

건조방법 형태에 따른 우분 고체연료 수분 감소효과

정광화[†], 김종곤, 이동준, 조원모, B. Ravindran, 곽정훈

농촌진흥청 국립축산과학원

Effect of Drying Process on Cow Manure Solidified Fuel Applications

Kwang-Hwa Jeong[†], Jung Kon Kim, Dong-jun Lee, Won-Mo Cho,
B. Ravindran, Jung-Hoon Kwag

National Institute of Animal Science, RDA, Wanju-gun, Jeollabuk-do, South Korea

(Received: Nov. 24, 2016 / Revised: Dec. 14, 2016 / Accepted: Dec. 14, 2016)

ABSTRACT: The drying test was carried on the globular type cow manure pellet for use in solid fuel applications. The globular type cow manure pellet fuel was sorted according to size by rotatory sieves. The three kind of drying methods such as convection hot-air drying method, infrared ray drying method and superheated steam method were used to dry the globular type cow manure pellet. Among the three kind of drying methods, superheated steam method of dry time was the shortest. The apparent specific gravity and low calorific value of dried cow manure pellets was about 250~350 kg/m³ and above 3,000 kcal/kg respectively. The smaller the particle size of cow manure pellets, the less drying time was required. The time was required very less for drying smaller particle size cow manure pellet when compared to larger size. In the case of the same drying condition, it has been found that reducing the particle size of cow manure fuel pellet is an important factor for shortening the drying time of the livestock manure pellet.

Keywords: Cow manure, Drying effect, Moisture content, Solidified fuel

초 록: 우분을 원료로 하여 구 모양의 펠릿(Spherical pellet) 형태로 가공한 우분 고체연료에 대한 건조실험을 수행하였다. 제조한 구 형태의 우분 고체 연료를 선별기에 투입하여 각 크기별로 분리하였다. 건조방식으로는 대류형 열풍건조 방법과 적외선 조사 건조 방법, 그리고 과열증기 적용에 의한 건조방법을 적용하였다. 제조된 펠릿의 직경에 따라 5 mm, 10 mm, 20 mm 로 구분하여 각 입경별 우분 고체연료 가공품의 수분 감소효과를 분석하였다. 가공된 우분 펠릿의 건조에 소요된 시간은 대류형 열풍기 건조 > 적외선 건조 > 과열증기 건조 방법의 순이었다. 과열 증기 적용에 의한 건조방법의 경우 건조에 소요된 시간은 열풍과 적외선 방법에 비해 상대적으로 짧았다. 건조된 상태인 우분 펠릿의 겉보기 비중은 250~350 kg/m³ 수준이었으며, 건조된 우분 펠릿의 저위발열량은 가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률 시행규칙 별표 2에서 정한 가축분뇨 고체연료의 성분 등에 관한 기준에 규정된 3,000 kcal/kg 보다 높은 수준이었다. 우분 펠릿의 입자크기가 작을수록 모든 건조방법에서 건조에 필요한 시간이 짧게 소요되었다. 5 mm 크기의 우분 펠릿을 건조하였을 때 시료의 무게 변화가 1% 내외가 될 때까지 소요된 시간은 과열증기 적용 시 약 30분, 적외선 조사 시 약 108분, 대류형 열풍 적용 시

[†] Corresponding Author (e-mail: gwhaju@korea.kr)

약 120분이 소요되었다. 동일한 건조조건일 경우에는 펠릿 입자의 크기를 작게 하는 것이 가축 분 고체연료의 건조시간을 단축하는 중요한 요소인 것으로 판단된다.

주제어: 우분, 고체연료, 수분함량, 건조

1. 서론

국내 가축분뇨 발생량이 증가하는 추세인 반면에 경지면적은 지속적으로 감소하고 있으므로 가축분뇨 퇴비화, 액비화외에도 가축분뇨를 효율적으로 처리할 수 있는 방법의 개발이 필요하다¹⁰⁾. 이러한 노력의 일환으로 최근 들어 가축 분뇨 고체연료화에 대한 관심이 높아지고 있다. 소가 배설하는 우분은 총고형물 함량이 15~20% 내외에 이르고 이 고형물 중에서 휘발성 고형물이 차지하는 비율이 약 85~90% 내외에 달한다. 따라서 우분을 원료로 가공한 고체연료는 저위발열량이 3,000 kcal/kg을 초과한다. 특히 우리나라에서 소를 사육하는 방식은 축사바닥에 톱밥 등의 깔짚재를 약 5~10 cm 두께로 깔고 그 위에서 소를 사육하는 형태이므로 축사에서 배출되는 우분은 톱밥과 혼합된 상태가 된다. 통상적으로 깔짚으로 사용되는 톱밥은 우분과 같은 신선분뇨에 비해 분해되는 속도가 더 느린데 이는 톱밥 중에 함유된 리그닌이나 셀룰로오스 등과 같은 분해가 느린 물질 때문인 것으로 볼 수 있다. Pham 등¹³⁾은 젖소 분뇨의 고형물중 13% 내외가 리그닌이라고 하였으며 김낙주 등⁸⁾은 폐 목재류는 리그노셀룰로오스 (cellulose, hemicellulose, lignin)로 구성되어 있으며 이 중 난분해성으로 알려진 리그닌은 수분 및 미생물 분해에 대한 저항성이 상당히 높아 완전한 분해가 진행되지 않는다고 보고하였다. 본 실험에서 분석한 톱밥혼합 우분의 탄소함량은 48.4~48.7% 수준으로서 축사에서 배출된 우분은 고체연료로서 이용할 수 있는 가치를 가진다. 가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률 시행규칙 별표4의 2 가축분뇨 고체연료의 성분 등에 관한 기준에 의하면 가축분뇨 고체연료의 수분을 20% 이하로 하여야 한다. 수분함량이 낮으면 고체 연료의 저장과 운송 그리고 취급이 편리하게 된다. 따라

서 가축분뇨 고체연료의 수분함량을 20% 수준까지 낮춰야 할 필요가 있다. Neyens, E 등¹²⁾에 따르면 원료를 건조하는 방식은 간접 가열방식인 전도건조 (conduction drying)와 직접 가열방식인 대류건조 (convection drying)로 대별되어진다고 하였다. 건조의 사전적 의미는 물기나 습기를 말려서 없앤다는 것이다. 전원표 등⁶⁾은 건조는 연료, 열풍, 스팀, 전기 및 전자파 등의 직접 또는 간접적인 에너지를 투입하여 피 건조물에 함유된 수분이나 용제 등을 제거하는 단위조작이라고 하였다.

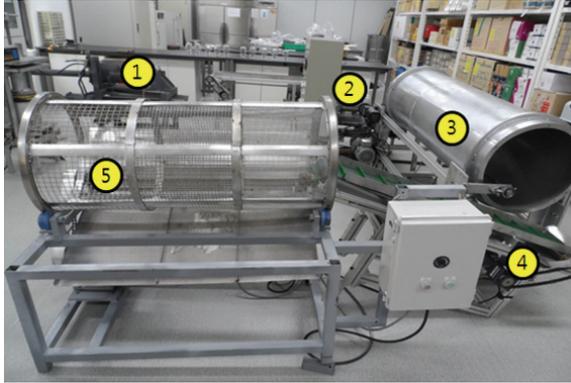
본 연구에서는 우분을 5~20 mm 내외의 크기를 가진 구 형태의 펠릿형 고체연료로 가공한 후 열풍과 적외선 그리고 과열증기를 적용하였을 경우의 건조효과를 분석하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구에서는 우분을 원료로 하여 직경 5 mm, 10 mm 그리고 20 mm 크기의 구 모양으로 가공한 펠릿을 건조하는 실험을 수행하였다. 건조실험은 열풍과 적외선 그리고 과열증기를 적용한 건조방식을 적용하였다.

2.1 우분 펠릿 가공

우사에서 수거한 분뇨를 유압 프레스형 탈수장치로 압착 탈수한 다음 스크류형 균질기로 분쇄, 혼합 후 균질화를 하였다. 균질화된 우분을 직경 550 mm, 길이 1,500 mm의 회전 원통형 가공장치를 이용하여 구 형태의 펠릿으로 가공한 후 선별장치에 유입시켜 5 mm, 10 mm, 20 mm 크기로 선별, 분리하였다. 본 실험을 위해 제작한 우분 펠릿화 장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같다.



1. Dewatering device 2. Homogenizer 3. Pelletizer
4. Conveyer 5. Separator

Fig. 1. Schematic diagram of experimental pelletizing system

2.2 건조 실험

가공된 우분 펠릿을 건조하는 실험을 수행하기 위하여 열풍건조기, 적외선 건조기, 과열증기 건조기를 사용하였다. 건조실험은 펠릿화된 우분 시료를 건조용 시료용기에 2 cm 두께로 채운 뒤 회분식으로 건조 실험을 실시하였다. 각 건조장치에서 시료에 적용되는 건조온도는 180 °C로 조절하였다. 건조시간은 직경 5 mm의 펠릿을 기준으로 하여 무게 변화가 1% 이내로 되는 시점까지로 하였다. 본 실험에서 사용한 건조장치의 형태를 Fig. 2에 나타내었다.

열풍 건조장치는 실험실용 대류형 열풍건조기를 사용하였으며 온도는 180 °C로 설정하고 편평한 시료 용기에 우분 펠릿을 담아서 건조실험을 실시하였다. 적외선 건조는 파장 3~5 μm의 증적외선이 방출되는 램프를 시료의 양측 상단에 설치하여 시료에 열을 가하였다. 건조가 진행되는 동안의 시료의

무게변화는 건조 장치에 설치한 로드 셀을 이용하여 1 분 단위로 측정하였다. 과열 증기는 시료 용기에 우분 펠릿을 담아 가열 공간 내에 넣고 회분식으로 건조하는 방식을 적용하였다. 과열증기는 시료상단에서 노즐에 의해 분사하였다.

본 실험을 수행하는 과정에서 발생한 모든 시료의 분석은 AOAC(Official Methods of Analysis) 방법과 APHA(Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater) 시험법에 준하여 실시하였다^{2,3)}.

3. 결과 및 고찰

가축분 고체연료를 제조하는 주요공정은 성형과 건조공정으로 대별할 수 있다. 제조된 고체연료는 연소가 쉽도록 하여야 환경적, 열역학적으로 유리하다. 고체연료의 착화는 표면에서부터 진행되므로 고체연료의 입자 크기를 작게 하면 연료표면적이 증가함으로써 연료의 온도가 빨리 상승하게 되어 연소에 도움이 된다. Table 1은 고체연료의 직경과 표면적의 상관관계를 나타낸 것이다. 구 모양의 물체일 경우 직경이 작아질수록 표면적이 넓어진다.

제조된 고체연료는 연소용 원료로 사용되어야 하므로 착화가 쉽고 연소가 지속적으로 이루어져야 한다. 연소로에 투입된 고체연료는 연소로 내의 고온에 의해 온도가 상승하여 발화온도에 도달하면 착화가 되므로 열전달이 잘되도록 하는 것이 중요하다. 고체연료의 직경을 작게 할수록 표면적이 넓어지므로 고체연료의 물리-화학적 특성을 고려하여 연료크기를 조절하는 것이 필요하다.

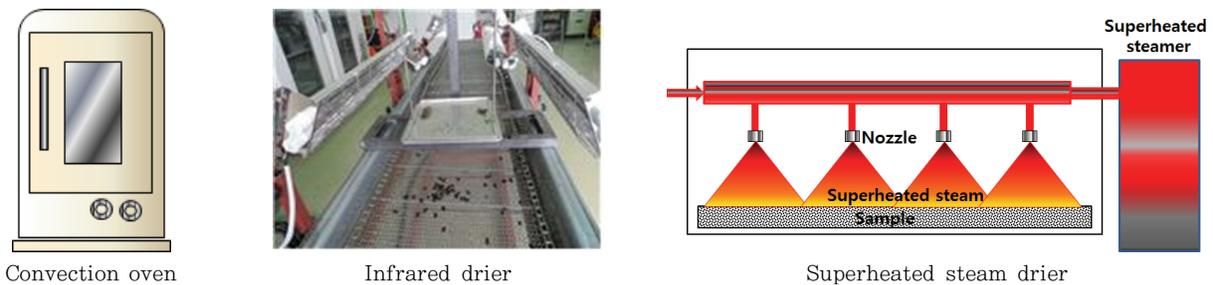


Fig. 2. Schematic diagram of experimental drying apparatus

Table 1. Surface area ratio compared to volume of spherical solid fuel according to diameter

Diameter (mm)	Volume (cm ³)	Surface area (cm ²)	Surface area / Volume (%)
3	1.41	2.83	199.95
6	11.30	11.30	100.00
12	90.44	45.21	49.98

3.1 우분 고체연료 가공효과

본 실험을 위해 제작, 적용한 회전 원통형 가공방식은 아직까지 국내에서 가축 분 고체연료 가공방법으로서 적용된 사례가 없는 기술이다. 가공원리는 회전하는 원통 내에 균질화 된 가축 분을 투입하면 투입된 가축 분이 원통 내부 표면을 구르는 과정에서 구 형태로 가공되는 방식이다. 이 방식은 기존의 압출형 펠릿가공 방법과는 달리 가축 분의 수분이 70% 내외일 경우 가공이 원활하게 이루어지는 방식이다. 그러므로 축사에서 배출된 축분을 직접 펠릿으로 가공함으로써 가축 분 적체 등으로 인한 문제를 해소할 수 있을 것으로 판단된다. 이 방식은 가공된 고체연료의 입자크기가 고르지 않고 입자크기가 큰 덩어리가 형성되는 문제가 있다. 본 실험에서는 이 문제를 해소하는 방안으로서 원통 내부에 파쇄 장치를 장착하였다. Fig. 3은 파쇄장치를 설치함에 따른 가축분뇨 펠릿 가공품의 입자 분포

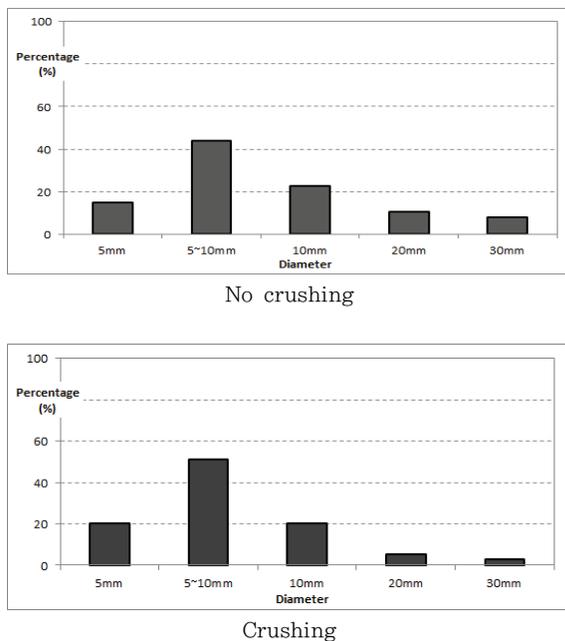


Fig. 3. Difference of size of products by installation crushing device

변화 정도를 나타낸 것이다.

본 실험에서 파쇄장치를 장착하여 가동한 결과 직경 5 mm~20 mm 크기를 가진 고체연료의 비율이 높아지는 결과를 보였다. 최진환 등⁴⁾은 고체연료의 입자의 크기가 작을수록 빠르게 가열되기 때문에 연소속도가 증가하고 초기 투입 시 탈 휘발 속도도 빠르다고 함으로써 고체연료의 입자크기를 줄일 필요가 있다고 하였다.

Table 2는 가공된 축분 고체연료의 수분을 20% 수준으로 맞춘 상태의 우분 고체연료의 저위발열량을 나타낸 것이다.

가공된 우분 고체연료 수분함량 수준을 가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률 시행규칙 별표 2에서 정한 가축분뇨 고체연료의 성분 등에 관한 기준에서 규정하고 있는 수분 수준인 20%로 조절하여 저위 발열량을 분석한 결과 우분의 경우 3,800 kcal/kg 수준으로 분석되었다. 우분은 섬유소가 함유되어 있고 유기물 중의 탄소함량이 40%를 초과하며 3,000 kcal/kg 수준의 발열량을 가지므로 우분 펠릿의 에너지화 가능성이 있는 것으로 평가할 수 있다. Siddique 등¹⁴⁾은 젖소분뇨(TS 14.5% 수준)의 C/N 비가 22.5 인 것으로 보고하였고 Alkaya 등¹⁾은 젖소 생분뇨(TS 16%)의 C/N 비를 16으로 보고 함으로써 우분이 함유하고 있는 탄소의 함량을 제시하였다.

3.2 우분 고체연료 건조효과

소는 볏짚이나 풀 사료 등 섬유소 함량이 높은 사료를 섭취하기 때문에 배설된 우분의 펠릿화 가공이 상대적으로 용이하고 발열량도 저위발열량 기준으로 3,000 kcal/kg 이상이 되므로 고체연료로서의 가치가 있는 것으로 나타났다. 그러나 가공품을 고체연료로 이용하기 위해서는 가축 분뇨 고체연료 품질기준에 따라 가공품의 수분함량을 20% 미만까

Table 2. Change of Lower heating value of livestock manure by solidified fuel process

Item	Calorific value (kcal/kg)
Cow manure	3,800
Compressed cow manure	3,957
Compressed cow manure + sawdust	3,585
Cow manure solidified fuel (> 10mm)	3,845
Cow manure solidified fuel (5~10mm)	3,883
Cow manure solidified fuel (< 5mm)	3,769

지 건조시켜야 한다. 가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률 시행규칙 별표 2에서 정한 가축분뇨 고체연료의 성분 등에 관한 기준은 Table. 3과 같다.

가축분뇨 고체 연료화 산업에 있어 펠릿 가공기술 못지않게 중요한 기술이 건조기술이다. 따라서 본 연구에서는 세 가지 입경으로 제조한 우분펠릿에 대해 열풍 건조, 적외선 건조 그리고 과열증기 건조방식을 각각 적용하였을 경우의 건조효과를 분석하였다.

3.2.1 열풍 적용에 의한 건조 효과

가축분뇨를 고체 연료화 함에 있어 적용할 수 있는 건조 방식은 가공 전 건조와 가공 후 건조 방식으로 구분할 수 있다. 본 실험에서 우분을 이용하여 제조한 고체연료의 가공 후 건조특성을 분석하였다. 가축분뇨의 관리 및 이용에 관한 법률 시행규칙 별4의 2에 규정된 가축분뇨 고체연료 성분 등에 관

한 기준에 따르면 가축분뇨 고체연료의 수분함량을 20% 이하로 건조해야 하는데 일반적으로 축사에서 배출되는 가축분뇨는 수분함량이 80% 내외에 이르는 경우가 흔하다. 따라서 가축분뇨 고체연료화 측면에서 건조는 고체연료화 과정에서의 경제성과 가공효율에 큰 영향을 미치는 요소가 되며 또한 가공된 가축분뇨 고체연료의 취급과 사용 편의성에도 영향을 주는 요인이 된다. Fig. 4는 열풍건조 방식 적용에 따른 우분 고체연료의 시간대 별 수분 변화 정도를 나타낸 것이다.

열풍건조에 따른 우분 고체연료의 중량변화를 분석한 결과, 우분 고체연료의 입자 크기와 건조에 소요되는 시간은 반비례하는 현상을 나타냈으며 입자 크기가 작을수록 초기 중량감소가 큰 것으로 나타났다. 엄태규 등⁵⁾은 고체입자 지름이 작을 경우, 쉽게 유동화 되고 열전달 계수 및 표면적 증가로 인해

Table 3. Quality standards for livestock manure solidified fuel

Items	Standard
Lower heating value	Over 3,000 kcal/kg (Pure livestock manure solidified fuel) ※ Over 2,000 kcal/kg {Livestock manure solidified fuel made from livestock manure consumed energy by some treatment process(eg, Anaerobic digestion)}
Characteristics of solidified livestock manure fuel	- Water content : < 20% - Ash content : < 30%(DM basis) - Sulfur content : < 2%(DM basis) ※ If the livestock manure solidified fuel is used as a fuel for power plant, the ash content of the fuel exceeded by 30% is permitted - Length : < 40mm (If the livestock manure solidified fuel is cylindrical shape, the diameter must be less than 40mm)
Heavy metal	- Hg : ≤ 1,20 mg/kg - Cd : ≤ 9,0 mg/kg - Pb : ≤ 200,0 mg/kg - Cr : ≤ 70,0 mg/kg
Analyzing condition	Ash, Sulfur and Heavy metal analysis should be done at DM basis
Shape of fuel	Allowed only pellet shape

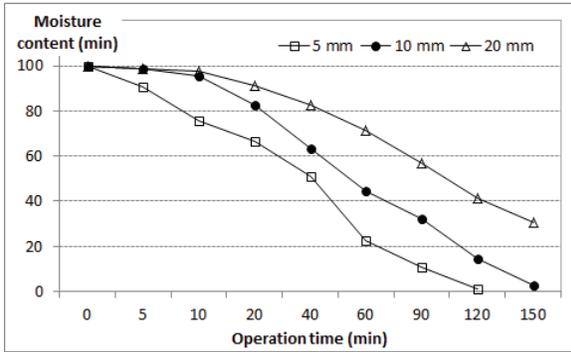


Fig. 4. Changes of moisture content cow manure pellet by application of convection hot-air drying method

수분증발 및 열전달이 증진될 것이고 반대로 고체 입자 지름이 큰 경우, 상대적으로 유동화가 힘들고 수분증발 및 열전달효과 역시 감소할 것이라고 보고하였는데 본 실험 결과에서도 이와 유사한 결과를 보였다. 열풍건조에 따라 우분 고체연료의 겉보기 밀도가 변화하였다. Fig. 5는 우분 고체연료의 겉보기 밀도 변화를 나타낸 것이다.

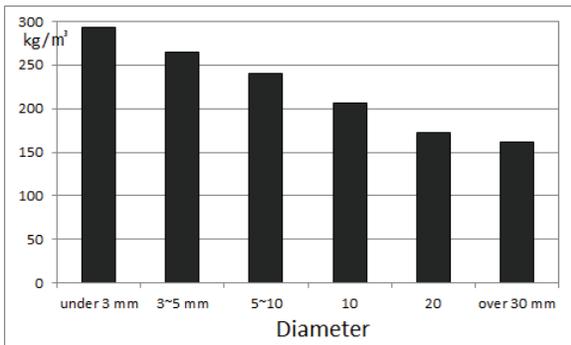


Fig. 5. Apparent density of solidified fuel made of cow manure

가공 후에 수분함량 20% 수준으로 건조된 우분 고체연료의 직경에 따른 겉보기 밀도를 측정하 결과 고체연료의 입자 직경이 작아지면 겉보기 비중이 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과는 가공된 우분 고체연료의 입자가 작을수록 입자 간의 빈 공간이 줄어들기 때문에 겉보기 밀도가 증가하는 것으로 판단된다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 본 실험에 공시된 5, 10, 20 mm 직경의 우분 고체연료 외의 3 mm 이하와 30 mm 이상의 직경을 가진 고체연료에서도 동일한 결과를 보였다.

3.2.2 적외선 조사에 의한 건조 효과

적외선을 조사하였을 때 조사시간에 따른 건조효과를 분석하기 위하여 5 mm와 10 mm 직경의 우분 고체연료에 180 °C의 적외선 열이 도달하도록 하였다. 우분 고체연료 건조실험을 위하여 적외선 발열 램프를 작동한 다음에 시간의 경과에 따른 수분이 감소하는 정도를 측정하였다. Fig. 6은 적외선 조사에 따른 우분 고체연료의 수분함량 변화결과를 나타낸 것이다.

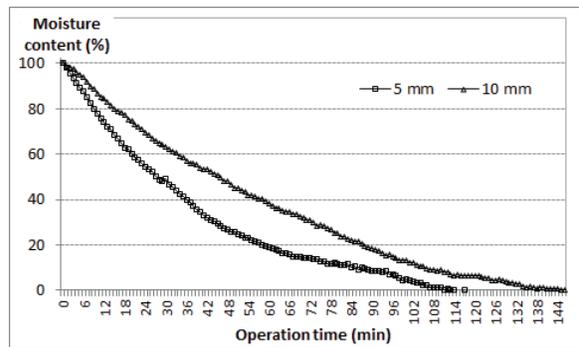


Fig. 6. Changes of moisture content cow manure pellet by application of infrared ray drying method

적외선을 조사한 결과 입자 크기 5 mm의 우분 고체연료 가공품이 직경 10 mm 인 가공품에 비해 수분 감소속도가 20% 정도 단축되는 결과를 보였다. 이는 앞서 수록한 열풍건조 실험결과에서 나타난 입자직경이 작을수록 건조시간이 단축되는 결과와 유사한 경향을 나타낸 것이다.

3.2.3 과열증기 적용에 의한 건조 효과

우분 고체연료 가공품을 대상으로 하여 과열증기 건조방식을 적용하였다. 김남찬 등⁷⁾은 과열증기는 포화온도 이상으로 가열된 증기를 말하며 복사열에 의한 직접적인 열전달이 이루어지기 때문에 일반 hot steam에 비하여 우수한 열전달과 열량을 가지게 된다고 과열증기의 가능성을 평가한 바 있다. Mujumdar¹¹⁾는 열풍 건조 과정에서 4,000~5,000 kJ/kg의 에너지가 소비되지만 증기열 공정을 이용함으로써 1,000~1,500 kJ/kg 정도의 에너지를 절약할 수 있다고 발표하였다. 과열 증기를 적용하여 각각 다른 입경의 우분 펠릿을 시간대별로 건조하

였을 때의 수분변화는 Fig. 7에 나타난 바와 같다.

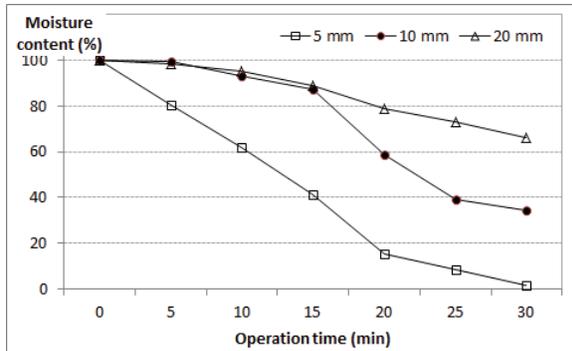


Fig. 7. Changes of moisture content cow manure pellet by application of superheated steam method

우분 펠릿의 입자크기별로 과열증기를 적용하였을 때 입자 크기가 작은 경우에 건조효과가 더 좋은 것으로 나타났다. 김옥신 등⁹⁾은 과열 증기 건조 방식은 대류를 이용한 직접 건조 방식으로서, 건조를 위한 열을 공급하고 증발된 수분을 운반하기 위한 건조 매체로 사용되던 기존의 열풍이나 연도 가스를 대신하여 과열 증기를 사용하여 피 건조물을 건조하는 방식이라고 하였고, 또한 과열 증기는 큰 열용량과 열전도도, 작은 비중 등의 독특한 물리적인 특성으로 인해 기존의 열풍 건조에 비해 건조 속도가 빠르고 건조 시간을 단축할 수 있기 때문에 건조기 용적을 줄일 수 있다고 하였는데 이는 본 실험에서 나타난 결과와 유사한 것으로 판단할 수 있다. 이상의 실험결과를 종합하면 제조된 우분 펠릿에 대해 과열증기 방식과 적외선 방식, 그리고 열풍건조 방식에 대한 건조 소요시간 실험결과 과열증기 방식이 가장 짧게 나타나 시간적인 면에서 가장 적합한 방법으로 나타났다. 우분펠릿을 건조하는 경우 펠릿의 입자크기가 작을수록 건조에 소요되는 시간이 단축되므로 입자크기를 작게 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결론

가축분뇨 고체연료화 과정상 중요공정이면서 에너지 소요 정도가 높은 건조공정의 효율적인 방안

을 설정하기 위한 목적으로 수행된 본 실험의 수행 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 건조된 상태인 우분 펠릿의 겉보기 밀도는 약 250~350 kg/m³ 수준이었으며, 건조된 우분 펠릿의 저위발열량은 3,000 kcal/kg 이상으로 높아 에너지 이용 가능성이 있는 것으로 평가되었다.

2) 제조된 우분 펠릿에 대해 과열증기 방식과 적외선 방식, 그리고 열풍건조 방식에 대한 건조 소요시간 실험결과 과열증기 방식이 가장 짧게 나타나 시간적인 면에서 가장 적합한 방법으로 판단되었다. 건조방법별 건조 소요시간은 과열증기 방식이 가장 짧게 소요되었고 이어서 적외선과 열풍건조 방법 순이었다.

3) 제조된 우분 펠릿을 건조하는 경우, 펠릿의 입자크기가 작을수록 건조에 소요되는 시간이 단축되므로 입자크기를 작게 하는 것이 건조효율 측면에서 바람직할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구과제인 가축분뇨 고품질 연료 열량증대 기술개발(PJ010948012016)과정에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Alkaya, E., Erguder, T.H. and Demirel, G.N., "Effect of operational parameters on anaerobic co-digestion of dairy cattle manure and agricultural residues: A case study for the Kahramanmaraş, region in Turkey", *Engineering in Life Sciences*, 10(6), 552-559. (2010).
2. AOAC., "Official Methods of Analysis", AOAC INTERNATIONAL, (2007).
3. APHA., "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21th Edition. (2005).
4. Choi, J. H., Park, Y. H., Choi, S. M., "Solid fuel combustion in a fluidized bed - Characteristics of a lab-scale combustor and experimental parameters",

- The Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 55–61. (2001).
5. Eom, T. K and Choi, S. M., “Performance Evaluation of a Flash Dryer and a Rotary Kiln Dryer for Upgrading Low Rank Coal”. *J. Korean Soc. Combust*, 20(2), pp. 1–13. (2015).
 6. Jeon, W. P., “Energy saving trend of Hot-air drying process” *Trend of energy saving technology*, 23, pp. 95–113. (2005).
 7. Kim, N. C., Physicochemical Characteristics of Food Waste Carbide Treated with Superheated Steam, *J. of the Korean Society for Environmental Analysis*, 12(4), pp. 228–232. (2009).
 8. Kim, N. J., “Assessment on the Degradability of Landfilled Waste Wood by Cellulose/Lignin Ratio” *J. of the Korean Society for Environmental Analysis*, 14(2), pp. 76–82. (2011).
 9. Kim, O. S., Lee, D. H., C. W. P., “Eco-Friendly Drying Technology using Superheated Steam”, *Korean Chem. Eng. Res.*, 46(2), pp. 258–273. (2008).
 10. Korean Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, “Yield of livestock manure in South Korea”, (2016).
 11. Mujumdar, A. S., in A. S. Mujumdar(Ed.), “Hand book of Industrial Drying”, Ch. 35, 2nd ed., Marcel Dekker, Inc., New York, NY (1995).
 12. Neyens, E. et al. J., “A Review of Thermal Sludge Pre-treatment Process to Improve Dewaterability”, *Journal of Hazardous Materials*, 98, pp. 51–67. (2003).
 13. Pham, C. H., Triolo, J. M., Cu, T. T. T., Pedersen, L. and Sommer, S.G., “Validation and recommendation of method to measure biogas production potential of animal manure”, *Asian Australas Journal of Animal Sciences*, 26(6), pp. 864–873. (2013).
 14. Siddique, Md. N. I., Munaim, M. S. A. and Zularisam, A. W., “Mesophilic and thermophilic biomethane production by co-digestion pretreated petrochemical wastewater with beef and cattle manure”, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(1), pp. 331–337. (2014).