

쌀 분말이 함유된 생분해성 멀칭필름이 고구마 생육에 미치는 영향

박신영¹ · 임주현¹ · 고은별¹ · 김길자² · 박재민³ · 김동관^{2,†}

Effects of Biodegradable Mulching Films Containing Rice Powder on Sweetpotato Growth

Sin Young Park¹, Ju Hyun Im¹, Eun Byul Go¹, Kil Ja Kim², Jae Min Park³, and Dong Kwan Kim^{2,†}

ABSTRACT In this study, two types of biodegradable film prototypes were produced using plastic resin containing rice powder. The application of these biodegradable films in sweetpotato (*Ipomoea batatas* L. Lam) fields and their impacts of plant growth, yield, and the soil environment were assessed, in comparison with Polyethylene (PE) film. The light transmittance of the biodegradable film containing 30% of 350 mesh rice powder (BF30-350RP) was 0.8%, which was lower than the 2.0% light transmittance of the biodegradable film containing 40% of 500 mesh rice powder (BF40-500RP) and 2.7% light transmittance of PE film. Surface temperature measurements on clear day indicated that the PE film exhibited the lowest temperature, with the minimal difference observed between BF40-500RP and BF30-350RP. Assessment of the damage ratio resulting from agricultural work revealed a ranking of 0.4% for the PE film, 3.3% for BF500-400RP, and 5.3% for BF350-30RP. Visible decomposition of BF40-500RP and BF30-350RP commenced after 40 and 30 days of outdoor exposure, reaching 62.3% and 70.4% decomposition at 90 days post-exposure, respectively. The decomposition of biodegradable films applied to sweetpotato fields progressed more slowly in BF40-500RP than in BF30-350RP. The BF40-500RP film on the surface of the ridges was decomposed by 5%, 30%, 55%, and 90% after 30, 60, 90, and 120 days after planting sweetpotato cuttings, respectively. Both types of biodegradable films at the ridge and furrow borders were completely decomposed after 75 days of sweetpotato planting. In a field where the surface was sealed by mulching without growing sweetpotatoes, the soil moisture and its deviation were lower in the order of PE film, BF40-500RP, and BF30-350RP, but the differences were not significant. The soil temperature was higher for PE film mulching than for the biodegradable films containing rice powder, but the differences were small. Two months after sweetpotato planting, the daily average soil moisture decreased by 2.5%point for BF30-350RP mulching, 1.5%point for BF40-500RP mulching, and 1.1%point for PE film mulching over seven days. Soil temperature was similar for both biodegradable film mulches, but increased steadily for the PE film mulch, reaching a daily average of 0.1°C higher than for the biodegradable films. Sweetpotato vine growth and tuber yield were similar for all the mulching films tested.

Keywords : biodegradable, decomposition, film, mulch, rice, soil temperature and moisture, sweetpotato

메꽃과에 속하는 고구마(*Ipomoea batatas* L. Lam)는 알칼리성 식품으로 각종 비타민, 무기질, 단백질 및 양질의 식이섬유를 함유하고 있어 과거 구황작물에서 최근에는 건강 기능성 식품으로 인식되고 있다(RDA, 2018). 최근 30여

년 동안 고구마 재배면적은 1991년(17,313 ha) 이후 지속적으로 감소 추세를 유지하여 2001년(12,718 ha)에 가장 적었고 이후 꾸준히 증가하여 2007년부터는 18,000~23,000 ha를 유지하고 있다(KOSIS, 2024). 2022년에 ha당 고구마 소

¹전라남도농업기술원 식량작물연구소 농업연구사 (Research Scientist, Crop Research Division, Jeonnam Agricultural Research & Extension Services, Naju 58213, Korea)

²전라남도농업기술원 식량작물연구소 농업연구관 (Senior Research Scientist, Crop Research Division, Jeonnam Agricultural Research & Extension Services, Naju 58213, Korea)

³다원그룹(주) 대표이사 (CEO, Dawin Group Corporation, Pyeongtaek 17710, Korea)

[†]Corresponding author: Dong Kwan Kim; (Phone) +82-61-330-2520; (E-mail) kms1996@korea.kr

<Received 1 April, 2024; Revised 26 April, 2024; Accepted 29 April, 2024>

득은 13,416천 원으로 콩, 밀, 보리, 벼, 노지 풋옥수수, 감자 등 식량작물 중에서 가장 높다(KOSIS, 2024). 고구마 재배에 잡초관리, 토양수분관리 등을 위해 필름 멀칭은 필수이고 영농현장에서 멀칭작업은 기계화되었으나 수확 전 필름 수거작업은 고구마 지제부의 형태적 특성 때문에 대부분 인력에 의존하는데 ha당 33시간 소요되고 있다(Kim *et al.*, 2011).

2022년 영농폐비닐은 314,507톤 발생하여 65% (203,509톤) 수거되고 수거 비닐의 89% (180,410톤)가 재활용되며, 멀칭용 저밀도 폐비닐 발생량은 영농폐비닐의 51% (160,693톤)를 차지하고 발생량의 60% (97,889톤)가 수거된다고 보고하였다(KECO, 2023). 수거되지 않은 폐비닐은 매립 또는 불법 소각으로 환경오염을 유발한다(Han *et al.*, 2012; Jung *et al.*, 2023). 이에 국내 플라스틱 폐기물 정책을 3가지 측면에서 평가하고 개선방안을 제시하거나(Yun, 2020), 2022년 3월 제3차 유엔환경총회(UNEA-5)에서 플라스틱 오염 종식을 위해 2024년까지 법적 구속력을 갖춘 국제협약을 마련하기로 합의하는 결의를 채택하였다(Cho, 2022). 한편 PE (Polyethylene) 필름의 사용 후 인력수거, 불법 매립과 소각에 따른 문제를 완화하기 위해 생분해성 필름을 양파, 마늘, 옥수수, 고구마 등에 적용하여 멀칭 효과를 국내에서 검토하였다(Jung *et al.*, 2023; Lee *et al.*, 2015; Lim *et al.*, 2016; Lee *et al.*, 2009). 그러나 생분해성 필름은 널리 이용되고 있는 PE 필름보다 2배 가량 고가여서 활용이 제한적이다.

그 대안으로 종이 멀칭이 벼 잡초방제와 생육특성 변화(Jeon *et al.*, 2007), 벼 부산물, 왕겨 분말, 해조 분말, 쌀겨 분말, 밤껍질 추출물, 쌀겨 충전 고분자 복합체를 이용한 생분해성 필름의 제조 및 적용(Han *et al.*, 2011; Han *et al.*, 2012; Kim, 2020; Rhim & Kim, 2004; Yang & Song, 2020; Yap *et al.*, 2021) 등과 관련한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 또한 쌀을 이용한 전분과 쌀가루 및 이중변성 전분 기반 생분해성 필름 제조와 특성 연구(Bourtoom & Chinnan, 2008; Dias *et al.*, 2010; Woggum *et al.*, 2014)도 진행되었으나 국내에 적용되는 사례는 거의 없다. 한편 MAFRA (2023) 기준으로 2022년 국민 1인 당 쌀 소비량은 1992년의 절반인 56.7 kg으로 급격하게 줄었고, 쌀 재고량은 130만 톤으로 적정량인 80~100만 톤보다 30~63% 많아 가공식품이나 주정용 외의 용도로 확대할 필요성이 대두되고 있다. 따라서 본 연구는 쌀 분말의 입도별 쌀 분말 함량과 첨가제 및 배합조건 등을 달리하여 제조된 수지로 생산한 생분해성 필름 시제품을 피복작물인 고구마에 적용하여 물리적 특성 변화와 멀칭에 따른 토양 습도와 온도 변화, 그

리고 생육과 수량에 미치는 영향을 검토하고자 수행하였다.

재료 및 방법

쌀 분말이 함유된 생분해성 필름 제조방법 및 멀칭필름의 종류

쌀 분말의 입도제어, 함수제어, 물리적결합 기술을 개발하고, 이들의 변수들을 잘 조합하여 전분의 결정이 사라지면서 유연성, 생분해성, 친수성, 흐름성 등을 가지는 열가소성 쌀 분말 제조기술을 다윈그룹(주)에서 개발하였다. 열가소성 쌀 분말, PBAT 및 천연첨가제 배합조건을 구명하여 압출용 원료를 가공하고 필름압출기를 이용하여 생분해성 필름을 2023년 4월에 생산하였다. 필름 제조 초기단계인 쌀 분말을 가공할 때 350 mesh와 500 mesh 입도로 하였고, 필름 생산 단계에 350 mesh 분말은 30%, 500 mesh 분말은 40% 첨가하였다. 다만 수지를 제조할 때 열가소성으로 개질화 단계에 쌀 분말 함량별로 첨가제 종류와 배합조건을 달리하였다. PE 필름을 포함하여 본 연구에 적용된 필름은 모두 0.015 mm 두께, 80 cm 폭에 흑색이었다.

필름의 투광성, 표면온도 및 충격내성 조사

본 연구는 전라남도 나주시 산포면 등수리 66-1번지(위도 35.029°N, 경도 126.828°E)에서 수행되었다. 필름별 투광율은 멀칭하기 전에 광도 4,250 Lux의 LED Lamps가 설치된 Photobox (60×60×60 cm)에서 Digital Lux Meter (TM803M, TECMAN, China)를 이용하여 필름 내부 광도의 비율로 산정하였다. 필름별 표면온도의 상대적 차이는 200 ml 비이커에 물 200 ml를 넣고 각 필름으로 밀폐하여 그림자가 없는 옥상에 3~5일 동안 방치한 후 맑은 날과 흐린 날에 열화상카메라(FLIRONE[®]PRO, FLIR, China)로 측정하였다. 흐린 날은 구름이 매우 많고 햇볕이 완전히 가린 2023년 6월 21일 14시 40분, 맑은 날은 구름이 매우 적고 햇볕이 전혀 가리지 않는 2023년 6월 23일 15시 21분에 촬영하였다. 농작업 충격에 대한 필름의 내성은 멀칭 15일 후에 체중 70 kg인 남성이 작업화를 신고 두둑 측면부 멀칭 부위를 밟은 면적 대비 손상된 면적을 비율로 산출하였다. 투광성과 충격내성은 완전임의 30반복 조사하였고, 결과는 R 통계 프로그램을 이용하여 $\alpha=0.05$ 에서 DMRT (Duncan's multiple range test)에 의해 유의성을 검정하였다.

필름의 분해(붕괴) 추이 조사

토양에 멀칭하지 않은 생분해성 필름의 분해율은 표면온도의 상대적 차이 측정에 사용된 재료를 활용하여 실외에

서 조사하였다. 분해율은 10일 간격으로 90일 후까지 붕괴 면적을 조사하여 비율로 환산하였고, 그 결과는 붕괴가 확인된 노출 30일 째부터 제시하였다. 실외 장소는 1층 건축물 옥상으로 그림자 영향을 전혀 받지 않은 조건이었다. 고구마 재배포장에 멀칭된 생분해성 필름의 분해율은 두둑 표면부, 두둑과 고랑 경계부로 구분하여 삼식 후 15일 간격으로 90% 이상 분해될 때까지 조사하였다. 두둑 표면부 멀칭 필름의 분해율은 고구마 식재 지점을 제외한 표면적 대비 붕괴 면적의 비율, 두둑과 고랑 경계부의 멀칭필름 분해율은 경계부 길이 대비 붕괴된 길이의 비율로 각각 산출하였다.

필름 멀칭 두둑의 토양 온·습도 변화

2023년 5월 22일에 조성한 이랑을 나지 상태로 유지하여 충분하게 토양을 경화시켜 2023년 8월 4일에 두둑 상단부 지표에서 15 cm 깊이에 센서를 설치하고 비선택성제초제 (Glufosinate ammonium 18%)를 살포한 후 필름별로 멀칭하고 2023년 8월 16일부터 8월 31일까지 토양 습도와 온도를 측정하였다. 이때 멀칭 후 고구마를 삼식하지 않았고 울타리를 설치하여 야생동물로 인한 필름 손상을 방지하여 밀폐된 상태로 유지하였다. 측정 시기에 생분해성 필름의 멀칭 두둑 표면부 및 두둑과 고랑 경계부 모두 분해(붕괴)되지 않은 상태였다. 한편 2023년 5월 25일에 고구마를 삼식하고 2개월 후인 7월 25일부터 8월 1일까지 두둑 상단부의 토양 습도와 온도를 고구마 개체와 개체 중간지점의 지표 5 cm 깊이에서 측정하였다. 측정 당시 생분해성 필름의 두둑 표면부 분해(붕괴)는 약 30% 이었고 지표면은 고구마 지상부가 완전히 피복되었다. 토양수분온도전기전도도센서 (TEROS12, METER, US)의 측정 값을 10분 간격으로 데이터수집모듈(ZL6, METER, US)로 수집하여 일평균 값으로 산출하였다. 이 시기의 일별 강수량과 일평균 기온은 항공우주연구원과 전라남도농업기술원이 구축한 위성 부가 산출물 검증을 위한 나주 기상관측사이트(Ha *et al.*, 2023)의 관측 값을 활용하였다. 기상관측사이트는 시험포장 기준 반경 500 m 지점(위도 35.027°N, 경도 126.822°E)에 위치한다.

고구마 생육 및 수량 평가

고구마 삼식 30여 일 전에 ha당 퇴비 10톤을 살포하고 삼식 3일 전인 2023년 5월 22일에 ha당 질소 55 kg, 인산 63 kg, 칼리 156 kg 및 토양살충제(Ethoprophos 5%) 60 kg 을 전량 살포하였고, 시험 전 토양 이화학적성은 Table 1과 같다. 시비 직후에 넓이 70 cm, 높이 25~30 cm의 이랑을 조성하고 각 필름을 멀칭하였다. 전남 해남군에 소재한 육묘업체에서 길이 30 cm 내외의 고구마(품종: 소담미) 삼수를 2023년 5월 22일에 채묘하여 서늘한 음지에서 3일간 보관한 후 덩굴쪄김병 예방을 위해 5월 25일에 작물보호제 (Pydiflumetofen 18.35%) 500배액에 10 cm 깊이로 25분간 침지하여 20 cm 간격으로 1분씩 삼식하고 130일 후인 2023년 10월 2일에 모두 수확하였다. 농촌진흥청 농업과학기술 연구조사분석기준(RDA, 2012)을 참고하여 삼식 90일 후에 원줄기의 길이와 직경 및 마디수를 조사하였다. 이때 직경은 원줄기 길이의 2/3 부위를 측정하였다. 분지수는 원줄기를 제외한 10 cm 이상의 줄기를 괴근 수확 직전에 조사하였다. 상저중과 총저중, 상저수와 총저수는 수확 후 통풍이 양호한 건조장에서 15일 동안 음건하고 조사하였다. 이때 중량이 30 g 이상인 괴근을 상저로 분류하였다. 시험구배치는 난괴법 3반복으로 하였고 반복당 면적은 54 m²이며, 결과는 R 통계 프로그램을 이용하여 α=0.05에서 DMRT (Duncan's multiple range test)로 유의성을 검정하였다.

결과 및 고찰

필름의 투광성, 표면온도 및 충격내성

본 연구에 적용된 필름(두께 0.015 mm, 흑색)의 투광율은 Table 2와 같이 350 mesh 쌀 분말이 30% 함유된 생분해성 필름(BF30-350RP)이 0.8%로 500 mesh 쌀 분말이 40% 함유된 생분해성 필름(BF40-500RP) 2.0%, Polyethylene (PE) 필름 2.7%보다 낮았다. 이와 같은 결과는 쌀 분말의 함량보다는 입도가 투광성에 영향을 미치거나 생분해성 플라스틱 수지 제조단계에 첨가제, 배합조건 등도 관련이 있을 것으로 보여졌다. 마늘 재배에 적용된 두께 0.015 mm 반투명 생분해성 필름의 멀칭 전 투광율은 73.4% (Lee *et al.*, 2015), 상추 잡초관리에 사용된 유액 코팅 베이지색 종이 필름의

Table 1. Soil chemical properties in the experimental field in 2023.

pH (1:5)	O.M. (g/kg)	Av. P ₂ O ₅ (mg/kg)	Ex. Cat. (cmol(+)/kg)			C.E.C (cmol(+)/kg)	E.C. (Ds/m)
			K	Ca	Mg		
7.36	15.0	235	0.37	9.00	3.57	14.48	0.62

사용 직전 광합성유효광(400~700 nm)의 평균 투광율은 4.3% (Brault & Stewart, 2002) 등이 보고되었다. 그러나 쌀 분말이 함유된 생분해성 필름의 투광성에 대한 보고는 없어 쌀 분말의 입도와 함량, 원료의 배합조건 등이 필름의 색상과 투광성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 검토가 필요하였다.

열화상카메라로 맑은 날 햇볕이 구름에 전혀 가리지 않은 시각과 흐린 날 햇볕이 구름에 완전히 가린 시각에 측정된 필름의 상대적 표면온도는 Fig. 1에 제시하였고, 사진의 색상이 밝을수록 표면온도가 높게 나타난다. 맑은 날에 투광율이 2.7%로 가장 높은 흑색 PE 필름의 표면온도는 가장 낮았고, BF40-500RP와 BF30-350RP는 큰 차이가 없었다. 햇볕 쬐일 때에는 PE 필름의 특성상 투광율과 표면온도가 반비례 경향이었으나, 쌀 분말이 함유된 흑색 생분해성 필름은 투광율 차이에 비하여 표면온도 차이는 미미한 수준이었다. 이와 같은 결과는 쌀 분말 함유에 따른 특징으로 여겨지나 추가 검토가 필요하였다. 흐린 날에는 투광율이 가장 높은 PE 필름과 가장 낮은 BF30-350RP는 비슷하게 어두운 반면 투광율이 중간인 BF40-500RP는 상대적으로 덜 어두워 맑은 날과 상이한 특성을 보였지만 필름간 차이는 매우 미미한 수준이었다. 이상의 결과를 고려할 때 필름의 표면온도는 투광성뿐만 아니라 수지 제조 방법과도 관련이 있을 것으로 판단되었다.

필름별로 멀칭하고 15일 후에 작업화를 착용하고 두둑 측

면부를 밟았을 때 손상 비율은 PE 필름 0.4%, BF40-500RP 3.3%, BF30-350RP 5.3% 순으로 유의하게 낮았다(Table 2). 생분해성 필름의 손상율은 5.3% 이하로 PE 필름보다 2.9~4.9%point 높았으나 고구마 생육 초기뿐만 아니라 중·후기 잡초관리에는 문제가 없었다(No data presented). 그러나 멀칭과 이식 작업단계에 약간의 주의는 필요한 수준으로 보여졌다. 생분해성 PBSA (Poly butyleneadipate-co-butylene succinate)나 PCL (Polycaprolactone)+Starch를 주성분으로 하는 생분해성 필름은 농업용 저밀도 PE 필름에 비해 인장강도는 약간 높은 반면 신장률과 인열강도가 낮아 기계적 물성이 다소 낮은 편이었으나 실제 작업환경에서는 문제가 없었고(Lee *et al.*, 2009), 유통되는 생분해성 필름의 인장강도, 신장률, 인열강도는 PE 필름보다 다소 낮거나 비슷한 편이었고 농작업 과정에서 갈라지거나 찢겨지는 등의 문제는 발생하지 않았다(Lee *et al.*, 2015)는 보고에 비해 본 연구에 사용된 시제품은 물성이 다소 낮은 것으로 여겨졌다.

필름의 분해(붕괴) 추이

생분해성 필름을 그림자 없는 1층 건축물 옥상에 상시 노출하고 붕괴가 시작된 노출 30일 차부터 10일 간격으로 붕괴 면적을 조사하여 산출한 분해율 추이는 Fig. 2와 같다. 500 mesh 쌀 분말이 40% 함유된 생분해성 필름(BF40-500RP)은 0.2% 붕괴된 외부 노출 40일 차에 가시적 분해의 시점

Table 2. Light transmittance and damage ratio resulting from agricultural work of biodegradable films *versus* polyethylene film.

Mulching film type	Light transmittance (%)	Agricultural work impact damage ratio (%)
BF40-500RP	2.0±0.05 a*	3.3±1.01 b
BF30-350RP	0.8±0.05 b	5.3±1.32 a
Polyethylene film	2.7±0.04 a	0.4±0.15 c

BF40-500RP: Biodegradable film containing 40% of 500 mesh rice powder.

BF30-350RP: Biodegradable film containing 30% of 350 mesh rice powder.

*Means separation within columns by DMRT at 5% level.

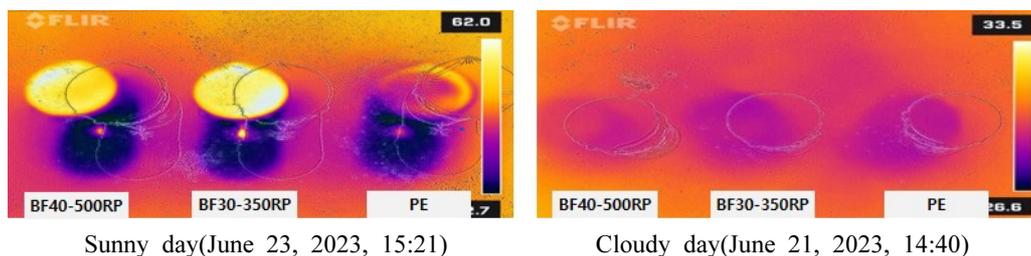


Fig. 1. Photographs of relative surface temperatures of biodegradable films and PE film on sunny and cloudy days.

BF40-500RP: Biodegradable film containing 40% of 500 mesh rice powder.

BF30-350RP: Biodegradable film containing 30% of 350 mesh rice powder.

PE: Polyethylene film.

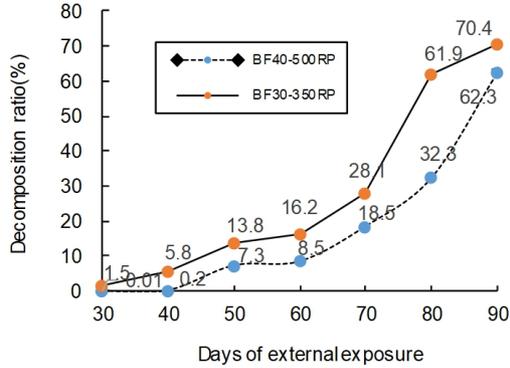


Fig. 2. Changes in biodegradable films' decomposition ratio according to days of external exposure after June 18, 2023.

BF40-500RP: Biodegradable film containing 40% of 500 mesh rice powder.
 BF30-350RP: Biodegradable film containing 30% of 350 mesh rice powder.

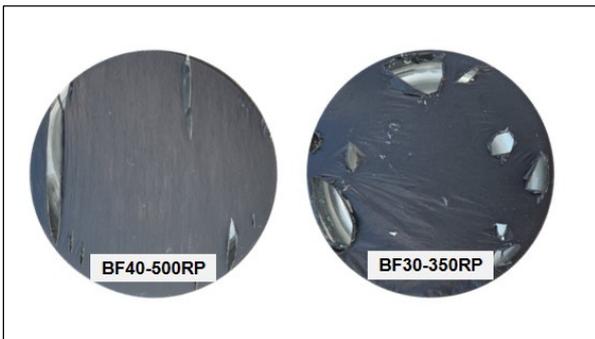


Fig. 3. Decomposition photographs of biodegradable films exposed to the outside for 60 days from June 18, 2023.

BF40-500RP: Biodegradable film containing 40% of 500 mesh rice powder.
 BF30-350RP: Biodegradable film containing 30% of 350 mesh rice powder.

이였으나, 350 mesh 쌀 분말이 30% 함유된 생분해성 필름 (BF30-350RP)은 BF40-500RP보다 10일 빠른 노출 30일 차 부터 분해(1.5%)가 되었다. 이후 급격한 붕괴로 BF30-350RP 는 노출 70일 차에 28.1%, BF40-500RP는 노출 80일 차에 32.3% 정도 분해되어 유용성이 현저하게 저하된 시점이었고, 이후 10일 간 BF30-350RP 33.8%point, BF40-500RP 30%point 정도 증가되어 상대적으로 급속하게 붕괴되는 시기로 관찰되었다. 반면에 노출 50일 차 이후 10일 간 분해를 증가는 BF40-500RP 1.2%point, BF30-350RP 2.4%point 로 상대적으로 매우 서서히 붕괴되는 시기이었다. 이상의 생분해성 필름을 토양에 멀칭하지 않고 외부에 상시 노출

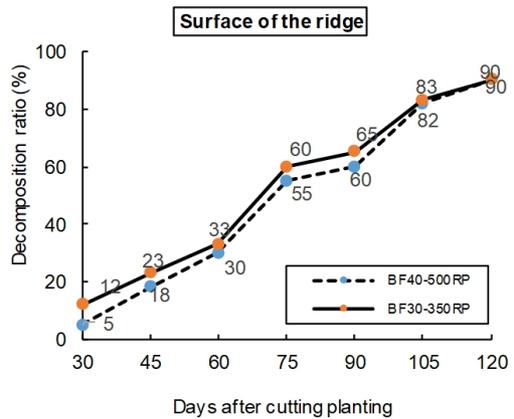
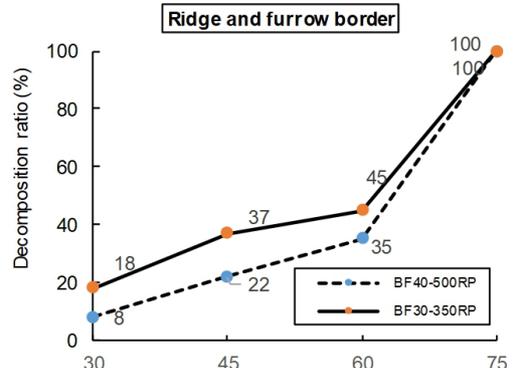


Fig. 4. Changes in the decomposition ratio of biodegradable mulching films in different parts of the field during a sweetpotato growth period.

BF40-500RP: Biodegradable film containing 40% of 500 mesh rice powder.
 BF30-350RP: Biodegradable film containing 30% of 350 mesh rice powder.

하였을 때 분해 추이만으로 농업적 효용성을 평가하기 곤란하고 관련 보고 또한 없어 보다 더 면밀한 검토가 필요하였다. 그리고 외부 노출 60일 차에 생분해성 필름의 붕괴 모양은 Fig. 3에서 보여진 바와 같이 BF500-40RP는 일자형, BF350-30RP는 원형이었다. 붕괴 모양의 차이는 쌀 분말의 입도뿐만 아니라 천연첨가제 종류에 따른 생분해성 수지와 PBAT (Polybutylene adipate terephthalate)의 결합 특성 차이 때문인 것으로 판단되었다.

한편 고구마 재배에 적용된 필름별 두둑 표면부, 고랑과 두둑 경계부의 분해는 Fig. 4와 같이 500 mesh 쌀 분말이 40% 함유된 생분해성 필름(BF40-500RP)이 350 mesh 쌀 분말이 30% 함유된 생분해성 필름(BF30-350RP)보다 서서히 진행되는 경향을 보였다. 고랑과 두둑 경계부의 BF40-500RP 분해는 삽식 후 60일 차(35%)가 30일 차 대비 27%point 증

가하였고 이후 급격하게 증가하여 삽식 후 75일 차에 100% 붕괴되었으며, BF30-350RP 또한 유사한 경향이였다. 다만 Fig. 5의 포장 전경과 같이 삽식 후 60일 차에는 완전히 피복되어 필름이 날리는 등 포장 중간관리 측면에서의 문제는 나타나지 않았다(No data presented). 두둑 표면부 필름의 가시적 붕괴 시점은 삽식 30일 후로 5% 이상 분해되었고, 30% 이상 분해는 삽식 60일 후, 60% 이상 분해는 삽식 90일 후, 90% 분해는 삽식 120일 후에 관찰되었다. 특히, 두둑 표면부 BF40-500RP의 시점별 분해율 증가는 삽식 후 60일 차 대비 75일 차에 25%point, 90일 차 대비 105일 차에는 22%point 순으로 높았고, 삽식 후 75일 차 대비 90일 차에는 5%point로 가장 낮았다. 삽식 후 30일 차와 60일 차에 두둑 표면부 BF30-350RP의 분해율은 토양에 멀칭하지 않고 외부에 상시 노출했을 때보다 2배 이상 높았으나 이후에는 큰 차이가 없었고, BF40-500RP 또한 정도의 차이는 있었으나 유사한 경향이였다. 다만 두 필름 모두 삽식 60일 후에 두둑 표면부는 30% 이상, 고랑과 두둑 경계부는 35% 이상 분해되었으나 피복작목인 고구마 생육 특성상

Fig. 5와 같이 전체 포장이 완전히 피복되어 흑색 필름 멀칭의 목적 중 하나인 잡초관리 측면에 부정적 영향은 없는 것으로 판단되었다(No data presented). 이상의 결과는 필름 위와 아래 모두 토양에 밀착되어 상대적으로 유기화가 잘되는 고랑과 두둑 경계부 필름의 분해 추이가 고려된 제품을 생산해야 할 것으로 판단되었다. 한편 콩 재배에 적용된 6종의 생분해성 멀칭필름은 110일 경과했을 때 표면적의 25%가 조그만한 파편이 보이는 수준에서 원형을 유지하지 못하는 수준까지 분포하고(Kim *et al.*, 2024), 마늘 재배에 적용된 생분해 필름은 5개월 정도 경과했을 때 표면에 미세한 줄이 보이고 쉽게 찢겨졌다(Lee *et al.*, 2015)는 보고를 고려할 때 본 연구에 적용된 시제품은 기존 제품보다 다소 실용성이 낮을 것으로 판단되었다.

필름 멀칭 두둑의 토양 습도와 온도 변화

2023년 8월 4일에 멀칭하고 밀폐된 상태를 유지하고 8월 16일부터 8월 31일까지 강수, 토양 습도와 온도를 측정한 결과(Fig. 6), 1 mm 이상 강우 일수는 6일 이었고 누적 강

Days after cutting planting	BF40-500RP	BF30-350RP	Polyethylene film	Field view
30				
60				
90				
130 (After cutting the vines)				

Fig. 5. Decomposition photographs of each mulching film in a sweetpotato field.

BF40-500RP: Biodegradable film containing 40% of 500 mesh rice powder.
 BF30-350RP: Biodegradable film containing 30% of 350 mesh rice powder.

수량은 226.2 mm 이었다. 필름별 멀칭 두둑의 토양습도와 그 편차는 PE 필름이 각각 37.0~38.2%와 1.2%point로 가장 낮았고, BF40-500RP 36.9~39.1%와 2.2%point, BF30-350RP 36.9~39.3%와 2.7%point 순으로 낮았으나 차이는 크지 않았다. 그러나 PE 필름과 BF40-500RP의 최저 토양 습도 시점은 각 8월 16일과 8월 17일로 비슷하였으나 BF30-350RP는 4~5일 늦은 8월 21일 이었고, 최고 토양습도 시점 또한 최저 토양습도 시점과 유사하게 PE 필름과 BF40-500RP는 각각 8월 25일과 8월 24일 이었으나 BF30-350RP는 5~6일 늦은 8월 30일 이었다. 이상의 생분해성 필름간 에도 토양습도 변화 차이가 다른 이유는 필름의 투수성과 통기성 등 본 연구에서 검토되지 않은 요인의 영향이었을

것으로 추정되나 추가적 검토를 통한 개선된 제품 생산에 적용할 필요가 있다고 판단되었다. 멀칭 두둑의 토양온도는 생분해성 및 PE 필름 모두 기온이 28.8°C로 가장 높은 8월 21일보다 1일 뒤인 8월 22일에 가장 높았고, 기온이 21.8°C로 가장 낮은 8월 30일에 가장 낮았다. 토양온도 범위는 PE 필름 27.8~34.4°C, BF40-500RP 27.1~33.7°C, BF30-350RP 27.3~33.7°C로 PE 필름이 쌀 분말이 함유된 생분해성 필름들보다 높고 편차가 적은 경향이었고 생분해성 필름간 차이는 매우 미미하였다.

고구마를 삼식하고 2개월 후인 2023년 7월 25일부터 8월 1일까지 두둑 상단부 지표에서 5 cm 깊이의 토양 습도와 온도를 측정된 결과(Fig. 7), BF40-500RP 멀칭의 토양

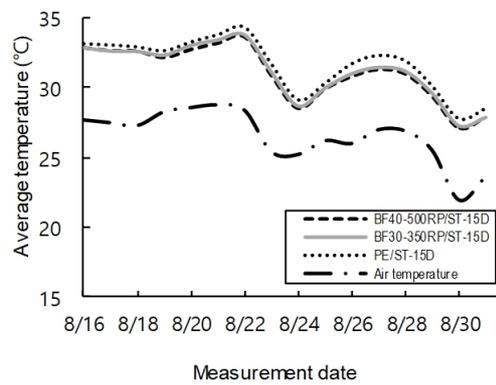
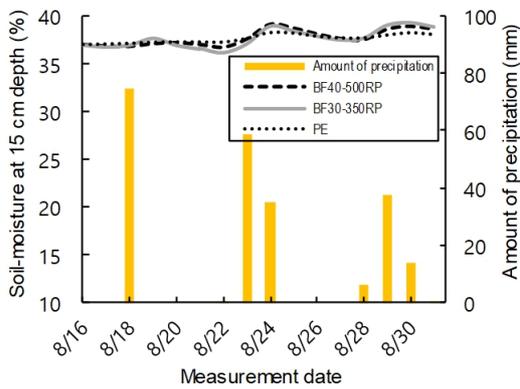


Fig. 6. Changes in soil moisture and temperature at a depth of 15 cm in a mulched field without sweetpotato plants in August 2023. BF40-500RP: Biodegradable film containing 40% of 500 mesh rice powder. BF30-350RP: Biodegradable film containing 30% of 350 mesh rice powder. PE: Polyethylene film. ST-15D: Soil temperature at 15 cm depth.

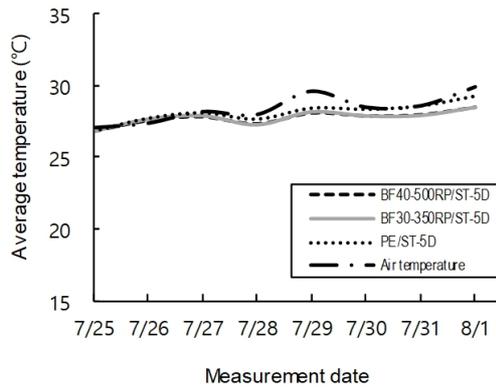
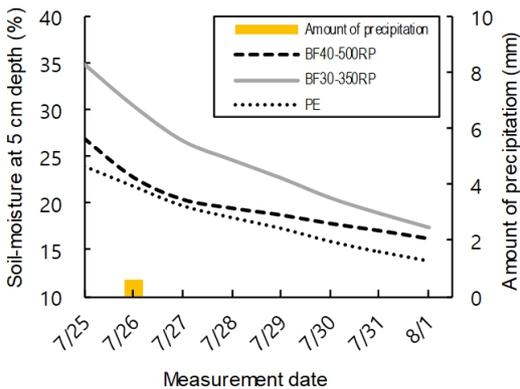


Fig. 7. Changes in soil moisture and temperature at a depth of 5 cm after two months of planting sweetpotato cuttings. BF40-500RP: Biodegradable film containing 40% of 500 mesh rice powder. BF30-350RP: Biodegradable film containing 30% of 350 mesh rice powder. PE: Polyethylene film. ST-5D: Soil temperature at 5 cm depth.

습도는 7월 25일 26.9%에서 8월 1일 16.3%로 10.6%point(일평균 1.5%point) 감소되었다. 반면에 BF30-350RP 멀칭은 7월 25일 34.9%에서 8월 1일 17.4%로 17.5%point(일평균 2.5%point) 감소되어 BF40-500RP보다 토양습도가 높고 변이 또한 큰 편이었다. 이와 같은 차이는 삽식 60일 후에 BF40-500RP의 분해율이 30%로 BF30-350RP보다 3%point 낮고(Fig. 4), BF40-500RP의 붕괴 모양이 일자형으로 원형인 BF30-350RP (Fig. 3)보다 두둑에 수분 유입과 유출이 상대적으로 낮은 형태적 특징 때문으로 사료되었다. 한편 20 cm 간격으로 고구마를 삽식한 지점을 제외한 부위의 수분 유출입이 적은 PE 필름을 멀칭한 두둑의 토양습도는 7월 25일 24.0%에서 8월 1일 16.3%로 가장 낮게 유지되었고 일평균 감소도 1.1%point로 가장 적은 변이를 보였다. 이상의 결과는 분해성 필름을 멀칭한 양파, 콩 포장의 포장용수량이나 토양습도는 PE 필름 적용과 큰 차이가 없었다는 보고(Jung *et al.*, 2023; Kim *et al.*, 2024)와 일부 상이하였다. 그 이유는 전술한바와 같이 각 연구에 사용된 필름의 분해율, 연구시기의 기상과 측정시기가 달랐기 때문으로 판단되었다. 그리고 생분해성 필름이면서 측정 당시 30% 가량 분해된 BF40-500RP와 BF30-350RP 멀칭 두둑의 토양온도 차이는 매우 적었다. 공시한 필름 모두 7월 25일 토양온도는 26.8°C로 동일하였고 이후 PE 필름이 2종의 생분해성 필름보다 지속적으로 편차가 증가하여 7일 동안 0.8°C(일평균 0.11°C) 상승하였다.

고구마 생육 및 수량

삽식 90일 후에 원줄기 길이는 PE 필름 184 cm, BF40-500RP 190 cm, BF30-350RP 204 cm로 멀칭 필름간 통계적으로 유의성 있는 차이가 관찰되지 않았다(Table 3). 원줄기 직경과 마디수는 각각 4.7~4.9 mm와 45~50개 범위로 원줄기 길이와 유사하게 필름간 차이가 없었다. 그리고 수확기인 삽식 130일 후에 원줄기를 제외한 10 cm 이상의 분지수 또한 1.4~2.2개 범위로 적용된 필름별 유의차가 없었다. 수확한 고구마를 통풍이 잘되는 건조장에서 15일 동안 음건한 후에 괴근의 특성을 조사한 결과(Table 4), 주당 총 괴근수는 9.4~9.5개, 30 g 이상인 괴근은 5.0~5.3개로 필름간 유의차가 없었다. 10a당 총 괴근 수량은 3.7톤 내외, 30 g 이상인 괴근의 수량은 3.3톤 내외로 주당 괴근수 경향과 같이 차이가 관찰되지 않았다. 이와 같은 고구마 생육과 수량은 시중 유통 생분해성 필름을 마늘에 적용하였을 때 수량은 PE 필름과 비슷하였고(Lee *et al.*, 2015), 지방족 폴리에스테르가 주성분이거나 수지+전분 컴파운드 생분해성 필름 멀칭 처리는 고구마 수량과 품질이 PE 필름과 차이가 없었으며(Lee *et al.*, 2009), 최근 상용 생분해성 필름을 적용한 목화의 출현속도 및 바이오매스 생장은 PE 필름과 비슷하나 수량은 비교적 낮았고(Liu *et al.*, 2022), 상추묘 생육에 생분해성 필름이 긍정적으로 작용한다(Souza *et al.*, 2021)는 연구결과들과도 대체로 유사하였다. 이상의 고구마 지상부 생육, 지하부(괴근) 수량 등의 결과를 종합하면

Table 3. Sweetpotato vine characteristics as affected by biodegradable films and polyethylene film mulching in 2023.

Mulching film type	Vine length (cm)	Vine diameter (mm)	Node no. of vine	Branch no. of vine
BF40-500RP	190±8.2 a*	4.9±0.2 a	45±2.3 a	1.8±0.5 a
BF30-350RP	204±3.5 a	4.7±0.1 a	50±2.5 a	2.2±2.2 a
Polyethylene film	184±16.4 a	4.9±0.4 a	45±3.5 a	1.4±0.3 a

BF40-500RP: Biodegradable film containing 40% of 500 mesh rice powder.

BF30-350RP: Biodegradable film containing 30% of 350 mesh rice powder.

*Means separation within columns by DMRT at 5% level.

Table 4. Sweetpotato tuber number and yield as affected by biodegradable films and polyethylene film mulching in 2023.

Mulching film type	No. of tubers per plant		Tuber yield (ton/ha)	
	Marketable(>30 g)	Total	Marketable(>30 g)	Total
BF40-500RP	5.1±0.7 a*	9.4±1.7 a	33.3±4.0 a	37.8±4.6 a
BF30-350RP	5.3±0.4 a	9.5±0.5 a	29.8±3.1 a	34.1±3.3 a
Polyethylene film	5.0±1.1 a	9.4±1.5 a	35.0±6.8 a	39.8±7.0 a

BF40-500RP: Biodegradable film containing 40% of 500 mesh rice powder.

BF30-350RP: Biodegradable film containing 30% of 350 mesh rice powder.

*Means separation within columns by DMRT at 5% level.

쌀 분말이 함유된 생분해성 필름의 고구마 멀칭 재배에 적용 가능할 것으로 사료되었다.

적 요

쌀 분말이 함유된 플라스틱 수지를 이용하여 생분해성 필름 시제품 2종을 생산하고, 고구마(*Ipomoea batatas* L. Lam) 재배에 적용하여 생육과 수량, 토양환경 등을 PE (Polyethylene) 필름과 비교한 결과는 다음과 같다.

1. 투광율은 350 mesh 쌀 분말 30% 함유된 생분해성 필름 (BF30-350RP)이 0.8%로 500 mesh 쌀 분말 40% 함유된 생분해성 필름(BF40-500RP) 2.0%, PE 필름 2.7%보다 낮았다.
2. 맑은 날 필름의 표면온도는 PE 필름이 가장 낮았고, BF40-500RP와 BF30-350RP는 차이가 적었다.
3. 농작업 충격에 의한 손상율은 PE 필름 0.4%, BF500-400RP 3.3%, BF350-30RP 5.3% 순으로 낮았다.
4. 외부에 노출하였을 때 BF40-500RP와 BF30-350RP의 가시적인 분해 시점은 각각 노출 40일과 30일 차이였고, 노출 90일 차에 각각 62.3%와 70.4% 분해되었다.
5. 고구마 재배에 적용된 생분해성 필름의 분해는 BF40-500RP가 BF30-350RP보다 서서히 진행되었다. 두둑 표면부의 BF40-500RP는 고구마 삼식 30일 후에 5%, 60일 후에 30%, 90일 후에 55%, 120일 후에 90% 분해되었다. 두둑과 고랑 경계부의 생분해성 필름은 고구마 삼식 75일 후에 완전히 분해되었다.
6. 멀칭 후 고구마를 재배하지 않아 지표면이 밀폐된 조건에서는 토양습도와 그 편차는 PE 필름, BF40-500RP, BF30-350RP 순으로 낮았으나 큰 차이를 보이지 않았고, 토양온도는 PE 필름이 생분해성 필름보다 높았으나 그 차이는 낮았다.
7. 고구마 삼식 2개월 후에 7일 동안 일평균 토양습도는 BF30-350RP 멀칭 2.5%point, BF40-500RP 멀칭 1.5%point, PE 필름 멀칭 1.1%point 씩 감소하였고, 토양온도는 두 생분해성 필름 멀칭 모두 비슷하였으나 PE 필름 멀칭은 지속적으로 증가되어 생분해성 필름보다 일평균 0.1°C 높았다.
8. 고구마 줄기 생육과 괴근 수량은 멀칭 필름간 차이가 관찰되지 않았다.

사 사

본 연구는 중소벤처기업부 중소기업기술개발지원사업 (과제명: 탈플라스틱 농업용 생분해 신소재/제품 기술 개발; 과제번호: S3303663) 지원으로 수행된 것임.

인용문헌(REFERENCES)

- Bourtoom, T. and M. S. Chinnan. 2008. Preparation and properties of rice starch-chitosan blend biodegradable film. *LWT-Food Science and Technology* 41(9) : 1633-1641.
- Brault, D. and K. A. Stewart. 2002. Optical properties of paper and polyethylene mulches used for weed control in lettuce. *HortScience* 37(1) : 87-91.
- Cho, Y. M. 2022. Analysis of recent international legal discourse for the end of plastic era. *The Korean Journal International Law* 67(3) :225-264.
- Dias, A. B., C. M. O. Muller, F. D. S. Larotonda, and J. B. Laurindo. 2010. Biodegradable films based on rice starch and rice flour. *Journal of Cereal Science* 51 : 213-219.
- Ha, J. S., S. T. Jeong, H. O. Kim, S. G. Lee, D. W. Jeong, J. I. Cho, S. H. Shin, K. J. Kim, D. K. Kim, and J. M. Yeom. 2023. The introduction of Naju ground observation site measurement data and web service for validation of satellite value-added products. *GEO DATA* 5(2) : 103-109.
- Han, S. I., H. W. Kang, D. W. Byun, K. C. Jang, W. D. Seo, J. E. Ra, and K. J. Choi. 2011. Mechanical properties and degradability of bio-degradable agricultural transplanting pot containing rice by-product. *Korean J. Crop Sci.* 56(1) : 44-49.
- Han, S. I., H. W. Kang, K. C. Jang, W. D. Seo, J. E. Ra, S. H. Oh, H. U. Lee, M. N. Chung, and K. J. Choi. 2012. Studies on the bio-degradability and characteristics of mulching film containing rice by-products applied to upland crops. *Korean J. Crop Sci.* 57(1) : 99-105.
- Jeon, W. T., W. H. Yang, S. W. Roh, M. T. Kim, K. Y. Seong, and J. K. Lee. 2007. Changes of soil redox potential, weed control and rice growth in paddy on paper mulching transplanting by organic matter application. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 40(6) : 495-500.
- Jung, J. S., D. W. Park, and H. S. Choi. 2023. Effect of biodegradable film mulching on soil environment and onion growth and yield. *Korean J. Crop Sci.* 68(3) : 99-105.
- Korea Environment Corporation (KECO). 2023. 2022 Agricultural waste statistics survey. KECO. Incheon. Korea. pp. 11-31.
- Kim, H. S., J. S. Lee, and M. N. Chung. 2011. Effect of harvesting system on labor-saving in sweetpotato cultivation. *Korean J. Crop Sci.* 56(4) : 400-403.
- Kim, S. J. 2020. Thermal and mechanical properties of rice husk flour reinforced recycled polystyrene composites. *Polym.*

- Korea 44(2) : 192-200.
- Kim, Y. G., Y. H. Woo, H. H. Park, D. J. Lee, and Y. I. Kuk. 2024. Effects of various biodegradable mulching films on growth, yield, and soil environment in soybean cultivation. *Korean J. Crop Sci.* 69(1) : 34-48.
- Korean Statistical Information Service (KOSIS). 2024. <https://kosis.kr/index/index.do>.
- Lee, J. H., M. J. Kim, H. L. Kim, Y. B. Kwack, J. K. Kwon, K. S. Park, H. G. Choi, and B. Khoshimkhujae. 2015. Effects of biodegradable mulching film application on cultivation of garlic. *Protected Horticulture and Plant Factory* 24(4) : 326-332.
- Lee, J. S., K. H. Jeong, H. S. Kim, J. J. Kim, Y. S. Song, and J. K. Bang. 2009. Bio-degradable plastic mulching in sweetpotato cultivation. *Korean J. Crop Sci.* 54(2) : 35-142.
- Lim, S. J., M. B. Lee, S. W. Kim, J. S. Kim, S. J. Heo, S. C. Choi, B. S. Yoon, and I. J. Kim. 2016. Effects of bio-degradable mulches on the yield of maize and the density of soil microbe. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 49(4) : 375-380.
- Liu, Q., Y. Wang, J. Liu, X. Liu, Y. Dong, X. Huang, Z. Zhen, J. Lv, and W. He. 2022. Degradability and properties of PBAT-based biodegradable mulch films in field and their effects on cotton planting. *Polymers* 14 : 1-15.
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). 2023. Grain policy data. MAFRA. Sejeong. Korea. pp. 36-182.
- Rural Development Administration (RDA). 2012. Standards of research, investigation, analysis in agricultural science and technology. RDA. Suwon. Korea. pp. 459-467.
- Rural Development Administration (RDA). 2018. Sweet potato-Agricultural technology guide. RDA. Jeonju. Korea. pp. 10-32.
- Rhim, J. W. and J. H. Kim. 2004. Preparation of bio-degradable films using various marine algae powder. *Korean J. Food Sci. Technol.* 36(1) : 69-74.
- Souza, A. G., R. R. Ferreira, J. Harada, and D. S. Rosa. 2021. Field performance on lettuce crops of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/polylactic acid as alternative biodegradable composites mulching films. *Journal of Applied Polymer Science* 138(11) : 1-13.
- Woggum, T., P. Sirivongpaisal, and T. Wittaya. 2014. Properties and characteristics of dual-modified rice starch based biodegradable films. *International Journal of Biological Macromolecules* 67 : 490-502.
- Yang, H. S., and K. B. Song. 2020. Characterization of biodegradable antioxidant films based on maca root polysaccharides and chestnut inner shell extract. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr* 49(11) : 1268-1274.
- Yap, S. Y., S. Sreekantan, M. Hassan, K. Sudesh, and M. T. Ong. 2021. Characterization and biodegradability of rice gusk-filled polymer composites. *Polymers* 13, 104.
- Yun, K. G. 2020. Searching for a better plastic waste policy. *Modern Society and Public Administration* 30(4) : 1-28.