하수슬러지 유기성 고형연료의 점하중 시험에 의한 강도 예측 Strength Estimation by the Point Load Test of the Sewage Sludge Solid Refuse Fuel

정일갑[†] · 김태원 · 이동명* · 강충길**

Il-kab Jeong[†] · Tae-won Kim · Dong-myung Lee* · Chung-gil Kang**

(주)석진이엔티 · *한국산업기술시험원 · **부산대학교 기계공학부

Seokjin E & T · *Korea Testing Laboratory

**Mechanical Engineering Pusan National University

(Received March 22, 2017; Revised September 18, 2017; Accepted January 10, 2018)

Abstract : Recently, interest has increased about sewage sludge solid refuse fuel. So, Studies have conducted on sewage sludge, the production method of solid fuel and the characteristics as fuel. However, studies on the mechanical properties of sewage sludge solid fuel have not been conducted. In this study, the point load strength of sewage sludge solid fuel was measured by the point load strength test of rock and the uniaxial compressive strength was derived based on this. We propose the mechanical strength of sewage sludge solid fuel through the result of this study. As a result, the size corrected point load strength ($IS_{(50)}$) of sewage sludge solid fuel was max. 3.74 MPa and min. 0.04 MPa. And, the uniaxial compressive strength of sewage sludge solid fuel estimated by the point load strength was max. 89.78 MPa, min. 1.08 MPa and the average was 24.86 MPa. The result of study should be observed all data and should be use according to the application. because the range and distribution of the point load strength and the uniaxial compressive strength of the sewage sludge solid fuel are wide.

Key Words : Sewage Sludge Solid Refuse Fuel, The Point Load Strength, Uniaxial Compressive Strength

요약 : 최근, 하수슬러지 유기성 고형연료에 대한 관심이 높아지면서 하수슬러지를 이용한 유기성 고형연료 생산방법 및 연료로서의 특성에 대한 연구가 이루어지고 있다. 하지만 연료화 된 하수슬러지 유기성 고형연료의 기계적 물성에 대한 연구는 진행되고 있지 않다. 본 연구에서는 암석의 점하중강도 시험을 통하여 하수슬러지 유기성 고형연료의 점하중 강도를 측정하고 이를 바탕으로 일축압축강도를 도출하여 하수슬러지 유기성 고형연료의 기계적 강도를 제시하고자 한다. 연구결과, 하수슬러지 유기성 고형연료의 보정된 점하중 강도($IS_{(50)}$)은 최대 3.74 MPa, 최소 0.04 MPa이었다. 그리고, 점하중 강도를 통하여 추정된 하수슬러지 유기성 고형연료의 일축압축강도는 최대 89.78 MPa, 최소 1.08 MPa이었으며, 평균 24.86 MPa이었다. 하수슬러지 유기성 고형연료의 점하중강도 및 일축압축강도의 범위와 분포가 넓어 전체 값을 관찰하여 용도에 맞게 결과값을 활용해야 할 것으로 판단된다.

주제어 : 하수슬러지 유기성 고형연료, 점하중강도, 일축압축강도

1. 서론

하수슬러지는 하수처리 과정을 통하여 필연적으로 발생되는 폐기물로서 처리해야하는 부산물이다. 국내 하수처리장의 신·증설, 하수관거 정비 및 방류수 수질기준 강화 등으로 하수 슬러지 발생량이 지속적으로 증가하고 있다. 하수슬러지 발생량은 2008년 7,446톤/일에서 2013년 10,946톤/일, 2015년 10,526.7톤/일로 증가되었다.¹⁻³⁾ 2011년까지는 발생된 하수슬러지의 30% 이상을 해양투기를 통해 처리하였으나 2012년부터 ‘폐기물 및 기타물질의 투기에 의한 해양 오염방지에 관한 협약’으로 해양투기가 금지되어 이를 처리하기 위해 재활용, 소각, 매립, 연료화 등의 방법을 사용하고 있다. 2015년 기준 하수슬러지는 처리방법에 따라 재활용(연료화, 비료화, 기타) 약 5,997.2톤/일(57%), 건조 902.7톤/일(8.6%), 소각 1,971.4톤/일(18.7%), 매립 1,444.2톤/일(13.7%), 기타 211.3톤/일(2%) 순으로 처리하고 있다.

재활용의 경우 57%로 하수슬러지 처리방법 중 가장 많이 사용되고 있으나 연료화는 2,171.9톤/일로 전체 재활용 중 36.2%로 연료화의 활용이 낮다.³⁻⁶⁾

한편, 고형연료는 폐기물(생활/사업장 폐기물)을 전처리(선별, 파쇄, 건조, 성형)하여 폐기물 내 함유된 수분, 금속, 유리 등의 불연물을 제거한 후 가연성분만을 가공하여 만든 고체연료로서, 크게 생활폐기물 고형연료 제품(Solid Refuse Fuel, SRF), 폐플라스틱 고형연료제품(Refuse Plastic Fuel, RPF), 폐타이어 고형연료제품(Tire Derived Fuel, TDF), 폐목재 고형연료제품(Wood Chip Fuel, WCF) 등의 4가지로 나눌 수 있다. 고형연료 제품은 시멘트 소성로, 발전시설, 지역난방시설, 산업용보일러, 제철소로, 보일러시설 등에 사용된다.⁷⁾

하수슬러지는 건조공정 등을 통해 재가공하면 연료화가 가능하며 이러한 과정을 거친 건조물은 수분함량 10% 이하, 가연분 함량 50% 이상, 탄소함량 35% 이상 저위발열량

[†] Corresponding author E-mail: kaby1031@nate.com Tel: 051-203-8420 Fax: 051-202-8422

Fig. 1. Production process of sewage sludge solid refuse fuel.

3,000 kcal/kg 이상의 성질을 보유하여 석탄과 매우 유사한 특성을 지닌 하수슬러지 유기성 고형연료를 얻을 수 있으며 이는 발전연료로 활용이 가능하다.⁸⁾

대한민국 정부는 지구온난화 방지를 위한 범세계적인 노력에 기여하기 위하여 2012년부터 일정규모(500 MW) 이상의 발전설비를 보유한 발전사업자에게 총 발전량의 일정 비율 이상을 신·재생에너지를 이용하여 발전하도록 하는 신재생 에너지 의무할당제(Renewable Portfolio Standards, RPS)를 시행하고 있다. 국내 석탄 화력발전소는 이에 맞추어 하수슬러지 유기성 고형연료를 이용하여 신재생 에너지 의무할당제를 이행하고 있다.

이러한 이유로 하수슬러지 유기성 고형연료에 대한 관심이 높아지면서 하수슬러지를 이용한 성형연료화 최적 조건 연구,⁸⁾ 하수슬러지의 슬러지연료탄 생산 공정 및 활용성에 대한 연구,⁹⁾ 하수슬러지 건조 연료탄의 화력발전소 혼소 특성 평가¹⁰⁾ 등의 하수슬러지 유기성 고형연료 생산방법 및 연료로서의 특성에 대한 연구가 이루어졌다. 하수슬러지가 아닌 음식물폐비를 활용하여 제작된 고형연료에 대해 압축강도 시험 방법을 이용한 고형 연료의 압축강도 특성에 대한 연구가 진행된 바가 있으며, 음식물폐비 고형연료의 최

대 압축강도 값은 9.2 MPa이었다.¹¹⁾

국내 석탄 화력발전소의 석탄과 하수슬러지 유기성 고형연료의 혼합 연료 사용을 위한 하수슬러지 유기성 고형연료 투입 방식에는 Co-Milling 방식(간접 투입방식)과 Co-firing 방식(직접 투입방식)이 있다. Co-milling 방식은 하수슬러지 유기성 고형연료를 미분기에 투입하여 석탄과 함께 미분 처리하여 연료로 사용하는 방식이며, Co-firing 방식은 미분기에 투입하지 않고 자체 분쇄 설비를 사용하여 분쇄 후 연소로에 직접 투입하는 방식이다. 최근에는 하수슬러지 유기성 고형연료로부터 석탄 미분기 및 이송라인의 보호가 가능한 Co-firing 방식을 선호하고 있으며, 충남에 위치한 D 석탄화력발전소에서는 Co-firing 방식으로 약 5%의 하수슬러지 유기성 고형연료를 투입하고 있다.

현재 Co-firing 방식으로 하수슬러지 유기성 고형연료를 투입하기 위해 Fig. 2와 같은 Hammer Mill(해머 분쇄기)를 사용하여 분쇄를 하고 있으나, Fig. 3에 나타난 바와 같이 주요 부품의 빠른 마모와 잦은 파손으로 인해 낮은 가동 효율을 보이고 있어, 높은 내구성과 가동 효율을 가지는 형태의 분쇄기에 대한 개발이 필요한 상황이다.

본 연구에서는 높은 내구성과 가동 효율을 가지는 형태의

Fig. 2. Shape of Hammer Mill.

Fig. 3. Damage of Hammer Mill Parts.

분쇄기에 대한 개발을 위해 연료 형태로 가공된 하수슬러지 유기성 고형연료에 대해 점하중강도 표준시험법을 적용하여 기계적 특성에 대한 분석을 통해 하수슬러지 유기성 고형연료의 기계적 물성(강도)을 제시하고, 하수슬러지 유기성 고형연료 분쇄기 개발 등에 필요한 기초 자료를 확보하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구에서는 점하중강도법을 이용하여 하수슬러지 유기성 고형연료의 압축강도를 측정하기 위해 시료의 가압부의 치수를 측정하고 점하중 시험기를 압축의 점하중강도 표준시험법에 따라 점하중강도를 측정하였다.¹²⁾ 측정된 가압부 치수와 점하중강도를 이용하여 하수슬러지 유기성 고형연료의 일축압축강도를 도출하고, 분석하였다.

본 연구에 사용된 하수슬러지 유기성 고형연료는 2016년 4/4분기에 A, B, C 하수처리장에서 D 석탄화력발전소에 납품된 하수슬러지 유기성 고형연료에서 시료를 채취하여 측정에 활용하였다.

2.1. 하수슬러지 유기성 고형연료의 연료 특성 분석

시험에 사용된 하수슬러지 유기성 고형연료의 발열량 및 성분 구성은 Table 1과 같다. Fig 4와 같이 하수처리장별로 하수슬러지 유기성 고형연료의 형상 및 크기가 조금씩 차이를 가지고 있어 하수처리장별로 분류하여 분석을 진행하였다.

2.2. 하수슬러지 유기성 고형연료 가압부 치수 측정

점하중강도 시험은 Fig. 5와 같이 시험편 형상에 따라 직경방향 시험, 축방향 시험, 직육면체 시험편의 시험, 불규칙형상 시험편의 시험으로 나누어지며, 각 시험 방법에 따라

Fig. 5. The shape of specimen for the point load test.¹²⁾

시험편 등가 직경(D_e)을 구하는 방법이 달라진다. 본 연구에 사용된 하수슬러지 유기성 고형연료 시험편은 점하중강도 시험의 직경방향시험이 용이한 둥근형상의 시험편을 선별하여 가압부의 치수를 Mitutoyo사의 0-200 mm 디지털 버니어캘리퍼스를 이용하여 치수를 측정하였다.

2.3. 하수슬러지 유기성 고형연료의 점하중강도 시험

본 연구에서는 선별된 둥근형상의 시험편을 이용하여 직경방향시험(Diametral test) 방법에 따라 점하중강도 시험을

Table 1. Specification of sewage sludge solid refuse fuel test specimen

Sewage treatment plant	Higher heating value (kcal/kg)	Lower heating value (kcal/kg)	Moisture (%)	Ash (%)	Cl (%)	S (%)
A	3,590	3,900	5.5	31.8	0.31	1.94
B	3,190	3,480	4.9	34.1	0.13	0.99
C	3,210	3,520	7.9	33.6	0.08	1.14

Fig. 4. Sewage sludge solid refuse fuel.

Fig. 6. The point load tester & The shape of pressing position.

진행하였다.

하수슬러지 유기성 고형연료의 점하중강도 시험은 Fig. 6의 점하중 시험기를 이용하여 측정하였으며, 점하중 시험을 위한 점하중 시험기는 ㈜에이스테크에서 제작된 것으로, 압력 용량 100 kgf, 최대 Stroke 100 mm, 속도 0~66.6 mm/min이다. 하중측정을 위한 가압부는 반지름 5 mm, 60도의 각도를 가지는 형상으로 되어있다.

점하중 강도 시험의 과정은 Fig. 7과 같이, 하수슬러지 유기성 고형연료 시험편의 치수를 측정하고, 시험편을 시험기에 위치시키고 시험편의 점하중 시험기의 하부 가압부의 높이를 조정하여 시험편의 가압부와 시험기의 가압부가 접촉하도록 한다. 하부 가압부를 0.2 mm/sec의 속도로 상승시켜 시험편이 파괴되도록 하였으며, 이때의 파괴 하중(P)을 기록하였다. 시험 후 파괴면이 두 개의 가압점을 포함하지 못하고 발생하였을 때는 그 시험은 무효로 하고 재시험을 진행하였다.

2.4. 하수슬러지 유기성 고형연료의 일축강도의 계산

앞선 점하중강도 시험을 통해 측정된 파괴 하중을 이용하여 일축 압축강도를 계산하며, 점하중강도지수(I_S)는 아래의 식 (1)¹²⁾과 같이 계산된다.

$$I_S = P/D_c^2 \quad (1)$$

여기서, I_S 는 점하중강도지수(N/mm²)

P 는 파괴하중(N)

D_c 는 시험편 등가직경(mm)

시험편 등가면적(D_c^2)은 시험방법에 따라 아래의 식 (2)와 같이 계산되며, 본 연구에서는 직경방향시험 방법에 따라 계산하였다.

$$\begin{aligned} D_c^2 &= D^2 \quad (\text{직경방향시험}) \\ &= WD \quad (\text{축방향시험}) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, D 는 두 접촉점 사이의 거리(mm)

W 는 시험편의 너비(mm)

점하중강도지수는 시험편 크기에 따라 달라지므로 이에 대한 보정이 필요하다. 크기가 보정된 보정점하중강도지수($I_{S(50)}$)는 50 mm 직경을 가지는 원주형 시험편으로 직경방향시험을 수행하였을 때 얻어지는 점하중강도지수로 정의된다. 크기 보정은 다음의 식 (3)¹²⁾과 같으며, 크기보정계수(F)는 식 (4)와 같다.

$$I_{S(50)} = F \times I_S \quad (3)$$

여기서, F 는 크기 보정계수

$$F = (D_c/50)^{0.45} \quad (4)$$

$I_{S(50)}$ 과 일축압축강도와는 평균적으로 20~25배의 관계가 있는 것으로 알려져 있으며, 일반적으로 $I_{S(50)}$ 로부터 일축압축강도(q_u)는 아래의 식 (5)로 구할 수 있다.¹³⁾

$$q_u = 24 \times I_{S(50)} \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 하수슬러지 유기성 고형연료 시험편 치수 측정

A, B, C 하수처리장 별 하수슬러지 유기성 고형연료의 가압부 치수 측정 결과는 Table 2와 같으며, 측정된 가압부의 평균직경은 A 하수처리장은 3.63 mm, B 하수처리장은 2.62 mm, C 하수처리장은 2.81 mm이다.

Fig. 7. Process of the point load test for the sewage sludge solid refuse fuel.

Table 2. Dimension of sewage sludge solid refuse fuel's pre-surrization point

Plant A				Plant B				Plant C			
No.	Dim. (mm)	No.	Dim. (mm)	No.	Dim. (mm)	No.	Dim. (mm)	No.	Dim. (mm)	No.	Dim. (mm)
1	5.34	16	3.32	1	2.93	16	2.01	1	3.18	16	2.29
2	3.78	17	3.7	2	3.01	17	2.84	2	2.8	17	2.0
3	3.78	18	3.47	3	3.27	18	2.09	3	3.01	18	2.67
4	4.25	19	3.05	4	3.44	19	1.98	4	2.91	19	3.13
5	3.75	20	3.81	5	2.94	20	3.29	5	3.6	20	2.72
6	3.75	21	4.43	6	3.58	21	2.2	6	4.1	21	2.13
7	4.84	22	4.34	7	2.4	22	2.55	7	2.6	22	2.98
8	3.92	23	3.44	8	2.37	23	1.43	8	2.61	23	2.55
9	3.23	24	3.22	9	3.03	24	2.02	9	3.21	24	2.69
10	2.77	25	3.04	10	3.01	25	1.94	10	2.51	25	3.36
11	3.61	26	3.03	11	2.82	26	2.74	11	2.85	26	3.31
12	3.38	27	3.35	12	2.53	27	2.5	12	3.0	27	2.34
13	4.53	28	1.89	13	2.9	28	2.86	13	2.61	28	2.82
14	3.87	29	3.52	14	2.8	29	2.22	14	2.7	29	2.75
15	3.57	30	2.78	15	2.55	30	2.25	15	2.74	30	2.19

3.2. 하수슬러지 유기성 고형연료 점하중강도 시험 결과

하수슬러지 유기성 고형연료 점하중강도 시험을 통하여 측정된 하수슬러지 유기성 고형연료의 파괴하중(P)은 Table 3과 같다. A 하수처리장의 최대 파괴하중은 124.56 N, 최소 파괴하중은 6.96 N, 평균 파괴하중은 45.07 N으로 측정되었다. B 하수처리장의 최대 파괴하중은 67.42 N, 최소 파괴하중은 1.08 N, 평균 파괴하중은 36.23 N으로 측정되었으며, C 하수처리장의 최대 파괴하중은 31.36 N, 최소 파괴하중은 4.02 N, 평균 파괴하중은 13.07 N으로 나타났으며, 각

Table 3. Result of the point load test (Breaking load)

Plant A				Plant B				Plant C			
No.	Load (N)	No.	Load (N)	No.	Load (N)	No.	Load (N)	No.	Load (N)	No.	Load (N)
1	37.93	16	66.84	1	16.95	16	22.25	1	8.04	16	8.43
2	36.26	17	27.64	2	28.52	17	43.51	2	14.60	17	31.36
3	18.52	18	42.73	3	45.28	18	45.18	3	11.56	18	8.92
4	6.96	19	48.02	4	23.03	19	20.09	4	9.80	19	10.68
5	10.88	20	75.56	5	62.23	20	30.87	5	6.47	20	16.17
6	17.05	21	69.58	6	42.63	21	24.11	6	9.41	21	8.62
7	124.56	22	56.84	7	52.21	22	47.24	7	10.19	22	10.88
8	39.89	23	76.73	8	24.50	23	36.26	8	29.30	23	4.02
9	40.47	24	36.55	9	61.45	24	12.45	9	9.70	24	24.89
10	57.04	25	61.16	10	67.42	25	60.76	10	27.44	25	9.70
11	34.30	26	67.52	11	30.77	26	42.63	11	8.62	26	20.87
12	14.70	27	34.69	12	49.29	27	1.08	12	6.76	27	11.56
13	57.92	28	55.96	13	9.21	28	39.340	13	18.13	28	12.25
14	33.03	29	53.21	14	24.30	29	43.61	14	8.62	29	9.31
15	22.74	30	26.75	15	26.56	30	53.21	15	13.23	30	12.64

Fig. 8. Normal distribution of the breaking load.

하수처리장별 파괴하중의 정규분포 형태는 Fig. 8과 같다.

각 하수처리장별 파괴하중의 표준 편차는 A 하수처리장은 24.17 N, B 하수처리장은 16.59 N, C 하수처리장은 6.87 N으로 시료별로 파괴하중의 편차가 큰 것으로 나타났다.

측정된 시험편 등가 직경(D_e)과 파괴하중(P)로부터 식 (1)을 사용하여 계산된 점하중강도지수(I_s)는 Table 4와 같으며, 각 하수처리장별 점하중강도지수의 정규분포 형태는 Fig. 9와 같다. A 하수처리장의 최대 점하중강도지수는 15.67 MPa, 최소 점하중강도지수는 0.38 MPa, 평균 점하중강도지수는 3.88 MPa으로 측정되었다. B 하수처리장의 최대 점하중강도지수는 17.73 MPa, 최소 점하중강도지수는 0.17 MPa, 평균 점하중강도지수는 5.29 MPa으로 측정되었으며, C 하수처리장의 하수처리장의 최대 점하중강도지수는 7.84 MPa, 최소 점하중강도지수는 0.50 MPa, 평균 점하중강도지수는 1.87 MPa으로 나타났다.

Table 4. The point load strength index

Plant A				Plant B				Plant C			
No.	I_s [MPa]	No.	I_s [MPa]	No.	I_s [MPa]	No.	I_s [MPa]	No.	I_s [MPa]	No.	I_s [MPa]
1	1.33	16	6.06	1	1.97	16	5.51	1	0.79	16	1.61
2	2.54	17	2.02	2	3.15	17	5.39	2	1.86	17	7.84
3	1.30	18	3.55	3	4.23	18	10.34	3	1.28	18	1.25
4	0.39	19	5.16	4	1.95	19	5.12	4	1.16	19	1.09
5	0.77	20	5.21	5	7.20	20	2.85	5	0.50	20	2.19
6	1.21	21	3.55	6	3.33	21	4.98	6	0.56	21	1.90
7	5.32	22	3.02	7	9.24	22	7.26	7	1.51	22	1.22
8	2.60	23	6.48	8	4.36	23	17.73	8	4.30	23	0.62
9	3.88	24	3.53	9	6.69	24	3.05	9	0.94	24	3.44
10	7.43	25	3.37	10	7.44	25	16.14	10	4.36	25	0.86
11	2.63	26	7.35	11	3.87	26	5.68	11	1.06	26	1.90
12	1.29	27	3.09	12	7.70	27	0.17	12	0.75	27	2.11
13	2.82	28	15.67	13	1.10	28	4.82	13	2.66	28	1.54
14	2.21	29	4.29	14	3.10	29	8.85	14	1.18	29	1.23
15	1.78	30	3.46	15	4.08	30	10.51	15	1.76	30	2.64

Fig. 9. Normal distribution of the point load strength index (I_s).Table 5. $I_{s(50)}$ of sewage sludge solid refuse fuel

Plant A				Plant B				Plant C			
No.	$I_{s(50)}$ [MPa]	No.	$I_{s(50)}$ [MPa]	No.	$I_{s(50)}$ [MPa]	No.	$I_{s(50)}$ [MPa]	No.	$I_{s(50)}$ [MPa]	No.	$I_{s(50)}$ [MPa]
1	0.49	16	1.79	1	0.55	16	1.30	1	0.23	16	0.40
2	0.79	17	0.63	2	0.89	17	1.48	2	0.51	17	1.84
3	0.41	18	1.07	3	1.24	18	2.48	3	0.36	18	0.33
4	0.13	19	1.47	4	0.58	19	1.20	4	0.32	19	0.31
5	0.24	20	1.63	5	2.01	20	0.84	5	0.15	20	0.59
6	0.38	21	1.19	6	1.02	21	1.22	6	0.18	21	0.46
7	1.86	22	1.00	7	2.36	22	1.90	7	0.40	22	0.34
8	0.83	23	1.94	8	1.11	23	3.58	8	1.14	23	0.16
9	1.13	24	1.03	9	1.90	24	0.72	9	0.27	24	0.92
10	2.02	25	0.96	10	2.10	25	3.74	10	1.13	25	0.25
11	0.81	26	2.08	11	1.06	26	1.54	11	0.29	26	0.56
12	0.38	27	0.92	12	2.01	27	0.04	12	0.21	27	0.53
13	0.96	28	3.59	13	0.30	28	1.33	13	0.70	28	0.42
14	0.70	29	1.30	14	0.85	29	2.18	14	0.32	29	0.33
15	0.54	30	0.94	15	1.07	30	2.60	15	0.48	30	0.65

Fig. 10. Normal distribution of $I_{s(50)}$.

식 (2)를 사용하여 계산된 보정점하중강도지수는 Table 5와 같으며, 정규분포 형태는 Fig. 10과 같다.

A 하수처리장의 하수슬러지 유기성 고형연료의 최대 및

최소 보정점하중강도지수는 3.59 MPa와 0.13 MPa 이었으며, 평균은 1.11 MPa, 표준 편차는 0.71 MPa로 계산되었다. B 하수처리장의 하수슬러지 유기성 고형연료의 최대 및 최소 보정점하중강도지수는 3.74 MPa와 0.04 MPa 이었으며, 평균은 1.51 MPa, 표준 편차는 0.87 MPa 이었다. C 하수처리장의 보정점하중강도지수는 최대 1.84 MPa, 최소 0.15 MPa와 평균 0.49 MPa, 표준 편차 0.36 MPa로 계산되었다.

A, B, C 하수처리장 중 최대 보정점하중강도지수는 3.74 MPa, 최소 보정점하중강도지수는 0.04 MPa로 계산되었다. 또한, 세 하수처리장 전체의 평균 보정점하중강도지수는 1.04 MPa, 표준 편차는 0.80 MPa로 계산되었다.

3.3. 하수슬러지 유기성 고형연료 점하중강도를 활용한 일축압축강도 추정

식 (3)을 적용하여 하수슬러지 유기성 고형연료의 일축압

Table 6. Uniaxial compressive strength of sewage sludge solid refuse fuel

Plant A				Plant B				Plant C			
No.	q_u [MPa]	No.	q_u [MPa]	No.	q_u [MPa]	No.	q_u [MPa]	No.	q_u [MPa]	No.	q_u [MPa]
1	11,67	16	42,95	1	13,22	16	31,12	1	5,52	16	9,63
2	19,05	17	15,01	2	21,33	17	35,62	2	12,22	17	44,20
3	9,73	18	25,64	3	29,78	18	59,48	3	8,65	18	8,03
4	3,05	19	35,19	4	14,01	19	28,76	4	7,72	19	7,52
5	5,79	20	39,22	5	48,28	20	20,12	5	3,67	20	14,15
6	9,07	21	28,59	6	24,37	21	29,31	6	4,36	21	11,03
7	44,62	22	24,11	7	56,54	22	45,69	7	9,57	22	8,26
8	19,81	23	46,67	8	26,54	23	85,97	8	27,34	23	3,89
9	27,14	24	24,63	9	45,49	24	17,27	9	6,57	24	22,16
10	48,53	25	22,95	10	50,43	25	89,78	10	27,20	25	6,12
11	19,36	26	49,99	11	25,47	26	36,89	11	7,02	26	13,41
12	9,19	27	21,98	12	48,26	27	1,08	12	5,08	27	12,78
13	22,99	28	86,10	13	7,30	28	31,90	13	16,92	28	10,14
14	16,73	29	31,23	14	20,34	29	52,29	14	7,63	29	8,01
15	13,05	30	22,64	15	25,69	30	62,49	15	11,45	30	15,48

Fig. 11. Normal Distribution of uniaxial compressive strength.

축강도를 계산하였으며, 계산된 일축압축강도는 Table 6과 같으며, 일축압축강도의 정규분포는 Fig. 11과 같다.

일축압축강도(q_u)는 점하중강도($Is_{(50)}$)에 24배를 증가한 값이므로 전체적인 양상은 비슷하다. 각 하수처리장에서 제조된 하수슬러지 유기성 고형연료의 일축압축강도는 A 하수처리장 최대 86.10 MPa, 최소 3.05 MPa, 평균 26.56 MPa를 나타내었으며 표준편차는 17.19 MPa로 계산되었다. B 하수처리장 최대 89.78 MPa, 최소 1.08 MPa, 평균 36.16 MPa를 나타내었으며, 표준편차는 20.97 MPa로 계산되었다. C 하수처리장 최대 44.20 MPa, 최소 3.67 MPa, 평균 11.86 MPa, 표준편차는 8.62 MPa로 계산되었다. A, B, C 하수처리장에서 제조된 하수슬러지 유기성 고형연료의 최대 일축압축강도는 89.78 MPa, 최소 일축압축강도는 1.08 MPa로 나타났으며, 이는 음식물폐비를 활용하여 제작된 펠렛화된 고형연료의 압축강도 시험을 통하여 얻은 최대 압축강도 9.2 MPa¹¹⁾ 약 10배의 최대 일축압축강도를 가지는 것으로 관찰되었다. A, B, C 각 하수처리장 기준 일축압축강도 최대값과 최소값의 차이는 B 하수처리장의 하수슬러지 유기성 고형연료가 88.71 MPa로 가장 컸으며, C 하수처리장이 40.54 MPa로 가장 작았다.

A, B, C 하수처리장에서 제조된 하수슬러지 유기성 고형연료 전체의 일축압축강도(q_u)의 평균은 24.86 MPa이었으며, 표준편차는 19.10 MPa로 계산되었다.

A, B, C 하수처리장에서 제조된 하수슬러지 유기성 고형연료의 점하중강도 시험을 통하여 추정한 일축압축강도 전체 최대값과 최소값의 차이는 88.7 MPa로 차이가 큰 것으로 나타났으며, 표준편차 역시 19.10 MPa로 평균을 중심으로 넓게 퍼져 있는 것으로 확인되었다.

3.4. 하수슬러지 유기성 고형연료 점하중강도 시험 후 파단면 관측

A, B, C 하수처리장에서 제조된 하수슬러지 유기성 고형연료의 점하중강도 시험 후, 점하중강도 및 일축압축강도에서 시험편마다 큰 차이를 가지는 원인을 분석하고자 높은 점하중강도를 가지는 하수슬러지 유기성 고형연료와 낮은 점하중강도를 가지는 하수슬러지의 파단면을 디지털 카메라 및 SOMETECH사의 SV-35 비디오 현미경을 이용하여 5배, 40배 확대하여 파단면을 촬영하였다.

높은 점하중강도 및 일축압축강도를 가지는 하수슬러지 유기성 고형연료의 파단면을 Fig. 12에 나타내었으며, 낮은 점하중강도 및 일축압축강도를 가지는 하수슬러지 유기성 고형연료의 파단면을 Fig. 13에 나타내었다.

Fig. 12 및 Fig. 13의 하수슬러지 유기성 고형연료의 파단면을 비교하였을 때, Fig. 13의 낮은 점하중강도를 가지는 하수슬러지의 파단면에서 Fig. 12의 높은 점하중강도를 가지는 하수슬러지의 파단면에서 관찰되지 않은 불순물이 섞여 있는 것을 관찰할 수 있었다.

관찰된 불순물은 비닐종류 및 플라스틱의 일종으로 관찰되었으며, 이러한 불순물의 혼합이 하수슬러지 유기성 고

Fig. 12. Fracture of sewage sludge solid refuse fuel (High uni-axial compressive strength).

Fig. 13. Fracture of sewage sludge solid refuse fuel (Low uni-axial compressive strength).

형연료 제작에 있어 압축과정을 통한 유기물의 결합을 방해하고 그 결과 하수슬러지 유기성 고형연료의 강도를 저하시키는 것으로 판단되었다.

4. 결론

국내 하수처리장 3곳에서 제조된 하수슬러지 유기성 고형연료의 점하중강도 시험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 하수슬러지 유기성 고형연료의 점하중 시험 결과 최대 3.74 MPa, 최소 0.04 MPa의 크기가 보정된 점하중 강도 $Is_{(50)}$ 를 얻었으며, 평균 점하중강도 $Is_{(50)}$ 은 1.04 MPa이었다.
- 2) 하수슬러지 유기성 고형연료 점하중 시험 결과 값으로 일축압축강도를 추정할 수 있었으며, 최대 89.78 MPa, 최소 1.08 MPa와 평균 24.86 MPa의 일축압축강도를 가지는 것을 확인하였으며 이는 9.2 MPa의 압축강도를 가지는 음식물폐비 펠렛보다 약 10배 높은 일축압축강도 값이다.
- 3) 하수슬러지 유기성 고형연료의 일축압축강도 최대값과 최소값의 차이는 88.7 MPa이며, 일축압축강도 값이 어느 특정 범위에 집중되지 않고 다양하게 분포되어 있는 것으로 확인되었다.
- 4) 점하중강도 시험 후 하수슬러지 유기성 고형연료의 파단면을 관찰한 결과, 낮은 점하중강도를 가지는 하수슬러지 유기성 고형연료의 파단면에서는 유기물이 아닌 불순물(비닐, 플라스틱류)이 발견되었으며, 불순물로 인하여 유기물

의 압축결합력이 저하되어 점하중강도가 낮은 것으로 판단되었다.

5) 하수슬러지 유기성 고형연료의 점하중강도 시험을 통한 일축압축강도 계산결과, 낮은 강도를 가지는 하수슬러지 유기성 고형연료에는 불순물이 혼합되어 있는 것을 확인하였다. 이에 따라 하수슬러지 유기성 고형연료의 점하중강도 및 일축압축강도는 불순물이 혼합되지 않은 하수슬러지 유기성 고형연료에서 측정된 최대 점하중강도 및 일축압축강도를 활용하는 것이 적합한 것으로 판단되었다.

향후 하수슬러지 유기성 고형연료의 파쇄 및 분쇄를 위한 장비 설계 시 최대 일축압축강도 값에 안전율을 적용하여 활용하는 것이 바람직하겠다.

Acknowledgement

본 연구는 중소기업청 지원하의 2016 중소기업기술개발 지원사업_구매조건부기술개발사업(민관공동투자) 과제의 지원으로 수행되었습니다.

KSEE

References

1. Cho, I. H., Ko, I. B. and Kim, J. T., "Technology trend on the increase of biogas production and sludge reduction in wastewater treatment plants: sludge pre-treatment techniques," *Korean J. Chem. Eng.*, **52**(4), 413~424(2014)
2. Lee, C. Y., Chung, W. J. and Kim, J. T., "A Study on the Development Trends of Wastewater Sludge Treatment Technology," *J. Korean Geo-Environ. Soc.*, **17**(8), 5~15(2016).
3. Korea Ministry of Environment, "2015 Statistics of Sewerage," (2016).
4. Korea Ministry of Environment, "Sewer statistics," (2000-2014).
5. Kim, S. W. and Yoo, H. C., "Melting Characteristics of Bottom Ash and Fly Ash from Municipal Solid Waste Incineration," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **24**(5), 801~812 (2002).
6. Kim, S. B. and Lee, W. T., "Characterization of Fly Ash Produced from a Sewage Sludge Incineration Facility in Korea," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **38**(2), 96~99(2016).
7. Korea Ministry of Environment, "Enforcement Rule of the Law Concerning the Promotion of Saving and Recycling of Resources,"(2010).
8. Ahn, H. C. and Lee, Y. S., "A study on optimum conditions for molding sewage sludge," *J. Korra*, **23**(1), 29~37(2015).
9. Hwang, Y. S. and Cho, S. Y., "Process & Capabilities of the Bio-solid Fuel Production for Green Growth," *Daewoo Eng. Technical Note*, **25**(1), 39~46(2009).
10. Jeong, H. T., Yun, H. C., Choe, J. G., Seong, H. J., Yun, S. Y. and Kim, H. B., "Assessment of mixed firing Characteristics of Thermal Power Plants in Sewage Sludge Drying Fuel," *J. Korea Soc. Waste Manage. Conference*, **2013**(1), 147~147(2013).
11. Kim, T. K., Min, Y. B., Moon, S. D. and Kim, M. C., "Pelletizing Rerformance of Food Waste Compost by An Extrusion Process," *J. Biosystem Eng.*, **35**(5), 336~342(2010).
12. Editorial department, "Standard test method for point load strength of rock," *Tunnel and Underground Space*, **17**(2), 75~82(2007).
13. Broch, E. and Franklin, J. A., "The Point Load Strength Test," *Int. Jurnal Rock Mech. Min. Sci.*, **9**, 669~697(1972).