

## 시멘트 유동성과 물성에 미치는 영향인자에 관한 연구

엄태선 · 최상홀\*

쌍용중앙연구소

\*한양대학교 무기재료공학과

(1997년 8월 21일 접수)

### A Study of Effecting Factor in the Reology and Physical Properties of Cements

Tai Sun Um and Sang Heul Choi\*

Ssangyong Reasearch Center

\*Dept. of Inorg. Mater. Eng. Han Yang Univ.

(Received August 21, 1997)

#### 요 약

Closed circuit ballmill을 이용하여 입도분포가 다른 시멘트를 1종과 5종클링커를 사용하여 제조하고 제조된 시멘트의 유동성 및 제 물성을 광물조성과 입도특성으로 해석하여 고유동, 저열, 고강도를 발휘하는 시멘트를 제조하는데 요구되는 영향인자와 그의 제어방안을 제시하였다. 콘크리트의 유동성은 페이스트의 점도와 밀접한 관계가 있으며 시멘트의 광물조성(C<sub>3</sub>A)과 입도특성은 페이스트의 점도와 콘크리트의 유동성을 결정하는 인자이다. 이러한 유동성은 시멘트의 강도와 제물성에 영향을 주고 있다. 특히 동일 비표면적의 시멘트에서 입도특성(rosin-rammer index, 44 μm잔사)은 콘크리트의 유동성과 제반 물성을 크게 좌우한다. 이것은 콘크리트의 구성재료로서 시멘트의 충전성은 입도특성에 좌우되고 이와 같은 충전성은 요구수량, 유동성과 강도등 제반특성에 영향을 주므로 고유동, 저열, 고강도를 위한 시멘트의 제조인자로 선정하였다. 이상의 결과로 C<sub>3</sub>A함량이 작은 5종클링커와 슬래그를 약 5%첨가하여 rosin-rammer index 0.7이하(3-32 μm범위), 44 μm잔사 3.5-4.5%과 비표면적 4000±100 cm<sup>2</sup>/g 내외로 입도를 조정할 시멘트를 제조하여 시중유통시멘트와 비교한 결과 고유동, 저열, 고강도등의 특성이 매우 우수하였다.

#### ABSTRACT

The reology and several physical properties of cements are studied by varying the different mineral composition and particle size distribution(PSD) of cements with closed circuit ball mill for high workability, low heat of hydration, and high strength. In this study, we found that the workability of concretes is related to the viscosity of cement, and affects to strength. Here, this workability is affected by mineral composition(C<sub>3</sub>A) and the PSD. Especially, rosin-rammer index and 44 μm residuc in the PSD of cements are affected to water demand, casting property, slump loss, strength of cements. From the above results, the conditions of cement for high workability, low heat of hydration and high strength are to use low C<sub>3</sub>A clinker, 5-10% slag addition, and to grind cement below 0.7 rosin-rammer index, above 3.5-4.5% 44 μm residue, 4000±100 cm<sup>2</sup>/g blaine. Such cements are, therefore, superior to super low heat cement and slag-blended cement in comparing the physical properties of strength, slump, slump-flow, adiabatic temperature, etc.

**Key words :** Reology, Physical properties, Mineral composition, Particle size distribution

#### 1. 서 론

콘크리트재료로서 시멘트의 고유동, 저열, 고강도화는 세계적인 연구추세이며, 이런 연구는 적은 혼합수로 고유동성을 갖으며 재료분리현상이 작고, 시공후에는 고

강도와 내구성이 확보가 가능한 시멘트의 개발과<sup>1,2)</sup>, 재료특성을 고려한 시공연구<sup>3,5)</sup>에 집중되고 있다.

콘크리트의 고유동, 저열, 고강도특성을 위해 고성능감수제, 고성능AE감수제<sup>6,13)</sup>가 개발되었고, 슬래그, 플라이애쉬, 실리카퓌름등의 다양한 혼화제의 활용이 검토되

고 있다. 특히, 화학혼화제를 이용한 콘크리트의 고유동, 고강도화는 어느 정도의 성과도 기대되고 있으나<sup>6,7)</sup>, 각종 대형공사에서 요구하는 시공성 특히, 혼합, 운반, 펌핑, 타설시간, 온도응력균열등 시공성과 내구성을 함께 고려할 때는 보완되어야 할 특성이 계속 상존하고 있다.<sup>8-10)</sup> 따라서, 다양한 종류의 고유동,저열시멘트의 개발<sup>11,12,13)</sup>이 검토되고 있는 실정이다. 지금까지 성능향상을 위한 시멘트의 개발은 소량소비를 주로 하는 속경성 시멘트에 국한되어 왔으며 대량소비형 시멘트개발은 최근에서야 벨라이트시멘트, 초저열시멘트, 슬래그와 플라이애쉬등이 첨가된 혼합시멘트등을 중심으로 시험적용이 추진 중에 있다. 그러나, 이런 연구결과들은 시멘트화학 이론을 기초로 한 시멘트특성의 개질이기에 때문에 이런 기술개념으로 생산된 시멘트는 콘크리트의 고유동, 저열, 고강도화를 위해 사용할 때, 급격한 슬립프 손실, 초기강도저하, 온도균열발생, 내구성(중성화,동결융해등)저하등으로 생산, 품질, 및 적용등에서 야기되는 제반 문제가 여전히 존재하고 있다.

본 연구는 시멘트 화학이론에 의존한 시멘트의 개발에 문제점을 해결할 목적에서, 시멘트의 제조특성이 유동성과 제 물성에 미치는 영향을 시멘트화학과 생산기술을 함께 검토하였다.우선 클링커의 광물조성과 입도특성을 달리할 수 있는 분급기가 부착된 closed circuit mill을 이용하여 다양한 입도분포를 갖는 시멘트를 조제했다. 조제된 시멘트의 조건에 따라 고유동, 저열, 고강도특성에 대하여 페이스트의 점도측정과, 반죽질기를 달리한 고강도콘크리트의 실용배합에 적용하여 유동성과 제 물성을 시멘트의

광물조성과 입도특성인자로 해석하므로써, 고유동, 저열, 고강도특성을 갖는 시멘트의 제조기술을 재정립하였다.

2. 실험내용

2.1.출발원료

2.1.1. 클링커, 석고 및 시멘트

시멘트와 콘크리트의 유동성과 제 물성을 측정하기 위해 사용한 클링커, 석고와 시멘트의 화학성분은 Table 1과 같다. 여기서 cement 1, 2, 3은 Table 1의 Type I,V clnker를 사용하여 만든 시멘트이다.

2.1.2. 혼화제

시멘트와 콘크리트의 유동성과 제 물성의 영향을 조사하기 위해 사용한 혼화제의 특성은 Table 2와 같다.

2.2. 실험방법

2.2.1 시멘트조제

시멘트는 Type I, V clnker를 closed circuit mill를 이용하여 다양한 입도의 시멘트를 조제하였으며, 이때의 조건은 Table 3과 같다.

2.2.2. 입도측정

조제 시멘트의 입도측정은 Cilas사의 granulometer 1064를 사용하였다.

2.2.3. 점도

시멘트 페이스트의 점도측정은 Malcom사 의 spiral viscometer PC-1 TL를 사용하였다.

2.2.4. 시멘트의 특성

Table 1. Chemical Compositions of Starting Materials

Starting materials		Chemical composition (%)									Remark
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	L.O.I	
Clinker	Type V	22.8	4.0	4.8	64.4	2.9	0.10	0.54	0.5	0.1	s-maker
	Type I	21.7	5.8	3.4	65.1	2.9	0.12	0.72	0.2	0.1	s-maker
Calsum sulfate		5.9	0.1	0.8	38.7	0.1	-	-	53.0	1.1	Natural anhydrite
Cement 1		20.6	4.7	3.1	61.1	2.7	-	-	7.4	0.5	Type I, blaine 4050 cm <sup>2</sup> /g
Cement 2		19.6	5.9	2.9	59.7	3.0	0.11	0.72	6.2	1.9	Type I, blaine 3650 cm <sup>2</sup> /g
Cement 3		22.0	3.8	4.2	62.9	2.5	0.10	0.69	3.5	0.3	Type V, blaine 4000 cm <sup>2</sup> /g

Table 2. Properties of Superplasticizer

Superplasticizer		Properties			Remark
		Color	Gravity	Status	
Naphtalen	I	Dark brown	1.02	Liquid	m-maker
	II	Dark brown	1.02	Liquid	s-maker
Naphtalen+Melamin		Brown	1.02	Liquid	s-maker
Melamin		Transparency	1.01	Liquid	s-maker
Polycabon		Brown	1.01	Liquid	s-maker

**Table 3.** Condition of Cements Prepared by Closed Circuit Mill

Cement	Clinker	Mixing ratio			Grnding condition	
		Clinker	Calcium sulfate	Slag	Blaine(cm <sup>2</sup> /g)	44 μm(%)
I-A I-B I-C I-D I-E I-F	Type I	86.4%	13.6%	-	4000±100	2.5 3.5 4.5 5.5 6.5 8.5
V-A V-B V-C V-D	Type V	94.3%	5.7%	-	4000±100	1.5 2.5 3.5 4.5
V-E		89.3%		5%		4.5
Belite	Belite(C <sub>2</sub> S>49%)	88%	2.2%(SO <sub>3</sub> base)	5%	4000±100	1.0
Slag	Type I	45%	2.5%(SO <sub>3</sub> base)	50%	5500~6000	1.7

시멘트의 특성은 KS L5103(응결축경), KS L5105(압축강도축경), KS L5106(분말도축경), KS L5120(화학분석)방법에 따라 측정하였다.

2.2.5. 콘크리트의 특성

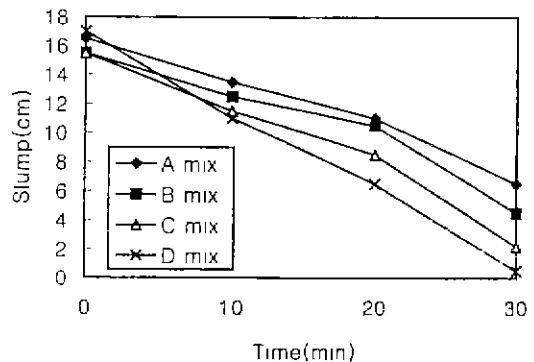
콘크리트의 특성은 KS F2401(시료채취), KS F2402(슬럼프시험), KS F2405(압축강도시험), KS F2454(원심력 강도시험) 방법에 따라 측정하였으며, 단열온도측정은 Maruto사의 adiabatic temperature lester(96-1)를 사용하였다.

3. 실험결과

3.1. 고성능감수제와 작업성

동일 콘크리트에서 감수제의 양을 달리한 콘크리트의 특성을 조사한 결과는 Table 4와 Fig 1과 같다. slump를 같이 하고 감수제와 시멘트의 양을 크게 하면 고강도는 얻어지나, 상대적으로 수화열이 커지고 작업성의 손실 (slump loss)이 커져 외관 불량이나 온도응력에 의한 균열발생으로 내구성이 떨어진다. 따라서, 감수제의 분할첨가 또는 후첨가방법이 제안되며 감수제의 사용에 따른 급

격한 유동성손실을 다소 억제할 수 있는 방법으로 추천되고 있다. 이와 같은 유동성의 손실은 시멘트입자에 혼화제의 흡착 또는 분산입자의 응집으로 발생되며 고유동, 저열, 고강도를 위한 시멘트의 개발은 혼화제의 흡착 또는 시멘트입자의 응집성이 작도록 조절해야 한다.<sup>9,10)</sup>



**Fig. 1.** Slump loss by condition of mix designs in concretes

**Table 4.** Slump Loss and Strength by Condition of Mix Designs in Concretes

Sort	Mix design				Slump loss(cm)				7ds strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Remark
	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	w/c(%)	Superplasticizer (%)	s/a (%)	0 min	10 min	20 min	30 min		
A	580	32.0	0.7	35	16.0	13.5	11.0	6.5	689	- Cement 1 - Steam curing (65°C, φ10 cm)
B		30.0	1.0		15.5	12.5	10.5	4.5	736	
C		28.5	1.3		15.5	11.5	8.5	2.2	790	
D		27.0	1.6		17.0	11.0	6.5	0.5	865	

3.2. 시멘트특성과 유동성

3.2.1. 비표면적

시멘트의 비표면적 증가는 초기 재령강도에 유리하나, 콘크리트의 유동성(작업성)을 저하시킨다(Table 5-7 참조). 동일강도를 갖도록 콘크리트를 배합할 경우 비표면적이 작은 시멘트는 단위시멘트는 증가하지만 페이스트의 점도가 작아 유동성(slump, workable time)이 비표면적이 큰 시멘트에 비해 양호하다. 이것은 비표면적이 큰 시멘트는 동일강도를 확보하기 위한 단위시멘트의 양을 작게 해도 혼화제의 흡착과 초기수화가 빨라 유동성 손실이 빨라지므로 적용제품의 생산성이 떨어진다.

3.2.2. 시멘트의 광물조성

시멘트의 광물조성도 시멘트페이스트와 콘크리트의 유동성에 크게 영향을 주고 있다(Table.8, 9 참조). 이것은 시멘트의 광물조성 특히 C<sub>3</sub>A의 함량에 따라 혼화제의 흡착량과 초기수화도가 다르기 때문으로 판단되며<sup>9)12)13)</sup> 또한, 시멘트페이스트와 콘크리트의 유동성은 공시체의 치밀충전성과도 관계가 있고 이것은 강도특성에 영향을 주고 있다.

3.2.3. 감수제의 종류

동일 시멘트도 혼화제의 종류나 성분에 따라 유동성이 달라지고 있다. 이것은 혼화제의 성분에 따라 시멘트 입자와의 흡착과 입자간의 응집성이 다르기 때문으로

Table 5. The Physical Properties of Cement 1 and 2

Cement	Fineness			w/c (%)	Setting time		Compressive strength(kg/cm <sup>2</sup> )			
	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	44 μm (%)	88 μm (%)		Initial (min)	Final (hr)	1 day	3 days	7 days	28 days
Cement 1	4050	1.7	0.0	24.5	219	6:00	142	226	265	396
Cement 2	3650	8.2	0.1	23.5	300	7:30	78	189	236	356

Table 6. The Viscosity and Mix Design of Concretes by the Condition of Cements

Cement	*Viscosity of paste				**Mix design of concrete				Slump (cm)	***Workable time(min)
	0 min	10 min	20 min	30 min	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	w/c (%)	Superplasticizer (%)	s/a(%)		
Cement 1	1470	2680	-	-	580	25.5	1.5	35	1.0	15
Cement 2	820	1070	1140	1190	610	25.0	1.5	35	4.0	40

\*w/c : 30%, superplasticizer : 1.0%, \*\*coarse aggregate : 19 mm,

\*\*\*workable time : handling time to be workable when concrete is placed and cast

Table 7. The Strength and Productivity of Concretes by the Condition of Cements

Cement	Compressive strength(kg/cm <sup>2</sup> )			Productivity (t/day)	Condition
	1 da	2 da	7 da		
Cement 1	810	850	903	330	○ Centrifugal cast
Cement 2	780	838	916	400	○ Steam curing(80°C-5hr)

Table 8. The Comparison of the Viscosity in Pastes of Cement 1 and 3

Cement	Clinker mineral(%)				Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	Condition of Mix		Viscosity(cp)			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF		w/c	Superplasticizer	0 min	10 min	20 min	30 min
Cement 1	34	35	11.9	12.0	4050	27%	1.4%	1430	2580	2690	-
Cement 3	44	32	3.3	13.5	4000	27%	1.4%	920	1040	1170	1270

Table 9. The Workability and Strength of Concretes by Cement 1 and 3

Cement	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	44 μm (%)	Mix design of concrete				Slump (cm)	Workable time(min)	7days strength (kg/cm <sup>2</sup> )
			Cement (kg/m <sup>3</sup> )	w/c (%)	Superplasticizer (%)	s/a (%)			
Cement 1	4050	2.1	580	26.3	1.5	37	1.5	15	880
Cement 3	4000	1.7	580	24.5	1.5	37	3.5	45	927

**Table 10.** The Viscosity and Workability of Concrete by Superplasticizers

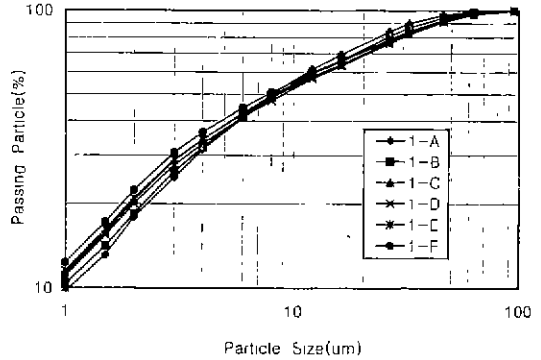
Superplasticizer	Viscosity (cp)			W/C (%)	Slump (cm)	Workable time(min)	Remark
	0 min	10 min	20 min				
Naphtalen 1	950	1750	2300	25.5	1.5±0.5	20	Cement 1 Cement : 580 kgm <sup>3</sup> s/a : 37%
Naphtalen 2	820	1340	-	24.5		15	
Naphtalen+melamin	970	-	-	25.5		10	
Melamin	1800	-	-	26.5		10	
Polycarbon acid	1160	-	-	26.0		15	

판단된다. 여기서, 페이스트의 점도와, 콘크리트의 사용 수와 성형가능 작업시간을 비교한 결과(Table 10 참조)를 보면 서로 잘 일치하였다.

이상의 시멘트광물, 비표면적, 감수제의 종류등에 따른 시멘트페이스트의 점도와 콘크리트의 작업성과의 관계(Table 5-10참조)를 볼때 콘크리트의 유동성은 페이스트의 점도를 측정하므로써 판단할 수 있었다.

**3.3. 시멘트 제조조건**

콘크리트의 유동성과 페이스트의 점도와의 관계를 시멘트의 입도와 광물특성이 콘크리트의 유동성과 제 물성에 미치는 영향을 조사하기 위해 클링커를 달리하고, 또한 분급기가 부착된 closed circuit mill를 이용하여 동일 비표면적의 시멘트에 rosin-rammer index(이하



**Fig. 2.** The particle size distribution of type I cements (blaine 4000±100 cm<sup>2</sup>/g) produced by the closed circuit mill

**Table 11.** The Relationship between the Viscosity and Particle Size Distribution of Type I Cements (Blaine 4000±100 cm<sup>2</sup>/g) Produced by the Closed Circuit Mill

Cement	Condition of manufacture				Viscosity (cp)				Condition
	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	44 μm (%)	Rosin-rammer		0 min	10 min	20 min	30 min	
			3-32 μm	1-95 μm					
I-A	4050	2.5	0.820	0.911	950	2160	2370	-	- w/c : 30% - Superplasticizer (naphthalene) : 1.0%
I-B	3940	3.6	0.784	0.893	880	2100	2370	2560	
I-C	3950	4.4	0.705	0.806	830	1790	2180	2360	
I-D	3960	5.5	0.688	0.801	690	1330	2150	2230	
I-E	3940	6.4	0.673	0.787	560	1300	1670	1720	
I-F	3970	8.0	0.651	0.770	500	1040	1270	1470	

\* Rosin-rammer index(n) ← R=100×E<sup>(b×n)</sup> R ; particle residue(%), b ; constant

**Table 12.** The Relationship between the Viscosity and Particle Size Distribution of Cements (C<sub>A</sub>:3.3%, Blaine 4000±100 cm<sup>2</sup>/g) Produced by the Closed Circuit Mill

Cement	Condition of manufacture				Viscosity (cp)				Condition
	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	44 μm (%)	Rosin-rammer		0 min	10 min	20 min	30 min	
			3-32 μm	1-95 μm					
V-A	4050	1.5	1.422	1.258	1080	1050	1180	1230	- w/c : 30% - Superplasticizer (naphthalene) : 1.0%
V-B	3950	2.5	1.102	1.109	620	660	590	640	
V-C	3960	3.5	0.693	0.838	400	420	540	560	
V-D	3970	4.5	0.676	0.798	380	420	510	570	

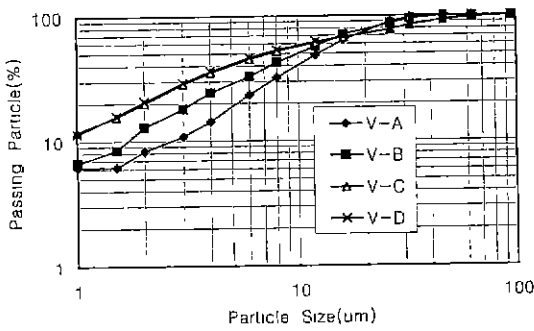


Fig. 3. The particle size distribution of cements ( $C_3A$  : 3.3%, blaine  $4000 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) produced by the closed circuit mill

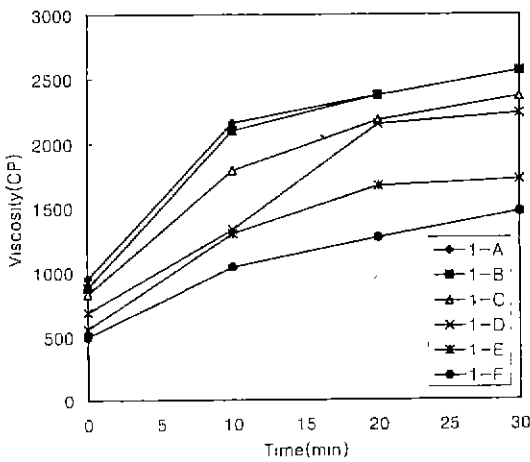


Fig. 4. The viscosity of type I cements (blaine  $4000 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) produced by the closed circuit mill

R-R지수)와  $44 \mu\text{m}$  잔사를 변화시켜 다양한 입도분포를 갖는 시멘트를 제조해 분석한 결과는 Table 11,12와 Fig. 2-5과 같다.

실험결과, 시멘트의 광물조성과 관계없이 동일브레인에서  $44 \mu\text{m}$  잔사가 크고 또한 R-R지수가 작아지면 페

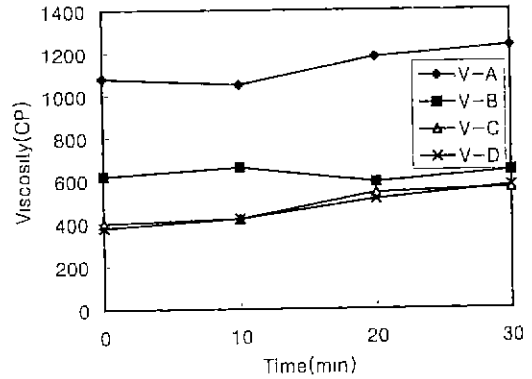


Fig. 5. The viscosity of cements ( $C_3A$  : 3.3%, blaine  $4000 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) produced by closed circuit mill and used type V clinker

이스트의 점도가 작아지는 경향이다. 이런 특성은 시멘트의 입도가 특정입도로 집중해 있는 시멘트보다는 입자가 큰 것에서 작은 입자까지 폭 넓게 분포한 시멘트가 페이스트와 콘크리트의 유동성이 양호한 것으로 판단된다 (Table 13과 Fig. 6 참조).

한편, Table 11, 12와 Fig. 2, 3의 결과에서  $C_3A$ 가 작은 시멘트는  $C_3A$ 가 큰 시멘트에 비해  $44 \mu\text{m}$  잔사가 작고, R-R지수가 큰 값을 갖어도 페이스트의 점도는 작아 유동성을 확보하는데 유리하였다. 이런 결과와 함께, 재료적인 측면에서 콘크리트의 유동성을 향상하기 위해 시멘트의 광물조성(특히,  $C_3A$ )의 조정은 적절한 조치로 판단된다.

### 3.4. 조제시멘트와 콘크리트 특성

#### 3.4.1. 뒀반죽 콘크리트의 유동성과 제 물성

광물조성과 입도특성이 다른 시멘트를 동일 blaine으로 생산하고 이때 제조된 시멘트를 뒀반죽 콘크리트 (slump 4 cm 이하)배합에 적용하여 원심성형으로 중공식 원심력공시체를 제작하고 증기양생( $80^\circ\text{C}$ , 5hr)하

Table 13. The Workability and Strength of Type I Cements (Blaine  $4000 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) Produced by Closed Circuit Mill (condition : w/c fix)

Cement	Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	44 $\mu\text{m}$ (%)	Mix design of concrete				Slump (cm)	Workable time(min)	7days strength ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )
			Cement ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	w/c (%)	Superplasticizer (%)	s/a (%)			
1-A	4050	2.5	580	26.5	1.5	37	1.0	15	890
1-B	3940	3.6					3.4	20	923
1-C	3850	4.4					7.0	25	934
1-D	3960	5.5					7.5	40	955
1-E	3940	6.4					9.0	50	964
1-F	3870	8.0					11.0	60	968

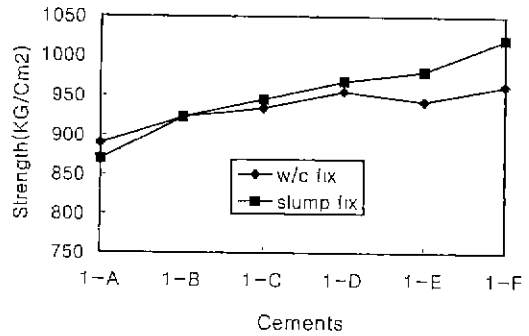
**Table 14.** The Workability and Strength of Type I Cements (Blaine  $4000 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) Produced by Closed Circuit Mill (condition : slump fix)

Cement	Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	44 $\mu\text{m}$ (%)	Mix design of concrete				Slump (cm)	Workable time(min)	7days strength ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )
			Cement ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	w/c (%)	Superplasticizer (%)	s/a (%)			
I-A	4050	2.5	580	26.5	1.5	37	2.5	15	890
I-B	3940	3.6		25.5	1.3		3.5	25	923
I-C	3850	4.4		25.0			3.3	25	945
I-D	3960	5.5		24.7			3.6	25	968
I-E	3940	6.4		24.5			3.8	35	989
I-F	3870	8.0		24.2			3.3	40	1020

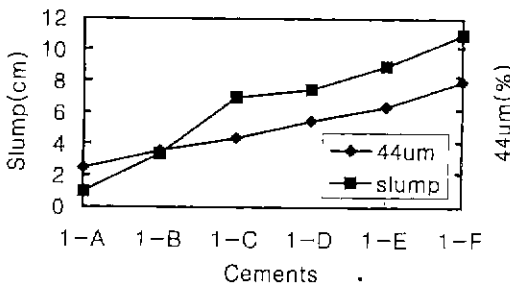
**Table 15.** The Workability and Strength of Cements ( $C_3A : 3.3\%$  Blaine  $4000 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) Produced by Closed Circuit Mill (condition : w/c fix)

Cement	Blaine ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	44 $\mu\text{m}$ (%)	Mix design of concrete				Slump (cm)	Workable time(min)	7days strength ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )
			Cement ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	w/c (%)	Superplasticizer (%)	s/a (%)			
V-A	4000	1.5	580	23.5	1.3	37	2.5	25	945
V-B	3950	2.5					4.0	45	950
V-C	3960	3.5					5.3	60	955
V-D	3940	4.5					5.2	60	980

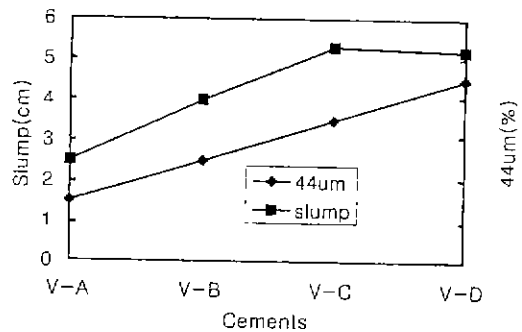
로서 강도와 유동성을 종합 평가하였다. 이때, 조제시멘트는 페이스트의 점도특성과 같이 입도의 R-R지수가 작고 44  $\mu\text{m}$  잔사가 클수록 콘크리트의 유동성(단위수량, slump, workable time)이 좋아지고 강도가 증가하는 경향이다(Table 13-15, Fig. 6-8 참조). 동일 blaine의 시멘트에서 강도증진은 콘크리트의 유동성이 양호해 성형성이 좋아지고 이에 따라 공기체가 치밀하게 충전된 효과로 판단된다. 한편 시멘트의 광물조성에 따른 콘크리트의 유동성과 강도특성은(Table 13, 15 참조)  $C_3A$ 가 작은 클링커를 사용한 시멘트가  $C_3A$ 가 큰 클링커를 사용한 시멘트에 비해 피분쇄성의 저하로 동일 blaine에서 44  $\mu\text{m}$  잔사가 작게 제조되었지만 Fig. 4, 5와 같이 페이스트의 점도가 작고 콘크리트의 유동성과 강도도 양호하였다. 이것



**Fig. 7.** The strength of type I cements (Blaine  $4000 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) produced by closed circuit mill



**Fig. 6.** The relationships between slump and 44  $\mu\text{m}$  residue of type I cements (Blaine  $4000 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) produced by closed circuit mill



**Fig. 8.** Slump and 44  $\mu\text{m}$  residue of cements ( $C_3A : 3.3\%$ , Blaine  $4000 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) produced by closed circuit mill

**Table 16.** The Workability and Physical Properties of Cements in High Performance Concrete

Cement	Design (%)		Condition of materials (kg/m <sup>3</sup> )			Slump (cm)	Slump loss (cm)			Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )		
	w/c	s/a	Cement	Water	s-plasticizer		0 min	30 min	60 min	3ds	7ds	28ds
V-E	30.5	45	525	160	6.24	25	25.0	23.5	21.8	607	715	839
	31.0	45	500	155	6.30	26	25.0	21.5	21.3	624	679	827
Belite cement	33.3	45	525	175	6.24	25	25.0	21.0	18.5	401	496	762
Slag cement	33.9	45	525	178	6.24	25	24.5	18.9	12.8	425	618	780

**Table 17.** The Workability and Physical Properties of Cements in High Performance Concrete

Cement	Slump flow (cm)	Adiabatic temperature (°C)			V-lot (sec)	Remark
		1d	3ds	7ds		
V-E	60×61	35.0	56.0	58.0	44	C <sub>3</sub> A : 3.3%, 44 μm residue : 4.5% Blaine : 4000 cm <sup>2</sup> /g, Slag 5%
	60×61	35.0	52.0	53.0	∞	
Belite cement Type I cement	63×61	32.0	50.0	52.0	∞	s-maker, 44 μm residue : 2.1% s-maker, cement : 525 kg/m <sup>3</sup>
	-	47.0	62.0	62.6	∞	

도 앞서 기술한 것같이 C<sub>3</sub>A가 작은 클링커를 사용한 시멘트가 C<sub>3</sub>A가 큰 클링커를 사용한 시멘트에 비해 요구수량이 작고 유동성과 성형성이 좋아 공시체의 치밀충전으로 강도가 증진되는 것으로 판단된다.

#### 3.4.2. 진반죽 고강도 콘크리트의 유동성과 제 물성

Closed circuit mill을 이용하여 44 μm 잔사가 4.5%이고 비표면적을 4000±100 cm<sup>2</sup>/g으로 분쇄한 V-E 시멘트(C<sub>3</sub>A:3.3%, slag 5%)와, 콘크리트의 고유동, 저열, 고강도를 위해 유통되는 시멘트를 고유동 고강도콘크리트배합조건으로 혼합하여 제 물성을 상호비교한 결과는 Table 16, 17과 같다.

제조된 V-E 시멘트는 동일 slump를 확보하기 위한 단위수량과 slump loss가 작았으며 V-Lot Test(일정 V형의 용기에서 배출되는 시간)결과도 비교시멘트(Table 3참조)에 비해 양호하고 콘크리트의 단열온도 측정값도 작아 고유동 저열 고강도콘크리트제조에 적합한 시멘트로 평가되었다. 이런 결과는 시멘트화학과 생산기술을 접목하여 광물조성과 입도특성을 조정한 시멘트를 계획한 결과로 판단되며 이와 같은 결과에서 근자에 다양하게 검토되고 있는 고유동 저열 고강도시멘트의 기술개념은 수정될 필요가 있다고 생각된다.

## 4. 고 찰

대형건설공사용으로 주목되고 있는 고유동, 저열, 고강도용 시멘트의 개발은 시멘트화학이론과, 입도특성 등 생산기술이론이 함께 고려되어 검토할 필요가 있다. 통상적인 기술개념에서 검토되고 시험적용되는 고유동,

저열시멘트는 C<sub>3</sub>A함량이 적은 시멘트에 다량의 혼합재(slag, fly ash, silica fume 등)가 첨가된 2성분계 또는 3성분계의 혼합시멘트가 주류를 이루고 있는데, 이런 시멘트는 저열특성에는 유효한 결과가 보고되고 있으나, 초기강도와 유동성을 위해 고성능감수제사용과 고분말화(high blaine)로 인해 초기에 확보된 유동성이 급속하게 상실되고 또한 장기내구성(중성화, 동결융해 등)에 문제가 발생하고 있다.

이런 원인을 분석하면 콘크리트의 유동성에 손실은 화학적인 요인과 물리적인 요인으로 구분되는데, 화학적 요인으로 볼 때 시멘트의 유동성손실은 주로 첨가된 고성능감수제가 시멘트입자의 표면에서 흡착(adsorption), 흡수(absorption), 수착(sorption) 및 층간화합물등을 형성하므로써 소비되고 있으며 이런 고성능감수제의 포화흡착량이 큰 시멘트는 시멘트의 유동성손실이 크다.(Table 8 참조) 이것은 많은 양의 감수제가 수화물(칼슘알루미늄에이트수화물)에 흡착되어 성능이 발휘하지 못하기 때문으로 이런 감수제의 흡착량은 Table 5-10에서와 같이 시멘트내의 C<sub>3</sub>A 함량, 분말도에 좌우되고 있다. 또한, 시멘트의 알칼리와 SO<sub>3</sub>도 페이스트와 콘크리트의 유동성에 영향인자로 보고되고 있는데, 알칼리성분은 감수제의 흡착량은 작지만 초기수화촉진으로 유동성을 저하시키며 SO<sub>3</sub>는 유동성을 향상하는 영향인자로 분류하고 있다.<sup>12,13)</sup> 이와 같은 시멘트화학이론으로 볼때 C<sub>3</sub>A함량이 적은 V계열의 시멘트가 C<sub>3</sub>A함량이 큰 I계열의 시멘트보다 점도가 작고(Table 11, 12 참조) 또한 콘크리트의 slump, workable time, slump loss, slump-flow등 유동특성이 양호한 것



(Table 13-15, Fig. 6-8 참조)을 보아 유동성과 저열특성의 시멘트재료로서  $C_3A$  함량이 적은 클링커의 선정은 타당하다고 볼 수 있다. 그러나, 이런 계열의 시멘트는 저열화를 위해 다량의 혼합재(slag, fly ash, silica fume 등)가 첨가되므로써 고분말화와 감수제의 과잉첨가가 요구되며 이에 따라 유동성손실이 불가피하게 발생되고 있다.

따라서 물리적인 요인으로써 생산조건을 변경해 시멘트의 입도조정을 하였으며, 시멘트의 고분말화 과정으로 분급기가 부착된 closed circuit mill을 이용할 때 입도조정은 시멘트의 유동성향상과 초기강도를 개선하는 중요한자임을 확인하였다. 이런 유동성의 개선은 시멘트의 입도조정에 의한 물리적인 개선효과로 판단된다. 일반적으로 시멘트 또는 콘크리트를 혼합하기 위해 사용된 물의 많은 양은 시멘트입자사이의 공극을 채우거나 상호입자간에 윤활작용으로 사용되는데, 여기서 콘입자사이의 공극에 작은 입자가 이상적으로 채워질 때 혼합수는 최소화되고 시멘트의 유동성이 커진다. 이것이 넓은 입도분포를 갖는 시멘트가 좁은 입도분포를 갖는 시멘트에 비해 더 적은 공극을 갖으며 이에 따라 적은 혼합수가 요구되는 원인이다. 이런 특성과 현상은 비표면적이 동일하면 R-R지수가 크고 position parameter(63.8%의 잔사에서의 입경)이 작을수록, position parameter가 일정하면 R-R지수가 증가하고 비표면적이 작을수록, R-R지수가 일정하면 비표면적이 증가하고 position parameter가 작을수록 혼합수가 증가되며 이런 현상이 역이면 반대결과가 된다.<sup>17-20)</sup> 고유동,저열,고강도화를 위해 비표면적  $4000 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$ 범위에서 클링커의 종류를 달리하고 closed circuit mill을 이용하여 시멘트의 광물조성과 입도를 조정한 결과, 사용클링커에 관계없이 유동성은 R-R지수가 작아지고  $44 \mu\text{m}$  잔사가 클수록 유동성과 성형성이 양호해지고 또한 강도특성은 성형성이 양호하므로써 동일 비표면적, 재료조건이라 해도 증진되었다.

실용적인 평가를 위해 원심력을 주된 성형조건으로 하는  $800 \text{ kg/cm}^2$  이상의 된반죽 콘크리트에서는 W/C는 약 2-3%정도 감소하고 성형가능한 작업시간(30-60분)도 2-3배정도로 증가되었다. 또한 범용적 사용을 고려하여 고강도, 고유동, 저열특성을 요구하는 진반죽 콘크리트배합에 적용한 결과는, 비교대상으로 한 초저열계의 시멘트와 고분말 슬레그를 혼합한 시멘트 (blaine  $8000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , slag 50%)에 비해 모든 물성에서 동등 또는 그 이상의 품질이 확보되었다.

이상의 결과를 종합할 때, 대형건설에서 주목하고 있는 고유동, 저열, 고강도특성의 시멘트개발은 시멘트화학이론과, 시멘트의 입도특성을 고려한 입도조정 기술

이 도입될 필요성이 있다.

### 5. 결 론

Closed circuit ballmill를 이용하여 시멘트의 광물조성을 달리하고 입도특성을 조정한 시멘트를 조제하여 시멘트와 콘크리트의 유동성과 제 불성에의 영향을 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 고유동, 저열화를 위한  $C_3A$  함량제한과 다량의 혼합재의 사용은 초기강도의 저하로 비표면적의 증가가 요구되며 이런 고분말화는 필연적으로 유동성의 저하를 발생시키나 시멘트의 입도(R-R지수: 0.7이하,  $44 \mu\text{m}$  잔사: 5.5%이상)를 제어할 때 작은 비표면적을 갖는 시멘트와 같은 유동성과 작업시간확보가 가능하다.
2.  $C_3A$  함량 4%이하의 클링커를 사용하고 R-R지수 0.7이하,  $44 \mu\text{m}$  잔사 4% $\pm$ 0.5%에서 비표면적을  $4000 \pm 100 \text{ cm}^2/\text{g}$ 으로 조제한 V-E시멘트(slag 5-10%첨가)는 초저열계의 시멘트와 비교할 때 동일강도의 콘크리트배합에서 유동성과 단열온도측정값이 양호하였다.
3. 이상의 결과에서 고유동 저열 고강도콘크리트를 위한 시멘트의 기술개념은, 다량의 혼합재(slag, fly ash)을 사용하는 2성분 또는 3성분계의 시멘트의 개발에서 저함량의  $C_3A$ 클링커를 사용하고, 입도조정 및 소량의 혼합재(5-10%)가 첨가된 1성분계 또는 2성분계의 시멘트개념으로 전환이 바람직하다.

### REFERENCES

1. 羽原俊祐, 飛内圭之, "低發熱セメント," *セメント 콘クリト*, No.535, 12-24 (1991).
2. 中野錦一, "超低發熱セメント," *セメント 콘クリト*, No.563, 2-12 (1994)
3. A. Aguado, R. Gettu, S.P. Shah, "Concrete Technology; new trend, applications," RILEM, 177-195, E & FN Spon, London, 1995.
4. K. Ganesh Bau, "High Performance Concrete," *ICI-IWC-93*, 3, 169-180 (1993).
5. Peter J.M. Batos, "Special Concrete; Workability and Mixing" RILEM, 131-143 E & FN Spon, London, 1995.
6. W.F. Perenchio, D.A. Whiting, D.L. Kantro, "Water Reduction, Slump Loss and Entrained Air-Void Systems as influenced by Superplasticizers" *ACI SP62*, 137-166 (1979)
7. Kenichi Hattori, "Experiences with Superplasticizer in Japan" *ACI SP62-3*, 37-66 (1979).
8. H. Kasami, T. Ikeda, "On Workability and Pumpability of Superplasticized Concrete," *ACI SP62-4*, 67-85 (1979).

9. L.M. Meyer, W.F. Perenchio, "Theory of Concrete Slump Loss as related to the Use of Chemical Admixtures," Concrete International, Jan, 36-43 (1979)
10. 服部健一, "流動コンクリトについて" セメント技術年報 Vol.30, 254-258 (1976).
11. 長瀧重義, "高性能減水濟を添加したコンクリトのスランフロス" セメントコンクリト, 418, 28-33 (1981).
12. 服部健一 "高性能減水濟のセメント粒子への吸着" セメントコンクリト, No.416, 10-18 (1981).
13. 服部健一 "普通ホルトランドセメントの性質と高性能減水濟による分散" セメント技術年報 Vol.38, 122-125, (1984).
14. I. Mieke, A. Muller, J. Stark, "Active Belite Cement," Proc. 9th Inter. Cong. Chem. Cem. Vol.I, 399-405 (1992).
15. S.I. Ivashchenko, "Cement Based on Modified Portland and Sulfoaluminate-Belite Clinkers," Proc. 9th Inter. Cong. Chem. Cem. Vol.I, 222-226 (1992).
16. 吉田 孝三郎, 高橋俊之, "ヒ-ライトセメント," セメント・コンクリト, No.548, 29-35 (1992).
17. S. Sprung, H.G. Ellerbrock, K. Kuhlmann "Particle Size and Properties of Cement; Water Demand of Cement" ZKG(translation), No.11, 275-281 (1985).
18. H.G. Ellerbrock, S. Sprung, K. Kuhlmann "Particle Size and Properties of Cement; Influence of the Grinding Process" ZKG(translation), No.3, 55-58 (1990).
19. K. Kuhlmann, H.G. Ellerbrock, S. Sprung, "Particle Size and Properties of Cement; Strength of Cement" ZKG(translation), No.6, 136-144 (1985).
20. Hiroshi Uchikawa "Influence of Fineness and Particle Size Distribution of Cement on Fluidity of Fresh Cement Paste, Mortar and Concrete," 小野田研究報告, Vol.42 No.1 75-84 (1990).