

농촌 폐비닐 재활용 공정에서의 에너지 절약

심성훈, 김우현, 길상인, 윤진한, 정상현, 안국영
한국기계연구원

Saving of Energy in a Recycling Process for Waste Mulching Vinyl

S. H. Shim, W. H. Kim, S. I. Keel, J. H. Yun, S. H. Jeong, and K. Y. Ahn
Korea Institute of Machinery & Materials

1. 서론

국내에서 농업용으로 사용되는 폐비닐의 수거율은 2000년에 66% 수준으로 64,673톤이었다. 수거량의 30% 가량은 흙 등의 이물질로 순 폐비닐의 수거량은 45,000톤으로 추정되고 있다. 2001년에는 전국에서 발생한 농업용 폐비닐은 모두 238,000톤이며 이 중 51%인 121,000톤만이 수거되어 적정 처리된 반면, 나머지 49%인 117,000톤은 불법 소각 또는 매립되었거나 방치되고 있는 실정이다. 이는 폐비닐의 발생량에 비해 처리시설이 크게 부족한 것이 한 원인으로써 2002년 상반기 현재 폐비닐 중 처리되지 못하고 있는 재고량이 328,000톤에 이르며 자원재생공사가 확보하고 있는 폐비닐의 처리능력은 2002년 폐비닐 수거목표량(128,000톤)의 약 25% 수준이므로 이의 확충을 위하여 건식공정으로 중간처리를 시도하고 있다. [1,2] 폐비닐 재생을 위한 습식공정은 이물질 제거를 위해 2~3차에 걸쳐 세정공정을 거치므로, 이 과정에서 발생하는 폐수 처리의 문제와 경제성 감소로 인해 폐비닐을 처리한 재생품이 가격 경쟁력을 가지지 못하며 적자운영의 원인이 되고 있으며, 보다 재활용 단계에서 저렴한 건식공정의 필요성이 대두되고 있다.[3-5]

본 고에서는 비용이 많이 소요되는 습식공정을 지양하고 세척과정이 없는 건식공정으로 폐비닐을 보다 저렴하게 재활용할 수 있는 기술을 개발하기 위한 연구의 일부를 발췌하여 개재하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

폐비닐에 부착된 이물질을 세척하지 않고 대형의 이물질만 자연 이탈된 상태에서 투입, 가열하여 열분해 및 용융 압출을 통하여 원료물질로써 재활용하기 위한 공정의 설계 및 운전 인자를 도출하기 위하여 폐비닐을 시간당 약 8kg 정도 처리할 수 있는 실험장치를 설계하여 제작하였다. 스크류의 외경은 60mm이며 산과 골의 폭은 모두 15mm로 하였으며, 산의 깊이는 8mm이므로 스크류의 내경은 44mm이다. 투입부에서부터 배출구까지의 총 길이는 1,520mm이며 실린더의 외경은 240mm이다. 이 실린더는 2kW 용량의 밴드 히터(band heater)로 가열하도록 하였으며, 실린더 표면 하 5mm 위치의 온도가 최대 320℃까지 조절할 수 있도록 하였다. 그림 1에 장치의 사진을 나타내었다.

2.2 실험방법

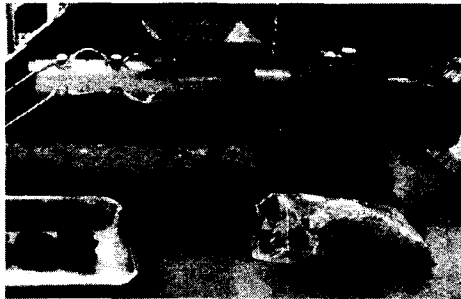
그림 2에서 보는 바와 같은 수집된 농업용 폐비닐을 대형 유압 파쇄기로 파쇄하여 이 과정에서 흙 등의 이물질의 일부가 자연 이탈된 상태로 이물질과 부착수분의 함량 및 원소분석을 수행하였다. 시료는 3종을 채취하여 그 결과를 평균하였다. 우선 각 시료의 중량을 측정 후, 조성의 변화가 발생하지 않도록 강제 건조하지 않고, 통풍이 잘 되는 곳에서 충분히

히 자연건조시킨 후에 다시 중량을 측정하여 수분 함유율을 산정하였다. 이 시료는 다시 세척과정을 통해 부착 이물질을 완전히 제거한 후에 중량을 측정하여 이물질의 함유량을 측정하였다. 이물질이 제거된 시료는 일부를 채취하여 2mm이하의 크기로 잘게 자른 후에 C, H, O, N, S의 원소 분석을 행하였다. 원소 분석 결과는 Table 1과 같다. 전체 시료에서 질소(N)과 황(S)성분은 아주 미미한 양으로 분석되었으며, 평균 수분이 25.66%, 흙 등의 이물질이 평균 18.34% 부착되어 있었다.

본 연구에서는 수분이 부착되어 있는 상태의 건조 전 폐비닐과, 수분을 완전히 건조시킨 후의 건조 후 폐비닐 및 인위적으로 수분 함량을 조절한 폐비닐에 대하여 200~200℃구간에서 열분해 압출실험을 수행하면서 체류시간, 히터 소요동력, 수율을 측정하여 재활용 과정에서 에너지 절감을 위한 운전인자를 분석하였다.

<표 1> 폐비닐의 분석 결과 (세척 건조 전)

구분 \ 조성	C	H	O	N	S	기타	H ₂ O	이물질	계
평균 wt%	45.45	7.71	0.24	0.01	0.00	2.60	25.66	18.34	100.00



[그림 1] 실험장치



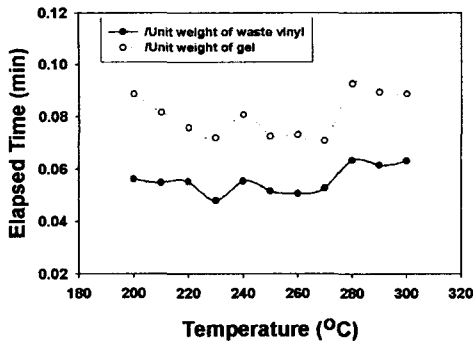
[그림 2] 파쇄전 폐비닐 형태

3. 실험 결과 및 고찰

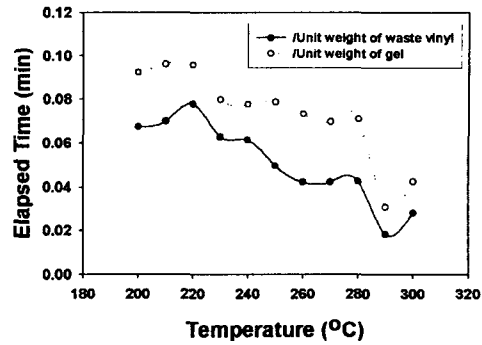
3.1 건조 전 폐비닐

수분과 흙 등의 이물질이 부착된 그대로 건조하지 않은 상태의 폐비닐을 대상으로 가열, 열분해 압출 실험을 수행하면서 체류시간, 소요전력, 수율을 측정하여 도시한 결과를 그림 3에서 그림 6에 게재하였다. 체류시간이나 소요 전력은 각각 투입량 및 배출된 질량으로 나누어 g당 단위 값을 표시하여 서로 비교가 가능하도록 하였다. 먼저 그림 3을 보면 회전수 5rpm에서 체류시간은 200℃~300℃에서 뚜렷한 변화가 나타나지 않는다. 회전수를 15 rpm으로 높인 그림 4에서 체류시간은 온도의 상승에 따라 감소하는 경향이 나타난다. 여기서 빠른 회전수에도 불구하고 온도가 낮은 부분에서는 5rpm의 경우보다 체류시간의 절대량이 오히려 큰 특이한 경향이 나타나는데, 이는 회전이 빨라지면 온도가 낮은 경우 투입부에서 부착수분이 압축 배출되면서 실린더와 스크류 사이에서 미끄러짐(slip)이 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 실험 시 투입부에 수분이 다량 배출되면서 투입이 원활히 이루어지지 않는 현상이 관찰되었다. 온도가 상승하면 미끄러짐이 감소하고 체류시간도 동시에 감소함을 보여주고 있다.

다음, 가열용 히터의 소요 전력 변화 경향을 보면 먼저 그림 5의 회전수 5rpm에서 소요 전력은 단위 투입량에 대해 약 0.4Wh에서 온도가 상승함에 따라 약 0.7Wh까지 증가하고



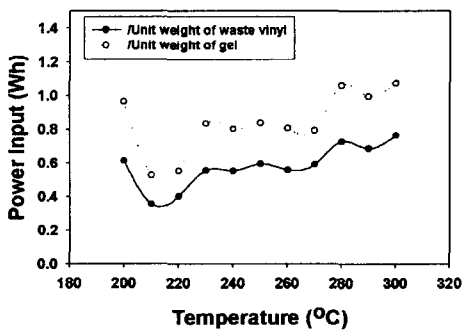
[그림 3] 온도에 따른 체류시간의 변화 (건조 전, 회전수 5 rpm)



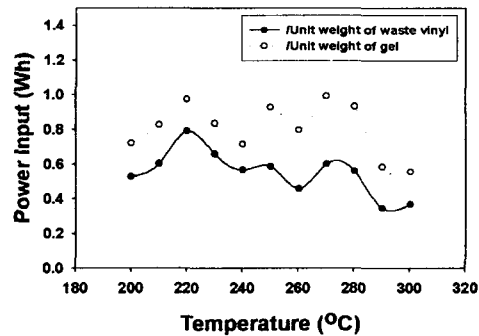
[그림 4] 온도에 따른 체류시간의 변화 (건조 전, 회전수 15 rpm)

있다. 이는 낮은 회전수에서는 투입부에서 미끄러짐이 발생하지 않아 체류시간이 거의 전 온도대에 걸쳐 일정하게 나타난 그림 3의 결과에 비추어 설정 온도의 상승에 따라 히터의 소요 전력이 증가한 당연한 결과로 볼 수 있다.

반면 그림 6에서와 같이 회전수가 15rpm으로 증가하면 운전 온도의 상승에 따라 소요 전력이 약하게 감소하는 경향을 보인다. 이는 온도의 상승에 따른 소요 전력의 증가보다 체류시간의 감소 효과가 더 큰 때문으로 판단된다. 즉, 회전수를 높일 경우에는 운전온도를 동시에 높이는 것이 전체 전력 소모를 줄일 수 있는 것이다.



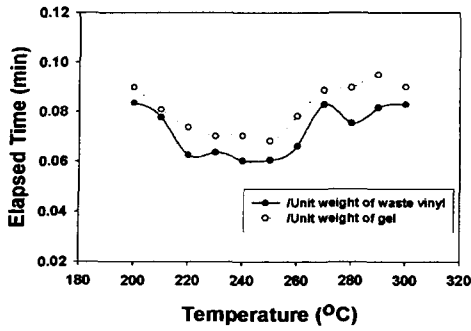
[그림 5] 온도에 따른 히터 소요전력의 변화 (건조 전, 회전수 5 rpm)



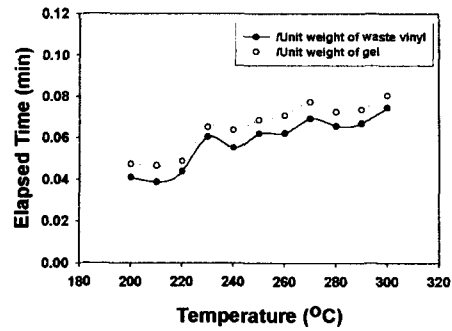
[그림 6] 온도에 따른 히터 소요전력의 변화 (건조 전, 회전수 15 rpm)

3.2 건조 후 페비닐

수분은 완전히 건조되고 흙 등의 이물질은 그대로 부착된 상태의 페비닐에 대하여 실험한 결과를 보면, 먼저 그림 7의 회전수 5rpm에서 체류시간은 온도의 증가에 따라 감소하였다가 다시 증가한다. 즉, 저온에서 낮은 유동성, 고온에서는 높은 점도로 인한 체류시간의 증가로 판단된다. 건조된 상태이므로 단위 투입량 당이나 단위 겔 당의 체류시간이 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나, 그림 8에서 보는 바와 같이 회전수가 15 rpm으로 증가하면 운전 온도가 낮은 조건에서는 체류시간이 5rpm에서보다 현저히 작으나, 온도의 증가에 따라 체류시간이 증가하여 거의 비슷해지는 경향을 보인다. 이는 온도의 상승에 따른 점도의 증가가 체류시간에 보다 큰 영향 인자로 작용한다는 것으로 설명할 수 있다. 이 경향은 건조 전의 페비닐 실험 결과와는 정반대로 페비닐을 완전히 건조하여 투입하는 것이 에너지 절약



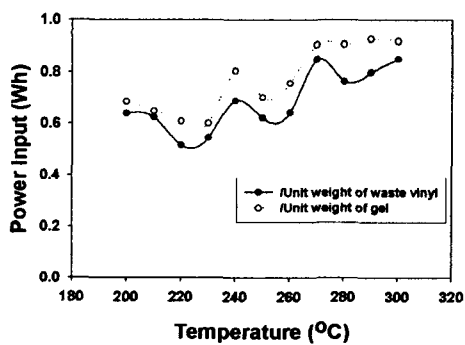
[그림 7] 온도에 따른 체류시간의 변화 (건조 후, 회전수 5 rpm)



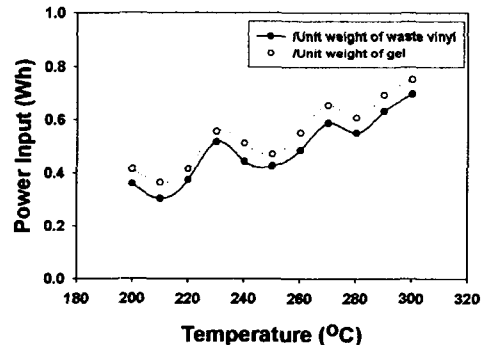
[그림 8] 온도에 따른 체류시간의 변화 (건조 후, 회전수 15 rpm)

측면에서 유리한 결과만을 제공하지는 않는다는 점을 시사한다. 이를 다시 히터의 소요전력에 대해서 비교해 보면, 그림 9의 5rpm에서는 건조전과 마찬가지로 온도의 증가와 히터 소요 전력의 증가는 거의 비례하는 경향을 가진다. 그림 10의 15 rpm에서는 소요 전력의 절대량은 작으나 건조전의 경우와는 반대로 온도의 상승에 따라 증가하고 있으며 체류시간의 경향과 동일하다. 즉, 체류시간이 소요전력의 중요한 영향인자임을 알 수 있다. 건조 후의 폐비닐은 운전 온도가 높아질 경우 체류시간을 오히려 증가시키는 부정적인 면이 있으므로 적절한 수준의 수분 함유를 이용할 수도 있을 것이다. 다만 수분의 함유는 증발하면서 가스를 증가시키고 후단에서 응축되게 되므로 종합적으로 소요 에너지와 생산 효율 등을 고려하여 최적의 수분 함유율을 결정하여야 할 것이다.

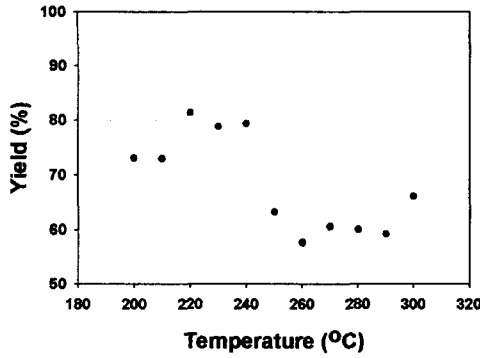
다음 이 건조 전후의 폐비닐에 대하여 회전수 15rpm에서 온도 변화에 따라 투입량 대비 생산된 겔의 비율로 정의된 수율의 변화를 나타낸 그림 11과 그림 12를 보면 먼저 건조 전의 폐비닐에서는 220°C 부근에서는 수율이 80% 정도로 높으나, 250°C 이상이 되면 수율이 60% 수준으로 감소한다. 이 회전수에서 온도의 상승 시에 나타나는 체류시간의 감소에도 불구하고 수율이 감소하는 것은 회전수의 증가에 의한 교반효과로 인해 온도가 높아지면서 열분해 가스화 양이 증가한 때문으로 판단된다. 이 교반 효과의 증가는 온도의 상승에 따른 수분의 빠른 증발과도 관련이 있을 것으로 예측되는데 가열되어 불안정해진 폐비닐 분자 사이에 팽창한 수증기 분자의 침투가 역시 열분해율을 높이는 것으로 보인다. 건조 후 폐비닐의 수율은 거의 변화가 없으며 15 rpm에서 평균 89.3% 수준을 유지하였다.



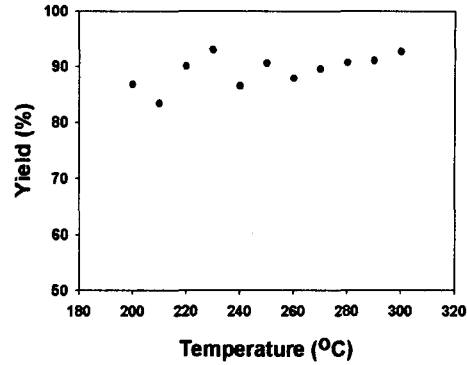
[그림 9] 온도에 따른 히터 소요전력의 변화 (건조 후, 회전수 5 rpm)



[그림 10] 온도에 따른 히터 소요전력의 변화 (건조 후, 회전수 15 rpm)



[그림 11] 온도에 따른 수율의 변화 (건조 전, 회전수 15rpm)

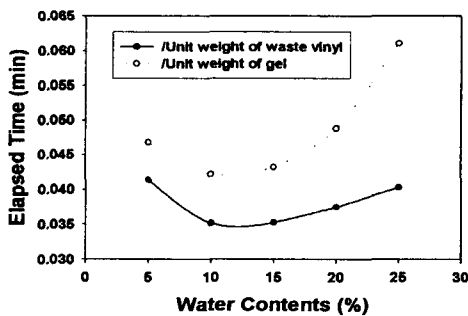


[그림 12] 온도에 따른 수율의 변화 (건조 후, 회전수 15rpm)

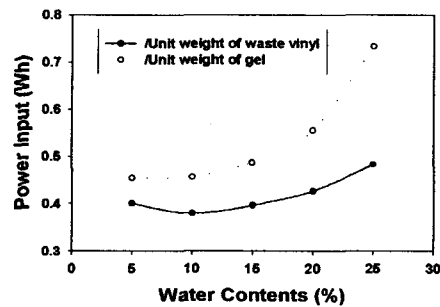
결론적으로 회전수가 15rpm으로 높은 경우가 건조후의 페비닐의 단위 겔 생산량 당의 소요 전력의 절대값이 전반적으로 가장 낮으므로 생산 효율이 가장 높은 조건은 가능한 회전수를 높이고 페비닐을 건조시키는 것이 유리하다는 것을 알 수 있다. 그러나 앞의 체류시간 결과에서 알 수 있듯이 건조 후에는 온도가 높아짐에 따라 체류시간이 길어지는 경향을 가지므로 적당한 부착수분의 유지를 통해 생산조건을 보다 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 운전 온도의 조건도 이 결과에서 볼 때, 250°C부근이 체류시간, 소요 전력 면에서 유리한 것으로 사료된다.

3.3 부착수분 함량 변화의 영향

부착수분의 영향을 분석하기 위하여 건조된 페비닐에 대해 인위적으로 수분 함유율을 변화시키면서 체류시간과 소요전력 및 수율을 측정하였다. 수분 함유율은 0에서 25%까지를 대상으로 시료를 제조하여 사용하였다. 회전수는 15 rpm, 설정온도는 250°C로 하여 실험하였다. 먼저 그림 13에서 체류시간은 수분 함유율 10%에서 15% 정도의 범위에서 가장 적게 나타났다. 이는 수분 함유율이 낮으면 점성의 증가로, 반대로 높아지면 투입부에서의 미끄러짐의 증가로 인해 체류시간이 길어지기 때문인 것으로 판단된다. 그림 14의 소요 전력을 보면 체류시간과 거의 같은 경향으로 10% 대에서 최소 전력 소요를 보인다는 것을 알 수 있다. 그림 15의 수율에서는 당연히 함수율의 증가에 따라 수율이 감소하지만 15%까지는 수율의 감소가 완만하다가 20%를 넘어서면서 수율이 급격하게 감소함을 보인다. 열분해와 압출을 통해 생산된 재활용 원료물질인 겔의 비중량은 1.4 g/cm^3 정도이다



[그림 13] 수분함량에 따른 체류시간의 변화 (온도 250°C, 회전수 15 rpm)



[그림 14] 수분함량에 따른 히터 소요 전력의 변화 (온도 250°C, 회전수 15 rpm)

이 결과에서 전반적으로 수분 함유율이 낮은 쪽이 체류시간이나, 소요 전력, 수율 등 운전 효율을 고려한 생산성에서 우수하다는 것을 알 수 있다. 그러나, 완전히 건조된 상태보다는 10% 정도의 수분이 포함된 시료에서 체류시간 및 소요 전력이 낮게 나타났음을 감안하면, 앞에서 언급한 바와 같이 수분이 폐비닐로부터 생성된 젤과 실린더나 스크류 사이에서 윤활 작용을 하여 소요 동력을 줄이는 긍정적인 효과가 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

이물질이 제거되지 않은 에너지 절약형 농업용 폐비닐의 건식처리 공정 개발을 위하여 열분해 압출 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 건조되지 않은 폐비닐의 경우에 체류시간은 회전수가 5 rpm으로 낮은 경우에는 온도에 따른 변화가 거의 없으나 회전수가 15 rpm으로 높은 경우 저온에서는 수분 배출에 의한 미끄러짐의 발생으로 체류시간이 길어지고 온도가 상승하면서 수분의 빠른 증발로 인해 감소하며, 소요 전력의 경우에도 회전수가 높은 경우 온도의 상승에 따라 역시 감소하는 경향을 보인다. 그러나, 건조 후의 폐비닐에서는 회전수가 낮은 경우에는 저온에서 유동성이 낮아 체류시간이 길다가 온도의 상승에 따라 감소 후 보다 높은 온도에서는 점도의 증가로 다시 증가한다. 즉, 유동성의 변화가 온도에 의존하며, 부착 수분이 어느 정도 윤활작용을 하는 것으로 판단된다. 소요 전력의 변화 경향은 체류시간에 거의 의존하므로 체류시간을 감소시키면서 미끄러짐이 발생하지 않는 구조의 설계가 필요하다.

2) 전반적으로 수분 함유율이 낮은 쪽이 체류시간이나, 소요 전력, 수율 등의 운전 효율을 고려한 생산성에서 나은 결과를 보이나, 10% 정도의 수분이 포함된 시료에서 가장 체류시간 및 소요 전력이 낮은 것으로 보아, 소량의 수분은 열분해나 윤활작용 등으로 에너지 절약 효과를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 농림부에서 지원하는 농림기술개발사업으로 수행된 연구 결과의 일부임을 알려드립니다.

참고문헌

1. 환경관리연구소, "2002 산업환경총람", 2002
2. 한국자원재생공사 인터넷 홈페이지.
3. 김혜태, 이형식, 조영수, "농업용 멀칭 플라스틱 필름 건식 세척을 위한 pilot plant 시험 운전 결과", 대한환경공학회 춘계학술발표회 논문집(II), 2001, p.55~58.
4. 황택성, 김영수, "농업용 폐플라스틱 필름의 열분해 및 고온 원심분리에 의한 재생왁스의 제조", 한국폐기물학회지, 2003, 20(3), p.222~230.
5. 황인희, 김승도, 김태동, 이동훈, "농업용 플라스틱 필름의 열분해 동역학에 관한 연구", 한국폐기물학회지, 2003, 20(4), p.354~368.