

농업용 폐비닐로부터 중간원료의 경제적인 제조기술 개발

손상진, 김혜태, 김명호, 김형국, 안태광*, 周恭明**, 陣德珍**

한국환경자원공사 기술연구처, 혜전대학 환경의료계열*, 中國 同濟大學 環境工程學部**

Development of Technologies for Intermediate Stuff from Waste Agricultural Plastic Film

Sang-jin Shon, Hae-tae Kim, Myoung-ho Kim, Hyung-kuk Kim, Tae-kwang Ahn*,
Gong-ming Zhou**, De-zhen Chen**

Korea Environment & Resources Corporation, Hyejeon College, Tongji University***

요 약

현재 우리나라에서만 연간 약 26만톤이 발생되고 있는 농업용 폐비닐은 재생원료로 재활용되어지면 국내외에서 그 용도가 매우 많으나 멀칭용으로 사용되었던 폐비닐은 그 오염도가 워낙 심하여 쉽게 재활용할 수 없는 처지이다. 즉 공급과 수요는 많으나 재생기술의 한계가 병목으로 작용하고 있는 현실이다. 따라서 간단하고 경제적인 방법으로 재활용할 수 있는 습식 및 건식 재생기술의 개발이 계속되어 요구되어 왔다. 강제 세척, 회전분리, 열풍 건조 및 압착성형을 이용한 새로운 간이습식공정을 통하여 멀칭용 농업용 폐비닐을 순도 95% 이상의 탄화 및 열화가 적은 압착 펠렛을 경제적으로 제조할 수 있었다. 이들의 재생수지는 인장강도 $168.6 \pm 3.9 \text{ kgf/cm}^2$, 파단신율 315.8%, 인장탄성을 $2,551.8 \pm 50.1 \text{ kgf/cm}^2$, 굴곡강도와 굴곡탄성을 $166.7 \pm 7.4 \text{ kgf/cm}^2$, $5,716.2 \pm 242.2 \text{ kgf/cm}^2$ 그리고 충격강도는 $49.2 \text{ kgf} \cdot \text{cm/cm}$ 을 각각 보여 연질수지로서 기능하기 위한 충분한 성능을 보유하고 있음을 알 수 있었다. 또한 이들의 응용분야 확대를 위하여 fly ash 및 탄산칼슘을 배합하여 이들의 물성변화를 살폈다.

주제어 : 농업용 폐비닐, 강제식 간이세척기, 고속 충격식 회전분리기, 열풍식 건조기, 마찰식 압착성형기, 무기질 첨가

1. 서론

농작물 보온용 비닐하우스나 잡초 성장억제를 위한 멀칭용 등으로 사용되어진 폐비닐은 우리나라에서 연간 약 26만톤이 발생하고 있으나 농촌 인구의 고령화와 수익성이 떨어지는 재활용 현실 등 여러 요인에 의해 수거되지 않고 경작지에 그대로 방치되면 자연 생태계에 나쁜 영향을 미치게 된다.

반면 우리나라를 비롯한 인근 국가들에서의 폐비닐 재생품의 수요는 최근 고유가의 영향에 의하여 급격히 증가하고 있는 실정이나 농업용 멀칭 폐비닐은 이물질이 많이 함유되어 있을 뿐만 아니라 경제성을 갖는 재생기술의 부재로 공급을 제대로 하지 못하고 있다. 따라서 간단하면서도 경제적인 방법으로 농업용 멀칭 폐비닐을 재활용한 각종 산업용 자재 및 그 중간원료의 제조 기술개발이 절실히 요구되고 있는 시점에서 pilot plant를 설치하여 운전하였다. 여기에 그 결과 및 무기질의 첨가에 의한 PE재질의 물성 향상에 관한 실험 내용을 소개한다.

2. 연구방법

2.1 발생량 조사 및 성분 분석

국내 농업용 폐비닐의 발생량 및 수거처리 체계에 따른 적체량 등을 조사하였다. 2003년도 현황은 Fig. 1에서 보는 바와 같다.

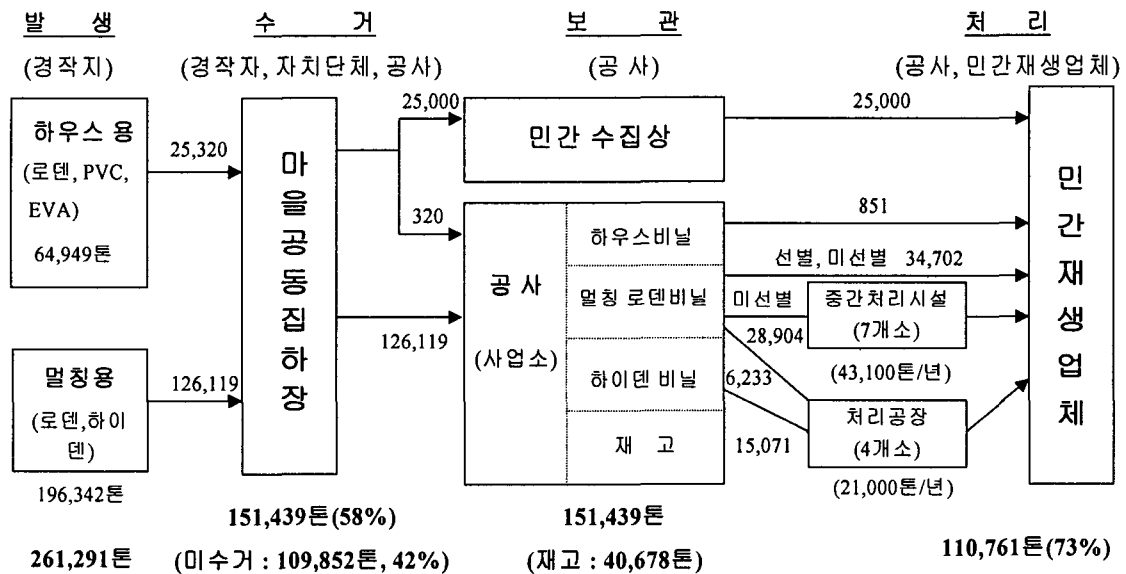


Fig. 1. 농업용 폐비닐의 발생경로 및 발생량

한편 경작지에서 수거되는 농업용 멀칭 폐비닐의 성상은 지역별, 작물별 차이는 있으나 LDPE의 경우 이물질 40%, 수분 42%, PE 순분 19% 수준이며, LDPE의 경우는 이보다 더 열악하여 이물질 47%, 수분 42%, PE 순분 11% 수준이다.

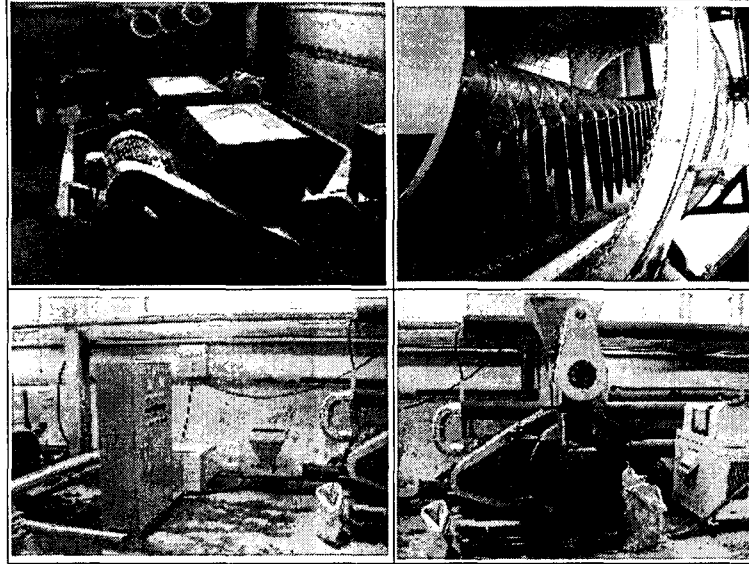


Fig. 2. Apparatuses in the pilot plant

2.2 Pilot plant 운전

한국환경자원공사 시화공장 창고동에 간이 습식공정을 통한 재생원료 시험제조를 위하여 pilot plant를 가동하였다. 이 pilot plant 내에 강제식 간이세척기, 고속충격식 회전분리기, 열풍식 건조기, 마찰식 압착성형기 등을 설치하여 6개월 이상 운전하였다. 주요 장비의 모습은 Fig. 2와 같다.

2.3 무기질 첨가 실험

무기질 첨가에 의한 PE재질의 물성 향상에 관한 분석을 실시하였다.

2.4 연구 목표 및 범위

일련의 연속적 연구에서의 궁극적인 연구 목표는 경제적인 방법에 의한 멀칭용 폐비닐로부터 중간원료 및 각종 최종 산업자재들의 개발을 망라하고 있으나 이번 발표에서는 그 범위를 간단한 습식공정을 통한 멀칭용 폐비닐의 우수한 중간원료 제조기술에 국한하기로 한다. 공정별 목표점은 Table 1에서 보는 바와 같다.

Table 1. Main R&D targets in the new process

Stages	Existed	New	Advantages of New Process
Pretreatment	Low Speed Shredding	Low Speed Shredding	-
Washing	Precipitation	Scrubbing	Higher Efficiency
Separation	None	High Impact in a Rotating Trommel	Simple
Dewatering · Drying	Screw Press	Air Blowing	Higher Efficiency
Pelletizing	Extruding	Forming by Friction	Energy Saving

3. 연구개발결과

3.1 세척공정

강제식 간이세척기를 이용한 세척효율은 Table 2에서 보는 바와 같으며 주목할 만한 관찰사항은 아래와 같다.

Table 2. Washing effect of the scrubbing washer

Components	Before(%)	After(%)	Change(%p)	Remarks
Soil	70.3	29.1	-41.2	
PE	29.7	70.9	+41.2	

(1) 드럼 밑면이 물의 표면으로부터 10cm 깊이로 들어가 구동함으로 과부하는 발생할 여지가 없다. 그러나 폐비닐이 길어 드럼에 말리거나 흐름에 문제가 발생하지 않도록 설계되어야 한다.

(2) 세척대상 비닐 칩이 너무 작으면 비닐 칩이 수면위에 흐르지 않고 떠 있는 상태가 되어 세척을 어렵게 함으로 세척 대상 비닐은 최소 50mm에서 최대 500mm정도가 적당할 것으로 보인다.

3.2 분리공정

이번 습식공정의 핵심공정으로 실험에 사용된 고속충격식 분리기의 개념도는 Fig. 2에서 보는 바와 같다.

한편 분리기의 운전결과는 Table 3에서 보는 바와 같으며 최적 운전조건 도출에 관한 결론은 아래와 같다.

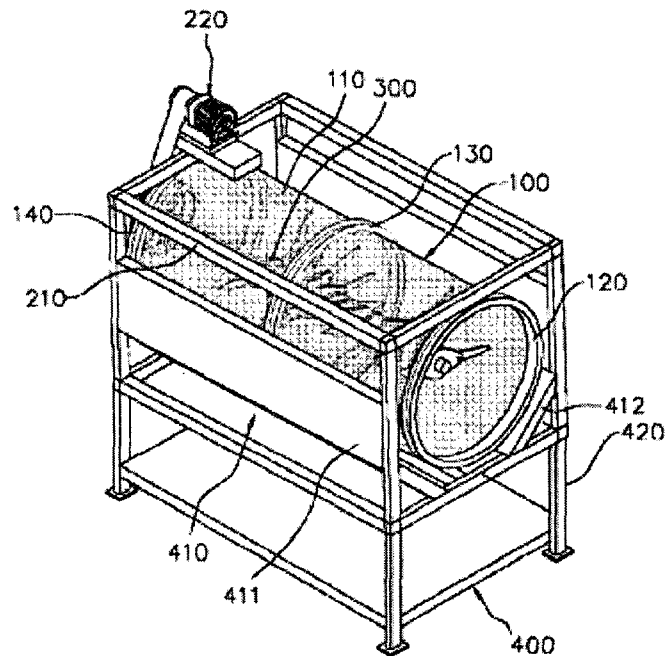


Fig. 3. Concept drawing of the rotating separator

(1) 트롬멜형 고속충격식 분리기는 강제식 간이세척기에서 분리되지 않은 이물질을 분리하는 효과가 뛰어나 수분을 제외한 기준으로 페비닐의 수분을 94%까지 향상시킬 수 있었다.

(2) 분리기 내의 각종 조건, 즉 경사도, 털개의 속도, 트롬멜의 회전방향 등에 의해서 분리효과가 크게 달라질 수 있어 최적조건에서 운전하는 것이 중요하다.

(3) 투입 비닐의 길이는 최장 70cm 이내가 적당하다.

Table 3. Separation effect of the rotating separator

Components	Before(%)	After(%)	Change(%p)	Remarks
Moisture	78.0	60.4	-17.5	
Soil	6.4	2.6	-3.9	
PE	15.6	37.0	+21.4	

3.3 건조공정

성형이 유리한 5% 이내의 함수율 확보를 위해 열풍건조방식을 도입하였다.

건조효율은 열풍건조장치의 배관 길이, 관경 그리고 열풍의 온도 등에 따라 매우 달라지므로 pilot plant에서 단계별 건조효율을 논하는 것은 의미가 크지는 않아 보인다. 다만 아래 Table 4와 같은 조건에서 3차례 순환송풍을 시킨 뒤 건조효율을 측정한 결과 수분이 5% 이하로 감소되었던 것을 확인할 수 있었다.

Table 4. Specifications of the blowing dryer

Items	Specification
Power	Turbo-fan : 7.5KW, Heater : 80KW
Type	Enforced Blowing by Heated Air
Pipe Used	Total Length : 50m(Insulation : 30m), Ø : Ø150mm
Air Pressure	Max. 500mmAq
Air Velocity	Max. 14m/sec
Air Quantity	Max. 15m ³ /min
Air Temperature	Max. 150℃ in the heater

한편 효과적인 건조에 관한 결론은 아래와 같다.

(1) 비닐표면의 수분 증발은 열풍에 접하는 표면적, 체류시간, 열풍온도, 풍속 등의 요인에 의해 결정된다. 비닐의 체류시간을 높이면 건조는 매우 효과적일 수 있으나 단위시간당의 건조량이 적어지거나 배관에 막힘 현상이 생길 수 있다.

(2) 배관 초반에 방해판을 설치하거나 말단에 사이클론을 설치할 경우 건조효율이 팔목하게 증가하리라 예상된다.

Table 5. Effect of the pressing pelletizer

Components	Before(%)	After(%)	Change(%p)	Remarks
Moisture	4.1	0.8	-3.3	
Soil	2.4	2.5	+0.1	
PE	93.5	96.7	+3.2	

3.4 성형공정

용융압출기를 이용할 경우, 과도한 에너지는 물론 재생원료의 탄화(炭化)로 인한 품질의 저하, 재생품의 흑화(黑化) 등 단점이 있다. 따라서 보다 경제적이며 개선된 성형방식인 마찰식 압착성형기를 폐비닐(PE)에 적용하여 실험을 한 결과는 Table 5에서 보는 바와 같다.

3.5 무기계 충전재의 배합에 따른 영향

1) 인장시험 결과

위의 공정으로부터 처리된 멀칭용 폐비닐 칩을 이용하여 이들 응용분야를 검토하기 위하여 무기계 충전재인 탄산칼슘과 fly ash를 이용하여 재생 폐비닐 칩과 비율별로 배합하여 사출형 시험편을 제조하여 물성을 조사하였다.

이들 중에서 먼저 인장시험을 실시하였다. 이들 시험은 KSM 3006 2호형 시험편을 제조하여 이들 시험규격에 의한 시험을 실시하였다. 이들에 대한 결과를 인장강도와 탄성을 값들의 변화를 아래의 Fig. 4와 5에 각각 나타내었다.

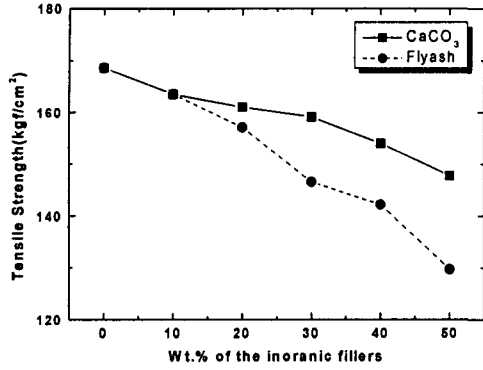


Fig. 4. Tensile strength behaviors by inorganic CaCO₃ and fly ash

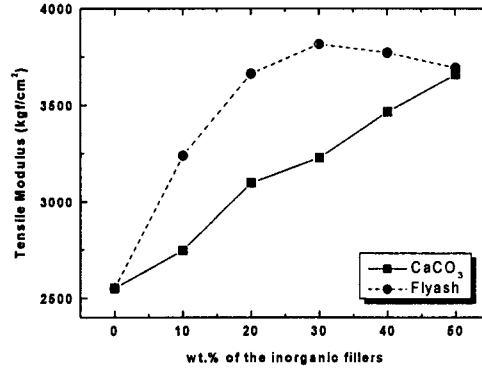


Fig. 5. Tensile modulus behaviors by inorganic CaCO₃ and fly ash.

2) 굴곡시험 결과

KSM 3008 시험 규격에 의해 무기충진재의 배합비율에 따른 굴곡강도 및 탄성율의 변화를 살펴보았다. 그 결과는 Fig. 6과 7에서 보는 바와 같다.

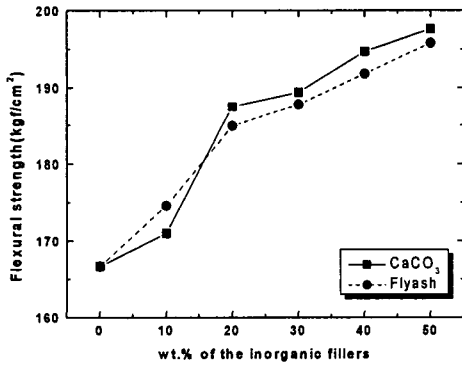


Fig. 6. Flexural strength behaviors by inorganic CaCO₃ and fly ash.

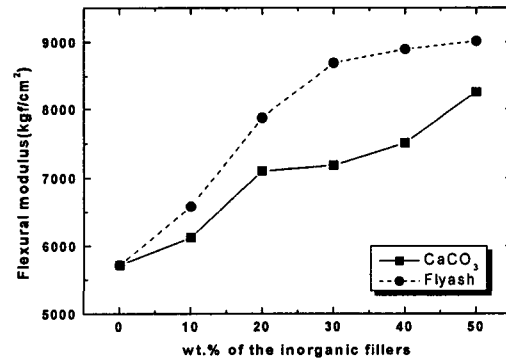


Fig. 7. Flexural modulus behaviors by inorganic CaCO₃ and fly ash.

3) 충격시험 결과

Izod 충격시험은 KSM 3055에 의한 규격대로 실시하였다. 이들 결과를 Fig. 8에 나타내었

다. 이들 결과로부터 fly ash는 충격강도에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

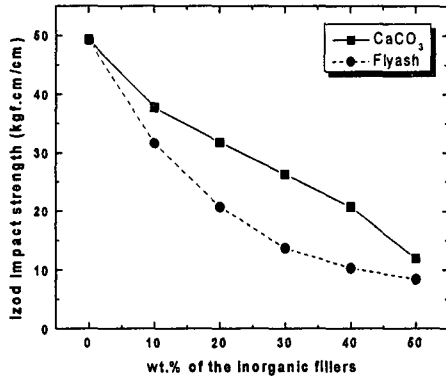


Fig. 8. Izod impact strength behaviors by inorganic CaCO₃ and fly ash

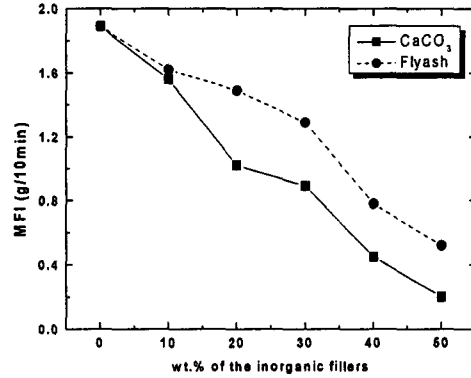


Fig. 9. MFI behaviors by inorganic CaCO₃

4) MFI 시험 결과

무기 충전재의 배합비에 따른 용융흐름지수의 변화를 고려하여 MFI의 값을 조사하였다. 이들 결과는 Fig. 9에 나타내었다. 구(球)의 형상을 지니는 fly ash의 경우가 탄산칼슘의 경우보다 흐름성이 양호한 것으로 나타났다.

4. 기술개발 효과 및 적용분야

4.1 기술개발 효과

기존의 농업용 멀칭페비닐 재생공정을 대체할 경우, 시설에 요구되는 부지는 약 57%, 시설에 소요되는 장치비는 1/3 수준에 불과할 것으로 예상된다. 그리고 기존시설과 대비하여 감가상각비, 인건비 그리고 동력비 등에서도 50% 수준 이하로 소요될 것으로 예상된다.

뿐만 아니라 지역별로 소규모 시설의 건설이 용이하여 멀칭 페비닐을 수거하여 장거리로 이동을 하지 않아도 되므로 이에 소요되는 물류비용의 절약은 물론 용수 등의 사용량 절감에 의한 2차 환경오염 부하도 감소된다.

또한 각종 무기재질의 적정량 첨가에 의해 PE 재질로써의 물성이 향상되는 것을 확인할 수 있어 전자재 같은 특수용도별 주문형 원료의 공급도 가능하리라 판단된다.

4.2 적용분야

적용분야는 기존의 각종 농업용 멀칭 폐비닐 재생공장의 대체는 물론, 지역별 소규모 멀칭 폐비닐 재생시설의 수요에 부응할 수 있으며 또한 주변국의 수요에 대응하여 기술을 수출할 수도 있을 것으로 보인다.

5. 결론 및 향후 방향

다량으로 발생되어 많은 양이 처리되어지지 못한 채 방치되고 있는 농업용 멀칭 폐비닐도 고유가가 지속되면서 자산으로 가치가 크게 부각되고 있다. 지금까지 적절한 재활용기술의 개발이 소홀하였지만 향후 대량 용처의 꾸준한 개발과 함께 간편하면서도 경제적인 재활용 기술을 발전시키고 물성을 향상시키는 것을 체계화시켜 나가면 모든 농업용 폐비닐이 자산으로써 그리고 자원으로써 자리매김하게 될 것이다. 따라서 본 기술개발은 이러한 요구에 하나의 해답이 될 수 있으며 재활용을 통한 순환사회 구축이라는 시대적 소명에도 부응하리라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 차세대 핵심환경기술개발사업의 연구비 지원으로 수행된 것의 일부이며, 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 한국환경자원공사, 2004, 내부자료
2. 김혜태: 2001, 풀어 쓴 재활용공학, 엔트로피와 리사이클링, 수자원환경신문사, pp 36-45
3. J. Scheirs: 1996, The Polymeric Materials Encyclopedia, (Ed. J. Salamone) CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, p 6063
4. C. Llop and A. Perez: 1992, Die Makromol. Chem., Makromol. Sym., (Ed. Heitz), 57, p 115
5. J. Scheirs, S. W. Bigger, and O. Delatycki: 1991, J. Polym. Sci., Polym. Phys. Ed., 29, p 79
6. 우복균: 1998, 최신플라스틱재료, 대광서림, p 236
7. J. Scheirs: 1998, Polymer Recycling, John Wiley and Sons, p 183