

시멘트 고형화에 의한 유해폐기물의 처분

申 恒 植

〈한국과학기술원 토목공학과 부교수〉

1. 서 론

산업화에 따라 필연적으로 발생하는 유해산업폐기물은 질적, 양적으로 급격히 증가하는 추세인데, 이들 각종 유해폐기물은 적절한 처리를 통해서 최종적으로 인간과 자연환경에 무해하거나, 안전하게 처분되어야만 한다.

유기독성물질인 경우는 소각하거나, 유기물질을 산화시켜 무해화하는 방법을 사용할 수 있으나, 무기독성물질은 이와 같은 방법으로는 처분할 수가 없다. 중금속을 함유하는 산업폐수의 슬러지는 불용성의 수산화물이나, 황화물 형태로 존재하지만, pH나 산화조건이 바뀌면 유동성이 있는 형태로 바뀌게 된다. 이러한 유동성 중금속들은 생물학적으로 농축될 수가 있고, 결국 먹이사슬을 통해 인간건강에 급성 및 만성적인 영향을 끼치는 농도까지 이를 수 있다.

이러한 중금속을 함유하는 슬러지를 안정화시키는 방법으로서 고형화를 들수 있는데, 이것은 유해폐기물을 최종적으로 고체상의 덩어리로 고정시키거나, 표피를 입혀서 외부와 차단시키는 처리방법을 말한다. 이때 폐기물은 필요한 경우, 전처리를 통해서 안정화시킨 후, 고형화시키게 되는데, 물리적, 화학적작용이 동시에, 혹은 단독으로 일어나게 된다. 안정화/고형화는 취급을 용이하게 하고, 폐기물의 물리적 성질

을 개선시키며, 표면적을 줄이고, 폐기물로부터 오염물이 새어나가는 것을 막는 효과가 있다.

본고에서는 고형화 기술의 개발 배경과 고형화의 종류, 고형화 공정의 선정, 현장적용, 고화체의 특성 및 처분 방향 등에 대해 고찰해보기로 한다.

2. 유해폐기물 고형화 기술

2.1 기술개발 배경

일반적으로 안정화 및 고형화(S/S: Stabilization/ Solidification)라고 하는 것은 유해폐기물을 매립처분에 적합한 형태로 전환시키는 처리방법을 통칭한다. 안정화는 유해물질을 분해하거나 무해화하여 독성을 제거하는 측면을 고려한 것이며, 고형화는 폐기물의 물리적 특성을 개량하여 단일고체화하는 측면을 고려한 것이다. 그러나 안정화와 고형화가 동시에 이루어지기 때문에 대개 고형화라는 표현으로 나타낸다.

외국의 고형화기술의 개발과정을 살펴보면 1970년대이전까지는 주로 방사선 폐기물을 대상으로 하던 것이, 1970년도에는 FGD(Flue Gas Desulfurization)슬러지 및 중금속 슬러지를 대상으로 단일고체화하는 기술로 발전하였고, 1980년도에는 환경법규로 인해 대상 폐기물의 급속

한 확장과 함께 용출특성의 개량이라는 개념을 도입하게 되었다 [1]. 유해폐기물의 고형화 효과는 일반적으로 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 폐기물의 수분을 감소시킴으로써 취급하기가 용이하다.
- (2) 유해물질이 용출되는 표면적을 줄인다.
- (3) pH조절 및 흡착을 통해 유해물질의 용해도를 줄인다.

특히 미국에서는 수질 및 대기분야의 환경규제가 엄격해지면서 많은 양의 잔류 폐기물이 발생되었고 이러한 폐기물은 매립처분에 의존하게 되었다. 이에 1976년 RCRA(Resource Conservation and Recovery Act) 제정 그리고 1984년 HSWA(Hazardous and Solid Waste Amendments)개정을 통해 폐기물의 매립처분을 강력히 규제하기 시작했다. 이 법률에서는 몇몇 폐기물의 매립을 금지하고 매립되는 폐기물의 수분함량을 제한하는 한편, 유해폐기물 매립장의 시설기준을 강화했다. 그러나 어떤 처리기술일지라도 처분해야만 하는 잔류물이 발생되게 되며 고농도로 농축된 독성물질을 함유한 잔류물이 매립처분이 유일한 대안일 경우, 매립을 금지한 폐기물을 어떻게 처리할 것인가 하는 문제를 해결해야만 했다. 이에 고형화방법을 매립처분의 전처리 단계로 적용하려는 시도가 활발해져 마침내 BDAT(Best Demonstrated Available Treatment)로 인정하기에 이르렀다. 더우기 1981년의 CERCLA(Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act)제정, 그리고 1986년 SARA(Superfund Amendments and Reauthorization Act) 개정 에 따라 지정된 Superfund Site에서 불량 처분지의 개량방법(SITE : Superfund Innovative Technology Evaluation) 으로 확고한 위치를 점하게 되었다 [2, 3].

2. 2 고형화 방법 분류

고형화 공정은 고화체를 만들기 위해 사용되는 고화재료의 특성에 따라 크게 무기성 및 유

기성 공정으로 나눌 수 있다 [1].

유기성 고화재료는 대개 소수성 (Hydrophobic)의 특성을 갖고 있기 때문에 유기독성물질에 적합하며 폐기물내의 수분은 고형화 과정에서 증발하게 된다. 그러나 유기성 고형화는 고화재료, 에너지 및 장비 비용이 비싸기때문에 방사성 폐기물과 같이 유해성이 대단히 높은 경우에만 한정적으로 사용된다. 무기성 고화재료는 대개 시멘트 반응성을 갖고 있어 적절한 함수율의 무기성 슬러지 특히 중금속 슬러지의 고형화에 적합하다. 또한 시멘트와 친화성이 좋은 포졸란 물질을 슬러지 함수율 조절 및 시멘트 대체 고화보조제로 이용할 수 있어 비교적 비용이 저렴하다는 장점으로 인해 현재까지 가장 많이 이용되고 있는 방법이다.

현재 널리 알려진 대표적인 고형화공정으로 는 Lime-Pozzolan Processes, Portland Cement Systems, Thermoplastic Microencapsulation, Macroencapsulation 등을 들 수 있다. 여기에서 이상의 4가지 공정에 관해 간략히 고찰해 보기로 한다 [4].

2. 2. 1 Lime-Pozzolan Processes

포졸란(Pozzolan)이란 실리카(Silica)혼합물로서 그 자체는 수경성이 없으나 물의 존재하에서 석회와 결합하여 불용성의 실리카질 화합물을 생성시키는 물질로서 물과 접촉하면 미량의 칼슘(CaO)과 규산(SiO₂)이 용출되어 입자의 표면에 불용성의 치밀한 수화물과 함께 비결정질의 실리카 및 알루미늄 수화물이 생성된다. 이와같은 응결 고화 반응은 시멘트의 경화와 본질적으로 동일한 것이다. 포졸란 활성을 가지는 물질로는 화산재나 응회암 등의 자연산과 플라이애쉬 같은 인공적인 것이 있는데, 분말도가 좋고 형태가 구형인 플라이애쉬가 주로 쓰이는 포졸란 물질이다. 포졸란은 그 조성이 다양한데 플라이애쉬의 경우 SiO₂, Al₂O₃, CaO, Fe₂O₃의 순으로 구성되며 포졸란 활성에 기여하는 성분은 주로 SiO₂와 Al₂O₃라고 한다.

Lime-Pozzolan 공정에서는 먼저 포졸란을 첨가하여 폐기물과 균일한 상태로 섞은 다음 혼합하여 포졸란 반응이 일어나게 한다. 그 후 혼합물을 모울드에서 압축성형후 양생시키거나 매립지에 타설하면서 다짐(Compaction)하는 방식으로 처분한다. Table 1 은 여러가지 폐기물에 따른 적합한 석회 주입량을 보여주고 있

다. 이 공정은 다른 고형화 공정보다 비용이 적게 소요되고 고화재료만 잘 선택한다면 품질이 좋은 고화체를 얻을 수도 있다. 그러나 일반적으로 시멘트를 이용한 공정보다 내구성이 떨어지며 유해물질의 용출도 비교적 많기 때문에 고형화된 후에도 유해폐기물로 간주되는 경우가 많다.

Table 1 Approximate Lime and Fly Ash Requirements for Solidification [4] (kg /L)

Waste tye	Commercial lime	Waste lime	Lime, fly ash, and bentonite
Spent brine	3.2	5.4	2.2
Metal hydroxide sludge	2.9	5.6	1.1
Copper pickle liquid sludge	1.8	2.6	0.7
FeCl ₂ pickle liquid sludge	2.5	4.0	1.9
Sulfur acid plating waste	3.0	5.2	2.3
Oily metal sludge	0.6	0.84	0.54

2. 2. 2 Portland Cement Systems

시멘트의 주성분은 CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ 등의 산화물로서, 이들은 4 가지의 시멘트 화합물을 만든다. 시멘트는 물과 반응하여 수화작용을 통해서 응결하게 되는데, 이때 주목해야할 것은 C₃S와 C₂S의 수화반응시 수산화칼슘이 발생함으로써 pH를 높인다는 사실이다. 시멘트의 C₃S 및 C₂S의 조성비와 수화반응의 양론을 이용하여 산술적으로 계산하면 1g의 시멘트 수화반응으로부터 0.3g의 Ca(OH)₂가 생성되는 것으로 나타난다 [1]. 이것은 1g의 시멘트가 8meq의 산중화능력을 나타내는 것에 해당한다. 따라서 수화반응 결과 알칼리성 환경이 조성되어 중금속의 고형화에 대단히 유익하다. 또한 포졸란을 포트랜드 시멘트와 섞을 경우 수화반응시 생성된 Ca(OH)₂와 포졸란이 반응하게 되어서, Ca(OH)₂를 소모하면서 수화된 시멘트

고화체에 있어서 C-S-H의 비율을 증가시키게 된다. 이와 같은 포졸란을 시멘트와 섞어서 사용하게 되면 워커빌리티가 증가하고, 수화열의 발생이 낮아지며, 초기강도는 떨어지나 장기재령의 경우는 강도가 증진되며 수밀성과 황산염 이온의 침식에 대한 저항이 향상되는 장점이 있다.

시멘트가 수화반응을 일으키면 체적이 증가해서 수화생성물이 입자사이의 공극을 채우게 되며, 이때 수화정도와 물/시멘트 비에 따라 공극율이 달라지게 되는데, 물/시멘트 비가 증가함에 따라 공극율도 커진다. 공극율이 커지면 이것이 중금속 용출시의 통로 역할을 하게 되어 용출량을 크게 한다. 슬러지/시멘트 비의 경우는 이 값이 증가하면 시멘트의 총 중금속량이 증가하게 되고, 증가한 슬러지 양만큼 시멘트의 양이 줄어들어서 수화를 일으킬 수 있는 물질이 줄어들기 때문에 강도가 저하되고, 중금속 용출량이 높아지게 된다. Table 2 는 여

러가지 폐기물에 따른 적합한 시멘트 주입량을 보여주고 있다.

Table 2 Approximate Portland cement and fly ash requirements for Solidification [4] (kg / L)

Waste type	Cement/fly ash
Spent brine	3.8
Metal hydroxide sludge	2.4
Copper Pickle liquid sludge	1.9
FeCl ₂ pickle liquid sludge	3.5
Sulfur acid plating waste	3.8
Oily metal sludge	0.96

또한 유해폐기물의 시멘트 고형화에서는 유해물질의 용출특성을 개량시키거나 시멘트와의 반응을 촉진시킬 수 있는 여러가지 첨가제를 사용한다. 수화반응을 지연시키는 중금속 이온들의 방해줄이기 위해 시멘트의 수화반응을 촉진시키는 Sodium Silicate 또는 Potassium Silicate 등의 용해성 Silicate를 첨가제로 많이 이용한다. Bentonite같은 점토는 수분조절 및 오염물질 흡수작용을 함으로써 용출특성을 개량하는 효과가 있으며 석회는 pH및 온도의 상승을 통해 응결 특성을 향상시킨다고 한다. 그밖에 활성탄 및 지올라이트 등도 첨가제로 이용된다 [1, 4].

2. 2. 3 Thermoplastic Microencapsulation

이 공정은 폐기물을 100°C 정도에서 건조시킨 후 플라스틱성 재료(Asphalt Bitumen, Paraffin, Polyethylene)와 혼합시키는 방법으로 냉각시 고형화되어 폐기물 입자가 플라스틱으로 싸이게 된다.

특히 포졸란 및 시멘트 고형화로는 처리할 수 없는 용해성이 높은 독성물질을 효과적으로 고형화할 수 있는 장점이 있다. 그러나 특별한

장비와 숙련된 기술이 필요하고 폐기물 건조와 플라스틱 용융에 에너지가 많이 소요되는 단점이 있다.

2. 2. 4 Macroencapsulation

이 공정은 유해폐기물을 운반, 저장 처분에 용이하도록 드럼통이나 고분자 물질을 이용하여 폐기물을 물리적으로 둘러싸는 방법이다. 특히 Polybutadiene을 건조한 슬러지와 혼합해서 특별한 모울드에서 Thermosetting시켜 단일 고화체를 형성시킨 후 표면을 폴리에틸렌으로 5mm정도 코우팅시키는 방법으로까지 개발되어 있다. 그러나 드럼 및 고분자성 재료비용이 비싸고 에너지가 많이 소요되며 초기 시설투자와 숙련된 기술이 필요하다는 점으로 인해 실용화되지는 못하고 있는 실정이다.

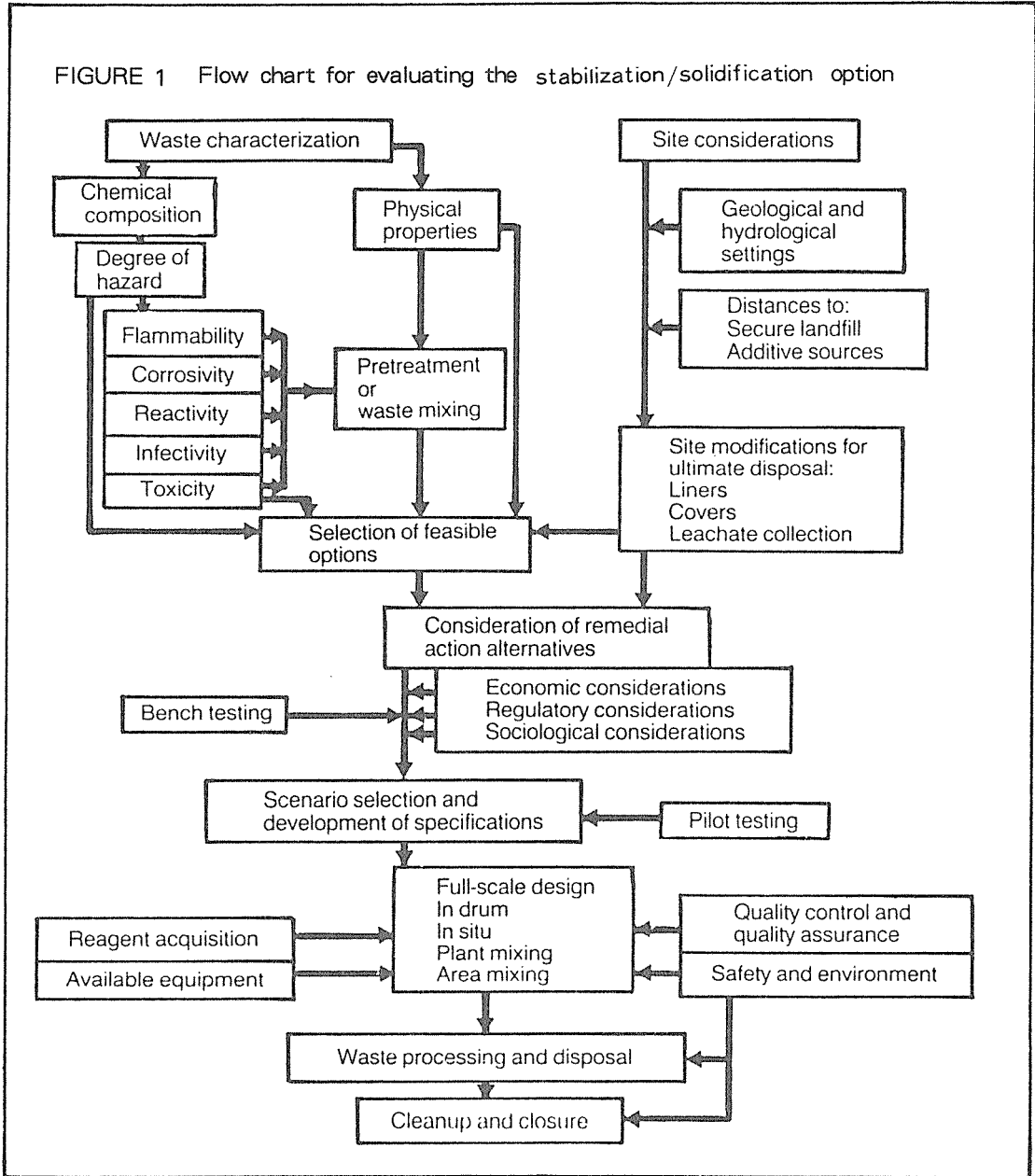
3. 고형화 공정의 선정 및 적용

유해폐기물에 고형화 공정을 적용시키고자 할 때 폐기물의 특성, 처분장 제반여건, 경제성 등의 여러가지 영향인자에 따라 적합한 공정 및 현장 적용방법이 달라지게 된다. Figure 1 은 불량처분지 개량의 경우에 고형화 방식을 선정하는 과정을 나타내고 있다.

3. 1 고형화 공정의 선정

폐기물의 운반, 혼합을 위한 적절한 장비 및 방식 선정에 있어서 폐기물의 물리적 특성은 대단히 중요하다 [4]. 대표적인 물리적 특성항목으로 함수율, 부유물질, 겔보기 비중, 입도분포, Atterberg Limit, Cone Index, 압축강도 등을 들 수 있다. 또한 폐기물의 화학적 특성은 고형화 공정 선정에 필수불가결한 요소이다. 따라서 폐기물의 전체적인 구성성분과 아울러 유해물질 및 고형화 방해물질에 관한 화학적

FIGURE 1 Flow chart for evaluating the stabilization/solidification option



분석이 필요하다.

각종 폐기물 종류에 따른 고형화 공정의 적합성을 개략적으로 요약하면 Table 3 과 같다. 포졸란 및 시멘트 고형화 공정에서 유기물의 방해작용이 중요하지만 현재까지의 연구결과는

대단히 제한되어있는 실정이다. 특히 초기의 응결이 지연된다 하더라도 후기에 강도 및 용출특성이 향상되는 경우도 있기 때문에 연구의 어려움이 있다. 일반적으로 유기성 폐기물의 고형화에 대한 부적합성으로 인해 10% 유기물

Table 3 Waste Compatibility with Various Stabilization Processes [7]

Waste component	Treatment Type			
	Pozzolan based	Cement based	Thermoplastic Microencapsulation	Macroencapsulation
Organics				
Orgnic solvents and oils	May impede setting, may escape as vapor	May impede setting, may escape as vapor	Organics may vaporize on heating	Must first be adsorbed on solid matrix
Solid organics (plastics, resins, tars)	Good-often increase durability	Good-often increase durability	Possible use as binding agent in this system	Compatible-many encapsulation materials are plastic
Inorganics				
Acid wastes	Compatible, will neutralize acids	Cement will neutralize acids	Can be neutralized before incorporation	Can be neutralized before incorporation
Oxidizers	Compatible	Compatible	May cause matrix breakdown, fire	May cause deterioration of encapsulation materials
Sulfates	Compatible	May retard setting and cause spalling unless special cement, is used	May dehydrate and rehydrate causing splitting	Compatible
Halides	May retard set, most are easily leached	Easily leached from cement, may retard setting	May dehydrate and rehydrate	Compatible
Heavy metals	Compatible	Compatible	Compatible	Compatible
Radioactive materials	Compatible	Compatible	Compatible	Compatible

함량을 최대 허용한계라고 한다. 고분자성 유기물을 고화재료로 이용하는 고형화 공정은 산화성 폐기물(Oxidizer)에는 부적합하며, 어떤 용제 및 기름은 플라스틱을 굳지 못하게 하고, 붕소염(Borate Salts)은 고온에서 굳어져 장비를 손상시킨다고 한다. 그러나 방해작용을 일으키는 성분들을 분해시키거나 최소화시키는 전처리과정을 거침으로써 고형화 공정을 효과적으로 적용할 수 있다. 대표적인 전처리 방법

으로는 중화, 산화 및 환원, 흡착, 침전, 폐기물의 혼합(Blending)을 통한 균일화 등이 있다 [4].

공정과 폐기물 특성의 적합성과 함께 고형화 공정 선정시 고려해야만 하는 중요한 요소로서 고형화를 통해 얻을 수 있는 물리적 특성의 개량효과와 소요되는 비용의 평가를 들 수 있다.

이상의 제반요소를 면밀히 검토하여 공정을 선정한 다음에는 선정된 공정의 최적 운영조건

을 결정하기 위한 파일럿 실험이 반드시 필요하다〔5〕. 파일럿 실험에서 조사해야할 항목은 다음과 같다.

- (1) 폐기물 취급에 따른 안전문제(Fume, Heat, Organic Vapor 등),
- (2) 폐기물 혼합 및 펌핑 특성,
- (3) 고화재료 배합비율 및 양생 조건,
- (4) 고형화후 부피변화.

지금까지 고화체 특성을 평가하기 위한 표준화된 시험방법 및 고화체에 관한 규격 등이 설정되어 있지는 않지만, 고형화공정의 운영조건을 결정하기 위해서는 고화체 규격을 설정할 필요가 있다.

3. 2 선정된 공정의 현장 적용

앞에서는 폐기물 특성, 고화재료 특성, 고화체의 규격조건 등을 기준으로 적합한 고형화 공정을 선정하고 운영조건을 결정하는 제 1 단계 과정에 관해 살펴보았다. 이제부터는 제 2 단계 과정으로 선정된 고형화 공정을 실제 현장에 적용하기 위한 혼합방식 선정, 장비선정, 비용 분석 등에 관해 고찰한다. 현재까지 고형화 공정을 위해 개발된 혼합방식은 크게 In-drum Mixing, In-situ Mixing Mobile Mixing Plant, Area Mixing 등 4가지로 나눌 수 있다.

In-drum Mixing은 드럼통을 혼합 및 고화체 저장용기로 이용하는 방식으로 매우 유독한 폐기물을 처리할 때 적합하다. 이 방식은 일정량의 폐기물이 들어있는 드럼통에 여유공간을 남겨둔 채 고화재료를 넣은 후 드럼통자체를 교반해서 고형화시킨 다음 여유공간을 채운 후 밀봉한다. 따라서 드럼통 값이 고화재료 비용보다 많이 들며, 드럼통내에서 혼합하기 때문에 완전혼합이 어려워서 품질관리면에서 어느 정도 문제점을 내포하고 있다.

In-situ Mixing은 액체나 슬러리 상태로 존재하는 라군을 폐쇄시킬 때 적합한 방법으로 Kiln Dust 또는 플라이애쉬 등을 대량투입한 후 건설장비를 이용하여 혼합한다. 따라서 균일한 고화체를 얻기는 힘든 단점이 있으나 비용면에

서 가장 유리한 방식이다.

Plant Mixing은 폐기물과 고화재료를 이송, 계량, 혼합하는 단위공정들이 결합되어 있는 이동식 혹은 고정식의 시스템을 말한다. 액체상이나 함수율이 높은 슬러리의 경우에는 펌프를 통하여 처리하게 되고, 고형분이 높은 슬러지는 건설장비를 이용하여 이송하게 되며, 고화재료와 폐기물과의 혼합은 부피비 혹은 무게비에 의해서 조절되게 된다.

Area Mixing은 최종처분장에서 폐기물과 고화재료를 교대로 층을 이루게 하면서 일정한 높이로 넓게 퍼서 건설장비를 이용하여 혼합하는 방법이다. 이 방식은 고형분이 많은 슬러지나 오염된 토양을 처리할 때 적당한 방법으로 넓은 토지를 요구하는 단점이 있다.

고형화 공정의 현장 적용시 가장 중요한 작업은 고화재료와 폐기물을 혼합하는 것이다. 따라서 장비 및 비용은 혼합방식 선정과 밀접한 관계를 갖고 있다.

4. 고화체 특성 및 처분방법

고화체 특성은 수송 및 처분 작업에 있어서의 적합성을 평가하기 위한 물리적인 측면과 최종처분후 환경영향을 평가하는 화학적인 측면으로 나눌 수 있다〔5〕.

4. 1 물리적 특성

고화체 형태는 고화재료의 종류와 첨가량에 따라 토양처럼 작은 입자의 형태(Granular Soil-like Material)에서부터 콘크리트처럼 한덩어리 형태(Monolithic Concrete-like Mass)에 까지 다양하다. 따라서 고화체의 물리적 특성은 고화체 형태에 따라 토질 및 콘크리트 시험방법을 응용하여 측정하는 경우가 많다. 물리적 특성 중에서 가장 중요한 항목은 Table 4 와 같이 5 가지로 요약할 수 있다.

Table 4 Standard Tests of Physical properties
[7]

- Bulk and Dry Unit Weight
- Unconfined Compressive Strength
- Permeability
- Wet/Dry Durability
- Freeze/Thaw Durability

고형화 공정은 대개 고화재료의 첨가가 필수적이기 때문에 고화체의 부피 및 무게가 증가하게 된다. 무기성 고형화에서 부피증가비는 시멘트만을 이용한 경우 1.3 정도이지만 플라이애쉬를 이용한 경우 2.3 정도까지 증가하게 된다. 또한 겔보기 밀도는 $1.25 \sim 1.75 \text{ g/cm}^3$ 정도이고 함수율은 0.14~0.50 정도라 한다. 시멘트 고화체의 공극율을 조사한 연구결과에 의하면 공극율은 0.25~0.75 정도의 광범위한 변화를 보이며 공극율과 함수율을 비교해보면 공극중 일부만이 수분으로 채워져 있다 [1].

시멘트 고화체의 압축강도는 $1 \sim 50 \text{ kg/cm}^2$ 정도로 광범위한 변화를 보여주며, 특수계수는 점토와 비슷한 $10^{-7} \sim 10^{-9} \text{ m/sec}$ 정도라고 한다. 또한 자연적인 풍화에 대한 내구성은 Freezing/Thawing 또는 Wetting/Drying 시험을 통해 측정한다.

많은 연구결과에 의하면 고화체의 물리적 특성에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 물/시멘트 비라고 한다. 경제적인 측면에서 시멘트를 적게 사용하는 것이 바람직하다. 그러나 그 결과 물/시멘트 비가 증가함으로써 강도가 저하되고, 투수계수가 증가하며, 풍화작용에 대한 저항이 감소하게 된다. 또한 시멘트만의 수화반응에서 나타나는 현상과는 달리 폐기물의 고형화에서는 폐기물 입자표면에서만 수화반응이 일어나면서 얇은 막을 형성하는데 그쳐 콘크리트처럼 공극을 완전히 채우지는 못한다.

4.2 화학적 특성

고화체의 화학적 특성은 일반적으로 고화체

최종처분 후 고형화된 오염물질, 즉 유해물질의 용출특성을 평가하는 것이라 할 수 있다. 그러나 비용 및 시간적인 제약으로 인해 고화체 매립지에서의 침출수에 관한 현장규모의 연구는 거의 없었으며, 고화체 자체에 관한 실험실 규모의 용출특성 연구가 대부분을 차지하고 있다 [12].

고형화 효과중에서 가장 중요한 부분을 오염물질의 용출특성을 개선한다는 측면일 것이다. 그러나 시멘트 고화체의 단일고체특성(Monolithic Properties)을 용출시험시 어떻게 반영할 것인가에 따라 시험결과와 해석 및 응용이 달라지게 된다. 한가지 시험방법은 고화체가 여러가지 풍화작용으로 인해 단일고체성질을 상실하는 최악의 조건을 가정하여 고화체를 일정한 크기로 파쇄하여 용출시험을 실시한다. 이러한 경우에는 고화체내의 용해성 오염물질을 총체적으로 용출시킴으로써 오염물질의 최종적인 용출가능성을 평가할 수 있도록 한다. 다른 시험방법은 단일고체 상태의 고화체에 대한 용출시험을 통해 오염물질이 용출되는 속도를 파악하며 실제 매립지에서 장기용출을 예측할 수 있는 자료를 제공하는 것이다.

4.3 최종처분방법

고형화된 폐기물 즉 고화체의 최종처분방식은 자연환경적인 여건, 사회경제적인 여건 그리고 규제제도적인 여건에 따라 다르지만, 일반적으로 매립(Landfill), 해양투기(Ocean Dumping), 건설자재로의 재활용(Reuse as Construction Materials)등을 들 수 있다. 여기에서 고화체의 3가지 최종처분방식에 관해 고찰해 본다.

4.3.1 매립

일반적으로 매립방법을 유해폐기물을 처분하기 위한 안전매립(Secure Landfill)과 일반폐기물을 처분하는 위생매립(Sanitary Landfill)으

로 구분할 수 있다. 따라서 유해폐기물을 고형화한 고화체를 여전히 유해폐기물로 간주하는가 여부에 따라 매립방법이 결정되게 된다. 즉 현재 여러나라에서 이용되고 있는 대표적인 평가기준인 용출시험을 통해 고화체를 안전매립할 것인가 위생매립할 것인가가 결정된다. 고화체의 유해성 여부에 대한 관점들을 정리해보면, 고형화되지 않은 유해폐기물보다 고화체가 상대적으로 무해하지만 고화체에는 유해물질이 함유되어 있기 때문에 일반폐기물보다는 유해하다는 판단이 지배적이다 [6]. 따라서 폐기물의 유해성 정도를 기준으로 적합한 규제기준을 마련함으로써 유해폐기물을 효과적으로 관리하고 일관된 환경수준을 유지할 수 있도록 해야 한다는 원칙을 고려할 때 고화체는 중간정도의 규제를 받아야 한다고 할 수 있다.

고형화의 주목적이 폐기물로부터 용출되는 오염물질을 줄이기 위해 단일한 고체(Monolithic Solid)로 전환시키는 것이므로 고화체의 단일 고체특성을 적절히 활용할 수 있는 매립처분방식을 선정해야 한다. 일반적으로 고화체를 크게 제작하는 것이 오염물질 용출측면에서 유리하기 때문에, 매립지 전체를 하나의 고화체로 조성하는 방식이 시도되기도 한다 [7]. 이를 위해서는 폐기물을 수송하여 매립장근처에서 고화재료와 혼합한 다음, 슬러리상태로 처분하여 매립장에서 양생이 이루어지도록 해야 한다. 또한 고화체 매립장을 폐쇄(Closure)할 때에는 자연적인 풍화작용, 즉 Freezing/Thawing 및 Wetting/Drying으로 인한 고화체의 균열을 방지하기 위해 충분한 최종복토를 실시하여야만 한다.

유해폐기물을 취급하는 모든 경우에 있어서 유해물질의 누출여부의 감시계획(Monitoring Program)은 대단히 중요하다. 고화체의 매립의 경우에도 매립작업중에 발생할 수 있는 대기, 지표수, 지하수에 대한 오염여부를 감시하고 저감대책을 수립하여야만 한다 [5]. 매립완료후에는 고화체 및 라이너 균열 및 기타 매립지 시설물의 파괴를 감시하기 위한 정기적인 조사와 아울러 감시정(Monitoring Well)을 설

치하여 지하수의 오염여부를 오랜기간 측정해야 한다. 고화체 매립장은 구조적인 안정성으로 인해 매립완료후 초기에 부지의 적극 활용을 기대할 수 있다. 매립부지의 활용단계에서는 지반침하, 지지력, 사면안정 등의 구조적인 측면과 대기 및 지하수 오염 등의 환경오염적인 측면을 신중히 고려하여야 한다 [7].

4.3.2 해양투기

해양투기에 대한 규제가 강화되면서 해양환경에의 악영향을 극소화시키면서 방대한 해양의 정화능력을 이용할 수 있는 해양투기 공법의 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다 [8, 9]. 특히 매립장 확보의 곤란에 대처하기 위해 고화체 제조후의 해양투기가 적극 검토되고 있다. 예를들어, 석탄화력발전소에서 발생하는 막대한 양의 FGD(Flue Gas Desulfurization) 슬러지 및 플라이애쉬를 시멘트를 이용하여 블럭(20×20×40cm)으로 고형화시킨 후 해양투기하는 방안이 연구되었다. 미국에서 1976년부터 시작된 연구는 우선 적합한 강도의 블럭을 제조하기 위한 배합비를 결정하고, 블럭으로부터 오염물질의 용출특성분석과 해양생물에 대한 독성실험을 거쳐, 1980년 18m 깊이의 해양에 15,000개의 블럭을 투입한 후 수년간 해양생태계의 영향을 면밀히 조사하였다. 이 연구를 통해 해저에 투기된 블럭은 해양생물에 서식처를 제공하는 인공어초(Artificial Reefs)로서 작용함을 확인할 수 있었다. 그 후 블럭의 대량생산을 위한 시범공장 건설을 통해 경제적인 타당성 조사를 계속하고 있다.

이와 함께 고농도의 티타늄(Ti: Titanium Metal)을 함유한 슬러지를 플라이애쉬를 이용하여 블럭으로 고형화한 후 해양에 투기하기 위한 연구가 있었다 [10]. 이 연구에서 20kg/cm²를 블럭취급에 필요한 최소한의 압축강도로 설정하여 최적배합비를 결정하고, 블럭을 6개월 동안에 해수에 침적시켜도 압축강도의 변화가 거의 없음을 발견할 수 있었다. 또한 파쇄한 고화체에 대한 용출시험을 행하여 중금속

이 거의 용출되지 않음을 알 수 있었으며, 용출시험결과를 해저오염물 확산모델에 적용해본 결과 1000 고화체를 투입할 경우 중금속 농도의 영향반경이 100m 미만으로 예측되었다. 비용면에서도 고형화한 후 매립처분하는 방식과 비슷한 수준으로 나타나 중금속 슬러지 블록의 해양투기가 가능성 있는 대안임을 확인할 수 있었다.

4. 3. 3 건설자재로의 재활용

폐기물의 재활용은 천연자원 및 에너지 소비

를 절약할 수 있고 환경오염을 저감할 수 있기 때문에 각국에서 적극 권장하고 있다. 특히 건설자재로의 재활용은 다양한 폐기물을 대상으로 적용범위가 날로 확대되고 가고 있다. 폐기물을 인간생활과 밀접한 관계가 있는 건설자재로 재활용하고자 할 때 우선적으로 고려해야할 사항은 환경오염의 최소화라 할 수 있다. 따라서 폐기물을 적합하게 재활용하기 위해서는 환경에 미치는 영향을 면밀히 검토하고 저감대책을 수립해야만 한다. 재활용시 유용하게 이용할 수 있는 3 단계 환경영향 평가방법은 다음과 같다 [11].

1 단계 : 폐기물에 함유된 유해물질 평가,

Table 5 Waste Uses in Construction and Their Environmental Impacts [11]

Use	Possible Waste	Environmental Effect	
		Advantages	Disadvantages
Ceramics, insulation	Metallurgical slags	1. Insolubilization	1. Leaching under certain condition
	Spent oil shale	2. Dust control	
	Waste glass		
Concrete	Fly Ash	1. Insolubilization	1. Possible leaching of heavy metals 2. Possible abrasion
	Metallurgical slags	2. Dust control	
	FGD sludges		
Agregates	Waste rock	1. Fixation in stable matrix	1. Possible leaching of heavy metals 2. Possible abrasion 3. Dusting problem in processing 4. Radiation from some tailing
	Mill tailings		
	Waste glass	2. Dust control in product	
	Metallurgical slags		
	Fly ash		
	Bottom ash		
Embankments, road base	Waste rock	1. Better control	1. Erosion and abrasion 2. Leaching of heavy metals 3. Phytotoxicity 4. Heavy metals into food chain 5. Radiation from some tailings
	Mill tailings		
	Fly ash		
	Bottom ash		

2단계 : 재활용과정에서 발생할 수 있는 유해 물질 이동특성 평가,

3단계 : 이동경로상에서 회석용량 평가.

여기에서 폐기물에 유해물질이 함유되어 있다 하더라도 유해물질이 이동하는 경로를 차단함으로써 환경오염을 방지할 수 있다는 사실은 대단히 중요하다. 특히 폐기물의 고형화는 건설자재로서의 구조적인 강도를 증진시키고 함유된 오염물질의 이동경로를 차단할 수 있기 때문에 건설자재화에서 필수적인 기술이라 할 수 있다. 고형화 기술을 적절히 이용할 수 있는 건설자재로는 세라믹 및 단열재료, 콘크리트, 골재, 도로 및 간척지 충전재료 등을 들 수 있다. Table 5는 건설자재 용도에 따라 재활용될 수 있는 폐기물과 재활용에 따른 환경영향을 요약하고 있다.

5. 결 론

지금까지 시멘트 고형화를 중심으로 고형화 기법에 대하여 전반적으로 살펴보았다. 이것은 결국 유해한 폐기물을 인간과의 접촉을 차단시키고, 안전하게 보관하고자 하는 기법으로서 처리가 경제적이고, 고화체가 자연환경 내에서도 장기간에 걸쳐 안정한 형태로 존재할 수 있도록 하는 지속적인 연구가 필요하다.

또한 보다 덜 위험하게 고화체는 여러 가지 용도로 재활용하고자 하는 연구도 필요하다.

<참 고 문 헌>

1. Cote, P. L., *Contaminant Leaching from Cement-based Waste Forms under Acidic Conditions*, Ph. D. Thesis, McMaster Univ., 294 p., 1986.
2. Wiles, C. C., *Perspectives on Solidification/Stabilization Technology for Treating Hazardous Waste*, EPA/600/D-87/027, 6p., 1987.

3. Barth, E. F. and Wiles, C. C., "Technical and Regulatory Status of Solidification/Stabilization in the United States," *Conference Proc. of The Application of U. S. Solid and Hazardous Waste Pollution Control Technology in Korea, Seoul, Korea, May 1-3, 1989.*
4. Cullinane, M. J. and Jones, L. W., "Solidification and Stabilization of Hazardous Wastes : Part 1." *Hazard. Material control*, Vol. 2, No. 1, pp. 9-18, 1989.
5. Cullinane, M. J. and Jones, L. W., "Solidification and Stabilization of Hazardous Wastes : Part 2," *Hazard. Material Control*, Vol. 2, No. 2, pp. 24-33, 1989.
6. Lucia, P. C., "Design of Landfills," *Conference Proc. of The Application of U. S. Solid and Hazardous Waste Pollution Control Technology in Korea, Seoul, Korea, May 1-3, 1989.*
7. Malone, P. G., et al., *Guide to the Disposal of Chemically Stabilized Solidified Waste*, U. S. EPA, SW-872, 113 p., 1980.
8. International Maritime Organization, *Fourth International Ocean Disposal Symposium : Program and Abstract*, 181 p., April 11-15, 1983.
9. International Maritime Organization, *Symposium Proc. of Ocean Waste Management : Policy and Strategies*, 77p., May 2-6, 1983.
10. Lechich, A. F. and Roethel, F. J., "Marine Disposal of Stabilized Metal Processing Waste," *J. of Water Pollut. Control Fed.*, Vol. 60, No. 1, pp. 93-99, 1988.
11. Gidley, J. S. and Sack, W. A., "Environmental Aspects of Waste Utilization in Construction," *ASCE, JEED*, Vol. 110, No. 6, pp. 1117-1133, 1984.
12. 신항식, 윤석표, "유해폐기물의 안정화 및 고형화 기법", *공해대책*, Vol. 20, No. 6, pp. 82-88, 1989.