

도시고형폐기물 소각 비산재의 지반공학적 특성 및 시멘트 안정화에 관한 연구 The Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash and Cement Stabilization

조진우¹⁾, Jin-Woo Cho, 김지용²⁾, Ji-Yong Kim, 한상재³⁾, Sang-Jae Han, 김수삼⁴⁾, Soo-Sam Kim

¹⁾ 중앙대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Chung-Ang University

²⁾ 중앙대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Chung-Ang University

³⁾ 중앙대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng., Chung-Ang University

⁴⁾ 중앙대학교 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Envir. Eng., Chung-Ang University

SYNOPSIS : Solid waste incinerator is expected to become widely used in Korea. The incineration of solid waste produces large quantities of bottom and fly ash, which has been disposed of primarily by landfilling. However, as landfills become undesirable other disposal methods are being sought. In this study, an experimental research is conducted to determine the geotechnical properties of municipal solid waste incinerator fly ash(MSWIF) in order to evaluate the feasibility of using the material for geotechnical applications. Basic physicochemical characteristics, moisture-density relationship, strength, permeability, and leaching characteristics are examined. The results of MSWIF are compared to other MSWIF and coal fly ash which are used as construction material. In addition, the effectiveness of cement stabilization is investigated using various mix ratios. The results of stabilized mixes are compared to the unstabilized material. Cement stabilization is found to be very effective in reducing permeability, increasing strength, and immobilizing heavy metals. These results indicate that MSWIF with cement stabilization may be used effectively for geotechnical application.

Key word : MSWIF, Cement, Geotechnical properties, Heavy metal

1. 서론

전세계적으로 각종 환경오염물질의 종류가 계속 증가하고 있으며, 발생량 또한 급증하고 있는 추세이다. 현재 국내의 폐기물 처리방법을 보면 대부분의 폐기물이 매립되고 있는 실정이나, 국토가 좁은 우리나라에서 매립에 의한 폐기물의 처리에는 매립용지의 부족, 매립장 시설재료의 부족, 2차 환경오염 등의 문제점이 있다. 이에 대한 대책으로 폐기물 부피의 90%, 중량의 75%정도를 감소시켜 폐기물 매립지의 사용연한을 연장시키고, 폐기물 중에 유기물질이 거의 분해되어 기존의 매립지와 비교할 때 안정화 기간이 짧으며, 폐열을 이용할 수 있는 소각처리방식의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 요구에 따라 정부는 폐기물 소각처리 비율을 높이기 위하여 상대적으로 재활용비율이 낮은 도시고형폐기물(Municipal Solid Waste)의 소각처리 비율을 2001년까지 20%이상으로 증가시킬 목적으로 소각처리시설을 확충하고 있다(환경부,1999). 이 결과 도시고형폐기물 소각 비산재(Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash, 이하 MSWIF)의 발생량이 상당히 증가할 것으로 예상된다.

국내의 경우 MSWIF의 처리방법을 보면 대부분 매립되고 있는 실정이나 앞에서 언급했듯이 매립에

의한 폐기물의 처리에는 한계가 있으며 특히 2차 환경오염문제 등의 경제적 또는 환경적으로 많은 문제점을 발생시킬 수 있다. 국외의 경우에는 MSWIF의 지반공학적인 활용(도로 기층 건설재료, 성토재, 연약점토 개량재, 매립지 복토재 등)을 목적으로 많은 연구가 진행되고 있다(Collins, 1977; Poran and Ahtchi-Ali, 1989; Goh and Tay, 1993; Schuster and Collins, 1979). 따라서 본 연구에서는 현재 대부분 매립되고 있는 국내 MSWIF의 지반공학적인 활용 가능성을 알아보려고 그 사전 단계로 MSWIF의 지반공학적인 성질을 국내 다른 지역의 MSWIF 및 Coal Fly Ash와 비교하여 그 특성을 알아보았으며, 환경적 유해성을 파악한 후 시멘트 안정화 처리에 따른 MSWIF의 특성을 평가하였다.

2. 시험개요

2.1 사용시료

본 연구에 사용된 MSWIF는 서울 ○○소각장에서 채취하였으며 미백색의 분말형태이다. 채취 당시의 자연함수비는 1~2%의 범위를 가지고 있었으며 실내에서 건조 후 사용하였다.

MSWIF의 지반공학적인 성질을 개선하고 환경적 유해성을 제거하고자 첨가제로 S사 보통 포틀랜드 시멘트를 선정하였다.

2.2 시험 종류 및 방법

MSWIF의 지반공학적인 특성을 알아보려고 본 연구에서는 기본 물리/화학시험(비중, 입도, 화학조성, pH), 다짐시험, 강도시험, 투수시험, 중금속 용출시험을 실시하였다. 각각의 시험종류에 따른 시험 방법을 표 1에 제시하였다.

표 1. 시험 종류 및 방법

시험항목	비중	입도	pH	화학조성	용출	다짐	일축강도	직접전단	투수
시험방법	KS F	KS F	폐기물 공정시험법	XRF	폐기물 공정시험법	KS F	KS F	KS F	연성벽

MSWIF의 지반공학적인 성질을 개선하고 환경적 유해성을 제거 하기 위한 시멘트는 중량비로 0~ 40% 혼합하였다. 각 시험별 재료의 혼합비는 용출시험은 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40%의 시멘트와 시멘트 20%에 석회를 10%, 20% 혼합하여 시험을 실시하였다. 또 다짐, 강도, 투수시험의 경우에는 시멘트 배합비를 0, 5, 10, 15, 20%로 하여 시험을 실시하였다. 일축압축강도와 투수시험은 다짐함수비에 따른 일축압축강도와 투수계수를 조사하여 최대의 일축압축강도와 최소의 투수계수를 만족시키는 20%의 다짐함수비와 최대건조밀도의 95%이상으로 직경 5cm, 높이 10cm의 PVC 파이프를 사용하여 성형하였다. 시멘트 첨가 후 양생은 가습기를 사용하여 상대습도 95%이상으로 28일까지 양생한 후 시험을 실시하였다. 투수시험은 벽면누수(side leakage)를 최소화하기 위하여 삼축셀을 이용한 연성벽시험기를 사용하였으며 이때 구속압 0.5kg/cm², 수압 0.4kg/cm²을 적용하여 투수시험을 수행하였다.

3. MSWIF의 지반공학적인 특성

3.1 기본특성

주재료인 MSWIF의 화학성분을 국내 다른 지역의 MSWIF(Ash1) 및 2개 지역(보령, 서천)의 Coal Fly Ash와 비교하여 표 2에 나타내었다. MSWIF의 XRF 분석결과 조사대상인 7가지 원소 이외의 상당량의 다른 원소들이 포함되어 있음을 알 수 있는데 이는 MSWIF가 조사대상인 7가지 원소 외에 S와 Zn, Pb 등의 중금속을 많이 포함하고 있기 때문이라 판단된다. Ash1 및 Coal Fly Ash와 비교해 보면 MSWIF는 SiO₂와 Al₂O₃의 함유량이 매우 낮음을 알 수 있었으며 CaO의 경우 7.57%를 함유하고 있고 K⁺와 Na⁺

등의 알카리 금속이온의 함유량이 각각 14.70%, 13.95%로 상대적으로 MSWIF에 많이 함유되어 있음을 알 수 있다. 이러한 화학성분의 차이는 소각재료의 조성 성분과 연소과정의 차이에서 기인된 것으로 판단된다. 특히 국내 MSWIF의 화학성분은 지역별, 계절별, 그리고 시료채취 위치별로 그 차이가 있을 수 있으며 소각장내에서 최종 처리시에 혼합되는 안정재(소석회슬러리, 활성탄 등)의 종류에 따라서도 달라질 수 있어 국내 MSWIF의 화학성분은 지역적으로 차이를 보일 것으로 예상된다. 또한 Coal Ash와 비교하여 MSWIF는 조사대상인 7가지 원소 이외의 함유량이 상대적으로 많아 MSWIF는 Coal Ash보다 복잡한 화학조성을 나타냄을 알 수 있다. 하지만 일반적으로 Fly Ash 내의 SiO₂와 Al₂O₃는 활성도가 낮아 이러한 원소들의 많고 적음은 MSWIF의 지반공학적 성질에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 예상되며, 대부분 자유이온으로 존재하여 Fly Ash의 경화성질에 영향을 미치는 CaO의 영향과 알카리금속이온(K⁺와 Na⁺)의 특성상 용해성이 높아 장기적으로 용출될 가능성이 많으므로 이에 따른 내구성의 문제가 발생할 수 있다고 예상된다.

표 2. MSWIF의 화학성분(XRF 분석)

Material \ 화학성분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	LOI	Total
MSWIF	6.17	2.64	0.53	7.57	1.73	14.70	13.95	14.55	61.84
Ash1 ^a	18.87	8.37	2.63	19.82	4.18	6.45	6.08	3.24	69.64
국내 ^b (Coal Fly Ash)	44~47	28~31	4~6	1~5	0~1	1~4	0~1	7~14	-

^a한소영(1999); ^b이용수 외(1994).

MSWIF의 기본 물성치 역시 국내 다른 지역의 MSWIF(Ash1) 및 Coal Fly Ash와 비교하여 표 3에 나타내었다. MSWIF의 비중은 2.18정도로 일반적인 토립자의 비중값에 비하여 낮은 값을 보이고 있는데, 이는 Gray and Lin(1972)이 전자현미경을 이용하여 제시한 바와 같이 대부분의 MSWIF가 속이 빈(hollow) 형태의 입자로 구성되어있기 때문이라 판단된다. 그림 1에 나타난 바와 같이 MSWIF의 입도 분석시험 결과 #200번체 통과율은 82.6%, 점토함유량(<2 μ m)은 7.3%로 대부분 실트 크기의 입자로 구성되어 있음을 알 수 있다. 균등계수(Cu)와 곡률계수(Cc)는 각각 7.38, 2.22로 비교적 입도분포가 양호한 편이었으며 pH는 약알카리성을 나타내었다. 그림 2에 제시한 바와 같이 MSWIF의 최대건조밀도와 최적함수비는 각각 1.68g/cm³, 18.2%이다. Coal Fly Ash와 비교해 볼 때 MSWIF와 Coal Fly Ash의 물성치는 큰 차이를 나타내지 않았으며 Ash1과도 그 입도분포가 비슷하였다.

표 3. MSWIF의 기본 물성치 비교

Material \ 물성치	비중	입도					최적 함수비(%)	최대 건조밀도 (g/cm ³)	pH	통일 분류
		D10(mm)	>2mm (gravel)	0.074~ 2mm(sand)	0.002~ 0.074mm(silt)	<0.002mm (clay)				
MSWIF	2.18	0.0042	0	17.4	75.3	7.3	18.2	1.68	7.80	CL
Ash1 ^a	-	0.009	0	15~20	75~85	<5	-	-	10	-
국내 ^b (Coal Fly Ash)	2.29~2.31	0.003~ 0.07	0	7~18	71.5~90	<5	19~26	1.2~1.5	7~11	ML

^a한소영(1999); ^b이용수 외(1994).

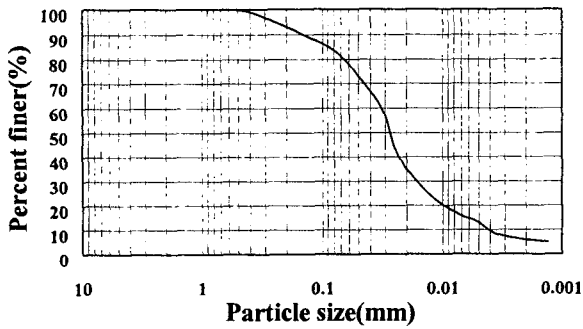


그림 1. MSWIF의 입도분포 곡선

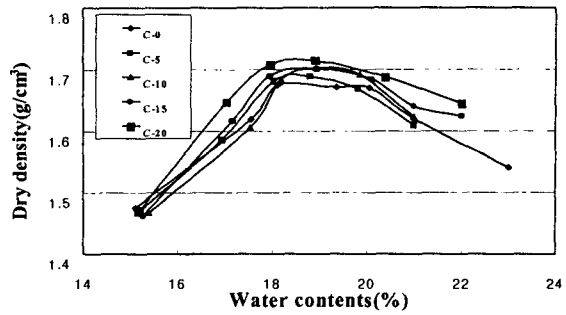


그림 2. MSWIF의 다짐곡선

3.2 역학적 특성

국내 MSWIF의 역학적 특성을 국내 Coal Fly Ash와 비교하여 표 4에 나타내었다. 다짐함수비에 따른 MSWIF의 일축압축강도를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에 나타난 바와 같이 일축압축강도는 다짐함수비에 따라 0.76~1.48kg/cm²의 범위를 나타내었다. 최적함수비의 습윤측에서는 강도가 급격하게 떨어진 반면에 최적함수비 건조측에서는 강도변화율이 미비하였다. 이러한 결과는 기존의 세립토에 대한 결과와 비슷한 것으로서 최적함수비의 습윤측에서는 다짐함수비의 영향이 크며, 최적함수비의 건조측에서는 다짐함수비보다는 다짐에너지에 크게 영향을 받음을 간접적으로 알 수 있었다(Gray and Lin, 1972). 직접전단시험결과 점착력과 내부마찰각은 각각 0.13kg/cm², 45°로 나타났으며 다짐함수비에 따른 투수계수의 변화를 그림 4에 제시하였다. 최소의 투수계수는 함수비 19%~20% 사이에서 8~9×10⁻⁷ cm/sec를 나타내어 가는 실트질의 투수계수를 나타내었다. 최적함수비의 건조측에서는 습윤측보다 상대적으로 투수계수가 높았는데 이는 Benson과 Daniel(1990)이 제시했듯이 최적함수비의 건조측에서는 입자가 면모 구조를 나타내어 간극이 커지고 반대로 최적함수비 습윤측에서는 입자가 분산화 구조를 나타내기 때문이라 판단된다. 국내 Coal Fly Ash와 비교해보면 물성치와 마찬가지로 큰 차이를 보이지 않아 지방공학 적 활용 가능성을 보여주었다.

표 4. MSWIF의 역학적 특성

실험결과 Material	일축압축강도 (kg/cm ²) ^a	점착력 (kg/cm ²) ^a	내부마찰각 (°) ^a	투수계수 (×10 ⁻⁶ cm/sec) ^a
MSWIF	1.48	0.13	45	0.86
국내 ^b (Coal Fly Ash)	1~3	0~1	32~45	10~25

^a 최적함수비로 다져진 상태의 값; ^b 이용수 외(1994)

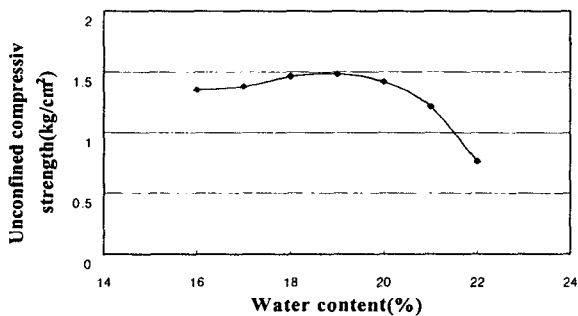


그림 3. 다짐함수비에 따른 일축압축강도

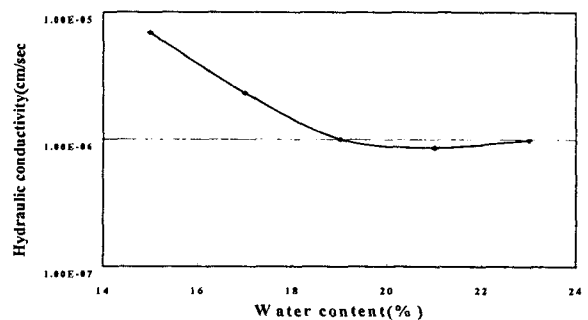


그림 4. 다짐함수비에 따른 투수계수

3.3 중금속 용출 특성

MSWIF의 중금속 함유량을 알아보기 위하여 용액의 pH를 2~3으로 유지시키면서 탈착시험을 한 결과를 표 5에 나타내었다. MSWIF는 Pb와 Zn을 특히 많이 함유하고 있는 것을 알 수 있으며 지구표층부 각 원소의 평균함유량의 추정치(Klark number)와 비교하여 보면 상당히 높은 농도의 중금속을 함유하고 있음을 알 수 있다. 이는 쓰레기 중의 중금속들이 연소 시 MSWIF에 농축되었기 때문이라 생각되며 MSWIF의 매립 처분 시 이들 중금속이 용출되면 주위 지반을 오염시킬 가능성이 클 것으로 예상된다.

표 5. 국내 MSWIF의 중금속 함유량(ppm)

시험 항목	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn	pH
용출량	13.54	70.32	14.60	77.51	70.91	257.33	1832.24	2~3유지

MSWIF가 지반에 위치했을 때의 중금속 용출특성을 알아보기 위하여 폐기물공정시험법에 의한 용출 시험을 실시하였다. 이때 중금속 용출특성에 가장 큰 영향을 미치는 인자 중 하나인 pH를 고려하고자 초기 pH를 2와 6으로 나누어 시험을 실시한 후 그 결과를 표 6에 제시하였다.

표 6. 중금속 용출시험 결과(ppm)

평가항목	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn	최종 pH
용출량(초기pH 2)	<0.5	39.4	0.04	3.4	3.1	4.8	518.8	7.00
용출량(초기pH 6)	<0.5	14.75	<0.01	1.29	2.1	2.4	162.3	7.80
국내 기준치	1.5	0.3	1.5	3	-	3	-	-

기존의 폐기물 공정법(초기 pH 5.8~6.3)에 의한 MSWIF의 용출시험 결과 Cd를 제외한 중금속들은 기준치 이하의 용출농도를 나타내었으나 Cd는 기준치 0.3ppm을 훨씬 초과하는 14.75ppm을 나타내어 이에 대한 대책이 필요하다고 생각된다. pH의 영향을 고려하기 위하여 초기 pH를 2로 실시한 실험결과 용출농도가 증가하였는데 이는 중금속들의 특성상 초기 산성에서 중금속의 용해도가 높기 때문이라 판단되며, 따라서 현재 초기 pH를 5.8~6.3으로 고정시킨 폐기물 공정시험법에 의한 용출시험으로 다양한 조건에서의 중금속 용출특성을 파악하기는 불충분한 것으로 판단된다. 초기 pH를 2로 시험한 경우는 Cd외에 Cu와 Pb의 용출농도도 기준치를 넘었음을 알 수 있다.

전반적으로 MSWIF의 용출시험결과 유해중금속 중 Cd와 Pb가 상대적으로 고농도 용출되는 것을 알 수 있었는데 이는 Luz and Almeida(1998)와 Kammon and Jang(1999; Cd=10.4, Pb=19.6ppm)이 제시한 바와 같이 대부분 MSWIF의 Cd와 Pb 용출농도가 높다는 연구결과와 일치하는 것이어서 재활용 시 이에 대한 주의가 필요하다고 판단된다.

4. 안정화된 MSWIF의 지반공학적 특성

MSWIF의 안정화에는 시멘트와 석회가 많이 쓰이고 있으며(Zimmerman,1977; Terrel,1979), 일반적으로 시멘트와 석회는 MSWIF의 강도를 증가시키고 투수계수를 감소시키는 것으로 알려져 있다. 그러나 석회의 경우 MSWIF의 팽창문제(Poran and Ahtchi-Ali,1989)와 Pb의 용출문제로 본 연구에서는 시멘트를 사용하여 MSWIF를 안정화 시켰다. 가장 보편적으로 사용되는 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement)로서 석회석과 점토(또는 실리케이트)의 혼합물을 고온에서 소성시켜 제조한다. 시멘트는 산화칼슘(CaO), 이산화규소(SiO₂), 산화알루미늄(Al₂O₃)가 주성분으로 이 성분들이 전체조성의 90% 이상을 차지하고 있다.

4.1 다짐특성

시멘트 배합비에 따른 다짐특성을 그림 2에 제시하였다. 그림 2에 나타난 바와 같이 시멘트로 안정화된 MSWIF의 다짐특성은 안정화되지 않은 MSWIF와 큰 차이를 보이지 않았다. 시멘트 배합비에 따른 최대건조밀도와 최적함수비의 변화를 살펴보면 최대 건조밀도는 1.68g/cm^3 에서 1.72g/cm^3 까지 약간 증가하였는데 이는 시멘트의 비중이 3.15로서 매우 크기 때문에 시멘트에 의하여 상대적으로 혼합재의 비중이 증가하였기 때문이라 판단된다. 최적함수비는 증감현상이 뚜렷하지 않음을 알 수 있다.

4.2 강도특성

배합비와 양생일에 따른 MSWIF의 일축압축강도와 변형계수(E_{50} :응력-변형율곡선에서 최대응력의 50% 지점에서의 기울기)의 변화는 그림 5, 6과 같다. 시멘트 배합비가 증가함에 따라 일축압축강도와 변형계수는 증가하였다. 이는 시멘트 첨가에 의한 수화반응과 포졸란 반응이 그 원인이라 판단되며 이러한 증가양상은 시멘트 반응이 계속됨에 따라 장기적으로 지속될 것으로 판단된다. 또 초기 양생 7일 강도 증가량에 비하여 양생 14일, 28일 강도는 상대적으로 그 증가폭이 작았는데 이는 양생 7일까지는 초기 수화반응으로 인하여 강도 증가가 큰 반면에 이후부터는 포졸란반응에 의한 장기적인 강도발현이 그 원인이라 판단된다. 또 변형계수는 대략 $100\sim 300\text{ kg/cm}^2$ 의 범위로 강성(stiffness)이 상당히 높아짐을 알 수 있었다. 이에 따라 균열(Cracking)에 대한 저항성은 낮아질 것으로 예상되어 이에 대한 대책이 필요하다고 생각된다.

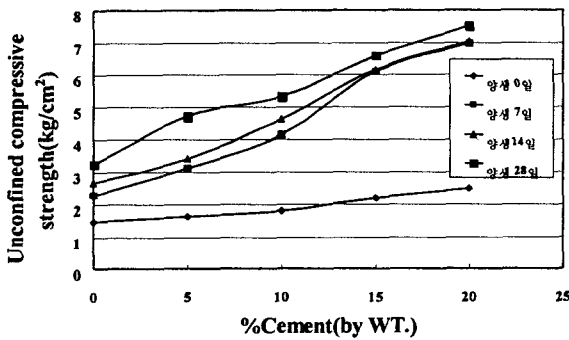


그림 5. 시멘트 배합비에 따른 강도

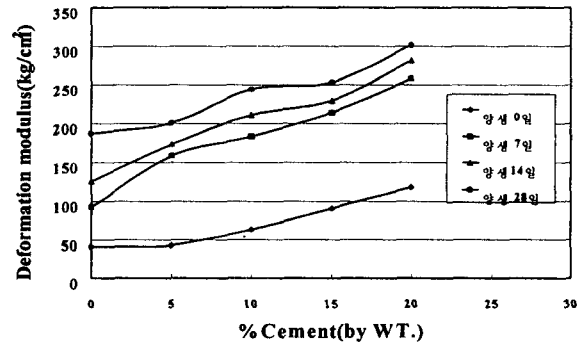


그림 6. 시멘트 배합비에 따른 변형계수

4.3 투수특성

시멘트 배합비와 양생일에 따른 투수계수의 변화를 그림 7에 제시하였다. 배합비와 양생일이 증가할수록 투수계수는 감소하는 경향을 나타내었는데 이는 시멘트와 물이 반응하면서 시멘트 반응 생성물질인 ettringite와 tobermorite가 간극내를 채움으로써 투수계수가 감소하였다고 판단된다. 이러한 투수계수의 감소양상은 상당시간 지속될 것으로 예상된다.

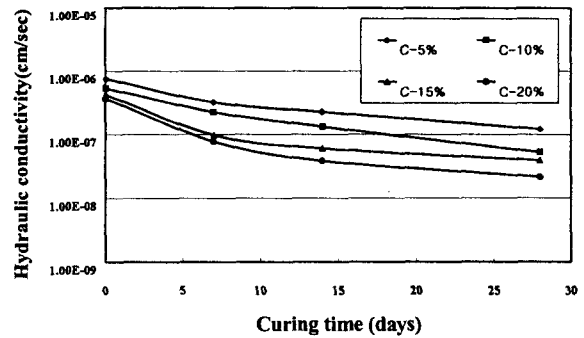
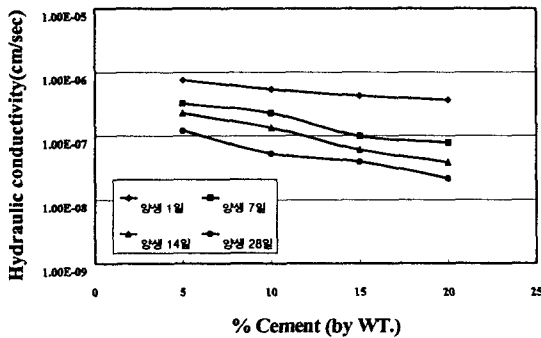


그림 7. 시멘트 배합비와 양생일에 따른 투수계수

4.4 중금속 용출특성

시멘트로 안정화된 MSWIF의 중금속 용출특성을 알아보기 위하여 시멘트 배합비, 양생일, 그리고 초기 pH에 따른 용출시험을 실시하였다. 시험결과 대부분 중금속들의 용출농도가 기준치 이하였으며 상대적으로 용출농도가 높은 Cd와 Pb만을 선택하여 그래프로 나타내었다(그림 8, 9)

배합비에 따른 중금속 용출량을 살펴보면 Cd의 경우 시멘트 배합비가 증가할수록 용출량이 급격히 감소하였는데, 이는 시멘트 첨가에 따른 용액의 pH 증가(10~13)로 인한 침전이 그 주요원인이라 판단된다. Pb의 경우에는 시멘트 배합비가 증가할수록 용출량이 감소하다가 어느 일정 배합비 이후부터는 다시 용출량이 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 양쪽성 이온인 Pb의 특성상 강 알칼리 조건에서의 재용출이 그 이유라 판단된다(Cernushi et al.,1990). 양생일과 초기 pH에 따른 중금속 용출특성을 살펴보면 양생일이 증가할수록 중금속 용출량은 감소하였으며, 초기 pH 6보다 초기 pH 2에서 중금속 용출량이 증가함을 알 수 있었다. 따라서 pH가 중금속의 용출특성에 큰 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었으며, pH에 대한 MSWIF의 완충능력(buffer capacity) 또한 중금속 용출에 중요한 영향을 미치리라 예상된다.

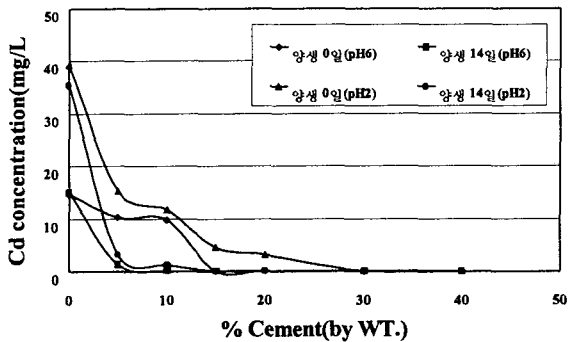


그림 8. 초기 pH와 양생일에 따른 Cd 용출량

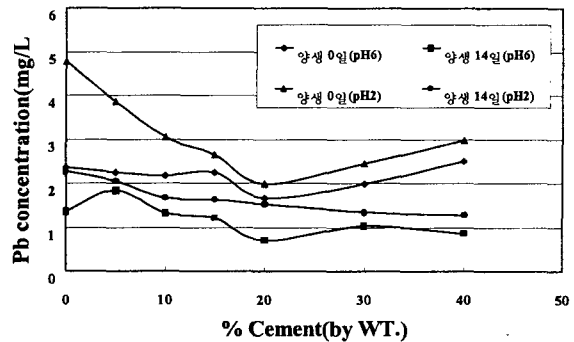


그림 9. 초기 pH와 양생일에 따른 Pb 용출량

또 포졸란 반응을 촉진시키기 위하여 생석회(CaO)를 혼합하여 초기 pH 6으로 용출시험한 결과를 표 7에 제시하였다. 표 6의 시멘트 안정처리하지 않은 MSWIF와 비교해 보면 Cd, Mn, Zn의 용출량은 감소했으나 나머지 금속들의 용출량은 비슷하거나 증가한 것을 알 수 있다. 시멘트 20%만을 첨가한 시험결과와 비교해보면 용출농도의 감소는 나타나지 않았으며 오히려 pH의 급상승으로 Cr, Cu, Zn, Pb 이온의 농도가 증가되는 것을 알 수 있었다. 이는 Cr, Zn, Pb 이온들의 특성상 강알칼리성 조건에서 침전된 중금속들의 재용출이 그 원인으로 판단된다. 시멘트 20%만을 첨가한 경우에는 강알칼리성 조건임에도 Cr, Zn, Pb 이온들의 용출량이 낮았는데, 이는 시멘트에 포함되어 있는 포졸란물질(SiO₂와 Al₂O₃)의 영향으로 재용출된 중금속 이온들이 CSH(calcium silicate hydrate)와 반응하여 불용성의 silicate 화합물로 존재하여 용출이 억제되기 때문이라 판단된다(Bishop,1988).

표 7. 생석회(CaO) 첨가에 따른 중금속 용출시험 결과(ppm)

평가항목	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Pb	Zn	최종 pH
용출량 (시멘트20%+석회10%)	<0.5	0.94	2.78	3.06	<0.01	235.99	3.09	12.46
용출량 (시멘트20%+석회20%)	<0.5	<0.1	3.74	3.82	<0.01	251.94	3.16	12.73
용출량 (시멘트20%)	<0.5	<0.1	1.27	0.93	<0.01	1.99	0.04	11.7

5. 결론 및 추후 연구과제

MSWIF의 재활용을 위한 지반공학적 특성과 시멘트 안정처리에 관한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) MSWIF의 기본 특성시험 및 역학시험 결과 본 연구에 사용된 MSWIF는 국내 다른 지역의 MSWIF와 화학성분의 차이를 보여 국내 MSWIF는 지역적으로 화학성분의 차이를 보일 것으로 예상된다. Coal Fly Ash와 비교해보면 화학성분에서는 차이를 보였으나 물성치 및 역학적 성질은 유사하여 지반공학 적 재활용 가능성을 보여주었다.
- 2) MSWIF의 중금속 용출시험결과 시멘트를 혼합하지 않은 MSWIF는 유해 중금속인 Cd와 Pb의 용출량이 기준치를 넘어 재활용 시 이에 대한 대책이 필요하다고 판단된다.
- 3) 시멘트로 안정화된 MSWIF는 강도가 증가하고 투수계수가 감소하며 또, 중금속 용출량도 감소함을 알 수 있었다. 따라서 MSWIF를 안정화시키는 데는 시멘트가 적당하다고 판단되며 석회는 Pb, Cu 및 Cr의 용출가능성이 있었다.
- 4) 이상의 결과로부터 현재 전량 매립하고 있는 MSWIF는 시멘트로 안정화시킬 경우 지반공학적으로 재활용이 가능하다고 판단되며 국내 여러 지역의 MSWIF에 대한 추가의 연구가 필요하다고 생각된다. 특히 함유량이 높은 알카리 금속(Na^+ , K^+)의 영향과 MSWIF와 시멘트의 재료특성상 물과 혼합 후 다짐되기까지의 경과시간에 따른 지반공학적 성질의 저하가 우려되며 시멘트 안정화에 의해 고정된 중금속들의 장기적인 용출특성이 규명되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 이용수, 정문경, 정하익, 우제윤(1994), "매립지 차수재로서 플라이에쉬 재활용을 위한 기본연구", 한국지반공학회 가을 학술발표회, pp.513~516
2. 천병식, 고용일, 오민열, 권형석(1990), "산업폐기물로 발생하는 석탄회의 토질역학적 특성에 관한 연구", 대한토목학회논문집, Vol.10, No.1 pp.115~124.
3. 한소영(1999), "폐기물 소각재의 시멘트 고형화", 충남대학교 석사학위논문"
4. Bishop, P. L.(1988), "Leaching of Inorganic Hazardous Waste", Hazardous Waste & Hazardous Materials, Vol.5, No.2, 129~143
5. Benson, C. H. and Daniel, D. E.(1990), "Influence of Clods on Hydraulic Conductivity of Compacted Clays", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE Vol.116, No.8, pp.1231~1248
6. Cernushi, S., Giugliano, M. and Paoli, I.(1990), "Leaching of residues from incineration", Waste Management and Research. Vol.8, 419~427
7. Goh, Anthony T. C. and Tay, Joo-Hwa (1993), "Municipal Solid-Waste Incinerator Fly Ash for Geotechnical Applications", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE Vol.119, No.5, pp.811~825
8. Gray, Donald H. and Lin, Yen-Kuang (1972), "Engineering Properties of Compacted Fly Ash", Journal of the Soil Mechanics and Found, ASCE Vol.98, SM4, pp.361~380
9. Kamon, Masashi and Jang Yeon-Soo(1999), "Solution Scenarios of Geo-environmental Problems", Proc., 11th. ARC. Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, Vol.2 pp 207~226
10. Poran, Chaim J. and Ahtchi-Ali, Faouzi (1989), "Properties of Solid Waste Incinerator Fly Ash", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE Vol.115, No.8, pp.1118~1133