

## Air Table 을 이용한 입상플라스틱 혼합물로부터 PVC의 건식분리

\*宋泳俊 · 四元弘毅

産業技術總合研究所 環境調和技術研究部門 粒子分離Group

### Removal of PVC from Granular Plastic Mixture by Using Air Table

\*YoungJun Song and Hiroki Yotsumoto

Particle Separation Group, Research Institute for Green Technology, National Institute of  
Advanced Industrial Science and Technology, JAPAN

#### 요 약

Air table을 이용해서, 입상플라스틱 혼합물로부터 PVC를 제거 분리하는 연구를 행하였다. Air table상에서 플라스틱이 어떠한 운동을 하는가 연구하고, PVC 10%와 PE 90%의 인공혼합물을 가지고 선별 분리시험을 행하였다. 이 연구로부터 선별 최적조건은, 9.2 Hz의 Frequency, 1.05 m/sec의 바람속도, 7.5 End-slope, 1 side-slope, 450 g/min의 Feeding speed 등이었다. PE-PVC 혼합물에서 99.96%의 PE를 98.9% 얻을 수 있었고, 88.7%의 PVC를 99.6% 얻을 수 있었다.

#### ABSTRACT

A study was conducted in order to remove Poly vinyl chloride (PVC) from granular plastic mixture by using Air Table. The motion of plastic particle on Air Table was investigated, and separation test on the plastic mixture with the mixing ratio of PVC 10% and PE 90% was conducted. At the optimum condition obtained from this study, that is frequency of 9.2Hz, air velocity of 1.05 m/sec, End-slope of 7.5°, Side-slope of 1°, Feeding speed of 450 g/min, etc., we could separate the PE-PVC mixture to PE (99.96% grade and 98.9% yield) and PVC (88.7% grade and 99.6% yield).

**Key words:** dry separation, granular plastic mixture, PVC, PE, air table

#### 1. 서 론

1999년도 일본의 폐플라스틱 발생량은 976만톤이며 이중 유효이용된 폐플라스틱량은 452만톤 정도이고 재사용된 134만 톤을 제외한 318톤은 발전소각, 열이용소각, 고형연료, 고로연료 등의 열에너지의 회수 형태로 이용되었다.<sup>1)</sup> 이들 열에너지 회수 형태의 유효이용은 폐플라스틱에 대한 잠재 수요량이 막대하여 고로연료(또는 환원제)로서의 잠재 수요량만 해도 연간 2000만톤 정도로 추정되고 있다. 폐플라스틱을 고로연료로 사용할 경우는 올레핀계인 PE와 PP가 가장 적

당하고, 염소계플라스틱(대부분 PVC이므로 이하 PVC로 약함)을 함유하는 폐플라스틱을 연료로 사용할 경우는 설비의 부식등의 문제가 발생하기 때문에 연료용 폐플라스틱내의 PVC 함량을 1% 이내로 제한하는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다. 따라서 경제적인 방법으로 혼합폐플라스틱 내의 염소계플라스틱을 제거하는 것이 가능하다면 폐플라스틱의 재활용은 비약적인 발전을 보일 것으로 기대된다. 이러한 필요성에 부응하여 부침분리, 중액선별, 부유선별, 정진선별등의 기존의 선광기술을 응용한 선별기술들이 연구되고 있다.<sup>2)</sup> 현시점에서 이들 방법 중 가장 현장적용 가능성이 높은 것으로 평가되고 있는 원심력을 이용하는 연속식 부침분리의 경우에도 회수 대상 플라스틱이 PE와 PP

\* 2001년 10월 31일 접수, 2001년 11월 27일 수리

\* E-mail: yj.song@aist.go.jp

로 제한되어 회수율이 낮을 뿐만 아니라 분리공정에서 발생하는 폐수 및 슬러지의 처리가 필요하다는 단점을 갖고 있다. 따라서 보다 효율적이고 대량처리가 가능한 분리기술을 개발하기 위한 연구가 절실히 요망되고 있다.

본 연구에서는 폐플라스틱을 연료로 재활용하는데 있어서 문제가 되고 있는 폐플라스틱내에 혼입 되어 있는 PVC의 제거를 목적으로 하였으며, 먼저 Air Table 상에서의 플라스틱 입자의 운동특성을 조사한 다음 PVC90%와 PE10%의 혼합시료를 대상으로 Air Table에 의한 건식 분리에 있어서 분리효율에 미치는 Frequency, Side-slope, End-slope, Air velocity, Feeding speed 등의 영향을 검토하였다.

2. 실험방법

시료는 시판되고 있는 5 mm 두께의 회색 PVC판과 5 mm 두께의 반투명 PE판을 동일한 커터식 파쇄기에서 동일한 조건으로 5 mm 이하의 크기를 갖도록 파쇄하였다. 각 시료의 입도분포를 나타낸 Fig. 1에서 알 수 있는 바와 같이 입자의 평균입도는 3.4 mm 정도로 거의 동일하였다. 시료는 PE90%+PVC10%가 되도록 혼합하였으며, 선별산물은 물에 충분히 적신 다음 수중에서 부침분리하여 PE(비중 0.95)와 PVC(비중 1.35)를 분리하고 80°C의 건조기에서 5시간 건조한 다음 평량하여 선별시험 성적의 계산에 이용하였다.

시험 결과의 고찰에 있어서는 복잡하게 되는 것을 피하기 위하여 Deck의 왼쪽배출구로부터 나오는 경산물 중의 PE의 회수율과 거기에 포함되는 PVC의 함량 그

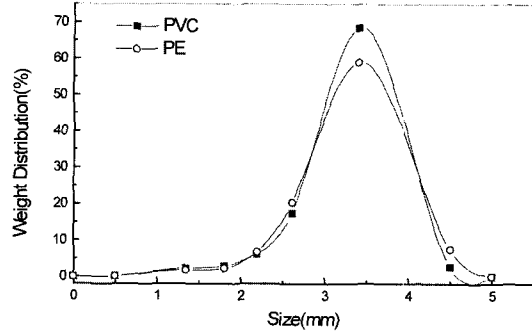


Fig. 1. Particle size distribution of samples.

리고 종합분리효율<sup>3)</sup>에 대하여 주로 고찰하였다. 각각의 계산식은 아래와 같다.

$$Y_{PE} = \frac{L_{PE}}{L_{PE} + H_{PE}} \times 100$$

여기서  $Y_{PE}$  : 경산물로부터의 PE회수율(%),  $L_{PE}$  : 경산물내 PE의 무게(g),  $H_{PE}$  : 중산물내 PE의 무게(g)

$$C_{PVC} = \frac{L_{PVC}}{L_{PVC} + L_{PE}} \times 100$$

여기서  $C_{PVC}$  : 경산물내 PVC 혼입율(%),  $L_{PVC}$  : 경산물내 PVC의 무게(g)

$$\text{종합분리효율 } \eta = \frac{Y_{PE} + Y_{PVC} - 100}{100}$$

여기서  $Y_{PVC}$  : 중산물로부터의 PVC 회수율(%)

Air Table은 Fig. 2의 SSS Dynamics사제 V-135E형을 사용하였으며 진동수 0~12 Hz, 풍속 0~5 m/sec,

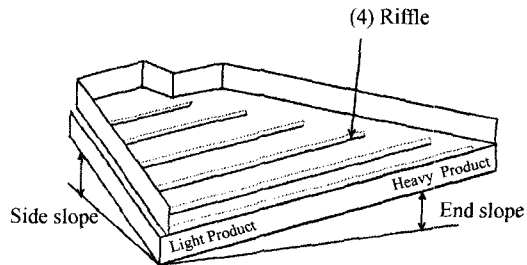
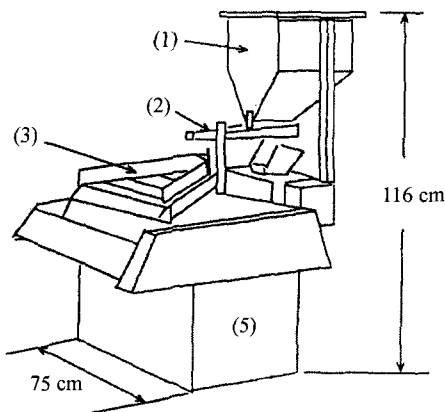


Fig. 2. Schematic diagram of air table. (1) Hopper (2) Electromagnetic feeder (3) Deck (4) Riffle (5) Control box

End-slope 0~13°, Side-slope 0~7°, Feeding speed 0~5 kg/min의 조정 범위를 갖는다.

### 3. 결과 및 고찰

분리 실험을 행하기에 앞서 먼저 deck와 입자의 운동기구를 해석하였다. deck는 수평에 대하여  $\beta$ 의 기울기(End-slope)를 갖고,  $\alpha$ 방향으로  $a \sin \omega t$ 의 정현운동을 한다( $a$ 는 진폭으로 본 연구에서는 5.2 mm가 되도록 고정,  $\alpha$ 는 45°,  $\omega$ 는 각속도). deck의 하부로부터 공기를 불어넣지 않을 경우 진동하는 deck 위의 물체는 주로 진동과 마찰력의 균형관계에 의해 그 운동방향 및 운동속도를 결정하게 된다. 즉 side-slope를 0°로 가정하고, 테크의 변위를 Fig. 3 과 같이 XY축 상으로 설정할 경우 테크의 운동은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X = a \cos(\alpha - \beta) \sin 2\pi n t$$

$$Y = a \sin(\alpha - \beta) \sin 2\pi n t$$

여기서 테크의 총운동량  $n = f$ ( $f$ 는 진동수)이다. 따라서 테크의 운동속도  $\dot{X}$ ,  $\dot{Y}$ , 및 가속도  $\ddot{X}$ ,  $\ddot{Y}$ 도 상기 식을 미분함으로써 얻을 수 있다. 이러한 운동을 하는 테크 상의  $x$ ,  $y$ 축 상에서 입자가 운동한다고 가정할 때 입자의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$m\ddot{x} = F - mg \sin \beta$$

$$m\ddot{y} = Q - mg \cos \beta$$

여기에서  $m$ 은 입자의 질량,  $g$ 는 중력가속도,  $Q$ 는 물체가 deck면으로부터 받는 수직항력,  $F$ 는 마찰력이다.

입자는 테크의 위에 있으므로  $\ddot{Y} = \ddot{y}$ , 따라서  $Q = m[g \cos \beta - (2\pi f)^2 a \sin(\alpha - \beta) \sin 2\pi n t]$ 로 나타낼 수 있다. 따

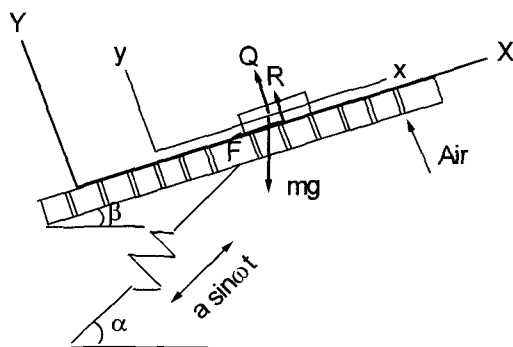


Fig. 3. Force diagram of particle on a inclined shaking deck.

찰계수를  $\mu$ 라고 했을 때  $F$ 와  $Q$ 와의 관계는

$$F = \mu Q \quad (\dot{x} < \dot{X} \text{ 일 경우})$$

$$F = -\mu Q \quad (\dot{x} > \dot{X} \text{ 일 경우})$$

와 같다. 즉 deck 상의 입자의 운동은 end-slope  $\beta$ , 입자의 질량  $m$ , 마찰계수  $\mu$ 에 의존한다고 할 수 있다. 본 연구에서는  $\beta$ 를 0~12°의 범위에서 변화시킨다. 한편,  $Q$ 보다 큰 진동강도로 deck를 진동시킬 경우 deck상의 입자는 비행→착지→후퇴(미끄러짐)→비행을 반복하게되며 이 경우에 있어서 입자의 운동은 주로 진동강도와  $\beta$ 에 의존한다.

Kluge<sup>4)</sup>는 진동하는 테크상에서의 입자의 운동속도에 대한 아래의 경험식을 제안하였다.

$$V_p = \frac{\sqrt{g}}{4\pi n} \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \cdot \sqrt{r \cdot K_c} \cdot (\phi_0 - \phi_L)^2 \cdot \sin \phi_L$$

여기서  $n$ 은 입자의 1비행시간 동안의 진동수로서 본 연구의 경우  $n=1$ 이다.  $\phi_0$ 는 착지시의 입자의 위상이고  $\phi_L$ 는 이륙시의 위상이다. 진동강도  $K_c$ 는 진동의 원심효과라고도 하며  $K_c = r\omega^2/g$ 의 관계를 갖는다. 상기의 식에 본 연구에서의 에어테이블의 운전조건중 하나인  $r=5.2$  mm,  $\alpha=45^\circ$ ,  $\beta=7.5^\circ$ ,  $\omega=57.8$ (진동수가 9.2 Hz인 경우) 등을 대입할 경우 입자의 운동속도는 9.96 cm/sec로 계산된다. 그러나 상기 조건에서 입자의 운동속도를 실측한 결과는 7.2 cm/sec 였다. 이는 상기의 경험식에서는 미끄러짐에 의한 속도저하를 고려하지 않았기 때문으로 생각된다. 이러한 자료를 토대로 테크면과 입자의 궤적을 Fig. 4에 도시하였다.

테크면의 궤적은  $Y_d = r \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\alpha + \beta)$ 로 나타낼 수 있는 반면, 입자의 궤적은 아래와 같이 구할 수

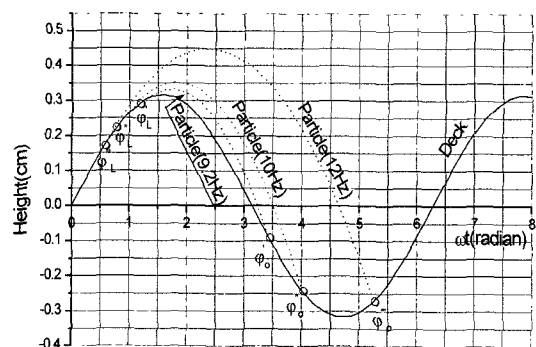


Fig. 4. Trace of Deck and Particle on Air Table in no air condition.

있다.

입자의 시간에서의 입자의 위상을  $y_p$ 라고 가정하면

$$y_p = x_p \cdot \tan\alpha - \frac{g}{2V_L^2 \cdot \cos^2\alpha} \cdot x_p^2$$

에서  $x_p = V_L \cdot \cos\alpha \cdot t$ 이고, 입자의 초기 비행속도  $V_L = r\omega \cos\phi_L$ ,

비행시간  $t = \frac{\omega t - \phi_L}{\omega}$ 의 관계에 있으므로

$$y_p = V_L \cdot \cos\alpha \cdot \tan\alpha \left( \frac{\omega t - \phi_L}{\omega} \right) - \frac{g}{2} \left( \frac{\omega t - \phi_L}{\omega} \right)^2$$

으로 표시된다.

상기 식으로부터  $V_L = 13.9$  cm/sec, 탈리점의 높이  $= r \cdot \sin\phi_L \cdot \sin(\alpha + \beta) = 0.290$  cm이므로 입자의 궤적은  $Y = 0.147\omega t^2 + 0.51\omega t - 0.11$ 로 표시된다. 또한 입자를 데크의 오른쪽 방향으로 비행시키기 위한 조건은  $K_v \geq 1$ 이므로,  $K_v = 1$  즉 입자를 오른쪽으로 비행시키기 위한 최소진동수  $F$ 와 End-slope와의 관계는

$$F = \sqrt{\frac{\frac{g}{\gamma} \cdot \cos\beta \cdot \sin(360 + \alpha - \beta)}{(2\pi)^2}}$$

로 나타낼 수 있게된다. 따라서 풍속이 0인 경우 상기한 본 연구의 조건인  $r = 5.2$  mm,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\beta = 7.5^\circ$ 에서 입자를 오른쪽으로 비행시키기 위한 최소의 진동수는 2.79 Hz임을 알 수 있다. 또한 Fig. 4의 결과로부터는 진동수가 증가할수록 1회당 비행거리도 증가함을 알 수 있다.

한편, Air Table에 공기를 불어넣는 경우에 있어서 진동deck의 하부에서부터 나오는 공기류에 의하여 물체가 받는 항력은 다음식<sup>5)</sup>으로 표현된다.

$$R = C \cdot A \cdot \rho \cdot u^2 / 2$$

여기에서 R: 공기가 물체에 미치는 항력, C: 저항계수, A: 물체의 투영면적,  $\rho$ : 공기의 밀도, u: 물체와 유체

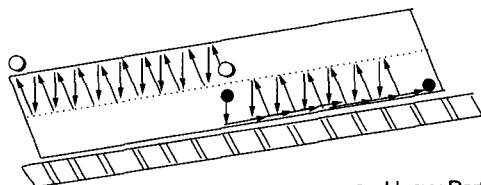


Fig. 5. Illustration for formation of fluidized bed on the deck of Air Table.

의 상대속도이다.

이러한 공기의 흐름 방향은 언제나  $\beta + 90^\circ$ 이므로 대부분의 경우에 있어서 공기의 흐름은 진동에 의한 물체의 운동에 저항력으로 작용하며 그 크기는 입자의 형상이나 공기유속에 커다란 영향을 받는다.

공기류와 진동의 영향으로 Air Table의 deck 상에 형성된 유동층 내에 있어서의 무거운 입자와 가벼운 입자의 운동을 Fig. 5의 모식도로 나타내었다. deck 상의 물체는 진동에 의한 운동과 공기류에 의한 작용을 받으므로 무겁고 투영면적이 작은 물체는 입자층 내의 하부로 이동하고 가볍고 투영면적이 큰 물체는 상부로 이동하여 2개의 층을 형성한다. 하부층의 입자는 진동의 영향을 주로 받아 deck의 오른쪽 방향으로 운동하고 상부층의 입자는 공기류의 영향을 주로 받아 deck의 왼쪽으로 이동하여 두 입자의 분리가 이루어진다.

이와 같은 특성을 갖는 Air Table에 의한 건식 분리에 있어서 분리효율을 결정하는 주요 인자로는 운전조건으로 풍속, Side-slope, End-slope, 진동수, 급광량 등을 들 수 있으며 구조조건으로 리플의 치수, 데크면의 성상 등을 들 수 있다. 그 중에서도 진동수, 풍속, End-slope이 분리효율에 가장 큰 영향을 미친다. 먼저 연구의 효율성을 위하여 진동수, 풍속, End-slope을 각각 변화시켜 입상 혼합플라스틱에 대한 분리가능영역을 조사하여 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 실험 결과에서 플라스틱 입자의 유동층은 유동화 개시 풍속  $\sim 1.2$  m/sec의 영역에서는 homogeneous fluidization<sup>6)</sup>

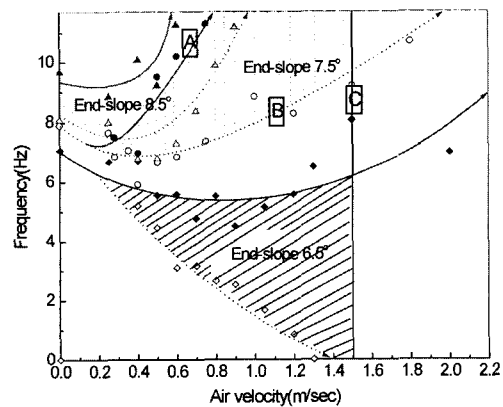


Fig. 6. Limited operating condition of Air Table for separating PVC from PE-PVC mixture; the conditions in hatched areas are available. In the case of 7.5°, End-slope, A: upper limit line, B: lower limit line, C: maximum air velocity line

상태를 유지하였지만 1.2~1.4 m/sec의 영역에서는 bubbling-slugging 상태로 전이하고 1.4 m/sec의 풍속에서는 turbulent fluidization 상태로의 전이가 시작되었으며 1.5 m/sec의 풍속에서 완전히 turbulent fluidization 상태가 됨에 따라 더 이상 입자의 분리는 일어나지 않았다. 유동화 개시 풍속은 End-slope의 기울기와 진동수가 커질수록 작아지는 경향을 보였다. 즉 End-slope이 6.5°의 경우는 유동화 개시점의 좌표가 풍속 0.22 m/sec-진동수 6.17 Hz이지만 End-slope이 7.5°가 되면 유동화 개시점의 좌표는 풍속 0.17 m/sec-진동수 7.25 Hz로 이동하고, End-slope이 8.5°이고 진동수가 8 Hz 이상이 되면 풍속에 관계없이 유동층이 형성된다. 또한, 유동층이 homogeneous fluidization 상태를 유지하는 조건 범위 내에서는 End-slope 과 진동수가 작을수록 그리고 풍속이 클수록 분리가능 영역이 넓어지는 경향을 보였다. 그림의 결과로부터 End-slope이 7.5°인 경우에 있어서 분리가능 영역은  $x$ =풍속,  $y$ =진동수 라고 할 때  $y=3.785x^2-3.586x+7.92$ 의 방정식을 갖는 상한곡선(곡선 A)과  $y=15.736x^2-6.16x+7.92$ 의 방정식을 갖는 하한곡선(곡선 B) 그리고 풍속 상한선인  $x=1.5$ (직선 C)의 직선 등 3선분으로 둘러 쌓인 부분임을 알 수 있다.

다음으로 예비 실험 결과 가장 양호한 분리성적을 나타낸 조건인 진동수 9.2 Hz, 풍속 1.05 m/sec, End-slope 7.5°, Side-slope 1°, Feeding speed 450 g/min 그리고 리플의 높이 10 mm의 조건을 표준조건으로 하고 해당인자 만을 소정의 범위에서 변화시켜 분리효율에 미치는 그 영향을 조사하여 결과를 Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11 에 각각 나타내었다.

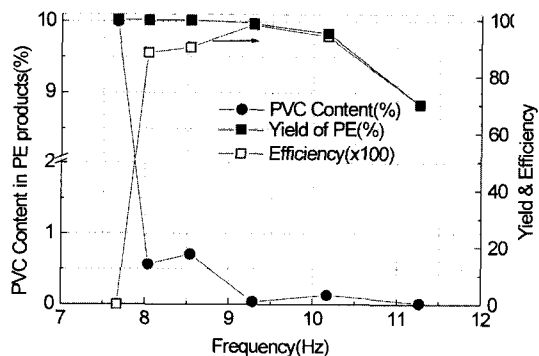


Fig. 7. The effect of frequency on the separation of granular PVC-PE mixture, with the conditions of End-slope of 7.5°, Air velocity of 1.05 m/sec, Side-slope of 1.0°, feeding speed of 450 g/min

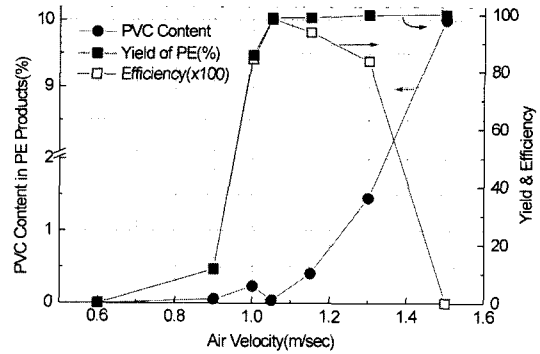


Fig. 8. The effect of air velocity on the separation of granular PVC-PE mixture with the conditions of End-slope of 7.5°, Frequency of 9.2 Hz, Side-slope of 1.0°, feeding speed of 450 g/min

진동수의 영향을 조사한 Fig. 7의 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 표준조건 하에서 진동수가 7.66 Hz인 조건에서 PE와 PVC가 분리되기 시작하였으며, 7.66~9.2 Hz의 진동수 범위에 있어서는 진동수의 증가에 따라 데크의 왼쪽 가장자리에 위치한 경산물 배출구로부터 배출되는 PE의 회수율은 약간씩 감소하는 경향을 보이지만 PE에 혼입되는 PVC의 량(이하 PVC 혼입율로 표기)은 급격히 감소하여 결과적으로 분리효율은 증가하는 추세를 보인다. 9.2~11.3 Hz의 진동수 범위에서는 PVC혼입율은 0.2%이하의 비교적 낮고 일정한 값을 보이지만 PE회수율은 진동수의 증가와 함께 급격한 감소를 보여 11.3 Hz에서는 70.6%를 보인다. 결국 PE의 회수율과 품위를 모두 고려하는 분리효율은 9.2 Hz에서 최대치인 0.98이 되었다. 이러한 결과들은 유동층 하부의 입자들을 Deck의 오른쪽으로 이동시키는 구동력인 진동에 의해 단위시간당 입자에 전달되는 힘이 증가함으로써 Deck의 오른쪽 가장자리에 위치한 중산물 배출구로 배출되는 입자의 량이 증가하는 결과에 기인한다. 따라서 분리 목적상 PE회수율과 그 품위에 동일한 중요도를 부여할 경우는 분리효율이 0.9이상인 8~10.2 Hz(9.2 Hz에서 분리효율 0.98)의 진동수가 적당하다고 할 수 있으나, PVC 혼입율의 제어를 보다 중시하는 경우는 9.2~10.2 Hz의 진동수가 적당하고 PE 회수율을 중요시 할 경우는 8~9.2 Hz의 진동수가 적당할 것으로 생각된다.

Fig. 8의 풍속의 영향 조사 결과에서는 0.6 m/sec 이하의 풍속에서는 PE와 PVC 입자들이 모두 중산물 배출구로 배출됨에 따라 분리는 전혀 이루어지지 않았으

며 1.05~1.15 m/sec의 좁은 범위 내에서 PE회수율 98.5~99.0%, PVC 혼입율 0.04~0.4%로 양호한 분리성적을 나타내었다. 풍속이 1.2 m/sec가 되면 플라스틱 입자들로 구성된 유동층은 bubbling현상을 보이기 시작하였으며 이 때 PVC 입자들 중 형상계수가 작은(판상에 가까운) 입자들이 먼저 경산물인 PE에 혼입됨에 따라 PVC 혼입율이 증가하기 시작하였다. 이러한 bubbling 상태는 1.3 m/sec 부근에서 slugging 상태로 전이하고 1.4 m/sec에서는 turbulent fluidization 상태를 보이기 시작함에 따라 분리효율은 점차 악화됨을 보였다. 1.5 m/sec에서는 유동층이 완전히 turbulent fluidization 상태로 될 뿐만 아니라 풍력에 의한 저항력의 과대로 입자들은 더 이상 중산물 배출구까지 이동하지 못하고 모든 입자들이 경산물 배출구로 배출됨으로써 분리는 전혀 이루어지지 않았다. 본 실험의 결과는 Air Table에 의한 분리에 있어서 풍속이 가장 중요한 인자임을 시사하며 실제 공정에 있어서도 풍속을 정밀하게 제어하는 기술이 분리의 성패를 좌우할 것으로 생각된다.

End-slope의 영향을 조사한 Fig. 8의 결과에서는 End-slope이 5°이하의 경우는 모든 입자들이 오른쪽 중산물 배출구로 배출됨에 따라 분리는 전혀 이루어지지 않았으며 5~7.5°의 범위에서는 End-slope의 증가에 따라 PE회수율은 증가하고 PVC혼입율은 0.2%이하의 비교적 안정된 값을 보임으로써 분리효율은 End-slope의 증가와 함께 증가하여 7.5°에서 최대치인 0.98을 보였다. 7.5~9.5°의 범위에서는 End-slope의 증가와 함께 PVC혼입율이 급격히 증가함에 따라 분리효율이 저하하는 것으로 나타났으며 9.5°이상의 기울기에서는 모든 입자들

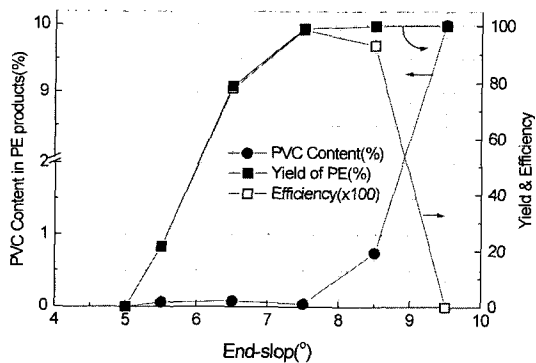


Fig. 9. The effect of End-slope on the separation of granular PVC-PE mixture by air table, at the conditions of Frequency of 9.2 Hz, Air velocity of 1.05 m/sec, Side-slope of 1.0°, feeding speed of 450 g/min.

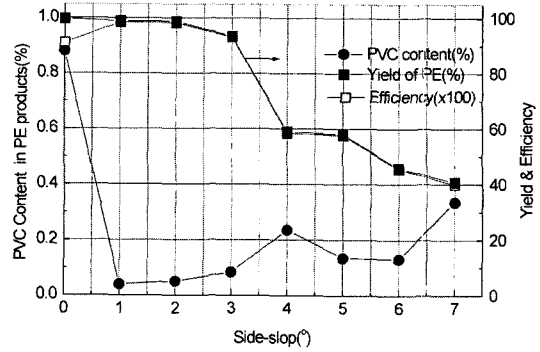


Fig. 10. The effect of side-slope on the separation of granular PVC-PE mixture with the conditions of End-slope of 7.5°, Frequency of 9.2 Hz, air velocity of 1.05 m/sec, feeding speed of 450 g/min

이 경산물 배출구로 배출됨에 따라 분리는 전혀 이루어지지 않았다. 본 실험의 결과로부터 PE와 PVC의 분리에 적당한 End-slope은 PE회수율이 90%이상이고 PVC 혼입율이 1%이하인 7~8.5°정도를 알 수 있다.

Side-slope의 영향 조사에서는 Side-slope이 증가함에 따라 유동층의 종방향 흐름 속도가 증가하여 결과적으로 유동층의 높이를 감소시키는 현상으로 나타난다. side-slope이 4°일 때 유동층의 높이는 리플의 높이와 비슷한 10~15 mm가 되어 리플의 상단부를 넘어 종방향으로 흐르는 입자에 비해 리플의 높이를 극복하지 못하고 리플의 벽면을 따라 오른쪽 횡방향으로 흐르는 입자들이 월등히 많아지고 이러한 현상은 PE 회수율 감소라는 결과를 가져온다. 한편 Side-slope의 변화에 따른 PVC의 혼입량은 1~7°의 범위에서 0.4%이하의 비교적 안정된 값을 보이긴 하지만 기울기의 증가와 함께 약간씩 증가하는 경향을 보인다. Side-slope의 증가에 따라 유동층의 높이가 점점 낮아지게 되면 비중차에 의한 분리대의 길이가 짧아지기 때문에 비중차에 의한 분리 기회가 증가하게 된다. 즉 상기와 같이 기울기의 증가에 따라 PVC 혼입량이 증가하는 것은 주로 PVC와 PE의 파쇄특성 차이 즉 PE에 비하여 PVC 쪽이 박편상으로 파쇄된 입자가 다소 많기 때문으로 판단된다. 0°에 있어서 PVC 혼입량이 비교적 많아지는 것은 종방향으로의 흐름속도의 저하 등에 기인하는 유동층 높이의 증가에 따라 유동층의 표면 부분에 부분적으로 발생하는 bubbling 현상이 그 원인으로 판단된다. 본 실험의 결과로부터 표준조건 하에서의 PE와 PVC 입자의 분리

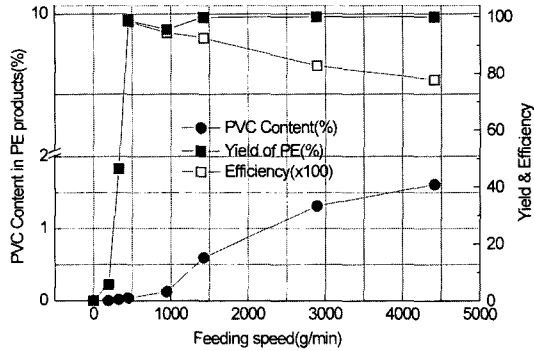


Fig. 11. The effect of feeding speed on the separation of granular PVC-PE mixture with the conditions of Frequency of 9.2 Hz, Air velocity of 1.05 m/sec, Side-slope of 1.0°, End-slope of 7.5°.

에 적당한 Side-slope는 1~3° 정도임을 알 수 있다.

Fig. 11의 급광량의 영향 조사에서는 0~300 g/min의 급광량 범위에서는 유동층의 평균 높이가 리플의 높이보다 작아짐에 따라 많은 입자들이 리플벽을 따라 데크의 오른쪽으로 이동하여 중산물 배출구로 배출됨에 따라 PE회수율은 50% 이하의 낮은 값을 나타내었다. 450~1000 g/min의 급광량에서는 95% 이상의 PE회수율과 0.2% 이하의 PVC 혼입량으로 비교적 양호한 분리 성적을 나타내었다. 1000 g/min 이상으로 급광량이 증가함에 따라 유동층의 높이는 3 mm 이상으로 증가하고 결국 유동층 표면의 일부분에 고정층의 발생이 관찰되기 시작하였다. 결과적으로 PVC 중 일부 입자들은 유동층 최하부인 데크면까지 도달하지도 못하고 유동층 상부에 형성되는 좌하 방향의 입자흐름을 따라 경산물 배출구로 PE와 함께 배출됨으로써 PE내 PVC 혼입량을 증가시킨다.

본 실험의 결과로부터 일반적으로 알려져 있는 PVC 혼입량 1% 이하라는 조건을 만족시키기 위해서는 급광량을 2000 g/min(단위 면적당 처리량: 866 kg/hr · m<sup>2</sup>) 이하로 제한할 필요가 있음을 알 수 있다.

상기 분리실험 결과들 중 PE와 PVC의 분리에 비교적 많은 영향을 미치는 것으로 나타난 진동수와 End-slope에 대하여 분리효율과의 상관관계를 나타낸 것이 Fig. 12이다. 그림의 결과로부터 각각의 End-slope에 있어서 0.9이상의 최고의 분리효율을 나타내는 조건은 5.5°-6.5 Hz, 6.5°-7.5 Hz, 7.5°-9.3 Hz, 8.5°-10.1 Hz, 9.5°-10.9 Hz로 End-slope이 증가함에 따라 진동수도 연동하여 변화함을 알 수 있다.

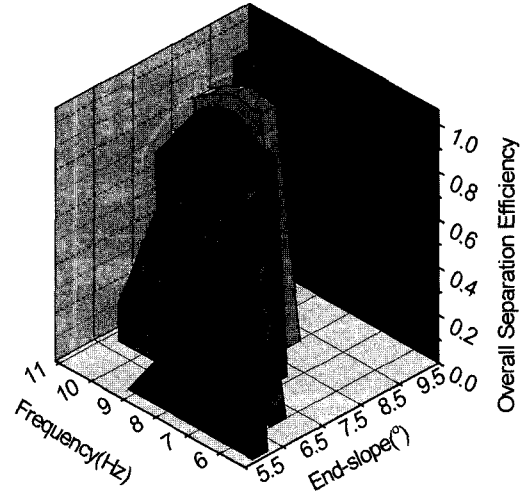


Fig. 12. Relationship among the frequency and end-slope of air table and overall separation efficiency.

상기 6항목에 걸친 분리 실험 결과를 요약하면 PVC 함량이 10% 정도인 입상의 폐플라스틱 혼합물로부터 PVC 함량이 1%이하인 고로연료용 폐플라스틱을 90% 이상의 실수율로 회수하고자 할 경우 적당한 Air Table의 운전 조건은 진동수 8.0~10.2 Hz, 풍속 1.05~1.15 m/sec, End-slope 7.0~8.5°, Side-slope 1~3°, Feeding speed 450~2000 g/min 정도임을 알 수 있다. 또한, 표준조건인 진동수 9.2 Hz, 풍속 1.05 m/sec, End-slope 7.5°, Side-slope 1°, Feeding speed 450 g/min의 조건에서 PVC함량이 10%인 PVC+PE 혼합물을 분리한 결과 경산물로부터 PVC 혼입량이 0.04%인 PE를 98.9%의 실수율로 얻을 수 있었으며 동시에 PE혼입량이 11.3%인 PVC를 99.6%의 실수율로 얻을 수 있었다.

#### 4. 결 론

폐플라스틱을 연료로 재활용하는데 있어서 가장 어려운 문제중 하나인 폐플라스틱 내에 혼입되어 있는 PVC의 제거를 목적으로 수행된 본 연구에 의하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 데크상에서의 플라스틱 입자의 운동특성을 조사한 결과 편진폭  $r=5.2$  mm, 진동축의 기울기  $\alpha=45^\circ$ , 데크의 기울기  $\beta=7.5^\circ$ , 진동수 9.2 Hz, Side slope 0°, 풍속 0인 조건에서의 플라스틱입자의 운동속도는 7.2cm/sec로 Kluge의 경험식에 의해 계산되는 9.96 cm/sec 보다 다소 작게 측정되었다. 또한 이

조건에서 플라스틱 입자의 궤적방정식은  $Y=0.147\omega x^2 + 0.51\omega x - 0.11$ 이고, 플라스틱 입자를 데크의 오른쪽 방향으로 비행시키기 위한 최소진동수  $F$ 와 End-slope와의 관계는

$$F = \sqrt{\frac{g \frac{\cos\beta}{\gamma \sin(360+\alpha-\beta)}}{(2\pi)^2}} \text{ 임을 알았다.}$$

- 유동층이 homogeneous fluidization 상태를 유지하는 조건 범위 내에서는 End-slope 과 진동수가 작을수록 그리고 풍속이 클수록 분리가능 영역이 넓어지는 경향을 보였다. End-slope이 7.5°인 경우에 있어서 분리가능 영역은 x=풍속, y=진동수라고 할 때  $y=3.785x^2-3.586x+7.92$ 의 방정식을 갖는 상한곡선과  $y=15.736x^2-6.16x+7.92$ 의 방정식을 갖는 하한곡선 그리고 풍속 상한선인  $x=1.5$ 의 직선으로 둘러 쌓인 부분임을 알 수 있었다.
- PVC 함량이 10% 정도인 입상의 폐플라스틱 혼합물로부터 PVC 함량이 1%이하인 고로연료용 폐플라스틱을 90% 이상의 실수율로 회수하고자 할 경우 적당한 Air Table의 운전 조건은 진동수 8.0~10.2 Hz, 풍속 1.05~1.15 m/sec, End-slope 7.0~8.5°, Side-slope 1~3°, Feeding speed 450~2000 g/min 정도일 것으로 판단되었다. 또한, 표준조건인 진동수 9.2 Hz, 풍속 1.05 m/sec, End-slope 7.5°, Side-slope 1°, Feeding speed 450 g/min의 조건에서 PVC함량이 10%인 PVC+PE 혼합물을 분리 하여 경산물로부터 PVC 혼입량이 0.04% 인 PE를 98.9%의 실수율로 얻음과 동시에 중산물로부터 PE혼입량이 11.3%인 PVC를 99.6%의 실수

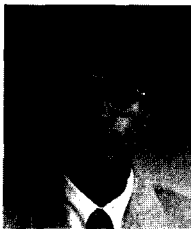
율로 얻었다.

## 감사의 글

본 연구를 통하여 자원공학도로써의 18년 동안 제가 접해본 수많은 물리적 선별의 경험 중에서 가장 우수한 선별 성적을 올리는 것이 가능하였습니다. 이 결과가 있기까지 오랜 기간 동안 축적해온 노하우를 아낌없이 전수해 주신 大井 英節 氏와 시료를 제공하여 주시고 스케일 업 부분의 연구를 같이해온 일본강관주식회사(NKK)의 山崎 茂樹 氏 이하 폐플라스틱 연료화 사업 관련 여러분에게 감사드립니다.

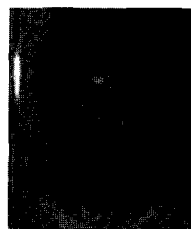
## 참고문헌

- (社)プラスチック處理促進會, “プラスチックの有效利用量と有効利用率の推移”, <http://www.pwmi.or.jp/flow/flow02.htm>, (2001).
- 谷川 昇 : “新しいプラスチック材質判別技術”, 廢プラスチックの分離分別技術の最近動向講習會, 技術情報センター, 1-14 (1996).
- 井伊谷綱, 三輪茂雄 : 化學工學통론II, 朝倉書店, 86-91 (1993).
- Kluge, O. W. : Erdöl u. Kohle, Vol. 4., No. 11, 705-717 (1951).
- 日本粉體工業協會 編, 分級裝置技術便覽, 新日本印刷株, pp 24-29 (1978).
- 日本粉體工業技術協會 編, 流動層ハンドブック, 培風館, pp45-48 (1999).



宋 泳 俊

- 1986년 인하대학교 자원공학과 공학사
- 1988년 인하대학교 자원공학과 공학 석사
- 1997년 인하대학교 자원공학과 공학 박사
- 현재 日本 産業技術總合研究所 招聘研究員



四元 弘毅

- 1979년 일본 경도대학 자원공학과 졸업
- 1994년 일본경도대학 자원공학박사
- 현재 日本 産業技術總合研究所 環境調和技術研究部門 粒子分離Group Leader