

줄봉형 탈곡기의 탈곡장치에 관한 연구⁺
-탈곡과정의 역학적 분석-

A Study on the Threshing Mechanism of
Rasp-Bar Type Thresher⁺
-Dynamic Analysis of Threshing Process-

박금주* 스텐레이 제이 클라크** 수실 브이 드와이어**
K. J. Park* S. J. Clark** S. V. Dwyer**

Summary

Threshing operation is performed by impact, compression and friction forces inside the thresher. These values should be appropriate to the crop condition to enhance the threshing and separating efficiency and to decrease the grain damage.

To analyze the threshing process inside the rasp-bar type thresher, impact, friction and compression forces were measured using transducers with strain gage circuits. To measure the impact forces and friction forces between the rasp-bar and crop, full bridge strain gage circuit was built on the rasp-bar holder. To measure the compression forces and circumferential friction forces between the concave and crop, two sets of full bridge strain gage circuits were built on the T-type concave transducer.

Threshing work of wheat crop with 12% of moisture content was performed at 3 levels of compression ratio and with 3 replications. Each transducer could not measure the exact forces continuously because the transducer oscillates with the forces. However they could measure maximum forces and force distribution according to the time.

Average friction coefficients between crop and concave was 0.61 not showing any significant difference according to the compression ratio.

Average acceleration of the crop in the cylinder appeared from 70.6m/s² to 140.8m/s² according to the compression ratio. The velocity of the crop at the exit of the cylinder appeared from 10.7m/s to 15.0 m/s according to the compression ratio.

+ 본 논문은 1992년도 한국과학재단의 지원을 받아 미국 캔사스 주립대학 농공학과에서 Post-Doc 연수기간 중에 수행된 것임

* 순천대학교 농과대학 농업기계공학과

** 미국 캔사스 주립대학 농공학과

1. 서론

줄봉형(Rasp-bar type) 탈곡기에서 밀, 보리 등의 탈곡작용은 작물이 충격, 압축 및 마찰력을 받으면서 탈곡실을 통과하는 과정에서 이루어진다. 이들의 작용력은 작물의 탈곡성능, 선별성능을 향상시키고 곡물손상의 감소를 위해서는 적절한 값을 유지하여야 한다.

충격력은 작물이 탈곡실 입구에 들어왔을 때 줄봉이 작물을 타격함으로써 발생하는 힘으로서 줄봉의 원주속도에 의하여 영향을 받으며, 압축력은 탈곡실 내의 작물이 탈곡실의 입구로부터 출구쪽으로 진행되는 동안 줄봉과 탈곡망으로부터 받는 반경방향의 수직력이며 줄봉과 탈곡망 사이의 틈새와 공급작물의 두께에 의하여 영향을 받는다. 원주방향으로 작용하는 마찰력은 작물과 줄봉 사이에 작용하는 마찰력, 작물과 탈곡망 사이에서 작용하는 마찰력 및 작물의 내부마찰력으로 구분할 수 있으며, 줄봉의 원주속도, 작물과 줄봉사이의 마찰계수, 작물과 탈곡망사이의 마찰계수 및 작물의 내부마찰계수에 의하여 영향을 받는다.

본 연구는 줄봉형 탈곡기 내에서 탈곡작용이 수행되는 동안의 과정을 역학적으로 해석하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 실험용 줄봉형 탈곡기를 제작하고 탈곡이 진행되는 동안 탈곡실 내에서 작물의 탈곡과정을 역학적으로 분석하였으며 그 구체적인 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 실험용 줄봉형 탈곡기를 제작하였다.
- 2) 탈곡작업중 작물에 작용하는 힘들을 측정하기 위한 변환기를 제작하고 계측시스템을 구성하였다.
- 3) 줄봉 및 탈곡망 변환기의 측정센서를 측도 설정하였다.
- 4) 탈곡작업중 탈곡실 내에서 작물에 작용하는 충격력, 압축력, 마찰력 및 작물의 이동가속도, 출구 속도 등을 측정 분석하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험용 탈곡기의 제작

줄봉형 탈곡기를 제작하였으며 그림 1은 실험용 탈곡기와 계측장비를 나타내주고 있다.

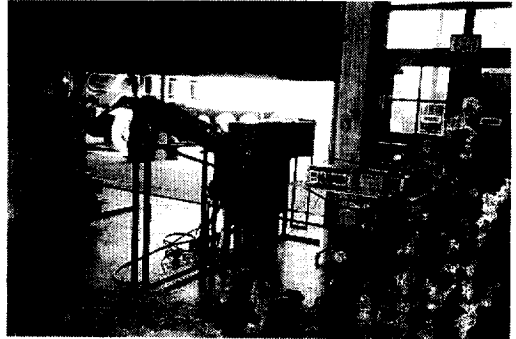


Fig. 1. Rasp-bar type thresher and MDAS data acquisition system.

탈곡기의 탈곡실은 8개의 줄봉이 45° 간격으로 배열된 회전탈곡통(직경 60cm), 탈곡망, 외벽을 형성하는 철판 등으로 구성되었으며, 작물은 서로 반대 방향으로 회전하는 2개의 벨트컨베이어를 통하여 탈곡실 내부로 공급되도록 하였다.

탈곡된 곡물을 선별하기 위한 탈곡망은 탈곡실 주위의 150° 범위에 걸쳐서 설치하였으며, 줄봉과 탈곡망 사이의 간극은 탈곡실 입구측에서는 1cm 가 되도록 하였으며, 점차 간극을 좁혀 출구측에서는 0.5cm로 하여 가능한 한 압축력이 일정하게 유지되도록 하였다.

작물이 벨트컨베이어에 의하여 탈곡실 입구 쪽으로 투입되면 줄봉이 회전하면서 작물에 충격력, 마찰력 및 압축력을 가하면서 작물을 탈곡실 출구 쪽으로 이송시키며, 이 과정에서 탈곡이 수행된다.

나. 변환기의 제작과 측도 설정

탈곡이 진행되는 동안 줄봉과 탈곡망 사이에 있는 작물은 그림 2에서와 같이 원주 방향의 마찰력과 반경 방향의 압축력을 받는다. 원주력 F_s

1는 줄봉이 작물에 가하는 충격력과 줄봉과 작물 사이에 작용하는 마찰력의 합력으로서 작물의 이송을 가속시키며, F_{s2} 는 탈곡망과 작물 사이에서 작용하는 마찰력으로서 작물의 이송에 저항하는 힘이다. 이들의 원주마찰력은 작물을 진행방향으로 가속시킬 뿐만아니라 전단력으로서 작용하여 작물이 그림 2에서와 같이 층을 이루면서 진행하도록 한다.

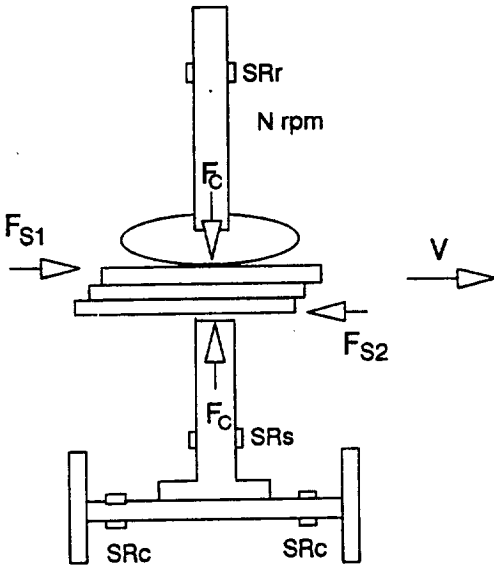


Fig. 2. Friction and compression force inside the thresher.

줄봉과 작물 사이의 원주마찰력은 원주각 45° 간격으로 배열된 8개의 줄봉 중에서 90° 간격으로 4개를 선택하여 줄봉 연결바에 각각 스트레인게이지(SRr)를 부착하여 연결바의 변형량을 측정함으로써 그 값을 구하였다.

탈곡망과 작물 사이의 원주마찰력과 수직 압축력은 T자형 변환기를 제작하여 2조의 스트레인게이지 회로(SRs 및 SRc)를 부착하여 변환기의 힘을 받는 윗부분이 탈곡망과 같은 위치에 와서 탈곡망과 동일한 힘을 받도록 설치하여 그 값을 측정하였다. 그림 2에서 센서 SRs는 원주마찰력을, 센서 SRc는 압축력을 측정하도록 제작하였다. 탈곡망 변환기는 탈곡실의 입구에서

출구까지 원주각 50° 의 간격으로 4개 설치하였다.

이들 각각의 변환기의 축도설정은 만능재료시험기를 이용하여 원주방향(마찰력), 반경방향(수직 압축력)의 방향으로 하중을 단계별로 증가 및 감소시키면서 수행하였으며, 센서회로의 출력은 데이터 수집장치 MDAS 7200를 통하여 개인용 컴퓨터에 입력하였다.

다. 탈곡작업중 원주 마찰력과 압축력의 측정

탈곡작업은 무부하시 탈곡통의 회전속도 1040rpm이 되도록 설정하고, 작물의길이 50 cm 되는 밀을 이용하여 수행하였다. 작물은 벨트컨베이어를 통하여 2m/s의 속도로 탈곡실 입구쪽으로 공급하였다. 수분함량 12%의 작물을 공급 두께 5cm, 10cm, 15cm의 3수준으로 3반복 작업하였다. 작물의 공급두께는 작물을 압축시키지 않고 가지런히 놓은 상태에서 측정된 높이이고, 탈곡실 입구에서 탈곡실 간극이 1cm이므로 공급두께 5cm, 10cm, 15cm는 각각 5 : 1, 10 : 1, 15 : 1의 압축비를 나타내고 있다.

탈곡이 진행되는 동안 원주 마찰력은 줄봉과 작물 사이의 마찰력, 그리고 탈곡망과 작물 사이의 마찰력으로 구분하여 측정하였다. 그러나 줄봉과 작물 사이의 마찰력은 충격력과 함께 작용하기 때문에 순수한 마찰력을 분리하여 측정할 수는 없었다. 줄봉과 작물 사이의 마찰력과 충격력은 줄봉 변환기를 통하여, 탈곡망과 작물 사이의 마찰력은 탈곡망 변환기를 통하여 측정하였다. 압축력은 작물이 반경방향으로 받는 힘으로서 탈곡망 변환기를 통하여 측정하였다.

탈곡실 내에서의 작물의 평균이송속도 및 이송가속도는 입구측과 출구측의 탈곡망 변환기의 신호를 이용하여 구하였다.

센서회로의 출력은 데이터 수집장치 MDAS 7200를 통하여 개인용 컴퓨터에 입력하였다. 데이터의 수집을 위한 프로그램은 MDAS 명령어와 BASIC 컴퓨터 언어를 이용하여 구성하였다. 데이터의 수집은 초당 15000개의 속도로 수집하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 변환기의 측도설정

1) 줄봉 변환기의 측도설정 결과

그림 3은 4개의 줄봉 변환기 중에서 하나에 대한 측도설정 결과를 나타내주고 있다. $R=0.999$ 이상의 선형 비례의 관계를 보여주고 있으며 히스테리시스 효과도 거의 없는 것으로 나타났다. 나머지 3개의 줄봉 변환기도 모두 거의 비슷한 결과를 나타내었다. 표 1은 4개의 줄봉 변환기의 측도설정 결과 센서의 디지털 출력값(DV)과 원주력(F, Newton)과의 관계식을 나타내주고 있다.

2) 탈곡망 변환기의 측도설정 결과

탈곡망 변환기는 그림 4에서와 같이 원주방향 마찰력 측정을 위해서 SRs 스트레인 게이지 회로, 압축력 측정을 위해서 SRC 스트레인게이지 회로를 부착하였다.

Table 1. Relations between digital output of rasp-bar transducer and circumferential force.

| Transducer | Regression equation | R ² |
|------------|---------------------|----------------|
| No. 1 | $F=0.841 * DV$ | 0.999 |
| No. 2 | $F=0.845 * DV$ | 0.999 |
| No. 3 | $F=0.850 * DV$ | 0.999 |
| No. 4 | $F=0.842 * DV$ | 0.999 |

그림 5와 6은 4개의 탈곡망 변환기 중에서 1번 탈곡망 변환기의 측도설정 결과를 나타낸 것이다. 그림 5는 변환기에 순수한 원주력을 가하였을 때에 원주력 센서(SRs) 및 압축력 센서(SRC)의 디지털 출력을 나타낸 것이다. 원주력은 원주력 센서(SRs)에 큰 신호를 발생시켰지만 압축력 센서(SRC)에도 약간의 신호를 발생시키는 것으로 나타났다. 그림 6은 변환기에 순수한 압축력을 가하였을 때에 SRC 와 SRs의 디지털 출력을 나타낸 것이다. 압축력도 압축력 센서에 큰 신호

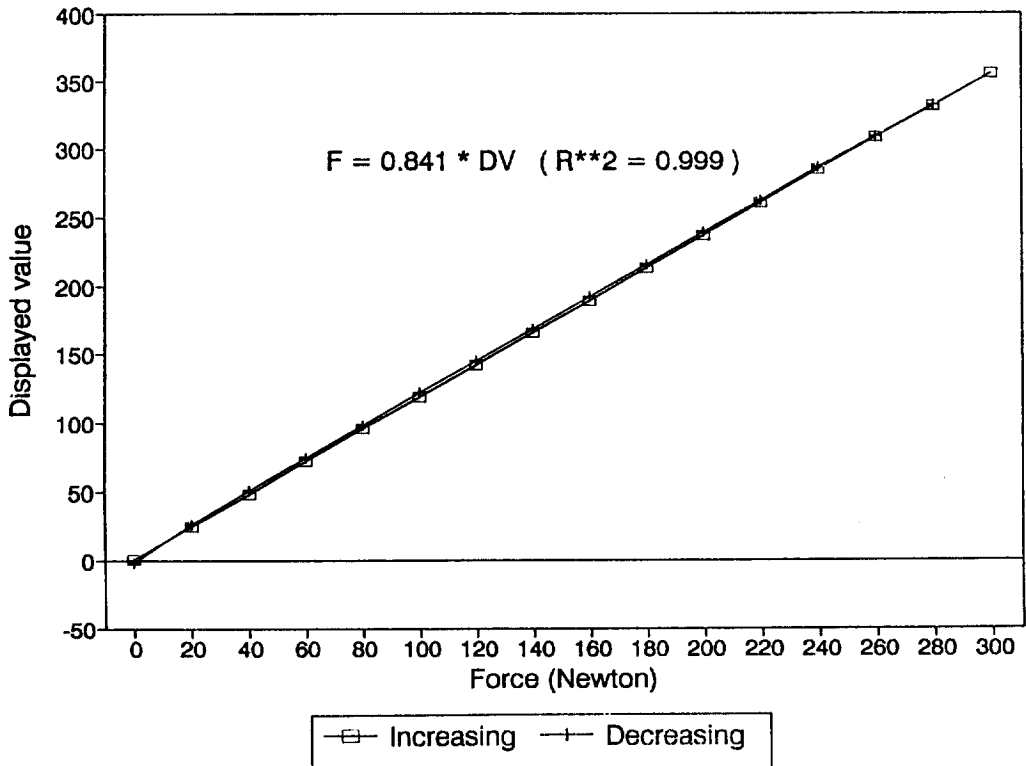


Fig. 3. Results of calibration of the rasp-bar transducer.

를 발생시켰지만 원주력 센서에도 약간의 신호를 발생시키는 것으로 나타났다. 이와 같은 현상은 나머지 3개의 변환기의 경우에도 비슷하게 나타났다.

이와 같은 상호 간섭효과는 T 자형 변환기의 제작상의 정밀성 부족에 의하여 나타나는 것으로 판단되었다. 즉 T 자가 정확히 직각을 이루고 스트레인게이지를 정확한 위치에 부착하면 이 간섭효과는 피할 수 있다.

실제의 탈곡실 내에서는 원주력과 압축력의 합력이 작용하므로 이와 같은 일반각의 힘이 작용할 경우에 이 힘의 순수한 원주력 및 압축력 성분은 2개의 센서회로의 출력에 중첩의 원리를 적용하여 구하였다. 즉, 탈곡망 변환기의 측도설정 결과와 일반각의 힘이 작용하였을 때의 센서회로의 출력값을 이용하여 2원 1차 연립방정식

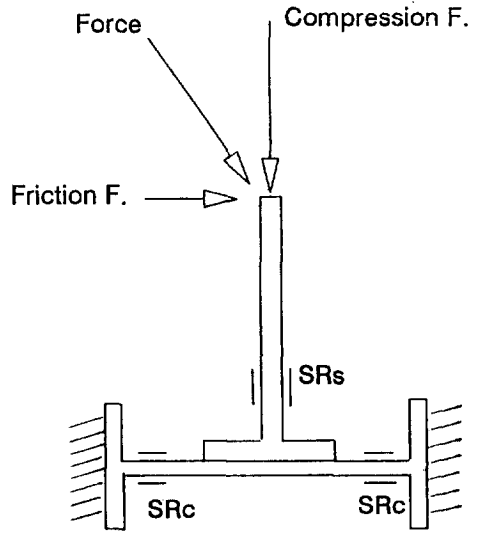


Fig. 4. Concave transducer for measuring friction and compression force inside the threshers.

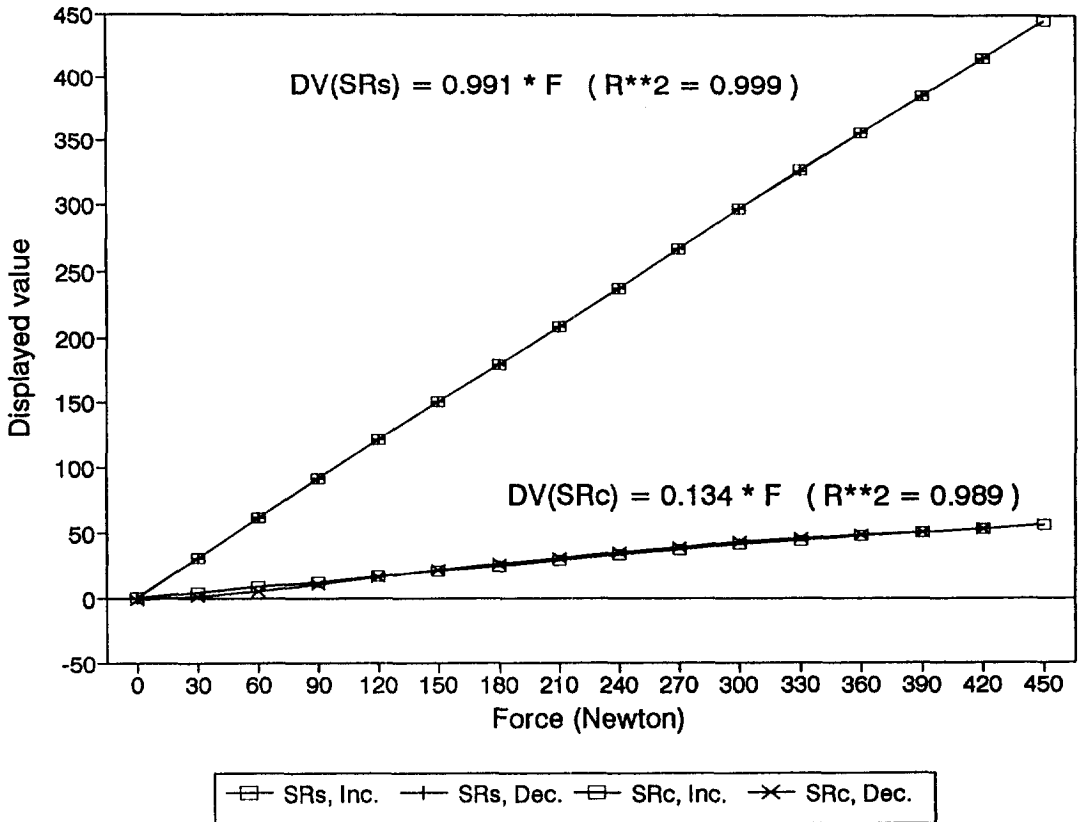


Fig. 5. Results of calibration of the concave transducer with circumferential friction force.

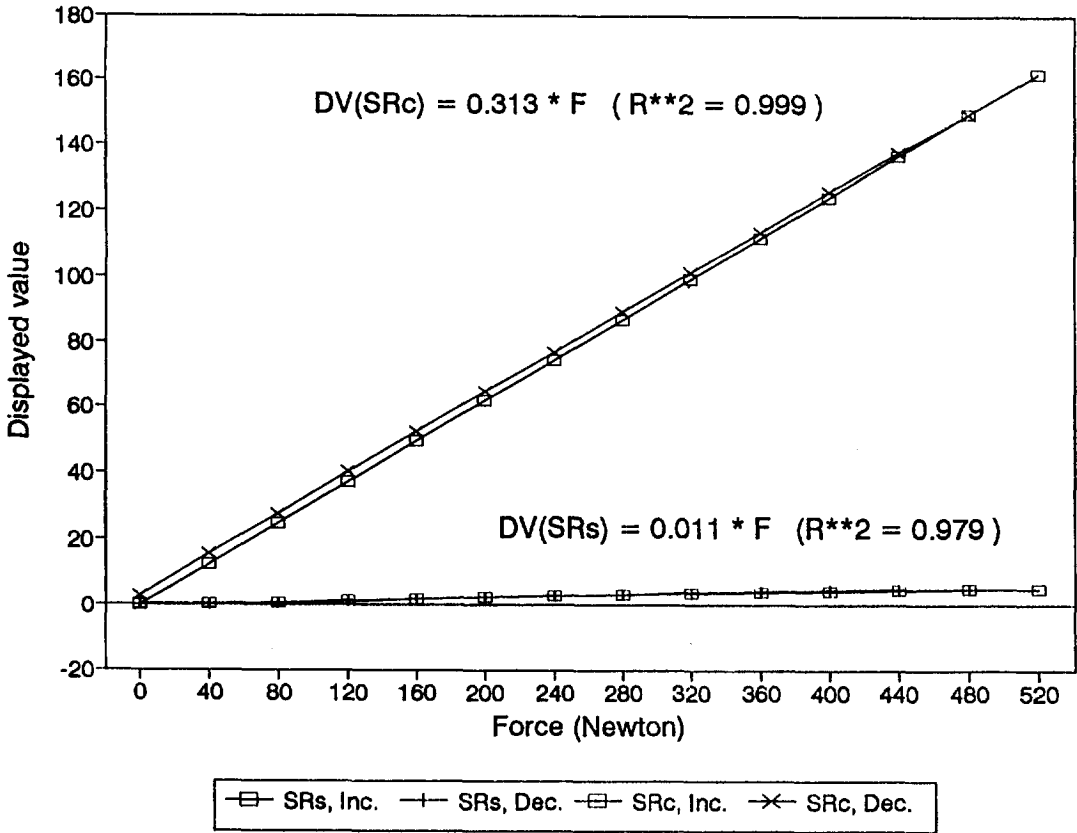


Fig. 6. Results of calibration of the concave transducer with compression force.

을 다음과 같이 유도하고 그 해를 구하여 원주력과 압축력 성분의 값을 예측하였다.

$$A11 * F_s + A12 * F_c = b1$$

$$A21 * F_s + A22 * F_c = b2$$

여기서,

F_s : 원주력 성분

F_c : 압축력 성분

$A11$: 순수 원주력에 의한 센서 SR_s 의 측도 설정 비례상수

$A21$: 순수 원주력에 의한 센서 SR_c 의 측도 설정 비례상수

$A12$: 순수 압축력에 의한 센서 SR_s 의 측도 설정 비례상수

$A22$: 순수 압축력에 의한 센서 SR_c 의 측도 설정 비례상수

$b1$: 일반각의 힘이 작용할 때 센서 SR_s 의 디지털 출력값

$b2$: 일반각의 힘이 작용할 때 센서 SR_c 의 디지털 출력값

4개의 탈곡망 변환기에 대한 측도설정 비례상수의 값과 R^2 의 값을 표 2에 나타내었다.

나. 탈곡실 내에서 작물운동의 역학적 분석

1) 줄봉과 작물 사이의 충격력과 원주마찰력

Table 2. Slope of regression equation and R^2 from the calibration results of concave transducer.

| Transducer | A11 (R^2) | A21 (R^2) | A12 (R^2) | A22 (R^2) |
|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| No. 1 | 0.991(0.999) | 0.134(0.989) | 0.011(0.979) | 0.313(0.999) |
| No. 2 | 1.073(0.999) | -0.015(0.984) | -0.012(0.969) | 0.298(0.999) |
| No. 3 | 1.130(0.999) | 0.054(0.901) | 0.008(0.011) | 0.308(0.999) |
| No. 4 | 1.129(0.999) | 0.010(0.836) | 0.008(0.684) | 0.308(0.999) |

줄봉이 작물에 가하는 원주방향의 힘은 충격력과 마찰력의 합성력이 작용하며 이 힘은 줄봉 변환기를 통하여 측정하였다. 그림 7은 압축비 15:1의 작업조건에서 4개의 줄봉 변환기중 임의의 하나로부터 출력한 결과를 나타내주고 있다. 그림에서 가로축은 샘플링을 시작한 이후의 경과시간을 나타낸다.

그림에서와 같이 (-)방향의 힘이 나타난 것은 작물이 변환기를 타격함에 따라 변환기가 회전축을 중심으로 좌우 진동하는 결과를 나타냈

다. 이것은 실제로 작물이 반대 방향으로 힘을 가하는 것을 의미하는 것은 아니라고 생각하며, 변환기가 순간적으로 타격을 받아 감쇠 자유진동을 하는 것으로 볼 수 있다. 이러한 사실은 실험 전에 충분히 예기치 못했던 것으로서 본 실험장치로서는 순간순간의 힘을 정확하게 측정할 수 없으나 줄봉이 1회전 마다 작물에 가하는 최대치의 힘은 측정할 수 있었다. 즉 줄봉이 탈곡실 입구쪽에서 작물을 타격할 때 큰 변형이 나타나고 잠시 감쇠 자유진동을 하다가 줄봉이 1회전

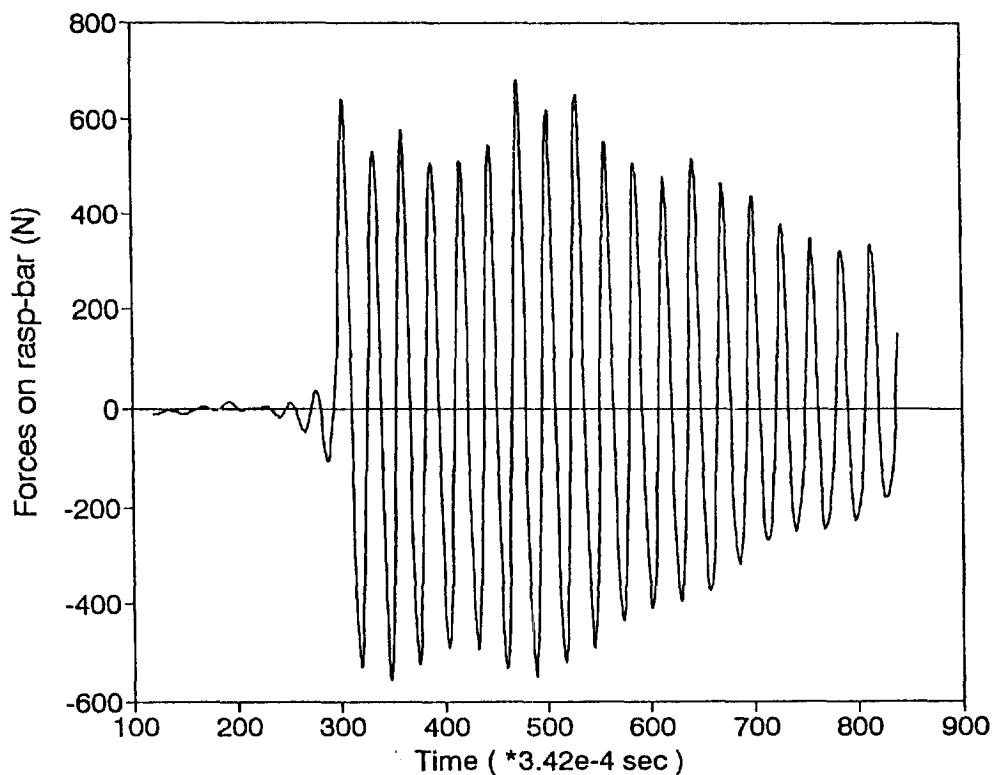


Fig. 7. Resultants of impact and friction forces on the crop from the rasp-bar during threshing operation.

하여 작물을 타격하면 다시 큰 변형을 나타내고 있다. 나머지 3개의 변환기도 거의 유사한 현상을 나타내었다.

2) 작물의 압축력과 탈곡망과 작물 사이의 원주마찰력

작물의 반경방향 압축력과 탈곡망과 작물사이의 원주방향 마찰력은 탈곡실을 원주방향으로 50°의 간격으로 나누어 4 곳의 지역에 설치한 탈곡망 변환기를 통하여 측정하였다.

그림 8은 압축비 15 : 1의 작업조건에서 탈곡실 입구쪽에 설치한 탈곡망 변환기로부터 출력한 압축력이고, 그림 9는 동일 조건에서 출력한 원주마찰력을 나타내주고 있다. 그림에서와 같이 탈곡망 변환기도 작물에 의하여 힘을 받았을 때 감쇠 자유진동을 하는 것으로 나타났다.

작물과 탈곡망 사이의 마찰계수는 압축력에 대한 원주마찰력의 비율로서 정의할 수 있으나 작용력이 시시각각 변화하기 때문에 여기서는 탈곡실 입구측에서 최대 압축력과 최대 원주마찰력 값으로부터 구하였다. 표 3은 작물의 압축비별로 최대 압축력, 최대 원주마찰력과 마찰계수를 나타내주고 있다. 마찰계수는 평균 0.61의 값으로 나타났으며, 압축비 10 : 1에서 0.69로 가장 크게 나타났으나 다른 값과의 사이에 유의차는 없었다.

3) 작물의 이송 가속도 및 출구 속도

작물이 탈곡실에 들어왔을 때 회전하는 줄봉의 타격을 받아 작물이 입구로부터 출구쪽으로 이동하면서 4개의 탈곡망 변환기에 타격을 가한다. 그림 10은 압축비 15 : 1의 작업조건에서 탈

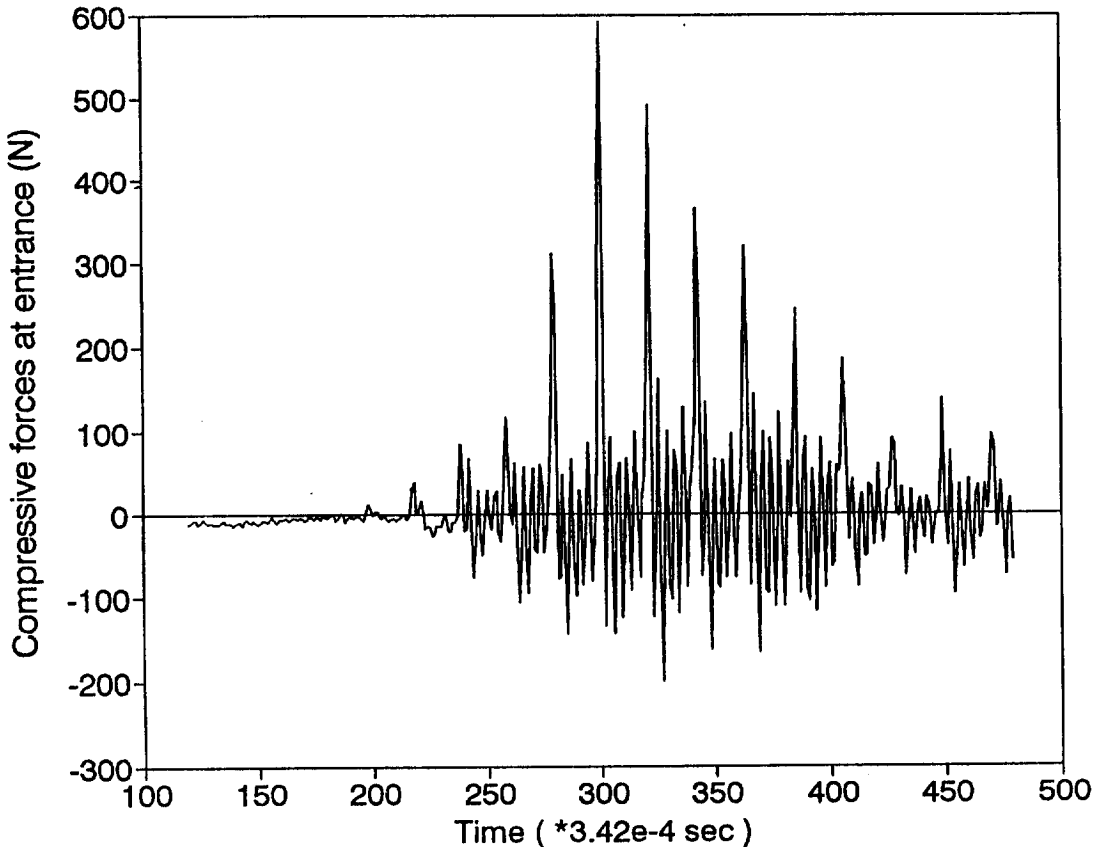


Fig. 8. Compression forces on the crop at the entrance of threshing room while threshing operation with compression ratio of 15 : 1.

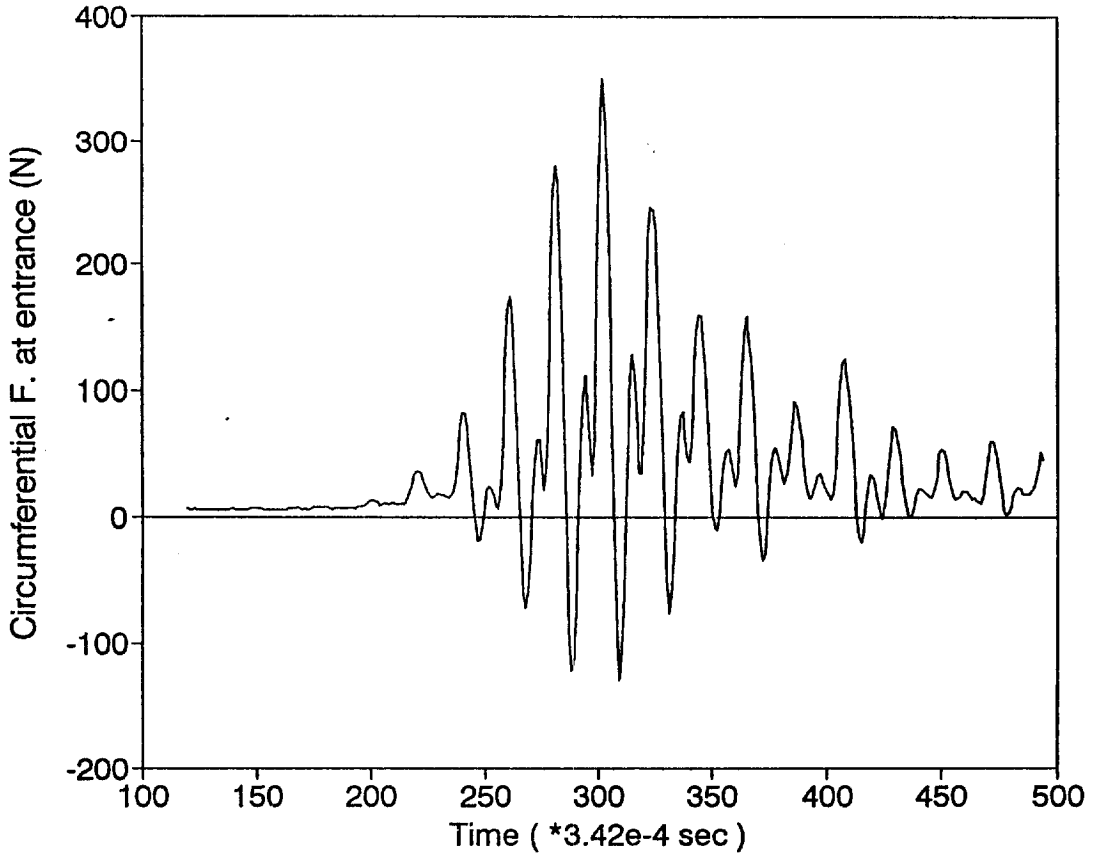


Fig. 9. Friction forces between the concave and the crop at the entrance of threshing room while threshing operation with compression ratio of 15 : 1.

Table 3. Friction coefficients between wheat and concave of experimental thresher at various compression ratio

| Compression ratio | Compression force (Newton) | Circumferential force(Newton) | Friction coefficient |
|-------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------|
| 5 : 1 | 56 | 29 | 0.52 |
| 10 : 1 | 173 | 120 | 0.69 |
| 15 : 1 | 372 | 233 | 0.63 |

곡실 입구와 출구측의 탈곡망 변환기로부터 출력한 원주마찰력을 나타내주고 있다. 탈곡실 입구측과 출구측의 변환기에 가장 큰 힘이 작용할 때의 시간 간격을 이용하여 탈곡실내의 평균가속도(a_w), 출구측 속도(v)를 다음 식과 같이 구하였다.

$$a_w = (s - v_o \cdot t) / (0.5 t^2)$$

$$v = v_o + a_w \cdot t$$

여기서,

s : 콘케이브 원주길이(0.785m)

v_o : 탈곡실 입구에서의 공급속도(2m/s)

t : 탈곡실 통과 시간

Table 4. Average acceleration of crop and exit velocity in the cylinder at various compression ratio

| Compression ratio | Average acceleration(m/s ²) | Exit velocity(m/s) |
|-------------------|---|--------------------|
| 5 : 1 | 70.6 | 10.7 |
| 10 : 1 | 98.1 | 12.6 |
| 15 : 1 | 140.8 | 15.0 |

표 4는 작물의 압축비별로 작물의 평균가속도 및 출구속 속도를 나타내주고 있다. 표에서와 같이 압축비가 증가할수록 가속도 및 출구속 속도가 증가한 것은 압축력이 증가함에 따라 줄봉과 작물사이에 원주마찰력이 증가하여 이동하는 동안 슬립이 적어지기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결론

줄봉형 탈곡기 내에서 탈곡이 진행되는 동안

탈곡과정을 역학적으로 분석하기 위하여 탈곡실 내에서 작물에 작용하는 충격력, 마찰력 및 압축력을 측정하기 위한 변환기를 제작하고 계측시스템을 구성하여 각각의 값을 측정하였다. 또한 이의 측정결과를 이용하여 탈곡실 내에서 작물과 탈곡망 사이의 마찰계수, 작물의 평균가속도 및 출구속도를 구하였다.

줄봉이 작물에 작용하는 원주방향 충격력과 마찰력을 측정하기 위하여 4개의 줄봉연결부에 각각 스트레인 게이지 센서회로를 구성하여 탈

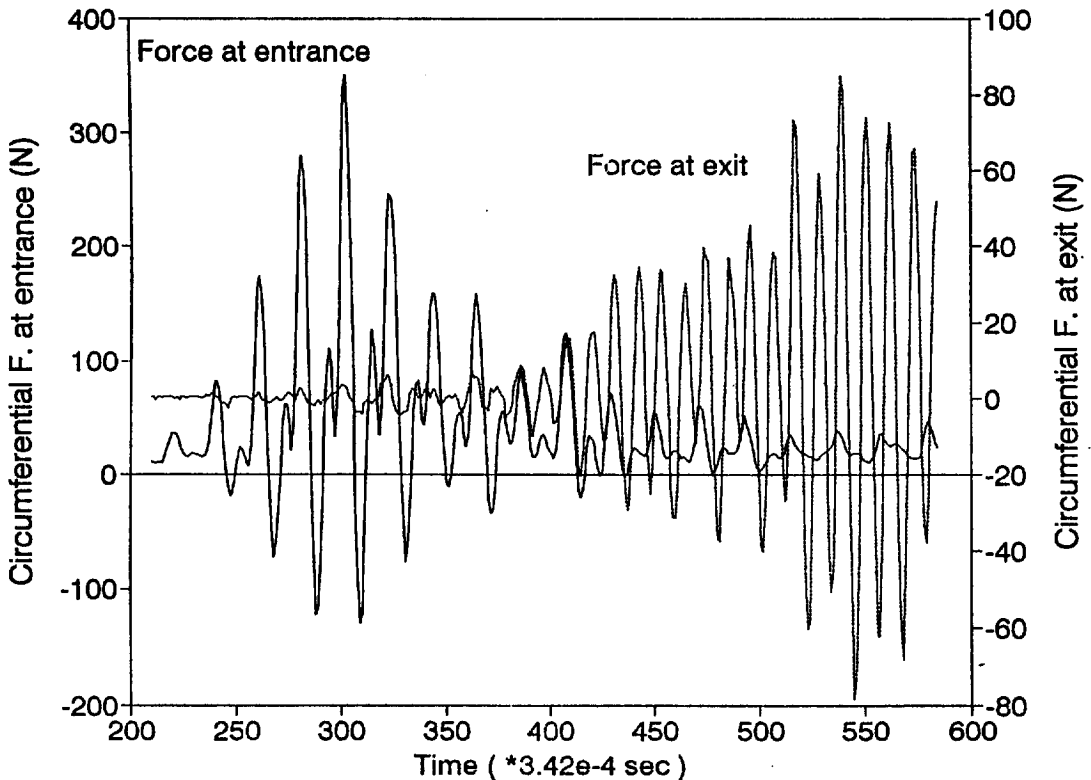


Fig. 10. Friction forces between the concave and the crop at the entrance and the exit of the threshing room while threshing operation with compression ratio of 15 : 1.

곡통 원주각 90°의 간격으로 설치하였다.

탈곡망과 작물 사이에 작용하는 마찰력과 압축력을 동시에 측정하기 위하여 1개의 T자형 구조물에 2조의 스트레인 게이지 센서회로를 부착한 변환기를 4개 제작하였으며, 이들을 탈곡망면에 원주각 50°의 간격으로 설치하였다.

이들 변환기의 측도설정 결과와 탈곡작업시 작물에 작용하는 각 방향의 힘의 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 줄봉 변환기와 탈곡망 변환기의 측도설정을 하기 위하여 만능재료시험기를 사용하여 힘을 단계별로 가하였으며, 스트레인 게이지 센서회로의 출력은 데이터 수집장치를 통하여 컴퓨터에 입력하였다. 줄봉 변환기의 측도설정 결과는 $R^2=0.999$ 의 선형 직선으로 나타났다.

2) 탈곡망 변환기의 측도설정은 변환기에 원주력 및 압축력을 각각 가하여 스트레인 게이지 센서회로의 출력을 얻었다. 탈곡망 변환기에 작용하는 힘의 원주력과 압축력 성분은 변환기의 출력과 측도설정 결과를 이용하여 연립방정식을 유도하고 그 해를 구하여 각 성분의 값을 산출하였다.

3) 탈곡작업시 줄봉변환기와 탈곡망변환기를 통하여 충격력, 원주방향 마찰력, 압축력을 측정하였으나 변환기가 가지고 있는 탄성의 특성 때문에 순간 순간의 정확한 하중을 측정할 수는 없었으나 최대 작용력 및 시간에 따른 하중의 분포상태 등을 측정할 수 있었다.

4) 탈곡실 입구측에서 탈곡망과 작물 사이의 마찰계수는 0.61의 값을 갖는 것으로 나타났다.

5) 탈곡실 내에서 작물의 평균 이송가속도는

70.6~140.8m/s²이고 출구측의 속도는 10.7~15.0m/s이었으며, 압축비가 클수록 속도와 가속도가 증가하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. 정창주. 1992. 농작업기계의 분석과 설계 : p 187-244. 서울대학교 출판부
2. Arnold, R.E. 1964. Experiments with rasp-bar threshing drums. I : Some factors affecting performance. Journal of Agricultural Engineering Research. 9(2) : 99-131.
3. Arnold, R.E. 1964. Experiments with rasp-American Society of Agricultural Engineers bar threshing drums.
II : Comparison of open and closed concave. Journal of Agricultural Engineering Research. 9(3) : 250-251.
4. Arnold, R.E. 1964. Experiments with rasp-bar threshing drums.
III : Power requirements. Journal of Agricultural Engineering Research. 9(4) : 348-355.
5. Dwyer, S.V., S.J. Clark, et al. 1991. Bi-rotor thresher : A new concept.
paper 91-1609.
6. Dwyer, S.V. and S.J. Clark. 1992. Wheat threshing from compaction.
American Society of Agricultural Engineers paper 92-1010.
7. Kanafojski, Cz. and T. Karwowski.1976. Agricultural Machines, Theory and Construction Vol.2 Crop-Harvesting Machines : p255-299.