

# 고강도 혼합재의 특성과 특수콘크리트 적용사례

조 성 현 (한일시멘트 테크니컬센터, 선임연구원)  
 윤 용 선 (한일시멘트 테크니컬센터, 주임연구원)  
 권 인 표 (한일시멘트 본사 품질팀, 과장)  
 최 용 민 (한일시멘트 테크니컬센터, 건재연구팀장)

## 1. 서 언

2000년대 이후 국내 건설사들은 도곡동 타워팰리스와 목동 하이페리온과 같은 초고층 구조물을 건설하기 시작하였다. 최근에는 부산 해운대 워브더 제니스와 같이 80층대의 초고층 구조물을 건설 중에 있으며, 잠실 제2롯데월드, 인천타워, 상암 DMC 랜드마크 등 100층 이상 초고층 구조물 건설계획도 추진하고 있다. 또한 최근 완공된 인천대교, 거가대교와 침매터널, 현재 공사 중에 있는 4대강 살리기의 수중보와 같이 대형 토목구조물도 증가하는 추세에 있다.

이와 같이 초고층 및 대형화된 콘크리트 구조물을 건설하기 위해서는 콘크리트도 고강도 및 초고강도, 고내구성, 고유동성, 저발열성 등의 다양한 성능이 필요하다. 따라서 콘크리트의 성능 향상을 시키기 위하여 플라이애시, 고로슬래그 미분말 등과 같이 광물질 혼화재를 많이 사용하고 있다. 최근에는 초고강도 콘크리트의 제조와 침매터널과 같이 해양환경하에 있는 콘크리트 구조물의 고내구성 향상을 위해 실리카 흙이 일부 적용되고 있다.

실리카 흙은 기존 플라이애시, 고로슬래그 미분말보다 콘크리트의 초고강도 발현 및 고내구성 향상에

유리하다고 보고 되고 있다. 그러나 실리카 흙은 해외에서 수입하기 때문에 시멘트보다 약 10배 정도 높아 콘크리트용 혼화재로 활용하는데 많은 어려움이 있다.

위와 같은 문제점을 해결하고자 당사에서는 실리카 흙보다 저렴하면서도 콘크리트의 초강도와 고내구성을 실현할 수 있는 고강도 혼합재를 개발하여 현재 다양한 특수콘크리트에 적용 중에 있다.

따라서 본고에서는 실리카 흙을 대신하여 특수콘크리트에 적용할 목적으로 개발한 고강도 혼합재를 콘크리트의 특성과 특수콘크리트에 적용한 사례를 소개하고자 한다.

## 2. 고강도 혼합재

### 가. 물리·화학적 특성

고강도 혼합재(오메가 2000)는 콘크리트의 강도 및 내구성 향상을 목적으로 개발한 콘크리트용 혼화재이다. 고강도 혼합재는 고로슬래그 미분말과 특수첨가제를 혼합 미분말로 분쇄하여 수화활성도를 높였다. 고강도 혼합재의 물리·화학적 성질은 <표-1>과 같다.

〈표-1〉 고강도 혼합재(오메가 2000)의 물리·화학적 성질

밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	분말도 (cm <sup>3</sup> /g)	화 학 분 석						
		CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	강열감량
2.94	7.750	40.37	25.14	12.20	0.45	5.42	13.20	0.48

### 나. 강도발현 메카니즘

고강도 혼합재의 강도발현 메카니즘은 아래와 같이 ① C-S-H(CaO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O)계의 증대에 의한 고강도 발현과 ② Ettringite(3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O)의 생성에 의한 치밀한 미세구조 형성으로 설명될 수 있다.

① C-S-H(CaO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O)계의 증대에 의한 고강도 발현

시멘트 수화시 생성되는 Ca(OH)<sub>2</sub>와 고강도 혼합재가 반응하여 C-S-H를 생성함으로써 조직의 결합력이 증대되어 고강도를 발현한다.

② Ettringite(3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O)의 생성에 의한 치밀한 미세구조 형성

고강도 혼합재를 사용하게 되면 Ettringite의 생성을 증가시키고, 이것이 시멘트 페이스트와 골재사이의 공극을 충전 함으로써 콘크리트 조직을 치밀화시켜 고강도를 발현한다.

〈그림-1〉은 고강도 혼합재 사용에 따른 시멘트

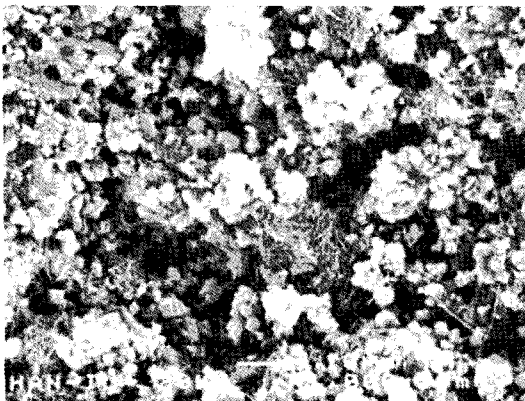
페이스트 경화체의 수화 생성물을 전자현미경(SEM)으로 촬영한 것이다. 시멘트를 단독 사용한 플레인보다 고강도 혼합재를 함께 사용한 경우가 Ettringite 생성으로 치밀한 조직을 형성하였다.

또한 〈그림-2〉와 같이 고강도 혼합재에 따른 세공률을 측정 한 결과, 고강도 혼합재를 사용한 경우가 시멘트를 단독 사용한 경우보다 10μm 이상의 큰 공극이 감소되고, 0.01μm 이하의 미세공극 증가되었다. 따라서 큰 공극의 미세공극으로의 전환은 콘크리트의 강도향상뿐 아니라 내구성 향상에도 기여한다.

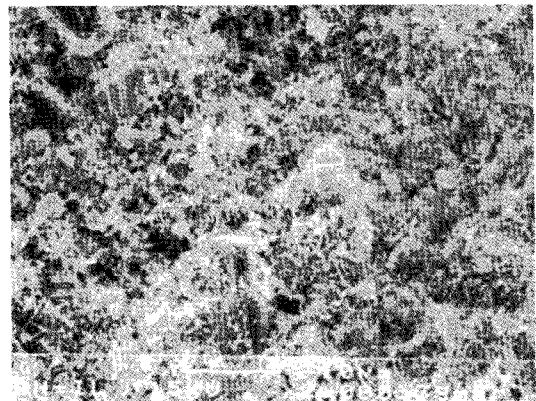
### 3. 고강도 혼합재를 사용한 콘크리트의 특성

#### 가. 유동성

〈그림-3(a)〉은 저발열 시멘트(혼합계)에 대하여 고강도 혼합재를 0, 5, 10, 15% 대체하여 유동성을

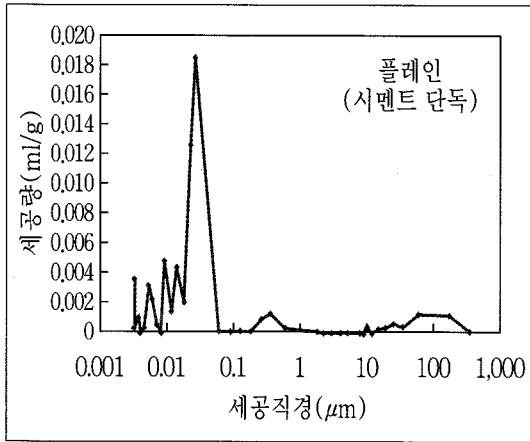


(a) 플레인(시멘트 단독)

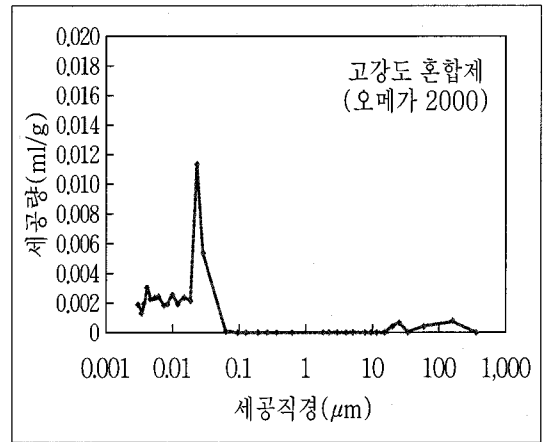


(b) 고강도 혼합재 사용

〈그림-1〉 고강도 혼합재의 Ettringite 생성(SEM 사진)



(a) 플레인(시멘트 단독)



(b) 고강도 혼합제 사용

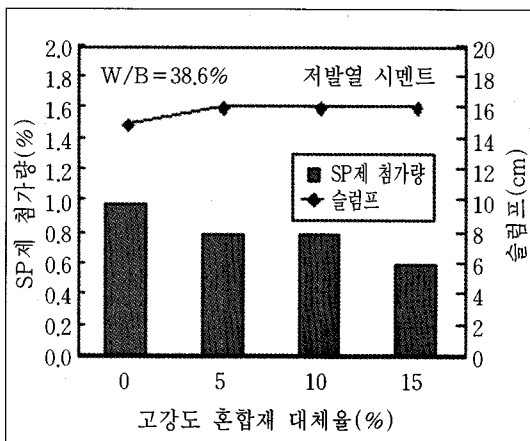
〈그림-2〉 고강도 혼합제의 세공량 분석

검토한 결과이고, 〈그림-3(b)〉는 고강도 혼합제와 실리카 흙의 사용에 따른 유동성을 검토한 것이다.

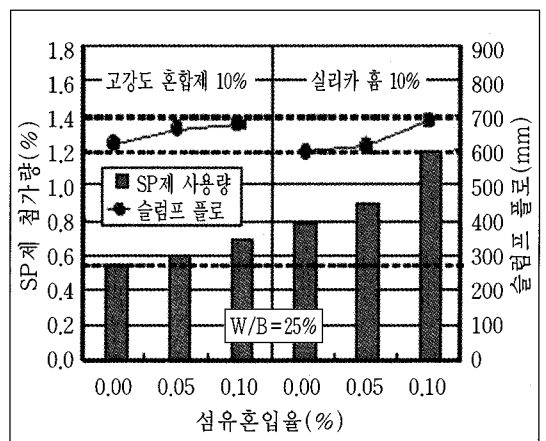
고강도 혼합제를 사용할 경우 동일 슬럼프 확보를 위한 고성능 감수제의 첨가량이 약 0.2~0.4% 정도 감소되는 것으로 나타났다. 또한 실리카 흙과 비교한 경우에도 고강도 혼합제가 동일 슬럼프 플로의 확보에 필요한 고성능감수제의 첨가량이 적게 필요한 것으로 나타났다. 특히 섬유혼입율이 증가할수록 이러한 현상은 크게 나타났다.

#### 나. 압축강도

〈그림-4〉는 고강도 혼합제의 사용에 따른 콘크리트의 압축강도 특성을 나타낸 것이다. 〈그림-4(a)〉와 같이 고강도 혼합제의 대체율이 증가할수록 초기 재령(7일, 14일)에서 콘크리트의 압축강도가 높게 나타났다. 실리카 흙과의 비교에서도 〈그림-4(b)〉와 같이 초기 재령인 7일에서 콘크리트 압축강도가 높게 나타났다. 그러나 28일 압축강도와 유사한 수

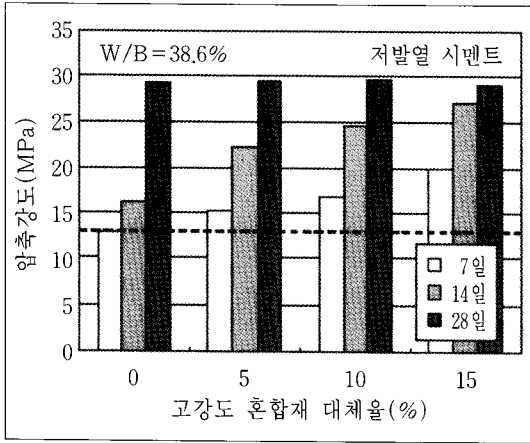


(a) 고강도 혼합제 대체율에 따른 비교

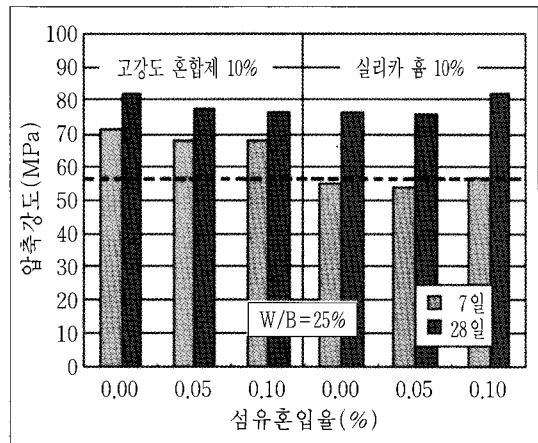


(b) 고강도 혼합제와 실리카 흙 비교

〈그림-3〉 고성능감수제 첨가율과 유동성



(a) 고강도 혼합재 대체율



(b) 고강도 혼합재와 실리카 흙 비교

〈그림-4〉 압축강도

준인 것으로 나타났다.

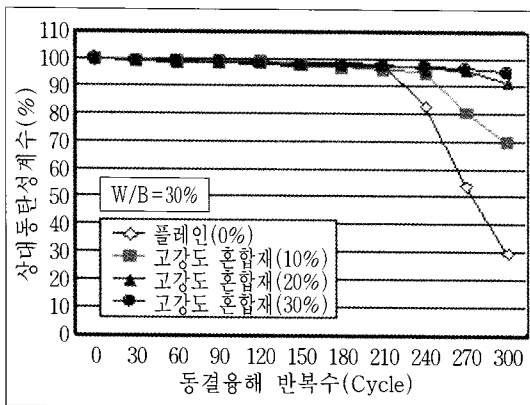
#### 다. 동결융해 저항성

〈그림-5〉는 고강도 혼합재의 대체율에 따른 동결융해 저항성 실험결과를 나타낸 것이다. 〈그림-5(a)〉와 같이 고강도 혼합재의 사용량이 증가할 수록 동결융해 저항성이 우수한 것으로 나타났으며, 〈그림-5(b)〉와 같이 동결융해 300사이클 후 시험체의 외관을 검토한 결과 고강도 혼합재를 사용한

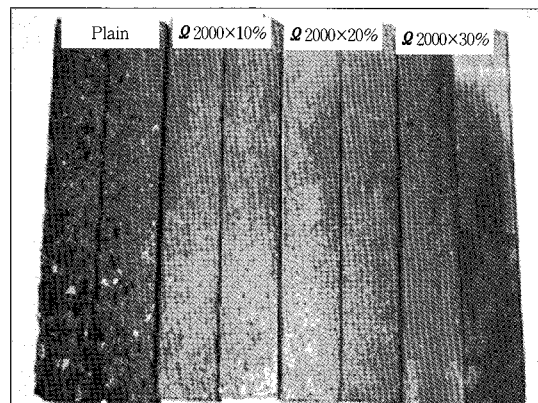
경우 시험체 표면에 스케일링이 거의 발생하지 않았다. 이는 고강도 혼합재를 사용할 경우 C-S-H 수화물의 증대, 미립자에 의한 공극 충전, 수화활성 촉진 등으로 경화체내의 공극 감소로 조적이 치밀해졌기 때문으로 판단된다.

#### 라. 염화물 확산계수와 길이변화율

〈그림-6〉은 고강도 혼합재 대체율에 따른 염화물 확산계수와 길이변화율을 나타낸 것이다. 염화물 확

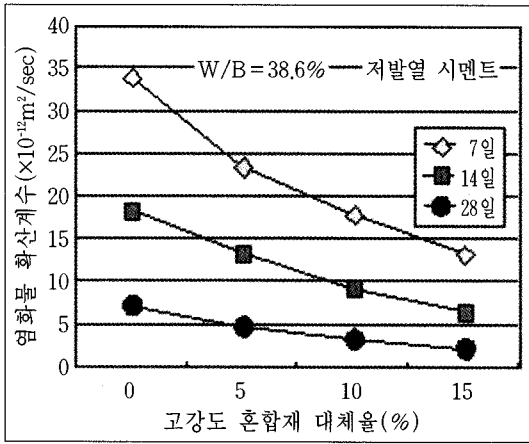


(a) 상대동탄성계수

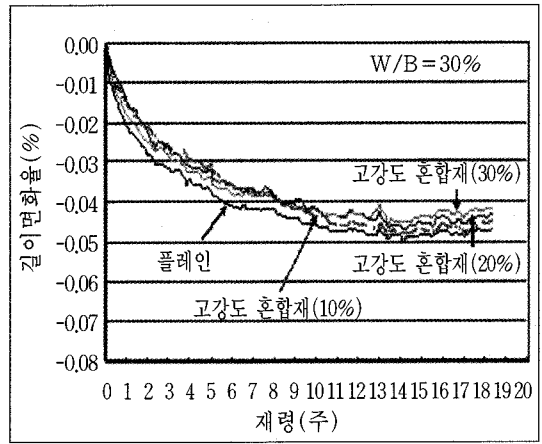


(b) 동결융해 실험 후 시험체 (300cycle)

〈그림-5〉 동결융해 저항성



(a) 염화물 확산계수



(b) 길이변화율

〈그림-6〉 염화물 확산계수와 길이변화율

산계수는 「NT Build 492」에 의해 측정하였으며, 고강도 혼합재 대체율이 증가할수록 염화물 확산계수는 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 고강도 혼합재를 사용할 경우 콘크리트의 염해저항성을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

또한 콘크리트의 길이변화율에서도 고강도 혼합재 대체율이 증가할수록 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. 그러므로 고강도 혼합재의 사용이 콘크리트의 건조수축 저감에도 기여할 것으로 판단된다.

### 바. 고강도 혼합재를 사용한 초고강도 콘크리트의 펌프압송성

고강도 혼합재를 사용한 초고강도 혼합시멘트로 100MPa급 초고강도 콘크리트를 제조하여 수평 270m 압송 테스트하였다. 〈표-2〉는 초강도 콘크리트 배합표이고, 〈표-3〉은 펌프압송 전·후의 콘크리트 물성과 압축강도 결과를 나타낸 것이다.

압송 전·후의 균지 않은 콘크리트 특성을 측정된 결과 슬럼프 플로는 압송 후 다소 감소하였고, O-Lot 유하시간은 다소 빨라졌으나 압송 전·후의 콘크리트 물성차이는 크지 않았다.

압축강도는 압송 전보다 압송 후 압축강도가 저하하였지만 재령 28일에 모두 목표했던 100MPa를 상회하였다.

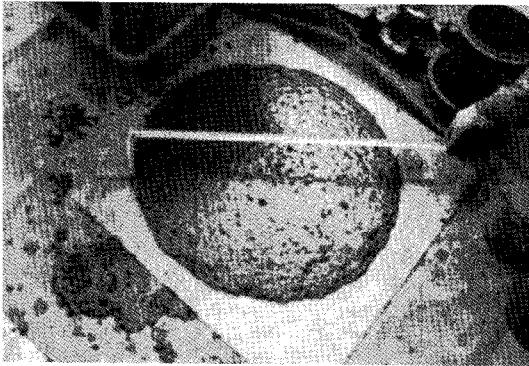
〈표-2〉 초고강도 콘크리트 배합표

규격	W/B	S/a	W	C*	S1	S2	G	SP(%)
20-100-700	20.0	42.0	165	825	361	235	850	C × 1.50

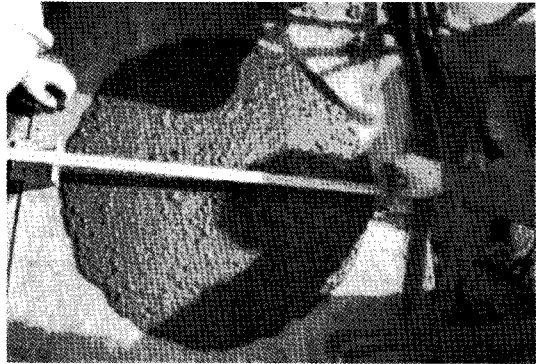
\* C : 고강도 혼합재가 혼합된 초고강도용 혼합시멘트

〈표-3〉 270m 펌프압송 전·후의 실험결과

구분	운반거리 (시간)	압송거리 (m)	슬럼프 플로 (mm)	O-Lot 유하시간 (sec)	압축강도 (MPa)			비고
					3일	7일	28일	
압송 전	22km	270	710 × 730	14	73.6	91.8	119.3	물성 양호
압송 후	(40min)		670 × 690	13	69.2	85.8	106.2	물성 양호



(a) 펌프압송 전(710×730mm)



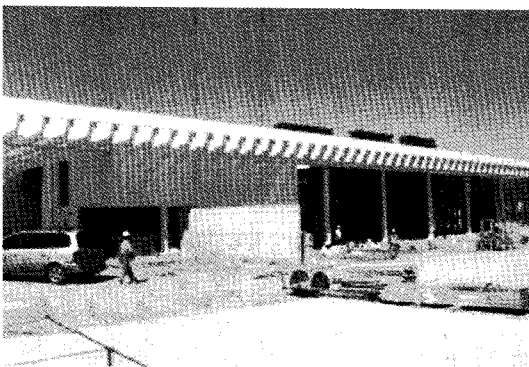
(b) 펌프압송 후(670×690mm)

<그림-7> 100MPa 초고강도 콘크리트의 펌프압송 전·후 슬럼프 플로

#### 4. 고강도 혼합재의 특수콘크리트 적용사례

##### 가. 백색칼라 노출콘크리트 적용

백색칼라 노출콘크리트는 기존의 콘크리트 공사처럼 페인트, 석재, 타일 등으로 마감공사를 하지 않기 때문에 콘크리트 노출면이 마감재 역할을 한다. 그러므로 별도의 마감공사가 없는 백색칼라 노출콘크리트 구조물은 다양한 요인에 의해 내구성이 저하될 우려가 있다. 따라서 <그림-8>과 같이 백색칼라 노출콘크리트의 내구성 향상을 위해 고강도 혼합재를 사용하였다.

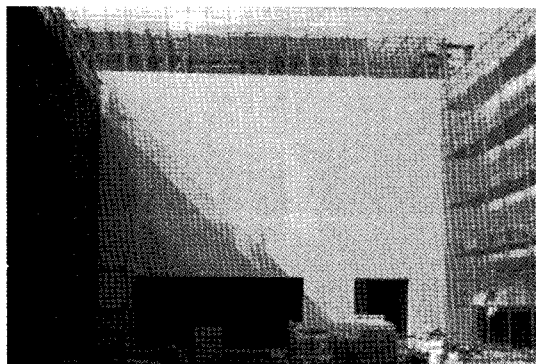


(a) 이응노 미술관(계룡건설산업)

국내 최초로 대전 이응노 미술관(시공사:계룡건설산업, 공사기간:2005.12.7~2007.1.2)에 백색칼라 노출콘크리트 적용하였으며, 이때 내구성 향상을 위해 고강도 혼합재를 사용하였다. 현재에는 아모레 퍼시픽 오산공장(시공사:대림산업)에 적용하고 있다.

##### 나. 초고강도 콘크리트 적용

현재 공사중인 청라 더샵 레이크파크 주상복합 아파트(시공사:포스콘 건설)는 하부층의 경우 설계 기준강도 100MPa, 80MPa, 70MPa로 설계되어 있다. 본 현장에서는 경제적인 초고강도 콘크리트를 적용하기 위하여 실리카 흙 대신 가격이 약 1/3 수



(b) 아모레 퍼시픽 오산공장(대림산업)

<그림-8> 고강도 혼합재를 사용한 백색칼라 콘크리트 현장적용



(a) 슬럼프 플로



(b) 100MPa 초고강도 콘크리트 타설

<그림-9> 고강도 혼합재를 사용한 100MPa 초고강도 콘크리트의 현장적용

준으로 저렴한 고강도 혼합재를 사용하였다.

현재 <그림-9>와 같이 100MPa 초고강도 콘크리트를 국내 최초로 실 적용하였고, 이때 압축강도는 재령 28일에 110MPa를 발현하였다. 향후에도 80MPa, 70MPa 초고강도 콘크리트에도 고강도 혼합재를 적용할 예정이다.

## 5. 결 언

상기와 같이 실리카 흙을 대체할 수 있는 고강도

혼합재를 사용한 콘크리트 특성을 살펴보고, 또한 백색칼라 노출콘크리트, 초고강도 콘크리트 등 특수 콘크리트에 적용한 사례를 소개하였다.

고강도 혼합재는 기존의 실리카 흙보다 가격은 저렴하면서 동등 이상의 성능을 발휘하기 때문에 초고강도 및 고내구성을 필요로 하는 특수 콘크리트에 활발히 적용될 것으로 기대된다. 또한 앞으로도 무기질 혼화재의 성능개선 및 개발이 꾸준히 이루어져 다양한 콘크리트의 요구 성능이 실현되기를 기대한다. ▲

## 시사 용어 해설

### ▶ SBHI

중소기업업황전망건강도지수(Small Business Health Index)를 말하는데, 줄여서 중소기업경기전망지수로도 쓰인다. 중소기업중앙회가 1,500개의 중소제조업체를 대상으로 다음달의 경기전망을 조사하여, 100을 기준으로 한 지수로 매달 발표한다. 100 이상이면 다음달 경기가 좋아질 것으로 전망한 업체가 더 많다는 것을 뜻한다. 2010년 7월 28일에 발표한 '8월 중소기업경기전망지수'는 92.8로 전월(96.2) 대비 3.4p 하락한 것으로 나타났다. 이 지수는 2010년 5월 101.4로 2002년 10월(108.7) 이후 7년 7개월 만에 최고치를 기록했으나, 3개월 연속 하락하는 모습을 나타냈다. 이에 대해 중소기업중앙회는 남유럽 경제위기 등 글로벌 경제의 불안전성과 기준금리 인상으로 중소기업 경영부담 증가 및 건설경기 위축 우려 심화 등에 기인한 것이라고 분석했다.