

페벤토나이트 분말의 소성 및 냉각조건에 따른 모르타의 압축강도 발현특성에 관한 연구

The Study on the Compressive Strength Properties of Mortar using Discarded Bentonite Powder by the Cooling Method after Heat Treatment

김 효 열*

Kim, Hyo-Youl

Abstract

As the bentonite is main material to prevent from collapse of drilling hole at underground excavation works, it is increased using quantity on construction industry day by day. But, the discarded bentonite that is over using at underground excavation works is caused various enviromental trouble as soil and water pollution est. Therefore, this study aims to propose a fundamental report for pozzolan reaction of discarded Bentonite powder by heat-treatment and cooling as concrete mineral admixture.

To find out pozzolan reaction ability of discarded Bentonite powder by indirect cooling & cooling using of water after heat-treatment, the experiments are excuted flow test & compressive strength on age of mortar using discarded Bentonite powder.

As a result of this study, discarded Bentonite powder can be utilized as concrete mineral admixture by heat-treatment and especially, pozzolan reaction ability of discarded Bentonite powder is superior to the situation of 600°C-60min & cooling using of water.

키 워 드 : 페벤토나이트분말, 소성가공, 간접냉각, 주수냉각, 포졸란, 콘크리트 광물질 혼화재

keywords : discarded bentonite powder, heat-treatment, indirect cooling, cooling using of water, pozzolan, concrete mineral admixture

1. 서 론

1.1 연구의 목적

벤토나이트는 양이온 치환성, 점결성, 수화 및 팽윤성 등의 특성이 있어 산업전반에 걸쳐 이용되고 있다. 특히 물과 접촉하면 팽창하는 팽윤특성을 이용하여 건설산업에서는 벤토나이트를 지하연속벽 및 지하차수벽 공사시 굴착공의 붕괴 방지를 위한 안정액으로서 널리 사용되고 있다.¹⁾

일반적으로 벤토나이트 안정액은 굴착공에 투입하기 전 품질검사를 실시하여 소정의 품질규준을 만족하지 못하는 것과 사용이 끝난 것은 폐기하게 된다. 이러한 순환과정에 의하여 굴착공사시에 다량의 안정액 폐기물이 발생되게 되며, 이를 페 벤토나이트라 한다.

페 벤토나이트는 높은 함수율로 인해 직접 매립이 곤란하며 방치시 토양 오염 등의 환경문제를 유발하므로 그 처리가 매우 어렵다. 이에 정부에서는 산업폐기물 관리법을 제정하여 폐기물에 따른 처리방법을 명시하고 있으며, 페 벤토나이트는 단순건조 후 성토용재로 이용하도록 규정하고 있다. 그러나,

대부분의 굴착현장에서 발생하는 페 벤토나이트는 오수로 흘러 보내어지거나 무단방치 되고 있는 실정이다.

그러나, 벤토나이트 안정액은 폐기시 단일 폐기물로서 배출되므로 혼합폐기물의 형태로 발생하는 기존의 건설폐기물에 비하여 재활용 가능성이 높다. 또한 벤토나이트는 다량의 규산과 실리카를 함유하고 있어 그 화학조성에 있어서도 재활용 가능성의 범위가 확대될 수 있다.

본 연구에서는 페 벤토나이트가 다량의 실리카와 알루미늄을 함유한 점토광물이라는 점에 착안하여 소성가공시 포졸란 반응성을 나타낼 것으로 기대하였다.²⁾³⁾

따라서, 본 연구에서는 소성가공한 페 벤토나이트의 포졸란 반응성을 검토하여 콘크리트 혼화재로서의 활용가능성을 고찰하였으며, 이상의 결과를 통하여 페 벤토나이트의 재활용 기술개발을 위한 기초자료를 제시하는 데 그 목적이 있다.

1.2 연구방법 및 범위

본 실험에서 사용한 페 벤토나이트 분말은 실제 건설현장에서 사용 후 폐기하는 굴착용 벤토나이트 안정액을 수집하여 이용하였다. 수집된 페 벤토나이트를 건조분쇄 후 설정 온도와 시간에 따라 각각 소성하였으며, 시료의 냉각은 간접

* 동아대 건설기술연구소 특별연구원, 공학박사

냉각방식과 주수냉각 방식으로 급냉하였다.

실험은 페벤토나이트 분말의 가공조건에 따른 모르타의 물성을 검토하기 위하여 모르타의 플로우 시험과 재형별 압축강도 시험을 실시하였다.

이상의 결과를 바탕으로 페 벤토나이트 분말을 콘크리트 혼화재로서의 활용하기 위한 적정 소성조건 및 냉각조건을 제시하는 것까지를 본 연구의 범위로 한다.

2. 실험

2.1 실험계획

본 연구에서는 실험인자 및 수준을 표 1과 같이 설정하였다.

표 1. 실험인자 및 수준

실험인자		수준수
소성온도 (°C)	0, 400, 500, 600, 700, 800	6
소성시간 (분)	30, 60	2
냉각방법	주수냉각, 간접냉각	2
계		24

2.2 사용재료

1) 벤토나이트

벤토나이트의 사용전·후의 화학조성은 표 2 및 그림 1과 같다.

표 2. 벤토나이트의 화학조성

성분(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	기타
사용전	55.60	15.47	2.82	2.71	5.09	0.85	3.86	13.60
사용후	56.66	23.45	1.28	-	-	4.50	1.44	13.67

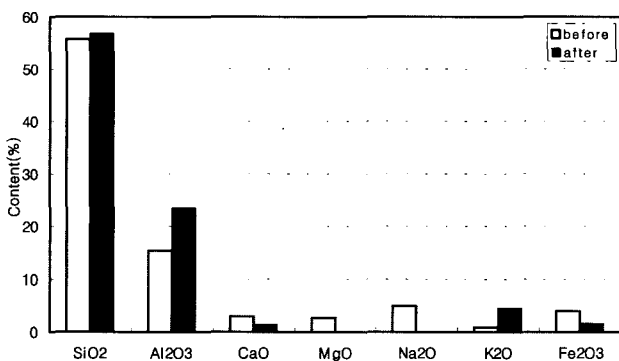


그림 1. 벤토나이트의 화학조성 (사용전·후)

벤토나이트의 화학조성은 SiO₂ 56.60%, Al₂O₃ 15.47%, 소량의 CaO, Na₂O, Fe₂O₃ 등이 함유된 점토광물로서, 특히 규산과 알루미나의 함량은 전체 함량의 약 72.07%를 차지하고 있어 벤토나이트는 다량의 규산과 알루미나를 함유한 점토광물인 것으로 나타났다.

벤토나이트 안정액의 폐기물인 페벤토나이트의 화학조성은 사용 전과 큰 차이를 나타내지 않았으며, 이는 벤토나이트가

현장에 적용시 벤토나이트 안정액의 품질확보를 위하여 철저한 품질관리에 의한 것으로 사료된다. 화합물의 함량 변화는 SiO₂와 Al₂O₃, K₂O가 각각 약 1.06%, 7.98%, 3.65% 증가하였고 그외의 화합물의 함량은 감소하는 것으로 나타났으며, SiO₂와 Al₂O₃의 함량 증가는 벤토나이트 안정액 사용 중 소량의 점토가 혼입됨에 의한 것으로 판단된다.

포졸란 반응은 시멘트 수화과정 중 발생하는 수산화 칼슘(Ca(OH)₂)과 혼화재의 실리카(SiO₂), 알루미나(Al₂O₃)가 반응하여 불용성의 염을 형성하는 반응으로, 혼화재의 화학성분 중 실리카(SiO₂), 알루미나(Al₂O₃)의 함량이 클수록 포졸란 반응성은 높아지게 된다.

본 연구에서 사용한 페벤토나이트의 실리카 함량은 56.66%로 점토질 물질로서는 상당히 높은 수준이며, 알루미나의 함량 역시 비교적 높다. 따라서 소성가공에 의하여 벤토나이트의 실리카와 알루미나 모두가 불안정화 되거나, 비정질화 된다면 상당히 높은 포졸란 반응성을 가질 것으로 기대된다.

표 3, 그림 2는 일반적인 콘크리트용 혼화재의 화학조성을 나타낸 것으로, 기타 혼화재와 비교하여 볼 때 벤토나이트의 화학조성은 플라이 애쉬와 유사한 것으로 나타났다.

표 3. 콘크리트용 혼화재의 화학조성

성분(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃
고로슬래그	33.10	13.80	42.40	6.10	0.23	0.31	0.29
플라이애쉬	59.90	27.94	1.75	1.08	2.58	0.70	4.59
실리카 흙	90.00	2.00	0.60	0.60	0.40	1.40	3.00

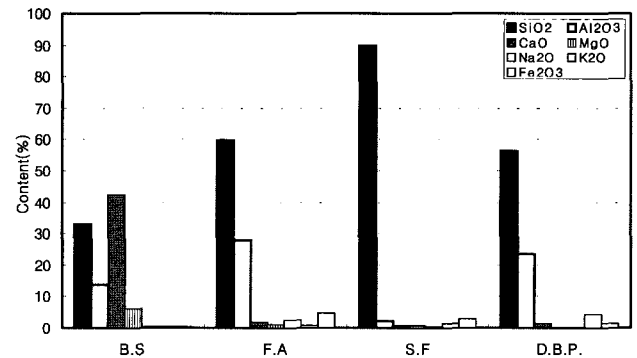


그림 2. 콘크리트용 혼화재의 화학조성

페벤토나이트 분말의 제작과정은 그림 3, 냉각방법은 그림 4와 같다.

제작된 페벤토나이트 분말의 비중은 2.57이며, #230을 이용하여 63 μ m이하로 조정하여 사용하였다.

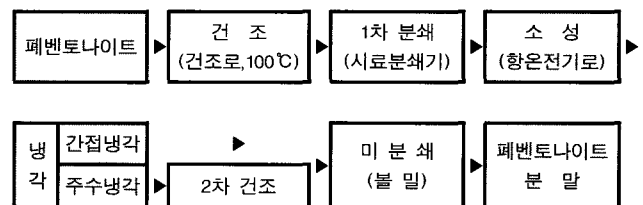


그림 3. 페 벤토나이트 분말의 제작과정

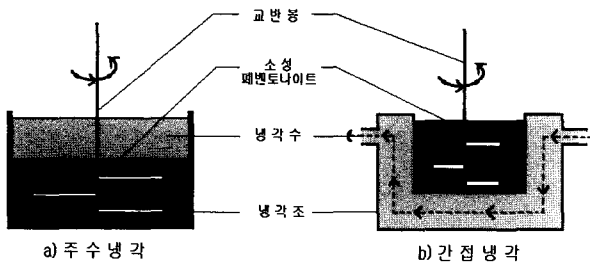


그림 4. 페넌토나이트 분말의 냉각장치

2) 시멘트

본 실험에는 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 그 물리적·화학적 성질은 표 4, 표 5와 같다.

표 4. 보통 포틀랜드 시멘트의 물리적 성질

비중	분말도 (cm ² /g)	응결(분)		안정도 (%)	압축강도(kgf/cm ²)		
		초결	중결		3일	7일	28일
3.15	3,260	240	405	0.11	200	275	385

표 5. 보통 포틀랜드 시멘트의 화학 조성

성분	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Ig-loss
함량(%)	62.5	21.3	5.4	3.5	3.3	1.64	1.38

3) 잔골재

본 실험에서 사용한 골재는 경남 합천산 강모래를 사용하였으며, 그 물리적 성질은 표 6과 같다.

표 6. 골재의 물리적 성질

종류	최대입경(mm)	조립율	비중	흡수율(%)	단위용적중량 (kg/ℓ)
잔골재	5	2.52	2.56	2.2	1,620

4) 혼화제

본 실험에 사용한 혼화제는 고성능 AE 감수제의 일종으로 폴리카루본산 에테르계의 복합체인 Rheobuild SP-8N을 사용하였으며, 그 특성은 표 7과 같다.

표 7. 혼화제의 특성

구분	주 성분	외 관	비중	알칼리량 (%)	염산이온량 (%)
내용	폴리카루본산 에테르계	암갈색의 액체	1.05	0.1	0.01이하

5) 사용수

본 실험에서는 불순물 등을 포함하지 않은 부산광역시 상수도 물을 사용하였다.

2.3 실험방법 및 측정

1) 모르터의 제조 및 공시체 제작

모르터의 배합은 시멘트와 페넌토나이트 분말의 건비율 1분, 모래의 투입 후 1분간 건비율한 후 물과 혼화제를 투입하여 3분간 배합하였으며, 총 배합시간은 5분 이내로 하였다.

공시체는 $\phi 5 \times 10$ cm 크기의 원주형 몰드를 사용하여 KS F 5105(수경성 시멘트 모르터의 압축강도 시험방법)에 따라 제작하였다.

공시체는 KS F 2403에 준하여 24시간 동안 기중에서 양생한 후 탈형하여, 온도 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 항온수조에서 7, 14, 28일의 소요재령까지 양생하였다.

또한 재령 91일의 공시체는 28일간 수중 양생 후 소요 재령까지 기중양생하였다.

2.4 측정

1) Flow 시험

Flow 시험은 KS F 5105에 준하여 실시하였으며, 흐름판 윗면에 몰드를 놓고 모르터를 약 2.5cm 채운 뒤 다짐봉으로 20회 다지고 다시 2회 추가 반복하였다. 그 후 모르터의 윗면을 흡손으로 고른 뒤 1분 동안 그대로 두었다가 물기를 제거하고 몰드를 올린 다음 1.27cm높이의 흐름 시험기의 시험판을 15초 동안 25회 낙하시킨 후 흐름판 위에 퍼진 모르터의 지름을 대칭으로 4회 측정하여 평균 지름을 Flow 값으로 하였다.

2) 압축강도

압축강도 시험은 KS L 5105(수경성 시멘트 모르터의 압축강도 시험방법)에 따랐으며, 시험체 단면적을 2방향으로 버어니어 캘리퍼스를 이용하여 길이를 최소 0.25mm까지 측정한다 다음 평균값에 의해 단면적을 계산하였다.

시험체의 가압시 시험체가 가압판의 중앙에 비치하도록 하고 하중은 매초 2.0~3.5kg/cm²의 일정한 속도로 시험체가 파괴될 때까지의 소요시간은 80초이내로 하여 가압한다. 모르터의 압축강도는 1개조 3개씩으로 각 시험체마다 시험체가 받는 최대하중을 단면적으로 나누어 그 평균값으로 하였다.

3) 활성도 지수(SAI : Strength Activity Index)

활성도 지수는 혼화제를 혼입함에 따른 강도발현 특성을 나타내는 지표로서 압축강도비와 동일한 개념으로써 사용되고 있으며, KS 기준에서는 혼화제를 혼입한 모르터의 압축강도비와 활성도지수 규정하여 콘크리트 혼화재로서 활용하기 위한 최소 기준을 제시하고 있다.

페넌토나이트 분말을 사용한 모르터의 활성도 지수는 식 1에 의하여 산출하였다.

$$\text{활성도지수} = \frac{\text{페넌토나이트모르터의압축강도}}{\text{플레인모르터의압축강도}} \times 100(\%) - \text{식 1.}$$

표 8. 시험결과

냉각 방법	소성 온도 (°C)	소성 시간 (min)	플로우 (cm)	압축강도 (kgf/cm ²)				활성도지수 (%)			
				7일	14일	28일	91일	7일	14일	28일	91일
Plain			19.0	309	351	392	429	100	100	100	100
간접	500	30	16.1	200	277	314	373	65	79	80	87
		60	17.6	216	323	369	459	70	92	94	107
냉각	600	30	16.5	210	278	318	421	68	79	81	98
		60	17.0	234	326	381	459	76	93	97	107
각	700	30	16.5	211	284	345	399	68	81	88	93
		60	17.1	287	344	373	468	93	98	95	109
주	800	30	16.5	248	326	333	423	80	93	85	99
		60	17.5	230	347	389	446	74	99	99	104
수	500	30	16.2	210	273	306	357	68	78	78	83
		60	17.4	235	329	377	468	76	94	96	109
냉각	600	30	16.3	229	285	333	454	74	81	85	106
		60	17.5	236	332	397	491	76	95	101	114
각	700	30	17.0	216	301	350	406	70	86	89	95
		60	17.8	251	336	384	450	81	96	98	105
주	800	30	17.1	231	297	331	350	75	85	84	81
		60	17.8	231	316	357	391	75	90	91	91

3. 실험결과 및 고찰

3.1 플로우

소성가공한 페벤토나이트 분말의 냉각방법에 따른 모르터의 플로우 변화는 그림 5, 그림 6과 같다.

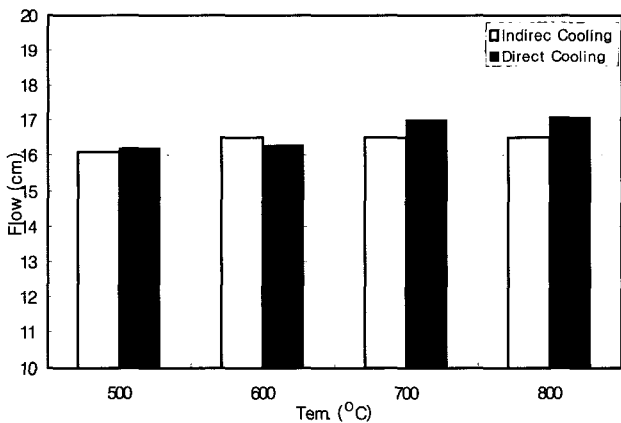


그림 5. 모르터의 플로우 (소성시간 30분)

소성시간 30분의 경우, 소성온도 500°C에서 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 플로우는 페벤토나이트의 냉각방법의 차이에 따른 변화는 적은 것으로 나타났다. 그러나, 소성온도 600°C, 700°C, 800°C에서는 페벤토나이트의 소성 후 냉각방법이 변화함에 따라 모르터의 플로우는 다소 차이를 나타내었으며, 소성온도 600°C의 경우에는 간접냉각, 소성온도 700°C와 800°C에서는 주수냉각이 모르터의 플로우가 높게 측정되었다.

소성시간 60분의 경우, 소성온도 500°C에서는 페벤토나이트 분말의 혼입한 모르터의 플로우는 간접냉각의 경우가 17.6cm, 주수냉각의 경우가 17.4cm로서 유사한 것으로 나타났으나, 소성온도 600°C 이상의 범위에서는 소성 후 냉각방법을 간접냉각으로 실시한 경우보다 주수냉각이 모르터의 플로우가 높은 것으로 측정되었다.

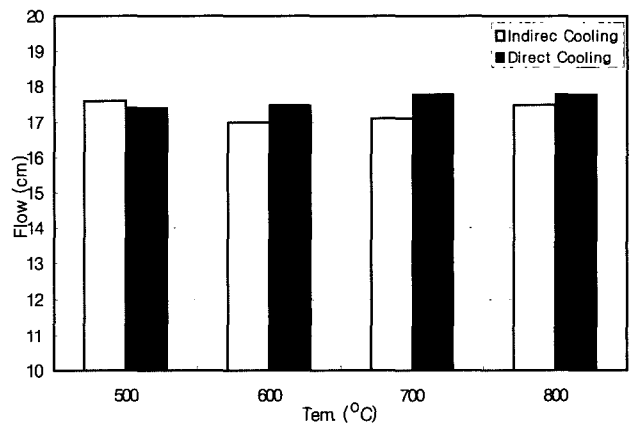


그림 6. 모르터의 플로우 (소성시간 60분)

특히, 소성온도 600°C와 700°C의 범위에서는 페벤토나이트 분말을 혼입한 모르터의 플로우는 주수냉각의 경우가 간접냉각의 경우보다 약 0.7cm 정도 높은 것으로 측정되었다.

페벤토나이트의 소성 후 냉각방법을 달리하여 제작한 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 플로우 시험 결과를 전체적으로 고려하여 볼 때, 페벤토나이트 분말의 냉각방법에 따

른 플로우의 변화는 적은 것으로 나타났으며 소성온도가 변
화하는 경우에서도 동일한 양상을 나타내었다.

그러나, 페벤토나이트 분말의 제조시 소성시간에 따른 모
르터의 플로우 변화는 현저한 것으로 나타났으며, 페벤토나이
트 분말의 제조 시 소성시간이 길어짐에 따라 모르터의 플로
우는 증가하는 것으로 나타났다.

페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 플로우가 페벤토나
이트 분말의 제조 시 소성온도와 냉각방법의 차이에 따른 변
화가 적게 나타나는 현상은 벤토나이트는 100℃ 부근에서 결
정내부의 층간수가 모두 탈수하여 층간의 간격이 1Å이하로
축소되어 결정내의 층간 유입수량이 감소하게 되는 벤토나이
트 특유의 열적성질에 기인한 것으로 판단된다.

따라서, 추후 페벤토나이트 분말을 콘크리트용 포졸란계
혼화제로서 적용시 페벤토나이트 분말의 제작환경 중 소성온
도를 100℃ 이상의 범위에서 실시한다면, 소성온도와 냉각방
법의 변화는 콘크리트의 유동성에 큰 영향을 미치지 않을 것
으로 판단된다.

3.2 냉각방법에 따른 모르터의 압축강도 및 활성도지수

1) 소성시간 30분

소성온도 500℃로 30분간 소성가공한 페벤토나이트 분말을
사용한 모르터의 냉각방법에 따른 시험 결과는 그림 7과 같다.

페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 압축강도는 재령이
증가함에 따라 증진하는 것으로 나타났으나, 주수냉각·간접냉
각 모두에서 전 재령에 걸쳐 플레인 압축강도에 비하여 낮은
것으로 측정되었다. 소성가공한 페벤토나이트 분말을 사용한
모르터의 압축강도 비율은 재령 7일에서 약 67%, 재령 14일·
28일에서 약 79%, 재령 56일에서 약 85%로서 주수냉각 및
간접냉각의 냉각방법의 차이에 따른 영향은 적은 것으로 나
타났다.

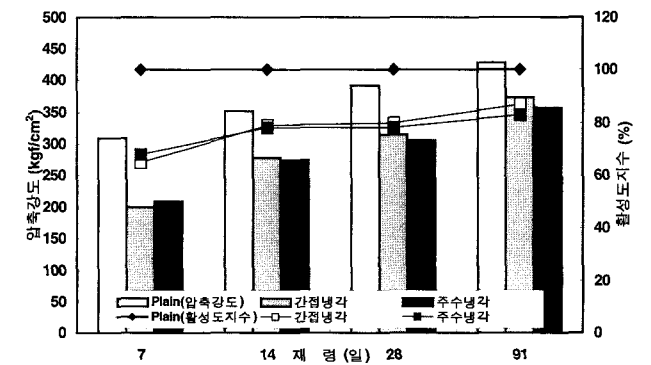


그림 7. 압축강도 및 활성도지수 (500℃·30분)

따라서 소성온도 500℃·소성시간 30분의 경우 주수냉각 및
간접냉각 모두에서 전 재령의 모르터의 압축강도가 플레인
모르터의 압축강도에 비하여 낮은 것으로 측정되어, 이상의
가공조건에서 냉각방법을 달리하더라도 페벤토나이트 분말은
시멘트 경화체 내에서 포졸란 반응성을 발현하지 않은 것으
로 나타나 콘크리트용 포졸란계 혼화제로서의 활용가능성은
희박한 것으로 사료된다.

소성온도 600℃로 30분간 소성가공한 페벤토나이트 분말을

사용한 모르터의 냉각방법에 따른 시험 결과는 그림 8과 같다.

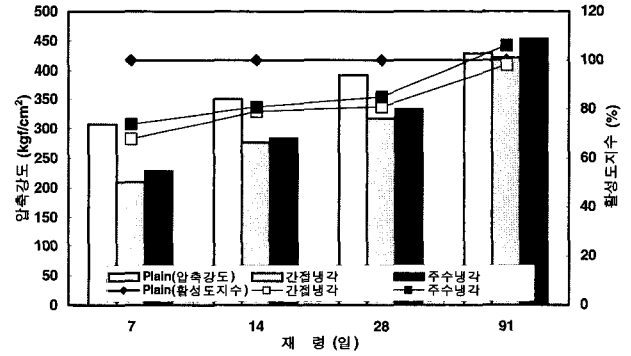


그림 8. 압축강도 및 활성도지수 (600℃·30분)

페벤토나이트 분말의 소성온도 600℃의 경우 페벤토나이트
분말의 소성 후 냉각방법에 따라 재령별 압축강도의 발현비
율은 다소 차이를 나타내었다. 전 재령에 걸쳐 주수냉각의 경
우가 간접냉각에 비하여 모르터의 압축강도가 다소 높은 것
으로 측정되었으나, 재령 28일 이내에서는 플레인 모르터의
압축강도에 비하여 낮은 것으로 측정되어 콘크리트용 혼화제
로서의 활용가능성이 적은 것으로 나타났다. 그러나 재령 28
일 이후에서 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 압축강도
는 직선적으로 증가하여 주수냉각방식으로 가공한 페벤토나
이트 분말을 사용한 모르터는 플레인 압축강도를 약 6% 정도
상회하는 것으로 나타났으며, 간접냉각의 경우는 플레인 모
르터의 압축강도보다 낮았으나 약 98%의 압축강도 발현비율
을 나타내어 재령 28일 이내의 압축강도에 비하여 큰 폭으로 압
축강도가 증진하는 것으로 나타났다. 이는 페벤토나이트 분말
이 시멘트 경화체 내에서 시멘트 수화과정 중 발생한 수산화
칼슘과 포졸란 반응을 일으킴으로서 발생된 결과로 사료되며,
소성온도 600℃·소성시간 30분, 주수냉각방식으로 가공한 페
벤토나이트분말을 콘크리트용 포졸란계 혼화제로서 사용할
경우 장기강도증진 효과를 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

소성온도 700℃로 30분간 소성가공한 페벤토나이트 분말을
사용한 모르터의 냉각방법에 따른 시험 결과는 그림 9와 같다.

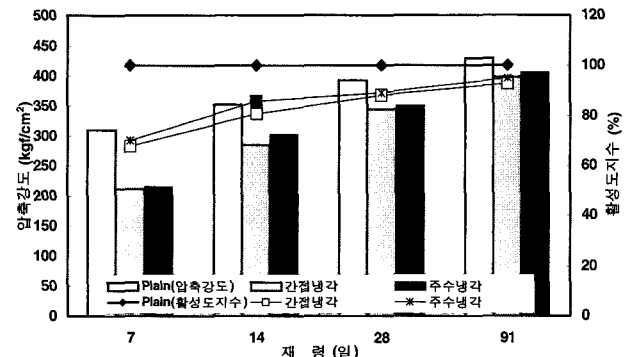


그림 9. 냉각방법에 따른 압축강도 및 활성도지수
(700℃·30분)

페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 압축강도는 재령이
증가함에 따라 증진하는 것으로 나타났으나, 전 재령에서 주

수냉각간접냉각 모두에서 플레인 모르터의 압축강도에 비하여 낮은 것으로 측정되었다. 또한 페벤토나이트 분말의 소성 후 냉각방법에 따른 압축강도의 발현 정도의 차이는 작은 것으로 나타나, 소성온도 700℃소성시간 30분의 가공조건에서는 페벤토나이트의 냉각방법의 차이에 따라 결정의 변화의 차이는 적어 포졸란 반응성의 발현 정도가 유사한 것으로 사료된다. 그러나 재령 7일의 압축강도 발현비율에 비하여 재령 14일에서는 큰 폭으로 압축강도가 증진하는 것으로 나타나 이상의 가공조건에서도 페벤토나이트 분말은 시멘트 경화체 내에서 포졸란 반응성을 발현하는 것으로 나타났다. 따라서 소성온도 700℃소성시간 30분, 주수냉각간접냉각 방식으로 제작한 페벤토나이트 분말은 전 재령에서 모르터의 압축강도가 플레인에 비하여 낮은 것으로 측정되어 콘크리트용 포졸란계 혼화제로서의 활용가능성은 희박한 것으로 판단된다.

소성온도 800℃로 30분간 소성가공한 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 냉각방법에 따른 시험 결과는 그림 10과 같다.

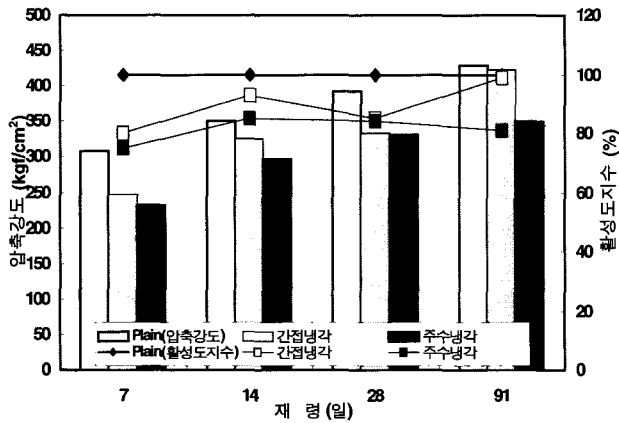


그림 10. 압축강도 및 활성도지수 (800℃·30분)

소성온도 800℃의 경우 페벤토나이트 분말의 냉각방법에 따른 모르터의 압축강도 발현 비율은 다소 차이를 나타내었으며, 간접냉각의 경우가 주수냉각에 비하여 다소 높은 것으로 측정되었다. 그러나, 간접냉각·주수냉각 모두에서 재령 28일의 압축강도가 플레인에 비하여 약 85%만을 발휘하는 것으로 나타나 콘크리트용 혼화제로서의 활용성은 희박한 것으로 나타났다.

따라서 소성시간 30분의 경우 페벤토나이트 분말의 냉각방법에 따른 모르터의 압축강도 발현비율은 소성온도에 따라 다소 차이를 나타내었으나, 전 재령에서 플레인 모르터의 압축강도에 비하여 낮은 것으로 측정되어 콘크리트용 포졸란계 혼화제로서의 활용가능성은 적을 것으로 판단된다.

2) 소성시간 60분

소성온도 500℃로 60분간 소성가공한 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 냉각방법에 따른 시험 결과는 그림 11과 같다.

소성온도 500℃의 경우, 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 압축강도는 재령이 증가함에 따라 증진하는 것으로 나타났으며, 소성 후 냉각방법에 따른 차이는 적었으나, 압축강

도의 발현비율은 간접냉각에 비하여 주수냉각방식으로 가공한 페벤토나이트 분말이 다소 높은 것으로 나타났다. 재령 7일에서 간접냉각의 경우는 활성도지수가 70%이었으나, 주수냉각의 경우는 약 76%로서 플레인 모르터의 압축강도와와의 차가 적었으며 재령 14일 이후에서의 압축강도 발현비율은 간접냉각에 비하여 주수냉각방식으로 가공한 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 압축강도 발현비율이 약 2%정도 높은 것으로 측정되었다.

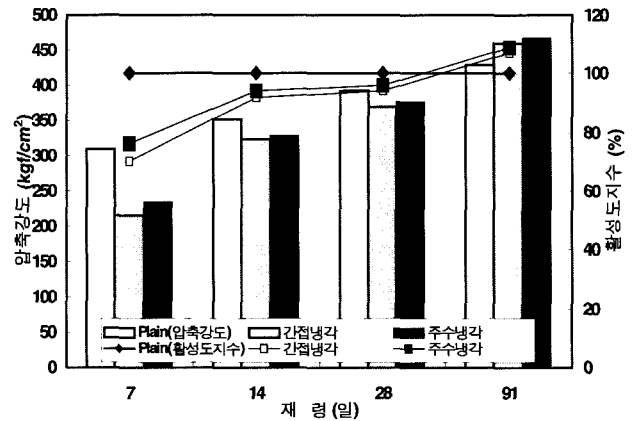


그림 11. 압축강도 및 활성도지수 (500℃·60분)

특히 재령 91일에서 페벤토나이트 분말의 냉각방법 모두에서 플레인 모르터의 압축강도를 상회하였으며, 간접냉각의 경우는 약 7%, 주수냉각의 경우는 약 9%의 장기강도 증진 효과를 발휘하는 것으로 나타났다. 압축강도의 발현비율은 재령 7일과 14일에서 가장 큰 폭으로 증진하는 것으로 나타났으며, 재령 28일 이후에서도 압축강도의 증진은 지속적으로 진행되었다. 그러나 재령 28일의 압축강도는 간접냉각·주수냉각 모두에서 플레인 모르터의 압축강도에 비하여 낮은 것으로 측정되어 강도의 확보가 어려운 것으로 나타났으나, 재령 91일의 압축강도는 플레인 모르터를 상회하여 콘크리트용 포졸란계 혼화제로서 활용시 페벤토나이트 분말을 혼입함으로써 콘크리트의 장기강도 증진효과를 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

소성온도 600℃로 60분간 소성가공한 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 냉각방법에 따른 시험 결과는 그림 12와 같다.

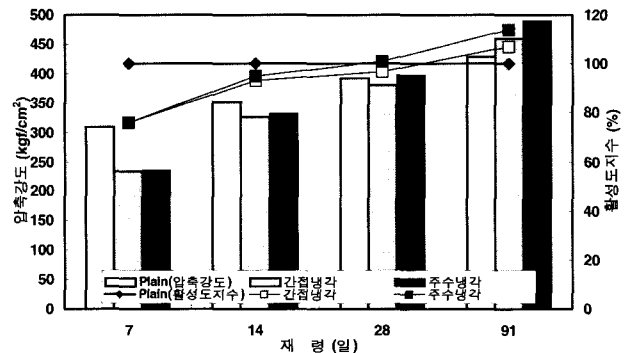


그림 12. 압축강도 및 활성도지수 (600℃·60분)

재령 7일에서 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 압축강도는 페벤토나이트 분말의 냉각방법에 따른 차이는 적었으며, 플레인 모르터의 압축강도에 비하여 약 76%의 강도를 발현하는 것으로 나타났다. 그러나, 재령 14일 이후에서는 주수냉각의 경우가 간접냉각보다 압축강도 발현비율이 다소 높은 것으로 측정되었으며, 재령 14일에서는 약 2%, 재령 28일에서는 약 4%, 재령 91일에서는 약 7%정도 간접냉각에 비하여 압축강도 발현비율이 높은 것으로 나타났다. 특히 주수냉각의 경우는 재령 28일에서 플레인 모르터의 압축강도와 유사한 것으로 나타나 페벤토나이트 분말의 혼입에 따른 압축강도의 감소가 발생하지 않아 콘크리트용 포졸란계 혼화제로서의 활용성이 매우 우수한 것으로 나타났다. 또한 재령 91일에서는 간접냉각·주수냉각 모두에서 플레인 모르터의 압축강도를 각각 약 7%, 9%정도 상회하는 것으로 나타나 페벤토나이트 분말의 혼입에 따른 장기강도의 증진효과를 확인할 수 있었다. 또한 초기재령의 강도는 낮으나 장기재령으로 갈수록 강도가 회복되는 압축강도의 발현양상은 기존의 콘크리트용 혼화제를 사용한 콘크리트의 강도발현 양상과 유사한 것으로 나타나 페벤토나이트 분말은 시멘트 경화체 내에서 포졸란 반응을 발현하는 것으로 나타났다. 이는 페벤토나이트 분말이 시멘트 경화체내에서 수산화칼슘과의 포졸란 반응을 통하여 수용성의 수산화칼슘이 불용성염으로서 변화함에 따라 시멘트 경화체내의 수화생성물이 증가함에 의한 것으로 사료된다. 따라서 소성온도 600℃의 경우 주수냉각의 경우가 간접냉각의 경우보다 압축강도의 발현비율이 우수하였고, 특히 주수냉각의 경우 재령 28일 이후의 압축강도가 플레인 모르터의 압축강도를 상회하는 것으로 나타나 콘크리트용 포졸란계 혼화제로서의 활용가능성이 매우 높은 것으로 판단된다.

소성온도 700℃로 60분간 소성가공한 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 냉각방법에 따른 시험 결과는 그림 13과 같다.

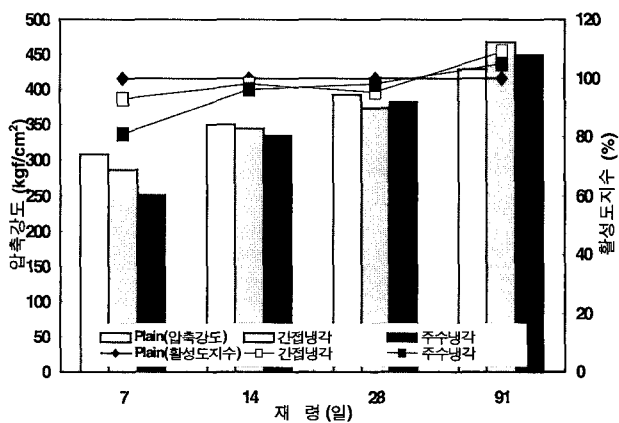


그림 13. 압축강도 및 활성도지수 (700℃·60분)

페벤토나이트 분말의 냉각방법에 따른 압축강도의 발현비율은 각 재령에 따라 다소 차이를 나타내었다. 재령 7일에서 주수냉각 방식으로 가공한 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터에 비하여 간접냉각의 경우가 약 12% 정도 압축강도 발현비율이 높은 것으로 나타났으며, 재령 14일에서는 약 2%정도

높았다. 그러나 재령 28일에서는 주수냉각의 경우가 간접냉각에 비하여 약 3%정도 압축강도의 발현비율이 높았으나, 재령 56일에서는 간접냉각의 경우가 주수냉각에 비하여 약 4% 정도 압축강도의 발현비율이 높은 것으로 측정되었다. 또한 재령 91일에서 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 압축강도는 간접냉각·주수냉각 모두에서 플레인 모르터의 압축강도를 상회하였으며, 주수냉각의 경우는 약 5%, 간접냉각의 경우는 약 9% 정도의 압축강도 증진 효과를 발휘하였다. 그러나, 재령 28일에서 주수냉각·간접냉각방식으로 제작한 모르터의 압축강도는 냉각방식 모두에서 플레인 모르터의 압축강도보다 낮은 것으로 측정되어 재령 28일 이내의 압축강도를 확보가 어려웠다. 따라서 소성온도 700℃·소성시간 60분의 경우 페벤토나이트 분말의 냉각방법에 따른 차이는 각 재령에서 차이가 있었으나, 재령 28일 이내에서 간접냉각·주수냉각 모두에서 플레인 모르터보다 압축강도가 낮은 것으로 측정되어 콘크리트용 포졸란계 혼화제로서의 활용성은 낮을 것으로 사료된다. 그러나, 이상의 방식으로 가공한 페벤토나이트 분말을 콘크리트용 포졸란계 혼화제로서 활용한다면 콘크리트의 장기강도 개선효과를 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

소성온도 800℃로 60분간 소성가공한 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 냉각방법에 따른 시험 결과는 그림 14와 같다.

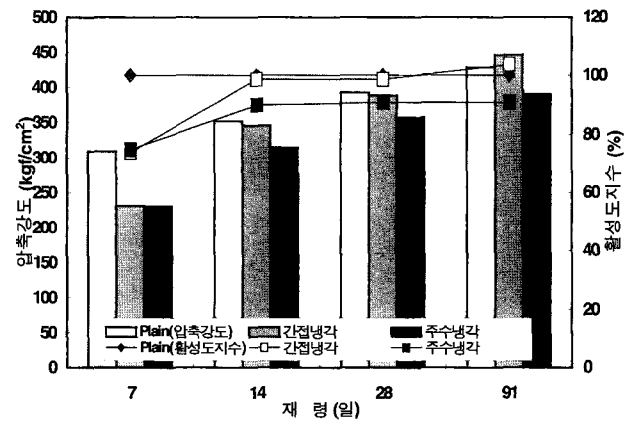


그림 14. 압축강도 및 활성도지수 (800℃·60분)

소성온도 800℃의 경우, 페벤토나이트 분말의 냉각방법의 차이에 따른 압축강도의 발현비율은 확인한 차이를 나타내었으며, 간접냉각의 경우가 주수냉각에 비하여 압축강도의 발현비율이 높은 것으로 측정되었다. 재령 7일에서의 활성도지수는 약 75%로서 냉각방법의 차이에 따른 영향은 적었으나, 재령 14일에서는 간접냉각의 경우가 주수냉각에 비하여 약 9%, 재령 28일에서는 약 8%, 재령 91일에서는 약 13%정도 압축강도의 발현비율이 높은 것으로 나타났다. 특히 간접냉각의 경우는 재령 14일, 28일에서 압축강도가 플레인 모르터와 유사하였으며, 재령 91일에서는 플레인 모르터의 압축강도를 약 4%정도 상회하는 결과를 나타내었다. 따라서 콘크리트용 포졸란계 혼화제로서 페벤토나이트 분말을 활용하기 위한 가공조건을 800℃로 설정한다면 냉각방식은 간접냉각방식을 택하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

따라서, 소성시간 60분의 경우 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 압축강도 비율은 소성온도에 따라 주수냉각 및 간접냉각의 냉각방법에 따른 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 특히 소성온도 800℃에서는 그 차이가 확연하게 발생하였으며 이는 냉각방법의 차이에 따라 페벤토나이트 분말의 결정상의 변화가 달라지는 것을 의미하고 있다. 또한 압축강도의 발현비율은 소성시간 30분에 비하여 60분의 경우가 높은 것으로 나타나 페벤토나이트 분말의 포졸란 반응성은 페벤토나이트 분말의 소성시간에 따라서도 변화하는 것으로 판단된다. 콘크리트용 혼화재로서 활용하기 위한 페벤토나이트 분말의 냉각방식은 비교적 낮은 온도에서 반응성이 높은 주수냉각을 택하는 것이 유리할 것으로 보인다.

4. 결 론

소성 및 냉각방법을 달리하여 제작한 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 플로우 및 재령별 압축강도 발현특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 페벤토나이트 분말을 혼입한 모르터의 플로우 시험 결과를 전체적으로 고려하여 볼 때, 페벤토나이트 분말의 냉각방법 및 소성온도에 따른 플로우의 변화는 적은 것으로 나타났으나 소성시간에 따른 모르터의 플로우 변화는 현저하였다.
- 2) 소성시간 30분의 경우, 페벤토나이트 분말의 냉각방법에 따른 모르터의 압축강도 발현비율은 소성온도에 따라 다소 차이를 나타내었으나, 전 재령에서 플레인 모르터의 압축강도에 비하여 낮은 것으로 측정되어 콘크리트용 포졸란계 혼화재로서의 활용가능성은 적은 것으로 나타났다.
- 3) 소성시간 60분의 경우, 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 압축강도 비율은 소성온도에 따라 주수냉각 및 간접냉각의 냉각방법에 따른 차이가 발생하는 것으로 나타났다.
- 4) 페벤토나이트 분말을 사용한 모르터의 압축강도 발현비율은 소성시간 30분에 비하여 60분의 경우가 높은 것으로 측정되어 페벤토나이트 분말의 포졸란 반응성은 페벤토나이트 분말의 소성시간에 따라서도 변화하는 것으로 나타났다.
- 5) 콘크리트용 혼화재로서 활용하기 위한 페벤토나이트 분말의 냉각방식은 비교적 낮은 온도에서 반응성이 높은 주수냉각을 택하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

이상의 결과에서 페벤토나이트 분말이 포졸란 반응성을 발휘하기 위한 최적의 가공조건은 소성온도 600℃·소성시간 60분 및 주수냉각인 것으로 도출되었으며, 이상의 조건으로 가공된 페벤토나이트 분말을 콘크리트용 혼화재로서 사용하면 콘크리트의 장기강도 개선효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

추후 페벤토나이트 분말의 분말도에 관한 연구가 이루어진다면 콘크리트용 혼화재로서 페벤토나이트 분말의 활용성이 배가될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 노진환 외, 벤토나이트와 그 응용, 산업광물은행·한국과학재단, 2000, pp1~45
2. 변근주, 혼화재료, 한국레미콘공업협회, 1990, pp54~58
3. 정재동, 콘크리트 재료공학, 보성각, 2000, pp168~169
4. 최희용·황혜주·김문한, 황토반응의 메카니즘에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 97 추계학술발표대회 논문집, 1997
5. 이종근, 무기재료원료공학, 반도출판사, 1995, pp3~81
6. 정상진 외, 건축재료학, 보성각, 1999, pp69~70
7. 笠井芳夫, 池田尙治, 콘크리트의實驗方法, 技術書院, 1993, pp81~87
8. 정민철, Meta Kaolin 및 Silica Fume을 이용한 고성능 고강도 시멘트 모르타르 특성에 관한 연구, 한국세라믹학회지 제33권 5호, 1996
9. F. M. Lea, The Chemistry of Cement and Concrete, Chemical Publishing Company, 1971, pp414~453
10. P. Kumar Mehta, Concrete, The McGraw-Hill Companies Inc., 1993, pp271~285
11. A. M. Neville, Properties of Concrete, LONGMAN, 1995, pp84~88