

벼 상온통풍건조시설의 송풍특성

이 효 재 · 김 훈 · 한 재 웅^{1)†}

한국식품연구원 유통시스템연구단 · 공주대학교 생물산업공학부¹⁾

Airflow Characteristics of Natural Air Drying for Rough Rice

Lee, Hyo-Jai · Kim, Hoon · Han, Jae-Woong^{1)†}

Division of Food Distribution System Research Group, Korea Food Research Institute, Sunnam, Korea

Division of Bio-industry Engineering, Kong-Ju National University, Yesan, Korea¹⁾

ABSTRACT

This study was conducted to define the characteristics of the fan according to the bed depth of rough rice for the silo used in South Korea. In this study, the characteristics like air flow resistance and air flow rate of the fan were investigated for an independent blowing system with 1 fan and the serial blowing system with 2 fans. In the experiment, the depth of rough rice was determined by 0, 1, 2, 3.2 and 4.5 m for an independent blowing system and the depth of rough rice was 4.5 m for the serial blowing system. The air flow resistances of the blowing fan and the suction fan in an independent blowing system were 55 mmAq and 88 mmAq respectively. In addition, the air flow resistance of the serial blowing system was 61% lower than the blowing fan and 28% lower than the suction fan of the independent blowing system. The air flow rates of the blowing fan and the suction fan in the serial blowing system were 516 m³/min, 570 m³/min, respectively. The former was 22% higher than the blowing fan while the latter was 29% higher than the suction fan in the independence blowing system. In other words, the serial blowing system was superior to the independent blowing system in blowing characteristics because the air flow rate was lower and air flow resistance was higher than the independent blowing system. However, the fan power consumption of the serial blowing system was more than 100% comparing with the independent blowing system.

Key words: air flow resistance, air flow rate, fan performance, fan characteristics, rough rice

I. 서론

벼의 수확후 처리기술에는 건조, 저장, 가공, 포장 및 유통기술이 있으며, 건조는 수확후 첫 번째 공정으로 건조공정이 적절치 못하면 저장,

가공 등 후속공정에 악영향을 줌으로 건조공정은 품질유지에 관건이 되는 기술이다(Sharp 1982; Kim & Han 2009).

벼를 생산하는 농가 또는 조합에서 이용하고 있는 건조저장시설은 원형철제빈, 사각빈 및 평

접수일: 2013년 8월 20일 심사일: 2013년 9월 24일 게재확정일: 2013년 9월 25일

[†]Corresponding Author: Han, Jae-Woong Tel: 82-41-330-1283

e-mail: hanwoong@kongju.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

창고 등으로서, 특히 원형철제빈은 국내 건조저장능력의 50% 이상을 담당하는 시설이다(Keum et al. 2008).

원형철제빈의 형태는 크게 평타입사일로와 호퍼식사일로로 구분할 수 있으며, 농가 및 조합에는 평타입사일로가 약 90%, 호퍼식사일로가 약 10% 정도 보급되었다. 과거에는 일반철제용 용접사일로가 보급되어 있으나, 현재는 주로 아연도금 철판을 조립한 사일로가 설치되고 있다. 사일로 저장용량은 100~500 ton 규모이고, 보급된 평타입사일로는 건조저장 겸용 교반식이 주축을 이루고 있으며, 일부 저장전용 평타입사일로는 소수에 불과하다.

원형철제빈의 건조방법은 상온통풍건조방법으로써, 벼를 투입한 후 압송식 송풍기를 이용하여 외기의 공기가 하부의 공기충만실에서 충만되고, 상부의 벼층을 통과하면서 건조되는 고정층건조(Fix-bed drying)방법으로 이루어진다(Pfost et al. 1977). 상온통풍건조방법은 상온의 공기를 통풍하여 건조하는 방법으로서 벼의 품질 손상을 최소화 할 수 있고, 에너지 효율이 높은 방법이다(Keum & Park 1996; Kim & Han 2009). 그러나, 벼는 고정된 상태에서 건조되기 때문에 송풍이 시작되는 벼의 하부층부터 건조가 시작되며, 점차 상층부까지 건조가 이루어지게 되므로 퇴적고별로 함수율 차이가 발생하게 된다(Keum et al. 2003). 이러한 함수율 불균형의 문제점을 해결하기 위해서 원형철제빈에 수직오거를 이용한 교반기를 설치하고, 누적으로 투입되는 벼를 교반기로 혼합하면서 건조하는 누적혼합건조방법이 주로 이용되고 있다(Keum et al. 1998). 누적혼합건조는 원형철제빈의 건조과정에서 발생할 수 있는 퇴적고에 따른 함수율 차이를 감소시킬 수 있는 건조방법으로 운영되고 있으나, 상하부의 함수율 차이를 근본적으로 해결하기는 어려운 현실이다. 특히, 하부층의 벼는 과다한 건조가 발생하여 외기의 평형함수율인 10% 내외 정도로 건조가 이루어져 품질저하가 우려되고 있다. 따라서, 원형철제빈에서 건조과정에서 발생하는 하부층의 과다한 건조와 상부층의 건조지연으로 인한 품질손상 등을 방지하기 위하여 적정 송풍기의 선정을

위한 송풍특성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 원형철제빈의 퇴적고별 송풍기의 적정 선정 및 작동방법을 구명하기 위하여 압송 및 흡입의 각각의 송풍기만을 이용하는 독립송풍방법과 송풍기를 동시에 사용하는 직렬송풍방법을 선정하여, 송풍저항 및 송풍량 등의 송풍특성을 측정하였다.

II. 연구방법

1. 실험장치

본 연구에서는 충남 태안군 소재의 원북 RPC에 설치되어 있는 원형철제빈을 이용하였다. 실험에 이용한 원형철제빈은 직경 12 m, 저장 용량 400 ton 규모의 평타입이며, 압송 및 흡입을 위하여 총 2대의 송풍기가 설치되었다. 원형철제빈에 설치되어 있는 압송 및 흡입 송풍기(경원 Eng. Korea)의 동력은 40 hp, 제작회사에서 제시하는 최대정압은 150 mmAq, 송풍량은 650 m³/min 이었으며, 송풍기 성능자료는 다음의 Table 1과 같았다.

Table 1. Air flow rate of a fan according to static pressure

Static pressure (mmAq)	160	150	135	120	100	80
Air flow rate (m ³ /min)	585	650	715	780	845	900

2. 실험방법

1) 압송 및 흡입 독립송풍방식

Fig. 1은 원형철제빈에서 압송 및 흡입 송풍기를 이용한 송풍방법별 공기흐름과 송풍기 및 덕트 작동방법을 나타낸 것이다. Fig. 1과 같이 압송송풍방식과 흡입송풍방식을 적용하여 실험을 수행하였으며, 압송송풍방식은 압송 송풍기의 작동과 함께 하부에서 유입되는 공기가 벼층을 상부로 통과하면서 지붕에 설치되어 있는 배풍구(0.63 × 0.49 m)로 공기가 송풍되는 방식이다. 압

송풍방식의 경우에는 압송송풍기만 작동되며, 압송송풍기의 상부연결 덕트와 흡입송풍기의 상하부 연결 덕트는 차단되고 압송송풍기로 조성된 공기는 하부로 유입되어 벼층을 상부로 통과하여 지붕의 배풍구로 배출된다(Fig. 1(a)).

흡입송풍방식은 압송송풍과 반대로 흡입 송풍기의 작동과 함께 상부 배풍구로 공기가 유입되면서 벼층을 하부로 통과하면서 흡입 송풍기로 공기가 배출되며, 압송송풍기의 상하부 연결덕트 및 흡입송풍기의 상부 연결덕트는 차단된다(Fig. 1(b)).

2) 압송 및 흡입 직렬송풍방식

Fig. 2는 압송과 흡입을 동시에 송풍하는 직렬

송풍방식의 송풍방법을 나타낸 것이다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 직렬송풍방식은 압송 및 흡입 송풍기 2대가 동시에 작동하는 방식이다. 압송송풍의 경우에는 상부로 연결된 압송 송풍덕트와 흡입 송풍기로 연결된 하부 덕트를 차단하여 압송송풍기에서 조성된 공기는 하부로 유입되어 벼층을 상부로 통과하게 되고 흡입 송풍덕트 및 흡입송풍기를 통해 배출된다(Fig. 2(a)).

흡입송풍의 경우에는 압송송풍과 반대로 압송 송풍기와 하부로 연결된 압송 덕트와 상부와 연결되는 흡입 덕트를 차단하여, 압송송풍기에서 조성된 공기는 상부로 유입되어 벼층을 하부로 통과하여 흡입송풍덕트 및 흡입송풍기를 통해 배출된다(Fig. 2(b)).

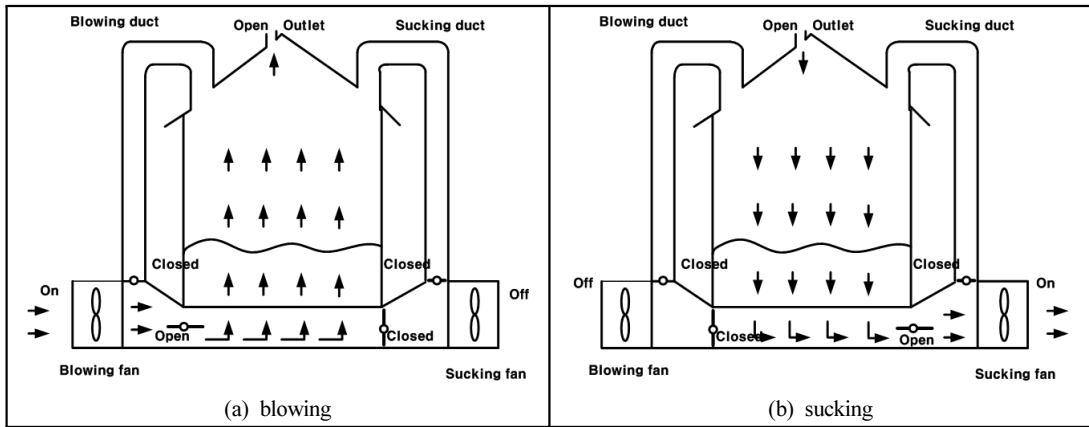


Fig. 1. Air flow and gate condition according to one fan's operation methods

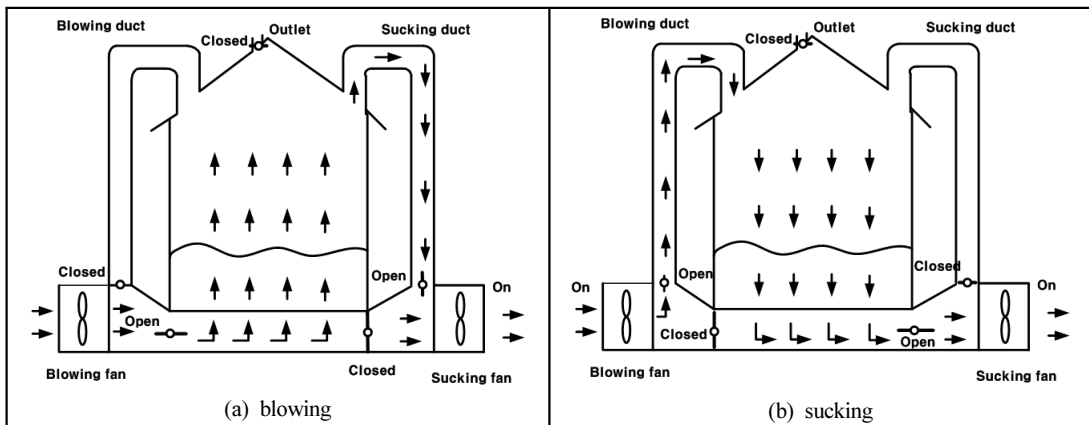


Fig. 2. Air flow and gate condition according to two fans operation methods

3) 송풍방법

실험방법은 원형철제빈에 벼를 약 1 m씩 퇴적하면서 최대 4.5 m가 되도록 하였으며, 실험에 이용한 벼의 퇴적고는 0.0(무부하상태), 1.0, 2.0, 3.2 및 4.5 m 이었다. 각각의 퇴적고별로 압송 및 흡입 송풍시 송풍기 연결덕트에 풍속계를 이용하여 100 mm 간격으로 풍속을 측정후 송풍량으로 환산하였다. 또한, 빈의 지붕에 있는 환기구에서 동일한 방법으로 송풍량을 측정하였다. 정압은 벼층 하부에 빈공간인 공기층만실의 외부에 manometer(3166, Yokogawa, Japan)를 설치하여 측정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 시스템의 송풍특성

본 연구에서는 송풍기의 성능을 예측하기 위하여 정압과 송풍량의 관계식을 개발하였으며, 개발된 관계식은 Eq. 1과 같았다. 실험상수는 SAS(ver. 7.0, USA)의 다중회귀프로그램으로 결정하였으며, Table 2에 나타내었다.

$$\Delta P = A_0 + A_1 Q + A_2 Q^2 \quad \text{Eq. 1}$$

where, ΔP : Static pressure(mmAq)

Q : Air flow rate(m³/min)

A_0, A_1, A_2 : Experiment coefficients

Table 2에서 보는 바와 같이 압송 및 흡입송풍에서 정압 및 송풍량의 실험식은 결정계수가 0.99로 만족한 수준이었다. 또한 Eq. 1을 이용하여 송풍기의 정압 및 송풍량에 따른 성능곡선은 Fig. 3에 나타내었다.

Table 2. Experiment coefficients of fan performance equation

Experiment coefficients			R^2
A_0	A_1	A_2	
111.31	0.301566	-0.000373	0.99

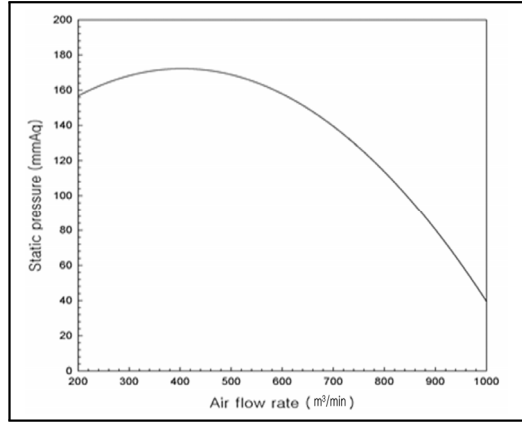


Fig. 3. Performance curve of fan

2. 퇴적고에 따른 송풍량

벼 퇴적층의 공기저항은 Eq. 2(Keum et al. 2003)을 이용하여 계산하였다. 일반적으로 송풍기는 송풍저항이 증가하면 송풍량이 감소한다. 그러므로 벼의 퇴적고의 증가는 송풍저항의 증가와 동일하므로 송풍량이 감소하며, 풍량비(Keum et al. 1996)도 감소하는 것으로 나타났다.

$$\Delta P = 653.54 \left(\frac{q_s}{60A} \right)^{1.2727} D \quad \text{Eq. 2}$$

where, A : Sectional area(m²), D : Bed depth(m)

q_s : Specific air flow rate(m³/min/m³)

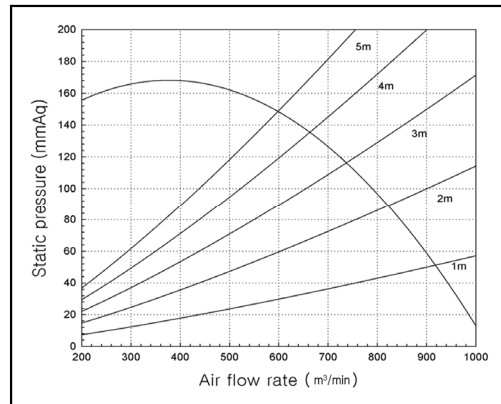


Fig. 4. Performance curve and system curve of fan

Fig. 4는 Eq. 2를 이용하여 송풍기 성능곡선 및 시스템 곡선을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 송풍기의 작동점은 송풍기의 성능곡선과 벼 퇴적층에 따른 송풍저항식의 교점이다. 이와 같이 퇴적고가 증가할수록 송풍저항이 증가하여 송풍량이 감소하는 것으로 판단된다.

퇴적고에 따른 송풍량은 SAS 비선형회귀분석 프로그램을 이용하여 Eq. 3과 같이 표시하였으며, 결정계수는 0.99 이었다. 또한 Eq. 3으로 계산한 송풍량은 다음의 Fig. 5와 같았다.

$$Q = 1084.0733 \exp(-0.1117D) \tag{Eq. 3}$$

where, Q : Air flow rate(m^3/min),
 D : Bed depth(m)

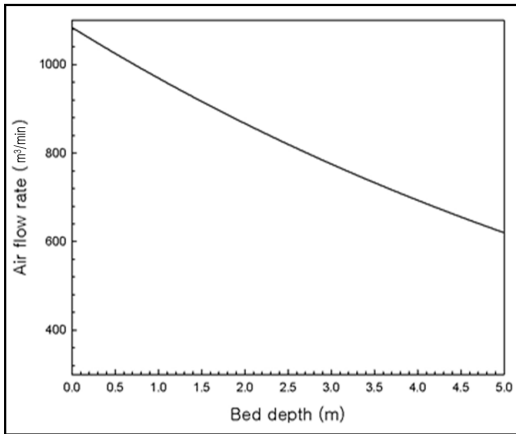


Fig. 5. Changes of air flow rate according to bed depth

3. 송풍방법에 따른 송풍특성

Table 3과 4는 압송 및 흡입송풍일 때 퇴적고(0.0, 1.0, 2.0, 3.2 및 4.5 m)별 송풍량, 정압 및 소비전력 측정결과를 나타낸 것이다. 표에서와 같이 무부하 상태에서 송풍량은 압송 및 흡입송풍일 때, 각각 632 및 620 m^3/min 으로 비슷한 수준으로 나타났으며, 이때 정압은 55 및 88 mmAq 이었다.

원형철제빈의 설계기준에 의하면 벼가 퇴적되

지 않은 상태에서 정압은 무부하상태(정압 = 0 mmAq)이어야 한다. 그러나 벼가 퇴적되지 않은 상태에서 측정된 정압은 압송의 경우 55 mmAq 이었고, 흡입송풍에서는 88 mmAq로 정압손실이 크게 나타났다. 이는 공기충만실의 다공마루의 다공율에 의한 것이 아니라, 원형철제빈의 지붕에 설치된 환기구의 단면적이 0.3 m^2 로서 설계기준인 송풍량 1,000 m^3/min 당 3.3 m^2 (농협RPC 설계기준, 2000)에 크게 부족한 것이 주요한 원인으로 판단된다.

따라서 환기구의 단면적을 확대하는 방안이 모색되어야 하고, 건조용 사일로와 저장용 사일로의 구조의 설계기준을 준수하는 것이 필요하였다. 건조용 사일로의 경우에는 다수개의 환기구를 설치하고 저장용일 경우는 가능한 기밀이 유지될 수 있는 구조로 설치되어야 한다.

1) 압송 및 흡입 독립송풍방식

Table 3과 4에서 알 수 있듯이 송풍기 1대를

Table 3. Blowing characteristics according to bed depth

Bed depth (m)	Weight of grain(ton)	Air flow rate(m^3/min)	Static pressure (mmAq)	Power (kw)
0.0	-	632	55	22
1.0	68	526	79	24
2.0	136	481	94	24
3.2	217	452	109	24
4.5	305	422	129	24

Table 4. Sucking characteristics according to bed depth

Bed depth (m)	Amount of grain(ton)	Air flow rate(m^3/min)	Static pressure (mmAq)	Power (kw)
0.0	-	620	88	26
1.0	68	610	104	25
2.0	136	530	124	25
3.2	217	507	147	26
4.5	305	443	165	26

이용하는 독립송풍방식 중 압송송풍시 퇴적고별 (0~4.5 m) 송풍량은 632~422 m³/min의 범위를 나타내었고, 흡입송풍시 퇴적고별 송풍량은 620~443 m³/min의 범위로 압송송풍시보다 높게 나타났다. 퇴적고별 송풍저항에 의한 정압은 압송송풍시 55~129 mmAq의 범위 이었고, 흡입송풍시 정압은 88~165 mmAq의 범위로 압송송풍보다 높게 나타나 송풍량과 유사한 경향을 나타내었고, 동일한 송풍기에서 압송과 흡입방식에 따라 송풍 특성이 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

송풍기의 소요전력은 퇴적고에 따라 큰 차이가 나타나지 않았으며, 흡입방식과 비교하여 압송방식일 경우에는 낮은 경향을 보였는데, 이는 송풍량과 소요동력이 비례하기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 퇴적고별 송풍량 예측식(Eq. 3)과 실험에 의한 압송 및 흡입방식의 실측치를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 퇴적고 2.0 m에서 송풍량 예측치는 850 m³/min 임에 비해 실측치는 압송 481 m³/min, 흡입 530 m³/min으로 약 63% 수준

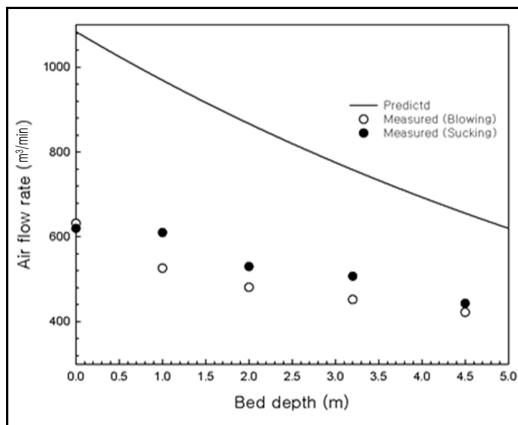


Fig. 6. Comparison measured and predicted air flow rate according to bed depth

에 불과하였다. 그리고 퇴적고 4.5 m에서도 송풍량 예측치에 비해 실측치는 약 70% 수준이었다. 이는 무부하상태와 마찬가지로 원형철제빈의 지붕에 설치된 환기구의 단면적이 설계 기준보다 작게 설계되어 나타나는 현상으로 판단되었다. 따라서 압송 및 흡입 송풍시 송풍기의 성능을 유지하기 위해서는 적정 단면적을 유지하는 환기구를 설치하여 정압손실을 최소화하는 것이 필요하였다.

2) 압송 및 흡입 직렬송풍방식

Table 5는 압송 및 흡입 송풍기 2대를 동시에 작동하는 직렬송풍방식의 송풍특성을 나타낸 것이다. 표에서와 같이 동시에 송풍기를 작동할 경우 압송방식에서는 압송송풍량이 516 m³/min, 흡입방식에서는 흡입송풍량이 570 m³/min으로 1대를 단독으로 사용하는 경우와 비교하여 압송방식은 22%, 흡입방식은 29%의 송풍량이 증가하였다.

정압의 경우에는 1대를 단독으로 사용하는 경우와 비교하여 압송방식은 61%, 흡입방식은 28%가 감소하였다. 즉, 송풍기 2대를 동시에 가동할 때가 송풍기 1대에 비해서 송풍량이 증가하고, 정압은 감소하여 송풍특성이 개선되는 것으로 나타났다. 그러나 이에 비해 2대의 송풍기를 함께 이용할 경우 소요전력은 100% 증가하였다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 원형철제빈의 퇴적고별 송풍기의 적정 선정 및 작동방법을 구명하기 위하여 수행되었다. 송풍방식은 송풍기를 1대를 사용하여 압송 및 흡입송풍하는 독립송풍방식과 2대 송풍기를 동시에 사용하여 직렬송풍방식으로 압송과 흡입의 송풍특성을 조사하였다. 실험에서는 원형철

Table 5. Simultaneous operation characteristics of two fans at 4.5 m of bed depth

Bed depth (m)	Weight of grain (ton)	Fan operation condition	Air flow rate(m ³ /min)		Static pressure (mmAq)	Power(kw)	
			Sucking part	Blowing part		Sucking fan	Blowing fan
4.5	305	Sucking	570	485	118	26	22
		Blowing	630	516	50	27	23

제빈의 벼 퇴적고를 0, 1, 2, 3.2, 4.5 m로 결정하였으며, 독립송풍방식은 0~4.5 m의 퇴적고를 대상으로 실험을 수행하였고, 직렬송풍방식은 퇴적고 4.5 m의 경우를 대상으로 실험을 수행하였다.

송풍특성 중 퇴적고에 따른 송풍저항은 예측치는 퇴적고가 0 m인 무부하인 경우에 정압이 0 mmAq 이었으나, 실제 원형철제빈에서 측정한 측정치는 송풍기를 1대를 사용하는 독립송풍방식 중 압송송풍방식은 55 mmAq, 흡입송풍방식은 88 mmAq로 나타났다. 이는 빈의 상부에 설치되는 환기구의 면적이 0.3 m²로 설계기준치보다 작게 설치되었기 때문으로 판단된다. 또한 송풍기 2대를 사용하는 직렬송풍방식의 송풍저항은 독립송풍방식보다 압송방식은 61%, 흡입방식은 28%가 감소하였다.

송풍특성 중 송풍량의 경우에는 직렬송풍방식의 압송송풍량이 516 m³/min, 흡입송풍량이 570 m³/min으로 독립송풍방식과 비교하여 압송방식은 22%, 흡입방식은 29%의 송풍량이 증가하였다. 즉, 직렬송풍방식이 독립송풍방식보다 송풍량이 증가하고 송풍저항이 감소하여 송풍특성이 개선되는 것으로 나타났다. 그러나 2대의 송풍기를 사용하는 직렬송풍방식의 소비전력이 독립송풍방식보다 2배 증가하는 것으로 나타났다.

따라서, 원형철제빈의 송풍기를 가동할 경우에는 퇴적고에 따른 송풍량과 송풍저항을 고려하여 송풍방식을 선택하여야 적절한 송풍량 및 소비전력을 소비되며, 직렬송풍방식이 독립송풍방식보다 송풍특성이 개선되어 적정 송풍량이 가능하지만 사용 시 소비전력의 증가를 고려하여야 한다.

References

- Keum DH(2008) Post-harvest process engineering. CIR, 166-168
- Keum DH, Han CS, Park CW(1998) Fan and heater management schemes for layer filling and mixing drying of rough rice with natural air by simulation. J Biosystems Eng 23(3), 229-244
- Keum DH, Han JW, Kim H(2003) Automatic management system for rough rice stored and dried in bin -Automatic management device for drying and storage of rough rice-. Proceed of the KSAM 2003 Winter Conference 8(1), 112-117
- Keum DH, Park ST(1996) Minimum specific air flow rate requirements for natural air drying of rough rice in Korea. J Biosystems Eng 21(1), 60-71
- Kim H, Han JW(2009) Performance evaluation of rough rice low temperature drying using heat pump. Food Eng Prog 13(4), 308-313
- Kim H, Han JW(2009) Quality characteristics of rough rice during low temperature drying. Korean J Food Preserv 16(5), 650-655
- Pfost HB, Maurer SG, Chung DS, Foster G(1977) Fan management systems for natural air dryers. ASAE No.77-3526
- Sharp JR(1982) A review of low temperature drying simulation models. J Agr Eng Res 27, 169-190