

크립의 메카니즘에 대한 고찰

한 만 엽 (아주대학교 토목설계공학과 공학박사)

1. 서론

수많은 이론과 모델들이 크립 현상을 설명하기 위하여 제안되어 왔으나, 아직 완벽한 정설로 널리 받아들여지는 이론은 없다고 할 수 있다. 대개의 이론들이 일부 실험 자료들을 바탕으로 개발된 관계로 처음에는 상당히 타당성이 있다고 생각되던 이론들도 그 이론으로는 설명이 되지 않는 다른 자료들이 나타남으로 해서 이를 보완하는 새로운 이론이 등장하는 과정이 반복되었다.

초기의 크립 이론들은 하나의 메카니즘만으로 크립을 설명하려고 하였으나, 나중에는 몇 개의 이론들을 조합하여 크립을 설명하려는 이론들이 많이 등장하게 되었다. 그러나 이들 크립 이론들은 콘크리트의 크립이 주로 시멘트 페이스트의 성질에 좌우된다는, 그리고 크립의 원천적인 원인이 물에 있다는 점에 대해서는 모두 견해를 같이하고 있다. 크립 실험에 앞서 시편을 공기중의 상대 습도와 평형을 이룰 때까지 건조시키면 크립을 대폭으로 줄일 수 있다는 점과 콘크리트를 완전히 건조시키면 크립을 거의 없앨 수 있다는 점이 그런 결론을 유도하게 된 것이라 할 수 있다. 다만 여러 이론들의 차이점은 수화된 시멘트 페이스트내에서 물이 크립에 어떤 역할을 하는 것인가에 있다고 할 수 있다.

이 글에서는 초기의 크립 이론들을 먼저 설명하고, 후기 크립 이론들의 내용과 장단점 등을 서로 비교하고자 한다.

2. 크립의 초기 이론들

초기 크립 이론으로는

- ① 소성 변형 이론(Plastic Deformation Theory),
- ② 점성 흐름 이론(Viscous Flow Theory),
- ③ 지연 탄성 이론(Delayed Elasticity Theory),
- ④ 젤공극수의 흐름 이론(Seepage of Gel Water),
- ⑤ 불균질 건조수축 이론(Nonuniform Shrinkage),
- ⑥ 미세균열 이론(Microcracking Theory),

등과 같이 외형적인 현상을 묘사하는 이론과,

등과 같은 미세조직의 변화를 분석하는 이론으로 구분된다.

가. 소성 변형 이론

(Plastic Deformation Theory)

이 이론에서는 콘크리트 크립의 원인이 내부 결정들 사이의 미끄러짐과 수화된 시멘트 페이스트나 때로는 골재의 부분적인 파괴에 있다고 설명하는 것이다. 이 이론은 Voigt가 단기간의 콘크리트 크립이 주철이나 다른 취성 금속의 소성 변형과 비슷한 점에 착안하여 제안한 것이다.

소성 변형은 대개의 경우 영구 변형을 남기며, 가해진 응력과 비선형적인 관계가 있고, 응력이 항복점 이상 가해질 때만 발생하는 특징이 있다. 콘크리

트의 크립도 응력 제거 후 완전히 제자리로 돌아가지 않으며, 가해진 응력과 크립이 비선형적인 관계가 있고, 몰탈의 경우에 65psi(4.6kg/cm²) 이상의 응력이 가해져야만 크립이 발생한다는 공통점이 있다. 그러나 크립에 관한 이 임계 응력은 값이 너무 작아 무시할 수 있을 정도이며, 그 존재 여부에 대해서조차 이론의 여지가 있다. 이 임계 응력의 값은 극한 강도의 1% 정도밖에 안되는 것이다. 따라서 이 이론은 콘크리트가 극한 강도에 가까운 하중을 받을 때의 크립을 설명하기에는 적합할지 모르나, 보다 작은 통상적인 하중을 받는 경우에는 이 이론에 의한 설명이 불가능하다.

나. 점성 흐름 이론 (Viscous Flow Theory)

점성 흐름 이론에서는 수화된 시멘트 페이스트를 매우 점성이 높은 액체로 생각하여 콘크리트의 크립을 설명한다. 시멘트의 화학반응에 의하여 결정이 성장하여 뭉쳐지며 점성이 증가하는 액체가, 안정되고 딱딱한 골재를 둘러싸고 있는 것이 콘크리트라 생각하는 것이다.

Thomas는 하중을 받게 되면 시멘트 페이스트의 흐름이 발생하고 이 흐름은 골재에 의하여 구속된다고 설명하였다. 그 결과 골재는 높은 응력을 받게 되고 반면에 시멘트 페이스트에 작용하는 응력은 감소하게 된다. 보통 크립 실험에서 사용하는 응력의 한도내에서는 크립과 작용응력이 거의 선형적인 관계가 있으므로, 응력이 시멘트 페이스트에서부터 안정된 골재로 분산됨으로 해서 크립 증가속도가 점차 감소하게 된다는 것이다.

이 개념은 크립과 보통의 하중 한도내에서의 작용 응력과의 선형적 관계와 시간에 따른 크립 변형의 감소를 잘 설명해 주고 있다. 아울러 이 이론에서는 임계응력이 없는 점과, 고정 변형 하에서의 응력 이완 현상과 크립의 온도에 의한 영향 등을 잘 설명해 주고 있다.

그러나 하중 제거시 변형 회복성이나, 크립 변형시 체적 감소, 그리고 습도에 민감한 크립의 성질 등을 설명하지 못하고 있다. 또한 크립을 등방성 흐름으로 간주하는 가설도 있으나 실험적인 증거를 갖고 있지는 못하다.

다. 지연 탄성 이론(Delayed Elasticity)

이 이론은 수분을 흡착하고 있는 콜로이드 크기의 결정질과 비결정질 입자들이 있는 시멘트 수화물의 결정구조를 고려한 이론으로 지속하중 상태에서 시멘트젤의 거동을 설명한 이론이다. 시멘트젤의 거동은 하중이 가해질 때 탄성거동을 보이는 부분과 점성거동을 보이는 부분이 서로 상호작용을 통하여 복합거동을 함으로써 지연된 탄성거동을 보이는 것이라고 설명하였다.

Freyssinet에 의하여 제안된 지연 탄성 이론은 지속하중에 의하여 시멘트 수화물의 모세공극 구조가 변형됨으로서 내부 응력이 축적되기 때문에 크립이 발생한다고 설명한다. 압축응력이 작용하면 모세관에 변형이 일어나서 모세관내의 수분곡면이 변형되고, 따라서 현재의 수분과 평형을 이루는 응력 상태가 깨져서 표면장력이 줄어드는 상황이 발생하는데, 이것이 가해진 압축응력을 줄이는 역할을 하며 외부에서 가해진 응력과 내부의 응력에 차이가 발생하는 요인이 된다는 것이다. 이 과정에서 수분의 평형상태가 깨지기 때문에 모세공극내의 증기압이 외부의 증기압과 같은 상태가 될 때까지 수분이 증발하게 된다. 또한 수분이 증발하게 되면, 모세관내의 수분에 작용하는 인장력은 증가하여 고체에 작용하는 압축응력과 평형을 이루게 된다. 이 과정 중에 발생하는 변형이 바로 크립이기 때문에 이를 지연 탄성 현상이라 하고, 시멘트 페이스트가 주변 공기와 수분의 증기압이 평형을 이루기 위하여 재배치되는 동안의 시간 지연이 있게 된다.

이 크립 이론은 완전한 가역이 가능하다고 가정하고 있다. 하중을 가할 때나 하중을 제거할 때의 거

동이 모두 탄성적이지만 모세관 내에 유발되는 압력 때문에 지연 현상이 나타나는 것이다. 이 가설은 그러나 물속에서의 크립을 설명하지 못한다. 또한 이 이론의 문제점은 크립에 미치는 다른 여러 가지 요인들의 영향을 적절히 설명하지 못한다는 점이다.

라. 젤공극수의 흐름 이론 (Seepage of Gel Water)

이 이론은 Lynam에 의하여 처음 제안되었는데 수화된 시멘트 페이스트를 수분을 함유한, 팽창이 억제된 상태의 젤로, 젤의 뼈대에 작용하는 응력과 외부 하중과의 평형이 젤공극수의 증기압에 좌우되는 것으로 설명하는 이론이다. 외부 하중이 작용하여 평형상태가 깨지게 되면 주변 공기와 수분을 교환함으로써 새로운 평형을 이루게 되고, 따라서 체적 변화도 동시에 일어나는 것을 크립으로 보는 것이다.

이 이론에서는 외부에 가해진 응력에 의하여 콘크리트 내부의 증기압이 변하게 되고 이에 따라 젤공극에 존재하는 함수량의 변화와 함께 체적 변화가 일어나게 된다고 주장한다. 따라서 크립은 수분의 이동 속도에 좌우되는데, 이는 습도 분포의 기울기, 수분의 방출 조건 등에 좌우되며 이러한 과정을 통하여 고체 입자간의 응력은 증가하고 내부 수분에 가해지는 압력은 감소한다. 압력이 감소하면 수분의 방출 속도가 낮아지면서 서서히 평형 상태에 도달하게 되며 크립도 줄어들게 된다.

크립이 복원되는 과정은 외부 하중이 없어지면서 내부에 발생했던 인위적인 평형상태가 다시 원래의 평형상태로 되돌아가려는데서 발생하는 것이다. 그러나 젤입자들이 가까워졌을 때 새로운 결합 팔이 형성됨으로서 크립이 완전히 제자리로 돌아가지 못하는 부분이 생기게 되는데 이것이 비가역성 크립의 원인이다. 그러나 이 모든 과정 중에 젤공극수만이 절대적인 역할을 하고, 모세공극수나 결정수는 별다른 역할을 하지 못한다.

크립 실험이 시편의 건조에 영향을 받는 이유를 이 젤공극수 침투 이론이 가장 잘 설명하고 있기에 가장 크립을 잘 설명하는 것으로 보인다. 그러나 이 이론으로도 몇가지 설명하지 못하는 현상들이 있다. 공기 중에 건조된 시편을 수중에서 압축 크립 시험을 한 것이 수중에서 양생되고 수중에서 압축 크립이 가해진 시편보다 두배 이상 크게 관측된 것과, 수중에서의 인장 크립과 압축 크립이 거의 비슷한 것도 이 이론으로 설명하기가 어렵다. 젤공극수의 침투이론에 의하면 인장 크립이 더 커야 할 것이다.

수분의 손실이 발생되지 않는 대형 콘크리트 구조물의 내부에서도 크립이 관측되는 것을 이 이론으로는 설명하기가 쉽지 않다. 이 이론에 대한 반론들이 없는 것은 아니지만 수화된 시멘트 페이스트내의 수분의 증발이 크립과 밀접한 관계가 있다는 점에 대해서는 이론의 여지가 없다.

마. 불균질 건조수축 이론 (Nonuniform Shrinkage)

콘크리트내의 불균질한 건조수축이나, 위치에 따라 차이가 있는 것이 콘크리트의 크립을 발생시키는 전적인 또는 부분적인 원인이라는 설이다. Maney는 콘크리트 실린더 실험을 통하여, 지속 하중에 의하여 발생하는 소성 변형이나 크립으로 간주되던 모든 주요한 변형은 불균질한 건조수축에 의한 응력과 변형율이 탄성적으로 재배치되는 현상이라는 결론을 내렸다.

Voigt는 응력-변형도 곡선이 이전의 변화가 많은 응력 이력에 좌우된다는 가정하에 작은 시편의 경우 건조수축이 전단면에 모두 일정하게 분포가 된다 하더라도 하중 재하 상태에서 시간의 경과에 따른 변위는 건조수축이 없는 경우의 변위보다 더 클 것이라 결론지었다. 이런 불균형 건조수축이 응력의 크기를 평균값보다 더 크게 하는 쪽으로 작용한다고 본 것이다.

불균형 건조수축 이론에 관한 여러가지 가정의 타

당성은 매우 심한 비판을 받아왔고, 크립이 아주 높은 응력을 받을 때만 이 불균질 건조수축에 의한 효과가 나타날 수 있는데 이때도 그 기여도는 미미한 것으로 Hansen은 보았다. 이 이론으로는 또한 습기가 크립에 미치는 영향에 대하여 설명하기가 어렵다.

바. 미세균열 이론 (Microcracking Theory)

이것은 크립에 대한 이론이라기 보다는 크립에 영향을 미치는 미세균열의 역할에 관한 가설이라 해야 할 것이다. Hsu는 콘크리트의 응력-변형을 곡선의 비선형성이 골재와 시멘트 페이스트 사이의 경계면 때문이라는 것을 보여주었다. 이 경계면에서 미세균열이 발생하며, 이 미세균열이 증가하기 시작할 때가 응력-변형을 곡선의 선형성의 한계와 일치한다는 것이다. 이 미세균열의 증가가 크립을 빠른 속도로 증가시키는 것이다.

그러나 미세균열은 크립의 증가에 부분적인 기여만 한다는 것을 명심해야 한다. 또한 미세균열에 의한 크립의 증가는 비가역적이다. 미세균열의 발전 정도와 이것이 크립에 미치는 영향은 하중 재하 전부터 존재하는 미세균열의 양에 좌우된다. 일반적으로 콘크리트에 하중이 늦게 가해지면 가해질수록 크립은 줄어든다. 이것은 콘크리트의 강도 증가에 따라 부착강도가 증가하기 때문에 경계면에 존재하는 미세균열이 적어지기 때문이다.

Meyers는 미세균열이 전체 크립 변형의 약 10에서 25% 정도까지 기여하는 것으로 추정하였다. 그러나 극한강도에 가까운 정도의 하중하에서는 미세균열의 발전에 의한 영향이 훨씬 더 커진다.

3. 크립의 메카니즘

프리스트레스트 콘크리트의 사용이나, 고강도 콘크리트의 사용이 증가함에 따라 콘크리트의 크립을

좀 더 정확히 예측할 필요성이 증가하였고, 또 콘크리트 부재의 거동을 제어하기 위하여 크립의 메카니즘에 관한 연구의 필요성이 증가하여서 좀더 발전된 크립의 메카니즘을 규명하기 위한 연구가 아직도 계속되고 있다. 몇가지의 대표적인 가설을 조사하여 그들의 장단점을 비교 분석하였는데, 대부분의 가설들은 서로 유사점이 많다고 할 수 있다.

가. Feldman의 가설

이 가설은 시멘트 수화물에 관한 Feldman과 Sereda의 모델에 기초를 둔 것이다. 이 모델에서는 C-S-H젤이 층구조를 갖고 있으며 그 사이에는 층간수(Interlayer Water)라는 물이 들어차 있는 것으로 설명하였다.

Van Der Waals Force에 의하여 물이 젤의 층 표면에 흡착되어 있다. 이 물은 시료가 건조되면 증발할 수 있는 물이다. 이 층간수의 증발은 수화된 시멘트에 커다란 건조수축을 유발시킨다. 수분의 증발은 두개의 인접한 표면을 서로 끌어당겨 서로의 인력의 영향권내로 들어오게 하여, 이들 사이에 새로운 결합을 형성하게 된다. 이렇게 형성된 결합은 이들 사이에 다시 물이 들어오더라도 끊어지지 않고 남아있기 때문에 비가역성 변형의 원인이 되며, 첫 번째 건조수축 때에 그 값이 가장 크다.

비가역성 크립은 비가역성 건조수축과 거의 유사한 현상으로 다만 기계적인 원인에 의하여 발생되었다는 점만이 다르다. 비가역성 크립은 또한 층구조간의 상대적인 위치 변동이나 이들 사이에 새로 형성되었던 결합 팔의 형성이나 파괴와도 관계가 있다. 가역성 크립은 하중 재하상태에서 수분의 방출과 함께 서서히 분해되는 수화물과 관련이 있는 현상으로, 방출된 수분의 일부가 응력이 제거되면 제자리로 돌아오는 현상이다. 크립에 관한 이 가설은 크립에 영향을 미치는 수분과 수분 이동의 효과를 설명하는데 적절하게 사용될 수 있으며, 온도가 상승했을 때 크립 양이 증가하는 현상도 전단 미끄러

짐, 미세균열 발생, 결합 필의 형성과 끊어짐, 그리고 고체의 변형 등의 과정과 연관된 효과로서 설명할 수 있다. 시간에 따른 크립 속도의 저하도 고체 입자들의 점진적인 결합과 노화에 의한 콘크리트의 안정화의 결과로 설명될 수 있다.

그러나 이 이론은 가역성 크립(Reversible Creep)을 설명하는데는 문제점이 많은데, Feldman은 이 문제를 간과해 버렸다. 또한 광물학적으로는 잘 정의되어 있으나 층간수의 정의도 약간의 문제점이 있다. 수화된 시멘트를 측정할 X선 회절 분석이나 등온흡수선 분석, Moesbauer 효과 등의 측정으로부터 결정된 층간수의 양이 측정 방법에 따라 각기 다른 값을 보여주고 있다. 따라서 층간수를 포함한 시멘트의 미시 구조에 근거를 둔 Feldman의 결론은 의문의 여지가 많다.

나. Powers의 가설

수화된 시멘트 페이스트를 비결정질에 가까운 콜로이드 크기의 - 약간의 좁은 입자도 함유한 - 점착성이 있는 다공성 물질로 간주하였다. 이 콜로이드 크기의 입자들이 서로 아주 가까이 뭉쳐 있어서 이들이 형성하고 있는 공극의 크기가 표면에 흡착되는 물분자의 두께보다 작은 상태를 유지하고 있다고 하였다. 이렇게 좁은 곳에서는 고체 표면에 수분의 흡착이 방해되기 때문에, 이에 상응하는 반대방향의 기계적인 힘이 작용하게 되며, 이렇게 유발된 응력을 이완응력(Disjoining Pressure)이라 한다.

외부 하중이 콘크리트에 가해지면, 이 흡착이 방해된 부분의 층간수에 추가적인 하중이 가해진다. 층간수의 물분자들은 주변의 빈 공극으로 기화하게 되며, 기화된 물분자가 이동하여, 궁극적으로는 대기중으로 방출되게 된다. 표층을 통한 물분자의 이동은 확산에 의한 간접적인 이동을 하게 되는데 우선은 기화된 물분자가 통과해야 할 층간의 공간이 너무 좁기 때문이며, 둘째는 기화된 물분자가 고체표면에 부딪치게 되면 달라붙는 경향이 있기 때문이

다. 이런 과정을 통하여 하중이 가해진 방향으로 점진적인 수축이 일어나며 이 수축에 따라 층간수도 점점 얇아지게 된다. 이 현상을 Powers는 크립이라 설명하였다.

최초 변형시 인접한 표면들이 가까워져 새로운 결합을 형성하게 되면 이들은 다시 제자리로 돌아갈 수 없게 되는데, 이것이 비가역성 크립의 원인이다. 이때 형성된 대부분의 결합은 약하지만 콘크리트가 완전히 포화된 상태가 아니라면 그때의 이완 응력을 견디낼 정도의 강도를 갖고 있다. 물론 어떤 결합은 증가된 이완응력에 의하여 끊어질 수도 있다.

이론적으로 크립은 하중을 받는 층간수에 가해진 응력의 크기에 비례하는데, 단위 면적당 전체 페이스트의 응력이 정해져 있을 때, 하중에 의하여 층간수가 받는 추가적인 응력은 페이스트에서 층간수가 점유하고 있는 면적비가 클수록 작아진다. 이것은 크립이 수화된 페이스트의 밀도에 영향을 받는 것으로 증명된다. 같은 정도로 양생된 페이스트의 경우, 원래의 물-시멘트비가 작을수록, 즉 페이스트의 강도가 클수록 크립이 작아진다. 크립과 강도와의 관계를 밝힌 Neville의 실험결과를 비교해 보면 이런 결론과 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

Powers의 가설은 전반적인 가역성 크립의 메카니즘을 설명해 준다. 그러나 가역성 크립은 전체 크립의 약 1/4 이하이며, 나머지 대부분을 차지하는 비가역성 크립은 단순히 약하게 형성된 화학적 결합에 의하여 이루어졌다고 하기에는 설득력이 약하다.

다. Ali and Kesler의 가설

이 가설은 수분의 이동에 의하여 크립이 발생한다는 가설을 보완, 정립하고, 시멘트 젤의 점탄성(Visco-Elastic) 거동을 동시에 고려한 가설이다. 크립 변형은 응력이 가해졌을 때 부분적으로는 함수량의 변화에 따라 발생하는 건조수축이나 습윤 팽창이 변형된 것이며, 부분적으로는 시멘트 젤의 점탄성 변형에 의한 것이라 설명하였다. Kesler의 설명은

높은 응력이 가해질 때의 크립은 주로 층 구조 사이의 미끄러짐과 층간 결합 팔의 파괴로 인한 것이며, 이 결과 발생한 크립은 가해진 응력에 비하여 비선형으로 증가하게 되고, 비가역성 크립이 된다는 것이다.

흡착된 수분의 이동은 결과적으로 시편의 체적을 감소시키며, 초기 크립의 원인이 된다는 견해이다. 수분이 빈 공간으로 이동하여 새로운 평형상태를 유지하며 콘크리트의 표면에 가까운 곳에서는 주변으로 증발해 버린다. 이런 종류의 크립은 증발된 수분을 다시 받아들일 수 있고, 수분이 증발된 동안 수화반응에 의하여 새로운 결합이 형성되지만 않았다면 가역반응이 된다. 또한 응력이 골재로 전달되는 과정중의 지연현상이 크립에 약간의 기여를 한다고 한다.

비록 건조수축이 크립과 병행될 때에 크립을 상당히 증가시키지만 수분의 이동이 없을 때도 크립이 적은 것은 아니다. 이런 크립은 수분이동과는 무관한 메카니즘에 의한 것이다. 일반적으로 점탄성으로 불리는, 지연 탄성 효과나 층간변형은 앞에서 언급된 대로 수분의 이동없이 크립을 발생시킨다. 이것을 기본 크립이라고 한다. 시멘트 젤의 결정과 비결정 사이의 상호 연관 작용과 흡착된 수분이 일부는 가역성 크립을, 또 일부는 비가역성 크립을 발생시킨다. 흡착된 수분이 전단 변형을 일으킬 때는 체적 변화가 일어나지 않는다. 시멘트 젤의 다공성 구조는 외부하중의 형태와 상관없이 항상 전단력이 작용하는 부분을 발생시키는데, 이러한 공극 구조는 또한 구성성분이 전단변형을 일으키더라도 전체적으로는 체적변화를 일으킬 수 있도록 되어있다. 기본 크립은 콘크리트 구성재료의 체적비, 수화도와 주변 온도에 영향을 받는데, 함수량이 적을 때는 내부에 형성된 상대습도에 따라라도 변화한다.

Powers는 크립 중에 적은 양의 수분이 천천히 이동하는 것은 층간수에 작용하는 응력이 서서히 줄어들기 때문이라고 설명하였고, 이들이 서서히 줄어드는 것은 층간수가 존재하는 공간이 매우 작기 때문

이며, 공간이 작으면 물분자가 고체의 인력이 강하게 작용하는 영향권내에 있기 때문에 고체와 거의 비슷한 성질을 갖게 되기 때문이라고 설명하였다.

라. 활성화 대역 이론

(Activation Spectrum Theory)

크립은 재료의 변화가 어떤 특정한 에너지 경계를 따라 단계적 과정을 거쳐 발생하는 것으로 보는 것이다. Polivka와 Best는 콘크리트의 장기변형이 열역학적으로 활성화된 분자단위의 변형을 통하여 발생한다고 주장하였다. 반응속도를 모델화하는데 Arrhenius의 일반식을 이용함으로써 일정 온도하에서 응력이 일정하게 작용할 때 크립 속도가 시간에 따라 변한다는 것을 보여주었다. 또한 응력이 주어지고 순간적인 재료의 구조적인 상태가 주어진다면, 온도가 급격히 변할 때 크립의 걸보기 활성화에너지의 값을 결정할 수 있음을 보여주었다. 이들의 실험결과가 이들의 주장을 뒷받침 해주며, 적어도 수화된 순수 C₃S의 크립은 열역학적으로 활성화되며, 점성 흐름이던, 증발이던 수분의 이동만으로는 설명될 수 없음을 보여주었다.

활성대역이론의 성패는 하중 재하시 물질의 일반적인 상태, 즉 초기 상태의 정확한 예측에 달려있다. 예를 들면, 초기 크립은 주로 상당히 잘 정의된 활성화에너지인 물의 이동과 연관되어 있는데, 초기 활성화 대역을 알게 되면, 단계적 과정을 통하여 크립 거동을 예측할 뿐 아니라 시간에 따른 물질의 변화가 어떻게 일어나는 가도 예측할 수 있게 된다.

4. 결 론

대부분의 크립 이론들은 어떤 특정 범위의 응력과 온도, 그리고 상대습도의 조건 내에서는 타당성을 갖으나 이 범위밖으로 나가면 맞지 않게 된다. 다만 C-S-H(Calcium Silicate Hydrate) 젤과 공극구조, 시멘트 페이스트내의 수분이 크립의 주요인이라는

점에서는 의견이 일치되고 있다. 응력과 온도와 상대습도 등의 변화에 따른 미시적 관점에서의 시멘트 페이스트의 반응이 거시적인 변형, 즉 콘크리트의 크립이라는 것은 분명하다.

여러가지 크립의 메카니즘들, 즉 고체 입자의 경화와 재결정화, 젤 입자들 사이의 새로운 결합 팔의 형성, 결정내와 결정간의 간격의 축소, 그리고 수화물 층의 상대적인 영구 변형 등은 모두 전통적인 크립 이론인 공극수의 흐름이론과 점탄성이론에 근거를 두고 있다.

크립속도가 시간에 따라 줄어드는 것은, 비록 같은 메카니즘이 계속되는 것 일수도 있지만, 크립의 메카니즘이 바뀌는 증거 일수도 있다. 그러나, 하중이 오래 지속된 뒤에 흡착된 수분층에 무언가 변화가 일어났다고 보는 것이 더 타당한 추론이 될 것이다. 따라서 크립의 느린 장기적인 거동은 수분의 이동이 아닌 다른 이유에 의해서 일어난다고 생각된

다. 다만 증발 가능한 수분이 없다면 장기적 변형은 발생할 수 없다. 이 사실은 또한 점성 흐름이나 젤 입자들 사이의 미끄러짐 설을 뒷받침하게 된다. 점성 흐름 이론은 크립에 대한 온도의 영향과 크립 중비가역성 크립을 잘 설명하고 있다. 균열 전파 이론과 같은 다른 물리적인 메카니즘은 높은 응력을 받는 크립의 경우에 잘 맞는다.

콘크리트의 내부 구조와 물리적인 현상에 대한 지식이 좀더 발전하면 이 복잡한 현상도 좀더 잘 이해가 될 것으로 기대된다. 재료과학의 다른 분야가 발전, 진보하게 되면, 다른 고체의 변형에 대한 여러가지 이론들이 크립 이론에 더해질 것이다.

그러나, 크립 현상은 한가지의 메카니즘으로는 설명될 수 없는 현상일 가능성이 크다. 실제로 주어진 여러 가지 응력과 온도와 상대습도의 조건에 따라 각기 다른 메카니즘이 작용하는 것인지도 모르기 때문이다. ▲

시사 용어 해설

▶ e-무역상사

인터넷을 통해 무역마케팅 능력이 부족한 중소기업을 위해 바이어와의 거래중개, 전자 카탈로그나 오피 등재, 주문 관리 등 계약성사까지 지원 및 계약 이후의 무역업무를 대행하는 인터넷 무역 서비스 제공업체. 국내에서 영업하는 e-무역상사는 3개사(티페이지, EC21, EC플라자)로 자본금은 10억원 이상, 20명 이상의 종업원을 뒤야 한다.

▶ SOC펀드

SOC펀드란 기관이나 개인 투자자로부터 모은 돈으로 도로, 항만, 터널 등 국가기간 시설을 건설한 뒤 도로통행료와 항만사용료 등의 수입을 투자자들에게 배당하는 펀드, 1999년 SOC펀드 설립법안이 제정됐지만 올해 10월말 현재 호주 맥쿼리은행과 한국 신한은행이 합작해 세운 한국도로인프라펀드(KRIF)가 유일한 민간 SOC펀드로 등록돼 있다.