

## 초본계 농업부산물 바이오매스의 저장방법 및 저장시기에 따른 이화학적 특성

유경단 · 나한별 · 안기홍<sup>†</sup> · 구본철 · 안종웅 · 문윤호 · 차영록 · 윤영미 · 양정우 · 최인후

농촌진흥청 국립식량과학원 바이오에너지작물센터

### Physiochemical Characteristics for Bale Types and Storage Periods of Agricultural By-products as a Lignocellulosic Biomass

Gyeong-Dan Yu, Han Beur Na, Gi Hong An<sup>†</sup>, Bon-Cheol Koo, Jong Woong Ahn, Youn-Ho Moon, Young-Lok Cha, Young Mi Yoon, Jungwoo Yang, and In-Hu Choi

Bioenergy Crop Research Center, National Institute of Crop Science, RDA, 199 Muan-ro, Cheonggye, Muan, 534-833, Korea

**ABSTRACT** One of the abundant biomass for bioenergy production is thought to be agricultural by-products produced annually. The purpose of this study were to provide basic information about the changes of the moisture contents and chemical compositions for storage periods and bale types of rice straw, and it was attempted for the first time. The bale types of rice straw which were harvest in October 2011, were the square bale, the round bale, and the wrapped round bale type with plastic, respectively. Each of bale were stored in house, outdoor, and rain sheltering facilities condition for 1 year. The moisture contents and chemical compositions for each bale type are investigated for the 3-storage stages (0, 6, 12 month). While the moisture contents of the square and round bales stored in house condition were ranged from 20 ~ 25%, the square bale stored under the rain shelter facilities was showed the lowest moisture content less than 20% during the storage periods. For the chemical compositions, the cellulose and hemicellulose contents of rice straw bale stored in outdoor condition were decreased with the storage periods. However, in house condition, the chemical compositions of the square and round bales were slightly increased at the middle and the end of storage stages (6 and 12 months) compared with the initial storage stage (0 month). In conclusion, while optimum and favorable storage conditions of agricultural by-products is a house storage of the bale with plastic, if the bale can stored at outdoor, water penetration prevention such as the rain shelter facilities is required.

**Keywords** : agricultural by-products, biomass, moisture content, rice straw, bale type

**에너지**의 대부분을 수입에 의존하는 우리나라에서는 국가 안보와 지속적인 경제성장을 유지하기 위해 에너지 수입 의존도를 최대한 감소시킬 수 있는 장기적인 에너지 수급정책의 수립과 근본적인 청정 대체 에너지 개발이 필수적이다(Kim *et al.*, 2009; Hwang *et al.*, 2010). 또한 향후 50 ~ 60년 이내에 화석연료의 고갈이 예상되고 있는 가운데, 전 세계적으로 에너지 자원을 확보하려는 경쟁이 심화되고 있다. 더 나아가 화석연료의 무분별한 사용으로 비롯된 지구 온난화를 극복하기 위해 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출량 등을 규정하려는 교토의정서의 발효로 온실가스 배출규제가 심화되고 있는 추세이다(An *et al.*, 2012; Moon *et al.*, 2010). 이처럼 화석연료의 고갈과 환경오염에 대한 우려를 해소할 수 있는 대체 에너지의 한 분야로 바이오매스의 이용방안에 대한 투자와 연구노력이 꾸준히 증가하고 있다.

바이오매스는 태양에너지를 이용하는 식물의 광합성에 의해 생성되는 식물체와 이를 먹이로 이용하여 살아가는 동물체를 포함한 생물 유기체 전체를 일컫으며 이들로부터 생성되는 농업 및 임업 부산물, 그리고 인간 또는 동물로부터의 배설물 등도 이에 포함할 수 있다(Demirbas, 2007; Hong, 2004). 이처럼 바이오매스는 현재의 화석연료를 유지하면서 재생산하여 이용 가능한 탄소 중립적 에너지 자원이라 할 수 있다(Bark *et al.*, 2012). 과거 미국과 브라질의

<sup>†</sup>Corresponding author: (Phone) +82-61-450-0135 (E-mail) [agiho@korea.kr](mailto:agiho@korea.kr)

<Received 24 July, 2013; Revised 11 August, 2013; Accepted 19 August, 2013>

경우, 옥수수과 사탕수수를 원료로 이용한 수송용 바이오에너지를 생산을 확대하였으나, 국제적인 식량의 가격 폭등과 제 3세계의 식량 부족현상 등의 식량 윤리문제를 야기하게 되었다(An *et al.*, 2012; Koonin, 2006). 또한 바이오매스를 인위적으로 대량 생산하기 위해서는 넓은 면적과 기상과 같은 자연조건의 제약을 받는다(Kim *et al.*, 2009). 이에 곡물 생산과의 경합을 피할 수 있으며, 국내의 좁은 국토면적 등의 제한적인 환경을 극복하여 바이오매스를 대량 확보하기 위하여 볏짚, 보릿짚 등과 같은 농업부산물 유래의 섬유질계 바이오매스의 활용에 대한 연구가 크게 대두되고 있다.

국내 농업유래 바이오매스 잠재 발생량은 연간 약 1,164만 톤으로 알려져 있다(Park *et al.*, 2011). 이를 잠재에너지 부존량인 석유환산톤으로 환산할 경우 460 만 TOE(1TOE = 1,000kcal)에 달하는 수치이다. 이 중에서 볏짚의 연간 생산량은 약 659.8만 톤이며 왕겨의 경우는 114.6만 톤으로 농업 유래 바이오매스 중 각각 56.7%와 9.8%로서 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 이처럼 농업 유래의 바이오매스에너지 부존량을 전량 이용한다면 우리나라 신재생에너지 공급목표의 19.4%를 충족할 수 있으리라 기대된다. 하지만 볏짚, 왕겨와 같은 농산 바이오매스 자원은 대부분이 가축의 사료나 축사 깔짚 등으로 이용되고 있으며(Kim *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2011), 일부는 관리되지 않고 방치되거나 태워지고 있는 실정이다. 이와 같이 가축사료 등으로 이용되는 부산물 이외에 매년 미수거 되거나 유기되는 농업부산물을 신재생에너지의 원료로 이용하는 것이 신재생에너지 공급목표의 달성에 크게 기여할 것으로 보여진다.

농업부산물 유래의 바이오매스는 일반적으로 높은 수분함량을 나타낸다. 바이오매스에 있어서 수분함량은 바이오에너지 원료의 질을 결정짓는 가장 중요한 특성 중의 하나이다. 높은 수분함량의 바이오매스는 원료 운송비 증가의 원인이며 저장기간 중 원료의 부패를 유발시킴과 동시에 고체 연료로 이용될 경우 연소 효율을 저하시킨다(Robson *et al.*, 2012). 또한 수송용 연료인 바이오에탄올을 생산하는데 있어서 바이오매스 cellulose의 결정화도를 낮춰 표면적과 공극을 넓히고 당화 및 발효의 저해요인인 lignin 등을 효과적으로 제거하기 위한 전처리 공정 시 바이오매스의 높은 수분함량은 용매의 희석효과를 유발시켜 전처리의 효율을 저하시킨다고 알려져 있다(Alizadeh *et al.*, 2005; Chung, 2008).

본 연구에서는 농업유래의 바이오매스 중 볏짚을 대상으로 저장형태와 저장기간에 따른 수분함량 변이 조사를 최초로 시도하였다. 또한 수분함량 변이에 따른 바이오매스의 화학적 성분(cellulose, hemicellulose, lignin) 변화를 분석함으로써 바이오에탄올 생산을 위한 원료의 최적 저장방법을

제시하고자 하였다.

## 재료 및 방법

본 시험은 전남 무안군 국립식량과학원 바이오에너지작물센터에서 수행하였다. 시험에 사용된 볏짚은 2011년 10월말에 벼 수확 후 노지에서 2일 동안 건조한 볏짚을 구입하여 사용하였다. 본 연구에 사용된 볏짚 곤포는 사각곤포(75 × 50 × 30 cm), 원형곤포(120 × 120 cm) 및 비닐원형곤포 세 종류였으며, 비닐원형곤포는 원형곤포에 비닐랩핑하여 사용하였다. 실내 보관은 비 또는 눈을 완전히 차단할 수 있는 장소를 선택하여 사각곤포, 원형곤포, 비닐원형곤포를 각각 4개씩 보관하였고, 실외 보관은 사각곤포, 원형곤포, 비닐원형곤포 및 비가림 사각곤포를 외부환경에 쉽게 노출되도록 각각 4개씩 보관하였다. 비가림 사각곤포는 사각곤포에 비닐을 덮어 외부 수분이 침투하지 않게 처리하여 다른 집속형태와의 수분함량 및 화학적 성분 변이의 차이를 보고자 하였다.

수분함량의 측정은 2012년 3월 27일부터 2013년 2월 25일까지 약 1년간 월마다 1 ~ 2회 측정하였다. 수분함량은 휴대용 건조 수분함량 측정기 HMM-1110(Dra mnski, Poland)를 사용하여 각 장소 및 집속형태별 5반복 측정하였으며, 수분함량의 측정 범위는 최하 10%에서 최대 80%까지의 범위로 측정하였다.

볶짚의 보관기간에 따른 화학적 성분 변이를 알아보기 위해 NREL/TP-510- 42618, 42622(Sluis *et al.*, 2008)에 따라 분석하여 볏짚의 cellulose, hemicellulose, lignin 함량을 정량하였다. 당 분석을 위해 사용된 샘플은 보관중인볶짚의 시료(0개월, 6개월, 12개월)를 채취하여 1차 건조 후 분쇄하였고 2차 건조를 통해 수분함량을 5%이하로 낮춘 후 분석에 이용하였다. 분쇄된 시료 0.3 g에 72%(w/w) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 3 ml을 넣어 30℃에서 1 h 동안 1차 산 가수분해 시킨 뒤 증류수 84 ml을 첨가하여 121℃ 고압멸균기에서 1 h 동안 2차 산 가수분해 하였다. 고액 혼합물을 도가니형 유리 필터(Iwaki glass, Thailand)로 흡인 여과하여 분리하였고, 여과액은 CaCO<sub>3</sub>로 중화하였다. 중화된 여과액을 13,000 rpm, 15 min간 원심분리한 후 0.2 μm HPLC용 필터(Advantec, Japan)로 여과하여 High Performance Liquid Chromatography(Waters, USA)로 glucose, xylose, arabinose를 정량하였다. 정량은 HPX-87H Ion Exclusion Column(BIO-RAD, USA)으로 65℃에서 물질을 분리하였다. 이때 사용한 이동상은 5 mM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>이며 유속은 0.5 ml/min 이었다. 검출기는 Refractive Index Detector(Waters RID 2414, USA)를 사용하여 40℃

에서 검출하였다. Cellulose 함량은  $\text{glucose} \times 0.9$ , hemicellulose 함량은  $(\text{xylose} + \text{arabinose}) \times 0.88$ 의 관계식에 의해 검출하였다(Zhu *et al.*, 2008). 리그닌 분석을 위해 위 과정 중 도가니형 유리 필터에 남은 산 불용성 고상분을 105°C에서 건조시킨 후 감량분을 측정하였고, 여과액 5 ml을 따로 분취하여 UV spectrophotometer(Biochrom Libra S22, UK)로 205 nm에서 흡광도를 측정하여 리그닌 함량을 정량하였다.

수분함량 및 화학적 성분분석 데이터는 5회 반복 측정하였으며, 얻어진 결과는 SAS 프로그램(Statistical Analysis System ver. 9.2, SAS Institute, USA)을 사용하여 통계 분석을 실시하였고, 분산분석에 의한 유의차가 인정된 처리의 처리평균간 차이의 유의성은 Duncan's multiple range test를 이용하여 검정하였다.

### 결과 및 고찰

본 연구에서 초본계 농업부산물 바이오매스의 저장 방법

을 제시하기 위해 2012년 3월 1일부터 2013년 5월 20일까지의 일 평균기온과 강수량을 조사하였고, 그 결과는 Fig. 1에 나타냈다. 본 연구의 수행 기간 동안 국립식량과학원 바이오에너지작물센터가 위치한 전남 무안군의 기온변화를 조사한 결과, 최고기온은 2012년 8월 3일에의 29.8°C를 나타내었으며 최저기온은 2013년 1월 3일에 -6.6°C를 나타내었다. 조사기간 동안의 일 평균기온은 12.4°C 이었다(Fig. 1(a)). 누적 강수량은 장마철인 8월에 455 mm를, 9월에는 219 mm를 나타내었으며 그 이후 조사 시기는 평균 약 4 mm의 강수량을 보였다(Fig 1(b)).

국내 대표적 농업부산물인 볏짚의 저장장소 및 집속별 수분함량 조사는 외부환경의 영향에 의한 오류를 최대한 줄이고자 비가 오고 난 뒤 약 2~3일간의 건조기간을 두어 실내 및 실외에서 동일하게 수분함량을 측정하였다. 볏짚의 저장장소 및 집속별로 수분함량을 측정한 결과, 실내보관(Fig. 2(a))의 볏짚 사각 및 원형콘포가 약 20% 내외의 비교적 낮은 수분함량을 유지하였으나 비닐원형콘포의 경우 초

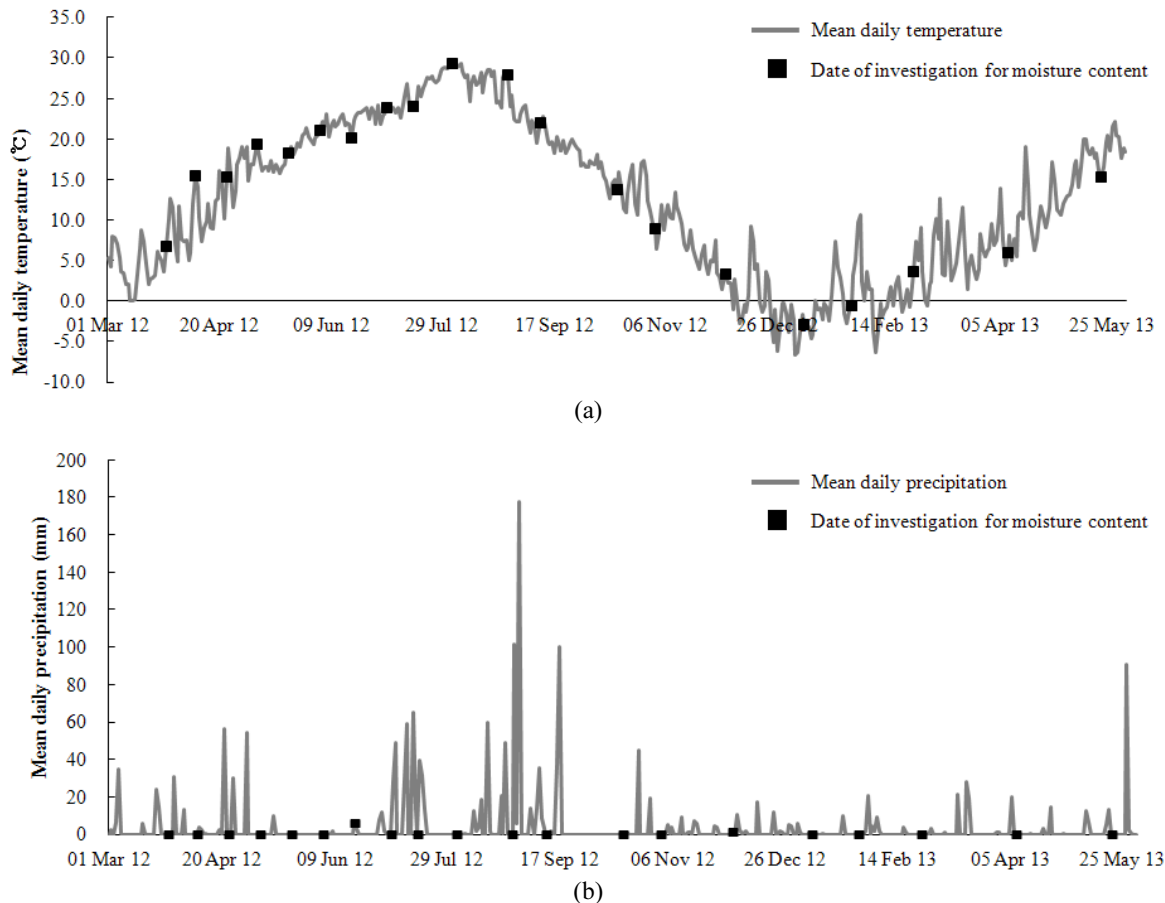


Fig. 1. Mean daily temperature (a) and precipitation (b) during the storage periods. Gray line and black squares indicate the mean daily temperature and precipitation, and the date of investigation for moisture content of rice straw bales.

기 측정부터 지속적인 수분함량의 상승을 보이다가 2012년 11월초에 측정하였을 때부터 수분함량이 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 비닐 내부의 부산물이 부패되며 발생하는 수분에 의해 수분함량이 지속적으로 증가하다가, 겨울철 낮은 온도에 의해 내부 수분이 냉각되면서 수분함량이

감소하는 것으로 추정된다.

실외에서 보관한 각 곤포(Fig. 2(b))는 외부환경의 영향을 많이 받았으며 측정 초기부터 꾸준한 수분함량의 상승을 보이다가 8~9월 장마철의 높은 강수량에 의해 수분함량 측정기의 최대치(80%) 이상의 수분함량을 유지하였다. 하지

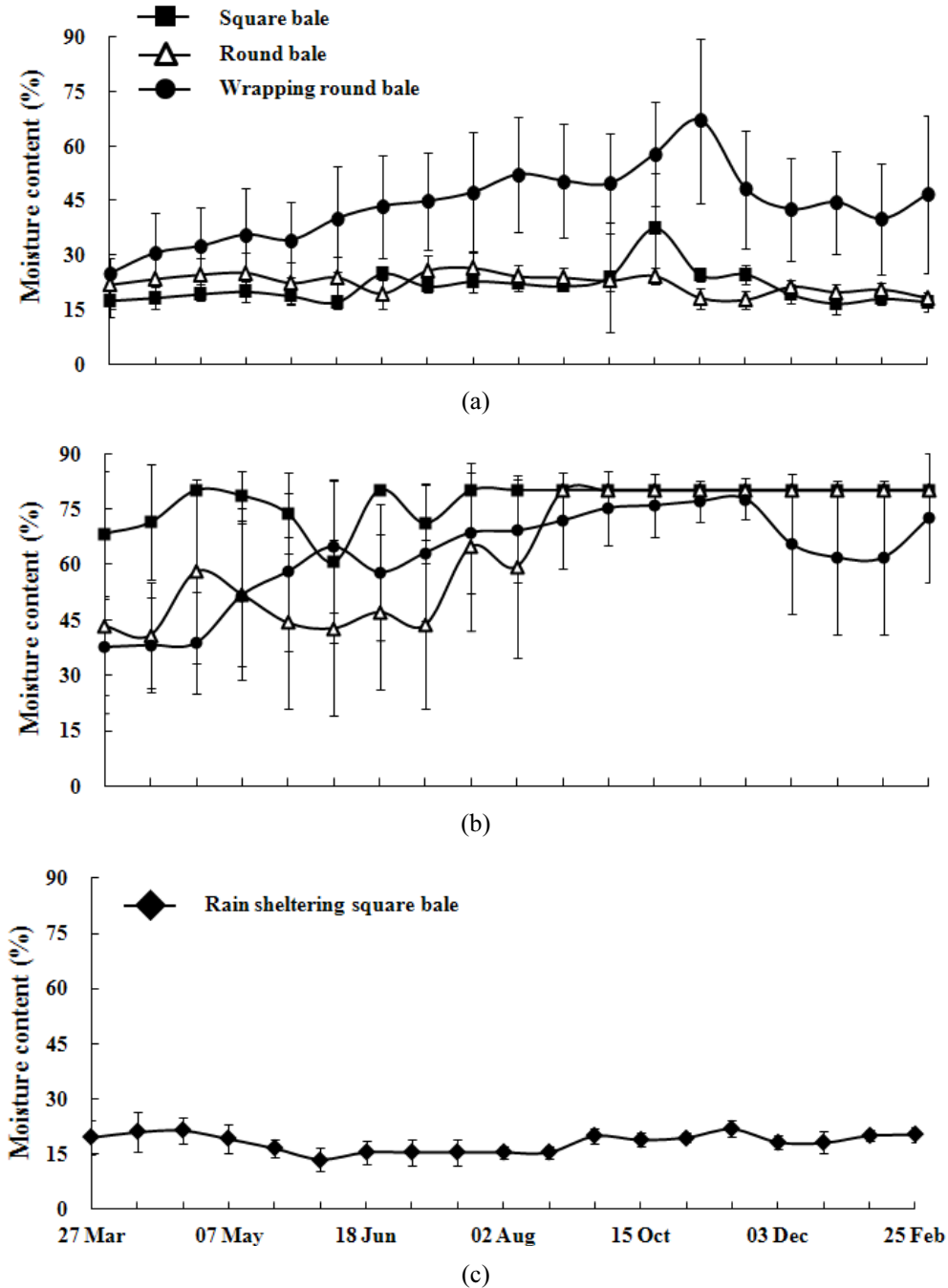


Fig. 2. Moisture contents of rice straw for the storage place (a, stored in house; b, stored in outdoor; c, stored under the rain shelter facilities). In each figure, closed squares, opened triangles, closed circles (a, b), and closed diamonds (c) indicate the square bale, the round bale, the wrapped round bale, and the rain sheltering square bale of rice straw, respectively.

만 실외에서 보관하더라도 수분을 차단해 주는 비가림 시설을 도입한 사각곤포의 경우(Fig. 2(c))는 20% 내외의 낮은 수분함량을 유지하였다.

실외에서 보관된 원형곤포의 경우 시간이 지남에 따라 내부에서부터 부패가 일어나 형태 유지가 어려워 무너져 내리는 현상을 관찰하였다(Fig. 3). 원형곤포는 비닐원형곤포와 같이 비닐로 감싸고 있지 않기 때문에 외부 환경 영향을 더욱 많이 받은 상태에서 보관되어 곤포를 감싸고 있는 네트 또한 끊어져 형태를 유지할 수 없어 무너져 내리는 것으로



(a)



(b)

**Fig. 3.** Changes for the outward form of the wrapped round bale (a) and round bale (b) stored in outdoor condition after 9 month.

판단된다. 이러한 결과로부터 곤포를 부득이하게 실외에서 보관할 경우 강우 시 수분이 내부로 침투되는 것을 막기 위한 비닐 등의 비가림 재료 또는 시설이 필요하리라 판단된다.

볏짚의 화학적 성분 변이를 분석한 결과 Table 1과 2에 나타내었다. 실내보관 볏짚의 화학 성분 분석결과(Table 1) 사각곤포의 경우 초기 분석 시 cellulose 함량이 32.3%이었고 12개월이 지난 후 분석한 결과 33.1%로, 약 0.8% 높아졌으며, hemicellulose는 14.1%에서 17.1%로 함량 변화를 나타내었다. 그러나 원형곤포의 경우 cellulose는 0개월에 분석 하였을 때 28.6%에서 6개월이 지난 후에 35.0%로 높아졌고 12개월이 지난 후에는 33.1%로 낮아졌으나, hemicellulose 경우는 13.8%에서 21.7%로 7.9%가 높아졌다. 비닐원형곤포에서 cellulose 함량 경우는 조사 초기(0개월) 분석 결과 34.7%에서 24.7%로 세가지 형태의 집속방법 중 가장 감소량이 많은 것으로 확인되었으며, hemicellulose 또한 23.7%에서 19.3%로 가장 많은 감소량을 보였다. 비닐 원형곤포의 경우 초기 측정 시점부터 수분함량이 지속적으로 상승하였으며 그로 인하여 내부 화학적 성분 또한 큰 폭으로 감소한 것으로 추정된다.

실외 보관 볏짚의 화학적 성분의 분석 결과(Table 2), 모든 집속형태에서 많은 성분의 감소를 확인하였다. 사각곤포에서 cellulose는 0개월에 분석 시 33.5%이었으나 12개월 후 분석한 결과 17.1%로 16.4%가 낮아졌으며 hemicellulose 또한 18.0%에서 13.0%로 낮아졌다. 원형곤포의 cellulose는 사각곤포에 비해 감소량은 적었으나 10.5%의 감소량을 보였으며, hemicellulose 또한 많은 감소량을 보였다. 실외 보관한 곤포 중 원형곤포, 비닐원형곤포는 사각곤포에 비해

**Table 1.** Chemical compositions of rice straw packed into three types of bale and stored indoor.

Bale types	Storage period	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)
Square bale	0 month	32.3a <sup>1</sup>	14.1c	17.7a
	6 month	33.2a	24.1a	19.7a
	12 month	33.1a	17.1b	17.2a
Round bale	0 month	28.6b	13.8b	19.9a
	6 month	35.0a	23.6a	23.5a
	12 month	33.1a	21.7a	20.2a
Wrapped round bale	0 month	34.7a	23.7a	17.6b
	6 month	25.5b	19.7a	27.1a
	12 month	24.7b	19.3b	26.8a

<sup>1</sup>Means with the same letter are not significantly different at 5% level

적 요

화학 성분의 감소량이 적었으며, lignin의 경우 cellulose 및 hemicellulose가 감소함에 따라 오히려 큰 폭으로 증가하는 것을 확인하였다.

실외 보관 중 비가림 시설을 도입한 사각곤포의 경우 cellulose, hemicellulose 및 lignin 모두 초기 측정에 비해 약 1 ~ 2%가량 증가하는 것을 확인하였다(Table 3).

본 연구결과, 바이오에탄올 원료로써 농업부산물 바이오매스는 저장방법 및 저장기간에 따라서 수분함량 변이가 컸으며 당 전환 성분인 cellulose 및 hemicellulose의 성분은 낮아지고 당화, 발효의 저해요인인 lignin 성분이 증가되는 등 바이오에탄올 생산 효율에 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 결론적으로 농업 유래의 바이오매스를 원료로 이용할 경우 그 저장방법이 매우 중요하며, 다양한 농업부산물의 저장방법에 대한 최적화 연구가 반드시 선행되어야 한다. 그럼으로써 안정적인 바이오매스 자원 확보 및 원료의 효율성 증대가 기대되며 최종적으로 섬유소 기반의 바이오에탄올 생산성 향상에 기여할 수 있다.

농업유래의 바이오매스 중 볏짚의 저장형태와 저장기간에 따른 수분함량 변화와 바이오매스의 화학적 성분 변화를 분석함으로써 바이오에탄올 생산을 위한 원료의 최적 저장 방법을 제시하고자 하였다. 주요 결과는 아래와 같다.

1. 볏짚의 수분함량 변이를 측정한 결과 실내에서 보관한 사각곤포 및 원형곤포는 약 20 ~ 25%의 수분함량을 유지하였으며 실외에서 보관한 비가림 시설을 도입한 사각곤포의 경우 20%이하의 낮은 수분함량을 확인하였다.
2. 볏짚의 화학적 성분의 변이를 분석한 결과 실외보관 곤포는 cellulose 및 hemicellulose의 함량이 큰 폭으로 감소하였으나, 실내에서 보관한 곤포들은 비닐원형곤포를 제외한 나머지 집속형태에서는 오히려 성분의 함량의 증가를 확인하였다.
3. 볏짚을 장기간 보관할 때에는 외부환경을 차단할 수 있는 실내에서 보관하거나 부득이하게 실외에서 보관할 때 최소 비가림 시설을 도입하여 수분함량 및 화학적 성분의 감소를 최소화해야 바이오에탄올 생산을 위한 고품질의 원료로써 이용될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(ATIS 과제번호: PJ009298)과 신재생에너지 융합원천기술 개발사업(과제번호: 20113010090040)의 지원으로 수행되었음.

인용문헌

Alizadeh, H., F. Teymouri, T. I. Gilbert, and B. E. Dale. 2005. Pretreatment of switchgrass by ammonia fiber explosion (AFEX). *Applied Biochem. Biotech.* 124 : 1133-1141.

An, G. H., B. C. Koo, Y. H. Choi, Y. H. Moon, Y. L. Cha, S. T. Bark, J. K. Kim, Y. M. Yoon, G. K. Park, and J. T. Kim. 2012. The effects of solidified sewage sludge as a soil cover material for cultivation of bioenergy crops in reclaimed land. *Korean J. Crop Sci.* 57(3) : 238-247.

Bark, S. T., B. C. Koo, Y. H. Moon, Y. L. Cha, Y. M. Yoon, J. K. Kim, G. H. An, K. G. Park, and D. H. Park. 2012. Study on the pretreatment of rice hull to enhance enzymatic saccharification efficiency. *Appl. Chem. Eng.* 23(4) : 399-404.

Chung, J. H. 2008. Cellulosic ethanol production. *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* 23(1) : 1-7.

**Table 2.** Chemical compositions of rice straw packed into three types of bale and stored outdoor.

Bale types	Storage period	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)
Square bale	0 month	33.5a <sup>1</sup>	18.0a	16.7b
	6 month	17.0b	12.6a	25.7a
	12 month	17.1b	13.0b	23.6a
Round bale	0 month	35.2a	22.2a	20.2b
	6 month	26.4b	17.0a	25.0a
	12 month	24.7b	19.3ab	26.8a
Wrapped round bale	0 month	35.6a	22.6a	18.2a
	6 month	24.8b	18.9b	23.7a
	12 month	24.5b	18.3b	23.7a

<sup>1</sup>Means with the same letter are not significantly different at 5% level.

**Table 3.** Chemical composition of rice straw packed into square bale and stored at rain shelter facilities.

Bale types	Storage period	Cellulose (%)	Hemicellulose (%)	Lignin (%)
Rain sheltering square bale	0 month	31.2a <sup>1</sup>	17.8a	16.6a
	6 month	31.2a	18.2a	18.2a
	12 month	33.9a	19.8a	17.2a

<sup>1</sup>Means with the same letter are not significantly different at 5% level.

- Demirbas, A. 2007. Progress and recent trends in biofuels. *Progress Energy Combustion Sci.* 33 : 1-18.
- Hong, S. G. 2004. Evaluation of agricultural biomass resources for renewable energy: Biomass from Orchards and non-paddy fields. *J. Korean Soc. Agric. Eng.* 46(3) : 85-92.
- Hwang, I. T., J. S. Hwang, H. K. Lim, and N. J. Park. 2010. Biorefinery based on weeds and agricultural residues. *Korean J. Weed Sci.* 30(4) : 340-360.
- Kim, Y. H., J. J. Nam, S. Y. Hong, E. Y. Choe, S. G. Hong, and K. H. So. 2009. Establishment of database and distribution maps for biomass resources. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(5) : 379-384.
- Koonin, S. E. 2006. Getting serious about biofuels? *Science* 311 : 435.
- Moon, Y. H., B. C. Koo, Y. H. Choi, S. H. Ahn, S. T. Bark, Y. L. Cha, G. H. An, J. K. Kim, and S. J. Suh. 2010. Development of "Miscanthus" the promising bioenergy crop. *Korean J. Weed Sci.* 30(4) : 330-339.
- Park, W. K., N. B. Park, J. D. Shin, S. G. Hong, and S. I. Kwon. 2011. Estimation of biomass resource conversion factor and potential production in agricultural sector. *Korean J. Environ. Agric.* 30(3) : 252-260.
- Robson, P., M. Mos, J. Clifton-Brown, and I. Donnison. 2012. Phenotypic variation in senescence in *Miscanthus*: Towards optimising biomass quality and quantity. *Bioenerg. Res.* 5 : 95-105.
- Sluiter, A., B. Hames, R. Ruiz, C. Scarlata, J. Sluiter, D. Templeton, and D. Crocker. 2008. Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. 4. National Renewable Energy Laboratory. Golden. CO.
- Zhu, L., J. P. O'Dwyer, V. S. Chang, C. B. Granda, and M. T. Holtzaple 2008. Structural features affecting biomass enzymatic digestibility. *Bioresour. Technol.* 99 : 3817-3828.