



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권으로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

하수슬러지 소각재의
인공경량골재화를 위한 기초연구



2007年 2月

釜慶大學校 大學院

環 境 工 學 科

金 度 亨

工學碩士 學位論文

하수슬러지 소각재의
인공경량골재화를 위한 기초연구

指導教授 李 濟 根

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2007年 2月

釜慶大學校 大學院

環 境 工 學 科

金 度 亨

金度亨의 工學碩士 學位論文을 認准함

2006年 12月 22日



主	審	工學博士	呂	碩	峻	인
---	---	------	---	---	---	---

委	員	工學博士	李	柄	憲	인
---	---	------	---	---	---	---

委	員	工學博士	李	濟	根	인
---	---	------	---	---	---	---

목 차

목차	i
<i>List of Tables</i>	iii
<i>List of Figure Captions</i>	iv
<i>Abstract</i>	v
제 1 장 서 론	1
제 2 장 문헌고찰	3
2.1 하수슬러지 소각재 특성 및 재활용	3
2.1.1 하수슬러지 발생 현황	3
2.1.2 하수슬러지 소각재의 특성	5
2.1.3 용융온도가 소각재의 소성에 미치는 영향	7
2.1.4 하수슬러지 소각재 재활용 기술	10
2.2 인공경량골재 제조 시 성형 특성	12
2.2.1 압출 성형	12
2.2.2 압축 성형	15
2.3 수치해석적 분석	17
2.3.1 유한요소해석을 통한 분석 방법	17
2.3.2 강소성 유한요소법(Rigid-Plastic Finite Element Method)을 이용한 해석	18
제 3 장 하수슬러지 소각재를 이용한 압출성형 인공경량골재 제조를 위한 수치해석적 분석	20
3.1 서 론	20
3.2 실험 재료 및 방법	21
3.2.1 실험 재료의 특성 및 배합	21
3.2.2 압출공정의 이론적 해석방법 및 가정	22

3.2.3 압출실험 장치 및 방법	25
3.3 결과 및 고찰	27
3.3.1 성형력에 대한 결과	27
3.3.2 압출공정에 따른 재료의 거동과 금형 내의 특성	30
3.4 결과 요약	34
 제 4 장 압축성형을 통한 하수슬러지 소각재의 인공경량골재 제조 ...	35
4.1 서 론	35
4.2 하수슬러지 소각재와 점토를 이용한 인공경량골재의 압축강도 특성	36
4.2.1 실험 재료 및 방법	36
가. 실험 재료 및 공정변수	36
나. 실험 장치 및 방법	38
4.2.2 결과 및 고찰	40
가. 소성온도 및 시간에 따른 압축강도	40
나. 혼합중량비에 따른 압축강도 변화	44
4.2.3 결과 요약	45
4.3 다양한 무기계폐기물과 하수슬러지 소각재를 이용한 인공경량골재 제조특성	46
4.3.1 실험 조건	46
가. 실험 재료	46
나. 공정 변수	46
다. 실험 장치 및 방법	48
4.3.2 결과 및 고찰	48
가. 소성온도에 따른 압축 강도	48
나. 소성온도에 따른 시편의 색상 및 체적 변화	50
4.3.3 결과 요약	51
 제 5 장 결 론	52
참고 문헌	54

List of Tables

Table 2.1 The production amount and the present state of treatment for sewage sludge in Korea	4
Table 2.2 The prediction for the increment of sewage sludge in Korea	4
Table 2.3 Analysis data of sludge and ashes	6
Table 2.4 Melting and boiling points of metal compounds	9
Table 2.5 Comparison of productivity for compression system	16
Table 3.1 Proximate analysis of sewage sludge and clay	21
Table 3.2 Heavy metal leaching test and ash analysis of sewage sludge and clay	21
Table 3.3 Mixture ratio by blending weight of testing material	22
Table 3.4 Estimation for formability by mixing ratio of testing material	27
Table 4.1 Proximate analysis of sewage sludge and clay	36
Table 4.2 Heavy metal leaching test and ash analysis of sewage sludge and clay	37
Table 4.3 Processing variables in compression test	37
Table 4.4 The classification by mixing ratio, diameter and moisture content of sample	38
Table 4.5 Ash analysis of testing material	46
Table 4.6 Processing variables in compression test	47
Table 4.7 The classification by incineration temperature and mixing ratio	47

List of Figure Captions

Fig. 2.1 Classification of extrusion process	12
Fig. 2.2 Geometrical processing variables of extrusion die	13
Fig. 2.3 Deformation behavior of material	14
Fig. 2.4 Variation of extrusion force by angle of die	14
Fig. 2.5 Process of numerical analysis	17
Fig. 2.6 A summery of mesh by using element and node	19
Fig. 2.7 Example of finite element mesh	19
Fig. 3.1 Result of compression test for investigation of deformation behavior	23
Fig. 3.2 Numerical model of extrusion die	24
Fig. 3.3 Universal Testing Machine	26
Fig. 3.4 Extrusion Die(diameter of outlet-angle of die)	26
Fig. 3.5 Phase by ratio of mixing weight of testing material	28
Fig. 3.6 Result of Analysis and experiment for extrusion force	29
Fig. 3.7 Material flow and Section of mixed material in extrusion process ...	30
Fig. 3.8 Distribution of strain in extrusion process (d_L_a)	31
Fig. 3.9 Distribution of flow stress in extrusion process (d_L_a)	32
Fig. 3.10 Distribution of flow vector in extrusion process (d_L_a)	33
Fig. 4.1 Result of analysis for compression forming	39
Fig. 4.2 Equipment of compression forming	39
Fig. 4.3 Compression strength by incineration temperature in case of incineration time at 20 minutes.....	41
Fig. 4.4 Compression strength by incineration temperature in case of incineration time at 30 minutes	42
Fig. 4.5 Compression strength by incineration temperature in case of incineration time at 40 minutes	43
Fig. 4.6 Variation of compression strength by ratio of mixing weight	44
Fig. 4.7 Compression strength by incineration temperature	49
Fig. 4.8 Volume of change by incineration temperature	50

A Fundamental Study on the Production of Artificial Lightweight Aggregate Using Sewage Sludge Ash

Do-Hyung Kim

Department of Environmental Engineering Graduate School
Pukyong National University

Abstract

In this study, production of artificial lightweight aggregate using sewage sludge ash was investigated with a intention of recycling of sewage sludge ash. To do this Numerical analysis by using Rigid-Plastic Finite Element Method was applied in production process of artificial lightweight aggregate to minimize trial-and-error and to satisfy for compression strength.

In order to find optimal parameter for production of artificial lightweight aggregate, extrusion and compression dies were constructed and characteristic of artificial lightweight aggregate by variable process factors were examined. Also Effects of binder on environment, compression strength and bake temperature of product were also estimated.

As the results, it was estimated that manufacture method through compression forming was more superior than extrusion because the former could form as excellent compressive strength and characteristic. Characteristic of clay and various inorganic wastes as a binder was grasped by controls of

mixing ratio or sintering temperature changes. Environmental effect and Utilization value as commercial product were also estimated

In we production of artificial lightweight aggregate using sewage sludge ash, results of this research are useful to forecast various processing variables of forming characteristic and quality of product.



제 1 장 서 론

국내의 하수슬러지 발생량은 2005년 기준으로 약 257만 톤이었으며, 그 발생량이 매년 증가하는 추세이다. 현재 하수슬러지의 처리는 해양투기나 매립, 소각, 재활용 등의 방법에 의존하고 있다. 그러나 해양투기는 슬러지를 해양에 투기하기까지의 관리, 저장, 운반 등의 과정에서 많은 문제점이 발생되고 있으며, 앞으로 하수슬러지의 해양투기에 대한 규제가 점차 강화되어 2011년에는 하수슬러지의 해양투기가 금지 될 예정이다. 이에 따라 최근 하수슬러지처리방안에 대한 연구가 보다 본격화 되고 있는데, 하수슬러지 및 중간처리 잔류물의 친환경적인 재활용에 중점을 두고 건조, 소각, 탄화, 고화 등 다각적인 방향으로 연구가 진행되고 있다. 이 중 하수슬러지의 감량화 및 안정적인 처리 시 비교적 효율이 높은 방식이 소각방법인데, 소각기술의 폭넓은 보급으로 인해 국내의 소각 처리량은 매년 증가하고 있는 추세이며, 소각재의 배출량도 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 일반적으로 소각 후 발생하는 하수슬러지소각재의 경우, 포틀랜드 시멘트 등의 고화제와 혼합하여 매립 처리하고 있으나, 유해한 중금속 함유여부 등에 따라 심각한 환경오염문제를 일으킬 수도 있으며, 발생하는 폐기물의 부피가 커지기 때문에 국내의 실정과 같이 매립지가 부족한 상황에서는 이 방식이 적합하지 못하다고 할 수도 있다. 일본 등에서는 하수슬러지소각재의 압축소성기술을 이용하여 인공골재 또는 우수의 지하 저류를 위한 침투성벽돌 등도 제작하여 활용하고 있다. 최근 하수슬러지 소각재의 건설자재로의 유효이용 가능분야는 아스팔트 필라, 노상 및 노반재, 경량골재와 시멘트원료 등이 있는데, 특히 소성공정을 통한 인공경량골재의 제조는 골재의 경량화, 에너지 비용절감 및 부족한 국내 골재수급을 동시에 충족시킬 수 있는 구체적인 방안이 될 것으로 전망된다.

본 연구에서는 하수슬러지의 소각처리 시 발생하는 소각재 재활용 방안의 일환으로 점결제로서 점토 및 다양한 무기계폐기물을 이용한 인공경량골재를 제조하여 그 가능성을 평가하고자 하였다. 인공경량골재 생산에 있어서 골재로서의 강도를 만족하고, 제품 제조 시 시행착오를 최소화하기 위한 하나의 방편으로, 강소성 유한요소법(Rigid-Plastic Finite Element Method)을 이용한 수치해석적 분석방법을 이용하였으며, 이를 통하여 하수슬러지 소각재 및 점결제를 이용한 인공경량골

재 제조의 최적성형공정변수를 파악하여 인공경량골재의 제조가 가능한 압출 및 압축성형 금형을 제작하였다. 제작된 금형으로 다양한 공정변수에 따라 하수슬러지 소각재를 이용한 인공경량골재를 제조하였으며, 제조된 시료를 통하여 성형공정 및 방법에 따른 제조공정의 효율성 및 골재로서의 가능성을 평가하고자 하였다.

또한 하수슬러지 소각재를 이용한 인공경량골재 제조 시 점결제로서 점토와 다양한 무기계폐기물 등을 이용하였으며, 점결제가 인공경량골재 제조 시 영향을 미칠 수 있는 환경적 요인과 혼합중량비 및 소성온도 조건 등으로 제품 특성에 대한 평가를 하고자 하였다.



제 2 장 문헌고찰

2.1 하수슬러지 소각재 특성 및 재활용

2.1.1 하수슬러지 발생 현황

국내 하수슬러지 발생량 추이를 보면 1997년 93개 하수처리장에서 일평균 4,050톤의 하수슬러지가 발생하였으나, 2002년에는 201개 하수처리장에서 5,680톤으로 발생량이 증가하고 있다. 정부는 장기적으로 80%의 하수처리율을 목표로 지속적인 하수처리시설 보급을 추진하고 있으나, 향후에는 더욱 하수슬러지 발생량이 증가 할 것으로 예상된다.

2001년 하수슬러지 직매립 금지가 발표되면서, 하수슬러지 처리방안에 대한 다각적인 연구가 이루어져 왔으나, 적절한 처리방식의 선택이 곤란해짐에 따라, 하수슬러지의 해양배출의 비율이 1997년 22%에서 2002년 71%로 크게 증가한 반면, 매립을 통한 처리율은 1997년 73%에서 2002년 12%로 급격히 감소하였다. 그러나 앞으로는 하수슬러지의 해양배출이 금지될 것에 대비하여 재활용이나 소각 등에 의해 육상에서 처리할 수 있는 근본 대책 마련이 필요한 것으로 보인다. Table 2.1에서 보듯이, 육상처리 방법 중 소각처리의 방법이 다른 처리방법에 비하여 급속히 증가하고 있음을 알 수 있다. 이에 따라, 하수슬러지의 소각으로 발생하는 부산물인 하수슬러지 소각재의 발생량도 크게 증가하고 있는 실정이며, Table 2.2를 보듯이 앞으로 하수슬러지 소각재의 발생량 또한 대폭 증가 할 것으로 예상된다. 현재 주로 매립 처리되고 있는 하수슬러지 소각재는 하수슬러지 구성 성분 중 무기물질이 주성분을 이루고 있으며, 석회계 소각재의 경우 일반적인 물리적, 화학적 특성을 확인한 후에 노반재 및 토양 개량제로 이용이 가능하며, 콘크리트 2차제품 및 타일 등으로도 제조 할 수 있다.

Table 2.1 The production amount and the present state of treatment for sewage sludge in Korea

(Unit: ton/day)

Specimen	Sewage disposal plant (point)	Sewage sludge						
		Generation	Ocean disposal	Landfill	Incineration	Recycling	etc.	Untreated
1997	93	4,050	815	2,709	25	118	27	356
			22.1%	73.3%	0.7%	3.2%	0.7%	-
1998	114	3,965	1,513	2,172	57	94	35	93
			39.1%	56.1%	1.5%	2.4%	0.9%	-
1999	150	4,364	2,247	1,755	91	220	0	51
			52.1%	40.7%	2.1%	5.1%	0.0%	-
2000	172	4,771	3,064	1,203	255	241	3	4
			64.3%	25.2%	5.4%	5.1%	0.1%	-
2001	184	5,212	3,810	628	379	324	56	15
			73.3%	12.1%	7.3%	6.2%	1.1%	-
2002	207	5,680	4,031	698	549	292	109	0
			71.0%	12.3%	9.7%	5.1%	1.9%	-
2003	236	6,199	4,616	399	941	240	-	-
			74.5%	6.4%	15.2%	3.9%	-	-

Table 2.2 The prediction for the increment of sewage sludge in Korea

(Unit: ton/day)

Component	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Total	19,165	19,549	20,269	20,747	21,002	21,346
Sewage sludge	7,745	8,158	8,907	9,414	9,698	10,071
Waste water sludge	11,420	11,391	11,362	11,333	11,304	11,275

2.1.2 하수슬러지 소각재의 특성

일반적으로 하수처리장에서 발생하는 하수슬러지는 탈수나 건조공정 전에 70~80%이상의 수분을 함유하고 있다. 하수슬러지를 건조 후 소각 할 경우 소각재에는 대부분의 함량을 차지하는 유기물과 수분을 제외한 무기성분만이 주로 남게 된다. 남은 무기물의 주요 성분은 SiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 , Fe_2O_3 , CaO 등으로 이루어져 있다. Table 2.3에서 보다시피, 하수슬러지 소각재는 다른 슬러지 소각재에 비하여 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 의 함량이 다소 높게 나타나며, 이들 성분을 이용한 재활용 방안은 매우 다양하게 연구되고 있다.

소각재에서의 중금속 용출문제는 소각의 특성상 제거가 어려운 가장 큰 환경적 단점이며, 이는 현재 하수슬러지 해양투기의 점차적 금지 문제와도 직접적으로도 연관된다. 소각재는 지정폐기물로 처리해야 하지만 재활용 여부에 따라 유용한 산업자원으로의 자원 재창출 및 환경오염 방지의 효과를 기대할 수도 있다. 국내에서는 아직 다양한 소각재의 처리 및 재활용에 관한 체계적인 연구가 미진한 실정이나 소각재를 효율적으로 이용하기 위한 새로운 활용기술이 개발된다면 소각재의 재활용뿐만 아니라, 폐기물의 지속적인 매립에 의한 국토의 손실 또한 방지 할 수 있어서, 기존의 소각재의 이용방법 이외의 고부가가치를 가진 재활용 방안에 대한 연구가 필요하다.

Table 2.3 Analysis data of sludge and ashes

Items	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Proximate (wt.%)										
Moisture	4.55	4.15	10.41	7.43	12.13	8.63	8.41	0.51	3.22	0.47
Volatile matter	18.54	14.06	18.16	13.36	12.14	9.15	41.86	1.59	3.61	2.16
Fixed carbon	30.04	21.72	0.98	1.07	1.25	1.25	4.14	0.09	2.30	1.29
Ash	46.87	60.07	70.45	78.14	74.48	80.96	45.59	97.81	90.88	96.08
Ultimate (dry basis, wt.%)										
C	24.16	17.04	3.02	2.26	4.19	3.07	17.58	0.59	0.44	0.47
H	1.25	1.03	1.86	1.42	2.48	1.85	6.24	0.21	0.51	0.39
N	0.69	0.95	1.38	1.33	1.16	1.18	2.46	0.48	1.57	1.22
S	2.07	2.18	0.46	0.32	0.49	0.34	0.37	0.40	2.44	0.003
O(difference)	22.73	16.12	14.6	10.26	6.92	4.94	23.57	0.01	1.14	1.39
Ash analysis(wt.%)										
SiO ₂	19.60	31.10	23.74	34.18	0.55	4.93	30.04	52.67	35.13	36.38
Al ₂ O ₃	5.74	5.48	5.43	6.30	2.20	3.08	13.47	17.75	5.55	8.54
CaO	8.69	15.23	9.64	14.82	3.33	12.21	6.71	6.86	33.06	30.15
Fe ₂ O ₃	52.70	33.22	47.31	29.87	85.33	65.71	29.39	12.97	2.45	3.94
K ₂ O	1.14	2.05	0.52	0.60	0.32	1.73	1.74	2.86	5.38	1.14
MgO	3.41	4.11	0.79	2.62	0.84	2.25	2.06	2.76	5.52	7.41
Na ₂ O	5.12	4.68	5.16	3.56	1.50	4.41	2.90	3.85	8.91	4.12
P ₂ O ₅	3.47	4.01	7.19	7.91	5.73	5.53	13.57	–	3.81	8.09
TiO ₂	0.12	0.12	0.21	0.14	0.18	0.16	0.12	0.26	0.19	0.22

A,B: Industrial waste incineration ash

C,D: Metal plating sludge ash

E,F: Dyeing sludge ash

G,H: Sewage sludge ash

I, J: MSW incineration ash

2.1.3 용융온도가 소각재의 소성에 미치는 영향

소각재의 성분은 주로 SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 등으로 구성되어 있으며, 낮은 온도에서는 반응을 하지 않던 성분들이 온도의 증가에 따라 서로 반응을 하여 새로운 결정을 형성 할 수도 있는데 이 때, 결정생성에 온도는 중요한 요인이 된다. 순수물질인 SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3 의 소성 시 용융온도는 $1570^\circ\text{C} \sim 2570^\circ\text{C}$ 정도로 아주 높은 편이지만 이들을 적당한 비율로 혼합하면 그 비율에 따라 용융점이 변화하는 공융(eutectic)현상이 일어나, 혼합물의 용융점이 순수물질의 용융점보다 낮아진다.

SiO_2 의 경우 소각재에서의 조성 비율이 증가할수록 용융점은 저하되는 것으로 알려져 있다. 또한 소각재 중의 알칼리 성분들은 소각재의 용융온도를 낮추는 역할을 하게 되는데, 그 대표적인 물질은 Fe_2O_3 이며, 그 성분이 약 20% 정도까지 함유되어 있는 경우에는 용제작용이 증가하지만, 그 이상의 양이 함유되었을 경우에는 용제작용이 그리 크지 않은 것으로 알려져 있다.(Fujimoto, 1988) 한편, 산성 산화물들은 용융온도를 높이는 역할을 하며, 대표적인 물질로는 Al_2O_3 가 알려져 있다.(Singer, 1981)

일반적으로 CaO/SiO_2 의 비율을 용융물의 용융점 및 유동성을 평가하는 하나의 지표로 사용하며 이를 염기도(basicity)라 한다. 이는 염기성산화물과 산성산화물의 비를 나타내는 것이며, 고분자계 하수슬러지의 경우 SiO_2 성분이 많고 석회계 하수슬러지의 경우 CaO 의 성분이 많은 편이다. Si 성분과 Ca 성분을 적절히 첨가하여 CaO/SiO_2 비를 1 정도로 조절 함으로써 용융온도를 감소시키기도 한다.(Watanabe, 1992)

또한 Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , NaCl , K_2SO_4 , K_2CO_3 등의 알칼리 금속성분들이 소각재에 포함되거나, 약품으로 주입되어 소각재의 용융온도를 감소시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 이 중 Na_2CO_3 는 소각재의 용융온도를 낮추어 부피를 줄이고 용출율을 낮추거나 Na중심의 결정을 생성하며, Na 성분이 낮은 온도에서 용융점이 높은 물질과 결합을 잘 하기 때문에 쉽게 소각재중의 중금속을 안정화시키는 것으로 알려져 있다. 또한 Na_2O 성분은 소각재의 용융온도를 대폭 감소시키는 용제(flux)작용을 한다. K_2CO_3 의 경우 알칼리 금속원자로 활성탄 제조 시 탄소원

자의 이온화 전위를 바꿔 기공형성에 촉매역할을 하는 것으로 이미 많은 연구를 통해 알려져 있으며, K_2O 는 응집(agglomeration)을 촉진시키는 것으로 알려져 있다(Ugurlu, 1998). 또한, Sulfate 성분은 분해와 함께 입자의 화학조성 변화로서 입자표면에 용융체의 형성을 촉진하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다.(Goblirsch, 1982 ; Bobman, 1980 ; Knox, 1977)

한편, 위의 알칼리 금속성분들도 공융 현상에 의하여 단일물질에 대한 혼합물의 용융점이 낮아지는 것으로 보고되고 있으며, 이는 순수한 Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , $NaCl$ 등이 혼합물로서 용융 시에 더욱 용융온도가 감소 될 수 있음을 보여준다.

Knox, 1977의 연구에서는 CaO 와 MgO 의 함량이 증가할수록 회재의 용융온도가 감소하였으며, CaO 와 MgO 가 용제작용을 한다고 알려져 있다.



Table 2.4 Melting and boiling points of metal compounds

Element	Compounds	Temperature(°C)	
		Melting point	Boiling point
Silicon	Si	1,412	2,680
	SiO ₂	1,722	–
Aluminium	Al	660	2,520
	Al ₂ O ₃	2,050	3,530
Sodium	Na	98	882
	NaCl	801	1,465
	Na ₂ O	1,132	–
Magnesium	Mg	649	1,090
	MgCl ₂	714	1,418
	MgO	2,825	3,260
Potassium	K	63	770
	KCl	772	1,437
	K ₂ O	490	–
Cadmium	Cd	321	767
	CdCl ₂	568	961
	CdO	–	1,497
Chromium	Cr	1,857	2,682
	Cr ₂ O ₃	2,330	3,000
	CrO ₃	196	–
	CrCl ₃ · 6H ₂ O	<83	–
Lead	Pb	327	1,753
	PbCl ₂	498	951
	PbO	890	1,472
Iron	Fe	1,537	2,872
	FeCl ₂	677	1,024
	FeCl ₃	304	332
	FeO	1,377	3,414
	Fe ₃ O ₄	1,597	–
	Fe ₂ O ₃	–	1,462
Copper	Cu	1,085	2,575
	CuCl	430	1,212
	CuCl ₂	<300	–
	Cu ₂ O	1,236	1,800
	CuO	1,122	–
Zinc	Zn	420	911
	ZnCl ₂	317	732
	ZnO	1,975	–

2.1.4 하수슬러지 소각재를 이용한 건설자재화 기술

가. 소각재를 이용한 건설자재화

최근 하수슬러지 해양매립금지 문제 등으로 인해 슬러지 처리 및 자원화에 대한 관심이 크게 증가하고 있으며, 그 대처방안으로는 소각 및 퇴비화, 건조, 고형화 등의 처리방법이 적극적으로 검토되고 있다. 소각 후의 소각재는 무기성분의 재료이며 탈수과정에서 사용되는 응집제에 따라 그 성분이 크게 달라지는데, 아직은 미진한 국내의 연구 실정에 비하여, 일본을 비롯한 유럽에서는 하수슬러지 소각재를 이용하여 건축, 건설자재를 제조하는 연구가 활발히 진행되고 있다.(Won, 1997 ; Takeuchi, 1999 ; Iwase, 1998) 그 중에서 대표적인 재활용 기술이 건설자재화이며, 그 종류를 보면 토질 개량제, 노반재, 노상재, 콘크리트 2차 제품, 아스팔트 충전제, 시멘트 원료, 매립복토, 경량 골재화, 타일, 벽돌, 투수성 블록, 도관, 인터로킹 블록 등이 있다.(장, 2005) 압축소성기술은 하수슬러지의 소각재만을 원료로 금형에 넣어 약 1톤/cm²의 압력으로 가압하여 성형한 후 1050℃ 전후에서 소성해 벽돌 등을 만드는 기술로써 일본에서는 이 제품을 보도, 연결도로, 광장, 공원 등의 포장재로 활용하고 있다. 또한 우수의 지하 저류를 향상시키기 위해 침투성벽돌도 제작하여 이용하고 있다.

하수슬러지 소각재를 아스팔트필라로서 사용할 경우 이전부터 이용되고 있는 석회암분말을 필라로서 사용하는 경우와 비교할 때, 연화점이 높고, 침입도가 적다. 또한 물의 침투저항성은 크고, 밀도, 공극률 포화도등은 크게 차이가 없다. 따라서 하수슬러지 소각재는 석회분말과 비교하여 손색이 없어 충분하게 이용이 가능하다.

소각재는 노상재료로서 이용가능한 공학적 특징을 가지고 있어 관거 공사시의 포설토등의 재료로서 사용이 가능하다. 노반재는 경교통로에만 사용이 가능하며 큰 응력이 작용하는 표층이 가까운 부분에서의 사용에는 문제가 있다. 그 이유는 소각재가 노반재로서 이상적인 입도분포로부터 서로 탈리된 세립입자의 재료이기 때문에 서로 간에 뭉치는 강도는 기대하기 어렵기 때문이다..

소각재를 조립 및 소성하여 입도를 조정 한 소성품에 대하여 골재성상과 콘크리

트성상을 조사한 결과, 일반 경량골재 및 구조용 경량골재로서 사용이 가능한 것이 생성되는 것으로 밝혀졌다. 또한 소각재에 벤토나이트를 넣은 소성에 있어서도 조립성이 좋으며 물성, 강도 등을 비교할 경우 시판되는 인공골재와 같은 품질을 확보할 수 있는 것으로 알려져 있다.

소각재 중에 CaO함유량이 적고, 규산의 함유량이 높으면 연와의 소성이 충분하게 가능하여 소각재에 일정량의 점토 또는 규사를 첨가하면 보통의 연와 주원료로서 이용이 가능하다.

나. 소각재 용융슬래그의 건설자재화

탈수슬러지 및 소각회를 1200~1500℃로 가열하여 유기물을 완전히 증발분해시킨 후 가열을 계속하여 무기분이 녹아 용액으로 된 것을 냉각하여 응고시킨 것이 용융슬래그이다.

하수슬러지를 소각처리하고 소각재를 매립처분하는 것보다 용융슬래그화하여 도로용 자재나 건축용 자재로서 재이용하고자 하는 발상은 오래전부터 있었으며, 용융기술은 중금속 등의 유해물질을 함유한 슬러지의 안정화 처리 및 슬래그의 유효이용 측면에서 괄목할 만한 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다.

용융슬래그는 용액의 냉각방법에 따라 2가지로 대별할 수 있다. 첫째 물과 직접 접촉 또는 침적시킴으로서 얻어지는 수쇄슬래그와, 둘째 대기 중에서 냉각시킴으로써 얻어지는 공냉슬래그이다. 수쇄슬래그는 유리성질로서 미립자형태나 모래형태이다. 또한 공냉슬래그는 수쇄슬래그와 마찬가지로 주로 유리성질이지만 일부 결정화가 진행되어 있는 경우가 많고 덩어리상태이거나 잘게 부순 돌맹이 형태이다. 로반재로의 이용은 로반재의 사용량이 많고 공공사업으로의 시공이 가능하기 때문에 앞으로 유망한 이용용도의 하나이다. 다른 이용방법으로서는 공냉슬래그를 단체로서 이용하는 방법이 있다. 콘크리트 골재로서의 이용도 로반재로의 이용과 같은 이유로 유망한 이용용도의 하나이다. 이용방법으로서는 인도와 차도의 경계에 사용되는 블록 등의 블록류, 홈관 등이다. 수쇄 슬래그는 유리성질의 미립자형태로서 로반재, 콘크리트 골재로 이용할 때에 엇물리게 하거나 부착시키는 데에 문제점이 있다. 이러한 점에서 결정화한 슬래그가 양호한 소재인데, 이는 공냉슬

래그를 냉각할 때 온도제어를 한다든가 냉각 후 다시 가열을 함으로써 결정화 슬래그를 얻을 수 있다. 그렇지만 슬러지 중에 규소함유율 또는 염기도에 의하여 냉각될 때에 결정화 특성이 크게 다르고 규소함유율이 높은 슬러지는 결정화가 어렵다. 이처럼 용융슬래그의 특성은 슬러지의 성분 및 냉각방법의 영향을 받아 변하기 때문에 유효이용에 있어서는 이의 특성을 충분히 파악하는 것이 중요하다.

2.2 인공경량골재 제조 시 성형 특성

2.2.1 압출성형

압출성형법은 일정한 모양의 단면을 가진 긴 봉이나 관 등을 제조하기 위한 성형법이다. 이 성형법은 비교적 단면에 비하여 길이가 긴 제품을 생산할 때 사용되는 방식으로서 압축성형이나 용융한 재료를 일정한 금형에 부어서 성형하는 방법에 비해 장비의 크기 및 제품의 연속성에서 유리한 성형방법으로 고려된다.

압출성형의 공정은 일반적으로 소재를 컨테이너에 넣고 다이의 구멍으로부터 밀어내어 단면적이 소재보다도 작고 일정한 긴 제품을 만드는 것인데, 이 가공법을 크게 나누면 Fig. 2.1과 같이 (a)후방압출, (b)전방압출, (c)측방압출 등으로 분류된다.

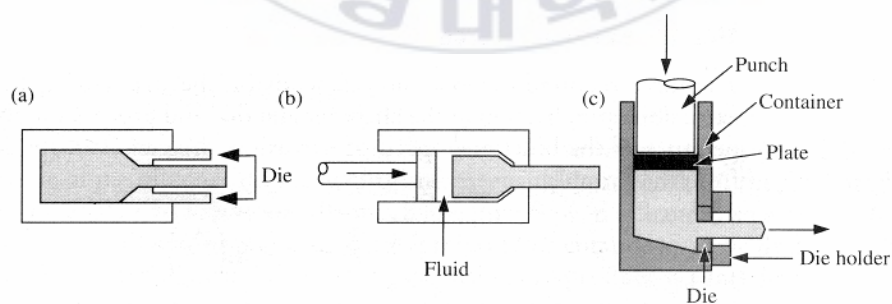


Fig. 2.1 Classification of extrusion process.

압출되는 재료의 방향이 외부로부터 압력을 가하는 방향과 같은 경우(a)는 후방 압출, 압출되는 재료의 방향이 외부로부터 압력을 가하는 방향과 반대인 경우(b)는 전방압출, 압력을 가하는 방향의 측면으로 재료가 압출되는 경우(c)는 측방압출이다.

압출공정에서 제품 단면의 모양은 다이의 구멍 모양과 같으므로 다이의 구멍 모양을 적당히 바꿈으로써, 환봉(丸棒), 각봉(角棒), 형재(形材), 관, 기타 임의의 것을 만들 수 있다. 그러나 재료를 구멍으로부터 밀어내려면 매우 큰 힘이 소요되며, 따라서 기계설비가 대규모로 될 뿐 아니라 금속이나 경질재료인 경우 고온, 고압에 견디는 공구를 사용해야 하는 결점이 있다. 고온 하에서 하는 것을 열간(熱間)압출가공이라 하고, 실온(室溫)에서 하는 것을 냉간(冷間)압출가공이라 한다.

압출공정에서는 금형의 기하학적 형상과 압출조건 등의 공정변수가 압출제품의 품질과 설비의 안정성을 좌우하게 되는데 이를 Fig. 2.2에 나타내었다.

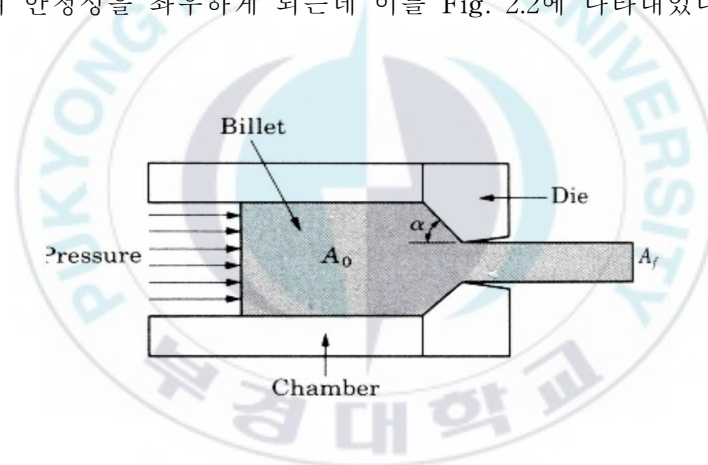


Fig. 2.2 Geometrical processing variables of extrusion die.

다이각 (α)에 따른 재료의 변형양상을 Fig. 2.3, 압출력의 변화를 Fig. 2.4에 나타내었다.

Fig. 2.3을 보면, 압출가공시 재료의 유동이 없는 부분을 고려하여 다이각을 생성시켰을 때, 재료의 변형구간이 금형내에서 다이각이 큰 (a)보다 다이각이 작은 (c)가 더욱 넓음을 확인할 수 있다. 또한 다이각이 증가할수록 압출력이 증가한다.

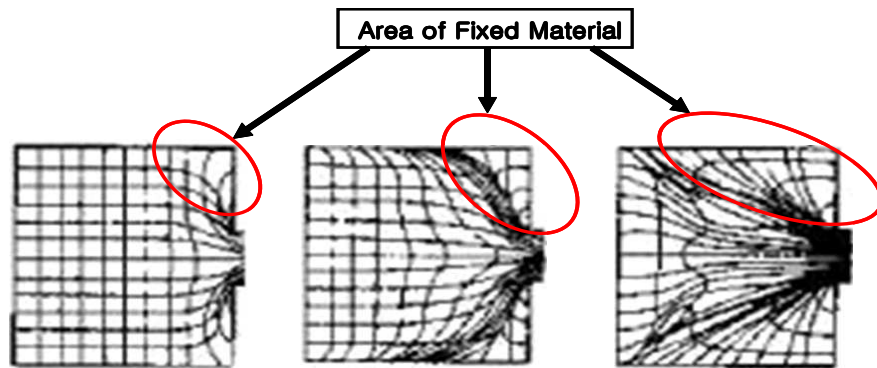


Fig. 2.3 Deformation behavior of material.

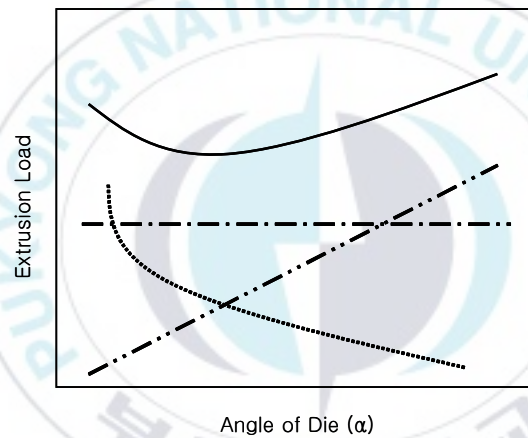


Fig. 2.4 Variation of extrusion force by angle of die.

또 다른 공정변수로서 압출비($\frac{A_0}{A_f}$)는 압출설비의 압출력을 구하는 식으로 그 영향을 확인할 수 있는데, 압출비가 증가할수록 압출력은 증가함을 알 수 있다. 여기서 A_0 는 재료의 원래 직경, A_f 는 압출 후 직경이며 F 는 압출력, k 는 압출계수이다.

$$F = A_0 k \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) \quad \text{식 - (2.1)}$$

2.2.2 압축성형

가. 압축성형의 목적

압축성형의 목적은 단련과 성형이다. 즉, 재료 내부의 기공, 편석, 조대 조직 등의 불균일성이 있는 것으로, 이것을 단련함으로서 기공을 압착시켜 결정립을 미세화 하여 조직을 개선하고, 또한 성형에 의해 소정의 형상을 주고 후처리 공정을 감소시키고, 기계적 성질의 개선을 일으키는 것을 목적으로 하는 것이다.

압축성형은 자유 압축성형과 금형을 이용한 압축성형으로 대별되며 일반적으로 말하면 전자는 비 양산 대형부품에 이용되며 강괴에서는 단련효과에 중점이 주어지며, 후자는 양산 소형부품에 이용되며 성형정도를 향상시키는 것이다.

나. 압축성형의 종류 및 특징

1) 자유압축성형

자유압축성형은 소성가공의 일종이며, 성형 시에 금형에 제약되지 않는다고 말하는 의미이다. 따라서 변형에 요하는 에너지는 금형을 이용한 압축성형 보다 적다.

자유압축성형은 단신(鍛伸), 거입(拒汲), 전신(展伸), 연신(延伸), 절단, 편칭, 중공단련(中空鍛鍊), 구멍 넓히기, 벤딩 등의 공정을 조합하여 금구 및 공구를 사용함으로서 강괴 또는 강재를 소정의 형상으로 성형한다. 또 보조 작업으로서 가스 가공 등도 행해진다.

자유압축성형의 특징은 무게 100t을 넘는 대형 부품의 압축성형이 가능한 것이다. 단면형상이 변화하는 부분의 단신, 거입 등의 공정의 조합에 의해 성형하는 것으로서 재료의 절약, 기계 가공의 절감이 가능하다. 또한 단련에 의한 제품조직의 개선과 열처리 공정과의 조합에 의해 소정의 기계적 성질이 주어지며, 품질이 향상된 부품의 제작이 가능하다. 따라서 외형에 따른 단류선이 얻어지는 것으로서 강도적인 면에서 향상되며 부품의 경량화가 가능하고 비 양산 부품에 적합하다.

2) 금형을 이용한 압축성형

자동차용부품 등 대량으로 생산하는 부품의 특성에 따라 금형을 제작하고 이것을 압축성형기에 취부하여 성형하는데, 이것을 금형을 이용한 압축성형이라 말한다. 보통은 재료의 변형저항이 적은 고온에서 행한다.

금형을 이용한 압축성형의 특징은 소성가공의 면에서는 자유압축성형과 같으나 더욱 좋은 단련효과가 얻어지며, 동일형상의 정도가 좋은 부품을 대량으로 생산할 수 있다. 단 금형을 이용한 압축성형기는 금형의 체결을 보지(保持)하는 기구가 필요한 것으로 같은 정도 크기의 부품에서 비교할 경우, 자유압축성형의 것보다 고가로 된다. 또한 설비적인 제약 때문에 더욱 큰 부품에는 이용되지 않고 최종 제품의 중량이 200kg 정도까지이다. 재료의 예비성형을 행하는 성형 물과의 조합, 연신, 롤, 브로카, 피니셔 등을 조합한 복식형에 의한 원히트 작업, 자동 반송장치 부 단조 프레스 등, 절단에서 형태까지 라인화된 일련의 단조설비에 의해 안정된 품질의 부품을 효율 좋게 양산하는 것이 가능하다.

일반적으로 사용되고 있는 압축성형기는 다음과 같은 것이 있으며 각각에 대한 비교를 Table 2.5에 나타내었다.

Table 2.5 Comparison of productivity for compression system

Classification	Forging Hammer	Mechanical Forging	Hydraulic Press
Control Condition	Potential Energy	Stroke	Load
Contact Time	Short	Ordinary	Long
Economical Efficiency	Cheap	Ordinary	Expensive
Capacity	Small quantity	Ordinary	Mass Production
Use	Small Part	Prototype	Final Product

2.3 수치해석적 분석

2.3.1 유한요소해석을 통한 분석 방법

유한요소해석(Finite Element Analysis : FEA)란, 유한요소법(Finite Element Method : FEM) 라고 하는 수치해석법(이론)을 이용하여 공학해석을 하는 것이다. 즉, 유한요소법의 이론체계에 기초하여 개발된 software (FEM 프로그램)을 이용하여 computer상에서 다양한 공학문제의 수치해석을 실시하는 것이다. 「FEM 해석」이라 하기도 한다. 수치해석 방법은 몇 개가 있지만, FEM은 그 우수한 특징 때문에 현재 다양한 공학분야에서 가장 널리 사용되고 있으며, 시판되고 있는 software도 매우 많다. Fig. 2.5는 수치해석프로세스를 나타낸 것이다.

물체가 외력을 받으면 변형한다는 물리현상은 일반역학에서 방정식문제로 정의되며, 이 방정식을 FEM과 같은 수치해석 방법에 의해 컴퓨터가 다룰 수 있는 형식으로 변환하면 수치계산처리(수치를 대입하면서 유한 회 반복함)에 의해 풀어 낼 수 있다. 여기서, 물리현상을 각 공학이론에 기초한 수학적인 문제로 정의하고 수리 화하여 수치계산으로 풀 수 있도록 하기 위한 프로세스는 다음과 같은 순서가 된다.

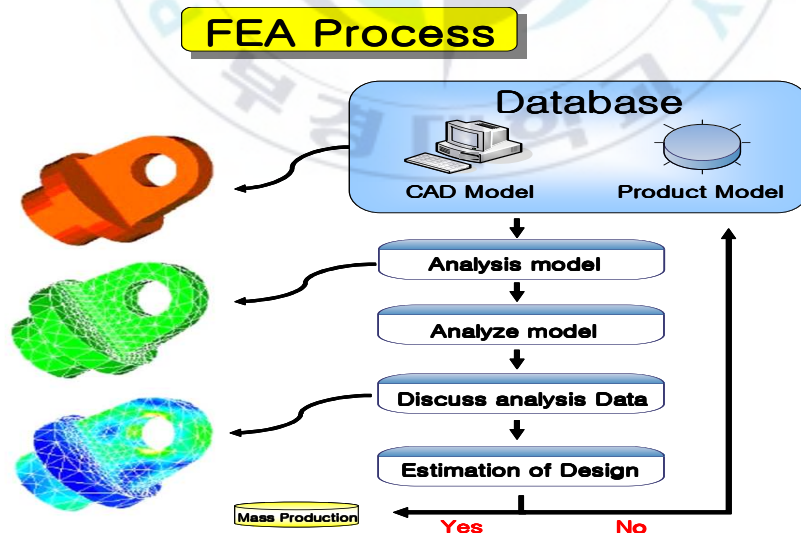


Fig. 2.5 Process of numerical analysis.

2.3.2 강소성 유한요소법(Rigid-Plastic Finite Element Method)을 이용한 해석

강소성 유한요소법에서는 대상이 되는 공학문제(물리현상)의 종류에 따라 이를 풀기 위한 기초방정식이 정해지는데, 이를 지배방정식이라 하며, 이 식에 특정의 경계조건이나 기초조건을 부여하여 해를 구하는 것이 해석의 목적이다. 일반적으로 공학문제에 있어서 해석대상은 연속체로 간주된다. 연속체는 무한개의 점의 집합이므로 미지 물리량은 영역 전체에 걸쳐 완전히 연속한 양 즉, 좌표의 함수로 표현된다. 그 결과 연속체 문제의 지배방정식은 일반적으로 편미분방정식이 된다. 그러므로 지배방정식을 푸는 것은 이 편미분방정식과 경계조건을 만족하는 좌표의 함수를 구하는 것을 의미한다. 공학문제에서 이 함수가 구해지면 다음으로는 좌표를 대입하여 임의점의 미지량(함수값)을 결정할 수 있다. 그러나 미분방정식을 그대로 엄밀하게 풀려고 해도 상당히 단순한 문제(단순한 형상, 단순한 경계조건) 이외에는 불가능하다. 따라서 유한 사이즈의 요소(Element)로 연속체를 분할하고, 전체는 요소의 집합체로써 표현하여 근사해를 구한다. 극한에 있어서 요소는 점이 되고, 무한개의 점의 집합인 연속체 모델로 표현할 수 있다. 이런 방식은 원래 트러스트 구조문제의 "유사(類似)"로써 고안되었다. 트러스트 구조에서는 실제의 구조를 절점(joint)로 접합된 구조요소(부재)의 집합으로 문제를 취급한다. 이 문제의 해법은 FEM이 생겨나기 이전부터 확립되어 있었기 때문에 연속체의 경우도 부재에 해당하는 "요소"라는 개념의 도입이 시도되었다. 실제로 "절점"이라는 말도 트러스트 구조의 joint에서 나온 말이다. 연속체의 경우는 트러스트 구조와는 달리 절점의 취급방법이 자유이기 때문에 구체적인 요소 사이즈는 제약이 없다. 그러나 요소형태는 순수한 선분(1차원 영역의 경우), 삼각형이나 사각형(2차원 영역의 경우), 또는 사면체, 오면체, 육면체(3차원 영역의 경우) 등으로 정해져 있다. 그리고 이들 요소의 각 코너에는 반드시 절점이 있으며, 중간에 절점을 가지는 경우도 있다. Fig. 2.6의 모델은 삼각형 요소로 분할되어 있다. 더욱 잘게 분할하면 결과적으로 FEM모델이 그물망처럼 보이므로 통상 "mesh"라고 부른다. mesh는 깨끗히 정리된 격자로 만들 필요는 없다. 중요한 것은 인접한 요소끼리 절점을 공유하는 것이다. 다르게 말하면, 2차원의 경우는 요소의 edge끼리, 3차원의 경우는

면끼리 정확하게 만나도록 영역을 요소로 구분한다.

mesh(절점과 요소)는 해석자가 생성하지 않으면 안된다. 이 작업을 "요소분할"이라고 한다. 그러나, 해석영역을 기하학적으로 분할하여 형성하는 것만이 요소분할의 목적이 아님을 알아야 한다. 요소는 단순히 영역의 기하학적인 구성요소는 아니다. 보간식을 부여할 범위이며, 요소에 의해 요소 내의 미지량의 분포를 판정한다. 또한 절점은 단순히 요소의 결합점이 아니다. 인접한 요소 간에서 보간식을 결합함과 동시에 요소 내에서는 보간의 기준점이고, 결과적으로 모델전체의 미지량의 대표점이 된다. 요소분할은 FEM의 근사해법의 정도에 밀접한 관계가 있다. 부분 영역을 더 조밀하게 자르면 즉, 요소사이즈를 조밀하게 하면 할수록 더욱 실제에 근사화된다. 이때 요소의 사이즈를 등간격으로 할 필요는 없으며, 정도를 좋게 근사하고 싶은 부근만을 조밀하게 하면 된다. 또한 1차식이 아니고 더욱 고차의 보간식을 이용하면 요소사이즈가 조대하여도 좋은 근사가 가능하다.

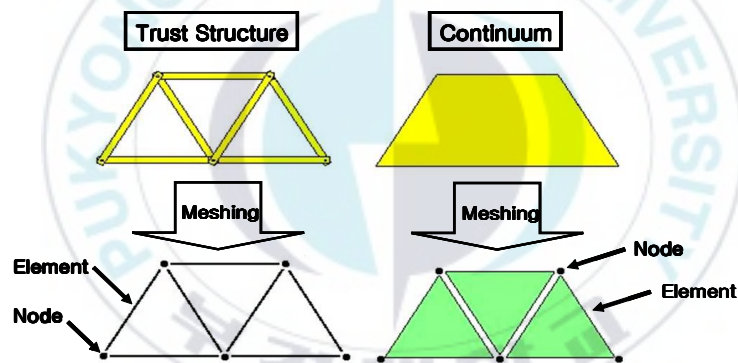


Fig. 2.6 A summary of mesh by using element and node.

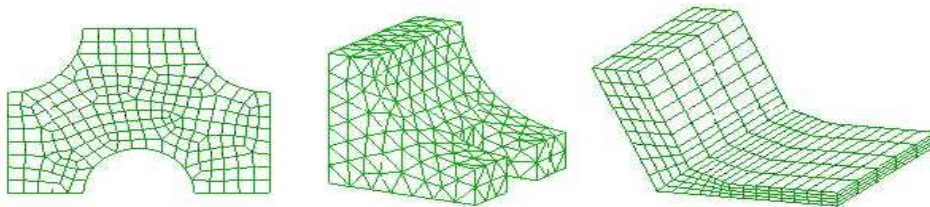


Fig. 2.7 Example of finite element mesh.

제 3 장 하수슬러지 소각재를 이용한 압출성형 인공경량골재 제조를 위한 수치해석적 분석

3.1 서 론

국내 하수슬러지 발생량은 매년 증가하는 추세이며 해양투기가 전면적으로 금지 될 예정인 2011년에는 약 368만 톤으로 2005년 대비 약 43% 증가할 것으로 예상되고 있다. 하수슬러지의 직, 매립을 금지하고 있는 현재로서는 거의 대부분의 하수슬러지가 해양투기에 의해 처리되고 있는 실정이다. 그러므로 하수슬러지의 해양투기 금지에 대한 적절한 처리 방안 연구가 절실히 필요한 시점이며, 이에 따라 하수슬러지 처리방안의 일환으로 소각처리가 검토되고 있다. 따라서 소각부산물인 소각재의 처리도 함께 검토되어야만 할 것이다.

하수슬러지 소각재를 이용한 인공경량골재의 제조는 환경오염의 방지 및 자원 재활용의 측면을 동시에 충족시킬 수 있는 구체적인 방안이 될 것으로 전망된다. 그러나 하수슬러지 소각재를 이용한 인공경량골재의 제조방법에 대한 해석적 접근은 아직 미미한 수준이다.

따라서 본 연구에서는 강소성 유한요소법(Rigid-Plastic Finite Element Method)을 이용한 수치해석적 분석을 통하여 하수슬러지 소각재와 점결제로서 점토를 이용한 인공경량골재의 최적성형공정변수를 파악하여, 제품의 대량생산 및 자동화에 유리한 압출성형 기법으로 인공경량골재를 제조하고자 하였다.

3.2 실험 재료 및 방법

3.2.1 실험 재료 특성 및 배합

본 연구에서 인공경량골재 제조의 주요 재료인 하수슬러지 소각재와 점토의 환경유해성 여부 및 특성을 파악하기 위하여 각각의 시료에 대한 공업분석과 중금속용출 농도 및 회재분석을 행하였다. Table 3.1은 하수슬러지 소각재와 점토의 공업분석, Table 3.2는 하수슬러지 소각재와 점토의 중금속용출 농도 및 회재분석 결과이다. 공업분석 결과 하수슬러지 소각재의 회분은 점토 보다 높게 나타났으며, 중금속의 경우 하수슬러지 소각재와 점토 모두 국내 기준치에 적합하였다.

회재분석결과 점토는 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3$ 순으로 함량이 높게 검출되었으며, 하수슬러지 소각재의 회재분석 결과 또한 점토와 비슷한 경향을 나타내었다. 하지만 CaO의 경우 점토에 비해 10배가량 높게 검출되었다.

Table 3.1 Proximate analysis of sewage sludge and clay

Proximate (wt%)	Component	Moisture	Volatile matter	Ash
	Incineration residue of Sewage sludge	12.75	2.37	84.88
	Clay	21.51	3.16	75.33

Table 3.2 Heavy metal leaching test and ash analysis of sewage sludge and clay

Leaching test (mg/ℓ)	Component	Pb	Cd	Cu	Cr ⁶⁺	As	Hg	Fe	Mn	Mo	Zn
	Ash*	0.02	N.D.	0.03	0.00	0.002	0.001	0.30	0.05	0.56	0.02
	Clay	0.10	0.01	0.02	0.19	ND	ND	NA	NA	NA	NA
Ash analysis (wt%)	Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	MnO
	Ash*	38.5	16.60	5.35	7.12	9.90	1.48	1.74	0.39	0.23	0.15
	Clay	61.90	23.30	NA	7.35	0.91	1.95	NA	0.85	0.87	NA

* : Sewage sludge ash, ND: Not detected, NA: Not analysis

수치해석적 분석을 수행하기에 앞서 기초 물성테스트로 압출성형공정의 주요 성형인자를 결정하게 되는데, 이를 위해 압출성형가능성과 시편제조가능성을 가지고 있는 하수슬러지소각재, 점토, 물의 혼합중량비를 결정해야 한다. 하수슬러지소각재의 함량을 50%로 고정한 상태에서 점토와 물의 혼합중량비를 변화시키며 시료의 성상을 파악하였으며 이는 Table 3.3에 나타내었다. 이때 하수슬러지 소각재의 함량을 50%로 고정한 이유는 예비실험결과 50%의 하수슬러지 소각재를 함유한 혼합시료의 시편제조가능성이 가장 높았기 때문이다.

Table 3.3 Mixture ratio by blending weight of testing material

Component	Sewage sludge ash (g)	Clay (g)	Water (g)	Moisture content (wt%)
1	50	30	20	32.83
2	50	25	25	36.75
3	50	20	30	40.67
4	50	15	35	44.60
5	50	10	40	48.52

3.2.2 압출공정의 이론적 해석방법 및 가정

가. 이론적 해석방법

본 연구에 사용된 수치해석적 기법은 강소성 유한요소법으로서 해석대상물체를 다수의 요소로 분할하고 각 요소의 변형거동을 미·적분하여 변위, 성형력, 유동벡터, 유동응력 등 여러 변수에 대한 결과를 분석하는 기법이다.

수치해석의 기초과정으로서 재료의 변형거동을 파악하여야만 하는데 이것은 본 실험에서 인공경량골재 제조의 주재료 물질인 하수슬러지 소각재와 점토를 혼합중량비에 따라 압축시험한 결과를 골재제조공정의 이론적 해석에 입력데이터로 사용하였으며 그 기본 물성테스트 결과는 Fig. 3.1에 나타내었다.

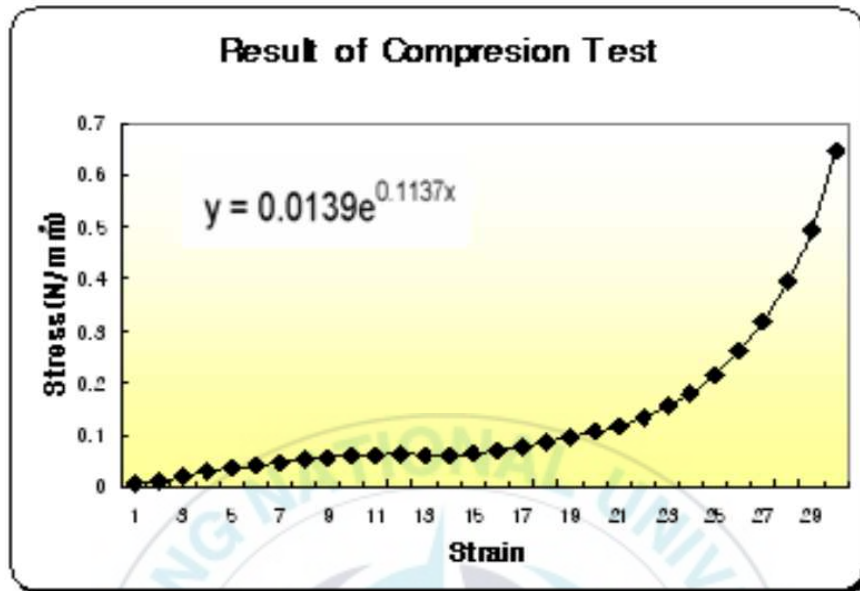


Fig. 3.1 Result of compression test for investigation of deformation behavior.

혼합시료의 기초물성테스트 결과를 이용하여 압출성형공정의 최적화를 위한 주요 성형인자를 정량적으로 밝혀내기 위해 상용해석패키지인 ATES 사의 DEFORM-3D를 이용한 강소성 FEM 시뮬레이션을 수행하였다.

본 연구에서 이론적 해석에 사용되는 수학적 모델에서 재료의 성형거동은 다음의 지배방정식 식-(3.1)을 따르며, 해석에 사용된 압출금형의 단순화된 3차원 모델은 Fig. 3.2와 같다.

$$\bar{\sigma} = C \cdot \bar{\epsilon}^n \quad \text{식 - (3.1)}$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 재료가 변형되면서 발생하는 유동응력, C는 유동응력계수, $\bar{\epsilon}$ 는 재료의 유동에 따른 유동변형량을 표시하는 유효변형률을 나타낸다.

이론적해석에 사용된 모델의 주요 변수는 Fig. 3.2에서 보다시피, 다이의 토출구 직경(d)과 다이각(a), 다이 Land 길이(L)이다.

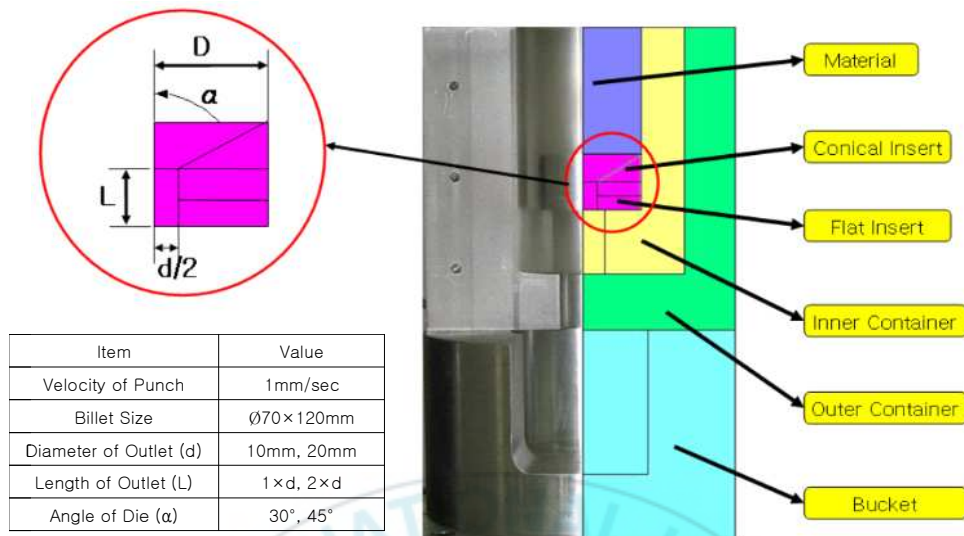


Fig. 3.2 Numerical model of extrusion die.

나. 압출공정의 유한요소법적 해석 가정

1) 재료내의 micro pore에 의한 성형력 변동

소재(슬러지-바인더 혼합물)내에서 2종 이상의 물질이 혼합되어 있고 교반을 행하였으므로 micro pore가 생성된다. 이로 인하여 압출공정이 시행되면 펀치로 재료를 압축함에 따라 압축성 변형거동을 보이다가 점차 성형력의 증가와 함께 재료내의 공극이 압착되면서 비압축성 변형거동을 하게 된다. 이러한 micro pore는 압출공정의 시행중 성형응력 변화를 야기할 수 있으나 micro pore에 의한 성형응력 저하요인은 전체 성형응력에 비하여 기여도가 매우 미미하므로 무시한다.

2) 재료의 연속성

실제의 재료는 혼합물을, 미분쇄 후 교반을 통한 혼합으로 연속성을 지닌다.

3) 재료는 등방성(isotropic) 강소성체(rigid-plastic material)이며 Von Mises 항복조건을 따른다.

4) 재료는 체적일정조건을 만족하며, 금형은 완전강체(rigid body)이다.

5) 변형중 온도변화와 관성은 무시하고 상당응력은 상당변형률 만의 함수이다.

$$\bar{\sigma} = C \bar{\epsilon}^n$$

6) 마찰조건은 소성변형 중 일정하며 다음과 같다.

$$\tau = m k$$

여기서, τ 는 마찰응력, m 은 마찰계수, k 는 순수전단항복응력을 나타낸다.

3.2.3 압출실험 장치 및 방법

FEM을 이용한 수치해석과 병행하여 인공경량골재 제조공정 중 혼합재료의 거동을 확인하기 위한 실험 장치를 Fig 3.3에 나타내었다. 압출공정은 펀치를 일정한 속도로 일정한 스트로크만큼 이송시켜 성형하는 방법이므로 UTM(Universal Testing Machine)으로 펀치이송에 대한 정밀도를 확보하였다. 또한 외부에서 재료의 유동을 확인하기 위해 아크릴재질의 컨테이너와 및 알루미늄 및 수지재료의 압출금형 세트를 이용하여 성형공정을 구현하였다. 압출금형 세트는 압출다이(Conical Insert), Land 길이를 조절하기 위한 인서트(Flat Insert)내부 컨테이너, 외부 컨테이너, 펀치로 구성되어 있다. 이 중 압출 다이는 성형 시 외부컨테이너와 내부컨테이너에 의해 구속되어 있으며 각각의 기하학적형상은 Fig 3.4에 나타내었다. 압출 다이는 압출력 및 재료의 변형거동에 영향을 미치는 주요 인자인 토출구의 직경(D), 다이각(α), Land 길이(L)에 따라 8종을 제작하였다. 압출 실험 시 투입재료는 높이 90mm, 직경70mm의 원주 형태였으며, 펀치의 이송속도는 60mm/min, 스트로크는 50mm로 적용하여 실험을 행하였다.



Fig. 3.3 Universal Testing Machine.

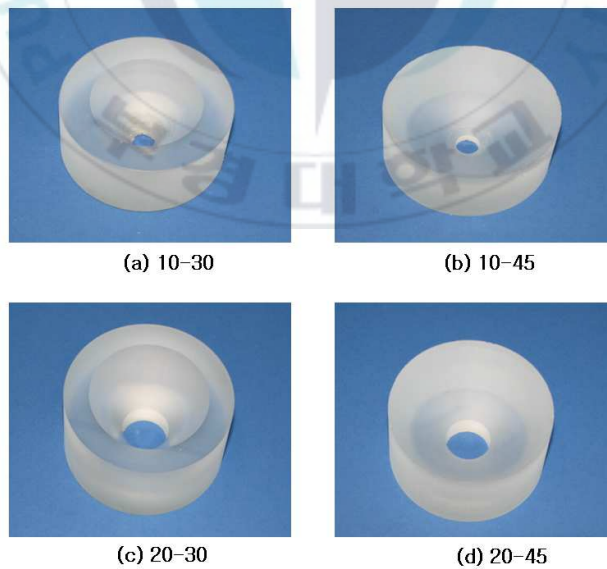


Fig. 3.4 Extrusion Die(diameter of outlet-angle of die).

3.3 결과 및 고찰

3.3.1 성형력에 대한 결과

Table 3.4는 실험재료의 혼합중량비에 따른 압출 성형 가능성을 평가한 것이다. 그 결과 FEM해석에 사용되는 재료의 응력-변형률 방정식을 얻기 위해서는 일축 압축시험을 행하여 얻어진 선도를 통하여 구할 수 있는데 이를 위한 시편제조가 능성(시편의 보형성)을 따져보면 수분량이 30(g)을 넘게 되면 시편의 요변성이 너무 커서 형상유지가 어려웠다. 그리고 일축압축시험용 시편의 제조가 가능한 혼합 중량비 중에서도 수분량이 30(g)이상 첨가하지 않으면 실제 압출실험을 하였을 때 혼합재료 내의 수분과 고형분이 분리되어 토출구가 막히는 현상이 발생하였다. 원활한 압출공정을 위해서는 재료가 보형성과 동시에 적절한 요변성을 가진 압출 성을 갖추어야 하는데, 본 실험 결과 압출가능성과 압축시편의 보형성을 만족시키는 혼합중량비는 50:20:30인 것으로 확인하였다.

Table 3.4 Estimation for formability by mixing ratio of testing material

Component	Sewage sludge ash (g)	Clay (g)	Water (g)	Possibility of compression test	Possibility of extrusion	Moisture content (wt%)
1	50	30	20	○	■	32.83
2	50	25	25	○	■	36.75
3	50	20	30	○	○	40.67
4	50	15	35	△	△	44.60
5	50	10	40	■	■	48.52

○ : good, △ : normal, ■ : bad

Fig. 3.5 는 재료의 혼합중량비에 따른 성상을 나타낸 것인데 하수슬러지 소각재 : 점토 : 물의 혼합중량비가 50:20:30의 경우에 가장 적절한 보형성을 가지고 있음을 알 수 있다.



Fig. 3.5 Phase by ratio of mixing weight of testing material.

이를 바탕으로 DEFORM-3D를 이용한 강소성 FEM 시뮬레이션을 수행하였으며, 인공경량골재 제조공정의 성형력 해석은 UTM(Universal Testing Machine)에서의 실험과 동일 조건인 변위제어방식을 적용하였고, 성형다이의 다이각(α), 다이 Land 길이(L), 압출비(입구직경/토출구직경, D/d)에 따른 영향을 고찰하였다.

Fig. 3.6은 압출공정의 성형력에 대한 해석결과와 실제 장치에서의 실험결과를 비교하여 나타내었다. 결과는 대체적으로 유사한 경향을 나타냈는데, 성형력은 다이각이 크고, 압출비가 큰 경우에 높게 나타났다. 이것은 소재의 유동이 토출구에서 병목현상을 일으키면서 소재의 내부변형에너지 증가와 더불어 성형력 상승을 야기시키기 때문이다. 한편 다이 Land 길이의 영향은 동일 압출비, 동일 다이각일 때 성형력에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

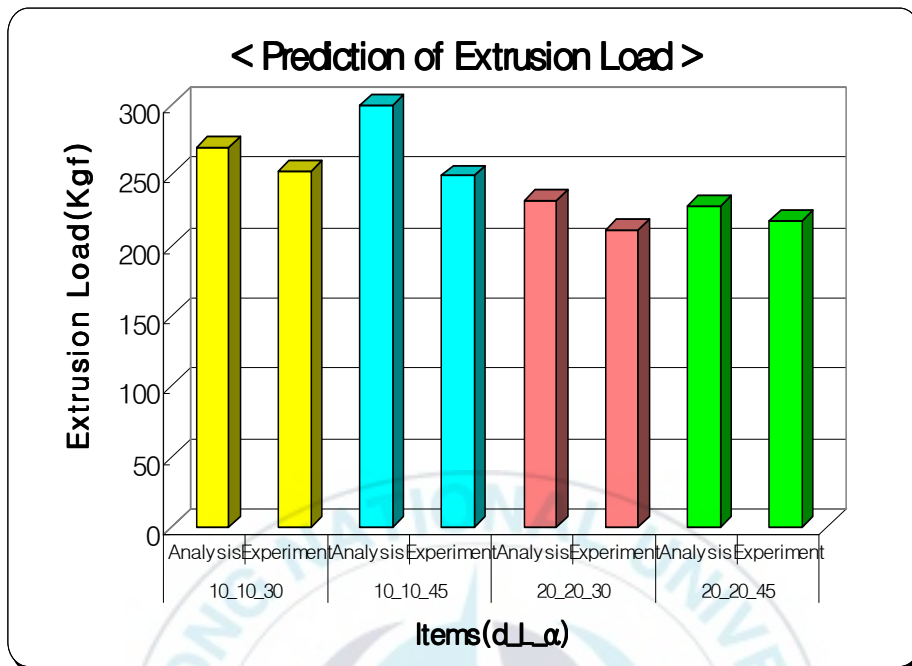


Fig. 3.6 Result of Analysis and experiment for extrusion force.

3.3.2 압출공정에 따른 재료의 거동 및 금형 내의 특성

가. 압출공정 시 재료의 거동

Fig. 3.7은 압출공정이 진행되는 중간에 혼합재료의 거동을 확인한 것이다. 압출공정이 진행됨에 따라 혼합재료는 펀치에 의해 압축된다. 점차로 펀치의 이송에 따라 압출력이 증가하는데 이때 혼합재료의 내,외부에 존재하는 기공이 서로 압착되면서 토출구로 재료가 빠져나오게 된다(a). 토출구에서 압출이 개시되고 펀치의 스트로크가 40mm가 되었을 때(b)의 혼합재료를 절단하여 내부의 상태를 확인하였다. 그 결과, 펀치와 직접 접촉하는 부분과 컨테이너 벽면 부분은 혼합재료가 압축되어 재료유동이 거의 없는 Dead Zone을 형성하며, 압출이 계속 진행됨에 따라 내부의 기공도 압착되어 소멸하면서 토출구로 재료가 빠져나오게 됨을 확인하였다.

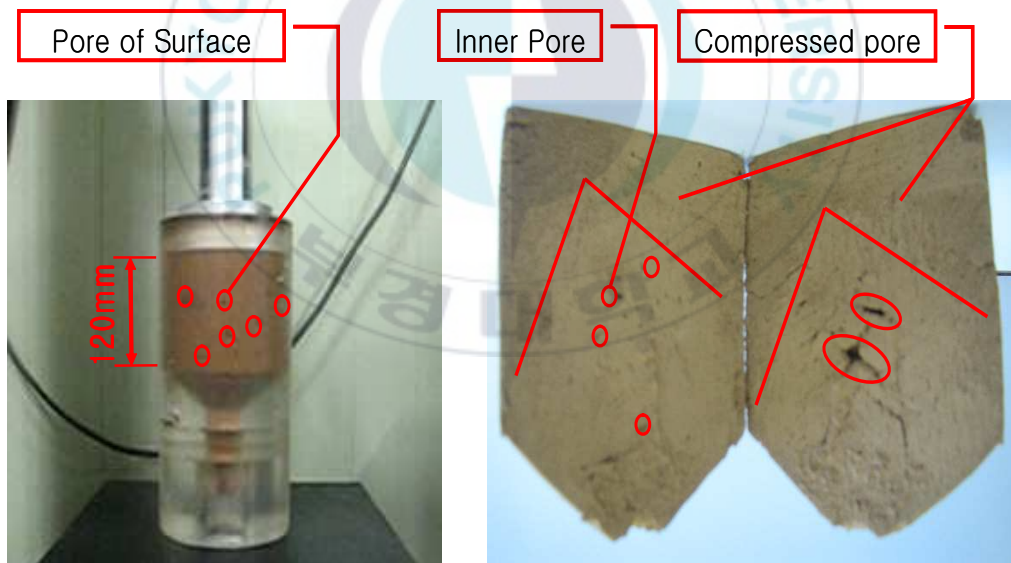


Fig. 3.7 Material flow and Section of mixed material in extrusion process.

나. 압출공정 중 금형 내의 변형률분포

Fig. 3.8은 압출공정의 다이 내 변형률분포이다. 다이 내에서 재료거동은 토출구에서 변형이 집중되며 펀치와 맞닿은 부분부터 다이각이 생성되는 부분에 이르기까지 재료는 강제유동을 하는 것으로 나타났다. 또한 변형률은 토출구에서 가장 크게 나타나며 다이각이 크고, 토출구의 직경이 작은 것이 가장 큰 변형률을 가지는 것으로 나타났다. 이는 다이각이 크고 토출구 직경이 작은 쪽이 유동체적이 작으므로 토출구에서 변형이 집중되는 것으로 보인다. 동일 다이각에서는 토출구 직경이 큰 경우에 소재가 다이에서 빠져나갈 수 있는 통로가 넓어지므로 변형률이 상대적으로 낮게 나타났다.

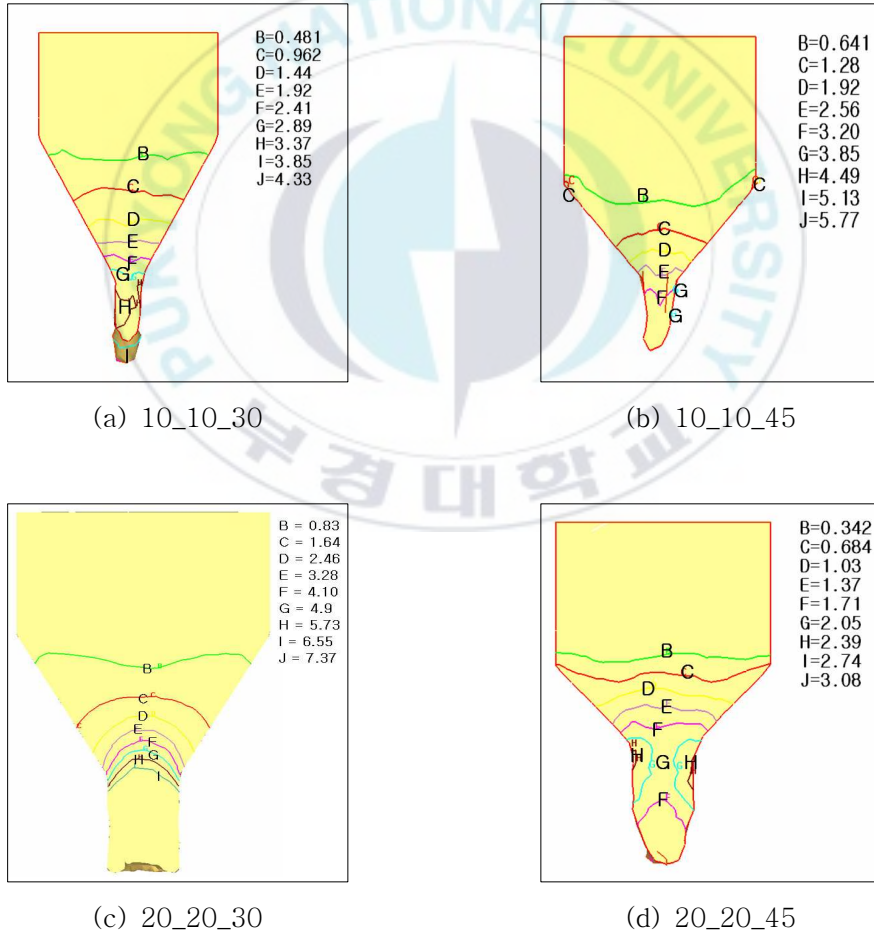


Fig. 3.8 Distribution of strain in extrusion process. (d_L_a)

다. 압출공정 중 금형 내의 유동응력분포

Fig. 3.9는 압출공정의 다이 내 유동응력분포이다. 다이 내에서 유동응력분포는 토출구의 직경보다 다이각의 영향이 더욱 지배적인 것으로 보인다. 다이각의 영향을 살펴보면 45° 인 경우가 30° 인 경우보다 압출력이 더 컸으며, 소재의 변형영역이 더 넓게 나타났다. 이것은 다이각이 클수록 컨테이너 벽면 주위에 소재의 정체 구역이 넓게 분포하기 때문에 생기는 현상이며, 다이 내에서 재료가 유동할 수 있는 영역이 작은 영향으로 파악된다. 또한 펀치와 소재의 접하는 부위와 펀치 말단과 내부 컨테이너와의 마찰부분, 그리고 다이각이 생성된 부분, 다이의 토출구 부위에 응력집중이 심함을 알 수 있다.

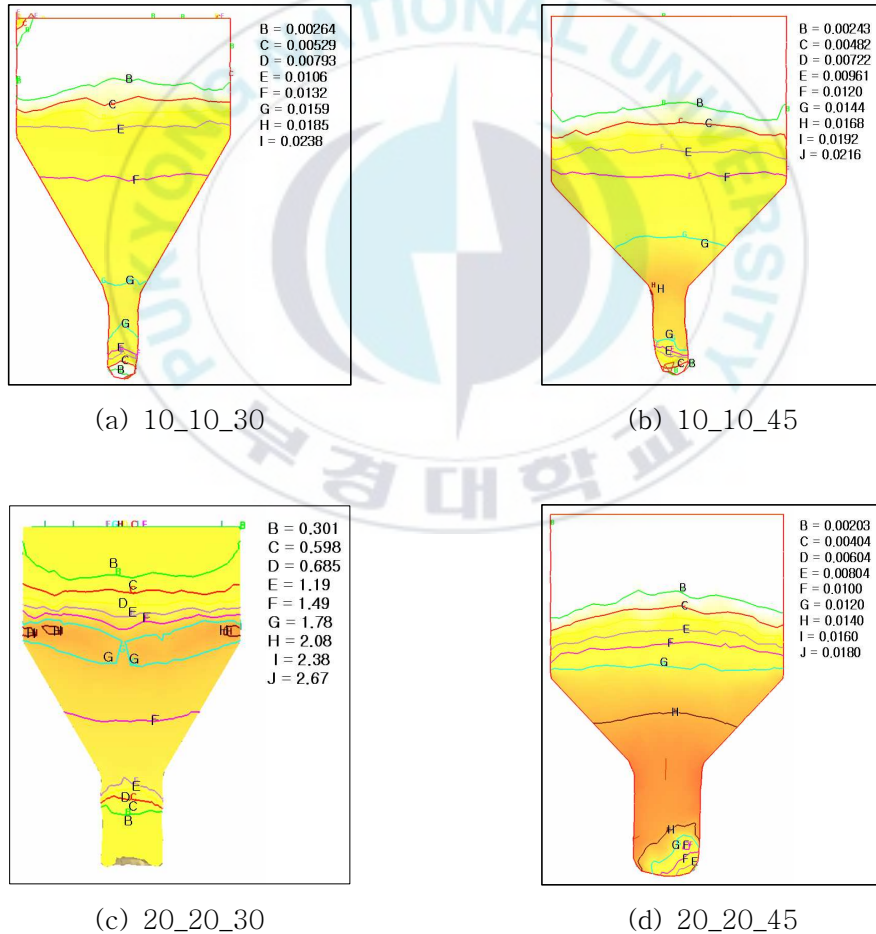


Fig. 3.9 Distribution of flow stress in extrusion process. (d_L_a)

라. 압출공정 중 금형 내의 유동벡터분포

Fig. 3.10은 압출공정의 다이 내 유동벡터의 분포이다. 전술한 바와 같이 다이각이 생성되는 부분에서 유동벡터의 방향이 심하게 꺾이는 것을 볼 수 있으며 그 집중도 또한 상대적으로 크게 나타났다. 또한 토출구의 직경이 작은 경우가 큰 경우보다 토출구에서 유동벡터가 더욱 집중됨을 볼 수 있다.

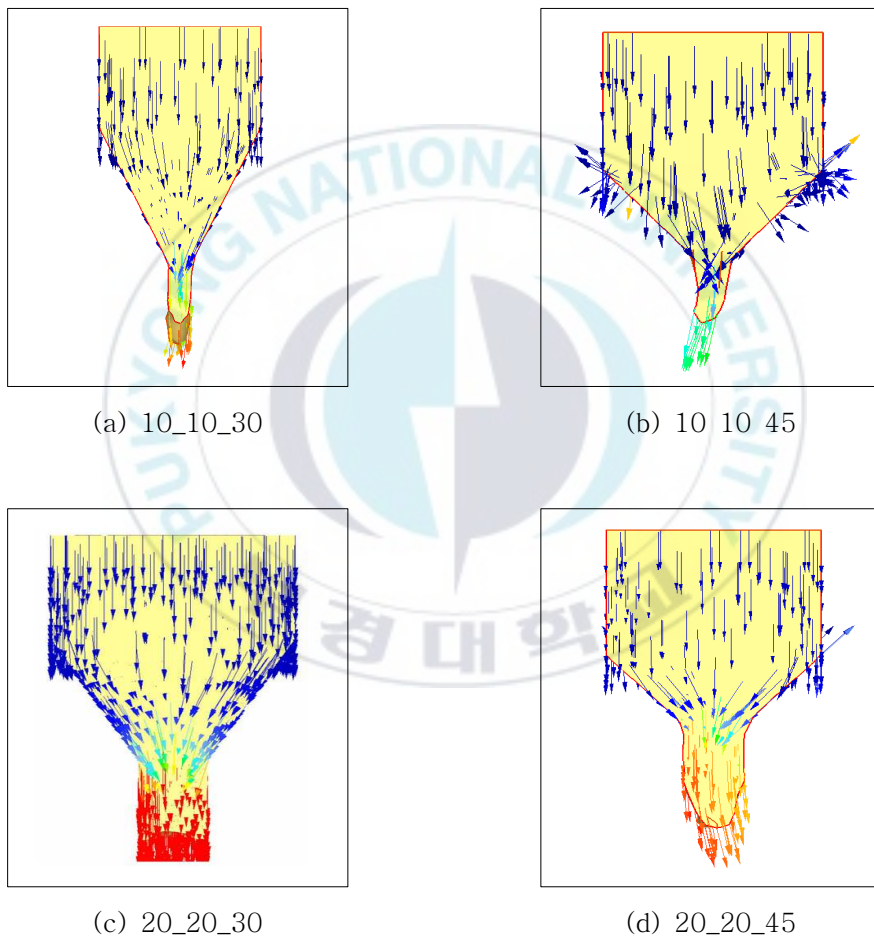


Fig. 3.10 Distribution of flow vector in extrusion process. (d_L_a)

3.4 결과 요약

1. 실험재료의 혼합중량비에 따른 압출성형성을 평가한 결과 하수슬러지 소각재와 점토 및 물의 혼합중량비가 50:20:30인 경우가 압출성형성과 보형성이 가장 우수함을 확인하였다.
2. 기초 물성실험을 바탕으로 수치해석적 분석을 수행하여 제작한 압출금형을 통한 인공경량골재 제조 시 이론적 해석결과와 실제 압출실험 장치에서의 결과가 유사함을 확인하였다.
3. 압출공정으로 제조된 시편의 인공경량골재로서의 가능성을 평가한 결과, 제조된 시편의 보형성이 부족한 것으로 나타났으며, 보형성을 부여하기 위해서는 압출비를 크게 하여 압출 다이 내에서의 압축력을 상승시키고 다이각을 작게 해야 함을 이론적 해석결과를 통하여 확인하였다.

제 4 장 압축성형을 통한 하수슬러지 소각재의 인공경량골재 제조

4.1 서론

제3장에서 시행하였던 압출방식의 성형공정은 재료의 압출성을 확보하기 위하여 높은 함수율을 적용하여야만 하므로 소성 시에 수분의 증발잠열로 인한 에너지 손실이 크고 성형 후에 제품의 보형성이 부족하여 제품의 압축강도가 낮은 편이다. 이에 비하여 금형을 이용한 압축성형 방식은 낮은 함수율에서도 성형이 가능하며, 압출방식에 비하여 우수한 압축강도를 가진다. 또한 함수율이 낮으므로 소성 시 에너지 소모가 작고, 컨베이어 시스템을 이용한 작업공정을 적용한다면 대량생산도 가능한 장점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 압축성형법을 이용한 하수슬러지 소각재의 인공경량골재를 제조함에 있어서 하수슬러지 소각재와 점토의 혼합중량비, 소성온도, 소성시간 및 소재의 직경 등의 공정변수가 인공경량골재의 압축강도에 대하여 미치는 영향을 파악하고자 한다.

또한 하수슬러지 소각재를 이용한 인공경량골재 제조에 무기계폐기물을 점결제로 사용하여 하수슬러지 소각재와 점토 및 무기계폐기물의 혼합중량비 및 소성조건에 따른 환경위해성, 인공경량골재로서의 제품 특성 등을 검토하고자 하였다.

4.2 하수슬러지 소각재와 점토를 이용한 인공경량골재의 압축강도 특성

4.2.1 실험 재료 및 방법

가. 실험 재료 및 공정변수

본 연구에서 사용된 하수슬러지 소각재는 지방 C시에서 운영 중인 하수슬러지 소각장에서 소각처리 후 발생한 비산재를 채취하여 이용하였다. 시편 제조의 주요 재료인 하수슬러지 소각재와 점토의 환경유해성 및 재료의 특성을 파악하기 위하여 각각의 시료에 대한 공업분석과 중금속용출 농도 및 회재분석을 행하였다.

Table 4.1은 하수슬러지 소각재와 점토의 공업분석결과이며, 공업분석 결과 하수슬러지 소각재는 99.6%의 회분을 함유하고 있음을 알 수 있다.

Table 4.1 Proximate analysis of sewage sludge and clay

Proximate	Component	Moisture	Volatile matter	Ash
(wt%)	Incineration residue of Sewage sludge	0.15	0.25	99.60
	Clay	21.51	3.16	75.33

하수슬러지 소각재와 점토 모두 중금속용출농도가 국내 기준치를 초과하지 않았으며, Table 4.2는 하수슬러지 소각재와 점토의 중금속용출 농도 및 회재분석 결과이다. 회재분석 결과 점토의 SiO_2 비율이 높은 것을 관찰 할 수 있는데 점토는 가장 일반적인 카올린나이트 광물로서 입자가 작고 가소성이 높아 소결 강도를 향상 시켜 주는 역할을 한다. 그러나 용제 성분은 작아 소결 시 급격한 용융은 없는 것으로 알려져 있다.(김, 2005))

Table 4.2 Heavy metal leaching test and ash analysis of sewage sludge and clay

Leaching test (mg/ℓ)	Component	Pb	Cd	Cu	Cr ⁶⁺	As	Hg	Fe	Al	Ce	Zn
	Ash*	0.002	0.001	0.008	0.002	0.521	ND	0.177	0.091	0.005	0.037
	Clay	0.10	0.01	0.02	0.19	ND	ND	NA	NA	NA	NA
Ash analysis (wt%)	Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	MnO
	Ash**	45.6	21.9	10.9	3.99	9.13	1.39	4.08	1.86	0.35	0.15
	Clay	61.90	23.30	NA	7.35	0.91	1.95	NA	0.85	0.87	NA

* : Sewage sludge ash, ND: Not detected, NA: Not analysis

Table 4.3은 압축성형시험에 있어서 공정변수를 나타낸 것이다. 이는 제3장에서
의 결과를 토대로 압축성형 시 실험재료의 성형성과 요변성 및 보형성 등에 적합
하고 인공경량골재로서의 강도를 가질 수 있는 혼합중량비를 찾아내기 위하여 혼
합시편의 함수율을 30% 미만으로 설정하였다. 또한 실험의 주재료가 하수슬러지
소각재 이므로 소성온도는 비교적 높은 600℃, 800℃, 1000℃, 소성시간은 20분~
40분으로 설정하여 실험하였다. 시편의 직경과 높이는 압축강도 실험에 용이한 L
(높이)/D(직경)비 1.5로 하여 실험하였다.

Table 4.3 Processing variables in compression test

Parameters	Conditions
Mixing ratio (Sewage sludge ash : Clay : Water)	6:2:2, 7:2:1, 8:1:1, 9:1:0
Incineration temperature (℃)	600, 800, 1000
Incineration time (min)	20, 30, 40
Sample height (mm)	12, 14, 16
Sample diameter (mm)	18, 21, 24

Table. 4.4는 각각의 공정변수를 조합하여 제작한 시편을 각 case별로 정리하여
나타낸 것이다.

Table 4.4 The classification by mixing ratio, diameter and moisture content of sample

Specimens		Mixing ratio (Sewage sludge ash : Clay : Water)			
		6:2:2	7:2:1	8:1:1	9:1:0
Moisture content(%)		24.4	14.4	12.3	2.3
Sample diameter(mm)	12mm	case 1-1	case 1-2	case 1-3	case 1-4
	14mm	case 2-1	case 2-2	case 2-3	case 2-4
	16mm	case 3-1	case 3-2	case 3-3	case 3-4

나. 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 여러 가지 공정변수에 따른 최적의 설계데이터를 얻기 위하여 압축성형공정에 대한 수치해석적 기법을 도입하였다.

수치해석의 주요공정변수는 하수슬러지 소각재, 점토, 물의 혼합중량비와 시편의 기하학적 형상으로 설정하였다. 사용된 수치해석적 기법은 현재 상용화와 해석결과의 정밀도에서 가장 신뢰도가 높은 강소성 유한요소법(Rigid-Plastic Finite Element Method)을 채택하였으며, 상용화된 유한요소해석 패키지인 ATES사의 DEFORM-3D와 ANSYS사의 ANSYS WorkBench를 사용하여 시뮬레이션하였다. 수치해석결과를 통하여 압축금형내의 재료거동을 파악하였고, 압축편치 및 하부 컨테이너와 소재가 직접 접촉하는 부분에 성형응력이 집중함을 확인하였다. 이를 Fig. 4.1에 나타내었다. Fig. 4.1에서 재료가 압축성형될 때 응력이 집중되는 부분은 타원형으로 표시된 부분이다. 이 부분은 성형이 진행되는 동안 재료가 압축되면서 지속적으로 높은 성형응력을 컨테이너에 작용하게 되므로 파손 및 마멸의 우려가 있다. 따라서 Fig. 4.2에 나타낸 압축성형 실험 장치 제작 시 해석 결과를 토대로 컨테이너와 압축편치를 열처리하여 강화하였으며, 컨테이너를 보호하고 고정하기 위한 플레이트를 부착하여 설계하였다. 이러한 압축성형 실험 장치를 이용하여 재료의 단위용적 질량을 $1,120\text{kg/m}^3$ 으로 균일하게 주입하여 압축성형 하여 시편을 제조하였으며, Table 4.3에 나타낸바와 같이 각 조건별로 시편을 소성하였다. 시편은 각 case별로 3개 이상의 동일 시편을 제조하여 그 평균값을 결과로 사용하였다.

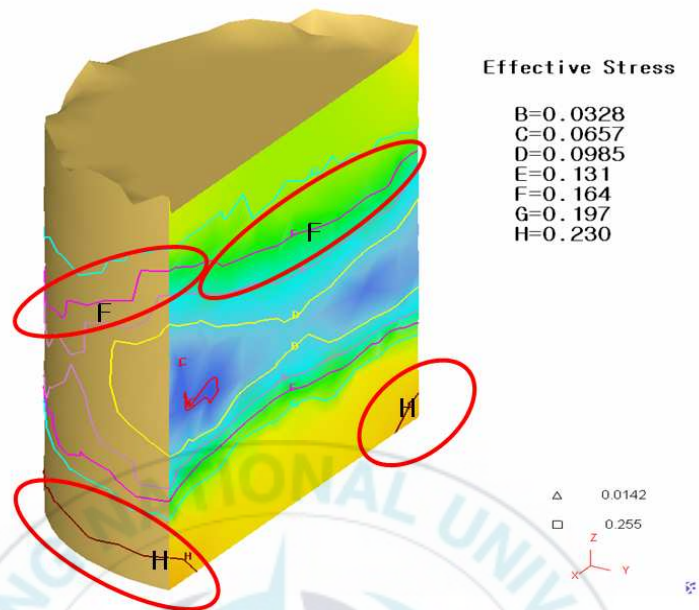


Fig. 4.1 Result of analysis for compression forming.

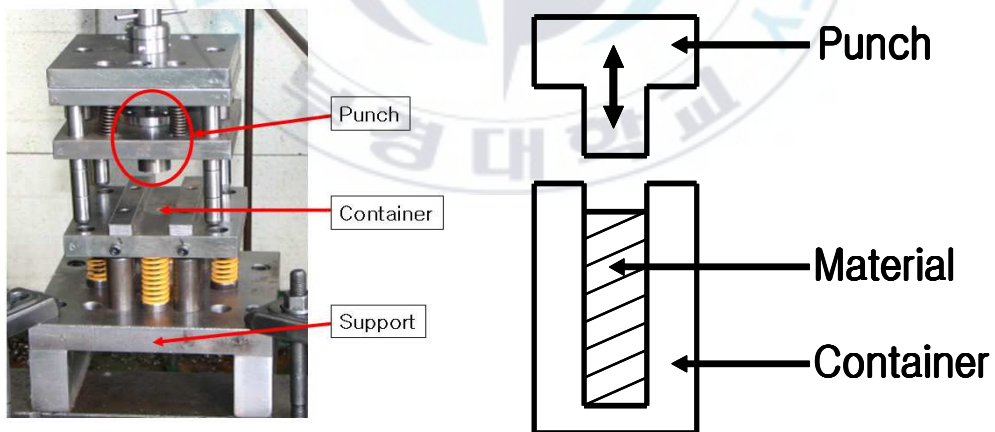


Fig. 4.2 Equipment of compression forming.

4.2.2 결과 및 고찰

가. 소성온도 및 시간에 따른 압축강도

Fig. 4.3, Fig. 4.4, Fig. 4.5는 각각의 소성시간에서 소성온도를 600, 800, 1000℃로 변화시켰을 때의 압축강도를 비교한 것이다. 소성온도의 경우 온도를 600℃와 800℃로 소성하였을 때는 온도의 상승에 따른 압축강도의 변화가 크지 않았으나, 소성온도 800℃와 1000℃사이에서는 압축강도가 급격히 상승함을 확인 할 수 있는데, 이는 시편을 제조한 재료의 주요성분인 하수슬러지 소각재의 구성성분 가운데 가장 높은 함량을 차지하는 SiO₂에 의한 일부 공융(eutectic)현상이 일어나는 것으로 보이며, 1000℃이상으로 시편을 소성할 경우 그 경향을 더욱 명확히 판단할 수 있을 것으로 사료된다. 소성온도의 상승에 따른 압축강도의 상승은 골재로서의 활용 가능성이 높아짐을 의미하며 본 실험 결과 1000℃로 소성 시 압축강도가 가장 우수하였다.

또한 시편의 소성시간이 증가할수록 압축강도가 완만히 상승 하는 모습을 보였으나 그 변화는 미미하였다. 제조된 시편의 소성시간 20분과 비교하여 소성시간 30분인 경우 시편의 직경과 높이에 관계없이 압축강도가 조금씩 상승하는 경향을 나타내었으나, 소성시간 40분으로 시편을 소성하였을 경우에는 소성시간 30분인 경우와 압축강도의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 본 실험에서의 공정변수에 따른 각 시편의 소성온도 변화 및 용적차이가 소성시간과는 무시 할 수 있는 수준의 연관관계를 가지는 것으로 판단된다..

한편, 시편의 직경과 높이에 따른 압축강도의 차이는 눈에 띄게 나타나지 않았으며, 이는 본 실험에서의 공정변수로서 시편 직경과 높이는 제조된 시편의 단위 용적 질량이 일정할 경우 압축강도 또한 그와 동일한 경향을 나타내는 것으로 보인다.

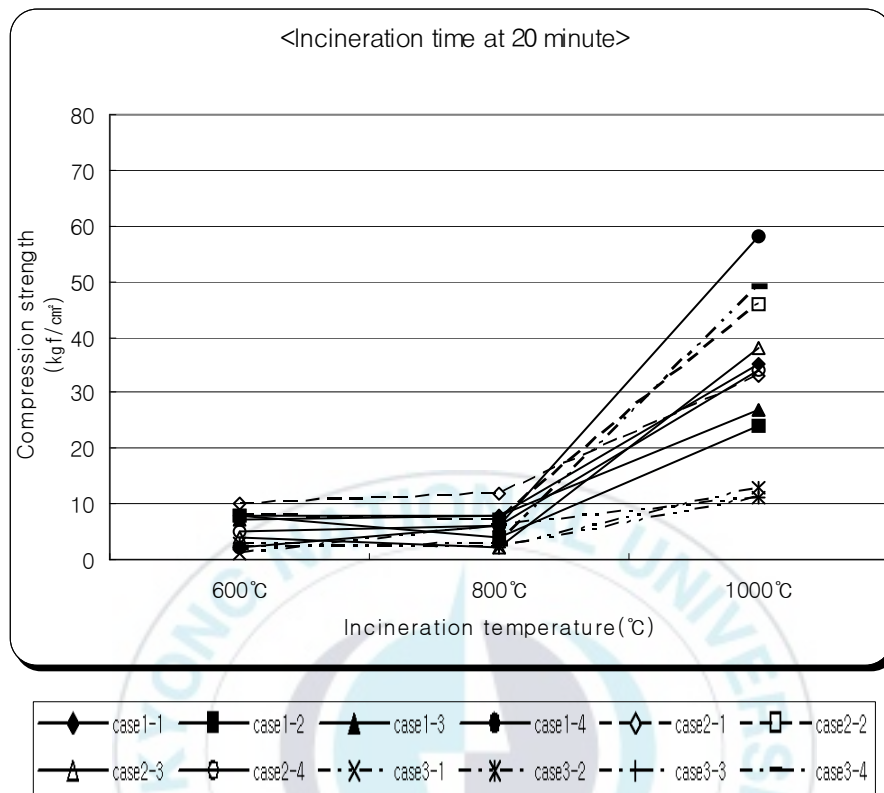


Fig. 4.3 Compression strength by incineration temperature in case of incineration time at 20 minutes.

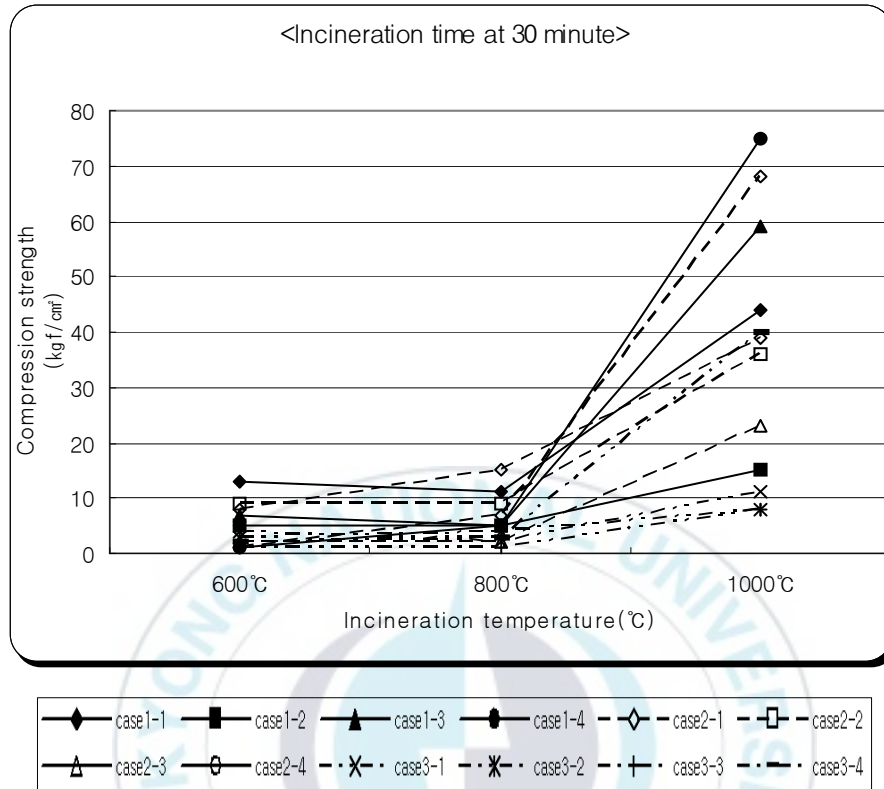


Fig. 4.4 Compression strength by incineration temperature in case of incineration time at 30 minutes.

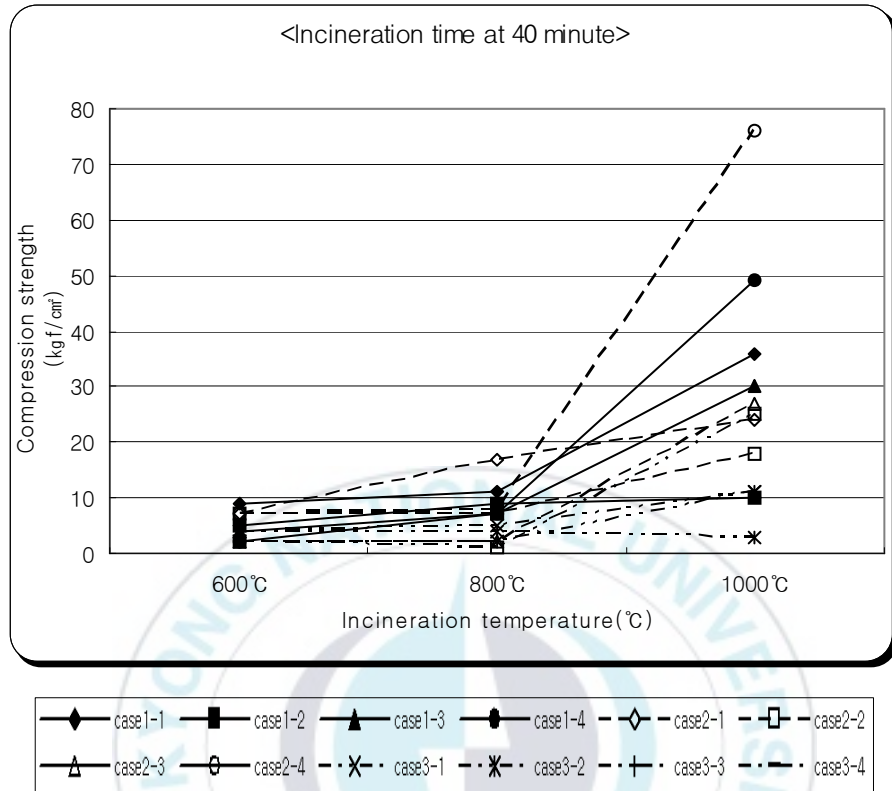


Fig. 4.5 Compression strength by incineration temperature in case of incineration time at 40 minutes.

나. 혼합중량비에 따른 압축강도 변화

Fig. 4.6은 혼합중량비에 대한 압축강도를 비교한 것이다. 여기서 하수슬러지 소각재의 비율이 높을수록 압축강도도 높은 경향을 보였으며, 하수슬러지: 소각재: 물의 혼합중량비가 9:1:0인 경우에 다른 혼합중량비에 비하여 월등히 높은 압축강도를 나타냈다. 이는 소성시간과 시편 직경에는 영향 받지 않는 것으로 보인다.

또한 시편의 함수율이 감소함에 따라 압축강도가 증가하는 추세를 보이는데, 이는 최소한의 보형성과 압축성형성을 유지할 수 있는 정도를 초과하는 수분량은 인공경량골재 제조 시 압축강도 저하를 가져올 수 있음을 의미하는 것으로 사료되며, 같은 혼합중량비를 가진 시편의 시간에 따른 압축강도의 변화는 크지 않은 것으로 판단된다.

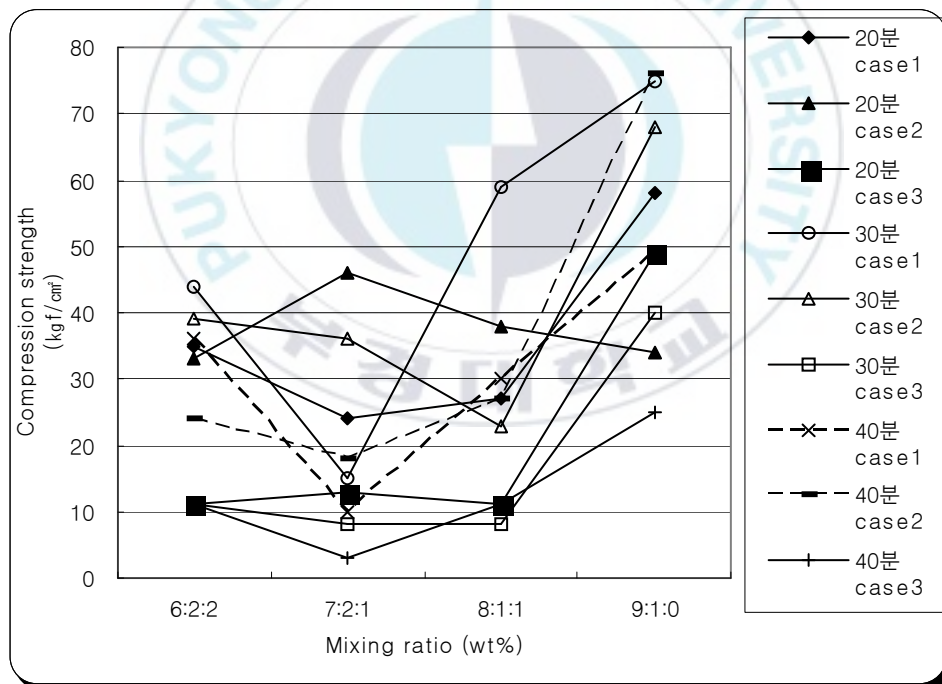


Fig. 4.6 Variation of compression strength by ratio of mixing weight.

4.2.3 결과 요약

1. 본 실험의 주재료인 하수슬러지 소각재와 점토의 중금속용출 농도시험 결과 국내 기준치 이하로 검출되었으므로 환경적 측면에서 무해할 것으로 판단된다.
2. 시편의 소성온도에 따른 압축강도의 변화를 알아본 결과, 소성온도 1000℃인 경우가 압축강도가 가장 우수함을 확인하였다.
3. 시편의 혼합중량비에 따른 압축강도의 변화를 알아본 결과, 하수슬러지 소각재: 점토:물의 혼합중량비가 9:1:0인 경우에 압축강도가 가장 우수하였다.
4. 시편의 소성시간 및 직경과 높이에 대한 압축강도의 변화를 살펴보면, 소성시간은 30분이 적합하였으며, 본 실험 내의 공정변수에서는 직경과 높이에 관계없이 동일한 L/D비를 가질 경우 유사한 압축강도를 나타내는 것으로 사료된다.

4.3 다양한 무기계 폐기물과 하수슬러지 소각재를 이용한 인공경량골재 제조 특성

4.3.1 실험 조건

가. 실험 재료

본 실험에서는 하수슬러지 소각재를 이용한 인공경량골재 제조 시 점결제로서 점토 이외의 다양한 무기계 폐기물을 이용하여 폐자원의 재이용 범위 확대 가능성을 타진함과 동시에 인공경량골재 제조 시 점결제의 사용으로 인한 압축강도와 소성온도 등의 변화를 파악하고자 하였다. 실험에는 굴패각, 폐석고, 폐유리, 물유리 등 다량의 무기성분을 함유하여 인공경량골재의 제조에 용이한 재료가 점결제로 사용되었으며, Table 4.5에 실험에 사용된 재료들의 회재분석 결과를 나타내었다.

Table 4.5 Ash analysis of testing material

	Component	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	MnO
Ash analysis (wt.%)	Ash*	45.6	21.9	10.9	3.99	9.13	1.39	4.08	1.86	0.35	0.15
	Clay	61.90	23.30	NA	7.35	0.91	1.95	NA	0.85	0.87	NA
	Wasted oystershell	ND	2.37	0.39	0.38	55.43	0.42	0.48	1.35	0.04	0.02
	Wasted gypsum	1.92	ND	ND	ND	35.72	ND	0.05	0.03	0.02	ND

: Sewage sludge ash, ND: Not detected, NA: Not analysis

나. 공정 변수

본 실험에서는 4.2에서의 실험결과를 바탕으로 보다 우수한 압축강도를 지닌 인공경량골재 제조가능성을 알아보기 위하여 Table 4.6에서와 같이 하수슬러지 소각재와 점결제의 혼합중량비를 9:1로 고정하고 소성온도 조건을 1000℃ 전후의 고온

으로 설정하여 실험하였다. 4.2의 실험결과 인공경량골재의 특성에 크게 영향이 미치지 않은 것으로 판단되는 소성시간과 시편직경 및 높이는 Table 4.6에서 보다시피 일정하게 고정하였다.

Table 4.6 Processing variables in compression test

Parameters	Conditions
Binder	Clay, Wasted oystershell, Wasted gypsum, Wasted glass, Water glass
Mixing ratio (Sewage sludge ash : Clay : Water)	9:1
Incineration temperature (°C)	800,850,900,950,1000,1050
Incineration time (min)	30
Sample diameter (mm)	14
Sample height (mm)	21

Table 4.7은 실험에서 사용된 각 재료별 소성온도 조건 및 하수슬러지 소각재와 점결제의 혼합중량비를 각 case 별로 나타낸 것이다. 여기서 소각재는 하수슬러지 소각재를 뜻한다.

Table 4.7 The classification by incineration temperature and mixing ratio

Specimens	Incineration temperature (°C)					
	800(1)	850(2)	900(3)	950(4)	1000(5)	1050(6)
Ash(A)	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
Ash:Clay(B)	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6
Ash:Wasted oystershell(C)	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6
Ash:Wasted gypsum(D)	D-1	D-2	D-3	D-4	D-5	D-6
Ash:Wasted glass(E)	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6
Ash:Water glass(F)	F-1	F-2	F-3	F-4	F-5	F-6

다. 실험 장치 및 방법

다양한 무기계 폐기물을 점결제로 이용한 인공경량골재 제조 특성 실험은 Fig. 4.2의 장치를 이용하여 4.2에서의 실험방법과 동일한 공정으로 진행하였다.

4.3.2 결과 및 고찰

가. 소성온도에 따른 압축 강도

하수슬러지 소각재와 점결제의 혼합중량비를 9:1로 고정 한 상태에서 소성온도의 변화에 따라서 각각의 점결제 첨가가 제조된 시편의 압축강도변화에 미치는 영향에 대해 알아보았다. 실험한 모든 시편들은 소성온도가 상승함에 따라 압축강도가 상승하였으며, 특히 굴폐각과 폐석고를 제외한 나머지 물질들은 소성온도가 1000℃를 초과하면서 압축강도가 급격히 증가하였다. 그중 순수한 하수슬러지 소각재만을 이용한 시편은 KS F 2534 구조용 경량골재의 압축강도 기준(180kgf/cm²)을 3배 이상 초과하는 강도를 나타냈으며, 이는 하수슬러지 소각재만으로 제조된 시편의 화학 구성성분이 점결제를 첨가한 시편의 화학 구성성분보다 소성조건이 뛰어난 것으로 판단되게 한다.

한편 소성에 좋은 영향을 미치는 것으로 알려진 SiO₂나 Al₂O₃ 성분의 함량이 미미한 대신 비교적 CaO의 함량이 높은 굴폐각과 폐석고는 소성온도가 1000℃를 초과하여도 인공경량골재로서의 활용이 가능한 압축강도를 나타내지 못했으나, 점토, 물유리, 폐유리를 점결제로 사용한 시편의 경우 소성온도가 1000℃를 넘어서면서, 인공경량골재로서의 활용 가능한 최소한의 압축강도를 만족했다. 또한 물유리와 폐유리의 경우 각 소성온도 변화에 따라 거의 동일한 압축강도를 나타냈는데 이는 이산화규소에 탄산나트륨을 일정 비율로 섞어 만들어지는 메타규산나트륨 Na₂SiO₃ 이 대부분을 구성하는 물유리와 규산을 주체로 하여 탄산나트륨과 탄산칼슘등을 고온에서 녹여 만들어진 폐유리의 화학적 구성성분이 대부분 규산나트륨으로 이루어져 있기 때문에 소성온도에 따른 변화 또한 유사한 반응을 보인 것으로 사료된다.

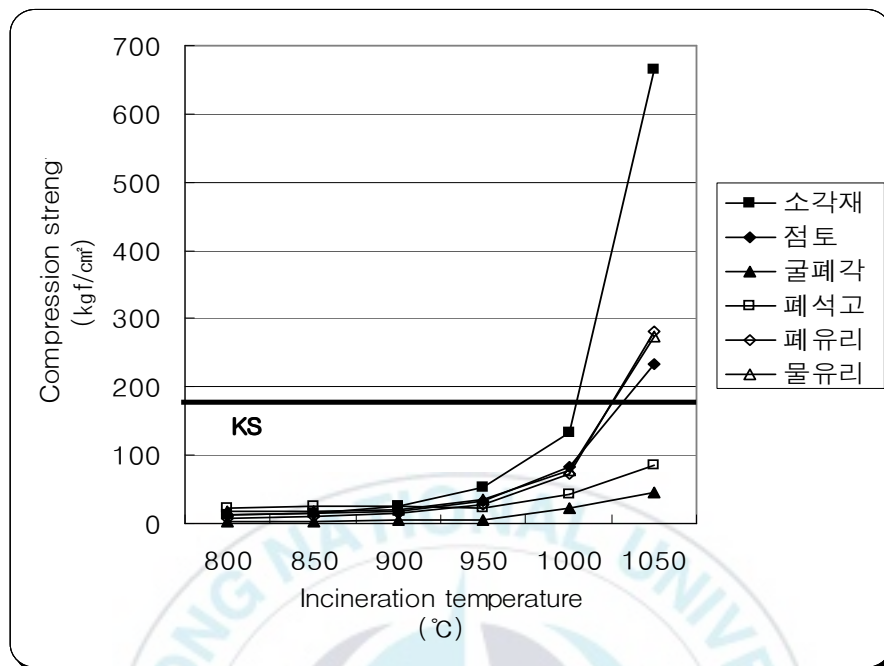


Fig. 4.7 Compression strength by incineration temperature.

나. 소성온도에 따른 시편의 색상 및 체적변화

각 온도별로 소성한 시편의 외관을 살펴본 결과 소성온도가 상승함에 따라 시편의 색상이 점차적으로 황토색에서 적갈색으로 변화하였다. 이는 시편 내에서 Fe 성분의 산화현상이 일어난 것으로 보이며, 1000℃ 이상의 온도로 소성한 시편의 경우 Fig. 4.8 에서 보다시피, 시편의 체적 또한 급격히 줄어드는 것을 알 수 있는데, 이는 시편의 소성 온도가 높아질수록 시편내의 주요성분인 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO 등이 공융현상 등의 소성 메카니즘에 의해 시편의 기공사이즈가 치밀하게 변화하면서 밀도가 줄어들어 시편의 체적을 줄이는 것으로 보이며, 이는 시편의 압축강도에도 일부 영향을 미치는 것으로 사료된다.

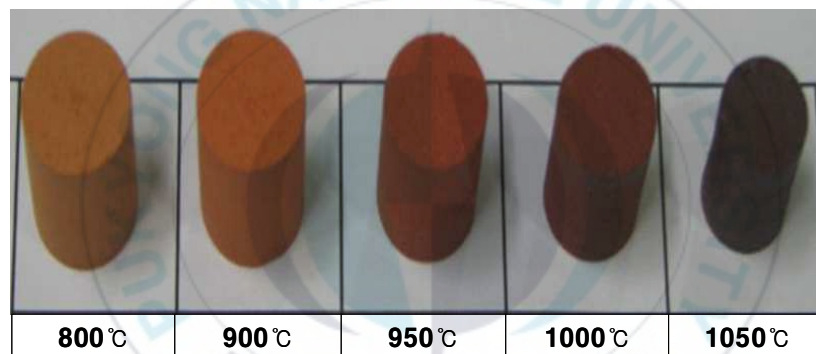


Fig. 4.8 Volume of change by incineration temperature.

4.3.3 결과 요약

1. 하수슬러지 소각재와 점토 이외의 무기계폐기물을 점결제로 사용하여 소성온도에 따른 압축강도를 확인한 결과, 1050℃의 온도에서 소성한 (A), (B), (E), (F) 시편이 인공경량골재로서의 사용이 가능한 압축강도를 나타냄을 확인하였다.
2. 소성온도에 따른 시편의 체적변화를 살펴본 결과 실험한 모든 시편에서 소성온도의 상승에 따라 체적이 줄어들면서 압축강도가 상승함을 확인하였다.



제 5 장 결 론

본 연구에서는 성형방법에 따른 이론적 해석기법을 적용한 압출 및 압축성형방식의 금형을 제작하여 하수슬러지 소각재를 이용한 인공경량골재 제조 시 성형방식의 효율성 및 점결제를 통한 환경적 영향과 제품의 특성에 대한 평가를 압축강도, 소성온도 조건, 시료의 혼합중량비, 중금속 용출농도 등을 통하여 검토하고자 하였다.

1. 압출방식의 성형공정에 대한 이론적 해석기법을 적용한 압출금형을 제작하여 인공경량골재를 제조한 결과, 하수슬러지 소각재와 점토 및 물의 혼합중량비가 5:2:3인 경우가 압출성형성이 가장 우수함을 확인하였으나, 혼합재료의 보형성이 유지되지 않아서 이에 대한 보완이 필요한 것으로 나타났다.
2. 이론적 해석기법을 바탕으로 제작한 압축성형금형을 통한 인공경량골재의 제조 시, 성형공정변수가 압축강도에 미치는 영향을 조사한 결과, 하수슬러지 소각재:점토:물의 혼합중량비가 9:1:0인 경우에 압축강도가 가장 우수하였으며, 압축성형시편의 함수율이 감소함에 따라 압축강도가 증가함을 알 수 있었다. 그리고 소성온도가 증가함에 따라 압축강도가 우수함을 확인하였다.
3. 하수슬러지 소각재와 점토 이외의 무기계폐기물인 굴폐각, 폐석고, 폐유리, 물유리 등을 이용하여, 각 시편의 소성온도 조건을 달리하여 인공경량골재로서의 가능성을 확인한 결과, 소성온도는 1050℃에서 혼합중량비 9:1(하수슬러지소각재:점결제)의 점결제로서 점토, 폐유리, 물유리 및 순수하수슬러지 소각재로 제조된 시편이 압축강도를 통해 인공경량골재로서 활용이 가능함을 확인하였다.
4. 하수슬러지 소각재를 이용한 인공경량골재의 제조 시 압출방식의 성형공정은 압축성형공정에 비하여, 에너지 손실이 크고, 성형성과 보형성이 부족하였으며, 인공경량골재로서 사용 가능한 압축강도의 실현이 어려웠다. 이에 비하여 금형을 이용한 압축성형 방식으로 제조된 시편은 뛰어난 보형성을 가지며 낮은 함수율에서

도 성형성이 유지되었으며, 압출방식에 비하여 우수한 압축강도를 가지는 것으로 나타났다

5. 시편의 제조에 사용된 재료에서 중금속 용출 농도가 국내 기준치 이하로 검출되어 본 실험을 통해 제조된 인공경량골재는 환경적으로 무해한 것으로 확인하였다.

본 연구를 통하여 하수슬러지 소각재와 다양한 점결제를 이용한 재활용 인공경량골재 제조에 적합한 조건의 혼합중량비와 소성온도 및 점결제를 파악하였으며, 제조된 제품의 환경위해성과 인공경량골재로서의 이용 가능성을 검토하였다. 본 연구의 결과는 하수슬러지소각재 및 다양한 폐기물을 이용한 인공경량골재 제조에 관련된 연구에 제품 성형특성 예측자료로도 활용이 가능 할 것으로 사료된다.



참 고 문 헌

- Bobman M. H., D. R. Hajicek and B. J. Zobeck : "A Study Bed Agglomeration Resulting from the AFBC of Low-Rank Coals", Proc. of the 8th Int. Conf. on FBC, Fluidization, pp.235 (1980).
- Fujimoto, T., Kawasugi, T. Fujiuchi, H., Ishihara, H., Shimizu, K., Abe, S., Kanbayashi, F. : "Empirical Study on Melting Characteristics and its Application to Melting Treatment of Waste(2)", Environ Conservation Engineering, 17(10), pp.37-41 (1988).
- Goblirsch, G. M., S. A. Benson, D. R. Hajicek and J. L. Cooper : "Sulfur Control and Bed Material Agglomeration Low-Rank Coal AFBC Testing", Proc. of the 7th Int. Conf. on FBC, 2, pp.1107 (1982).
- Iwase. M, and Kurokawa Y. : "Water-permeable Paving Brick bu Utilizing Sewage Sludge Ash (in Jpn.)," Ceramics of Jpn., 33(7) pp.521-523 (1998).
- Jiang, W. and Roy, D.M. : "Hydrothermal processing of new fly ash cement", Cer. Bull., 71(4), pp.642-647 (1992).
- Joseph. R. P. and Gary T. R., : "Aqueous Rection of Fly Ash and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ to Produce Calcium Silicate Absorbent for Flue Gas Desulfurization", Environ. Sci Technol. 22, pp.1299-1304 (1988).
- Knox, J. W. and C. M. Wheeler : "Waste Treatment by Fluidized Bed Thermal Oxidation", Air Pollution Control and Dedign Hanbook (part 1) edited by P. N. Cheremisinoff and R. A. Young, Marcel Dekker, Inc., New York (1977).

- Lin, D. F., and Weng, C. H. : "Use of Sewage Sludge Ash as Brick Material", Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 127, No.10, pp.922-927 (2001).
- Merikalio. T, Mannanen. R. and Penttala. V. : "Drying of Lightweight Concrete Produced from Crushed Expanded Clay Aggregates", Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 9, pp.1425 (1996).
- Min hong Zhang et. al., : "Characteristics of lightweight aggregates for high-strength concrete", ACI Materials Journal, No.88-M19, pp.150-158 (1991).
- N. Takeuchi, H. Takahashi and M. Wakamatsu, : "Effect of Firing Atmosphere on Extraordinary Expansion of Sintered Brick from Incinerated Ash of Sewage Sludge", J. Ceram. Soc. Jpn., 107(6) pp.551-54 (1999).
- Park. I. M. and Oh. J. S. : "Lightweight Aggregate Made from Dewatered Sludge of Sewage Treatment Plant(in Kor.)," J. Kor. Solid Waste Eng. Soc., 17(1) pp.102-110.
- Singer, J. G. : "Combustion Fossil Power System", Combustion Engineering Inc. (1981).
- Ugurlu A. and Salman B., Environment International, Vol. 24 No. 8, pp.911-918 (1998).
- Watanabe, H., T. Shiraishi : "Improvement of Melting Temperature and Viscosity in Sewage Sludge Melting Process", The 8th Int. Sym. on Environ. Tech. Development, 15(3), pp.393-405 (1992).

Y. S. Won, C. H. Lee and S. P. Choi. : "Characteristics of Composition and Incineration of Sewage Sludge(in Kor.)", J. Kor. Solid Wastes Eng. Soc., 14(1) pp.43-53 (1997).

김덕모 : "다량의 하수슬러지를 활용한 경량골재 제조 시 무기계폐기물의 점결제로의 적용성 평가", 전북대학교 석사학위논문 (2005).

장병인 : "하수슬러지 소각재의 특성 및 재활용", 충북대학교 석사학위논문 (2005).

김정국 : "염색슬러지의 용융특성에 관한 연구", 부경대학교 석사학위논문 (2005).

이처근, 허열 : "건설재로서 하수슬러지 소각재의 활용", 건설기술논문집 제22권 제2호, pp.245-257 (2003).

김도수, 박종현, 박병배, 노재성 : "유리섬유 폐재가 첨가된 플라이 애쉬계 인공경량골재의 소성특성", 한국폐기물학회지 제17권 제3호, pp.252-260 (2000).

정현태, 김기현, 유종익, 최용철, 윤기섭, 서용철 : "도시 폐기물 소각재의 물리, 화학적 특성 및 용출 방법에 따른 중금속 용출 특성 평가 연구", 한국폐기물학회지 제19권 제4호, pp.407-417 (2002).

한국공업규격 KS F 2534, 한국공업표준협회

한국공업규격 KS L 4201, 한국공업표준협회