

碩士學位論文

롤투롤 정전기력 잉크젯 프린팅  
시스템을 위한 웹 장력제어 알고리즘 개발



濟州大學校 大學院

에너지應用시스템學部 電子工學專攻

梁 鳳 秀

2010 年 2 月

# 롤투롤 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템을 위한 웹 장력제어 알고리즘 개발

共同指導教授 都良會, 金度縣

梁鳳秀

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2010 年 2 月

梁鳳秀의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

委 員 \_\_\_\_\_ 印

濟州大學校 大學院

2010 年 2 月

# Development of Web Tension Control Algorithm for Roll-to-Roll Based Electrostatic Inkjet Printing System

Bong-Su Yang

(Supervised by professor Yang-Hoi Doh)  
(Co-Supervised by professor Do-Hyeon Kim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of Master of Engineering

2010 . 2 .

This thesis has been examined and approved.

---

Thesis director, Kwang-Man Lee, Prof. of Electronic Eng.

---

Thesis director, Yang-Hoi Doh, Prof. of Electronic Eng.

---

Thesis director, Kyung-Hyun Choi, Prof. of Mechatronics Eng.

---

February 2010

Date

Faculty of Applied Energy System

Major of Electronic Engineering

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

## 목 차

LIST OF FIGURES .....	1
LIST OF TABLES .....	3
ABSTRACT .....	4
I. 서론 .....	6
II. 롤투롤 연속인쇄기술 .....	8
1. 롤투롤 연속인쇄기술의 종류 .....	8
1) 플렉소 인쇄(flexography printing) 기술 .....	9
2) 그라비아 인쇄(gravure printing) 기술 .....	9
3) 오프셋 인쇄(offset printing) 기술 .....	10
4) 그라비아-오프셋 인쇄(gravure-offset printing) 기술 .....	11
2. 롤투롤 시스템 제어기술 요소 .....	12
1) 장력제어(tension control)기술 .....	12
2) 사행제어(lateral control)기술 .....	13
3) 인압제어(printing pressure control)기술 .....	14
4) 레지스터제어(register control)기술 .....	15
III. 롤투롤 시스템과 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템 .....	16
1. 롤투롤 시스템 .....	16
1) 기구부 .....	17
2) 제어부 .....	19
2. 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템 .....	22
IV. 롤투롤 정전기력 잉크젯 프린팅 장력제어 알고리즘 연구 .....	24
1. 롤투롤 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템 .....	25
1) 장비설계 시 고려사항 .....	25

2) 기구부 설계 및 개발 .....	27
(1) 웹 이송부 .....	29
(2) 헤드 이송부 .....	30
(3) 사행제어부 .....	32
(4) 장력제어부 .....	34
2. 다중스펜 시스템에서의 장력제어 알고리즘 .....	36
1) Back-Stepping 제어 알고리즘 .....	37
2) 장력제어 시뮬레이션 .....	42
(1) PID제어 알고리즘을 이용한 장력제어 시뮬레이션 .....	43
(2) Back-Stepping알고리즘을 이용한 장력제어 시뮬레이션 .....	46
3) 제어 알고리즘별 결과 .....	49
V. 결론 .....	50
참고 문헌 .....	51

## LIST OF FIGURES

그림 2.1. 폴렉소 인쇄 기술의 개념도 .....	9
그림 2.2. 그라비아 인쇄 기술의 개념도 .....	10
그림 2.3. 오프셋 인쇄 기술의 개념도 .....	11
그림 2.4. 그라비아-오프셋 인쇄 기술의 개념도 .....	11
그림 2.5. 장력제어를 위한 롤투롤 시스템 개념도 .....	13
그림 2.6. 사행제어를 위한 롤투롤 시스템 개념도 .....	13
그림 2.7. 롤투롤 시스템에서의 인압제어 개념도 .....	14
그림 2.8. 롤투롤 시스템에서의 레지스터제어 개념도 .....	15
그림 3.1. 롤투롤 연속공정 시스템 구성도 .....	17
그림 3.2. 롤투롤 연속공정 시스템 .....	18
그림 3.3. 시스템의 (a)폴림 롤, (b)초음파 센서 .....	19
그림 3.4. 시스템의 (a) 피딩롤, (b) 웹 가이드롤 .....	20
그림 3.5. 시스템의 (a)레이저 센서, (b)웹 가이드 롤의 업쇼버 .....	21
그림 3.6. 시스템의 (a)감김 롤, (b)로드셀 .....	21
그림 3.7. 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템 구성도 .....	22
그림 3.8. 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템 .....	23
그림 4.1. 롤투롤 기반의 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템 구성도 .....	24
그림 4.2. 롤투롤 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템 .....	27
그림 4.3. 롤투롤 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템 설계도면 .....	28
그림 4.4. 시스템의 (a) 감김롤, (b) 고정판 및 커플러 부착형태 .....	29
그림 4.5. 시스템의 3축 XYZ스테이지 .....	30
그림 4.6. 시스템의 (a) 초음파센서, (b) 웹 가이드 롤 설계 도면 .....	32
그림 4.7. 시스템의 (a) 초음파센서, (b) 웹 가이드 롤 .....	33
그림 4.8. 인/아웃 피딩 롤 및 텐서 롤 설계도면 및 실제사진 .....	34
그림 4.9. 로드셀 설계도면 및 실제사진 .....	35
그림 4.10. 제어시스템의 블록다이어그램 .....	36

그림 4.11. 롤투롤(Roll to Roll) 시스템 모델 .....	37
그림 4.12. 3스팬(span) 장력제어 수학적 모델링 .....	38
그림 4.13. 기준 웹 속도 변화 파라미터 .....	41
그림 4.14. 3스팬(span) 롤투롤 시스템의 시뮬레이션 블록다이어그램 .....	42
그림 4.15. 유전 알고리즘의 구조 .....	43
그림 4.16. Case 1의 시뮬레이션 결과(PID제어 알고리즘) .....	44
그림 4.17. Case 2의 시뮬레이션 결과(PID제어 알고리즘) .....	45
그림 4.18. Case 1의 시뮬레이션 결과(Back-Stepping제어 알고리즘) .....	46
그림 4.19. Case 1의 시뮬레이션 결과(Back-Stepping제어 알고리즘) .....	47
그림 4.20. Case 2의 시뮬레이션 결과(Back-Stepping제어 알고리즘) .....	48



## LIST OF TABLES

표 3.1. 파트별 구성 리스트 .....	18
표 4.1. 웹 이송 롤투롤(Roll to Roll) 시스템의 고려사항 .....	26
표 4.2. 잉크젯 프린팅 시스템의 고려사항 .....	26
표 4.3. 폴립 롤 및 감김 롤 구성 .....	29
표 4.4. 3축 스테이지 구성 .....	31
표 4.5. 웹 가이드 롤 구성 .....	33
표 4.6. 초음파 센서 구성 .....	33
표 4.7. 텐서롤 구성 .....	35
표 4.8. 피딩롤 구성 .....	35
표 4.9. Back-Stepping 제어 알고리즘 설계 및 이점 .....	37
표 4.10. 장력제어 시뮬레이션에 대한 가정 .....	38
표 4.11. 기준 장력 파라미터 .....	41
표 4.12. PID 제어 알고리즘의 이득 .....	43
표 4.13. 유전 알고리즘에 의한 Back-Stepping 제어 알고리즘의 이득 .....	46

## ABSTRACT

Roll to roll (R2R) continuous printing technology is the process of web treatment method passed by idle rolls and printed by press rolls. All procedures about continuous printing are operated in all-in-one system. Development of this technology is accomplished for mass production such as printed electronics, RFID, printing newspaper, advertisement. After 2000, throughout the development of various materials and conducting inks, there are many researches about electronics element of solar cell, RFID, OLED (organic light emitting diode) and TFT (thin film transistor).

Roll to roll continuous printing technology is consisted of three methods of printing: offset printing technology, gravure printing technology and flexography printing technology. Contacted printing method is with the other meaning of roll to roll continuous printing technology; it is a useful technology that passes between idle rolls, printing press rolls, and contacted press rolls.

It is important to reduce web distortion, product error when controlling roll to roll continuous printing system. There are four control methods of roll to roll continuous printing technology: tension control of web materials, lateral control to reduce web distortion, printing pressure control to reduce product error, and register control to print multi-layer substrate.

Roll to roll continuous printing technology has advantages of manufacturing mass production, low-cost product and reducing procedure in printing progress. But there is problem about additional cost of changing product type, difficult to manufacturing high performance product.

Therefore, we center on research to apply multiple manufacturing technology in roll to roll continuous printing technology. By using this research, we developed roll to roll based electrostatic inkjet printing system as multiple

manufacturing technologies.

In the thesis, we proposed an approach for building the roll to roll based electrostatic inkjet printing system. Also, an algorithm for web tension control was given out for roll to roll based electrostatic inkjet printing system by using modified back-stepping control algorithm. The outcome of proposed algorithm proves the reliability throughout simulation results in Matlab/Simulink.



## I. 서 론

롤투롤(roll-to-roll, R2R) 연속인쇄기술은 각 롤을 통하여 연속적 이송이 이루어지는 웹(web)의 전처리, 연속생산 및 후처리가 가능한 시스템 기술이다. 이러한 기술은 대량생산을 위한 산업혁명을 통하여 발전을 이루었고 신문, 광고 등의 다양한 형태의 매체 발전에도 큰 도움을 주었다. 2000년 이후에는 다양한 소재 및 전도성 잉크의 개발로 이를 통한 태양전지, RFID, 수동소자, OLED(organic light emitting diode)와 TFT(thin film transistor)등의 전자소자 대량생산에 대한 연구가 진행되고 있다.

롤투롤 연속인쇄기술은 접촉식 생산 방식으로 오프셋 인쇄(offset printing), 그라비어 인쇄(gravure printing), 플렉소 인쇄(flexography printing)와 그라비어-오프셋 인쇄(gravure-offset printing) 등으로 구분된다. 접촉식 생산 방식으로 롤과 인쇄물 사이에 웹을 연속적으로 이송하면서, 소재와 인쇄물 간에 접촉을 통한 인쇄방식이다. 이러한 롤투롤 연속인쇄시스템의 운용상, 발생하는 웹 변형 및 생산 오차 등을 줄이고, 안정성을 확보하기 위해 기술요소에 대한 정밀한 제어가 필요하다.

롤투롤 연속인쇄기술을 위한 제어 기술 요소로는 연속적으로 이송되는 웹의 장력제어(tension control), 웹의 틀어짐에 대한 사행제어(lateral control), 인쇄압력에 대한 인압제어(printing pressure control)와 다중 인쇄오차를 위한 레지스터제어(register control)가 있다.

롤투롤 연속인쇄기술은 단일기술로서 대면적 소재에 대한 대량생산 및 대량생산에 따른 저가의 제품개발과 기술절차의 간소화 등으로 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 다양한 제품개발에 따른 비용증가와 고성능 제품 개발의 어려움으로 단일기술인 롤투롤 연속인쇄기술의 문제점에 대한 대안으로 단일기술의 융합을 통한 다중생산기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문의 롤투롤 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템은 단일기술의 문제점에 대한 대안으로 다중생산 기술을 적용한 시스템으로 기존의 롤투롤 연속인쇄기술에서 정전기력 잉크젯 프린팅 기술요소를 융합한 시스템이다.

본 논문에서는 다중생산기술을 적용한 롤투롤 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템을 바탕으로 롤투롤 연속인쇄기술의 제어 기술 요소 중 장력제어에 대한 개선된 알고리즘을 제안하였다. 또한 롤투롤 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템에 적용하기 위해 시뮬레이션을 진행하였고 PID제어 알고리즘과 비교를 통하여 개선된 성능 결과를 제시하였다.



## II. 롤투롤 연속인쇄기술

### 1. 롤투롤 연속인쇄기술의 종류

롤투롤 연속인쇄기술은 과거 신문, 광고 등의 매체의 인쇄에 널리 쓰였으며 2000년 이후 다양한 소재 및 잉크의 개발로 그 활용범위가 늘어나고 있다.

롤투롤 연속인쇄기술은 크게 플렉소 인쇄(flexography printing) 기술, 그라비아 인쇄(gravure printing) 기술, 오프셋 인쇄(offset printing) 기술과 그라비아-오프셋 인쇄(gravure-offset printing) 기술로 나눌 수 있다.

플렉소 인쇄기술은 인쇄판(printing plate)의 돌출된 형태의 양각된 면을 인쇄에 사용하는데 반해, 그라비아 인쇄기술은 인쇄판의 음각된 면에 잉크를 전사하여 인쇄를 진행한다. 또한 오프셋 인쇄기술은 간접인쇄기술로 기존 직접인쇄기술인 플렉소 인쇄와 그라비아 인쇄기술과는 다르게 오프셋 블랭킷롤(offset blanket roll)이 중간에서 전사된 잉크를 인쇄물로 전달하는 역할을 한다. 그라비아-오프셋 인쇄기술은 오프셋 인쇄기술과 그라비아 인쇄기술의 특성을 혼합한 기술로 음각된 인쇄판에 전사된 잉크를 오프셋 패드를 사용하여 피인쇄체에 간접적으로 인쇄한다.

## 1) 플렉소 인쇄(flexography printing) 기술

유연성을 가진 패터닝된 수지판(elastic printing plate)을 이용하는 인쇄법으로 그림 2.1에서와 같이 잉크를 아니록스롤(anilox roller) 위에 도포하고, 닥터블레이드(doctor blade)를 이용하여 롤 표면에 균일하게 펼친 후, 인쇄물의 유연성 수지판 위에 양각된 패턴으로 전사되고 기판표면에 프린팅 된다.

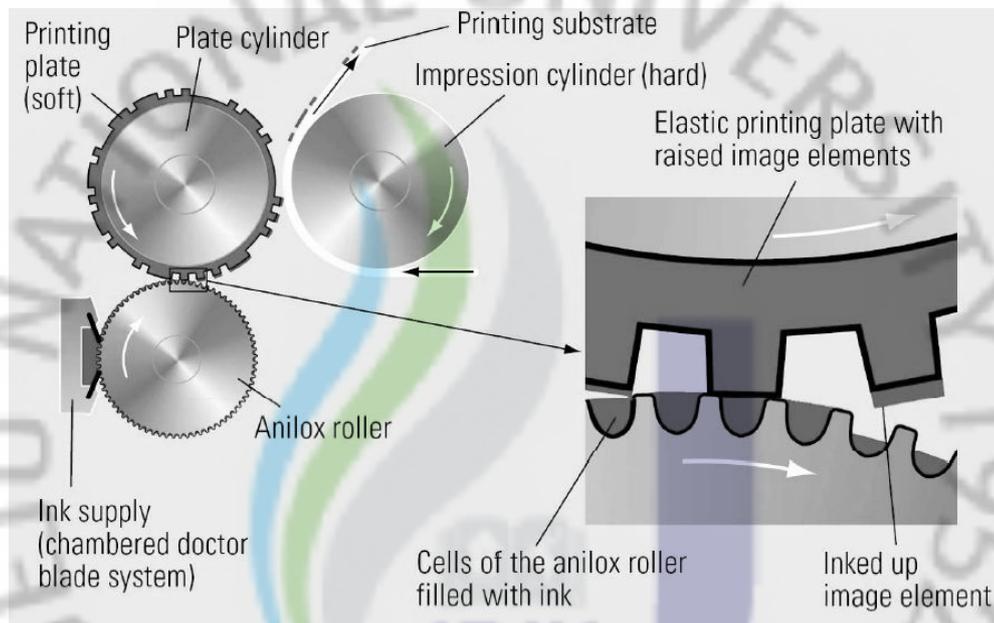


그림 2.1. 플렉소 인쇄 기술의 개념도.

## 2) 그라비어 인쇄(gravure printing) 기술

그라비어 인쇄는 요판 인쇄의 일종으로서, 그림 2.2에서와 같이 요철을 형성한 원통형 인쇄판(printing plate)에 잉크를 묻혀 불룩한 부분에 묻는 잉크를 닥터(doctor)로 긁어낸 후, 오목한 부분에 들어간 잉크를 피 인쇄물(film substrate)에 전사하는 방식이다.



그림 2.2. 그라비어 인쇄기술의 개념도.

### 3) 오프셋 인쇄(offset printing) 기술

오프셋 인쇄는 그림 2.3과 같이 판면에서 일단 잉크화상을 고무블랭킷에 전사하여, 다시 피인쇄체에 인쇄하는 방식이며 평대식과 윤전식으로 나뉜다.

평대식은 판면의 잉크를 고무블랭킷에 한번 옮기고 다시 그 고무블랭킷 위의 잉크를 소재에 전사하는 방식의 인쇄기판을 평평한 반상에 설치하는데 반해 윤전식은 인쇄기판을 원통형의 인쇄판에 설치한다.

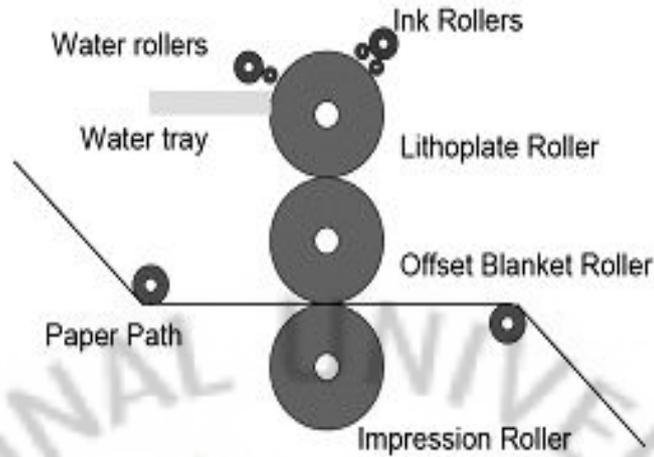


그림 2.3. 오프셋 인쇄기술의 개념도.

#### 4) 그라비어-오프셋 인쇄(gravure-offset printing) 기술

그라비어-오프셋 인쇄는 종이 이외의 피인쇄체에 인쇄하는 특수인쇄기술 중 하나로 그림 2.4와 같이 (a) 그라비어 제판(gravure plate)으로 판을 만든 후, (b) 오프셋 인쇄처럼 오프셋 패드(offset pad)에 잉크를 일단 전이하여 (c) 간접적으로 피인쇄체(substrate)에 인쇄하는 방식이다.

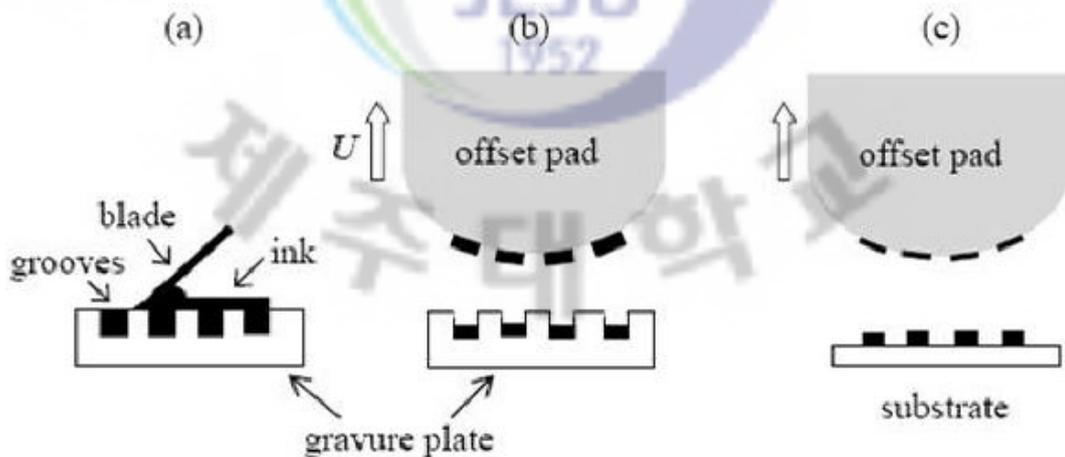


그림 2.4. 그라비어-오프셋 인쇄기술의 개념도.

## 2. 롤투롤 시스템 제어 기술 요소

롤투롤 시스템을 위한 제어 기술의 가장 큰 목적은 인쇄된 제품의 품질유지 및 대량생산을 위한 오차범위의 최소화가 큰 주제이다. 또한 각각의 제어 기술을 통합하고 제어 기술 간의 유기적인 연결을 통한 통합제어가 가능해야 시스템의 안정적인 제어 및 인쇄제품의 성능에 영향을 줄일 수 있다.

롤투롤 시스템을 위한 제어 기술 요소로는 장력제어, 사행제어, 인압제어, 레지스터제어 기술로 나뉘며 각각의 정의를 다음과 같이 정리하였다.

### 1) 장력제어(tension control)기술

웹 이송을 위한 롤투롤 시스템에서 웹의 이송 방향으로 일정한 장력을 유지하는 것은 웹의 안정적인 이송을 보장하며, 제품의 품질과 생산량을 결정하는 중요한 요소이다. 과도한 장력은 웹의 변형 및 손실을 일으키며, 외부영향에 의한 변동이 심한 장력은 웹 및 인쇄제품의 품질 저하등을 일으킬 수 있는 가능성을 지니고 있다[6].

그림 2.5에서는 롤투롤 시스템에서의 장력제어에 대한 개념을 간단히 나타내었다. 풀림롤(unwinding roll)과 감김롤(rewinding roll) 사이의 로드셀(load cell)에서 웹의 장력을 측정하여 각 롤의 속도제어를 통한 시스템 장력제어를 담당하게 된다.

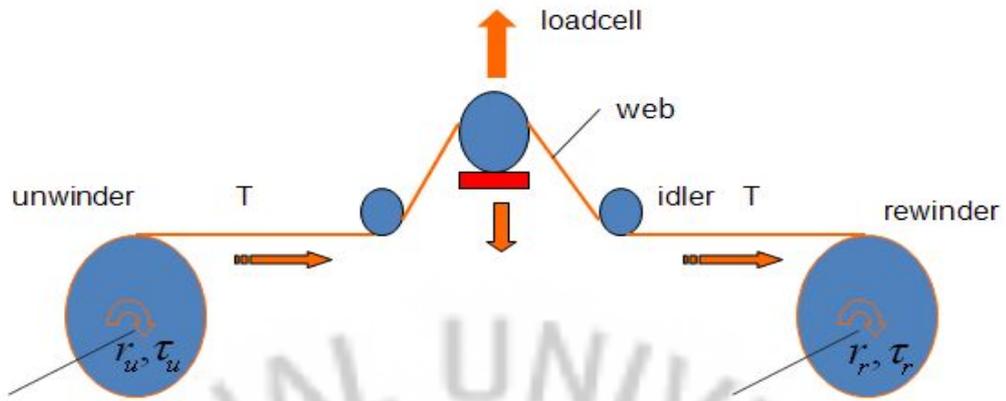


그림 2.5. 장력제어를 위한 롤투롤 시스템 개념도.

## 2) 사행제어(lateral control)기술

사행제어 기술은 높은 정밀도를 갖는 소재의 개발을 위한 중요한 제어요소중의 하나로 웹의 장력제어와 마찬가지로 제품의 생산성 및 품질에 영향을 미치는 요소이다. 그림 2.6에서와 같이 웹 이송 중에 웹의 틀어짐은 롤의 미세한 수평 및 정렬오차에 의 발생할 수 있으며 외부의 영향에 의한 장력의 불규칙적인 변화로도 틀어짐이 가능하다.

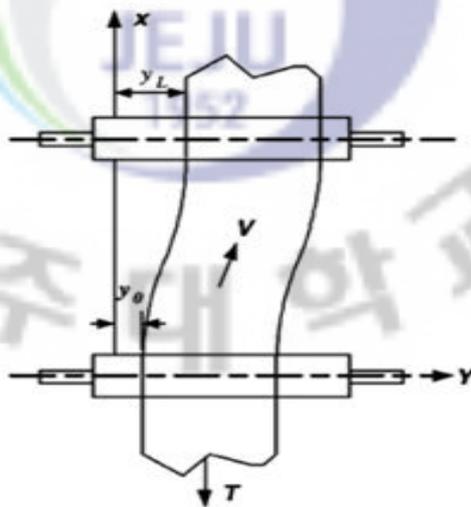


그림 2.6. 사행제어를 위한 롤투롤 시스템 개념도.

### 3) 인압제어(printing pressure control)기술

롤투롤 시스템에서 마이크론단위( $\mu\text{m}$ ,  $10^{-6}$ )의 프린팅을 위해서는 인압제어(printing pressure)를 통한 고정밀 인쇄제어 기술의 개발이 중요하다. 인압제어는 프린팅을 위해 사용되는 원형 인쇄판(printing plate)의 압력을 제어하여 피인쇄물의 인쇄상태를 조절하는 제어요소이다. 인압제어를 위한 원형 인쇄판의 제어구조는 그림 2.7과 같이 공압실린더(air cylinder)를 통하여 인압롤(pressure roll)의 상하 운동을 제어하고 압력센서(force sensor) 및 엔코더를 통하여 압력에 대한 피드백 값과 위치 값을 돌려받는다.

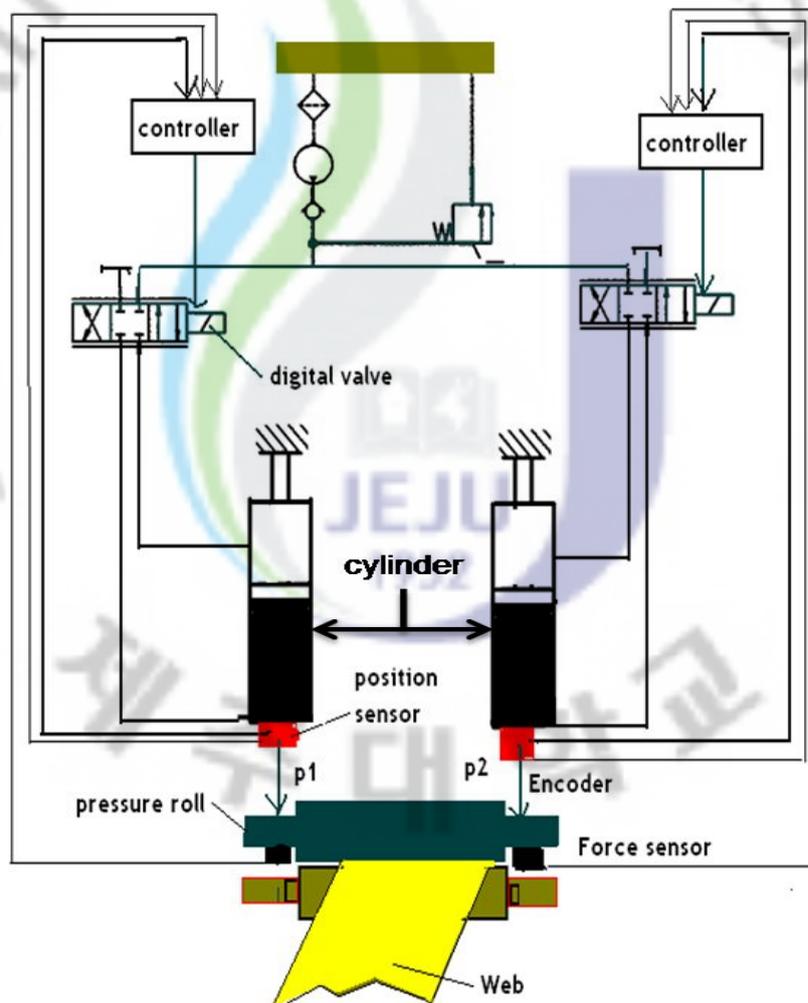


그림 2.7. 롤투롤 시스템에서의 인압제어 개념도.

#### 4) 레지스터제어(register control)기술

레지스터 제어 기술은 롤투롤 시스템에서 다중인쇄를 위한 제어요소로 그림 2.8에서와 같이 1번롤을 통과한 웹상에서 실제 2번롤에 도착시 예상되는 위치와 실제 소재 위치의 오차를 말한다. 이러한 오차를 레지스터 에러라 하며 실제 다중 인쇄를 위한 롤투롤 시스템에서 레지스터 에러가 발생할 경우 다중 인쇄된 인쇄물간의 오차가 생겨 제품 불량 발생하게 된다[4].

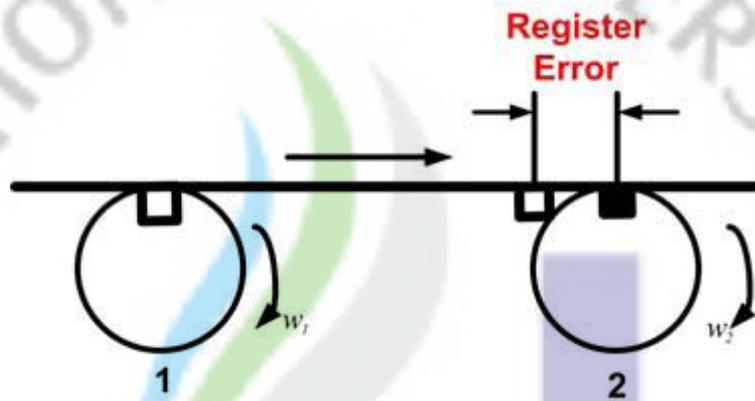


그림 2.8. 롤투롤 시스템에서의 레지스터 제어 개념도.

일반적으로 레지스터 제어를 위해서는 비전시스템을 활용한 제어방법이 가장 많이 쓰이고 있으며 비전시스템을 통한 오차를 다시 모터에 인가하여 오차는 모터의 제어를 통해 보정이 이루어진다.

### III. 롤투롤 시스템과 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템

#### 1. 롤투롤 시스템

롤투롤 연속인쇄기술은 연속적인 웹의 이송을 통하여 대량의 필름소재를 가공 및 처리를 통한 대량생산 분야에서 활용되어 왔다. 이러한 대량생산을 위한 롤투롤 시스템을 위해서는 시스템에서 연속적으로 이송되는 웹의 장력 및 사행운동에 대한 정밀한 제어가 필요하다[5].

장력제어를 위한 방법으로는 감김롤(winding roll) 및 피딩롤(feeding roll)을 통한 속도제어법이 있다. 그리고 텐서롤(dacner roll)의 상하운동을 이용한 장력제어법이 있으며, 사행제어 방법으로는 웹 가이드롤(web guide roll)의 좌우운동을 통한 제어법이 있다.

롤투롤 시스템은 그림 3.1과 같이 감김롤(winding roll), 풀림롤(unwinding roll), 로드셀(load cell), 레이저센서(laser sensor), 웹 가이드 롤(web guide roll), 피딩롤(feeding roll), 초음파 센서(ultrasonic sensor)로 구분할 수 있다.

감김롤과 풀림롤은 웹의 이송을 담당하며, 로드셀은 이송되는 웹의 면을 경계로 걸리는 힘을 측정한다. 레이저센서는 이송중인 웹의 틀어짐을 감지하는 기능을 담당하며, 웹 가이드 롤은 틀어진 웹을 센서값을 바탕으로 롤의 중심으로 위치보정하는 기능을 한다. 피딩롤은 안정된 웹 이송을 위해 웹의 양면을 롤로 압착하여 이송하는 기능을 하며 초음파 센서는 감김롤과 풀림롤에 장착된 웹 두루마리의 두께를 측정한다.

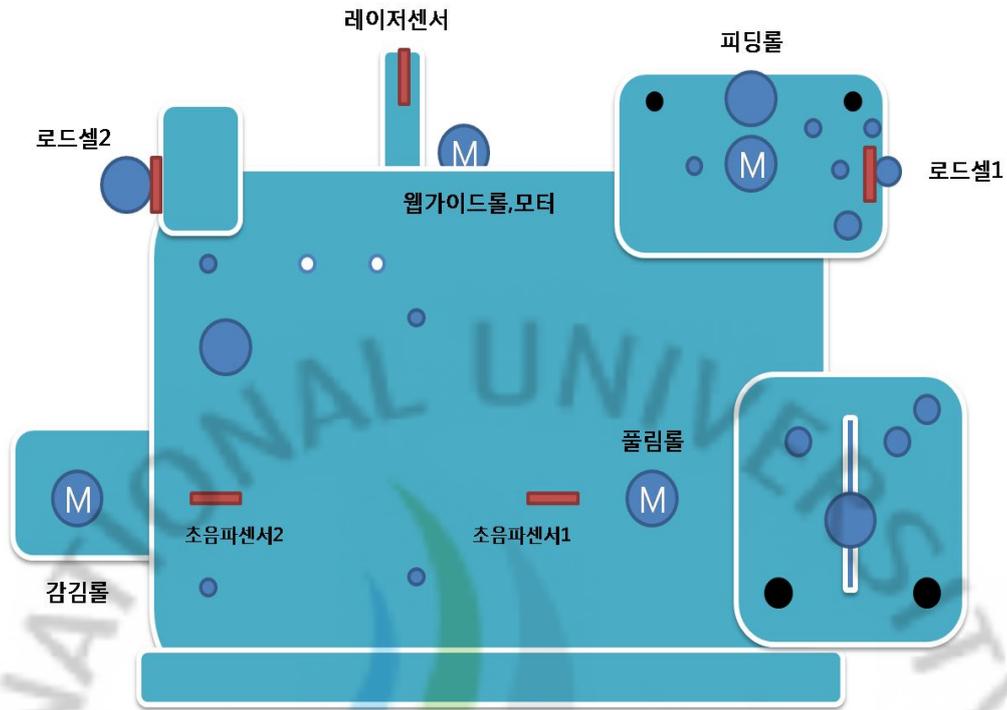


그림 3.1. 롤투롤 시스템 구성도.

### 1) 기구부

롤투롤 시스템의 기계적인 구성을 위해 고려해야 할 점으로 시스템의 형태 및 구성방식에 따라 시스템에 미치는 물리적인 영향을 미리 예상하여 구성하여야 한다. 만일 AC서보모터와 같이 반복적인 동작이 이루어지는 구동부에서의 구성방식이 잘못될 경우 시스템 전체의 진동으로 인한 영향으로 센서 값의 편차증가와 같은 현상이 발생할 수 있기 때문이다.

연속생산방식의 롤투롤 시스템의 구성은 그림 3.2와 같이 시스템의 속도에 의한 장력제어를 위한 3개의 AC서보모터와 웹의 이송에 의해 롤에 작용하는 외부적인 힘을 측정하기 위한 로드셀로 구성하였다. 또한 웹의 좌우 틀어짐을 체크하고 사행제어를 위한 레이저 센서와 사행 롤의 좌우이동을 위한 스텝모터와 피딩롤의 상하운동을 제어하는 공압 실린더를 피딩롤의 윗부분에 구성하였다.

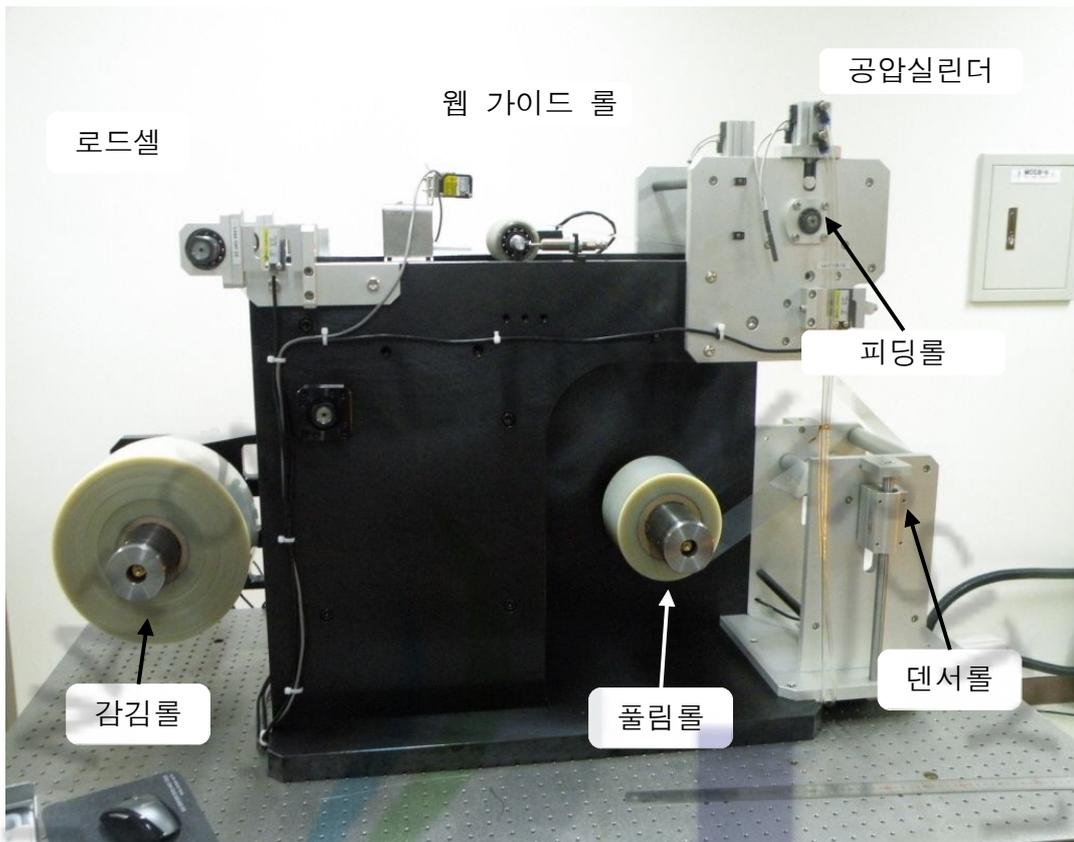


그림 3.2. 롤투롤 시스템.

각 파트를 구성하고 있는 장비 리스트를 표 3.1에 용도별로 정리하였다.

표 3.1. 파트별 구성 리스트

No.	목록	용도
1	AC서보모터	폴림롤, 감김롤, 피딩롤의 구동
2	로드셀	웹에 작용하는 힘 측정
3	레이저 센서	웹의 틀어짐 측정
4	스텝모터	웹 가이드 롤의 좌우이동
5	공압 실린더	피딩롤의 상하이동
6	초음파센서	소재물 두께측정

## 2) 제어부

일반적인 롤투롤 시스템에서 제어부는 장력제어, 사행제어, 인압제어등을 위한 구성요소로 정밀제어를 위해서는 각 구성요소 별 성능 및 구동방식에 대한 연구 진행이 필요하다.

롤투롤 시스템의 제어부를 구성하는 요소 중 풀림롤과 초음파 센서는 외팔보 형태와 센서의 신호입출력부분이 상부를 향해 있는 그림 3.3과 같은 형태로 구성되었다. 풀림 롤에서 이동한 웹은 일반 롤을 통하여 초음파센서가 부착되어 있는 텐서롤로 이동하고 시스템 내의 장력에 따라 텐서 롤의 높이가 변화하게 되며 이를 초음파센서를 이용해 거리를 측정하여 동일스팬(span)내의 장력의 간접적인 측정이 가능하다.

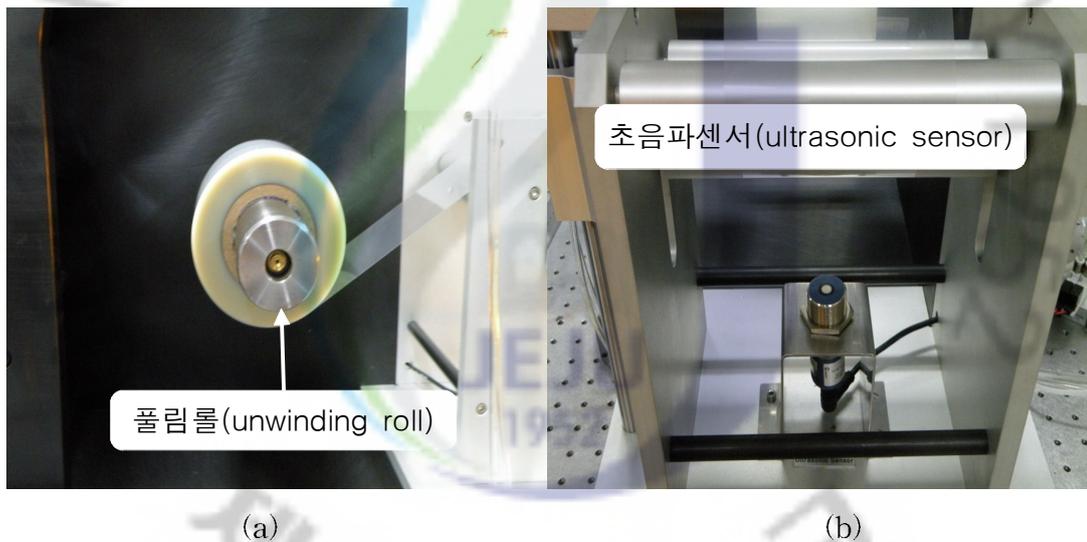


그림 3.3. 시스템의 (a)풀림 롤, (b)초음파 센서.

연속생산방식의 롤투롤 시스템에서 피딩롤은 시스템의 중간위치에서 공압 실린더 혹은 모터를 이용하여 웹을 다음 스펠스로 이송시킨다. 그리고 웹 미끄러짐을 막고 정확한 속도로의 이송을 담당하며 동일 스펠스내의 속도에 의한 장력제어에도 사용이 된다[8].

시스템 중간의 피딩롤에 의해 그림 3.4(a)에서와 같이 다음 스펠스로 이동하는

웹은 지그재그 형태의 사행제어를 위한 웹의 양 끝에 위치한 레이저 센서에 의해 웹의 틀어짐이 실시간으로 검출이 되고 이를 통하여 스텝모터에 연결돼 그림 3.4(b)의 웹 가이드 롤의 좌우이동에 의해 틀어진 웹의 이송방향을 다시 정상적으로 바로 잡는다.

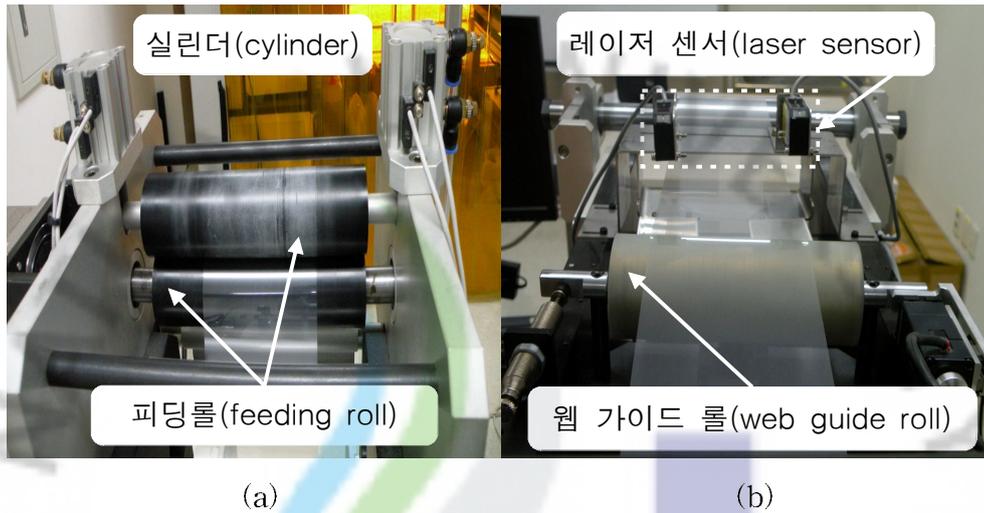


그림 3.4. 시스템의 (a) 피딩롤, (b) 웹 가이드롤.

그림 3.5는 사행제어에 필요한 레이저 센서 및 스텝모터가 연결된 웹 가이드롤로 웹의 틀어짐을 검출하여 이를 통한 스텝모터의 제어를 담당하여 웹의 틀어짐을 방지한다. 두 레이저 센서의 간격은 수동으로 조절이 가능하며 스텝모터에 연결된 컨트롤러를 통하여 웹 가이드 롤의 위치제어 및 속도제어가 가능하다. 또한 웹 가이드 롤의 업쇼버는 웹 가이드의 틀어짐에 의한 스텝모터의 부하를 완충작용을 통해 완화하는 역할을 한다.

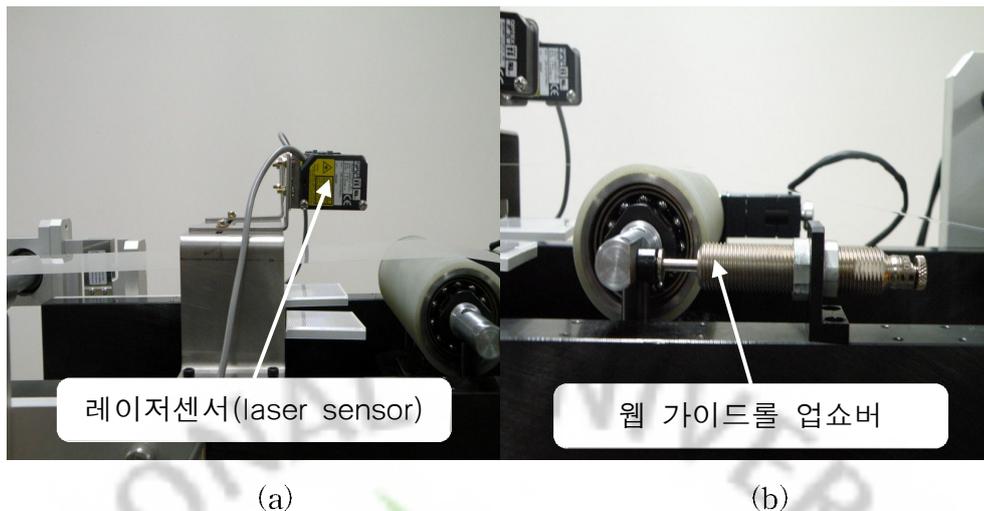


그림 3.5. 시스템의 (a) 레이저센서, (b) 웹 가이드롤의 업쇼버.

그림 3.6에서와 같이 시스템의 감김 롤 및 로드셀이 적용된 파트로 사행제어에 의해 웹의 틀어짐이 복구된 다음, 일정한 장력변화를 유지하면서 감김 롤로 웹이 감기게 된다. 이때 감김 롤로 들어가는 웹의 장력은 감김 롤의 속도제어를 통하여 일정한 변화율을 보인다. 이는 감김 롤로 이송되는 웹의 장력을 일정하게 유지하게 될 경우 두루마리 안쪽에 감기게 된 웹의 변형을 유발하기 때문에 웹의 직경이 작을 경우 장력을 일정수준으로 높이고 점점 직경의 커짐에 따라 장력을 낮추는 순서로 제어한다.

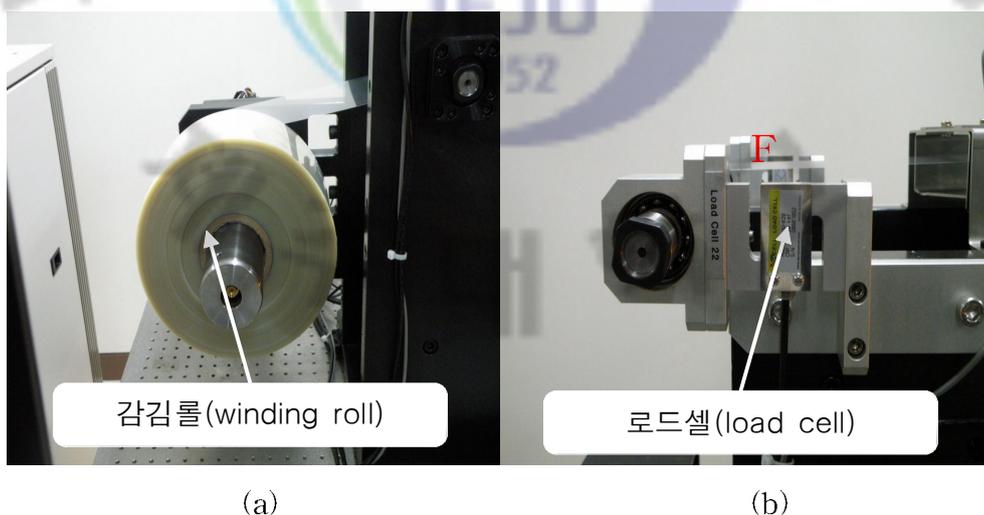


그림 3.6. 시스템의 (a) 감김롤, (b) 로드셀.

## 2. 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템

단일공정으로써의 정전기력 잉크젯 프린팅기술은 수십~수백 $\mu\text{m}$ 의 패터닝을 바탕으로 단순 공정, 친환경 등의 장점을 통한 상업인쇄, 공업인쇄, 디스플레이, 전자회로분야 등으로 그 범위가 확대되고 있다. 현재 정전기력 잉크젯 프린팅 기술은 직접 패터닝이 가능한 모든 영역에서 가능성을 확인하고 있으나, 기술 연구 단계로서 상업화로의 한계점 역시 드러내고 있다. 실제 수  $\mu\text{m}$ 의 패터닝을 위한 정전기력 잉크젯 프린팅 장비에서는 헤드 공정 장비 인쇄 선포의 정확도, 잉크토출에 영향을 미치는 고전압의 요구, 통합 헤드의 구현, 잉크젯 헤드 노즐 집적화 등의 한계를 극복하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1].

정전기력 잉크젯 프린팅 시스템은 그림 3.7.과 같이 잉크젯 헤드부, 프린팅소재 이송부, 프린팅상태 확인부 나눌 수 있다. 잉크젯 헤드부에서 잉크 공급 장치(syringe pump)로부터 일정한 양의 잉크를 공급받아 이를 통해 초기 메니스커스(meniscus)를 형성하고 헤드의 양전극(electrode)과 그라운드 전극(ground electrode)사이에서 고전압 공급 장치에서의 고전압을 공급하고 그로 인해 발생한 정전기력에 의해 미량의 잉크토출현상을 유도하게 된다. 제어시스템의 패턴 입력에 의한, 기능성 프린팅소재 이송하여 전도성 패턴의 형성할 수 있다.

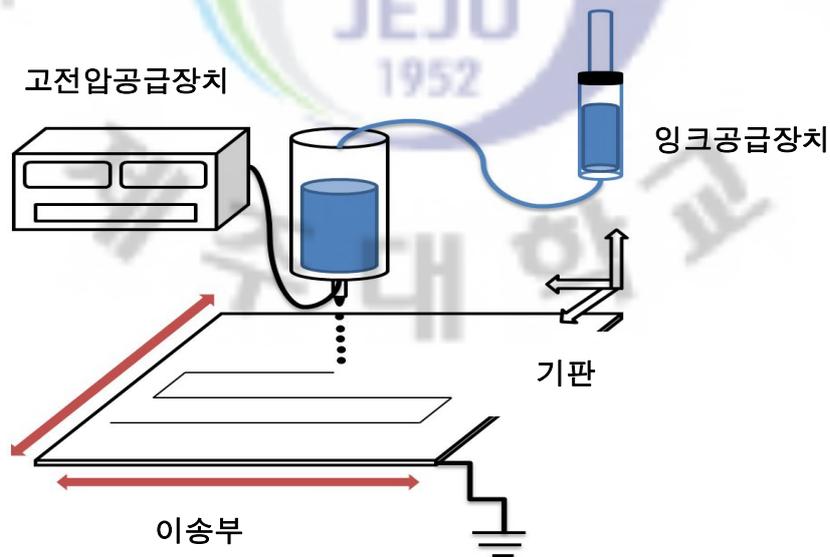


그림 3.7. 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템 구성도.

정전기력 잉크젯 프린팅 시스템은 2축 XY스테이지와 1축 수동제어기를 포함한 3축 프린팅 소재이송부와 고속카메라를 포함한 프린팅상태 확인부, 잉크공급장치로 그림 3.8.와 같이 구성하였다.

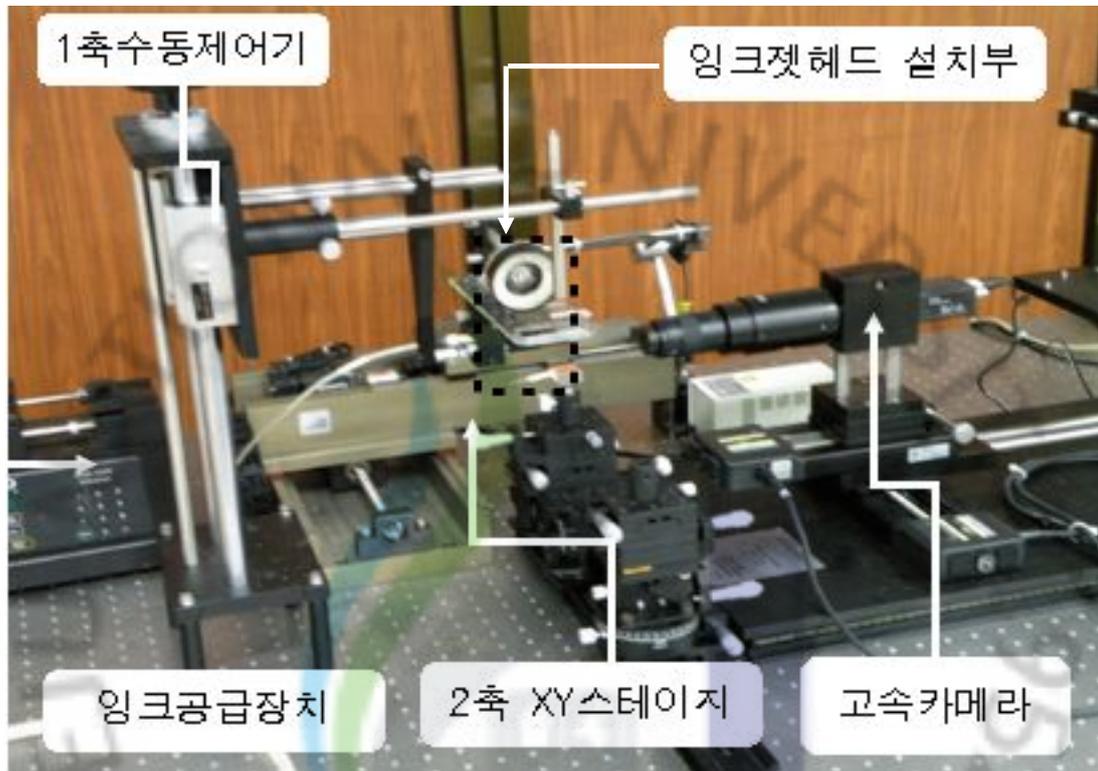


그림 3.8. 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템.

#### IV. 롤투롤 정전기력 잉크젯 프린팅 장력제어 알고리즘 연구

롤투롤 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템이란 롤투롤 연속인쇄공정 시스템에 의해 유연성 기판이 공급되고 정전기력 잉크젯 프린팅 요소기술을 이용하여 다양한 점도의 전도성 잉크 기반으로 전자 소자 및 제품을 대량 생산하는 시스템을 말하며 롤투롤 정전기력 잉크젯 프린팅 기술을 이용하여 대면적 프린팅 및 대량생산에 적합한 유연성 기판의 프린팅이 가능하다.

롤투롤 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템은 그림 4.1에서와 같이 정전기력 헤드 장치, 정밀이송장치, 마이크로 잉크공급장치, 고전압 발생·제어 장치로 구성되어 있으며 각각의 파트는 유기적인 제어를 통하여 인쇄기술을 통한 인쇄전자소재 개발에 효과적으로 사용될 수 있다.

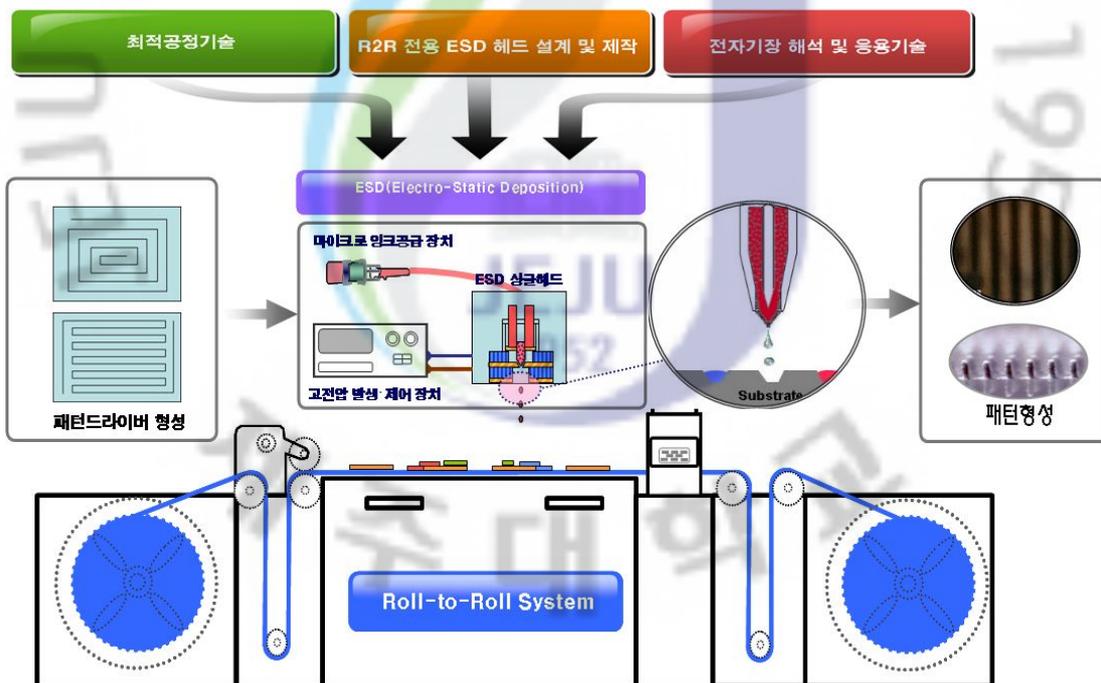


그림 4.1. 롤투롤 기반의 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템 구성도.

## 1. 롤투를 기반의 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템

일반적인 연속공정시스템에서는 인쇄전자 소재가 되는 웹 두루마리를 일정한 장력의 통제 하에 인쇄부로 공급할 수 있는 풀림(unwinding) 시스템과 인쇄전자 소재의 장력을 제어하기 위한 장력 제어 장비를 거치면서 인쇄부에 도달하기 전 웹의 실 장력에 대한 제어에 활용되는 인피딩(infeeding) 시스템, 그래비아 혹은 오프셋 프린팅 방식을 위한 프린팅(printing) 시스템, 프린팅시스템에서 프린팅된 웹의 정밀이송을 위한 아웃피딩(outfeeding) 시스템, 일정한 실 장력으로 웹의 감김을 위한 감김(winding) 시스템과 같이 각 부분을 기능적으로 구분하였다[3].

잉크젯 프린팅 공정은 노즐을 통해 토출된 미세한 잉크방울이 기판 표면에 부착되고, 용매가 건조되어 고형성분이 고착되는 것에 의해 패턴이 형성되는 과정을 진행한다. 액적의 크기는 수~수십 $\mu\text{m}$ , 직경은 수~수십 $\mu\text{m}$  내외로 기판에 부착되는 과정에서 액적의 크기가 커지게 되고 이러한 과정이 패턴의 형성에서 미세선폭형성요소로 작용한다.

본 논문에서는 이러한 각 부분별 시스템에서 프린팅시스템의 구조적인 부분을 기존의 그래비아, 오프셋 방식에서 벗어나 정전기력 기반의 잉크젯 프린팅 시스템으로 추가하여 시스템에서의 미세선폭 구현 및 대량생산이 가능한 기능적인 프린팅시스템 구현한다.

### 1) 장비설계 시 고려사항

현재 프린팅 기술에 대한 다양한 산업분야에서의 적용이 이루어지고 있으며 이러한 기술을 기반으로 인쇄전자 응용소재에서 요구하는 보다 진보적인 프린팅 기술 및 공정장비 개발에 대한 필요성이 증가하고 있다.

잉크젯 프린팅 기술의 장점은  $\mu\text{m}$ 단위의 정량 제어 특성, 디지털방식의 유연 제조방식, 고안정 고속 프린팅, 비접촉 직접 프린팅 방식, 환경 친화적인 기술, 대

량생산에 따른 저비용의 소재 및 공정비용등으로 단순히 프린팅 하는 기술을 넘어 인쇄 기관의 특성, 정확한 선폭의 구현 및 공정신뢰성, 응용소재의 성능 등에 대한 높은 기술수준이 뒷받침되어야 하는 기술이다. 본 연구에서는 이러한 기술을 바탕으로 웹 이송 기반의 롤투롤 시스템을 위한 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템에 대한 설계 및 그에 따른 설계시 고려사항에 대한 내용을 표 4.1과 표4.2로 나누어 롤투롤 시스템과 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템으로 정리하였다.

표 4.1. 웹 이송 롤투롤(Roll to Roll) 시스템의 고려사항

번호	목록	내용
1	장비	이송/공정속도, 건조기, 스펠길이, 롤크기
2	소재	인쇄기관, 소재변형률
3	잉크	점도,표면장력,입자크기,분산,전도성,음속도,콜로이드안정성,건조특성,캐리어종류
4	제어기	제어안정성, 동기화

표 4.2. 잉크젯 프린팅 시스템의 고려사항

번호	목록	내용
1	잉크특성	점도,표면장력,입자크기,분산,전도성,음속도,콜로이드안정성,건조특성,캐리어종류
2	젯팅특성	주파수,젯팅속도,잉크도출균일성, 잉크도출크기조절,직진성,노즐젖음특성,잉크적합성,노즐막힘,젯팅신뢰성,젯팅조건
3	잉크/소재 상호작용	소재 젖음온도,피짐특성,건조시간 및 온도,피면극성
4	젯팅헤드	헤드 형태/재료,노즐크기,채널젖음특성
5	결과사양	선두께,선폭,선가장자리균일성,접착성,소결방법,소결온도, 소결시간,전도성,장시간열적신뢰성,고온저항특성,내화확성 프린팅 속도,잉크젯 드라이브
6	장비	정렬,반복성,잉크공급방법,젯팅높이,유지보수,진동,패터닝 순서

## 2) 기구부 설계 및 개발

롤투롤 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템은 그림 4.2와 같이 웹 이송을 위한 정밀제어 부분과 정전기력 잉크젯 프린팅을 위한 프린팅 부분으로 구분된다. 전체적인 시스템의 롤 부착형태는 외팔보형태의 프린팅시스템으로 구성하였다. 전체 시스템으로 각 파트별로 재구성이 가능하도록 탈부착이 쉽게 설계되어 있으며 잉크젯 프린팅 파트와 웹 이송 파트의 설정순서를 재조정하여 다양한 형태의 응용기술로의 시스템 활용이 가능하다[7].

전체적인 시스템의 크기는 높이 1.6미터, 좌우길이 3미터, 앞뒤의 폭은 1.5미터로 도면의 가운데 시스템의 전체 설계사진에서 크게 3부분으로 나누어 첫 번째 파트와 세 번째 파트에는 폴림 롤, 감김 롤, 피딩 롤, 웹 가이드 롤, 텐서 롤 등의 웹 이송제어에 필요한 디바이스를 장착하는 플레이트로 구성되고 중앙에는 잉크젯 프린팅의 헤드부를 장착하여 패터닝 형성을 위한 3축 스테이지가 장착되고 이송되는 웹의 프린팅을 위해 고정을 위한 롤을 부착하게 된다.

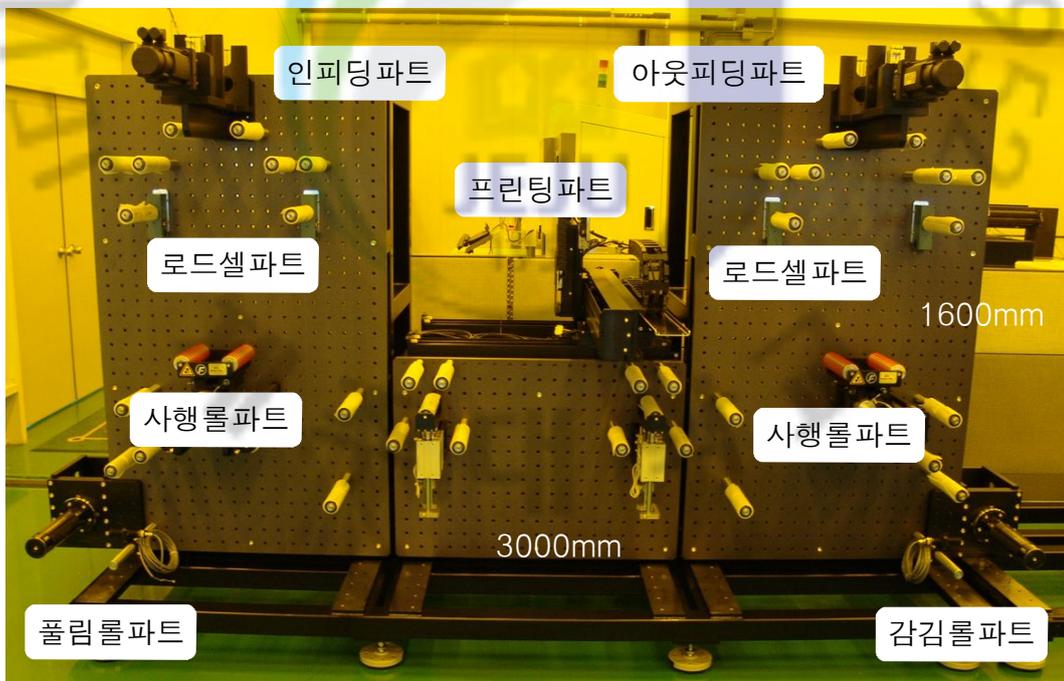


그림 4.2. 롤투롤 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템

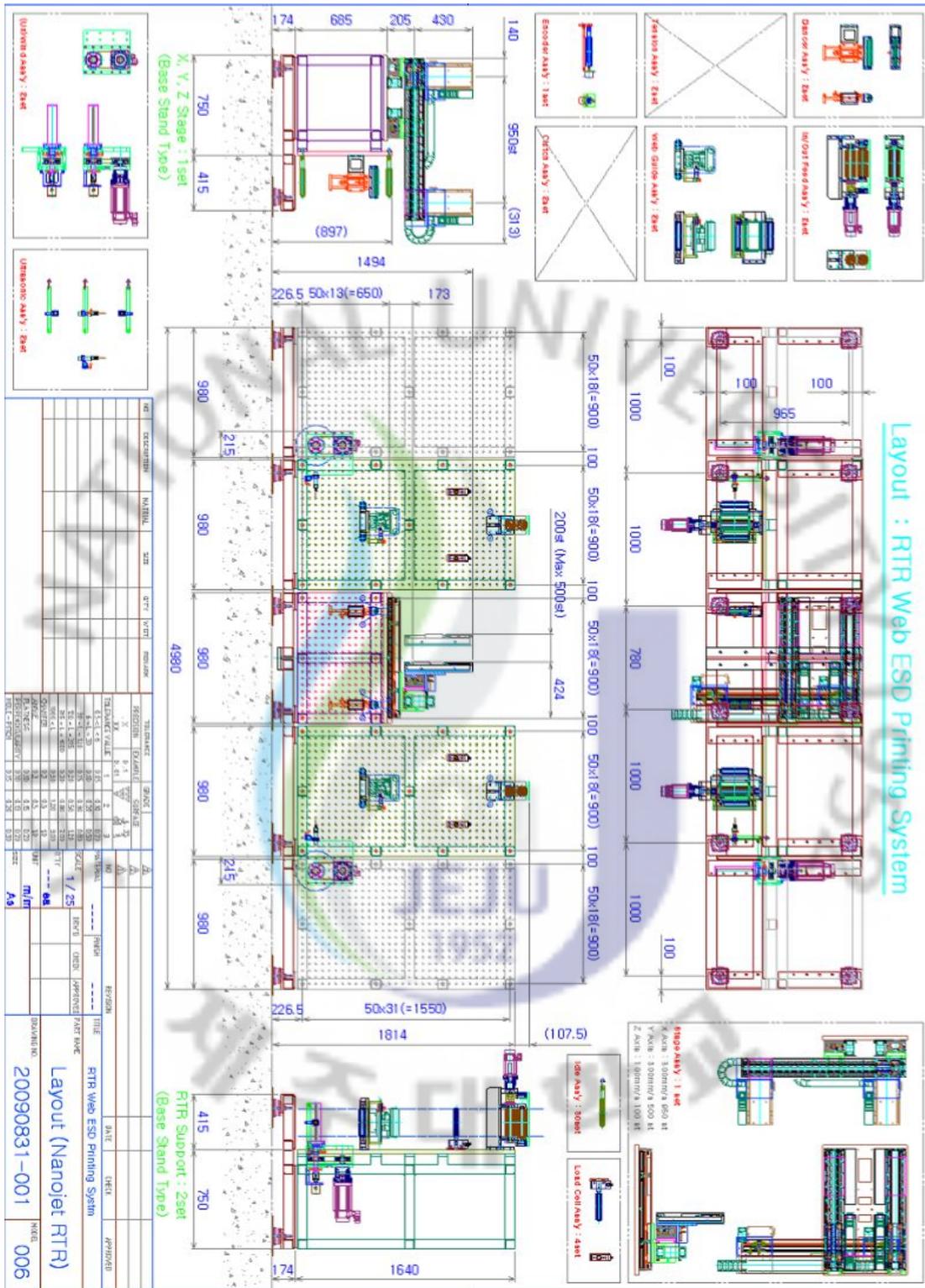


그림 4.3. 볼투볼 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템 설계도면.

(1) 웹 이송부

기존 롤투롤 웹 이송 시스템에서는 풀림롤과 감김롤의 고정위치 및 고정방법에 의해 모터의 진동에 의한 시스템 전체의 떨림 및 그에 따른 측정센서의 왜란 영향이 큰 문제점으로 지적되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 그림 4.4에서와 같이 각 풀림 롤과 감김 롤의 고정을 고정판(bracket)를 적용하여 이중으로 고정하였다. 그리고 롤의 무게와 웹 두루마리를 장착하였을 경우의 하중에 의한 롤의 처짐과 이에 따른 웹의 치우침등을 막기 위해 모터와 롤의 사이에 커플러(coupler)와 롤의 치우침을 막는 고정파트를 추가하였다. 표 4.3는 각 감김롤과 풀림롤에 사용된 장비에 대한 내용을 포함하고 있다. 웹 두루마리의 미끄러짐을 방지하기 위해 에어 샤프트(air shaft)를 사용하였다. 에어 샤프트는 공압에 의해 롤과 웹 두루마리(web scroll)가 접촉하는 부분이 팽창하여 웹 두루마리를 고정하는 기능을 가지고 있다.

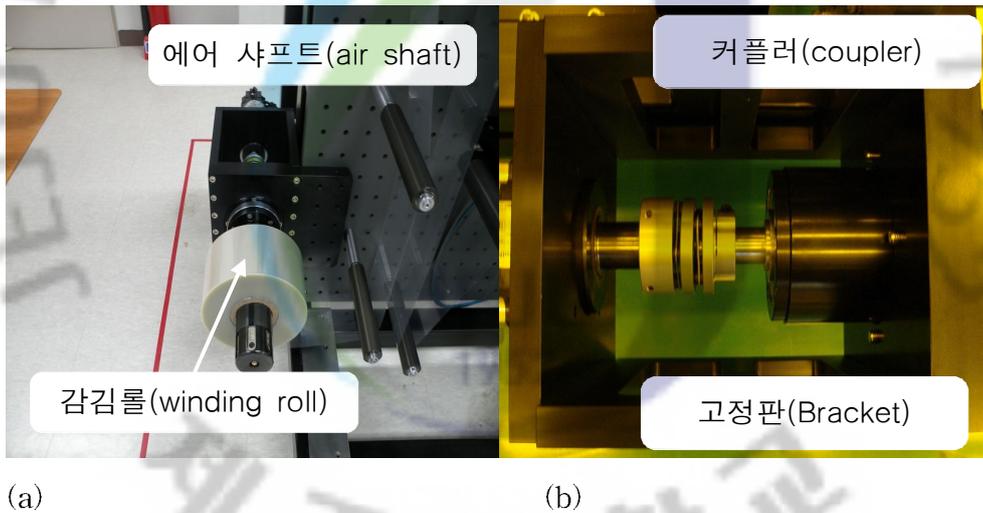


그림 4.4. 시스템의 (a) 감김롤, (b) 고정판 및 커플러 부착형태.

표 4.3. 풀림 롤 및 감김 롤 구성

	구성	
감김 롤	에어 샤프트 + 감속기 + 서보모터	커플링
풀림 롤	에어 샤프트 + 감속기 + 서보모터	커플링

## (2) 헤드 이송부

3축 스테이지 제어를 위한 리니어가이드의 설치는 그림 4.5에서와 같이 박스형태의 시스템 몸체의 상부에 부착하게 되는데 시스템 몸체의 앞부분에 롤이 부착하게 되고 이를 따라 이송되는 웹에 프린팅하기 위해 헤드의 위치를 박스형태 몸체 앞부분으로 나오게 되어 이에 따른 스테이지의 무게중심의 문제점을 나타내게 되었다. 이에 대한 해결방안으로 리니어가이드의 설치 방법으로 Y, Z축 스테이지의 고정 및 이송을 담당하는 X축 리니어가이드를 시스템 몸체위쪽에 평행으로 2축을 설치하여 무게중심 및 이송문제점을 해결하였다.

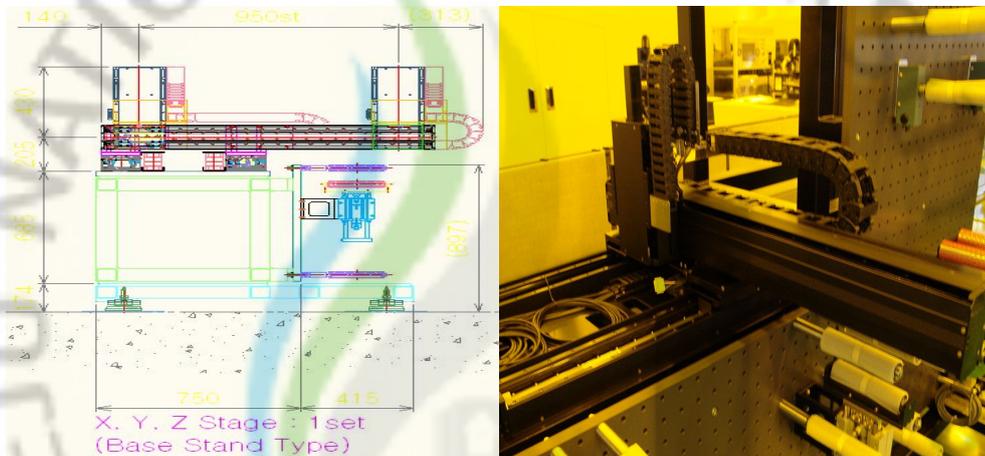


그림 4.5. 시스템의 3축 XYZ스테이지.

3축 스테이지에 대한 성능 및 각 부분별 구성요소를 표 4.4로 나타내었다.

표 4.4. 3축 스테이지 구성

스펙	
축이동 제어	X, Y, Z 3축제어 *. X : Across - Mqx 950st *. Y : Length - Max 500st *. Z : Head Height - Max 100st
축별 최대 속도	X 축 : 300mm/sec      리니어 모터 Y(2) 축 : 300mm/sec      리니어 모터 Z 축 : 100mm/sec      AC서보모터
포지션 제어	±10 $\mu$ m (Linear Scale에 준함.)
반복결정도	±5 $\mu$ m (Linear Scale에 준함.)
정밀도	±15 $\mu$ m
리니어 스케일	1 $\mu$ m 해상도      Renishaw社
방진	Base Frame 방진 마운트 설치
베이스프레임	Square Steel Pipe + Aluminum Plate Side Hole Aluminum Plate

### (3) 사행제어부

웹 이송기반의 롤투롤 시스템에서 감김 롤, 풀림 롤에 장착된 웹의 이송에 관련하여 롤 두루마리의 직경과 웹 이송속도의 관계는 웹 이송초기 시 롤의 직경이 낮은 경우 와 롤의 직경이 커지는 경우 두 가지에서 속도의 변화를 주어야 한다. 속도의 변화를 통하여 웹 두루마리에서 웹의 상태를 일정하게 유지시키게 된다.



그림 4.6. 시스템의 (a) 초음파센서, (b) 웹 가이드 롤 설계 도면.

웹의 감김 롤 및 풀림 롤에 장착된 웹 두루마리의 직경을 측정하기 위해 그림 4.7(a)의 형태와 같이 초음파 센서를 부착하여 측정값을 컨트롤러로 전송한다. 웹의 사행제어를 위한 웹 가이드 롤은 그림 4.7(b)와 같이 상부에 장착된 일정한 간격의 평행 롤과 웹의 이송각을 직각으로 설정하여 진행할 수 있도록 나머지 롤의 배치를 상부의 롤과 직각이 이루어지도록 한다.

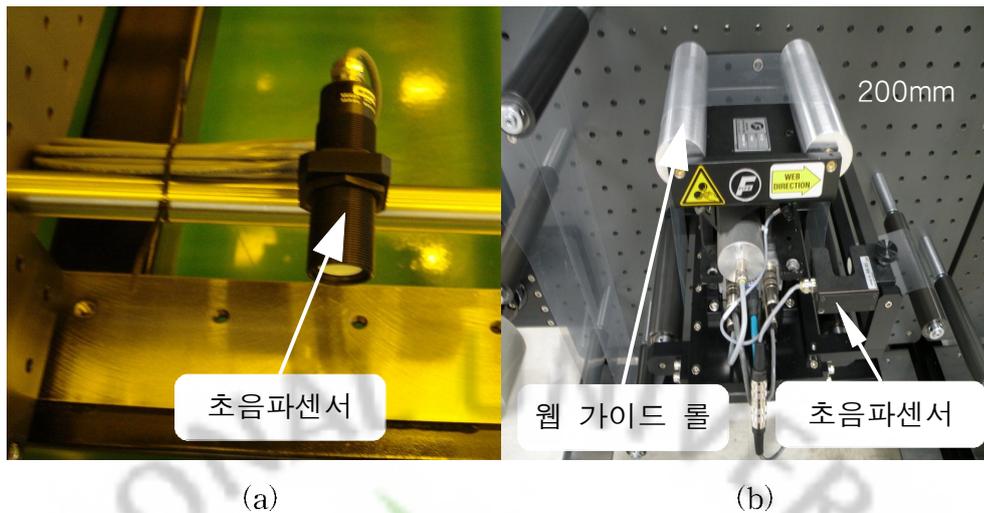


그림 4.7. 시스템의 (a) 초음파센서, (b) 웹 가이드 롤.

웹 가이드 롤의 폭은 200mm로 필요 이상의 프린팅 공간은 프린팅 상태에 영향을 미칠 수 있으므로 웹의 프린팅 공간을 폭은 150(mm)~180(mm)로 제한하여 설정하였고 웹 가이드 롤 파트에 포함된 “ㄷ”자 형태의 초음파센서를 통하여 이동되는 웹의 모서리부분의 위치를 검출하여 롤의 좌우 이동폭을 결정한다.

표 4.5. 웹 가이드 롤 구성

	구성	
웹 가이드	200mm 오프셋 피봇가이드	FIFE社
	초음파센서 SE-31 + 가이드	Maxcess社
	일반롤 + 서포트베이스	

표 4.6. 초음파 센서 구성

	구성
초음파 센서	Magpwr Ultrasonic Sensor +Square Steel Pipe + Steel Plate

#### (4) 장력제어부

시스템에서 장력을 일정하게 유지하고 연속적인 웹의 이송을 위해서는 피딩 롤을 삽입하여 속도제어를 통해 시스템 내에서 불규칙적인 장력변화를 방지하여야 한다. 그림 4.8은 피딩롤 및 텐서롤의 실제 시스템에 부착된 사진으로 각 피딩롤과 텐서롤은 상하운동을 통해 능동적인 웹의 장력제어를 담당하게 된다. 피딩롤의 제어는 AC 서보모터, 웹에 일정한 압력을 통해 미끄러짐을 방지하기 위한 공압 실린더에 의해 제어되는 공압롤(air press roll)을 삽입하였다. 또한 그림 4.8에 나와 같은 텐서 롤을 삽입하여 웹의 처짐 및 웹과 잉크젯헤드의 간격을 일정하게 유지하고 시스템에 미치는 외부영향을 줄이기 위해 선정하였다.

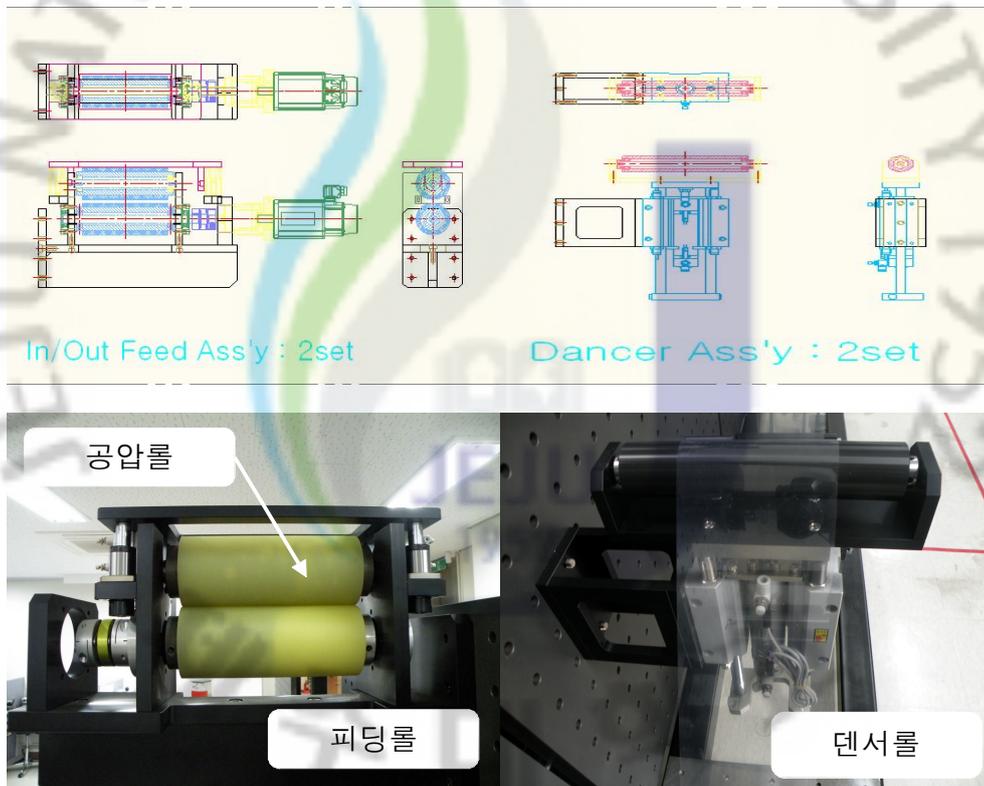


그림 4.8. 인/아웃 피딩 롤 및 텐서 롤 설계도면 및 실제사진.

표 4.7. 텐서롤 구성

구성		
텐서롤	실린더 (100st) + 일반롤	가이드 실린더

표 4.8. 피딩롤 구성

구성		
인피딩롤	서보모터 + 롤러 + 실린더	데스크 커플링
아웃피딩롤	서보모터 + 롤러 + 실린더	데스크 커플링

로드셀은 웹 표면에 걸리는 힘을 측정하는 센서로 그림 4.9와 같이 시스템에 장착된 외팔보 형태의 로드셀로 압력인식 방향에 따라 그 장착위치 및 방향을 달리하여 실제 웹에 의한 장력변화를 측정하도록 하였다. 본 시스템에서의 로드셀은 장력 인식방향이 단방향으로 설정되어 있어 이에 따른 다방향 장력인식문제점을 해결하기 위해 로드셀의 뒷부분에 고정판을 추가하여 여러방향으로의 장착이 가능하도록 하였다. 로드셀을 장착하기 위해서는 로드셀을 통과하여 만나게 되는 일반 롤과 로드셀 롤의 각을 같도록 설정해주어야 하고 디바이스의 한계 압력보다 큰 입력이 작용할 경우 파괴되는 상황이 발생할 수 있으므로 실제 로드셀의 최대압력을 설정하여 용량 설정을 해주어야 한다.

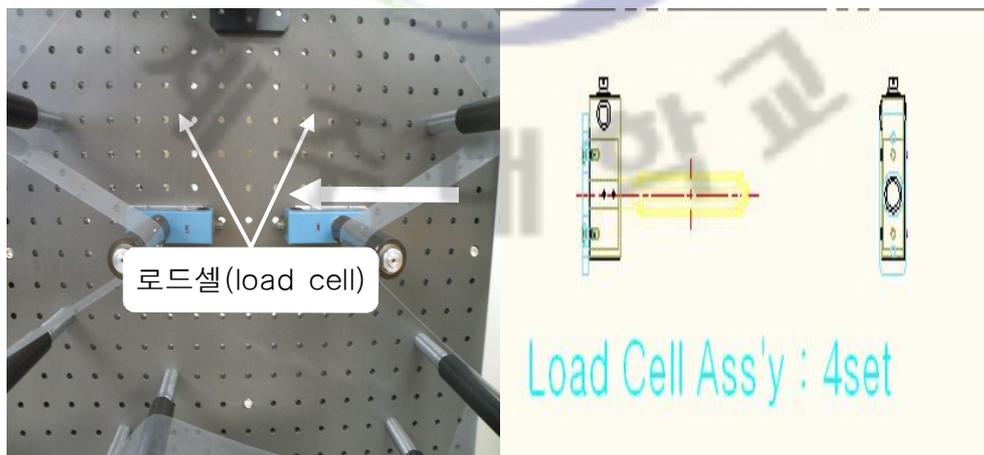


그림 4.9. 로드셀의 도면 및 실제사진

## 2. 다중스팬 시스템에서의 장력제어 알고리즘

일반적인 웹 이송 기반의 롤투롤 시스템의 제어는 크게 장력제어, 사행제어, 인압제어으로 나눌 수 있으며 전체 시스템의 장력을 제어하기 위해서는 감김 롤과 풀림 롤의 속도제어, 피딩 롤의 속도제어를 바탕으로 안정적인 장력의 유지에 활용된다. 또한 좌우이동이 가능한 평형 롤을 이용하여 시스템의 웹 사행제어를 유도한다[3].

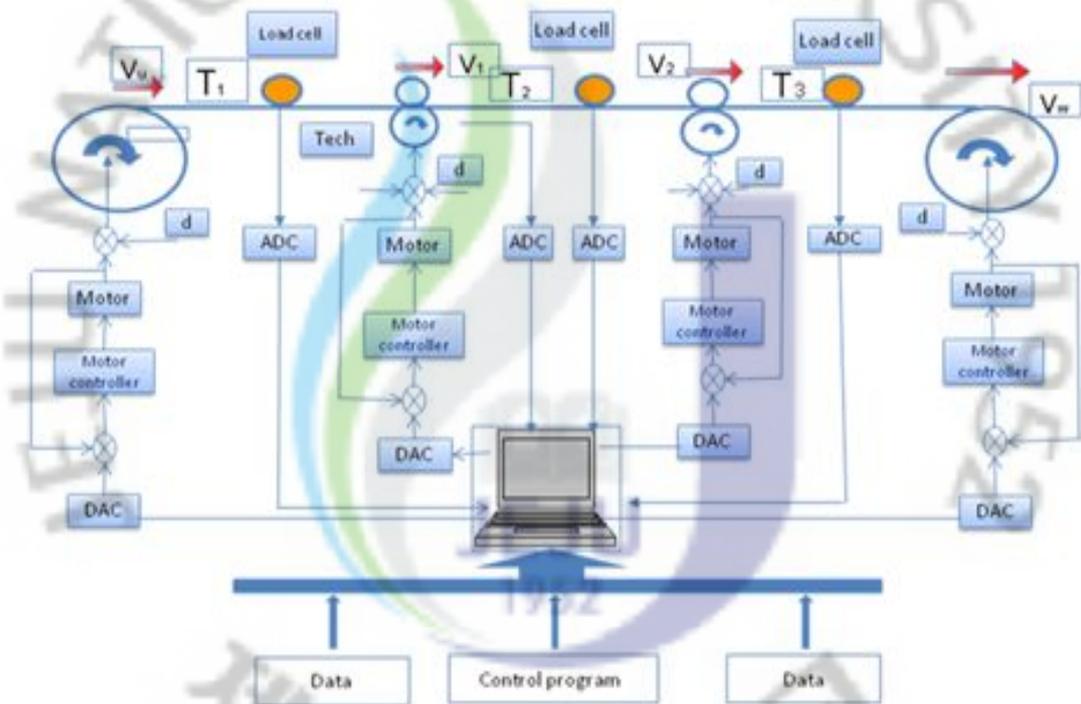


그림 4.10. 제어시스템의 블록다이어그램.

본 논문을 위한 정전기력 잉크젯 프린팅 기반의 롤투롤 웹 이송시스템에서는 그림 4.10의 시뮬레이션 블록다이어그램을 바탕으로 장력제어를 위한 제어 알고리즘으로 Back-Stepping 제어 알고리즘을 사용하여 장력제어에 대한 시뮬레이션을 진행하였고 결과 값을 PID제어 알고리즘의 시뮬레이션의 결과 값과 비교하여 나타내었다.

1) Back-stepping 제어 알고리즘

Back-Stepping 제어 알고리즘의 반복적인 구조 때문에 설계자는 알려진 시스템 및 각 외부 서브시스템을 안정화시키는 새로운 제어 알고리즘으로 생각하고 설계를 시작할 수 있다. 마지막 외부제어기에 도달했을 때 제어 알고리즘의 처리가 끝나기 때문에 Back-Stepping 제어 알고리즘이라 한다.

표 4.9. Back-Stepping 제어 알고리즘 설계 및 이점

Back-Stepping 제어 알고리즘 설계	Back-Stepping 제어 알고리즘의 이점
시스템의 분산화	높은 정밀도
Back-Stepping, 추적접근 방식	넓은 대역폭에서 안정적
Lyapunov 함수 제어	PC기반 알고리즘의 적용이 용이

Back-Stepping 제어 알고리즘에서는 퍼스널 컴퓨터를 유체 마찰력과 관성변화로 인한 웹의 속도 및 장력을 기준 값과 비교하여 일정하게 유지하기 위한 제어 토크를 생성하는 하나의 컨트롤러로 정의하고 로드셀, 엔코더, 회전속도계, 초음파센서는 피드백 신호를 얻기 위해 사용된다. 또한 제어 알고리즘에서는 이러한 속도, 장력, 반경변화에 대한 피드백 값을 바탕으로 시스템을 제어하게 된다. 롤투롤 시스템의 장력제어를 위한 모델은 그림 4.11과 같이 3스팬을 갖는 롤투롤 시스템으로 설정하였다. 또한 각 스펠과 롤의 이름은 약자(풀림롤:u, 감김롤:w)와 숫자( $T_1/T_2/T_3/V_1/V_2/V_3$ )를 이용하여 나타내었다.

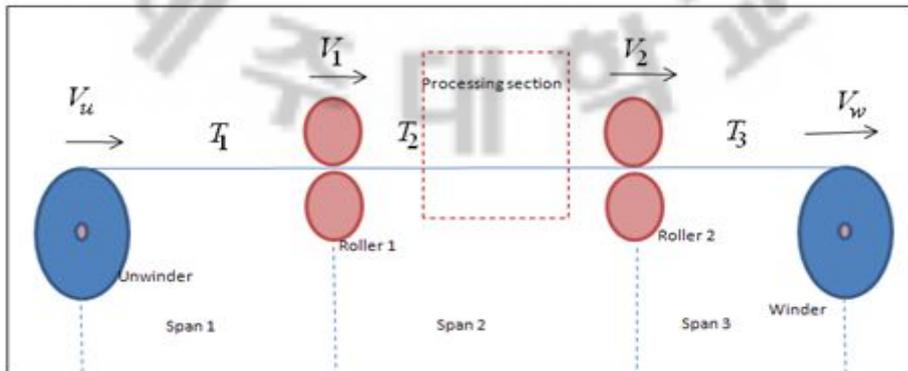


그림 4.11. 롤투롤(Roll to Roll) 시스템 모델.

Back-Stepping 제어방법은 Lyapunov함수를 이용하여 제어 알고리즘을 유도하는 방법으로 동력학 방정식을 가지고 유도하기 때문에 동력학 방정식을 정확하게 알고 있어야 하고, 그 정확도에 따라서 성능에 영향을 미치기 때문에, 공력계수등에 불확실성이 있을 경우 어려움이 있다. 본 시스템에서 Back-Stepping 제어 알고리즘을 적용하여 연속공정시스템에서의 장력제어에 대한 결과를 시뮬레이션을 통하여 PID제어 알고리즘과 비교하여 정리하였다. 이를 위해 시뮬레이션에 대한 가정을 설정하였다.

표 4.10. 장력제어 시뮬레이션에 대한 가정

가정
○ 웹의 미끄러짐 발생은 없음
○ 웹의 영구적인 변형은 없음
○ 로드셀 역학부분은 무시됨
○ 온도, 자기장과 같은 요소는 시스템의 장력과 속도에 영향이 없는 것으로 봄

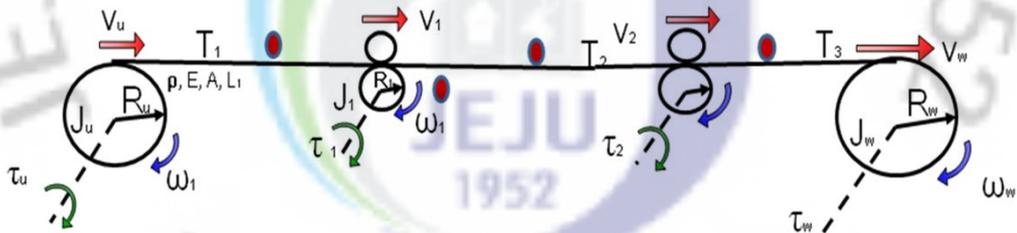


그림 4.12. 3스팬(span) 장력제어 수학적 모델링.

롤투롤 시스템에서의 다중 스펀 웹의 장력제어에 대한 동적 방정식을 미분방정식의 형태로 (1)~(7)로 나타내었다.

$$\dot{T}_1 = k_1 V_1 T_1 + k_2 (V_1 - V_u) \quad (1)$$

$$\dot{V}_u = k_3 T_1 - B_u V_u + k_4 \tau_u \quad (2)$$

$$\dot{V}_1 = k_5(T_2 - T_1) - B_1 V_1 + k_6 \tau_1 \quad (3)$$

$$\dot{T}_2 = k_7 V_2 T_2 + k_8 V_1 T_1 + k_9 (V_2 - V_1) \quad (4)$$

$$\dot{V}_2 = k_{10}(T_3 - T_2) - B_2 V_2 + k_{11} \tau_2 \quad (5)$$

$$\dot{T}_3 = k_{12} V_w T_3 + k_{13} V_2 T_2 + k_{14} (V_w - V_2) \quad (6)$$

$$\dot{V}_w = k_{15} T_3 - B_w V_w + k_{16} \tau_w \quad (7)$$

(1)~(7)식은 3-스팬 시스템에서의 각 스펠의 장력, 이송속도에 대한 동적방정식으로 위의 (1)~(7)식에서

$$k_1 = -1/L_1, k_2 = EA/L_1, k_3 = R_u^2/J_u, k_4 = -R_u/J_u, k_5 = R_1^2/J_1$$

$$k_6 = R_1/J_1, k_7 = -1/L_2, k_8 = 1/L_2, k_9 = EA/L_2, k_{10} = R_2^2/J_2$$

$$k_{11} = R_2/J_2, k_{12} = -1/L_3, k_{13} = 1/L_3, k_{14} = EA/L_3, k_{15} = -R_w^2/J_w, k_{16} = R_w/J_w$$

$T_1, T_2, T_3$  = 각 스펠에서의 웹 장력값

$V_u, V_l, V_2, V_w$  = 다중 스펠을 구성하는 각 일반롤1, 일반롤2, 풀림 롤, 감김 롤의 웹과의 접촉면에서의 접선속도

$J_u, J_l, J_2, J_w$  = 각 풀림 롤, 감김 롤, 일반롤1, 일반롤2에서의 롤과 모터간의 관성모멘트

$R_u, R_l, R_2, R_w$  = 각 풀림 롤, 감김 롤, 일반롤의 반경

$L_1, L_2, L_3$  = 각 스펠의 길이

$B_u, B_l, B_2, B_w$  = 각 풀림 롤, 감김 롤, 일반롤1, 일반롤2의 유체마찰계수

$\tau_u, \tau_l, \tau_2, \tau_w$  = 각 풀림 롤, 감김 롤, 일반롤1, 일반롤2의 제어토크

$$\dot{T}_i = -\frac{1}{L_i}V_iT_i + \frac{1}{L_i}V_{i-1}T_{i-1} + \frac{EA}{L_i}(V_i - V_{i-1}) \quad (i = 1,2,3 ; j = 0,1,2,3) \quad (8)$$

$$V_j = \frac{R_j^2}{J_j}(T_{j+1} - T_j) - B_jV_j + \frac{R_j}{J_j}\tau_j \quad (i = 1,2,3 ; j = 0,1,2,3) \quad (9)$$

식(8), 식(9)는 위의 조건을 포함하여 재정리한 각 스펀의 장력 및 속도에 대한 미분방정식 형태의 동적 방정식이다.

$E$  = The Young's modulus of materials

$A$  = 웹의 단면적

$h$  = 웹의 두께

풀림 톨과 감김 톨의 시간에 따른 관성변화는 다음의 식을 통하여 정의된다.

$$R_u = R_{u0} - \frac{h}{2\pi}\omega_u$$

$$R_w = R_{w0} + \frac{h}{2\pi}\omega_w$$

$\omega_u, \omega_w$  = 각 풀림 톨과 감김 톨의 각속도

위의 식을 통하여

$$\tau_u = (-c_2(V_u - \alpha_1) - k_3T_1 + B_uV_u + \dot{\alpha}_1)/k_4 \quad (10)$$

$$\tau_1 = (-c_3(V_1 - V_{ref}) - k_5(T_2 - T_1) + B_uV_u + \dot{V}_{ref})/k_6 \quad (11)$$

$$\tau_2 = (-c_5(V_2 - \alpha_2) - k_{10}(T_3 - T_2) + B_2V_2 + \dot{\alpha}_2)/k_{11} \quad (12)$$

$$\tau_w = (-c_7(V_w - \alpha_3) - k_{15}T_3 + B_wV_w + \dot{\alpha}_3)/k_{16} \quad (13)$$

장력제어 시스템에서의 각 풀림톨, 감김톨, 일반 톨에서의 제어토크를 위의 식 (10)~(13)과 같이 정한다.

$C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$  = 성능을 위한 조정 가능한 이득

$T_{1ref}, T_{2ref}, T_{3ref}, V_{ref}$  = 기준 성능값

위의 토크제어 식에서 각  $\alpha$ 의 값을 다음과 같이 설정하였다.

$$\alpha_1 = V_1 + (c_1(T_1 - T_{1ref}) + k_1 V_1 T_1) / k_2$$

$$\dot{\alpha}_1 = ((1 + k_1 T_1)(k_5(T_2 - T_1) - B_1 V_1 + k_6 \tau_1) + (c_1 + k_1 V_1)(k_1 V_1 T_1 + k_2(V_1 - V_u))) / k_2$$

$$\alpha_2 = (-c_4(T_2 - T_{2ref}) - k_8 V_1 T_1 + k_9 V_1) / (k_7 T_2 + k_9)$$

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_2 = & (-c_4(k_7 V_2 T_2 + k_8 V_1 T_1 + k_9(V_2 - V_1)) - k_8 V_1(k_1 V_1 T_1 + k_2(V_1 - V_u))) \\ & + (k_8 T_1 + k_9)(k_5(T_2 - T_1) - B_1 V_1 + K_6 \tau_1) / (k_7 T_2 - k_9) \\ & + (c_4(T_2 - T_{2ref}) + k_8 V_1 T_1 - k_9 V_1) k_7 (k_7 V_2 T_2 + k_8 V_1 T_1 + k_9(V_2 - V_1)) / (k_7 T_2 + k_9)^2 \end{aligned}$$

$$\alpha_3 = (-c_6(T_3 - T_{3ref}) - k_{13} V_2 T_2 + k_{14} V_2) / (k_{12} T_3 + k_{14})$$

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_3 = & (-c_6(k_{12} V_w T_3 + k_{13} V_2 T_2 + k_{14}(V_w - V_2)) - (k_{13} T_2 + k_{14})(k_{10}(T_3 - T_2) - B_2 V_2 + k_{11} \tau_2) \\ & - k_{13} V_2(k_7 V_2 T_2 + k_8 V_1 T_1 + k_9(V_2 - V_1))) / (k_{12} T_3 + k_{14})^2 \end{aligned}$$

PID 제어 알고리즘과 Back-Stepping 제어 알고리즘에서의 시뮬레이션 컨디션을 다음과 같이 나타내었다. 표 4.12의 각 두 가지 케이스의 기준장력과 그림 4.13의 속도변화에 따른 각 제어 알고리즘의 실제 장력변화를 시뮬레이션을 통하여 확인하고 이를 비교 분석하였다.

표 4.11. 기준 장력 파라미터

	시뮬레이션 컨디션
기준 장력 파라미터	Case 1 : $T_{1ref} = 3\text{kgf}, T_{2ref} = 2\text{kgf}, T_{3ref} = 3\text{kgf}$
	Case 2 : $T_{1ref} = 1.5\text{kgf}, T_{2ref} = 2\text{kgf}, T_{3ref} = 3\text{kgf}$

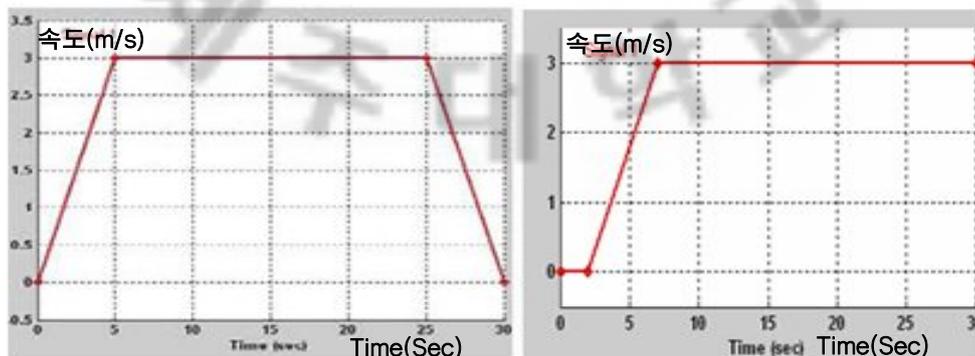


그림 4.13. 기준 웹 속도 변화 파라미터.

## 2) 장력제어 시뮬레이션

그림 4.14는 장력제어 시뮬레이션을 진행하기 위해 매트랩 기반의 시뮬레이션 블록다이어그램으로 다중스팬의 장력제어를 각 롤의 기준속도와 기준장력을 설정하고 이를 통하여 각 롤의 제어토크가 식에 의해 입력이 되면 각 인접 롤에서의 장력에 인한 영향을 포함하는 것으로 설정하여 장력제어 시뮬레이션이 진행 된다.

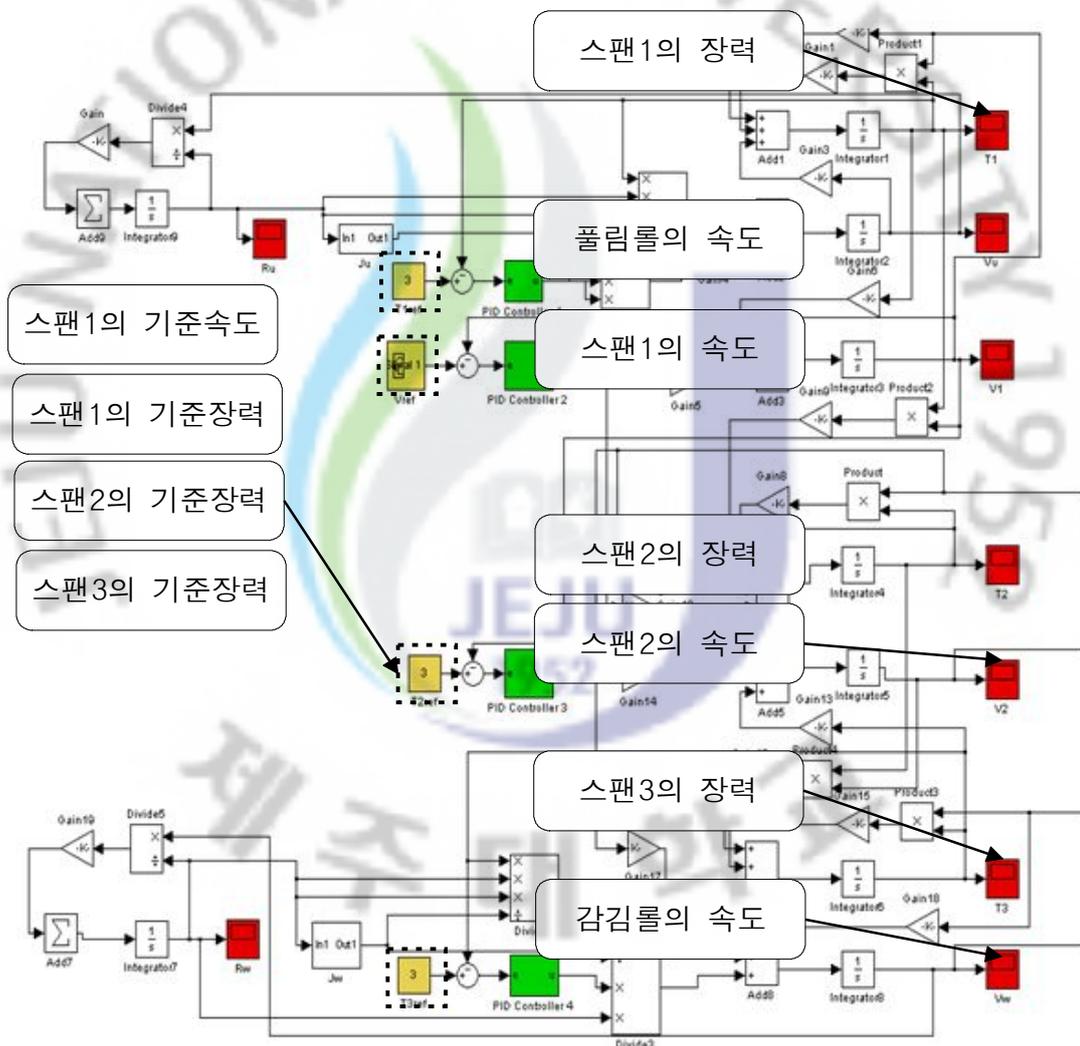


그림 4.14. 3스팬(span) 롤투롤 시스템의 시뮬레이션 블록다이어그램.

(1) PID제어 알고리즘을 이용한 장력제어 시뮬레이션

위의 시뮬레이션에 대한 조건과 파라미터를 통하여 PID제어 알고리즘을 사용한 장력제어 알고리즘의 시뮬레이션 결과를 확인한다. 또한 표 4.13의 PID의 이득은 유전 알고리즘(Genetic algorithm)을 이용하여 얻었다. 유전 알고리즘이란 해의 세트를 변수로 하여 하나의 데이터로 묶고, 이것을 유전자로 이용한다. 그림 4.15에서와 같이 처음에 몇 개의 유전자를 준비하여, 각각을 평가함수로 평가하여 보다 적합도가 높은 유전자를 남긴다. 남은 유전자의 조합을 생성하여 새로운 유전자를 만들고, 마찬가지로 평가함수로 평가를 한다. 이러한 조작을 몇 세대에 걸쳐 반복하면, 점점 최적의 해에 가까워지는 수법이다[11].

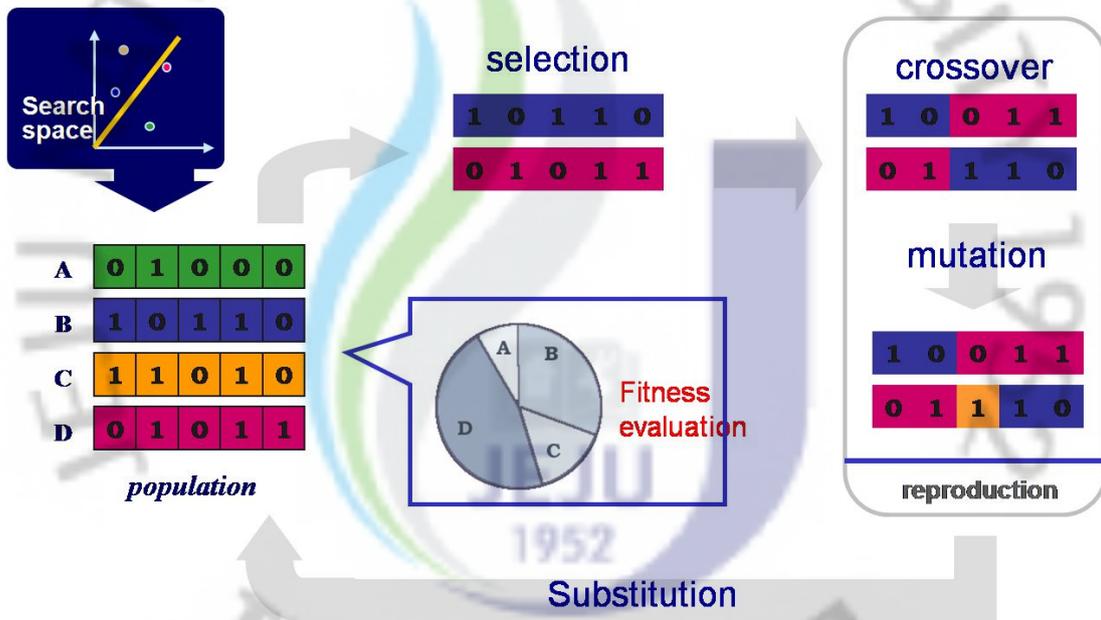
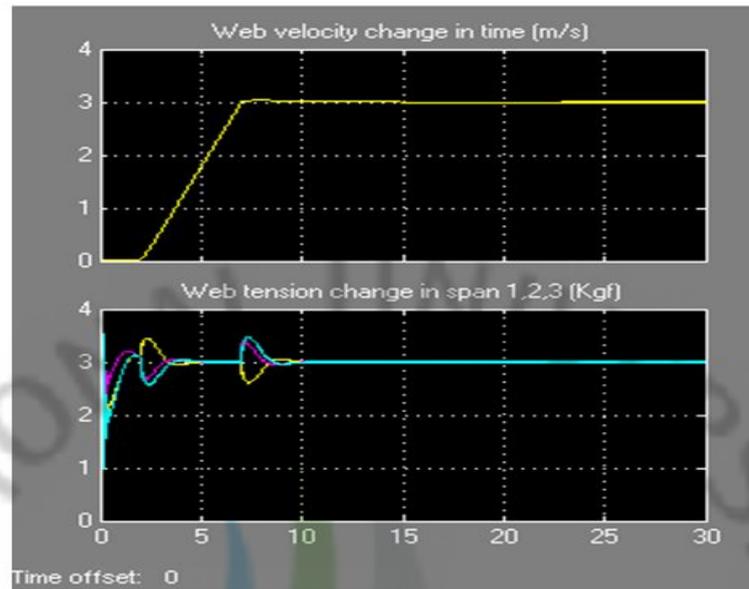


그림 4.15. 유전 알고리즘의 구조.

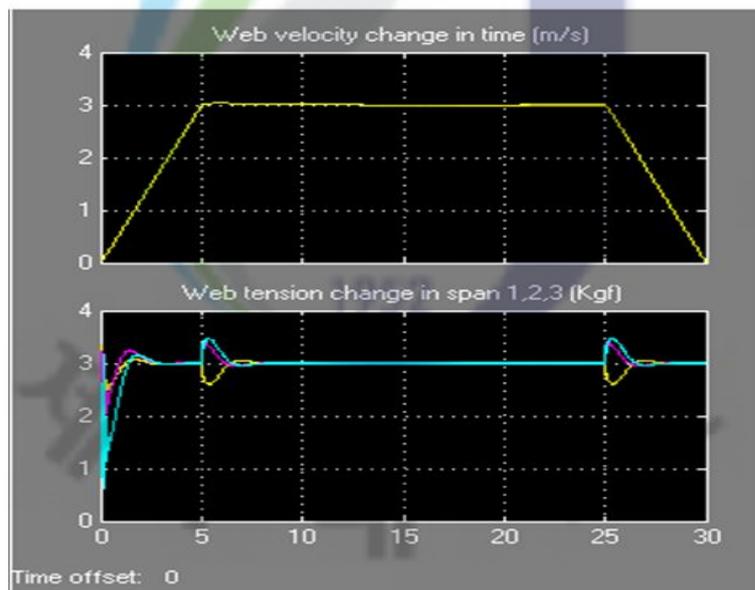
표 4.12. PID 제어 알고리즘의 이득

이득(PID) - 유전자 알고리즘(genetic algorithm)	
PID 1	$K_p = 0.05, K_i = 0.5, K_d = 0.06$
PID 2	$K_p = 0.6, K_i = 0.3, K_d = 0.5$
PID 3	$K_p = 0.04, K_i = 0.4, K_d = 0.03$
PID 4	$K_p = 0.04, K_i = 0.4, K_d = 0.05$

case 1 :  $T_{1ref} = 3\text{kgf}$ ,  $T_{2ref} = 2\text{kgf}$ ,  $T_{3ref} = 3\text{kgf}$



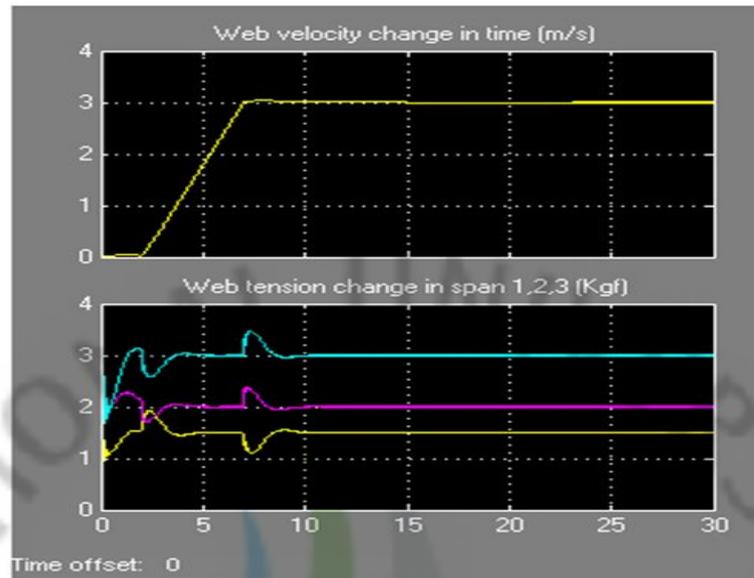
— Web tension change in time of span 1  
— Web tension change in time of span 2  
— Web tension change in time of span 3



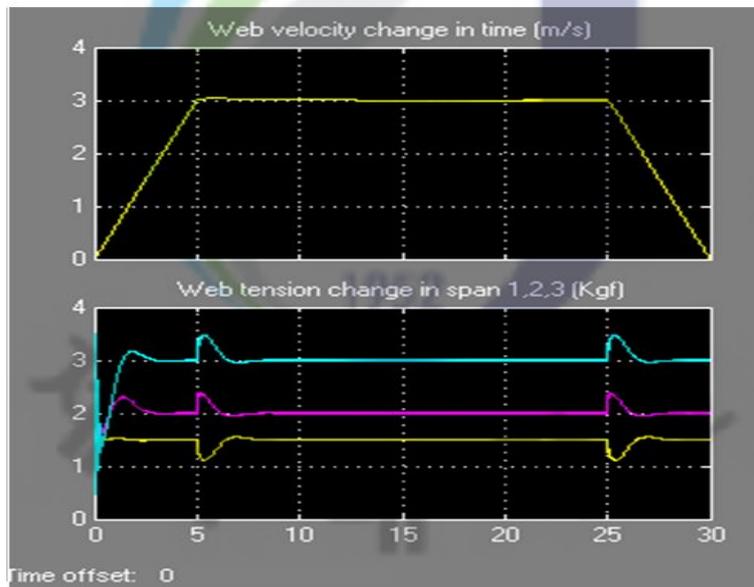
— Web tension change in time of span 1  
— Web tension change in time of span 2  
— Web tension change in time of span 3

그림 4.16. Case1의 시뮬레이션 결과(PID제어 알고리즘).

case 2 :  $T_{1ref} = 1.5\text{kgf}$ ,  $T_{2ref} = 2\text{kgf}$ ,  $T_{3ref} = 3\text{kgf}$



- Web tension change in time of span 1
- Web tension change in time of span 2
- Web tension change in time of span 3



- Web tension change in time of span 1
- Web tension change in time of span 2
- Web tension change in time of span 3

그림 4.17. Case2의 시뮬레이션 결과(PID제어 알고리즘).

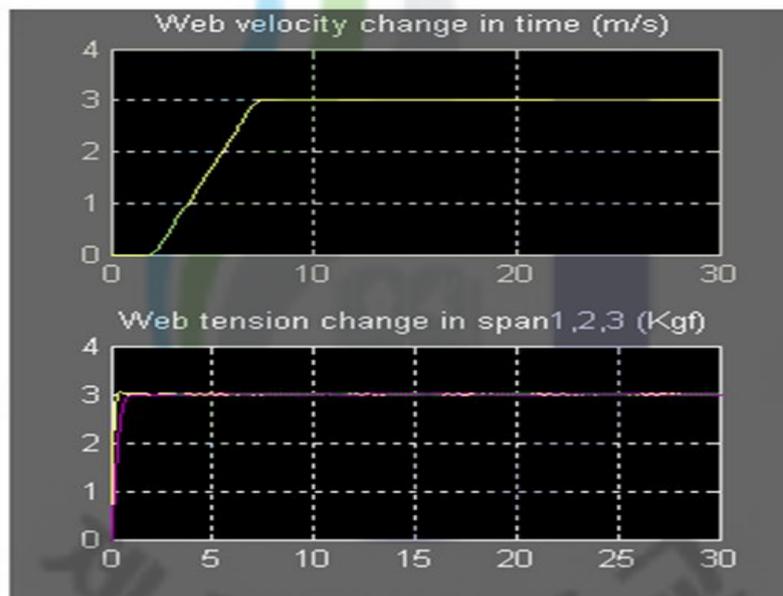
(2) Back-Stepping 알고리즘을 이용한 장력제어 시뮬레이션

PID 제어 알고리즘에 대한 시뮬레이션 과정과 동일한 과정으로 Back-Stepping 제어 알고리즘에 대한 시뮬레이션을 진행하였고 제어 알고리즘의 이득은 동일한 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)을 적용하여 얻어냈다.

표 4.13. 유전 알고리즘에 의한 Back-Stepping 제어 알고리즘의 이득

Optimal Gain(genetic algorithm)
$C_1 = 6.5, C_2 = 7, C_3 = 5, C_4 = 6.5, C_5 = 7.5, C_6 = 5.5, C_7 = 7$

case 1 :  $T_{1ref} = 3\text{kgf}, T_{2ref} = 2\text{kgf}, T_{3ref} = 3\text{kgf}$



- Web tension change in time of span 1
- Web tension change in time of span 2
- Web tension change in time of span 3

그림 4.18. Case1의 시뮬레이션 결과(back-stepping 제어 알고리즘).

case 1 :  $T_{1ref} = 3\text{kgf}$ ,  $T_{2ref} = 2\text{kgf}$ ,  $T_{3ref} = 3\text{kgf}$

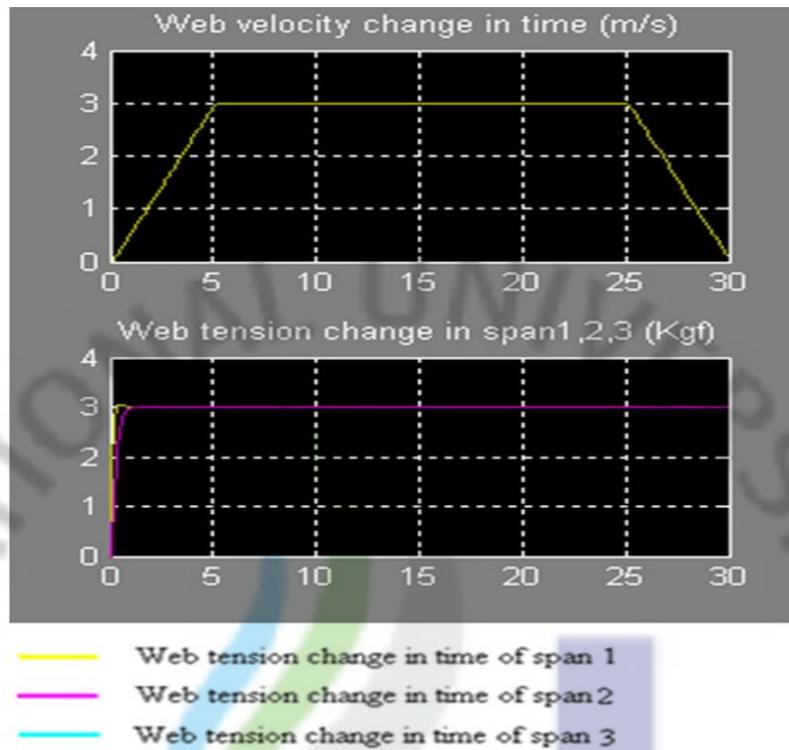
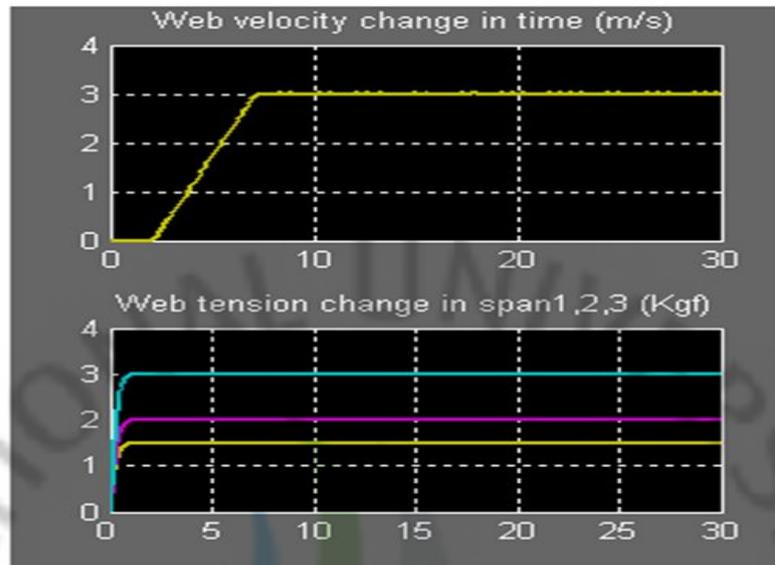
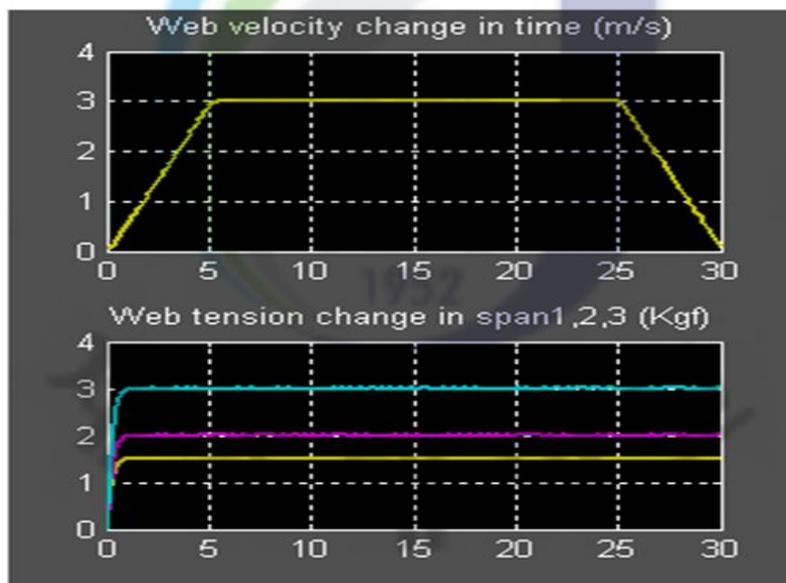


그림 4.19. Case1의 시뮬레이션 결과(back-stepping제어 알고리즘).

case 2 :  $T_{1ref} = 1.5\text{kgf}$ ,  $T_{2ref} = 2\text{kgf}$ ,  $T_{3ref} = 3\text{kgf}$



- Web tension change in time of span 1
- Web tension change in time of span 2
- Web tension change in time of span 3



- Web tension change in time of span 1
- Web tension change in time of span 2
- Web tension change in time of span 3

그림 4.20. Case2의 시뮬레이션 결과(back-stepping제어 알고리즘).

### 3) 제어 알고리즘별 비교결과

위의 PID 제어 알고리즘과 Back-Stepping 제어 알고리즘에 대한 동일한 시뮬레이션을 통하여 결과 값을 얻어낸 결과,

PID제어 알고리즘에서 두 가지 케이스의 기준장력을 통하여 실 장력에 대한 응답 값을 얻어낸 결과 Case 1에서 약 3초,5초,7초,25초정도에서 실 장력에 대한 응답 값이 크게 변동이 생겼음을 알 수 있었다. 또한 Case 2에서도 동일한 결과를 3초,5초,7초,25초에서 얻을 수 있었다. 반면 Back-Stepping 제어 알고리즘을 사용하여 두 가지 케이스에 대한 시뮬레이션을 진행한 결과 두 케이스의 전시간 영역에서 안정된 장력에 대한 응답 값을 보이고 있으며 PID제어 알고리즘과 비교 시에도 파형의 왜곡이 없었다.

이러한 두 가지의 제어 알고리즘에 대한 시뮬레이션 결과를 정리하면, 제안된 알고리즘에 의한 시뮬레이션 결과는 기존의 PID 제어 알고리즘과 비교시 향상된 성능을 보여주었으며 제시된 이득에서 Back-Stepping제어 알고리즘은 안정된 성능을 보였다. 또한 제안된 제어 알고리즘은 관성변화와 점성마찰로 인한 정밀도, 안정도에서 높은 결과를 보였다. PID제어 알고리즘과 비교시 Overshoot제거와 관성변화로 인한 정착시간 감소, 속도변화, 점성마찰에 대한 결과에서 좋은 성능을 보였다.

## V. 결 론

본 연구는 기존의 연속생산의 롤투롤 시스템과 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템을 결합하여 하이브리드 방식의 새로운 잉크젯 프린팅 시스템을 설계 및 개발하는데 목적이 있다.

본 연구에서는 기존 웹 이송 기반의 롤투롤 시스템 기술과 잉크젯 프린팅 기술에 대한 이론적 연구와 실제 시뮬레이션 및 실험을 통하여 각 공정에 대한 특성 및 장단점에 대해 확인하였고 이를 통하여 하이브리드 잉크젯 프린팅 시스템의 실제 설계, 개발을 통하여 하이브리드 형태의 프린팅 시스템의 고려사항 및 특성을 확인하였다. 그리고 롤투롤 기반의 정전기력 잉크젯 프린팅 기술요소 중의 하나인 다중스팬의 웹 장력제어를 기존 PID제어 알고리즘과 Back-Stepping 제어 알고리즘의 시뮬레이션 결과를 통하여 비교하였으며 이는 고정밀 제어도를 필요로 하는 롤투롤 정전기력 프린팅 시스템에 필요한 요소이다. 기존 PID제어 알고리즘에서의 최적이득을 통한 제어와 Back-Stepping 제어 알고리즘에서의 최적이득을 통한 시뮬레이션 결과를 비교 시 PID제어 알고리즘에서의 결과는 Case 1 및 Case2에서 실 장력에 대한 응답 값이 크게 변동이 생겼음을 알 수 있었다. 반면 Back-Stepping 제어 알고리즘을 사용하여 두 가지 케이스에 대한 시뮬레이션을 진행한 결과 두 케이스의 전 시간영역에서 안정된 장력에 대한 응답 값을 보이고 있으며 PID제어 알고리즘과 비교 시에도 파형의 왜곡이 없었다.

본 연구를 통하여 롤투롤 정전기력 잉크젯 프린팅 시스템에 대한 실제 설계 및 제작과 그에 따른 웹의 장력제어를 위한 개선된 Back-stepping 제어 알고리즘을 제시하였다. 그 결과 비교를 위해 같은 같은 조건(가정, 이득수령 알고리즘, 동일한 기준장력, 속도)을 통해 시뮬레이션을 진행한 PID제어 알고리즘과 비교시 응답값 및 응답시간 및 기준장력에 대한 실 제어장력에 대한 결과값이 큰 차이를 보였다. 이러한 개선된 장력제어 알고리즘을 바탕으로 추후 사행제어와 인압제어의 연구를 통하여 롤투롤 시스템의 통합 제어에 효과적으로 활용될 것이다.

## 참고 문헌

1. 김성한, 2008, “Printed Electronics의 최신 기술 및 시장 동향”, 2008년도 한국 인쇄전자협회 연구보고서
2. 이기현, 2004, “잉크젯 프린팅 기술의 현황 및 특허분석”, 지식재산21, 통권 제 88호, P.28~44
3. 신기현, 이창우, 김현규, 2009, “롤투롤 인쇄 기술을 이용한 전자소자 개발”, 기계저널 Vol.49, No.8, P.26~30
4. 강현규, 김정인, 신기현, 2006, “롤투롤 플렉서블 디스플레이의 보상롤 타입 레지스터 제어”, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, P.542~545
5. 김명섭, 김충환, 김동수, 이택민, 류병순, 최병오, 2008, “PEMS 생산용 롤투롤 프린팅 장비의 개발”, 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, P.973~974
6. 김근영, 2009, “온도 및 중력 영향을 고려한 다중 스펀 웹이송 시스템에 대한 모델링 및 장력 제어”, 부산대학교 학위논문
7. 최경현, 양봉수, 탄충탄, 도양희, 김동수, 2009, “웹 이송제어 기반의 롤투롤 시스템을 위한 ESD 프린팅 시스템 개발”, 기계가공학회 춘계학술대회 논문집, P.39~42
8. 윤석찬, 백승훈, 정진태, 한창수, 2000, “비선형 웹 이송 시스템의 장력제어”, 한국공작기계학회지, 제9권 제5호, p.65~72
9. 강철구, 이봉주, 2007, “고속 롤투롤 인쇄기의 장력제어시스템 안정도 해석”,

대한기계학회 춘계학술대회 논문집, P.148~153

10. 강현규, 성장엽, 신기현, 권순오, 2007, “연속공정시스템의 텐서 모델링 및 장력제어기 설계에 대한 연구”, 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, P.417~418
11. 최경현, 탄충탄, 양봉수, 김동수, 2009, “A control system design of automatically tuning controller for roll to roll web system using the midified genetic algorithm”, the 7th Asian control conference, P.1691~1696



## 본 논문과 관련된 저자의 발표 논문

### 1. 학술대회 논문집

- 최경현, 양봉수, 탄충탄, 도양희, 김동수, 2009, “웹 이송제어 기반의 롤투롤 시스템을 위한 ESD 프린팅 시스템 개발”, 한국기계가공학회 춘계학술대회 논문집, P.39~42
- 최경현, 탄충탄, 양봉수, 김동수, 2009, “A control system design of automatically tuning controller for roll to roll web system using the modified genetic algorithm”, The 7th Asian Control Conference, P. 1691~1696
- 최경현, 탄충탄, 양봉수, 도양희, 김동수, 2009, “ On a new approach for gravure/offset printing pressure control algorithm development using the full state feedback controller”, 한국정밀공학회 춘계학술대회, P.665~666
- 최경현, 아산 라만, 양봉수, 아드난 알리, 도양희, 김동수, 2009, “Drop Demand Analysis of Electrostatic Inkjet Considering Ground Position Effects”, 한국정밀공학회 춘계학술대회, P.341~342
- 최경현, 아드난 알리, 양봉수, 살림칸, 김동수, 2009, “Printed Patterns Life Dependency on Contact Angle of Ink on Substrate”, 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, P.753~754
- 최경현, 아드난 알리, 아산 라만, 양봉수, 김동수, 2009, “Analysis of Ink Droplet on Substrate and its effect on Printed Patterns”, International

Conference on Flexible and Printed Electronics

- 최경현, 아산라만, 아드난 알리, 양봉수, 김동수, 도양희, 2009, “Effect of Different Ground Hole Size on Stable Meniscus in Electrostatic Integrated Deposition Inkjet Head”, IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing 2009



## 감사의 글

대학원 2년이라는 시간이 긴 영화의 끝자락처럼 언제 왔다 갔는지도 모르게 지나갔다. 중간에 힘든일도 있었고 머리가 복잡할 정도로 어려운 일도 많았고 포기하고 싶은적도 있었지만 나와 함께 대학원 생활을 같이 해준, 그리고 나에게 많은 도움을 준 분들이 아니었으면 아마 그저 그렇게 대학원 생활을 마쳤을지도 모를일이었다.

짧은 2년간의 대학원 생활동안 열의보다 부족함이 더 많았던 저에게 많은 지도와 도움을 주신 도양희 교수님과 최경현 교수님께 우선 감사의 말씀을 전해드리고 싶고 부족한 부분에 대해 많은 도움을 준 형찬이형, 같은 동기이면서 스스로 배울점을 찾게 한 수진이형, 정범, 연구실에서 막내로 지내면서 항상 열심히 하는 현우, 이번 대학원 입학하는 경현, 모든 연구실의 식구들이 부족한 저에게는 멘토가 아니었나 생각된다. 그리고 먼 외국까지 와서 항상 열심히 하는 모습으로 생활하고 있는 외국인연구원인 칼리드와 그 동안 같은 팀원으로 많은 도움을 받았던 아산, 아드난, 탄충탄, 가네시, 살림, 알샤드에게 고마움을 전하고 싶다.

이제 대학원 생활을 마치고 새로운 분야로의 도전을 준비해야 하는 상황에서 지난 2년간의 대학원에서의 경험했던 모든 일들은 나에게 큰 경험이자 멘토로 남을 것이다.