

# 콘크리트용 混和材로서 국산 플라이애쉬의 사용에 대한 一考

文 翰 英 (漢陽大學校 工科大學 土木工學科 教授)

徐 政 佑 (漢陽大學校 工科大學 材料研究室 工學博士)

## 1. 머리말

플라이애쉬는 微粉炭 연소보일러로부터 배출되는 용융가스에 포함된 재의 微粒子를 集塵機로 채취한 것<sup>(1)</sup>으로 약 2000년전 로마시대로부터 석회와 함께 혼합하여 모르타나 콘크리트를 제조하는 데 사용하였던 천연포졸란과 유사한 성질을 가지고 있으며 1930년대 이후 콘크리트용 混和材 및 混合시멘트의 원료로서 널리 이용되어 왔다. 근년에 와서 플라이애쉬는 시멘트의 절감이라는 경제성 뿐만 아니라 콘크리트 성질 중 워커빌리티의 개선, 水和熱의 완화, 長期強度의 증진, 耐藥品性的의 向上, 건조수축의 저감 및 알칼리-골재반응의 방지에 유효하므로 콘크리트의 성질을 개선하기 위한 목적으로 널리 사용되고 있다. 그런데 종래에 사용된 플라이애쉬의 대부분은 무연탄 및 유연탄을 연료로 사용하여 발생한 부산물 또는 재로써 그 자체는 거의 水硬性이 없으며 시멘트의 수화과정에서 생성된 수산화칼슘과 반응하므로써 콘크리트의 장기강도 증진에 기여하였으나, 1973년 유류파동 이후 갈탄 또는 亞有煙炭이 사용되므로써 높은 칼슘성분을 포함한 水硬性을 가진 플라이

애쉬도 콘크리트용 혼화재로 사용 가능하게 되었다. ASTM C 618에서는 칼슘성분의 함유량이 낮은 종래의 플라이애쉬를 Class F로 칼슘함유량이 높은 플라이애쉬를 Class C로 분류하고 있다. 현재 우리나라의 화력발전소에서 사용하고 있는 석탄은 수입 유연탄과 국내에서 생산된 무연탄으로써 연간 발생량은 1981년의 70만톤 정도에서 1987년에는 141만톤으로 해마다 증가하는 추세에 있으나 이들 무연탄으로부터 발생한 플라이애쉬는 자체적으로는 水硬性이 없는 종류에 속한다.

본 원고에서는 국산플라이애쉬를 콘크리트용 혼화재료로 사용하기 위하여 실시한 필자의 연구실험 결과를 중심으로 지금까지 발표된 세계 각국의 연구성과와 참고자료들을 검토 분석하여 정리하였다.

## 2. 플라이애쉬의 물리, 화학적 성질

### (1) 화학성분 및 조성

플라이애쉬 시료는 국내 각 발전소에서 시기를 달리하여 채취한 15종이며 최대 4%를 넘지 않는 거의 自硬性이 없는 종류(Class F)로 시

멘트 혼합물 중에서의 강도에 대한 기여는 대부분 포졸란반응에 의존한다. 플라이애쉬의 포졸란 활성과 관련하여 종전에는  $\text{SiO}_2$  성분의 함유량을 중요시 하였으나, 계속적인 연구성과로부터 포졸란반응에 미치는 영향이 그다지 크지 않다는 것이 밝혀졌으며, 최근에는  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  양이 70% 이상이면 포졸란 활성면에서의 문제는 없는 것으로 보고 있다. 플라이애쉬 시료의  $\text{SiO}_2$  양은 모두 50% 이상이었으며  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  양도 80% 이상으로 포졸란 반응에 기여하는 화학성분의 양은 양호한 것으로 나타났다. 그러나 알칼리-골재 반응의 위험 때문에 1.5% 이하로 제한하고 있는 전알칼리(total alkalis) 양은 국내에서 생산된 무연탄으로부터 발생한 플라이애쉬의 경우 규정값을 초과하므로써 사용시 주의가 필요한 것으로 나타났으며 건조수축과 팽창성에 영향을 주는  $\text{SO}_3$  와  $\text{MgO}$  성분 중  $\text{SO}_3$  양은 거의 영향이 없는 미량으로 나타났으나 무연탄에서 발생한 시료에서의  $\text{MgO}$  양은 5%인 제한값에 가까운 값이었다. 다음은 강열감량으로 플라이애쉬의 강열감량 중 습분이나 결정수의 양은 그다지 많지 않으며 대부분은 미연소탄소가 차지하고 있다. 이 미연소탄소는 AE제를 흡착하여 연행공기량을 감소시킬 뿐만 아니라 입형, 분말도 등 물리적 성질에도 크게 영향을 미친다.<sup>(2-5)</sup> 국산 플라이애쉬의 강열감량은 4~12%의 범위로서 다소 높은 편이며 그 변동의 폭도 큰 것으로 나타났다. 플라이애쉬의 균질성 확보에 있어서 강열감량 관리의 중요성을 생각할 때 보다 면밀하게 이에 대한 대책이 배려되어야 할 것으로 판단된다.

## (2) 물리적 성질

플라이애쉬의 물리적 성질 중 立形은 流動性과  $44\mu\text{m}$ 체 잔류량으로 나타내는 분말도는 포졸란 활성과 관련있는 성질로 보고되어 있다. 사진-1은 국산 플라이애쉬 입자를 전자현미경으로 촬영한 것으로 플라이애쉬 입자의 경우 球形 또는 球形에 가까운 형상을 하고 있는 것

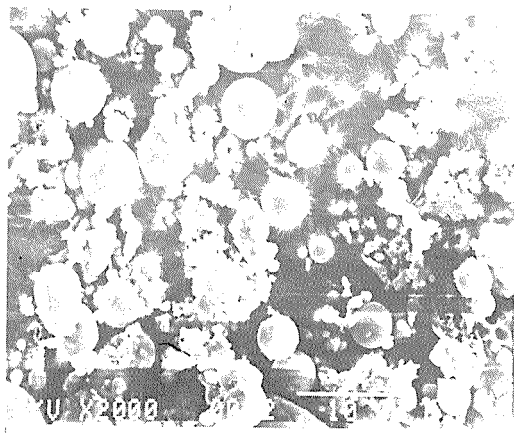


사진-1 플라이애쉬 입자의 전자 현미경 사진

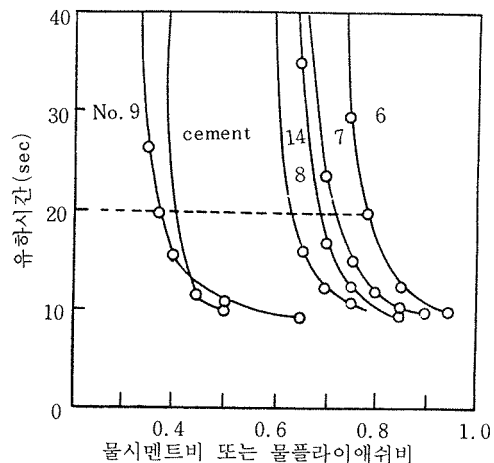


그림-1. 물시멘트비 또는 물플라이애쉬비와 유하시간과의 관계

이 일반적이거나 국산 플라이애쉬의 경우 球形의 粒子和 모양이 불규칙한 입자가 섞여있는 것을 보여주고 있다. 그림-1은 P funnel을 이용한 플라이애쉬풀의 유하시간을 시멘트풀과 비교한 시험결과로 대부분의 플라이애쉬의 유동성이 시멘트에 비해 낮은 것으로 나타나 국산 플라이애쉬의 경우 소위 불베어링 효과가 기대에 미치지 못함을 보여주고 있다. 한편 본 연구에 사용된 플라이애쉬의  $44\mu\text{m}$ 체 잔류량은 9~27%의 범위로서 ASTM의 제한값인 34% 보다

훨씬 낮았으며 우수한 플라이애쉬의 기준값으로 제시된 25% 보다 낮은 좋은 경향을 보였다.

### 3. 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 배합

플라이애쉬를 혼화제로 사용한 콘크리트의 배합방법으로는 종전부터 사용하여 온 방법으로 플라이애쉬의 혼합률( $F/(C+F)$ )에 따른 시멘트+플라이애쉬의 중량이 플라이애쉬를 혼합하지 않은 콘크리트의 시멘트 중량과 동일하게 하는 방법(혼합방법)이 있으며, 이 경우 플라이애쉬의 포졸란반응에 의한 기여도가 낮기 때문에 28일 전후의 콘크리트 강도는 시멘트만을 사용한 콘크리트보다 일반적으로 낮은 수준을 보인다. 이러한 早期材劣에서의 낮은 강도를 개선하기 위해 제안된 방법이 시멘트+플라이애쉬의 중량이 시멘트만을 사용한 콘크리트의 시멘트 중량보다 항상 많게 하는 배합방법(중량치환방법)으로 이 경우 시멘트 양은 혼합률에 따라 감소시킨 양으로 하고 플라이애쉬는 각각

의 혼합률에 따른 중량의 1.25, 1.5, 2.0배 등으로 증량한다. 또한 시멘트양은 변화시키지 않고 혼합률에 따른 플라이애쉬를 추가로 첨가하여 강도증진을 도모하는 배합방법이 있으며, 이 방법에 따라 제조한 콘크리트의 장기재령에서의 강도는 동일한 양의 시멘트를 증가시키는 것보다 오히려 높게 나타난다고 한다.<sup>(6)</sup> 이들 배합방법에 의하여 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 경우 용적의 증가, 혼합수 및 공기량의 변화가 뒤따르게 되며 이러한 변화를 보정하기 위해 반드시 잔골재양을 조정하는 방법이 사용되고 있으며 일반 콘크리트에서의 물-시멘트비 대신 플라이애쉬를 시멘트의 일부로 계산하여 물-시멘트+포졸란(결합제)비를 배합조건으로 한다. 한편 지금까지 보고된 결과들을 종합해 보면 저칼슘 플라이애쉬의 가장 경제적인 혼합률은 15~25% 범위에 있는 것으로 생각된다. 이 혼합률에 가장 큰 영향을 미치는 요인으로는 콘크리트 주위의 온도와 양생온도이며 따라서 한중시에는 마무리작업과 거푸집제거시기를 보다 빨리하기 위해 혼합률을 감소해야 하며 서중시에는 상대적인 강도증진의 경향에 힘입어 혼합률을 높일 수 있다.

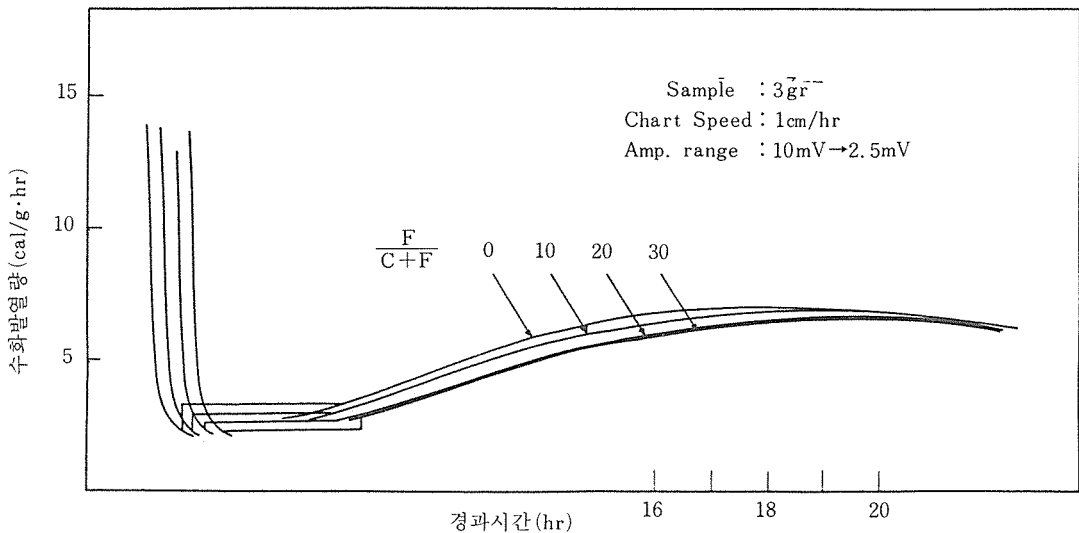


그림-2 시멘트-플라이애쉬물의 경과시간과 수화발열량의 관계

#### 4. 플라이애쉬를 혼합한 굳지않은 콘크리트의 성질

##### (1) 水和 및 凝結

저칼슘 플라이애쉬의 혼합은 일반적으로 일정한 결합재량에서 시멘트 조성광물의 희석효과를 가져오기 때문에 콘크리트의 응결시간을 지연시킨다. 이 응결시간은 플라이애쉬의 혼합방법 및 배합조건에 의해 달라진다. 시멘트의 10, 20, 30%를 플라이애쉬로 한 풀의 경과시간에 따른 수화발열량을 알아 본 결과가 그림-2와 표-1로서 플라이애쉬의 혼합률이 높아지면서 수화발열량은 점차로 감소되어 1, 2차 peak에 도달하는 시간이 점차 지연됨을 나타내고 있다. 이러한 현상은 콘크리트의 응결시간에 영향을 미쳐 그림-3에 보이는 바와 같이 혼합률이 증가함에 따라 응결시간이 늦어져 혼합률이 30%인 경우 3시간 이상 지연되었다.

표-1 시멘트 플라이애쉬풀의 경과시간에 따른 수화발열량 측정결과

구 분 $\frac{F}{C+F}$	1st Peak		2nd Peak		24시간 누적수화열 (cal/g)
	수화열 (cal/g · hr)	수화열 (cal/g · hr)	도달시간 (시 : 분)	도달시간	
0	14.1	1.5	18 : 00		31.3
10	13.8	1.5	19 : 05		29.8
20	12.5	1.3	19 : 50		26.5
30	11.8	1.2	20 : 00		24.2

##### (2) 流動性, 슬럼프손실

플라이애쉬를 혼합한 콘크리트에 있어서 시멘트+플라이애쉬(결합재)의 절대용적은 플라이애쉬의 비중이 시멘트보다 낮기 때문에 동일한 중량의 시멘트의 절대용적보다 크다. 이로 인해 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트는 개선된 점착성과 성형성을 가지게 되며 재료분리에 대한 저항성도 커지게 되며 또한 플라이애쉬 입자는 球形의 粒形을 가지고 있기 때문에 슬럼프 확

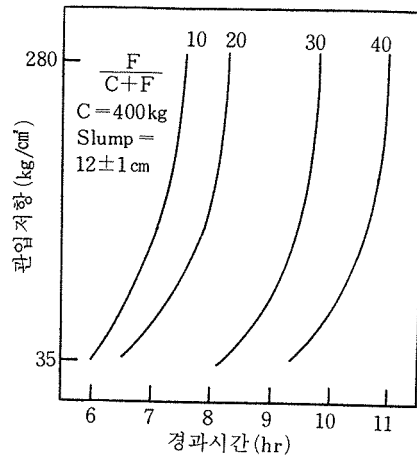


그림-3 플라이애쉬의 혼합률과 콘크리트의 응결시간과의 관계

보를 위한 단위수량을 감소시키므로써 시공성을 개선시킬 뿐만 아니라 동일한 슬럼프의 콘크리트에 대한 물-결합재비를 감소시키는 좋은 결과를 가져온다고 한다.<sup>(7)</sup> 그러나, 이러한 일반적인 경향과는 달리 국산 플라이애쉬를 콘크리트에 혼합할 경우 소요의 슬럼프를 얻기 위한 단위수량은 혼합방법에 관계없이 혼합률이 증가함에 따라 조금씩 증가하는 현상을 보였다. 이러한 현상은 앞에서 언급한 플라이애쉬 풀 자체의 유동성이 시멘트보다 낮은 데서 기인한 것으로 혼합률이 증가함에 따라 잔골재율을 줄이는 방법으로 얼마간 개선할 수 있었으며 그 예가 그림-4로 일정한 물결합재비에서 플라이애쉬의 혼합률이 증가함에 따라 슬럼프가 증가하는 것을 보여 주고 있다.

한편 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 경과시간에 따른 슬럼프손실은 포틀랜드시멘트 콘크리트에 비해 혼합률이 증가하는 데 따라 그림-5에서 나타난 바와 같이, 점차로 낮아지는 경향을 보였다.

그러나 AE 콘크리트의 경우는 플라이애쉬의 성분 중 콘크리트의 응결에 영향을 미치는 미연소탄소의 AE제의 흡착현상으로 인해 플라이

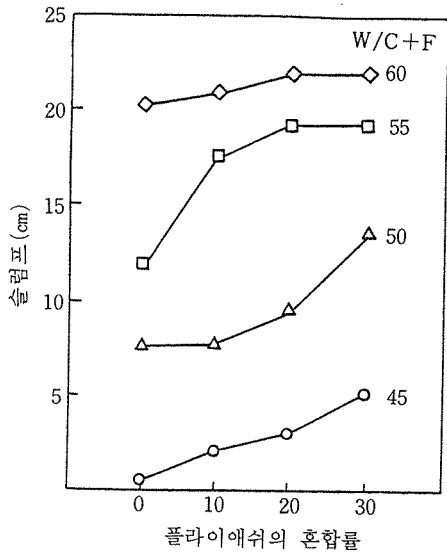


그림-4 플라이애쉬의 혼합률과 콘크리트의 슬럼프와의 관계

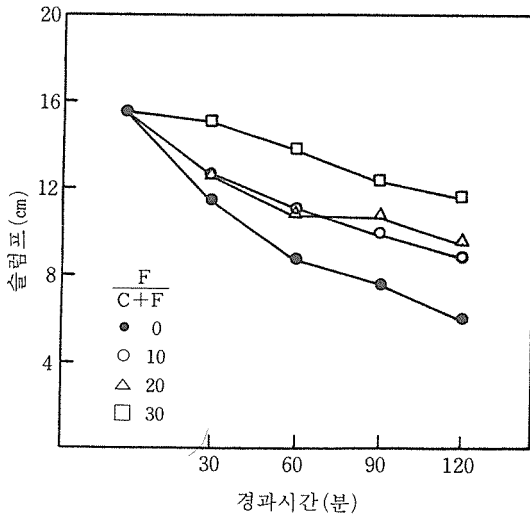


그림-5 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 경과시간에 따른 슬럼프 손실

애쉬 혼합에 따른 슬럼프 손실의 감소효과는 거의 없는 것으로 나타났다. 그림-6은 플라이 애쉬 혼합률을 달리한 AE 콘크리트의 경과시간에 따른 공기량 및 슬럼프 손실 경향을 나타낸 것으로 공기량 손실이 크며, 슬럼프 손실은

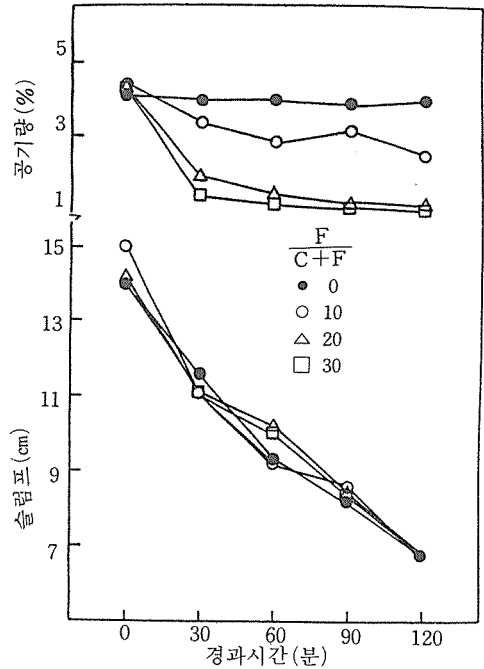


그림-6 AE 제를 사용한 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 경과시간에 따른 공기량 및 슬럼프손실

포틀랜드 시멘트콘크리트와 비슷한 것을 보여 주고 있다.

### (3) 공기연행성

플라이애쉬의 혼합은 균지않을 콘크리트의 공기량 확보에 영향을 미칠 뿐만 아니라 연행되어 있는 공기의 안정성에도 영향을 미친다. 콘크리트 중에서 일정한 공기량을 확보하기 위한 AE제 소요량에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 미연소 탄소량을 들 수 있으며 이밖에 분말도, 시멘트의 종류와 알칼리량, 물-시멘트비 등이 있다. 그림-7은 결합재의 45%를 플라이 애쉬로 한 콘크리트에서 공기량에 영향을 줄 수 있는 여러 요인들을 변화시켰을 때 공기량 6%를 확보하기 위해 필요한 AE제 소요량이 어떻게 달라지는 지를 보여준 결과이다.<sup>8)</sup> 플라이 애쉬의 강열감량의 대부분은 미연소 탄소로

서 이 미연소 탄소는 粗粒의 플라이애쉬에 보다 많이 포함되어 있으며 정수장의 여과 및 흡착과정에서 사용되는 多孔性 活性炭素와 매우 비슷한 성질을 가지고 있어 콘크리트 중에서 연행공기를 흡착하므로써 공기량 확보를 위한 AE제 소요량을 증가시킨다. 따라서 플라이애쉬의 강열감량의 관리는 AE제 소요량의 조절에 있어서 필수적인 요소이다. 지금까지의 여러 보고들을 참고할 때 플라이애쉬의 강열감량을 3% 이내로 조절할 경우, 강열감량에 따른 AE제 소요량은 크게 문제가 되지 않는 것으로 보인다. 이런 과정을 거쳐 콘크리트 중에 연행된 공기량은 에지테이션이나 재믹싱에 의해 손실이 일어난다. 이때 에지테이션 시간과 손실된 공기량 사이에는 상관성이 있으며 공기량 확보를 위한 AE제 소요량이 많을수록 공기량 손실이 크다고 한다. 플라이애쉬 입자의 AE제 흡착에 대한 실험에서 알아본 바에 의하면 30분 이내에 대부분의 흡착이 완료되었으며 충분한 양의 AE제를 첨가하였을 때 믹싱 후 15분 이후의 콘크리트 중에서의 공기량은 1~2rpm의 에지테이션을 계속해도 안정을 유지하였다. 그림-8은 AE제 첨가량을 점차로 증가시켰을 때 경과시

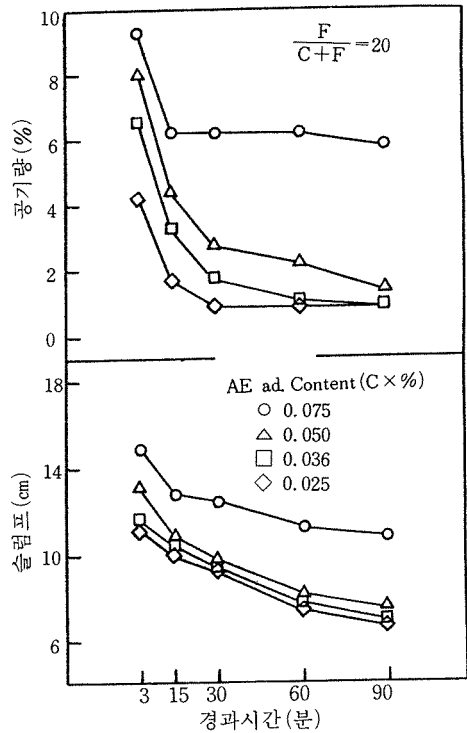


그림-8 플라이애쉬를 혼합한 AE콘크리트의 공기량 및 슬럼프값과 경과시간과의 관계

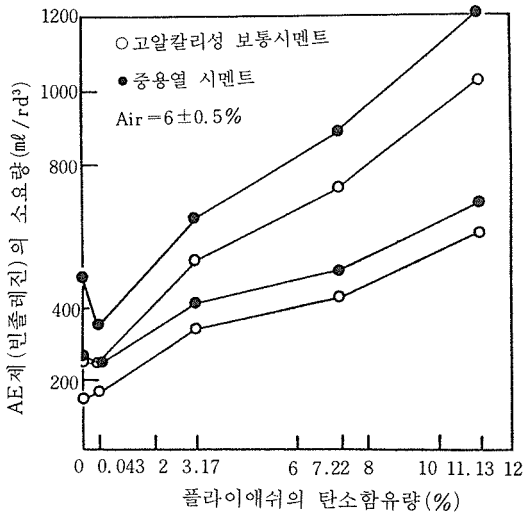


그림-7 플라이애쉬의 탄소함유량과 AE제 소요량과의 관계

간에 따른 공기량 및 슬럼프값을 측정한 결과이다. 한편 일단 타설을 완료한 콘크리트에서의 공기량은 손실되지 않는다고 한다.<sup>(9)</sup>

## 5. 플라이애쉬를 혼합한 경화한 콘크리트의 성질

### (1) 재령과 강도와의 관계

플라이애쉬의 콘크리트의 강도에 대한 기여 시기 및 정도는 화학적 활성의 정도에 따라 약간씩 다르며 화학조성면에서는 포함된 유리질의 양이 물리적 성질 면에서는 44 $\mu$ m(No. 325)체 통과량이 이 포졸란 활성에 영향을 미치는 가장 중요한 요인으로 생각되고 있다.<sup>(3)</sup> Lane과 Best에 의하면<sup>(4)</sup> 28일 강도를 기준으로 했을 때

재령 1년에서의 강도증진율은 시멘트만을 사용한 콘크리트가 30%인데 비해 플라이애쉬를 혼합한 경우는 50%였다고 하며, 재령 10년에서의 강도비교를 행한 보고에서도 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 강도증진이 뚜렷하게 나타났다고 한다.<sup>(40)</sup> 그림-9는 이 혼합방법에 의하여 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 재령에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 것으로 혼합률에 관계없이 28일 전후의 압축강도가 시멘트만을 사용한 콘크리트와 거의 같거나 낮은 수준을 보여주고 있으며 또한 혼합률이 클수록 낮은 경향을 나타내고 있다. 그러나 재령 1년에서는 시멘트만을 사용한 콘크리트의 강도보다 오히려 높거나 비슷한 것을 보이고 있어 플라이애쉬의 혼합이 장기강도의 증진에 효과가 있는 것으로 나타나고 있다. 이와같이 플라이애쉬를 혼합한

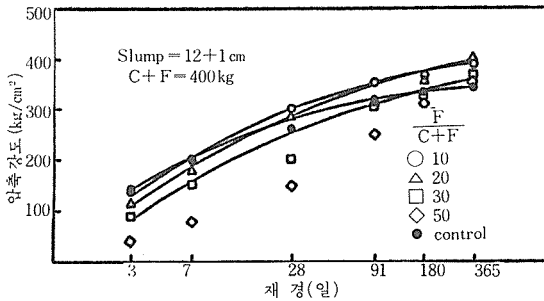


그림-9 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 재령과 압축강도와의 관계

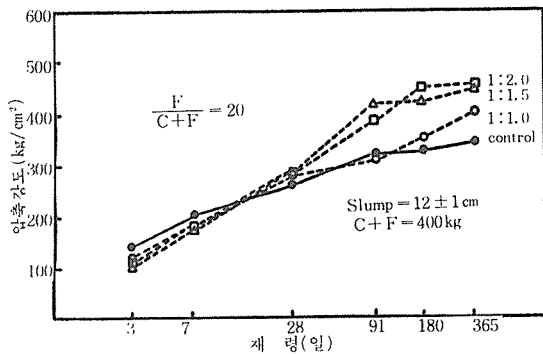


그림-10 플라이애쉬를 증량치환한 콘크리트의 재령과 압축강도와의 관계

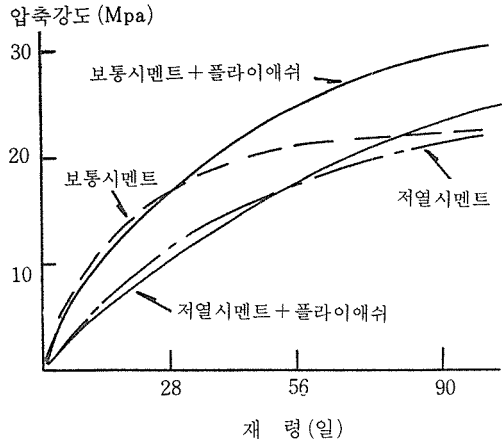


그림-11 플라이애쉬를 혼합한 각종 시멘트경화체의 재령과 압축강도와의 관계

콘크리트의 경우 28일까지의 강도에 비해 그후의 강도증진이 크기 때문에 28일 강도를 기준 강도로 하고 있으며 그 외의 나라에서도 60일이나 56일 강도를 기준강도로 하려는 경향이 많아지고 있다. 그림-10은 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 낮은 조기강도를 개선하기 위해 혼합률 20%인 플라이애쉬를 증량배합방법에 따라 혼합한 콘크리트의 재령에 따른 강도변화로서 1:1 증량 배이스로 혼합한 콘크리트에 비해 조기강도가 개선되어 장기재령에서의 강도증진율이 큰 것을 보여주고 있다. 한편, 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 강도에 영향을 미치는 플라이애쉬 자체의 품질 외적인 요인으로는 시멘트의 종류, 시멘트 중의 알칼리량, 혼합물 등이 있다. 그림-11은 각각 종류가 다른 시멘트에 플라이애쉬를 혼합할 경우, 재령에 따른 강도증진의 경향을 보여주는 것으로 함께 사용한 시멘트가 低熱形일 수록 장기재령에서의 강도증진이 큰 것을 보여주고 있다.

## (2) 크리프 및 건조수축

재하시의 강도 및 강도발현 속도에 플라이애쉬가 미치는 영향에 따라 콘크리트의 크리프는 달라진다. 시멘트만을 사용한 콘크리트와 결합

재의 용적이 동일한 경우 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트는 28일 이전에 재하한 경우 비교적 크리프 변형이 크다. 그러나 Ghosh와 Timusk<sup>(11)</sup>에 의하면 재하시에 있어서 시멘트만을 사용한 콘크리트와 동일한 강도를 갖도록 배합한 경우 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 크리프 변형률이 그 이후의 모든 재령에서 보다 작은 것을 보여주고 있다. 이에 비해 플라이애쉬의 혼합한 콘크리트의 건조수축 변형률은 일반 콘크리트와 분명한 차이를 보이지 않고 있다.

### (3) 동결융해저항성

콘크리트의 동결융해에 대한 저항성은 콘크리트 중의 연행공기의 분포, 골재의 안정성, 수화의 정도, 강도 및 콘크리트를 둘러싸고 있는 수분의 조건에 따라 달라진다. 그림-12는 이러한 제요인과 밀접한 관계를 가진 양생의 정도가 동결융해저항성에 미치는 영향을 나타낸 것으로 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 경우 보다 양생기간에 따른 영향을 많이 받는다는 것을 보여주고 있다.

이것은 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 강도발현이 늦기 때문이며 이러한 단점을 개선하기 위해 결합재양을 증가시키는 방법이 사용되고 있다. 그러나 적절한 공기량과 강도수준을

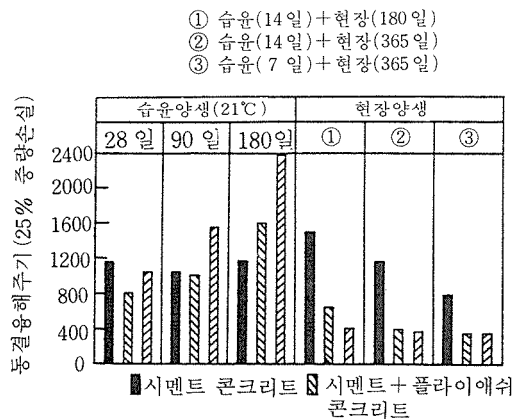


그림-12 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트의 양생조건과 동결융해 저항성과의 관계

확보한 경우 콘크리트의 동결융해에 대한 저항성은 플라이애쉬의 사용유무에 관계없이 그다지 차이가 없는 것으로 보고되고 있다.<sup>(8)</sup>

### (4) 耐藥品性

일반적으로 저칼슘 플라이애쉬의 혼합은 시멘트 경화체에 있어서 포졸란반응의 진행과 함께 수산화칼슘을 소비하여 황산과 칼슘이온의 결합에 의한 석고의 생성과 수산화칼슘의 삼출 현상으로 인한 시멘트 수화공간에서의 공극의 증가를 억제하므로써 황산에 대한 저항성을 증가시키는 것으로 알려져 있다.<sup>(12-15)</sup> 그림-13과 그림-14는 보통 포틀랜드시멘트(Oc), 중용열 포틀랜드시멘트(Mc), 고로슬래그시멘트(Sc)와 플라이애쉬 20% 및 30%를 혼합시킨 시멘트(Fc 20, Fc 30)로 제조한 모르타르를 5% 황산용액에 침지시킨 후 재령 28일에서 수중에서 양생한 보통 포틀랜드시멘트 모르타르의 압축강도 및 중량과 비교한 결과로 다른 시멘트 경화체에 비해 플라이애쉬를 혼합할 경우, 압축강도비가 크며 중량의 감소도 적은 것을 나타내고 있다.

한편, 그림-15와 그림-16은 플라이애쉬를 혼합한 시멘트 경화체의 염에 대한 저항성을

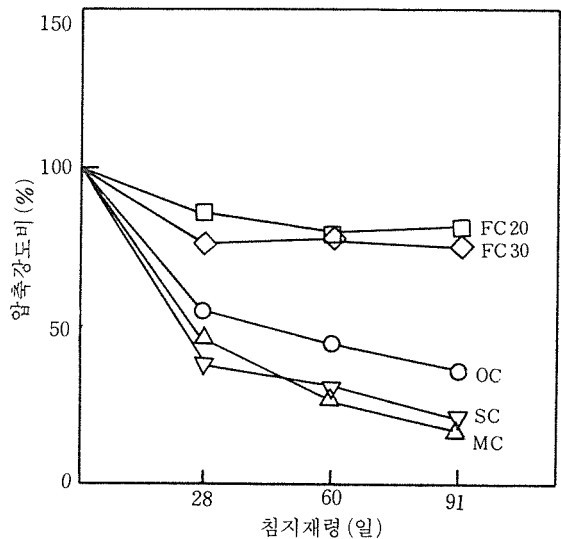


그림-13 황산에 침지된 모르타르의 압축강도비와 재령과의 관계



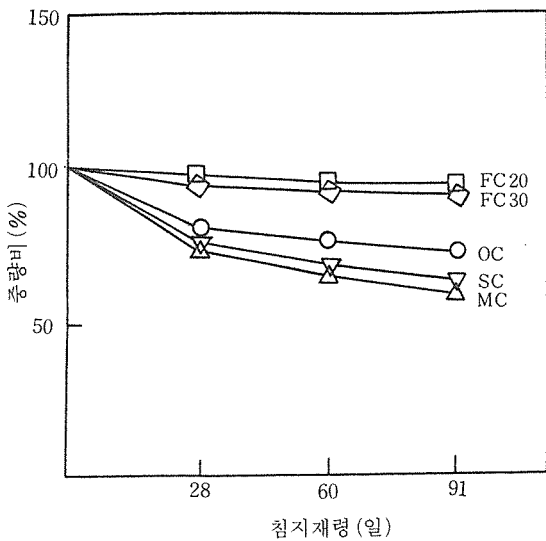


그림 - 14 황산에 침지된 모르터의 중량비와 재령과의 관계

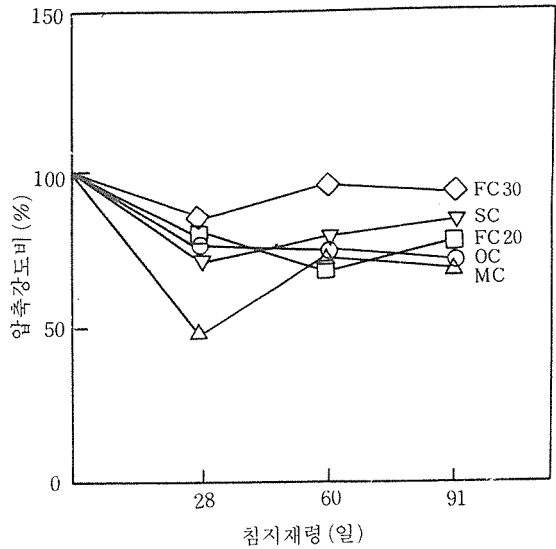


그림 - 15 염화칼슘에 침지된 모르터의 압축강도비와 재령과의 관계 (5% 염화칼슘)

알아보기 위해 제설제로 사용하는 염화칼슘 10% 용액에 침지시킨 모르터의 재령에 따른 압축강도 변화로서 플라이애쉬를 혼합한 모르터의 경우가 압축강도의 감소가 가장 적은 것으로 나타나고 있다. 이것은 플라이애쉬의 혼합에 따라 모르터 중의 수화발열량이 완화된으로써 수화발열현상으로 인한 내부균열의 생성이 감소되고 또한 염화칼슘 수용액 중에 해리된 칼슘이온이 공급되므로써 포졸란반응이 보다 활발하게 지속될 수 있었기 때문으로 생각된다. 이상의 결과들은 국산 플라이애쉬의 혼합이 산이나 염에 대한 모르터 및 콘크리트의 저항성을 개선시키는데 유효하다는 것을 알려주는 바람직한 결과로 생각된다.

## 6. 맺는 말

플라이애쉬에 대한 한국공업규격을 살펴보면 1964년에 KS L 5405, 1979년에 KS F 4049가 각각 제정되어 있으나 우리나라에서 플라이애쉬를 콘크리트용 혼화재료 내지는 시멘트 원료

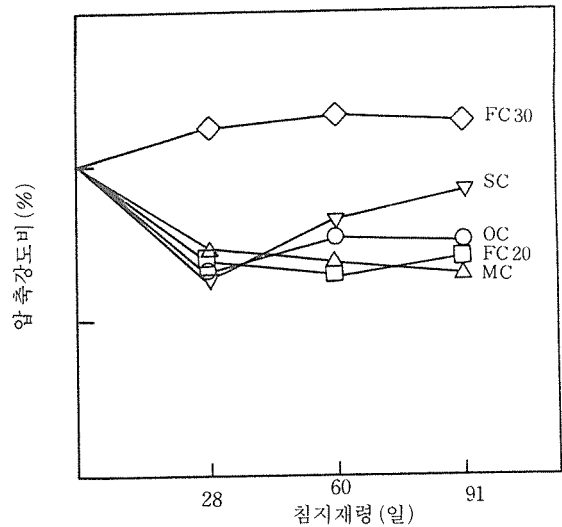


그림 - 16 염화칼슘에 침지된 모르터의 압축강도비와 재령과의 관계 (10% 염화칼슘)

로 사용한 실적이나 연구성과는 찾아보기 어려울 정도로 미미한 것 같다. 한편 서독, 영국 및 프랑스 등의 경우에는 플라이애쉬 발생량의 40% 이상을 유효하게 이용하고 있음을 감안해

볼 때 귀중한 자원이 사장되는 듯한 아쉬움을 금할 수 없다. 앞에서 이미 언급한 바와 같이 국산 플라이애쉬의 품질이 原炭의 종류 및 성질에 따라 크게 좌우되는 포졸란 활성면에서 큰 문제가 없으므로 콘크리트용 혼화재로써 사용 가능하다고 생각된다. 다만 국산 플라이애쉬의 강열감량이 비교적 큰 점이나 입자의 비표면적의 변동이 심한 편 등과 같은 품질관리에 대한 문제가 개선되어야 할 과제라 생각된다.

### 〈參考文獻〉

1. KS L 5405, “플라이애쉬”, KS F 4049, “플라이애쉬”
2. Walter H. Price, “Pozzolans—A Review,” ACI Journal, May 1975.
3. R. C. Meininger, “Use of Fly Ash in Cement and Concrete—Report of Two Recent Meetings,” Concrete International, July 1982.
4. R. O. Lane, J. F. Best, “Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete,” Concrete International, July 1982.
5. Michael F. Pistilli, “Air-Void Parameters Developed by Air-Entraining Admixtures, as Influenced by Soluble Alkalies from Fly Ash and Portland Cement,” ACI Journal, May—June 1983.
6. E. E. Berry and V. M. Malhotra, “Fly Ash for Use in Concrete—A Critical Review,” ACI Journal, Mar.—Apr. 1980.
7. M. Kokubu, “Fly Ash and Fly Ash Cement,” Cement Association of Japan, Tokyo. Vol. IV—2, 1969.
8. Bryant Mather, “Discussion of Investigations Relating to the Use of Fly Ash as a Pozzolanic Material and as an Admixture in Portland-Cement Concrete,” by L. John Mimmick, ASTM V. 54, 1954.
9. R. C. Meininger, “Use of Fly Ash in Air-Entrained Concrete—Report of NSGA—NRMCA Research Laboratory Studies,” National Ready Mixed Concrete Association, Feb. 1981.
10. Bryant Mather, “Compressive Strength Development of 193 Concrete Mixtures during 10 Years of Moist Curing,” U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Apr. 1965.
11. R. S. Ghosh, John Timusk, “Maturing Creep of Portland Cement Paste,” ACI Journal, Dec. 1971.
12. P. K. Mehta, “Effect of Fly Ash Composition on Sulfate Resistance of Cement,” ACI Journal, Nov.—Dec. 1986.
13. Katharine Mather, “Tests and Evaluation of Portland and Blended Cements for Resistance to Sulfate Attack,” ASTM, STP—66, 1978.
14. Mohammed Maslehuddin, Huseyin Saricimen, “Effect of Fly Ash Addition on the Corrosion Resisting Characteristics of Concrete,” ACI Journal(Materials), Jan.—Feb. 1987.
15. Ramon L. Carrasquillo, Peter G. Snow, “Effect of Fly Ash on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete,” ACI Materials Journal, July—August 1987.