

시멘트 콘크리트의 배합조건에 따른 pH 저감에 관한 연구

A Study on the pH Reduction of Cement Concrete with Various Mixing Conditions

조영국*

JO, Young-Kug

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the mix design of pH reducing cement concrete which can be used for environment-friendly concrete. Cement pastes and concretes are prepared with water-binder ratios and various admixtures such as blast-furnace slag, fly ash and recycled cement, and tested for compressive strength and pH. pH is measured through pore solution expressed from hydrated cement paste by special apparatus. From the test results, regardless of water-binder ratio, The pH of expressed pore solution from hydrated cement paste which is made of ordinary portland cement with blast-furnace slag, fly ash is decreased with increasing of admixtures content, and compressive strength is also slightly improved. The compressive strength of cement paste made of recycled cement which is burnt at 1000°C, for 2 hours is considerably increased compared with that of none-burnt recycled cement due to restoration of hydraulic property, but pH is a little higher. Porous concrete with ordinary portland cement has high pH in the range of 12.22 to 12.59, however, that is reduced to the range of 8.95 to 10.39 by carbonation at the surface of porous concrete. The pH reduction of porous concrete is possible by various admixture addition, however their degrees are very slight. Therefore, to reduce the pH considerably, carbonation method of porous concrete is better in pH reduction methods for plant survival condition of pH of 9.0 or less. In this study, it is apparent that pH for the environment-friendly porous concrete products used in the construction field can be suppressed by this carbonation method and various admixtures addition.

키워드 : 고로슬래그, 플라이애쉬, 재생시멘트, 압축강도, 중성화, 수화성

Keywords : Blast-furnaces slag, fly ash, recycled cement, compressive strength, carbonation, hydraulic property

1. 서론

최근 환경문제에 대한 관심이 고조되고 주위 경관과의 조화 등을 고려하여 미국이나 일본 등 선진국에서는 환경 친화적 콘크리트에 대한 연구 뿐 아니라 실제 하천제방 및 도로 사면 등에 적용시키는 적극적인 실용화가 활발히 진행되고 있다. 우리나라에서도 십여년 전부터 실제 시공되고 있는 사례가 많으나, 시멘트 콘크리트에 식물을 심어 조화롭게 하는 식생콘크리트의 사용이 시멘트 콘크리트의 표면을 치장하는 수단 밖에는 되지 못하고 있는 실정이며, 이에 대한 연구는 다수 진행되지 있지만 확실한 해결책이 마련되지 못한 형편이다.¹⁾⁻²⁾ 식생 콘크리트의 현장 실용화에 제약을 받고 있는 것은 pH가 12.5~13.0 정도로 강알칼리라는 점이다. 현재 식물 녹화방법에서도 콘크리트 속에서는 식물이 살기 어렵기 때문에 시멘트 콘크리트 2차 제품의 중앙에 흙을 메워 식물이 자랄 수 있는

환경을 만들어 시공하고 있다. 근본적으로 시멘트라는 결합재를 사용하면서 pH를 낮추는 것은 어려운 문제인데 pH 저감을 위한 배합은 강도 및 내구성을 저하시킬 수 있기 때문이다. 식생 콘크리트는 표면적이 큰 다공성으로 초기에는 알칼리 성분의 용출이 많으므로 고로슬래그 미분말이나 실리카흄 등의 혼화재를 혼입함으로써 수화중에 수산화칼슘의 생성량을 감소시키는 방법과 인산 2 암모니움과 같은 중화제를 이용하여 처리하는 방법 등이 많이 이용되고 있다. 본 연구에서는 기존의 방법과 달리 결합재에 의한 pH 저감으로, 고로슬래그를 치환시키는 방법, 한번 수화하여 경화되었던 시멘트를 재생하여 사용하는 방법, 재생시멘트를 소성시켜 사용하는 방법과 식생콘크리트 표면을 직접 중성화 시키는 방법 등을 이용하였다. 또한 시멘트 페이스트의 정확한 pH값을 측정하기 위하여 특수 제작된 세공용액 추출기를 사용하였으며, 시멘트 콘크리트는 물씻기법으로 측정하였다. 따라서, 본 연구는 충분한 역학적 성질과 내구성을 보유하면서 환경 친화적인 식생 콘크리트를 제조하기 위한 것으로 각종 배합조건에 따른 pH 저감효과를 평가

* 청운대학교 건축공학과 부교수, 공학박사

하였다.

2. 실험계획

2.1 사용재료

2.1.1 시멘트와 골재

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 골재로서는 19mm 이하의 쇄석을 사용하였다.

2.1.2 혼화재료

시멘트 페이스트와 콘크리트의 성질을 개선시키기 위하여 고로슬래그 (비중 2.89, 비표면적 4,400cm²/g)와 플라이 애쉬 (비중 2.18, 비표면적 3,400cm²/g)를 시멘트 중량에 대한 비율로 혼입하여 사용하였다.

2.1.3 재생시멘트

보통 시중에 널리 사용되고 있는 시멘트 벽돌(압축강도 2.2MPa)을 분쇄용기에서 0.15mm 이하로 분쇄한 재생시멘트 (밀도 2.83g/cm³)를 1,000℃, 2시간 동안 소성로에서 소성하여 결합재로 사용하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 시멘트 페이스트 및 포러스 콘크리트 제작

표 1과 같은 배합으로 시멘트 페이스트의 pH 측정용 공시체는 그림 1과 같은 ø50×100mm의 PVC 병을 이용하여 각각 3개씩 밀봉 제작하였다. 또한 경화시 공시체 내의 블리딩수를 제거하고 공시체 내의 고른 수화를 위해 초기재령 24시간 까지 공시체 회전기를 이용하여 회전시키면서 경화시켰으며 뚜껑을 완전히 밀봉한 공시체는 20±2℃의 양생실에서 소정의 기간 동안 양생하였다. 또한 압축강도용 공시체는 5x5x5cm

표 1. 시멘트 페이스트의 배합조건

결합재 종류	보통시멘트 + 혼화재	재생시멘트	소성 재생시멘트 + 보통시멘트
물시멘트비(%)	40, 50, 60, 70	50	50
고로슬래그 치환율(%)	0, 10, 40	30	-
플라이 애쉬 치환율(%)	-	30	-
보통시멘트 치환율(%)	-	-	10, 20, 30
무수석고 치환율(%)	-	3, 4, 5, 10	-

입방체를 사용하여 제작한 후, 20±2℃의 양생실에서 28일간 양생하여 강도를 측정하였다.

한편, 포러스 콘크리트용 배합표는 표 2와 같으며 ø75×150mm 크기의 원주형 공시체로 보통시멘트와 재생시멘트를 사용하여 제작한 후 28일간 기중양생을 실시하였다.



그림 1. 시험용 공시체

표 2. 포러스 콘크리트의 배합조건

단위량(kg/m ³)				공극율 (%)	물시멘트비(%)
시멘트	굵은골재	수량	혼화재		
280	1,333	120	120	25	30

2.2.2 pH 측정을 위한 세공용액 추출³⁾

세공용액의 추출은 Barneyback and Diamond,⁴⁾ Tritthart⁵⁾에 의해 발표된 고압용기와 유사하게 소수영³⁾에 의해 제작된 것을 사용하였으며, 고압용기의 상세도면과 실제 모양을 그림 2 및 그림 3에 나타냈다. 고압 세공용액 추출용기의 제작에는 SAE 4340합금을 사용하였으며, 모든 부품을 열처리하여 강성을 높였고 특히 실린더의 내부와 상하면, 실린더와 맞닿는 베이스의 표면과 피스톤의 표면은 평탄도 0.0012mm로 가공한 후 화학적 저항성과 마모저항을 높이기 위해 강성이 높은 크롬 도금을 하였다. 세공용액 추출은 200ton의 UTM을 사용, 일

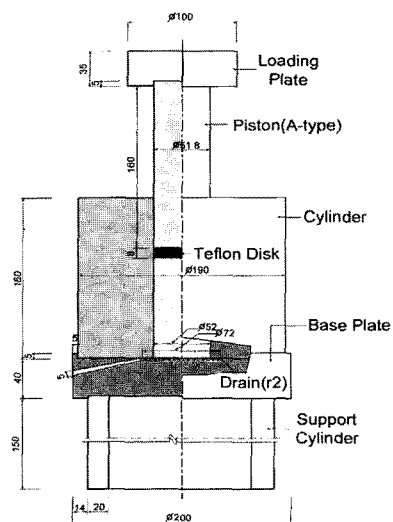


그림 2. Barneyback and Diamond, Tritthart에 의해 고안된 세공 용액 추출 고압용기

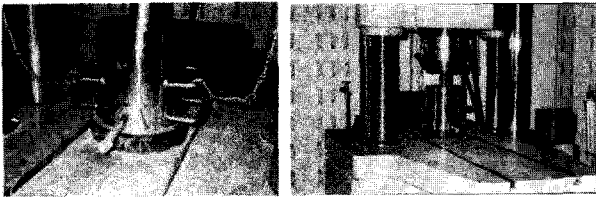


그림 3. 세공용액 추출기

정한 속도로 서서히 압력을 가하여 5~10ml 정도의 세공용액을 1회용 플라스틱 주사기를 이용하여 추출하였다. 추출시 고압세공용액의 상부 실린더 내 피스톤과 공시체 사이에 고압에서도 신축력과 강도가 큰 테프론 원반을 사용하여 실린더 내부의 압력이 누출되지 않도록 하였다. 세공용액은 동일 배합의 공시체에서 각기 추출한 3개의 세공용액을 합하여 추출 후 24시간 이내에 그림4와 같은 pH 측정기를 사용하여 분석하였다.

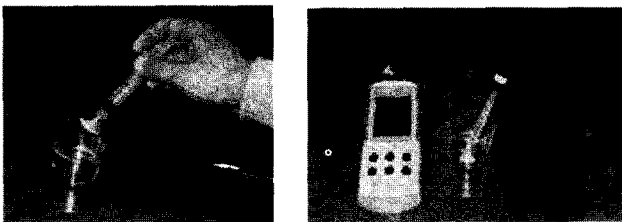


그림 4. 세공용액 추출기액 및 pH 측정기

2.2.3 압축강도 시험

시멘트 페이스트의 압축강도는 KS L 5105(시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법)에 준하여 공시체 5x5x5cm 입방체를 사용하여 압축강도 시험을 실시하였으며, 포러스 콘크리트의 경우 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 준하여 $\phi 75 \times 150$ mm 크기의 원주형 공시체를 사용하여 압축강도 시험을 실시하였다.

2.2.4 포러스 콘크리트의 pH측정

식생용 포러스 콘크리트 제품이 현장에서 물에 의한 씻겨 알칼리 성분이 용출되는 상황을 고려하여 포러스 콘크리트 위에 30ml의 증류수를 산포하여 흘러내린 증류수의 pH와 증류수에 28일 동안 담근 후에 pH를 KS M 0011에 따라 pH 측정기로 측정하였다. 이 때 pH를 저감시킬 목적으로 포러스 콘크리트를 촉진중성화시험 장치(30℃, 50%R.H, CO₂ 5%)에 7일간 방치하여 표면으로부터 0.5~1.0cm 정도까지 중성화시킨 공시체에 대해서도 시험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고로슬래그 혼입 시멘트 페이스트의 강도와 pH

그림 5는 고로슬래그로 치환한 시멘트 페이스트의 압축강도와 pH 변화를 나타내고 있다. 보통 시멘트만을 사용한 시멘트 페이스트는 물시멘트의 증가에 따라 당연히 압축강도가 크게 저감하는 것을 알 수 있었다. 또한 보통시멘트에 대한 고로슬래그의 치환율에 따라서는 물시멘트비에 관계없이 고로슬래그 치환율 10%에서 28일 압축강도가 가장 크게 증진되었으며, 그 정도는 물시멘트비 50%에서 현저하게 나타났다. 한편, 시멘트 페이스트 속에서 추출한 세공용액의 pH는 혼화재를 혼입하지 않은 경우 13.18~13.34로 아주 강알칼리성을 나타냈다. 고로슬래그의 치환율에 따른 pH는 물시멘트비에 상관없이 보통시멘트만을 사용한 경우에 비해 치환율이 증가할수록 현격하게 감소되었다. 물시멘트비 40%와 고로슬래그 치환율 40%에서의 pH는 보통시멘트만 사용한 경우에 비해 0.61~0.72 정도 낮게 나타났다. 이는 고로슬래그의 잠재수경성에 의해 수화과정에서 수산화칼슘의 생성이 그만큼 감소하였다는 의미이다.

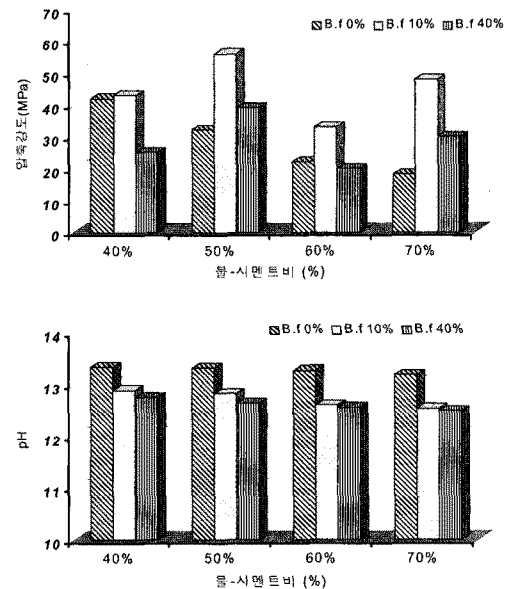


그림 5. 고로슬래그로 치환한 시멘트 페이스트의 압축강도와 pH

3.2 재생시멘트를 사용한 시멘트 페이스트의 강도와 pH

3.2.1 미소성 재생시멘트를 사용한 경우

그림 6은 폐시멘트 벽돌을 분쇄한 미소성 재생시멘트와 석고를 혼입한 결합재에 고로슬래그와 플라이애쉬를 각각 30% 치환한 시멘트 페이스트의 압축강도와 pH를 나타내고 있다. 재생시멘트를 파쇄하여 다시 소성을 통하면 원 시멘트와 같이 결합재로 사용될 수 있다는 연구가 2000년대 초부터 시작되어 많은 연구가 진행되고 있다.^{6),7)} 그러나 배합에 따라 차이는

있으나, 재생시멘트를 사용하면 압축강도가 원시멘트에 비해 30~75%까지 낮게 나타났다.⁷⁾ 본 연구에서 사용된 보통 시멘트 벽돌은 압축강도가 2.2MPa로 낮은 배합으로서 분말화한 재생시멘트의 성분에는 잔골재의 파쇄분도 포함되어 있다. 또한 이러한 재생시멘트는 한번 수화에 의해 경화되었기 때문에 다시 소성시키면 원 시멘트에 비해 pH가 저감될 것으로 판단하여 실험을 실시하였다. 재생시멘트는 소성에 의해 수화성이 회복된다고 알려져 있으나,^{6),7)} 그림 6은 미소성 재생시멘트에 석고를 첨가한 시멘트 페이스트의 압축강도와 pH의 변화를 검토하기 위하여 실시한 실험결과이다. 미소성 재생시멘트를 사용한 시멘트 페이스트는 석고에 의해 경화되어 강도를 발현하는 것으로 나타났으며, 여기에 고로슬래그나 플라이 애쉬를 혼입하면 강도는 크게 개선되었으나, 최대값이 4MPa 정도로 전반적인 압축강도는 낮게 나타났다. 한편, 시멘트 페이스트 내부에서 추출한 세공용액에 대한 pH는 석고만 혼입한 경우에는 12.26 정도였으나, 고로슬래그를 혼입한 경우 11.35~11.47, 플라이 애쉬를 혼입한 경우 11.75~11.89로 약 4~7% 정도 낮게 나타났다. 이는 전술한 혼화재의 잠재수경성의 결과라 볼 수 있으며, 상대적으로 보통시멘트의 절대량이 감소되었기 때문이다.

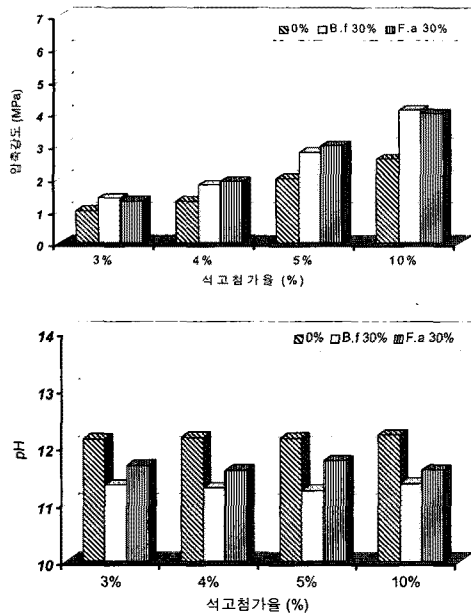


그림 6. 미소성 재생시멘트를 사용한 시멘트 페이스트의 압축강도와 pH

3.2.2 소성 재생시멘트를 사용한 경우

그림 7은 페 시멘트 벽돌을 미분쇄 한 재생시멘트를 1,000℃로 2시간 소성시켜 제작한 시멘트 페이스트의 압축강도와 pH를 나타내고 있다. 전술한 미소성 재생시멘트를 사용한 경우와 비교하여 시멘트 페이스트의 압축강도는 고로슬래그 및 플라이 애

쉬를 혼입한 경우에는 압축강도의 개선이 거의 없었으나, 석고만을 혼입한 경우에는 2.7배~3.1배의 강도 증진 효과가 발생하였다. 따라서 재생시멘트를 소성시키면 수화성이 어느 정도 회복되는 사실을 알 수 있었으나, 혼입되는 혼화재료에 따라 수화성의 회복정도에 차이가 있었다. 한편, 시멘트 페이스트 내부에서 추출한 세공용액에 대한 pH는 미소성 재생시멘트를 사용하였을 경우와 비교하여 0.3~0.5 정도 크게 나타나 재생시멘트를 소성시키면 수화성이 회복되면서 수산화나트륨과 같은 알칼리 성분의 생성이 촉진된 것으로 판단된다. 기존의 연구^{8)~10)}에서는 재생시멘트의 수화성 회복은 약 700℃에서 2시간 정도 소성시키는 것이 바람직하다고 보고되고 있으나, 본 연구에서는 페 시멘트 벽돌을 사용하였기 때문에 일반 시멘트 페이스트에 비해 잔골재 성분이 혼입되어 소성온도를 1,000℃로 높게 하여 재생 시멘트 자체의 활성도를 높이고자 하였다.

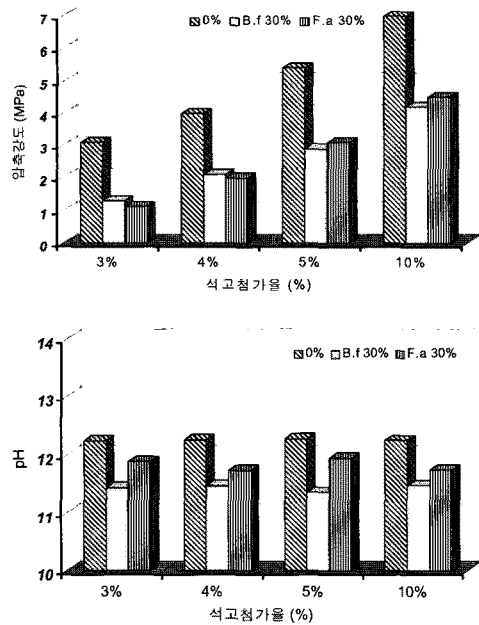


그림 7. 소성 재생시멘트를 사용한 시멘트 페이스트의 압축강도와 pH

3.2.3 소성 재생시멘트에 보통시멘트를 치환하여 사용한 경우

그림 8은 소성 재생시멘트의 강도를 증진시키기 위하여 보통시멘트를 치환하여 만든 시멘트 페이스트의 압축강도와 pH를 나타내고 있다. 소성 재생시멘트에 보통시멘트를 치환함에 따라 강도가 최대 4배이상 크게 증진되었다. 본 연구에서 사용된 재생시멘트는 강도가 낮은 배합에서 만든 것임에도 불구하고 보통시멘트를 전체결합재 비율에서 30%만 사용하여도 30MPa 정도의 압축강도를 얻을 수 있는 것은 재생시멘트 자체도 보통시멘트와 같이 강도발현에 크게 작용하였음을 알 수

있는 결과이다. 이러한 높은 강도 발현의 결과와 같이 시멘트 페이스트 내부에서 추출한 세공용액에 대한 pH도 12.65~12.85 범위로 강알칼리성을 나타냈다. 따라서 본 연구와 같이 재생시멘트를 사용할 때, 높은 강도를 필요로 하지 않는 경우에는 pH를 함께 억제할 수 있으나 높은 강도의 경우에는 pH를 낮추는 데는 별다른 효과를 볼 수 없었다.

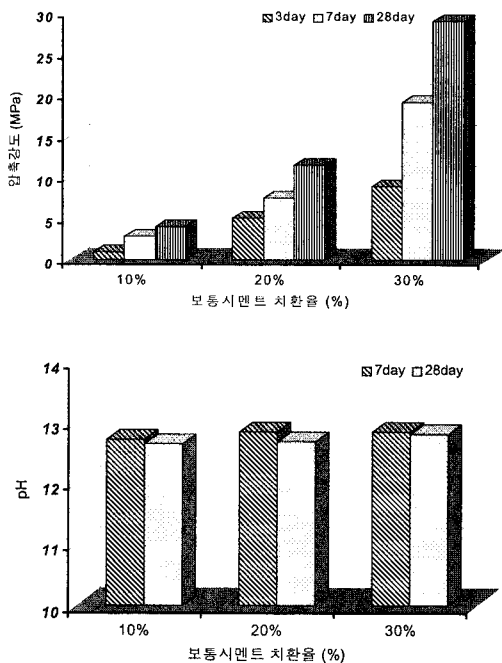


그림 8. 소성 재생시멘트에 보통시멘트를 치환 한 시멘트 페이스트의 압축강도와 pH

3.3 포러스 콘크리트의 pH

시멘트 페이스트는 전술한 세공용액을 추출하는 방법으로 실제 시멘트 구조체 내부의 pH를 결정시키는 세공용액으로 평가하였으나, 포러스 콘크리트와 같은 재료의 pH 측정에 관한 실증적인 방법이 아직까지는 확실히 정립되지 않았다. 따라서 실제 현장에서 사용되는 포러스 콘크리트에서 알칼리 성분 용출 정도에 따른 pH 변화를 측정하였다. 그림 9는 표 2의 배합으로 제작된 보통시멘트 사용 포러스 콘크리트의 물뭍기 시험에 의한 pH 측정 결과를 나타내고 있다. 보통시멘트를 사용하여 제작한 포러스 콘크리트는 혼화재를 혼입하지 않은 경우에는 pH가 12.22~12.58의 범위이었으며, 플라이애쉬와 고로슬래그를 혼입함에 따라 pH가 약간 낮아졌다. 그러나 같은 공시체를 중성화 시킨 후에는 pH가 2.0~3.0 정도 크게 감소되어 8.95~10.39의 범위를 나타냈다. 또한 공시체 표면에 물뭍기를 5회까지 증가 할수록 pH가 0.1 정도 증가하였으나, 5회 이상에서는 pH의 변화가 거의 없었으며 오히려 약간 감소하는 경향을 보였다.

보통 포러스 콘크리트를 식생 콘크리트로 사용하기 위해서

는 식물이 성장할 수 있는 적정조건으로서 pH를 5.0~8.0 범위이며, 최소 9.0 이하로 알려져 있다.^{8)~10)} 혼화재를 혼입한 중성화 처리 포러스 콘크리트의 경우가 pH 저감정도가 현격하였으며, 혼화재의 종류에 따라서는 거의 차이는 없으나 고로슬래그를 혼입한 경우가 플라이애쉬를 혼입한 경우에 비해 약간 pH가 낮게 나타났다.

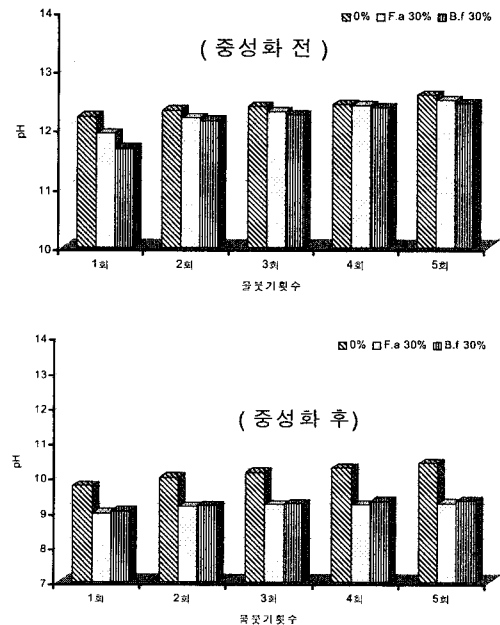


그림 9. 보통시멘트 사용 포러스 콘크리트의 중성화 전후의 pH

그림 10은 표 2의 배합으로 제작된 재생시멘트 사용 포러스 콘크리트의 물뭍기 시험에 의한 pH 측정 결과를 나타내고 있다. 미소성 재생시멘트를 사용하여 제작한 포러스 콘크리트의 pH는 중성화 전의 경우 9.75~10.14의 범위였으나, 중성화 후에는 8.05~8.49의 범위로 아주 낮은 pH를 나타냈다. 또한 미소성 재생시멘트의 수화성의 회복이 낮아 알칼리 성분의 수화물의 형성이 적었으며, 표면 중성화에 의한 물뭍기로 알칼리 성분의 용출이 크게 억제되었음을 알 수 있었다.

그림 11과 같이 소성된 재생시멘트를 사용한 경우 중성화 처리를 하지 않은 포러스 콘크리트는 거의 보통시멘트의 경우와 같이 높은 pH를 나타냈으나, 포러스 콘크리트의 표면을 중성화 시킬 경우에는 크게 pH가 저감되어 8.79~9.04의 범위를 나타내 포러스 콘크리트 표면의 중성화에 의해 pH를 22.7%~27.3% 정도 저감할 수 있었다. 전술한 보통시멘트에 혼화재를 혼입한 경우와 미소성 재생시멘트를 사용한 경우에 비해 훨씬 낮은 pH 9.0 이하를 나타내 실제 식생콘크리트용으로 사용할 수 있는 조건을 만족하였다.

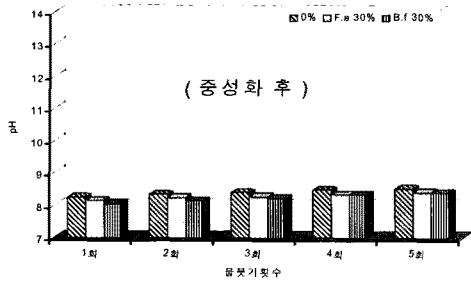
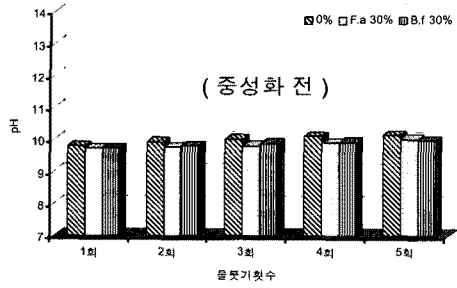


그림 10. 재생시멘트 사용 포러스 콘크리트의 중성화 전후의 pH (물뚫기방법)

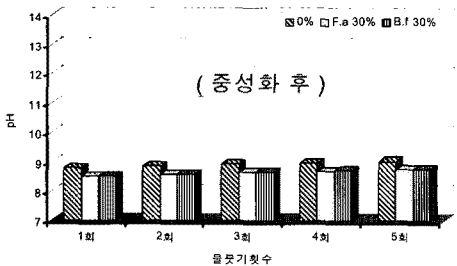
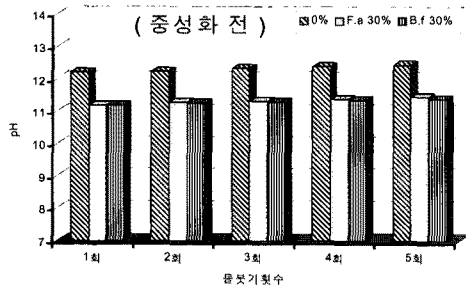


그림 11. 소성한 재생시멘트 사용 포러스 콘크리트의 중성화 전후의 pH(물뚫기방법)

그림 12는 표 2의 배합으로 제작된 각종 시멘트 결합재의 종류에 따른 포러스 콘크리트의 물담그기 시험에 의한 pH 측정 결과를 나타내고 있다. 본 연구에서 전술한 물뚫기 시험에 의한 pH 측정결과에 비해 물담그기 방법에 의한 pH가 0.5~1.0 정도 낮게 나타났으며, 미소성 재생시멘트, 소성 재생시멘트, 보통시멘트 순으로 pH가 낮게 나타났다. 이는 물뚫기 방법이 물담그기 방법에 비해 포러스 콘크리트 표면의 알칼리 성분의 용출을 촉진시켰기 때문으로 볼 수 있다. 또한 중성화된 포러스 콘크리트의 pH는 중성화 처리를 하지 않는 것에 비

해 보통 시멘트의 경우 18.6%, 미소성 재생시멘트의 경우 10.5%, 그리고 소성 재생시멘트의 경우에는 17.7%의 pH 저감효과를 나타냈다. 이와 같이 시멘트를 재생하여 결합재로 사용할 때, 자원을 재활용하는 측면과, pH를 저감시킬 수 있는 특수한 환경에서의 식생 콘크리트 제작 등에 사용가치를 들 수 있다.

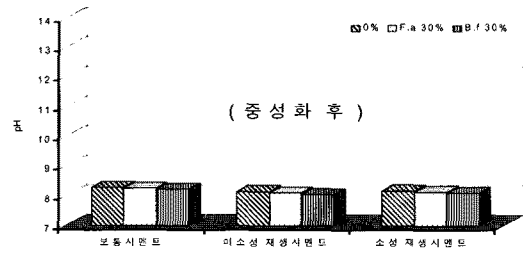
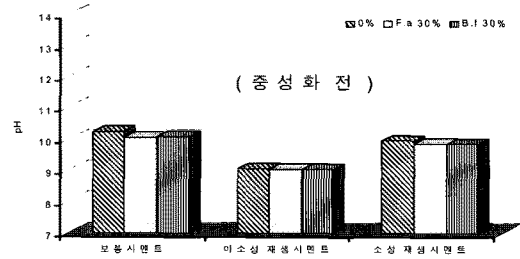


그림 12. 결합재에 따른 포러스 콘크리트의 중성화 전후의 pH (물담그기방법)

4. 결 론

pH 저감형 시멘트 콘크리트 배합에 관한 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 물시멘트비에 관계없이 보통시멘트에 고로슬래그를 10% 치환함에 따라 압축강도가 크게 증진 되었으며, 시멘트 페이스트 속에서 추출한 세공용액의 pH도 고로슬래그의 치환율이 증가 할수록 현격하게 감소되었다.
- 2) 폐시멘트 벽돌을 분쇄한 재생시멘트는 소성에 의해 압축강도가 크게 향상되었으며, 시멘트 페이스트 내부에서 추출한 세공용액의 pH는 미소성 재생시멘트를 사용하였을 경우와 비교하여 0.3~0.5 정도 크게 나타나 재생시멘트를 소성시키면 수화성이 회복되면서 수산화나트륨과 같은 알칼리 성분의 생성이 촉진된 것으로 판단할 수 있다.
- 3) 소성 재생시멘트에 보통시멘트를 30%까지 치환함에 따라 강도가 최대 4배 이상 크게 증진되었으며, 시멘트 페이스트 내부에서 추출한 세공용액에 대한 pH도 12.65~12.85 범위로 강알칼리성을 나타냈다.
- 4) 보통시멘트를 사용한 포러스 콘크리트의 물뚫기 방법에 의

한 pH 측정 결과, 포러스 콘크리트의 표면을 중성화시킴으로써 pH가 2.0~3.0 정도 크게 감소되어 8.95~10.39의 범위를 나타냈다.

- 5) 소성된 재생시멘트를 사용한 경우 중성화 처리를 하지 않은 포러스 콘크리트는 거의 보통시멘트와 같이 높은 pH를 나타냈으나, 중성화를 시킬 경우 pH를 22.7%~27.3% 정도 저감할 수 있었다.
- 6) 본 연구결과, 생물이 성장할 수 있는 최소조건인 pH 9 이하의 식생콘크리트를 제작할 수 있는 배합을 도출하였으나, 소성 재생시멘트에 보통시멘트를 30% 치환하고, 혼화재를 30%이하 혼입한 식생콘크리트 자체를 중성화 시키는 방법이 pH의 저감과 강도면에서 우수한 배합이었다.

참 고 문 헌

1. 박찬규, 정재홍, 식생을 위한 다공성 콘크리트의 pH 저감에 대한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 논문집, pp.1129~1134, 2001.11
2. 성찬용, 김영익, 벚짚재를 혼입한 다공성콘크리트 블록의 식생을 위한 공학적 특성, 콘크리트학회 논문집, 16권, 3호, pp.311~318, 2004
3. 소승영, 시멘트 경화체 중에서 염화물 이온의 거동에 관한 연구, 박사학위논문, 전북대학교, pp.35~39, 1995
4. 오상균, 폐콘크리트 미분말을 이용한 재생시멘트의 수화성 회복에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 구조계, 제18권 제10호, pp.53~60, 2002.10
5. 오상균, 홍영태, 정말분급방법을 이요한 폐콘크리트 미분의 고품질계 재생시멘트 개발, 대한건축학회논문집, 구조계, 제23권 제9호, pp. 167~174, 2007.9
6. 이승한, 김은겸, 환경친화콘크리트의 현황, 콘크리트 학회지, 12권 5호, pp.17~22, 2000
7. 이인석, 포러스 콘크리트의 양생방법에 따른 pH 저감에 관한 연구, 석사학위논문, 영남대학교, 2002
8. 이준우, 식생콘크리트의 pH 저감방법에 대한 실험적 연구, 석사학위논문, 영남대학교, 2002
9. Tritthart J., Chloride binding in cement I, Investigations to determine the composition of pore water in hardened cement, Cement and Concrete Research, Vol.19, No.4, pp.586~594, 1989
10. Diamond S., and Barneyback R. S., Expression and analysis of pore fluids from hardened cement pastes and mortars, Cement and Concrete Research, Vol.11, No.2, pp.279~286, 1981

(접수 2008. 6. 30, 심사 2008. 7. 31, 게재확정 2008. 8. 7)