

고강도 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 균열저감제의 영향에 관한 실험적 연구

Ready Mixed Concrete Journal

김도수 (주)트라이포드 기술경영이사 · 공박

길배수 (주)트라이포드 대표이사 · 공박

최세진 (주)삼표 기술연구소 책임연구원 · 공박

이성연 (주)삼표 기술연구소 소장 · 공박

1 서론

최근 선진외국뿐만 아니라 국내에서도 타워팰리스 등 60층 이상의 초고층 철근 콘크리트 구조물이 등장하고 있으며, 중·저층에 있어서도 장스팬을 요구하는 건축 및 토목 구조물이 급증하고 있다. 이러한 구조물에 적용되는 콘크리트의 압축강도는 일반적으로 약 450~500kgf/cm² 수준이며, 100층 이상의 경우 800~1,000kgf/cm² 수준의 초고강도 콘크리트가 건설현장에서 사용되고 있다. 고강도 콘크리트는 고층 구조물에서 매우 효과하게 사용되는 구조재료로서 강도 증가에 따라 많은 하중을 부담할 수 있고 단면이 축소되는 장점이 있어 현재까지 지속적으로 진보되어 왔으며, 이러한 고강도 콘크리트는 선진외국에서 지난 20여년간 급속히 발전하여 왔다.

그러나 이러한 고강도 콘크리트의 역학적 성질은 이미 잘 알려져 있으나, 초기균열의

주요원인이 되는 자기수축 및 건조수축에 의한 균열 혹은 대단위 부재의 적용으로 수화열에 의한 온도균열 등에 대한 대책은 미흡한 실정이다. 이러한 균열 발생은 초기의 높은 설계강도임에도 불구하고 압축강도, 탄성계수, 크리프 등의 역학적 특성의 저하는 물론 중성화에 의한 철근부식, 유해인자의 침투에 의한 열화, 동해 등 내구성의 저하를 초래하여 궁극적으로 구조물의 내구년수를 현저히 감소시키는 주요요인이 되고 있다.

특히, 고강도 콘크리트에서는 단위결합재량의 사용량이 많기 때문에 자기수축, 건조수축 등의 수축요인에 의한 균열발생은 피할 수 없는 것이 현실이다. 이중 자기수축에는 물-시멘트비(단위수량), 시멘트 종류 등이 주요 원인으로 작용되며, 건조수축의 경우에는 물-결합재비, 시멘트 종류 및 분말도, 골재의 성질 및 사용량, 습도, 건조기간, 부재 두께 및 혼화재의 사용량 등이 중요하게 작용한다.

이러한 고강도 콘크리트의 특성상 건조 초

기에 있어서 큰 수축변형을 일으키고, 균열일수가 빠르게 되므로 고강도 콘크리트가 적용되는 초고층 구조물에는 팽창재(주로 CSA계) 및 수축저감제를 사용하여 수축에 의한 균열발생을 억제하거나 지연시키는 방법이 주로 채택되고 있다. 그러나 팽창재 및 수축저감제의 사용에 있어서 시멘트 수화과정에 팽창성 물질을 도입하는 팽창효과에는 한계성이 있으며, 재료물성의 품질이 불균일하고, 시공상 번거로우며 고가의 재료를 적용함에도 불구하고 그 효과가 불분명한 점이 주요 문제점으로 지적되고 있다.

이에 본 연구에서는 콘크리트의 수밀성 증진과 함께 수축저감에 의한 균열억제를 통해 내구성 개선효과를 발휘할 수 있는 액상의 수밀성 균열저감제를 3수준(35MPa, 50MPa, 70MPa)의 고강도 콘크리트 배합에 적용하여 그 효과를 검증함으로써 향후 고강도 콘크리트용 수밀성 균열저감제의 현장적용시 참고 자료를 제시하고자 하였다.

II 실험계획 및 방법

2-1 실험계획

균열저감제의 첨가량은 모르타르를 대상으로 기초물성 및 압축강도, 흡수율 등의 예비시험을 통해 결합재량의 0.5%로 결정하였다.

[표 2] 사용재료의 물리적 성질

구성재료		물리적 성질
시멘트		보통포틀랜드시멘트 밀도 : 3.15g/cm ³ , 분말도 : 3,430cm ² /g
혼화재		플라이애시, 밀도 : 2.22
잔골재	천연모래	제염사 밀도 : 2.58g/cm ³ , 조립율 : 2.50
	부순모래	밀도 : 2.60g/cm ³ , 조립율 : 2.90
굵은골재		부순자갈 밀도 : 2.65g/cm ³ , 조립율 : 6.02
혼화제	감수제	고성능 나프탈렌계 감수제 고성능 폴리카르본산계 감수제
	균열저감제	고강도 콘크리트용 수밀성 균열저감제

[표 1] 콘크리트 배합표

Series	균열저감제 첨가율 (%)	W/B (%)	S/a (%)	FA 대체율 (%)	부순모래 대체율 (%)	단위수량 (kg/m ³)	단위중량 (kg/m ³)				
							C	FA	천연모래 (S)	부순모래 (CS)	G
I (35MPa)	0.0	36	49	15	50	175	413	73	393	397	839
	0.5										
II (50MPa)	0.0	30	49	15	50	175	496	88	372	376	795
	0.5										
III (70MPa)	0.0	23	49	15	50	175	647	114	334	338	714
	0.5										

<목표슬럼프의 조정>

- I : 목표슬럼프 - 21±1cm, 고성능나프탈렌계 감수제 적용(PNS)
- II : 목표슬럼프 - 55±5cm, 고성능폴리카르본산계 감수제 적용(PC)
- III : 목표슬럼프 - 65±5cm, 고성능폴리카르본산계 감수제 적용(PC)

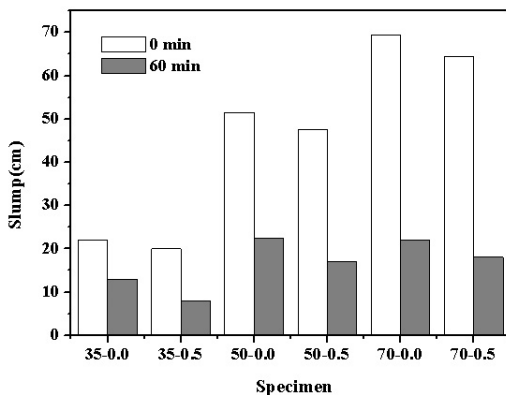
이를 적용한 고강도 콘크리트의 배합조건 및 사용재료의 특성을 각각 [표 1]과 [표 2]에 나타내었다.

III 실험결과 및 고찰

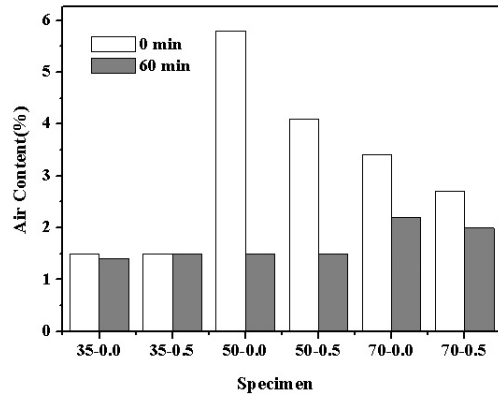
3-1 굳지 않은 콘크리트의 특성

콘크리트의 유동성상 중 균열저감제의 첨가로 인해 초기슬럼프는 다소 저하하였으나 배합강도가 증가됨에 따라 거의 유사한 경향을 보였다. 한편 공기량은 초기에 약간 감소되었으나 큰 변동이 없었으나 균열저감제의 첨가로 초기 슬럼프와 경시변화가 다소 큰 만큼 현장 적용시 고유동화제 혹은 PC계 슬럼프 유지제를 병용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

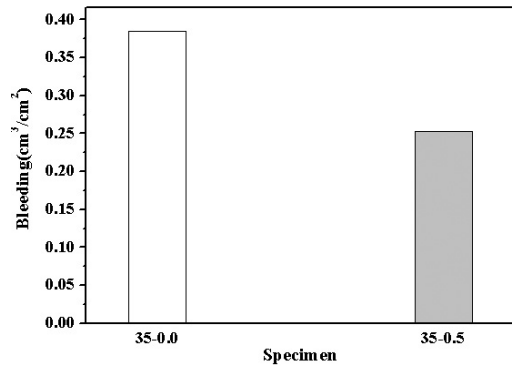
한편, 블리딩의 경우 배합강도 50MPa 및 70MPa의 경우 단위수량에 비해 결합재량이 비교적 많아 균열저감제의 첨가유무에 관계없이 블리딩이 발생하지 않았으나 35MPa에



[그림 1] 콘크리트 슬럼프 변화



[그림 2] 콘크리트 공기량 변화



[그림 3] 콘크리트 블리딩 변화

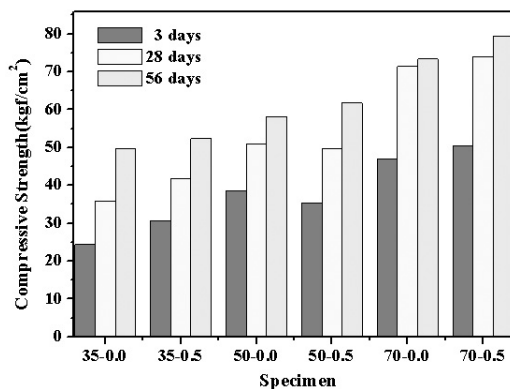
서는 균열저감제의 첨가로 무첨가 콘크리트에 비해 블리딩이 34.2% 저감되는 경향을 보였다. 이는 균열저감제의 초기 슬럼프가 저감되는 특성과 연관이 있는 것으로 균열저감제의 주요성분인 규소-불화물 복합염이 초기 수화반응에서 난용성 금속불화물로 전이되어 초기 컨시스턴시를 저감시켜 소성점도를 증가시키기도 하지만 최밀 충전효과에 의한 수

밀성의 강화를 통해 블리딩이 저감되는 특성도 발휘하는 것으로 판단된다.

3-2 경화 콘크리트의 특성

3-2-1 압축강도

경화 후 콘크리트의 압축강도는 [그림 4]와 같이 50MPa 배합을 제외하고는 전체적으로 균열저감제가 첨가되면서 재령에 관계없이 압축강도가 8~15% 향상되는 것으로 확인되었다. 따라서 균열저감제를 적당량 적용할 경우 유동성상 및 경화성상에는 큰 지장을 주지 않으면서 블리딩이 저감되어 재료분리에 대한 저항성을 향상시키고, 콘크리트 표면에서의 수분 집중현상을 억제하여 경화전 소성수축 및 경화 후 건조수축의 억제에도 기여할 것으로 판단되며, 경화물성 중 가장 기초적인 압축강도도 아울러 개선되는 것으로 판단된다.



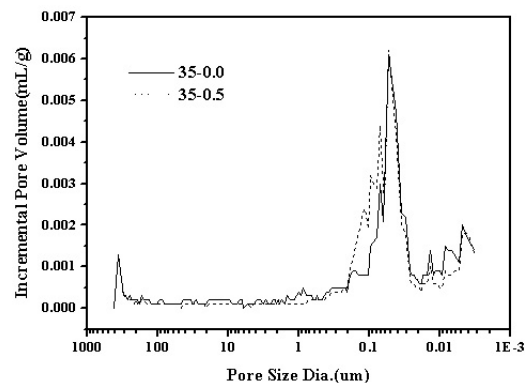
[그림 4] 콘크리트 압축강도 변화

3-2-2 수밀성

균열저감제가 경화 후 콘크리트의 수밀성 변화에 미치는 영향을 미시적으로 파악하기 위하여 수은압입법(Mercury Intrusion Porosimetry, MIP)으로 재령 28일 콘크리트 시험체의 공극분포를 분석하였다. 그림 5와 같이 무첨가 콘크리트와 달리 균열저감제가 첨가된 콘크리트의 공극분포는 난용성 금속불화물의 충전에 의해 거대공극이 감소하고 미세공극이 증가되는 거대공극→미세공극으로 전이되는 현상을 보였다.

이는 균열저감제의 주요성분인 규소-불화물 복합염에서 전이된 난용성 금속불화물에 의해 경화 콘크리트 중 결합부분이 충전되는 효과에 의해 콘크리트 경화조직이 치밀화되어 수밀성이 개선되었음을 나타내는 결과로 판단된다.

한편, 배합강도에 따라 무첨가 콘크리트 및 균열저감제를 0.5% 첨가한 콘크리트의 흡수율 및 투수율을 KS F 4926[콘크리트 혼입용 방수제]의 적용기준에 따라 공인시험기관에 의뢰



[그림 5] 콘크리트의 세공구조 분석(35MPa)

[표 3] 콘크리트 물흡수계수비와 투수비 평가결과

Series	시료명	W/B	균열저감제 첨가율(C×t%)	물흡수 계수비	투수비
I	35MPa-0.0	36	0.0	1.0	1.0
	35MPa-0.5		0.5	0.57	0.54
II	50MPa-0.0	30	0.0	1.0	1.0
	50MPa-0.5		0.5	0.61	0.63
III	70MPa-0.0	23	0.0	1.0	1.0
	70MPa-0.5		0.5	0.78	0.68

고성능 감수제 첨가율 : C×0.5%

하여 평가한 결과를 요약하면 [표 3]과 같다.

균열저감제가 첨가된 콘크리트가 무첨가 콘크리트에 비해 물흡수계수비 및 투수비가 개선되는 것으로 나타났으나 배합강도가 증가될수록 균열저감제의 첨가에 따른 효과는 약간씩 감소하였다. 그러나 35MPa에서는 균열저감제가 0.5%만 첨가되어도 물흡수계수비의 경우 43%, 투수비의 경우 46% 감소되어 수밀성이 크게 향상되는 것으로 확인되었다. 즉, 고강도 배합일수록 결합재의 사용량이 많고, 경화조직이 매우 치밀해지므로 균열

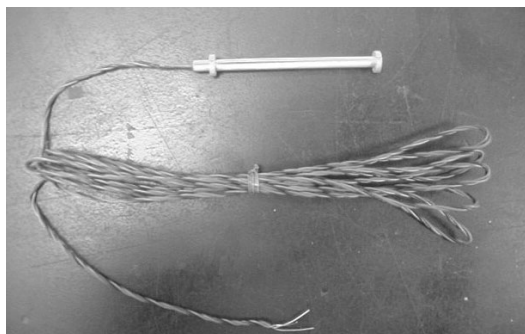
저감제의 첨가 효과와 함께 배합강도에 의한 영향도 크게 작용한 결과 균열저감제의 첨가로 인한 수밀성의 개선효과는 높은 배합강도보다는 낮은 배합강도에서 보다 효과적이었음을 알 수 있었다.

3-2-3 수축-균열특성

배합강도별로 무첨가 콘크리트 및 균열저감제를 0.5% 첨가한 콘크리트를 대상으로 자유(무구속) 및 구속상태에서 수축길이를 평가하였다. 무구속 상태에서의 수축은 KS F 2424[모르타르 및 콘크리트의 길이 변화 시험방법]에서 다이얼게이지 대신 [그림 6]과 같은 매입형 게이지(PMFL-60)를 콘크리트 중앙에 매입하여 200시간까지 평가하였다.

구속수축은 [그림 7]과 같이 JIS 원안[콘크리트의 건조수축균열 시험방법]에서 정한 몰드규격을 사용하여 구속 상태에서 건조수축과 자기수축에 의한 수축 변형율을 측정하였다. 이 때 시험체의 구속은 구속판 및 단부판으로 이루어진 구속기구를 사용하여 구속하였다.

시험체의 제작 및 양생온도는 $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ 로



[그림 6] 콘크리트 자유수축 시험사진

고강도 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 균열저감제의 영향에 관한 실험적 연구



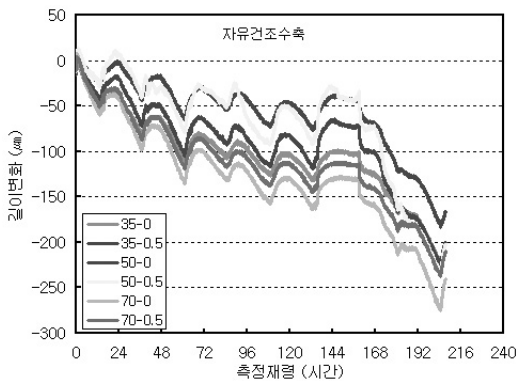
[그림 7] 콘크리트 구속수축 시험사진

하고, 몰드 그대로 7일간 습윤양생한 후 몰드를 제거하고 측정시까지 온도 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 $60 \pm 5\%$ 의 기건양생 하였다. 구속변형율은 시험체 양측면의 직선부 중앙 200mm 이상의 위치에서 계측된 길이를 측정하였으며 측정 시기는 시험체 탈형 직 후(건조개시 시점)에 실시하여 연속적으로 약 40일간 측정하였다.

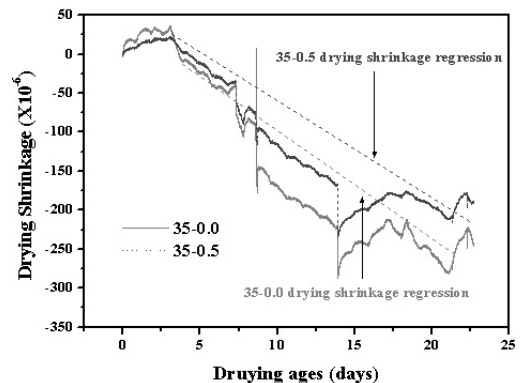
자유수축의 경우 그림 8과 같이 배합강도에 따른 영향보다는 균열저감제의 첨가에 따른 효과에 의해 측정기간 동안 무구속 상태에

서의 수축길이가 모두 저감되는 경향을 보였으며, 특히 배합강도가 상대적으로 낮은 35MPa에서 그 효과가 현저하게 나타났다.

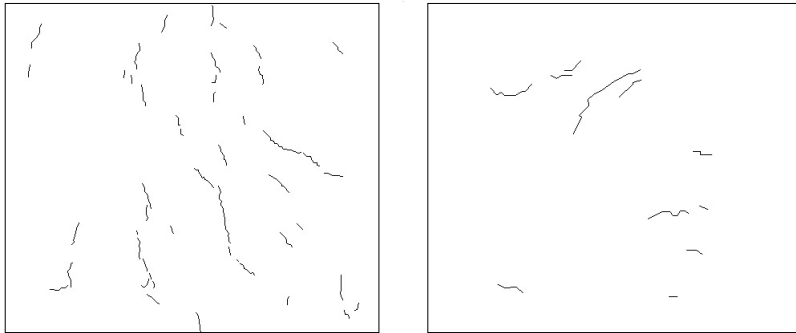
이에 구속수축 시험에서 자유수축에서 가장 큰 차이를 보인 배합강도 35MPa의 콘크리트를 대상으로 구속상태에서의 약 20여일간 수축 길이를 평가한 결과(그림 9)에서도 구속 때문에 자유수축보다는 수축변형이 다소 작게 나타났으나 균열저감제가 첨가된 콘크리트의 수축 길이가 무첨가 콘크리트보다 약



[그림 8] 콘크리트의 자유수축 변화



[그림 9] 콘크리트의 구속수축 변화



[그림 10] 콘크리트의 수축균열 패턴 비교

25% 가량 저감되는 것으로 나타났다.

이를 통해 무구속 및 구속여부에 관계없이 균열저감제의 첨가로 콘크리트의 수축길이 저감되는 특성을 확인하였으며, 이러한 특성으로부터 수축에 따른 수축균열을 억제하는데 효과적일 것으로 판단되었다.

한편, 경화 전·후 콘크리트의 수축균열을 정량적으로 평가하고자 배합강도 35MPa 콘크리트를 비빈 후 굵은 골재를 체분리한 상태에서 100×100×1.5cm의 판상형 몰드를 이용하여 제작하였다. 이 때 조기에 수축균열을 유도하기 위해 시험체 타설 완료 후 30분부터 선풍기를 가동하여 풍속 4.5~5.0m/s의 바람이 부는 환경을 조성하였으며, 경화 전·후 수축이 자유롭도록 시험체 바닥에 비닐막을 설치하여 평가하였다. 또한, 조기에 수축균열을 유도하기 위하여 온도 30~35℃, 상대습도 40% 이하의 환경을 조성하였다. 발생된 균열의 관찰은 시험체를 제작한 후 12시간 간격으로 균열 발생이 뚜렷이 구분된 8주까지 균열 패턴을 트레이싱(tracing)하고, 시험체의 균열 폭, 균열길이 및 균열면적을 측정하여 상호 정량적으로 비교하였다.

평가 결과, [그림 10]과 같이 무첨가 콘크리

(35-0.0)에 비해 균열저감제를 0.5% 첨가한 콘크리트(35-0.5)의 균열개수, 균열면적 및 길이가 최소 52%에서 최대 85%까지 저감되는 것으로 나타났다.

이러한 경향은 전술한 바와 같이 균열저감제의 첨가에 의한 최밀 충전효과로 거대공극, 모세관 공극 등 결함부분이 감소되어 콘크리트의 표면수 및 세공수가 증발되는 과정에서 표면장력이 증가되어 수축응력이 유발되는 현상을 세공구조의 개선(모세관 공극의 감소)과 모세관의 완충효과를 통해 수축을 억제시키는 것으로 판단된다.

IV 결론

고강도 콘크리트 배합에 균열저감제를 적용하여 평가한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 균열저감제의 첨가로 인해 초기 슬럼프는 다소 저하하였으나 과도한 응결 지연은 없었으며, 블리딩이 저감되는 경향을 보였다.
- 2) 압축강도의 경우 균열저감제를 사용한

- 배합에서 무첨가 콘크리트에 비해 약 8~15% 증진되는 결과를 나타내었다.
- 3) 균열저감제를 사용할 경우 물흡수 계수 비 및 투수비가 저감되어 콘크리트의 수밀성을 개선시켰으며, 이는 배합강도가 낮은 영역에서 더욱 두드러졌다.
- 4) 무구속(자유) 및 구속상태에서의 수축이 균열저감제의 첨가로 저감되었으며, 수축저감 효과에 의해 수축균열이 현저히 저감되는 현상을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 1) 정기성 외, 고내구성 콘크리트의 표면 마감성 개선사례, 콘크리트학회지, 공사기사, 2000. 7.
- 2) 김영근 외, 염해를 고려한 콘크리트 구조물의 내구성능설계, 콘크리트학회지, 2000. 7.
- 3) 日本材料學會, コンクリート混和材料ハンドブック, 2004. 4.
- 4) 양동석 외, 해양 철근 콘크리트구조물, 콘크리트학회지, 2001. 9.
- 5) 고경택 외, 해양 콘크리트 구조물의 재료 및 시공, 수리 및 항만 콘크리트 구조물의 신기술 II, 콘크리트학회지, 2004. 11.
- 6) M. H. Grant, Fluorine Chemistry (A Comprehensive Treatment) ; A Wiley Interscience Publication, New York, 1994. pp.83~95.
- 7) V. S. Ramachandran, Concrete Admixture Handbook (Properties, Science, and Technology), 2nd ; Noyes Publication, Ottawa, 1995, pp. 264-266.
- 8) Cement Chemistry, H.F.W. TAYLOR, pp. 199-274
- 9) P. Kumar Mehta, Concrete Structure, Properties, and Materials, Prentice Hall, pp. 17-41.