

## 순환골재 생산 공정상에서 공기유동을 이용한 토분에 포함된 이물질 제거장치에 관한 연구

서용권<sup>†</sup> · 허성규\* · 박용기\*\*

### Study on the Air-Flow Separator of Light Particles Included in the Clod in the Production Process of Recycling Aggregates

Yong-Kweon Suh, Seong-Gyu Heo and Yong-Gi Park

**Abstract.** In this paper, we present flow patterns around and performance of an air-flow separator by using the numerical analysis. With this separator, particles of different density are to be separated by using the drag force from the air flow. The low-density particles are designed to be separated by using inhalation through holes on a rotating drum. To obtain the flow informations needed for determining the proper design parameters, we have performed numerical simulations by using a commercial code, ANSYS CFX. Various parameter set was tested and it was found that depending on the design of drums there exist critical parameter set regarding the attachment of light particles on the drum, which is prerequisite for the separation of materials. We present here the possibility of using the present design in separation of particles mixed in the clod for use in recycling.

**Key Words:** Separator(분리기), Air Flow(공기유동), Recycling Aggregates(순환골재)

#### 1. 서 론

1990년대 이후 주거환경의 개선과 함께 그에 따르는 건설폐기물의 증가와 환경에 대한 인식이 고조되어 가면서, 이러한 건설폐기물의 처리와 순환골재 재 생산 산업의 기술가치 또한 증가하고 있다<sup>(1)</sup>. 이물질 분리기는 이러한 폐기혼합물들을 성질이 다른 각각의 물질로 별도로 분리함으로써 물질별로 재사용이 가능하도록 하는 중요한 기기이다.

이물질을 분리하는 방법에는 크게 습식과 건식으로 나눌 수 있다. 습식 이물질 분리기에는 중력을 이용하여 고체를 침전시키는 방법과 원심분리기(Centrifuge)에서 원심력을 이용한 방법 등이 있다. 중력을 이용하여 고체를 침전시키는 방법은 많은 시간과 넓은 공간을 필요로 하며, 원심분리기는 동력을 전달하는 기

어의 파손이 잦고 실린더와 스크류 두 개의 회전체는 고속회전 시에 큰 진동을 유발하는 등의 단점이 보고되고 있다.<sup>(2-8)</sup> 건식 이물질 분리기에는 진동을 이용하는 방법과 열처리를 이용하는 방법 등이 있다.

본 연구는 기존의 분리기와 차별성을 갖고 효율적인 분리 방식을 찾고자 공기 유동의 항력을 이용하여 분쇄된 폐 골재의 이물질을 제거하는 장치에 대한 수치 해석적 연구로서, 유동 양상과 더불어 입자의 분리특성을 살펴보고 최적설계를 위한 기본연구로서 그 가치를 찾고자 한다. 한편, 이같은 연구를 실험에 의해 규명하고자 한다면 시작품 제작에 상당한 비용이 요구되며 또한 특히 중소기업의 경우에는 신제품의 개발 단계의 초기부터 이를 감당하기는 매우 어려운 실정이다. 또한 개발기간의 단축이 무엇보다 중요한 최근의 기업실정은 수치해석 시뮬레이션에 의존하려는 경향이 더욱 높아지고 있다. 본 연구는 이러한 여건을 감안하여 이물질 분리기 내의 유동 양상과 입자 분리 특성을 수치해석적으로 규명하려는 목적으로 수행된 것이다. 또한 수치해석 결과의 타당성을 확보하

<sup>†</sup>동아대학교 기계공학과  
E-mail: yksuh@dau.ac.kr

\*동아대학교 대학원 기계공학과

\*\* (주)거산기계

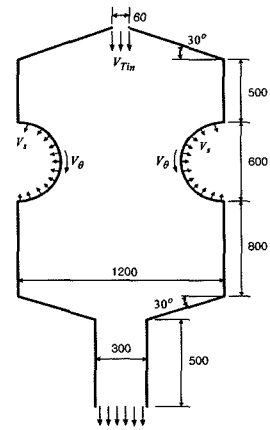
기 위하여 가능하다면 유체역학적 이론을 최대한 도입하여 보완하고자 노력하였다.

### 2. 유동모델과 이론해석

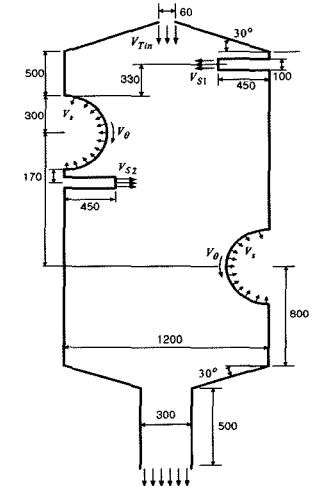
Fig. 1은 본 연구에서 수치해석 대상으로 삼은 이 물질 분리장치 3가지 구조를 스케치 한 것이다. 상부의 입구(속도  $V_{Tin}$ 으로 표시한 부분)에서 파쇄기에서 잘게 분쇄된 토분(또는 모래), 폐 목재, 페스티로 폼(또는 폐지)들이 투입된다. 한편 하부에는 일정한 속도로 회전하는 드럼이 있고 드럼 표면에는 공기 흡입용 구멍이 나 있다(Fig. 2 참조). 상부에서 물질들이 투입되어 낙하하면, 드럼통 표면 구멍으로부터의 공기 흡입에 의해 가벼운 입자들은 드럼 표면에 부착되고 무거운 입자들은 드럼 표면에 부착되지 않고 분리장치 하단의 바닥에 쌓이게 된다. 한편, 드럼 표면에 부착된 가벼운 물질들은 드럼의 회전에 의해 분리실 반대쪽에 왔을 때 역으로 드럼 내부에서부터 외부로 공기를 불어 넣으므로써 표면에 부착된 물질들을 떨어뜨리는 원리를 이용한다. 이렇게 수집된 물질들은 벨트 등을 이용하여 다른 곳으로 운반된다.

Fig. 1에서 보인 세 가지 구조는 지면에 수직인 방향으로는 일정한 폭을 갖는 2차원 구조의 형상이다. (따라서, 수치해석에서는 두께를 최소화하고 대칭조건을 이용하여 2차원적으로 수행하였다.) 제1 설계형은 원통이 2개 있고 좌우 대칭의 구조를 가진다. 제2 설계형에서는 두 원통을 아래 위로 어긋나게 배치하여 비대칭 구조로 하였고, 측면 2 곳에서 공기를 분리실로 불어내어 입자가 원통에 부착하는 것을 도우도록 설계하였다. 제3 설계 형은 좌측에 위치한 원통의 직경을 보다 크게 하여 공기가 흡입되는 면적을 크게 하고 우측 측면으로부터는 3개의 공기 유입구를 설치하여 드럼에서의 공기흡입에 의해 자연스럽게 외부의 공기가 분리기 내로 유입되도록 하였다. 드럼 내로 유입되지 않은 입자들은 하부 바닥에 쌓여 별도의 과정을 거쳐 외부로 배출되도록 하였다.

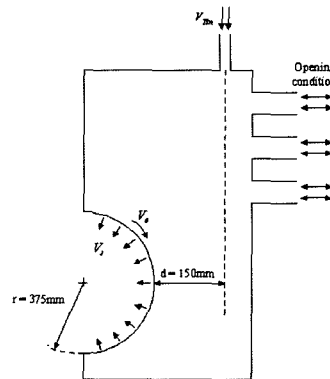
이 경우 가장 기본적인 사항은 입자가 공기로부터 받는 항력의 크기와 입자 무게로부터 종말속도(terminal velocity)를 이론적으로 알아보는 것이다. 입자를 구형으로 가정하면, 입자 하나의 무게는 다음 식으로 구해진다.



(a) 1st design



(b) 2nd design



(c) 3rd design

Fig. 1. Three design types of the material separator using the drag force from the air flow.

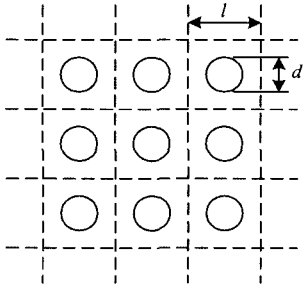


Fig. 2. Hole arrangement on the surface of drum.

$$W = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_s g \quad (1)$$

여기서,  $d$ 는 입자의 직경,  $\rho_s$ 는 입자의 밀도,  $g$ 는 중력 가속도이다. 그리고 공기항력은 아래 식으로 구할 수 있다.

$$F_D = C_D \rho_a V^2 \pi d^2 / 8 \quad (2)$$

여기서,  $C_D$ 는 항력계수,  $\rho_a$ 는 공기의 밀도,  $V$ 는 입자의 속도이다. 초고속도가  $V_0$ 인 밀도  $\rho_s$ 의 입자가 공기 항력을 받으면서 낙하하는 경우의 운동방정식은 아래 식과 같다.

$$W - F_D = m \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

여기서,  $m$ 은 질량이고  $V(t)$ 는 입자의 낙하 속도이다.  $W$ 와  $F_D$ 의 식 (1)과 (2)를 대입하면 식 (3)은 아래와 같이 된다.

$$\frac{dV}{V_f^2 - V^2} = \frac{g}{V_f^2} dt \quad (4)$$

여기서, 종말속도  $V_f$ 는

$$V_f = \sqrt{\frac{4gd\rho_s}{3C_D\rho_a}} \quad [\text{m/s}] \quad (5)$$

이다. 앞의 미분방정식을 풀면 그 해는 아래와 같다.

$$V = \frac{V_f[(1+\alpha)\exp(\beta t) - (1-\alpha)]}{(1+\alpha)\exp(\beta t) + (1-\alpha)} \quad (6)$$

여기서, 상수  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 아래와 같다

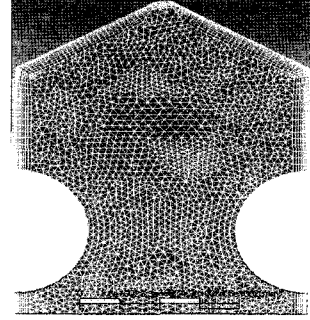


Fig. 3. An example of grid system for numerical simulation of fluid flows within the material separator of the 1st design type.

$$\alpha = \frac{V_0}{V_f}, \quad \beta = \frac{2g}{V_f} \quad (7)$$

한편, 거리  $s$ 의 함수로 하여  $V$ 를 표시하면 아래와 같다.

$$V(s) = V_f [1 - (1 - \alpha^2) \exp(-\gamma s)]^{1/2} \quad (8)$$

여기서 상수  $\gamma$ 는 아래와 같다.

$$\gamma = \frac{2g}{V_f^2} \quad (9)$$

### 3. 수치해석 방법

본 연구에서 수치해석을 위해서 ANSYS CFX 상용코드를 사용하였으며 난류 모델로는 k- $\epsilon$  모델이 사용되었다. 격자생성을 위해서는 ANSYS CFX-mesh를 사용하였으며 사면체 격자를 사용하였다.

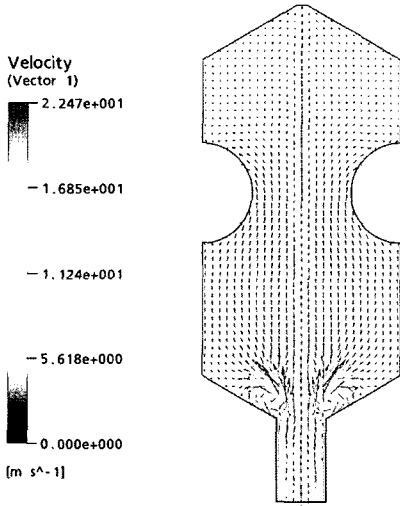
Fig. 3은 대표적인 격자계의 모양을 보여주고 있다. 측면에 있는 벽면 근처에서 조밀한 격자계를 구성하여 벽면 근처의 경계층이 원활히 처리되도록 하였다. 그리고 중력은 아래 방향으로 작용하며 입구를 통해 유입되는 입자들은 모두 직경이 2mm로서, 비중 2.5의 토석과 같이 무거운 입자(heavy particle), 폐목재와 같은 비중 1.0의 입자(medium particle), 페스티로 폼과 같은 비중 0.5의 입자(light particle) 등 3가지로 구성된다. 경계조건으로서, 공기와 입자의 유입 속도는 1 m/s, 입자의 유입 질량유량은 0.15 kg/s로 가정하였다. 그리고 이것들은 유체유동에 영향을 주는 것으로 하여 계산을 수행하였다.

### 4. 수치해석 결과

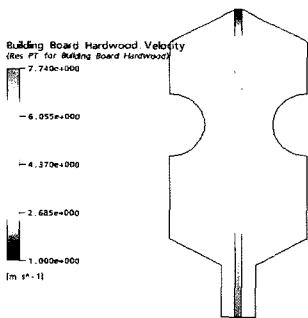
Fig. 4는 제1 설계형에 대한 수치해석 결과로서, 경계조건으로서는, 상부에서의 입자 유입 속도  $V_{tm}=1$  m/s, 원통흡입 속도  $V_s=0.2$  m/s이며 드럼의 회전 선속도는  $V_{\phi}=1.9$ m/s (60 rpm 기준)로 하여 계산하였다.

우선, Fig. 4(a)의 속도벡터 분포를 보면 유입구 근처에서 (그림에서는 잘 구분이 되지 않지만) 제트 쪽으로 강한 흡입이 발생하고 있다. 그리고 측면의 원통으로부터도 흡입이 발생하므로 전체적으로 보면 유입되는 양보다는 흡입이 많은 형태이다. 이에 따라 출구에서 공기흐름이 역류하여 이 흡입을 충족시켜주고

있다. 물론 이 흐름이 제트에 포함된 가벼운 물질들을 뜨게 하여 분리를 용이하게 해 줄 것이지만 그러나 그림에서 보듯이 그 흐름이 너무 강하여(15m/s 정도의 크기) 토석까지도 비산시킬 수가 있다. 이러한 상승기류는 전 영역에 걸쳐 나타나고 있다. 따라서 원통 자체는 아래쪽에서의 흐름을 만들지만 상승기류가 워낙 강하기 때문에 원통에 극히 가까운 영역을 제외하면 원통의 회전에 의한 흐름 효과는 무시되고 있는 실정이다. 또한 Fig 4(a)에서의 출구 근처에서는 이러한 상승류가 급확대 영역을 만나면서 강한 소용돌이를 형성하고 있는 것이 특이하다. 따라서 이러한 설계형태에서는 입자의 분리를 기대할 수 없다. 가장 가벼운 목재의 경우에도 입자들이 직선운동을 하는 것으로 나타난 Fig. 4(b)는 이를 잘 나타내고 있다. 유입면에서 1m/s의 속도를 가지던 입자들은 하강하면서 가속하여 유출면 근처에서는 약 7.7m/s의 속도를 가진다. 만약 토석이 공기흐름의 방해 받지 않고 자유낙하 한다면 전체 거리가 2.99m이므로 토석은 출구에서



(a) velocity vectors of the air flow



(b) motion and velocity of the light particles

$$V_{fall} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 2.99 + 1} = 7.72 \text{ m/S}$$

의 속도로 낙하하는 것으로 예측되며, 이는 수치해석 결과와 일치한다. 즉 이것은 토석이 공기로부터 항력을 거의 받지 않고 있음을 의미한다. 만약 공기의 항력을 고려한다면, 우선 식 (5)로부터 종말속도  $V_f=7.08$  m/s를 얻으며 이어서 식 (6)으로부터 바닥에 도달하는 순간의 속도로서  $V_{fall}=5.9$  m/s를 얻을 수 있다. 여기서 항력계수  $C_D$ 는 1로 가정하였다. 이는 수치해석 결과보다 훨씬 작은 값이다. 이는 입자들이 서로 뭉쳐서 낙하하며 입자 사이의 공기들이 입자와 더불어 거의 같은 속도로 흐른다는 것을 암시한다.

다음으로 제2 설계형에서는  $V_{tm}=1$  m/s,  $V_s=0.6$  m/s,  $V_{\phi}=1.9$  m/s에 측면 흡입유속  $V_{S1}=V_{S2}=5$  m/s의 조건에서 수행하였다.

Fig. 5는 수치해석 결과로서 속도벡터 분포를 보여준 것이다. 공기 흐름은 원통표면에 확실히 흡입되는 양상을 보이고 있지만 입자들은 여전히 원통에 부착되지 않고 곧바로 하향 운동하는 것을 알 수 있다. 여기서도 출구에서 부분적으로 공기의 역류를 관찰할 수 있다.

앞의 결과들을 보면 가장 가벼운 입자들도 원통에

Fig. 4. Numerical results of the air flow velocity and light-particles' motion for the 1st design type.

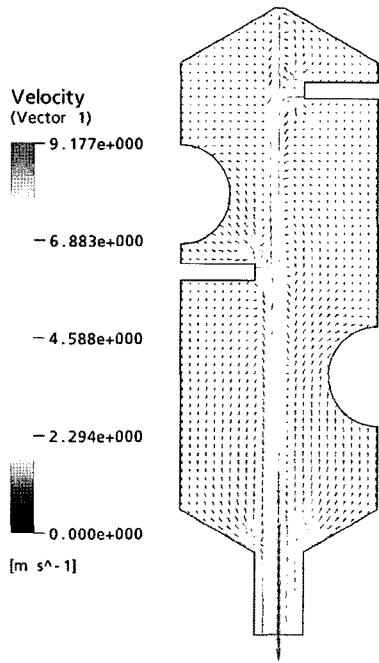
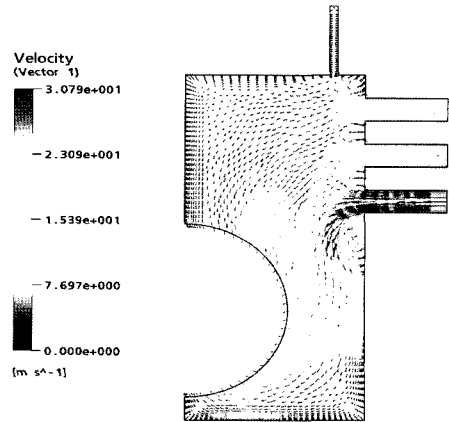


Fig. 5. Numerical results of the air flow velocity for the 2nd design type.

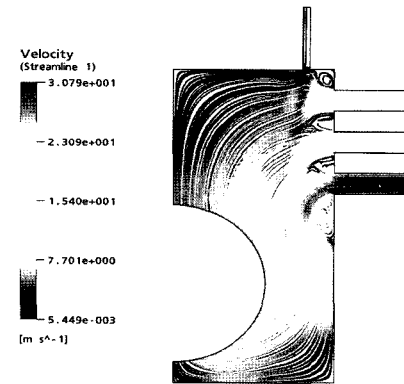
부착되지 않고 거의 직선운동을 한다. 그 원인으로서, 첫 째 측면으로부터 밀어주는 공기흐름이 미약하기 때문이며, 둘째 원통으로부터의 흡입이 강하지 않기 때문이라 생각되었다. 따라서 제3 설계형에서는 원통을 다소 크게 하였으며 원통으로부터의 흡입 속도를 증가시켰다. 경계조건은,  $V_{in} = 1 \text{ m/s}$ ,  $V_s = 7 \text{ m/s}$ ,  $V_{\theta} = m/s$ 이다. 그리고 측면 흡입구 끝은 개방조건으로 하였다. Fig. 6은 제3 설계형에 대한 수치해석 결과로서, 속도 벡터와 유선으로 나타낸 것이다. 원통으로부터의 흡입에 의해 우측 측면의 흡입구는 (특히 가장 아래쪽에서) 매우 강한 공기흡입을 보이고 있다.

전체적으로 보면 공기는 주로 측면 흡입구로부터 유입되어 원통 표면에서 송출된다. 그리고 상부 유입부는 공기 흐름이 미약하여 입자의 투입 역할만을 수행한다고 볼 수 있다. Fig. 6(b)의 유선을 보면, 우측 측면 흡입구로부터 시작된 유선들은 상부 유입입자들의 운동의 영향을 받아 약간이지만 휘어진 형태를 보이고 있다.

Fig. 7은 세 가지 입자들의 운동을 보여주고 있다. 무거운 입자들은 원통에 부착되지 않고 바닥에 떨어지



(a) velocity vectors

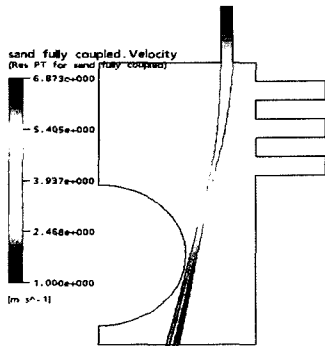


(b) streamlines

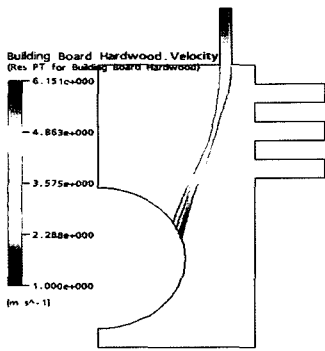
Fig. 6. Velocity vectors and streamlines with colors representing the velocity magnitude for the case of 3rd design type.

며(Fig. 7(a)), 중간 무게의 입자들은 원통의 측면에(Fig. 7(b)), 가벼운 입자들은 원통의 상부에(Fig. 7(c))에 각각 부착되는 모양을 확인할 수 있다.

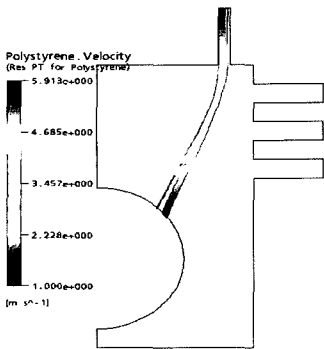
폐 목재나 폐스티로폼 또는 폐지는 토석과 달리 그 모양이 대부분 구형과 다르다. 이에 따라 공기로부터 받는 항력은 구형에 비해 크다. ANSYS CFX에서는 이에 따른 효과도 볼 수 있게 하고 있다. Fig. 8은 Fig. 7의 조건에서 원통 표면에서의 흡입 속도를  $V_s = 5 \text{ m/s}$ 로 낮춘 경우에 대한 수치해석 결과로서 구형의 중간 무게 입자와 가벼운 입자의 운동궤적을 나타낸 것이다. 가벼운 입자는 여전히 원통에 완전히 부착되는 모양을 보이나, 중간 무게 입자의 경우는 원통에 미



(a) heavy particles



(b) medium particles

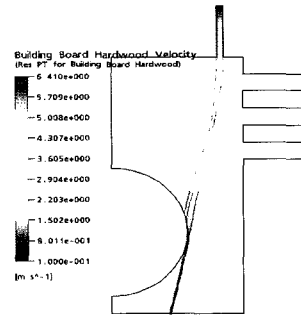


(c) light particles

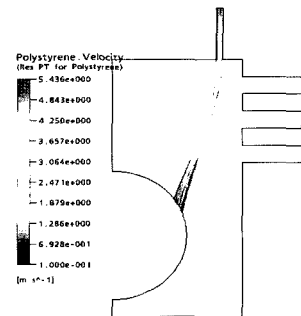
Fig. 7. Tracking of heavy(specific gravity 2.5), medium (1.0) and light(0.5) particles for the 3rd design type.

처 부착하지 못하는 양상을 보이고 있다. 이 경우 형상계수를 2로 하여 수치해석한 결과가 Fig. 9이다.

Fig. 8의 결과와 비교하여 볼 때 확연히 들어나듯



(a) medium particles



(b) light particles

Fig. 8. Tracking of medium and light particles for the case with the drum's suction velocity decreased from 7m/s to 5m/s at the form factor 1.0.

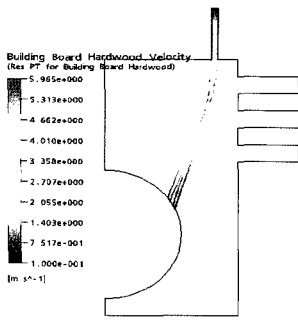
이, 형상계수를 증가함에 따라 입자의 분리는 더 잘 일어나고 있음을 알 수 있다. 형상계수를 높게 할수록 항력의 작용이 더 강하여 입자는 원통에 더 쉽게 부착하려는 경향이 있다.

### 5. 결 론

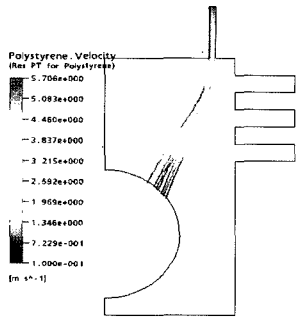
본 논문에서는 수치해석을 이용하여 공기유동을 이용한 이물질 분리장치의 입자 분리와 유동특성에 대하여 분석하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 세 가지 분리기에 대한 공기 유동 및 입자 궤적의 수치해석을 성공리에 수행하였으며, 표면에 공기를 흡입할 수 있는 회전 원통을 설치한 세 가지 설계에 대한 수치해석 결과는 해당 설계의 문제점과 운전 성능을 확실히 보여주고 있다.

(2) 좌우 대칭 형상의 설계에서는 상부유입 입자의



(a) medium particles



(b) light particles

**Fig. 9.** Tracking of medium and light particles for the case with the drum's suction velocity 5m/s at the form factor 2.0.

경로가 곧은 직선으로 나타났으며 따라서 입자의 분리가 발생하지 않는 결과를 보여주었다.

(3) 좌우측 원통을 상하로 떨어지게 하고 측면에 흡입관을 설치하여 공기를 불어 넣는 설계구조에서도 출구에서의 역류가 발생하는 등 분리성능이 개선되지 않는다.

(4) 하나의 원통만을 설치하고 측면에 3개의 개방 흡입구를 설치한 구조에서는 원통으로부터의 강한 흡입력에 의해 입자들은 확실히 분리되었으며, 이를 실제 제품의 설계에도 적용할 수 있다.

(5) 입자들의 형상계수를 증가시켜 수치 해석하여 본 결과 구형의 입자들보다 공기항력을 더 많이 받아 입자의 분리가 잘 되는 것을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 건설교통부 05'건설핵심기술 연구개발 사업(과제번호:05-건설핵심D02)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) 한국환경정책 평가연구원, 2004, "건설폐기물 분리배출 및 발생원단위 산정등에 관한 연구", 환경부 용역 보고서.
- 2) Suh, Y.K., 2003, "Analysis of the power for a Decanter-type centrifuge (I) - sludge-removal power", Trans. KSME (B), Vol. 27, No. 7, pp. 929-937.
- 3) Suh, Y.K. and Han, G.J., 2003, "Analysis of the power for a Decanter-type centrifuge (II) - total power and the power-transmission mechanism", Trans. KSME(B), Vol. 27, No. 7, pp. 938-947.
- 4) Seo, J., Hong, D.K., Kim, D.Y., Han, G.J., Ahn, C.W., 2002, "The Stability Estimation of Industrial Centrifuge Considering Vibration and Strength", Trans. KSME(B), pp. 1073-1078.
- 5) Suh, Y.K., 2003, "Channel design of decanter-type centrifuge (I) - Particles' suspension and the channel size", Trans. Korea Soc. Precision Eng., Vol. 20, No. 10, pp. 148-156.
- 6) Suh, Y.K., 2003, "Channel design of decanter-type centrifuge (II) - Particles' sediment and the bowl length", Trans. Korea Soc. Precision Eng., Vol. 20, No. 11, pp. 108-116.
- 7) Suh, Y.K., 2003, "Channel design of decanter-type centrifuge (I) - Particles' suspension and the channel size", Trans. Korea Soc. Precision Eng., pp. 148-156.
- 8) Records, A. and Sutherland, K., 2001, Decanter Centrifuge Handbook, Elsevier Advanced Tech.