

콘크리트용 混和材로서 국산 플라이애쉬의 품질에 관한 실험적 연구

A Study on the Quality of the Domestic Fly Ash as an Additive for Concrete

文 翰 英*
Moon, Han Young
徐 政 佑**
Seo, Joung Woo

Abstract

To use fly ash as an additive for concrete, authors collected 15 kinds of domestic fly ashes and tested the chemical compositions and physical properties of the fly ashes.

Fluidity of the fly ash paste was also investigated.

The result shows that the chemical compositions of the fly ashes were in the range of regulation of Korean Industrial Standards except ignition loss and the following relationships in fly ash were studied; specific surface and residue in standard sieve, specific surface and unit weight, residue in standard sieve and ignition loss.

For the given flow properties, fly ash paste required higher water-binder ratio than cement paste.

要 旨

국내의 각 공장에서 생산된 플라이애쉬 15 종류를 수집하여 콘크리트용 혼화재료로 이용하기 위한 연구의 일환으로 화학성분, 물리적 성질을 조사하고 플라이애쉬 풀의 유동성을 측정하였다.

본 연구에서 국산 플라이애쉬의 화학성분은 한국공업규격의 규정을 만족하였으나 강열감량이 약간 크게 나타났다. 한편 물리적 성질 중 비표면적과 표준체의 잔류량 및 단위중량, 표준체의 잔류량과 강열감량과의 사이에서 상관성을 알아냈다. 그리고 시멘트 풀과 동일한 유동성을 얻기 위한 플라이애쉬 풀의 물결합재비가 크게 요구됨을 알았다.

1. 서 론

인공포졸란에 속하는 플라이애쉬가 콘크리트용 混和材料로 사용된 것은 1910년대이며, 그 이후 Davis 등에 의하여 플라이애쉬에 관한 연

구가 활발히 진행되었다고 한다. 양질의 플라이애쉬를 콘크리트용 재료로 사용할 경우, 굳지않은 콘크리트의 워커빌리티 개선, 水和熱 완화, 경화한 콘크리트의 장기강도의 증진 및 水密性, 耐久性의 향상 등에 有效하며, 시멘트의 일부로 혼화하므로써 콘크리트를 경제적으로 제조할 수 있다는 장점과 産業廢棄物의 有效利用이라는 측

* 정희원 · 한양대학교 공과대학 교수

** 정희원 · 한양대학교 대학원 박사과정

면에서 一石二鳥의 效果를 기대할 수 있다⁽¹⁾.

그러나 최근 세계 각국에서 大氣汚染과 같은 환경공해문제에 관심이 높아지면서 가스의 배출을 줄이기 위한 조치를 강화하므로써 플라이애쉬 속에 未燃燒炭素의 비율이 증가되는 경향과 粉末度가 떨어지는 등 品質變動이 생기게 되므로써 이런 종류의 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 성질에 나쁜 영향과 문제점을 야기하게 되므로 이와 관련된 연구가 눈에 띄게 증가하고 있다⁽²⁻³⁾.

우리나라의 경우 플라이애쉬를 콘크리트용 재료로 이용하기 위하여 조사검토한 몇몇 기관의 보고서가 있으나 국내에서 생산된 플라이애쉬의 품질과 관련되는 연구성이나 이를 콘크리트 구조물에 응용한 실적에 관한 성과는 제대로 발표

안되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 국내에서 생산되는 플라이애쉬를 콘크리트용 混和材料로 이용하기 위한 연구의 일환으로 국내 각 공장에서 생산되는 15 종류의 플라이애쉬를 시기를 달리하여 수집하여 이 시료를 대상으로 화학성분 및 물리적 성질을 실험을 통하여 조사분석하였다. 그리고 플라이애쉬를 사용한 풀 및 모르타의 유동성에 대하여 검토해 보므로써 콘크리트용 混和材料로서 국산 플라이애쉬의 품질에 관한 基礎資料를 얻고자 하였다.

2. 실험개요

2-1. 사용재료

(1) 시멘트: 보통 포틀랜드 시멘트로서 화학 및 물리적 성질은 표-1 과 같다.

표-1. 시멘트의 화학성분 및 물리적 성질

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	lg·loss (%)	비 중	Blaine's 값 (cm ² /g)
21.8	5.84	3.56	60.62	3.54	2.58	—	—	0.95	3.15	3,422

(2) 플라이애쉬: 국내에서 1년간 생산된 15 종류를 시료로 사용하였다.

(3) 잔골재: KSL 5100의 표준모래를 사용하였다.

2-2. 실험기구 및 방법

(1) X-ray 시험: 플라이애쉬의 화학성분을 정량적으로 알아보기 위하여 형광X선을 分光結晶으로 分光시켜 검출, 기록하여 성분원소를 분석, 정량함.

(2) XRD 시험: 재료의 微細構造 연구에 사용되는 X-ray diffraction을 이용하여 플라이애쉬의 組成相을 分析함.

(3) 주사형 전자현미경: 플라이애쉬 및 시멘트 입자를 각각 倍率 2000 과 3000 배로 확대 촬영하여 粒形을 비교 관찰함.

(4) 단위중량시험: 용량 285 cc의 알미늄 용기를 2층으로 플로우 테이블 위에 놓고 플라이애쉬를 채운 뒤 중량에 변화가 없을 때까지 낙하시켜 구함.

(5) 플로우결정: KSF 5105에 의한 플로우값이 110~115가 되도록 단위수량을 정하여 표

준반죽으로 함.

(6) 보수계수: 500 cc 매스실린더를 사용하여 플라이애쉬 풀의 블리딩 속도를 측정하여 이 값에서 계산으로 보수계수 값을 구함.

(7) 유동성 측정: 주입모르타의 유동성 측정에 사용되는 용량 1725 cc의 깔대기 용기를 사용하여 시료의 유하시간을 초로 측정하였다.

3. 실험 결과

3-1. 플라이애쉬의 화학성분 실험 결과

플라이애쉬의 생산시기, 제조공장이 각각 다른 15개 중에서 대표적인 7개의 화학성분을 조사분석한 결과가 표-2이다.

3-2. 플라이애쉬의 물성에 관한 실험 결과

플라이애쉬 15개 시료의 비중, 분말도, 단위수량 및 단위중량 등에 관한 실험 결과를 정리한 것이 표-3이다.

4. 실험 결과에 대한 고찰

4-1. 플라이애쉬의 화학성분과 품질과의 관계

플라이애쉬의 화학성분은 KSF 4049와 KSL

표-2. 플라이애쉬의 화학성분

No.	분석값	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)	Ig·loss (%)
1		55.75	28.43	3.22	3.23	0.87	0.04	0.67	8.90
2		53.15	29.27	2.93	3.23	—	0.03	0.54	11.05
3		66.65	22.78	1.92	1.61	—	0.03	0.21	4.98
4		67.50	21.97	2.48	0.80	0.58	—	0.09	5.70
5		67.50	21.42	2.48	1.04	0.69	—	0.11	5.92
6		58.55	24.10	4.70	1.60	1.44	0.13	3.50	4.19
7		56.4	26.60	5.50	0.02	0.3	—	—	6.25
평균 (\bar{x})		60.79	24.94	3.32	1.65	0.78	0.058	0.32	6.71
표준편차 (σ)		5.76	2.93	1.21	1.12	0.38	0.042	0.24	2.23
최대-최소		14.35	7.58	3.58	3.21	—	—	—	6.86
변동계수		9.5	11.7	36.4	—	—	—	—	33.2
K	S	>45	—	—	—	—	—	—	<5.0

표-3. 플라이애쉬의 물성 실험결과

No.	비중	비표면적 (cm ² /g)	단위수량 (%)	28일압축강도 (%)	44 μ m 체량 (%)	88 μ m 체량 (%)	단위중량 (g/cm ³)	실적률 (%)	W/F (%)	보수계수
1	2.12	4,366	103	78	25.20	9.44	1.07	50.5	66.0	—
2	2.12	4,732	104	82	27.15	9.66	1.03	48.6	—	—
3	2.19	6,237	103	83	8.65	1.86	0.92	42.0	—	—
4	2.14	5,341	103	85	15.55	4.34	1.00	46.7	76.0	0.38
5	2.10	5,019	104	83	12.90	4.20	1.00	47.6	75.0	0.33
6	2.15	4,840	105	80	16.35	3.58	0.99	46.0	77.5	0.33
7	2.15	4,835	105	91	18.70	5.90	1.03	47.9	71.5	0.28
8	2.15	4,348	103	81	16.85	4.84	1.13	52.6	68.0	0.42
9	2.23	2,643	103	88	21.25	4.82	1.33	59.6	38.0	0.18
10	2.17	4,003	106	83	22.30	8.82	1.08	49.8	67.5	0.27
11	2.18	4,195	106	86	22.45	8.74	1.11	50.9	66.0	0.25
12	2.21	4,947	105	89	18.50	6.22	1.09	49.3	69.0	0.49
13	2.14	3,747	104	80	19.65	6.90	1.18	55.1	62.0	0.15
14	2.15	4,031	104	79	20.70	7.26	1.13	52.6	62.5	0.27
15	2.15	5,190	104	85	15.05	3.50	1.00	46.5	76.0	—
평균 (\bar{x})	2.16	4,565	104	83.5	18.75	6.00	1.07	49.7	67.3	0.303
표준편차 (σ)	0.03	796	1.02	3.67	4.61	2.33	0.10	4.06	9.80	0.095
최대-최소	0.13	3,594	3.0	13	18.5	7.80	0.41	17.6	39.5	0.341
변동계수	1.5	17.4	1.0	4.4	24.6	38.7	8.9	8.2	14.6	31.1
K	S	>1.95	>2,400	<102	>60	—	—	—	—	—

* 유하시간 20 초를 나타내는 플라이애쉬 풀의 물플라이애쉬비 일.

5405 에 각각 SiO₂ 45% 이상, SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ 70% 이상으로, 본 실험에 사용된 국내생 산 플라이애쉬는 표-2 에서와 같이 화학성분 비율이 KS 규정을 만족함을 알 수 있다. 그런데 플라이애쉬 화학성분 중 포졸란활성(pozzolan

activity)에 주로 기여하는 성분으로 SiO₂ 와 Al₂O₃ 를 들 수 있으며, 포졸란 활성도는 이들 화학성분의 함유량에 따라 달라진다. 그러나 포졸란 활성도만으로는 시멘트와 반응에 의해서 생성되는 결정의 종류는 알아내기 어렵다. 그래

서 플라이애쉬의 相組成을 알아보기 위하여 분말법에 따른 X-ray 회절시험 결과를 그림-1로 나타내었으며, 플라이애쉬의 相組成은 2θ 각이 21~26°인 범위에서 확산 band 을 가지는 Alumina Silicate($Al_2O_3 \cdot SiO_2$)系의 유리질과 인 石英(mullite 인 $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ 포함)으로 나타났다.

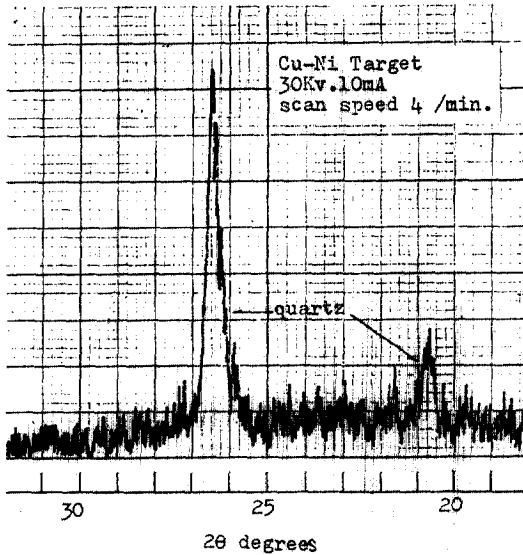


그림-1. 플라이애쉬의 X-ray 회절도

이러한 相組成을 가지는 플라이애쉬를 시멘트와 혼합하여 모르타나 콘크리트용으로 사용하면 반응생성물이 화학적인 침식작용 특히 황산염의 침식에 안정된 성질을 가진 ettringite를 생성하여 安定성과 耐久性을 향상시키는 데 有效하다고 한다.⁽¹⁰⁾

끝으로 강열감량의 평균값은 KS 규정값 5%보다 약간 큰 6.7% 정도였으나, ASTM C 618의 12% 규정값보다 작은 값을 알 수 있다. 플라이애쉬의 강열감량은 미연소탄소 함유량과 관계가 있으며 탄소함유량은 有機混和劑 특히 AE劑를 吸着하므로써 그 기능을 방해하는 작용을 하므로 소요의 공기량을 유지하기 위한 조치가 요망된다.⁽¹¹⁻¹³⁾

4-2. 플라이애쉬 품질에 영향을 미치는 물성에 대한 고찰

플라이애쉬의 비중, 분말도, 표준체의 잔류량, 단위중량 및 粒形과 관련된 보수계수 등을

구하여 물성이라 하였으며 표-3의 실험결과에서 얻어진 값들은 KS F 4049의 규정을 만족함을 알 수 있으며 시멘트의 25%를 플라이애쉬로 혼합한 모르타의 압축강도 시험결과 재령 28일 압축강도비가 KS 규정값의 60%를 훨씬 초과하는 평균 83.5%로서 강도면에서 품질을 만족하는 결과로 생각된다.

(1) 粒形

플라이애쉬 표면형상의 특성을 알아보기 위하여 주사형 전자현미경으로 시멘트 입자와 비교하여 촬영한 것이 사진-1, 사진-2이며, 사진-2의 플라이애쉬 입자는 각이 많은 시멘트 입자와 달리 球形으로 대체로 일정한 크기로 분포되어 있음을 알 수 있다.

(2) 粉末度, 粒度와 單位重量的 관계

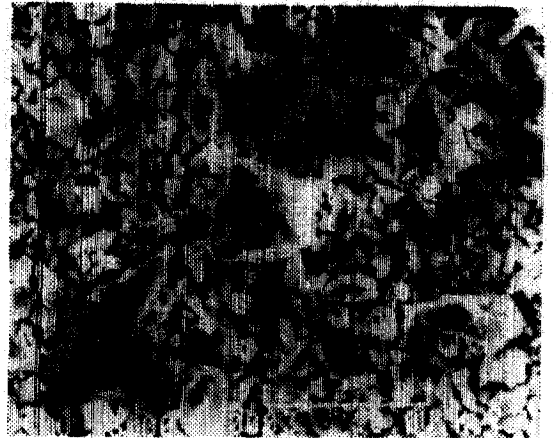


사진-1. 시멘트 입자의 현미경 사진

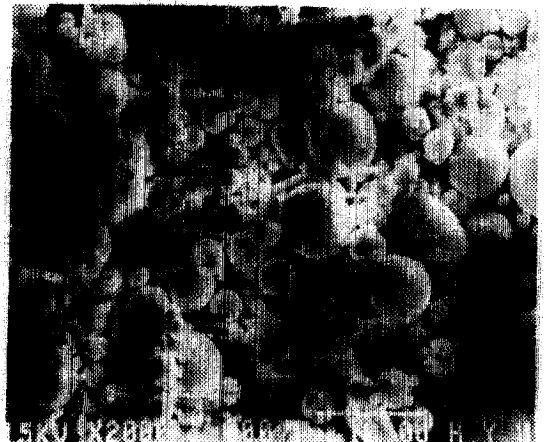


사진-2. 플라이애쉬 입자의 현미경 사진

플라이애쉬, 시멘트와 같은 粉體의 분말도를 평가하는 방법으로 Blaine의 공기투과방법에 의한 비표면적이 규정되어 있으며, 이외에도 44 μ m 체나 88 μ m 체에 잔류하는 양으로 평가하는 방법이 있다. 그래서 비표면적과 위의 두 체에 남는 잔류량과의 관계를 나타낸 것이 그림-2로서 이 그림에서 비표면적과 표준체에 남는 잔류량과의 사이에는 비표면적이 클수록 잔류량이 작아지는 상관관계를 나타내고 있어 플라이애쉬의 분말도

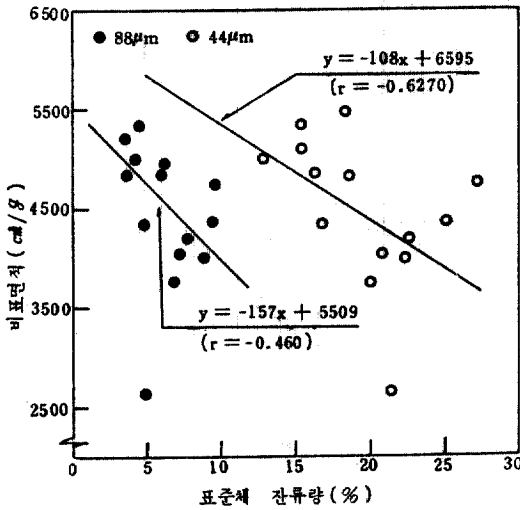


그림-2. 플라이애쉬의 비표면적과 체잔류량과의 관계

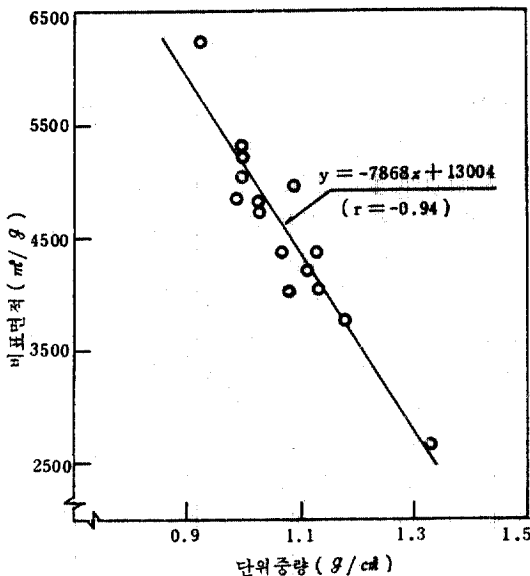


그림-3. 플라이애쉬의 비표면적과 단위중량과의 관계

및 입도의 상태를 표준체를 사용하여 얻어진 잔류량으로서 추정할 수 있는 참고자료가 되었다.

이번에는 비표면적과 단위중량 그리고 단위중량과 실적률과의 관계를 정리한 것이 그림-3 및 그림-4이다.

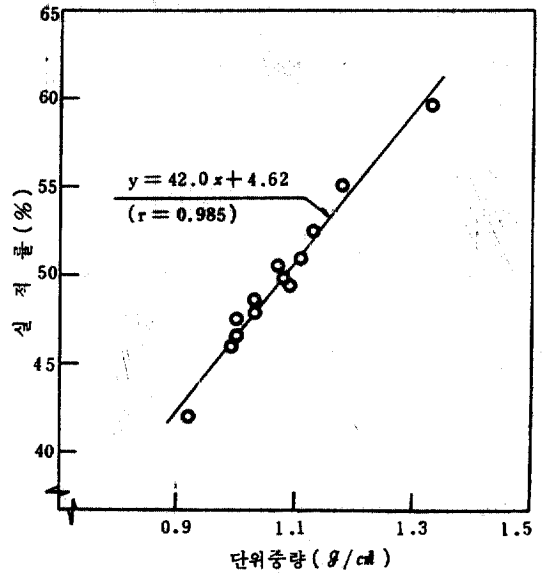


그림-4. 플라이애쉬의 단위중량과 실적률과의 관계

그림-3에서 粒狀材料에서 분말도를 대표하는 비표면적과 단위중량과의 사이에는 비표면적이 클수록 입자가 미세하기 때문에 실적률이 작아지므로 단위중량이 작아지는 좋은 상관관계가

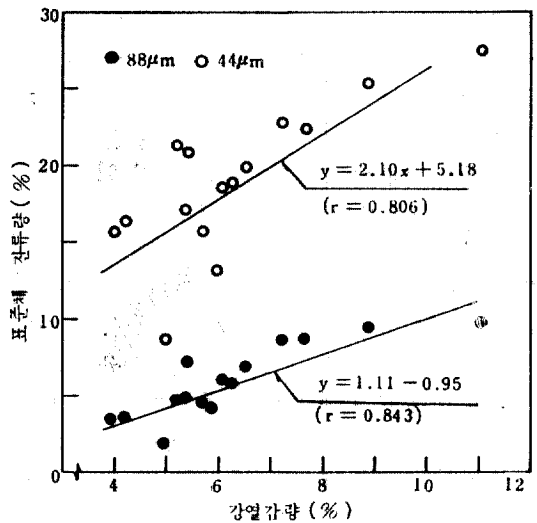


그림-5. 표준체에 남는 잔류량과 강열감량과의 관계

성립됨을 알 수 있으며, 플라이애쉬의 단위중량과 실적률과의 사이에 그림-4에서와 같은 매우 좋은 상관관계가 있음은 본 실험의 단위중량 시험방법이 매우 합리적인 방법임을 간접적으로 증명된 결과로 평가할 수 있겠다.

(3) 粉末度, 粒度와 強熱減量과의 관계

플라이애쉬의 강열감량과 비표면적 및 표준체에 남는 잔류량과의 관계를 정리한 것이 그림-5 및 그림-6이다.

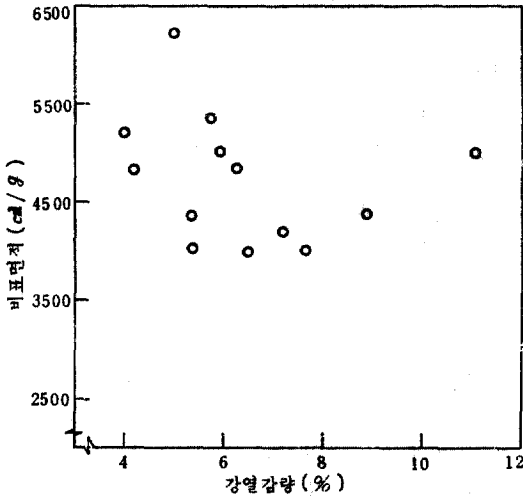


그림-6. 비표면적과 강열감량과의 관계

플라이애쉬의 미연소탄소 함유량의 정도를 나타내는 한 인자로서 강열감량을 생각할 수 있으며 미연소탄소 함유량이 많을수록 강열감량이 일반적으로 크며 미연소탄소 함유량이 많은 경우 일반적으로 粒徑이 큰 粒子가 많이 섞여 있기 때문에 표준체 잔류량과 강열감량과의 사이에는 그림-5에서와 같이 일정한 경향의 상관성을 가진다고 생각된다. 그러나 플라이애쉬의 비표면적과 강열감량 사이에는 그림-6에서와 같이 직접적인 상관성을 나타내지 않았다. 이상의 그림-2에서 그림-6까지의 실험결과들을 종합하여 정리해 보면 플라이애쉬 입자의 크기, 비표면적, 단위중량 및 실적률 사이에는 각각의 특성과 상관성 여부가 다른 점 때문에 위의 많은 요인 중에서 어떤 한 因子만으로 플라이애쉬의 품질을 평가하기가 어렵다고 생각된다.

(4) 粉末度와 保水係數와의 관계

플라이애쉬 풀의 불리딩속도 시험으로부터 구한 값으로 보수계수를 계산하였으며 이 보수계수는 광물질 미분말의 粒子形狀(shape)과 표면조직상태(surface texture)와 관계가 있는 계수로써 플라이애쉬의 비표면적이 클수록 표-3에서와 같이 대체로 크게 나타나는 경향임을 알 수 있다. 플라이애쉬의 비표면적과 보수계수와의 관계를 알아보기 위하여 정리한 것이 그림-7이다.

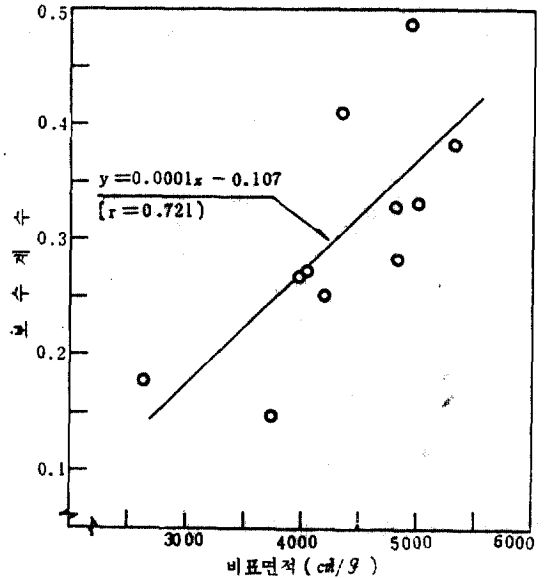


그림-7. 비표면적과 보수계수와의 관계

이 그림에서 양자 사이에는 75% 정도의 상관성을 나타내고 있어 비표면적이 클수록 보수계수가 크며⁽¹⁴⁾ 보수계수의 크기에 따라 불리딩량이나 속도가 반비례하는 결과를 나타내었다.

4-3. 플라이애쉬를 사용한 풀의 유동성에 관한 평가

플라이애쉬 풀과 시멘트 풀과의 유동성을 비교하기 위하여 시료 1725cc가 流下하는 시간을 초단위로 측정하여 종측에 그리고 횡측에는 물 플라이애쉬비 또는 물시멘트비를 각각 5%씩 변화시킨 값으로 나타낸 것이 그림-8이다.

이 그림에서 플라이애쉬 풀의 유하시간을 나타내는 곡선이 크게 상이함을 알 수 있으며, 동일한 유하시간 20초로서 비교해서 플라이애쉬 시료번호 9번의 비표면적 2,643 cm²/g 한 종류

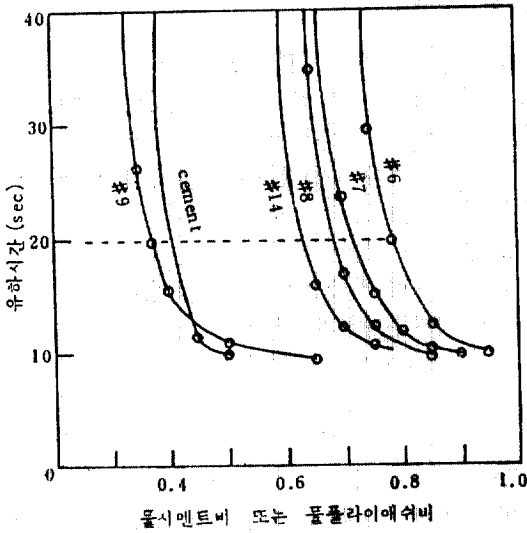


그림-8. 물플라이애쉬비 또는 시멘트비와 유하시간과의 관계

를 제외하고는 물플라이애쉬비가 시멘트풀보다 훨씬 큰 값을 알 수 있다. 이번에는 시멘트를 플라이애쉬로 20, 40, 60%로 각각 혼합한 물결합재비 55%인 풀의 유하시간을 측정하는 것이 그림-9이다.

이 그림에서도 시멘트 풀의 유하시간이 10초 이내에 비해 플라이애쉬로 혼합한 비율에 따라 유

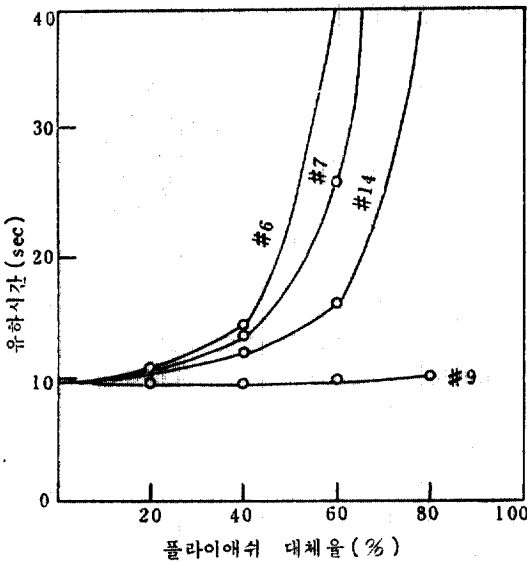


그림-9. 플라이애쉬 혼합재율과 시멘트풀의 유하시간과의 관계

하시간이 급격히 증가됨을 알 수 있다. 이상의 두 실험에서 플라이애쉬의 비표면적이 $4,000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 을 넘는 시료를 사용한 플라이애쉬 풀의 물플라이애쉬비가 시멘트 풀의 물시멘트비보다 크게 요구됨을 알 수 있으며, 그 정도는 플라이애쉬 비표면적의 크기에 따라 크게 나타났다. 플라이애쉬의 입형이 球形입에도 불구하고 유동성이 개선되지 못한 이유 중에는 플라이애쉬의 비

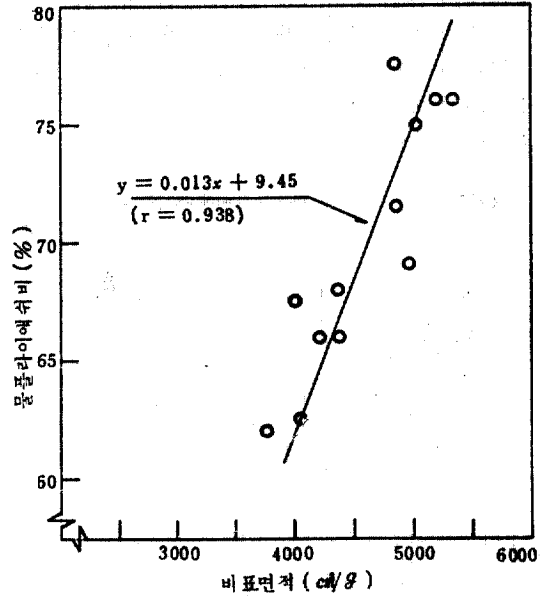


그림-10. 물플라이애쉬비와 플라이애쉬의 비표면적과의 관계(유하시간 20초일 때)

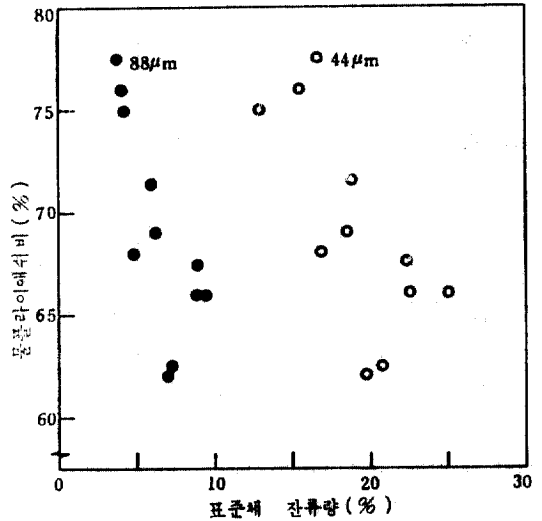


그림-11. 물플라이애쉬비와 표준재의 잔류량과의 관계(유하시간 20초일 때)

표면적이 시멘트보다 약 1000 cm²/g 정도 큰 점에 가장 큰 원인이 있는 것으로 생각되었다.

그래서 동일한 유하시간 20초의 유동성을 가지는 플라이애쉬 풀의 물플라이애쉬비와 비표면적과의 관계로 나타낸 것이 그림-10으로서 플라이애쉬의 비표면적이 클수록 물플라이애쉬비가 큰 경향의 일정한 상관관계를 나타냄을 알 수 있다. 그러나 그림-11의 동일한 유하시간 20초에서 표준체의 잔류량과 물플라이애쉬비의 사이에는 전연 상관관계를 알 수 없었다. 이번에는 플라이애쉬의 단위중량과 물플라이애쉬비의 사이에는 그림-12와 같은 좋은 상관관계가 있음을 알 수 있다.

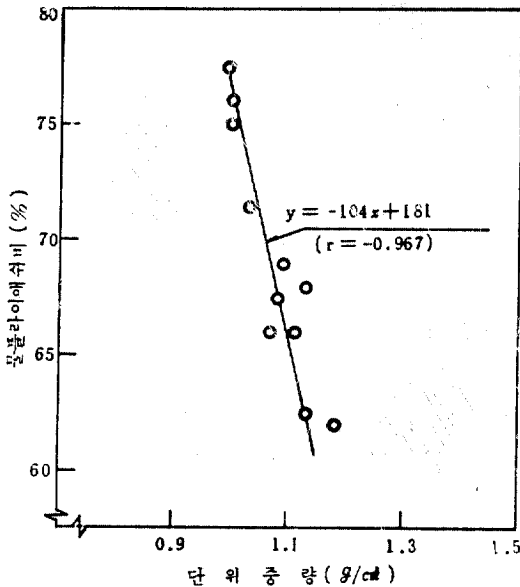


그림-12. 물플라이애쉬비와 플라이애쉬의 단위중량과의 관계(유하시간 20초일 때)

그래서 플라이애쉬를 사용한 풀의 유동성을 판정하는 한 수단으로 플라이애쉬의 비표면적값이 유용하겠으나, 비표면적 시험방법이 까다롭기 때문에 간단하고 쉽게 구할 수 있는 단위중량시험 결과로서 평가하는 방법의 검토가 요망된다. 한편 플라이애쉬의 혼화재율 25%인 모르타의 흐름값 110~115에 대한 단위수량비를 조사해 본 결과 특성있는 결과를 얻지 못했다.

5. 결 론

1. 플라이애쉬의 화학성분 중 SiO₂는 53~67% 범위로서 대체로 큰 편이며, 강열감량은 평균 6.7%로서 5%보다 약간 큰 값을 나타내었다. 그러나 기타 화학성분은 한국공업규격의 규정을 만족하였다.

2. 플라이애쉬의 비중, 분말도 및 압축강도비 등의 물성값이 한국공업규격의 규정을 만족하고 있으며 단위수량비의 평균값이 2%정도 초과하였으나, 압축강도비가 규정값을 훨씬 초과하는 83.5%였으므로 강도면에서도 문제가 없겠다.

3. 주사형 현미경으로 관찰한 플라이애쉬의 粒形은 시멘트 입자와 달리 球形임을 확인하였으며 플라이애쉬의 비표면적은 표준체에 의한 잔류량과의 사이에서 좋은 상관관계가 있을 뿐만 아니라 단위중량시험 결과와도 좋은 상관성을 나타내었다.

4. 입경이 큰 입자가 많이 섞여있는 플라이애쉬는 표준체에 의한 잔류량이 크며 미연소탄소가 많이 포함되어 있으며, 이런 종류의 플라이애쉬는 강열감량이 크기 때문에 표준체의 잔류량과 강열감량 사이에는 일정한 상관관계가 있음을 확인할 수 있었다.

5. 플라이애쉬 풀과 시멘트 풀의 유동성을 비교할 때 동일한 유동성을 얻기 위한 물플라이애쉬비가 물시멘트비보다 상당히 크게 요구되었다. 이러한 결과는 시멘트에 비하여 플라이애쉬의 비표면적이 1,000 cm²/g 이상 큰 것이 가장 큰 원인으로 생각되었다.

參 考 文 獻

1. 文翰英, 徐政佑, "플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 特性", 土木學會誌, 1985年 10月.
2. Richard C. Mielenz, "Mineral Admixture-History and Background", *Concrete International*, Aug. 1983.
3. E.E. Berry and V.M. Malhotra, Fly Ash for Use in Concrete-A Critical Review", *ACI Journal*, Mar.-Apr. 1980.
4. G.R. Mass, "Proportioning Mass Concrete and Incorporating Pozzolans Using ACI 211.1", *Con-*

- crete International*, Aug. 1982.
5. R.O. Lane, "Effects of Fly Ash on Freshly Mixed Concrete", *Concrete International* Oct. 1983.
 6. 大槻光雄外, "最近のフライアッシュの性状", セメント・コンクリート, June 1984.
 7. 須藤義一, "ヨーロッパにおけるフライアッシュ使用の趨勢", セメント・コンクリート, May 1982.
 8. James E. Cook, "Fly Ash in Concrete-Technical Considerations", *Concrete International*, Sep. 1983.
 9. Robert W. Cannon, "Proportioning No-Slump Concrete for Expanded Applications", *Concrete International* Aug. 1982.
 10. P.K. Mehta, "Effect of Fly Ash Composition on Sulfate Resistance of Cement", *ACI Journal* Nov.-Dec. 1986.
 11. Dan Ravina, "Slump Loss of Fly Ash Concrete", *Concrete International*, Apr. 1984.
 12. 内川 浩外, "フライアッシュのキャラクターと各種混和剤の吸着物性", セメント技術年報, 36, 1982.
 13. 長瀬重義外, "フライアッシュセメントペーストの流動性と高性能減水剤の吸着", セメント技術年報 36, 1982.
 14. 山崎寛司, "礦物質微粉末がコンクリートのウオーカビリティーにおよぼす効果に関する基礎研究", 土木學會論文集, Aug. 1962.

(接受: 1987. 7. 13)