

격납건물용 콘크리트의 배합별 Creep 특성

이대수
한국전력공사

요 약

격납건물용 콘크리트는 그 배합이 변경될 때마다 장기거동 특성시험 (크립, 건조수축, 탄성계수, 포아슨비, 열팽창계수 등)을 수행하여 그 시험결과를 설계회사가 텐돈의 인장 작업 전까지 검토하게 되어 있으나, 이 중 크립(Creep)시험은 특성상 장기간이 소요되는 관계로 적시에 시험결과를 제공할 수 없는 경우가 종종 발생한다. 본 연구에서는 이 경우 유사한 배합비를 가진 콘크리트와의 물성치 대비 및 크립 변형율의 예측을 통하여 실험치가 허용치 이내에 드는가를 분석함으로써, 사용된 콘크리트의 크립거동에 대한 안정성을 검토하였다.

1. 개요

1.1 배경

울진 #3, 4호기 기술시방서에는 격납건물용 콘크리트 장기거동특성(크립, 건조수축, 탄성계수, 포아슨비, 열팽창계수 등)의 시험결과가 텐돈의 인장 작업 전까지 확보되어야 한다고 명시하고 있다. 또한, 격납건물용 콘크리트는 그 배합이 변경될 때마다 장기거동 특성시험을 수행하게 되어 있으나, 이 중에서도 크립 특성은 시험의 특성상 장기간 (최소 2년)이 소요되는 관계로 적시에 시험결과를 제공할 수 없는 경우가 종종 발생한다.

울진 #3, 4호기에서는 지금까지 3번의 콘크리트 배합 변경이 있었으나, 첫번째 배합에 대한 크립시험은 텐돈의 인장 작업 전까지 완료될 수 있으나, 그 외의 배합에 대한 시험은 재령 7, 28, 90, 365 일의 시편 중 7일과 28일에 대한 시편이 시험중에 있어, 현실적으로 텐돈 인장작업 전까지 시험결과를 확보할 수 없는 실정이다.

따라서 현재 시험중인 배합비를 사용한 콘크리트가 격납건물에 타설되어 있으므로, 이 콘크리트가 시방서 규정을 만족시키며, 텐돈 인장작업을 계속 수행해도 무방한가에 대한 의문이 제기될 가능성이 있다. 본 연구에서는 이 경우 사용된 콘크리트가 구조 재료적으로 크립거동에 대하여 안정한가에 대한 정량적 검토를 수행하였다. 이를 위하여 콘크리트 배합의 재료적 특성을 상대 비교한 후, 배합변경에 따른 크립 특성치를 분석하였고, 크립변형율을 예측함으로써 배합비 변경이 크립에 미치는 영향은 어떠한가를 추정하였다.

1.2 시방서 및 시험 규정

- 울진 #3, 4 Technical Specification, 9-192-C651, Exhibit D.7.
 - 장기거동 특성시험은 콘크리트 재료나 배합이 변경될 때 시행
 - Creep : 500×10^{-6} in/in $\pm 15\%$

- ASTM C512, Section 7.1

시험의 목적이 서로 다른 콘크리트의 크립 특성을 비교하기 위함이라면 재령 28일의 시편을 사용하고, 만일 주어진 콘크리트의 완전한 크립 특성을 파악하기 위해서라면 재령 2, 7, 28, 90, 365일의 시편에 대한 시험을 수행

2. 배합비 비교

울진 #3, 4호기에 사용되었던 콘크리트 배합은 표 1과 같다.

(Unit : lb/cy)

Mix Type	W/C (%)	S/A (%)	Cement	Water	3/4" Agg.	Sand
GB-0	36	38	831	296	1712	1075
GB-2	41	37	706	288	1789	1051
GB-3	45	38	647	288	1791	1097

표 1. 콘크리트 배합표

세가지 배합을 비교해 보면 잔골재율 (S/A) 및 물, 골재의 양은 거의 유사하나, 단지 시멘트 함량만 줄어들었다. ACI 209, Section 2.6.3에 의하면 시멘트 함량의 변화는 크립 특성에 커다란 영향을 미치지 않고 (물의 양이 일정할 때), 단지 시멘트 함량이 커질수록 크립의 양은 줄어든다고 기술하고 있다. 따라서 표 1의 경우에는, 크립의 진행 양상이 유사하게 발생하며, 크립 변형율이 배합 GB-3에서 제일 크게 나타나리라 예측할 수 있다. 또한, 세가지 배합에 대한 재령 28일 시편의 탄성계수, 포아슨비, 압축강도는 표 2와 같다.

Mix Type	압축강도 (psi)	탄성계수 (psi)	포아슨비
GB-0	6700	3.9×10^6	0.20
GB-2	5600	3.4×10^6	0.21
GB-3	5400	3.3×10^6	0.18

표 2. 재령 28일 시편의 특성치

표 2에서와 같이 시멘트 함량이 가장 큰 GB-0 배합에서 압축강도가 가장 크게 나오는 것은 자명하나, 탄성계수, 포아슨비 등은 커다란 차이가 없어, 근본적으로 세배합이 물성에 있어서 크게 다르지 아니하며, 특히 물성치가 비슷한 GB-2와 GB-3는 유사한 크립거동을 보이리라 예상된다.

3. 배합변경에 따른 크립특성 비교 (재령 28일 및 90일 시편 이용)

배합비가 서로 다른 콘크리트의 크립특성을 비교하기 위하여, ASTM C512 및 US NRC Reg. Guide 1.35.1에 따라 울진 #3,4호기의 세종류 배합 시편과 영광 #3, 4호기 및 월성 #3,4호기의 크립시험 결과치 중에서 재령 28일 및 90일의 비크립 (Specific Creep =

변형율/작용응력)을 비교하여, 크립의 진행양상과 크기를 분석하였다. 그 이유는 시험하중과 실제 구조물에 가해지는 하중이 다르기 때문에 비크립을 비교하는 것이 합리적이기 때문이다.

그림 1에서는 재령 28일 시편의 비크립의 진행양상을 보여주고 있다. 전술한 바와 같이 크립의 발생량은 시험치가 확보된 재하후 약 90일까지는 시멘트 함량이 제일 많은 GB-0에서 제일 작게 나타나며, 특히 GB-2 및 GB-3는 매우 유사한 크립의 진행을 보여주고 있고, 울진 #3, 4호기의 세배합 모두 다 영광 #3, 4호기의 비크립보다 작게 나타나고 있으나 월성 #3,4호기보다는 크게 나타나고 있다.

또한, 크립변형율 예측에 많이 활용되는 ACI 209 방법에 의한 40년후의 크립 변형율을 구해보면 표 3과 같이 커다란 차이를 보이고 있지 않아 세종류의 배합은 크립에 대해서 유사한 거동을 보이리라 예상된다.

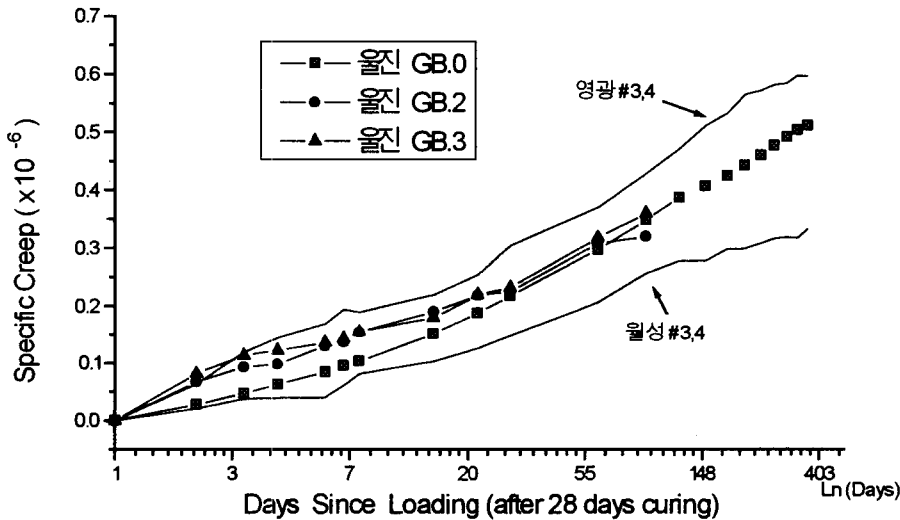


그림 1. 배합비에 따른 비크립 (28일 재령 시편)

Mix Type	40년후 크립 변형율 ($\times 10^{-6}$, in/in)
GB-0	982
GB-2	1019
GB-3	1004

표 3. 40년후의 크립 변형율 (울진 #3, 4호기 28일 재령 시편)

그림 2에서는 90일 시편에 대한 분석결과를 보여주고 있다. 여기에서도 울진 #3,4호기의 경우 시험치가 확보된 재하후 약 30일까지는 GB-0에서 제일 작은 크립이 발생하고 있으나,

전반적으로는 세가지 배합의 경우 매우 유사한 크립 진행을 보이고 있다. 또한 선행호기와 비교할 경우 영광 #3,4 호기와는 유사한 진행 양상을 보이고, 월성 #3, 4 호기보다는 비크립이 크게 나타나고 있다.

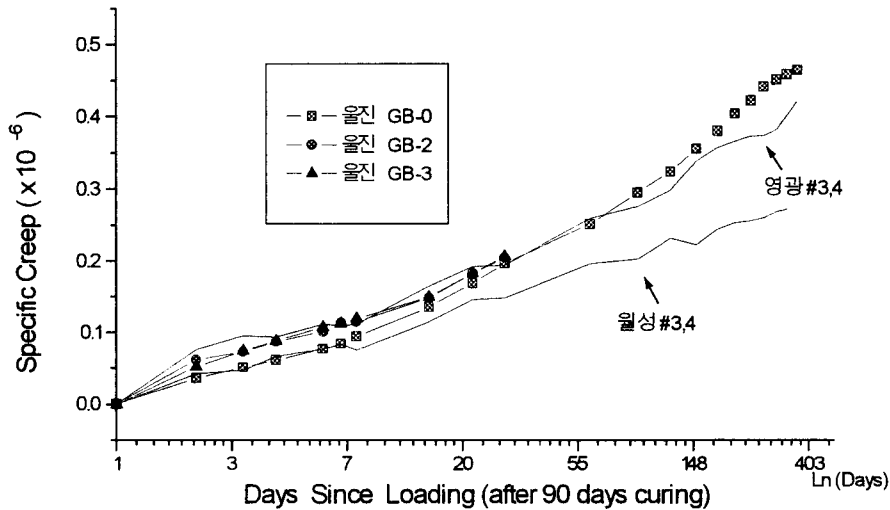


그림 2. 배합비에 따른 비크립 (90일 재령 시편)

28일 시편과 90일 시편을 종합적으로 볼 때, 울진 #3, 4호기의 경우 배합비가 다른 시편이라도 크립의 진행양상은 매우 유사하며, 그 크기도 선행호기의 범위에서 크게 벗어나지 않으므로, 배합변경에 따른 크립에 대한 영향은 현재로서는 미미하다고 판단된다. 그러나 보다 종합적인 판단은 시편에 대한 모든 시험이 끝난 후에 가능할 것임은 자명하다.

4. 40년 후 크립 변형율 예측 (재령 1년 시편 이용)

기술시방서 상의 크립 변형율 허용치 (500×10^{-6}) 는 발전소 설계수명인 40년 후의 격납건물 외벽 콘크리트에서의 크립 변형율을 의미한다고 보여지며, 영광 #3, 4호기의 경우 재령 1.5년의 시편이 실제 시공 조건을 가장 잘 반영한다고 보아 시험치를 회귀분석하여 40년 후의 비크립을 0.5×10^{-6} (in/in/psi) 으로 설정하였으므로 동일 설계인 울진 # 3, 4 호기도 이를 비교 검토의 기준으로 설정하였다.

울진 #3,4 호기의 경우 최고 재령을 1년 까지로 하여 시험 중에 있으므로 현재 이용가능한 시편인 배합 GB-0의 재령 1년인 시험치를 현장 조건에 가장 근접한 시편으로 보아 회귀분석후 (그림 3 참조), 40년 후의 비크립을 예측해 보면 0.21×10^{-6} 이 계산된다.

이 수치는 위에서 기준치로 설정한 0.5×10^{-6} 보다 훨씬 작은 값이며, 또한, 시편에 가해진 하중이 2400 psi 이므로 이 시편에서 발생될 40년 후의 크립 변형율은 $(0.21 \times 10^{-6}) \times 2400 \text{ psi} = 500 \times 10^{-6}$ 으로 산출된다.

이 수치는 실제 콘크리트보다도 보수적으로 취한 시편에 대한 크립변형률으로서 일반적으로 콘크리트의 재령이 커질수록 크립 변형률이 감소한다는 사실과, 실제 격납건물은 무근 콘크리트인 시험시편에 비해 철근과 Tendon으로 구속되어 있으며, 설계상의 여유유도를 감안한다면 실제 콘크리트에서의 크립 변형률은 이보다 더 작게 발생할 것을 예측할 수 있다.

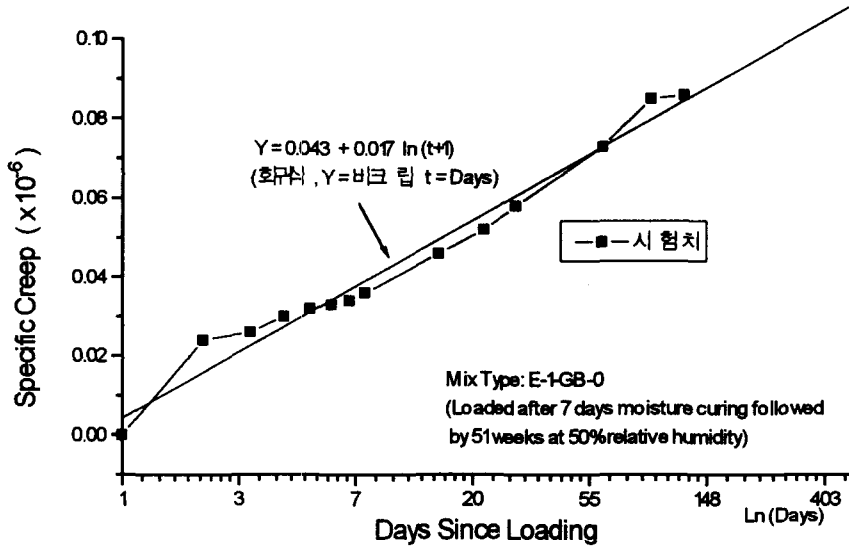


그림 3. 재령 1년 시편의 비크립

또한 상기의 추정치인 0.21×10^{-6} 의 비크립으로 실제 발생될 40년 후의 격납건물 외벽에서의 크립 변형률을 예측해 보면, 격납건물 포스트텐션 계통의 평균 유효응력 (Hoop 방향) 은 약 1600 psi로서 크립 변형률은 $(0.21 \times 10^{-6}) \times 1600 \text{ psi} = 336 \times 10^{-6}$ 이 산출되며, 이 값 역시 기술시방서 기준인 500×10^{-6} 보다 작은 수치이다.

따라서 울진 원자력 #3, 4호기의 경우 실제 콘크리트 구조물에서의 크립 발생량은 기준치 이내로 만족되리라 판단되며, 전술한 바와 같이 세가지 배합의 콘크리트가 유사한 장기거동특성을 가질 것이 예상되고 있으므로, 나머지 두가지 배합 (GB-2, 3)의 재령 1년의 시편에서도 40년 후에는 기준치 이내의 크립이 발생하리라 예측된다.

5. 결론

본 연구에서는 유사한 배합비를 가진 콘크리트와의 물성치 대비 및 크립크기의 예측을 통하여, 크립시험이 완전히 종료되지 않은 콘크리트의 크립변형률이 허용치 이내에 드는 것을 분석함으로써, 사용된 콘크리트의 크립거동에 대한 안정성을 검토하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 배합비 변경에 따른 물성 변화는 기본적으로 미미하여, 콘크리트 장기거동 특성 (크립)에 미치는 영향이 작을 것으로 예측되고, 기준치 이내의 크립 변형율이 발생하리라 예측됨.
- 따라서 배합 GB-0을 기본으로 하여 텐돈 인장작업전에 A/E의 시험결과에 대한 검토를 받아 작업을 진행하고, 추후 모든 시험결과가 나온 후 종합적인 크립 특성치의 비교 검토를 수행하여 설계치의 보완자료로 사용함이 적절하리라 사료됨.
- 현행 기술시방서에는 콘크리트 재료나 배합이 변경될 때마다 장기거동 특성 시험을 수행하도록 명시하고 있으나, 재료나 배합변경은 시공상 필연적이고 그 시험에는 장기간 (최소 2년)이 소요되므로 콘크리트 물성치의 근본적 변화를 일으킬 주요한 변동시에만 시험을 수행하도록 시방서 규정을 개정하는 것이 바람직.
- 또한 기술시방서상의 크립변형율이 500×10^{-6} 이라는 규정은 몇년 후의 변형율인지 혹은 재령 몇년 시편의 변형율인지에 대하여 논란의 여지가 많으므로, 크립 변형율 대신에 비크립을 사용하는 것이 합리적이라 봄 (예: 비크립: 0.5×10^{-6} in/in/psi at 40 years)

6. 참고 문헌

1. ACI 209, " Prediction of Creep"
2. ASTM C512, " Creep of Concrete in Compression"
3. S&L Calculation Report OTS0352, " Evaluation of Shrinkage and Creep Properties YGN 3&4 Long Term Concrete Tests", Dec. 21, 1994
4. S&L Construction Technology Lab, " Final Report on Creep and Concrete Properties Long Term Test Program for KEPCO's YGN 3&4", Jan. 19, 1994
5. E & FN SPON, "Creep and Shrinkage of Concrete", p637-p663
6. US NRC Rg. Guide 1.35.1, " Determining Prestressing Forces for Inspection of Prestressed Concrete Containments", July 1990