

무기계 폐분진을 이용한 전자재 제조기술 II : 인공경량골재

이기강, 김정환
경기대학교 재료공학과
gglee@kyonggi.ac.kr

1. 서 론

현재 전 세계적으로 환경오염이 심화되면서 환경오염 방지에 대한 관심도가 높아지고 있으며, 이에 따라 각종 폐기물의 적절한 처리 및 재활용 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 환경 관련 산업도 크게 활성화되고 있다.

폐기물의 종류는 매우 광범위하고 특성 또한 다양하다. 그 중에서 분진형태로 배출되는 고상폐기물은 화력 발전소와 제철소, 제련소 등에서 막대한 양이 배출되고 있으며, 이러한 산업체들이 기간을 이루는 국내 산업구조의 특성상 이들 폐기물의 적절한 처리 및 재활용 기술의 개발은 절실한 당면과제이다.

고상폐기물은 매립·소각·재활용 중의 한 가지 방법에 의해 처리되나 궁극적으로는 폐기물의 발생량을 최소화하고 발생된 폐기물은 재활용하는 것이 가장 바람직하며 따라서 재활용 기술에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 폐기물의 자원화를 위해서는 재활용 제품의 품질과 특성이 우수하고 재활용 공정에서 2차적인 오염물질의 발생이 없어야 하며, 재활용 제품의 시장 규모가 크고 안정적이어야 하며 기존 제품에 비해서 경제성이 있어야만 기술의 실용화가 가능하다. 이와 같은 관점에서 폐분진을 이용한 토목·건축재의 제조기술은 실용화의 가능성이 가장 크다고 할 수 있다.

일반적으로 골재는 모르타르 또는 콘크리트를 만들기 위하여 시멘트나 물 등과 함께 일체로 굳어지는 모래, 자갈, 분쇄된 모래, 분쇄된 자갈 또는 쇄석 등과 같은 건축 자재를 가리킨다. 이러한 골재는 크게 천연 골재와 인공 골재로 분류할 수 있으며, 산지에 따라서 나눌 경

우 강바닥에서 채취한 강모래 및 강자갈, 산지 끝 저변 부나 구릉지 등에서 채취한 산림골재, 육지의 평지 부분인 옛 하천부지에서 채취한 육상 모래 및 육상 자갈, 그리고 해안 가까에서 채취한 바다자갈 등을 들 수 있다. 강모래나 강자갈은 대체로 둥근 형상을 갖고 있으며 골재 표면에 불순물이 거의 없으므로 콘크리트용으로 가장 우수한 성질을 갖지만, 그 이외의 골재들은 불순물을 다양으로 포함하고 있기 때문에 사용할 때는 충분한 세척이 요구된다. 특히, 바다 모래의 경우에는 염분을 함유하고 있으므로 콘크리트에 시공되는 철근을 부식시킬 우려가 높기 때문에 물로 씻거나 염분을 함유하고 있지 않은 모래와 섞어서 사용하는 등의 주의가 요구된다.

인공 골재에는 쇄석 골재, 인공 경량 골재 및 고로 슬래그 쇄석 등이 포함된다. 쇄석 골재로는 암석이나 옥석을 부수어 만든 분쇄된 모래나 분쇄된 자갈 등이 있고, 인공 경량 골재는 팽창성 혈암, 팽창점토 또는 석탄회 등을 소성하여 제조하며, 고로 슬래그 쇄석은 제철소에서 부산물로 산출되는 고로 슬래그를 원료로 해서 제조된다.

구미와 일본의 경우 19C 말부터 인공경량골재의 응용이 시작되었으며, 미국의 경우 연간 골재수요가 약 21억 톤이며, 이중 19백만톤의 경량골재가 옹벽 등의 채움재와 벽돌원료, 구조용 콘크리트 등에 사용되고 있다.^{1,2)} 주로 팽창혈암, 팽창점토 등의 천연원료를 이용한 경량골재가 사용되며 최근에는 석탄회와 각종 슬러지를 이용한 인공경량골재의 상용화가 이루어지고 있으나,³⁻¹¹⁾ 국내에서는 현재 인공골재 생산이 이루어지지 않고 있으며 인공골재 시장의 기반조차 형성되어 있지 않은 실정이다. 이는 국내의 천연골재 자원이 비교적 풍부하며,



인공경량골재의 원료가 되는 팽창점토와 팽창혈암 등의 부존자원이 거의 없다는 등의 여건에 기인한다.¹²⁾ 과거 일부 업체에서 인공경량골재 생산을 시도한바 있으나 사업화에는 성공하지 못하였으며, 일부 경량 건축재 제조업체에서 비구조용 경량골재를 수입하여 쓰거나, ASEM 빌딩 등의 일부 고층건물에 대해서 고가의 수입 경량골재가 적용되는 등 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다.

국내에서도 점차적으로 골재자원의 고갈 및 무분별한 골재채취로 인한 환경훼손에 대한 인식이 증가하고, 각종 건축·토목 구조물에 대한 인공 경량골재의 적용 필요성에 대한 인식이 높아지고 있어 각 분야에서 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 고에서는 폐기물을 이용한 인공경량골재를 중심으로 국내의 기술현황과 문제점 및 대책에 대해서 살펴보고자 한다.

2. 인공경량골재의 개요

골재는 시멘트 콘크리트나 아스팔트 혼합물을 만들기 위해 이용되는 자갈, 쇄석, 모래 등과 같은 입상의 재료를 지칭하는 것으로, 다양한 형태와 크기를 가지며 비중에 따라 경량골재(비중 2.2이하), 일반골재, 중골재(비중 4이상)로 구분된다. 콘크리트 구조물의 규모는 경제 성장과 건축 기술의 발달에 의해 대형화, 고층화가 계속되고 있으나, 콘크리트는 강도에 비해 비중이 크기 때문에 구조물의 자중을 증대시키는 문제점을 갖고 있다. 따라서 콘크리트가 갖고 있는 이러한 결점을 개선함과 동시에 여러 우수한 성능을 부여하기 위하여 경량골재를 이용한 경량 콘크리트가 이용되고 있다.

경량 골재는 인공 경량 골재, 천연 경량 골재 및 부산 경량 골재의 3종류로 구분된다. 천연 경량 골재로 제조된 콘크리트는 강도가 약하고 모양도 나쁠 뿐만 아니라 천연자원의 고갈에 따른 자원의 효율적 이용 및 자연 환경의 보존과 유지를 위하여 점차 그 사용이 감소되고 있다. 따라서 혈암, 고로 슬래그(slag), 점토, 구조토암 또는 석탄회(fly ash) 등을 분쇄 혹은 미분쇄한 다음 조립한 것을 소성하여 발포시킨 인공 경량 골재를 사용한 콘크리트가 많이 사용되고 있으며, 이중 고로슬래그 골재

Table 1. 인공경량골재의 응용분야

	응용분야	장점
Structural	고층건물, 교량, 해상구조물	자중감소
Masonry	경량벽돌, 경량벽체, 경량마단재	흡음, 단열, 내화성
Geotechnical	옹벽, 지하 관망, 암거 등의 채움재, 도로기층재, 연약지반 보강재	자중감소(50%), 배수성, 낮은 운송비
Asphalt	아스팔트의 골재 대용	낮은 운송비, 미끄럼 방지, 유지비 감소
Horticulture	육상정원용, 원예용	높은 보수력, 물과 비료 사용량 감소, 에너지 절약

는 토목성토용으로 재활용되고 있으며, 석탄회를 이용한 경량골재의 경우에는 미국과 유럽 등에서 이미 상용화되어 있다.

미국과 유럽에서는 인공경량골재 제조에 대한 연구가 이미 19C 말부터 시작되어 이미 상당한 수준의 성과가 있으며 비구조용 뿐만 아니라 구조용으로 폭넓게 활용되고 있다. 미국에서는 1917년에 팽창혈암과 팽창점토를 열처리한 인공골재를 제조하는데 성공하였으며, 1차 세계대전 당시에 바지선 제작에 인공골재를 구조용으로 처음 적용한 이후 건축 구조물, 교량 상판, 프리캐스트 구조물 등에 본격적으로 적용되기 시작하였다. 가까운 일본의 경우에도 1960년대에 이미 인공경량골재가 각종 구조물에 이용되기 시작하였으며, 폐기물을 이용한 인공골재도 다수 실용화되어 있다. Table 1에 인공경량골재의 다양한 응용분야를 정리하였다.

일반적으로 점토와 다른 규석성분을 함유한 물질(siliceous material)을 이용하여 제조한 다공성의 경량체를 팽창점토라 지칭한다. 현재, 펠렛(pellet) 형태의 팽창점토가 LECA, HAYDIT 및 KERAMSIT 등의 상품명으로 시중에 제공되고 있다. 경량골재의 제조공정에 있어서 점토를 팽창시키는 과정이 제대로 이루어지기 위해서는 출발 물질인 점토가 잘 정의된 좁은 조성 범위를 가져야 한다. 즉, 용제(fluxing agent)와 유기 물질(organic substance)에 대한 실리카(SiO₂) : 알루미늄(Al₂O₃)의 적당한 조성 범위를 구하기 위해서는 많은 실험이 요구되며, 3상 평형도 등이 이용된다.

경량골재의 원료는 가열 시에 성형체 중 일부 성분의 용융이 시작되며, 성형체의 표면이 액상에 의해 둘러싸이게 된다. 동시에 일부 성분으로부터 가스가 발생되며 온도 상승에 따라 가스의 압력은 증가하지만, 액상의 점

Table 2. 연도별 골재원별 골재채취허가 및 채취실적(건교부통계)

(단위 : 천m³, %)

연도	허가공급 계획(A)	허가실적					채취실적				
		하천	바다	산림	육상	계	하천	바다	산림	육상	계
1992	161,820	47,517	15,546	37,072	1,691	101,826	47,517	15,546	37,072	1,691	101,826
		46.66	15.27	36.41	1.66	100	46.66	15.27	36.41	1.66	100
1993	152,120	52,123	20,072	52,116	5,700	130,011	44,405	18,122	39,474	4,012	106,013
		40.09	15.44	40.09	4.38	100	41.89	17.09	37.24	3.78	100
1994	127,571	52,007	24,011	80,025	11,341	167,384	43,084	21,339	37,483	7,570	109,476
		31.07	14.34	47.81	6.78	100	39.35	19.49	34.24	6.91	100
1995	158,415	52,319	30,608	107,858	15,544	206,329	35,393	23,086	35,717	10,488	104,684
		51.38	30.06	105.92	15.27	203	34.76	22.67	35.08	10.30	103
1996	188,280	64,261	33,392	170,396	15,365	283,414	49,437	30,591	49,416	9,585	139,029
		22.67	11.78	60.12	5.42	100	35.56	22.00	35.54	6.89	100
1997	197,325	47,176	32,512	114,182	13,118	206,988	31,501	29,092	64,843	8,487	133,923
		22.79	15.71	55.16	6.34	100	23.52	21.72	48.42	6.34	100
1998	191,030	34,240	26,179	118,248	11,312	189,979	21,848	19,276	60,252	7,078	108,454
		18.02	13.78	62.24	5.95	100	20.14	17.77	55.56	6.53	100
1999	168,368	38,361	25,865	96,199	9,905	170,330	28,069	24,586	59,688	6,790	119,133
		22.52	15.19	56.48	5.82	100	23.56	20.64	50.10	5.70	100
2000	159,059	31,080	33,312	66,237	9,105	139,734	26,770	29,179	50,283	6,133	112,365
		22.24	23.84	47.40	6.52	100	23.82	25.97	44.75	5.46	100

성은 감소하여 발포가 일어나게 된다. 이 경우, 경량 골재 내의 가스 압력이 증가하면 분해 온도는 상승하게 되며, 가스가 용액 중에 용해됨으로써, 고온까지 가스의 발생이 지연된다.

팽창점토의 경우, 발생하는 가스는 주로 산소와 이산화탄소이며 유황 성분이 존재할 때에는 이산화황 가스가 생성된다. 만일, 풍화가 많이 진행된 원료를 사용하거나, 소성 온도가 지연되어 탄소 성분이나 유황 성분이 상실되면 경량 골재의 발포 능력은 저하된다. 그렇지만, 점토질 광물에 함유된 결정수의 분해에 의하여 발생하는 수증기가 다소 경량 골재의 발포를 도와줄 가능성도 있다.

우리나라의 천연경량골재 자원은 화산암 기원의 것은 분포상태로 보아 양적으로나 입지조건으로나 유리하지 못하며, 팽창혈암 또는 팽창점토의 부존자원도 열악한 실정이다. 따라서 대량으로 발생하는 석탄회(fly ash), 제지 슬러지(sludge), 쓰레기 소각재, 폐수 슬러지 등과 같은 산업 폐기물을 활용하는 것이 바람직하며 저비용으로 인공경량 골재를 제조하려는 연구가 활발히 진행 중에 있다.

3. 국내 골재 현황

국내에서 각종 토목·건축 공사에 사용되는 골재의

사용량은 연간 2억 m³에 달하며, 80년대 초까지는 하천 골재가 주로 이용되었으나 하천골재 자원의 고갈로 점차 산림골재와 바다골재에 대한 비중이 높아지고 있는 실정이다. 건교부 자료에 의하면 1993~1997년까지 한국자원연구소가 조사한 골재채취가능지역을 중심으로 한 전국 골재 개발가능량은 약 55억3,798만 m³로 나타났으며, 골재의 개발가능량을 골재의 종류별로 보면, 산림골재가 60.6%, 하천골재 18.2%, 바다골재 21.2%로, 산림골재의 비중이 높은 것을 알 수 있으며, 실제로 2000년 산림골재채취실적(Table 1)은 5천만 m³에 달하고 있다. 산림골재의 사용에 따르는 문제점으로는 골재채취에 따른 환경파괴에 대한 대책이 철저히 이루어지지 못하고 있다는 점으로 골재채취에 따른 수질·대기·경관 및 자연생태계 현황파악과 영향예측 및 저감방안의 수립·시행이 반드시 요구되며 생태계 보전지역·생태계 변화 관찰대상지역·상수원 보호구역·자연 공원·녹지지역 등에 대해서는 골재채취를 제한하는 것이 필요하다. 또한 골재채취 후 원상회복을 철저히 이행하고 경관 및 녹지 보전을 고려한 골재채취를 통해 자연경관이 우수한 지역의 보전 및 주변 자연경관의 조화 유지하기 위한 노력이 요구된다.

한편 산림골재 생산과정에서 부순모래를 생산하고 남는 무기성 오폐수인 석분오니가 산림골재 생산량의 약 20% 정도 발생하게 된다. 그러나 실제 소규모 석산에서

는 부순모래를 제조하지 않으므로 연간 2,100,000톤(약 1,500,000 m³)의 석분오니가 발생하고 있으며, 세골재의 고갈로 인하여 매년 약 30%씩 증가하고 있는 추세이다.

석분오니는 관련법상에 공정오니에 포함되며 이의 재활용은 석분오니를 주원료로 사용되는 성토재, 복토재, 도로기층재 등으로 이러한 용도로 재활용하는 경우에는 일반 토사류나 건설폐재 토사류 등을 50% 포함하여 재활용하도록 되어 있다. 그러나 위와 같은 재활용 방법을 이용할 경우 처리비용이 많이 발생하기 때문에 석분오니가 발생하는 대부분의 산림골재 생산업체에서는 석분오니를 재활용하지 못하고 방치하고 있는 실정이다. 석분오니의 물리·화학적 성상은 세라믹 원료 중 장석류에 속하며, 회장석과 sericite 등의 점토광물로 구성되어 있어 오염원료로 재활용이 가능한 물질이며 석분오니를 점토벽돌과 인공골재의 원료로 재활용하기 위한 연구가 이루어지고 있다.

4. 폐기물을 이용한 인공경량골재의 국내외 기술현황

각종 폐기물을 이용한 인공경량골재에 대한 연구는 전 세계적으로 활발히 이루어져 왔으며, 그 중에서도 석탄회(fly ash)를 이용한 경량골재 제조기술에 대한 연구는 약 40년 전부터 시작되어 구조용·비구조용 경량골재로 상용화되어 시판되고 있다.³⁻⁷⁾

폐기물을 이용한 경량골재의 발포기구는 미연탄소 또는 유기물질을 다량 함유하는 폐기물을 점토 등과 적절히 혼합하여 비교적 빠른 속도로 소결함으로써 골재의 표면이 액상의 형성과 함께 치밀화되어 탄소 또는 유기물 등이 산화되면서 골재 내부가 환원분위기로 되고 골재 성분 중에 다량 존재하는 Fe₂O₃가 환원하면서 O₂ 가스가 발생하게 된다. 이렇게 탄소 또는 유기물 등이 산화되면서 발생하는 CO 가스 그리고 Fe₂O₃가 환원하면서 발생된 O₂ 가스의 포집에 의해 발포가 일어나게 된다.^{8,9)}

영국에서는 이미 40년 전에 석탄회를 이용하여 15백만톤의 인공경량골재를 생산하였으며, 네덜란드에서도 석탄회를 재활용하여 2백5십만톤의 인공경량골재를 생

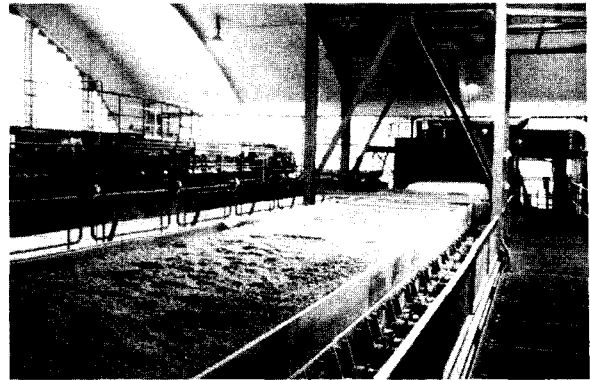


Fig. 1. SUSTAG사의 경량골재 소성공정.

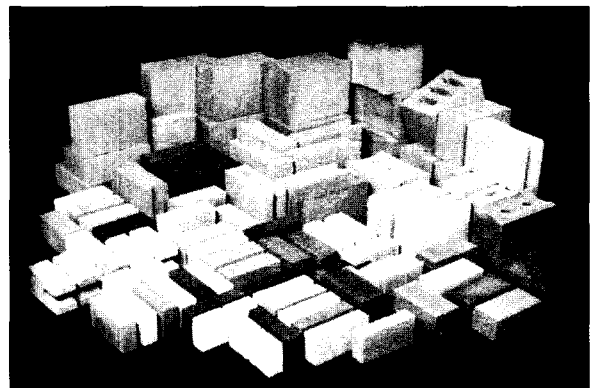


Fig. 2. 석탄회 인공경량골재를 이용한 이차제품.

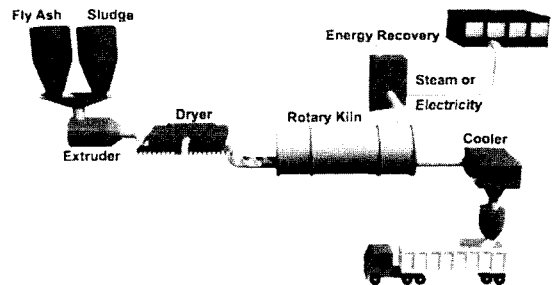


Fig. 3. 미국 Minergy 사의 석탄회 인공경량골재 생산라인의 개략도.

산하고 있다. Fig. 1에 SUSTAG 사의 경량골재의 소성 공정 사진을 나타내었으며 Fig. 2에 석탄회 인공경량 골재를 이용한 다양한 이차제품을 나타내었다.

미국에서는 연간 6천만톤의 석탄회가 발생하며, 이중 약 10% 정도가 6% 이하의 미연탄소함량을 갖고 있어 콘크리트 혼화제로 재활용되고 있으며, 또 다른 10%는 미연탄소가 문제가 되지 않는 단순 채움재, 도로기층재, 유해폐기물의 안정화 등의 분야에 재활용되며 나머지

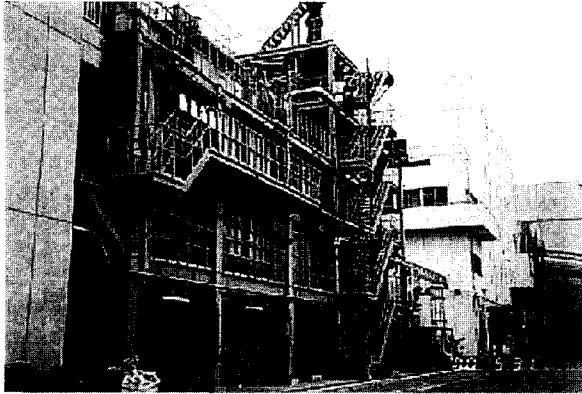


Fig. 4. 동경남부하수처리장의 경량골재 라인.

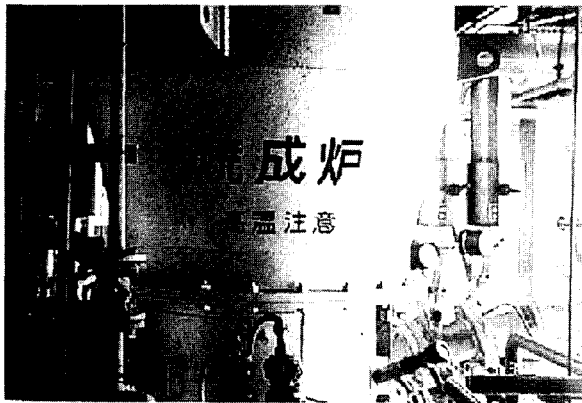
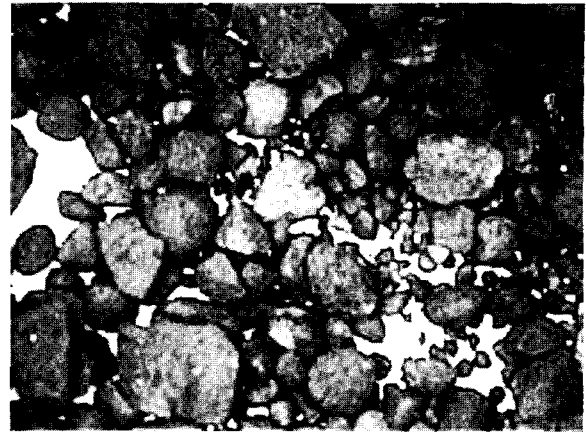
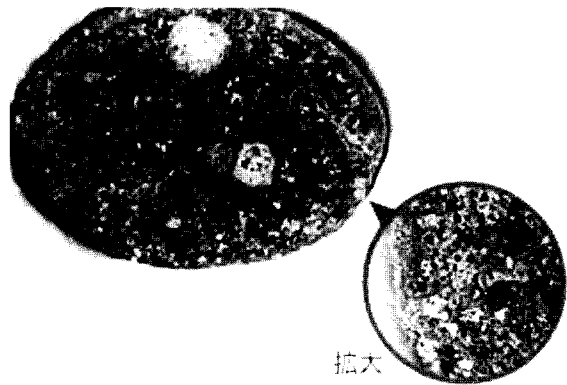


Fig. 5. 하수오니소각재를 재활용한 경량골재용 소성로

80%는 매립 처리되고 있는 실정으로 석탄회 처리 및 재활용 기술에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 이러한 석탄회 재활용 기술개발에 대한 여러 가지 시도 중에서 Wisconsin 소재의 Minergy 사는 석탄회를 이용한 인공경량골재의 성공적인 사업화 사례를 제공하고 있는데, 이들은 석탄회와 하수오니, 제지슬러지를 혼합하여 성형 후 1100°C의 온도에서 소성하여 인공경량골재를 제조하는 기술을 개발하여¹¹⁾ Minergy LWA 상표로 상품화하였으며, 병원과 도서관 등의 다수의 건물과 교량에 성공적으로 적용한 실적을 보유하고 있다. Minergy 사는 현재 Wisconsin Electric 사에서 발생하는 석탄회의 25%를 재활용하고 있는데 앞으로 슬러지 60,000 톤, 석탄회 85,000톤의 처리능력을 갖는 골재생산라인을 추가 설치하여 재활용률을 60%까지 증가시킬 계획에 있으며 폐열을 이용하여 4MW의 전력을 생산함으로써 보다 환경친화적인 생산공정을 계획하고 있다.



(a)



(b)

Fig. 6. 일본 메사라이트 사의 구조용 경량골재(a)와 수처리용 담체(b) 제품 사진.

Minergy 사의 경량골재 제조공정의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다.

가까운 일본의 경우 1964년에 미국과의 기술제휴에 의해 팽창철암을 원료로한 구조용 인공경량골재를 생산하여 일반 건축 구조물이나 토목 구조물에 사용되기 시작하였다. 일본에서는 각 지자체를 중심으로 폐기물 재활용을 지원하고 있으며, 이를 통해 인공골재를 포함한 다양한 분야에서 폐기물의 자원화가 이루어지고 있다. 이중 폐기물을 이용한 인공골재 제조에 대해서 살펴보면 다음과 같다. 동경남부하수 처리장에서는 동경만으로 유입되는 하수슬러지를 1일 400만톤 공급받아 탈수·소각하여 보도블럭, 경량골재, 용융슬래그를 제조하는데 이중 경량골재로 재활용되는 비율은 약 10%이며, 6,000 $\text{¥}/\text{m}^3$ 의 가격으로 판매되고 있다. Figs. 4, 5에 경량



골재 소성라인의 전경과 소성로를 나타냈다.

한편 일본의 경량골재 제조업계에서는 인공경량골재의 수요를 확대하기 위하여 구조용 경량골재 외에도 비구조용의 초경량 경량골재 및 수처리용, 원예용 경량골재 등의 시장개척에 노력하고 있는 실정이다. Fig. 6에 메사라이트 사의 구조용 인공경량골재 및 수처리용 담체제품의 사진을 나타내었다

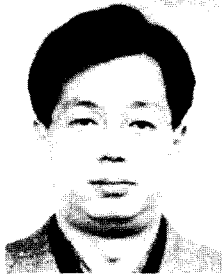
5. 결론

인공경량골재 제조기술의 경우 구미각국은 이미 100년에 가까운 기술축적을 통해 다양한 분야에서 실용화된 기술을 갖고 있으며, 일본의 경우에도 40년의 역사를 갖고 있다. 그러나 폐기물을 이용한 인공골재 제조기술에 있어서는 주로 석탄회를 이용한 인공경량골재 제조기술만이 실용화되어 있으며 그 외의 다른 폐기물을 이용한 경량골재 제조기술의 실용화는 거의 보고 되어 있지 않은 실정이다. 따라서 이 분야에 있어서 기존 기술 선진국과의 기술차이는 그리 크지 않은 것으로 판단된다. 또한, 기존의 인공경량골재의 경우 팽창혈암과 팽창점토 등의 부존자원을 필요로 하는 반면 폐기물을 이용한 인공골재의 제조에는 이러한 특정 자원을 필요로 하지 않으므로, 인공경량 골재의 부존자원이 빈약한 국내 실정에서는 향후 예상되는 골재자원의 고갈과 경량골재 수요에 대비하여 각종 폐기물을 이용한 경량골재 제조기술의 개발이 시급히 요구되며, 이의 실용화를 통해서 폐기물의 재활용과 기술 경쟁력을 제고될 수 있을 것으로 보여진다.

참고문헌

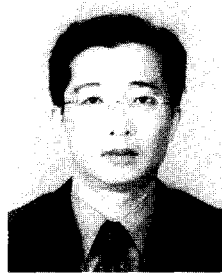
1. R. D. Stoll, and T. A. Holm, "Expanded Shale Lightweight Fill: Geotechnical Properties", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, **111** [8], Aug.

1985
 2. A. J. Valsangkar, and T.A. Holm, "Geotechnical Properties of Expanded Shale Lightweight Aggregate", Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol. 13, No.1, March 1990, pp 10-15
 3. J. Terukina, J. Kumamoto, M. Abe, M. Kato, K. Ozasa, "Manufacturing of Artificial Ultra Light-Weight Aggregates from Coal +Fly Ash," ACAA 13th International Symposium on Management & Use of Coal Combustion Products, Vol. 1, paper 1. 1999.
 4. G. Baykal, A. G. Doven, "Lightweight Concrete Production Using Unsintered Fly Ash Pellet Aggregate", ACAA 13th International Symposium on Management & Use of Coal Combustion Products, 1 [3]. 1999.
 5. M. M. Wu, R. A. Winschel, and G. J. Hasenfus, "Production of Manufactured Aggregates from Coal Combustion By-products," ACAA 13th International Symposium on Management & Use of Coal Combustion Products, Vol. 1, paper6. 1999.
 6. M. Shigetomi, M. T. Morishita, and M. Kato, "Characteristics of High Performance Aggregate Produced from Fly Ash Using a Rotary Kiln and Properties of Concrete Made Using This Aggregate," ACAA 13th International Symposium on Management & Use of Coal Combustion Products, Vol. 1, paper4. 1999.
 7. M. G. Kashi, C. Swan, O. Holmstrom, R. Malloy, "Innovative, Lightweight Synthetic Aggregate Developed from Coal Fly Ash", 13th International Symposium on Management and Use of Coal Combustion Products, Vol. 1, pp 5-1 through 5-14, January 1999.
 8. C. R. Brown, "Ceramic Product and Method of Making The Same", US Patent 2,576,565.
 9. L. J. Minnick, "Light Weight Aggregate and Method of Making The Same", US Patent 2,987,411.
 10. G. C. Harrison, "Method for Making Light Weight Ceramic Particles", US Patent 5,268,131.
 11. T. M. Nechvatal and G. A. Heian, "Light Ewight Aggregate from Fly Ash and Sewage Sludge", US Patent 5,342,442.
 12. 채영배, "경량골재의 원료광물", 한국광물학회, **3**, 1024-1030 (1990).



이 기 강

- 1978년 서울대학교 요업공학과 학사
- 1981년 서울대학교 무기재료공학과 석사
- 1987년 서울대학교 무기재료공학과 박사
- 1987년 포항 산업과학기술 연구소 주임
- 1990년 연구원
- 1990년 경기대학교 재료공학과 교수
~현재
- 1994년 Rutgers Univ. NJ, USA 교환
- 1995년 교수



김 정 환

- 1987년 서울대학교 무기재료공학과 학사
- 1989년 서울대학교 무기재료공학과 석사
- 1995년 서울대학교 무기재료공학과 박사
- 1995년 경기대학교 재료공학과 겸임교수
~현재