

## 편심 외팔보 구조의 코러패드 재권취기 개발에 관한 연구

김강은\*, 이종호, 신대영(한국생산기술연구원), 이우영(한국기술교육대학교)

### A Study on the Development of a Corrupad Rewinding Machine with Eccentric Cantilever Structure

K. E. Kim, J. H. Lee, D. Y. Shin(Korea Institute of Industrial Technology), W. Y. Lee(KUT)

#### ABSTRACT

This research focused on the development of automatically exclusive production equipment of corrupad as changing manual system into automatic system to increase the output. Therefore the minimization of the problem of the rewinding mechanism with eccentric cantilever structure is key to the achievement of the high performance for automation production. Proto-type corrupad rewinding machine is manufactured after considering the effect of the rotational vibration and natural frequency of the structure of machine by using 3D design packages such as ADAMS and I-deas. For evaluating the performance of the proto-type machine, simulations of dynamic and static characteristics using 3D design packages, a series of modal tests by accelerometer and measurements of dynamic behavior by high-speed camera for rewinding part, were carried out.

As a result, the proto-type machine was not affected with the rotational vibration. Whirling error of eccentric cantilever structure in driving is small. Therefore the machine developed is most suitable to produce corrupad automatically. However reinforcement of the structure in axial direction is required due to so vibration in that direction.

**Key Words** : Corrupad(코러패드), Rewinding machine(재권취기), Cantilever(외팔보)

#### 1. 서론

코러패드(corrupad)는 편면 골판지(single-faced corrugated board)에 접착제를 도포하여 일정 길이만큼 감은 후에 성형 틀에 맞추어 압축 성형하여 만든 적층(積層) 포장 완충재이다. 코러패드는 100% 재생 용지로 만든 골판지를 사용하므로 사용 후에 100% 재활용하거나 소각을 통한 에너지를 생성하거나 또는 매립할 때 매립공간의 최소화가 가능한 환경 친화적 특성을 갖고 있다.

코러패드는 형태에 따라 Fig. 1과 같이 앵글형과 플랫형, 채널형으로 구분하고, 포장 제품의 형태에 따라 기본형과 변형형으로 구분되는데 복사기와 같은 중량품(重量品)으로부터 가구 또는 산업용 오븐과 같은 대형 물품의 포장 완충재로 사용되고 있다.

현재까지 생산현장에서 사용되는 코러패드의 건

용기는 수동식으로 작동됨에 따라 낮은 생산성과 균일하지 못한 품질과 위험한 작업 환경의 문제점들을 안고 있다. 이와 같은 문제점들을 개선하기 위하여 코러패드 생산공정(골판지 원지의 공급, 호부(gluing) 작업, 절단(cutting) 작업, 와인딩(winding) 작업, 이송 작업, 성형(molding) 작업, 코러패드 이탈)을 일원화 및 자동화하는 새로운 시스템의 코러패드 전용기 개발을 목표로 하고 있다.<sup>[1]</sup>

일반적으로 장축의 외팔보 구조는 기구 설계에서 좋지 않은 구조라고 할 수 있다. 특히, 회전체 구조에 적용할 때에는 진동으로 인한 전체 시스템에 악영향을 줄 수 있으므로, 설계시 외팔보 구조는 회피하여 설계하는 경향이 있다. 하지만, 코러패드의 자동화 설계의 경우에는 외팔보 구조가 공정을 단순화하고 단순화 시키는 장점이 있으므로 본 논문에서는 이 구조의 구현을 위한 연구를 수행하였다.

기존의 수동식 방식의 생산에서는 재권취와 포장재의 배출이 인력으로 수행되고 외팔보인 재권취 기구의 구동속도 또한 저속(약60rpm)으로 운행되므로 진동에 대한 영향을 무시할 수 있었다. 그러나 자동화 구동방식에서는 인력을 대체하기 위한 실린더들 즉 부가질량을 부착한 재권취 기구를 고속(180rpm)으로 운행되므로 편심 회전운동이 발생된다.

따라서, 편심 외팔보 구조에서 재권취 기구의 진동에 대한 영향을 고려한 설계가 이루어져야 한다. 이를 위하여 3차원 설계에 의한 전산해석으로 고유진동수 해석과 탄성다물체동역학 해석을 통해 동적 거동을 파악하여 설계의 타당성을 입증하고자 하였고, 시제품을 제작한 후 평가를 위하여 가속도센서와 고속촬영을 통하여 재권취부의 진동특성과 동적 거동을 확인하여 해석된 결과와 최종 설계의 타당성 및 발생 가능한 문제점들을 예측하였다.

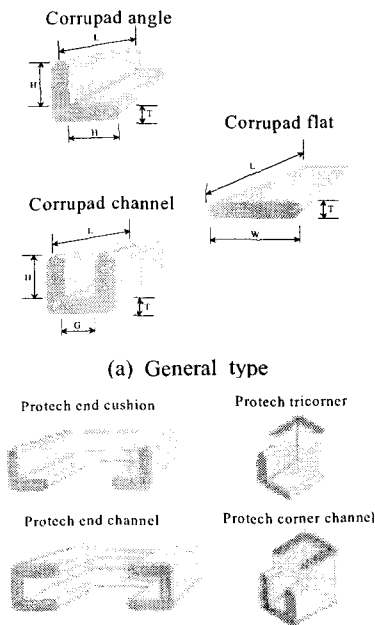


Fig. 1 Corrupad type

## 2. 재권취 기구설계 및 해석

### 2.1 기구설계

재권취 기구(rewinding mechanism)는 골정(flute)에 적당량의 풀이 도포된 골판지를 코러패드 규격에 맞도록 재권취하는 기계이다.

Fig. 2와 같이 축, 멈추기(stopper), 클램프(clamp), 맨드릴(Mandrel)로 구성되는 재권취 기구는 맨드릴의 회전운동과 클램프(clamp)의 직선운동과 멈추기

(stopper)의 직선운동으로 완성된다.

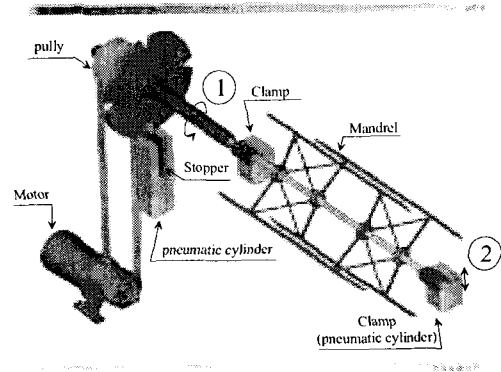


Fig. 2 Rewinding mechanism

재권취 기구는 두루말이의 내경의 조정을 용이하게 하기 위하여 Fig. 3과 같이 확장 맨드릴(expanded mandrel) 구조로 설계하였고 골정에 풀이 젖어있는 상태의 편면 골판지는 재권취 축이 회전함에 따라 4개의 맨드릴을 따라 감겨져 골판지 두루말이를 생성하므로 내부 응력에 대한 강성이 필요하다. [2][3]

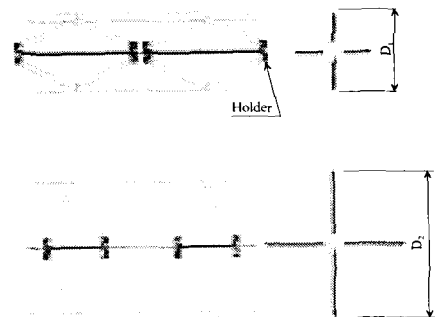


Fig. 3 Expanded mandrel

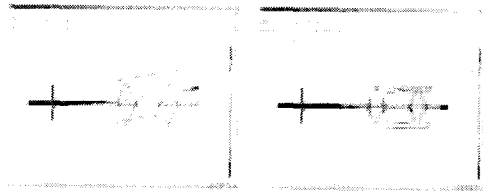
### 2.2 고유진동수 해석

골판지의 재권취(rewinding) 과정에서 골판지는 맨드릴에 감기며, 재권취된 골판지 두루말이의 감김 정도는 재권취 기구의 고유진동 특성에 의하여 영향을 받을 수 있다. 재권취 기구의 고유진동 해석을 통하여 재권취 과정에서 발생 가능한 문제를 예방하고 나아가 문제 발생 시 원인을 파악하고 대처 방안을 제시하고자 한다.

재권취 기구의 고유진동 해석은 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 유한요소 해석에 사용된 프로그램은 SDRC사의 I-DEAS VII Software이다. 해석 방법은 Lanczos법을 이용하여 Normal mode dynamics를 수행하였다.

유한요소 해석시의 element는 linear solid이며, 전

체 요소 수는 7273개이다.



(a) 1st mode shape (b) 2nd mode shape

Fig. 4 Mode shape of rewinding mechanism

Table 1 Result of modal analysis

Mode	1	2	3
Frequency(Hz)	11.2	31.8	39.0

Table 1은 재권취 기구의 고유진동수 해석결과를 나타내었으며 Fig. 4는 재권취 기구의 고유진동수 차수별 모드 형태를 나타내고 있다. 재권취 기구의 구동시 재권취 기구는 항상 3Hz(180rpm)으로 구동한다. 따라서 1차 고유진동수를 10Hz이상으로 설계 목표치를 두었으며, 해석결과 설계 목표치보다 높은 11.2Hz이기 때문에 호부 기구와 재권취 기구의 운전 영역은 재권취 기구의 1차 진동 모드와 떨어져 있어 공진에 의한 영향이 작을 것으로 판단된다. Fig. 4(a)에서 보이는 것처럼 1차 모드는 외팔보의 상·하 방향 운동하며, 가장 취약한 부위이기 때문에 이에 관한 구조 변경 시 외팔보의 강성이나 질량이 매우 중요한 변수로서 활용되어 질 것이다. Fig. 4(b)는 맨드릴의 모드형태를 나타내고 있으나 진동에 큰 영향을 끼치지 못할 것이라고 판단된다.

### 2.3 다물체동역학 해석

재권취 기구의 축은 외팔보 구조의 회전체로 회전시 골관지 원지를 잡아 주기위해 부착된 클램프와 공압실린더의 편심 하중에 의한 영향을 고려한 동역학적 해석을 위하여, 상용 다물체 동역학 해석 프로그램인 ADAMS를 사용하였다. 해석 결과의 분석은 회전 속도의 변화에 따른 외팔보 자유단에서의 동적 거동시 중심위치에서의 벗어난 변위량을 계산하여 경향성을 파악 하고자 하였다.

Fig. 5의 해석 모델은 3차원 CAD 프로그램인 Solidworks를 사용하여 모델링 하였다. 동적 거동에서 중요한 축의 유연체 생성을 위하여 ADAMS/Autoflex를 사용하였으며, 유한요소 모델을 생성하고 나머지 부품은 강체로 유연체 축에 고정하여 맨드릴 내경의 최대크기 위치와 최소크기 위치에

서 회전속도를 바꿔가며 탄성다물체 동역학 해석을 수행하였다.

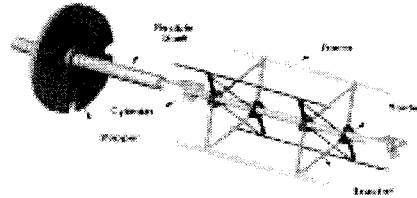


Fig. 5 ADAMS model of rewinding mechanism

시뮬레이션은 정적 평형 상태에서 5초 동안 실행하였고 Step 간격은 0.001초로 설정 후 실행하여 자유단 끝단에 위치한 node에 변위를 X축과 Z축에 대하여 맨드릴 내경의 최소 크기일 때와 최대 크기일 때의 조건에서 실행하였다.<sup>[4][5]</sup>

동적 거동의 Fig. 11의 해석 결과는 맨드릴 끝단이 회전 중심에서 벗어난 정도를 나타내고 있으며, 이에 대한 오차 프로파일은 중심점 회전속도의 변화에도 불구하고 위치가 매우 유사하다. 이 결과 동적 변위 크기는 자중을 고려한 정적 평형 상태에서의 처짐 상태가 유지되는 경향성을 보이고 있다. 이는 회전 속도에 의한 원심력의 영향보다는 유연체에 부착되는 부가 질량이 정적 처짐에 미치는 영향력이 더 큼을 알 수 있다. 그러나 회전속도가 증가함에 따라 변위의 오차변화 폭이 증가됨을 알 수 있었고 맨드릴 내경의 변화에 따른 오차 프로파일의 차이는 크지 않았음을 알 수 있었다.

### 3. 재권취기 평가 및 고찰

코러패드의 핵심공정 부품인 재권취 기구를 중심으로 한 Fig. 6 시제품의 고유진동수 및 동적거동 특성 평가를 수행하였다.

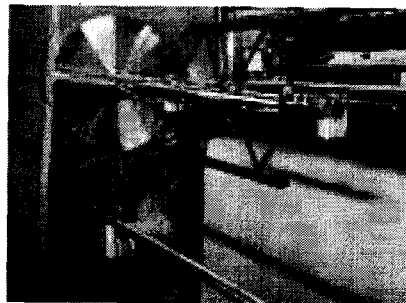


Fig. 6 Proto-type of rewinding machine

### 3.1 진동시험 평가

재권취 기구의 진동 시험 평가를 위한 장비 구성은 Modal Analysis 장비로 LMS사의 Road Runner와 PCB Piezotronics사의 3축 가속도계를 사용하였고 회전속도 측정은 포토센서를 측정된 데이터의 주파수 분석은 LMS Pimento가 사용됐다.

측정 방법은 Fig. 7과 같이 좌우측 4곳에 가속도계를 부착하여 재권취기를 정지상태에서 최대속도까지 구동하여 발생하는 진동을 측정하였다.

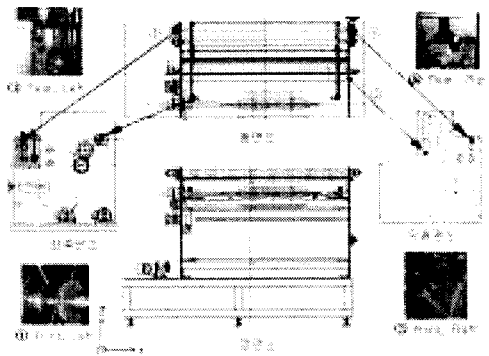


Fig. 7 Measurements position of accelerometer

재권취부에 부착된 가속도계로부터 측정된 데이터는 LMS Pimento를 이용하여 맨드릴의 운전속도 대역별로 진동 특성을 주파수 분석(FFT)하고 각 회전속도 별 주파수 분석된 결과의 평균을(AFFT) 구하여 2차원 형태로 나타냈다.

측정 결과에서 가로축은 재권취기의 고유진동수(Hz)이고 세로축은 맨드릴의 운전속도(rpm)이다. 고유진동수의 분석구간은 최대 100Hz로 설정하였고 맨드릴의 운전속도는 50 ~ 215 rpm으로 설정하였다.

Fig. 8은 맨드릴 회전부의 주파수 분석한 결과로 공진 영역에서 공진 주파수를 보면 10.3Hz와 32Hz 정도로 재권취 기구의 1차 고유진동수(11.2Hz)와 3차 고유진동수(31.8Hz)가 유사함을 알 수 있었다.

진동 특성 해석결과 프레임과 재권취 기구의 운용회전수(180rpm)와 고유진동수(1차 고유진동수 11.2Hz)가 일치하지 않아 공진현상이 발생되지는 않았고, 공진 영역의 공진 주파수는 프레임과 재권취 기구의 고유진동수와 일치하고 있음을 알 수 있었지만 7Hz 부근에서의 공진영역은 호부기구의 운전 영역의 영향으로 보이므로 호부기구의 roll을 지지하는 구조의 보강이 필요하다.

외팔보 형태의 회전 구조의 취약성을 보완하기 위해서는 끝단의 축을 지지하는 베어링과 프레임의 보강이 필요하고 향후 생산성 향상을 위하여 운용

회전수를 증가시에는 재권취 기구의 1차 고유 진동수를 회피하기위한 구조물의 보완이 필요할 것이다.

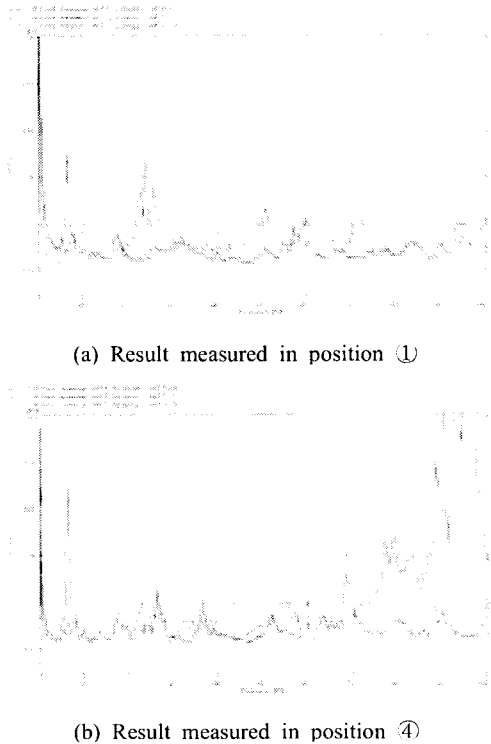


Fig. 8 AFFT analysis

### 3.2 동적거동 평가

촬영에 사용된 제품은 Kodak사의 FC-500C로 500fps에 24bit Color를 실시간으로 촬영할 수 있는 장비이며 재권취기의 축 끝단의 단면에 두 점을 표시하여 측면에서 촬영하였다. 촬영은 정지 상태에서 시작하여 각 회전 속도에서 5초간 512×480 pixel 크기에서 250fps으로 촬영하였고 촬영된 결과는 모션 추적 분석 프로그램인 SAI사의 ImageExpress Vision을 사용하여 Fig. 9의 중심에 표시된 점을 추적하여 재권취기의 동적 거동을 분석하였다.

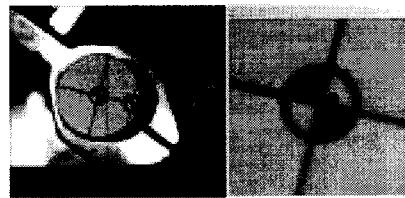


Fig. 9 Captured Image using high-speed camera

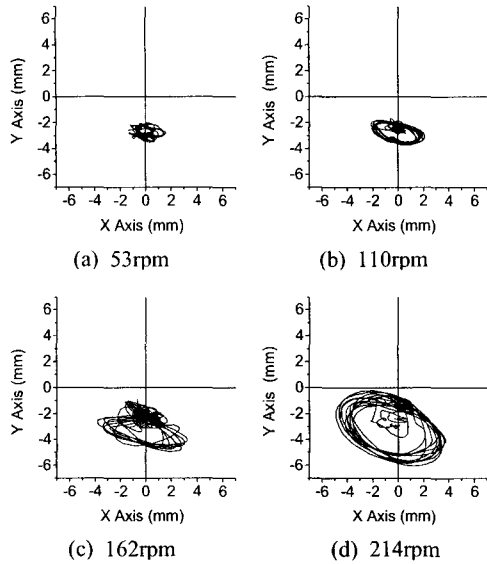


Fig. 10 Analysis of dynamic behavior

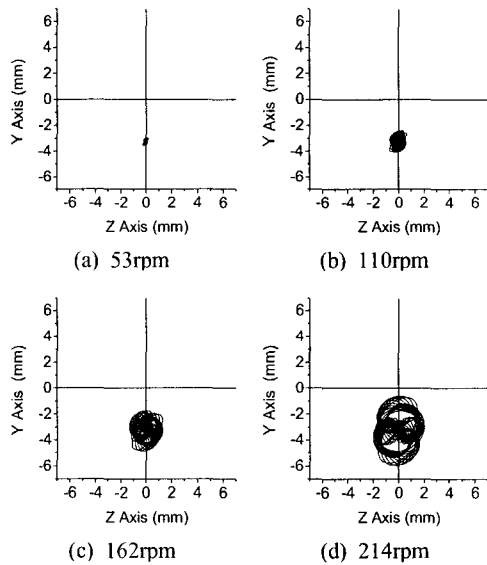


Fig. 11 Results of simulation with ADAMS

Fig. 10은 고속 촬영의 측정된 결과로서, 동일 조건하에서 ADAMS로 해석된 Fig. 11과 비교하여 Y축 방향의 변위 크기는 일치성을 보이고 있으나 Z축 방향의 변위 크기는 고속 촬영 결과가 크게 나타나고 있는데 ADAMS 해석 시에는 모델을 간략화 하여 해석에 적용하였기 때문에 실 제품에서 발생될 수 있는 복합적인 오차 영향들로 인하여 차이가 있을 수 있지만, ADAMS 해석을 통하여 경향성은 파악할 수 있음을 확인 할 수 있었다.

#### 4. 결론

재권취기의 재권취 기구에 대하여 전산해석을 통하여 설계에 반영하고 시제품을 제작하여 진동 특성 측정과 고속촬영을 통하여 자동화 코리패드 설비 개발에 필요한 연구가 수행되었으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 재권취기의 최대구동 회전수는 180rpm(3Hz)으로 고유진동수 해석과 시제품의 진동 특성을 측정 한 결과 공진에 대한 영향은 피하고 있음을 알 수 있었다.

2) 재권취기에서 탄성체인 외팔보 축의 동적거동을 살펴보기 위하여 ADAMS의 다물체 동역학을 이용하였으며, 고속촬영 결과 편심하중에 가진 외팔보 회전시의 동적거동 해석에 매우 유사한 경향을 나타내었다.

3) ADAMS를 통한 동역학 해석과 고속촬영을 통하여 탄성체인 축의 동적 거동을 파악한 결과 재권취기의 최대 구동 회전인 180rpm의 구동시 정적 처짐과 회전시 발생하는 편심하중에 의한 오차측정결과와는 재권취기의 구동상에 큰 영향을 끼치지 않았다.

4) 시제품의 진동 특성 측정 결과 수평방향(X축)의 진동이 크게 나타나는데 이는 지지 구조물이 취약하기 때문으로 보강이 필요함을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

1. A. Howard Bessen, "THE CORRUGATOR", Jelmar Publishing Co., Inc., 1999
2. David R. Roisum, "THE MECHANICS OF WINDING", TAPPI PRESS, 1994
3. James P. Lee, WINDERS, "Paper Machine Dynamic Foundation Design", TAPPI PRESS, 1994
4. 김성수, "회전관성 효과를 고려한 탄성 다물체 동역학에 관한 연구", 한국소음진동공학회지, 제6권 제3호, 1996
5. 김홍건, 나석찬, 조영태, "유한요소법을 이용한 외팔보의 최적설계에 관한 연구", Journal of the for Engineering and Technology Jeonju Univ. Vol 5