션(relaxation)이 발생함에 따라 프리스트레스트 힘을 감소시키는 원인이 된다. 그 중 원자력발전소의 프리스트레싱 시스템에서 시간의존성에 의한 손실 효과를 고려할 때 가장 큰 영향을 미치는 부분이 콘크리트 크리프이다. 그러므로 설계 초기단계에서 콘크리트의 크리프는 경험에 의한 추정값을 활용하여 프리스트레스트의 손실률을 결정하게 된다. 시공시에도 설계에 반영한 추정값과 실측값을 비교 분석하여 추정값이 허용범위를 벗어날 경우 구조해석을 통한 PS강재의 재긴장 작업을 하며, 가동중의 건전성 평가시에도 크리프의 특성을 시험, 분석 평가하여 반영한다. 이처럼 원자로 격납구조의 크리프에 의한 장기거동 특성은 원자력발전소의 안전성에 직접적인 관계를 가지고 있어 구조해석시 정확한 예측식을 적용하여 크리프 특성을 반영하는 것은 매우 중요하다. 특히 보통 포틀랜드 시멘트가 아닌 5종 시멘트를 사용하여 제작된 원자력 격납구조 외벽 콘크리트에 적절하게 사용될 수 있는 크리프예측식을 실험에 의해서 검증하여 선택하는 것은 매우 중요하다. 올바른 예측식으로 대상 콘크리트의 크리프 특성을 예측하여 이를 구조해석에 반영하는 과정이 반드시 필요하며 시공시에도 포스트 텐션링 작업시 설계에 고려된 추정값과 비교하여 재보정하는 과정을 수행할 수 있다.

이에 본 논문에서는 원자력 격납구조 콘크리트의 크리프 특성을 규명하기 위해 5종 시멘트로 제작된 대상 콘크리트에 대해 실험을 수행하였으며, 최근 개정된 한국과 일본의 콘크리트 표준시방서의 크리프 예측식을 비롯한 기존의 여러 크리프 예측식에 의한 결과와 실험결과를 비교, 검토하여 크리프예측식들의 적용가능성을 검토하였고, 대상 콘크리트에 적절하게 적용할 수 있는 크리프예측식을 제안하였다.

1905년 미국 ACI 보고서에 크리프 변형에 관한 첫 번째 논문이 발표된 이래 콘크리트 크리프 예측식이 많이 연구되었으며, 요즘 세계적으로 널리 채용되고 있는 콘크리트 구조물 설계의 극한상태설계법에서는 콘크리트 부재의 변형특성이 보다 정확히 고려되도록 되어 있다. 따라서 콘크리트의 사용성 한계상태에서의 콘크리트 부재의 장기 변형, 프리스트레스트 콘크리트 구조의 프리스트레싱력의 시간의존성 손실은 크리프 효과가 고려되어 계산되어야 한다. 이러한 배경하에서 크리프 변형율의 예측과 설계에 대한 적용방법에 대해 다양한 예측식들이 제안되고 있다. 대표적으로 미국 ACI-209식¹⁾, 미국 Bazant식²⁾, 유럽의 CEB/FIP-90³⁾ 및 최근에 개정된 일본 콘크리트 표준시방서⁴⁾(JSCE-96)식과 우리나라에서는 최근에 개정된 건교부제정 콘크리트 표준시방서⁵⁾(KSCE-96)식과 미국 Hansen식⁶⁾이 있다. ACI-209, CEB/FIP-90의 예측식은 구성식은 아니고, 단면의 평균직 성질을 예측한 것이며 Hansen식⁶⁾은 콘크리트 배합조건에서 시간에 따른 크리프양을 산정하기 위한 유동학적 이론과 실험데이터를 근거로 예측한 것이다. 한편 Bazant예측식은 구성식이라는 개념을 기초로 유도된 것이기 때문에 유한요

소법을 사용한 프로그램에 널리 적용되고 있다.

원자로 격납구조물의 설계 및 시공시 필수 시험 항목인 원자로 격납구조 크리프 특성 시험은 ASTM[®] (Section III, Division 2, CC-2230)을 포함한 각 발전소 기술시방서상에 명시되어 있으며 우리나라에서는 주로 외국의 코드와 기술에 의존하고 있는 실정이다.

2. 원자로 격납구조 콘크리트의 크리프 시험

원자력 격납구조 콘크리트의 크리프 특성을 규명하기 위해 5종 시멘트를 사용하여 만들어진 원자로 격납구조 외벽 콘크리트에 대해 크리프 시험을 실시하였다.

2.1 대상 콘크리트 크리프시험

원자로 격납구조 콘크리트의 크리프시험은 ASTM C512¹⁰⁾ 규정에 따라 Table 1과 같이 양생온도, 재령 및 측정주기 등의 조건을 따랐다.

원자력 격납구조 건설에 사용된 콘크리트 28일 설

Table 1 Creep test condition

| Temp. in Curing | Humidity | Temp. | Age at loading (Day) | Cycle of Measurement (Day) | Correction of Loading |
|-----------------|----------|--------|----------------------|---|------------------------|
| 23±2°C | 50±4% | 23±2°C | 2, 7, 28, 180, 365 | before loading after loading (2~6 time) 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 2 week, 3 week, 4 week, every month ~ 1 year | when it change over 2% |

계기준강도(352kg/cm²)를 갖는 콘크리트의 배합표는 Table 2와 같다.

Table 2 Mix design

| Max. Aggregate Size (mm) | Slump (cm) | Air Content (%) | W/C (%) | S/A (%) | Quantities (kg) | | | | Admixtures (ml) | |
|--------------------------|------------|-----------------|---------|---------|-----------------|-----|-----|-----|-----------------|--------------------------|
| | | | | | W | C | S | G | AE Agents | Water-reducing admixture |
| 20 | 10 | 5.5 | 42 | 43.7 | 165 | 330 | 702 | 983 | 40 | 1572 |

Table 3은 각 사용재료의 물성치를 보여준다.

대상 콘크리트의 탄성계수 E와 포아송비 μ 의 측정을 위해 측정 시편으로는 각 재령(7, 28, 90, 180, 365일)별로 3개씩의 $\phi 15 \times 30$ cm 표준공시체가 제작되었으며, 세로방향 변형률을 측정하는 com-

Table 3 Properties of Materials

| 구분 | Cement | Coarse Aggregate | Fine Aggregate | Admixtures | |
|--------------------------|--------|------------------|----------------|------------|--------------------------|
| | | | | AE Agents | Water-reducing admixture |
| Rel. Density(SSD) | 3.15 | 2.62 | 2.55 | 1.03 | 1.15 |
| FM | - | - | 2.83 | - | - |
| Water Absorption Rate(%) | - | 1.80 | 2.35 | - | - |
| Unit Weight(Dry) | - | 1.663 | 1.639 | - | - |

pressometer와 가로방향 변형률을 측정하는 extensometer를 사용하여 ASTM C469¹¹⁾에 의해 세로방향 변형률이 0.00005일때의 하중과 극한하중의 40%하중에 대한 변형률을 측정, 다음식 (1)과 (2)에 의해 탄성계수와 포아송비를 결정하였다.

$$E = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\epsilon_2 - 0.00005) \quad (1)$$

$$\mu = (\epsilon_{h2} - \epsilon_{h1}) / (\epsilon_2 - 0.00005) \quad (2)$$

여기서, σ_2 = 극한하중의 40% 하중에 대한 응력 (kg/cm²), σ_1 = 세로 변형률 0.00005에 대한 응력 (kg/cm²), ϵ_2 = 응력 σ_2 로 생긴 세로방향 변형률, ϵ_{h2} = 응력 σ_2 로 공시체의 중앙에 생긴 가로방향 변형률, ϵ_{h1} = 응력 σ_1 로 공시체의 중앙에 생긴 가로방향 변형률을 의미한다.

크리프 시험은 시간에 따른 하중과 압축변형률의 관계를 측정하는 것으로서 일반적으로 크리프는 콘크리트 압축강도의 0~40%까지는 응력에 비례하며, 최초 하중재하조건에 따라 그 특성이 결정된다. 크리프 시험은 ASTM C512¹⁰⁾에 따라 각 재령별로 $\phi 15 \times 30$ cm의 표준공시체 7개씩을 제작하여 시험하였다. 이 중 3개의 공시체로는 압축강도를 측정하였고, 2개의 공시체로는 하중을 재하하여 총 변형률을 구하였으며, 나머지 2개는 건조수축 변형률을 구하기 위하여 이용되었다. 각 시험항목에 따른 소요공시체는 Table 4와 같이 제작하였다. 시험에 사용된 콘크리트의 크리프 시험기는 다음 Fig. 1과 같다.

각 공시체는 크리프 시험이 완료될 때까지 온도 23.0±2°C, 상대습도 50±4%를 유지하였으며, 재하 직전에 공시체의 압축강도를 측정하였다. 크리프 재하하중은 각 재령에서 측정된 3개 공시체의 압축강도 평균값의 40% 이내로 설정하였으며, 변형측정은 재하직전, 직후 및 2~6시간후, 그리고 처음 1주일간은

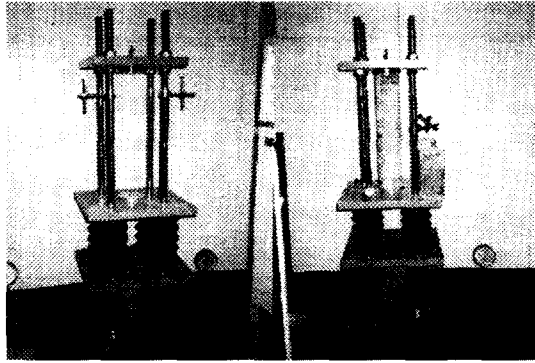


Fig. 1 Creep test machine

Table 4 Test specimen

| Test Item | SPEC | Size | No. | Equipment | Plan & Time |
|---|-----------|-----------|--------|-------------------------------|---|
| Modulus of Elasticity & Poisson's Ratio | ASTM C469 | 150×300mm | 6×5=30 | Compressive Strength Tester | • Preparation: 1 day |
| | | | | Compressometer & Extensometer | • Molding: 1 day • Unmolding: 1 day • Measurement: 5 days • Total required time: 8 days |
| Creep | ASTM C512 | 150×300mm | 7×5=35 | Creep Tester #5 | • Preparation: 1 day • Molding: 1 day • Unmolding: 1 day • Measurement after setting: 1 day, 7 days/day interval, 4 days/week interval, 12 days/month interval • Total required time for measurement: 24 days × 5 stage = 120 days • Total required time: 123 days |

매일, 처음 1개월간은 매주, 1년까지는 매달 측정하였다. 총 변형률은 초기 탄성 변형률과 건조수축 변형률 및 크리프 변형률의 합이므로 측정된 총 변형률에서 재하직후의 초기탄성 변형률과 건조수축 변형률을 제외하여 크리프 변형률을 구하였다. 또한 임의의 재하재령에서 비크리프(specific creep)를 구하기 위하여 반대수 방안에 가로축 대수눈금을 시간으로, 비크리프를 세로축으로 하여 결과를 도시하여 분석하였다.

2.2 시험 및 결과분석

대상 콘크리트의 압축강도는 재령에 따라 증가하여 90일 후에 483kg/cm²에 도달하였고, 28일 압축강도는 470kg/cm²으로서 설계기준강도인 352kg/cm²보다 상회하는 안정된 값을 나타내고 있다. 탄성계수 또한 KSCB-96에서 제안하고 있는 탄성계수 실험식 값과

비교 검토한 결과 모두 유사하게 일치함을 알 수 있으며 설계기준치인 290,000kg/cm²를 모두 상회하였다. 포아송비는 상대적으로 시간의 경과에 큰 변동없이 일정한 값을 나타내고 있으며 설계기준치인 0.18을 초과하고 있는 것을 알 수 있다. 본 시험의 재령에 따른 압축강도, 탄성계수 및 포아송비의 시험결과를 Table 5와 같다.

각 재령별 비크리프 측정 결과는 Fig 2로 나타내었다. Fig. 2과 같은 크리프 변화는 재하후 1달까지는 급격히 증가하다가 그 후에는 점차적으로 감소하는 경향을 나타내고 있으며 재령이 커질수록 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Table 5 σ_c , E, and μ in curing ages

| Curing Ages(days) | 7 | 28 | 90 | 180 | 365 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| Compressive Strength, σ_c (kg/cm ²) | 366 | 470 | 483 | 600 | 577 |
| Modulus of Elasticity, E(kg/cm ²) | 391,330 | 546,704 | 351,857 | 406,218 | 466,190 |
| Poisson's Ratio, μ | 0.1987 | 0.1982 | 0.2139 | 0.2367 | 0.2310 |

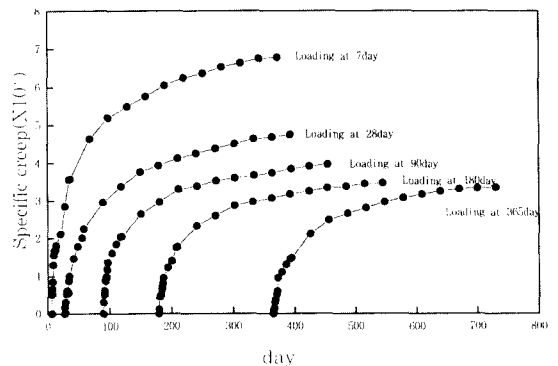


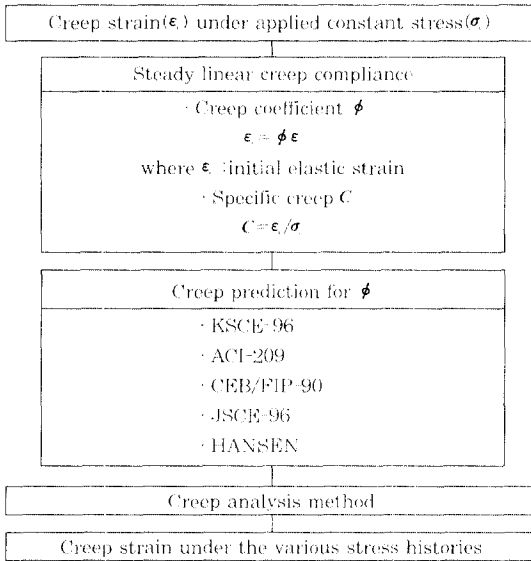
Fig. 2 Specific creep by experiments

3. 크리프 예측식에 의한 크리프 해석

실험을 수행한 대상 콘크리트를 크리프 예측식을 통하여 크리프 해석하였다. 각 예측식과 원자로 격납 건물 콘크리트의 크리프 시험에 사용된 계수는 동일한 조건으로 적용하였다. Table 6은 본 논문에서 사용한 크리프 예측식과 크리프에 관한 일반적인 해석 과정을 보여준다.

Table 7은 본 논문에서 사용한 각 예측식의 매개변수를 보여준다. 콘크리트 크리프 예측식에는 구조물의 형상과 콘크리트의 재료적인 내적요소 뿐만 아니라 크

Table 6 Creep prediction procedure



리프 시험의 외적환경 즉 콘크리트의 양생시간 및 온도, 습도 등의 영향이 고려되어 있음을 알 수 있다.

Table 7 Creep prediction parameters

| | Parameter | KSCE-96 | ACI-209 | CEB/FIP-90 | JSCE-96 | HANSEN |
|-----------|--------------------------------|---------|---------|------------|---------|--------|
| internal | C | * | * | * | * | * |
| | W | * | * | * | * | * |
| | W/C | * | * | * | * | * |
| | S | * | * | * | * | * |
| | G | * | * | * | * | * |
| | S/a | * | * | * | * | * |
| | σ_k | * | * | * | * | * |
| structure | Slump | * | * | * | * | * |
| | Air | * | * | * | * | * |
| | Type of Cement | * | * | * | * | * |
| | Shape | * | * | * | * | * |
| structure | Volume/Surface, (V/S) | * | * | * | * | * |
| | Ave. thickness | * | * | * | * | * |
| external | Curing time | * | * | * | * | * |
| | Curing method | * | * | * | * | * |
| | Temperature | * | * | * | * | * |
| | Relative humidity | * | * | * | * | * |
| | Age when loading starts, t_i | * | * | * | * | * |

3.1 KSCE-96 예측식

콘크리트의 크리프 현상은 재하방법이나 환경조건에 따라 다양하며 이를 하나의 메카니즘으로 설명하기는 어려운 실정이나, 건교부 제정 콘크리트 표준시

방서(KSCE-96)⁽⁶⁾의 크리프 변형율은 식 (3)과 같고, 크리프 계수는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\epsilon_c(t) = \frac{\sigma_c}{E_c(t)} [1 + \phi(t, t_i)] \quad (3)$$

$$\phi(t, t_i) = 3.5k_f k_f (1.58 - \frac{H}{120}) t_i^{-0.118} \frac{(t-t_i)^{0.6}}{10.0 + (t-t_i)^{0.6}} \quad (4)$$

여기서, t =콘크리트의 재령(일), t_i =하중이 처음 재하되었을 때의 재령(일), H =상대습도(%), k_f =콘크리트 체적과 표면적과의 비에 따른 보정계수(Fig. 3에서 얻어진다.), k_f =콘크리트 강도에 따른 보정계수이며, 다음 식(5)로 구한다.

$$k_f = \frac{629}{426 + \sigma_{ik}} \quad (5)$$

이때 σ_{ik} (kg/cm²)는 설계기준강도로서 원자로 격납 구조 콘크리트의 28일 압축강도시험으로 구한 값 470 kg/cm²를 사용하였다.

식 (3)과 (4)로부터 비크리프는 다음의 식 (6)과 같다.

$$C = \frac{1}{E_c} 3.5k_f K_f (1.58 - \frac{H}{120}) t_i^{-0.118} \frac{(t-t_i)^{0.6}}{10.0 + (t-t_i)^{0.6}} \quad (6)$$

Table 8은 콘크리트 크리프 변형율을 실험에 의하여 설정되지 않은 환경요인을 고려하여 KSCE-96의 예측식에 사용된 계수값들이다.

식 (4)와 (6)에서의 k_f 는 Fig. 3으로부터 구해진다.

Table 8 Values used at KSCE-96 equation

| Day | K | k_f | H | E_c (kg/cm ²) |
|-----|-----|-------|----|-----------------------------|
| 7 | 1.0 | 0.70 | 90 | 301390 |
| 28 | | | | 346704 |
| 90 | | | | 371857 |
| 180 | | | | 40628 |
| 365 | | | | 44567 |

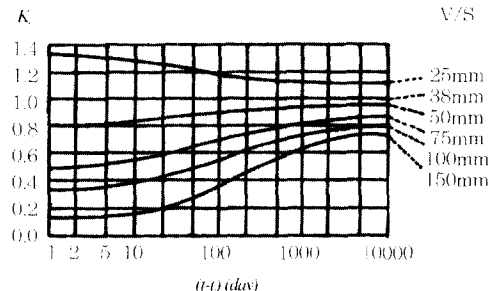


Fig. 3 Values of k_f

KSCE-96의 예측식 (6)에 적용하여 산정한 콘크리트의 재령별 비크리프 예측결과는 Fig. 4으로 나타내었다.

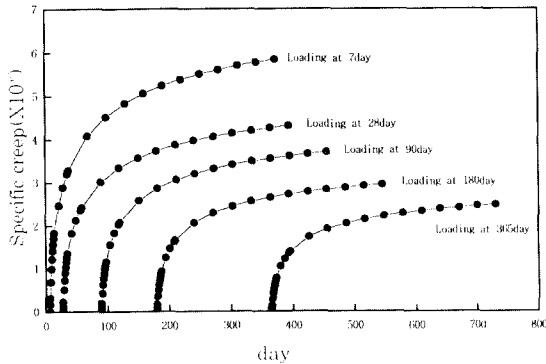


Fig. 4 Specific creep by KSCE-96 equation

3.2 ACI-209 크리프 예측식

ACI-209 크리프 예측식은 ACI Committee 209에서 다음의 식 (7)과 같이 제안하였다.

$$\phi(t, t_i) = \frac{(t - t_i)^{0.6}}{10 + (t - t_i)^{0.6}} C_u \quad (7)$$

여기서, t_i : 하중이 처음 가해진 시간 (day).

C_u : 극한 크리프 계수(ultimate creep coefficient)

이때 식 (7)에서의 C_u 는 다음과 같다.

$$C_u = 2.35C_1C_2C_3C_4C_5C_6 \quad (8)$$

식 (8)에서 사용되는 각기의 변수들은 다음과 같다.

- (1) C_1 = 양생조건에 따른 계수, 수중 양생일 경우, $C_1 = 1.25t_i$, 증기 양생일 경우, $C_1 = 1.35t_i$. 여기서, 수중 양생일 때는 t_i 는 7일보다 커야 하며, 증기 양생일 때에는 3일 보다 커야 한다.
- (2) C_2 = 상대습도 $h(\%)$ 따른 계수, $h < 40\%$ 일 경우, $C_2 = 1.27 - 0.0067h$, $h < 40\%$ 일 경우, $C_2 = 1.00$
- (3) C_3 = 평균 두께 h_0 (mm)에 따른 계수, $h_0 < 150\text{mm}$ 일 경우, h_0 가 50mm일때 $C_3 = 1.30$ 이고 75일때 1.17이고 100일때 1.11이고 125일때 1.04이고 150일때 1.00이다

150mm < h_0 < 380mm 일 경우,

$$C_3 = 1.14 - 0.00092h_0 \text{ (하중이 가해진 후 1년까지)}$$

$$C_3 = 1.10 - 0.00067h_0 \text{ (그 이후)}$$

$h_0 > 380\text{mm}$ 일 경우,

$$C_3 = 2 / 3[1 + 1.13e - 0.0213V / S']$$

(4) C_4 : 슬럼프치 $s(\text{mm})$ 에 따른 계수,

$$C_4 = 0.82 + 0.00264s$$

(5) C_5 : 잔골재량에 대한 잔골재량의 중량비

$$F(\%) \text{에 따른 계수, } C_5 = 0.88 + 0.0024F$$

(6) C_6 : 공기량의 비 $A(\%)$ 에 따른 계수,

$$C_6 = 0.46 + 0.09A < 1.0$$

Table 9는 ACI-209 예측식에 사용된 계수를 나타낸 것이다.

Table 9 Values used at ACI-209 equation

| Day | C | C | C | C ₁ | C | C | C | E(kg/cm ²) |
|-----|-------|-------|-------|----------------|------|-----|------|------------------------|
| 7 | 0.994 | | | | | | | 2005 |
| 28 | 0.844 | | | | | | | 34654 |
| 90 | 0.735 | 0.935 | 0.864 | 1.08 | 0.98 | 1.0 | 1.82 | 351857 |
| 180 | 0.677 | | | | | | | 36218 |
| 365 | 0.623 | | | | | | | 44567 |

식 (7)에서 구한 유효재령 t_i 일에 재하한 콘크리트의 유효재령 t 일에 따른 비크리프는 식 (9)와 같다.

$$C = \frac{1}{E_c} \left[\frac{(t - t_i)^{0.6}}{10 + (t - t_i)^{0.6}} C_u \right] \quad (9)$$

ACI-209 크리프 예측식 (9)에 적용하여 산정한 콘크리트의 재령별 비크리프 예측결과는 Fig. 5로 나타내었다.

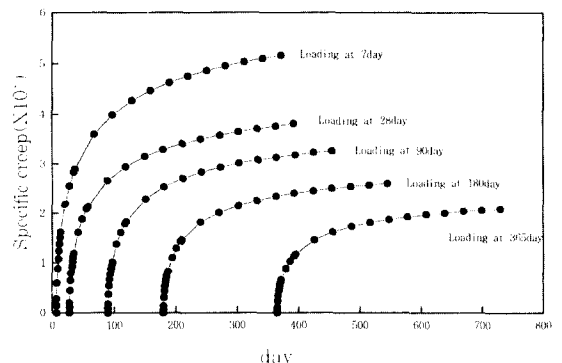


Fig. 5 Specific creep by ACI-209 equation

3.3 CEB/FIP-90 크리프 예측식

CEB/FIP-90 크리프 예측식*은 콘크리트의 재령 특성에 대한 변형속도 및 지속하중의 영향을 중심으로 시간 의존성 재료 특성에 관한 기술이 새롭게 첨가되고 있으며, 크리프 계수는 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\phi(t, t_i) = \Phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_i) \beta(t - t_i) \quad (10)$$

이때 사용되는 계수들은 다음과 같으며, 식 (11)~(14)로부터 그 값을 얻을 수 있다.

(1) Φ_{RH} : 상대습도 h (%)와 평균두께 h_0 (mm)에 따른 계수

$$\Phi_{RH} = 1 + \frac{100 - h}{10^3 \sqrt{h_0}} \quad (11)$$

(2) $\beta(f_{cm})$: 시간 t_i 에서의 압축강도 f_{cm} (MPa)에 따른 계수

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16.8}{\sqrt{f_{cm}}} \quad (12)$$

(3) $\beta(t_i)$: 시간 t_i 에 따른 계수

$$\beta(t_i) = \frac{1}{(0.1 + t_i^{0.2})} \quad (13)$$

(4) $\beta(t - t_i)$: 지속 $(t - t_i)$ 에 따른 계수

$$\beta(t - t_i) = \left[\frac{(t - t_i)}{\beta_{II} + (t - t_i)} \right]^{0.3} \quad (14)$$

여기서, $\beta_{II} = 1.5h_0[1 + (0.012h)^{18}] + 250$

즉 비크리프는 다음 식(15)와 같다.

$$c = \frac{1}{E_{ci}} \Phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_i) \beta(t - t_i) \quad (15)$$

여기서 E_{ci} 값은 재령 28에서 압축강도를 이용하여 구한 탄성계수이며 Table 10은 식(10)과 (15)에 사용된 계수이다.

CEB/FIP-90 크리프 예측식 (15)에 적용하여 산정한 콘크리트의 재령별 비크리프 예측결과는 Fig. 6로 나타내었다.

Table 10 Values used at CEB/FIP-90 equation

| Day | ϕ | f_{cm} (MPa) | $\beta(f_{cm})$ | $\beta(t)$ | β_0 | E (kg/cm ²) |
|-----|--------|----------------|-----------------|------------|-----------|---------------------------|
| 7 | 1.747 | 35.90 | 2.804 | 0.635 | 700.05 | 365114 |
| 28 | | 46.15 | 2.473 | 0.485 | | |
| 90 | | 47.39 | 2.440 | 0.391 | | |
| 180 | | 58.93 | 2.189 | 0.338 | | |
| 365 | | 75.59 | 1.883 | 0.298 | | |

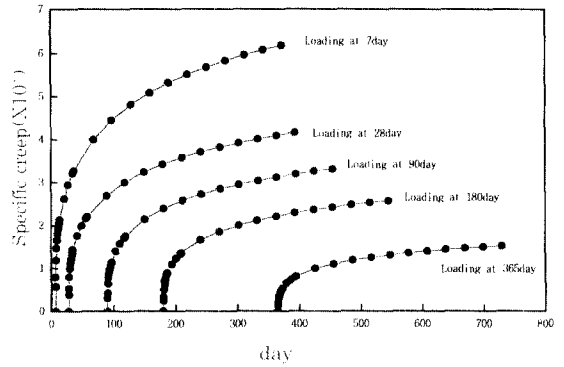


Fig. 6 Specific creep by CEB/FIP-90 equation

3.4 JSCE-96 크리프 예측식

최근에 개정된 일본 콘크리트 표준시방서의 크리프식(JSCE-96)^{10,11)}은 SAKATA에 의하여 많은 실험 데이터를 기초로 하고 통계학적 방법에 의해 유도되었다. 크리프 방정식은 유효재령 t 에 재하된 콘크리트의 재령 t' 에서의 크리프 변형율로 나타내며 식 (16)와 같이 표현된다.

$$\epsilon'_{cr}(t, t', t_0) = (1 - \text{Exp}(-0.09(t - t')^{0.6})) \epsilon'_{cr} \quad (16)$$

식 (16)에 사용된 계수들은 식 (17)~(19)로부터 그 값을 얻을 수 있다.

$$\epsilon'_{cr} = \epsilon'_{bc} + \epsilon'_{dk} \quad (17)$$

$$\epsilon'_{bc} = 1.5 \times 10^{-5} (C + W)^{2.0} (W/C)^{2.4} (1nt')^{-0.67} \quad (18)$$

$$\epsilon'_{dk} = 0.0045 (C + W)^{1.4} (W/C)^{4.2} (\ln V/S)^{-2.2} \times (1 - RH/100)^{0.36} (t_i)^{-0.3} \quad (19)$$

여기서, $\epsilon'_{cr}(t, t', t_0)$ = 단위응력당 크리프 계수 ($\times 10^{-4}$), ϵ'_{bc} = 단위응력당 기본 크리프의 최종치 ($\times 10^{-4}$ /kg/cm²), ϵ'_{dk} = 단위응력당 건조 크리프의 최종치 ($\times 10^{-4}$ /kg/cm²), C = 단위 시멘트량(kg/m³), W = 단위 수량(kg/m³), RH = 상대습도(%), t_0 = 건조 개시 재령(일), t = 재하기간 (일), t' = 재하시 재령(일), V = 체적(m³), S = 표면적(cm²)이다.

Table 11 Values used at JSCE-96 equation

| Day | ϵ' | ϵ'_{dk} | C (kg/cm ³) | W (kg/m ³) | RH (%) | RH (cm) |
|-----|-------------|------------------|---------------------------|--------------------------|----------|-----------|
| 7 | 0.3728 | 0.2913 | 393 | 165 | 70 | 3 |
| 28 | 0.2600 | 0.1922 | | | | |
| 90 | 0.2126 | 0.1354 | | | | |
| 180 | 0.1531 | 0.1100 | | | | |
| 365 | 0.1773 | 0.0690 | | | | |

Table 11은 JSCE-96 예측식에 사용된 계수값이다.

JSCE-96 크리프 예측식 (16)에 적용하여 산정한 콘크리트의 재령별 비크리프 예측결과는 Fig. 7으로 나타내었다.

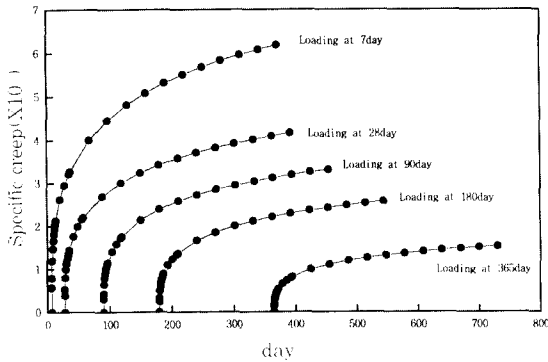


Fig. 7 Specific creep by JSCE-96 equation

4.5 HANSEN 크리프 예측식

유동학적이론과 실험데이터 상수를 포함하는 HANSEN의 비크리프(C)예측식⁽²⁰⁾은 식 (20)과 같다.

$$C = A \left[1 - e^{-\frac{1}{30}(t-t_i)} \right] + B \log_{10} \frac{t}{t_i} \quad (20)$$

여기서, t = 콘크리트의 재령(day), t_i = 하중이 처음 가해진 시간(day)이다.

식 (20)에 필요한 A와 B값은 Fig. 8에서 정의되며 대상 콘크리트의 크리프시험 결과를 이용하여 A값과 B값을 결정하였다. Fig. 8로부터 $A=0.13842$, $B=0.25640$ 이다.

HANSEN 크리프 예측식 (20)에 적용하여 산정한 콘크리트의 재령별 비크리프 예측결과는 Fig. 9로 나타내었다.

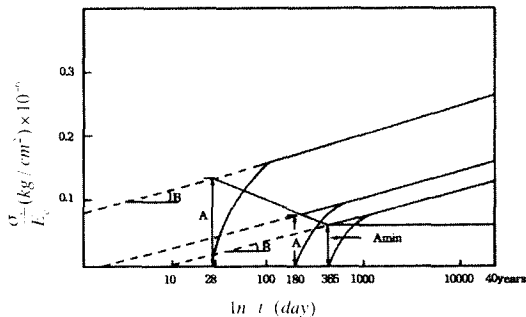


Fig. 8 크리프 곡선

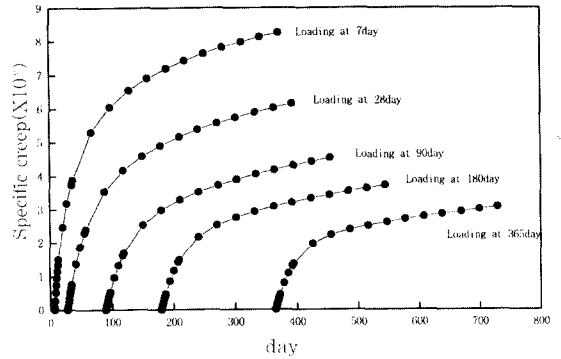


Fig. 9 Specific creep by HANSEN equation

4. 크리프 시험과 예측식과의 비교 및 분석

4.1 크리프 예측식과의 비교

대상 콘크리트의 실험에 의한 비크리프와 각 예측식에 의한 비크리프 예측값을 재하재령에 따라 구분하고 재령별로 비교하여 Fig. 10~14와 같이 나타내었다.

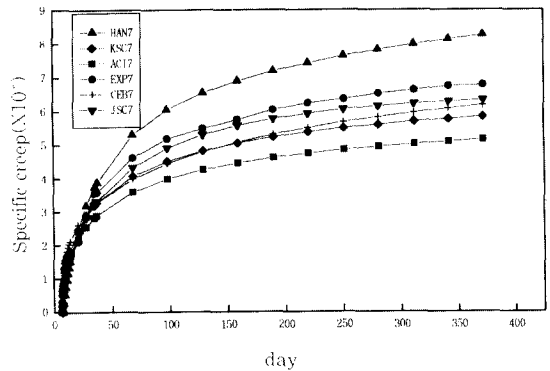


Fig. 10 Specific creep due to loading at 7 days

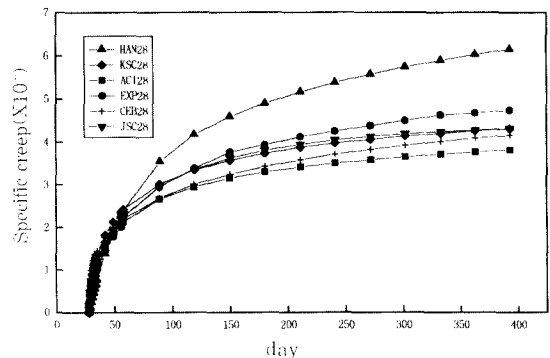


Fig. 11 Specific creep due to loading at 28 days

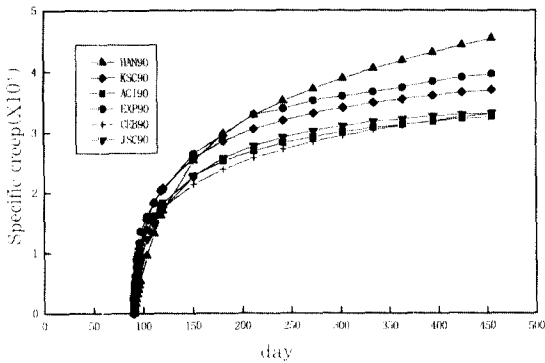


Fig. 12 Specific creep due to loading at 90 days

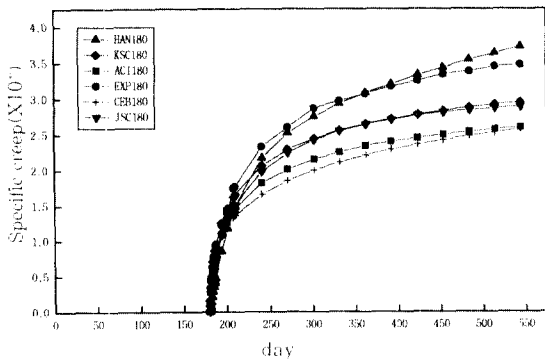


Fig. 13 Specific creep due to loading at 180 days

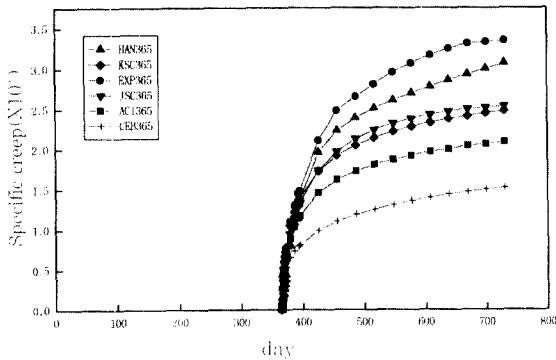


Fig. 14 Specific creep due to loading at 365 days

Table 12 Comparison of specific creep(unit: $\times 10^{-6}$)

| Pre- diction | 7 | | 28 | | 90 | | 180 | | 365 | |
|-----------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| | Predictor | value | Predictor | value | Predictor | value | Predictor | value | Predictor | value |
| KSC-E-96 | 1.81 | 1.86 | 4.37 | 4.37 | 5.77 | 5.77 | 2.90 | 2.95 | 2.28 | 2.34 |
| ACI-209 | 1.76 | 1.76 | 4.31 | 4.31 | 5.70 | 5.70 | 2.86 | 2.91 | 2.29 | 2.33 |
| Exp-EP-96 | 1.78 | 1.78 | 4.36 | 4.36 | 5.73 | 5.73 | 2.87 | 2.92 | 2.31 | 2.35 |
| KSC-E-96 | 1.84 | 1.84 | 4.32 | 4.32 | 5.71 | 5.71 | 2.89 | 2.94 | 2.30 | 2.34 |
| HANSEN | 1.83 | 1.83 | 4.33 | 4.33 | 5.72 | 5.72 | 2.91 | 2.96 | 2.32 | 2.36 |
| Experiment | 1.75 | 1.75 | 4.31 | 4.31 | 5.70 | 5.70 | 2.87 | 2.92 | 2.30 | 2.34 |

Table 12는 재령에 따른 각 예측식에 의한 비크리프 예측값을 실측값을 기준으로 비교하여 나타내었다.

재령별 예측결과를 비교한 결과는 다음과 같다.

1) 기존 예측식과 실측값을 각 재령(7, 28, 90, 180, 365일)별로 비교한 결과 예측값과 실측값 모두 재령에 따라 크리프 변형률이 감소하는 일반적인 경향을 보여주는 것으로 나타났다.

2) 실제값과 비교할 때 재령 90일이내 재하시의 비크리프는 ACI-209식이 가장 작은 값을 예측하였으며, 재령 90일 이후 재하시의 비크리프는 CEB/FIP-90식이 가장 작은 값을 예측하였다. 반면 HANSEN 예측식은 재령 180일 이전 재하시의 비크리프를 실측값보다 크게 예측하였다.

3) 실측값과의 관계로 볼 때 재령 180일까지의 재하시는 KSCB-96 예측식이 가장 실측값과 유사하게 예측하였으며 365일 이후 재하시부터는 HANSEN 예측식이 실측치에 가장 근접하게 예측하였다. 그러나 사용 예측식 모두 365일 이후 재하시부터는 비크리프를 실측값보다 작게 예측하였다.

4.2 대상 콘크리트의 크리프 예측식 제안

원자로 격납구조 콘크리트에 재령 1년후 재하된 경우 연구대상 모든 예측식들이 크리프 변형을 과소평가하므로 대상 콘크리트에 재령 1년후 재하된 경우의 크리프 시험결과(Fig. 14)를 회귀분석하여 재령 1년 이후의 크리프 변형을 예측할 수 있는 예측식(21)을 유도하였다.

$$C = 0.13165 + 0.5314 \ln(t+1) (\times 10^{-6}) \quad (21)$$

여기서 t 는 재령 365일 재하 이후부터의 재령을 의미한다.

5. 결론

원자로 격납구조 콘크리트의 크리프에 대한 연구 결과 얻어진 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 원자로 격납구조 콘크리트의 크리프 특성시험을 시행하였으며, 시험결과 얻어진 크리프 특성을 최근에 개정된 한국 콘크리트 표준시방서의 크리프 예

측식을 포함한 기존의 크리프 예측식에 의한 크리프 특성과 비교하였다. 그 결과로부터 대상 콘크리트의 크리프 특성을 예측할 수 있었다.

(2) 기존 크리프 예측식들의 비교 분석을 통하여 원자로 격납구조 콘크리트의 크리프 변형률은 재령 1년 이전의 콘크리트의 경우 한국 콘크리트 표준시방서의 크리프 예측식으로부터 비교적 잘 추정될 수 있음을 알았고, 연구대상 모든 예측식들은 재령 1년이 후에 작용된 재하조건에 의해 발생하는 크리프 변형률을 실측치보다 과소평가함을 밝혔다.

(3) 원자로 격납구조 콘크리트의 크리프 특성 시험 결과를 회귀분석하여 재령 1년이후에 작용된 재하조건에 의해 발생하는 재령 1년 이상의 대상 콘크리트의 크리프를 유효하게 예측할 수 있는 예측식을 제안하였다.

감사의 글

논문의 심사과정에서 본 논문의 개선에 도움을 주신 심사자에게 진심으로 감사드립니다.

참고 문헌

1. ACI Committe 209, *Predition of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structure*, ACI-SP-76, 1982
2. Bazant, Z. P. and Wittmann, F. H., *Creep and Shrinkage in Concrete Structures*, John Wiley & Sons, NewYork, 1982
3. Bazant, Z. P., "Creep and Shrinkage of Concrete :

- Mathematical Modeling", *4th RILEM International Symposium*, Northwestern Undid., 1986
4. CEP/FIP, *Model Code 1990*, Comite Euro-International du Beton, 1990
5. 日本土木學會編, *콘크리트標準方書(平成8年制定)*, 1996
6. 건설교통부제정, 콘크리트표준시방서, 1996, pp. 8~18
7. Hansen, T. C., *Creep and Stress Relaxation of Concrete*, Swedish Cement and Concrete Research Institution, Stockholm, 1960
8. Hansen, T. C. and Mattock, A. H., "Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete", *J. of ACI*, Vol. 63., 1966 pp. 42~51
9. ASME, *Code for Concrete Reactor Vessels and Containments*, ASME, Section 3, Division 2, 1992
10. ASTM Committee C-9, *Standard Test Method for Creep of Concrete in Compression*, Annual Book of ASTM Sandards, Vol. 04.02., C-512-82, 1983
11. ASTM Committee C-9, *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04. 02., C-469-87a, 1983
12. 阪田憲次·總理院紀·村治, "콘크리트의 크리프·히즈미의豫測式の提案", *日本콘크리트工學年次論文報告集*, Vol. 10-2, 1988 pp. 271~276
13. 阪田憲次, "콘크리트의 乾燥收縮および크리프의 히즈미豫測", *日本콘크리트工學*, Vol. 31, No. 2, 1993 pp. 5~14
14. Sakata, K., "Prediction of Shrinkage and Creep of Concrete", *Concrete Journal*, Vol. 31, No. 2, Feb. 1993 pp. 5~14

요 약

프리스트레스드 콘크리트 구조물인 원자로 격납구조에서 콘크리트의 크리프는 프리스트레스의 가장 큰 시간의존적 손실을 야기하며 격납구조의 설계, 시공 및 유지관리시의 안전성 확보에 매우 중요한 재료특성이다. 본 논문은 원자로 격납구조 콘크리트의 크리프 특성에 관한 연구이다.

본 논문에서는 5종 시멘트로 제조된 원자로 격납구조 콘크리트의 크리프 특성을 알기 위하여 크리프시험을 수행하였다. 또한 최근 개정된 건교부제정 콘크리트 표준시방서와 일본 콘크리트 표준시방서에 의한 크리프 예측식을 포함하여 ACI-209식, CEB/FIP-90식 및 HANSEN식의 적용성을 평가하기 위하여 이

를 예측식들에 의한 크리프 예측결과를 실험결과와 비교하였다.

비교로부터 건교부제정 콘크리트 표준시방서의 크리프 예측식이 다른 비교 대상 크리프 예측식들보다 대상 콘크리트의 크리프치를 비교적 잘 예측함을 알았으며, 1년 이상의 재령에서는 비교대상이 된 모든 예측식들이 크리프 변형을 과소 평가함을 알았다. 한편 실험결과와 회귀분석으로부터 재령 1년이후의 재하 조건에 의해 발생하는 대상 콘크리트의 크리프를 유효하게 예측할 수 있는 예측식을 제안하였다.

(접수일자 : 1997. 4. 22)