

미분쇄한 플라이애시 모르타르의 강도증진 방안에 관한 연구

- 알칼리 자극제와 고온양생이 강도에 미치는 영향 -

An Experimental Study on Strength Development of Micro Grinding Fly-ash Mortar

- Effect of Alkali Activator and High Temperature Curing on the Compressive Strength of Concrete -

조 현대*

Cho, Hyun-Dae

정 재 동**

Jaung, Jae-Dong

Abstract

Fly ash has the advantages, among others, of improving the characteristics of concrete, reducing the price of concrete products, improving the durability, and reducing hydration heat. However, when added in mass, it leads to problems such as insufficient concrete intensity, increase of AE use, and others, resulting in a limitation of the use volume.

Therefore, this study is undertaken to solve the problems associated with the mass use of fly ash through the high concentration powder (4000~8000cm²/g) of fly ash, curing method, the addition of an alkali stimulation agent and others for the purpose of increasing the added value of the fly ash. The research showed that the intensity manifestation has an outstanding status, with the hydrates reaching a very stable condition if the rate of addition of a stimulation agent is appropriately used with the heightening of the fineness of the fly ash in the temperature range of 40°C, and if the applicable study is continued, it is likely to result ineffective value generation on the massive replacement of fly ash.

Keywords : Micro Grinding, Fly-Ash, Fineness, Na₂SO₄, Ca(OH)₂

1. 서 론

1.1 연구의 목적

최근 국내외에서는 저탄소 녹색성장 등을 통한 환경문제를 해결하기 위한 연구가 가장 큰 이슈가 되고 있으며, 그와 관련된 기술개발과 연구가 활발히 이루어지고 있다. 또한 녹색성장과 관련하여 국내에서도 환경문제 해결을 위한 재활용 기술개발의 연구가 다방면으로 진행되고 있다. 지금의 시대는 대량생산, 대량소비, 대량폐기의 시대에서부터 모든 분야에서 순환형 사회 형성을 향한 기술개발을 추진하지 않으면 안되는 상황이다. 그 중에서도 화력발전소에서 부산물로 발생하는 석탄재의 일부인 플라이애시는 폐기물 재활용에 따른 부가가치의 창출, 환경오염방지에 기여할 수 있으며 몇 십년 동안 콘크리트산업과 시멘트 제조시의 증량제, 시멘트 저감용 혼화제로서 많이 사용되고 있으며, 또한 콘크리트의 특성 개선, 콘크리트 제품의 가격 저감 및 내구성 개선, 수화열 감소 등의 이점 등으로 인하여 많이 사용되고 있다.

그러나, 이러한 이점에도 불구하고 플라이애시의 다량 첨가시 콘크리트의 강도부족 및 AE제 사용량의 증가 등의 문제로 그 이용이 제한되고 있다.

이에 본 연구에서는 산업부산물인 플라이애시의 고부가 가치적 활용을 목표로 플라이애시 다량 치환시 느린 포졸란 반응성을 활성화하여 조기강도 증진 가능성을 증대하기 위한 방안으로 고분말도화, 양생방법, 알칼리자극제의 첨가에 따른 강도발현의 검토 및 분석을 통하여 플라이애시의 대량 사용에 대한 문제점을 해결하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 절차

본 연구에서는 일반적으로 통용되는 3,500cm²/g 정도의 플라이애시의 분말도를 4,000~8,000cm²/g 정도로 높였을 경우의 강도 발현성 검토, 플라이애시 다량 첨가시 초기강도 저하 문제, 장기강도의 증진을 위해 포졸란 자극제로서 황산나트륨을 사용하여 증기양생을 통한 강도발현 경향을 분석하고 자극제의 첨가율 및 양생온도에 따른 초기 포졸란반응으로 인한 강도증진효과 및 물성에 대해 검토하고자 한다.

* 대구대학교 건축공학과 대학원, 박사과정

** 대구대학교 건축공학과 교수, 공학박사

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 실험은 미분쇄한 플라이애시를 다량 첨가한 시멘트 경화체의 강도 증진을 목적으로 실시되었으며, 포졸란 반응시의 알칼리 자극제의 첨가량 변화가 미치는 영향과 공장제품에의 적용을 목적으로 한 증기양생 등의 고온양생시 양생조건이 강도에 미치는 영향을 검토하고자 하였다.

이러한 실험은 플라이애시의 분쇄조건 및 시멘트의 입자 크기 이전의 실험과는 달라지므로 결과의 비교를 목적으로 <Test-1>에서는 표 1에 나타낸바와 같이 분말도 3수준, 자극제 첨가량 2수준, 플라이애시 치환율 5수준 및 양생조건 1수준으로 예비적 검토를 실시하였다.

또한 <Test-2>에서는 표 2에 나타낸바와 같이 자극제 첨가량 변화와 고온양생조건에 따른 강도증진효과를 파악하기 위해 분말도 3수준, 자극제 첨가량 5수준, 플라이애시 치환율 4수준 및 양생조건 3수준의 실험을 실시하였다.

표 1. 공시체의 배합조건 <Test-1>

| 요인 | 조건 | 기호 |
|--|---|---------------------|
| 분말도 | 4000, 5000, 6000 cm^2/g | B4000, B5000, B6000 |
| 자극제 첨가량 (Na ₂ SO ₄) | 0% (일반수도수) 5% 수용액 | - |
| 플라이애시 | 0, 20, 40, 60, 80% | - |
| 양생온도 | 증기양생 후 표준수중양생 | - |
| 기본배합 | w : c : s = 0, 485 : 1 : 2.45 | |

표 2. 공시체의 배합조건 <Test-2>

| 요인 | 조건 | 기호 |
|--|---|------------------|
| 분말도 | 3500, 6500, 8000 cm^2/g | B3, B6, B8 |
| 자극제 첨가량 (Na ₂ SO ₄) | 0, 3, 5, 7, 10% 수용액 | S3, S5, S7, S10 |
| 플라이애시 | 0, 40, 60, 80% | P, F40, F60, F80 |
| 양생온도 | 고온양생 후 표준수중양생 | T20, T40, T60 |
| 기본배합 | w : c : s = 0, 485 : 1 : 2.45 | |

2.2 사용재료

본 실험에서 사용된 시멘트는 국내 S사의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 플라이애시는 경남 하동 플라이애시를 사용하였으며, 본 연구가 장기에 걸쳐 진행되는 관계로 실험계획에 따라 동일 제품을 2회에 걸쳐 재료를 반입하였으며, 그 물리적 성질은 표 3과 표 4에 나타내었다.

각 재료의 상태는 잔골재는 주문진산 표준사를 기건상태로 사용하였고, 플라이애시는 불밀을 사용하여 분쇄를 하였으며, 분쇄량은 2kg으로 소정의 크고 작은 불을 조합하여 분쇄한 후 대표시료를 채취하여 블레인 분말도 시험을 의뢰하였으며, 그 분말도 측정치는 표 5에 나타낸 바와 같다. 그리고 불밀의 분쇄시간에 따른 분말도를 시험한 결과 분쇄된 플라이애시의 분말도는 직선적으로 증가하였으며, 9시간에 6,747 cm^2/g , 15시간 경과시 분말도가 7,944 cm^2/g 을 얻을 수 있었고 이를 통하여 그림 1에 나타낸 바와 같이 불밀을 통한 분쇄시간과 분말도와의 관계를 나타낼 수 있었다.

또한 분쇄된 플라이애시의 입자형상에 대한 SEM촬영 결과를 그림 2에 나타내었으며, 불밀분쇄에 따른 분말도가 높아짐에 따라 구형의 입자형상이 깨어져 입자가 미세해짐을 알 수 있다. 또한 입도가 높아짐에 따라 표면이 다소 거친 입자의 형상을 나타내었다.

표 3. 시멘트의 물리적 성질

| No | 밀도 | 분말도 (cm^2/g) | 응결시간 | | 압축강도(MPa) | | | 안정도 (%) |
|----|------|--------------------------------|--------|--------|-----------|------|------|---------|
| | | | 초결 (분) | 종결 (분) | 3일 | 7일 | 28일 | |
| 1 | 3.15 | 3,450 | 209 | 340 | 21.0 | 28.3 | 37.6 | 0.24 |
| 2 | 3.14 | 3,262 | 210 | 330 | 25.1 | 31.2 | 40.1 | 0.09 |

표 4. 플라이애시의 물리·화학적 성질

| No | 밀도 | 분말도 (cm^2/g) | 단위 수량비 (%) | 압축강도비 (%) 28일 | 이산화 규소 (%) | 수분 (%) | 감열 감량 (%) |
|----|------|--------------------------------|------------|---------------|------------|--------|-----------|
| 1 | 2.20 | 3,650 | 95 | 96 | 51.0 | 0.1 | 3.7 |
| 2 | 2.22 | 3,722 | 100 | 95 | 49.3 | 0.2 | 3.1 |

표 5. 분쇄한 플라이애시 시료의 분말도

| 표시 분말도 (cm^2/g) | Test-1 | | | Test-2 | | |
|--------------------------------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | 4,000 | 5,000 | 6,000 | 3,500 | 6,500 | 8,000 |
| Blain 측정치 (cm^2/g) | 4,234 | 5,106 | 6,300 | 3,396 | 6,747 | 7,944 |

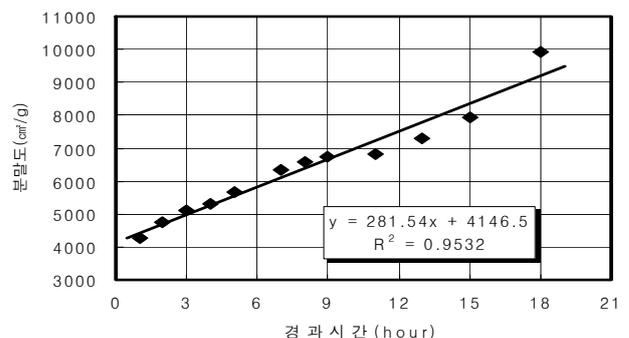
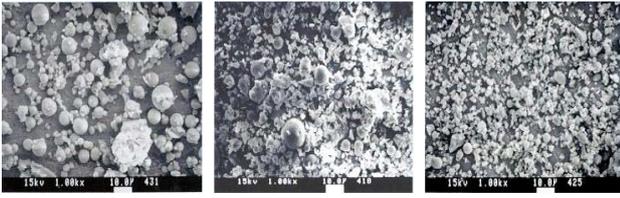


그림 1. 플라이애시의 분쇄시간과 분말도와의 관계



(a) 분말도 3500g/cm² (b) 분말도 6500g/cm² (c) 분말도 8000g/cm²

그림 2. 플라이애시의 입자형상(1,200배)

2.3 실험방법

본 실험에 사용된 미분쇄 플라이애시 모르타르의 강도발현특성을 알아보기 위하여 모르타르 공시체를 사용하였다.

실험에 사용된 배합은 KS L 5105(수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험 방법)에 준하여 시멘트 : 모래 : 물의 비율은 1 : 2.45 : 0.485로 하였다.

그리고 <Test-1>은 플라이애시 다량 첨가시 분말도별 자극제의 강도기여 효과를 검토하기 위한 연구로서 플라이애시를 시멘트에 대한 중량비로 20, 40, 60, 80%로 치환하였으며, 자극제 첨가율은 5% 수용액을 혼합수로 사용하여 일반수도수와 비교하였다.

<Test-2>는 플라이애시 다량 첨가시 분말도별 자극제의 첨가율에 따른 강도기여 효과를 검토하기 위한 예비적 연구로서 플라이애시를 중량비로 40, 60, 80%로 치환하였으며 배합수로는 일반수도수와 자극제 첨가율 3~10% 수용액으로 하여 수중양생 및 열수양생을 실시하였다.

각 재령별 압축강도 시험은 증기양생은 1, 3, 7, 14, 28일 실시하였으며, 수중양생은 재령 3, 7, 28, 56일에 실시하였다. 또한 열수양생은 3, 7, 28일에 실시하였으며, 수산화칼슘의 결합수 정도를 파악하기 위해 플라이애시 분말도 8,000cm²/g에 플라이애시 치환율 40%를 기준으로 각 재령별로 아세톤에 침지하여 수화를 정지시킨 후 DSC(시차열중량)분석을 실시하였다.

2.4 양생방법

<Test-1> 미분쇄 플라이애시의 포졸란반응 활성을 위해 증기양생을 실시하였으며, 양생방법으로는 몰드제작 후 20℃로 전치시간을 6시간 두었고, 시간당 17℃로 온도상승 후, 6시간 동안 70℃로 증기양생 후 표준수중양생을 실시하였다.

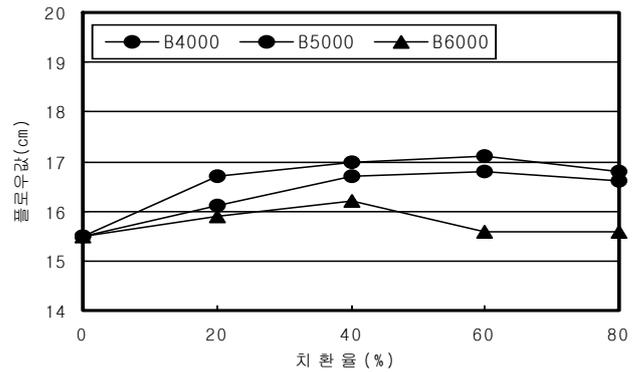
<Test-2> 자극제 첨가율 및 양생온도에 따른 포졸란반응 활성에 미치는 영향에 관한 실험으로 양생온도는 표준수중양생(20±2℃)을 실시하였으며, 열수양생으로는 공시체 제작 후 1일의 전치시간을 두고 시간당 17℃의 온도상승 후, 6시간 동안 40, 60℃로 열수양생을 실시한 후 표준수중양생을 하였다.

3. 실험결과의 분석 및 고찰

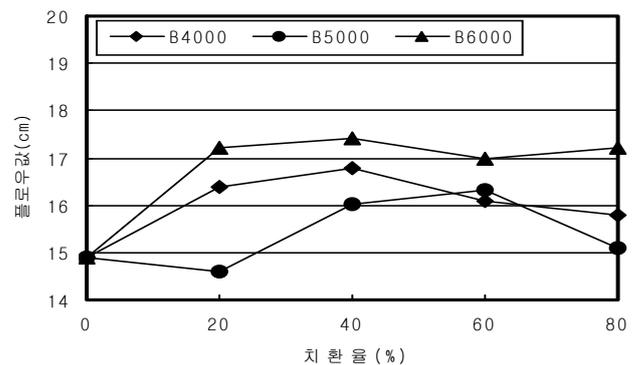
3.1 증기양생에 따른 재령별 강도발현특성

3.1.1 자극제 첨가유무에 따른 플로우값에 미치는 영향

그림 3은 분말도의 변화 및 자극제의 첨가유무에 따른 플로우 시험결과를 나타낸 결과로서 일반수도수를 사용하여 플라이애시의 혼입률을 증가하였을 경우 플로우값은 상승하나 60%이상 치환시에는 다소 감소하는 경향을 보이며, 또한 분말도가 증가할수록 유동성이 저하되는 것으로 나타났다. 이는 플라이애시의 분쇄로 인한 분말도의 입도에 기인한 영향으로 판단된다. 이에 반해 자극제 5% 첨가시 플라이애시 혼입률에 따른 플로우 시험결과를 보면, 분말도 6000cm²/g의 경우 플라이 애시 치환율이 플레인보다 2.5cm 이상 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 입도가 작을수록 알칼리자극제가 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있으며, 이로 인하여 슬럼프값의 증가를 도모한 것으로 사료된다.



a) 일반수도수 사용



b) Na₂SO₄ 5% 수용액 사용

그림 3. 분말도 변화 및 자극제 첨가에 따른 유동성 변화

3.1.2 재령별 강도발현

그림 4는 자극제의 첨가시 플라이애시 치환율에 따른 각 재령별 강도발현특성을 나타낸 것이다.

그림 4의 (a), (b)는 플라이애시 치환율 20%, 40%의 경우로서 자극제 첨가한 공시체는 다소 초기재령에 완만한 경향을 보이나, 재령 14일 이후부터는 일반적인 수화경향을 보이며 증가하였다. 자극제를 무첨가한 공시체는 분말도가 높을수록 높은 강도를 보이면서 지속적인 강도발현의 경향을 보이고 있다. 이는 증기양생에 의한 초기 수화활성의 영향으로 자극제 영향은 다소 낮은 것으로 여겨진다.

그림 4의 (c)는 플라이애시 치환율 60%의 결과로서, 분말도가 낮은 4000 cm^2/g 은 초기재령은 다소 높은 경향을 보이나 재령이 증가할수록 자극제 무첨가 보다 낮아지는 경향을 보였으며, 그림 (d)는 플라이애시 80%를 치환한 경우로 자극제를 첨가한 공시체의 분말도 6,000 cm^2/g 의 경우 초기재령부터 무첨가에 비해 높은 강도발현을 보였으며, 재령 28일에는 압축강도 23.2MPa를 나타내어 일반적으로 통용되는 시멘트 제품에 활용가능성이 보여, 플라이애시 다량 치환에 따른 자극제와 양생온도의 상관관계에 따른 플라이애시의 포졸란반응 기여정도에 대한 지속적인 연구가 진행된다면 효율적인 활용이 가능할 것으로 판단된다.

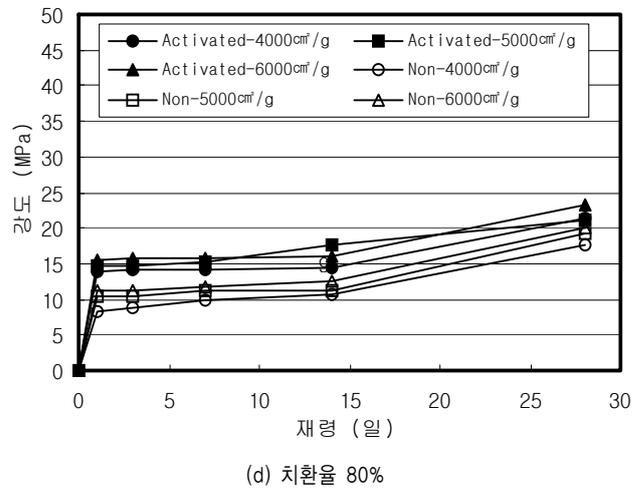
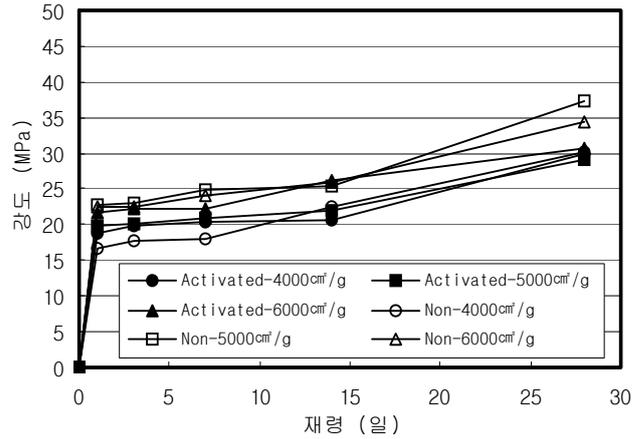
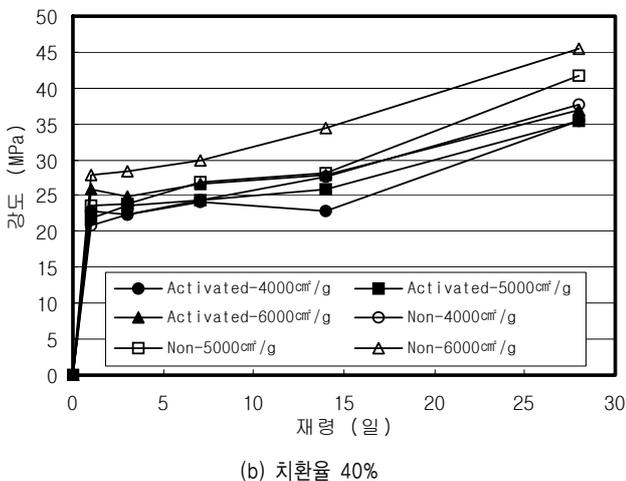
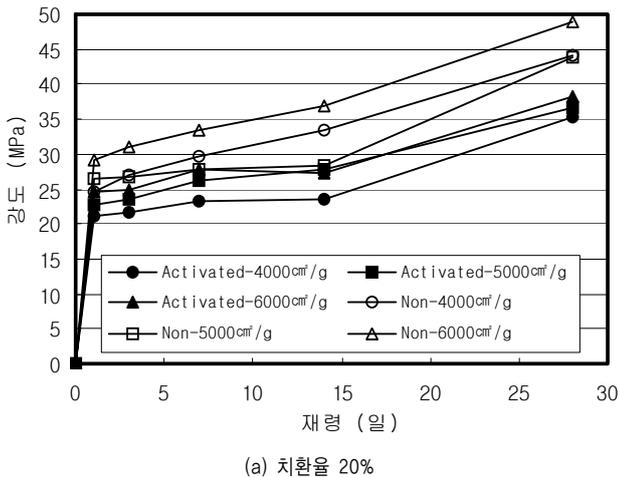
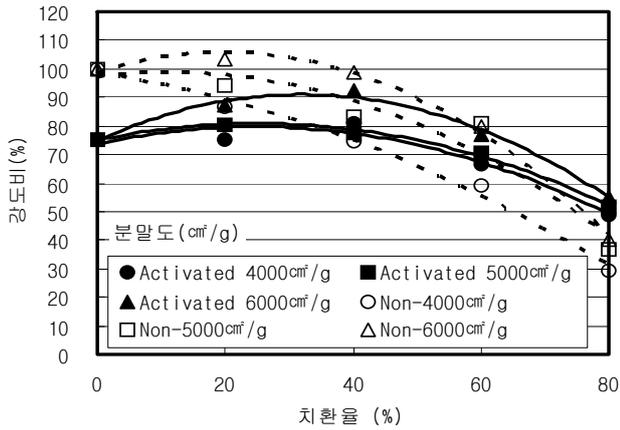


그림 4. 분말도, 치환율별 압축강도(증기양생)

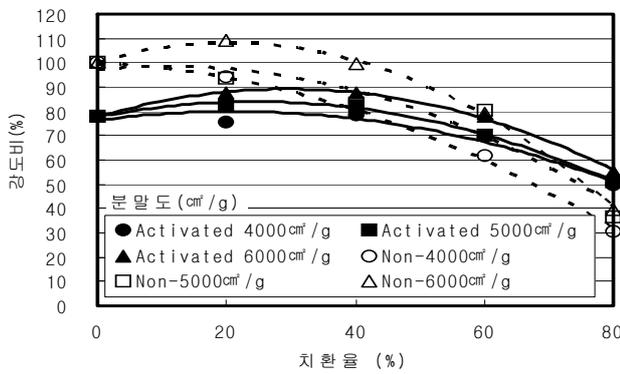
3.1.3 각 재령별 플레인 대비 강도비

그림 5의 a)~d)는 증기양생에 따른 각 재령별 강도발현율을 나타낸 결과이다. 그림 5의 a), b)는 재령 1, 3일의 강도비로서 분말도가 낮은 4,000 cm^2/g 은 플라이애시 치환율 40%이상부터 자극제 무첨가에 비해 높은 강도발현율을 보이고 있으며, 분말도 5,000, 6,000 cm^2/g 은 플라이애시 80%치환시에만 자극제의 첨가에 따라 재령 7일에 무첨가보다 19.2, 14.4, 15.8% 강도증진을 보였다. 그러나 그림 c), d)는 7, 28일의 결과로서 재령이 경과하면서 증기양생에 의해 포졸란 반응이 활성화되어 자극제를 첨가한 공시체 보다 다소 높은 강도비를 나타내고 있다.

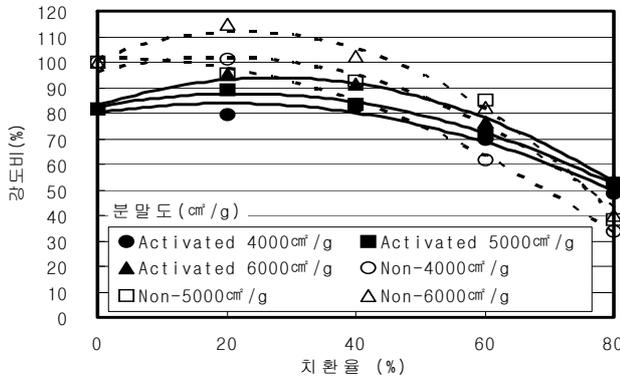
그러나 플라이애시 치환율 80%는 자극제의 첨가에 따라 강도비는 자극제 무첨가에 비해 분말도 4,000, 5,000, 6,000 cm^2/g 각각 8.3, 3.8, 7.2% 정도 높은 결과를 보였다. 이는 분말도가 낮을수록 자극제의 효과는 크게 나타나며, 분말도가 높을수록 포졸란반응의 활성화도가 높아져 자극제의 효과는 낮은 것으로 여겨진다.



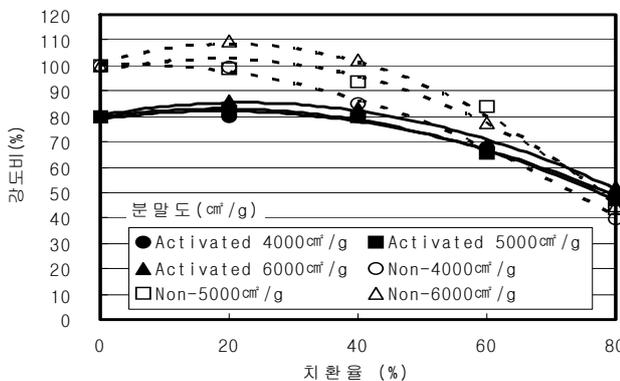
(a) 재령 1일



(b) 재령 3일



(c) 재령 7일



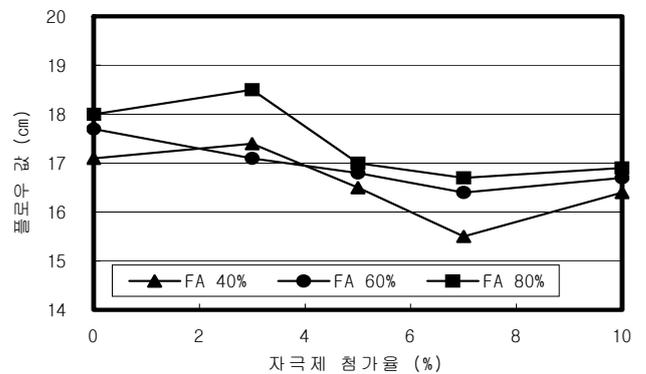
(d) 재령 28일

그림 5. 플레인 대비 재령별 압축강도비(증기양생)

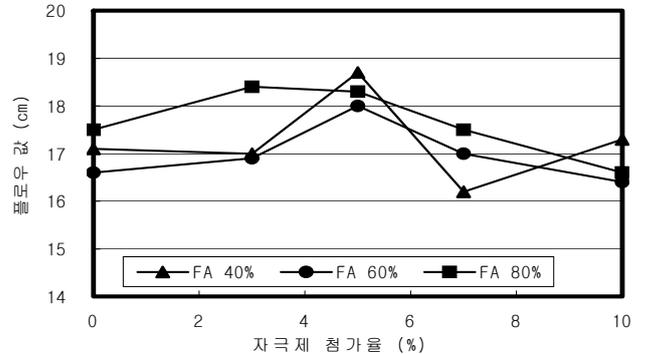
3.2 양생온도에 따른 강도발현특성

3.2.1 자극제 첨가율에 따른 플로우값에 미치는 영향

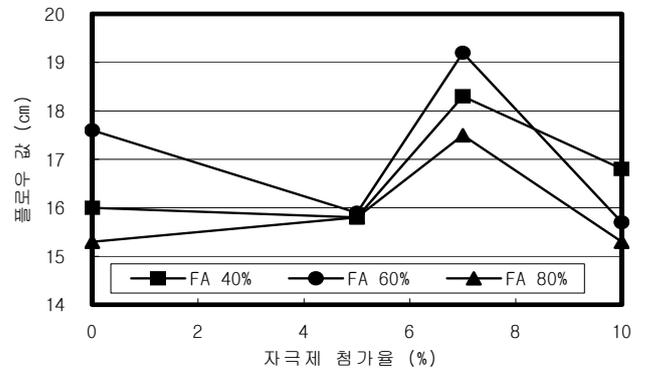
그림 6은 각 분말도별 자극제 첨가율의 증가에 따른 플로우 시험결과를 나타낸 것으로써 플라이애시 치환율이 증가할수록 다소 플로우값은 증가하였으며, 자극제의 첨가에 따라 분말도 3500cm²/g에서는 3%, 6,500cm²/g에서는 5%, 8000cm²/g은 7%에서 다소 증가하였으나 그 이상의 경우는 현저히 감소하였다. 이는 알칼리 농도에 의해 유동성에 영향을 미쳤으며, 과다 첨가시에는 초기 응결을 유발해 유동성이 감소되는 것으로 사료된다. 특히 분말도가 높을수록 알칼리 자극제의 영향은 크게 나타났다.



(a) 분말도 3500cm²/g



(b) 분말도 6500cm²/g



(c) 분말도 8000 cm²/g

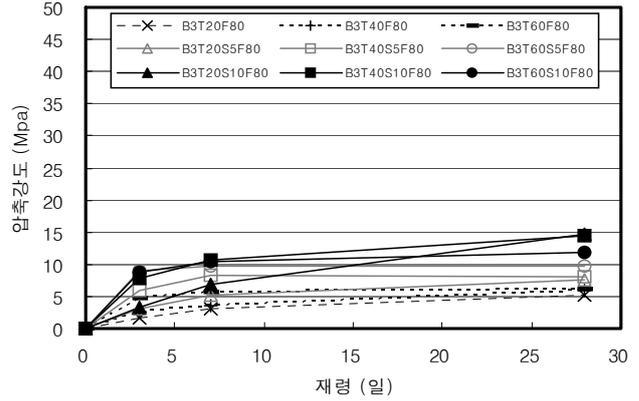
그림 6. 자극제 첨가율의 증가에 따른 유동성 변화

3.2.2 자극제 첨가율에 따른 강도발현특성

그림 7은 플라이애시 분말도 3,500cm²/g에 자극제 첨가에 따른 재령별 강도발현정도를 나타내는 결과로서 그림 6의 (a)는 플라이애시 치환율 40%의 경우로서 초기 양생온도가 증가할수록 자극제의 영향은 아주 적은 경향을 보이고 있으며, 양생온도 60℃의 경우를 보면 재령3일에서 최고강도 발현을 보이고 있으나 그 이후에는 강도증진은 거의 없는 것으로 보인다.

또한 양생온도 40℃의 경우는 자극제를 첨가한 경우가 초기재령에서 무첨가보다 우수하며 재령28일에서는 양생온도 40℃인 플라이애시가 가장 강도발현이 우수하나 일반수중양생에 자극제 5%첨가와 유사한 강도를 나타내고 있다. 이는 자극제에 의한 강도발현 및 양생온도의 상승이 강도발현에 지배적이라는 것을 의미한다.

그림 7의 (b)는 플라이애시 치환율 60%의 경우로서 양생온도가 높을수록 초기재령에 급격한 강도발현이 있는 반면 재령7일 이후에는 강도증진이 저조하며, 40℃의 경우는 자극제의 첨가는 초기재령에는 무첨가보다 강도발현이 우수하고 재령28일에서는 무첨가와 비슷한 경향을 보인다.



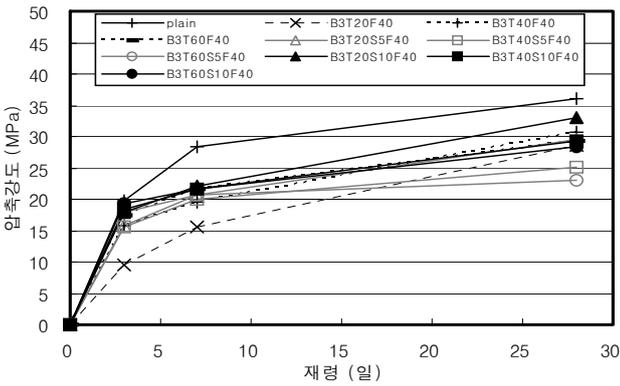
(c) 치환율 80%

그림 7. 자극제 첨가에 따른 강도발현(분말도 3500cm²/g)

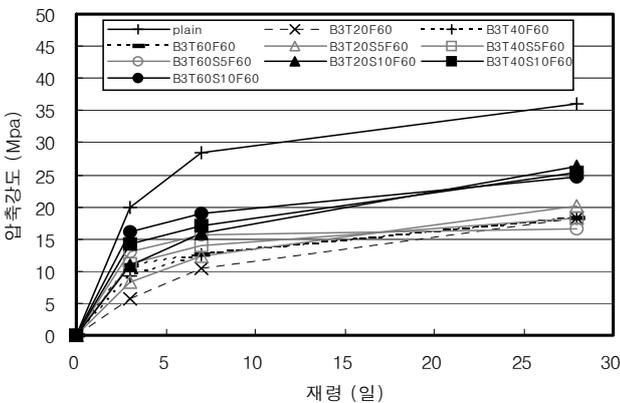
그림 8은 분말도 6,500cm²/g에 대한 자극제의 첨가에 따른 강도변화를 나타낸 결과이다. 그림 8의 (a)는 플라이애시 치환율 40%로 재령3일에서는 양생온도가 높고 자극제 첨가의 경우가 가장 높은 강도발현을 보이는 반면, 자극제를 첨가하여 양생온도를 높이면 40℃로 양생된 공시체는 조금 증가하는 경향을 보이나 60℃로 양생된 것은 재령7일 이후 강도증진은 보이지 않았다. 이는 초기재령에서 포졸란반응으로 인한 강도증진이 온도상승에 대한 자극제의 영향은 오히려 역효과가 나타나 자극제 무첨가의 경우 강도발현이 더 우수한 경향으로 나타났다.

그러나 그림 8의 (a)에 나타난 바와 같이 자극제의 첨가율을 높이면 초기재령에 급격한 강도증진이 일어났으며, 자극제의 첨가율 10%로 높이고 양생온도를 60℃로 높이면 재령3일에 압축강도 27MPa로 가장 높게 나타나는 반면 재령7일에는 40℃로 양생한 공시체가 압축강도 29.4MPa로 높았으며, 재령28일에서는 표준수중양생 및 40, 60℃로 양생된 공시체와 비슷한 경향을 보였다. 이는 양생온도에 따라 초기 포졸란 반응이 일어났으며, 수화에 의해 생성된 Ca(OH)₂을 재령이 지남에 따라 지속적으로 포졸란 반응이 활성화하여 치밀한 구조로 변화되었을 것으로 보인다.

그림 8의 (b)는 플라이애시 60%치환의 경우로서 플라이애시 양이 증가됨에 따라 Ca(OH)₂의 생성이 작아 강도증진이 다소 느린 경향을 보이고 있으나, 자극제의 첨가에 따라 초기재령에 급격히 일어나 재령7일 이후에는 자극제 첨가한 공시체는 거의 강도증진 효과가 없으며, 초기재령 3일에서 자극제 10%첨가의 경우를 보면 양생온도 20, 40, 60℃의 경우 각각 압축강도 18.2, 17.7, 25.5MPa로 자극제 무첨가보다 12.3, 7.1, 8.8MPa 증가한 결과를 보인다. 이는 자극제의 첨가에 따른 초기 포졸란 반응 및 수화의 촉진으로 생성된 CSH수화물 및 다량의 에트링가이트 생성으로 인하여 조직의 치밀해진 결과라 생각된다.



(a) 치환율 40%



(b) 치환율 60%

양생온도가 낮을수록 자극제 10% 첨가시 플라이애시의 잠재수 경성을 자극시켜 지속적인 포졸란반응을 활성화하여 더욱 밀실하게 되어 재령28일에서는 일반수중양생이 33.7MPa의 강도로 플레인의 93.4%에 상당하는 강도발현이 나타났다.

그림 8의 (c)는 플라이애시 치환율 80%에 대한 자극제 및 양생온도에 따른 재령별 강도발현특성을 나타낸 결과로서 알칼리 자극제의 영향으로 인하여 잠재수경성인 플라이애시의 포졸란반응을 조기에 활성화하여 자극제 5% 첨가시 양생온도와 자극제의 첨가율에 따라 초기재령의 강도증진은 뚜렷하게 나타나며, 재령7일 이후의 강도증진은 거의 변화가 없으며, 재령28일에서는 자극제의 첨가시 무첨가보다는 높은 강도결과가 나타났으나, 자극제의 첨가에 따른 양생온도에 의한 강도차이는 거의 없었다.

또한 자극제의 첨가에 따른 강도발현율을 보면 초기재령에서는 다소 강도증진의 차이는 있으나, 자극제 첨가율 5%의 경우 자극제를 첨가한 모든 공시체가 재령28일에서 압축강도 15.5MPa 전후를 보이는 반면 10% 첨가시에는 평균 압축강도 20MPa 정도로 보여 이는 자극제 5%첨가시 보다 플라이애시의 잠재결합특성이 뛰어나 강도증진의 가능성을 제시하고 있다.

그림 9는 플라이애시 분말도를 8,000 cm^2/g 으로 높여 플라이애시 치환율을 40, 60, 80%로 다량 사용시 자극제 첨가율 10% 및 양생온도(20, 40, 60 $^{\circ}\text{C}$)가 강도증진에 미치는 영향을 나타내었다. 그림 8의 (a)는 플라이애시 치환율 40%의 결과로서 자극제 무첨가의 경우 분말도에 의한 영향으로 포졸란 활성이 일어나 양생온도를 40, 60 $^{\circ}\text{C}$ 로 높여도 분말도에 의한 강도증진 현상으로 양생온도의 증진에 따른 강도증가는 크게 나타나지 않으나 양생온도를 60 $^{\circ}\text{C}$ 이상 높이면 높은 강도발현의 가능성이 보이며 재령 28일에서의 강도발현은 분말도가 높은 경우는 양생온도가 낮은 경우가 높은 강도발현이 일어남을 알 수 있다.

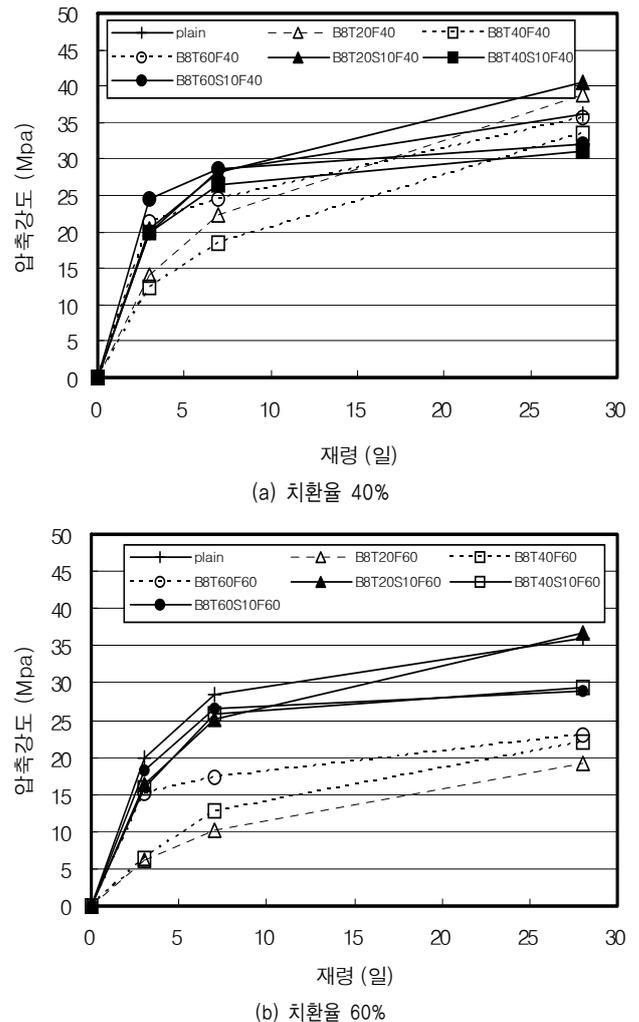
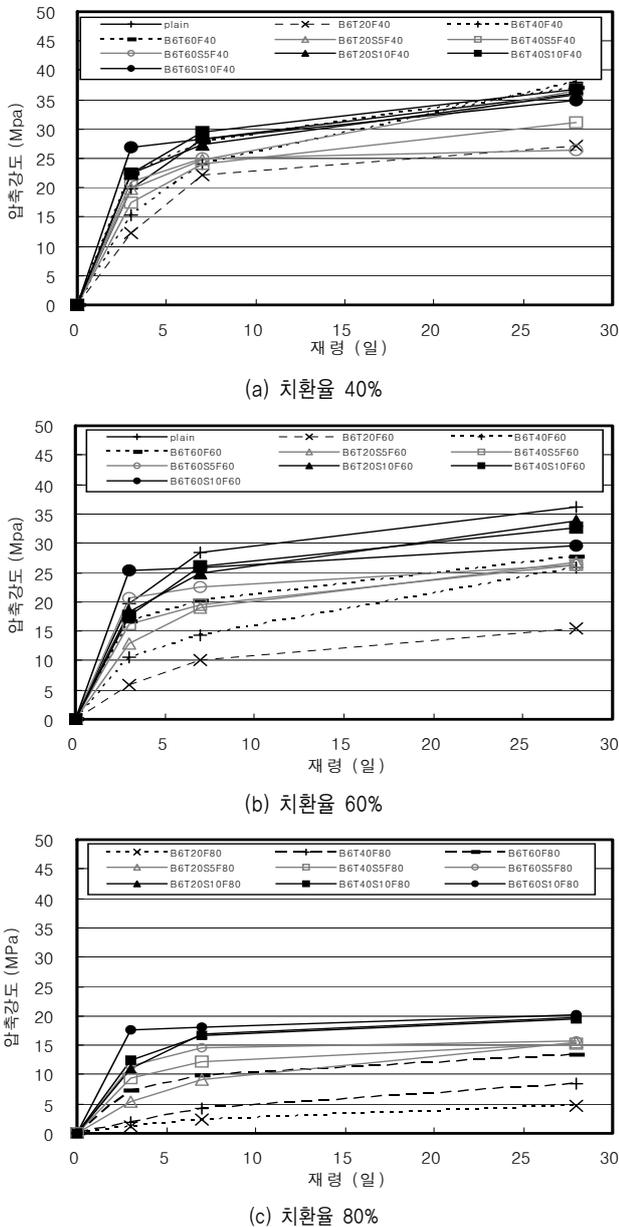


그림 8. 자극제 첨가에 따른 강도발현(분말도 6500 cm^2/g)

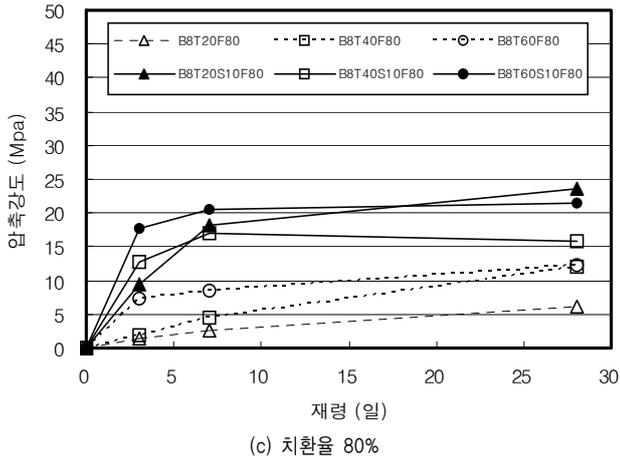


그림 9. 자극제 첨가에 따른 강도발현(분말도 8000 $\mu\text{m}^2/\text{g}$)

그러나 자극제의 첨가로 인한 강도증진 효과는 초기에는 증가하는 경향이 보이나 재령이 증가할수록 자극제가 미치는 영향은 줄어드는 것으로 나타나 강도증진에 미치는 영향은 분말도에 의한 플라이애시의 포졸란 반응이 더욱 우세한 것으로 판단되며 재령 28일 수중양생에서의 자극제의 첨가 유무에 따른 강도발현은 큰 차이가 없이 지속적으로 강도증가가 나타나 플레인과 비슷한 강도결과를 보였다.

이는 플라이애시의 포졸란 반응성을 활성화시키는 방안으로 양생온도에 의한 방법, 자극제의 첨가에 의한 방법, 분말도에 의한 영향 등에 따른 상호복합적인 관계에 있어 면밀히 고려할 필요가 있을 것으로 사료된다.

그림 9의 (b)는 플라이애시 치환율 60%에 대한 결과로 자극제 무첨가의 경우 양생온도의 증가에 따라 초기에 강도증진이 일어났으나, 분말도로 반응성을 높이고 양생온도를 올렸으나, 초기재령 7일에서 압축강도 17.4MPa를 보였으나 이후의 강도증진은 미비하게 나타났다. 자극제의 첨가시에는 분말도가 높아진 영향으로 자극제의 반응성은 더욱 높아져 양생온도가 낮은 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 초기재령 7일에 26.5MPa를 보였으며, 재령28일에서는 플레인과 동등한 강도발현을 보였다. 또한 자극제의 첨가시 양생온도의 증가는 크게 영향을 미치지 않았다.

그림 9의 (c)는 플라이애시를 80%로 치환한 결과이며, 초기재령 3일에서는 양생온도 60 $^{\circ}\text{C}$ 에 자극제를 첨가한 경우가 가장 높은 강도발현을 보이는 반면 재령이 증가할수록 수중양생의 경우가 우세함을 나타내었다.

이는 분말도가 높아짐에 따라 자극제가 플라이애시의 반응성을 더욱 촉진시킨 결과라 여겨지며, 양생온도를 높여 자극제를 첨가시에는 과도한 플라이애시의 포졸란반응 및 수화물의 생성에 의해 조직이 다소 엉성하게 되어 장기적으로 강도발현에 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

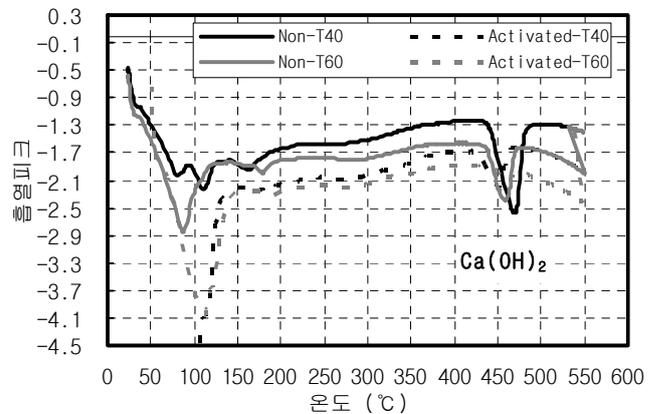
3.3 Ca(OH)₂의 분석

그림 10은 미분쇄된 플라이애시 분말도 8000 $\mu\text{m}^2/\text{g}$ 으로 플라이애시 치환율 40%에 자극제 첨가율 10%에 따른 재령별 양생온도에 따른 수산화칼슘의 소비정도를 DSC 의해 분석한 결과이다.

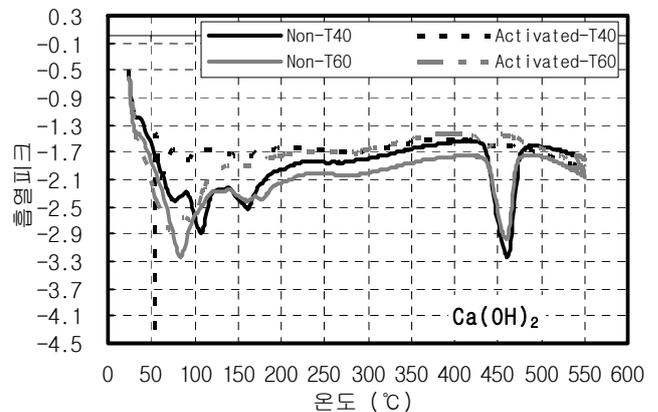
Ca(OH)₂의 흡열피크는 450 $^{\circ}\text{C}$ 부근에서 나타나고 있으며, 그림 9의 (a)는 재령 3일의 결과로서 초기수화에 의해 생성된 수화물의 피크는 자극제의 첨가시 크게 나타나고 있으며 이는 초기강도를 지배한 것으로 보여진다.

또한 Ca(OH)₂은 흡열피크의 크기를 보면 자극제 첨가에 따라 흡열피크의 감소가 드러나 보이며, 재령이 증가함에 따라 자극제의 무첨가의 경우는 Ca(OH)₂는 높은 피크를 보이는 반면 자극제를 첨가한 경우 Ca(OH)₂의 흡열피크는 지속적으로 낮은 피크를 보이고 있다. 이는 자극제에 의한 포졸란 반응에 의해 소멸되는 현상이라 사료된다.

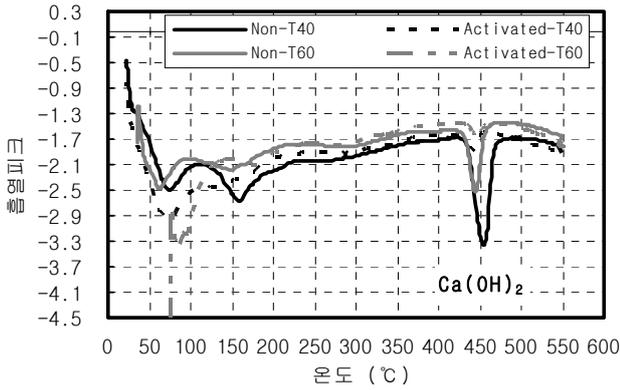
또한 그림 10의 (b), (c)를 보면 재령7일에서 자극제 무첨가의 경우 수화에 의해 생성된 Ca(OH)₂의 피크는 양생온도 40, 60 $^{\circ}\text{C}$ 에서 각각 비슷한 경향을 보이나 재령28일에서는 양생온도가 높은 60 $^{\circ}\text{C}$ 의 공시체가 감소하는 경향을 보이며, 이는 플라이애시의 포졸란반응이 양생온도 및 분말도에 의해 활성화된 것으로 사료된다.



(a) 재령 3일



(b) 재령 7일



(c) 재령 28일

그림 10. 수산화칼슘정량분석(DSC결과)

4. 결론

본 연구는 산업부산물인 플라이애시를 시멘트, 콘크리트 제품으로 대량 사용을 목표로 플라이애시의 포졸란반응성을 활성화시키는 방안으로 고분말도화, 양생방법, 알칼리자극제의 첨가율 등에 따른 강도증진 및 물성변화를 시험하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 증기양생에 따른 포졸란반응 활성화에 의한 강도발현은 분말도가 높을수록 우수하였으나, 자극제의 첨가에 따른 강도발현은 플라이애시 치환율 80%이상 시 가장 효과적으로 나타났다.
- 2) 양생온도가 높으면 초기에 플라이애시의 포졸란반응의 활성이 일어나 다량의 $Ca(OH)_2$ 의 소비로 인해 초기강도는 우수하나 장기재령에서는 강도발현이 다소 떨어지는 경향을 보였다.
- 3) 양생온도가 높을수록 수화가 빨리 일어나 초기재령에서 $Ca(OH)_2$ 가 많이 생성되며, 자극제를 첨가함에 따라 초기재령부터 포졸란 반응이 활성화하여 $Ca(OH)_2$ 의 소비(반응량)가 크게 됨을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 플라이애시의 분말도를 높여 양생온도 40℃전후로 하여 자극제 첨가율을 적정하게 사용할 경우 수화물이 안정한 상태로 되어 강도발현이 우수함을 알 수 있었다. 또한 향후 양생온도, 수산화칼슘, 물결합제비, 분말도 등의 요인에 대한 연구가 진행된다면 플라이애시의 다량치환에 대한 효과적 가치 창출이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2009학년도 대구대학교 학술연구비지원에 의한 논문임

참 고 문 헌

1. 배수환, 최광윤, 정재동, 자극제 사용 미분쇄 플라이애시 모르타르의 강도증진에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표논문집, 제23권 제1호, pp.223~226, 2003,4
2. 이동하, 공민호, 박선길, 백민수, 이영도, 정상진, 플라이애시를 다량 치환한 콘크리트의 초기 특성에 관한 실험적연구, 대한건축학회 학술발표논문집, 제21권 제2호, pp.347~350, 2001,10
3. 정철우, 김영수, High-Volume 플라이애시 콘크리트의 동결융해저항성에 관한 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 제16권 제3호, pp.61~68, 2000,3
4. 田代忠一, 飯塚信之, 西 武志, “微粉砕 フライアッシュの可能性”, セメント・コンクリート No.598, 1996,12
5. Qian Jueshi, Shi Caijun, Wang Zang Zhi, Activation of blended cements containing fly ash, Cement and Concrete Research 3, pp.1121~1127, 2001

(접수 2009.10.6, 심사 2009.11.23, 게재확정 2009.12.28)

요 약

플라이애시는 콘크리트의 특성 개선, 콘크리트 제품의 가격 저감 및 내구성 개선, 수화열 감소 등의 이점이 있으나 다량 첨가 시 콘크리트의 강도 부족 및 AE제 사용량의 증가 등으로 인하여 그 사용량이 제한되고 있다. 이에 본 연구에서는 플라이애시의 고부가 가치적 활용을 목적으로 플라이애시의 고분말도화(4000~8000 cm^2/g), 양생방법, 알칼리자극제의 첨가 등을 통하여 플라이애시의 대량 사용에 대한 문제점을 해결하고자 하였으며, 연구결과 플라이애시의 분말도를 높여 양생온도 40℃전후로 하여 자극제 첨가율을 적정하게 사용할 경우 수화물이 안정한 상태로 되어 강도발현이 아주 우수하게 나타나, 이에 대한 연구가 지속될 경우 플라이애시의 다량치환에 대한 효과적 가치 창출이 가능할 것으로 사료된다.

키워드 : 미분쇄, 플라이애시, 분말도, 황산나트륨, 수산화칼슘