

소성가공한 폐 벤토나이트 분말의 냉각방법에 따른 포졸란 반응성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Pozzolan Reaction of discarded Bentonite by the Cooling Method after Heat Treatment

김 호 열* 강 병 희**
Kim, Hyo-Youl Kang, Byeung-Hee

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.

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 Phenolphthalein test, setting test, pH test and the analysis by X-ray diffractor.

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 500°C ~ 700°C, 60min.

키워드 : 폐 벤토나이트, 소성가공, 폐 벤토나이트 분말, 간접냉각, 주수냉각, 포졸란 반응성, 콘크리트 광물질 혼화제
keywords : discarded Bentonite, heat-treatment, discarded Bentonite powder, pozzolan reaction ability, 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 품질기준을 만족하지 못하는 것과 사용이 끝난 것은 폐기하게 된다. 이러한 순환과정에 의하여 굴착공사시에 다량의 안정액 폐기물이 발생되게 되며, 이를 폐 벤토나이트라 한다.

폐 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, 폐 벤토나이트는

단순건조 후 성토용재로 이용하도록 규정하고 있다. 그러나, 대부분의 굴착현장에서 발생하는 폐 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 폐 벤토나이트가 다량의 실리카와 알루미늄을 함유한 점토광물이라는 점에 착안하여 소성가공시 포졸란 반응성을 나타낼 것으로 기대하였다.²⁾³⁾

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

1.2 연구방법 및 범위

본 실험에서 사용한 폐 벤토나이트 분말은 실제 건설현장에서 사용후 폐기하는 굴착용 벤토나이트 안정액을 수집하여 이용하였다. 수집된 폐 벤토나이트를 건조·분쇄 후 설정 온도

* 동아대 대학원 건축공학과 박사수료

** 동아대 건축공학과 교수, 공학박사

본 연구는 2002년도 산·학·연 공동기술개발 컨소시엄사업 연구 지원 과제의 일환으로 수행되었음.

와 시간에 따라 각각 소성하였으며, 시료의 냉각은 간접냉각 방식과 주수냉각 방식으로 급냉하였다.

실험은 소성가공한 페 벤토나이트 분말의 포졸란 반응성을 확인하기 위해 페놀프탈레인 반응성 시험, 응집·응결 시험, pH시험, X선 회절 분석을 하였다.

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

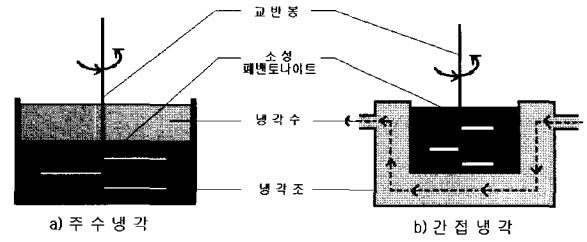


그림 2. 페 벤토나이트 분말의 냉각장치

2. 실험

2.1 실험계획

본 연구에서는 실험인자 및 수준을 표 1.과 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.와 같다.

표 2. 벤토나이트 분말의 화학조성(%)

성분(%)	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	Na2O	K2O	Fe2O3	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

사용전·후의 벤토나이트 안정액을 KS L 4007 「점토의 화학분석」에 의하여 분석한 결과, 사용전·후에 따른 화학조성의 변화는 크지 않았다.

페 벤토나이트 분말의 제작과정은 그림 1., 냉각방법은 그림 2.와 같다.

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

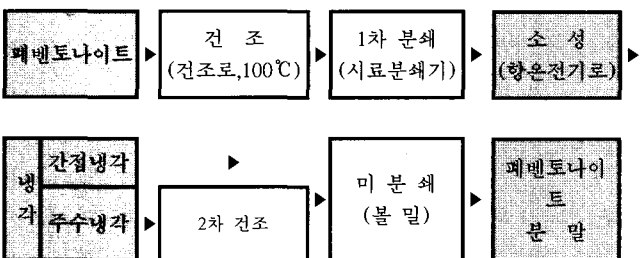


그림 1. 페 벤토나이트 분말의 제작과정

2) 수산화 칼슘(소석회)

수산화 칼슘(소석회)의 물성은 표 3.과 같다.

표 3. 수산화 칼슘(소석회)의 물성

	CaO	CO2	불순물	분말도 잔분	
				600 μ m	150 μ m
함유량(%)	70.0이상	1.5이하	3.0이하	0	5.0 이하

2.3 실험방법 및 측정

1) 페놀프탈레인 반응성 시험4)

소성온도, 시간 및 냉각방법에 따라 가공한 페 벤토나이트 분말과 수산화 칼슘의 반응성을 파악하기 위하여 페놀프탈레인 반응성 시험을 실시하였다.

수산화 칼슘 포화용액은 알칼리성으로 페놀프탈레인 지시약에 대하여 붉은색의 반응을 나타낸다. 투입한 페 벤토나이트 분말과 수산화 칼슘이 포졸란 반응을 일으킨다면 용액은 알칼리성분을 잃게 되어 페놀프탈레인 지시약에 대하여 무색의 반응을 나타내게 된다.

따라서, 본 실험에서는 수산화 칼슘 포화용액 500g에 페 벤토나이트 분말 300g을 투입한 후 7일간 6시간 간격으로 교반정지하였다. 그 후 시료에 페놀프탈레인 1% 알코올 용액을 떨어뜨려 시료의 색깔 변화를 관찰하여, 페 벤토나이트 분말의 포졸란 반응 여부를 판단하였다.

2) 응집·응결 시험4)

일반적으로 물질의 응집은 물리적 응집과 화학적 응결으로 대별할 수 있다. 물리적 응집은 단순한 결합력을 가져 다시 물에 교반시 작용한 응집력이 상실되나, 화학적 응결은 화학작용에 의한 불용성 물질을 생성하므로 물에 교반시 흐트러짐이 일어나지 않는다.

따라서, 본 실험에서는 소성온도, 소성시간 및 냉각방법에 따라 가공한 페 벤토나이트 분말을 수산화 칼슘과 증량비 4:1의 비율로 혼합하여 5×5×5cm의 공시체를 제작하였다.

제작된 공시체를 표준조건 하에서 7일간 양생한 후, 수중에 침지하여 시료의 흐트러짐을 관찰하였다.

3) pH 시험

수산화 칼슘 포화용액은 pH 12.3이상의 강알칼리성 용액이다. 수산화 칼슘과 페 벤토나이트 분말이 포졸란 반응을 일으킨다면 용액 속의 수산화 칼슘의 감소로 인하여 pH는 저하하게 된다.

표 4. 시험 결과

소성 온도 (°C)	소성 시간 (분)	페놀프탈레인 반응성 시험		응집·응결 시험		pH 시험 (Ca(OH) ₂ 포화용액 pH : 12.3)			
		간접냉각	주수냉각	간접냉각	주수냉각	3일		7일	
						간접냉각	주수냉각	간접냉각	주수냉각
0	0	○	○	×	×	11.9	11.9	11.3	11.3
400	30	○	○	×	×	-	-	-	-
	60	×	×	×	×	-	-	-	-
500	30	×	×	×	○	9.2	9.1	8.1	8.5
	60	×	×	○	○	8.0	7.9	7.5	7.4
600	30	×	×	○	○	9.0	8.9	8.2	8.4
	60	×	×	○	○	8.2	7.8	7.6	7.3
700	30	×	×	○	○	9.5	9.3	8.6	8.5
	60	×	×	○	○	8.6	9.1	7.7	8.2
800	30	○	○	○	○	10.2	9.7	9.8	9.3
	60	×	○	○	○	8.8	10.2	7.9	10.0

※ 페놀프탈레인 반응성 시험 - ○ : 붉은색으로 변화, × : 색깔변화 없음
 ※ 응 집·응 결 시 험 - ○ : 변화없음(화학적응결), × : 흐트러짐(물리적응집)

따라서, 본 실험에서는 수산화 칼슘 포화용액 500g에 페 벤토나이트 분말 300g을 투입한 후 6시간 간격으로 교반·정지 하여 정치기간 3일, 7일에 용액의 pH를 측정하였다.

4) X선 회절 분석5)

고체의 분자구조는 크게 결정질과 비정질로 구분된다. X선 회절 시험시 결정질 물질은 X선에 대하여 고유의 반사각을 가지나, 비정질 물질은 난반사를 일으킴으로 X선 회절 시험시 peak가 나타나지 않거나, 감소하게 된다.

따라서 본 실험에서는 소성온도, 시간 및 냉각방법에 따라 가공한 페 벤토나이트 분말을 X선을 이용 회절분석하여 결정 상태를 판단하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 페놀프탈레인 반응성 시험

페 벤토나이트 분말의 포졸란 반응성 검토를 위하여 페 벤토나이트 분말-수산화 칼슘 용액의 페놀프탈레인 1% 알코올 지시약에 대한 반응성 시험을 행한 결과는 표 4와 같다.

소성가공을 하지 않은 페 벤토나이트 분말을 투입한 용액은 페놀프탈레인 지시약에 대하여 붉은 색의 반응을 나타내어 포졸란 반응을 일으키지 않는 것으로 나타났다.

간접냉각의 경우, 소성온도 400°C, 소성시간 30분으로 제작한 페 벤토나이트 분말은 페놀프탈레인 용액에 대하여 붉은 색으로 변하여 수산화 칼슘과의 반응을 일으키지 않는 것으로 나타났으나, 소성시간 60분의 경우에는 색깔변화가 관찰되지 않아 수산화 칼슘과 포졸란 반응을 일으키는 것으로 나타났다.

또한, 소성온도 500°C ~ 700°C로 가공한 페 벤토나이트 분말을 투입한 수산화 칼슘 용액은 소성시간 30분, 60분 모두에서

페놀프탈레인 용액에 대하여 색깔 변화를 일으키지 않아 수산화 칼슘과의 포졸란 반응을 일으키는 것으로 나타났다.

소성온도 800°C의 경우, 소성시간 30분으로 제작한 페 벤토나이트 분말을 투입한 용액은 페놀프탈레인 지시약에 대하여 붉은 색으로 변화하여 포졸란 반응성을 발현하지 않는 것으로 나타났다. 그러나, 소성시간 60분에서는 페 벤토나이트 분말-수산화 칼슘 용액이 무색의 반응을 나타내어 포졸란 반응성을 발현하는 것으로 나타났다.

주수냉각의 경우 페 벤토나이트 분말-수산화 칼슘 용액은 소성온도 400°C, 소성시간 30분으로 제작한 페 벤토나이트 분말은 페놀프탈레인 용액에 대하여 붉은 색으로 변화하였으나, 소성시간 60분의 경우에는 무색의 반응을 나타내어 포졸란 반응을 일으키는 것으로 측정되었다.

소성온도 500°C ~ 700°C는 소성시간 30분, 60분 모두에서 페놀프탈레인 용액에 대하여 반응을 일으키지 않아 포졸란 반응성을 발현하는 것으로 나타났다.

그러나, 소성온도 800°C의 경우 소성시간 30분, 60분 모두에서 페 벤토나이트 분말-수산화 칼슘 용액은 붉은 색의 반응을 나타내어 포졸란 반응을 일으키지 않는 것으로 나타났다.

따라서, 페놀프탈레인 반응성 시험 결과 페 벤토나이트 분말의 포졸란 반응성은 냉각방법에 따른 차이는 적은 것으로 나타났으며, 소성온도 400°C ~ 700°C의 범위에서 수산화 칼슘과 반응성을 발현하는 것으로 나타났다.

일반적으로 포졸란재는 주수냉각 방식에 의해서만 포졸란 반응성을 나타내는 것으로 알려져 있다. 그러나, 페 벤토나이트는 본 연구에서 적용한 간접냉각방식에 의해서도 포졸란 반응성을 발현하는 것으로 나타나, 추후 페 벤토나이트 분말의 제작에 있어 간접냉각방식을 적용한다면 재건조 과정을 요구하는 주수냉각방식에 비하여 시료의 제작공정이 단축될 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 응집·응결시험

페 벤토나이트 분말의 포졸란 반응성 검토를 위하여 수산화 칼슘과 페 벤토나이트 분말을 혼합하여 제작한 공시체의 응집·응결시험을 행한 결과는 표 4.와 같다.

소성가공을 하지 않은 페 벤토나이트 분말과 수산화 칼슘을 혼합하여 제작한 공시체는 수중에 침지시 모두 흐트러져 수산화 칼슘과의 포졸란 반응을 일으키지 않는 것으로 측정되었으며, 또한 소성가공을 하지 않은 페 벤토나이트 분말의 경우는 벤토나이트 특유의 팽윤특성으로 인하여 공시체의 흐트러짐이 매우 급격하게 발생하였다.

간접냉각 방식으로 제작한 페 벤토나이트 분말의 경우, 소성온도 400℃에서는 소성시간 30분, 60분 모두에서 수중에 침지시 공시체의 흐트러짐이 관찰되어 포졸란 반응을 일으키지 않는 것으로 측정되었다.

소성온도 400℃로 가공한 페 벤토나이트 분말의 경우, 소성시간 60분에서는 페놀프탈레인 지시약에 대하여 무색의 반응을 나타내어 포졸란 반응성을 가지는 것으로 나타났으나, 응집·응결시험시 공시체의 흐트러짐이 관찰된 것은 소성온도 400℃의 범위에서는 벤토나이트의 팽윤성이 상실되지 않아 나타나는 현상으로 사료된다.

소성온도 500℃로 가공한 페 벤토나이트 분말을 사용한 공시체는 소성시간 30분의 경우에서는 수중에 침지시 공시체가 흐트러져 단순한 물리적 응집만을 이루는 것으로 나타나 포졸란 반응을 일으키지 않는 것으로 측정되었다. 그러나, 소성시간 60분의 경우에서는 공시체의 흐트러짐이 관찰되지 않아 수산화 칼슘과 포졸란 반응을 일으키는 것으로 나타났다.

소성온도 600℃ ~ 800℃로 가공한 페 벤토나이트 분말을 사용한 공시체는 수중 침지시 소성시간 30분, 60분의 모든 경우에서 공시체의 흐트러짐이 관찰되지 않아 수산화 칼슘과의 화학적 응결을 일으키는 것으로 나타나 포졸란 반응성을 발현하는 것으로 측정되었다.

주수냉각 방식으로 제작한 페 벤토나이트 분말의 경우, 소성온도 400℃에서는 소성시간 30분, 60분의 모든 경우에서 공시체의 흐트러짐이 관찰되어 수산화 칼슘과의 화학적 응결 작용을 일으키지 않는 것으로 나타났다.

소성온도 400℃·소성시간 60분의 경우는 간접냉각 방식으로 제작한 페 벤토나이트 분말의 경우와 동일한 시험 결과를 나타내어, 페 벤토나이트의 제조에 있어 주수냉각 방식을 적용하더라도 최저 소성온도는 400℃ 이상이 되어야 할 것으로 사료된다.

소성온도 500℃ ~ 800℃로 가공한 페 벤토나이트 분말을 사용한 공시체는 소성시간 30분, 60분 모두에서 공시체의 흐트러짐이 관찰되지 않아 수산화 칼슘과 포졸란 반응을 일으키는 것으로 나타났다.

따라서, 페 벤토나이트 분말은 소성가공에 의해 수산화 칼슘과의 화학적 응결작용을 일으키는 포졸란 반응성을 나타내는 것으로 측정되었으며, 포졸란 반응성을 부여하기 위한 적정 소성온도는 간접냉각 방식과 주수냉각 방식 모두에서 500℃ ~ 800℃의 범위인 것으로 나타났다.

또한, 페놀프탈레인 반응성 시험 결과와 응집·응결 시험 결과를 종합하여 볼 때, 페 벤토나이트 분말의 팽윤성은 주수냉

각, 간접냉각 모두에서 400℃ 이상의 고온환경하에서 상실되는 것으로 나타났다. 따라서, 콘크리트 혼화재로서 이용시 페 벤토나이트 분말의 팽윤특성으로 인해 발생될 다량의 건조수축을 저감하기 위한 최저 소성온도는 400℃ 이상이 되어야 할 것으로 판단된다.

3.3 pH 시험

소성온도와 시간 및 냉각방법을 달리하여 제작한 페 벤토나이트 분말의 포졸란 반응성을 검토하기 위해 페 벤토나이트 분말 - 수산화 칼슘 용액의 pH를 측정된 결과는 표 4.와 같다.

1) 간접냉각

간접냉각 방식으로 제작한 페 벤토나이트 분말의 존치기간 3일, 7일에 대한 소성시간에 따른 pH 시험 결과는 그림 4., 그림 5.와 같다.

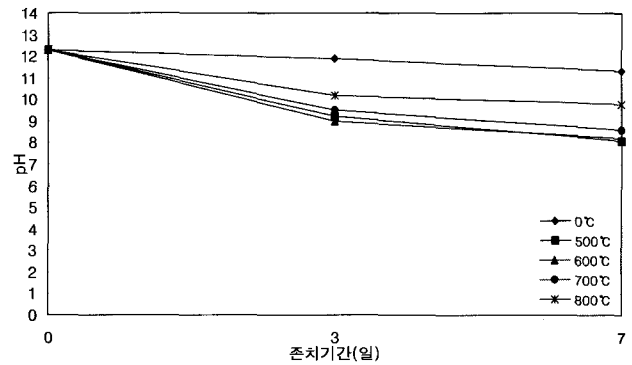


그림 3. 존치기간에 따른 pH의 변화 (소성시간 30분, 간접냉각)

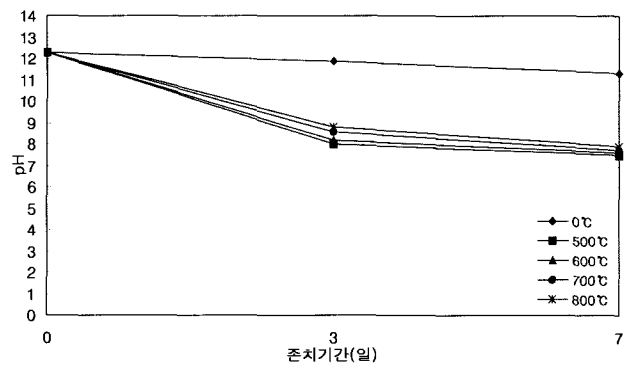


그림 4. 존치기간에 따른 pH의 변화 (소성시간 60분, 간접냉각)

소성가공을 하지 않은 벤토나이트의 존치기간 3일, 7일의 pH는 11.9, 11.3으로 수산화 칼슘과의 반응성이 낮은 것으로 나타났다.

소성시간 30분, 존치기간 3일의 경우 모든 조건에서 pH가 감소하는 것으로 측정되어 수산화 칼슘을 소비하는 것으로 나타났다. 특히 소성온도 500℃, 600℃, 700℃에서는 pH가 각각 9.2, 9.0, 9.5로 pH가 급격하게 감소하는 것으로 나타나 비교적 수산화 칼슘의 소비가 빠른 것으로 나타났다. 소성온도 800℃의 경우는 다른 조건에 비하여 pH의 변화가 가장 적은 것으로 측정되었다.

존치기간 7일의 경우 소성온도 500℃~700℃의 경우는 pH가 각각 8.1, 8.2, 8.6으로서 pH의 감소가 큰 것으로 나타나 수산화 칼슘과의 반응성이 매우 높은 것으로 측정되었다. 그러나 소성온도 800℃의 경우는 존치기간 3일 이후에서 pH의 변화가 적은 것으로 나타나 수산화 칼슘과의 반응성이 낮은 것으로 측정되었다.

소성시간 60분, 존치기간 3일의 경우 모든 조건에서 pH가 급격하게 감소하는 것으로 나타나 수산화 칼슘과의 반응성이 높은 것으로 측정되었다.

존치기간 7일의 경우, 소성온도 500℃~800℃의 pH는 평균 약 7.7로서 유사한 경향을 나타내었으며, 존치기간 3일 이후에 pH가 약 1정도 감소하는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 바탕으로 간접냉각한 페 벤토나이트를 투입한 용액의 pH는 존치기간 3일에서 비교적 pH의 감소가 급격한 것으로 나타났으며, 소성시간 60분의 경우에서는 모든 소성온도에서 pH의 변화가 유사한 것으로 나타났다.

2) 주수냉각

주수냉각 방식으로 제작한 페 벤토나이트 분말의 존치기간 3일, 7일에 대한 소성시간에 따른 pH 시험 결과는 그림 6., 그림 7.과 같다.

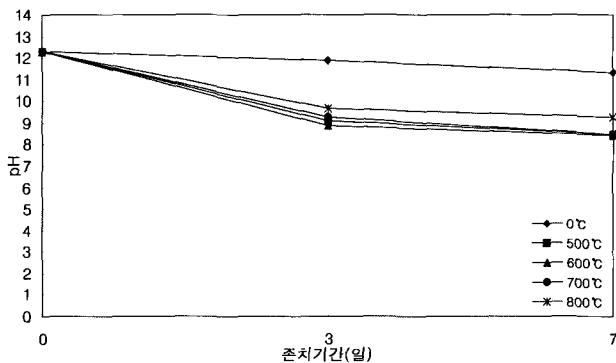


그림 5. 존치기간에 따른 pH의 변화 (소성시간 30분, 주수냉각)

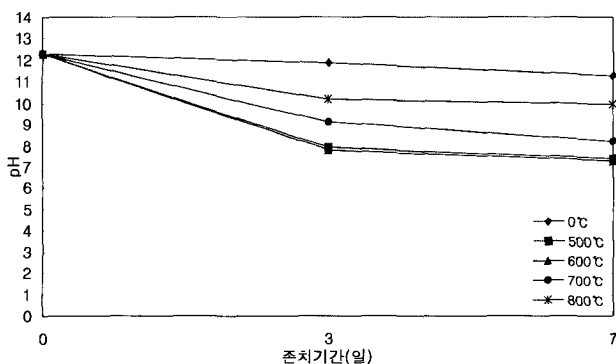


그림 6. 존치기간에 따른 pH의 변화 (소성시간 60분, 주수냉각)

소성시간 30분의 경우, 존치기간 3일에서 소성온도 500℃, 600℃, 700℃, 800℃의 모든 조건에서 pH가 감소하는 것으로 측정되어 수산화 칼슘을 소비하는 것으로 나타났다. 소성온도 500℃, 600℃, 700℃, 800℃에서 pH는 각각 9.1, 8.9, 9.3, 9.7

로 측정되어 소성온도 600℃의 경우가 수산화 칼슘과의 반응이 가장 큰 것으로 나타났다.

소성시간 30분-존치기간 7일의 경우, 소성온도 500℃, 600℃, 700℃에서 pH는 평균 약 8.5로 측정되어 수산화 칼슘과의 반응성이 비교적 큰 것으로 나타났다. 그러나 소성온도 800℃에서 pH는 9.3으로 포졸란 반응성이 적은 것으로 측정되었다.

따라서, 소성시간 30분의 경우 페 벤토나이트 분말의 적정 소성온도는 500~700℃ 정도가 적합할 것으로 판단된다.

소성시간 60분, 존치기간 3일의 경우 모든 조건에서 pH가 감소하는 것으로 나타났으나, 소성온도에 따른 pH의 변화는 매우 큰 것으로 측정되었다.

소성온도 500℃, 600℃에서의 pH는 각각 7.9, 7.8로 측정되어 pH가 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 소성온도 700℃와 800℃에서의 pH는 각각 9.1, 10.2로서 600℃ 이상의 고온 환경하에서는 포졸란 반응성이 감소하는 것으로 나타났다.

존치기간 7일에서 소성온도 500℃, 600℃의 경우의 pH는 평균 약 7.4로서, 소성온도 조건 중 pH의 감소가 가장 큰 것으로 나타나 포졸란 반응성이 가장 높은 것으로 측정되었다. 소성온도 800℃의 경우에는 존치기간 3일 이후의 pH의 변화가 비교적 적은 것으로 나타나 포졸란 반응성의 발현정도가 가장 낮은 것으로 측정되었다.

이상의 결과를 바탕으로 페 벤토나이트의 적정 소성온도 500~600℃가 적합할 것으로 사료된다. 또한 소성시간 30분에 비하여 소성시간 60분의 경우 pH의 감소가 큰 것으로 나타나, 적정 소성시간은 60분이 적합할 것으로 판단된다.

3) 냉각방법에 따른 pH

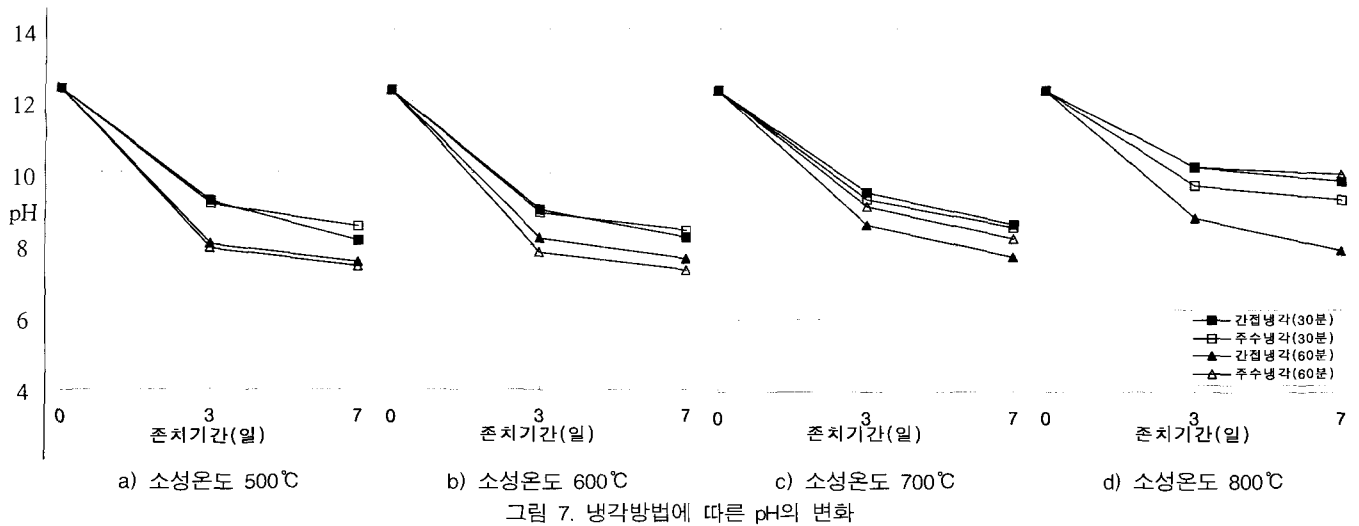
소성가공한 페 벤토나이트의 냉각방법에 따른 소성온도별 페 벤토나이트 분말 - 수산화 칼슘 용액의 pH의 변화는 그림 7.과 같다.

페 벤토나이트 소성온도 500℃의 경우 소성시간에 따른 pH의 차이는 큰 것으로 측정되었으며, 냉각방법에 따른 차이는 적은 것으로 나타났다.

소성온도 600℃·소성시간 30분의 경우 냉각방법에 따른 pH의 감소는 유사한 것으로 나타났으나, 소성시간 60분인 경우에는 주수냉각방식으로 제작한 페 벤토나이트 분말을 투입한 용액의 pH 저하가 간접냉각 방식에 의한 것에 비하여 다소 큰 것으로 측정되어 수산화 칼슘과의 포졸란 반응성이 가장 큰 것으로 측정되었다.

페 벤토나이트를 700℃·30분간 소성가공한 페 벤토나이트 분말을 투입한 용액의 pH의 변화는 냉각방법에 따른 차이는 크지 않은 것으로 나타났으나, 소성시간 60분의 경우에는 주수냉각에 비하여 간접냉각방식으로 제작한 페 벤토나이트 분말을 투입한 pH의 감소가 더욱 급격한 것으로 측정되어 포졸란 반응성이 가장 높은 것으로 나타났다.

소성온도 800℃의 경우 소성시간 30분에서는 냉각방법에 따른 pH의 변화가 적었으며, 소성시간 60분의 경우에는 간접냉각방식이 주수냉각에 비하여 pH의 저하가 급격한 것으로 측정되었다.



이상의 결과를 바탕으로, 페 벤토나이트 분말의 소성시간 30분의 경우에서는 냉각방법에 따른 포졸란 반응성의 발현정도가 유사한 것으로 나타났으나, 소성시간 60분의 경우에는 냉각방법에 따른 페 벤토나이트 분말의 포졸란 반응성의 발현정도가 상이한 것으로 나타났다. 특히, 소성온도 600°C 이하에서는 주수냉각의 경우가 더욱 우수한 것으로 나타났으며, 700°C 이상의 환경에서는 간접냉각의 경우가 우수한 것으로 나타났다.

따라서, 페 벤토나이트에 포졸란 반응성을 부여하기 위한 투입 에너지량을 고려하여 볼 때, 비교적 낮은 온도에서 포졸란 반응성을 발휘하는 주수냉각의 경우가 간접냉각에 비하여 더욱더 경제적인 것으로 판단된다.

3.4 X선회절 분석

소성온도, 시간 및 냉각방법에 따라 가공한 페 벤토나이트 분말의 X선 회절분석 결과는 그림 8., 그림 9.와 같다.

소성가공을 하지 않은 페 벤토나이트 분말은 그림 3-5 a)와 같이 매우 뚜렷한 주 피크와 상당히 많은 부피크가 관찰되어, 페 벤토나이트를 이루는 광물이 매우 안정한 결정질로 이루어진 것을 파악할 수 있었다.

간접냉각방식으로 제작한 페 벤토나이트의 X선 회절 시험을 행한 결과, 소성시간 30분의 경우에는 소성온도 500°C를 제외한 모든 조건에서 소성가공을 하지 않은 페 벤토나이트 분말의 주피크에 비하여 회절강도가 감소하는 것으로 나타났으며, 부피크 또한 감소하거나 관찰되지 않아 소성가공에 따라 페 벤토나이트를 이루는 광물의 결정이 변화하는 것으로 나타났다. 소성온도 500°C·소성시간 30분의 경우 주피크의 회절강도가 소성가공을 하지 않은 페 벤토나이트에 비하여 높게 나타난 것은 벤토나이트 결정내부의 층간에 포함된 층간수의 탈수로 인하여 층간의 간격이 감소하여 나타나는 현상인 것으로 사료된다.

소성시간 60분의 경우 페 벤토나이트 분말의 주피크는 소성온도 500~800°C의 범위에서 소성온도가 증가함에 따라 낮아지는 것으로 나타났으며, 소성시간 30분에 비하여 그 변화는 큰 것으로 측정되었다. 특히, 소성온도 600°C와 800°C의

경우는 주피크의 회절강도가 급격히 낮아지는 것으로 측정되어, 페 벤토나이트 분말의 결정 변화가 가장 큰 것으로 나타났다. 그러나 소성온도 800°C의 경우에는 주피크가 다시 증가하는 양상을 나타내었다. 이는 벤토나이트를 이루는 주 광물이 800°C 이상의 고온 환경하에서

고온에서 안정한 결정상을 형성하는 것에 기인한 것으로 사료된다.

따라서, 간접냉각의 경우 페 벤토나이트의 소성온도는 600~700°C의 범위가 포졸란 반응성이 가장 클 것으로 예측되며, 소성시간 30분보다는 소성시간 60분의 경우가 포졸란 반응성을 부여하는 데 더욱 유리할 것으로 판단된다.

주수냉각의 경우, 페 벤토나이트 분말의 X선 회절 시험을 행한 결과 뚜렷한 주피크와 부피크가 관찰되는 소성가공을 하지 않은 페 벤토나이트 분말의 X선 회절 그래프에 비하여 모든 소성조건에서 주피크와 부피크의 회절강도가 급격히 감소하는 것으로 나타나 페 벤토나이트를 이루는 결정상태의 변화가 큰 것으로 나타났다.

또한 주수냉각 방식으로 제작한 페 벤토나이트 분말은 소성온도와 소성시간에 따른 결정변화의 차이는 매우 적은 것으로 나타나, 페 벤토나이트 분말의 제작시 비교적 낮은 소성온도의 범위에서 포졸란 반응성을 기대할 수 있을 것으로 예상되며 또한 결정변화를 유도하기 위한 소성시간도 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

따라서, 페 벤토나이트는 소성가공을 함에 따라 결정의 상태가 변화하는 것으로 나타났으며, 간접냉각의 경우 보다 주수냉각의 경우가 결정의 변화가 큰 것으로 나타나 포졸란 반응성이 더욱 높을 것으로 사료된다.

또한 페 벤토나이트 소성온도 500~700°C의 범위에서는 소성온도가 증가할수록 결정의 변화가 더욱 커지는 것으로 나타나 소성온도가 증가할수록 포졸란 반응성은 높아질 것으로 예측되며, 페 벤토나이트의 소성은 800°C를 넘지 않은 범위에서 이루어져야 할 것으로 사료된다.

4. 결론

소성온도와 시간 및 냉각방법에 따라 제작한 페 벤토나이트 분말의 포졸란 반응성 검토를 위해 페놀프탈레인 반응성 시험, 응집·응결 시험, pH 시험, X선 회절 분석을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 페놀프탈레인 반응성 시험 결과 페 벤토나이트 분말은 소성 온도 500~700℃의 범위에서 포졸란 반응을 일으키는 것으로 나타났으며, 냉각방법에 따른 차이는 적은 것으로 나타났다.
- 2) 페 벤토나이트 분말은 400℃ 이상의 고온환경하에서 팽윤성을 상실하는 것으로 나타나, 콘크리트 혼화재로서 이용시 페 벤토나이트 분말의 팽윤특성으로 인해 발생될 다량의 건조수축을 저감하기 위한 최저 소성온도는 400℃ 이상이어야 할 것으로 판단된다.
- 3) 응집·응결 시험 결과 페 벤토나이트 분말은 소성온도 500℃~700℃의 범위에서 소성할 경우 수산화 칼슘과 화학적 응결작용을 일으키는 것으로 나타났으며, 소성시간과 냉각방법에 따른 차이는 적은 것으로 나타났다.
- 4) pH 시험 결과 페 벤토나이트 분말은 모든 조건에서 수산화 칼슘과 포졸란 반응을 일으키는 것으로 측정되었다. 또한, 소성온도 500~700℃로 가공한 페 벤토나이트 분말의 포졸란 반응성이 가장 큰 것으로 나타났으며, 소성시간이 길어짐에 따라 포졸란 반응성은 증진되는 것으로 나타났다.

따라서, 페 벤토나이트는 소성가공에 의하여 포졸란 반응성을 발현하는 것으로 나타나 콘크리트 혼화재로서 활용이 가능할 것으로 판단된다.

또한, 콘크리트 혼화재로서 이용하기 위한 페 벤토나이트 분말의 적정 소성온도 범위는 500~700℃, 소성시간은 60분이 적합할 것으로 사료된다.

냉각방식에 따른 포졸란 반응성은 주수냉각의 경우에는 600℃ 이하에서, 간접냉각의 경우는 700℃ 이상의 고온환경하에서 각각 우수한 것으로 나타나, 적정 냉각방식은 포졸란 반응성을 부여하기 위한 투입 에너지량과 제조공정 및 콘크리트 적용성 실험을 통하여 결정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 산·학·연 공동기술개발 원소사업사업 지원하에 이루어진 연구의 일부로, 특히 본 연구에 많은 도움을 주신 (주)산양공업 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

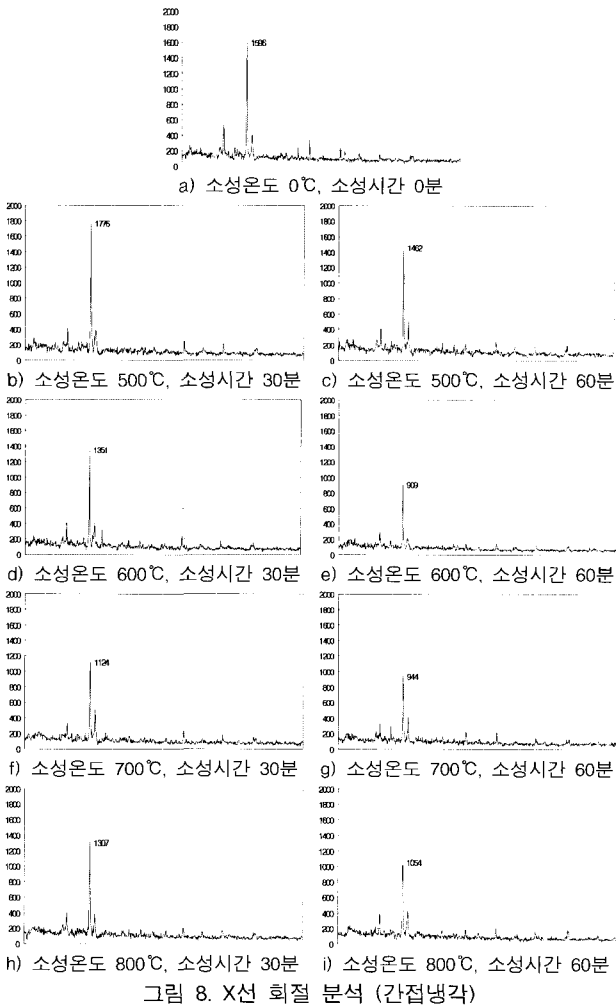


그림 8. X선 회절 분석 (간접냉각)

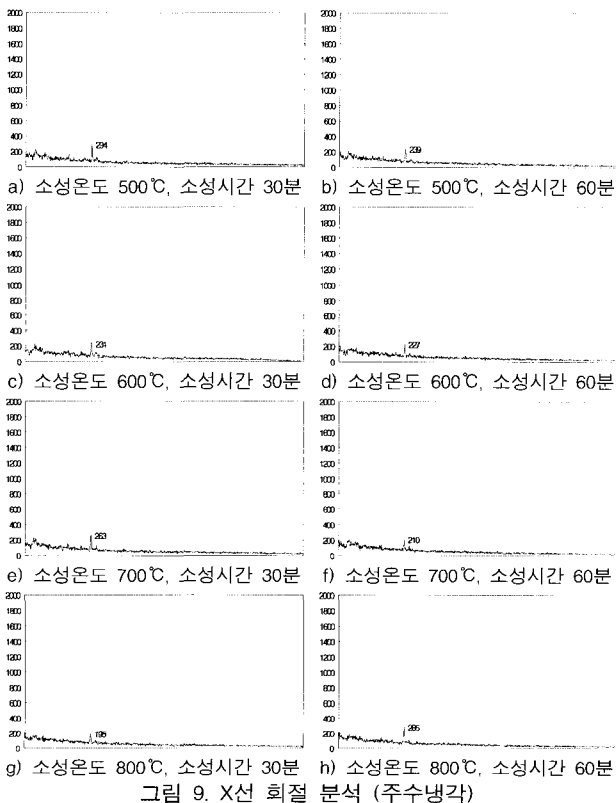


그림 9. X선 회절 분석 (주수냉각)

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, コンクリートの實驗方法, 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