

# 시멘트 · 콘크리트용 혼화재료의 최신 기술동향

이 중 열 (쌍용기술연구소 소장)

정 연 식 (쌍용기술연구소 콘크리트연구실 수석연구원)

## 1. 서 론

콘크리트가 혼합수, 시멘트, 잔골재, 굵은골재로 구성되어 있다고 표현하는 것은 이제는 옛말이 되어 가고 있는 것 같다. 콘크리트의 구성재료는 이제 혼합수, 혼화재료, 시멘트, 잔골재, 굵은골재로 구성되어 있다고 표현해야 할 정도로 혼화재료는 콘크리트산업에서 그 위치가 확실히 굳혀졌다 해도 과언이 아니다. 그만큼 혼화재료의 중요성과 사용기술 및 사용량은 점점 향상되고 있고 증가하고 있다.

그러나 그 사용기술 및 사용량에 대응하는 콘크리트 특성은 효과적이질 못한 것 같다. 다시 말해서 콘크리트의 특성을 생각하지 않고 단순한 경제성 논리에 의해 사용범위가 확대되어가고 있는 듯하여 안타까울 따름이다. 다시 한번 강조하지만, 혼화재료는 음식물의 양념과 같은 존재로서, 그 양이 적거나 지나치면 음식물 본연의 맛을 잃어버리는 것과 같이 혼화재료를 과학과 기술에 바탕을 두지 않고 사용하면 콘크리트의 특성이 제대로 발휘되지 않는다.

따라서 본 검토에서는 최근 혼화재료의 사용기술의 최근 기술동향을 일부 중요한 항목만을 발췌, 기술하여 콘크리트산업에 종사하는 분들에게 기술적인 정보를 제공하고, 올바른 혼화재료의 개념을 정립하고자 한다.

## 2. 시멘트 콘크리트용 혼화제

### 가. 고성능 AE감수제의 최근 상성문제 동향

현재 가장 많이 사용되고 있는 PC계의 본질적 작용기구가 측쇄에 의한 입체 장애효과이기 때문에 분산제로서의 기능을 발휘하는 데에는 아래와 같은 2개의 조건이 요구된다.

- 1) 반데르발스 힘을 차폐하는데에 필요한 측쇄 길이
- 2) 시멘트입자와 수화물입자 표면을 에워쌀 수 있는 충분한 밀도

상기 요건을 위해서는 에틸렌옥시드의 중합수가 어느 정도 필요하고, PC계 첨가량과 유동성이 비례적인 영역에서 특히 중요하다.

PC계의 분산성능은 고상 표면체적당 흡착량이 기본적으로 지배한다. 그래서 그 흡착은 액상이온 농도, 특히 Ca 이온 또는 황산이온 농도에 강하게 의존한다.

이상의 작용기구 입각에서 생각하면 PC계가 보다 입자분산 성능을 발휘하기 쉬운 시멘트와 역의 시멘트가 존재한다는 것을 알 수 있다. <표-1>에 PC계의 성능에 미치는 특성을 표시했다.

제어하지 않은 인자가 변화함으로써 콘크리트의

〈표-1〉 PC계의 성능에 미치는 시멘트 특성

특 성	영향	기 구
입 도	-	흡착면적이 증가해서 흡착밀도가 저하
C <sub>3</sub> A 량	-	초기수화에 따라 흡착면적이 증가, 생성된 에트리징자이트에는 보다 고밀도 흡착
석고의 종류와 량	-/+	C <sub>3</sub> A 량에 대응한 양이 필요 반수석고는 용해속도가 빠르기 때문에 효과적으로 C <sub>3</sub> A의 초기수화를 제어
황산알칼리	-	액상의 황산이온 농도가 결정인자, 고농도가 되면 흡착평형이 탈리측으로 이동
K 함유량	-	K 함유량이 높은 클링커는 C <sub>3</sub> A가 고반응성의 결정이 되기 쉬어, 초기수화물이 증가 흡착면적이 증가

작업성이 변화하는 것을 상성문제라고 한다. 〈표-1〉에 표시한 인자는 통상, 문제가 없는 범위에서 제어되어져 왔지만, PC계가 사용된 낮은 물시멘트비 조건에서는 미세한 시멘트 특성의 차이가 작업성 차이로 되어 나타난다. PC계측에서도 복수의 성분을 적절히 조합함으로써 초기 분산성능과 그 경시변화의 원점에서 상성현상이 발생하지 않도록 설계가 가능한 것도 암시하고 있다.

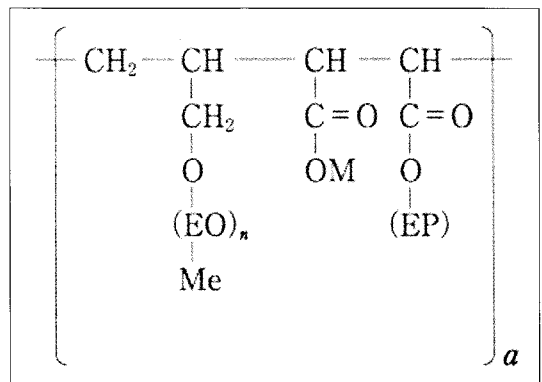
한편 폴리카르본산계와 나프탈렌설폰산계와의 작용기구의 큰 차이는, 초기수화물에서의 흡수가 있다. 특수한 실험조건에서는 폴리카르본산계도 모노설페이트상의 층간에 인터칼레이트 한다고 하는 보고도 있지만, 통상에서는 무시할 수 있다. 그러나 나프탈렌설폰산계는 C<sub>3</sub>A의 점수 직후의 반응시에, 황산이온과 동시에 구조내에 들어간다. 모노설페이트내에 들어간 분자는 고상 표면에 존재하지 않기 때문에 분산제로서의 기능을 하지 못한다.

이 반응은 황산이온과 경합해서 일어나기 때문에 시멘트 혼련 직후, 액상에 황산이온을 보다 많이 공급하는 성분(예를 들어 황산알칼리, 반수석고)이 적정량이 존재함으로써 나프탈렌설폰산계의 모노설페이트에의 흡수를 제어할 수 있다. 그러나, 황산이온은 폴리카르본산계와 같이 나프탈렌설폰산계의 고상 표면에 흡착을 방해하기 때문에 과잉으로 존재하면, 나프탈렌설폰산계의 분산능력을 저하시키게 된다. 다시 말해서 나프탈렌설폰산계에는 최적의 황산이온농도가 존재한다.

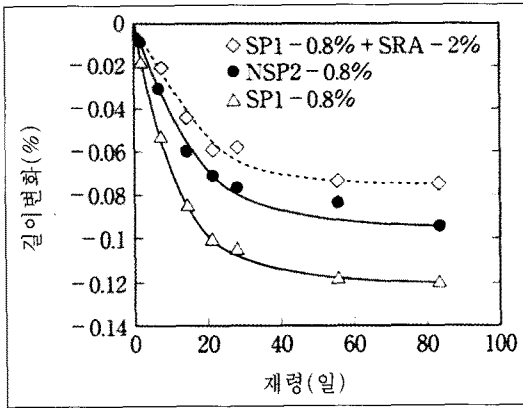
### 나. 하이브리드형 고성능 감수제

고성능 AE감수제에 수축저감 성능을 갖는 혼화제도 개발되고 있다. 분자구조의 차이에서, 수축저감제는 폴리카르본산감수제 용액과는 완전히 혼합되지 않는다. 그 최적조건을 찾아내어 상품화한 경우와, 수축저감 성분을 폴리카르본산계 감수제의 분자구조내에 하이브리드화한 것이 있다. 〈그림-1〉에 그 예를 나타내었다. 이 경우는 무수말레인산계의 폴리머이지만, 카르복실기의 일부에 수축저감 성분을 부가시킨 것이다.

이 하이브리드형 혼화제와 수축저감제를 폴리카르본산계와 조합하여 첨가한 경우의 건조수축 거동을 〈그림-2〉에 나타내었다. 이 실험 예에서는 하이브리드형 혼화제는 폴리카르본산계와 동량의 첨가



〈그림-1〉 하이브리드형 혼화제의 분자구조 예



(SP1:PC계 혼화제, NSP2:하이브리드형 혼화제, SRA:수축저감제)

〈그림-2〉 수축저감제와 하이브리드형 혼화제를 첨가한 모르타르의 건조수축

량이면서 건조수축을 20% 정도 감소시킨다. 수축저감제는 시멘트의 2% 첨가로, 35% 정도의 수축저감 효과가 있다.

수축저감 효과는 그 성분의 양에 기본적으로 비례하기 때문에 하이브리드형 혼화제는 수축저감제와 비교하면 수축저감 성능은 떨어지지만, 한가지 형태로 감수능력과 수축저감 성능을 효율이 좋게 얻을 수 있는 가능성을 열어주었다는 점에서 의미가 있다. 이러한 수축저감형 하이브리드 혼화제 외에 수중불분리성 하이브리드형 혼화제는 이미 개발되어 실용화단계에 들어서고 있다.

### 다. 표면얼룩(흑점) 저감제

최근에는 콘크리트 제품의 외관을 중시하는 경향이 크고, 제품의 외관은 제품의 제조방법 사용재료의 특성에 따라서 콘크리트의 얼룩 또는 오염발생 등에 영향을 받는다. 콘크리트제품 표면이 그대로 노출되는 경우가 많은 2차 제품에서 문제가 되는 경우가 많다.

표면얼룩(흑점)의 원인으로는 ① 콘크리트의 페이스트 분리, ② 콘크리트 제품 형틀오염, ③ 소수성 흑색물질의 재료 사용 등이 있다.〈그림-3〉 참조)

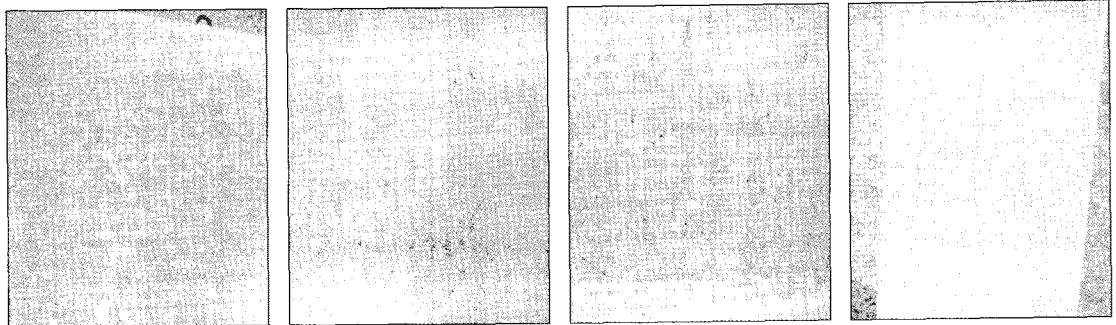
흑색 저감제는 〈그림-3〉의 ③과 같은 경우에 효과가 있다. 즉, 흑색 성분을 콘크리트내에 효율적으로 분산시키고, 재응집을 막는 계면활성제이다.

한편 대부분 콘크리트 자체의 물성은 양호하지만, 외관상 콘크리트 제품표면의 미려함 등이 물성 등을 무시한 채, 콘크리트 제품의 판단기준이 되는 경우가 있다. 따라서 이러한 경우가 발생하지 않도록 각별한 주의가 필요하다.

## 3. 시멘트 콘크리트용 혼화제

### 가. 고로슬래그(수재, 괴재 등)의 활용

고로 서냉슬래그는 고로슬래그 중, 서냉되어 결정화되어 있는 것으로, 고로 수쇄슬래그가 비정질화



①

②

③

저감제 사용

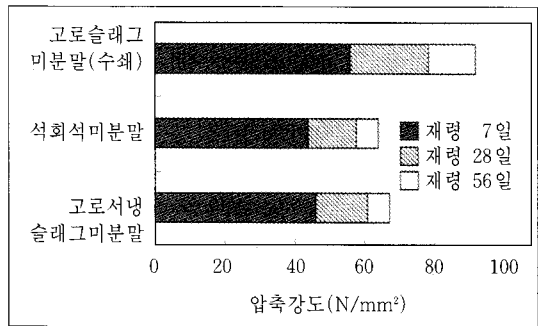
〈그림-3〉 콘크리트 표면 얼룩과 흑색 저감제 사용 표면

(글래스화)하여 잠재수경성을 나타내는 것에 반하여 고로 서냉슬래그는 Melilite(황장석)라고 불리는 불활성의 결정성 화합물을 주체로 하기 때문에 수화에 의한 강도발현은 기대할 수 없다. 따라서, 고로 서냉슬래그는 대부분 노반재 및 콘크리트용 굵은 골재로 사용되어 왔으며, 고로 서냉슬래그 미분말을 콘크리트용 혼화재료로서 검토한 연구는 많지 않다. 그러나, 최근 천연자원인 석회석 미분말을 대체하여 시멘트 혼합재 또는 필러재로서 고로 서냉슬래그 미분말을 사용하려는 연구가 이루어지고 있으며, 석회석에는 없는 유동성 유지 및 중성화 억제효과 등이 밝혀져 이의 메커니즘에 대한 연구도 특히 일본을 중심으로 활발히 진행되고 있다.

먼저, 시멘트 규격의 국제화와 관련하여 시멘트 혼합재로서 고로 서냉슬래그 미분말의 중요성이 증가하고 있다. 시멘트 ISO 규격에서는 시멘트를 32.5 MPa 클래스, 42.5MPa 클래스, 52.5MPa 클래스 등의 “강도 클래스”로 구분하고 있다. 요구 강도가 낮은 32.5MPa 클래스에서는 수화활성이 없는 석회석 미분말 등이 혼합재로 이용될 수 있으며, 천연자원인 석회석에 대응하는 재료로서 불활성인 부산물인 고로 서냉슬래그를 32.5MPa 클래스 시멘트의 재료 설계에 첨가하자는 제안이 이루어지고 있다. 또한, 단위 분체량이 많은 고유동 콘크리트에서도 석회석 미분말을 대체하여 고로 서냉슬래그미분말을 사용하는 것도 검토되고 있다.

〈그림-4〉는 각종 혼합재를 사용한 고유동 콘크리트의 압축강도를 나타낸 것으로 고로 서냉슬래그미분말을 사용한 경우에는 석회석미분말을 사용한 것과 동등한 값을 보이고 있다. 고로 서냉슬래그미분말은 강도발현성 관점에서 불활성인 무기분말(필러)로 볼 수 있다. 한편, 고로슬래그미분말(수쇄)을 이용하면, 잠재수경성에 의해 높은 강도가 얻어지고 있다.

한편, 당초에는 단순히 석회석미분말의 대체재료로서 제안되었던 고로 서냉슬래그미분말이지만, 석회석미분말에는 없는 기능도 발견되어지고 있다.

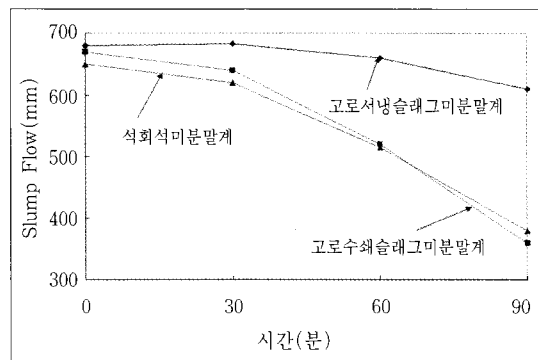


〈그림-4〉 혼합재별 콘크리트 압축강도 측정결과

〈그림-5〉는 각종 혼합재를 사용한 고유동 콘크리트의 슬럼프 플로우 경시변화를 나타낸 것으로, 서냉슬래그 미분말을 사용한 콘크리트는 석회석미분말 또는 수쇄슬래그 미분말을 사용한 콘크리트에 비해 매우 우수한 유동성을 나타냄을 알 수 있다.

또한, 연구결과에 의하면 고로 서냉슬래그를 사용한 콘크리트는 석회석미분말을 사용한 콘크리트에 비해 중성화속도가 낮은 것으로 알려져 있다. 이는 고로 서냉슬래그미분말은 석회석과 같이 수화는 하지 않으나, 탄산화반응에 의해 조적을 치밀하게 함으로써 이산화탄소의 투과를 억제하기 때문이다.

이상과 같이, 고로 서냉슬래그의 특성 등이 새롭게 인식되고는 있지만 산지별 및 지역별, 생산시기, 저장기간 등에 따라 성분 및 특성도 변하기 때문에 사용목적에 따라 재료에 대한 충분한 사전 검토가 이루어져야 할 것이다. 또한, 고로 서냉슬래그에는



〈그림-5〉 혼합재별 콘크리트 슬럼프 경시변화

〈표-2〉 유럽 시멘트 규격(EN197)의 시멘트 종류와 조성

대분류 (Main type)	시멘트 품종의 명칭 (Type of Common Cement)	소분류 품종수	광물조성 (Main Constituents)	중량구성비 (%)
CEM I	Portland Cement	1	Cement Clinker	95-100
	Portland-Slag Cement	2	Blastfurnace Slag	(6-20), (21-35)
	Portland-Silica Fume Cement	1	Silica Fume	6-10
	Portland-Pozzolana Cement	4	Pozzolana Natural Pozzolana Ash Calcareous	(6-20), (21-35) (6-20), (21-35)
	Portland-Fly Ash Cement	4	Fly Ash Siliceous Fly Ash Calcareous	(6-20), (21-35) (6-20), (21-35)
CEM II	Portland-Burnt Shale Cement	2	Burnt Shale	(6-20), (21-35)
	Portland-Limestone Cement	4	Limestone L Limestone LL	(6-20), (21-35) (6-20), (21-35)
	Portland-Composite Cement	2	Any Admixtures Mixed	(6-20), (21-35)
CEM III	Blastfurnace Cement	3	Blastfurnace Slag	(36-65), (66-80) (81-95)
CEM IV	Pozzolanic Cement	2	Silica Fume, Fly Ash	(11-35), (36-55)
CEM V	Composite Cement	2	Blastfurnace Slag, Pozzolana Mixed	(18-30), (31-50)
	계	27종		

유황분이 함유되어 산성물질과의 접촉에 의해 아황산가스를 발생하므로 이에 대한 주의도 필요하다.

## 나. 석회석 미분말의 활용

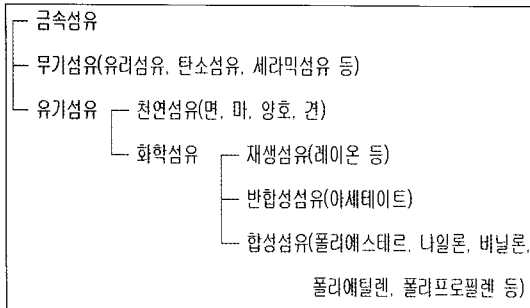
석회암은 칼사이트, 아라고나이트, 돌로마이트 등의 탄산염 광물을 50% 이상 함유한 퇴적암으로 칼사이트가 돌로마이트보다 훨씬 많은 암석으로 정의되고 있다. 석회석의 용도로써 가장 많은 부분을 차지하는 것은 시멘트 산업이며, 이외에 제철·철강용, 콘크리트용 골재, 도로용 골재 및 유리산업 등의 기타 용도로 사용되었다.

혼화재료로서 석회석미분말은 분체계 또는 병용계의 고유동 콘크리트에서 석회석미분말을 다량 사용한 콘크리트가 실용화되어 왔으며, 최근 또한 자

원 및 에너지 저감, 환경문제 등과 관련하여 필러 시멘트 등의 새로운 재료로서 석회석미분말이 주목을 받고 있다. 〈표-2〉에 나타난 것과 같이 EN 197-1 (2000년)에서는 석회석미분말의 치환률이 6~20%와 21~35%의 혼합 포틀랜드 시멘트(필러 시멘트) 및 그것을 이용한 석회석미분말의 규격(안)이 규정되어 있으며, 실용화되고 있다.

이외에 석회석미분말은 실리카흄과 병용하여 분진저감과 리바운드의 방지를 목적으로 이용되고, NATM 공법용 고품질 숏크리트로서도 사용되고 있으며, RCD담 콘크리트의 시공성 개선, 일반콘크리트에서 골재 미립분의 확보 등에도 이용되고 있다.

콘크리트 제조시 시멘트의 일부를 석회석미분말로 치환하는 경우 유동성이 개선되며, 수화열 저감의 효과가 크다. 또한 잔골재의 일부를 석회석미분말로



〈그림-6〉 첨가의 분류

치환하면 콘크리트 중의 분체량이 증가하여 재료분리 저항성은 향상되며, 특히 분체계 및 병용계 고유동 콘크리트의 제조에 효과적으로 이용될 수 있다.

한편, 석회석미분말은 산지 및 제조방법 등에 따라 품질이 달라질 수 있으며, 특히 분말도 및 점도 광물의 혼입에 따라 콘크리트의 유동성, 재료분리 저항성 등이 큰 영향을 받을 수 있으므로 사전 배합시험을 통해 충분한 검토가 이루어져야 할 것이다.

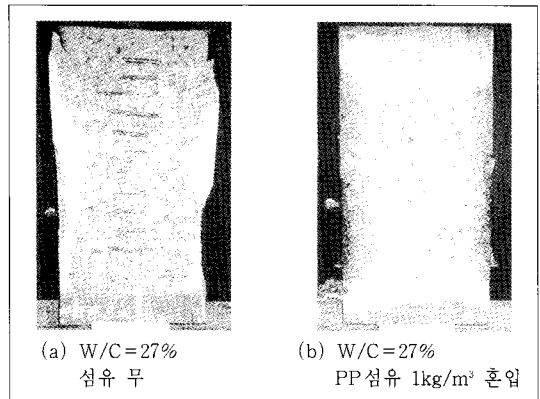
#### 다. 유기 단첨유

시멘트계 인성 및 저인장강도 등의 단점을 보강하는 방법의 하나로 시멘트계 재료에 단첨유를 혼입하여 보강하려는 시도가 오래전부터 행해져 왔다.

〈그림-6〉에 첨가의 분류를 나타내었다.

시멘트계 재료에 이용할 수 있는 단첨유는 강첨유 및 스테인레스 첨유 등의 금속첨유, 유리첨유 및 탄소첨유 등의 무기첨유와 비닐론, 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 나이론 등의 합성첨유이다. 이중 유기계의 복합첨유는 강첨유 등과 비교하여 역학적인 보강효과는 떨어지지만, 녹이 발생하지 않는다는 점, 목적에 맞게 첨유의 굵기나 표면형상을 비교적 자유롭게 가공할 수 있다는 점, 밀도가 작아 변형하기 쉽기 때문에 시공이 편리한 점 등의 이점으로 인해 플라스틱 수축균열의 대책, 건조수축균열의 대책, 박락방지, 화재시의 폭열대책 등을 목적으로 널리 사용되고 있다.

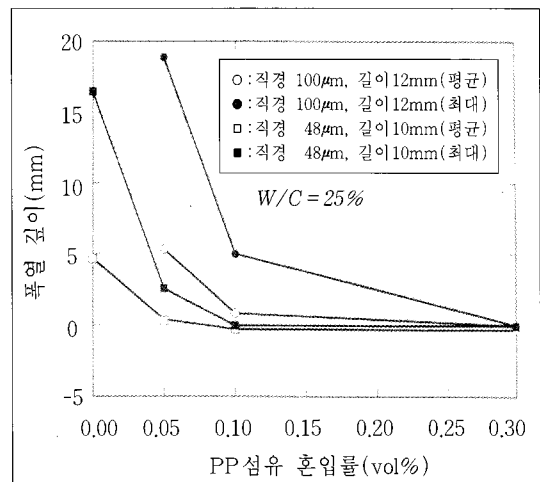
〈그림-7〉 및 〈그림-8〉은 최근 주목받고 있는 고



〈그림-7〉 첨가에 의한 폭열억제 효과

강도 콘크리트에서 화재시의 폭열대책으로서 합성첨유를 사용한 예를 나타낸 것으로, 콘크리트의 온도가 상승하면 콘크리트에 혼입된 유기첨유는 고온에서 용해되어 증기 이동의 통로를 형성함으로써 폭열의 위험성을 완화시킨다. 설계기준강도 80MPa 이상의 고층 건축의 기둥에 적용한 예가 많지만, 화재의 상황이 매우 악조건인 터널에 대해서는 보통강도 레벨에서도 검토가 필요하다.

한편, 콘크리트의 보강재로서 합성첨유를 이용하는 경우에는 시멘트 경화체와 첨유의 부착력이 중요하다. 첨유의 탄성한계응력에 비하여 부착력이 낮으



〈그림-8〉 첨유혼입과 폭열깊이의 관계

면 섬유 방출이 시작되어 충분한 보강효과를 얻을 수 없다. 비닐론 섬유는 원료에 OH기를 포함하고 있기 때문에 친수성이 크고, 시멘트 경화체와의 부착력이 높다. 한편, 폴리프로필렌 섬유 및 폴리에틸렌 섬유 등은 시멘트 경화체와의 부착력이 낮기 때문에 섬유형상 및 표면처리제 등에 의해 시멘트 경화체와의 부착을 개선시키고 있다. 한편, 합성섬유의 화학적 성질은 섬유의 종류에 따라 다르다. 합성섬유의 시멘트에 의한 알칼리 열화는 섬유보강 콘크리트의 내구성에 큰 영향을 미친다. 따라서, 섬유보강 콘크리트의 공시체를 알칼리 수수에 침적시켜 휨강도 및 휨인성에 대한 열화를 확인하는 방법 등이 검토되고 있다.

#### 4. 맺음말

차세대 콘크리트는 시멘트 및 혼화재료의 이용뿐이라고 콘크리트관련 종사자들과 토론을 한 기억이 있다. 현재 사용되고 있는 콘크리트 즉 고성능, 고강도 콘크리트 등은 혼화재료를 복합한 콘크리트라고 표현을 해도 무방할 정도로 혼화재료는 이미 콘크리트 내면에 깊게 뿌리박고 있다. 그만큼 혼화재료는 사용상 기술상 그 중요성이 부각되고 있고, 특히 시멘트 콘크리트에서의 혼화재료는 고기능화라고 하는 과제를 동시에 풀어갈 수 있기 때문이다. 끝으로 가까운 시일내에 또다른 신개념들의 제안을 기대해 본다. ▲

### 시사 용어 해설

#### ▶ 고객만족 경영(CSM customer satisfaction Management)

고객의 심적 사고를 바탕으로 모든 경영활동을 전개해 나가는 새로운 경영조류이다. 고객만족(CS)이란, '고객이 제품 또는 서비스에 대해 원하는 것을 기대 이상으로 충족시켜 감동시킴으로써 고객의 재구매율을 높이고, 그 제품 또는 서비스에 대한 선호도가 지속되도록 하는 상태'를 일컫는다. 고객만족도를 높이는 것은 고정 고객층의 이탈 방지를 통해 안정적 기업 이익을 확보하는 첩경이다. 고정고객은 반복구매뿐만 아니라 호의적 구전(口碑)광고를 통해 새로운 고객을 창출하고 기업의 판촉 비용을 경감시켜줌으로써 기업 이익을 크게 늘려준다. 많은 서비스 기업의 실증연구에 의하면, 치열한 경쟁상황 속에서는 고정고객의 유지, 발전에 초점을 두는 경영이 새로운 고객의 창출에 따르는 경우보다 비용이나 효과면에서 유리하다는 결론이 나왔다. 따라서 고객 만족 경영에서 고객은 잠재 고객보다 기존 고객에게 초점이 맞춰져 있음을 알 수 있다. 그리고 고객만족 경영을 실현하기 위해서는 외부 고객 뿐만 아니라 내부 고객, 즉 사내 종업원들의 만족도가 선행되어야 한다. 자사의 상품 서비스에 만족하지 못하는 종업원들이 자부심을 가지고 고객에게 판매 서비스활동을 전개하기를 기대하기는 힘들게 마련이다. 제록스(Zerox)의 경험에 의하면, 내부고객의 만족도와 외부고객의 만족도는 90% 이상의 정(正)의 상관관계를 갖는다는 것이 입증된 바 있다.