

3단 회전식 건조기의 내부 유동에 관한 수치해석 Numerical Analysis of the Inner Flow of a 3-pass Rotary Dryer

김태식 · 김영국 · 최윤환 · 이연원 · 최 광

T. S. Kim, Y. K. Kim, Y. H. Choi, Y. W. Lee and K. Choi

Key Words : 3 pass rotary dryer(3단 회전식 건조기), Lift plate(훑기 판), Screw plate(나선형 이송 판)

Abstract : In order to prevent the environmental pollution, the dryers are commonly used to treat sludge that one of sewages is polluting the quality of water. Generally, the drying method is various as to the property of material and use. Rotary dryer is a good apparatus to treat them. The rotary dryer is the way that is to make substance transmission and heating using hot air between sludge particles and heated gas. In this paper, we performed a numerical analysis of the inner air flow of the 3-pass rotary dryer through the changing rotational speed from 3rpm to 10rpm. In this result, we found that 3rpm is effective to dry material in terms of heat transfer because large scale velocity fluctuation is occurred inside the first and second drum. Also we confirmed that 5rpm and 8rpm showed up uniform flow at the center area of the first drum.

1. 서 론

산업화가 진행됨에 따라 환경문제의 중요성이 강조되면서 환경오염 개선에 대한 요구가 증가하고 있다. 환경오염 중에서 가장 심각하게 대두되는 것 중의 하나가 수질오염이라 할 수 있는데, 몇 년 전 부터 정부차원에서 주요 하천의 수질 오염을 방지하기 위하여 하수 처리 기초 시설을 갖추고 운영되고 있다. 일반적으로 하수처리장이 가동됨에 따라 부수적으로 하수 슬러지가 발생하게 되는데, 하수 슬러지는 다량의 수분(80%)과 유기물(20%)을 포함하고 있다. 현재 하수 슬러지 처리 방법으로는 대부분이 단순 매립되거나 해양투기가 되고 있지만, 매립은 악취, 해충 등의 2차적인 환경오염을 유발시킬 우려가 있고, 국제 환경규제에 따라, 향후 해양투기는 어려울 전망이다. 현재의 슬러지 자원화 처리 방법으로는 주로 소각에 의해 이루어지고 있으나, 열풍을 이용하여 슬러지를 건조시킨 후, 슬러지

에 포함된 수분 함량을 줄이고 고농도의 유기물을 확보하여 토지의 퇴비화 및 시멘트 원료 등에 사용하는 방법도 활발하게 실행되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 하수 슬러지를 퇴비화 할 목적으로 사용하고 있는 회전식 열풍건조기에 대해서 건조기 내부로 공급되는 열원에 관하여 회전식 건조기 내부 유동에 관한 수치해석을 실시하여 건조기의 설계에 대한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 해석 모델 및 수치해석 방법

2.1 해석 모델

본 연구에 사용된 모델은 전기 히터에 의해 가열된 공기를 건조기 내로 투입하여 하수 슬러지를 직·간접 방식으로 건조시키는 회전식 건조기로서 기존의 회전식 건조기와는 다른 구조로 3개의 드럼이 동시에 같은 방향으로 회전하면서 재료를 건조시키는 3단 회전식 건조기이다. 일반적으로 건조기의 선정은 재료의 성질이나 재활용하는 목적에 따라 결정하는데, 우선 다루기가 용이하고 재료의 재활용성이 좋아야 하기 때문에 장치 설계에서 재료의 체류시간과 건조 효율 및 열 효율에 대한 문제가 하나의 과제가 된다. 3단 회전식 건조기는 이런 측면에서 하수 슬러지를 분말 형태가 아닌 pellet 형태로 제조가 가능하여 제 2공정을 거치지 않고 바로

접수일 : 2005년 6월 4일
이연원(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : ywlee@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1417
최윤환 : 부경대학교 BK21 사업단
김태식 : 부경대학교 대학원 기계공학부
김영국 : 구마모토대학교 대학원
최 광 : 포항산업과학연구원 강구조연구소

퇴비나 시멘트 원료로 사용할 수 있어 활용성 면에서 우수한 성능을 가지고 있다. 보통 1단 건조기에 비하여 건조 효율이 1.5배 정도 좋은 것으로 보고되고 있다.^{1),4),6)}

본 연구에 있어서 모델링 되어진 회전식 건조기의 형상은 Fig. 1과 같다. 먼저 1번 드럼의 입구에서는 공기 유동을 벽면으로 원활하게 공급하고, 슬러지가 열풍에 의하여 멀리 이동하는 것을 방지하는 콘 모양의 장애물이 설치되어 있다. 또한 첫 번째 드럼의 벽면에는 하수 슬러지가 열풍과의 접촉으로 건조가 잘 이루어 질수 있도록 드럼이 회전할 때 하수 슬러지를 건어 올려 아래로 낙하시킬 수 있는 lift plate가 부착되어 있다.

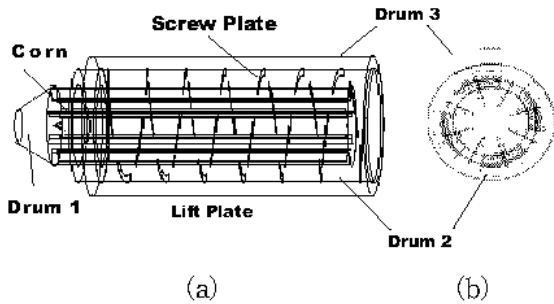


Fig. 1 Schematic diagram of 3-pass rotational dryer

방향 45° 간격으로 부착 되어있다. 또한 2번 드럼에는 screw plate가 나선형의 형상으로 pitch 660mm 간격으로 각각 부착되어 있다. Screw plate의 역할은 1번 드럼에서 재료가 가지는 초기 함수율을 80%에서 50%로 수분함수율이 감소된 상태에서 2번 드럼을 지나면서 재료가 가지는 최종 함수율 40~45%정도의 건조가 이루어지면서 이동할 수 있도록 재료와의 접촉 면적의 증대와 물체의 이동을 고려하는 것이다.

일반적으로 lift plate의 설계는 드럼의 회전수와 함께 재료의 이동과 재료를 건조시키는데 중요한 인자라 할 수 있기 때문에, Fig. 2처럼 원심력을 고려한 lift plate의 훔기 용량 Z(%)와 ϕ (동식각)는 다음과 같은 식으로 정의 할 수 있다.^{1),3),5)}

$$Z = \frac{100 \cdot n \cdot z}{S} \quad (1)$$

$$\tan \phi = \frac{\mu_p - \mu_p \nu \sin \theta + \nu \cos \theta}{1 - \mu_p \nu \cos \theta - \nu \sin \theta} \quad (2)$$

$$\nu = \frac{r \omega^2}{g} \quad (3)$$

여기서, n은 lift plate의 개수이고, S는 원통 횡단 면적(m²)이며, z는 한 개의 lift plate의 단위 길이당 용량(m³/m), μ_p 는 마찰계수, Lift의 훔기 용량은 lift의 끝단이 원통의 수평축의 중심을 지날 때 거기에 쌓이는 재료 층의 단면적으로 구해진다.

2.2 수치해석 방법

3단 회전식 건조기의 수치해석은 내부 유동이 시간에 따라 변화하는 비압축성, 비정상 유동으로 가정하고, 유동을 3차원으로 해석하였다. 유동해석은 Fluent 6.1.2 parallel 프로그램을 이용하였으며, 계산에 사용된 컴퓨터는 node수 16개 cpu 2.8GHz의 병렬컴퓨터이다. 난류 모델로는 건조기내에 회전에 의한 swirling 현상을 감안하여 RNG(Renormalization Group) k- ϵ 모델을 적용하였다.²⁾ 3단 회전식 건조기의 내부 유동 특성을 분석하기 위한 경계 조건으로 입구 유속은 673K의 온도를 가지는 가열된 공기가 3.23kg/s의 질량 유량의 값으로 유입된다고 가정하였으며, 건조기 내부는 가열된 공기가 들어가기 전의 초기상태로 가정한 후, 회전수를 3rpm, 5rpm, 8rpm, 10rpm으로 변경하면서 각각의 회전수에 대한 건조기 내부 유동 특성을 비교 분석하였다.

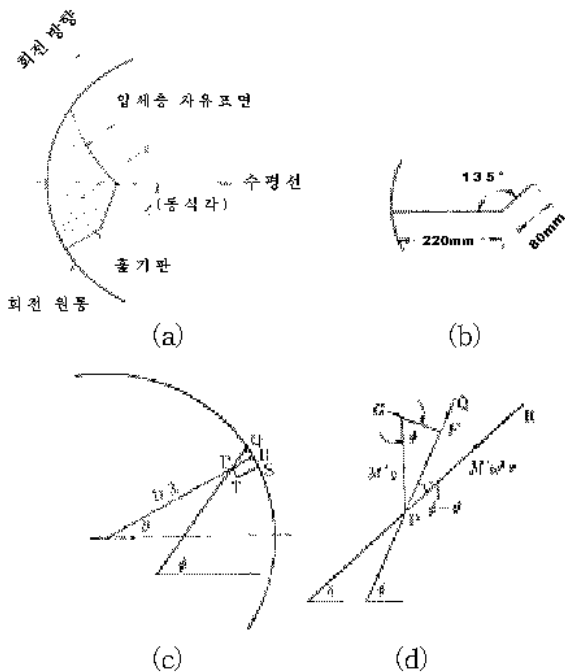


Fig. 2 Definitions of volume rate for lift plate

Fig. 2의 (b)는 실제 현장 실험에 적용되고 있는 lift plate의 형상으로서 똑같은 모양으로 8개가 원주

Table 1 Boundary condition of a rotary dryer

입 구	벽 면	출 구	난류모델
m 3.23 kg/s	로그법칙	대기경계	RNG
T 673K	adiabatic		k ε 모델

3. 결과 및 분석

3.1 속도분포

Fig. 3, Fig. 4는 3단 회전식 건조기의 첫 번째 드럼에서의 축 방향 속도 성분을 드럼 길이 방향으로 1.2m, 1.5m, 1.8m, 2.5m, 3m, 4m 지점에 대해서 나타낸 것이다. 우선 Fig. 3과 Fig. 4에서 3rpm인 경우, corn 입구에서 축 방향 속도 성분에 대한 회전 속도 성분의 비율이 2.4%로서 다른 회전수를 가진 경우에 비하여 축 방향 속도 성분이 corn을 지나면서 가장 크게 나타나고 있고, 3rpm드럼의 회전속도에 비해 축 방향 속도벡터들이 corn을 지나 드럼 벽면방향으로 빠르게 유출되면서 corn 후부 정 중앙 영역에서부터 드럼 끝단까지 유속 변동이 심한 와류 영역이 크게 형성됨을 알 수 있다.

변동이 심한 와류는 하수 슬러지를 건조시키는데 매우 중요한 요소이기 때문에 3rpm인 경우가 열전달 효과가 클 것으로 예상된다. 또한 첫 번째 드럼 끝단 벽면에서 와류 현상이 나타나고 있다. 이는 벽면과의 충돌로 인하여 발생하는 것으로 사료된다. 또한, 재순환 영역은 Z-방향으로 4m 지점까지 변동이 심하게 나타남을 알 수 있다. 5rpm과 8rpm인 경우, 축 방향 성분에 대한 회전속도 성분의 비율이 각각 4.17%, 6.68%로서 유입되는 공기 유량에 대비해서 드럼 상부영역에서 드럼 끝단으로 이동하는 유속 분포가 비교적 균일하게 나타나고 있으며, 후류 영역에서의 역류되는 속도 분포 또한 균일한 특징을 보여주고 있다.

그러나 와류 영역에서 유속의 변동은 다소 감소된 형태로 나타나고 있다. 10rpm인 경우는 축 방향 속도에 대한 회전속도 성분비율이 8.34%로서, 입구에서 축 방향으로 나아가려는 유속 분포가 가장 낮은 값을 나타내고 있고, 드럼 중앙부에서 와류에 의한 속도 변동이 거의 없으며 재순환 유속의 크기도 다소 감소된 형태로 나타났다.

두 번째 드럼의 벽면에서 유동의 벽면 충돌로 인해 발생하는 재순환 유동의 감소가 그 이유라 할 수 있다. 대체적으로 거리에 따라 다소 차이를 보이지만 회전수가 낮을수록 첫 번째 드럼 중앙부에서 유

속의 변화 폭이 크게 나타나고 있으며 회전수가 증가할수록 재순환 유속의 감소와 두 번째 드럼 벽면에서의 와류가 감소함을 알 수 있다.

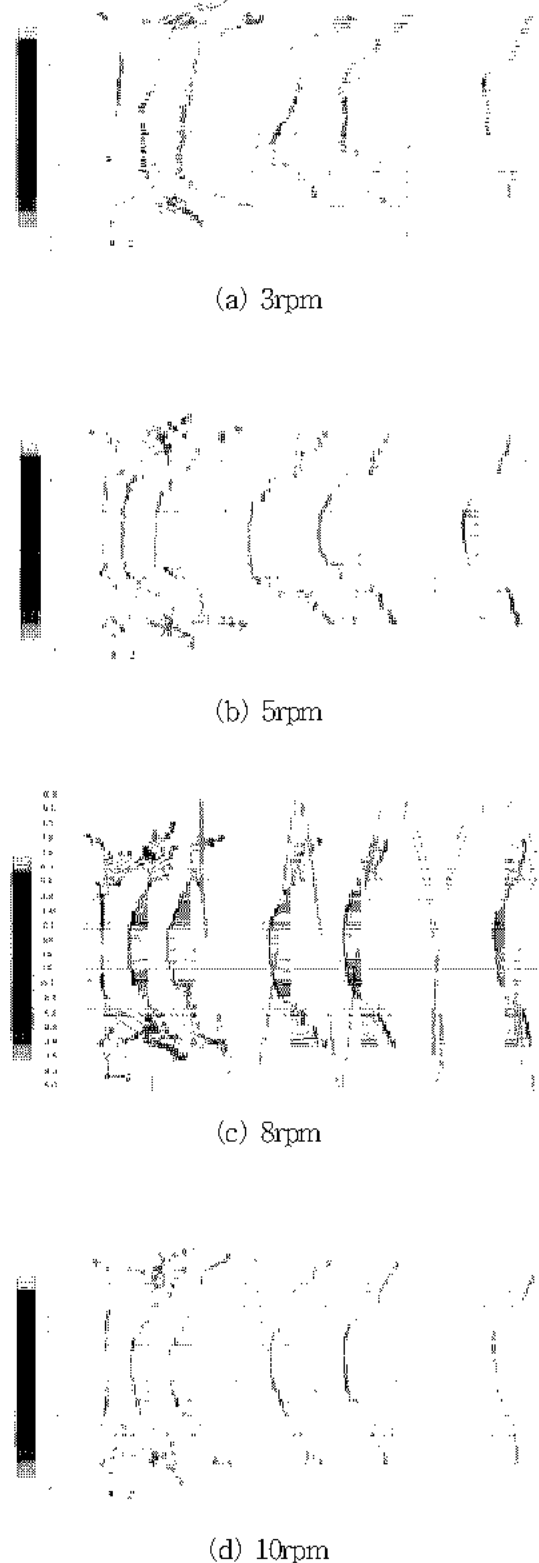


Fig. 3 Axial velocity vectors versus rotational speeds at the center position of the first drum

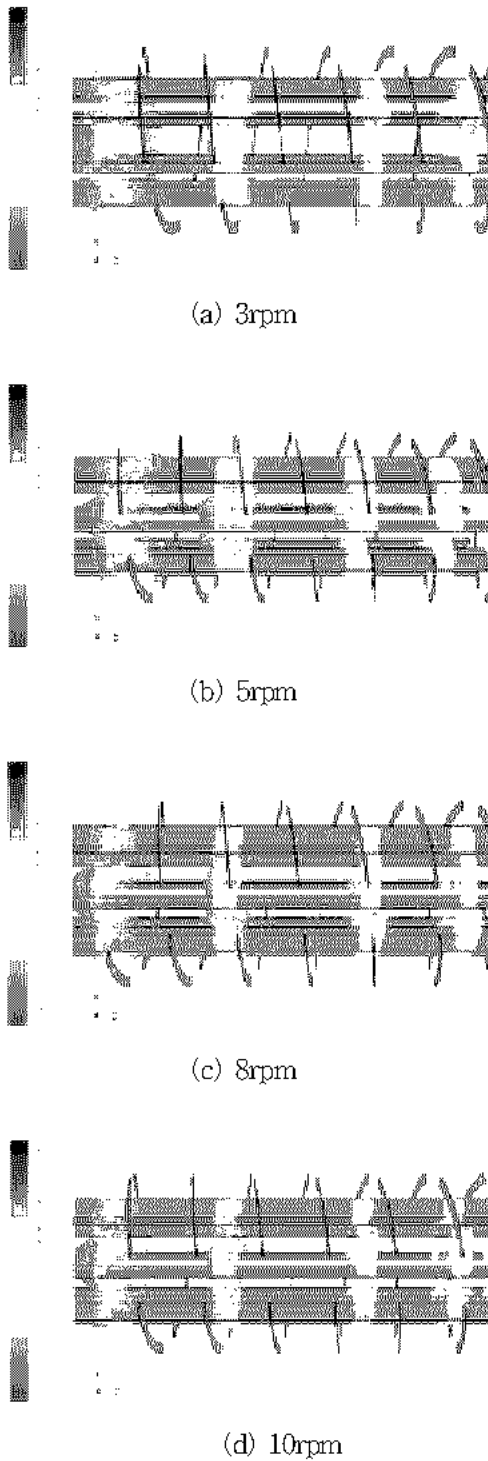


Fig. 4 Axial velocity vectors versus rotational speeds at the surrounding lifts

Fig. 5는 각각의 회전수에 대하여 첫 번째 드럼 내에서 y축(직경 방향)을 기준으로 각 지점에 대한 와도를 나타낸 것이다. 전반적으로 Corn을 지나면서 드럼 끝단으로 갈수록 와도는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 5rpm인 경우 1.2m 지점에서 가장 높은 값을 보여주고 있으며 8rpm과 유사하게 드럼

중앙부에서 균일한 분포를 나타내고 있다. 3rpm인 경우, 드럼 중앙부에서 후류에 의한 유속의 변동의 변동으로 와도의 폭이 y축 방향으로 크게 분포되고 있다. 이는 corn 뒷면에서 유속의 감소와 벽면에서의 빠른 유속으로 인하여 드럼 전체에 걸쳐 와류가 형성되는 것으로 사료된다.

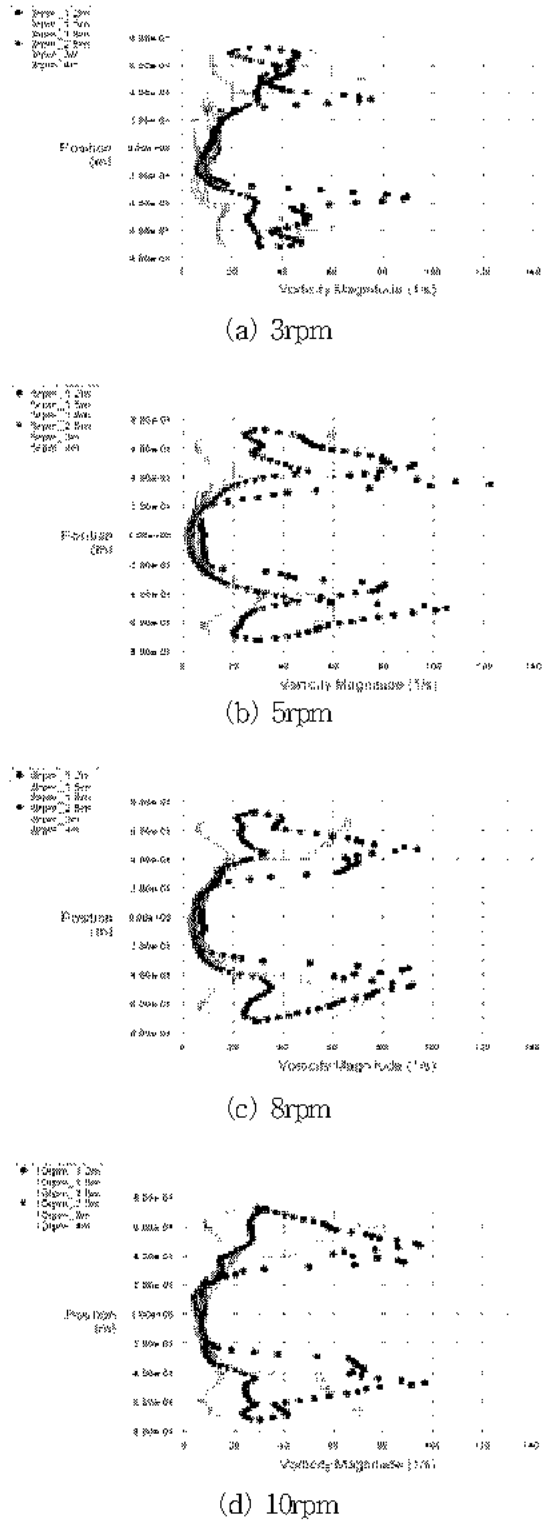


Fig. 5 Vorticity profiles versus rotational speeds

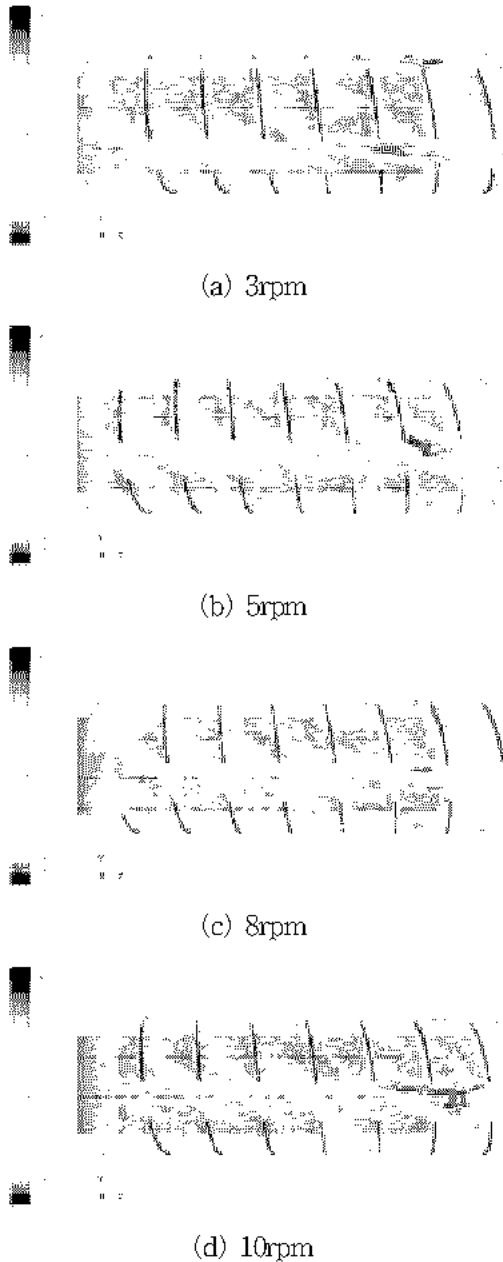


Fig. 6 Axial velocity vectors at the second drum

Fig. 6은 2번 드럼에서의 축 방향 속도 성분을 나타낸 것이다. 3rpm인 경우가 축 방향으로 이동하는 유동이 가장 많이 나타나며, 회전수가 증가할수록 회전력에 영향을 받아 축 방향 유속이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 첫 번째 드럼을 지나 2번 드럼으로 유입되는 유체는 screw plate 간격사이에서 유동이 서로 교차하면서 두 번째 드럼 입구부에서 재순환 영역을 형성하는데 회전수가 증가할수록 재순환 영역이 커짐을 알 수 있다. 이는 회전수가 높은 경우 속도 성분이 축 방향으로 나아가지 못하고 회전속도 성분에 의해 두 속도 성분이 두 번째 드럼 입구부 screw plate의 간격 틈에서 유체의 혼

합형태가 이루어지면서 재순환 영역이 발생하는 것으로 사료된다.

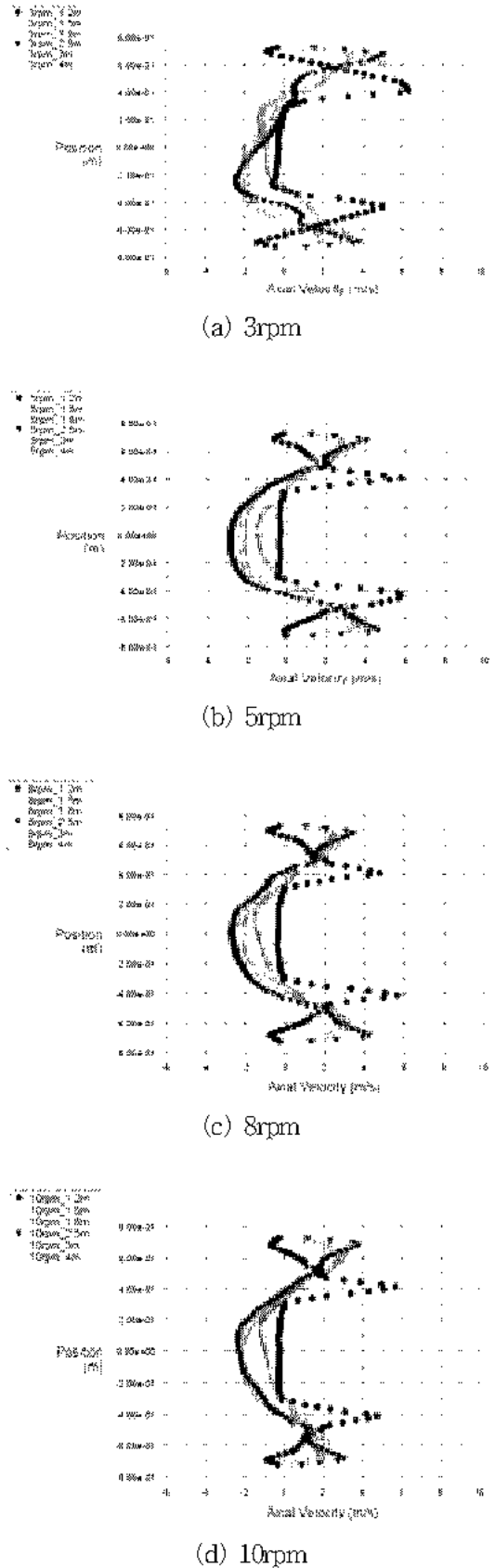


Fig. 7 Velocity profiles versus rotational speeds

Fig. 7은 15초인 경우의 각각의 회전수에 대한 각 지점에서의 속도성분을 나타낸 것이다. 3rpm인 경우, 1.2m와 4m의 두 지점간의 속도 변화차이가 3.5m/s 로 5rpm~10rpm보다 높게 나타나고 있는데 이는 드럼 내에 발생하는 와류의 영향인 것으로 사료되며, 5rpm인 경우는 1.2m와 4m 두 지점간의 속도 변화의 차가 2.5m/s로서 다른 회전수에 비하여 축방향의 유속이 다소 작은 변동 값을 보이고 있다.

3.2 온도분포

Fig. 8은 가열된 공기가 건조기 내로 유입되었을 때, 회전수에 따라서 드럼 내에 전달되는 온도분포

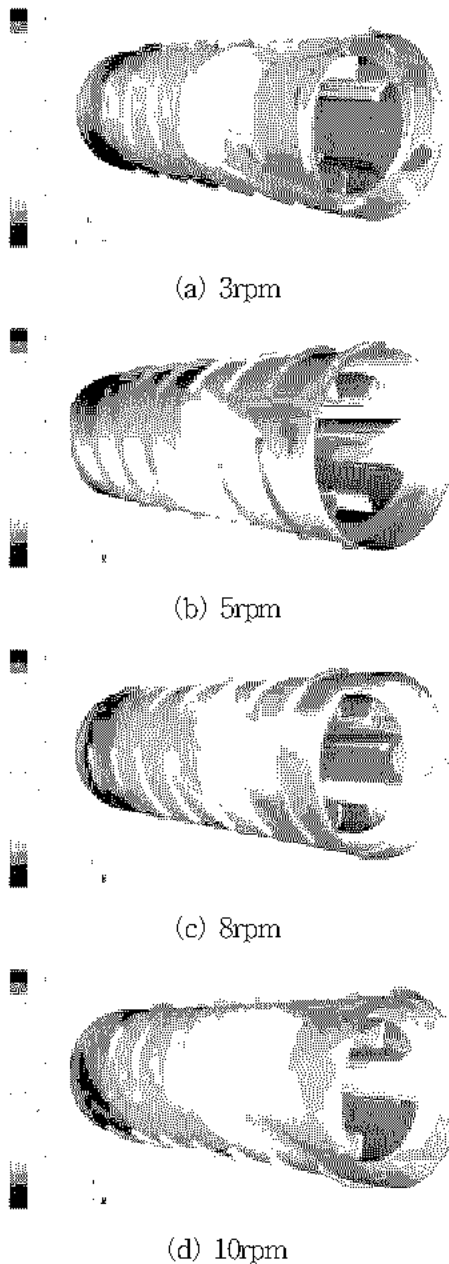


Fig. 8 Temperature contours versus rotational speeds

를 나타낸 것이다. 회전수가 작을수록 온도 전달이 좋게 나타남을 알 수 있다. 이는 축 방향 속도 성분이 회전수가 작은 경우에 Screw Plate사이로 많은 유동이 이동하기 때문이며 회전수가 클수록 저항력이 커져서 두 번째 드럼 입구부에 많은 와류로 인하여 열전달이 잘 이루어지지 않는 것으로 판단된다.

3.3 압력분포

Fig. 9는 각각의 회전수에 따른 압력 분포를 나타낸 것이다. 전반적으로 회전수가 낮을수록 입구에서

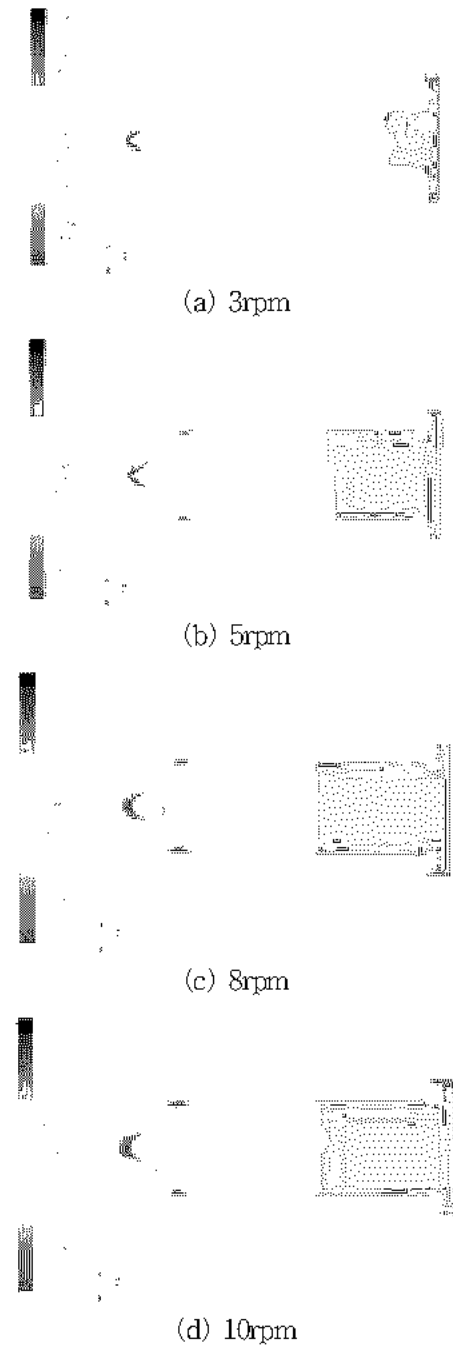


Fig. 9 Pressure profiles versus rotational speeds

의 압력은 낮게 나타나고 있다. Corn 뒷면 영역에서는 다소 높은 압력을 보이고 있는데 이는 corn을 지나면서 유속이 빨라지면서 와류로 인한 벽면 충돌로 압력이 상승하는 것으로 사료된다. 후부 1.2m 지점에서 와류의 영향으로 속도가 감소하여 유동 정체현상이 생기고 그 영역에서의 압력이 상승하는 경향을 보이고 있다.

4. 결 론

3단 회전식 건조기에 대한 수치해석을 수행하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 회전수가 낮을수록 축 방향의 유동이 반경방향의 유동보다 많은 것으로 사료되며, 3rpm의 경우 드럼 중앙부에서 속도 변동이 크게 발생하고, 5rpm과 8rpm은 후류의 분포와 벽면으로의 유속이 균일한 형태로 나타났다. 1.2m와 4m 두 지점간의 속도 변화의 차가 3rpm인 경우는 3.5m/s, 5rpm인 경우가 2.5m/s로 가장 낮게 나타나고 있다.
- (2) 재순환 영역은 드럼 전체에 걸쳐 발생하고 있는데 드럼의 길이 방향으로 1.2m~2.5m 지점에서 변동 폭이 크게 나타난다. 특히 드럼 입구부와 회전수 증가에 따라 두 번째 드럼 유입부에서 크게 발달하는 와류 영역을 감소하기 위한 형상 변경이 필요할 것으로 사료된다.
- (3) 드럼 내 압력은 대체적으로 대기압 이하의 낮은 압력 값을 나타내고 있는데 회전수가 증가함에 따라 조금씩 압력이 상승하는 것으로 나타났다으며, 각각의 회전수(3rpm, 5rpm, 8rpm, 10rpm)에 대하여 입·출구의 전압력 차이는 각각 54.11Pa, 54.91Pa, 55.78Pa, 55.27Pa으로 나타났다.

후 기

본 연구는 부경대학교 BK21 기계사업단 및 RIST 지원 과제의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사의 말씀을 드립니다.

참고문헌

1. 桐榮, 良三 編, 1967, “乾燥 裝置”, 日刊工業新聞

社, pp. 139~141.

2. B. Mohammadi, O.Pironneau, 1994, “Analysis of the K-Epsilon Turbulence Model”, pp. 89~90
3. 岡崎守男, 鈴木 睦, “化學 工學 便覽”
4. S. J. POTRER, B.Sc., M.S., F.R.I.C. “The design of rotary driers and coolers” TRANS. INSTN CHEM. ENGRS, Vol. 41, 1963.
5. W. C. SAEMAN, “Passage of solids through rotary kilns” Chemical Engineering Progress, pp. 508~514, October, 1951.
6. Harold F. Porter, B.S, George A. Schurr, Ph.D., David F. Well, B.S., Konrad T. Semrau, M.S, “Solids Drying and Gas-Solid Systems” Section 20.