

컴퓨터 시뮬레이션에 의한 미국 도정공장의 적정설계 및 개발(II)⁺

— 미국 도정시스템의 개발 및 성능평가 —

Optimal Design and Development of a Rice Mill Pilot Plant by Computer Simulation (II)

— Development and Performance Evaluation of a Rice Mill Pilot Plant —

정종훈*

김보곤*

최영수**

정희원

정희원

정희원

J. H. Chung

B. G. Kim

Y. S. Choi

ABSTRACT

A rice mill pilot plant was designed and developed in the basis of the simulation results on the mill plants. The performance of the developed rice mill plant was evaluated, and the simulation model on the mill system was validated with the experimental data in the mill plant. The results of this study were as followings :

1. A rice mill pilot plant with the capacity of 0.5 t/h was designed and developed.
2. The hulled ratio of the mill plant was 87.3%, and the milled rice recovery and the head rice recovery of the cleaned rice were 74% and 87%, respectively. The degree of milling of the cleaned rice was 10.6% with a high polish. The intensity of the cleaned rice appeared high compared with that of the milled rice in the analysis of whiteness test using an image processing system.
3. The bottleneck, processing time, and production amount of the developed mill system almost coincided with those of the simulation of the rice mill plant. The developed simulation model of the rice mill plant was proven to be applicable to the design of a rice mill plant through experiments.

주요 용어(Key Words) : 미국 도정공장(Rice Mill Plant), 설계(Design), 개발(Development), 성능평가(Performance Evaluation), 시뮬레이션 검증(Simulation Validation)

1. 서론

농업이 산업화되면서 농업 생산과 함께 농산물 가공의 중요성이 증대되고 있는 가운데 농업 발전을 위해 농업과 관계되는 가공업의 효율적 관계 정립이 필요하게 되었다. 미국 도정 산업을 살펴보면 비록 생산된 벼 전체가 기계도정에 의한다고 하지만 전국 16,000여개소에 달하는 임

도정공장과 400여개소의 정부미 도정공장의 도정시설이 노후화되어 있고 더구나 가동률이 11.6% 및 29.3%로서 매우 낮은 수준을 나타내고 있다. 전체 미국 생산량의 약 70%를 가공 처리하고 있는 임도정공장의 경우 정부 양곡 도정공장에 비해 가공기술 및 가공시설이 낙후되어 양곡 손실을 초래할 뿐만 아니라 소비자가 원하는 양질을 생산하지 못하고 있는 실정이다. 지금까지

+ 이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음

* 전남대학교 농과대학 농공학과

** 서울대학교 농업생명과학대학 부속 농업개발연구소

우리나라 농업이 생산량 증대에 최우선을 두었다면 앞으로의 농업은 생산량보다는 생산된 농산물의 품질과 상품성을 향상시켜 그 부가가치를 높이는데 더 치중해야 한다. 현재 미곡종합처리장을 비롯 정부 및 민간 입도정공장들이 그동안 도정공장 설치시 단지 경험만을 바탕으로 설치함에 따라 어느 시설에 대해선 불필요한 설비로 인하여 공간 및 재정 낭비가 큰 것으로 나타나고 있는 바 이같은 시설 설치의 낭비를 줄이고 양질미 생산으로 인한 국제 경쟁력을 높이기 위해서는 미곡의 가공 시설 현대화가 시급히 이루어져야 한다. 그 동안 일반적으로 설치되었던 많은 도정공장들이 경험만을 기초로 설치되어 있어 도정시설에 대한 이론적 분석 및 설계가 매우 미흡한 실정이다. 그리고 정백시스템에 대해서 부분적으로는 연구가 보고된 적이 있지만 (2, 3, 4, 5) 도정시스템의 전반적인 설계에 대해서는 보고된 바가 없었다.

이에 전 연구에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 도정공장의 도정시스템을 이론적으로 분석하여 도정공장의 시스템을 설계하였다. 즉 미곡의 투입단계에서부터 최종 제품의 포장에 이르기까지 도정공장의 모든 기계장치나 중요한 기계적 작업공정들을 모델화하였고, 개발된 모델로 주요장치의 활용도나 생산량 및 원료의 정체도와 같은 시스템의 성능을 분석하여 적정 기계 및 설비들을 결정함으로써 미곡 도정시스템을 개발하고자 하였다.

따라서 미곡 도정공장을 시뮬레이션을 통해 이론적으로 분석하고 그 자료를 기초로 도정시스템을 개발한 후 시스템을 평가하고 개발된 시뮬레이션 모델을 검증하고자 하였다.

이에 본 연구의 구체적 목적은 다음과 같다.

1. 개발된 시뮬레이션 모델을 응용하여 미곡 도정시스템을 이론적으로 분석함으로써 시간당 0.5톤의 가공능력을 가진 소형 미곡 도정공장을 설계한다.

2. 시뮬레이션의 분석 결과를 기초로 하여 설계된 소형 미곡 도정공장(rice mill pilot plant)을 설치한 후 이를 시험하여 주요 도정기계들의 성능을 평가하고 개발된 시뮬레이션 모델을 검증

한다.

2. 재료 및 방법

가. 설계 조건 및 방법

1) 원료투입부

가) 반입호퍼

반입호퍼는 곡물이 반입되는 부분으로서 공급되는 곡물의 양을 간단한 조작에 의해 원활히 조절되도록 설계되었다. 반입호퍼는 승강기 1번에 부착되어 있으며 승강기의 용량에 준하여 설계했다. 사각형의 투입구는 165 mm×160 mm로 투입 면적은 26,400 mm²로 설계했다.

나) 승강기

도정공장은 여러 개의 공정이 연속적으로 이루어지므로 각 공정을 연결하는 반송기계가 필요하다. 이에 본 연구에서는 원심력에 의해 슈트로 이송되는 원심배출형 승강기 8개를 사용하였다. 승강기 3번을 제외한 승강기의 반송능력은 0.5 t/h의 도정규모를 고려하여 시간당 약 2톤 규모로 설계하였다. 승강기 3번은 현미기와 스크린선별기 그리고 현미분리기 등 세 지점에서 곡물이 들어와 이송량이 많은 관계로 시간당 약 6톤 규모로 설계하였다. 각 승강기에 사용된 동력은 승강기 3번을 제외한 나머지 승강기의 모터는 동력 0.5 HP, 정격전압 220/380 V, 정격전류 2.3/1.3 A, 모터효율 65%, 주파수 60 Hz, 회전수 1,710 rpm으로 모두 같은 모터를 사용하였고, 승강기 3번의 모터는 이송량이 많으므로 동력 1 HP, 정격전압 220/380 V, 정격전류 3.5/2.0 A, 모터효율 71.5%, 주파수 60 Hz, 회전수 1,710 rpm으로 크게 설치했다.

2) 정선 및 제현부

가) 석발기

석발기는 석발과정에서 많은 먼지가 발생되므로 도정공장 밖 왕겨실로 먼지를 유도하는 장치를 설치했다. 본 연구에 사용된 석발기는 연풍기계공업사의 제품으로서 사양은 모델 MCL40B,

용량 2.1~2.4 t/h, 동력 2 HP 4P, 정격전압 110/220 V, 전류 30/15 A, 주파수 60 Hz, 모터효율 62 %, 회전수 1,730 rpm, 칫수(L×W×H, mm) 1,340×930×2,010 이다.

나) 현미기

본 도정공장에서는 고무로울러식 현미기를 설치했다. 로울러는 동일고무(주)의 고무로울러를 사용하였고 고무로울러의 직경은 220 mm이고 간격은 약 1.2 mm로 설치했다. 그리고 현미기의 처리능력 제고를 위하여 보조탱크를 설치하였다. 본 연구에 사용된 현미기는 제현능력이 1.6 t/h, 소요동력은 10 HP으로 광주기계공업사의 현미기를 사용했다.

다) 왕겨풍구

왕겨풍구는 현미기 아래에 설치하며 진동에 견딜 수 있는 구조로 설치하였으며 처리능력은 1 t/h으로 하였다. 도정공장 밖에 왕겨실을 설치하여 왕겨와 먼지 등을 수집하도록 하였다. 소요동력은 현미기에 사용한 10 HP를 공동으로 사용하였다.

라) 보조탱크(Buffer Tank)

각 공정상의 보조탱크들은 현미기, 정미기, 연미기의 가공능력과 현미분리기, 포장작업의 처리능력에 대응할 수 있도록 시뮬레이션 결과에 기초하여 300 kg 이상의 저장능력을 가지도록 설계했다. 보조탱크는 총 5개를 설치했고 소형 보조탱크 1개를 설치했다. 또한 정미기 2번 앞에 설치한 보조탱크의 용량은 약 45 kg으로 설계하였다. 탱크의 중간부분에 점검을 위한 점검창을 설치하였고 탱크하부에 설치된 유량조절장치는 수동으로 개폐하도록 하였다.

3) 현미선별부

가) 스크린 선별기

본 연구에서는 곡류의 정선 또는 선별에 사용되는 것으로서 구조가 간단한 체(sieve)를 3중으로 설치하여, 벼와 현미가 섞인 곡물이 흐르면서 상단에는 벼, 중간스크린에는 벼와 현미, 하단스크린에는 현미가 층을 이루면서 흘러가도록 하였다. 스크린 모양에 따라 여러가지로 나누어 지는데 본 연구에서는 입자의 크기를 선별인자

로 하여 직사각형 모양의 스크린을 사용하였다. 3단으로 설치된 사각형 모양의 스크린에서 상단의 격자크기는 한변이 5.5 mm의 정사각형이고 중간스크린의 격자크기는 한변이 3.5 mm로 하였다. 하단은 나머지 곡물이 흐를 수 있도록 격자없이 편평하게 설치했다. 스크린선별기는 체의 경사각을 적절히 주어야만 곡물이 원활히 흐를 수 있다. 체의 경사각을 작게 했을 경우에는 곡물이 정체할 수 있고 경사각을 너무 크게 했을 때는 선별효율이 떨어진다. 그러므로 사용자가 스크린선별기의 경사체 각을 수동으로 조절할 수 있도록 설계했다. 처음 설치된 스크린선별기의 경사각은 30°로 설치했다. 직사각형 모양의 스크린 선별기는 가로×세로가 795 mm×1,950 mm이었다.

나) 현미분리기

설치된 현미분리기는 3단식으로 구성되어 있으며 앞뒤 및 좌우 경사각을 조절하도록 제작되어 있다. 선별판의 경사각은 곡물이 선별판의 유효작업면적 전체에 같은 두께로 얇게 깔리도록 조절하는 것이 바람직하기 때문에 벼의 합수를 및 분리효율 등에 따라 수시로 조정할 수 있도록 하였다. 현재의 경사각은 앞뒤 경사각이 약 25°이고 좌우 경사각은 약 20°로 설치하였다. 선별판의 크기는 가로 1,460 mm이고 세로는 장축이 1,200 mm, 단축이 810 mm이다. 또한 현미분리기 선별판의 간격은 11.8 mm이고 골의 깊이는 4.3 mm이다. 그리고 현미분리기의 처리능력 제고를 위하여 현미분리기 앞에 보조탱크를 설치했다. 설치된 요동식 현미분리기의 모터동력은 2 HP, 4P이고 정격전압은 220/380 V 이며 전류는 6.0/3.5 A, 주파수는 60 Hz, 모터효율은 78%, 회전수는 1,720 rpm이었다.

다) 청치선별기(미선기)

제현과정을 끝낸 현미는 미숙립에서 나온 쪽정이나 청치를 포함하고 있는데 이를 청치선별기에서 선별한다. 청치선별기의 처리 용량은 0.5~1 t/h이다. 현미분리기에서 반출되는 현미의 양이 많을 경우에는 청치선별기의 후면울 약 300 mm정도 올려 경사를 줌으로써 곡물의 흐름을 원활히 할 수 있지만 너무 경사각이 클 경우에는

선별도가 떨어지게 되므로 주의를 해야한다. 본 연구에서 설치한 청치선별기는 정우기계공업사가 제작한 청치선별기를 사용하였다. 청치선별기의 스크린 간격은 1.9 mm이며 소요동력은 승강기와 같은 0.5 HP이고, 정격전압 110/220 V, 정격전류 10/5 A, 주파수 60 Hz, 회전수 1,710 rpm인 모터를 설치했다.

4) 정백부

가) 정미기

본 시설에서는 연좌식 배열방식으로 마찰식 정미기를 3대 직렬로 설치했다. 그리고 정미의 출구와 같이 미강이 부착되기 쉬운 부분은 스테인레스 철판을 사용하여 미강의 부착을 방지하도록 했다. 미강의 회수 방식은 정미기에 부착된 팬과 연결된 사이클론을 통해 미강을 집진하도록 하였다. 본 시설에서는 회전수가 900~950 rpm인 동광기계공업사의 마찰식 정미기를 설치했다. 3대의 정미기는 삼상 유도전동기로 구동되며 전동기 모터는 20 HP, 정격전압은 220/380 V, 전류는 58/33 A, 주파수는 60 Hz, 회전수는 1,165 rpm이다. 정미과정에서 쉐미 및 동할미의 발생을 줄이고 과다한 곡은 상승 방지를 위하여 압력을 조절하도록 하였다. 정미기 중간에 있는 보조탱크는 정미기 용량을 초과하여 과부하가 걸렸을 때 다음 정미기로 넘어갈 원료의 양을 일부 저장하도록 하여 원료가 항상 일정하게 흐름이 이루어 지도록 설계했다.

나) 연미기

최종적으로 생산되는 백미의 품위를 높이기 위해서 즉 백미의 표면에 부착된 미세한 분말성분을 제거하고 표면의 광택을 증가시킴으로서 미관을 좋게하고 상품가치를 높이기 위해서 습식연미기를 설치하였다. 강력한 강제 흡입방식을 채택한 팬을 사용하여 완전하게 미강과 불순물을 처리하며, 저회전의 습식연미기를 사용하여 쉐미를 방지하고 수율을 높이도록 하였다. 본 시설에서는 형식 BCPWJ-1500, 용량 1.3~1.6 t/h, 동력 15 HP 6P, 정격전압 220/380 V, 전류 41.0/23.6 A, 주파수 60 Hz, 모터효율 85.5%, 회전수 1,140 rpm인 보천산업주식회사의 습식연

미기를 설치했다.

다) 쉐미선별기

연미기를 거친 청결미에 섞인 쉐미를 분리해내기 위해서 스크린 방식의 쉐미선별기를 설치하였다. 또한 고품질 양질미를 만들기 위해 백미에 포함된 각종 세균을 없애기 위해 일반적으로 소독기에 사용되고 있는 자외선 램프를 설치하였다. 20 W의 자외선 램프 길이는 580 mm로서 살균효과를 높이기 위해 쉐미선별기의 길이 방향으로 측면에 2개 설치한 뒤 밀폐시켰다. 쉐미선별기의 길이는 약 970 mm 정도이고 폭은 310 mm로 설치했다. 쉐미선별기에 설치된 스크린의 격자크기는 한번이 2.3 mm 인 정사각형 스크린으로 설치했다.

라) 백미탱크

연미기의 가공능력과 제품계량 및 포장능력에 대응할 수 있는 저장능력을 가지도록 백미탱크를 설계하였다. 탱크의 재질, 두께 및 크기는 다른 보조탱크와 동일하게 설계되었다. 백미탱크 중간에 현미탱크와 마찬가지로 탱크 중간부분에 점검을 위한 점검창을 설치하였고 쉐미선별기와 마찬가지로 백미의 살균처리를 위해 탱크 중간에 길이 580 mm의 20 W 자외선 램프를 두개 설치한 뒤 밀폐시켰다. 쉐미선별기와 백미탱크에 설치된 자외선 램프는 사용자가 필요에 따라 스위치로서 수동으로 조작할 수 있도록 설치하였다.

마) 사이클론

사이클론은 정미기와 연미기에서 나오는 미강을 모으는 집진장치로써, 정미기와 연미기에 설치된 팬을 사용하여 미강을 사이클론으로 보내도록 설치하였다. 세계의 정미기에서 나오는 미강은 하나의 사이클론으로 모아지는데 그 크기는 높이가 1,370 mm이고 중간원의 지름이 610 mm가 되고 아래원의 지름은 140 mm이다. 연미기에서 나오는 미강을 수집하는 사이클론은 높이 1,235 mm이며 중간원의 지름이 665 mm이며 아래원의 지름은 285 mm로 설계했다.

5) 제품계량 및 포장부

제품계량기의 계량능력과 소포장기의 포장능

력 제고를 위하여 보조탱크를 설치하였다. 설치된 비닐 소포장 계량기는 400 g에서 20 kg까지 계량할 수 있으며 반자동식 비닐 소포장으로 제품을 생산한다. 비닐 소포장 계량기는 복성기업(주)의 제품으로 모델은 PSS-3S이며 처리용량은 400 g~20 kg으로 셀링기 부착형이다.

나. 주요기계의 작동 및 성능평가

시스템의 성능평가 방법으로 개발된 도정공장 에서 각 보조탱크 간의 소요시간을 초시계(STOP WATCH)를 이용하여 시간을 측정하고 또한 각 도정기계 및 공정별로 시간을 측정하여 사양에서 제시한 처리능력을 비교 분석하였다. 또한 시스템의 탈부율, 도정수율, 완전미수율, 백도 등을 조사하여 도정시스템의 성능을 평가하고자 하였다. 실험에 사용된 벼는 곡창지대인 전남 함평(1993년)에서 수확한 동진벼였다. 실험은 40 kg 단위의 20 포대를 1, 2, 3차에 나누어 실험하였다. 모든 도정시설은 하나의 제어반에 의해 간편하게 조작할 수 있도록 하였다. 일정양의 곡물 무게를 측정한다 뒤 반입호퍼를 통해 곡물이 투입되는 과정에서 최종적으로 제품이 포장되어 나오기 까지 시간을 초시계를 이용 측정하여 각 공정에서 처리능력을 조사하였으며 생산된 쌀의 품질을 조사하였다. 곡물의 함수율은 소요동력, 탈부율, 도정수율 등에 영향을 미치는 중요한 요인중의 하나이기 때문에 본 실험에서는 공기오븐법을 사용하여 벼, 현미, 백미 등의 함수율을 측정하였다.

1) 승강기의 반송능력 분석

승강기를 설계하는데 있어 중요한 인자는 반송능력과 소요동력 결정이다. 시간당 정미능력이 0.5톤인 도정시설을 설계하는데 있어 반송규모는 곡물의 투입량이 도정수율 0.75를 적용하면 시간당 0.67톤인 점과 효율 등을 고려하여 안전계수 3을 적용하면 승강기의 반송능력은 약 2 t/h으로 설계하였다. 다음 식(1)은 반송능력과 버킷 한개의 용량, 버킷의 간격 그리고 벨트 속도와와의 관계를 나타냈다.

$$W = \frac{60 \eta V \gamma v}{l} \dots\dots\dots \text{식 (1)}$$

- 식에서,
 W : 반송능력 (t/h)
 η : 버킷의 충만율
 V : 버킷 1개의 용량(m³),
 v : 벨트 속도(m/min),
 γ : 반송물의 산물밀도(t/m³),
 l : 버킷간의 간격(m)

본 연구에서 사용된 버킷의 충만율은 반송조건이 양호한 상태에서 60%에 해당되는 것으로 간주하였다. 반송물의 산물밀도는 벼의 경우 느슨한 채움일 때 0.58 t/m³을 사용하였다. 반송물체의 시간당 소요체적(m³/h)과 버킷충만율 및 반송물의 산물밀도와의 관계는 식 (2)와 같다. 따라서 버킷의 효율을 60%로 가정하였으므로 식 (2)를 이용하여 시간당 총 소요체적을 구하면 5.75 m³/h가 되었다.

$$\text{소요체적} = \frac{W}{\eta \gamma} \dots\dots\dots \text{식 (2)}$$

- 식에서,
 η : 버킷의 충만율,
 γ : 반송물의 산물밀도(t/m³),
 소요체적(m³/h)

승강기 3번을 제외한 버킷의 치수(mm)는 130×105이고 승강기 3번은 병목현상을 고려하여 190×105으로 설계하였다. 결과적으로 승강기 3번을 제외한 각 버킷의 용량은 325×10⁻⁶ m³으로 하였으며 승강기 3번의 용량은 830×10⁻⁶ m³으로 하였다.

시간당 2톤의 버킷을 설치하기 위해 벨트의 길이는 두 풀리의 직경을 상부 145 mm, 하부 130 mm로 각각 설계하였으므로 반원인 두 풀리의 둘레를 고려하여 벨트의 총 길이를 산출하였다. 예를들어 승강기 1번은 건물높이 및 기계배치를 고려하여 두 풀리간 길이를 4 m로 할 경우 두 풀리의 둘레를 고려하여 총 벨트의 길이는 약 9 m로 하였다. 버킷간의 간격은 벨트 총 길이를 버킷의 갯수로 나눈값이므로 승강기 1번의 경우

9,000/40=225 mm로서 약 23 cm의 간격이 되도록 설계하였다. 반송능력을 시간당 약 2톤 규모로 설계하는데 있어 효율을 60%로 가정하였으므로 앞에서 구한 소요체적과 버킷용량을 이용하여 버킷의 갯수를 구할 수 있었다. 일반적으로 권장되는 벨트의 속도는 약 1.2 m/s이었으므로 이에 벨트의 회전수는 약 7~8 rpm이 되도록 하였다. 가령 승강기 1번의 버킷갯수는 식 (3)을 이용하면 40개의 버킷이 적정수준임을 알 수 있었다.

$$\begin{aligned} \text{버킷의 갯수} &= \frac{\text{소요체적}}{1\text{개의 버킷용량} \times \text{시간당 회전수}} \dots \text{식(3)} \\ &= \frac{5.75\text{m}^3/\text{h}}{325 \times 10^{-6}\text{m}^3 \times 7.5 \times 60/\text{h}} \\ &= 39.3\text{개} \end{aligned}$$

전동기의 구동동력은 식 (4)에 의해 산출되었다.

$$P = \frac{9.8 \times C \times h}{1000 \times \eta} \times k \dots \text{식(4)}$$

식에서,

- P : 구동동력(kW), C : 이송 곡물량(kg/s),
- h : 이송높이(m), k : 안전계수
- η : 전동기와 전동장치의 합성효율

식 (4)를 사용하여 승강기 1번과 승강기 3번에 대한 구동동력을 산출하면 다음과 같이 할 수 있었으며, 승강기 3번을 제외한 승강기의 구동동력은 비슷하였다.

$$\begin{aligned} \text{승강기 1번의 구동동력} \\ &= \frac{9.8 \times C \times h}{1000\eta} \times k = \frac{9.8 \times 0.639 \times 4.29}{1,000 \times 0.3} \times 3 \\ &= 0.27\text{kW}(0.36 \text{ PS}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{승강기 3번의 구동동력} \\ &= \frac{9.8 \times C \times h}{1000\eta} \times k = \frac{9.8 \times 1.789 \times 4.54}{1,000 \times 0.3} \times 3 \\ &= 0.796\text{kW}(0.36 \text{ PS}) \end{aligned}$$

위와 같은 구동동력 산출식에 의해 각각 승강기의 안전계수 3을 적용하여 승강기 1번의 구동동력은 0.5 마력으로 설치하였으며 승강기 3번의

구동동력은 1 마력으로 설치했다. 승강기의 중간에는 버킷의 점검을 위한 점검 창을 설치하고 하부에는 승강기 내부의 청소를 위한 공간을 확보해 두었다.

2) 현미기의 작동

현미기의 탈부율을 결정하기 위해 제현과정을 거친 일정한 시료를 채취하여 무게를 측정하고 시료를 벼와 현미로 분리하여 각각의 무게를 측정한다. 다음 탈부율을 결정하였다. 탈부율이 80% 이상 유지하도록 현미기에 있는 고무롤러를 간격을 적절하게 조정하였다. 고무롤러의 인장강도가 100kg/cm² 이상인 로울러를 사용하였다. 두 로울러 사이의 적정간격은 벼 두께의 1/2, 적정 주속도는 11~14 m/s로 알려져 있다. 시료인 동진벼(1993년도 함평산)의 두께가 2.25 mm 이므로 로울러 간격은 1.2 mm 정도로 하여 사용하였다. 고무롤러의 수명은 120~130시간으로 사용시간이 경과함에 따라 마모가 되므로 이에 적절히 간격조절이 필요하다고 판단되었다.

3) 현미분리기의 분리효율

설치된 요동식 현미분리기의 크기 및 경사각을 측정하여 현미분리기의 선별능력을 결정하고 선별능력이 떨어질때는 경사각 조절장치를 이용하여 경사각을 재조정하였다. 분리되는 벼와 현미의 무게를 측정하여 현미분리기의 분리효율을 계산했다.

4) 도정수율 및 완전미수를 측정

도정수율은 전체 벼 투입량에 대한 총 생산된 백미의 무게비를 나타내며 본 연구에서는 3차에 걸친 실험을 통해 도정수율을 구하였다. 완전미수율이란 투입된 현미의 무게에 대한 생산된 백미 중의 완전미의 무게비를 나타내며 투입되는 백미중에 현미시료의 무게와 동일하게 채취한 뒤 백미중에 썬미를 제외한 완전한 백미만의 무게를 측정하여 백미의 완전미수율을 구하였다.

5) 연미기의 분사노즐 분석

연미기에서 발생하여 싸이클론으로 모아지는 미강의 양을 측정하고 습식연미기내에 장착된 노즐의 성능을 분석하였다. 노즐의 분두에서 나오는 분무량, 분무압, 분무입자의 크기 및 균일도 등을 조사하여 연미기의 노즐을 분석하고 평가하였다. 실험에 사용된 장치는 압력게이지, 초시계, 감수지, 비이커, 전자저울(정밀도 0.01 g), 실험현미경, 486-DX 컴퓨터 등을 사용하였다. 실험조건은 연미기의 용량 조절밸브를 최대로 하였고, 연미기 작동상태는 자동으로 하여 측정하였다. 설치된 노즐분두의 분무량은 8.5l/h(2.25 gal/h)이었다.

분석방법은 1)압력은 노즐 끝으로부터 100 mm 앞에서 압력게이지를 설치하여 노즐의 분무압을 측정하였다. 2)분무량은 유량손실을 없애기 위해 입구가 작은 비이커를 사용하여 노즐로부터 일정시간(약 5분)동안 나오는 물을 담아 정밀한 전자저울로 그 무게를 측정하여 유량을 산출하였다. 3)입자크기 측정은 노즐로부터 300 mm 떨어진 곳에 감수지를 놓고 일정하게 순간적으로 노즐에서 분사되는 분무액을 채취하여 무게하고 이것을 실험 현미경을 통하여 컴퓨터 영상처리 시스템으로 입자의 크기를 측정하였다. 현미경을 통해 보여지는 영상크기와 실제 크기와의 차를 줄이기 위해 보정하였고 10 반복하여 입자크기 결정방법을 VMD(Volume Mean Diameter), MMD(Mass Mean Diameter) 두가지로 분석하여 각각의 평균을 구하였다.

6) 미강제거율(degree of milling)

정미기에서 미강이 발생하여 싸이클론으로 모아지는데 이때 시스템에서 실제로 발생하는 미강량을 정확하게 측정하기 힘들기 때문에, 미강의 양을 측정하는 방법으로 완전현미 1,000개와 완전백미 1,000개의 무게를 각각 측정하여 제거된 미강의 양을 완전현미 1,000개의 무게로 나눈 값을 미강제거율이라 하였다. 또한 총 현미 무게에서 8%의 무게가 미강으로 제거되고 백미 무게가 92% 될 경우를 10분도라 하여 분도를 조사하였다.

7) 영상처리에 의한 백도 측정

컴퓨터 영상처리장치는 카메라로 촬영한 영상 신호(analog signal)를 A/D변환기에 의해 디지털 신호로 바꾸어 디지털 컴퓨터에 입력시킴으로써 컴퓨터 내부에서 입력된 영상신호를 처리하여 프린터와 모니터로 출력할 수 있게 구성했다. 그리고 컴퓨터에 입력되거나 컴퓨터내에서 처리된 영상을 볼 수 있는 영상용 모니터와 조명장치, 그리고 일정량의 시료를 담기 위해 플라스틱 용기를 사용하였다. 본 실험을 위해 사용된 영상처리장치와 그 시스템은 다음과 같았다.

1) 카메라는 SONY사의 비디오 카메라(모델명-CCD-F380)를 이용했으며 셔터속도는 1/60초, 초점조절, 백색 밸런스는 수동조절, 역광보정기능의 상태에서 카메라를 사용했다. 2) 영상처리용 하드웨어는 Imaging Technology사의 Color Frame Grabber (CFG)를 사용했다. 하드웨어 CFG는 아날로그의 천연색 영상을 색상(Hue), 채도(Saturation), 명도(Intensity)(이하 HSI라 칭함) 3가지 화면으로 분해하며 각 화면은 512×480×8 bit의 영상자료로 분해하도록 구성되어 있다. 3) 영상용 모니터로 Electrohome사의 천연색 모니터(모델명-ECM1311)를 사용하였다. 컴퓨터는 50MHz의 클럭을 갖는 IBM-486DX계의 것을 사용하였다. 4) 컴퓨터 시각 검사를 하기 위해서 시료의 영상특성은 가능한 두드러지게 하고 물체 영상의 배경은 가능한 단순화하여야 하므로 본 연구에서 사용한 조명장치는 설계시 불빛이 가능한 난반사가 되도록 배경을 흰색으로 물체의 그림자가 형성되지 않도록 하고, 물체에 대한 광량이 가능한 균일하도록 아크릴판을 이용하여 간접조명방식을 사용하였다. 조명은 20 W 용량의 형광등을 좌우로 1개씩 2개와 중앙부에 1개를 설치하였다.

쌀의 백도 검사 방법은 먼저 정미과정을 거치기 전의 현미, 각 정미과정을 거친 백미(1차, 2차, 3차), 그리고 최종적으로 연미기를 거친 백미를 각각 시료로 채취하여 일정량(용기포함 46.5 g)을 플라스틱 용기에 담아 CCD카메라에 의해 촬영한 뒤 각 시료의 H, S, I 값을 분석하였다. 본 실험의 정확도와 신뢰도를 높이기 위해 각 시료

당 12회 이상의 반복실험을 하였으며 H, S, I의 평균과 표준편차를 구하였다.

다. 시뮬레이션 모델의 검증

전 연구의 시뮬레이션에 의해 분석한 요인들의 결과치를 실제의 도정실험을 통해 비교 분석함으로써 모델을 검증하고자 하였다. 특히 각 공정상에 있어서 원료의 정제도 및 생산량 그리고 모델에서 변수 처리된 도정수율, 완전미수율, 탈부율, 미강제거율 등을 분석하여 모델에서 사용한 변수들의 가정값들을 검토하고자 하였다. 즉 모델의 타당성 검토를 위해서 도정실험에서 1) 정제현상, 2) 도정수율과 완전미수율, 3) 탈부율, 4) 미강제거율, 5) 시스템의 처리능력 등을 측정하여 비교하고자 하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 소형 도정공장의 시스템 개발

미국 도정시스템을 개발하여 공정별로 공간에 설치된 각종 기계장치들의 위치를 나타내 주는 도정공장의 평면도는 그림 1과 같다. 평면도에서 보는 바와 같이 왕겨실을 도정공장 밖에 설치하였고 도정공장 안에는 곡물을 저장할 수 있는 저장창고와 쌀의 품질검사 및 각종 시설들의 성분분석 등을 할 수 있도록 실험실을 두었다. 표

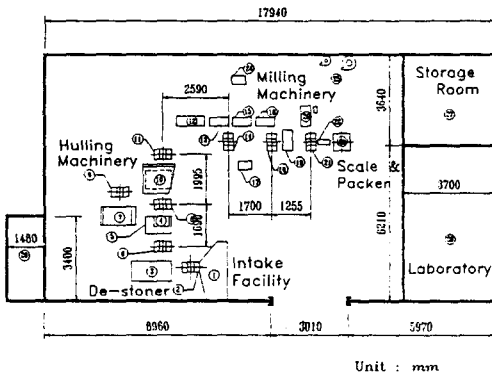
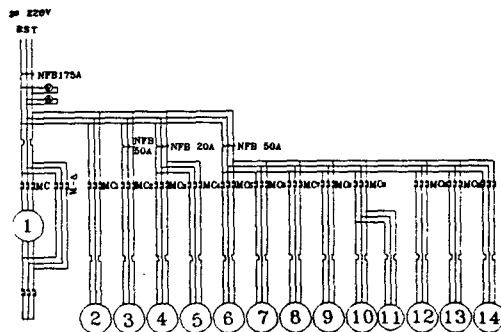


Fig. 1. A layout of a rice mill pilot plant.

Table 1. Machinery and equipments in the rice mill pilot plant

No.	Item	Spec.	No.	Item	Spec.
1	Intake hopper	165x160 mm	15	Rice polisher2	0.5 t/h
2	Bucket elevator 1	2 t/h	16	Rice polisher3	0.5 t/h
3	De-stoner	2.1~2.4 t/h	17	Control panel	
4	Rice huller	1.2~1.6 t/h	18	Bucket elevator 7	2 t/h
5	Husk aspirator	1 t/h	19	Hi-brilliant polisher control panel	1.3~1.6 t/h
6	Bucket elevator 2	2 t/h	20	Hi-brilliant polisher & power motor	15HP 6P
7	Screen sorter	795x1950 mm	21	Bucket elevator 8	2 t/h
8	Bucket elevator 3	6 t/h	22	Broken rice separator	310x970 mm
9	Bucket elevator 4	2 t/h	23	Scale	400g~20 kg
10	Paddy separator	0.5~1 t/h	24	Rice polisher power motor	20HP
11	Bucket elevator 5	2 t/h	25	Bran cyclone	
12	Thickness grader	0.5~1 t/h	26	Husk room	1480 X 3400mm
13	Rice polisher1	0.5 t/h	27	Storage room	3640 X 3700mm
14	Bucket elevator 6	2 t/h	28	Laboratory	3640 X 6210mm



- 1 경미모터(MORTOR 20HP), 2 연미기(MORTOR 15HP).
- 3 연미기(MORTOR 10HP), 4 분리기(MORTOR 2HP).
- 5 석탈기(MORTOR 2HP), 6 승강기 1(MORTOR 1/2HP).
- 7 승강기 2(MORTOR 1/2HP), 8 승강기 3(MORTOR 1HP).
- 9 승강기 4(MORTOR 1/2HP), 10 승강기 5(MORTOR 1/2HP).
- 11 미선기(MORTOR 1/2HP), 12 승강기 6(MORTOR 1/2HP).
- 13 승강기 7(MORTOR 1/2HP), 14 승강기 8(MORTOR 1/2HP).

Fig. 2. An electric circuit diagram of a rice mill pilot plant.

1은 도정공장에 설치된 기계장치들의 내역을 나타내었다. 그림 2는 본 도정공장에 설치한 도정시설의 전기 회로도이다. 회로도에서 전원은 220 V 3상, 175 A 이고 각 도정기계들의 동력

및 결선을 보여 주고 있다. 도정기계들에 대한 제어는 중앙제어방식으로 제어판넬에서 하고 각 도정시설별 제어를 할 수 있도록 되어있다. 제어판넬은 도정기계들에 대한 각종 스위치와 과부하 방지 회로차단기, 작동상태를 알려주는 램프, 전압·전류 지시계, 과부하시 울려주는 경적 등을 기본적으로 갖추고 있다. 사진 1은 본 연구에서 설계하고 개발하여 설치한 소형 미곡 도정공장의 도정 시스템을 나타낸다.



Photo. 1 An overall system of a rice mill pilot plant

나. 도정공장 시스템의 성능평가

본 연구의 시료로 사용된 동진벼(93년산)는 벼 두께가 2.25 mm 정도였고 초기 함수율이 13.36% (w.b., ± 0.19%) 정도로 측정되었다. 생산된 백미의 함수율은 13.8% (w.b., ± 0.01%) 이었고, 현미기에서 왕겨실로 배출된 왕겨의 함수율은 9.6% (w.b., ± 0.05%) 이었다. 왕겨의 무게 비율은 시료인 벼 300 g을 시험용 제현기에 투입했을 때 왕겨가 46.23 g으로서 투입된 벼에 대해 약 15.41% (± 0.33%)에 해당되었다. 개발된 미곡 도정 시스템의 각 장치별로 성능평가한 결과는 다음과 같았다.

1) 승강기의 반송능력 평가

이론적으로 분석하여 설계한 승강기를 설치하였으며 설치된 각 승강기의 성능을 평가하고자 하였다. 승강기의 반송능력을 결정하는데 있어

벨트의 속도는 각 승강기에 대한 1회전시 걸리는 시간을 초시계를 이용해 3회 반복 측정하여 평균을 구한 뒤 그 결과를 이용해 벨트의 속도를 산출했다. 버킷의 갯수, 버킷간의 간격, 벨트의 폭 등을 측정하여 승강기의 반송능력을 산출했다. 반송능력이 산출되면 하나의 개체가 승강기에서 이송되면서 걸리는 시간을 추정했다. 각각의 승강기 상부풀리는 직경이 145 mm이며 하부 풀리의 직경은 130 mm로 설치되었는데, 상부축과 하부축과의 길이, 버킷의 갯수, 버킷간의 간격을 측정하여 나타내면 표 2와 같다. 그리고 각 승강기의 평균 회전수는 7.75 rpm (표준편차: 0.427)으로 나타났다.

표 3은 각각의 승강기에 대한 두 풀리 축간의 길이를 측정한 뒤 풀리의 둘레의 길이를 고려하여 측정한 벨트의 총 길이와 벨트의 회전수를 이용하여 벨트의 속도를 구한 결과를 나타낸 것이다. 여기에서 구한 속도를 이용해 각 승강기에 대한 반송능력을 결정할 수 있었다. 각 벨트의 총 길이에 대한 평균값은 9.25 m이며 평균 벨트의 속도는 1.19 m/s로 나타났다.

Table 2. Height of bucket elevators, distance between buckets and numbers of buckets at each elevator

Item B.E.No.	Height (mm)	Distance between buckets(mm)	Bucket numbers
B.E. 1	4,290	225	40
B.E. 2	4,240	228	39
B.E. 3	4,540	211	45
B.E. 4	4,650	216	45
B.E. 5	4,140	223	39
B.E. 6	4,340	222	41
B.E. 7	4,440	239	39
B.E. 8	4,650	237	41

Table 3. Total length and velocity of belts of bucket elevators

No. of B.E.	Total length of belt(m)	Velocity of belt(m/s)
B.E 1	9.01	1.187
B.E 2	8.91	1.227
B.E 3	9.51	1.238
B.E 4	9.73	1.159
B.E 5	8.71	1.150
B.E 6	9.11	1.163
B.E 7	9.31	1.264
B.E 8	9.73	1.131

표 4는 표 3에서 나타낸 속도를 식 (1)에 적용해 구한 각 승강기에 대한 반송능력을 나타낸 것이다. 승강기 3번을 제외한 각 승강기의 평균 반송능력은 2.20 t/h로 나타났으며 이 값은 반송능력을 시간당 2톤으로 설정하여 시스템을 설계한 것과 거의 일치한 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 승강기 3번은 버킷의 가로 길이가 다른 버킷에 비해 60 mm가 더 길어 표 4에서 보는 바와 같이 다른 승강기의 이송량에 비해 약 3배인 시간당 6.441톤에 이르는 이송량을 가졌다.

Table 4. Conveying capacity of each bucket elevator

No. of B.E.	Conveying capacity(t/h)
B.E. 1	2.300
B.E. 2	2.172
B.E. 3	6.441
B.E. 4	2.247
B.E. 5	2.178
B.E. 6	1.933
B.E. 7	2.453
B.E. 8	2.093

2) 현미기 탈부율 평가

현미기를 통과한 부분에서 시료를 3회 반복 채취하여 현미와 벼에 대하여 각각의 무게를 측정해본 결과 탈부율은 87.25%로 나타났다. 수치는

본 연구에서 사용된 현미기의 탈부율이 일반적으로 사용되고 있는 도정공장의 현미기 탈부율을 고려해 볼때 높은 값을 알 수 있는데 이는 현미분리기에서 되돌려진 벼속에 현미가 일부 섞여 탈부율이 높게 나타나는 것으로 사료되었다.

3) 현미분리기 분리효율

일반적으로 현미분리기의 적정 경사각은 제조 회사에 따라 다르나 본 연구에서 사용된 요동식 현미분리기는 처음에 앞뒤의 경사각이 25°, 좌우가 20° 정도로 설치되어 경사각이 너무 커 곡물이 하단쪽으로 모이는 현상이 나타나므로 곡물의 양을 일시에 많이 통과시키지 못하고 소량의 곡물로 통과시켜야 하므로 분리효율이 50% 정도로 떨어지는 것으로 나타났다. 그러므로 본 연구 결과 현미분리기 앞의 보조탱크에서 가장 많은 정체현상(병목현상)을 보이는 것으로 나타났다. 이에 현미분리기의 현미 분리효율을 60% 이상으로 향상시키기 위해서는 경사각의 재조정이 요구되었다.

4) 도정수율(Milled rice recovery) 및 완전미수율(Head rice recovery)

도정수율과 완전미수율은 도정시스템의 성능을 대표하는 하나의 지표이다. 총 투입된 벼의 평균량은 290.5 kg이고 총 생산된 백미의 평균 무게는 216.2 kg으로 나타났다. 도정수율과 완전미수율을 결정하는데 있어 3 반복 실험을 한 결과, 평균적인 도정수율은 74.4%로 나타났으며 이는 일반적인 도정공장의 도정수율(73%)을 상회함을 알 수 있었다. 그리고 투입된 현미의 무게에 대한 생산된 백미 중의 완전미 무게비인 완전미수율은 약 87%를 나타냈는데 이 수치는 일부 도정공장의 완전미수율 84%에 비해 다소 높게 나타났다.

5) 연미기 성능 평가

연미기에서는 미립자의 물을 백미에 가수하여 쌀 표면의 미강을 제거시켜 줌으로써 좀더 윤기 있고 청결한 백미를 생산하였다. 약간의 백미속

에 포함되어 있는 수분은 연미과정에서 발생하는 곡온에 의해 자연 증발하였으나 약 0.6~0.3% 증가하였다. 이러한 연미과정은 백미의 광택을 향상시켰고, 제거된 미강은 사이클론에서 모아 지는데 벼 무게의 약 1~2%에 달했다. 습식연미기내에 장착된 노즐의 분두에서 나오는 분무량, 분무압, 분무입자의 크기 및 균일도 등을 조사하여 연미기의 노즐 성능을 분석한 결과 1) 연미기의 분당 물 분무량은 125 ml/min을 나타냈고, 2) 노즐의 분무압력은 약 9기압 이었으며, 3) 노즐의 분무입자 크기는 MMD(Mass Mean Diameter)가 약 86 μm 이었고 VMD(Volume Mean Diameter)는 약 97 μm 이었다.

6) 미강제거율(Degree of Milling) 분석

쌀의 품질을 결정하는 중요한 인자 중의 하나는 미강제거율이다. 이에 완전한 현미 1,000개와 완전한 백미 1,000개의 무게차를 이용하여 분리된 미강의 양을 측정하여 미강제거율을 결정하였다. 본 분석 실험에서는 백미 1,000개의 무게는 19.5 g, 현미 1,000개의 무게는 21.8 g이었고, 미강으로서 제거되는 양은 현미의 10.55% (± 0.05)로 본 시스템에서 생산된 청결미(cleaned rice)는 약 12~13분도 쌀로서 광택이 높게 나타났다. 물론 이때 완전현미와 백미를 골라 무게를 측정하였기에 완전백미와 완전현미 무게의 차에는 싸래기와 소쇄미의 무게가 포함되지 않는다고 가정하였다.

7) 영상처리에 의한 백도 분석

컴퓨터 시각을 이용한 현미와 백미에 대한 상대적인 백도 측정은 CCD카메라와 컴퓨터로 구성된 영상처리장치를 사용하여 조사하였으며 그 결과는 다음과 같았다. 그림 3은 각 시료의 가공 정도에 따른 색상(Hue ; H), 채도(Saturation ; S), 명도(Intensity ; I)의 평균값을 보여주고 있다. 색상(H)화면에서 무채색은 화소값이 0, 적색계열은 255에 가깝고, 녹색계열은 85~170 정도인데, 현미가 1차 정미기를 거치면서 색상값이 급격히 감소하고 이후 완만한 감소추세를 보이는 것은 1차 정미과정에서 대부분의 미강이

제거되어 백미가 되어가는 것을 의미하였다. 채도(S)화면에서의 백색에 대한 화소값은 보통 20~75로 나타나는데, 본 실험에서 현미에서 연미로 가면서 25에서 40으로 증가하였는데 이는 연미로 갈수록 백색을 띠고 있는 것을 의미하였다. 또한 명도(I)화면에서는 흑색으로 갈수록 0에 가깝고 백색으로 갈수록 255에 가깝는데, 본 실험에서는 현미에서 1차 정미기를 거친 백미가 급격히 증가하고 이후 완만한 증가세를 보이는데 이는 밝아지는 것, 즉 광택이 나는 것을 의미하였다. 종합적으로 볼때 현미가 연미로 갈수록 I 값과 S 값은 증가하고 H 값은 감소한다는 것을 알 수 있었는데 I 값에서 뚜렷한 변화를 보였다.

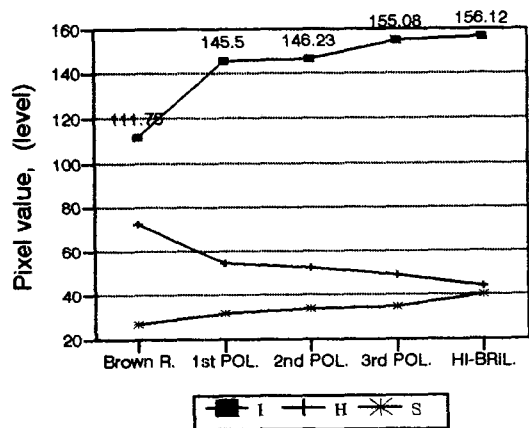


Fig. 3. Pixel values of H, S, I of brown, milled and cleaned rice analyzed by an image processing system.

다. 시뮬레이션 모델의 검증

시뮬레이션한 결과와 실제 도정실험을 한 결과의 비교치를 표 5에 나타내었다. 표에서 나타난 바와 같이 시뮬레이션에서는 도정수율이 73.83% 이었고 실제 도정실험에서는 74.4%로 거의 비슷하게 나타났으며 정미의 완전미수율은 시뮬레이션한 결과가 91.6%로서 실제 도정실험한 87%에 비해 다소 높게 나타났다. 탈부율은 이와 반대로 시뮬레이션에서 얻은 84.6%에 비해 도

정실험에서 얻은 결과치가 87.25%로서 약간 높게 나타났다. 미강제거율에서는 시뮬레이션 결과가 8.34%인 11분도이었고, 실제 도정실험에서는 미강제거율이 10.55%로서 약 13분도에 해당되었다. 이처럼 도정수율, 완전미수율, 탈부율, 미강제거율에서 시뮬레이션 값들과 실제 측정값들과 약간의 차이를 나타내고 있는데 이는 시뮬레이션에서 이들 변수들에 대한 설정값(가정값)의 재조정이 요구된다고 사료되었다.

정체지점은 시뮬레이션과 실제 도정실험의 두 경우가 일치하여 모두 현미분리기 앞에 설치된 보조탱크 2에서 가장 많은 대기시간과 대기량을 보이고 있어 이 부분이 정체지점으로 판단되었다. 시스템의 생산능력에 있어서는 시뮬레이션에서 시간당 0.5톤의 정미능력을 가지고 있으며 실제 설계 개발한 도정시설에서는 시간당 0.4~0.5톤의 정미능력을 가지고 있는 것으로 평가되었다.

Table 5. Comparison between simulation results and actual data in milling experiment

Item	Simulation	Experiment
Milled Rice Recovery	73.8 %	74.4 %
Head Rice Recovery	91.6 %	87.0 %
Hulling Efficiency	84.6 %	87.3 %
Degree of Milling(%)	8.3 %	10.6 %
Bottleneck	Buffer tank 2	Buffer tank 2
Production Capacity	0.5 ton/h	0.4~0.5 ton/h

* Degree of Milling(%)

$$= \frac{\text{Weight of brown rice-cleaned rice}}{\text{Weight of brown rice}} \times 100$$

* Buffer Tank 2 is installed before a brown rice separator.

4. 결론

미곡 도정시스템에 대한 일반적인 시뮬레이션 모델을 개발한 후 이를 기초로 소형 미곡 도정공장을 설계하고 개발하였다. 그리고 개발된 소형 미곡 도정공장의 시스템 성능을 평가하고 시뮬레이션 모델을 검증하였다. 이에 본 연구의 결론은 다음과 같았다.

1. 시뮬레이션의 분석결과를 기초로 시간당 0.5톤 규모의 미곡도정시설을 설계하여 개발하였다.

2. 개발된 소형 미곡 도정시스템 탈부율은 87.25%이었고, 도정수율은 74.4%로 나타났으며 정미의 완전미수율은 약 87%이었다. 이때 본 도정시설에서 생산된 쌀의 분도는 제거된 미강의 양이 10.55%로 약 13분도 쌀로서 높은 광택을 나타냈다. 또한 영상처리를 이용한 백도분석에서 현미, 정미에 비해 연미과정을 마친 청결미의 명도가 가장 높게 나타났다.

3. 소형 미곡도정공장을 개발 설치한 후 도정시스템에 대한 시뮬레이션 모델의 타당성 여부를 위해 검증한 바 시스템의 병목현상 및 처리시간 그리고 생산량을 고려할때 시뮬레이션이 실제와 매우 일치하였다. 실제 도정실험에서 도정수율은 74.4%이었고 시뮬레이션에서는 73.8%으로 나타났으며, 완전미수율은 시뮬레이션한 결과가 91.6%로서 실제 도정실험한 87%에 비해 다소 높게 나타났다. 이에 전 연구에서 보고된 시뮬레이션 모델이 도정공장 설계에 유용하게 사용될 수 있으리라 사료된다.

참 고 문 헌

1. 고헌균, 금동혁 외 5인, 1990. 농산가공기계학, 향문사
2. 김삼도, 정창주, 노상하, 1982. 연삭,마찰의 조합식 정백작용이 정백성능에 미치는 영향, 한국농업기계학회지 7(2) : 72~85.
3. 노상하, 최재갑, 1976. 정미기의 능률에 미치는 기계적 요인 및 작동 조건에 관한 연구, 한

- 국농업기계학회지 1(1) : 15~48.
4. 노상하, 고헌균, 이종환, 박승제, 1987. 조합식 정백시스템의 설계 및 작동인자에 관한 연구 (I), 한국농업기계학회지 12(2) : 28~37.
 5. 이종환, 노상하, 고헌균, 1987. 조합식 정백시스템의 설계 및 작동인자에 관한 연구 (I), 한국농업기계학회지 12(1) : 20~30.