

시멘트를 이용한 도금 슬러지 고형화에 대한 실험적 연구

An Experimental Study on Stabilization/Solidification of Plated Sludge using Cement

김 남 중* 김 광 서**
Kim, Nam-jung Kim, Kwang-seo

Abstract

Radical development has been made in the every field of our society for the past scores of years. Radical development of industry and living environment has mass-produced various toxic wastes, which comes to the fore as a serious environmental problem. The purpose of this is to suggest the optimum mix design by studying the utility of a toxic waste, plated sludge as a building material and deciding the standards of quality and use of cement and evaluating the properties of mortar and concrete in which plated sludge mixed. From an experiment, compressive strength required high early strength cement or special cement. Watertightness proved to be excellent. Heavy metals, such as Cd, Pb, Cu came out below an environmental standard. Cr+6 exceeded an environmental standard under a steam curing, but came out below an environmental standard under a standard curing. The higher replacement rate was, the lower frost, fusion and resistance were. Thus, got better results above the goal by condition. It was possible that plated sludge was replaced and solidified to aggregate. Therefore, it is necessary to define the standards of quality on strength, replacement rate of wastes, water permeability, endurance in order to solidify plated sludge to concrete products.

키워드 : 도금 슬러지, 폐기물 고형화, 폐기물활용

Keywords : Plated Sludge, Stabilization/Solidification, waste treatments

1. 서 론

1.1 연구의 목적

우리나라는 지난 수십 년 간 사회 전 분야에서 급진적인 발전이 이루어 졌다. 급격한 산업의 발달 및 생활 환경은 각종 유해한 폐기물을 양산하고 있으며, 이러한 폐기물의 급격한 증가는 심각한 환경문제로 대두되고 있다.

특히 지정폐기물(8)들은 유해 산업폐기물이기 때문에 그대로 보관, 매립 처분할 경우 주변의 토양과 지하수 등을 오염시킬 가능성이 크기 때문에 처리되지 않은 유해폐기물의 경우는 법적으로 매립이 금지되어 있다. 유기폐기물은 소각과 같은 방법으로 분자구조를 변화시켜 무해화한 후 처리할 수 있지만, 더 이상 분해할 수 없는 중금속 함유 무기폐기물은 무해화 하기 쉽지 않다. 그래서 유해 무기폐기물을 무해화 시키는 방법으로 고형화 방법이 주로 이용되고 있다. 고형화하는 방법에는 시멘트 고형화법, 아스팔트 고형화법, 플라스틱 고형화법, 소결 고형화법, 고온 용융 고형화법 등이 있다. 이 중에서 시멘트에 의한 고형화는 다른 고형화법에 비해 가장 경제적인 뿐만 아니라, 시멘트의 무기

화학적 특성으로 중금속 및 유기독성 물질의 고형화에 적합하기 때문에 가장 폭넓게 이용되고 있다. 시멘트는 복잡한 수화과정, 다양한 수화생성물과 다공질의 미세구조에 의해 물리적 뿐만 아니라 화학적 반응에 의해 유해폐기물을 안정화할 수 있는 특징을 가지고 있기 때문에 유해폐기물을 가장 효과적으로 무해화 할 수 있는 재료라고 말할 수 있다. 또한 풍부한 원료를 바탕으로 값싸게 제조할 수 있을 뿐만 아니라 상온에서 고형화 시킴과 동시에 함수상태로 폐기물을 처리할 수 있는 특징을 가지고 있어 고화방법 중에서 경제성을 가지고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 산업폐기물인 도금 슬러지를 잔골재로 치환하여 시멘트의 사용 품질기준을 확립하고, 콘크리트에 적용하여 건설재료로 활용 될 가능성 고찰과 도금 슬러지를 혼입한 모르타 및 콘크리트의 특성을 파악하는데 그 목적이 있다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1. 실험 요인 및 수준

본 연구는 도금 슬러지의 고형화를 위한 고화제의 조합원료로서 보통포틀랜드시멘트, 조강포틀랜드시멘트, 고로슬래그시멘트, 아원클링커와 무수석고를 조합

* 정희원, 원광대학교 건축공학과 박사과정
** 정희원, 원광대학교 건축공학과 교수, 공학박사

하여 도금 슬러지의 배합에 따른 특성을 파악하는데 있다. 그리고 이를 평가하기 위하여 시멘트를 이용하여 표 1의 배합으로 압축강도²⁵⁾, 표 2의 배합으로 압축강도²⁵⁾, 길이변화²⁵⁾, 중금속용출 시험을 하였다. 배합수량을 결정하기 위하여 Flow Test를 실시하여, Flow 110±5%로 고정하여 배합설계 하였다. 콘크리트의 기초 성능을 평가하기 위해 표 4의 배합으로 압축강도, 길이변화, 중금속용출²²⁾, 동결융해 저항성 실험²⁵⁾을 실시하였다.

도금 슬러지를 시멘트 품종별(보통, 조강, 고로슬래그시멘트) 및 그의 첨가량에 따른 특성과 기초 성능 평가를 위해 설정한 배합조건은 표 1과 같다.

표 1. 시멘트와 도금 슬러지의 중량 배합비

수 준	시멘트(%)	도금 슬러지(%)	계(%)
1	5	95	100
2	10	90	100
3	20	80	100
4	30	70	100

포틀랜드시멘트에 도금슬러지를 배합할 경우 각종 무기염류 및 유기물이 칼슘이온과 반응하여 불용성 화합물을 형성한다. 그 생성물이 시멘트입자의 표면을 피복하고 이후의 반응을 진행하지 못하게 하여 수화반응을 저해한다. 그래서 조강성과 고강도 특성을 가지며 중금속 안정화특성이 우수한 아원클링커와 무수석고(7:3)혼합물의 적용성을 검토하기 위하여 표 2의 배합조건으로 실험을 하였다.

표 2. 시멘트·아원클링커·무수석고의 배합조건(중량비)

구분	도금 슬러지(%)	시멘트(%)	아원클링커(%)	무수석고(%)
배합	80	20	0	0
		17	2.1	0.9
		14	4.2	1.8

표 3. 콘크리트 단위배합

시멘트 종류	ID.	도금 슬러지 (%)	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량(kg)				
					C	도금 슬러지	W	S	G
보통	1A0	0	40	65	350	0	141	1231	681
	1A2.5	2.5	43		350	47	151	1184	655
	1A5	5	49		350	91	171	1123	621
조강	3A0	0	42		350	0	147	1220	675
	3A2.5	2.5	47		350	46	165	1160	642
	3A5	5	49		350	91	172	1119	619
혼합	SA2.5	2.5	47		350	46	165	1160	642
	SA5	5	55		350	88	192	1088	602

표 4. 혼합 시멘트 혼합비

조강시멘트(%)	슬래그미분말(%)	아원클링커(%)	무수석고(%)
60	20	14	6

표 3과 표 4는 시멘트 모르타 시험결과에 의해서 배합과 혼합비를 결정하였고, 공기량은 5%로 배합설계를 하였다. 도금 슬러지를 잔골재에 대하여 용적비로 치환을 하였으며, 응결이 상당히 지연되므로 증기양생 후 수조에서 양생을 하였다. 표 4는 조강시멘트에 아원클링커와 무수석고를 7:3으로 혼합하였을 때의 압축강도가 가장 크게 나왔으나, 조강성이 너무 커 길이변화가 컸기 때문에 특수시멘트의 혼합비를 결정하였다. 배합수량은 시공성을 고려하여 결정하였다.

2.2. 사용재료 및 시험방법

(1) 사용재료

① 시멘트

시멘트는 국내산 S사 제품인 보통포틀랜드시멘트, 조강포틀랜드시멘트, 고로슬래그시멘트를 사용하였고 물리적 성질은 표 5와 같다. 아원클링커와 무수석고의 혼합시멘트(분말도는 6,000cm²/g)를 사용하였고, 아원클링커의 화학성분과 조성은 표 6과 같다. 무수석고와 같이 조강성과 고강도 특성을 가지며, 중금속 안정화특성이 우수하고 표에서 보는 것과 같이 시멘트와 약간 다른 광물조성을 가지는 것을 말한다. 제조 방법은 시멘트와 같다.

표 5. 시멘트의 물리적 성질

시멘트	비 중 (g/cm ³)	분말도 (cm ² /g)	응결시간		압축강도(kgf/cm ²)		
			초결(m)	종결(h)	3일	7일	28일
보통	3.15	3324	260	06:49	213	293	373
조강	3.12	4250	185	04:50	270	366	470
슬래그			284	08:09	183	289	453

표 6. 아원클링커의 화학성분과 조성

화학적 성분 (%)								광물조성			
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
7.3	36.0	1.3	40.6	1.2	11.8	0.59	0.09	70	21	4.0	4.5

② 골재

실험에 사용한 잔골재는 천연골재로 충남 금강에서 채취한 강모래를 사용하였으며, 비중이 2.60, 흡수율 1.1%, 조립율 2.8, 실적율 60%이다.

굵은 골재는 전북 익산시 낭산면 소재 쇠석으로 19mm이하를 사용하였다. 비중이 2.60, 흡수율 0.9%, 조립율 6.8, 안정성 3.5%, 실적율 59%, 마모율 26%이다.

③ 도금 슬러지

도금 슬러지의 발생량은 상업의 고도화와 새로운 생산 기법으로 인하여 1994년 15,000톤, 1995년 63,000톤, 1996년 85,000톤, 1997년 90,000톤으로 계속 증가하고 있으며, 1997년도 지정폐기물은 전년도 대비 20%가 증가하였으며, 그 중 도금 슬러지는 약 4.1%를 차지하고 있으며 계속 증가하고 있는 추세이다.

본 실험에서 사용한 도금 슬러지는 경기도 안산 도금조합에서 나온 것으로 압축기에 의해 탈수처리를 한 저함수, 저비중의 케이크이다. 1주일이상 건조하여야 탈수되는 고점도 슬러지의 것으로 건조한 후 분쇄한 것을 사용하였다. 주성분은 Calcite가 주성분이고, 비정질의 점토광물과 같이 점성과 가소성을 지니며 열분석결과 다량의 수분이 흡착수와 결정수로 함유되어 있다. 입자는 구형으로 매우 치밀하게 찰흙과 같이 서로 엉겨 있는 상태이다. 표 7에 도금 슬러지의 물성 및 성분을 나타내었다.

표 7. 도금 슬러지의 물성 및 성분

전체중량	건조중량	함수비	부피	중량	밀도						
402.7g	356.6g	11.4%	62ml	185.4g	2.99g/ml						
NaK	MgK	AlK	SiK	PK	SK	CaK	CrK	FeK	NiK	CuK	ZnK
3.15	7.04	8.22	3.73	3.19	9.43	21.87	12.02	4.37	13.98	8.97	3.99

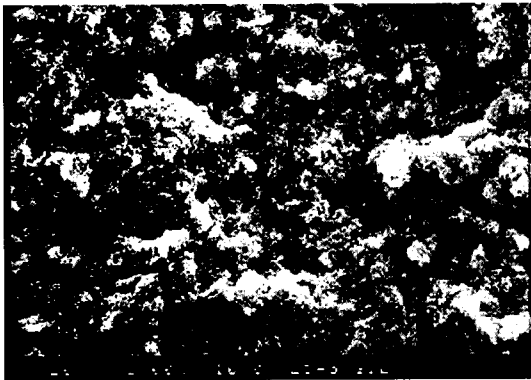


그림 1. 도금 슬러지의 입자(1,000배)

(2) 실험방법

① 압축강도

시멘트 적용성 시험으로는 건조분쇄한 도금 슬러지를 사용하여 표 1의 배합으로는 공시체를 4개의 수준별로 9개씩, 3가지 재령, 시멘트 3종류로 총 324개를 제작하였다. 도금 슬러지에 시멘트를 5, 10, 20, 30%를 치환하여 KS L 5105 모르타 압축강도 시험 방법에 의하여 각각 3일, 7일, 28일 재령별 압축강도를 측정하였다. 그리고 표 2의 배합으로는 도금 슬러지와 보통 및 조강시멘트의 혼합비를 8:2로 고정하고, 시멘트 20% 중 아원클링커와 무수석고의 혼합물을 0, 15, 30%로 변화시키며 3일, 7일, 28일 재령별 압축강도를 측정하

였다. 압축강도 공시체는 50mm 입방체를 3개 수준별 9개씩, 3가지 재령, 시멘트 2종류로 총 162개를 제작하였고, 50t 압축강도시험기로 실험을 실시하였다.

콘크리트 시험으로는 표 3의 배합으로 보통, 조강, 혼합시멘트에 건조 분쇄한 도금 슬러지를 잔골재에 대한 용적비로 0%, 2.5%, 5% 치환하여 압축강도를 측정하였다. 10×20cm 원주형 공시체를 각 수준별로 27개씩 총 216개를 제작하였다. 경계블록과 같이 증기양생을 한 후 시험 전까지 20±2℃의 항온 수조에서 수중양생 시킨 후 최대 용량 200t의 만능재료 시험기로 KS F 2405의 규정에 따라 수행하였다. 경계블록을 제작할 때 습식배합은 건식배합에 비해 동결융해에 대한 저항성이 약하므로 공기량을 증가시켜 저항성을 증대시키기 위하여 잔골재율을 65%로 설정하였다.

② 길이변화 시험

표 2의 배합으로 4×4×16cm의 공시체를 54개를 제작하였다. KS F 2424 모르타 및 콘크리트의 길이 변화 시험 방법에 의해서 공시체를 탈형한 후, 습기함에서 1주 양생 뒤 1회 측정, 항온 항습실에서 온도 20±1℃, 습도를 60±5%로 유지하며 기건양생 하면서 1주, 4주 일 때 길이변화를 측정하였다.

그리고 콘크리트 시험으로는 표 3의 배합조건 중에서 10×10×40cm의 공시체를 보통, 조강, 혼합시멘트에 도금 슬러지를 5% 치환하여 각 수준별로 3개씩 총 9개를 제작하여 측정하였다.

③ 중금속 용출시험

시멘트 적용성 시험에서 도금 슬러지의 배합별 중금속의 정도를 파악하기 위해 표 2의 배합조건으로 28일 재령 마친 공시체를 5mm 이하로 파쇄하여 폐기물 공정 시험법2)에 의해 시험을 하였다.

콘크리트 시험은 표 3의 배합조건 중 보통, 조강 혼합시멘트에 도금 슬러지를 5% 치환한 것을 증기양생 후 기건양생한 것과 증기양생 후 수중양생한 것 2종류로 나누어 폐기물 공정시험법2)에 의해 실험을 실시하였다.

④ 투수율

표 3의 콘크리트 배합 중에서 1A0, 3A0, 1A2.5, 3A2.5, SA2.5 5종류의 배합으로 실험을 실시하였다. 콘크리트의 투수시험은 높은 압력으로 물을 강제 투수시켜 Darcy의 법칙에 의하여 투수계수를 결정하는 방법이 주로 적용되고 있으나, 조직이 치밀한 콘크리트의 경우 투수량이 극히 적기 때문에 측정기간이 길게 요구되므로 전압차에 의한 염소이온의 투과 촉진법을 채택하여 각 배합의 투수성을 간접적으로 알아내고자 하였다. ASTM C 1202 - 91에 의거하여 실험을 수행

하였다. 증기양생 후 28일동안 기건양생한 직경 10cm의 콘크리트 시편을 길이가 5cm로 절단 한 후 실험 전까지 상대습도 95%이상 유지시키며, 전류를 측정하였다. 전류를 측정하는 방법은 기지의 저항체를 연결하여 전압을 측정함으로써 얻을 수 있는데, 측정한 전압값을 전류치(I)로 환산한다. 염소이온 투과실험은 매 시편마다 6시간이 소요되고 30분 간격으로 전압값을 측정한다. 측정된 전압을 전류로 환산하여 다음 식을 이용하여 회로를 통과한 총 전하량을 산정하였다.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360})$$

여기서 Q = 회로통과 전하량(coulombs)
= n분 경과시의 전류(amperes)

⑤ 동결융해 저항성 시험

도금 슬러지가 콘크리트의 동결융해 저항성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 표 3의 배합조건 중 보통, 조강 혼합시멘트에 도금 슬러지를 5% 치환한 것을 동결융해 시험을 실시하였다. 동결융해 시험은 KS F 2456 “급속동결 융해에 대한 콘크리트의 저항 시험방법” 중 수중 급속 동결융해 시험법에 의거하였으며, 시편은 8×10×40cm의 각주형 공시체를 증기양생 후 14일간 항온항습실에서 수중 양생한 후 동결융해 시험을 수행하였다. 동결융해시험 이후의 손상은 일정한 주기로 동탄성 계수를 측정하여 판단하는데, 본 실험에서는 초음파속도법에 의하여 동탄성 계수를 산정하였다. 시험은 300주기를 원칙으로 수행하나 상대 동탄성 계수가 60%이하인 경우에 시험을 종료하였다. 동결융해주기에 노출된 콘크리트 시편을 일정한 주기간격으로 동탄성계수를 측정하여 성능저하를 판단하였다. 측정주기마다 초음파속도법에 따라 동탄성계수를 측정하고 다음 식에 의해 내구성지수를 산정하였다.

$$\text{내구성 지수} : DF = \frac{C \times N}{M}$$

C : N회 반복에서 상대동탄성계수(%)
N : 동결융해실험을 마친 사이클의 수
M : 원칙적으로 300

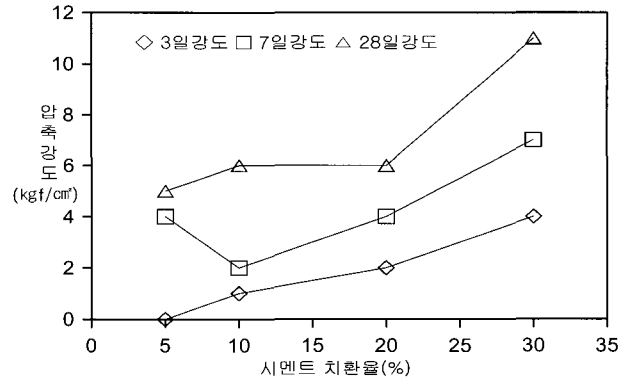
3. 실험결과 및 고찰

3.1. 모르터 시험

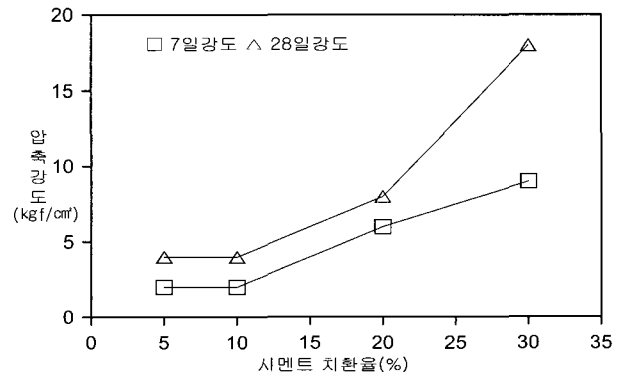
(1) 시멘트 적용성 시험

그림 2는 도금 슬러지 사용량에 따른 결합재 종류별 압축강도를 나타낸 것이다. 시멘트의 양이 증가할수록, 양생기간이 증가할수록 강도는 증가하였으나, 강도가 매우 낮은 수준이고, 조강 및 슬래그시멘트 사용시 3일째 탈형시 공시체가 파괴되어 탈형이 불가능할 정도로 경화가 늦게 이루어졌다. 이는 각종 중금속이 다량

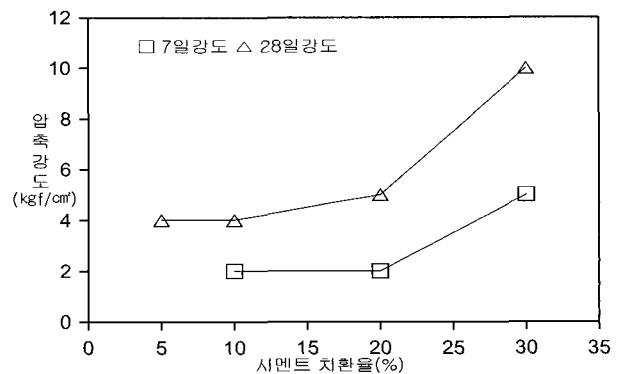
으로 함유되어 있고, 도금폐수의 중금속 포집을 위해 사용한 킬레이트제에 의해서 시멘트의 수화가 극도로 지연된 것으로 판단된다. 고형화 강도 10kgf/cm² 이상을 만족하기 위해서는 시멘트를 30%이상 사용해야하고, 도금슬러지의 고형화를 위해서도 조강성 및 고강도성을 갖는 특수결합재의 적용 및 개발이 필요한 것으로 판단된다.



(1) 보통시멘트를 결합재로 사용



(2) 조강시멘트를 결합재로 사용

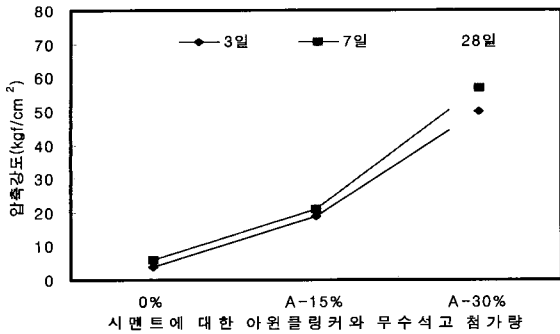


(3) 슬래그시멘트를 결합재로 사용

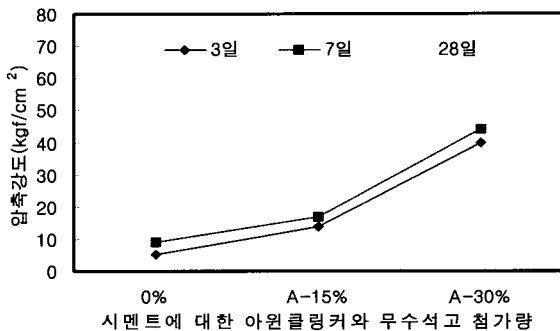
그림 2. 도금 슬러지 사용량에 따른 결합재 종류별 압축강도

(2) 아원클링커 및 도금 슬러지 적용성 시험

① 압축강도



(1) 결합재로 보통시멘트 및 아원클링커와 무수석고 사용



(2) 결합재로 조강시멘트 및 아원클링커와 무수석고 사용

그림 3. 아원클링커를 사용할 때의 압축강도

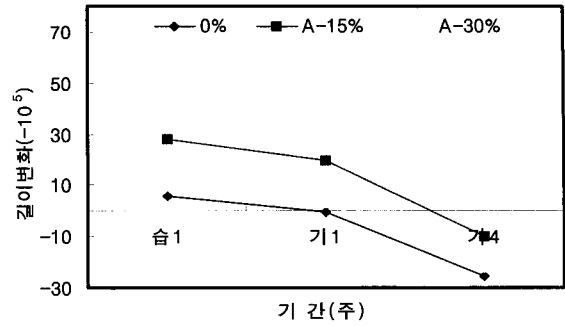
그림 3은 아원클링커와 무수석고를 혼합하여 적용성 실험을 한 결과이다. 도금 슬러지에 아원클링커와 무수석고의 혼합물의 사용량이 증가할 수록 강도가 크게 증대되었으며, 단위수량도 증가되었다. 증가율은 조강 시멘트에 혼합물을 첨가하는 것 보다 보통시멘트에 혼합물을 첨가하는 경우가 더 크게 나타났다. 이는 조강 시멘트에 혼합물을 첨가하는 경우 급격히 수화 반응이 일어나 ettringite를 완전히 생성하지 못하거나, 단위수량이 조강시멘트가 많기 때문으로 판단된다.

② 길이변화

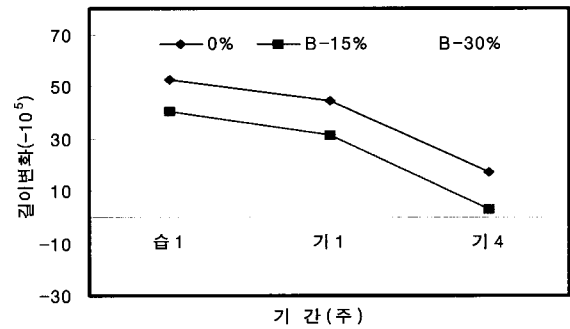
그림 4는 보통, 조강시멘트에 아원클링커와 무수석고의 혼합물을 첨가한 결과이다. 보통시멘트에 혼합물을 첨가하였을 때는 보통시멘트를 단독으로 사용할 때와 비슷한 정도의 수축을 나타냈다. 조강시멘트에 혼합물을 첨가하는 경우는 혼합물의 사용량이 증가할수록 팽창이 감소하였다.

③ 중금속 용출시험

표 8은 도금 슬러지의 시멘트 결합재에 따른 중금속 용출 결과이다. 도금 슬러지의 경우는 $C\gamma^{+6}$ 과 Cu 함량이 각각 12% 및 9%로 높아 원시료의 용출시험 결과 환경기준보다 매우 높은 수치를 나타냈다. 시멘트



(1) 결합재로 보통시멘트 및 아원(무수석고30%) 사용



(2) 결합재로 조강시멘트 및 아원(무수석고30%) 사용

그림 4. 아원클링커와 무수석고 혼합물을 첨가한 길이변화

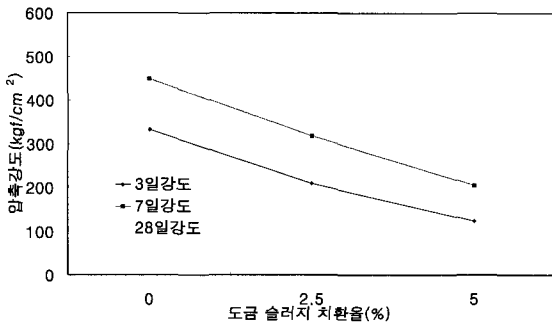
를 사용하여 고형화한 시료의 경우도 $C\gamma^{+6}$ 의 경우 상당량 용출량이 감소하기는 하나 환경기준보다는 약 10 배정도 높은 수치를 나타냈다. 또한 Cu의 경우는 용출량 감소가 미미하고 다만 슬래그시멘트를 사용한 경우와 아원클링커를 사용한 경우에서만 용출량이 약간 감소하였을 뿐이다. 따라서 도금 슬러지를 고형화할 경우는 추가적으로 킬레이트 사용하며 시멘트는 슬래그를 첨가하여 중금속 고정화 능력을 향상시키고, 아원클링커를 사용하여 조강성, 고강도성을 높인 시멘트를 사용하는 것이 바람직하다.

표 8. 아원과 무수석고를 치환한 중금속 용출시험 결과

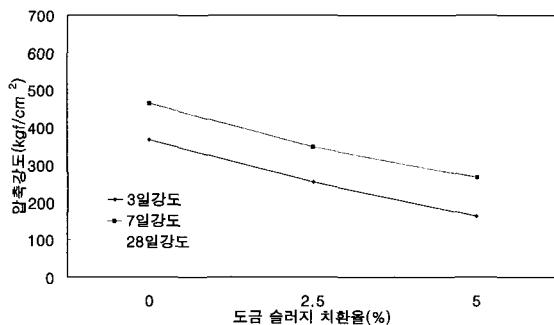
수준	중량 배합비(%)				중금속 용출량			
	시멘트 종류	치환율 (%)	아원클링커 & 무수석고	도금 슬러지	Cr^{+6}	Cu	Cd	Pb
plain	-	-	-	100	58.0	14.6	tr	tr
1D	보통	20	-	80	13.1	12.4	tr	tr
3D	조강	20	-	80	13.8	12.4	tr	tr
SD	슬래그	20	-	80	12.7	9.4	tr	tr
1DA1	보통	17	3	80	13.0	13.4	tr	tr
1DA2	보통	14	6	80	10.9	11.0	tr	tr
3DA1	조강	17	3	80	12.6	10.4	tr	tr
환경 기준					1.5	3.0	0.3	3.0

3.2 콘크리트 시험

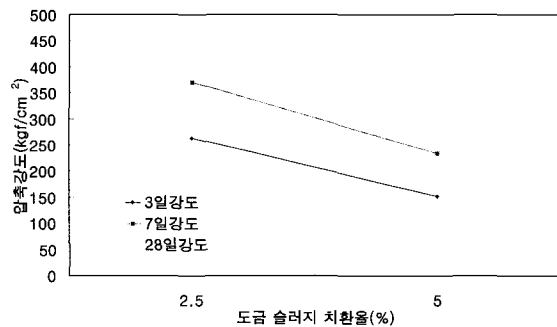
(1) 압축강도



(1) 보통시멘트를 결합재로 사용



(2) 결합재를 조강시멘트 사용



(3) 결합재를 혼합시멘트 사용

그림 5. 결합재를 혼합시멘트로 사용

그림 5는 도금 슬러지 양에 따른 콘크리트 압축강도를 나타낸 결과이다. 도금 슬러지의 양이 증가할수록 강도는 저하하였다. 이는 단위수량의 증가와 도금 슬러지의 성분 중 다량의 중금속과 석회성분이 증가하므로 수화가 점차 이루어지지 않기 때문이라 판단된다. 그리고 결합재에 따라 분말도가 높은 조강시멘트가 가장 좋은 강도를 나타내었고, 보통시멘트, 혼합시멘트 순으로 나타났는데 혼합시멘트는 단위수량이 가장 많기 때문에 압축강도가 적게 나타났다.

(2) 길이변화

그림 6과 같이 초기에는 비슷하지만 기전 1주 이후에는 조강시멘트만 단독으로 사용한 것 보다 변화가 크게 나타났다. 보통시멘트 > 조강시멘트 > 혼합시멘트 결합재 순으로 길이변화가 나타났다. 이는 단위수량이 많은 것과, 조강, 혼합시멘트가 보통시멘트 보다 SO₃의 함량이 많고, 수화속도가 빠르기 때문으로 판단된다. 수화속도를 적절히 조절하기 위해 무수석고의 사용량을 조절할 필요가 있다고 판단된다.

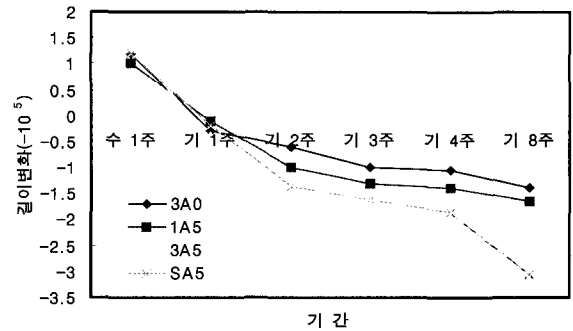


그림 6. 콘크리트의 길이변화

(3) 투수량 시험

콘크리트의 내투수성을 평가하기 위하여 염소 이온 투과법에 의한 촉진 시험을 통하여 수행하였으며, 투수시험 결과를 표 9에 나타내었다. 도금 슬러지 치환율이 증가할수록 투수저항성은 감소하는 경향을 보이지만 크게 차이가 없었다. 단위수량에 의한 것 보다 조직이 치밀한 것이 투수량이 적은 것으로 나타났다.

표 9. 투수성에 따른 실험 시편의 분류

등급	ASTM 규정		시편명	통과 전하량 (Coulomb)
	투과성	전하량(C)		
1	무시할 만함	100 이하	-	-
2	매우 낮음	100~1000	-	-
3	낮음	1000~2000	1A0	1252
			3A0	1335
			SA2.5	1596
			3A2.5	1900
4	보통	2000~4000	1A2.5	2175
5	높음	4000 이상	-	-

(4) 중금속 용출시험

중금속 용출시험 결과는 표 10과 같으며, 도금 슬러지 원시료는 Cr⁶⁺과 Cu 함량이 환경기준보다 매우 높은 수치를 나타냈다. Cd, Pb, Cu는 용출량이 환경기준

치 이하로 용출되었으나, $C\gamma^{+6}$ 은 용출량이 증기양생을 하였을 때 환경기준치를 초과하였지만, 표준양생을 하였을 때는 환경기준치 이하로 용출되었다. 이는 증기양생을 할 때 급격하게 수분 증발과 수화반응이 일어나, 즉, ettringite 형성이 잘 되지 않아 조적이 치밀하지 못하여, 중금속물질을 단단하게 결속시키지 못하였기 때문에 판단된다.

표 10. 콘크리트 배합의 중금속 용출 시험 결과

I.D.	Cd(ppm)	Pb(ppm)	Cu(ppm)	Cr ⁺⁶ (ppm)	
				증기	표준
환경기준치	0.3	3.0	3.0	1.5	
도금슬러지	tr	tr	14.6	58	
1A0	"	"	0.1	1	1
1A5	"	"	1.1	4	1
3A0	"	"	0.1	1	1
3A5	"	"	0.8	3	1
SA5	"	"	1.6	6	2

(5) 동결 융해 저항성 시험

동결융해 시험결과는 그림 7과 같다. 도금 슬러지의 치환율이 높을수록 동결융해 저항성이 낮게 나타났으며, 보통시멘트 > 조강시멘트 > 혼합시멘트 결합재 순으로 동결융해 저항성이 나타났다. 전체적으로 동결융해에 대한 저항성이 보통시멘트 단독으로 사용한 경우보다 높은 것으로 나타났다. 이는 단위수량의 증가로 인한 영향으로 판단된다.

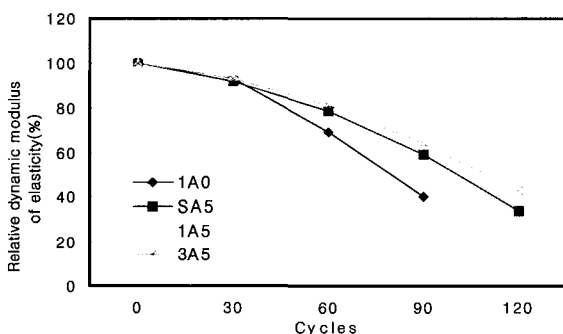


그림 7. 동결융해 저항성 시험 결과

4. 결 론

본 연구에서는 도금 슬러지를 잔골재에 대해 치환하여 시멘트 및 콘크리트로 배합하였을 때 압축강도, 길이변화, 투수성, 동결융해저항성, 중금속 용출시험 등을 실시한 후 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 건설재료에 적용하기 위한 시멘트의 사용 조건은 콘크리트 압축강도 시험결과 조강시멘트 > 보통시멘트 > 혼합시멘트 순으로 나타났고, 길이변화 시험에서는 보통시멘트 > 조강시멘트 > 혼합시멘트 결합재 순으로 길이변화가 나타났다. 투수량 시험에서 전체적으로 낮은 투과율을 보였으며, 혼합시멘트 > 조강시멘트 > 보통시멘트 순으로 투과전하량이 낮게 나타났다. 중금속 용출 시험에서는 Pb, Cu, Cd은 환경기준치 이하로 나타났으며, $C\gamma^{+6}$ 은 증기양생 할 때는 환경기준치에 대해 최대 4배정도 초과되었으나, 표준양생 할 때는 환경기준치 이하로 측정되었다. 동결융해 저항성 시험에서는 보통시멘트 > 조강시멘트 > 혼합시멘트 순으로 동결융해 저항성이 나타났다.

2. 시멘트의 적용성 시험결과 보통시멘트, 조강시멘트는 큰 차이를 보이지 않았지만, 시공성을 고려한다면 조강성이 있는 조강시멘트나 적당량의 아원클링커와 무수석고를 혼합하여 사용하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

3. 콘크리트 시험결과 시멘트의 적용성 시험 결과와 비슷하게 나타났으며, 시공성을 고려하여 보통시멘트에 아원클링커와 무수석고를 혼합하여 사용하고 조강시멘트는 단독으로 사용하는 것이 가장 좋은 것으로 나타났다.

4. 현장 제조환경을 고려하여 콘크리트 제품을 만들기 위한 적당한 도금 슬러지의 치환율은 보통시멘트는 3%, 조강시멘트는 4%, 특수시멘트는 3% 내외가 가장 적당한 것으로 나타났다.

이상의 연구 결과 콘크리트에 잔골재 대신 치환하여 도금 슬러지를 고품화하는 것과 건설재료로 활용될 가능성을 확인하였다. 향후 전기로 더스트를 치환하여 콘크리트로 제품을 만들기 위해서는 단위수량을 고려한 강도, 폐기물 치환율, 투수성, 내구성 등에 대한 품질기준을 선정하는 것이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 김창은, 이승규, "시멘트를 이용한 폐기물의 고품화처리기술, 요업재료의 과학과 기술", Vol. 9, No. 5, p517~528, 1994.
2. 김삼권, "폐기물처리 공정시험방법 해설", 동화기술, 1995.
3. 趙泰雄 外, "有害廢棄物의 固型化 處理規格基準에 關한 研究"(NIER No.96-13-484), 國立環境研究院, 1996.
4. 신항식, "시멘트고형화에 의한 유해폐기물의 처분"(기술논총(技術論叢)), 한국과학기술원.
5. 신항식, 김종모, 정연구, "중금속 슬러지의 고품화 및 최종 처분 방안 연구", 한국폐기물학회지, Vol. 9, No. 1, p103, 1992.
6. 厚生省生活衛生局, "産業廢棄物處理 핸드ブック."1996.

7. 日本厚生省生活衛生局, "산업 폐기물 Handbook", 1995.
8. Wayne S. Adaska, "Solidification and Stabilization of Wastes Using Portland Cement", Portland Cement Association, 1981.
9. Institute for Prospective Technological Studies Seville, "The Legal Definition of Waste and its Impact on Waste Management in Europe", 1997.
10. Carlton C. Wiles, "Mechanisms for Containing Contaminants by Solidification/ Stabilization", US EPA, 1990.
11. C.E. Kim and S.K. Lee, "The effects of the Heavy Metal Ions on the Hydration and Microstructure of the Cement Paste, Journal of Korean Ceramic Society", vol. 30, No. 11, p967~973, 1993.
12. M. S. T. Bhatti, "Fixation of metallic ions in Portland cement, Portland Cement Association, IL.", USA, 1986.
13. F. P. Glasser, "Chemistry of Cement-Solidified Waste Forms", Lewis Publishers, 1993.
14. J. R. Conner, "Chemistry of Cementitious Solidified / Stabilized Waste Forms", Lewis Publishers, 1993.
15. D. M. Roy and B.E. Scheetz, "The Chemistry of Cementitious Systems for Waste Management: The Penn State Experience", Lewis Publishers, 1993.
16. Conner, J. R., "Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes", Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
17. D. L. Cocke and M. Y. A. Mollah, "The Chemistry and Leaching Mechanisms of Hazardous Substances in Cementitious Solidification/Stabilization Systems", Lewis Publishers, 1993.
18. I. Jawed, J. Skalny and J. F. Young, "Hydration of Portland Cement", Applied Science Publishers, London and New York, 1983.
19. T. M. Michael Gilliam and Carlton C. Wiles, "Stabilization and Solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes - 2nd Volume", ASTM, Philadelphia, 1992.
20. Double, D.D and A. Hellowell, "The Solidification of Cement" Sci. Am. 237, 1977.
21. Lea, F. M., "The Chemistry of Cement and Concrete" Edward Arnold, London, 1970.
22. 환경부, "폐기물관리법", 1999.
23. 건설부, "건축공사 표준 시방서", 대한건축학회, 1994.
24. 건설부, "콘크리트 표준 시방서", 건설부, 1994.
25. 김수마, "품질관리검사기술", 명문사, 1994.