

# 로터 장착 건식 미분 분리기의 작동원리 규명 및 파라미터 연구 - I. 이론 해석

박성욱,<sup>1</sup> 강양수,<sup>2</sup> 강상모,<sup>1</sup> 서용권<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>동아대학교 기계공학과

<sup>2</sup>금호 기계 부설연구소

## INVESTIGATION OF THE OPERATIONAL PRINCIPLE AND PARAMETRIC STUDY ON A DRY PASTE SEPARATOR EQUIPED WITH A ROTOR - I. THEORETICAL STUDY

S.U. Park,<sup>1</sup> Y.S. Kang,<sup>2</sup> S. Kang<sup>1</sup> and Y.K. Suh<sup>\*1</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Dong-A University

<sup>2</sup>Research Institute, Kumho Machinery Co. Ltd.

*Construction waste is known to include a large part of coarse and fine aggregates, which can be recirculated in the industry. Separating those aggregates economically from the waste has been thus considered to be one of the most important issues in this field. In particular, paste mixed in the waste causes significant complain from the inhabitants living near the place where waste-processing equipments are built and operated. In this study, we investigate the operational principle of a newly developed paste separator by using theoretical (in this first part) and CFD (in the second part) analysis. The separator consists of a rotor which turned out to play a significant role in separating those pastes from the aggregates. Under suitable assumptions regarding the air flow velocity as well as the particle velocity, we show that particles can be stagnant at the outlet of the roto channel for a wide range of parameter values, which allow the particles to get enough time to settle down via the gravitation. We also demonstrate such phenomenon by using a simple numerical simulation.*

**Key Words :** 미분 분리(Paste separation), 건축 폐기물(Construction waste), 골재(aggregate), 이론해석(Theoretical analysis), 정체현상(Stagnation phenomenon)

### 1. 서 론

최근 신도시 개발과 재건축 등으로 기존 도로나 건물의 파쇄에 따른 건설폐기물의 발생량이 급증하고 있으며 따라서 이러한 건설폐기물의 처리기술이 환경보존 및 재활용에 의한 자원낭비 방지를 위해 매우 중요한 이슈로 등장하고 있다. 건설폐기물의 처리기술은 일찍이 개발되어 온 광물자원의 처리 기술을 바탕으로 하였으며, 그 세부적인 기법들도 그로부터

착안한 것이 많다[1]. 연구 보고서[2]는 천연골재를 대체할 수 있는 재생순환 골재의 수급전망, 활용방안 및 관련 정책에 관한 조사결과를 보고하고 있다. Oh et al.[3]은 국내 건설폐기물의 리사이클링 현황과 연구동향을 분석 보고한 바 있다.

건설폐기물의 자세한 처리과정과 관련 기계장치에 대해서는 Reference[4]를 참고할 수 있다. 처리과정은 크게 보아, 각종 이물질(비닐, 목재, 플라스틱, 종이, 스티로폼, 금속류 등)의 제거, 굵은 골재의 파쇄, 골재의 크기(무게)별 선별, 미분 제거(paste removal) 등의 과정으로 구성되며, 이러한 처리과정에 참여하는 기계장치는 물과 같은 액체를 이용하는 습식[5]과 공기를 이용한 건식[6]으로 나뉘어진다. 특히, 골재는 크기나 구성성분에 따라 용도가 다르므로 크기나 밀도별로 선별할 필요가 있으며, 이를 위한 방법에는 진동 스크린을 이용하는 방법, 비중의 차이를 이용한 액체 중의 부유법이나 공기

Received: November 6, 2015, Revised: December 16, 2015,

Accepted: December 16, 2015.

\* Corresponding author, E-mail: yksuh@dau.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2015.20.4.070>

© KSCFE 2015

흐름에 의한 방법, 혹은 이들을 조합하는 방법 등 다양하다. 가장 흔히 사용되는 스크린형 선별기는 비교적 큰 골재의 선별에는 효과적이거나 작은 크기의 골재나 미분의 선별에는 스크린 망의 막힘 등의 문제가 발생한다.

건설폐기물은 지름 0.15 mm 이하의 미분(paste)도 상당한 비율로 포함하고 있는데 양질의 골재를 위해서는 이를 효과적으로 제거할 필요가 있다. 또한 이러한 미분이 다른 용도로 활용될 수 있다는 가능성에 대해서도 연구된 바 있어 건설폐기물로부터 이러한 미분을 분리하는 기술의 확보가 폐기물 처리업체의 입장에서는 무엇보다 중요한 관심의 대상이 되고 있다[7]. 현재 미분 분리와 관련한 자료들을 분석해 보면 미분 분리를 위한 최근의 설계추세는 습식보다는 건식을 선호하는 것을 확인할 수 있다[6,8-14].

본 연구는 특허[6]에서 제시한 공기순환 방식의 잔골재 생산기술에서 미분 분리의 가장 핵심인 로터의 기능과 설계 파라미터들이 그 성능에 미치는 영향을 분석하기 위한 것으로서 본 제 1보에서는 특히 로터 주변의 공기 흐름과 입자의 운동을 1차원적으로 모델링하고 그 지배방정식의 해를 통해 로터의 회전이 미분분리에 기여하는 원리를 이해하며 설계 파라미터의 영향을 분석하고자 한다. 제 2보[15]에서는 로터 자체는 물론 그 주변의 유입 유출영역을 포함하는 보다 넓은 공간에 대해 3차원 전산유체역학을 적용하여 해를 구하고 이론해석에서 예측한 각종 원리들과 정량적인 성능수치들을 확인하고자 한다.

## 2. 영역별 공기유동 및 입자의 운동방정식

특허[6]에서 제시한 골재선별 및 미분분리 장치는 송풍기에 의한 공기의 강제순환 방식으로서, 골재 원료의 투입부터 시작하여 배출구로 골재 및 미분이 배출될 때까지 모두 공기 항력, 원심력 및 중력의 작용에 의해 입자들이 분리 선별되도록 한 것이다. 투입 후 골재 원료는 중력에 의해 낙하하면서 분산 및 분급 유도관에 충돌하여 파쇄되고 동시에 모르타르 박리의 과정이 진행된다. 상대적으로 굵은 골재 입자들은 아래 쪽의 배출구를 통해 즉시 배출되며 나머지 모르타르와 미분 및 잔 골재들은 상부로 흘러가서 회전 로터로 유입된다. 로터는 회전 디스크 위에 반경방향의 날개들이 원주상에 축대칭 형상으로 뺨뺨이 배치된 형태를 취한다(Fig. 1). 따라서 공기는 날개 사이 통로를 통해 로터 회전 중심 축 쪽으로 흐르며, 입자들이 날개 사이를 통과하는 동안 날개와 같이 회전하면서 원심력을 받게 된다. 이 과정에서 입자들은 크기에 따라서 공기 항력과 원심력이 상대적으로 달리 작용되고 이로 인해 상호 거동이 달라지고 분리 현상이 생기는 것이다.

로터 주위의 입자 운동을 이론적으로 해석하기 위해 공기

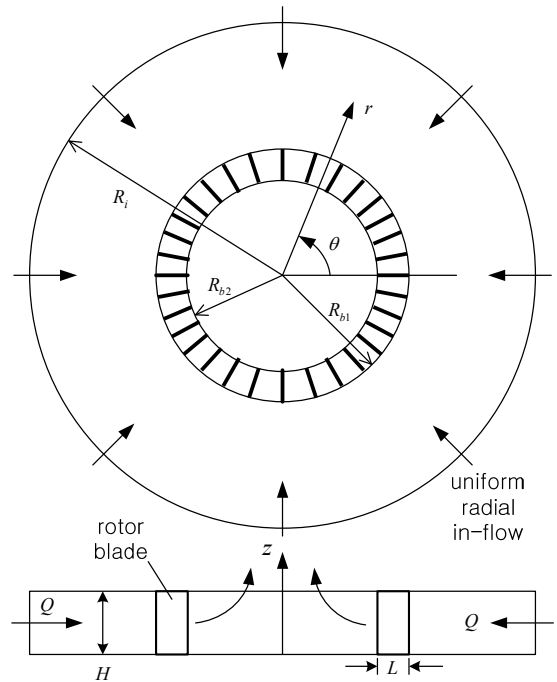


Fig. 1 Cylindrical coordinates and air-flow passage for modelling the rotor composed of blades (with height  $H$  and length  $L$ ) built on the bottom disk

및 입자의 유로는 Fig. 1과 같이 단순화된 기하학적 모델로 가정한다. 반경  $R_i$  의 유입구로부터 공기가 유량  $Q$ 로 균일한 유속분포로 유입되며 이 후 로터 날개로 유입되기 전까지 (유입부) 영역에서도 반경방향을 유지하며 균일한 분포를 보이는 것으로 가정한다. 로터 채널 입구반경  $R_{o1}$  에서 로터로 유입한 공기는 로터 날개 사이에 갇혀서 날개와 동일한 속도로 회전운동을 하면서 나아가며(로터 내부 영역), 로터 채널 출구반경  $R_{o2}$  를 지난 공기는 이 후의 코어 영역에서 각운동량 보존의 원리를 만족하면서 반경방향과 회전방향의 속도성분을 가지며 나아간다고 가정한다. 한편 이 영역에서는 축방향 속도가 축방향 좌표  $z$  에 대해 선형적으로 증가한다고 가정하며 그 크기는 반경방향 속도의 크기와 더불어 연속방정식을 통해 결정하도록 한다. 해석을 위해 고정된 원통좌표계  $(r, \theta, z)$  를 사용하며, 공기 유속 벡터  $\mathbf{u}_a$  의 반경방향, 원주방향 및 축방향 성분은 각각  $u_a, v_a, w_a$  로, 입자의 속도 벡터  $\mathbf{u}_p$  의 반경방향, 원주방향 및 축방향 성분은 각각  $u_p, v_p, w_p$  로 나타낸다. 덧붙여, 로터 날개의 길이는  $L$ , 높이는  $H$ , 로터의 회전속도는  $\omega$ 로 타나낸다. 본 연구에서 공기의 최대속도는 20 m/s를 넘지 않으므로 마하 수는 0.1보다 충분히 작아서 압축성 효과는 무시하기로 한다.

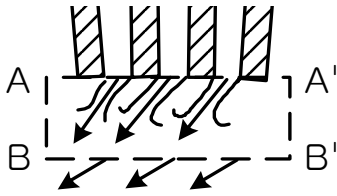


Fig. 2 Sketch of the flow pattern and velocity vectors on the  $(r, \theta)$  plane near the outlet of the rotor channel

위 가정에 따라 유입 영역에서 공기의 속도는 아래와 같이 결정된다.

$$u_a = -b/r, \quad v_a = w_a = 0 \quad (1)$$

여기서,  $b = Q/(2\pi H)$ 이다. 로터 영역에서는 날개 사이 통로를 공기가 꽉 채우면서 흐르고 역시 균일 분포로 가정한다.

$$u_a = -b_b/r, \quad v_a = r\omega, \quad w_a = 0 \quad (2)$$

여기서,  $b_b = \gamma Q/(2\pi H)$ 는 날개 두께로 인해 공기흐름의 통로가 좁혀진 효과를 나타내며,  $\gamma$ 는  $r$ 의 함수로서

$$\gamma = \frac{1}{1 - z_b t_b / (2\pi r)} \quad (3)$$

와 같으며 항상 1보다 크다. 그리고  $z_b$ 는 로터에 심어져 있는 전체 날개의 개수이며  $t_b$ 는 날개의 두께이다. 회전 로터를 빠져나온 공기는 로터 날개의 두께 영향으로 날개 뒷쪽에서 유동박리 현상을 보이며 그 후류의 양상은 매우 복잡한 것이나 여기서는 그 효과를 무시한다. Fig. 2는 로터 출구에서 공기 흐름의 유선과 속도벡터의 변화를 관성좌표계에서 스케치한 것이다. 그림에서 로터 출구면 A-A'에서는 유체가 제트 모양으로 분출되고 그 하류면 B-B'에서는 제트들이 합쳐져서 보다 균일한 속도분포를 보이므로 운동량 보존 원리에 의해 회전방향 속도 성분은 변하지 않고, 연속법칙에 의해 반경방향 속도 성분은 감소해야 하므로 그림과 같은 속도 벡터의 변화를 예상할 수 있다. 이에 따라 로터 출구 지점  $r = R_{i2}$ 에서 공기의 선회속도는 같은 위치에서 로터의 회전속도와 동일할 것으로 즉  $v_a = \omega R_{i2}$ 으로 가정하며 반경 방향 좌표에 따라서는 운동량 보존의 원리를 적용하여

$$v_a(r) = \omega R_{i2}^2 / r \quad (4)$$

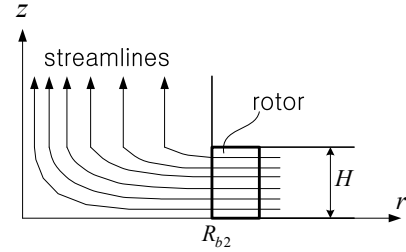


Fig. 3 Streamline pattern on the axial plane of the flow in the core of the paste separator after passing through the rotor

와 같이 변하는 것으로 가정한다. 이는  $r < R_{2b}$ 의 코어 영역에서  $z$ 의 위치와는 무관하게 적용가능하다고 가정한다. 코어 영역의  $z \leq H$ 에서 축방향 속도성분은 아래와 같이  $z$ 에 대해 선형적으로  $r$ 에 대해 3차함수의 형태로 모델링 한다.

$$w_a(r, z) = w_0 \left( 1 - \frac{3r^2}{R_{i2}^2} + \frac{2r^3}{R_{i2}^3} \right) \frac{z}{H} \quad (5)$$

이는  $z = H$ 의 평면 상에서 로터 출구  $r = R_{i2}$ 에서는 0이 되고 회전축  $r = 0$ 에서는  $w_0$ 가 되며 그 사이에서는 반경  $r$ 에 따라 3차함수의 모양으로(case 2의 경우) 변하는 분포이다.  $r$ 에 대해 선형적으로 변하는 형태도 시도하였으나 결과는 그다지 차이가 나지 않음을 확인하였다. 식 (5)를 연속방정식에 대입하고 적분을 통해  $u_a$ 를 구하면 다음과 같다.

$$u_a(r) = \frac{-w_0}{H} \left( \frac{r}{2} - \frac{3r^3}{4R_{i2}^2} + \frac{2r^4}{5R_{i2}^3} \right) \quad (6)$$

미지수  $w_0$ 는 로터 출구에서 연속의 법칙을 적용함으로써 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$w_0 = \frac{10Q}{3\pi R_{i2}^2} \quad (7)$$

코어영역의  $z \geq H$ 에서는

$$u_a = 0 \quad (8a)$$

$$w_a(r, z) = w_0 \left( 1 - \frac{3r^2}{R_{i2}^2} + \frac{2r^3}{R_{i2}^3} \right) \quad (8b)$$

를 가정한다. Fig. 3는 로터 출구 하류의 코어 영역에서 축대칭 공기 유동의 유선의 축단면도를 스케치한 것이다.

입자의 속도 성분  $u_p, v_p, w_p$ 를 지배하는 운동방정식은 원통 좌표계에서 다음과 같다.

$$\frac{du_p}{dt} - \frac{v_p^2}{r} = f_r \tag{9a}$$

$$\frac{dv_p}{dt} + \frac{u_p v_p}{r} = f_\theta \tag{9b}$$

$$\frac{dw_p}{dt} = f_z \tag{9c}$$

우변에 나타나는, 입자에 작용하는 단의 질량당 힘은 중력  $f_g$ 와 공기항력  $f_D$ 의 합으로서 아래 식으로 결정한다.

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}_g + \mathbf{f}_D \tag{10a}$$

$$\mathbf{f}_g = -g\mathbf{k} \tag{10b}$$

$$\mathbf{f}_D = K(\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_p) \tag{10c}$$

$$Re_p = \frac{\rho |\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_p| d_p}{\mu} \tag{10d}$$

$$K = \frac{3c_D\rho}{4\rho_p d_p} |\mathbf{u}_a - \mathbf{u}_p| \tag{10e}$$

$$c_D = \frac{24}{Re_p} + \frac{6Re_p}{11.55 + Re_p^{1.52}} + 0.194Re_p^{0.06} \tag{10f}$$

항력계수의 식 (10f)는 Morrison의 공식[16]에 따른 것으로서,  $Re_p < 1000$ 에서 유효하다.

원주 방향의 속도 성분  $v_p$ 를 결정함에 있어서 특별히 고려해야 할 두 가지 점에 대해 설명한다. 유입 영역에서 입자는 반경방향으로만 흐르며 원주방향 힘의 성분은 0으로 설정한다. 그리고, 로터 내 영역에서는 원주방향 속도 성분을 단순히  $r_p\omega$ 로 가정한다. 실제로 로터 내 채널을 입자가 통과할 때는 날개 벽과 몇 번이고 충돌할 것이며 채널 통로를 벗어날 때도 그 방향은 입구에서의 유입위치에 따라서 상당히 다를 것으로 예상할 수 있다. 그러나 여기서는 문제를 단순화시키기 위해 그러한 세세한 상황은 고려하지 않고, 채널 내에서 입자는 중력에 의해 수직방향으로 침강하는 것 외에는 공기 흐름과 나란히 이동하며(따라서 입자의 원주방향 속도 성분은 관성 좌표계에서  $r_p\omega$ 와 같다고 가정), 출구를 벗어날 때도 그 상대적인 운동방향(회전좌표계 기준)은 채널 길이와 같은 반경방향인 것으로 가정한다.

입자의 운동 경로는 아래 방정식을 풀어서 구한다.

$$\frac{dr_p}{dt} = u_p \tag{11a}$$

$$\frac{d\theta_p}{dt} = \frac{v_p}{r_p} \tag{11b}$$

$$\frac{dz_p}{dt} = w_p \tag{11c}$$

### 3. 입자의 정체궤도 운동

입자가 로터 채널 입구 밖의 유입구  $r = R_i$ 에서 출발하여 로터 채널 내를 거친 뒤 로터 채널 출구를 빠져나와 중심부의 코어 영역을 여행하는 동안 받는 힘은 당연히 입자의 위치좌표  $r$  및 운동속도  $\mathbf{u}_p$ 와 더불어 변한다. 이 때 입자가 반경방향으로 정지 상태에 있고( $u_p = 0$ ) 회전방향으로 공기와 동일한 선회속도로 회전한다고 하면( $v_p = v_a$ ) 입자에 가해지는 반경방향 총 힘의 성분이 0이 될 수 있고, 측면면에서 보았을 때 입자는 정지 상태에 머무르는 물리적 상황이 가능하다. 이것을 입자의 정체 상태로 정의하며, 3차원적으로 보았을 때 입자는 선회 운동을 하므로 그 궤적을 정체 궤도라 부르기로 한다. 이러한 정체점의 존재는 입자의 분리에 중요한 역할을 하게 된다.

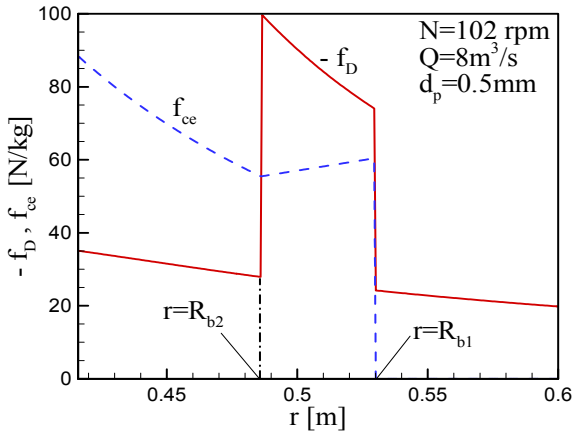
입자의 속도 성분에 관한 앞의 두 가지 가정( $u_p = 0$ 과  $v_p = v_a$ )을 앞에서 유도한 입자의 운동방정식 (9a), (9b)에 적용하면 그 결과는 아래와 같다.

$$\frac{du_p}{dt} = f_{ce} + f_D \tag{12a}$$

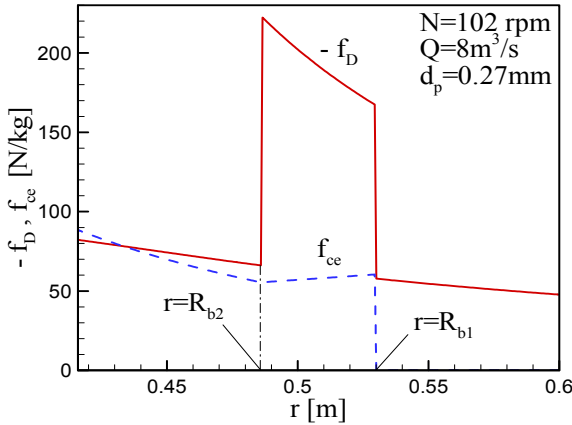
$$\frac{dv_p}{dt} = 0 \tag{12b}$$

여기서,  $f_D = Ku_a$ 는 공기항력으로서 항상 음이고,  $f_{ce} = v_p^2/r_p$ 은 원심력에 해당하며 항상 양이다. 그리고,  $K$ 는 앞에서 제시한 식 (10e)와 같다. 원심력은 식 (9a)의 좌변 둘째 항을 우변으로 이항한 결과이며, 이는 정체운동의 안정성을 논함에 있어서 필요한 조치이다.

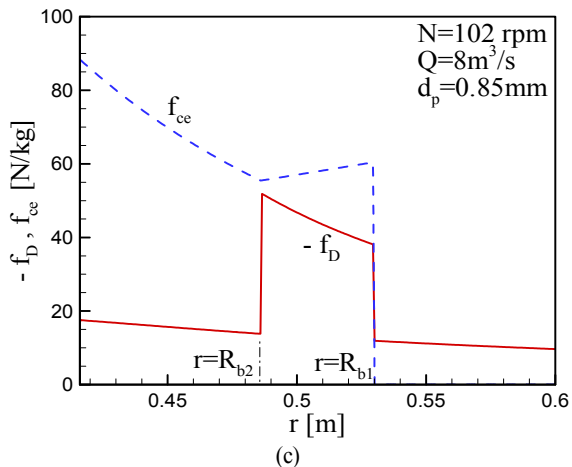
정체조건에서 입자의 위치에 따라 공기 속도, 입자의 속도 및 입자에 가해지는 힘은 다음과 같은 세 가지 영역으로 나누어서 제시할 수 있다; 입구의 자유 유입 공간 ( $R_{b1} < r \leq R_i$ ), 로터 채널 내 영역( $R_{b2} \leq r \leq R_{b1}$ ), 및 코어( $r < R_{b2}$ ). 각각의 영역에서 입자의 반경방향 속도 성분은 항상  $u_p = 0$ 으로 설정된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Variation of the air-flow drag force  $f_D$  and the centrifugal force  $f_{ce}$  with the radial coordinate  $r$ : Numerical results with  $N=102$  rpm,  $Q=8$  m<sup>3</sup>/s; (a)  $d_p=0.5$  mm, (b)  $d_p=0.27$  mm, (c)  $d_p=0.85$  mm

입자가 입자분리 기계 시스템 입구로 유입하고 나서부터 로터 채널에 유입되기 전까지의 자유 유입 공간( $r > R_{b1}$ )에서 입자에 작용하는 힘은 중력 외에는 공기항력  $f_D$  밖에 없다. 입자가 로터 채널 내에 있을 때는 입자의 회전방향 속도가 로터의 회전속도  $r\omega$  와 동일하다고 가정한다. 그리고 원심력은  $f_{ce} = r\omega^2$  과 같다. 입자가 로터를 벗어나 코어 영역에 이르면( $r < R_{i2}$ ) 원심력은 다음과 같은 식으로 결정된다.

$$f_{ce} = \omega^2 R_{i2}^4 / r^3 \quad (13)$$

Fig. 4(a)는 기본 설계조건

$$\begin{aligned} \rho &= 1.25 \text{ kg/m}^3, & \rho_p &= 2500 \text{ kg/m}^3 \\ \mu &= 1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}, & R_{b1} &= 0.53 \text{ m} \\ L &= 0.044 \text{ m}, & H &= 0.36 \text{ m} \\ N &= 102 \text{ rpm}, & Q &= 8 \text{ m}^3/\text{s} \\ z_b &= 360, & t_b &= 4.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

에서 입자직경  $d_p=0.5$  mm에 대해 수치해석으로 구한 세 가지 영역에서의  $f_D$  및  $f_{ce}$ 의 반경방향 좌표  $r$ 에 따른 분포이다. 자유 유입영역( $r > R_{b1}$ )에서 원심력은 0이고 공기항력만이 존재하며 입자를 일방적으로 로터 쪽으로 미는 힘이 작용하므로 정체점이 존재할 수 없다. 로터 채널 내( $R_{i2} \leq r \leq R_{b1}$ )에서는 공기항력이 다른 영역보다 월등히 높은 수치를 보이며 Fig. 4(a)의 경우는 원심력이 어디서나 항력보다 낮으므로 정체점이 존재하지 않는다. 물론 보다 큰 직경에서는 두 힘의 교점이 존재하지만 이 교점은 동적으로 불안정하여 물리적으로 정체점이 될 수 없다. 한편 Fig. 4(a)의 경우, 로터와 코어 사이의 접경면  $r=R_{i2}$ 에서는 공기항력이  $r$ 과 더불어 급증(점프)하는 양상을 보이는데 이는 접경면에서 로터 내의  $u_a$ 가 그 바깥에서의  $u_a$ 보다 높기 때문이다. 그리고 이 때 두 힘의 교점이 존재하며 이 점은 동적으로 안정한 점이므로 물리적으로 실현가능한 정체점이 된다.

입자직경을 점차 낮추더라도 접경면 정체점  $r=R_{i2}$ 는 그대로 존재한다. 그러다가 입자직경이 0.305 mm보다 작아지면 정체점은 접경면에서 벗어나 코어로 이동한다(Fig. 4(b) 참조). 이 점도 사실상 동적으로 안정한 점이다. 이제 반대로 입자직경이 점차 증가하여 0.806 mm보다 커지면 로터 출구에서 머무르던 정체점은 사라진다(Fig. 4(c) 참조).

로터 채널 내부의 영역에서 원심력은 항상  $r$ 과 더불어 증

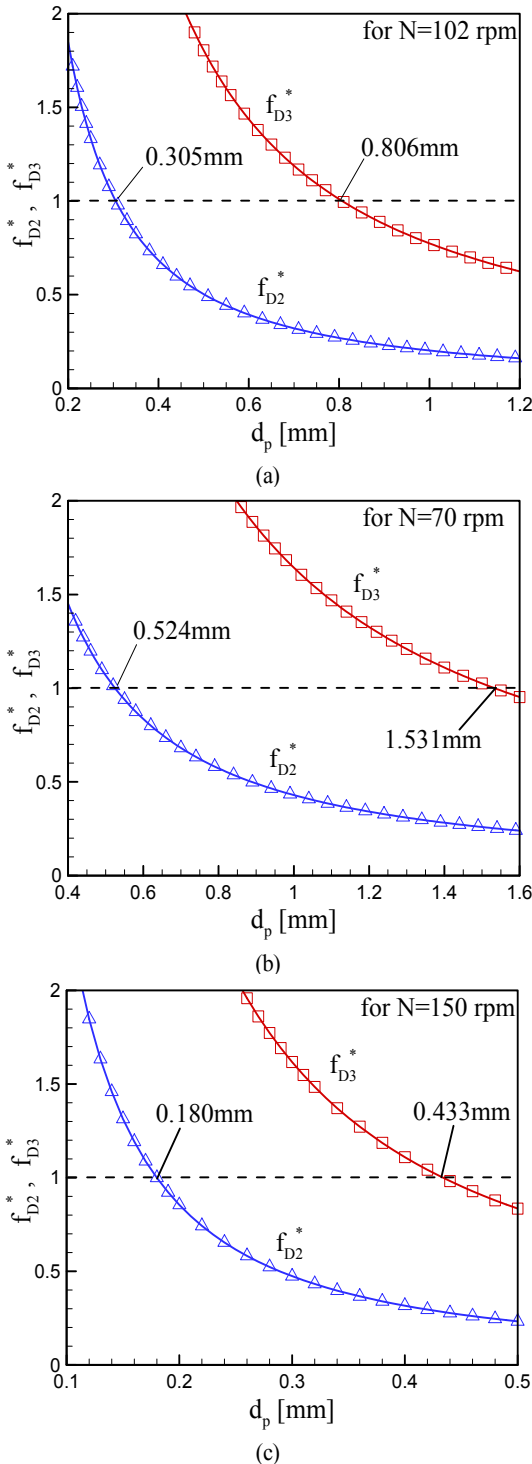


Fig. 5 Dimensionless air-flow drag force  $f_{D2}^*$ ,  $f_{D3}^*$  versus  $d_p$  for three values of  $N$ ; (a)  $N=102$  rpm, (b) 70 rpm, (c) 150 rpm

가하는 반면 공기 항력은 감소하므로 적절한 입자직경에서는 두 힘의 교점  $r=r_c$ 가 존재한다. 그러나 이 교점은 동적으로 불안정하여 물리적으로 실현될 수 없다.

이러한 정체점의 존재에 파라미터들의 영향이 어떠한지 분석해 보기로 한다. 로터 출구 접경에서 로터 내부 공기의 반경방향 속도는  $u_{a2} = -\gamma Q / (2\pi H R_{i2})$ , 그 바깥(하류) 지점 공기의 반경방향 속도는  $u_{a3} = -Q / (2\pi H R_{i2})$ 과 같다. 여기서, 상수  $\gamma = 1 / [1 - z_b t_b / (2\pi R_{i2})]$ 는 항상 1보다 크므로  $|u_{a2}| > |u_{a3}|$ 임을 알 수 있다. 입자가 축단면 상에서 정지한 경우 이러한 공기 속도에 따른 반경방향의 공기 항력  $f_{D2}$ ,  $f_{D3}$ 은 식 (10c)로부터 구해진다. 원심력은  $f_{ce} = \omega^2 R_{i2}$ 과 같다. 접경이 정체점이 되기 위한 조건은  $-f_{D3} < f_{ce} < -f_{D2}$ , 혹은

$$f_{D3}^* < 1 < f_{D2}^* \tag{14}$$

과 같다. 여기서 무차원 힘  $f_{D2}^*$ ,  $f_{D3}^*$ 는 두 지점의 공기항력  $-f_{D2}$ ,  $-f_{D3}$ 을 국소 원심력  $f_{ce}$ 로 나눈 것이다.

Fig. 5(a)는 기본 설계 조건에서 회전속도를  $N=102$  rpm으로 고정하고 입자의 직경  $d_p$ 를 0.2 ~ 1.2 mm 사이로 변화시켰을 때의  $f_{D2}^*$ ,  $f_{D3}^*$ 를 계산한 결과이다. 그림을 보면 예측한 대로 로터 내의 공기 항력( $-f_{D2}$ )이 그 하류의 공기항력( $-f_{D3}$ )보다 항상 크다는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 직경  $0.305 \text{ mm} \leq d_p \leq 0.806 \text{ mm}$ 의 범위에 있는 입자는 로터 출구 접경에서 정체 되므로 그 곳에 집결한다는 것을 예측할 수 있다. 이는 앞의 Fig. 4에 대한 설명에서도 확인한 바 있다.

회전속도가 작아지면, 접경에 집결하는 입자의 직경이 증가한다. 이는 회전속도의 감소는 원심력의 감소로 이어지기 때문에 무차원 공기항력  $f_{D2}^*$  및  $f_{D3}^*$ 이 1 근처의 값을 유지하기 위해서는 단위 질량당 힘  $f_{D2}$  및  $f_{D3}$ 가 감소해야 하며, 공기흐름의 속도가 변함없고 항력 계수가 크게 달라지지 않는다는 조건 하에서는 입자 직경이 증가해야 하기 때문이다 (식 (10c), (10e) 참조). Fig. 5(b)는  $N=70$  rpm인 경우의 계산 결과로서, 로터 출구 접경에 집결하는 입자는 직경  $0.524 \text{ mm} \leq d_p \leq 1.531 \text{ mm}$ 의 범위에 있을 것임을 예측할 수 있다.

회전속도가 증가하면 당연히 접경에 결집하는 입자의 직경은 반대로 감소하게 되어 있다. Fig. 5(c)는  $N=150$  rpm인 경우의 결과로서,  $0.180 \text{ mm} \leq d_p \leq 0.433 \text{ mm}$ 의 범위에 있는 입자가 접경에 모이게 된다.

위 세 가지 경우 공히 입자의 직경이 커지면 무차원 공기항력이 원심력보다 작아져서 입자는 로터를 거슬러 상류로

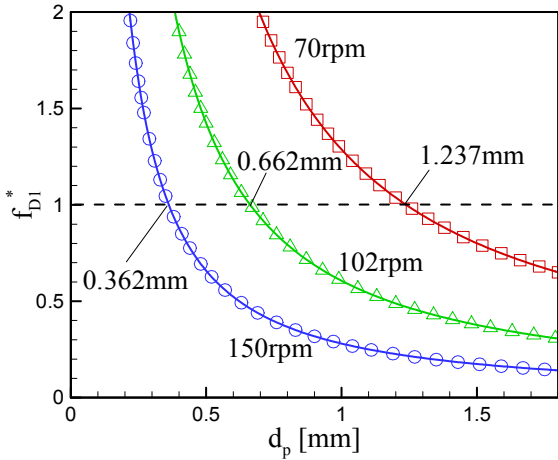


Fig. 6 Variation of  $f_{D1}^*$  with  $d_p$  for three rotor speeds

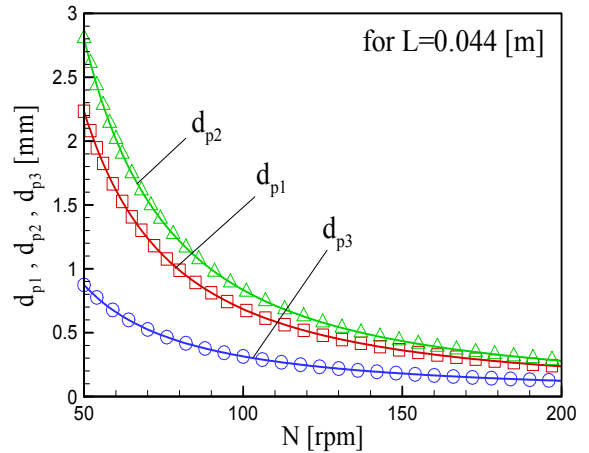


Fig. 7 Variation of  $d_{p1}$ ,  $d_{p2}$  and  $d_{p3}$  with  $N$

이동해 갈 것임을 예측하게 한다. 로터 입구에서도 원심력을 기준으로 한 입자 정지상태의 무차원 공기항력  $f_{D1}^* = -f_{D1}/(\omega^2 R_{bl}^2)$ 의 크기로 입자의 거동을 어느 정도 예측할 수 있다. Fig. 6는 세 가지 회전속도에서 입자의 직경변화에 따른  $f_{D1}^*$ 의 계산결과를 보여주고 있다. 여기서도 입자의 크기가 임계값보다 커지면 원심력에 비해 공기항력이 작아지기 때문에 입자는 로터 내부에서 상류로 거슬러 올라간다. 그러나 로터를 벗어나면 원심력을 유발하는 강제회전의 소스가 없기 때문에 유입 공기의 기류에 밀려 되돌아 올 것이고, 되돌아온 입자의 반경방향 속도가 그렇게 크지 않다면 로터 내로 일단 유입한 뒤 원심력을 받아서 다시 상류로 거슬러가며, 이 과정이 계속해서 반복될 것임을 예측할 수 있다. Fig. 4(c)의 경우는 로터 입구  $r = R_{bl}$ 의 바로 하류에서  $f_{\alpha}$ 가  $-f_D$ 보다 커서 정체현상이 예상되며, 각 그림의 계산 조건인 입자 직경 0.85 mm는 Fig. 6에서 확인 가능한 임계치 0.662 mm보다 크므로 타당한 결과라 말할 수 있다.

무차원 힘  $f_{D1}^*$ ,  $f_{D2}^*$ , 및  $f_{D3}^*$ 이 1이 되는 입자의 직경을 각각  $d_{p1}$ ,  $d_{p2}$ ,  $d_{p3}$ 라 하고, 설계조건을 기준으로 몇 가지 파라미터의 변화에 따른 이들 값의 변화를 계산하였다. Fig. 7은 설계조건에서  $N$ 의 변화에 따른 계산결과로서,  $N$ 이 증가하면  $d_{p1}$ ,  $d_{p2}$ ,  $d_{p3}$ 의 값들은 전반적으로 감소하는 경향을 보인다. 즉, 로터 날개의 유입 및 유출지점에 정체하는 입자의 크기는 회전속도와 더불어 작아진다는 물리적으로 타당한 결론을 도출할 수 있다.

지금까지의 분석결과를 사용하면, 입자의 직경이 주어졌을 때 영역의 입구에서 입자가 투입된 이후 로터 출구를 벗어날 때까지의 입자거동 예측이 가능하다. 예를 들어, 설계조건에

서 직경  $d_p = 0.7$  mm 입자의 경우 로터 채널의 입구까지는 공기 항력에 의해 도달한다. 로터 채널 내로 유입한 즉시 순간적으로 정체 상태에 있다고 한다면 주어진 입자 직경이 0.662 mm보다 크므로 구심 방향의 공기 항력이 원심력보다 작아서(Fig. 6) 입자는 로터에서 되튀어 나오며 이후 로터 채널 입구에서 채널 내를 들락날락하는 정체현상을 보일 것이다. 반면 같은 입자가 로터 채널 내를 통과한다 해도 출구에 도달하였을 때 주어진 입자의 직경이 0.305 mm와 0.806 mm 사이(Fig. 5(a))이므로 다시 로터 출구에서 정체하는 현상이 나타난다.  $d_p = 0.4$  mm 입자의 경우에는 이것이 0.662 mm보다 작으므로 로터 입구를 무사히 통과한다. 그러나 출구에 도달한 뒤에는 앞과 같은 이치로 출구에서 정체현상을 보인다.  $d_p = 0.2$  mm 입자의 경우에는 로터 입구뿐만 아니라 출구도 무사히 통과하게 된다. 즉 설계조건에서 직경 0.2 mm의 미분 입자는 다른 골재로부터 분리된다고 말할 수 있다.

#### 4. 입자 궤적의 수치해석 결과 및 검토

Fig. 8은 설계조건에서 입자의 직경을 4가지로 변화시켜가면서 계산한 입자의 궤적을 나타내고 있다. 입자는  $r_{p0} = 0.9$  m,  $\theta_{p0} = 0$ ,  $z_{p0} = H/2$ 에서 출발하였으며, 붉은실선은 평면도( $x-y$  평면)에서 본 입자의 궤적을, 점선은 정면도( $x-z$  평면)에서 본 입자의 궤적을 나타낸 것이다.

직경 0.4 mm 입자의 점선 궤적을 보면 Fig. 8(a) 처음 수평으로 짧은 거리를 가다가 그 다음부터는 경사진 방향으로 거의 직선적으로 낙하한다. 바닥에 닿으면 입자가 분리된 것으로 보고 계산이 완료되도록 하였다. 실선 궤적을 보면 이 사

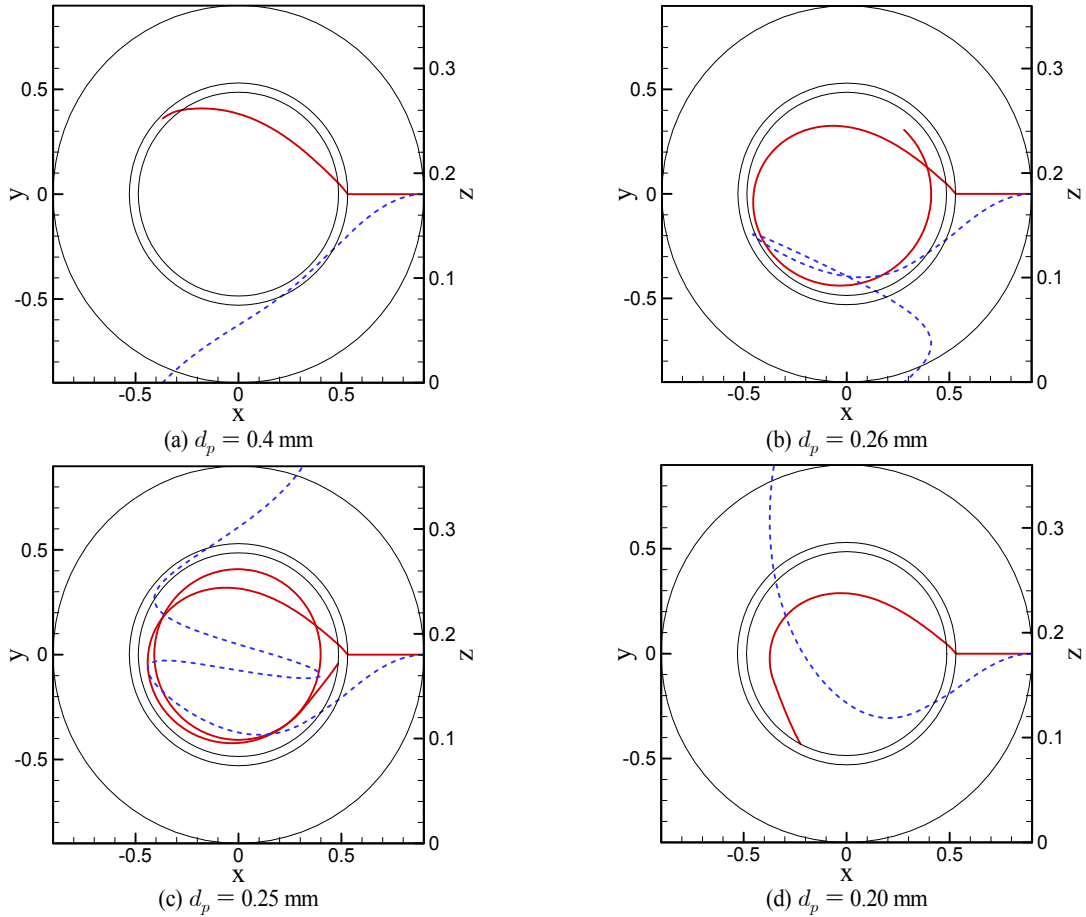


Fig. 8 Particle trajectory (solid line) on the  $(x,y)$ -plane and the variation of the particle's vertical position  $z$  on time (dashed line) given on the  $(x,z)$ -plane obtained from the numerical simulation at each of four particle diameters at  $N=102$  rpm

이 입자는 반 바퀴도 채 돌지 않는다. 입자의 크기가 작아지면 중력의 효과가 상대적으로 작아지면서 바닥까지 낙하하는데 시간이 더 소요된다. 직경 0.26 mm의 경우 Fig. 8(b), 입자가 유입공간의 직선행로를 지나 로터를 거쳐 중심부의 코어 영역에 진입한 뒤 로터의 회전과 같은 방향으로 한 바퀴 이상 회전하고 바닥에 닿는다. 이 사이 입자가 반시계 방향으로 12시 방향에서부터 9시 방향까지 가는 과정에서 상승하기도 하지만 결국에는 바닥에 닿게 된다. 이보다 약간 작은 0.25 mm의 경우 Fig. 8(c)에는 입자가 코어 영역에서 중심축 쪽으로 더욱 가까이 다가간 위치에 머물면서 수직 상승 기류를 더 많이 접하게 되어 결국 바닥에 닿지 못하고 위로 가 버린다. 입자 직경 0.2 mm의 경우 Fig. 8(d)에는 원심력보다는 공기항력의 효과가 더욱 증대되어 중심부 쪽으로 더욱 다가가기 때문에 더 쉽게 상승하여 영역을 벗어나 버린다. 결론적으로, 이 조건에서는 입자 직경 0.25 mm 이하는 분리가 된다고

말할 수 있다.

이제 다른 조건은 동일하게 하고 로터의 회전속도를 줄여서  $N=70$  rpm으로 하여 계산해 보았다(Fig. 9). 앞에서 회전속도가 작아지면 로터 출구의 접경에 밀집하는 입자들의 크기가 증가할 것으로 예측한 바 있다. 이로부터 분리가능한 입자의 직경도 회전속도의 감소와 더불어 커 질것으로 예측되는데, 계산결과를 보면 과연 그러함을 알 수 있다. 입자 직경을 점차 줄여 가면서 계산을 수행해 보면 직경 0.35 mm가 임계치임을 알 수 있다. 직경 0.35 mm의 경우 Fig. 9(a), 평면도를 보면 앞의  $N=102$  rpm의 입자직경 0.26 mm의 경우와 매우 유사한 거동임을 확인할 수 있다. 이 경우, 입자는 평면도의 9시 방향 위치에서 순간적으로 정체한 뒤 아래쪽으로 진로를 결정하고 곧바로 하강한다. 한편, 입자직경 0.34 mm에서는 Fig. 9(b) 평면도에서 9시 방향을 기점으로 입자가 수직 상승을 결정하고 곧바로 상승함을 확인할 수 있다. 연직방향



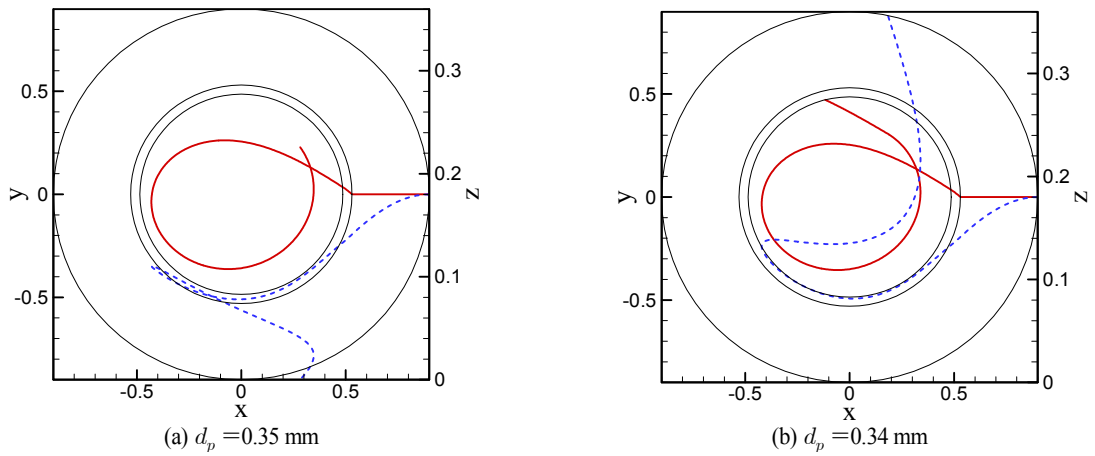


Fig. 9 Particle trajectory and vertical coordinate obtained numerically for each of two particle diameters close to the critical value at  $N=70$  rpm

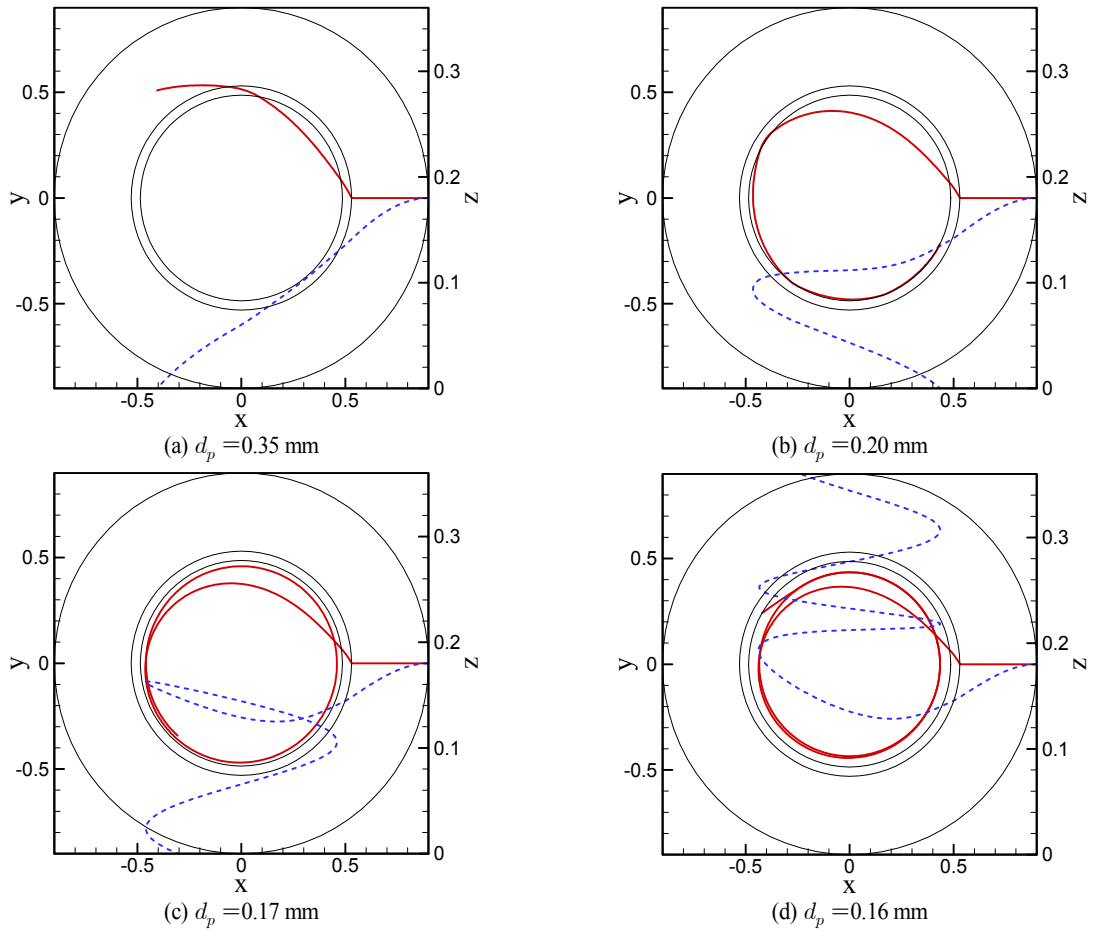


Fig. 10 Particle trajectory and vertical coordinate obtained numerically for each of four particle diameters at  $N=150$  rpm

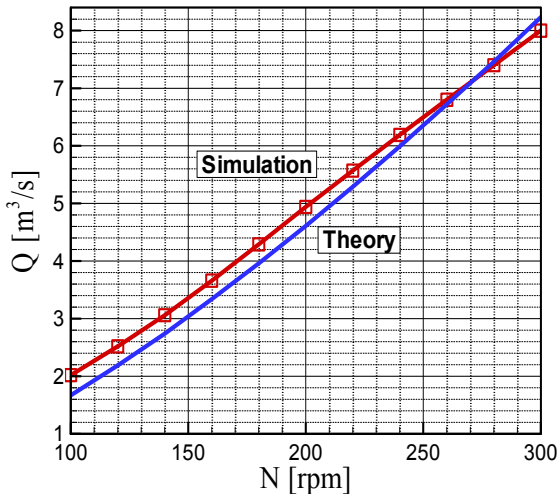


Fig. 11 Line graphs showing numerical simulation result(solid line with symbols) obtained with  $z_{p0} = h$  and analytical estimate(without symbols) for the operational condition  $(N, Q)$  to make 0.075 mm as the critical particle-diameter for its separation from the other aggregates

속도 성분  $w$ 의 크기는  $z$ 와 더불어 증가하므로 정체점(수직 운동 관련)이 존재한다면 그 점은 불안정한 것임을 쉽게 이해할 수 있다. 70 rpm의 이번 경우에도  $r=0.4$  m,  $z=0.1$  m에 위치한 정체점이 0.35 mm의 입자직경에 대해 그러한 성질을 보인다고 말할 수 있겠다.

이제 회전속도를 증가시켜  $N=150$  rpm으로 설정하였다 (Fig. 10). 로터에 유입한 직경 0.35 mm의 골재입자의 경우 Fig. 10(a)는 계속해서 침강하는 동시에 원심력의 증대효과로 인해 로터를 지나 코어 영역에 얇게 침투한 뒤 곧바로 되돌아 나온다(Fig. 10(a)). 직경 0.2 mm의 경우는 Fig. 10(b) 앞에서 예측한대로 로터 출구 접경 지점에 머물면서 정체하는 양상을 보인다. 앞에서  $N=150$  rpm의 경우 접경면에서의 정체현상이 0.18 mm 이상의 직경에서 가능함을 예측한 바 있다 (Fig. 5(c)). 본 계산에서도 이러한 접경면에서의 정체현상이 직경 0.18 mm까지 나타남을 확인하였다. 직경을 더욱 낮추어 0.17 mm로 한 경우 Fig. 10(c)에는 이제 정체점이 접경면보다 약간 더 안쪽에 위치함을 확인할 수 있다. 이 또한 앞에서 예측한 대로이다. 직경을 더욱 낮춘 0.16 mm의 경우 Fig. 10(d)에는 정체점의 위치가 더욱 안 쪽이며 따라서 입자는 수직 방향의 공기 흐름의 영향을 더욱 강하게 받아서 바닥에 가라앉지 못하고 상부 영역의 출구로 연결되는 유선을 따라 배출되어 버린다.

Fig. 11은 분리가능 입자 직경의 목표치를 0.075 mm로 설정하였을 때 회전속도와 유량의 설정치를 구한 데이터로서,

입자 궤적의 수치 시뮬레이션 결과와  $d_{b2} = 0.075$  mm의 조건에 근거한 이론해석 결과를 함께 나타낸 것이다. 분리 가능 입자의 직경을 0.075 mm보다 더 작게 하려면 곡선의 우하 영역에서 유량과 속도 세트를 찾아야 하고 더 크게 하려면 곡선의 좌상 영역에서 찾아야 한다. 이로부터, 분리 가능 입자 직경이 0.075 mm가 되도록 하려면, 회전속도 102 rpm에서는 유량을 2 m³/s 이하로 설정해야 함을 확인할 수 있다. 만약, 처리 물량을 증가시키기 위해 유량을 8 m³/s로 설정한다면 회전속도는 300 rpm으로 증가 시켜야 한다. 둘 사이의 절충으로 유량을 5 m³/s로 할 때는 회전속도를 200 rpm으로 설정해야 한다. 이러한 결과는 실제 입자 분리기의 설계에 직접 활용할 수 있을 것이다.

### 5. 결론

공기중에 혼합된 미분 입자의 분리를 위해 고안된 새로운 개념의 분리기의 작동원리를 이론해석을 통해 규명하였다. 본 기계 시스템의 핵심 부품인 로터 주변의 공기 흐름을 1차원 문제로 단순화 시키고, 공기 및 입자의 속도를 로터 주변 3개 영역별로 나누어서 여러 가지 타당한 가정을 통해 단순화 시킨 모델을 대상으로 하였다. 입자의 분리 여부를 결정하기 위한 입자 궤적의 추적을 위해 수치계산 및 이론해석을 수행하였으며, 해석 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 공기 중에 혼합된 골재 및 미분 입자는 로터의 출구 접경면에서 정체 상태를 보이며 이로 인해 입자가 중력에 의해 침전되는 시간을 확보할 수 있으며 결국 로터 주변의 바닥에 뚫린 구멍을 통해 출구로 배출된다.
- (2) 분리 가능 입자의 직경의 결정에 미치는 주요 파라미터는 공기 유량과 로터 회전속도이며, 공기 유량이 작을수록, 회전속도가 클수록 배출 가능 입자의 직경은 작아진다.
- (3) 기존의 설계조건 즉 유량 8 m³/s, 회전속도 102 rpm에서 분리 가능 입자의 직경은 시뮬레이션에서는 0.35 mm, 이론해석에서는 0.30 mm이 얻어졌으며 둘 사이의 차이는 크지 않다.
- (4) 분리 가능 입자 직경이 0.075 mm가 되도록 하려면, 유량 8 m³/s에서는 회전속도를 300 rpm으로 증가시켜야 하며, 회전속도 102 rpm에서는 유량을 2 m³/s로 낮추어야 한다.
- (5) 단순화된 공기유동 및 입자의 속도 모델에 대해 관련 파라미터들을 다양하게 변화시키면서 수치해석 및 이론해석을 수행하였으며, 그 결과는 향후 본 기계의 운전 및 설계개선에 직접 활용될 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2009-0083510), 2015년도 지식경제부에 의한 한국에너지 기술평가원(KETEP)(No. 21004030200030), 그리고 금호기계의 지원을 받아 수행된 연구과제입니다.

## References

- [1] <http://blog.naver.com/ibs0512/100025527489>(in Korean).
- [2] 2010, 한국건설산업연구원, "골재의 수급 안정 및 품질향상 방안 연구," (in Korean) 국토해양부 연구보고서.
- [3] 2008, Oh, J.-H., Kim, M.-S., Shin, H.-D. and Min, J.-W., "Recent Status on the Recycling of Construction Waste and Research Trends - the Current Situation of Recycling Technology for Waste Resources in Korea(4)," (in Korean) *J. Kor. Inst. Resources Recycling*, Vol.17, No.2, pp.16-29.
- [4] 2011, Hong, M.-Y., "Recycling Plan of Circulation Aggregate Using Construction Waste," (in Korean) *M.S. Thesis, Dept. of Environmental Engineering, Graduate School of Industry, Hanbat National University*.
- [5] 2007, Lee, M.-G., Kwon, K.-O., Gayabazar, G. and Kang, H.-C., "Separation of Recycled Aggregates from Waste Concrete by Heavy Medium Separation," (in Korean) *J. Kor. Inst. Resources Recycling*, Vol.16, No.5, pp.13-18.
- [6] 2015, 성중금, "공기 순환방식의 건식 순환 잔골재 생산 장치," 특허 10-1523635.
- [7] 2009, Kim, J.M., Kang, C. and Kim, H.S., "Physical and Chemical Properties of Waste Concrete Powders Originated from the Recycling Process of Waste Concrete," (in Korean) *J. Kor. Recycled Construction Resources Inst.*, Vol.4, No.2, pp.82-89.
- [8] 2004, 구경신, 구재일, "건설폐기물에서의 재생골재 선별 장치," 특허 10-0436545.
- [9] 2003, 기준호, 기형호, "건설폐기물로부터 시멘트 페이스트 및 모르타르가 제거된 재생골재 및 모래를 생산하는 방법 및 장치," 특허 특2003-0083663.
- [10] 2004, 김용, "건설폐기물을 이용한 골재 재생방법 및 재생장치," 특허 10-0455833.
- [11] 2006, 김장용, "공기순환형 이물질, 미분 제거수단을 포함한 양질의 순환골재 생산 방법 및 그 장치," 특허 10-0544233.
- [12] 2006, 유은미, 한상희, "재생 굵은골재 미분 제거장치," 특허 10-0552351.
- [13] 2007, 이명섭, "공기 순환식 골재 분리장치," 특허 10-0670186.
- [14] 2014, 정일섭, "흡입원심배출장치를 구비한 폐건축물에서 발생된 폐골재에 섞인 이물질 선별장치," 특허 10-1479187.
- [15] 2015, Park, S.W., Kang, Y.S., Kang S. and Suh, Y.K., "Investigation of the Operational Principle and Parametric Study on a Dry Paste Separator Equipped with a Rotor - II CFD Analysis," (in Korean) *J. Comput. Fluids Eng.* (submitted).
- [16] 2013, Morrison, F.A., *An Introduction to Fluid Mechanics*, Cambridge University Press.