과도기적 단계에서 수요자 요구에 부응하는 특수 시멘트의 생산

한 천 구 (청주대학교 건축공학부 교수)
차 완 호 (아세아시멘트(주) 기술연구소 선임연구원)
노 상 균 (청주대학교 건축공학부 석사과정)

1. 서 언

시장의 형태는 수요와 공급의 과·부족 상황에 따라 다양하게 형성된다. 즉 수요가 많고 공급이 부족할 때는 수요자의 다양한 요구가 묵살되면서 공급자의 생산설비는 대형으로 대량생산이 가능하게 형성된다. 이제까지 우리나라 시멘트 산업의 모습이었다고 해도 과언이 아닐 것이다.

그러나 이제는 상황이 바뀌었다. 건설수요는 변함이 없거나 줄고 있는 반면 시멘트 생산설비는 증가하였고, 중국산 저가의 시멘트가 수입되고 있으며, 혼화재료의 개발 및 다량 사용으로 인해 시멘트의 사용량이 감소하는 등 이제는 수요보다 공급이 과잉인 상황으로 역전되고 있다.

그렇다면 이제부터는 수요자의 다양한 요구가 존중되어야만 하는데, 우리나라 기존의 대형생산설비로는 수요자의 다양한 요구에 부응하기란 많은 어려움이 따른다. 즉 우리나라의 각 시멘트 회사에서는 보통 포틀랜드 시멘트 생산설비 시스템 이외의 다양한 수요를 만족시켜 줄 수 있는 시멘트의 생산설비가 거의 없는 실정이다.

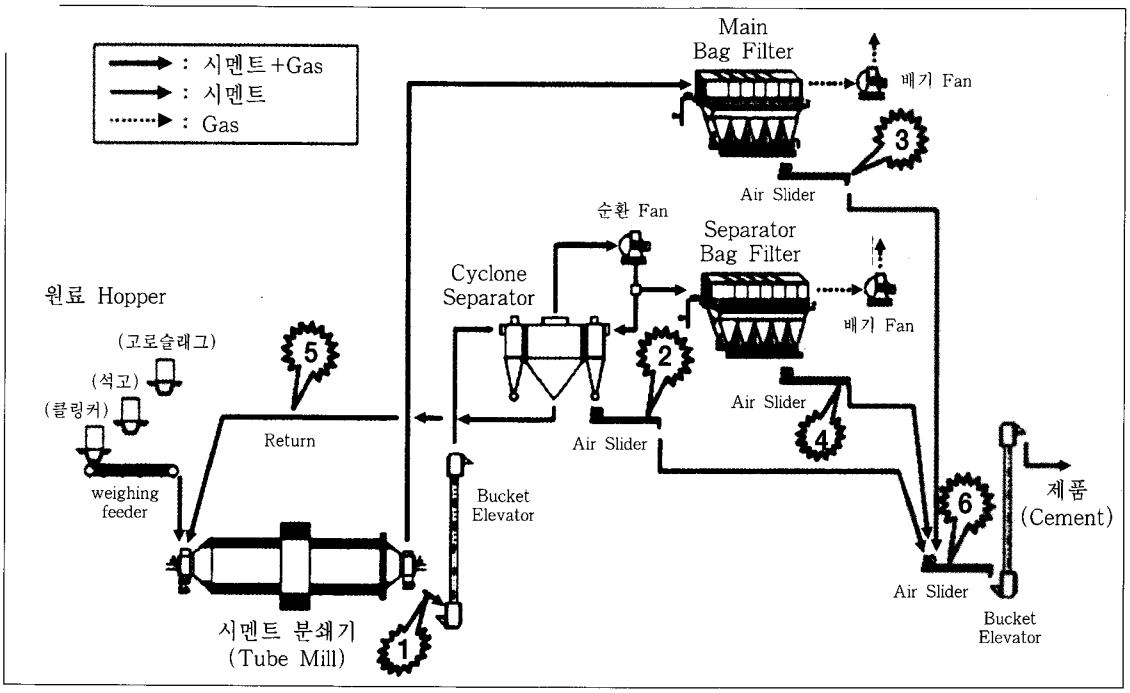
따라서 본 기사에서는 과도기적 단계로서 이와 같은 기존의 대형생산설비를 활용하여 수요자의 다양한 요구에 부응할 수 있는 맞춤형 특수 시멘트의 생산에 관하여 지식경제부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업의 일환으로 수행된 필자들의 연구팀과 아세아시멘트(주)간의 공동연구개발 성과물인 「시멘트 분쇄공정에 의해 분급된 시멘트 분말도 변화에 따른 조강/저발열 시멘트의 제조공법」에 대하여 소개해 보고자 한다.

2. 분쇄공정에 의한 특수 시멘트의 제조

본래 조강이나 중용열·저열 포틀랜드 시멘트 등은 보통 포틀랜드 시멘트(이하 OPC)와 달리 원료조합에서부터 소성온도 및 분쇄공정 등을 달리하여 제조하는 것이 기본이다.

그러나 위에서 언급한 것처럼 현재의 대형설비로 이와 같은 조건을 수시로 바꾸면서 수요자의 요구에 부응하는 것은 어려운 일이다. 따라서 필자들의 아이디어는 시멘트 생산시 분쇄공정에서 시멘트의 입도를 달리하여 포집한다면 어느 정도 다양한 요구에 부응할 수 있을 것이라는 생각인 것이다.

즉 〈그림-1〉은 포틀랜드 시멘트 생산과정 중 분



〈그림-1〉 포틀랜드 시멘트의 분쇄공정도

쇄공정도의 일예를 나타낸 것이다.

시멘트 분쇄기(Tube Mill)에 크링카 및 기타 원료가 투입되면 분쇄된 원료는 ①라인에서 사이클론 세퍼레이터(Cyclone Separator)로 이동된다. 이때 충분한 분쇄가 이루어지지 않은 입자는 ⑤라인으로 역송되어 시멘트 분쇄기에서 재분쇄과정을 거치게 되고, 제품수준으로 분쇄된 입자는 ②라인을 통하여 시멘트 사일로에 투입되며, 미세하게 분쇄된 입자는 공기와 함께 메인 백 필터(Main Bag Filter) 및 세퍼레이터 백 필터(Separator Bag Filter)에 포집되어 ③라인 및 ④라인으로 이동하여 ⑥라인의 OPC에 혼합된다.(〈표-1〉)

〈표-1〉 포틀랜드 시멘트 분쇄공정 구분

공정위치	시 료 명	특기사항
①	Mill출구분	조분말
②	C/S미분	미분말
③	M-B/F미분	미분말
④	S-B/F미분	미분말
⑤	C/S역송분	조분말
⑥	종합분	②+③+④

3. 분쇄공정 라인별 시멘트의 물리·화학적 특성

가. 분말도

〈표-2〉는 〈그림-2〉에서 제시된 시멘트 분쇄공정 라인별 분말도를 측정한 일예에 대한 표이다.

분말도는 ⑤라인에서 가장 작은 경향을 나타내고 있는데, 이는 튜브 밀의 피분쇄물 중에서 미분을 분리한 후 조분만을 재역송하는 흐름이므로 가장 작은 분말도를 나타내고 있는데, 44㎛ 및 88㎛ 잔사가 너무 높아 이용시 제한이 있을 것으로 생각된다. 또한 ①라인 시멘트의 분말도는 1,908cm²/g으로 ⑤라인보다는 다소 높지만, 전체적으로는 작은 분말도를

〈표-2〉 분말도

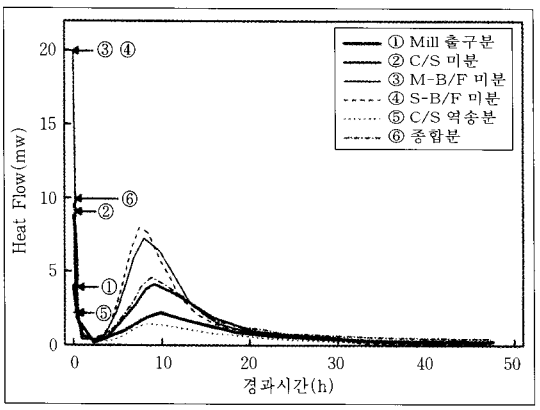
시 료	n	분말도 (cm^2/g)	Sieve 잔사(%)	
			44μmR	88μmR
① Mill출구분	6	1,908	49.0	12.9
② C/S미분	6	3,272	7.4	0.4
③ M-B/F미분	6	4,213	4.2	0.0
④ S-B/F미분	6	6,953	4.2	0.1
⑤ C/S역송분	6	1,087	72.5	19.0
⑥ 종합분	6	3,380	7.0	0.5

나타내고 있다. 그러나 ② 및 ③라인에서의 분말도는 제품으로 출하되는 포틀랜드 시멘트와 유사한 분말도를 나타내고 있으며, ④라인의 분말도는 (6,953cm^2/g, 44μm Sieve 잔사 4.2% 수준) 사이클론 세퍼레이터공정 과정을 거쳐 세퍼레이터 백 필터로 이동하여 집진된 극미분이므로 가장 높은 분말도를 나타내고 있다.

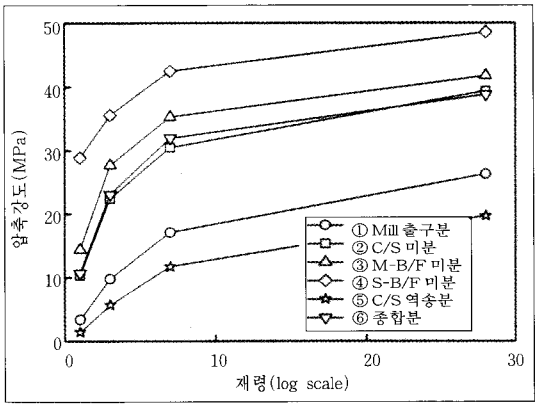
나. 수화열

〈그림-2〉는 시멘트 분쇄공정 라인별 수화열을 나타낸 그래프이다.

수화발열 패턴에서 1차 피크는 물과 접촉 후 수분 이내에 나타나고, 석고와 C_3A의 반응에 의한 에트린가이트($C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)의 생성열, C_3S



〈그림-2〉 시멘트의 수화열



〈그림-3〉 시멘트의 압축강도

표면의 용해열 및 F-CaO의 수화열인 것으로 사료된다. 또한 수화열 측정결과 1차 피크는 ③라인 시멘트, ④라인 시멘트가 높고, ①라인 시멘트가 낮은 경향을 보이고 있다.

1차 피크와 2차 피크 사이 유도기는 C_3A와 석고간의 반응으로 에트린가이트 막이 C_3S 표면에 불용성으로 형성되어 수화반응을 억제함으로써 더 이상 수화반응이 진행되지 못하고 억제되는 시기이다. 이때 수화열 측정결과 유도기 시간은 ①라인 및 ⑤라인이 이 약간 길고, 나머지 시료는 유사한 수준으로 나타난다.

2차 피크는 불용성막이 파괴되고, C_3S가 본격적으로 수화하여 C-S-H를 형성함에 따라 발생되는 수화열이다. 측정결과 2차 피크 높이와 최고점 도달 시간은 ④라인 시멘트 및 ③라인 시멘트가 높고 조기에 출현하며, ①라인 시멘트 및 ⑤라인 시멘트의 높이가 낮고 출현시기가 지연됨을 알 수 있다.

결과적으로 ④라인 시멘트는 수화열이 높은 동시에 수화반응이 촉진되었으며, ① 및 ⑤라인 시멘트는 수화열이 낮고 수화반응이 지연됨을 알 수 있다.

다. 압축강도

〈그림-3〉은 시멘트 분쇄공정 라인별 압축강도를 나타낸 그래프이다.

〈표-3〉 화학성분

시 료	화 학 성 분(%)								Module		
	LOI	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	LSF	SM	IM
① Mill출구분	0.18	22.18	5.17	3.82	64.44	2.05	1.14	0.87	90.03	2.47	1.35
② C/S미분	0.32	21.91	5.04	3.67	64.25	2.00	1.77	0.91	90.45	2.52	1.38
③ M-B/F미분	0.55	21.64	5.01	3.69	64.00	2.02	1.98	0.97	90.87	2.49	1.36
④ S-B/F미분	0.54	21.24	5.01	3.68	62.91	2.00	3.17	1.31	89.55	2.44	1.36
⑤ C/S역송분	0.15	22.30	5.24	3.88	64.64	2.06	0.77	0.82	90.12	2.45	1.36
⑥ 종합분	0.35	21.88	5.02	3.66	64.18	2.01	1.83	0.92	90.44	2.52	1.37

LOI : 강열감량, LSF : 석회포화도, SM : 규산률, IM : 철률

①라인 시멘트 및 ⑤라인 시멘트는 전체 재령에서 압축강도가 낮으나, 4종 저열 시멘트의 강도규격은 만족하는 것을 알 수 있다. 단, 압축강도는 다른 시멘트와 혼합비율을 조정하게 되면 의도한대로 자유롭게 제어가 가능하다. ③라인 시멘트 및 ④라인 시멘트는 전체 재령에서 높은 강도를 나타내고 있어 각각의 시멘트를 단독으로 사용하여도 3종 조강 시멘트의 강도규격을 충분히 만족하는 것으로 나타난다.

라. 화학성분

〈표-3〉은 시멘트 분쇄공정 라인별 화학성분을 나타낸 표이다.

먼저 시멘트 분말도가 높을수록 LOI, SO_3 및 K_2O 함량은 증가하고, SiO_2, Al_2O_3 및 CaO 함량은 감소한다. 특히 시멘트 분말도가 높을수록(③ 및 ④라인 시멘트) SO_3 함량이 크게 증가하는데, 이는 연질인 석고의 재료적 특성상 튜브 밀에서 미세하게 분쇄되어 사이클론 세퍼레이터 공정과정 중 공기와 함께 세퍼레이터 백 필터로 이동하여 집진되었기 때문에 높은 범위를 나타낸 것이다. 또한 상대적으로 조립분인 ①라인 시멘트 및 ⑤라인 시멘트는 석고함량이 낮아 응결지연 효과의 감소 우려가 있으나, 조립입자에 의하여 수화가 지연되기 때문에 응결시간 확보에는 문제가 없는 것으로 생각된다.

이상을 종합하면 시멘트 분쇄공정 라인별 시멘트의 물리·화학적 특성을 평가한 결과 분말도, 화학성분, 입도분포 등 고유 물성의 차이로 인하여 상이한 품질특성을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 또한 분쇄공정 중 ④라인의 미분 시멘트는 분말도가 높은 시멘트를 생산할 수 있고, ① 및 ⑤라인의 조분 시멘트는 수화열이 낮은 시멘트를 생산할 수 있는 것으로 밝혀졌다.

따라서 상기의 미분 시멘트 및 조분 시멘트는 시중에 유통되는 3종 조강 및 4종 저열 시멘트로 대체할 수 있을 것으로 생각되지만, 경제성 및 현장 수요에 따른 원활한 시멘트 공급을 고려한다면 OPC와 혼합하여 사용하는 것이 적절할 것으로 생각된다.

4. 미분 시멘트를 사용한 콘크리트의 공학적 특성

④라인에서 분급한 시멘트는 분말도가 6,000~7,000cm^2/g 수준의 미분 시멘트(이하 FC)로서 조강 시멘트로의 활용이 가능하다. 따라서 〈표-4〉의 실험계획과 같이 FC 치환율 변화에 따른 콘크리트의 공학적 특성을 분석하였다.

가. 굳지 않은 콘크리트

FC 치환율 변화에 따른 슬럼프 및 공기량은 배합

〈표-4〉 실험계획

실 험 요 인		실 험 수 준	
배합사항	W/C(%)	1	50
	목표 슬럼프(mm)		150±25
	목표 공기량(%)		4.5±1.5
	FC 치환율(%)	5	0(OPC), 25, 50, 75, 100
실험사항	굳지 않은 콘크리트	3	• 슬럼프 • 공기량 • 응결시간
	경화 콘크리트	1	• 압축강도(종결시간×2, 4, 8, 16, 32, 64배, 28일)

설계에 의해 모두 목표범위를 만족시키는 것으로 하였으므로, 목표 슬럼프 및 목표 공기량 확보를 위해 고성능 감수제 및 AE제의 사용량을 검토하였는데, 고성능 감수제 사용량은 FC 치환율 변화에 따라 점차 증가시켜주어야 하는 것으로 나타났다. 이는 FC 치환율이 증가할수록 물과 접촉할 수 있는 비표면적이 커지는 동시에 분체량이 증가하여 점성이 늘어남에 기인한 것으로 분석된다.

〈그림-4〉는 FC 치환율별 경과시간에 따른 관입저항치를 나타낸 그래프이다.

전반적으로 FC 치환율이 증가함에 따라 비례적으로 응결이 촉진되었는데, 이는 FC 치환율이 증가함에 따라 물과 접촉할 수 있는 비표면적이 커져서 수화반응이 촉진된 결과로 판단된다.

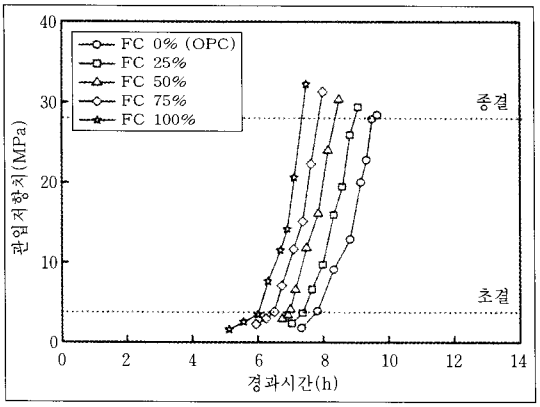
나. 압축강도

〈그림-5〉는 FC 치환율별 경과시간에 따른 압축강도를 나타낸 그래프이다.

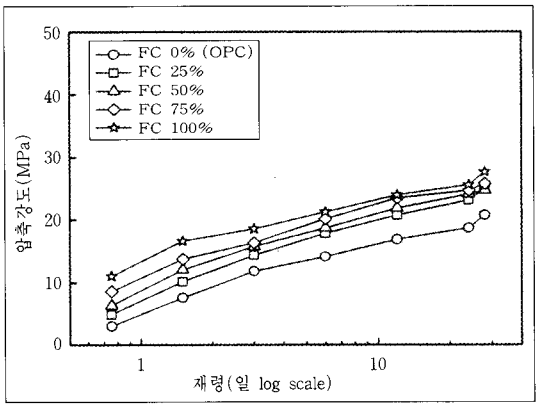
FC 치환율이 증가할수록 압축강도는 비례적으로 증가하였는데, 특히 초기재령에서 예상대로 높은 강도증진을 보였다. 그러나 재령이 증가하면서 FC 치환율에 따른 강도증가는 점차 둔화되는 경향을 나타냈는데, 이는 FC의 고분말도로 인해 혼합수와의 접촉면적이 증가하여 수화가 촉진되고 초기에 활발한 수화반응을 일으키지만, 수화반응에 이용되는 시멘트의 절대량 및 화학적 성분은 OPC와 거의 동일하므로 시멘트 절대량에 따른 수화작용의 총량은 결국 같다고 할 수 있다. 따라서 장기재령으로 진행될수록 OPC에 비해 수화에 이용될 수 있는 여분의 시멘트량 감소로 더 이상의 활발한 수화반응이 이루어지지 못해 강도발현 성능이 감소할 것으로 생각된다.

5. 조분 시멘트를 사용한 콘크리트의 공학적 특성

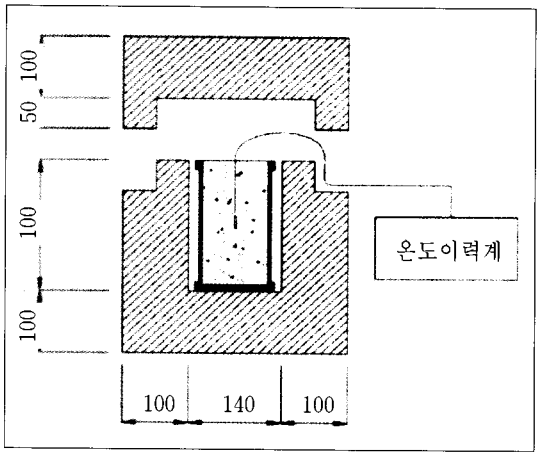
대표적으로 ①라인에서 채취한 시멘트는 분말도

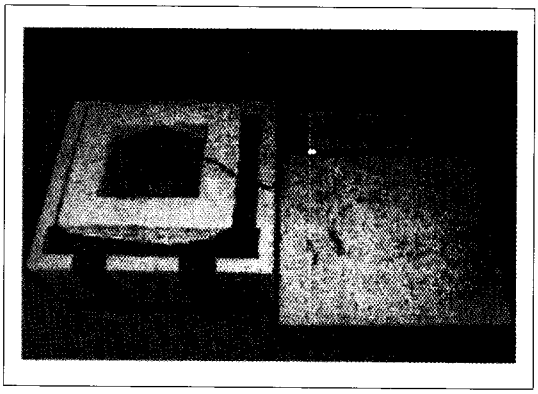


〈그림-4〉 FC 치환율별 경과시간에 따른 관입저항치



〈그림-5〉 FC 치환율별 경과시간에 따른 압축강도





〈그림-6〉 간이단열에 의한 온도 시험장치

가 1,600~2,100cm²/g 수준의 조분 시멘트(이하 CC)로서 저발열 시멘트로의 활용이 가능하다. 따라서 〈표-5〉의 실험계획과 같이 CC 치환율 변화에 따른 콘크리트의 공학적 특성을 분석하였다.

가. 굳지 않은 콘크리트

CC 치환율 변화에 따른 슬럼프 및 공기량은 FC와 마찬가지로 배합설계에 의해 모두 목표범위를 만족시키는 것으로 하였으므로, 목표 슬럼프 및 목표 공기량 확보를 위해 고성능 감수제 및 AE제의 사용량을 검토하였는데, 고성능 감수제 사용량은 CC 치환율이 증가할수록 점차 감소시켜주어야 하는 것으로 나타났다. 이는 CC가 OPC에 비해 24μm 이

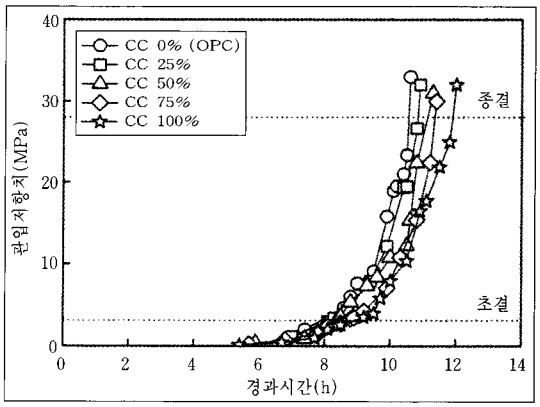
〈표-5〉 실험계획

실 험 요 인			실 험 수 준
배합사항	W/C(%)	1	50
	목표 슬럼프(mm)		120±25
	목표 공기량(%)		4.5±1.5
	FC 치환율(%)	5	0(OPC), 25, 50, 75, 100
실험사항	굳지 않은 콘크리트	3	• 슬럼프 • 공기량 • 응결시간
	경화 콘크리트	1	• 압축강도(1, 3, 7, 28, 91, 180일, 1년) • 간이단열에 의한 온도

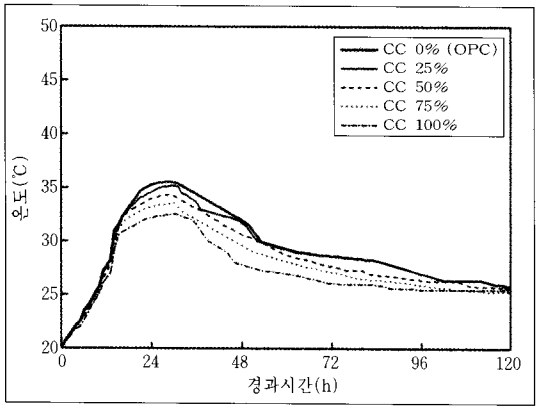
하의 입자가 적고, 연속입도분포를 나타내고 있으며, 평균입경이 크기 때문에 시멘트 입자수가 줄어들어 페이스트와 골재계면 사이의 마찰이 작아짐에 따라 유동성이 증가한 것이고, 또한 CC 치환율이 증가할수록 물과 접촉할 수 있는 비표면적이 작아지는 동시에 분체량이 저하하여 점성이 줄어들어 유동성이 증가한 것으로 분석된다.

〈그림-7〉은 CC 치환율별 경과시간에 따른 관입저항치를 나타낸 그래프이다.

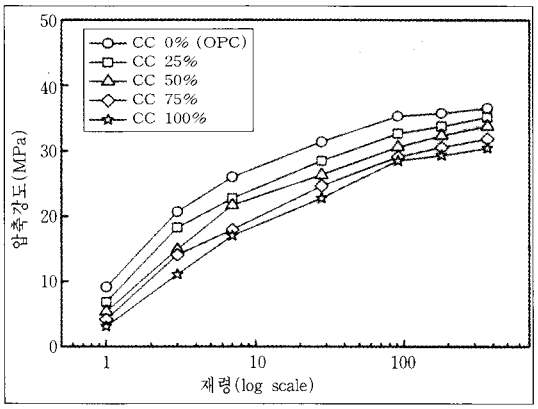
전반적으로 CC 치환율이 증가함에 따라 비례적으로 응결이 지연되었는데, 이는 CC 치환율이 증가함에 따라 물과 접촉할 수 있는 비표면적이 작아서 수화반응이 지연된 결과로 판단된다.



〈그림-7〉 CC 치환율별 경과시간에 따른 관입저항치



〈그림-8〉 CC 치환율별 경과시간에 따른 간이단열에 의한 온도



〈그림-9〉 CC 치환율별 경과시간에 따른 압축강도

나. 간이단열에 의한 온도

〈그림-8〉은 CC 치환율별 경과시간에 따른 간이단열에 의한 온도변화 경향을 나타낸 그래프이다.

전반적으로 CC 치환율이 증가할수록 피크온도는 감소하며 피크온도 도달시간은 지연되는 것으로 나타났다. 이는 분말도 저하에 의하여 수화반응이 비례적으로 지연되고, 또한 활성화 되지 못해 발생된 결과로 판단된다. CC 치환율이 증가할수록 경과시간에 따른 간이단열에 의한 온도 곡선형태는 피크형태에서 언덕형태로 완만하게 형성되었는데, 이러한 피크온도 이후 완만한 저하는 CC의 치환율이 증가함에 따라 CC의 낮은 분말도로 인하여 미수화 시멘트가 지속적으로 수화반응을 진행하므로서 나타난 결과로 분석된다.

다. 압축강도

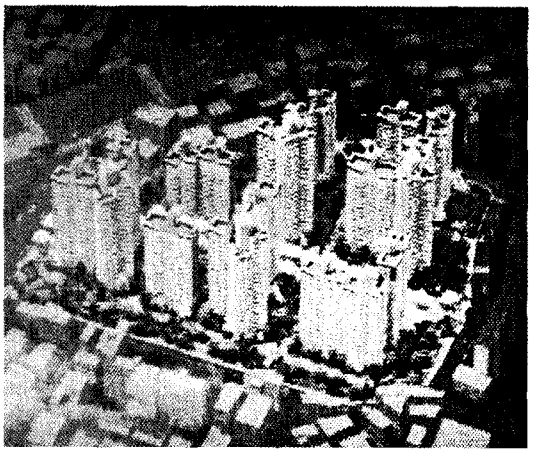
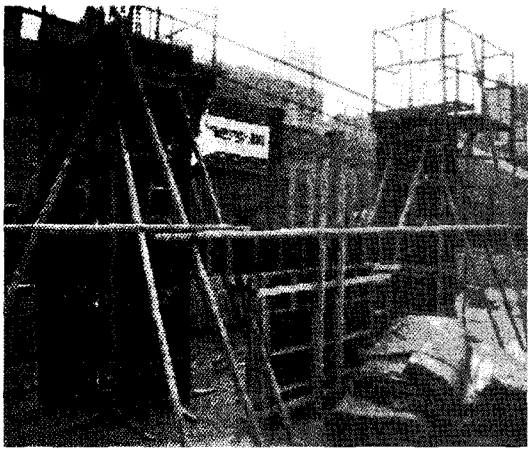
〈그림-9〉는 CC 치환율별 경과시간에 따른 압축강도를 나타낸 그래프이다.

CC 치환율이 증가할수록 압축강도는 비례적으로 저하하였지만, 재령이 경과할수록 강도저하 폭은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 CC의 낮은 분말도로 인하여 미수화 시멘트가 지속적으로 수화반응을 진행하여 나타난 결과로 분석된다. 또한 수화초기의 응결지연작용에 의해 수화반응이 서서히 진행되게 되면, 이로 인한 밀실한 수화생성물이 생성되어 장기재령에서 내부조직이 보다 치밀화된 것에 기인하는 것으로 분석된다. 따라서 추후 재령이 경과함에 따른 압축강도는 수화반응에 필요한 충분한 수분공급이 존재한다면 OPC와 동등 수준의 강도발현을 나타낼 것으로 생각된다.

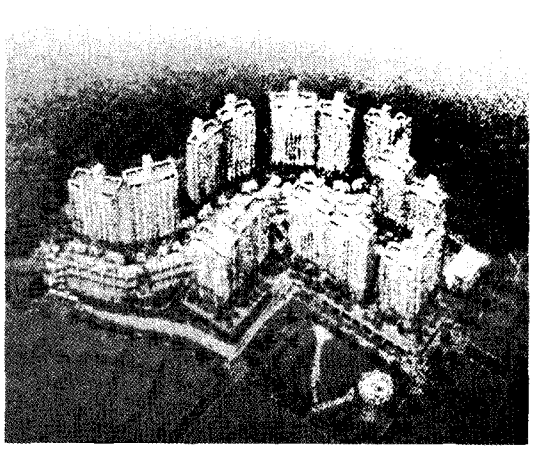
7. 활용 방안

최근 도심지의 건축물은 지가상승 및 건물의 효율적 활용과 관련하여 대단위 주거시설을 중심으로 초고층화하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 추세에 따라 건축물의 일반 구조체는 공사비와 관련하여 공기단축을 요구함과 동시에 기초 구조체는 안전성과 연관하여 대규모 매스콘크리트가 채택되어 진다. 그에 따라 조강이나 중용열·저열 시멘트의 수요가 증가하고 있는데, 기존에 개발된 2종~4종 시멘트의 경우 별도의 성분조정이나 소성온도변경 등에 의하여 고가가 소요된다. 그러나 본 기사에서 소개하는 분쇄공정에 의해 분급된 시멘트 분말도 변화에 따른 조강/저발열 시멘트는 위와 같은 절차가 필요 없게 되어 가격경쟁력 면에서 우위를 점할 수 있다.

미분 시멘트의 경우 조강 시멘트를 대체하여 사용

〈사진-1〉 D건설사의 미분 시멘트를 활용한 한중 콘크리트 현장적용



〈사진-2〉 D건설사의 미분 시멘트를 활용한 동절기 숏크리트 현장적용

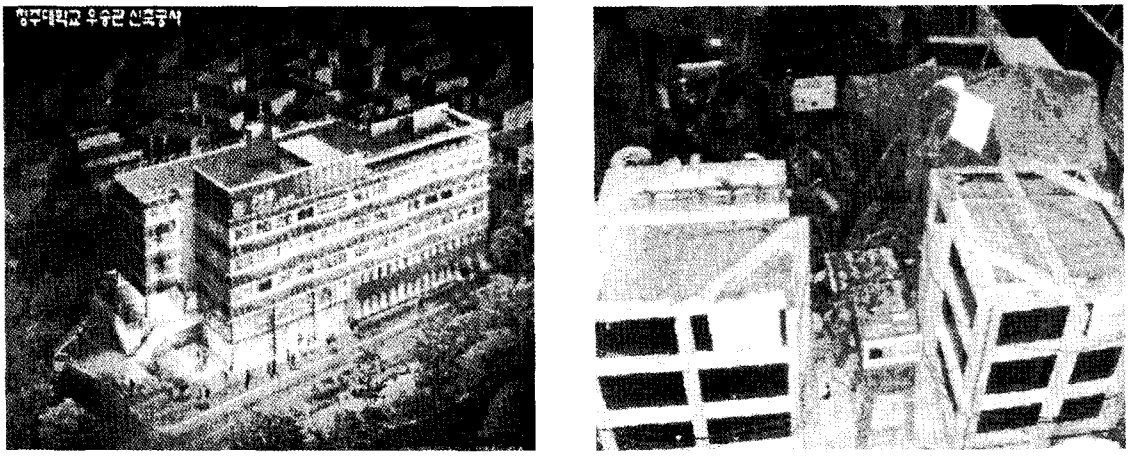
할 수 있으며, 빠른 응결을 요하는 긴급보수용이나 숏크리트제 및 동절기 공사에 활용이 가능하다. 또한 조분 시멘트의 경우는 저발열 시멘트를 대체하여 사용할 수 있으며, 기초 매스콘크리트나 댐 및 하절기 공사에 활용이 가능하다.

〈사진-1〉 및 〈사진-2〉는 미분 시멘트의 한중 콘크리트 현장 및 동절기 숏크리트 현장에 적용을 한 사례를 나타낸 사진이다.

〈사진-3〉은 조분 시멘트의 12월 중 기초 매스콘크리트 현장적용을 위해 그 효율성을 확인하고자 Mock-up 실험을 실시하는 사진이다.

8. 결 론

본 기사에서는 시멘트 분쇄공정 라인에서 분급한 시멘트의 물리·화학적 특성과 미분 및 조분 시멘트를 사용한 콘크리트의 공학적 특성을 분석하여 과도기적 단계에서 수요자의 요구에 부응하는 특수 시멘트의 생산에 대하여 검토하였다. 그 결과 미분 시멘트를 사용할 경우 초기재령에서 OPC보다 높은 조강성을 나타내고 있어 거푸집 탈형 시기를 단축시킬 수 있는 조강 시멘트로의 활용이 가능할 것으로 사료되고, 역으로 조분 시멘트를 사용할 경우 OPC보



〈사진-3〉 S건설사의 조분 시멘트를 활용한 기초 매스콘크리트 현장적용 예정 및 Mock-up 실험

다 수화열의 피크온도가 감소하며 피크온도 도달시간도 지연되어 중용열 및 저발열 시멘트로의 활용이 가능할 것으로 생각된다.

그러므로 어느 시간 때와 기상조건에서 어느 정도의 강도를 수요자가 요구하게 되면, 미분 및 조분 시멘트를 혼화재 싸이로에 저장하여 혼화재와 유사한 방법으로 OPC와 혼합하여 레미콘을 출하하는 것이 가능하게 되고, 결국 수요자의 다양한 요구에 부응하는 맞춤형 시멘트로의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

시사 용어 해설

▶ 계약제조와 OEM 수출

해외생산에서의 가장 단순한 형태가 계약제조인데, 그 뜻은 적절한 제조능력을 가진 현지 외국기업에서 본사의 요구에 합당한 제품을 만들도록 제품 생산계약을 맺고, 생산된 제품에 대한 마케팅책임을 본사 조직 자체가 맡는 경우를 말한다. 이는 해당 시장 사정에 신속히 적응하기 위함인데, 일반적으로 본사의 생산여력이 너무 작거나, 본사국서 판매하려는 목적도 있을 수 있다. 이 경우에는 물론 국제 마케팅 행위와는 연관성이 없는 것이다. 계약제조 활동의 경우에서 볼 수 있는 단점으로는 제조과정에의 통계력이 약해서 잠재적 이윤의 손실이 있을 수가 있다. 이와는 반대의 경우로 OEM(Original Equipment Manufacturing, 주문자 상표에 의한 생산) 주문 형태에 따라서 이에 응하는 것도 해외시장 진출방식이라는 면에서 이 범주에 넣을 수 있다. 그러나 OEM 방식으로 수출할 경우 비록 제품은 우리 업체가 생산했지만 그 제품에는 그 제품을 주문한 외국 회사의 상표가 붙여져 해외시장에서는 마치 그 주문국 회사의 상품처럼 팔리게 된다. 이 방식은 하청생산과 다름없이 수출가격을 제대로 받아내지 못하는 흠이 있다.