

가변단면 Sweeping Auger의 유동량 해석에 관한 연구

최갑용*, 오태일*, 신성호*
*아주자동차대학 자동차계열
e-mail:kychoi@motor.ac.kr

A Study on the Flow-Rate Analysis of Variable Section Sweeping Auger

Kab-Yong Choi*, Tae-Il Oh*, Sung-Ho Shin*
*Division of Automobile, Ajou Motor College

요 약

본 연구는 일체형 곡물 건조/저장 시스템 개발에 사용되는 Sweeping Auger의 성능 개선을 위하여 추진되었다. 이를 위하여 본 연구에서는 Variable Section Sweeping Auger를 제안하고 그 특성을 해석할 수 있는 수식모형을 개발하였다. 이를 통하여 곡물 건조 저장시스템의 성능개선에 이바지 하고자 한다.

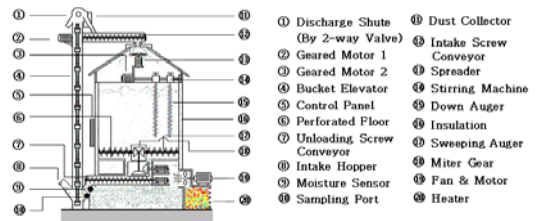
1. 곡물 건조/저장 시스템의 개요

[그림 1]은 본 연구의 대상이 되는 곡물 건조/저장 시스템(이하 건조시스템이라 칭한다.)이다. 건조시스템은 수분함량이 많은 곡물은 쉽게 변질되기 때문에 건조시스템은 수분을 일정수준에 도달하도록 건조시킨 후 지속적으로 안전한 상태로 유지 보존하는 용도로 사용되고 있다.



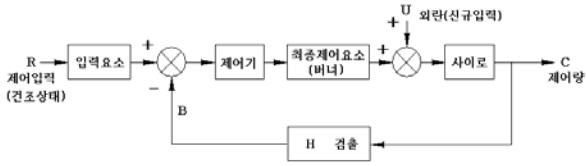
[그림 1] 곡물 건조/저장 시스템

[그림 2]는 건조시스템의 구조를 보여주고 있다. 건조대상 곡물을 ④ Bucket Elevator와 ⑫ Intake Screw Conveyor를 이용하여 시스템 상층부로 운반해서 ⑬ Spreader를 이용하여 시스템 내부에 골고루 뿌리면서 장입시킨다. 장입 후 곧바로 하부에 있는 ⑳ Heater를 이용하여 수분함유량이 일정 수준에 이를 때까지 건조시킨다. 이 때 ⑮ Down-Auger는 공급되는 건조 풍이 곡물사이를 잘 통과될 수 있도록 교반시키는 역할을 한다. 건조가 완료되거나 희망하는 수준에 도달한 곡물은 ⑰ SA(Sweeping Auger, 이하 SA로 칭한다.)에 의하여 ⑦ Unloading screw conveyor로 이송된 후 시스템 외부로 배출하거나 재장입이 이루어지기도 한다.



[그림 2] 곡물 건조/저장 시스템의 구조

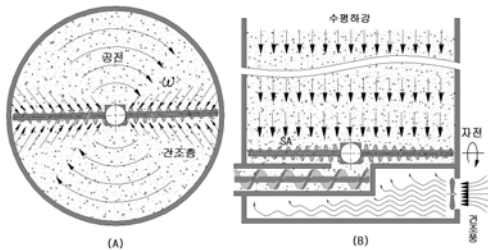
건조시스템의 제어선도는 [그림 3]와 같다. 곡물은 유기체로서 그 보존조건이 무기체보다 까다롭기 때문에 다양한 조건을 고려하여야 한다.



[그림 3] 건조공정 블록선도

제어시스템은 지속적으로 유입과 배출이 이루어지기 때문에 저장기간 동안에는 건조 상태를 모니터링하면서 적절한 상태를 유지할 수 있도록 Closed-Loop Control System 으로 이루어져 있다.

시스템의 핵심기술은 곡물을 장입된 순서에 따라 빠짐없이 순환시킬 수 있도록 하는데 있다. 이를 본 연구에서는 선입선출이라고 부르기로 한다. 이와 같은 선입선출 기능을 발휘하는데 가장 직접적이고 중요한 역할을 담당하는 것이 SA이다. 바로 이 SA에 의하여 선입선출이 이루어지기 때문에 SA는 건조시스템의 성능을 결정하는 핵심요소라고해도 과언이 아니다.



[그림 4] SA의 공전과 자전

SA의 공전은 [그림 4]의 (A)와 같이 저장된 곡물을 사방에서 골고루 배출될 수 있도록 하는 역할을 하고, 자전은 [그림 4]의 (B)와 같이 안쪽과 바깥쪽의 곡물을 골고루 배출될 수 있도록 해서 시스템 내에 있는 곡물 전체가 수평하강 즉 '선입선출'이 이루어지도록 하는 역할을 한다. SA는 직경방향으로 배치되어서 양쪽의 곡물을 중심으로 배출하기 때문에 두 개가 하나의 짝으로 이용된다. 그리고 이 두 SA는 공전방향은 같지만 자전방향은 반대이다.

2. 연구목적

건조시스템의 핵심기술은 시스템으로 유입/유출되는 곡물의 선입선출이 이루어지도록 하는데 있고,

이것을 가능하도록 하는 핵심요소는 SA라고 하는 사실을 앞에서 밝혔다. 지금까지 사용해온 직선형 SA의 특성으로는 선입선출을 시킬 수 없다. 본 연구는 직선형 SA의 문제점을 개선해서 바람직한 성능을 발휘할 수 있는 설계방향을 제시 하고자하는데 있다. 시스템의 선입선출을 가능하게 하려면 SA가 갖추어야 할 조건은 중간유입이 가능해야 한다는 것이다. 직선형 SA는 입력단면에서 일단 유입이 이루어지면 배출이 완료될 때까지 입력된 위치를 유지하면서 배출되기 때문에 새로운 중간유입이 이루어질 수 없게 된다는 것이다[1]. 때문에 중간유입을 갖는 SA의 연구가 필요하다.

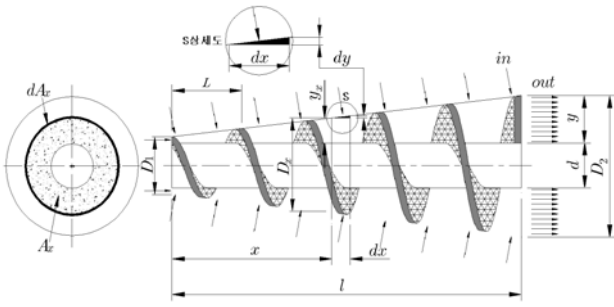
따라서 본 연구의 목적은 SA의 전 구간에 걸쳐서 입력이 이루어지도록 하는 방법을 모색하고 입력량을 희망하는 상태로 결정하여 제어할 수 있도록 중간유입의 크기를 결정하는 수식모형을 개발하는데 있다. 이를 위하여 SA의 공전과 자전에 의하여 결정되는 배출량을 예측하고 이 배출량을 감당할 수 있는 SA의 배출능력과의 관계를 이용하여 수식모형을 유도하고자 한다.

3. SA의 단면 분산에 관한 고찰

본 장에서는 유입단면 분산을 위한 방법을 모색하고 유동량의 입력/출력 해석을 위한 이론체계를 수립한다.

3.1. 가변단면 Sweeping Auger

[그림 5]에서 보는 SA는 직선형 SA와는 달리 SA의 전체 구간에 걸쳐서 입력이 이루어지도록 입력단면이 분산되어 있음을 보여준다. 이 SA를 가변단면 SA라고 부르기로 한다. 본 연구는 이에 착안하여 중간유입을 허용하는 가변단면 SA에 관한 이론 체계를 수립코자 한다. 이 가변단면 SA는 구간의 모든 지점에서 미소크기의 입력 단면 dA_x 을 가지고 있기 때문에 중간유입이 가능하다. [그림 5]에서 Blade의 끝부분을 잇는 커브의 기울기에 따라 축방향의 입력단면이 결정되므로 이 커브를 결정하는 수식모형을 개발하는 것이 본 연구의 목적이기도 하다. [그림 5]에서는 직선이기 때문에 전체 구간의 모든 부분에서 유입되는 양의 크기는 같다. 그 크기는 D_1 과 D_2 에 의하여 결정된다. 그러나 각 지점에서의 유입량을 다르게 하기 위해서는 2차 이상의 커브로 설계해야 할 때도 있다.



[그림 5] VSSA의 유입단면과 입출력

현장의 조건에서는 [그림 5]에서 보는 $D_1 > d$ 의 관계를 갖는 D_1 은 존재할 수도 있고 없을 수도 있지만 가능한 모든 경우를 대비할 수 있어야 하기 때문에 본 연구에서는 D_1 을 고려하기로 한다. D_1 은 SA의 범위 밖의 적체된 곡물이송에 필요하다. 그리고 가변단면을 이루기 위해서는 반드시 $D_2 > D_1$ 의 관계가 성립되어야 한다.

3.2. 임의의 지점 x 에서 처리할 수 있는 유동량

[그림 5]에서 임의의 지점 x 에서의 미소입력 dq_x 의 크기는 가변단면커브의 기울기에 의하여 결정되기 때문에 이 커브를 구하는 수식모델을 구하는 것은 매우 중요하다. 미소 유입량 dq_x 는 점 x 에서 주어지는 미소 단면적 dA_x 와 이 점을 통과하는 곡물의 속도에 의하여 결정된다는 것은 주지의 사실이다. 곡물의 이송 속도는 SA의 자전 회전수 N 과 리드 (Lead) L 에 의하여 결정되고, 미소 단면적 dA_x 는 D_1 과 D_2 의 비, a_1 에 의하여 결정되기 때문에 미소유동량 dq_x 는 (식 1)과 같이 유도하여 구할 수 있다[3].

$$dq_x = vdA_x \tag{식 1}$$

$$= \frac{\pi NL}{240} \left[2\left(\frac{1}{l}\right)^2 (D_2 - D_1)^2 x dx + 2\left(\frac{1}{l}\right) (D_2 - D_1) D_1 dx + D_1^2 - d^2 \right]$$

따라서 (식 1)를 이용해서 체적유동량 q_{cx} 와 질량 유동량 q_{mx} 를 구하는 식을 (식 3), (식 4)와 같이 유도할 수 있다. 여기에서 N 은 회전수이고 ρ 는 곡물의 밀도이다.

$$q_{cx} = \int_0^x vdA_x = \frac{\pi NL}{240} \left[\left(\frac{1}{l}\right)^2 (D_2 - D_1)^2 x^2 + 2\left(\frac{1}{l}\right) (D_2 - D_1) D_1 x + D_1^2 - d^2 \right] \tag{식 2}$$

$$\approx \frac{\pi NL}{240} (D_x^2 - d^2)$$

$$q_{mx} = \rho V_{cx} \tag{식 3}$$

$$= \rho A_x v$$

$$= \frac{\rho \pi NL}{240} (D_x^2 - d^2)$$

위의 (식 2)와 (식 3)은 지점 x 에서의 체적유동량 q_{cx} /질량유동량 q_{mx} 를 결정짓는 요소는 유입단면 요소와 이송속도 요소로 이루어져 있는 것을 보여주고 있다. 유입단면정보로서 D_x 와 d 는 자전회전수 N 과 리드 L 과의 관계로 나타내고 있다. 그리고 이 정보는 Blade의 높이를 결정하는데 이용된다. 이 값들을 이용하여 모든 구간의 희망하는 유입량에 따라 SA를 설계할 수 있다.

3.3. SA의 공전에 의해 발생하는 임의의 지점 x 에서의 누적유동량

SA가 단위시간당 배출하는 양은 축방향의 입력단면 크기를 모두 합한 크기에 비례하여 결정되는데 이는 곧 배출 축의 단면적과 같다. 때문에 직선형이나 가변단면형 모두 배출량의 크기는 같다고 할 수 있다.

SA의 공전 각속도 ω 와 자전 회전수 N 이 일정할 때 단위시간 동안에 처리해야 할 곡물의 총량 Q 의 크기와 모양은 피자조각의 모양과 같기 때문에 바깥쪽의 배출량이 중심 쪽보다 크게 된다. 이러한 상황에서는 직선형 SA는 중간 유입을 허용하지 않기 때문에 건조시스템에 적용할 수 없다. 안쪽과 바깥쪽의 배출해야 할 양의 비는 공전회전수 ω 에 비례하므로 각 지점에서의 배출량의 비도 이에 비례하여 결정하여야 한다.

SA의 입력 시작점에서 유입된 곡물은 입력의 위치가 확보되면 그대로 배출이 완료될 때까지 유지되기 때문에 임의의 지점 x 를 통과해야 하는 곡물은 그 전까지 유입된 양의 누적된 값이 된다. 따라서 이 누적처리량을 알 수 있는 수식모형을 구하는 것이 매우 중요하다. 누적처리량을 $Q_{(l-x)}$ 라 할 때 이를 구하는 식을 유도하면 다음과 같다. $Q_{(l-x)}$ 를 구하기 위한 임의의 지점 x 에서의 미소 처리량 dQ_x 는 x 지점까지의 거리, 각속도 ω 그리고 자전회전수에 의하여 결정되는 때 공전당 처리높이 h 와 의 관계를 이용하여 (식 4)와 같이 유도하여 구할 수 있다[5].

$$dQ_x = \rho(x\omega dx)h \tag{식 4}$$

$$= \rho\omega h x dx$$

그리고 x 지점까지의 누적 처리량 Q_x 를 구하는 식은 (식 4)를 이용하여 (식 5)과 같이 유도한다.

$$\begin{aligned}
 Q_x &= \int dQ_x && \text{(식 5)} \\
 &= \rho\omega h \int x dx \\
 &= \frac{1}{2} \rho\omega h x^2
 \end{aligned}$$

따라서 전체구간에서 유입된 총 처리량 Q 는 (식 5)를 이용하여 (식 6)과 같이 구할 수 있다. 여기에서 l 은 SA의 총길이를 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 Q_l &= \int_0^l dQ_x && \text{(식 6)} \\
 &= \frac{1}{2} \rho\omega h l^2
 \end{aligned}$$

지금까지 유도한 식들은 SA의 길이 l 만을 고려하여 총 처리량을 계산하였다. 그러나 실제 처리해야 할량은 빈의 반경 R 에 의하여 결정된다. 빈의 반경 R 과 SA의 총길이 l 사이에는 몇 가지 고려해야 할 사항이 있다. SA의 끝단과 빈의 벽사이의 간격과 중심부에 설치된 SA의 구동장치에 의하여 만들어지는 여지(Margin)를 들 수 있다. 이에 대한 보다는 많은 연구가 필요하므로 다음의 연구과제로 제안한다. 본 연구에서는 R 과 l 이 같은 경우를 가정한다. 따라서 총 처리량을 구하는 식은 (식 8)과 같이 유도할 수 있다[4].

$$Q_{l \rightarrow R} = \frac{1}{2} \rho\omega h R^2 \quad \text{(식 7)}$$

(식 5), (식 6), (식 7)을 (식 8)와 같이 정리하고

$$Q_l = Q_x + Q_{(l-x)} \quad \text{(식 8)}$$

(식 8)로부터 (식 9)와 같이 누적유동량 $Q_{(l-x)}$ 를 구한다.

$$\begin{aligned}
 Q_{(l-x)} &= Q - Q_x && \text{(식 9)} \\
 &= \frac{1}{2} \rho\omega h (R^2 - x^2)
 \end{aligned}$$

$Q_{(l-x)}$ 는 임의의 지점 x 에서 가변단면 SA에 의하여 처리되어야 할 곡물의 양이 된다.

4. 결론

곡물자원의 저장성 개선에 대한 중요성은 아무리 강조해도 지나침이 없다하겠다. 건조시스템은 (주)두손에 의하여 개발되었다. 건조시스템의 핵심기술은 곡물의 선입선출이 이루어지도록 하는데 있다. 선입선출이 이루어지도록 하는 결정적인 요소는 SA이다. 종래에 사용되었던 직선형 SA는 건조시스템에 적합하지 않기 때문에 새로운 개념의 SA의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 가변단면 SA를 제안하고 가변단면 SA의 유동특성을 해석하는 수식모형을 제

안하였다. 수식모형을 이용해서 SA의 모든 지점에서 발생하는 누적유동량과 이를 처리할 수 있는 SA의 Blade의 크기를 설계할 수 있도록 하였다. 지금까지 도출한 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) SA 상의 임의의 지점에서 처리할 수 있는 유동량을 해석할 수 있는 수식모형을 제안하였다.
- (2) SA의 공전에 의해 발생하는 임의의 지점 x 에서의 누적유동을 해석하는 수식모형을 제안하였다.
- (3) 다양한 빈의 조건에 따라 SA를 설계할 수 있도록 하는 연구의 필요성을 제기하였다.
- (4) 수식모형을 이용해서 SA의 모든 지점에서 발생하는 누적유동량을 구하고 이를 이용하여 SA의 Blade의 크기를 설계할 수 있도록 하였다

본 연구의 결과가 성공적인 성과를 달성하고 관련산업의 발전에도 기여할 수 있기를 바란다. 아울러 산학협동에 적극적인 협조를 아끼지 않은 (주)두손에 깊이 감사드린다.

참고문헌

- [1] 최갑용(Kab-Yong Choi), “일체형 곡물 건조/저장 시스템 개발을 위한 Straight Type Sweeping Auger의 이송 특성 분석에 관한 연구”, Journal of the Korea Academic-Industrial Cooperation Society, vol. 10, No. 3, pp. 521-528, 2009.
- [2] 방진기(Jinki Bang) 외 3인, “국내외 바이오 에너지 원료 작물 개발 및 연구 동향”, The Korean Society of International Agriculture, 20(1), pp.24-29, March, 2008.
- [3] 정종훈(J.H. Chung), “곡물보관창고의 산물 시설화를 위한 곡물저장 시설의 개발(사각사일로 시스템)”, 한국농업학회지, 제20권 제2호, pp.151-161, 1995.
- [4] Donald R. Coughanowr, “Process Systems Analysis and Control”, McGRAW-HILL, pp.249-281, 2002.
- [5] 박재복(Park, JaeBok) 외 1인, “곡물의 유동현상에 관한 연구” Seoul Nat'l Univ., Coll. of Agric. Rese. vol.9, No.1, pp.1-10, March, 2005.