

콘크리트 균열방지용 혼화재 - 팽창재 Concrete Shrinkage Compensating Admixture



김 송 호*

1. 머리말

콘크리트와 모르타(mortar)는 0.04% 이상의 수축이 일어나면 균열이 발생할 수 있는데, 일반 시멘트를 사용할 경우 콘크리트는 양생후 0.07~0.08% 정도의 수축이 일어난다. 따라서 콘크리트의 가장 큰 단점중의 하나인 균열을 방지하기 위해서는 콘크리트가 수축을 일으키는 만큼 팽창을 일으켜 주는 성분(팽창재)을 첨가하는 방법이 주로 많이 사용된다. ASTM C 845에는 7일 구속 팽창(7 day restrained expansion)의 범위가 0.04~0.10%이고, 28일 구속 팽창이 7일 구속 팽창에 대해 15% 이상을 초과하지 말도록 규정하고 있다. 이렇게 팽창재를 이용하여 균열을 방지하는 방법은 약 50년 전에 고안되었으나, 아직까지도 충분히 활용되지 못하여, 전체 콘크리트의 1% 정도만이 팽창재를 사용하고 있다.

KS 규정에 의하면(KS F 2562-1989) "팽창재란 시멘트 및 물과 함께 혼합하였을 경우 수화반응에 의해 에트링가이트(Ettringite) 또는 수산화칼슘 등을 생성하고 모르타 또는 콘크리트를 팽창시키

는 작용을 하는 혼화재료를 말한다."고 정의하고 있다.

2. 팽창재의 분류

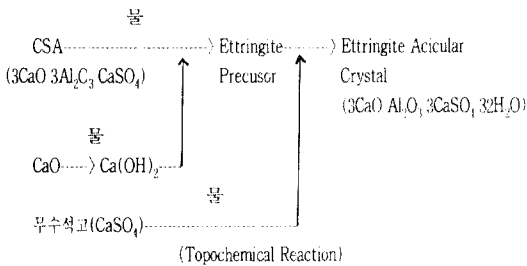
콘크리트 균열방지용 혼화재로는 크게 시멘트 자체에 팽창성분을 첨가한 팽창시멘트(Type K cement 등)와 팽창성분을 별도로 제조하여 차후에 일반시멘트에 적정비율로 혼합 사용할 수 있도록 한 팽창재로 구별된다. 현재는 별도 관리의 어려움, 물류 비용의 증가, 환경변수(기온, 습도 등)와 사용 용도(콘크리트용 또는 모르타용 등) 변화에 따른 팽창성분의 가감 불가 등의 단점으로 인해서 팽창시멘트보다는 팽창재가 널리 사용되고 있는 추세이다.

넓은 의미에서의 팽창재는 (1) 금속 알루미늄 powder 등으로 물과 반응하여 가스를 발생시켜 굳지 않은 콘크리트에 팽창을 일으키는 성분을 포함한 경우, (2) 수화반응중에 팽창을 일으키는 에트링가이트 또는 수산화칼슘 등을 생성시키는 석회(lime) 또는 CSA(calcium sulfoaluminate) 성분을 포함한 경우, (3) 철(Fe) 성분이 있어서 콘크리트가 굳은 다음에 산화반응을 통해 팽창을 일으키는 경우로 나누어 진다. 그러나 일반적으로

* (주)이지콘 대표이사, 공학박사

통용되는 팽창재는 좁은 의미로서 위에 기술된 (2)의 석회 또는 CSA 성분의 혼화재료를 말한다. 앞으로 기술할 팽창재는 좁은 의미의 팽창재에 한한다.

팽창재는 CSA(calcium sulfoaluminate)를 주성분으로 하는 K형, S형, M형(미국토목학회(ACI) 223R-90과 ASTM C 845-90)과 일본에서 주로 개발되고 사용되는 산화칼슘(CaO)을 주성분으로 하는 O형이 있다. K형 팽창재는 대략 30% CAS와 50% 무수석고, 20% CaO로 구성되어 있다. 각 성분의 개략적인 수화반응 기구는 다음과 같다.



S형 팽창재는 알루미늄산3칼슘($3CaO \cdot Al_2O_3$)과 석고의 혼합물이고, M형 팽창재는 알루미늄시멘트(주광물은 $CaO \cdot Al_2O_3$)와 석고의 혼합물로 각각 성분의 수화반응기구는 위의 K형 팽창재와 동일하다. 각 팽창재 화학성분의 예를 표1에 나타내었다.

표 1 각 팽창재의 화학성분(예)

성분	K형 시멘트	K형 팽창재	O형 팽창재
SiO ₂	18.4	1.4	13.1
Al ₂ O ₃	5.8	13.1	2.9
Fe ₂ O ₃	2.8	0.6	2.0
CaO	62.7	47.8	76.9
MgO	4.3	0.5	1.1
SO ₃	5.4	32.2	3.0

3. 팽창재의 용도

(1) 넓은 면적에 이음매 없이 콘크리트나 모르터를 연속 타설할 때

일반적으로 2m×2m 이상의 넓은 면적에 콘크리트를 타설할 경우에는 콘크리트의 수축에 의한 균열을 방지하기 위해 1~5m² 정도의 작은 부분으로 나누어 중간에 신축성을 주는 이음매를 두게 된다. 그러나, 특별한 경우, 예를 들어 부식성이 강하거나 토양에 스며들면 안되는 화학 약품을 취급하는 공장바닥이나, 비행장의 활주로나 유도로 등은 이음매를 둘 수가 없다. 이 경우에 팽창재를 사용하여 수축이 없는 콘크리트를 타설하면 균열이 없으면서도 이음매 없는 바닥을 만들 수 있다.

아파트 등의 바닥에 난방 배관 후 모르터 타설을 할 경우에도 연속 타설을 해야하기 때문에 위에 기술한 동일한 이유로 팽창재를 사용하면 균열을 방지할 수 있다. 바닥미상용 self-leveling 혼화재에 사용하여도 동일한 효과를 얻을 수 있다.

(2) 강제 말뚝 및 강관의 라이닝

콘크리트 2차 제품 중에서 한 번에 강제등 다른 소재를 부착하여 양생하는 경우에는 강제와 콘크리트의 수축율 차이에 의해 휘는 현상이 발생할 소지가 있다. 이 경우에 팽창재를 사용하여 콘크리트의 수축율을 부착된 다른 소재와 맞추어 주면 휘는 현상을 방지할 수 있다.

(2) 충전용 모르터

콘크리트의 보수시에 보수 부위에 충전한 모르터도 수축을 일으키면 균열이 생기고 탈착될 수 있으므로, 팽창 성분을 첨가함으로써 모르터가 제 성능이 발휘될 수 있다. 즉, 기존 콘크리트 위에 콘크리트를 덧 씌우거나 타설하는 경우 두 콘크리트의 일체화, 기계 설치시 양카본트 또는 기계기초와 기초 콘크리트의 일체화, 교량 받침부와 교대 또는 교각과의 일체화등 공극 부분을 충전하여 하중에 대한 내력을 부여하는 곳에 사용된다.

충전용 모르터에는 팽창재외에 유동성 향상과 블리딩 방지를 위한 고성능 감수제나 중점제, 초기팽창을 부여하기 위한 금속알루미늄 분말을 혼합하여 시멘트의 10%정도 사용하고, 필요에 따라서는 소포재 등을 혼합하여 사용한다.

(4) 팽창 콘크리트

수력발전소의 지하 구조물 중 수압철관의 하부 공간에 팽창재를 사용하면 팽창작용에 의해 철관을 주변 암기에 고정시킬 수가 있어서 그라우팅

작업을 줄일 수 있다. 원자로 격납용기의 경우에도 하부 기초구조물의 공극에 팽창 콘크리트 또는 모르터를 충전하면 격납용기와 콘크리트 구조물을 일체화시켜 단단한 구조물을 만들 수 있다. 그 밖에도 일시적으로 구멍을 낸 콘크리트의 공극 충전, 철재파이프 즉 강관 내부 충전, 철재교각의 내부 충전에 의한 보강 등에 응용된다.

(5) 터널

콘크리트 균열시 붕괴 위험이 있는 터널 벽면에 사용된다.

(6) 수영장, 사일로등

수영장, 사일로등은 이음매 없는 연속 타설을 하여야 하므로, 팽창제 사용이 적극 권장되는 응용 분야이다.

4. 팽창제 사용시 유의 사항

(1) 첨가량의 결정

팽창제의 첨가량은 팽창을 일으키는 성분의 함량에 따라 크게 달라지나, 일반적으로 시멘트 함량의 5~15% 정도를 사용한다. 모르터의 경우는 콘크리트에 비해 절반 정도(시멘트 함량 비율 기준)의 팽창제가 사용된다. 팽창제의 수화 반응에 의해 생성되는 에트리카이트 또는 수산화칼슘은 일반 시멘트 광물의 수화물에 비해 강도 발현이 낮고, 과도하게 사용하여 지나치게 체적 팽창이 일어나는 경우에는 수화물 조직에 균열을 발생시켜 강도가 낮아지게 된다.

팽창제의 첨가량은 팽창률 시험 또는 길이 변화 시험을 통해 적정량을 찾아 내어야 한다. 그러나 실제 첨가량은 물-시멘트 비, 콘크리트 타설시의 기온, 습도, 풍속 등의 수분 증발 및 수화 반응 속도에 영향을 미치는 여러 요인을 참고하여 정하여야 한다. 즉, 물 첨가량이 많거나, 수분 증발 속도가 빨라 건조 수축이 많이 발생할 우려가 있을 경우에는 팽창제의 첨가량을 증가시켜야 한다.

(2) 저장 기간

팽창제는 일반 시멘트보다는 흡습성이 강하므로, 저장 기간에 따라 그 성능이 저하되어 저장기간이 길어지면 첨가량도 증가하여야 한다. 대략적으로 30일 경과할 때마다 첨가량을 20~30% 정도

씩 증가시켜야 한다. 하지만, 첨가량의 가감은 팽창제의 풍화상태에 따라 달라지므로, 사용 직전에 팽창시험을 통하여 적정량을 찾아내는 것이 가장 바람직하다.

팽창제는 방수가 잘되는 재질의 포장지로 포장한 후 보관하여야 하며, 건조한 조건하에서 저장되어야 한다. 포대는 사용 직전에 뜯도록 하고, 일단 포장을 뜯은 다음에는 내용물을 가능한 한 모두 사용하도록 하여야 한다. 만약 남겨야 할 경우에는 꼭 줄라 매어서 공기나 습기와 접촉이 되지 않도록 유의하고, 단시일내에 사용하도록 해야 한다. 일단 생산된 제품의 최장 저장기간은 보관 상태에 따라 달라지지만, 보관이 잘 된 상태에서도 9개월 이내이다. 벌크(bulk) 상태로 생산된 팽창제나 팽창제를 혼합하여 만든 벌크 상태의 제품도 밀폐가 잘 된 사이로에 보관하여야 한다.

(3) 첨가 방법

팽창제는 드라이 모르터(dry mortar) 제조시에 시멘트, 모래, 다른 혼화재, 혼화제등과 함께 배합 혼합하여 현장에서 바로 사용할 수 있도록 하는 방법과 현장에서 물과 반죽시에 첨가하는 방법이 있으나, 어느 경우에도 혼합이 충분히 되도록 하여야 한다. 레미콘 트럭에 첨가하여 혼합하는 방법도 생각할 수 있으나, 한국의 레미콘 트럭은 가정식으로 충분한 혼합에 부적합하므로 가급적 피해야 한다.

팽창콘크리트의 비빔시간은 일반콘크리트의 비빔시간보다 약간 길게 하는 것이 좋다. 일반적으로 비빔시간은 KS F 2455 “믹서로 비빈 콘크리트 중의 모르터와 같은 골재량의 변화율(차) 시험방법”에 의해 구한 시간에 가정 믹서의 경우에는 30초 이상, 강제식 믹서의 경우에는 10초 이상을 추가하는 것이 좋다.

여러가지 재료를 콘크리트 혼합기(mixer)에 넣어서 콘크리트를 비비는 경우, 특히 추운 날씨에 뜨거운 물을 혼합수로 사용하는 경우에는 물과 팽창제가 먼저 반응하면 급결이 일어날 수 있으므로, 골재→물→시멘트→팽창제의 순으로 넣어야 된다.

팽창제를 첨가한 콘크리트 또는 모르터의 강도를 저하시키지 않으려면, 팽창제를 첨가한 만큼

모래를 빼주는 것이 좋다. 강도가 조금 저하하여도 크게 상관없는 경우에는 팽창재 첨가량만큼 시멘트량을 줄여주는 것도 가능하다. 팽창재 성분도 수화반응에 의해 어느 정도의 강도 발현을 하지만, 그 정도가 시멘트 광물의 수화물보다는 약하므로 시멘트량을 줄여주는 경우에는 강도가 약간 저하될 수도 있다.

(4) 팽창콘크리트의 배합비

물-시멘트 비가 증가할수록 물이 증발한 후 공극이 많이 생겨서 수축이 많이 일어날 가능성이 크다. 물-시멘트 비가 낮아지면, K형 팽창재의 경우에는 팽창율이 커지고, 압축강도도 커지지만, O형 팽창재는 팽창율이 크게 증가하지 않는다.

부배합의 경우에는 팽창율이 커지고, 시멘트 함량이 낮아지면 팽창율도 감소한다. 일반적으로 원하는 팽창율을 확보하기 위한 최소 시멘트 함량은 $280\text{kg}/\text{m}^3$ 이다.

(5) 양생 온도의 영향

콘크리트와 대기 온도가 올라가면 슬럼프 로스(slump loss)가 커지고, 최종 팽창율이 감소한다. 일반적으로 K형 팽창재의 경우, 상온($18\sim 25^\circ\text{C}$)에서 팽창율이 가장 커진다. 기온이 높아지면(35°C 이상)에트린가이트 형상이 가속화되고, 초기에 팽창율이 커지지만 동시에 강도 발현도 커지므로 전체적으로 팽창율이 작아진다. O형(CaO 계통)의 경우에는 기온에 크게 영향을 받지 않는다. 프리스트레스 콘크리트(prestressed concrete)의 경우에는 기온의 영향이 커진다.

(6) 다른 혼화제와의 적합성(compatibility)

K형 팽창재의 경우에는 감수제를 사용하면 에트린가이트의 형성이 느려질 수 있으므로, 팽창율이 떨어질 수 있다. 지연제나 조강제도 팽창율에 영향을 주는 것으로 보고되고 있다. 상온에서 지연제는 최종 팽창율을 증가시킨다. 그러나 고온인 경우에는 지연제가 고온에 의한 수화반응의 가속화를 막아주므로 통상의 팽창율을 나타낸다.

공기연행제는 팽창율에 크게 영향을 주지 않는다. K형이나 O형 팽창재를 공기연행된 콘크리트에 사용하면 공기량이 증가할 수 있다. 조강제(CaCl_2)는 수축에 부작용을 일으키므로 팽창재와 같이 사용하지 않도록 하여야 한다.

O형 팽창재는 감수제에 의한 팽창율 저하 정도가 K형에 비해 덜하다. O형을 사용하면 수화물 중에 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 증가하므로 응결시간이 길어질 수 있다.

혼화제나 혼화제는 경우에 따라서 팽창재와 같이 사용할 경우 악영향이 나타나는 경우가 있으므로 사용전에 반드시 적합성 시험을 하는 것이 바람직하다.

(7) 골재 종류

골재도 콘크리트의 수축, 팽창에 영향을 줄 수 있다. 팽창재를 사용하면, 탄성계수가 큰 골재를 사용할 경우 팽창율이 커진다.

5. 팽창재를 첨가한 콘크리트의 물성

(1) 물 소요량

동일한 슬럼프를 기준으로 할 때, 팽창재를 사용하면 물이 더 많이 소요된다. 그 이유는 초기에 팽창성분이 수화반응을 통해 에트린가이트를 형성하면서 물을 많이 소모하기 때문이다. 일반적으로 동일 슬럼프를 유지하기 위해서는 보통 포트란트 시멘트 사용시에 비해 물의 양을 약 15% 늘려야 한다. 같은 물(水)량의 경우에 슬럼프 15cm 콘크리트에 팽창재를 첨가하면, 슬럼프는 대략 10cm 정도로 떨어지게 되고, 슬럼프 로스(slump loss)도 커진다.

(2) 블리딩

팽창재를 사용한 콘크리트의 블리딩량은 현저히 감소한다. 위에 언급한 물소요량 증가와 블리딩량의 감소는 모두 수화반응에 의한 에트린가이트 형성과 관련이 있다.

(3) 공기량

적정량의 팽창재를 사용하면 콘크리트에 연행 공기를 추가로 발생시키지 않는다. 과다한 양이 사용되면 공기가 연행될 수도 있다. 팽창재 성분은 별도로 투입되는 공기 연행제에는 큰 영향을 주지 않는다.

(4) 강도

팽창재를 적정량 사용하면, 휨강도등 물성이 향상될 수 있다. 팽창재 성분의 수화반응에 의해 생성되는 에트린가이트가 시멘트의 주요 수화 생성

물에 비해 강도발현이 낮으므로, 팽창재 첨가량 만큼 시멘트 함량을 줄이면 압축 강도가 저하되게 된다. 그러나, 시멘트의 감량 없이 팽창재를 추가로 첨가하면 압축강도는 증가한다. 예를 들어, 28일 압축강도 기준으로 약 25% 증가한다. 단, 팽창재를 과다 투여하면 자유 팽창(free expansion)에 의해 압축강도가 현저히 감소될 우려가 있다.

(5) 내구성

팽창재를 사용하면 콘크리트 조직이 치밀해지므로 내구성이 증가한다. 물-시멘트 비가 0.5의 경우에 투수율이 1/3로 감소하고, 표면 마모율도 절반 정도로 줄어든다.

6. 팽창 콘크리트의 시공

콘크리트의 팽창은 양생온도, 건조 속도에 따라 달라지므로, 콘크리트의 습윤상태를 유지하고, 직사광선, 급격한 건조, 냉기에의 접촉을 피하여야 한다. 특히, 콘크리트 표면에서의 수분 증발 속도가 블리딩 속도보다 빠를 때에는 건조 수축에 의한 균열이 발생할 염려가 크다고 알려져 있다. ACI 305 분과 위원회의 기술보고서에 따르면, 수분 증발 속도가 $1\text{kg}/\text{m}^2/\text{h}$ 이상이 되는 대기 조건하에서는 시공에 각별히 주의하여야 한다고 보고하고 있다. 콘크리트 표면에서의 과다한 수분 증발을 막기 위하여 노출면은 콘크리트가 경화한 후 5일 이상 다음 방법에 의해 항상 습윤상태에서 양생이 되도록 하여야 한다.

(1) 일정 시간마다 표면에 살수한다.

(2) 양생매트를 덮고, 양생기간중 양생매트를 습윤상태로 유지시킨다.

(3) 시트류를 덮는다.

(4) 표면 양생제로 처리한다.

팽창 콘크리트는 통상의 콘크리트와의 달리 강도 확보와 동시에 팽창율을 확보하는 것이 중요하므로 거푸집 설치기간은 이를 고려하여 결정하여야 한다. 일반적으로 초기에 수화반응에 필요한 물이 건조로 인해 없어지는 것을 방지하기 위해, 거푸집의 설치기간을 평균 외부온도가 20°C 미만일 때는 5일 이상, 20°C 이상일 때는 3일 이상으로 하여야 한다.

참 고 문 헌

1. Fu, Y., P. Xie, P. Gu, and J.J. Beaudoin, "Characteristics of Shrinkage Compensating Expansive Cement Coating a Pre-Hydrated High Alumina Cement-Based Expansive Additive," *Cement and Concrete Research*, 24(2), 1994, pp.267-276.
2. Mailvaganam, N.P., "Miscellaneous Admixtures", *Concrete Admixtures Handbook-Properties, Science, and Technology*, edited by V.S. Ramachandran, Noyes Publications, New Jersey, 1984, pp.498-506.
3. Mailvaganam, N.P., S. Nunes, and R. Bhagrath, "Expansive Admixtures in Structural Grout," *Concrete International*(October 1993), pp.38-43.
4. Neville, A., "Whither Expansive Cement?," *Concrete International*(September 1994), pp. 34-35.
5. Senbetta, E. and M.A. Bury, "Control of Plastic Shrinkage Cracking in Cold Weather," *Chemical Admixtures*(ACI Compilation 23), pp. 25-29.
6. 변단주 편저, "혼화재료", 한국레미콘공업협회, 1990. □