

장력신호의 주파수 해석을 이용한 롤 형상 이상 진단에 관한 연구

신기현*

A Study on the Fault Diagnosis of Roller-Shape Using Frequency-Domain Analysis of Tension Signals

Kee-Hyun Shin*

ABSTRACT

Rollers and rolls in the continuous process systems are ones of key components that determine the quality of web products. The condition of rollers and rolls (ex. eccentricity wear) should be consistently monitored in order to maintain the process conditions (ex. tension, edge position) within a required specification. In this paper, a new diagnosis technique is suggested to detect the defect of rollers / rolls (ex. eccentricity, wear) based on frequency domain analysis of web tension signal. The kernel of this technique is to use the spectrum amplitude of tension signal which allows to identify the fault rollers / rolls and to also diagnose the degree of fault in corresponding rollers and rolls. The experimental results proved that the suggested diagnosis technique can be successfully used to identify the defect rollers and rolls as well as to diagnose the degree of the defect of those rollers. The suggested technique can be applied to monitor and diagnose the shape of rollers and rolls in various multi-span web transport systems.

Key Words : Fault Diagnosis(이상진단), Tension (장력), Roll / Roller (롤/롤러), Spectrum Amplitude (스펙트럼 크기), Continuous Process System (연속공정시스템)

기호설명

E_c : 편심량
 T_i : i 번째 스패에서의 장력변화
 V_i : i 번째 스패에서의 소재의 속도변화
 v_{oi} : i 번째 스패에서의 소재의 운용속도
 L : 소재의 길이
 A : 소재의 단면적
 E : 탄성계수(Young's modulus)
 t_1 : Fig. 3 의 5 번 롤에서 측정된 소재의 장력
 t_2 : Fig. 3 의 7 번 롤에서 측정된 소재의 장력

$T_{v/max}$: 최대 장력변화량
 R : 롤(Roller)의 반경
 v : 소재의 이송속도
 f : 주파수(Frequency)
 P_f : 스펙트럼 크기

1. 서론

연속공정시스템(Continuous Process System)은 Fig. 1 와 같이 일반적으로 여러 개의 롤러나 롤이 장력이 걸려있는 금속, 필름, 제지, 섬유 등의 박판 소재(웹(web) 이라 부름)에 의하여 탄성

* 건국대학교 기계설계학과

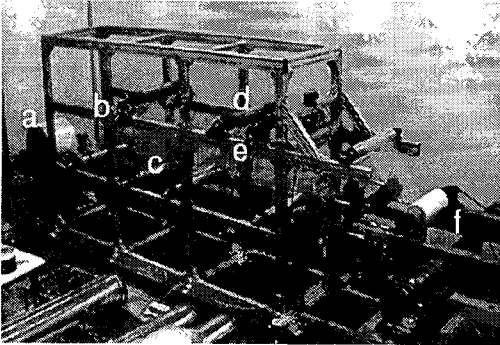


Fig. 1 Continuous process system test bed
 (a : Winder roll, b : Load cell, c : Idle roller,
 d : Driven roller, e : Load cell, f : Unwinder roll)

영역에서 상호 연결되어(Elastically coupled) 있다. 편심도, 마모 정도 등 롤러의 상태는 이송 혹은 가공되는 웹 제품에 가장 직접적이고 민감하게 영향을 미치게 된다. 또한 롤의 상태는 웹의 장력, 축방향 운동 등에 직접적으로 영향을 미치게 되므로 코팅(Coating), 프린팅(Printing), 슬리팅(Slitting) 등의 공정조건 변화에도 지대한 영향을 주게 된다. 그러므로 롤의 상태에 대한 감시, 이상진단 및 이에 대한 대처는 연속공정시스템의 운용, 유지보수에 매우 중요하다고 하겠다. 현재까지 연속 공정 시스템에서 롤의 이상(마모, 편심)진단에 대한 연구결과가 보고된 바는 없으며, 주로 롤을 지지하는 각종 베어링(Bearing)의 이상진단에 대한 연구가 진행되고 있고, 그 결과가 실제 산업현장에 적용되어 왔다. 베어링에 대한 이상진단방법과 그 대표적 적용사례는 다음과 같다.

1. 모터(Motor)로 구동되는 기계시스템에서 주파수 영역에서의 신호분석을 이용한 베어링(Bearing)의 이상진단. [1], [5]
2. 파워 스펙트럼(Power Spectrum)분석에 의한 회전기계요소들의 결함탐지. [4]

본 연구에서는 소재 장력신호에 대한 스펙트럼 해석(Spectrum analysis)을 통하여 연속공정시스템에서 소재를 이송시키는데 사용되는 롤의 형상이상(예 : 마모에 의한 편심) 검출 및 이상의 정도를 진단하는 새로운 기법을 제안하였다. 제안된 기법을 시뮬레이터에 적용하여 편심된 롤 및 롤러를

정확히 찾아내고, 그 편심의 정도를 진단해 낼 수 있음을 실험적으로 확인하였다.

2. 롤(Roller)의 이상진단 이론

웹(Web)과 롤 사이에 미끄러짐(Slip)이 없는 경우, 롤의 운동은 웹의 장력에 직접적인 영향을 미치게 된다. 롤은 제작할 때부터 편심도, 표면의 거칠기 등에 결함이 있을 수도 있다. 또한 장기간 사용된 롤은 부분적으로 마모되어 그 형상이 변화될 수 있고, 이 변화된 롤의 형상은 소재의 장력 변화에 직접적으로 반영된다. 이러한 롤의 변형은 롤의 회전운동으로 인하여 롤에 의하여 이송되는 소재의 장력변화에 일정한 주파수 성분으로 나타난다.

본 연구에서는 장력(Tension) 신호의 주파수 특성을 해석하여 롤의 이상에 따른 주파수를 분리해냄으로써 연속공정시스템에서 사용되고 있는 마모나 편심을 갖는 롤을 찾아내고, 장력에 대한 스펙트럼(Spectrum)을 계산함으로써 해당 주파수에서의 신호의 크기(Spectrum amplitude)를 이용하여 롤의 이상의 크기(편심이나 마모의 정도)를 진단하고자 한다.

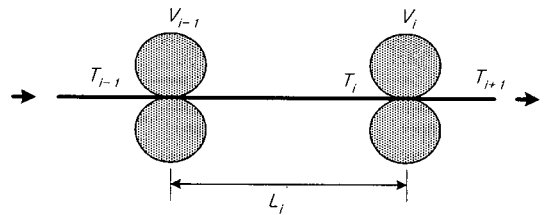


Fig. 2 A single-span web transport system

Fig. 2 과 같은 단일 스펙 연속공정시스템에서 롤 사이를 지나는 소재의 장력에 대한 선형화된 동적모델은 다음과 같다. [9]

$$\frac{d}{dt}[T_i] = -\frac{v_{oi}}{L_i} T_i + \frac{v_{oi-1}}{L_i} T_{i-1} + \frac{A_i E_i}{L_i} (v_i - v_{i-1}) \quad (1)$$

(1)식에서 보는 바와 같이 소재의 장력(T_i)은 롤의 선속도의 변화량(V_i)에 큰 영향을 받고, 롤의 선속도는 롤의 형상에 영향을 받는다. 따라서 (1)식에서 소재의 장력 T_i 에 대한 스펙트럼을 구하

여 주파수 영역에서의 장력 특성을 분석하여 롤의 이상진단에 활용하였다.

2.1 스펙트럼 분석(Spectrum analysis)

스펙트럼 분석이란 어떠한 신호에 포함되어 있는 주파수 성분의 분포를 구하고 그 신호가 가지고 있는 주파수와 신호의 크기나 위상과의 관계를 이용하여 주파수 대역에서의 신호 특성을 분석하는 것을 말하며 스펙트럼의 정의는 다음과 같다.^[6]

$$V(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} T_i(t)e^{-j\omega t} dt = R(\omega) + jX(\omega) \quad (2)$$

2.2 스펙트럼 크기(Spectrum amplitude)

스펙트럼 크기란 주파수 대역에서 임의의 신호에 대하여 특정 주파수에 대한 신호의 크기를 말하는 것으로 다음과 같이 정의된다.^{[6],[7]}

$$A(\omega) = \sqrt{R^2(\omega) + X^2(\omega)} \quad (3)$$

본 연구에서는 연속시간에서의 (2), (3)식과 같은 계산과정을 샘플링(Sampling)된 장력값에 대하여 이산시간에서 계산하기 위하여 (4)식과 같은 고속 푸리에 변환(Fast fourier transform)을 이용하였다.^[6]

$$F(k) = \sum_{n=0}^{(N/2)-1} T_i(2n)W_{N/2}^{nk} + W_N^{nk} \sum_{n=0}^{(N/2)-1} T_i(2n+1)W_{N/2}^{nk} \\ = R(\omega) + jX(\omega)$$

여기서, $k=0, 1, 2, \dots, N-1$, $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ (4)

$$\omega = 2\pi k / NT$$

(2)식에서의 $T_i(t)$ 는 소재의 장력값이고, (4)식에 적용하기 위하여 이산시간에서의 장력값 $T_i(2n)$ 으로 바뀌어 고속 푸리에 변환에 의해 특정 주파수와 이에 대한 스펙트럼 크기 $A(\omega)$ 로 나타난다.

따라서 소재가 이송되고 있을 때의 장력에 대한 스펙트럼을 구하고, 특정 주파수 및 크기의 특성을 분석함으로써 연속공정시스템에서 롤의 이상유

무와 그 정도 그리고 롤의 편심이 장력의 변화에 미치는 영향을 규명하였다.

3. 실험장치의 구성 및 실험내용

3.1 실험장치의 구성

장력에 대한 주파수영역에서의 이상진단 기법의 적용가능 여부를 실험적으로 증명하기 위하여 실제 연속공정시스템을 제작하였으며, Fig.1 과 같이 제작된 시스템에는 소재를 이송하기 위한 감김롤(Winder roll), 구동롤(Driven roller) 및 풀림롤(Unwinder roll)의 구동을 위하여 3 개의 AC 모터(Siemens)가 장착되어 있다. 이 시스템은 장력 및 소재의 이송 속도 측정이 가능하고, 소재의 이송 속도에 따른 장력 변화를 다양하게 실험할 수 있으며, 필요에 따라 롤들의 위치를 변경하여 소재의 이송경로 및 스펜 길이를 임의로 바꿀 수 있는 구조를 갖추고 있다.

각 구동 롤은 상용 실시간 운용체제(Vxworks)와 타겟보드(Target Board)에 의하여 제어되며 풀림롤(Unwinder roll)을 MSD(Master Speed Drive)로 설정하여 전체 공정의 운전속도를 결정한다. 시스템의 구동 중에 이송되는 소재의 장력은 롤(Roller)의 지지대에 장착된 로드셀(Load Cell)에 의하여 측정되며, 본 연구에서는 이렇게 측정된 장력값에 대한 주파수 분석법에 의하여 각 스펜(Span)에 있는 롤의 편심여부와 그 정도를 알아낸다.

3.2 실험 내용

Fig. 3 는 Fig. 1 의 연속공정시스템에서 사용되는 이상진단시스템의 개략도를 나타낸다. 서로 다른 스펜(Span)에 위치해 있는 로드셀(Load Cell)에 의해서 측정된 소재의 장력은 AD 컨버터를 거쳐 롤의 이상진단을 위해 사용되는 PC 에 저장된다

또한 저장된 장력값들은 컴퓨터 프로그램에 의해 시간영역에서 주파수영역의 신호특성으로 전환되며 그 결과는 시스템내부에서 각 롤(Roller)들의 정해진 반경과 이송되는 소재의 속도를 고려하여 현재 이상이 있는 롤과 이상의 정도를 규명하는데 사용된다.

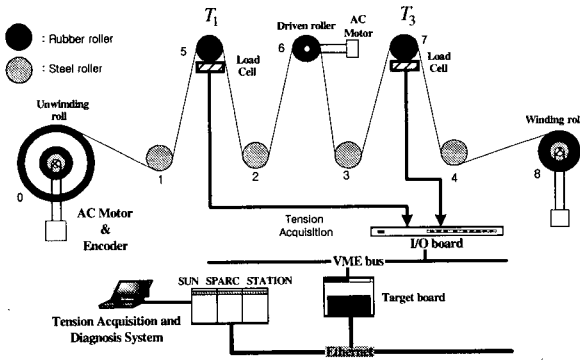


Fig. 3 Schematic of fault diagnosis system

편심 및 국부적인 마모가 존재하는 롤에 의해서 이송되는 소재는 롤에 의해서 주기적인 외란(Disturbance)을 받게 되고, 이러한 외란으로 인하여 소재에는 롤의 구동속도에 비례하는 주기적인 장력변화 현상이 발생하게 된다. 따라서 이러한 특성을 활용하면 측정된 소재의 장력값을 이용하여 소재를 이송시키고 있는 롤의 이상(편심, 마모)의 유무와 그 양을 판단할 수 있다.

이상과 같은 진단방법을 사용하기 위하여 다음과 같은 과정을 거쳐 롤의 이상유무를 판단하게 된다.

1. 로드셀(Load Cell)을 통한 소재의 장력(Tension)측정.
2. A/D 컨버터(Converter)를 이용한 장력값의 수집
3. 수집된 장력값을 이용한 스펙트럼(Spectrum) 계산. (Matlab 이용)
4. 주파수 영역(Frequency domain)에서 특정 주파수와 롤의 관계, 특정 주파수에서 신호의 크기(Spectrum amplitude)와 롤의 편심량과의 관계의 고찰을 통한 롤의 이상 유무와 그 정도 판단

이와 같은 과정을 통한 실험 결과는 다음과 같다.

4. 실험결과

4.1 장력에 대한 스펙트럼 분석결과

Table 1 은 본 실험에서 사용한 연속공정시스템에서의 감김롤, 풀림롤, 구동롤 및 비구동롤의 반경과 소재의 이송속도가 0.5m/s, 1m/s, 1.5m/s 일 때 롤의 결함에 의해서 나타날 수 있는 장력신호의 주파수를 나타낸 것이다. Table 1 에서 알 수 있듯이 소재가 이송되고 있을 때, 롤의 마모나 정렬불량 등의 이유로 인해 편심이 발생할 경우, 이는 곧 롤의 반경에 따라 특정 주파수에 해당하는 장력신호를 발생하게 된다. 이러한 원리를 이용하여 본 연구에서는 소재가 이송되고 있을 때, 측정된 소재의 장력을 이용하여 스펙트럼을 구하고 주파수 영역에서의 장력변화 특성을 분석하였으며 그 결과는 Fig. 4 ~ Fig. 6 과 같다.

Fig. 4 는 소재의 이송속도 $V=0.5m/s$, 운전장력 (Operating tension) $t_1=t_2=4kg_f$ 일 때, 장력값에 대한 스펙트럼을 나타낸다. 여기서 장력 t_1 은 Fig. 3 의 5 번 롤에 부착된 로드셀에서 측정된 소재의 장력을 의미하며, Fig. 4 에서 보는 바와 같이 주파수 1.4Hz 부근의 값은 장력센서의 위치와 소재의 이송방향, Table 1 에서 구한 각 롤의 주파수 등을 고려해 볼 때, 풀림롤(Unwinder roll : 0 번 롤)의 편심에 의해서 발생한 신호임을 알 수 있다

또한 장력 t_2 는 Fig. 3 의 7 번 롤에 부착된 로드셀에서 측정된 장력이므로 0.8Hz 부근의 신호는 감김롤(Winder roll : 8 번 롤), 1.5 - 1.6Hz 부근의 신호는 Fig. 3 의 6 번 고무롤, 2Hz 부근의 신호는 3 번 금속롤의 편심에 의해서 발생한 것이다. 또한 Fig. 4 과 Fig. 5 에서 소재의 이송속도가 0.5m/s 에서 1m/s 로 두 배 증가 했을 때 반경이 항상 일정한 금속롤과 고무롤의 경우 주파수특성이 모두 두 배씩 증가하여 나타난 것을 알 수 있다.

Fig. 5, Fig 6 는 각각 소재의 이송속도 $V=1m/s$, 1.5m/s, 운전장력 $t_1=t_2=4kg_f$ 일 때, 장력의 주파수 특성을 나타낸다. 이 두 경우도 Fig. 4 의 경우와 마찬가지로 Table.1 에서 구한 각 장력신호의 주파수와 비교해 보면 각 롤에 의해서 유발된 장력의 주파수 특성이 모두 나타남을 알 수 있다.

따라서 연속공정 시스템에서 이송되고 있는 소재의 장력의 주파수 특성과 롤의 반경을 이용하면 각 롤의 편심여부를 정확히 진단해 낼 수 있다는 것을 실험적으로 검증하였다.

4.2 장력에 대한 각 주파수 대역별 특성 분석결과

Table 1 Frequency of tension variation according to operating velocity and roller radius.

Rollers	Operating Velocity (m/s)					
	0.5		1.0		1.5	
	R (m)	f (Hz)	R (m)	f (Hz)	R (m)	f (Hz)
No. 8	0.09	0.8	0.05	2.9	0.08	2.9
No. 0	0.05	1.4	0.09	1.7	0.09	2.6
No. 1, 2, 3, 4	0.04	2.0	0.04	4.0	0.04	6.0
No. 5, 6, 7	0.05	1.6	0.05	3.2	0.05	4.7

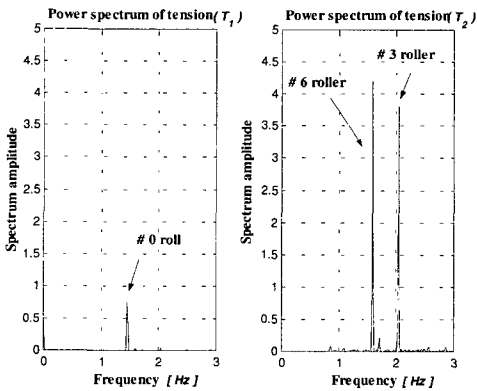


Fig. 4 Spectrum amplitude of tension signal ($v = 0.5\text{m/s}$, $t_1=t_2=4\text{kg}_f$)

이제까지는 수집된 장력값에 대해 주파수영역에서의 분석을 통하여 시스템 내에서 편심이 발생한 롤을 찾아낼 수 있었으나 편심이 발생한 정도나 롤의 편심이 장력의 변화에 미치는 영향은 알 수 없었다. 따라서 장력값에 대한 주파수 분석결과를 이용하여 각 주파수 대역별로 장력의 변화를 분석함으로써 롤의 편심량과 스펙트럼에서 특정 주파수에 대한 신호(장력)의 크기와의 관계 그리고 장력변화와의 관계를 규명하고자 한다.

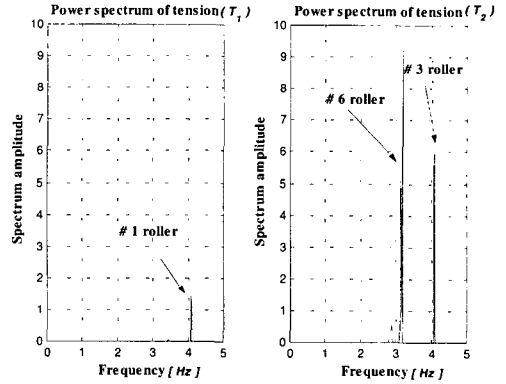


Fig. 5 Spectrum amplitude of tension signal ($v = 1\text{m/s}$, $t_1=t_2=4\text{kg}_f$)

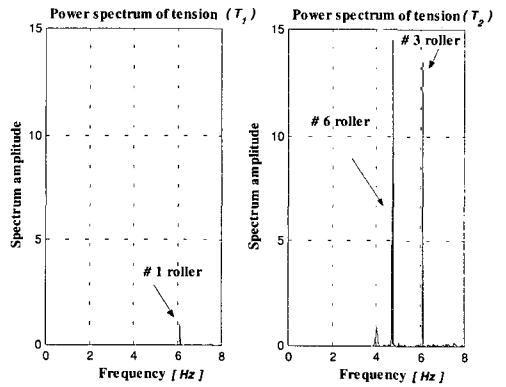


Fig. 6 Spectrum amplitude of tension signal ($v = 1.5\text{m/s}$, $t_1=t_2=4\text{kg}_f$)

측정된 장력값에서 특정 주파수에 해당하는 신호를 추출해 내기 위하여 본 연구에서는 대역통과 필터(Band pass filter)를 사용하였으며, 사용된 장력값은 소재의 이송속도 1m/s 에서 총 80 초 동안의 실험결과에 의하여 장력 변화량의 평균값을 구하고 평균값에 대한 장력의 변화량을 구하여 그 값을 기준으로 원하는 주파수 대역에 대한 필터링(Filtering)을 하였다. 실험 대상으로 한 롤은 Fig. 3 에서와 같이 구성된 시스템에서 임의로 선택한 비구동 1 번 금속롤, 비구동 3 번 금속롤 그리고 구동 6 번 고무롤이며, 소재의 최대 장력 변화량은 장력이 비교적 안정된 변화율을 갖는 구간(10 초~70 초 구간)의 장력값을 수집하여 계산된 결과이다.

고속 푸리에 변환에 의하여 계산된 장력값에 대

한 주파수 대역별 신호(장력)의 크기(Spectrum amplitude)를 결정하는 요인은 장력신호 $T_1(t)$ 의 변화량을 (4)식을 통하여 알 수 있다. 그러므로 장력의 변화량이 주파수 영역에서의 신호(장력)의 크기로 나타나게 된다. 따라서 시간영역에서의 특정 주파수 대역에 대한 장력의 변화량을 알아냄으로써 롤의 편심량과 장력의 변화 그리고 주파수 대역에서의 신호의 크기와 의 관계를 실험을 통하여 알아낼 수 있다.

Fig. 7 은 본 연구에서 비교대상으로 정한 서로 다른 세 개의 롤의 편심량을 측정 한 위치(a, b, c, d)를 나타내며 롤의 편심량은 각 측정값들의 평균값으로 정하였다.

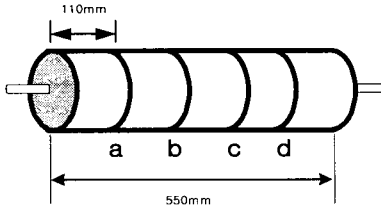


Fig. 7 The measured positions of eccentric quantities of rollers

실험결과는 다음과 같다.

Fig. 8, 9 과 Table 2 에서 볼 수 있듯이 편심이 큰 롤(3 번 롤) 일수록 소재의 장력변화에 영향을 많이 주게 되고, 이것은 다시 주파수 대역에서의 신호(장력)의 크기에 영향을 주게 되므로 장력의 변화가 심할수록 신호(장력)의 크기가 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 Table 2 와 Table 3 에서 볼 수 있듯이 6 번 롤(고무롤)의 경우 다른 두 개의 롤에 비해서 평균적으로 편심량(E_c)이 작다. 그럼에도 불구하고 롤의 편심에 의해서 유발되는 최대 장력 변화량($T_{v,max}$)과 그 때의 주파수 영역에서의 신호(장력)의 크기는 Fig. 10 에서 보듯이 다른 롤들에 비해서 상대적으로 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 편심량이 롤 전체에 대하여 비교적 균일한 경우에, 이송되고 있는 소재에 형성되는 응력(Stress)분포 또한 균일하지만, 편심량이 롤의 특정방향(좌측이나 우측)쪽으로 더 많이 존재하는 경우에는 소재에 형성되는 응력이 일정하지 않을 뿐만 아니라 전단응력(Shear Stress)이 존재함으로써 더 많은 장력변화를

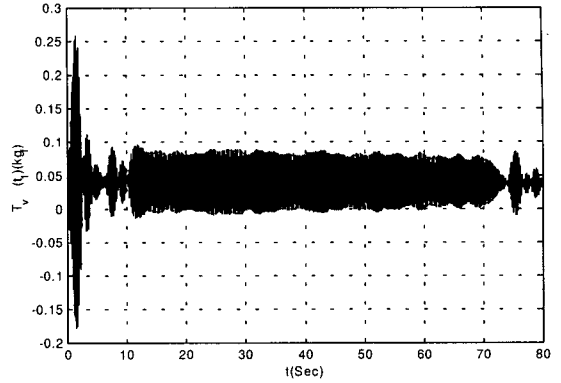


Fig. 8 Tension(t_1) variation due to eccentric steel roller(#1) ($f = 4.1$ Hz, $v = 1$ m/s)

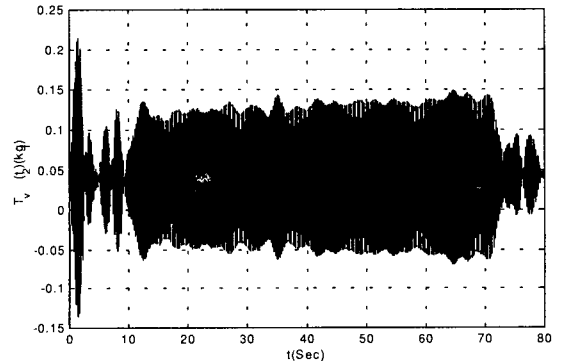


Fig. 9 Tension(t_2) variation due to eccentric steel roller(#3) ($f = 4.1$ Hz, $v = 1$ m/s)

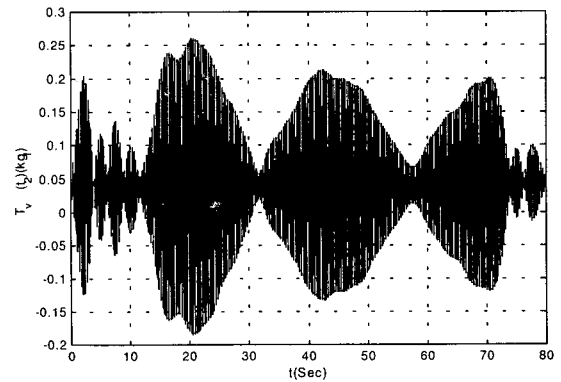


Fig. 10 Tension(t_2) variation due to eccentric steel roller(#6) ($f = 3.2$ Hz, $v = 1$ m/s)

Table 2 The eccentric quantities of rollers from several positions

Position # of roller	a	b	c	d	Mean
#1 Roller(mm)	0.13	0.13	0.12	0.10	0.12
#3 Roller(mm)	0.15	0.14	0.13	0.18	0.15
#6 Roller(mm)	0.08	0.03	0.01	0	0.03

Table 3 Relation between eccentric quantities of rollers, tension of web and spectrum amplitude of tension signals in frequency-domain.

	#1 steel roller	#3 steel roller	#6 rubber roller
f (Hz)	4.1	4.1	3.2
E_c (mm) (Mean)	0.12	0.15	0.03
$T_{v/max}$ (kgf)	0.11	0.23	0.46
P_f	1.3	6	9.5

유발하게 되는 현상이 나타나게 된다. 따라서 롤이 전체적으로 균일한 편심량을 갖는 경우보다 그렇지 않은 경우가 소재의 장력변화에 더 큰 악영향을 주며, 이러한 경우에 주파수영역에서의 신호(장력)의 크기가 편심량에 상관없이 다른 롤들에 비하여 매우 크게 나타나는 것으로 생각된다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 웹(Web)이 여러 개의 롤을 통과하는 연속공정시스템에서 롤의 속도를 통해 조절되는 장력을 측정·수집하고, 장력에 대한 스펙트럼을 계산하여 주파수 영역에서 장력의 특성을 분석함으로써 각 롤의 편심여부와 그 정도 및 롤의 편심이 소재의 장력변화에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다.

연구결과를 정리해 보면 다음과 같다.

1. 장력에 대한 주파수 특성을 통하여 시스템내에서 편심이 발생한 롤을 찾아낼 수 있다.
2. 각 롤의 편심은 소재의 장력변화를 유발하게 되며, 이것은 주파수 영역에서의 특정 주파수에 대한 신호(장력)의 크기(Spectrum amplitude)로 나타난다.
3. 롤의 편심량과 장력의 변화량 그리고 주파수 영역에서의 특정 주파수에 대한 신호(장력)의 크기는 서로 비례관계에 있다. 따라서 주파수 분석법에 의하여 롤의 편심의 양을 예측할 수 있다.

롤의 편심량이 평균적으로 작다 할지라도 상대적으로 특정방향(롤의 좌·우측)으로의 편심량이 증가하게 되면 이송되고 있는 소재에 전단응력(Shear stress)이 작용하게 되고, 이로 인하여 더 심한 장력변화를 유발하게 되어 주파수 대역에서의 신호(장력)의 크기가 증가하게 된다

대부분의 연속공정시스템에서는 장력측정 센서가 설치되어 있다. 따라서 본 연구의 결과를 이용하여 연속공정시스템내의 무수히 많은 각 롤들에 대한 이상유무 및 이상의 정도를 기존의 시스템의 큰 변화없이 진단할 수 있게 되어 시스템에 대한 효과적인 유지·보수가 가능해졌다. 그러나 시스템 내에 롤의 수가 많아지고 반경이 같은 롤이 여러 개 있을 경우 본 연구에서 제안된 이상진단 방법으로는 이상이 있는 롤을 정확히 찾아내기 어렵다. 따라서 앞으로 이와 같은 문제를 해결하기 위한 연구가 추가로 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Bo Li, Gregory Goddu, Mo-Yuen Chow, "Detection of Common Motor Bearing Faults Using Frequency-Domain Vibration Signals and a Neural Network Based Approach," AACC, pp. 2032 ~ 2036, 1998.
2. G. Dalpiaz, A. Rivola, "Condition Monitoring and Diagnostics In Automatic Machine : Comparison of Vibration Analysis Techniques," Mechanical Systems and Signal Processing II (1), pp. 53 ~ 73, 1997.
3. Polenta, Hector P, "Implementation of a fault

- detection procedure,” AACC ; Seattle, WA ; 18 ~ 20, Vol. 1, pp. 176 ~ 181, 1986.
4. 정완섭, “Wideband spectral histogram 분석에 의한 회전기계요소의 결함탐지,” 한국자동제어학술회의 논문집; 한국과학기술대학, 충남; Oct , Vol. 1, pp. 123 ~ 127, 1986.
 5. 유정훈, 윤종호, 김성걸, 이장무, “롤러베어링에서의 결함의 자동진단,” 한국소음진동공학회지 제 5 권 제 3 호, pp. 353 ~ 360, 1995.
 6. D. E. Newland, “An Introduction to Random vibrations, spectral and wavelet analysis,” Addison Wesley Longman, 1993.
 7. The Institute of Electrical and Electronics Engineer, “IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms,” Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, 1984.
 8. 신기현, “감김롤 교체공정을 갖는 다중스팬 웹 연속공정 시스템의 실시간 장력제어 기법에 관한 연구,” 보고서, 한국과학재단, 1999.
 9. 권순오, “다중스팬 연속공정 시스템에서 가 · 감속시의 장력제어에 관한 연구,” 석사학위논문, 건국대학교, 1996.
 10. 김현기, “랜덤진동을 이용한 하드디스크 드라이브 슬라이더 공기베어링의 모드해석,” 석사학위 논문, 건국대학교, 1999.