

# 곡물선별기의 성능 향상을 위한 구조변경

## Structural Modification for the Performance Improvement of a Grain Sorting Machine

김 성 현\* · 이 규 호\* · 임 형 빈\* · 정 진 태†

Sunghyun Kim, Kyuho Lee, Hyungbin Im and Jintai Chung

(2007년 11월 29일 접수 ; 2007년 12월 24일 심사완료)

**Key Words** : Grain Sorting Machine(곡물선별기), Vibration(진동), Structural Modification(구조변경)

### ABSTRACT

This paper presents a structural modification for the performance improvement of a grain sorting machine. The grain sorting machine is used to sort abnormal grains from normal grains such as rice or wheat. Vibration is one of main causes to deteriorate the sorting performance of the machine. Based on the finite element analysis and the experimental modal testing, the vibration characteristics were investigated for the sorting machine. Furthermore, in order to improve the sorting performance of the machine, the frame, chute and base plate of the sorting machine were modified by using the results of the vibration analysis.

### 1. 서 론

곡물선별기(grain sorting machine)는 미곡 중합 처리장에서 사용하는 첨단 장비로써, 고속 CCD카메라를 이용하여 명암에 따라 변색된 곡물을 선별하고 양품의 쌀만을 골라내는 기계장치이다. 곡물선별기에서 상부로 투입된 곡물이 피더의 강제 운동에 의해 슈트를 통하여 하강하다가, 이물질이나 변색된 곡물만을 공기총의 압축공기로 분리하여 양질의 곡물이 선별 된다<sup>(1)</sup>. 따라서 고속 CCD카메라가 선별 대상을 정확히 감지하여, 이물질이나 불량곡물을 안정적으로 분리하기 위해서는 곡물선별기와 이를 이루고 있는 각 부품의 동적 안정성을 확보해야 한다.

현재 국내업체의 곡물선별기 개발상황은 선진업체와는 달리 독자 모델에 대한 개발 경험이 적고, 체계적인 설계 능력이 미흡하기 때문에 대부분의 개발이

선진 외국 제품의 모방에 의존하고 있는 실정이다. 또한 안정성을 갖춘 곡물 선별기의 설계가 곡물의 선별능력에 중요한 역할을 차지함에도 불구하고, 국내에서는 구조해석기술과 이를 기반으로 한 체계적인 설계가 이루어 지지 않고 있다. 따라서 생산된 곡물선별기의 구조적 문제로 인하여 부품들의 비틀림 변형에 따른 곡물선별능력 저하현상이 발생하게 되면 이에 대한 설계를 수정하여 생산하는 비효율적인 방식을 사용하고 있다. 반면 국외에서는 곡물이 슈트로 낙하할 때의 충격으로 인한 슈트의 수명 단축과 성능 저하를 개선하기 위해 실험과 시뮬레이션을 통해 슈트로 낙하하는 곡물의 위치를 최적화 하는 연구를 수행하고<sup>(2)</sup>, 여러 종류의 곡물을 선별할 수 있도록 각 곡물이 이송될 때의 과장을 조사하여 이에 따른 곡물별 선별능력을 최적화 하기위한 연구를 수행하여 곡물선별기를 개발하는데 이용하고 있다<sup>(3)</sup>. 곡물선별기의 기술을 선도하는 대표적인 선진 외국 회사로 일본의 사다케(satake)와 영국의 솔텍스(sortex)가 있다. 두 회사는 개발과 연구를 끊임없이 지속하여 곡물선별기의 기술 개발 노하우를 가지고 있지만 이에 대

† 교신저자: 정희원, 한양대학교 공학대학 기계공학과

E-mail : jchung@hanyang.ac.kr

Tel: (031)400-5287, Fax : (031)406-6964

\* 한양대학교 대학원 기계공학과

한 연구결과는 발표되지 않고 있다.

이 연구에서는 곡물선별기의 유한요소해석<sup>(4)</sup> 통한 체계적인 설계기술을 확보하고, 높은 선별능력을 갖는 고효율의 곡물선별기를 개발하는 것을 목표로 하고 있다. 곡물선별기가 고효율의 선별성능을 확보하기 위해서는 곡물선별기와 이를 이루고 있는 각 부품의 정적 및 동적 안정성에 대한 검증이 선행되어야 한다. 따라서 이 연구에서는 곡물선별기 전체 구조와 각 부품들의 구조의 안정성에 대하여 상용유한요소해석 프로그램을 통하여 분석 및 고찰하고, 시뮬레이션 결과를 실험<sup>(5)</sup>과 비교하여 검증하였다.

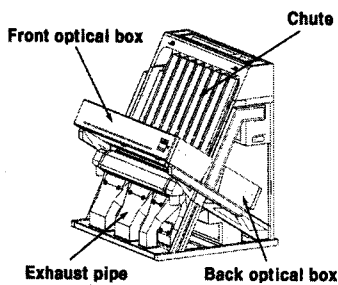


Fig. 1 Schematic plot of a grain sorting machine

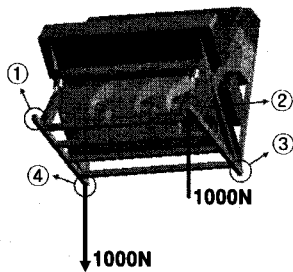


Fig. 2 Boundary conditions for the static analysis of the grain sorting machine

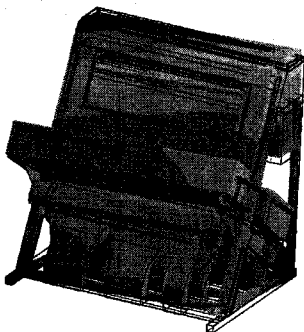


Fig. 3 Deformed shape of the grain sorting machine

또한 시뮬레이션 결과로 나타난 구조적 문제점을 보완하고 구조적 안정성을 확보하기 위하여 강성 및 형상 등의 설계변수의 변화에 따른 시뮬레이션을 수행하였다.

## 2. 곡물선별기의 정적 해석

곡물선별기를 운반하기 위해 크레인을 이용하여 곡물선별기 상부의 모서리 부분과 연결하여 들어 올리고 내리는 방법을 사용하고 있다. 이때 곡물선별기를 들어 올리는 순간과 내리는 순간에 곡물선별기의 상부와 하부에 하중이 가해지게 된다. 이러한 하중은 Fig. 1에 나타나 있는 슈트(chute), 전면 광학실(front optical box), 후면 광학실(back optical box) 그리고 양품구(exhaust pipe)에 영향을 주게 되어 변형을 일으키거나 파손을 발생시킬 수 있다. 따라서 곡물선별기에 파손이나 변형이 일어나는 경우는 하중이 고르게 분포되지 않고 4개의 점 중에서 1개의 점에 하중이 집중될 때이다. 따라서 유한요소해석의 수행 시 경계조건은 1개의 점에 하중이 집중될 때를 적용하여 곡물선별기에 미치는 영향을 살펴 보았다. 곡물선별기를 하역할 때 가해지는 충격을 구현하기 위해서 Fig. 2와 같이 점 1과 3을 고정하고, 점 2에 위 방향으로 1000N의 힘을 가하고 점 4에 아래 방향으로 1000N의 힘을 가하였다.

Fig. 2와 같이 작용된 하중에 의한 변형을 살펴보기 위한 시뮬레이션 결과는 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3에서 실선으로 표시된 부분은 하중이 가해지기 전의 상태를 표시한 것이다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 하부 경계조건을 따라서 곡물선별기 상부에서 뒤틀림과 병진 운동이 발생하게 된다. 특히 슈트와 전면 광학실이 위치한 상부에서 움직임이 크게 나타나기 때문에 곡물 이송에 영향을 줄 수 있다. 따라서 하부에 하중이 작용할 때 곡물의 고른 이송에 영향을 미치는 슈트가 변형을 일으킬 우려가 있다. 이러한 변형은 전면 광학실의 성능을 저하시킬 수 있다. 때문에 곡물선별기의 뒤틀림이나 변형을 최소화하기 위하여 곡물선별기의 구조개선이 필요하다.

## 3. 곡물선별기의 진동 특성 분석

### 3.1 프레임

프레임은 곡물선별기의 골격으로써 모든 부품을 연결시키고 이들을 지지하는 역할을 한다. 그러므로 외부의 하중에 대하여 변형이 크지 않아야 곡물선별기의 변형에 따른 성능저하를 예방할 수 있다. 앞에서 보았듯이 곡물선별기의 외부 하중에 대한 영향 평가에서 하부에 가해진 하중이 곡물 선별기의 곡물 이송과 선별의 안정성을 저하시키는 것으로 나타났다. 하부 하중에 대한 전체 시스템의 안정화를 위하여 프레임의 변위와 응력을 파악하여 구조개선의 방향을 제시하였다.

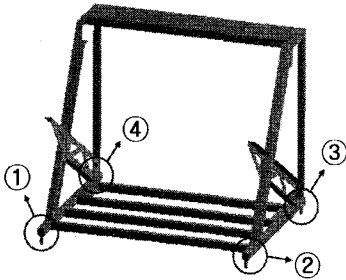


Fig. 4 Finite element model for the frame of the grain sorting machine

프레임에 대한 하중 및 경계조건을 Fig. 4의 유한요소해석 모델에 나타내었다. 앞 결과 같이 Fig. 4의 점 1과 3을 고정하였고, 점 2에서 위 방향으로 1000 N의 힘을 점 4에 아래 방향으로 1000 N의 힘을 가하였다. 이러한 하중 및 경계조건을 갖고 유한요소해석을 수행한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5(a)는 프레임에 하중을 가했을 때 응력 해석 결과이다. 응력 집중은 프레임의 고정축인 점 3에서 나타나는 것을 알 수 있다. 최대 응력은 점 3에서 144.29 MPa 로 나타났다. Fig. 5(b)는 프레임에 하중이 가해졌을 때 프레임의 변형을 보여주는데, 하중이 가해지는 점 2에서의 변위는 7.66 mm이고 점 4에서의 변위가 7.51 mm임을 확인하였다. 프레임의 하부 하중에 대한 유한요소해석을 실시한 결과로 프레임의 하부 끝단에 응력 집중 현상이 나타나고, 하부 하중을 가한 점 2와 4에서 생기는 변위의 크기를 확인하였다. 이 결과를 토대로 하여 하부 끝단의 응력 집중 현상과 점 2와 4의 변위를 감소시킬 수 있는 구조 개선을 마련하도록 하였다.

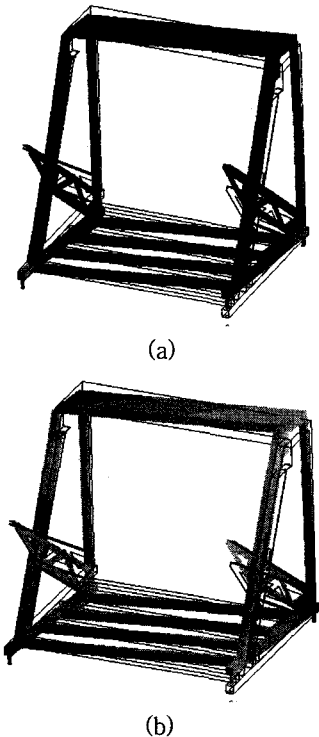


Fig. 5 Result of the finite element analysis : (a) stress distribution and (b) deformed shape

### 3.2 슈트

슈트는 상부에서 투입된 곡물을 전면 및 후면 광학실로 고르게 이송시켜주는 역할을 한다. 고속 CCD카메라가 곡물의 명암을 효율적으로 구분하기 위해서는 곡물이 멩치지 않고 고르게 내려가는 것이 중요하다. 따라서 슈트가 안정적인 성능을 유지해야 곡물이 고르게 이송될 수 있고, 이를 통하여 곡물선별기의 불량 곡물과 양질의 곡물에 대한 선별력을 향상시킬 수 있다. 곡물의 이송을 담당하는 슈트 부품과 슈트 부품을 고정시키는 슈트 지지판으로 나누어 슈트에 대한 유한요소해석과 실험을 실시하여 각 부품의 특성과 안정성을 확인하였다.

슈트 부품은 곡물이 고르게 이송될 수 있도록 반원형의 곡물 이송경로가 있다. 이로 인하여 슈트 부품의 곡면이 복잡한 형상을 이루고 있기 때문에 해석 결과의 오차가 발생할 수 있다. 따라서 슈트 부품의 모델링을 Fig. 6과 같이 슈트 부품의 전체 형상을 셀 형태로 단순화 시켜서 모델링을 실시하였다. 이와 같은 셀 모델<sup>(6)</sup>을 통하여 슈트 부품의 전체적인 경향을 파악하여 개선 필요성의 여부를 판단하도록 하였다.

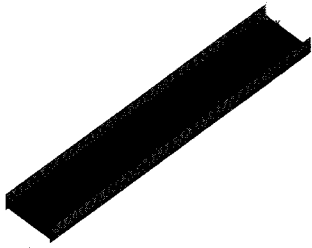


Fig. 6 Finite element model of the chute

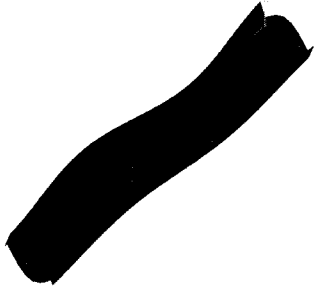


Fig. 7 Mode shape of the chute

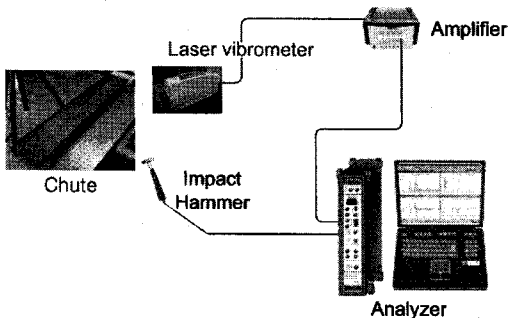


Fig. 8 Experimental set-up for the signal analysis of the chute

셀 모델의 동특성과 안정성을 살펴보기 위해서 동적 해석을 실시하였다. 경계조건은 자유단 조건을 적용하였다. Fig. 7은 슈트 부품의 모드 형상을 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 공진에 의해 슈트가 변형하면 곡물을 안정적으로 이송할 수 없기 때문에 선별기의 곡물 선별능력이 떨어진다. 따라서 곡물의 선별능력을 증대하기 위해서는 공진을 회피하는 슈트의 설계가 필요하다.

슈트 부품의 고유진동수를 측정하고 이를 통해 모드 형상을 살펴보기 위해 주파수 분석 실험을 실시하였다. Fig. 8과 같이 실험자가 알 수 있는 가전력을 대상 시스템에 적용하여 이에 따른 응답 특성을 통해

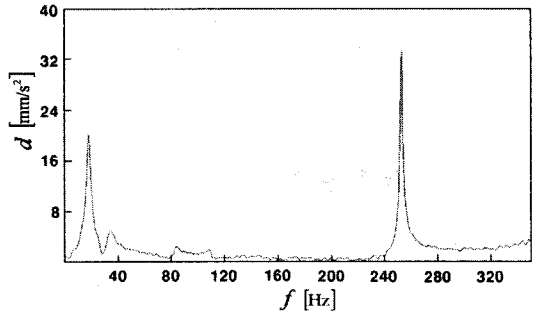


Fig. 9 Frequency response function of the chute

Table 1 Comparison of the natural frequencies of the chute between finite element analysis and experiment

Mode	Finite element analysis	Experiment
1st	270.81 Hz	253.50 Hz
2nd	533.55 Hz	534.00 Hz
3rd	707.97 Hz	688.00 Hz

서 구조물의 고유 특성을 분석하는 시스템 분석 실험인 모드 실험을 수행하였다.

시스템 분석 실험의 결과로 나타나는 주파수 응답 함수를 Fig. 9에서 보여주고 있다. 고유진동수는 253 Hz이고 40 Hz이하에서 나타나는 부분은 시스템 분석 실험 시 슈트 부품의 경계조건으로 인하여 나타나는 강제모드이다. 각각의 가진 포인트에서 출력되는 주파수 응답함수를 바탕으로 슈트 부품의 고유진동수를 추출하였다.

실험과 시뮬레이션의 결과는 Table 1에서 비교하였다. 1차 모드를 비교해 보면 실험 253 Hz, 시뮬레이션 270 Hz로써 17 Hz의 차이를 보였다. 이러한 차이는 슈트의 복잡한 곡면이 시뮬레이션에서는 적용되지 못한 것이 원인인 것으로 생각된다. 슈트의 미세한 진동이 곡물선별기의 선별능력에 영향을 주기 때문에, 슈트를 보다 견고히 고정하여 고유진동수를 증가시키고 변위를 최소화하는 슈트의 지지부가 필요하다.

### 3.3 슈트 지지판

슈트 부품이 장착되는 슈트 지지판은 상부와 하부가 'C'형태로 구부러져 있는 넓은 판이다. 이는 슈트 부품을 지지하는 역할을 하기 때문에 구조적 안정성이 요구되는 부품이다. 슈트 지지판의 경계조건은 좌

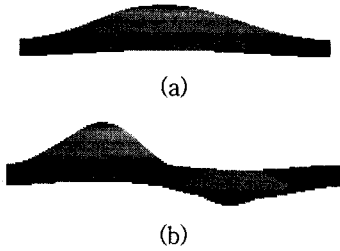


Fig. 10 Mode shapes of the chute base plate : (a) 1st mode and (b) 2nd mode

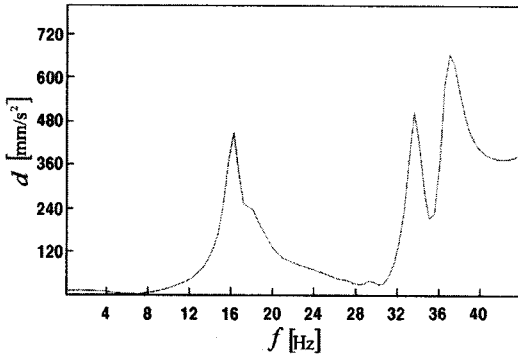


Fig. 11 Frequency response function of the chute base plate

측과 우측 끝단이 곡물 선별기에 용접을 통하여 장착된다. 이 경계조건을 유한요소해석과 실험에 동일하게 적용하였다. Fig. 10은 슈트 지지판의 유한요소해석 결과로서 슈트 단면의 모드 형상을 보여준다. 슈트 지지판의 변형에 의한 진동은 슈트가 곡물을 이송할 때 곡물이 튀어 오르거나 뭉치는 현상을 유발하여 이송 능력을 저하시킨다.

슈트 부품을 지지하는 슈트 지지판의 고유진동수와 고유모드를 측정하기 위해 주파수 분석 실험을 실시하였다. 프레임에 부착되어 있는 슈트 지지판을 대상으로 실험을 수행하여 Fig. 11의 주파수 응답함수를 구하여 지지판의 고유진동수를 구하였다. 실험과 유한요소해석 결과 값을 Table 2에 나타내었는데, 1차 모드는 실험 16 Hz, 시뮬레이션 25 Hz로 나타났다. 두 결과 모두 슈트 지지판이 매우 유연하다는 것을 암시한다. 모드 형상을 살펴보면, 슈트 지지판의 중앙부가 변형하는 모습을 확인할 수 있다. 앞서 수행한 슈트 모델에 대한 동적 해석의 결과에서 중앙에 위치한 슈트 부품들의 변형이 일어나는 원인이 슈트 지지판이라고 판단 할 수 있는 결과이다. 안정

Table 2 Comparison of the natural frequencies of the chute base plate between finite element analysis and experiment

Mode	Finite element analysis	Experiment
1st	25.57 Hz	16.00 Hz
2nd	47.94 Hz	38.00 Hz
3rd	56.69 Hz	56.00 Hz

성이 높은 슈트 부품이 곡물선별기에 적용되어도 이를 지지하는 슈트 지지판의 구조가 약하다면 저주파 영역의 지반 가진으로 인하여 곡물의 고른 이송과 선별력에 악영향을 끼치게 될 것이라고 판단된다.

#### 4. 구조 개선

앞 절에서와 같이 곡물선별기와 프레임의 유한요소해석에서 살펴본 바와 같이 하중이 가해졌을 경우 대각선으로 비틀림 현상과 병진운동이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 비틀림과 병진운동을 줄이기 위해서는 보강재를 추가하여 구조의 강성을 높이는 방법이 필요하다. Fig. 12는 곡물선별기의 중앙부에 'ㄱ'자 형태의 보강재를 적용한 모델을 나타낸 것이다<sup>(7)</sup>. 개선 모델의 적합성을 파악하기 위하여 앞서 수행한 기존 프레임과 동일한 경계조건을 개선 모델에 적용하고 유한요소해석을 실시하여 개선 방안의 타당성을 살펴보았다.

개선 모델의 하부 하중에 대한 응력 해석 결과를 Table 3에 요약하였다. Table 3을 살펴보면, 프레임 하부 끝단에서 발생하는 최대 응력이 144.29 MPa에서 112.17 MPa까지 줄어들었다 그리고, Fig. 4의 점 2와 4에서 변위의 평균값은 7.59 mm에서 6.81 mm로 감소되었다. 곡물선별기의 프레임에 'ㄱ'자 형태의 보강재를 추가한 개선 모델은 기존 프레임과 비교했을 때 변위와 하부 끝단의 응력 집중 현상을 효과적으로 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 이를 통하여 곡물선별기의 운반 시 나타날 수 있는 구조의 뒤틀림 현상을 막을 수 있고, 구동 시 곡물 선별능력의 안정성을 유지할 수 있다.

슈트 부품과 슈트 지지판의 실험 및 유한요소해석의 분석을 통하여 슈트 부품에 대한 안정성을 확인하였고, 슈트 지지판의 문제점을 발견하였다. 슈트 지지판은 얇고 넓은 형태로 제작되었기 때문에 중앙

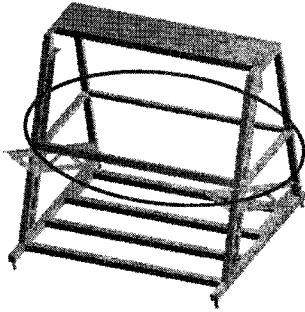


Fig. 12 Structural modification of the frame

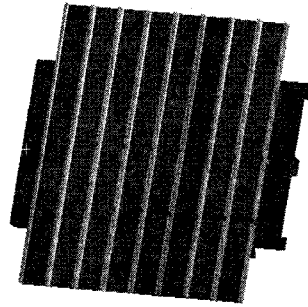


Fig. 14 Structural modification of the chute system

Table 3 Comparison of the deformation and stress between the original and modified frame

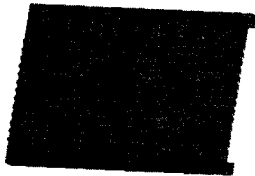
	Original frame	Modified frame
Deformation	7.59 mm	6.81 mm
Stress	144.29 MPa	112.17 MPa
3rd	56.69 Hz	56.00 Hz

Table 5 Comparison of the natural frequencies between the original and modified model

Mode	Original model	Modified model
1st	46.65 Hz	51.72 Hz
2nd	56.15 Hz	71.00 Hz
3rd	85.73 Hz	103.58 Hz



(a)



(b)

Fig. 13 Structural modification of the chute base plate : (a) model 1 and (b) model 2

Table 4 Comparison of the natural frequencies between the original and modified models

Mode	Original model	Model 1
1st	25.57 Hz	85.23 Hz
2nd	47.94 Hz	157.80 Hz
3rd	56.69 Hz	170.40 Hz

부가 휘는 현상을 나타낸다. 이를 개선하기 위하여 슈트 지지판의 중앙부의 휨에 대한 강성을 높이는 설계 방안이 필요하다. Fig. 13은 슈트 지지 판의 두

가지 개선 모델을 나타낸 것이다. Fig. 13(a)은 앞에서 수행한 정적 해석 결과에서 나타난 중앙부의 변형을 방지하기 위하여 지지판의 가운데에 중공 사각 보강재를 부착하였다. Fig. 13(b)은 지지판의 중앙부에 반원형의 텐트를 적용하였다. Table 4에 요약한 바와 같이, 2개의 보강 모델 모두 기존 슈트 지지판에 비해서 향상된 결과를 보여주었다. 하지만 Fig. 13(b)은 1차 모드가 크게 향상되지 않았기 때문에 60 Hz인 피더의 가진주파수와 지반 진동의 영향을 받을 수 있다. Fig. 13(a)모델이 중앙부의 휨에 대한 강성을 높이고 슈트 부품을 안정적으로 지지할 수 있다고 판단되는 결과를 보여주었다. 따라서 최적의 개선 방안은 슈트 지지판의 가운데에 중공 사각 보강재를 부착하는 방식을 적용한 Fig. 13(a)을 선택하였다.

슈트 부품은 안정성이 확인되었지만 슈트 지지판에 부착되는 고정부가 상부와 하부 2개만으로는 슈트 부품을 고정할 수 없다고 판단된다. 따라서 슈트의 변형을 방지할 수 있도록 상부와 하부 고정부 사이에 중앙 고정부 2개를 추가하여 슈트 부품의 부착에 적용하도록 하였다.

Fig. 14는 보강 슈트 지지판과 슈트 부품의 설계 개선 모델을 적용한 슈트 시스템의 모델링이다. 경계조건은 기존 슈트 시스템의 동적 해석과 마찬가지로 슈트 지지판의 좌측과 우측 끝단을 고정하였다.

Table 5의 기존 모델과 개선 모델에 대한 시뮬레이션 결과 비교를 살펴보면 전체적으로 고유진동수가 평균 15 Hz 증가되었다. 기존 슈트 모델의 동적 해석 결과에서 문제로 나타났던 1차 모드와 2차 모드의 고유진동수가 증가함으로써 지반 진동과 피더의 60 Hz 가진주파수의 영향을 피할 수 있게 되었다. 이를 통해 슈트 부품에 영향을 주었던 슈트 지지판이 안정성을 갖추게 되었고, 슈트 또한 슈트 지지판과 견고한 결합 상태를 유지할 수 있기 때문에 곡물 이송능력을 향상시킬 수 있게 되었다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 곡물선별기의 성능을 향상시키기 위하여 전체 시스템과 부품을 대상으로 해석적인 접근과 이를 검증하는 실험 방법을 적용하여 개선 방안에 대하여 강구하였다. 프레임과 슈트의 하부 하중에 의한 변형이 곡물 선별능력에 영향을 주는 것을 확인하였다. 프레임과 슈트의 안정성 및 동특성 파악을 위하여 유한요소해석과 실험을 수행하였다. 이를 토대로 프레임에 대한 보강설계를 실시하여 곡물선별기의 뒤틀림과 응력 집중현상을 감소시킬 수 있었다. 또한 슈트 부품을 지지하는 슈트 지지판의 취약점을 파악하여 이를 보강하기 위한 설계를 실시하여 곡물 이송을 안정적으로 수행할 수 있는 구조 개선안이 마련되었다.

## 후 기

이 논문은 2007년도 2단계 두뇌한국21사업에 의

하여 지원되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) Kim, S. M., 2005, "A Study on the Sheet Metal Forming Method in Product Design - Focused on 'Anysorter' Design Development Process", KSBDA conference, Vol. 6, No. 1, pp. 249~256.
- (2) Camacho, J., Lewis, R. and Dwyer-Joyce, R. S., 2007, "Wear of a Chute in a Rice Sorting Machine", Elsevier Science, Part 1, pp. 65~73.
- (3) Delwiche, S. R. and Gaines, C. S., 2005, "Wavelength Selection for Monochromatic and Bichromatic sorting of Fusarium-Damaged Wheat", Engineering in Agriculture, Vol. 21, No. 4, pp. 681~688.
- (4) Park, C. M. and Jang, D. O., 2001, "Finite Element Analysis of Ship Structures", SNAK Seoul, pp. 368~371.
- (5) Ewins, D. J., 2000, Modal Testing : Theory, Practice and Application, Hertfordshire.
- (6) Timoshenko, S. P., 1959, Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, Singapore
- (7) Ahn, C. W., Hong, D. K., Kim, D.Y., Choi, S. C. and Park, I. S., 2001, "A Study on the Optimal Position Determination of Middle Supporting Points to Maximize the First Natural Frequency of a Beam", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 1, pp. 89~95.