

# 특수시멘트 고품화재를 이용한 지정폐기물의 고형화/안정화(Ⅲ)

## Solidification/Stabilization of Hazardous Wastes Using Cementitious Materials(Ⅲ)

임 채 용\*    구 기 대\*\*    엄 태 선\*\*\*    이 종 열\*\*\*\*    최 롱\*\*\*\*\*    오 병 환\*\*\*\*\*  
I, Chae Yong    Ku, Ki Dae    Um, Tae Sun    Lee, Jong Ryul    Choi, Long    Oh, Byoung Hwan

### ABSTRACT

This study concerns the cement-solidification/stabilization of the waste with high concentration heavy metals. Compressive strength and leaching test of heavy metals were evaluated for different types of cements and the effect of the additives of Hauyne clinker and slag were also discussed.

Using ordinary portland cement, rapid hardening portland cement and the cement with additives as solidification materials, it shows that the strength and stability of concrete is satisfactory and the superiority is in the order of rapid hardening portland cement > the cement with additives > ordinary portland cements.

### 서    론

지난 수십 년 간 경제 정책은 지속적인 고성장 위주로 이루어져 사회 전 분야에서 급진적인 발전이 이루어졌다. 급격한 산업 발달 및 생활 환경은 각종 유해한 폐기물을 양산하고 있으며, 이러한 생활 산업폐기물의 적절하고 안정적인 처리와 재활용 방안에 대한 대책 제시는 국가적 번영에 있어 심각한 현안으로 나타나고 있다. 특히 IMF 외환위기로 인한 처리업체의 부도 증가로 사업장 폐기물이 방치되고 경기활성화 등의 양적 성장 위주 정책으로 인하여 토양·하천 등의 환경 훼손문제가 심각하게 제기되고 있다. 이와 같이 폐기물 처리 등에 관한 환경문제 해결 의지가 감소되고 그에 따른 대책 개발이 도외시된다면, 이는 향후 국내외 산업활동의 전반에 커다란 장애요인으로 작용할 것이다. 따라서 천연 자원의 고갈을 해소하고, 품질에서도 문제되지 않는 효과적인 방법으로는 폐기물을 재활용(Recycling)하는 방법이며, 이 방법은 각종 산업폐기물들을 해결하는데 가장 적절한 방법으로(Green Recycle) 제품 규격 등 사회적인 관심을 불러일으키고 있다. 따라서 본 연구는 산업부산물 폐기물들을 고품화 하기 위한 시멘트의 품질 및 사용기준을 결정하여 건설 재료로 활용 될 가능성 고찰하고, 특수 고품화재를 사용한 폐기물 고품화 제품을 제조하여 각종 특성 평가를 수행함으로써 시멘트 고품화의 안정성을 평가하였다.

### 실험계획 및 사용재료

\*    정회원, 쌍용중앙연구소 주임연구원  
\*\*\* 정회원, 쌍용중앙연구소 책임연구원  
\*\*\* 정회원, 쌍용중앙연구소 소장

\*\*    정회원, 쌍용중앙연구소 위촉연구원  
\*\*\*\* 정회원, 쌍용중앙연구소 수석연구원  
\*\*\*\*\* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

## 2.1. 실험계획

본 연구에서 폐기물을 고형화하기 위해 사용한 콘크리트는 1종보통포틀랜드시멘트, 3종포틀랜드시멘트, 아원계 특수시멘트 고화재(아원계 클링커, 무수석고, 고로슬래그미분말)를 사용하였다. 이때 고형화특성을 평가하기 위한 시험항목은 압축강도, 길이변화, 동결융해 저항성, 중금속용출 등이었다.

## 2.2. 사용 재료

### 2.2.1. 폐기물 종류별 성분

대상 폐기물의 성분은 표 1과 같다. 소각재의 경우  $Cl^-$ ,  $SO_3$ ,  $P_2O_5$ ,  $SO_3$  등이 많으며, 제강 더스트는 주성분이  $Fe_2O_3$ 이고  $Cl^-$ 도 상당히 많다. 한편 도금슬러지는 금속성분을 다량 포함하고 특히 유해중금속(Cr, Cu)이 많았다.

표 1. 폐기물 분석

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	NaO	K <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>	LOI	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	수분
비산재	15.2	5.6	0.8	38.5	3.9	0.28	0.22	22.9	20.2	2.26	11.7	0.8
제강 더스트	3.4	5.1	64.2	7.5	3.3	0.28	0.63	8.79	6.4	-	-	-
도금슬러지	Na	Mg	Al	Si	P	S	Ca	Cr	Fe	Ni	Cu	Zn
	3.15	7.04	8.22	3.73	3.19	9.43	21.9	12.0	4.37	14.0	9.0	4.0

### 2.2.2. 고화재

폐기물 고화에 사용한 각 시멘트별 물리성능은 다음의 표 2와 같다.

표 2. 시멘트 품종별 물리성능

시멘트 품종	응 결 시 간			압축강도(kg/cm <sup>2</sup> )			길이변화율( $\times 10^{-4}$ )		
	W/C(%)	초결(min)	종결(hr:min)	3일	7일	28일	수중1주	기건1주	기건4주
1종시멘트	24.1	251	6:30	223	310	391	0.87	-1.69	-4.06
3종시멘트	25.4	175	4:55	290	365	455	-	-	-

## 2.3. 실험 방법

### 2.3.1. 실험방법 및 규격

표 3. 특수고화재 혼합비

구 분	고형화재료 첨가비				
	시멘트		슬래그미분말 (%)	아원클링커 (%)	무수석고 (%)
	종류	사용량(%)			
도금 슬러지	3종	60	20	14	6
소각재	1종	70	20	5	5
전기로 더스트	1종	90	-	5	5
	3종	90	-	6	4

표 3과 4에 의해 배합한 시료를 KS F 2403에 의해 콘크리트 공시체를 제작하여 재령별로 압축강도를 측정하였으며, KS F2424에 의해 길이변화를 측정하였다. 중금속 고정특성은 부서진 시편을 5mm이하로 파쇄, 폐기물 공정시험법에 의해 용출조작 하여 ICP Mass 로 측정하였다.

◀ 각 지정 폐기물별 추천 특수고화재의 혼합조건

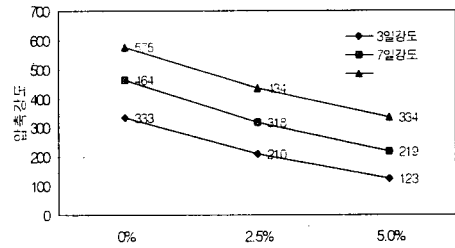
표 4. 시멘트 고품화재를 사용한 경계블록의 배합 조건

폐기물 종류	사용시 멘트/고 화재	I.D.	폐기물 (%)	W/C (%)	S a (%)	단위재료량(kg/m <sup>3</sup> )				
						C	폐기물	W	S	G
도 금 슬 러 지	1종	1DS00	0	40	65	350	0	141	1231	681
		1DS05	2.5	43		350	47	151	1184	655
		1DS10	5	49		350	91	171	1123	621
	3종	3DS05	2.5	47		350	46	165	1160	642
		3DS10	5	49		350	91	172	1119	619
		3DS10S	5	54		315	92	170	1140	631
	특수 고화재	SDS05	2.5	47		350	46	165	1160	642
		SDS10	5	55		350	88	192	1088	602
		SDS10S	5	60		315	90	190	1109	613
소 각 재	1종	1FA00	0	40	65	350	0	140	1233	682
		1FA05	2.5	42		350	41	147	1191	659
		1FA10	5	48		350	81	168	1127	624
	3종	3FA05	2.5	48		350	40	168	1155	639
		3FA10	5	51		350	79	180	1107	612
		3FA10S	5	54		315	81	170	1140	631
	특수 고화재	SDS05	2.5	48		350	40	168	1155	639
		SFA10	5	51		350	79	180	1107	612
		SFA10S	5	54		315	81	170	1140	631
전 기 로 터 스 트	1종	1JD00	0	40	65	350	0	140	1233	682
		1JD10	5	47		350	153	166	1130	625
		1JD15	10	48		350	304	168	1187	656
		1JD20	15	48		350	456	168	1187	656
	3종	3JD00	0	42		350	0	147	1220	675
		3JD15	10	55		350	293	193	1143	633
		3JD20	15	56		350	438	195	969	536
		3JD20S	15	67		315	436	210	964	533
	특수1종 (중기)	1SJD10	10	47		350	305	166	1071	592
		1SJD15	15	50		350	451	176	997	552
		1SJD15S	15	53		315	463	168	1024	567
	특수3종 (중기)	3SJD10	10	53		350	296	187	1038	574
		3SJD15	15	54		350	442	190	976	540
		3SJD15S	15	59		315	452	185	999	553
	특수1종 (기전)	1SJD10	10	47		350	305	166	1071	592
		1SJD15	15	50		350	451	176	997	552
		1SJD15S	15	53		315	463	168	1024	567
	특수3종 (기전)	3SJD10	10	53		350	297	184	1042	577
		3SJD15	15	54		350	442	190	976	540
		3SJD15S	15	59		315	452	185	999	553

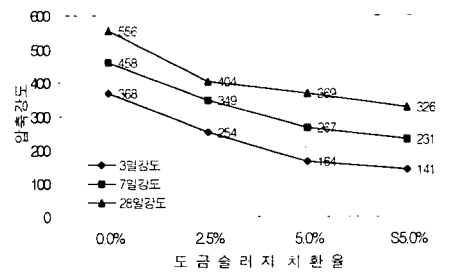
3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도 및 길이변화

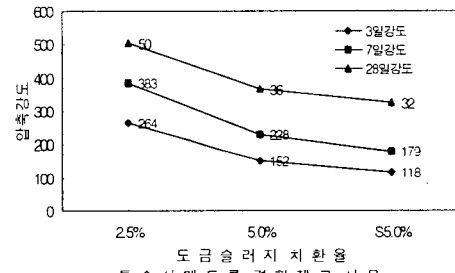
3.1.1 압축강도



a. 1종 시멘트를 결합재로 사용



b. 3종 시멘트를 결합재로 사용



c. 특수시멘트를 결합재로 사용

그림 1. 도금슬러지 사용량에 따른 결합재 종류별 콘크리트 압축강도

도금슬러지를 표 4의 배합조건과 같이 잔골재 사용량의 각각 2.5%, 5.0%를 첨가하여 공시체를 제작하고 재령별 압축강도를 측정한 결과, 도금슬러지의 양이 증가할수록 강도는 저하하였고, 고품화 강도는 3종시멘트 > 특수시멘트 > 1종시멘트 순으로 고품화 강도가 나타났다.

소각재를 잔골재 사용량의 2.5%, 5.0% 사용하여 재령별 고품과 강도를 측정하였다. 도금슬러지 사용량에 따른 배합조건과 마찬가지로 소각재의 양이 증가할수록 강도가 저하하였으며, 3종시멘트 > 특수시멘트 > 1종시멘트 순으로 고품화 강도가 양호하게 나타났다.

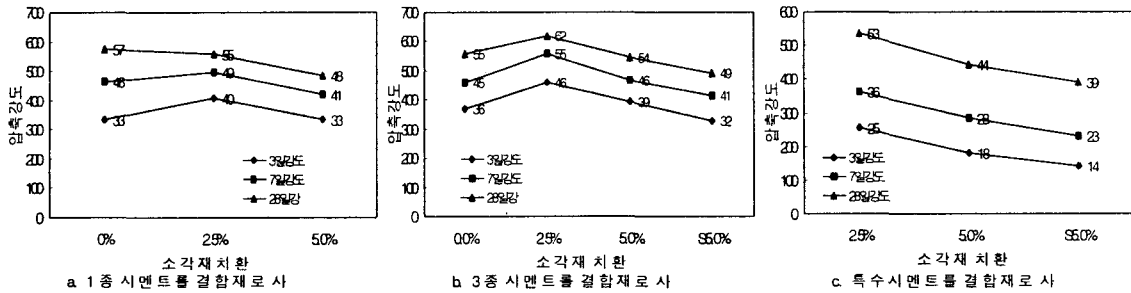


그림 2. 소각재 사용량에 따른 결합재 종류별 콘크리트 압축강도

제강 더스트를 잔골재 사용량의 10%, 15% 사용하여 고품화 강도를 측정하였다. 아원계 특수고화제를 사용할 때의 양생은 기건과 수증양생으로 하였다. 3종시멘트 > 특수시멘트 > 1종시멘트 순으로 고품화 강도가 나타났으며, 특수고화제를 사용시 증기양생 할 때가 기건양생을 할 때보다 고품화 강도가 크게 나타났다.

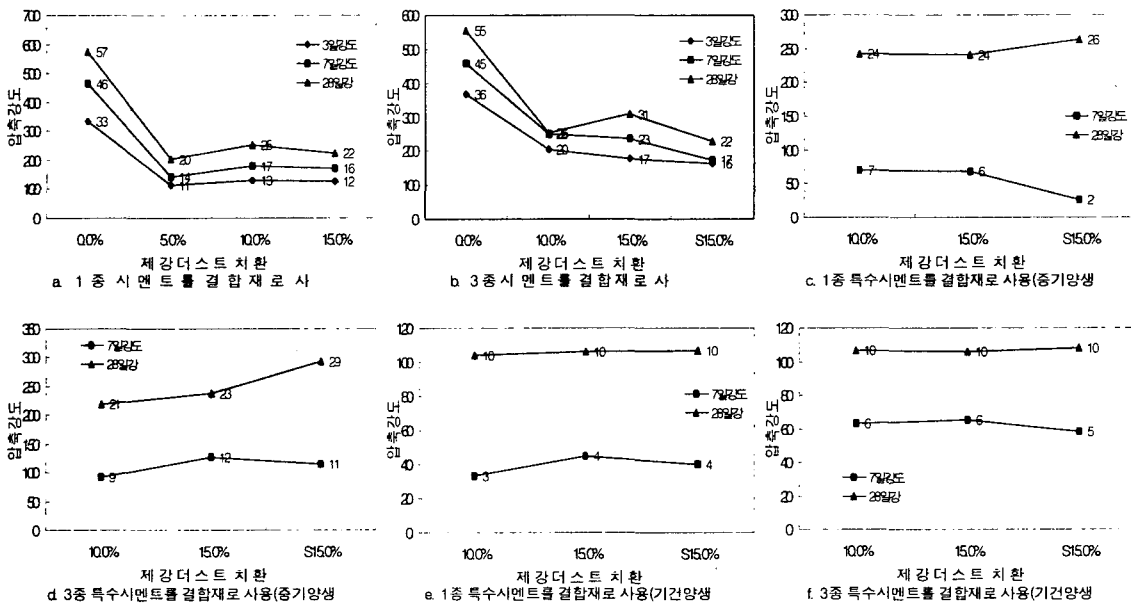


그림 3. 제강 더스트 사용량에 따른 결합재 종류별 콘크리트 압축강도

### 3.1.2. 길이변화

길이변화는 그림 4와 같다. 특수고화제를 사용할 때 제강 더스트는 증기양생한 것 보다 기건양생한 것이 수축이 적었다. 그리고 전반적으로 1종시멘트를 고화제로 사용한 것보다 3종시멘트를 고화제로 사용시 수축이 더 크게 나타났다.

## 3.2. 콘크리트의 내구성능 평가 실험

### 3.2.1 동결융해 저항성 시험

동결융해 시험결과는 그림 5와 같다. 도금슬러지, 소각재, 제강더스트 3종류 모두 동결융해에 대한 저

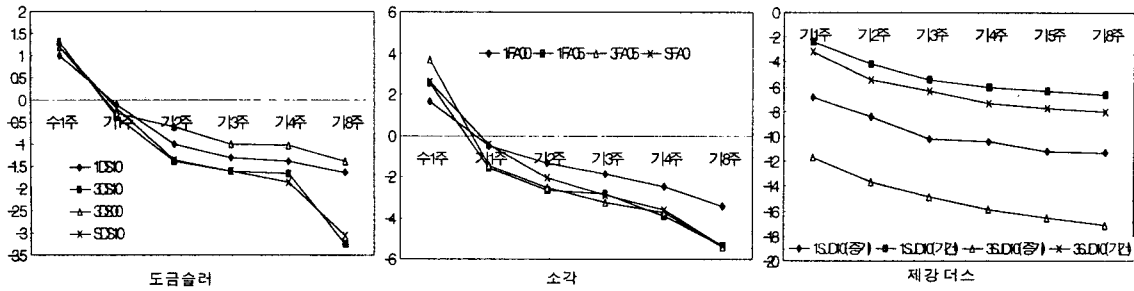


그림 4. 폐기물별 각 재령별 길이변화

항성이 어느 정도 나타나고 있다. 3종시멘트 > 1종시멘트 > 특수시멘트 고화재 순으로 동결융해 저항성이 나타났다.

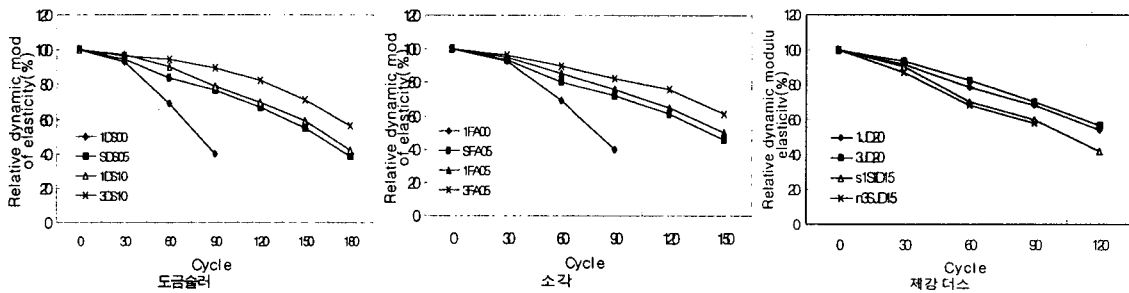


그림 5. 폐기물 종류별 콘크리트의 동결융해 저항 특성

### 3.2.2 중금속 용출시험

표 5. 폐기물 종류별 콘크리트의 중금속 용출시험 결과

I.D.	Cd(ppm)	Pb(ppm)	Cu(ppm)	Cr <sup>6+</sup> (ppm)		
				중기	표준	
환경기준치	0.3	3.0	3.0	1.5	58	
도금슬러지	tr	tr	14.6	tr	tr	
소각재	tr	7.42	0.95	tr	tr	
제강 더스트	0.02	3.73	0.47	15	15	
1	1DS10	tr	tr	1.1	4	1
2	3DS10	"	"	0.8	3	1
3	3DS10S	"	"	0.9	4	1
4	SDS10	"	"	1.6	6	2
5	SDS10S	"	"	2.1	8	2
6	1FA10	"	"	0.1	tr	1
7	3FA10	"	"	0.1	"	1
8	3FA10S	"	"	0.1	"	1
9	SFA10	"	"	0.1	0	1
10	SFA10S	"	"	0.1	0	tr
11	1JD10	tr	tr	0.1	0	1
12	1JD20	"	"	0.1	1	1
13	3JD15	"	"	0.1	0	1
14	3JD20	"	"	0.1	1	1
15	3JD20S	"	"	0.1	1	1
16	SJD20	"	"	0.1	-	1
17	1SJD15	"	"	0.2	9	-
18	1SJD15S	"	"	0.2	10	-
19	3SJD15	"	"	0.2	5	-
20	3SJD15S	"	"	0.2	6	-
21	1SJD15	"	"	0.2	9	-
22	1SJD15S	"	"	0.2	9	-
23	3SJD15	"	"	0.1	8	-
24	3SJD15S	"	"	0.1	9	-

\* 1~15 : 중기양생→수중양생, 16 : 수중양생, 17~20 : 중기양생→기건양생, 21~24 : 기건양생

중금속 용출시험 결과는 표 5와 같다. 양생을 증기, 표준양생한 결과 폐기물의 용출량이 증기양생을 하였을 때 Cr<sup>6+</sup>이 환경기준치를 초과되었지만, 표준양생을 하였을 때는 환경기준치 이하로 용출되었다..

#### 4. 경계블록 제조를 위한 추천 배합 선정

표 4의 배합설계에서 현장에서의 변수를 감안하고, 도금슬러지는 중금속 용출시험에서 기준치를 초과하므로 양을 줄여 2%, 소각재는 6%, 제강 더스트도 기준치를 초과하기 때문에 양을 줄여서 2%, 4%를 치환하여 현장 추천 배합설계를 하였다.

표 6. 경계블록 제조를 위한 추천 배합

폐기물 종류	사용시멘트 /고화재	I.D.	폐기물 (%)	Mix (ℓ)	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m)				
							C/M	폐기물	W	S	G
도금슬러지	1종	Plain	0	350	42	65	122.5	0.0	52.0	431.5	238.8
		1DS20	2	350	43	65	122.5	13.0	53.0	413.8	228.9
	3종	3DS20	2	350	43	65	122.5	12.9	53.0	410.9	227.3
	특수	SDS20	2	350	42	65	122.5	12.5	51.0	399.0	220.7
소각재	1종	1FA60	6	350	40	65	122.5	33.0	49.0	381.1	210.8
		Plain	0	350	42	65	122.5	0.0	52.0	417.6	231.0
	3종	3FA60	6	350	41	65	122.5	32.6	50.0	376.7	208.4
		특수	SFA60	6	350	41	65	122.5	33.2	50.0	383.3
제강더스트	1종	1JD20	2	350	41	65	122.5	21.7	50.0	414.4	229.3
		3JD20	2	350	39	65	122.5	20.9	48.0	400.1	221.4
	3종	3JD40	4	350	39	65	122.5	41.9	48.0	392.0	216.9
		특수1종	1SJD20	2	350	37	65	122.5	21.6	45.0	412.6
	특수3종	3SJD20	2	350	37	65	122.5	20.8	45.0	397.9	220.1

#### 5. 경계블록 제조 및 특성 평가

현장에서 표 6에 의해 경계블록을 만들어 압축강도 측정결과 도금슬러지는 220~360kgf/cm<sup>2</sup>, 소각재는 227~330kgf/cm<sup>2</sup>, 제강 더스트는 270kgf/cm<sup>2</sup>가 측정되었으며, 휨강도, 길이변화, 염소이온투과, 동결융해저항성, 중금속 용출시험 등 종합적인 내구성 평가실험이 수행 중이다.



#### 6. 결론

- 1) 도금슬러지는 3종시멘트, 소각재는 특수시멘트 고화재가 효과가 있고, 제강 더스트는 3종시멘트 고화재의 효과가 좋은 것으로 나타났다.
- 2) 시멘트 고화재를 사용하여 폐기물을 고형화하기에 적당한 양은 도금슬러지 2%, 소각재 6%, 제강 더스트는 2% 정도가 적정하다고 판단된다.
- 3) 지정폐기물을 첨가하여 경계블록/보강도 블록을 제작함에 있어서 processing, 지정폐기물의 저장과 feeding 문제가 해결이 되면 제품을 생산하는데 문제가 없을 것으로 판단되며, 제품 생산을 위해 폐기물 고형화 제품의 품질관리 기준을 선정하는 것이 필요하다.

#### 참고문헌

1. 쌍용양회공업(주), 산업기반기술개발사업 1차년 중간보고서, 2000, 고화재를 이용한 지정폐기물의 고형화기술개발.
2. 신항식, 1994, "시멘트고형화에 의한 유해폐기물의 처분"(기술논총(技術論叢), 한국과학기술원 9.