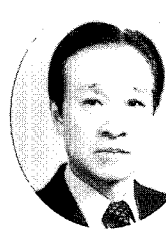


특 집

|| 최신 혼화재료 ||

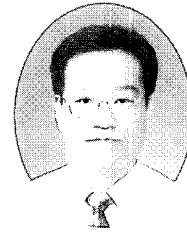
혼화재료의 활용현황 및 전망

- The Present State and Future of Concrete Admixtures -



문한영*

Moon, Han Young



최재진**

Choi, Jae Jin

1. 머리말

콘크리트는 시멘트, 골재, 혼화재료(混和材料) 및 물로 구성된 복합재료로서 사람이 만든 인공재료 가운데 가장 많은 양을 차지한다고 해도 과언이 아니다. 특히, 콘크리트용 구성재료 중 한 성분으로 사용되는 혼화재료의 주된 활용목적은 다음과 같이 정리할 수 있겠다.

- 콘크리트 또는 모르타르의 물리·화학적 성능향상 및 개선
- 시멘트 원료의 대체에 따른 자원 및 에너지 절약
- 자원절약에 따른 환경파괴의 감소 및 환경보전
- 에너지 절약에 따른 온난화 가스 배출저감
- 콘크리트 제조원가의 절감에 따른 경제성

위에서 알 수 있듯이 혼화재료는 콘크리트 제조 시 없어서는 안 될 구성성분으로 그 정의에 대하여, Dictionary of Concrete¹⁾에서는 "A material, other than aggregate, cement and water, added to concrete during mixing to modify one or more of its properties in the fresh or hardened states" 라 표현하였으며, 일본 콘크리트 용어사전²⁾에 의하면, "혼화재료는 시멘트, 물 및 골재 이외의 재료로서 믹

싱 시에 필요에 따라 콘크리트나 모르타르 등에 혼합하는 재료를 말하며, 굳지 않은 콘크리트 또는 경화한 콘크리트에 소량의 성능을 부여하거나, 경제적인 콘크리트를 제조하기 위하여 사용된다."라고 정의하고 있다.

ASTM C 125에서는 혼화재료를 광물질혼화제(mineral admixtures)와 함께 화학혼화제(chemical admixtures)로 분류하고 있으며, 화학혼화제는 ASTM C 260, C 494 및 C 1017 등에서 정의, 종류 및 성능에 대하여 규정하고 있다.

우리나라에서는 혼화재료 중에서 사용량이 비교적 적어 콘크리트의 배합계산에서 그 부피를 무시해도 좋은 경우를 혼화제(混和劑)라 하며, 사용량이 비교적 많아 콘크리트의 배합계산에 고려해야 하는 경우를 혼화재(混和材)로 구분하고 있다.

長瀧³⁾은 혼화재를 mineral admixtures, cementitious materials 또는 additives로 표기하였으며, Young 등⁴⁾은 mineral admixtures를 ① pozzolanic materials ② cementitious materials ③ non-reactive materials 이라고 하는 세 개의 카테고리 분류하고, 카테고리 ①, ②는 supplementary cementing material, 카테고리 ③은 석회석 분말, 실리카 분말 등과 같은 비반응성의 미분말 재료들로 구분하였다.

본고에서는 우리나라에서 주로 널리 사용되고 있는 콘크리트용 혼화재료를 중심으로 활용현황, 효과 및 사용상의 주의사항 등과 아울러 향후의 전망에 대해서 기술하였다.

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 천안공업대학 토목과 교수

2. 혼화재료의 활용현황

2.1 광물질혼화재

2.1.1 고로슬래그 미분말

1862년에 독일의 E. Langen에 의해 고로슬래그의 잠재수경성이 발견되고 1880년대 후반부터 구미에서 슬래그시멘트가 상업화되기 시작하였다⁵⁾. 그러나 고로슬래그 미분말이 콘크리트용 혼화재로 사용되기 시작한 것은 1950년대 이후라고 할 수 있으며 혼화재로서의 규격은 1980년대에 들어서 오스트리아, 미국, 캐나다 및 영국에서 제정되었다.

우리나라에서 고로슬래그 미분말을 혼화재로 콘크리트에 사용하기 시작한 것은 1990년대 중반으로 인천공항, 부산 광안대교 등의 건설에 이용되었다. 현재는 레디믹스트 콘크리트 공장에서 고로슬래그 미분말을 사용하는 경우, 시멘트에 대해 15 ~ 25%의 범위에서 계절별, 배합강도에 따라 치환하여 사용하고 있다.⁶⁾

〈표 1〉은 2000년도의 우리나라 슬래그 처리현황을 나타낸 것이다. 제철·제강 공정 중에 부산물로 발생된 슬래그량은 고로슬래그 820만 톤과 제강슬래그 640만 톤을 합하여 약 1,500만 톤 정도이었다⁷⁾. 2001년의 경우 고로슬래그는 포틀랜드시멘트의 증량재, 고로슬래그시멘트 및 콘크리트 혼화재용으로 각각 130만 톤, 290만 톤 및 120톤을 합하여 모두 540만 톤 정도가 사용되었다⁸⁾. 이와 같은 용도로는 급냉슬래그가 사용되는데 현재 고로슬래그의 발생량 중 약 70% 정도가 급냉슬래그로 만들어지고 있고 30% 정도는 서냉슬래그로서 만들어지고 있다.

KS L 5201(포틀랜드시멘트)에서는 증량의 5% 이하의 범위에서 고로슬래그 미분말과 플라이 애쉬 등을 포틀랜드시멘트의 증량제로서 사용할 수 있도록 허용하고 있고, KS L 5210(고로슬래그시멘트)에서는 고로슬래그시멘트 증량의 25 ~ 65%의 범위에서 고로슬래그를 혼합하도록 하고 있다.

고로슬래그 미분말에 관한 우리나라의 규격과 지침으로는 1997년에 제정된 KS F 2563(콘크리트용 고로슬래그 미분말) 및 1995년 대한토목학회에서 마련한 「고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 설계시공지침(안)」이 있다.

KS F 2563에서는 고로슬래그 미분말의 비표면적 범위를

표 1. 2000년 슬래그의 주요용도별 처리내역⁷⁾

구분	고로슬래그(톤, %)		제강슬래그(톤, %)	
시멘트 원료	5,272,190	64.3	468,584	7.4
도로용 골재	1,436,092	17.5	990,486	15.6
성토용 골재	793,515	9.7	3,605,324	56.6
토양 개량재	522,928	6.4		
규산질 비료	167,908	2.0		
공정 재사용	6,000	0.1	1,124,225	17.7
지급 회수			20,052	0.3
벽돌용 골재			154,570	2.4
미끄럼방지용			2,177	0.0
계	8,198,633	100.0	6,365,418	100.0

3,000 ~ 5,000 cm²/g, 5,000 ~ 7,000 cm²/g 및 7,000 ~ 10,000 cm²/g으로 나누고 각각을 고로슬래그 미분말 1종, 2종 및 3종으로 부르고 있는데 현재 시판되고 있는 고로슬래그 미분말은 비표면적 4,000 ~ 4,500 cm²/g 정도의 것이 주류를 이루고 있다.

한편 KS F 4009(레디믹스트 콘크리트)가 2003년 2월에 고로슬래그 미분말을 비롯한 KS에 규격화된 모든 혼화재료를 레디믹스트 콘크리트에 사용할 수 있도록 개정안이 확정됨에 따라 고로슬래그 미분말의 사용이 더욱 폭넓게 이루어질 전망이다.

2.1.2 플라이 애쉬

플라이 애쉬는 1948년에서 1953년 사이 미국에서 건설된 Hungry Horse 댐에서 콘크리트용 혼화재로 처음 사용한 이후 세계적으로 고로슬래그 미분말과 더불어 가장 널리 사용되는 대표적인 혼화재가 되었다.

플라이 애쉬는 화력발전소에서 미분탄을 연소할 때 배출되는 석탄회의 일부로서 바텀 애쉬(bottom ash) 및 신더 애쉬(cinder ash)와 함께 부산물로 생산된다. 바텀 애쉬는 보일러 연소실 바닥에서 얻는 것으로 덩어리 또는 모래상태(1 ~ 10 mm)로서 석탄회의 약 5 ~ 15%를 차지한다. 이것은 내부에 기공이 있어 취약하고 활성이 적기 때문에 매립용으로 사용된다. 신더 애쉬는 보일러에 부착된 절탄기(節炭器), 공기에열기의 호퍼에서 회수한 것으로 0.1 mm 이하이고 미립분도 많이 포함되어 있다.

굴뚝의 전기 집진기에서 포집한 플라이 애쉬는 미립분으로 석탄회의 85 ~ 90%를 차지하며, 입자의 크기가 작지만 0.1 mm 정도의 크기도 포함된다.

회수된 플라이 애쉬와 신더 애쉬는 혼화재, 시멘트 제조용 점토 대체재료 등으로 이용되는데 사용목적에 적합한 세립으로 조정하기 위해 통상은 양자를 함께 혼합시켜 사이클론에 의해 조립분과 세립분으로 분급한다. 일반적으로 플라이 애쉬라 하는 것은 이렇게 하여 얻어진 세립분이다.⁹⁾

석탄을 사용하는 우리나라의 11개 화력발전소의 현황을 보면 2001년 기준으로 보령, 삼천포, 태안, 하동, 당진, 호남 등 6개의 화력발전소는 외국에서 수입한 유연탄을 사용하고 있고 서천, 연동, 영월, 군산, 당진 등 5개의 화력발전소에서는 국내에서 생산된 무연탄을 사용하고 있는데 무연탄을 사용한 발전소에서 나오는 석탄회는 콘크리트용 혼화재로서는 활용이 어려워 주로 시멘트 원료로 사용되고 있고 유연탄을 사용하는 곳의 플라이 애쉬만을 콘크리트용 혼화재로 사용하고 있다.

유연탄을 사용하고 있는 6개 화력발전소에서 2001년도에 사용한 석탄의 양은 3,800만 톤이었으며 그 양의 약 10%인 365만 톤의 석탄회가 생산되었다. 이 석탄회 중 66% 정도가 레디믹스트 콘크리트용 혼화재로서 활용되었는데⁸⁾ 현재 우리나라의 레디믹스트 공장에서는 플라이 애쉬를 혼화재로 사용하는 경우 시멘트 증량의 10% 범위 내에서 대체 사용하고 있는 것으로 파악되고 있다.

2.1.3 실리카 폼

실리카 폼은 제강용(製鋼用)의 탈산(脫酸)제로 사용되는 페로 실리콘 합금이나 실리콘 금속 등의 규소합금을 전기로에서 제조할 때 발생하는 폐가스를 집진하여 얻어지는 산업부산물의 총칭이다.

실리카 폼의 주요 생산국가는 소련, 미국, 노르웨이, 브라질 등이며 이를 콘크리트에 활용하기 위한 연구는 1950년 노르웨이에서 처음 시도되었다. 그러나 당시는 실리카 폼을 혼합함으로써 콘크리트의 워커빌리티가 급격히 저하되는 문제점이 있었기 때문에 실용화되지 못하다가 1960년대말의 고성능감수제의 개발과 더불어 그 효용성이 입증되어 현재는 고강도 콘크리트용 혼화제로서 그 가치를 크게 인정받고 있다. 현재 실리카 폼은 전세계의 연간 생산량이 160만 톤 정도에 지나지 않으며³⁾ 국내에서는 생산되고 있지 않아 고가로 매입하여 사용할 수밖에 없는 것이 우리의 실정이다.

콘크리트용 혼화제로서 실리카 폼에 대한 규격은 1978년 노르웨이에서 처음 제정되었다. 일본에서도 2000년에 JIS 6207 (콘크리트용 실리카 폼)을 제정하였으며, SiO₂ 85% 이상, 비표면적 15m²/g 이상 및 강열감량 5% 이하 등의 품질규정을 두고 있다.³⁾

실리카 폼은 고강도 콘크리트의 제조에 필수적인 재료로 알려져 있으며, 80MPa 정도를 넘는 콘크리트에서는 실리카 폼을 시멘트의 5~10% 대체하여 사용하는 예가 많다.¹⁰⁾

최근 국내에서도 대형 건축 구조물의 건설에 실리카 폼이 상당량 사용된 예가 있으며, 고강도 또는 초고강도 콘크리트의 수요가 점차 증가하고 있어 실리카 폼의 활용에 대한 활발한 연구와 더불어 혼화제로서의 실리카 폼에 대한 규격도 마련할 필요가 있다고 생각된다.

2.2 화학혼화제

2.2.1 AE제, 감수제 및 AE감수제

화학혼화제는 1930년대 후반 AE제가 발견되고 1944년 ASTM에 AE포틀랜드시멘트의 표준 모르타르 시험방법이 제정된 이후 크게 발전하였다.

AE제는 초기에는 공기를 연행시키는 시멘트로 개발이 이루어졌으나 수지를 첨가시켜 만든 AE시멘트는 사용재료와 혼합조건이 조금만 차이가 있어도 공기량이 변화하기 쉽기 때문에 그 후 콘크리트를 혼합할 때 혼합수에 희석하여 사용하는 AE제로 발전하였다.⁵⁾ 국내에서는 1970년대부터 수입한 AE제가 사용되기 시작하였는데 현재는 거의 국내에서 생산된 원료에 의해 AE제가 제조되고 있다.

감수제는 1960년대 후반 국내에 소개되었으며 1970년대부터 수입된 리그닌계의 감수제가 사용되었다. 현재 국내에서 사용하고 있는 감수제의 시장 점유비율은 대략 리그닌계 70%, 나프탈린계 20% 그리고 유기산계 10% 정도인 것으로 추정되며, 감

수제의 원료로서 나프탈린 성분은 국내에서 생산된 것이 사용되고 있고, 리그닌은 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다.

우리나라에서는 1985년에 KS F 4009(레디믹스트 콘크리트)에서 보통콘크리트 중의 공기량을 4%(현재는 4.5%)로 규정함으로써 AE제의 사용을 간접적으로 의무화한 이후 감수제의 기능을 함께 가지는 AE감수제의 사용이 보편화되어 왔다.

콘크리트용 화학혼화제에 대한 규격으로는 KS F 2560이 있으며 이 규격에서는 그 종류를 AE제, 감수제(표준형, 지연형, 촉진형), AE감수제(표준형, 지연형, 촉진형) 및 고성능 AE감수제(표준형, 지연형)로 분류하여 각각의 품질규정을 두고 있다.

2.2.2 고성능 AE감수제

1960년대 말에 새로운 나프탈린설폰산포르말린축합물 또는 멜라민설폰산포르말린축합물로 이루어진 고성능 감수제가 개발되었다. 이 고성능 감수제는 감수효과가 사용량에 비례하여 증대되며 콘크리트의 응결을 지연시키지 않는 등의 특성이 있어 유동화 콘크리트나 고강도 콘크리트의 제조에 널리 사용되고 있다.

우리나라에서는 1980년대 중반부터 PC파일의 제조에 고성능 감수제를 사용하기 시작하였으며 현재는 국내에서 그 원료가 생산되고 있는 나프탈린계의 고성능 감수제가 주류를 이루고 있다. 그러나 고성능 감수제는 높은 감수성능에 의해 콘크리트의 고강도화에 크게 기여하고 있는 반면 슬럼프 손실이 크다는 결점이 있어 운반시간을 필요로 하는 레디믹스트 콘크리트 공장에서의 사용에는 큰 걸림돌이 되어 왔다.

이러한 문제를 해결한 혼화제로서 1980년대 중반에 고성능 AE 감수제가 개발되었으며 국내에서도 몇 년 전부터 생산을 시작하였다. 고성능 AE감수제는 높은 감수특성을 가지며 60~90분의 운반시간에도 안정된 슬럼프 유지성능을 가지기 때문에 레디믹스트 콘크리트를 제조하는 배치 플랜트에서의 사용이 가능해졌고 단위수량이 적은 고내구성 콘크리트의 제조 및 자기충전성으로 재료분리가 적은 고유동 콘크리트의 제조 등에도 이용되고 있다.

고성능 AE감수제는 성능이 우수한 재료이지만 아직 품질의 개선이 필요한데 그것은 고성능 AE감수제의 성능이 시멘트의 종류, 골재, 배합, 혼합방법, 콘크리트 온도 등의 영향을 크게 받는 경향이 있기 때문이다. 현재는 고베라이트시멘트용, 고강도용, 고유동용 또는 표준형, 지연형 등과 같이 요구성능과 사용조건에 맞는 제품을 개별적으로 준비하여 시판하고 있다.

3. 혼화재료의 역할 및 사용상 주의사항

3.1 광물질혼화제

3.1.1 고로슬래그 미분말

고로슬래그 미분말을 혼화제로서 사용하였을 때의 효과는 수화

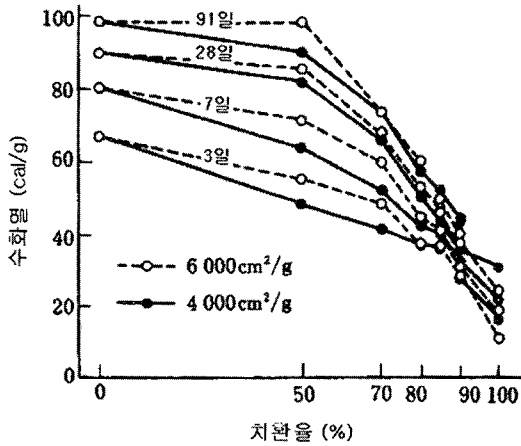


그림 1. 고로슬래그 미분말의 치환율·분말도와수화열의 관계¹¹⁾

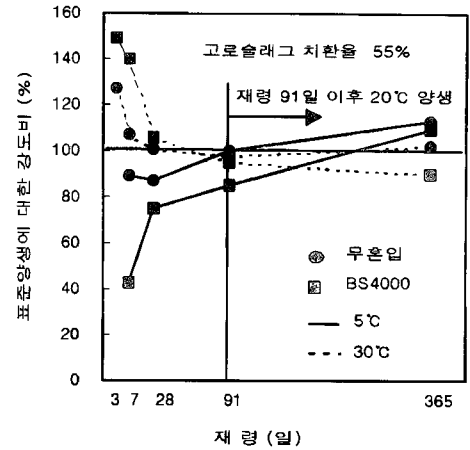


그림 2. 양생온도가 콘크리트 압축강도에 미치는 영향¹²⁾

열 저감, 잠재수경성에 의한 장기강도의 증진 및 해양콘크리트에서 Cl⁻ 이온의 침투억제효과 등이며 알칼리골재반응의 억제효과도 인정되고 있는데 그 효과는 고로슬래그 미분말의 분말도, 사용량 및 석고 첨가여부 등에 따라 다르다.

고로슬래그의 분말도가 높을수록 전체 재령에서의 강도발현이 증가한다. 그리고 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 표준양생강도는 치환율이 클수록 초기강도가 저하하며 석고를 첨가한 것은 약간 초기강도가 개선된다.

〈그림 1〉은 수화열을 측정된 결과의 예이다. 고로슬래그 미분말을 다량으로(70% 이상) 사용하면 수화열을 줄일 수 있지만 고로슬래그 미분말의 대체율 30% 정도에서는 수화열이 거의 줄어들지 않는 등 발열특성이 사용량이나 분말도에 따라 다르게 나타난다. 한편 양생온도가 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향은 고로슬래그 미분말을 사용하지 않은 콘크리트보다 현저하다. 〈그림 2〉의 실험결과를 보면 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 고로슬래그 미분말을 사용하지 않은 콘크리트에 비하여 저온양생에서 강도가 크게 저하됨을 알 수 있다. 특히 이 경향은 분말도가 낮을수록 또 치환율이 높을수록 크게 나타난다.

이와 같이 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 콘크리트의 온도 및 양생온도의 영향을 크게 받으며 저온에서는 장기에 걸쳐 강도발현이 좋지 않다. 따라서 치기시의 콘크리트 온도는 10°C 이상이어야 하며, 양생기간 중에는 콘크리트의 표면온도를 10°C 이상 유지시키는 것이 중요하다.

3.1.2 플라이 애쉬

플라이 애쉬 중에는 콘크리트의 내구성을 저하시키거나 장기의 강도발현이 보이지 않으며 팽창하는 것이 있다. 또 원탄 및 연소조건 등에 따라 화학성분과 미연소탄소량이 다르며 입자표면에서의 유기산화제의 흡착특성과 입경분포 등 품질변동이 발생할 수 있기 때문에 사용할 때 주의가 필요하다.

미연소탄소량이 많은 플라이 애쉬는 거친 입자의 함유비율이 높아서 단위수량을 증가시키는 경우가 있으며, AE콘크리트의 경우 플라이 애쉬 중의 미연소탄소에 AE제가 우선적으로 흡착되어 AE제의 사용량이 현저히 증가되거나 공기량 관리가 어렵게 된다.

현재 외국에서 수입된 유연탄을 사용하고 있는 화력발전소에서 나오는 플라이 애쉬는 대부분 KS L 5405(플라이 애쉬)에서 제한하고 있는 강열감량 5% 이하를 유지하고 있는 것으로 보인다. 이들 화력발전소에서 부산물로 생산된 플라이 애쉬는 원심분리기 등으로 가공처리하는 시설을 갖춘 업체를 통해 유통되며, 이 처리에 의해 플라이 애쉬 속에 포함되어 있는 조립자가 제거된다. 그러나 원심분리기에 의한 미연소탄소의 제거효과는 그다지 크지 않아 그 제거량은 1~1.5%를 넘지 않는 것으로 알려져 있다.

최근 외국에서는 플라이 애쉬를 사용한 콘크리트용의 AE제가 개발되어 보급되고 있다. 〈그림 3〉은 표준형의 AE감수제를 사용한 콘크리트에 있어서 플라이 애쉬 치환율과 AE제 사용량의 관계를 실험한 예이다. AE제를 구성하는 성분의 차이가 흡착량 즉, 사용량의 차로서 나타난다. 현재 미연소탄소의 영향을 적게 받는 플라이 애쉬용의 AE제로서는 고알칼리카르본산계 음이온 성분과 비이온계 성분을 병용한 것 등이 시판되고 있다.

3.1.3 실리카 폼

실리카 폼은 비표면적이 20~25 m²/g 정도이고, 평균입경이

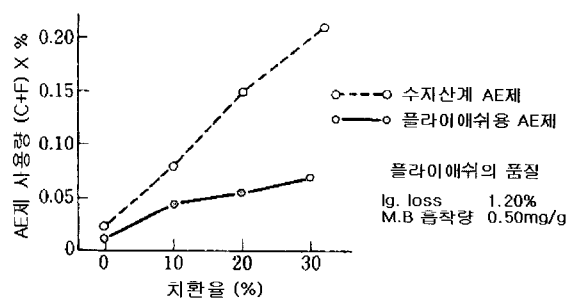


그림 3. 플라이 애쉬 치환율과 AE제 사용량의 관계¹³⁾

0.1 μm 정도인 초미립자로 이산화규소(SiO₂) 함유율 90% 이상의 비결정질 물질이다. 이 물질은 시멘트 수화에서 생성되는 수산화칼슘과 강력한 포졸란 반응을 하며 미세한 실리카 폼 입자가 시멘트 입자 사이에 충전되는 미세 충전제(micro filler) 효과에 의해 초기재령부터 콘크리트의 세공구조를 치밀하게 하고 강도를 증진시킨다. 또 적절히 양생시키면 내구성이 향상되며 특히 염화물 이온 침투저항성, 수밀성 등이 현저히 개선된다. 반면 실리카 폼은 초미립자이기 때문에 응집하기 쉽고 수산화칼슘 용액 중에서 급속히 용해하여 실리카가 풍부한 겔 층을 만들어 콘크리트의 슬럼프가 작아지므로 고성능 감수제를 반드시 사용하여야 한다. 그리고 초기에 포졸란 반응을 나타내기 때문에 특히 초기부터 충분한 양생을 실시할 필요가 있다.

또한 실리카 폼을 첨가하면 콘크리트의 자기수축변형이 크게 되는 경향이 있으며 특히 낮은 물-시멘트비에서 현저한 변형을 나타낼 수 있기 때문에 이에 대한 충분한 고려가 필요하다.¹⁴⁾

3.2 화학혼화제

3.2.1 화학혼화제의 과량 투입 및 시멘트 성분과의 상관성

감수제는 과다하게 사용하면 응결, 경화가 현저하게 지연되며 강도가 저하된다. 또 AE제나 AE감수제는 공기포의 과잉 연행으로 강도저하가 보다 크게 나타난다. 실제로 혼화제를 물로 희석하는 과정에서 실수로 혼화제의 농도가 높아졌거나 계량밸브의 고장으로 과량 투입되는 사례가 종종 발생하기 때문에 혼화제의 계량관리에 특별한 주의가 필요하다. 그러나 시멘트 중에 석고가 적게 들어가 SO₃ 성분이 적게 되면 감수제를 과다하게 사용하지 않더라도 콘크리트의 응결이 현저하게 지연될 수 있다.

터널공사에서 있었던 사례로 리그던계 감수제를 사용한 콘크리트에서 시멘트 중의 SO₃ 성분이 1.6%일 때는 콘크리트의 응결이 크게 지연되었으나 SO₃가 2%인 시멘트를 사용했을 때는 정

상적으로 경화된 예가 있다. 또 시멘트 중의 SO₃ 함유량이 1.0% 정도 이하로 되면 감수제를 사용하지 않은 콘크리트일지라도 응결이 크게 지연된다고 한다.¹⁵⁾

〈그림 4〉는 지연형 감수제의 사용량과 시멘트 중의 SO₃ 함유량에 따른 콘크리트 종결시간의 측정 예이다. 이 그림에서 지연형 감수제를 사용한 경우 시멘트 중의 SO₃ 함유량이 적을수록 콘크리트의 종결은 지연되며 특히 SO₃가 1.1%인 경우를 보면 지연형 감수제가 표준사용량보다 다소 많이 사용된 경우에도 콘크리트의 응결시간이 극심하게 지연되어 심각한 문제가 야기될 수 있음을 보여준다.

한편 저열시멘트와 3성분계 시멘트 등 각종 특수시멘트가 개발되어 현재 사용되고 있고 또 각종 산업부산물인 사용된 시멘트가 제조되고 있어 미량성분 등 시멘트의 성분에 차이가 발생하고 있다. 이러한 상황 속에서 시멘트의 미량성분과 각종 화학혼화제와의 상호작용에 대해 모든 것이 명확히 밝혀졌다고 할 수 없는 상황이며 예기치 못한 문제도 발생할 가능성이 있다. 따라서 새로이 개발된 시멘트와 혼화제의 상호작용에 대한 연구검토가 계속적으로 이루어져야 하며 또 시멘트 업체와 혼화재료 업체간의 정보교환도 필요하다.¹⁶⁾

3.2.2 화학혼화제의 혼용

콘크리트를 혼합할 때 화학혼화제를 2종류 이상 사용할 경우가 있다. 예로서 별도로 구입한 AE제와 감수제를 함께 투입하여 콘크리트를 비비는 경우가 있고, AE감수제를 사용하여 베이스 콘크리트를 비빈 다음 다시 유동화제를 투입하여 혼합한 유동화 콘크리트가 있다. 또 수중불분리성 콘크리트를 만들 때는 수중불분리성 혼화제와 감수제, AE감수제 또는 유동화제를 병용하여 사용하는 경우가 많다.

〈표 2〉는 통상 사용되고 있는 수중불분리성 혼화제와 유동화제의 조합을 나타낸 것이다.

표 2 수중불분리성 혼화제와 유동화제의 조합

수중불분리성 혼화제	유동화제
셀룰로스계	· 멜라민설폰산염계
아크릴계	· 나프탈린설폰산염계
	· 멜라민설폰산염계(트리아진계)
	· 아크릴계
	· 폴리카르본산계

2종류 이상의 혼화제를 혼용하는 경우 서로 용해되지 않는 경우가 있는데, 감수제로 사용되는 리그던설폰산칼슘염과 AE제로 사용되는 수지비누(빈졸)는 혼합시키면 침전물이 발생된다.

〈표 3〉은 고성능 감수제와 AE감수제를 함께 사용하였을 때 콘크리트에서 이상응결이나 빠른 슬럼프의 저하가 생기는 등 문제 발생 여부를 나타낸 것이다. 특히 폴리카르본산계의 고성능 감수제는 나프탈린계나 멜라민계의 감수제와 함께 사용해서는 안

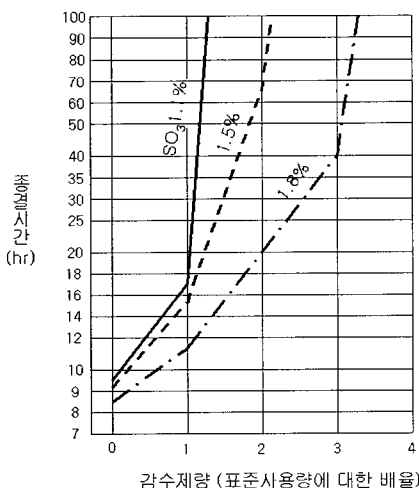


그림 4. 지연형 감수제의 사용량에 따른 콘크리트 종결시간의 변화¹⁵⁾

표 3. 화학혼화제간의 적합성 여부

주성분	리그닌계	나프탈린계	멜라민계	폴리카르본산계
리그닌계	-	○	○	○
나프탈린계	○	-	△	×
멜라민계	○	△	-	×
폴리카르본산계	○	×	×	-

○ : 문제 없음, △ : 주의 필요, × : 문제 있음

되는 것으로 알려져 있다.

한편 고유동 콘크리트의 재료분리를 방지하는 기술로 다량의 무기질 미분체를 사용하는 방법, 분리저감제를 사용하는 방법 및 고미분체와 함께 분리저감제를 사용하는 방법이 있다. 분리저감제의 종류로 셀룰로오스계, 아크릴계, 천연다당류폴리머계가 실용화되고 있지만 이들 분리저감제와 고성능 AE감수제의 상호작용이 문제점으로 지적되는 경우가 있다.

〈그림 5〉는 그 일례로 셀룰로오스계의 분리저감제는 폴리카르본산계의 고성능 AE감수제와는 문제가 없지만 나프탈린계와는 서로 맞지 않음을 보여준다. 그러나 천연다당류폴리머계는 폴리카르본산계, 나프탈린계와 모두 병용하여 사용할 수 있는 것으로 알려져 있다.

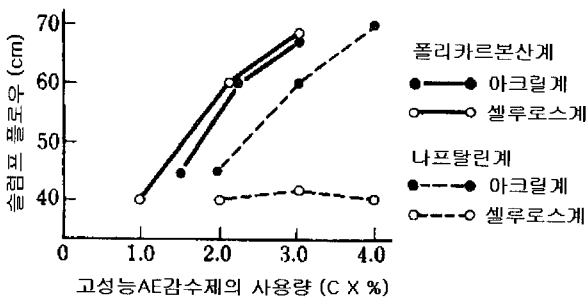


그림 5. 고성능 AE감수제의 사용량에 미치는 분리저감제의 영향¹³⁾

4. 혼화재료의 전망

최근, 우리나라에서도 경제규모가 크게 성장하는데 따른 대형 국책사업의 추진과 초고층 건축구조물의 수요증대에 의해 콘크리트의 고품질화, 고성능화 및 고내구성화가 요구되고 있는 추세에 있다. 따라서 콘크리트의 적용 범위의 확대와 요구성능의 다양화에 대처한 우수한 성능을 가진 혼화재료의 개발 및 발전이 필요 불가결한 시기로 생각된다.

4.1 광물질혼화제

광물질혼화제는 콘크리트의 고품질화를 위해 그 역할이 크게 기대되며 또 소성공정이 필요하지 않아 이산화탄소의 발생이 없으므로 지구환경보존과 자원 리사이클링의 측면에서도 중요한 의미가 있다. 따라서 Malhotra 등¹⁷⁾은 가까운 장래에 포졸란 재료나 유

사 시멘트질 재료(cementitious material)를 사용하지 않는 콘크리트 배합은 예외적으로 다루어질 것이라는 전망을 하고 있어 광물질혼화제의 사용이 더욱 더 보편화될 것으로 예측하고 있다.

광물질혼화제 별로 최근의 연구동향을 살펴보면 고로슬래그 미분말의 경우, 비표면적을 크게 하면 반응속도가 빨라지는 특성을 이용하기 위하여 비표면적 10,000 cm²/g을 초과하는 초미분말의 활용성 등에 대한 연구가 이루어지고 있으며 석고의 첨가 등 초기수화의 활성화를 위한 기술개발이 진행되고 있다¹⁸⁾. 그러나 고로슬래그 미분말은 CaO를 다량 함유하고 있기 때문에 포틀랜드시멘트 또는 SiO₂와 같은 성분을 조정하고 오토클레이브 양생을 실시하여 양질의 시멘트 경화체를 얻기 위한 연구 등이 요구된다 하겠다.

고로슬래그 미분말은 철강산업의 부산물인 슬래그를 급냉시켜 비결정질화 한 수쇄슬래그를 분쇄한 것이 주류를 이루었으나, 최근 들어 고로냉슬래그를 분쇄한 고로슬래그 미분말의 이용에 관한 연구도 시도되고 있다. 특히 고로냉슬래그를 분쇄계의 고유동 콘크리트에 사용하였을 때 유동성 유지 효과가 우수하며 강도발현과 단열온도상승량 및 자기수축 등의 측면에서 좋은 실험 결과가 발표됨으로써 혼화제로서의 활용이 기대된다.¹⁹⁾

플라이 애쉬의 성능을 높이하고자 하는 연구도 활발히 진행되고 있으며, 한 예로서 플라이 애쉬를 체나 특수한 장치를 사용하여 분급하여 입경이 작은 양질의 플라이 애쉬를 혼화제로 사용하거나, 플라이 애쉬를 전기로 등에서 용융시켜 고품질의 규산질 초미분말을 제조하여 사용하는 방안 등을 들 수 있다.

또한 플라이 애쉬 중에 유리석회 포함될 경우 장기강도가 발현되지 않는 문제점이 야기될 뿐만 아니라 팽창하는 경우가 발생하므로 대량의 플라이 애쉬 사용을 전제로 탄산가스를 사용하여 플라이 애쉬를 중화시키는 연구도 진행되고 있다. 그리고 플라이 애쉬는 오토클레이브 양생을 하는 콘크리트에의 활용이 기대되기 때문에 오토클레이브용 플라이 애쉬 품질의 평가방법 등에 대한 연구가 필요하다.¹⁰⁾

한편, 실리카 폼은 활성이 높은 초미분말로서 콘크리트의 압축강도 200 MPa 정도의 초고강도 콘크리트 제조 시 필요불가결하며, 탄소섬유 등으로 보강한다면 철골구조물의 대체재료로 사용할 수 있을 것으로 보인다. 그러나 이러한 초고강도 콘크리트의 실용화에 있어서는 투기성, 투수성의 개선, 내구성의 향상을 위한 방법 등의 연구와 더불어 믹싱 및 타설방법의 개선에 의해 짧은 시간의 타설 간격에도 이음이 발생하는 문제점 등을 해결해야 하는 숙제가 남아있다.

4.2 화학혼화제

현재 국내에서 가장 많이 사용되는 화학혼화제는 감수제와 AE제 성분을 같이 한 AE감수제이며 앞으로도 이 상황은 계속될

것으로 보인다. 다만 사용되는 시멘트나 광물질혼화제의 종류 및 기온 등에 따라 혼화제의 효과 면에서 차이가 생기므로 새로운 광물질혼화제의 사용과 환경조건에 맞는 혼화제의 품질개선이 이루어져야 한다. AE감수제 가운데는 바다모래나 부순모래를 사용한 시멘트량이 적은 빈배합 콘크리트의 펌프압송성 개선 및 재료 분리의 방지효과가 있는 제품의 개발과 RCD, RCCP 등 특수한 시공법에 따라 필요한 성능을 가지는 혼화제의 개발이 진행 중이거나 상당한 진전을 보이고 있다.²⁰⁾

참고로 일본에 있어서 1992년부터 1998년 사이의 연도별 고성능 AE감수제 제품수의 추이를 나타낸 것이 <표 4>이다.

표 4. 일본에서의 고성능 AE감수제 판매 추이²¹⁾

고성능 AE감수제	1992년	1993년	1994년	1995년	1998년
나프탈린계	19	19	19	16	14
폴리카르본산계	15	17	19	25	36
아미노설폰산계	4	4	6	7	7
멜라민계	4	8	7	7	5
총 제품수	42	48	51	55	62

<표 4>에서 알 수 있듯이 초기에는 나프탈린계의 고성능 AE감수제가 가장 많았으나 그 후 이것이 약간 감소한 반면, 적은 사용량에도 불구하고 우수한 감수효과를 나타내는 장점을 가진 폴리카르본산계가 2배 이상의 신장률을 나타내고 있으며 이러한 현상은 새로운 제품이 탄생하기까지는 당분간 지속될 것으로 예상된다.

폴리카르본산계 고성능 AE감수제의 개발로 고성능 감수제의 유동성 손실이 큰 문제를 상당히 해결했다고 볼 수 있다. 그러나 아직 온도 또는 콘크리트 재료의 품질의 변화에 따른 콘크리트의 성능이 변동하는 문제점이 있기 때문에 이를 해결할 수 있는 새로운 타입의 고성능 AE감수제의 개발이 필요하다. 또한 콘크리트의 인성, 약품저항성, 동결융해 저항성 및 해수저항성 등을 대폭 개선한 고인성, 고내구성 및 고유동성을 고루 잘 갖춘 고성능 콘크리트 제조를 위한 화학혼화제의 탄생도 기대된다.

끝으로 콘크리트 기능의 다양화에 따른 화학혼화제의 역할이 향후 더욱 더 중요해질 것으로 예상되는 기술개발 과 아울러 다음을 검토할 필요가 있을것으로 보인다.

(1) 기술력의 양성시스템과 유료화 : 다양한 재료변화에 대응한 혼화제의 개발과 동시에 혼화제를 사용하는 기술력을 배양하는 시스템의 구축과 기술관리의 유료화가 필요하다고 생각된다.

(2) 혼화제 기술의 세계화 : 혼화제의 기술개발에 있어서도 세계 각국의 정보를 수집, 파악 하는 동시에 세계적으로 인정받는 기술정보의 발전이 필요하다고 생각된다. 따라서 혼화제의 규격도 ISO에 상응하는 국제화가 요망된다.

(3) 리사이클 문제에 대응 : 리사이클 자원을 활용하는 문제를 해결하기 위하여 혼화제의 역할이 크게 기대되며 아울러 리사이클 자원화에는 환경문제를 반드시 고려할 필요가 있다. ▣

참고문헌

- John A Barker, "Dictionary of Concrete", Construction Press(London), 1983.
- 콘크리트用語辭典編纂委員會, "콘크리트用語辭典", 技報堂, 1983.
- 長瀧重義, "混和材," 콘크리트工學, Vol.40, No.1, 2002. 1, pp.18~22.
- Sidney Mindess, J. Francis Young & David Darwin, "Concrete", Prentice Hall, 2003, p.93.
- 笠井芳夫, 小林正几, "セメント・コンクリート用混和材料", 技術書院, 1993.
- 신진식, 최 룡, "레미콘에서 혼화제로 고로슬래그 미분말을 사용하는 당위성에 대하여", 콘크리트학회지, 제15권 2호, 2003. 3, pp.8~12.
- 한국철강협회, "2000년도 철강슬래그 재활용 실적", 2001. 2.
- 오재현, 안지환, "고로수쇄슬래그 미분말의 국내·외 재활용 현황 및 자원화 기술", 자원리사이클링, 제11권 3호, 2002, pp.46~59.
- 伏田洋一, "フライアッシュの活用", セメント・コンクリート, No.661, 2002. 3, pp.64~65.
- 笠井芳夫, "混和材の種類・性質・将来展望", 콘크리트工學, Vol.37, No.1, 1999. 1, pp.52~56.
- 富澤, 近田, 檀, 後藤, "スラグ高含有セメントの水和強度發現機構について", 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.14, No.1, 1992, pp.251~256.
- 이상화, 고경택, "고로슬래그 강도발현과 장기거동", 1997년도 가을학술발표회 POSCO Forum 발표집, 한국콘크리트학회, 1999. 11, p.103.
- 能町 宏, "混和劑", 콘크리트工學, Vol.33, No.3, 1995. 3, pp.17~20.
- 原田克己, "シリカフェーム", セメント・コンクリート, No.675, 2003. 5, pp.52~53.
- 藤木洋一, "リグニン系減水遅延劑を添加したコンクリートの凝結機構", 日本土木學會論文報告集, 第212號, 1973., pp.99~107
- 葉賀忠昭, "材料-混和劑", 콘크리트工學, Vol.39, No.1, 2001. 1, pp.66~69.
- V. M. Malhotra, P. Kumar Mehta, "Pozzolan and Cementitious Materials", Gordon Breach Publisher, 1996, p.1.
- 横室隆, 依田彰彦, 松井勇, "比表面的 30,000 cm²/gまでの高爐スラグ微粉末を用いたコンクリートの性状", 콘크리트工學論文集, 第13巻, 第1号, 2002. 1, pp.43~51.
- 盛岡實 樋口隆行, 山本賢司, 坂井悦郎, "高爐徐冷スラグ微粉末の流動性保持効果とその機構", 콘크리트工學論文集, 第14巻, 第1号, 2003. 1, pp.67~74.
- 島健太郎, "コンクリート混和劑の開発技術", (株)シーエムー, 1998, p.38.
- 이승현, "콘크리트용 화학혼화제의 변천", 시멘트, p.70, 2002. 12.