

# 성능 개선을 위한 곡물 선별기의 유한요소해석

## Finite Element Analysis of a Color Discerning Device for Performance Improvement

김성현\*·이규호\*\*·정진태†

Sung-Hyun Kim, Kyu-Ho Lee and Jin-Tai Chung

**Key Words** : Resonance(공진), Nodal Point(노달 포인트), Modal Analysis(모드 해석), Static Analysis(정해석)  
Color Discerning Device(곡물선별기)

### ABSTRACT

A Color Discerning Device(CDD) is the equipment to use in a Rice Processing Complex(RPC). A CDD can sorting discolored grain according to light and shade. The existing a CDD's driving performance is not so good as overseas machine. Besides, transportation process causes a defect in the mechanism from impact or harmonic excitation or etc. This study is represented the problem of CDD through experiment and simulation on a CDD. To analysis the problem of driving condition, devide each part of CDD for performed modal analysis. The problem of driving of driving condition and transportation process solved by carry out modal analysis and static analysis.

### 1. 서 론

본 연구는 곡물 선별기의 구조해석기술 확보와 이를 통한 곡물 선별기의 설계기술 개발로써 궁극적으로는 곡물 선별기의 선별 능력 향상을 위한 것이다.

곡물 선별기(Color Discerning Device)는 미곡 종합처리장에서 사용하는 첨단 RPC장비로써, 고속 CCD카메라를 이용하여 명암에 따라 변색된 곡물을 선별하고 양품의 쌀만을 골라내는 기기이다. 즉, 상부의 호퍼(hopper)로 투입된 곡물이 피더의 강제 운동에 의해 슈트를 통하여 하강하고, 압축된 공기를 이용하는 공기층에 의해 변색된 곡물이 분리되어 양품의 곡물만을 선별하는 원리로 작동한다. 따라서 고속 CCD카메라가 선별 대상을 골고루 파악하여 불량곡물을 안정적으로 분리하기 위해서는 곡물 선별기와 이를 이루고 있는 각 부품의 구조적 안정성을 확보해야 한다. 그러나 선진업체와는 달리 독자 모델에 대한 개발 경험이 적고, 체계적인 설계 능력이 미흡하기 때문에 대부분의 개발이 선진 외

국 제품의 모방 기술에 의존하고 있는 실정이다. 반면 국외에서는 곡물 선별기의 기술을 선도하는 대표적인 선진 외국 회사로 일본의 사다케(satake)와 영국의 솔텍스(sortex)가 있다. 세계 최고의 선별 성능을 지닌 제품을 출시하여 세계 시장을 선점하고 있는 일본의 사다케는 학계와 공동 연구를 통하여 슬라이딩 판의 진동 특성을 분석하여 곡물이 노드점에 집중 정렬되는 원인을 규명하였다. 또한 개발과 연구를 끊임없이 지속하고 있는 것으로 파악되지만 이에 대한 연구결과는 발표되지 않고 있다. 영국의 솔텍스는 1948년 세계 최초로 곡물 선별기를 개발한 정미·정선 산업의 선두 주자로 축적된 설계 노하우를 바탕으로 균질한 곡물 이송을 위한 피더의 설계 개선, 이물질 배출용 공기층의 고속 공압 밸브 작동을 위한 제어기 개발 등을 수행하고 있다.

본 연구에서는 곡물 선별기의 구조해석을 통한 체계적인 설계기술을 확보하고, 높은 선별 능력을 갖는 고효율의 곡물 선별기를 개발하는 것이다. 곡물 선별기의 고속 CCD카메라가 선별 대상을 골고루 파악하여 불량 곡물을 안정적으로 분리하여 고효율의 선별 성능을 확보하기 위해서는 곡물 선별기와 이를 이루고 있는 각 부품의 정적/동적 안정성이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 곡물 선별기 시스템의 구조해석을 통하여 성능에 영향을 미치는 부품을 파악하고 이를 검증하기 위한 실험을 수행하여 구조해석 기술의 타당성을 증명한다. 증명된 구조해석 결과를 이용하여 개선안을 마련하고 이에 따른 곡물 선별기의 설계를 실시하여 체계적인 설계기술을 확보하였다.

† 교신저자; 한양대학교 기계정보경영공학부  
E-mail : jchung@hanyang.ac.kr  
Tel : (031)400-5287, Fax : (031) 406-6964

\* 한양대학교 기계공학과

\*\* 한양대학교 기계공학과

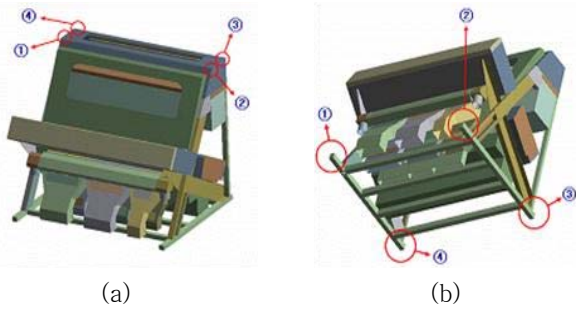


Fig. 1 Finite element model of the CDD: (a)forces to the upper side of CDD and (b)forces to the lower side of CDD

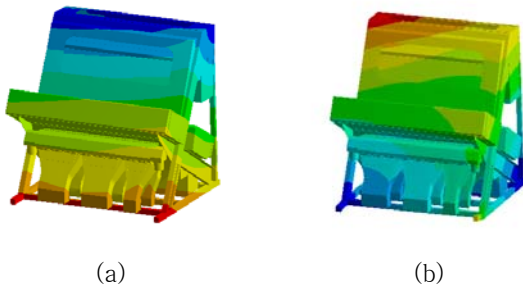


Fig. 2 Deform shapes of the CDD: (a)forces to the upper side of CDD and (b)forces to the lower side of CDD

## 2. 곡물 선별기의 성능 평가

곡물 선별기의 구동이나 포장 후 이송 시 발생할 수 있는 외부 하중 및 가진을 고려하여 상용유한요소해석 Tool을 이용하여 정적 해석을 실시하였다. 곡물 선별기의 상부의 외부 조건은 곡물 투입구가 위치하고, 하부는 구조물 지지이다. 따라서 정적 해석 시 고려한 외부 하중은 곡물 선별기의 상부에 가해지는 하중과 하부에 가해지는 하중을 택하였다.

Fig. 1 (a) 는 상부 하중에 대한 정적 해석 시 적용한 경계조건을 나타내고 있다. ①, ③은 Fixed support 조건을 이용해 모든 방향에 대한 움직임을 고정시켰다. ②는 곡물 선별기를 기준으로 상향으로 1000N의 Force가 작용하도록 하였고, ④는 동일 기준의 하향으로 1000N의 Force를 적용하였다. Fig. 1 (b) 는 하부 하중에 대한 정적 해석 시 적용한 경계조건을 표시하였다. ①, ③은 상부 하중에 대한 정적 해석 조건과 동일하게 Fixed support 조건을 이용해 모든 방향에 대한 움직임을 고정시켰다. ②는 곡물 선별기를 기준으로 상향으로 1000N의 Force가 작용하도록 하였고, ④는 동일 기준의 하향으로 1000N의 Force를 적용하였다.

Fig. 2 (a) 와 (b) 는 각각 상부 하중, 하부 하중에 가했을 때의 정적 해석 시물레이션의 결과를 보여준다. 두 결과

모두 고정 점이 되는 ①, ③이 축이 되어 ②, ④부분이 상하로 움직이게 된다.

(a) 는 경계조건이 상부의 움직임이 하부에 영향을 주게 되면서, 양품구가 위치한 바닥 프레임 부분의 뒤틀림과 병진 운동을 유발하게 된다. 이는 전면/후면 광학실과 슈트의 하단부에 영향을 미칠 수 있다고 판단되었다. (b) 는 하부 경계조건을 따라서 곡물 선별기의 뒤틀림이 발생하게 된다. 특히 피더가 장착되어 있는 부분과 슈트 부분의 움직임이 가장 크게 나타나기 때문에 곡물 이송에 영향을 받을 수 있다. 따라서 하부 하중의 발생 시 곡물의 고른 이송에 영향을 미치기 때문에 곡물 선별기의 뒤틀림이나 임의의 외부 가진 또는 지반 진동에 대한 내구성을 가진 곡물 선별기의 구조 개선이 필요하다.

## 3. 곡물 선별기 부품의 분석 및 평가

### 3.1 프레임

프레임은 곡물 선별기의 모든 부품을 연결시키고 지지하는 역할을 한다. 외부의 영향에 대한 안정성을 유지해야 다른 부품들의 곡물 선별력이 향상 될 수 있다.

전체 시스템의 외부 하중에 대한 영향 평가에서 하부 하중이 곡물 선별기에 미치는 영향이 상부 하중보다 크다고 판단하였다. 전체 시스템의 안정화를 위하여 프레임의 변위와 응력을 파악하여 구조개선의 방향을 파악하도록 하였다.

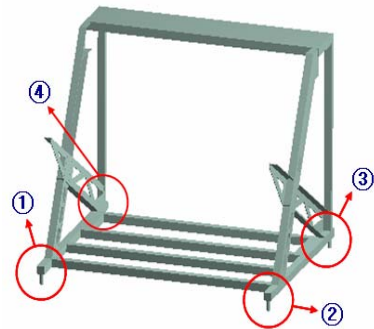


Fig. 3 Finite element model of the frame

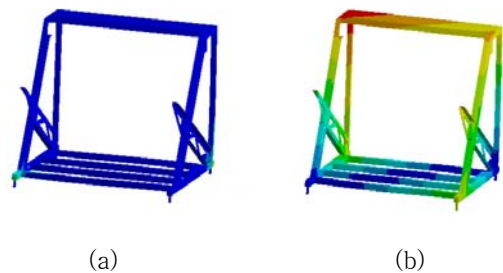


Fig. 4 Finite element analysis of the frame: (a) equivalent analysis and (b) deformation analysis

Fig. 3 은 프레임에 대한 하부 하중의 경계 조건을 나타낸 것이다. ①, ③은 Fixed support 조건을 이용해 모든 방향에 대한 움직임을 고정시켰다. ②는 프레임을 기준으로 상향으로 1000N의 Force가 작용하도록 하였고, ④는 동일 기준의 하향으로 1000N의 Force를 적용하였다.

Fig. 4 (a) 는 프레임의 하부 하중에 대한 응력 해석 결과이다. 응력 집중은 ①, ③에서 나타나는 것을 알 수 있다. ③에서 144.29MPa의 최대 응력이 발생하였다. Fig. 4 (b) 는 전체 시스템에 대한 하부 하중이 발생할 경우 하부 하중이 가해지는 위치인 ②, ④ 에서의 변위를 표시하였다. 움직임을 쉽게 파악하기 위하여 프레임을 제외한 다른 부품들은 숨긴 상태로 나타냈다. Point ② 에서는 7.66mm, Point ④ 에서는 7.51mm 의 변위를 보인다.

전체 시스템의 하부 하중에 대한 유한요소해석을 실시한 결과로 프레임의 하부 끝단에 응력 집중 현상이 나타나고, 하부 하중을 가한 ②, ④ Point에서의 변위가 생기는 것을 발견했다. 이와 같은 결과의 원인은 곡물 선별기의 각 부품들을 지탱하는 프레임 구조의 취약성이라고 판단되었다.

### 3.2 슈트

슈트는 피더에서 떨어진 곡물을 전면/후면 광학실로 고르게 이송시켜주는 역할을 한다. 고속 CCD카메라가 곡물의 명암을 효율적으로 구분하기 위해서는 곡물이 뭉치지 않고 고르게 내려가는 것이 중요하다. 따라서 슈트가 안정적인 성능을 유지해야 곡물의 고른 이송을 통하여 곡물 선별기의

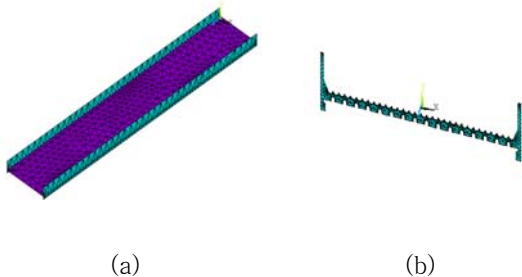


Fig. 5 Finite element model of the chute: (a) shell element model and (b) plane element model

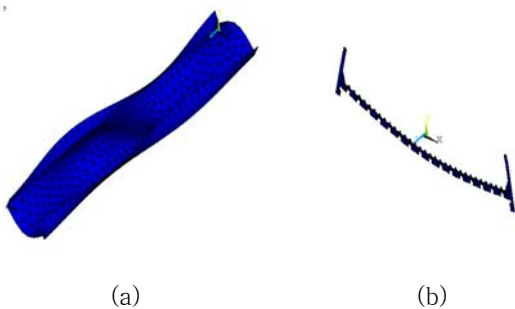


Fig. 6 Mode shapes of the chute: (a) shell element model and (b) plane element model



Fig. 7 Mode shapes of the chute base plate

Table 1. Natural frequencies of the chute base plate

Mode	Frequency (Hz)
1st	25.57
2nd	47.94
3rd	56.69

불량 곡물과 양질의 곡물에 대한 선별력을 향상 시킬 수 있다.

슈트 부품의 곡면이 복잡하게 나타나 있기 때문에 해석 결과의 오차가 발생할 수 있다고 판단되었다. 따라서 슈트 부품의 모델링은 전체적인 형상에 대하여 Fig. 5 (a) 와 같이 슈트 부품을 Shell 형태로 단순화 시켰고, 슈트 부품의 단면은 Fig. 5 (b) 에 나타낸 것과 같이 Plane 형태로 나타내었다.

Shell 모델과 Plane 모델의 개연성을 살펴보기 위해서 동적 해석을 실시하였다. 두 모델 모두 경계조건은 Free-Free 조건을 적용하였다. Element type은 Shell 모델의 경우 Shell 63, Plane 모델은 Plane 42를 사용하였다.

Shell 모델과 Plane 모델의 결과는 해석 모델의 차이로 인하여 근소한 차이를 보이고 있으나 비슷한 양상을 보였다. Fig. 6 (a)와 (b)는 두 모델의 300Hz 후반대역에서의 결과를 보여주었다. Shell 모델인 (a)는 378Hz이고 Plane 모델인 (b)는 395Hz를 나타내었다. 비슷한 주파수 대역에서 같은 모드형상을 나타내고 있기 때문에 두 모델의 개연성을 찾을 수 있었다.

슈트 부품이 장착되는 슈트 지지판은 상부와 하부가 ‘C’ 형태로 구부러져 있는 넓은 판이다. 슈트 부품과 가장 인접해 있기 때문에 구조적 안정성 여부를 파악해야 한다. 슈트 지지판의 경계조건은 좌/우측 끝단이 곡물 선별기에 용접을 통하여 장착된다.

Fig. 7 은 슈트 지지판을 놓힌 상태로 본 모습이다. Table 1 의 각 mode에서의 주파수를 살펴보면 전체적으로 Low frequency로 나타나기 때문에 피더의 가진 주파수나 다른 외부의 영향을 받을 수 있다고 판단되었다.

슈트 부품의 고유 진동수와 고유 모드를 측정하기 위해 신호 분석 실험을 실시하였다. 실험자가 알 수 있는 가진력을 대상 시스템에 적용하여 이에 따른 응답 특성을 통해서 구조물의 고유 특성을 분석하는 방법을 이용하여 신호 분석

실험을 했다.

Fig. 8 (a) 는 실험 장치의 구성도를 나타낸다. 슈트 부품의 전면부는 복잡한 곡면으로 이루어져 있기 때문에 후면부를 대상으로 실험을 실시하였다. 슈트 후면부에 가로 5개 세로 11개의 가진 포인트를 지정하고 대상 포인트를 Impact hammer로 가진 하였다. Laser vibrometer는 슈트에 가진력이 주어졌을 때의 응답을 받아서 Analyzer로 보내지게 된다. Analyzer는 신호의 진폭 및 위상정보를 이용하여 주파수 응답함수를 구하고 이를 바탕으로 고유진동수와 고유모드를 추출하게 된다. Fig. 8 (b) 는 시스템 분석 실험의 결과로 나타나는 주파수 응답함수이다. 각각의 가진 포인트에서 출력되는 주파수 응답함수를 바탕으로 슈트 부품의 고유진동수와 고유모드를 추출하게 된다. 고유진동수는 253Hz이고 40Hz이하에서 나타나는 부분은 시스템 분석 실험 시 슈트 부품의 경계조건으로 인하여 나타나는 강제모드이다.

슈트 부품을 지지하는 슈트 지지판의 고유 진동수와 고유모드를 측정하기 위해 신호 분석 실험을 실시하였다. Fig. 9 (a) 는 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 실험 대상인 슈트 지지판은 양품구와 프레임을 제외한 다른 파트는 조립되어 있지 않은 곡물 선별기에 부착되어 있다. 슈트 지지판에 가로 12개 세로 3개의 포인트를 지정하고 대상 포인트를 Impact hammer로 가진 하였다. Accelerometer는 슈트 지지판에 가진력이 주어졌을 때의 응답을 받아서 Analyzer로 보낸다. Analyzer는 신호의 위상정보와 진폭을 이용하여 주파수 응답함수를 구하고 이를 바탕으로 고유진동수와 고유모드를 도출하게 된다. Fig. 9 (b) 는 주파수 응답함수를 나

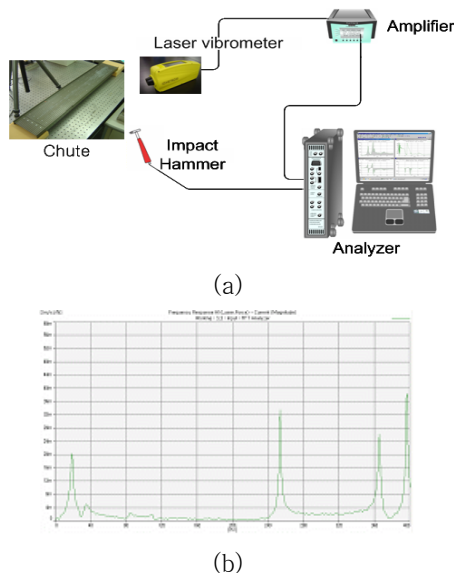


Fig. 8 Experimental of chute : (a) experimental set-up for signal analysis and (b) frequency response function of the chute

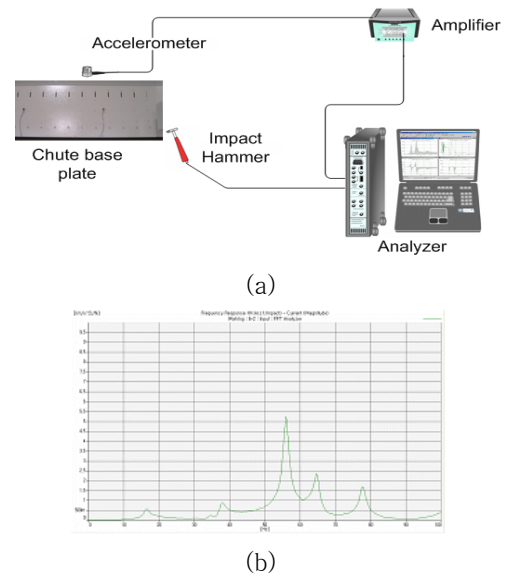


Fig. 9 Experimental of chute base plate : (a) experimental set-up for signal analysis and (b) frequency response function of the chute

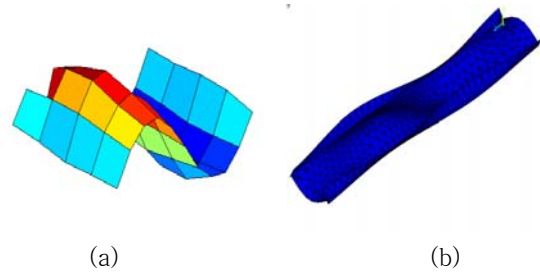


Fig. 10 Comparison of the chute: (a) experimental result and (b) simulation result

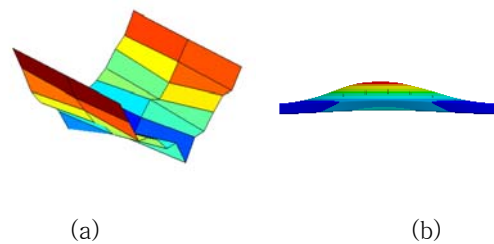


Fig. 11 Comparison of the chute base plate: (a) experimental result and (b) simulation result

타내고 있다. 가로 3개 세로 12개의 가진 포인트에서 출력되는 주파수 응답함수를 토대로 슈트 지지판의 고유모드 및 고유진동수를 추출하게 된다. 결과적으로 나타난 고유진동수는 16Hz이다.

Fig. 10 (a) 와 (b) 는 슈트 부품의 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 실험은 253Hz, 시뮬레이션은 240Hz로써 13Hz의 차이를 보였다. 이는 슈트의 복잡한 곡

면이 시뮬레이션에서는 적용되지 못한 것이 다음과 같은 차이를 나타내고 있었다. 또한 경계조건을 동일하게 맞추지 못하였기 때문에 작은 오차가 발생 되었다. 실험과 시뮬레이션의 결과를 보면 알 수 있듯이 슈트 부품의 고유진동수는 High frequency 영역이지만 Nodal point가 존재하기 때문에 슈트에 곡물이 지나갈 때에 Nodal point에서 곡물의 뭉침 현상이 발생하여 선별력에 영향을 미칠 수 있다고 판단되었다. 따라서 예상 Nodal point 위치에 슈트 부품과 슈트 지지판을 단단하게 고정 할 수 있는 지지부가 추가 되어야 한다고 판단된다.

Fig. 11 (a) 와 (b) 는 슈트 지지판의 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 실험은 16Hz, 시뮬레이션은 25Hz로써 두 결과 모두 슈트 지지판의 취약성을 보여준다. 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 지지판 이라고 판단 할 수 있는 결과이다. 안전성이 높은 슈트 부품이 곡물 선별기에 적용되어도 이를 지지하는 슈트 지지판의 구조가 약하다면 Low frequency 영역의 지반 가진으로 인하여 곡물의 고른 이송과 선별력에 악영향을 끼치게 될 것이라고 판단된다.

#### 4. 구조 개선안 제시

##### 4.1 프레임

Fig. 12 는 전면/후면 광학실과 슈트가 가장 인접한 위치에 ‘口’자 형태의 보강재를 프레임에 추가한 모델이다. 개선 모델의 성능을 파악하기 위하여 동일한 경계조건을 입력하고 유한요소해석을 실시하였다.

Fig. 13 (a) 는 개선 모델의 하부 하중에 대한 응력 해석 결과이다. Table 2 를 살펴보면, ①, ③에서 나타난 응력이 144.29MPa 에서 112.17MPa 까지 줄어든 것을 알 수 있다.

Fig. 13 (b) 는 개선 모델의 하부 하중에 대한 변위를 나타냈다. 하부 하중이 가해지는 위치인 ②, ④ 에서의 변위는 ② 에서 6.78mm, ④ 에서 6.84mm 의 변위를 보인다. Table 2 에 전체 시스템과 개선 모델의 ②, ④ 에서의 변위를 평균값으로 표시하였다. 전체 시스템은 7.59mm, 개선 모델은 6.81mm 의 변위가 발생했다.

곡물 선별기의 프레임에 ‘口’자 형태의 보강재를 추가한 개선 모델은 기존 곡물 선별기와 비교했을 때 Table 2 와 같이 ②, ④ 에서의 변위와 프레임 하부 끝단의 응력 집중 현상을 효과적으로 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 이를 통하여 곡물 선별기의 운반 시 나타날 수 있는 구조의 뒤틀림 현상을 막을 수 있고, 구동 시 곡물 선별 능력의 안정성을 유지할 수 있다.

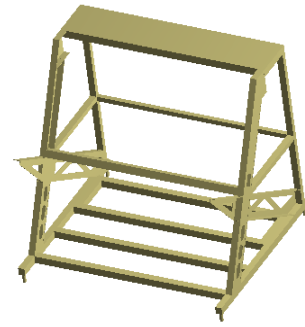


Fig. 12 Structural modification of the frame

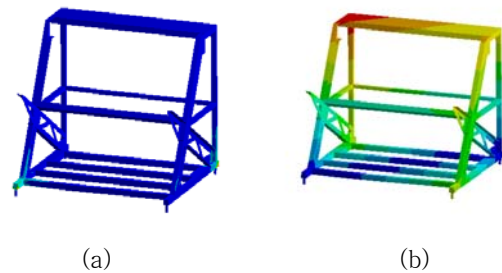


Fig. 13 Finite element analysis of the frame: (a) equivalent analysis and (b) deformation analysis

Table 2. Comparison of the deformation and stress between the frame and modify frame

	Frame	Modify frame
Deformation	7.59 mm	6.81 mm
Stress	144.29 MPa	112.17 MPa

##### 4.2 슈트

슈트 부품은 안정성이 확인되었지만 슈트 지지판에 부착되는 고정부가 상부와 하부 2개만으로는 슈트 부품에 Nodal point가 생기는 부분을 고정할 수 없다고 판단된다. 따라서 중앙부의 Nodal point를 방지 할 수 있도록 상부와 하부 고정부 사이에 중앙 고정부 2개를 추가하여 슈트 부품의 부착에 적용하도록 하였다. 기존 고정부를 그대로 사용하기 때문에 별도의 제작비용이 필요하지 않기 때문에 개선안의 목표 중 하나인 제작비용 및 제작시간의 낭비를 최소화 할 수 있다.

Fig. 14 (a)와 (b) 는 슈트 지지판의 두 가지 개선 모델을 나타낸 것이다. (a) 는 앞선 정적 해석 결과에서 나타난 중앙부의 변형을 방지하기 위하여 지지판의 가운데에 중공 사각 보강재를 부착하였다. 성능이 가장 뛰어난 보강재는 ‘X’ 형태로 부착하는 것이다. 하지만 개선 시 고려되어야 할 사항인 제작 비용과 제작 시간을 낭비하는 보강 형태이기

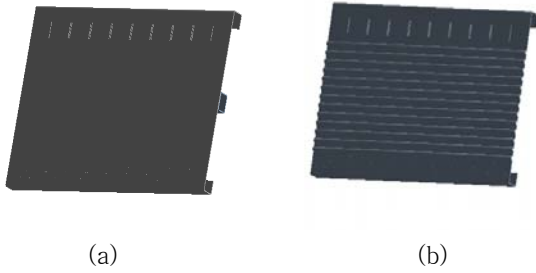


Fig. 14 Structural modification of the chute base plate (a) structural modification model 1 and (b) structural modification model 2

Table 3. Comparison of the natural frequencies between the chute base plate and modify models

Mode	Chute base plate	Modify model 1	Modify model 2
1st	25.57	85.23	30.29
2nd	47.94	157.80	66.63
3rd	56.69	170.40	67.21

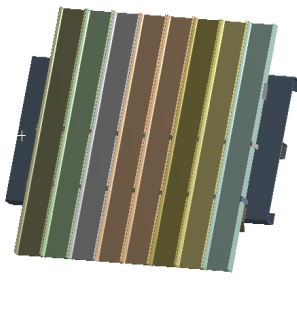


Fig. 15 Structural modification of the chute system

Table 4. Comparison of the natural frequencies between the chute system and modify model

Mode	Chute system	Modify model
1st	46.65	51.72
2nd	56.15	71.00
3rd	85.73	103.58

때문에 효율과 성능을 만족할 수 있다고 판단되는 중공 사각 보강재를 첫 번째 개선안으로 선택했다.

(b) 는 지지판의 중앙부에 반원형의 덴트를 적용하였다. 덴트 적용 시 슈트 지지판의 중앙부가 휘는 변형에 대한 강성을 높일 수 있다고 판단된다. Table 3 을 살펴보면, 3개의 보강 모델 모두 기존 슈트 지지판에 비해서 향상된 결과를 보여주었다. 하지만 보강 모델 2와 3은 1차 모드가 크게

향상되지 않았기 때문에 피더의 가진 주파수(60Hz)와 지반 진동의 영향을 받을 수 있다. (a) 의 경우 앞서 언급한 문제들의 영향을 회피할 수 있는 결과를 보여주었다. 따라서 최적의 개선 방안은 슈트 지지판의 가운데에 중공 사각 보강재를 부착하는 방식을 사용한 보강 모델 1을 선택하였다.

Fig. 15 는 보강 슈트 지지판과 슈트 부품의 고정부 추가 모델을 적용한 슈트 시스템의 모델링이다. 경계조건은 기존 슈트 시스템의 동적 해석과 마찬가지로 슈트 지지판의 좌측/우측 끝단을 Fixed support하였다. Table 4 의 두 모델에 대한 시뮬레이션 결과 비교를 살펴보면 전체적으로 평균 15Hz의 향상을 나타냈다. 기존 슈트 모델의 동적 해석 결과에서 문제로 나타났던 1차 모드와 2차 모드가 향상을 함으로써, 지반 진동과 피더의 가진 주파수(60Hz)의 영향을 피할 수 있게 되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 곡물 선별기의 성능을 향상시키기 위하여 전체 시스템과 부품을 대상으로 해석적인 접근과 이를 검증하는 실험 방법을 적용하여 개선 방안에 접근하였다. 프레임에 대한 보강설계를 실시하여 곡물 선별기의 뒤틀림과 응력 집중현상을 감소시킬 수 있었다. 슈트의 안정성을 확보하기 위해 슈트 지지판의 취약점을 파악하여 이를 보강하기 위한 설계를 실시하여 곡물 이송을 안정적으로 수행할 수 있는 구조 개선안이 마련되었다.

#### 5. 후기

이 논문은 2007년도 2단계 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

#### 참 고 문 헌

- (1) Klaus, J. B., 1996, Finite Element Procedures, Prentice-Hall International, Inc., New Jersey
- (2) Leonard, M., 1997, Principles and Techniques of Vibrations, Prentice-Hall International, Inc., New Jersey
- (3) 신정규 등, 2003, "저속차량 차체의 구조해석 및 구조최적설계", 한국자동차공학회, pp. 68~78.
- (4) D. J. Ewins., 2000, Modal Testing : Theory, Practice and Application, Research Studies Press LTD., Hertfordshire.
- (5) C. Wang and J. C. S. Lai, 1999, "Vibration Analysis Of An Induction Motor", Journal of Sound and Vibration, pp. 733~756