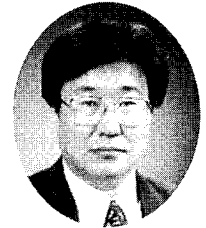


# 구조물의 고성능화를 지향하는 21세기 콘크리트 재료 : 시멘트

- Concrete Materials for the 21st Century : Cement -



염태선\*

## 1. 서론

21세기라고 해서 건설재료의 주체가 시멘트에서 다른 것으로 변하지는 않을 전망이다. 또한 포틀랜드시멘트가 사용되기 시작해 100~150년 정도 밖에 경과하지 않았지만, 콘크리트 구조물의 내구성이 100년을 넘게 요구되는 경우도 있고 축적된 데이터를 다음 세대를 위해 검토해야 하며 현 시멘트조성 범위에서 급후의 시멘트를 어떤 방법으로도 제시해야 할 필요성이 있다.

특히, 시멘트산업은 환경문제, 특히 순환형 사회에서 최종 처분장으로서의 역할이 점차 커지고 있어 향후 요구성능의 시멘트를 경제적으로 안정하게 공급하는 것은 물론이고 「리사이클사회에서의 최종처분장」으로서 중요성이 증가하여 21세기에서는 한층 더 이런 역할을 가속시켜게 될 것이다. 또한 CO<sub>2</sub> 배출량이 많은 시멘트 산업에서 그의 삭감은 중요과제이다.

또한 콘크리트 구조물에서는 경제성, 안전성, 공용성, 내구성 및 경관성 이외에도 환경부하 저감성 등이 요구되고 있다. 그

것을 구축하는 콘크리트의 요구성능은 시공성, 유동성, 응결, 경화제어성, 고강도, 고내구성 또는 발열제어성, 저수축성 및 환경부하 저감성 등이 열거되고, 복합재료로서 이런 성능을 만족할 수 있는 구성재료로의 시멘트 성능의 요구도 있고, 또한 설계·시공체계의 성능규정, 시공방법의 다양화 또는 국제규격(ISO규격)으로 전환과 관련하여 시멘트의 요구성능은 점점 다양하게 될 것이다.

본 자료는 21세기에 예상되는 시멘트를 둘러싼 환경과 시멘트의 요구성능에 따라

시멘트 산업에서 필요한 연구개발 과제를 일본 동경공업대학교에서 시멘트화학계의 석학으로 인지되어 있는 다이몬교수에 견해를 요약하였다.

## 2. 범용시멘트와 특수시멘트

〈그림 1〉과 같이, 1970년대 초에서 200대 정도의 킬론에서 연간 약 5000만 톤의 시멘트를 생산하였는데, 최근에는 약 80대 정도의 킬론에서, 약 7000~8000만 톤정도를 생산하고 있다.

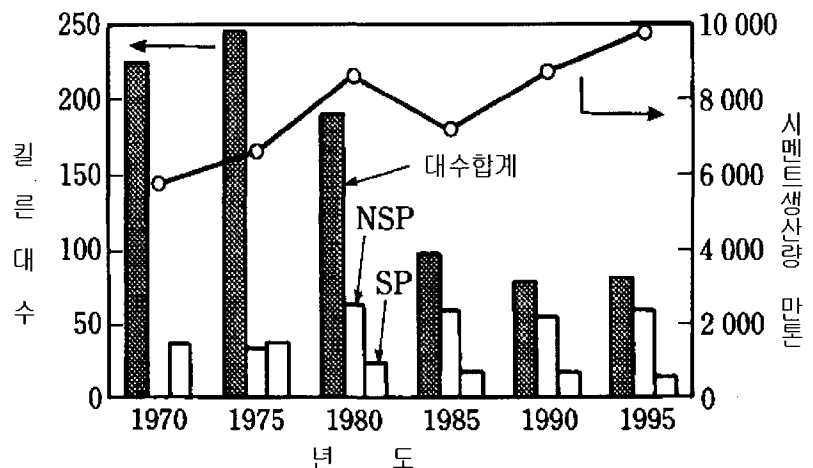


그림 1. 시멘트 생산량과 킬론대수의 추이

\* 정회원, 쌍용기술연구소 책임연구원

이와 같이 다품종 소량생산에 적합하지 않은 시멘트 공장에서 다양화하는 요구성을 만족하기 위해서는 소성 공정의 대응은 불가하고 가공비는 증가하지만 혼합시멘트 외에는 대안이 없다. 또한 다품종 소량생산에 대응하기 위한 분쇄·분급·혼합 등의 기술개발이 필요하다. 소성공정에 의한 다품종화를 대응할 경우에는 특수품으로서 가격이 높게 설정해야 한다. 단, 해외에서 특수한 구성성분을 제조하고 분쇄·혼합 등을 국내에서 하여 보다 범용적인 가격으로 시멘트를 공급할 수도 있다.

〈그림 2〉는 요구성능, 경제성 및 범용시멘트와 특수시멘트로의 분류 개념을 나타냈다. 범용시멘트는 적어도 소요강도를 확보해야 하고 최근에는 유동성이 우수한 시멘트가 장래에서는 내구성이 확보하기 위한 최적시멘트도 바람직하다. 이와 같은 유동성 또는 내구성은 콘크리트로서 요구되는 성능이지만 시멘트가 반드시 갖추어야 하는 성능이기도 하다.

또, 환경 영향이 적어야 한다. 예를 들면 CO<sub>2</sub>배출량이 작고 유해물질의 용출이 적은 시멘트가 요망되고 더욱 더 리사이클성이 우수한 것이 요구될 것이다. 저 발열성 시멘트는 본래 특수 시멘트이지만 범용화되어 있다. 범용과 특수를 보는 방법은 기능에서 뿐만 아니라 제조 판매량에서 판단이 필요하며 기능과 량과 가격의 관계를 소비자에게 명확하게 인식시킬 필요가 있다. 또 일본에서는 대부분 콘크리트에 AE

감수제 또는 고성능 AE감수제가 첨가하므로 그의 상성 등을 포함한 유동성 제어기술의 확립은 대단히 중요하고 이것은 특수시멘트에서도 동일하게 요구되고 있다.

응결, 강도발현성의 관점에서는 지연성, 초조강성, 급결성, 급경성을 갖는 특수시멘트도 이용되며 다양한 클링커 또는 혼화제가 개발되고 있다. 현장에서는 가사시간의 제어가 자기 스스로 갖출 수 없으므로 급경성 시멘트를 이용한 레미콘화는 곤란하다. 따라서 현장에서 연속 혼합기 등을 이용해서 콘크리트를 공급하기 때문에 가격은 더욱 높아진다. 고강도를 요구되는 강도수준이 많이 차이가 있어 대단히 다양한 재료가 이용된다. 균열 내구성의 영향이 정량화된다면 프리 스트레스 콘크리트 또는 팽창 콘크리트를 적용하지 않으면 내구성 확보가 곤란하므로 저수축성은 대단히 중요하다. 또 그의 기능을 발휘하는 성분이 소량이어도 효과가 나오도록 범용시멘트의 클링커 일부분을 포함하는 연구 개발이 필요하며, 기능은 특수하지만 범용시멘트에 가까운 경제성 확보도 가능성이 있다. 예를 들면 팽창제는 종래의 사용량에 반정도로 어떤 혼합시멘트에서도 문제없이 이용할 수 있는 것도 등장하고 있다.

또 특수시멘트는 레디믹스 콘크리트의 JIS에 포함하지 않아 대단히 사용하기 어려운 경향이 강하고, 성능규정의 설계·시공체계가 토목·건축분야를 포함해서 장래적으로 어느 방향으로 갈 것인가도 중요하다.

다. 품질보증을 근거로 새로운 재료가 사용하기 어렵게 하면 건전한 기술개발을 저해하고 성능을 규정하는 의미가 없다.

장기 내구성이 우수한 범용시멘트로는 JCI의 장기 내구성 연구위원회에서 각종 요인도 고려해 중용열 클링커를 기초로 한 혼합(혼화재 혼합율 20%정도)시멘트 또는 분말도를 작게 한 보통 포틀랜드시멘트 또는 혼합시멘트 등이 거론되고 있다. 장기간(100년정도) 경과한 구조물 등에서 채취한 건전한 콘크리트의 분석을 기초하면, 물 시멘트비가 작으며, 어느 정도 시멘트 량이 확보된 콘크리트가 사용되었다. 또 사용시멘트는 초기, 장기강도의 발현성이 반드시 좋은 것이 아니고 현재 보통 포틀랜드시멘트에 비해 베라이트(C<sub>2</sub>S)를 많이 포함하고 분말도가 작은 것이 이용되고 있다.

한편, 시멘트 제조기술의 개발동향은 회전로가 도입되어 대량생산 방향으로 이행하는 것과 함께 시멘트구성 화합물중에서는 알라이트(C<sub>3</sub>S)가 증가하고 초기 강도 발현성이 향상하는 방향으로 변천하고 있다. 그의 결과로서 콘크리트는 높은 물시멘트비에서도 소정의 강도를 확보하는 것이 가능하고 적은 단위수량이 증가해서도 강도변동이 생기지 않는 시멘트로 변화하고 콘크리트의 단위수량의 증가에 무관해지고 있다. 예를 들면 유럽에서는 32.5MPa의 콘크리트를 얻는 데, 1970년의 물시멘트비는 50%였지만 1984에서는 57%가 되어 내구성 관점에서 바람직하지 않다는 보고가 있다. 시멘트의 물리시험에서 물시멘트비는 ISO규격에 따라 50%로 낮추었지만 강도는 변하지 않고 높은 값을 나타내고 있다. 유럽규격(ENV-197)에서는 32.5(32.5N/mm<sup>2</sup>이상, 52.5N/mm<sup>2</sup>이하) 등급 또는 42.5(42.5N/mm<sup>2</sup>이상, 62.5N/mm<sup>2</sup>이하)등급과 같이 강도상한을 제시하고 있다. 이와 같이 물시멘트를 작게 한 콘크리트를 이용하는 것은 내구성 관점에서 다시 한번 생각해 볼 기회가 된 것 같다. 현재 일본 보통 포틀랜드시멘트는 거의 모두 52.5(28일에서, 52.5N/mm<sup>2</sup> 이상)등급이다.

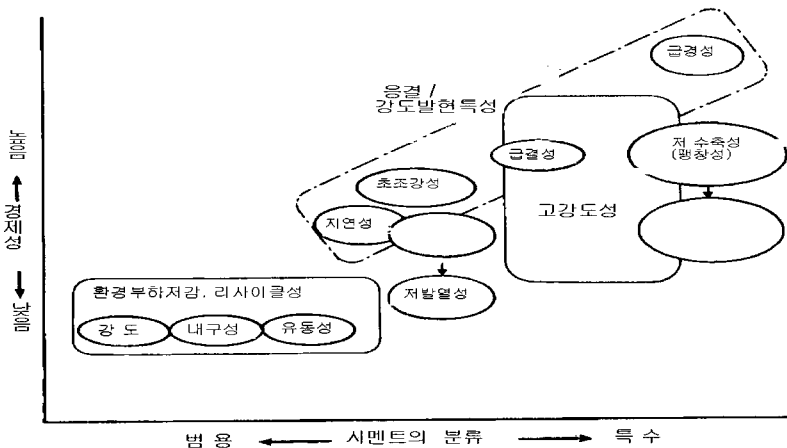


그림 2. 범용시멘트와 특수시멘트

### 3. 시멘트제조에서 환경대응

〈그림 3〉과 같이 시멘트의 소성공정에서 고효율 도입율은 일본이 외국에 비해 가장 크다. 미국은 일본의 32%, 영국은 21%, 독일은 54%, 프랑스는 30%이다. 따라서 연료 원단위는 일본이 가장 낮으며 독일은 일본 1.1배, 프랑스는 1.2배, 미국은 1.8배이다. 성에너지의 관점에서의 노력은 진척이 있다. 또 지금부터 10년후(2010년)까지에는 견형 밀, 고효율화 클링커 쿨러, 예비 분쇄기 또는 폐열 이용에 의해서 더욱 더 성 에너지화가 실현될 전망이다.

〈그림 4〉는 시멘트제조에서 탄산가스발생을 나타내고 있다. 원료에서 CO<sub>2</sub>발생량이 많고 이것을 저감하는 것이 중요하다. 따라서 클링커생산량을 저감하는 혼합시멘트가 유리하다.

〈그림 5〉는 각종 시멘트의 CO<sub>2</sub>배출량을 나타냈다. 그림중의 52.5, 42.5 및 32.5는 유럽규격(ENV-197)의 강도등급이다. CO<sub>2</sub>배출량을 억제하는 혼합시멘트 생산으로 클링커 생산량을 낮추는 것이 효과적이고 국제규격으로 전환도 쉽다. CO<sub>2</sub>발생량의 억제대책으로 혼합시멘트기술의 충실화가 요망되고 각종 혼합재를 이용하는 시멘트의 재료설계 기술 또는 품질관리 수법 및 제조기술의 체계화가 필요하다. 석회석 미분말은 고유동 콘크리트 또는 고품질 슛크리트에 이용되어 왔지만, 필라시멘트 또는 유럽규격의 석회석 포틀랜드시멘트 또는 복합 포틀랜드시멘트 등의 원료로 중요하다. 시멘트의 종류 또는 저환경형 시멘트(저열, 고유동)의 CO<sub>2</sub>발생량은 보통 시멘트의 98~99%정도이고, 소성온도의 저하 또는 분쇄효율 등이 저조하여 성에너지 또는 CO<sub>2</sub>저감대책으로서는 그다지 기대되지 않는다.

### 4. 리사이클 사회와 시멘트

시멘트 제조는 1500℃이상 고온 소성이 필요하며, 원료로 대체할 수 있는 일반

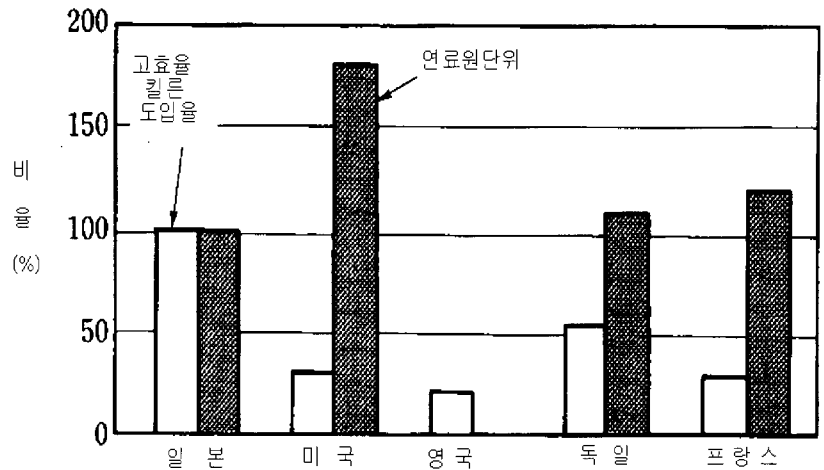


그림 3. 시멘트제조에서 연료원단위와 고효율킬른도입율

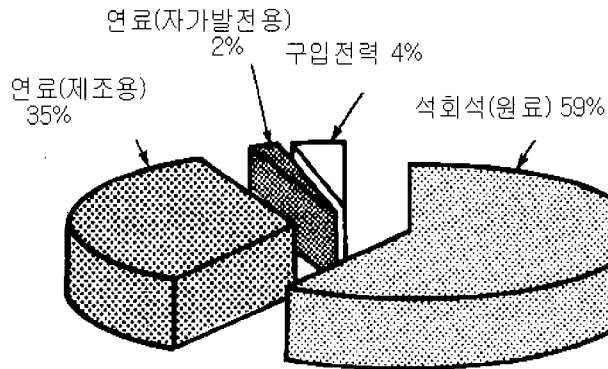


그림 4. 시멘트 제조에서 CO<sub>2</sub> 배출량

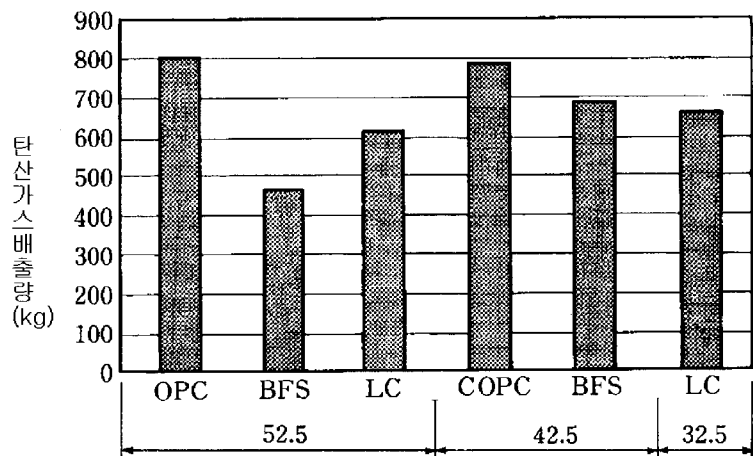


그림 5. 각종 시멘트의 CO<sub>2</sub> 배출량

폐기물 또는 산업폐기물을 선택하여 1500℃이상의 고온시설에서 처리감량도 가능하다. 시멘트산업에서 보유하는 킬른은 다 이옥신의 발생 가능성이 낮은 고온 소성로이고 따라서 처리감량의 관점에서도 그의

중요성이 증가하고 있으며, 이것은 시멘트가 많은 원료(원소를 화합물)를 사용할 수 있는 이유의 하나이다. 물론 유해금속 등의 허용치는 유지하고 사용자의 요구성을 만족해야 한다.

〈표 1〉은 시멘트의 원료 또는 연료로 사용하고 있는 산업폐기물의 일람이다. 시멘트의 주성분은 CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 또는 MgO이기 때문에 대부분의 폐기물 또는 부산물은 원료로서 이용가능하고, 페타이어 또는 폐유 등은 연료로서 이용되며 고로슬래그, 플라이앓쉬 또는 석고 등은 제품의 혼합재로 첨가할 수 있다. 시멘트 생산량은 96년 99267천톤, 97년 92556천톤, 98년 82569천톤으로 감소 경향이지만, 산업폐기물·부산물의 비율은 27.2, 28.7, 29.5%로 년차로 증가하고 있다. 특히 고로 슬래그는 원료와 혼합재로서 대량 사용되고 있다. 또 유효이용 또는 처리가능한 허용량은 무한하지 않으므로 무엇을 우선 하는가는 신중해야 한다. 하수 오니를 직접 원료 또는 연료로서 이용하는 설비 또는 페플라스틱을 연료로서 이용되는 설비등이 활용되는 시멘트 플랜트도 증가하고 있다. 또 RDF를 사용하는 공장도 있는 등 그의 처리 범위는 확대되고 있다.

유해금속 또는 염소 등의 혼입은 피해야 하므로 쓰레기 소각재 등은 수세해서 사용하는 방법 등이 검토되고 있다. 또 시멘트 플랜트에 염소 by-pass를 설치해서 염소를 규제치 이내로 하는 연구도 진행되고 있다. 또, 이 같은 시멘트 플랜트에서의 폐기물 또는 부산물의 이용외에도 현재 클링커의 주 원료의 50%이상을 쓰레기 소각재 또는 하수오니 등의 도시형 종합 폐기물을 이용한 에코시멘트의 약 300,000톤/년의 제1호 플랜트가 건설중이다. 기존 플랜트에서는 포틀랜드시멘트가 제조되는데 이런 경우에서는 도시 쓰레기 소각재중에서는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>량이 통상 원료에 비하여 높기 때문에 처리량을 증가시키면 알루미늄이트 또는 페라이트상을 통상의 포틀랜드시멘트보다 많이 된다. 또 소각재 중의 염소 또는 중금속이 문제인데 소각재중의 중금속은 중금속 회수공정으로 분별 농축시켜 금속정련소에서 재 자원화시키는 공정도 포함하고 있으며 염소는 by-pass를 설치하여 제거하고 보통 포틀랜드시멘트에

표 1. 시멘트산업에서 폐기물·부산물 사용량(천톤)

종류 \ 년대	1996	1997	1998
폐유	126	117	131
재생유	137	159	187
페백토	68	76	90
페타이어	259	258	282
고로슬래그	13892	12684	11353
제강슬래그	1246	1207	1061
비철광재	1430	1671	1161
주물사	434	542	454
Boarder	1772	1772	1104
미연소재·더스트	441	543	531
석탄회	3402	3517	3779
오니·슬릿지	930	1189	1394
부산 석고	2522	2524	2426
건설폐재	58	49	112
기타	268	292	305
합계	26986	26600	24371

표 2. 에코시멘트의 구성 화합물(예)

시멘트의 종류	구 성 화 합 물 (Mass %)					
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>11</sub> A <sub>7</sub> · CaCl <sub>2</sub>	C <sub>4</sub> AF	CaSO <sub>4</sub>
에코시멘트(보통형)	49	12	14	-	13	7.7
에코시멘트(초속경, 급경성)	44	11		17	8	15.1
보통시멘트	56	19	9	-	9	3.4

표 3. 에코시멘트의 품질예

시멘트의 종류	밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	응결		압축강도(N/mm <sup>2</sup> )				
			초결	종결	3hr	1ds	3ds	7ds	28ds
에코시멘트(보통형)	3.19	4500	2:00	4:30	-	9	22	37	53
에코시멘트(초속경, 급경성)	3.13	4600	0:09	0:13	10	23	30	38	46
보통시멘트	3.17	3220	2:22	3:20		11	27	43	59

가까운 성능의 것을 제조하는 경우와 염소를 화합물중에 의도적으로 잔존시켜 급경성 시멘트를 제조하는 경우도 있다.

이 경우 칼슘클로로알루미늄이트(C<sub>11</sub>A<sub>7</sub> · CaCl<sub>2</sub>)가 급경성을 부여하는 역할을 한다. 에코시멘트의 구성화합물의 조성과 품질의 일례를 〈표 2〉와 〈표 3〉에 나타내었다. 또 에코시멘트에 대해서는 다량으로 이용하는 용도개발과 이용방법도 포함한다. 종합 시스템의 구축이 필요하다.

### 5. 시멘트 제조

21세기 시멘트공장은 CO<sub>2</sub>שאם 대책 또는 요구성능의 다양화를 위해 혼합시멘트

를 주체로한 생산을 주력할 가능성이 높다. 그러나 가공이 가해지면 비용이 올라가므로 혼합과 분쇄에 관한 기술개발과 합리적인 혼합시멘트의 생산프로세스 개발은 중요하다. 이런 기술개발은 탄소세 등이 발동된 후에는 늦다. 어떤 혼합재를 선택하는가는 지역성과 생산성이 고려된 선택이어야 한다. 또 지원시스템 등도 통합화된 생산시스템의 확립으로 수주, 재고관리도 포함해서 각종 품종(특히, 유동성 향상)을 효율 좋게 생산할 수 있을 것이다. 이런 것을 대형화된 플랜트의 소성기술로 대응하는 것은 불가능하다.

또 폐기물이용의 증대를 위해 시멘트 재료설계, 제조 및 품질관리에서 다음과

같은 기술확립이 급하다. 시멘트 요구성능으로 유동성과 내구성은 중요하며 염소함유량 또는 알루미늄이트량의 증가는 강재 부식을 조정하고 유동성에 악 영향을 줄 수 있다. 또 폐기물 등의 투입량 또는 그것이 소성 가능한가 또는 요구성능을 만족하는가 등을 평가할 수 있는 재료설계 또는 소성 시뮬레이션 등의 지원시스템 등을 확립해 놓을 필요가 있고 이상과 같은 통합화된 시스템과 연관시켜야 한다. <그림 6>은 선형계획법과 상조성 모델을 이용한 물성예측을 위해 시멘트성능을 유지하는 조성을 어느 정도까지 변경해 어느 정도의 폐기물의 처리가 가능한가 등을 추정할 수 있는 예이다. 또 새로운 설계시공체계에 대응한 품질보증을 어떻게 하는가가 중요하다. 시험성적표는 없이 사용해야 할 리사이클 품질시험 또는 물성예측수법의 확립은 급하며 해당필자도 초기 수화열 측정에서 물성예측을 하는 방법을 제안하고 있다. 또 유해한 물질에 대해서는 그의 표시도 검토할 필요가 있다.

플랜트운전에 대해서는 소성 시뮬레이션에 전산망을 이용한 전문가 시스템 등이 도입되고 있는데 더한층 그의 정도를 향상시킬 필요가 있다. 시멘트산업은 폐기물의 최종처분장으로서의 적극적인 활용은 지역적 사회활동에 지대한 영향을 미친다는 것을

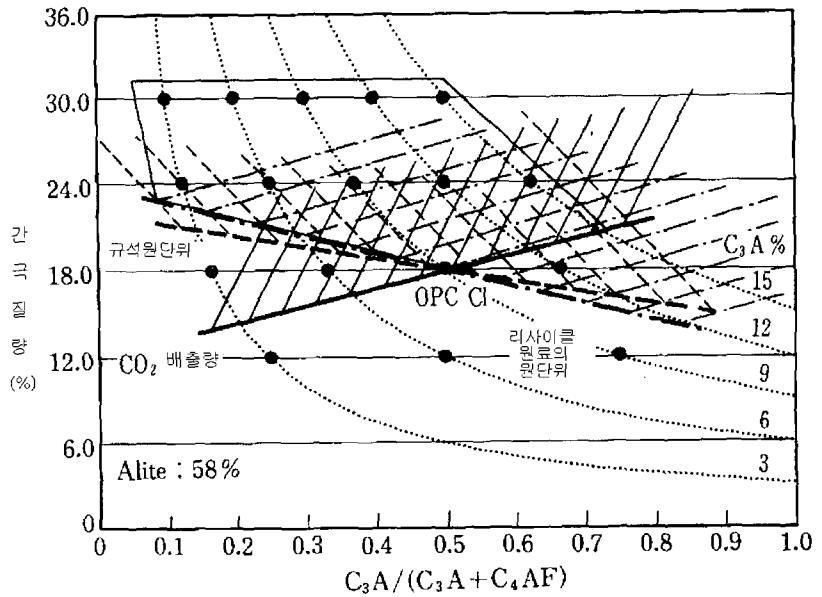


그림 6. 선형계획법과 상조성 모델에서 추정된 저환경부하로 된 조성

명심해야 한다. 그런 의미에서 플랜트 운전에 관계된 Know-How 등을 시스템적으로 확실히 만들어 놓을 필요가 있다.

### 6. 끝

지구 환경문제, 즉 CO<sub>2</sub>발생량 저감책으로 고로 슬래그 또는 펄라 시멘트와 같은 혼합시멘트가 강조되고 있다. 또한 유동성을 고려한 고성능 시멘트의 개발과도 관련해서도 혼합시멘트는 중요한 위치에

있게 될 전망이다. 또, 고온형 화학 플랜트의 시멘트 생산설비는 도시형 폐기물의 감용 처리시스템으로 그의 유용성이 증가하고 있다.

결국, 시멘트 플랜트는 사용자에게 보다 성능 좋은 시멘트를 안정적으로 공급하면서 종합적으로 지구환경에 공헌할 수 있는 기술개발과 경영이 요청되는 시기이고, 사회환경과 시멘트의 요구성능에 다양화를 고려하여 고내구성 범용시멘트가 대두될 전망이다. □

## 特輯 / 構造物の高性能化を目指す21世紀のコンクリート技術 / 4. 21世紀の 콘크리트材料

### 材料 -세멘트-

\* 坂井 悦郎 \*\* 大門 正機

\* 東京工業大學 大學院 助教授 理工學研究科

\*\* 東京工業大學 大學院 教授 理工學研究科

日, 콘크리트工學, Vol. 39, No. 1, pp50~54, 2001.1