

## 미세 패턴 가공을 위한 유도가열 및 수냉식 하이브리드 롤에 대한 기초 연구

조상현<sup>a</sup>, 김병인<sup>a\*</sup>, 손영수<sup>a</sup>, 윤동원<sup>a</sup>

## A Basic Study on Induction Heating and Water Cooling System Hybrid Roll for Fine Pattern Processing

Sang-Hyun Jo<sup>a</sup>, Byung-In Kim<sup>a\*</sup>, Young-soo Son<sup>a</sup>, Dongwon Yun<sup>a</sup><sup>a</sup> Department of Robotics and Mechatronics, Korea Institute of Machinery & Material, 104 Sinseongno, Yuseong-Gu, Daejeon, 350-343, Republic of Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	16	July	2013
Revised	25	September	2013
Accepted	11	October	2013

## Keywords:

Induction heating  
Water cooling  
Thermal analysis  
Structure analysis

## ABSTRACT

Roll-to-roll (R2R) hot embossing systems have been developed and are widely used in various industrial domains. These systems press and heat flexible films between a press roll and a back-up roll, as said films pass through the two rolls. In previous studies, a heating roll was used for heating. However, in this study, a hybrid roll for R2R hot embossing is conceptualized and developed. This R2R system can be used for generating fine patterns on large and continuous films. The hybrid roll of our system can cool and heat the films simultaneously, thus affording greater flexibility in process design. Thermal and structural analyses were performed for developing the hybrid roll. In addition, a hybrid roll was designed based on analytical results. Experiments were conducted for measuring the performance of the developed hybrid roll.

## 1. 서론

최근 산업분야, 의료/바이오, 전자기기분야등 다양한 분야에서 Nano/Micro의 정도를 가지는 극미세 형상이 필요로 하는 분야가 늘어나고 있는 추세이다. 이러한 미세 패턴을 제작하는 공정 중 대면적화가 가능하며, 공정시간이 짧은 롤 투 롤 핫 엠보싱 공정이 각광 받고 있다<sup>[1]</sup>. 현재 롤 투 롤 핫 엠보싱 공정의 극미세 형상의 제작에 관한 많은 연구가 진행 중에 있으며, 그 중 미세 몰드 제작에 관한 연구가 집중되고 있다. 미세 패턴 몰드 제작을 위해 광부식 세라믹 유리를 레이저로 가공하여 몰드 제작시간의 축소와 미세 엠보싱을 이용하여 미세 장치를 제조하는 공정이 개발되었고<sup>[2]</sup>,

UV 나노 엠보싱 공정을 이용하여 경제적으로 높은 고품비를 가지는 고분자 나노 섬모 어레이 성형을 통해 넓은 면적에 걸쳐 간단하게 미세 패턴을 제작 할 수 있는 연구가 보고되어 있다<sup>[3]</sup>. 또한 미세 패턴 몰드 제작뿐만 아니라 패턴의 품질에 영향을 주는 닙 롤 (nip roll)의 특성에 따른 실험을 통해 닙 롤의 경도와 재질의 영향력에 관한 연구가 발표되어있고,<sup>[4]</sup>롤 투 롤 인쇄전자 공정에서의 운전 장력, 운전속도, 전도성잉크의 점도, 셀의 형상 등의 인자들이 인쇄패턴의 두께와 표면조도에 미치는 영향에 대해 개별적이며 유기적으로 연구되었다<sup>[5]</sup>. 롤 투 롤 공정 중 발생하는 불량 요인들에 대해 동기화 오차에 대한 분석<sup>[6]</sup>과 레지스터 에러를 수학적 모델링과 시뮬레이션을 이용한 레지스터 에러에 대한 동특성 해석<sup>[7]</sup>, 롤

\* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7616

Fax: +82-42-868-7611

E-mail address: kimbi@kimm.re.kr (Byung-In Kim).

투 롤 공정에서 필름의 정밀제어를 위해 수학적 모델의 정의한 뒤 하드웨어를 구성하여 가능성<sup>18)</sup>을 알아보는 시스템 제어에 관한 연구 또한 활발히 이루어지고 있다. 이러한 여러 가지 요인들이 패턴의 품질에 영향을 미치지만 성형 중 능동적이지 못한 온도제어 또한 패턴의 품질에 나쁜 영향을 미친다. 또한 기존의 히팅롤에 삽입되는 히트파이프는 고가이며, 규격화되어 있는 히트파이프 크기로 인해 롤의 소형화에 어려움이 있다. 롤 투 롤 핫엠보싱 장비에서 사용되는 롤은 주로 히팅기능만 있는 히팅롤을 단독으로 사용하며, 갑작스런 온도변화조건에 대응이 어렵고, 다양한 공정조건 설정에 한계가 있다. 미세패턴 가공을 위해 가장 중요한 것이 최적의 공정 온도 설정이다. 기존의 히팅기능만을 가진 히팅롤은 최적 공정 온도를 찾기 위해 자연냉각을 사용함으로 냉각에 더 많은 시간이 걸린다. 이에 반해 냉각기능이 추가된 하이브리드 롤의 경우 강제 냉각을 하기 때문에 공정온도 설정에 걸리는 시간을 줄일 수 있다.

본 연구는 롤 기반의 핫엠보싱 공정구현을 위해 작업효율이 뛰어나며 연속공정이 가능하며 대면적화에 필수적인 기술인 롤 방식의 하이브리드 롤을 개발하려 한다. 기존의 히팅 기능은 그대로 있으며 냉각 기능을 추가적으로 사용 가능한 실린더 롤을 하이브리드 롤이라 한다.

본 연구를 통해 개발되는 하이브리드 롤은 유도 가열식 열원은 그대로 사용하면서 수냉의 냉각방식을 채택하였으며, 온도 균일도를 위해 롤러 전체가 히트파이프 역할을 할 수 있는 자켓(Jacket)방식으로 롤러를 설계하였다. 이와 같은 하이브리드 롤의 구조는 온도제어성능 향상을 통해 안정화된 공정구현 및 피가열물 재질에 따른 최적의 공정온도 선정에 이점을 가진다. 또한 히트파이프를 제거하게 되면 설계 및 제작이 용이하다.

이에 본 연구는 하이브리드 롤을 열전달해석과 구조해석을 통해 설계 변수 값을 선정된 뒤 선정된 값을 토대로 하이브리드 롤을 제작하였다. 또한 제작된 하이브리드 롤과 같은 규격의 히트파이프 방식 히팅롤과 열전달 비교 실험을 하였다. 열전달 실험 이후 냉각 성능 비교실험을 통해 히트파이프 방식 히팅롤 보다 능동적인 온도 대응 성능에 대해 검증하고자 한다.

## 2. 하이브리드 롤의 해석 및 설계 변수 값 선정

하이브리드 롤의 성능에 가장 많은 영향을 미치는 설계 변수는 하이브리드 롤 내부에 충전 되는 열매체 충전 관로 수량과 피가열물과 접촉하는 롤러의 셸 두께이다. 이러한 변수들은 하이브리드 롤의 성능과 직결되기 때문에 해석을 통해 목표성능에 부합하는 변수 값을 선정하여 설계에 반영하였다. Fig. 1은 하이브리드 롤의 가장 중요한 롤러부의 구조이다.

셸의 두께의 경우 두꺼울수록 롤의 구조적 건전성에는 이점이 있지만 열전달 면에서 단점이 될 수 있으며 열매체 충전 관로 수량이 많을수록 열전달 면에서는 이점이 있을 수 있지만 롤 내부 구조를 약하게 하는 단점이 있기 때문에 목표성능에 부합하는 설계가 필요 하다.

이후의 해석을 통해 실제 제작에 반영할 설계 변수 값은 Fig. 1에 지시된 열매체 체적과 셸의 두께이다. 해석은 이론적 해석과 수치적 해석이 있으며, 본 연구에서 적용한 해석은 수치적 해석이다. 수치적 해석 중 전산해석의 유한요소해석을 하였으며 이를 위해 상용프로그램인 ANSYS를 이용하여 구조 및 열전달 해석을 수행하였다. Table 1은 해석에 이용된 해석조건과 설계변수를 나타낸 것이다.

열매체 충전 관로의 수량을 변수로 설정하였으며, 셸(Shell)두께란 열원인 보빈에서 발생한 유도전류 통과하여 발열하는 외통의 두께를 말한다. 하이브리드 롤 설계는 Fig. 2와 같은 순서로 진행이 될 것이다. 하이브리드 롤의 셸 두께는 열전달에도 많은 영향을 미치지만 롤 투 롤 공정의 특징인 가압시스템에서 피가열물의 각인물과 롤 전체의 건전성에도 많은 영향을 미치는 변수이다. 셸 두께가 얇을수록 열전달은 빠를 수는 있지만 가압 공정의 건전성에는 악영

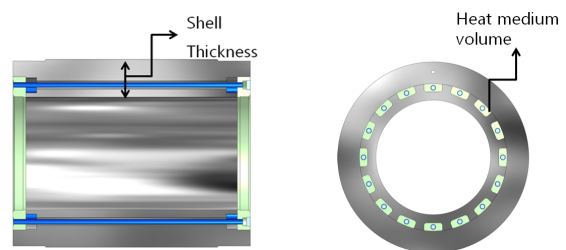


Fig. 1 Hybrid roll parameters

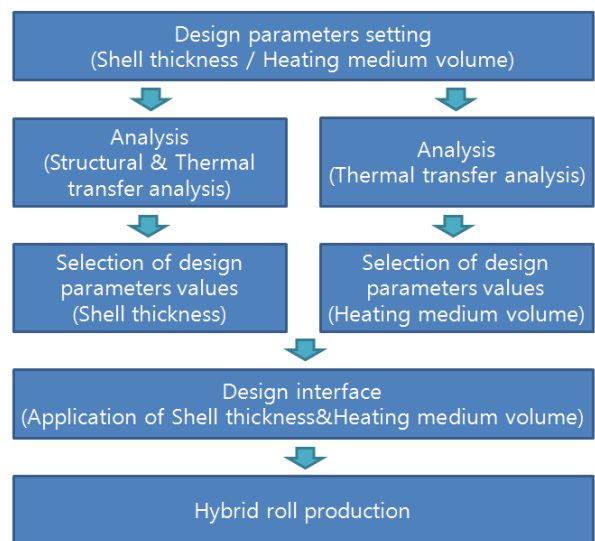
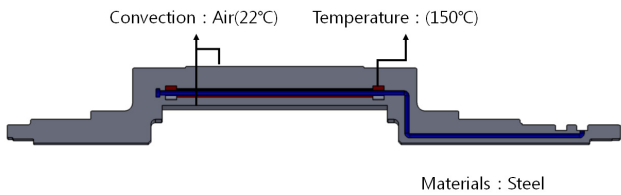


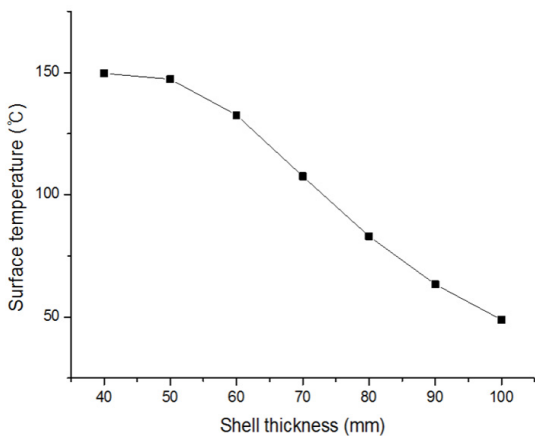
Fig. 2 Hybrid roll design process

**Table 1 Analysis condition by the design parameters**

Design parameters	Analysis type	Analysis condition		Remarks
Shell thickness	Thermal transfer analysis	Material	Steel	Compare the surface temperature of roller
		Temperature condition	Heating medium volume (150°C)	
		Convection condition	Exposed area (22°C)	
	Structural analysis	Material	Steel	Compare the deflection of roller
		Fix condition	Flange part	
		Press condition	Contact area (30kN)	
Heating medium volume	Thermal transfer analysis	Material	Steel	Compare the surface temperature of roller
		Temperature condition	Heating medium volume (150°C)	
		Convection condition	Exposed area (22°C)	
Cooling performance of Heating roll and Hybrid roll	Thermal transfer analysis	Material	Steel	Compare cooling time of heating roll and hybrid roll
		Temperature condition	Cooling pipe part (4°C) - hybrid roll	
			No temperature condition - heating roll	
Convection condition	Exposed area (22°C)			

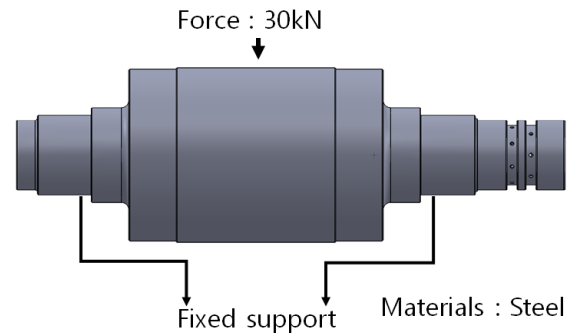


**Fig. 3 Thermal transfer analysis conditions**



**Fig. 4 Thermal transfer analysis result by shell thickness**

향을 미친다. 그렇기 때문에 가압공정의 허용 변위량 범위 내에서 가장 빠른 열전달을 보이는 셸 두께를 구해야한다. 셸 두께에 따른 열전달 해석을 수행하고 가압공정에서 롤 전체의 변형량에 대한 구조해석을 하였다.



**Fig. 5 Structural analysis conditions**

Fig. 3과 같이 롤의 재질은 강으로 설정하였으며 열매체 삽입부는 150°C 온도조건을 주었고 외부에 노출되어 있는 부분은 공기 대류조건을 주어 열전달해석을 하였다. 해석 시간 단축을 위해 롤의 패턴적인 특징으로 일부의 패턴만 해석을 수행하여 전체를 평가하였다.

열전달 해석의 결과값은 Fig. 4와 같다. 롤러 표면 온도결과는 셸 두께가 증가할수록 낮아지는 양상을 보였다.

셸 두께를 변수 값으로 설정하여 베어링 설치부를 고정 한 뒤 가압공정의 목표조건인 30 kN의 힘을 피가열물과 접촉하는 면에 주어 Fig. 5와 같이 구조해석을 수행하였다.

하중에 의한 변위량은 셸 두께가 증가할수록 작아졌다. 하중에 의한 변위량 결과는 Fig. 5의 그래프와 같다.

본 연구의 온도조건에서 피가열물 접촉면이 100~120°C 일 때

부터 폴리머의 미세 패턴 공정이 이루어지기 때문에 Fig. 4의 결과값을 토대로 셸의 두께가 65~70 mm 되어야 하며, 패턴의 정도목표가 20  $\mu\text{m}$ 이기 때문에 Fig. 6의 결과를 토대로 변위량이 20  $\mu\text{m}$  이하인 54 mm 이상의 셸 두께가 되어야 한다. 표면온도 및 허용변위량의 두 조건을 모두 만족하면서 구조적으로 안전하기 위해 범위 내의 가장 두꺼운 70 mm가 셸 두께로 가장 적합하다.

하이브리드 롤은 롤러 전체가 히트파이프 역할을 하기 위해 2중벽의 자켓방식으로 되어있으며 자켓안에 열매체가 충전 되어 있는 구조이다. 하이브리드 롤이 히트파이프의 역할을 충분히 할 수 있기 위해서는 열전달에 대한 열매체 충전 관로 수량이 목표성능에 부합하는 설계가 필요로 하다. 그러기 위해서는 열매체 충전 관로 수량에 따른 열전달 해석이 수행되어야 한다. 열전달 해석을 수행하기 위해 정해져 있는 사양 안에서 열매체 충전 관로 수량을 변경하면서 목표성능에 부합하는 해석을 수행하였다. 열매체 충전 관로 수량으로 체적을 변경하였다. Fig. 3와 같이 롤의 재질은 강으로

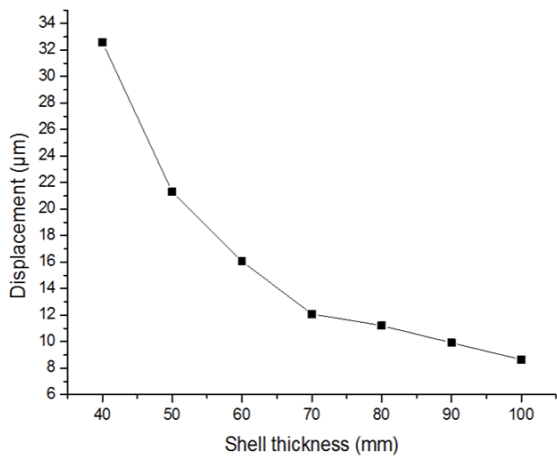


Fig. 6 Deflection compared analysis result by shell thickness

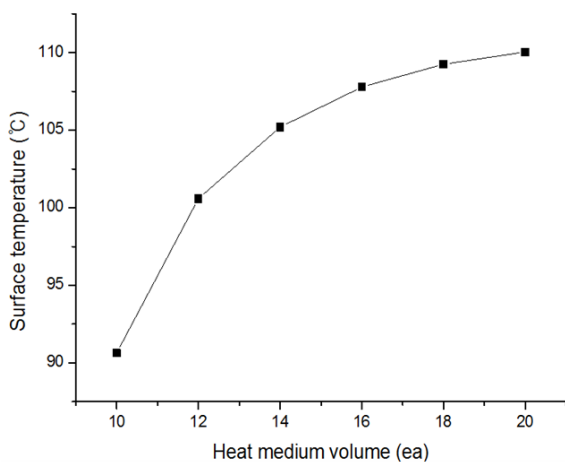


Fig. 7 Thermal transfer compared analysis result by heating medium volume

설정하였으며 해석 조건으로는 열매체 삼입부분은 목표온도 150 $^{\circ}\text{C}$ 의 열조건을 주었고 외부에 노출되어 있는 하이브리드 롤 표면 부분은 공기의 대류조건을 주었다.

해석 시간 단축을 위해 롤이 같은 패턴으로 설계되었기 때문에 대칭조건을 주어 패턴의 일부만 해석을 수행하여 전체를 평가하였다. Fig. 7은 열매체 충전 관로 수량에 따른 열전달 비교 해석 결과이다.

해석 결과 값인 Fig. 7에서 알 수 있듯이 열매체 충전 관로 수량이 16개 이상이 되면 피가열물 접촉면의 온도가 많은 차이를 보이지 않는다. 또한 열매체 충전 관로 수량이 18개 이상이 되면 롤 제작의 어려움이 발생하며 강성도 현저히 떨어지기 때문에 열매체 관로의 수량을 16개로 선정하여 이후의 해석과 제작을 진행하였다.

열전달해석과 구조해석을 통해 선정된 열매체 체적과 롤러의 셸 두께를 하이브리드 롤 전체에 적용하여 모델링 하였다. 모델링된 하이브리드 롤과 히트파이프 방식의 히팅롤과 열전달 비교 해석을 통해 같은 사양의 히트파이프 방식 히팅롤을 모델링하여 같은 조건에서 열전달 해석을 하였다.

히트파이프 방식 히팅롤과 하이브리드 롤 모두 롤러부 직경을  $\text{O}350\text{ mm}$ , 접촉면을 300 mm로 모델링 하였다. 히트파이프 방식 히팅롤은 히트파이프에 하이브리드 롤은 열매체부에 150 $^{\circ}\text{C}$ 의 열조건을 주었으며 대기와 접촉면은 공기의 대류조건을 주었다. 열전달 해석의 결과값은 Fig. 8과 같다.

같은 조건의 열전달 해석에서 비슷한 양상을 보였으며 피가열물 접촉면의 최종온도는 히트파이프 방식 히팅롤의 경우 148 $^{\circ}\text{C}$ , 하이브리드 롤의 경우 138 $^{\circ}\text{C}$ 로 약 10 $^{\circ}\text{C}$ 가 차이 났다.

또한 하이브리드 롤의 특징이라고 할 수 있는 능동적인 온도제어를 위해 냉각 해석을 하였다. 빠른 냉각성능은 온도변화 공정조건에 빠르게 대응할 수 있게 된다. 냉각성능면에서 히트파이프 방식

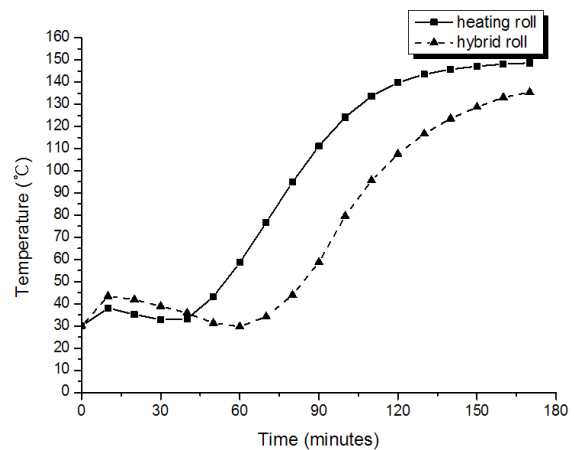


Fig. 8 Thermal transfer analysis result of heat pipe type heating roll and hybrid roll

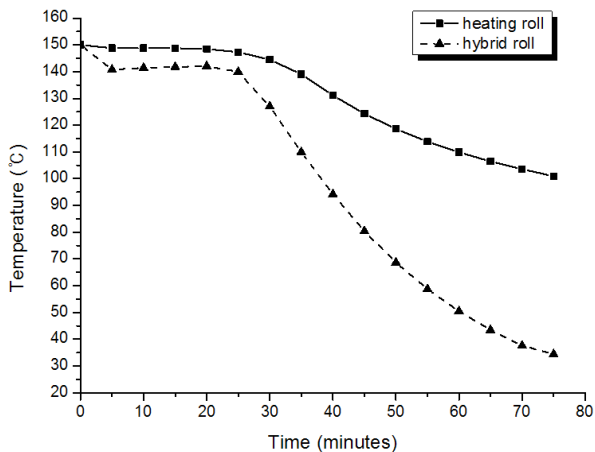


Fig. 9 Cooling performance result of heat pipe type heating roll and hybrid roll

히팅롤의 경우 상온에서 자연냉각방식을 이용하기 때문에 냉각속도가 느리지만 하이브리드 롤은 수냉방식을 채택하고 있어 빠른 냉각속도를 보인다. 히트파이프 방식의 히팅롤과 하이브리드 롤의 롤러 표면 온도가 150°C인 조건에서 시작하였다. 히트파이프 방식의 히팅롤은 자연냉각방식이기 때문에 가열온도 조건을 제거한 뒤 대기하고 노출되어 있는 부분은 공기의 대류조건을 주었으며 하이브리드 롤은 수냉 방식이기 때문에 가열온도 조건 제거 후 냉각관에 냉각수의 온도인 4°C 온도 조건을 주고 대기하고 노출되어 있는 대기 조건을 주어 냉각실험을 비교하였다. 냉각성능비교 결과는 Fig. 9와 같다.

같은 조건에서 냉각 해석 결과 자연냉각방식의 히트파이프 방식 히팅롤의 경우 피가열물 접촉면의 온도가 150°C에서 99.8°C로 50.2°C 냉각 되었고, 하이브리드 롤의 경우 150°C에서 34.4°C로 115.6°C 냉각되었다. 하이브리드 롤이 히트파이프 방식 히팅롤에 비해 80분 동안 65.4°C의 냉각온도 차이를 보였다.

위의 열매체 충전 관로 수량에 따른 열전달 해석과 셸 두께에 따른 열전달 및 구조해석을 통해 실험에 적용될 설계 변수값을 선정하였다. 선정된 설계 변수값은 열매체 충전 관로 수량의 경우 온도 증가율과 제작의 편의성 및 구조적 안정성을 위해 열매체 충전 관로 수량을 16개로 선정하였다. 셸 두께의 경우 열전달 감소율과 가압공정에서의 구조적 건정성을 고려해 봤을 때 70 mm 가장 목표성능에 부합하기 때문에 70 mm로 선정하였다. 선정된 설계변수 값들은 실제 실험장치에 적용되어 제작에 반영하였다.

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

본 연구의 하이브리드 롤의 열전달과 냉각 특성 비교 분석을 위

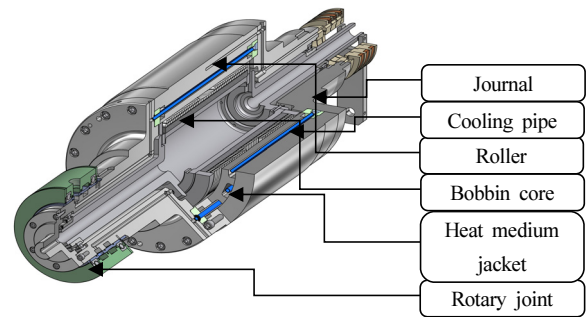


Fig. 10 Induction and water cooling type hybrid roll

해 같은 외경과 같은 접촉면적을 가지는 히트파이프 방식의 히팅롤과 하이브리드 롤을 설계 및 제작하였다. 실험에 사용될 롤은 모두 외경  $\phi 350$  mm와 접촉면을 300 mm의 조건으로 설계 및 제작하였다.

히트파이프 방식 히팅롤은 본 연구에서의 비교실험을 위한 장치이며, 열균일도를 위한 열매체로는 기존의 히트파이프를 적용하였다. 실험 장치에 사용된 히트파이프 방식 히팅롤은 크게 와전류를 발생시켜 열원으로 작용하는 보빈 코어(Bobbin Core)부, 열원의 열을 물전체에 고르게 분포해주는 역할을 하는 히트파이프가 삽입되는 롤러(Roller)부, 롤러가 양단에 체결되어 회전할 수 있도록 축을 형성하는 저널(Journal)부가 있다.

하이브리드롤은 온도를 능동적으로 제어할 수 있는 히팅롤로 히트파이프를 삽입하는 기존의 히팅롤과는 다르게 열매체를 롤러 내부에 주입 후 진공 처리하여 롤러 전체가 히트파이프 역할을 할 수 있도록 설계 하였고 롤러부에 냉각관을 삽입하여 냉각기능도 수행 가능하도록 하였다. 앞선 해석을 통해 선정된 설계 변수 값인 16개의 열매체 충전 관로 수량과 70 mm의 셸 두께를 적용하였다. 기존의 히팅롤과 큰 구조는 같으며 구성은 와전류를 발생하여 열원으로 작용하는 보빈 코어부와 피가열물에 직접적으로 닿는 롤러부, 롤러부가 회전이 가능하도록 롤러 양단에 체결되어 있는 저널부로 나눌 수 있다. 롤러를 냉각하는 냉각수는 냉각 후 로터리 조인트(Rotary joint)를 통해 저널부로 모여 밖으로 유출된다. 저널부와 롤러는 체결되어 있기 때문에 실링(Sealing)을 위해 저널부와 롤러부 사이에 내열성 테프론 실링(Teflon sealing)을 사용하여 냉각수 유출 문제를 해결하였다.

#### 3.2 실험방법

실험에 사용된 히팅롤은 롤러 외경이  $\phi 350$  mm에 접촉 유효거리를 300 mm로 동일하게 제작하였다. 열원으로 사용된 보빈코어의 사양으로  $\phi 6$  mm 직경, 90턴수로 히트파이프 방식 히팅롤과 하이브리드 롤 모두 동일하게 제작하였다. 실험에 사용된 롤의 그림은 Fig. 11과 같다. 히트파이프 방식 히팅롤은 기존의 방식과 마찬가지로 상온에서 자연냉각방식으로 냉각하며, 하이브리드 롤은

롤러 내부에 삽입된 냉각관을 이용하여 수냉 방식으로 실험하였다.

두 롤 모두 열매체의 열균일도를 위해 회전하면서 실험을 하였다.

히트파이프의 열균일도와 하이브리드 롤에 사용된 자켓방식의 열매체의 열균일도 성능 비교를 위하여 같은 80(A)의 전류를 투입하였고, 롤러 자체온도를 접촉식 온도센서를 이용하여 표면온도를 측정하였다. 온도센서로는 민감한 온도 변화에 대응하며, 폭넓은 응용범위와 취급이 용이한 K타입의 열전대를 사용하였으며, 표면온도는 유효거리내에서 5등분하여 롤러의 중심부와 외측부까지 전체적으로 측정하였다. 표면온도 측정의 기준은 중심으로부터 양쪽으로 75 mm씩 증분값으로 결정하였으며, 히트파이프 방식 히팅롤과 하이브리드 롤 모두 같은 유효장을 가졌기 때문에 같은 지점을 15분 간격으로 측정하였다.

냉각성능 측정 실험은 목표온도까지 도달한 히트파이프 방식 히팅롤과 하이브리드 롤을 전력을 차단한 후 히트파이프 방식 히팅롤은 상온에서 자연냉각방식으로 하였다. 하이브리드 롤은 냉동기를 이용한 수냉을 하여 냉각성능을 비교하는 방법을 채택하였다. 냉각 목표 온도에 도달하는 시간을 통해 냉각성능을 측정하였고, 온도 측정 방법은 가열 실험과 마찬가지로 롤러 자체온도를 접촉식 K타입의 열전대를 이용하여 표면온도를 측정하였다. 표면온도는 유효거리내에서 5등분하여 롤러의 중심부와 외측부까지 전체적으로 측

정하였다. 표면온도 측정의 기준은 중심으로부터 양쪽으로 75 mm씩 증분값으로 결정하였으며 5분간격으로 측정하였다. 하이브리드 롤은 30분 이후 부터는 온도변화가 미세하여 중지하였고, 히트파이프 방식 히팅롤은 30분 이후부터는 30분, 60분 간격으로 측정하였고, 상온이 되면 측정을 중지 하였다.

#### 4. 실험 및 결과 고찰

##### 4.1 히트파이프 히팅롤과 하이브리드 롤 실험결과

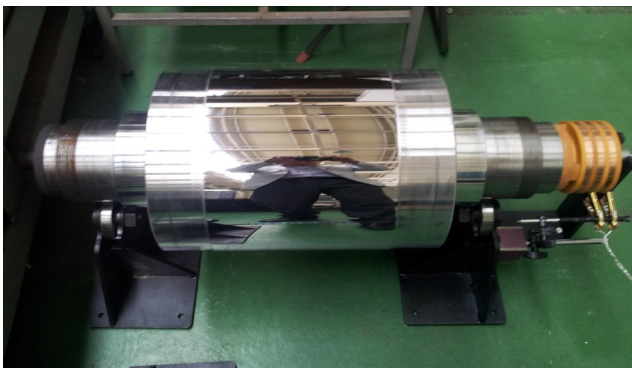
가열 실험은 15분간격으로 롤러 표면의 온도를 측정하였으며 5개의 지점에서 측정하였다. 목표온도인 130℃가 되는 시점으로 실험을 종료하였다. 측정결과는 Table 2이며, 비교 그래프는 Fig. 12와 같다. 비교그래프의 경우 측정지점의 평균온도 값을 선정하였다.

냉각 실험의 하이브리드 롤과 히트파이프 방식의 히팅롤의 실험 결과 값은 Table 3이며, 비교 그래프는 Fig. 13과 같다. 비교 그래프의 온도 값은 측정지점의 평균 온도이다.

**Table 2 Experiment result of heat pipe type heating roll and hybrid roll**

Time (min)	Surface temperature (°C)				
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
15	26.3	26.3	26.3	26.3	26.3
30	40.2	43.0	50.0	45.0	42.0
45	60.3	63.0	67.0	62.9	64.0
60	98.0	99.0	100.9	95.6	95.2
75	108.8	110.4	110.7	108.4	104.0
90	110.2	115.5	116.0	115.1	115.0
105	118.0	119.0	120.0	118.9	117.0
120	122.0	124.0	125.0	124.4	122.2
135	128.0	129.2	129.8	128.3	128.0

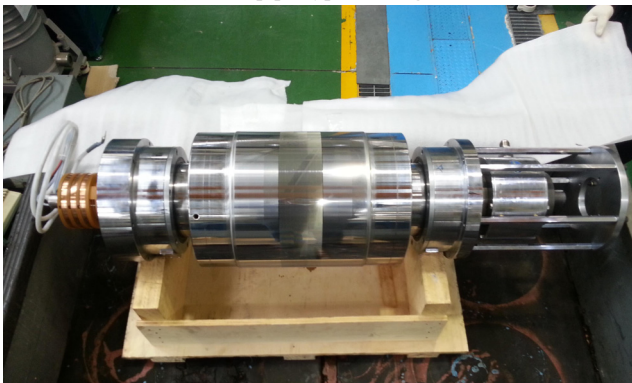
(a) Heat pipe type heating roll



(a) Heat pipe type heating roll

Time (min)	Surface temperature (°C)				
	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
15	27.1	27.1	27.1	27.1	27.1
30	48.0	50.0	55.2	52.3	50.0
45	69.2	78.5	79.3	72.8	70.1
60	86.2	91.5	95.0	87.5	87.0
75	98.5	100.0	104.6	102.1	99.6
90	105.6	108.1	109.6	106.9	103.4
105	120.3	120.8	123.1	122.3	121.2
120	123.4	125.2	125.5	124.8	124.0
135	128.0	128.7	129.0	128.5	128.1

(b) Hybrid roll



(b) Hybrid roll

**Fig. 11 Heat pipe type heating roll and hybrid roll used in the experiment**

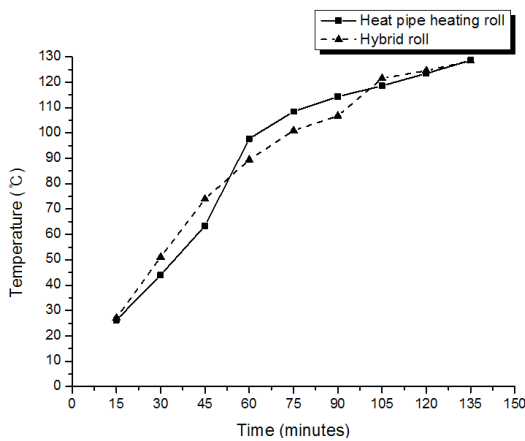


Fig. 12 Experiment result of heat pipe type heating roll and hybrid roll

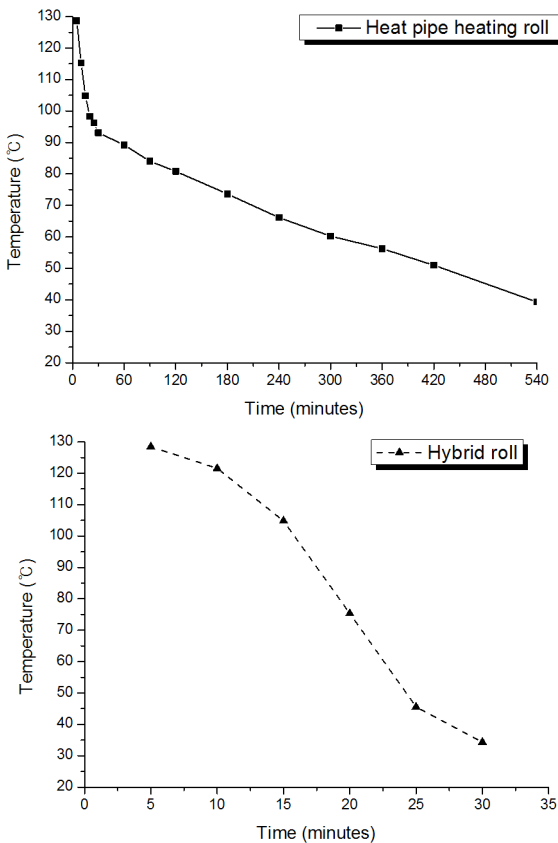


Fig. 13 Cooling efficient compared experiment result of heat pipe type heating roll and hybrid roll

#### 4.2 결과 고찰

히트파이프 방식의 히팅롤의 경우 열균일도를 위해 삽입된 히트파이프가 롤러 표면 전체의 온도를 고르게 전달하기 때문에 60분만에 100°C에 도달하였으며 이때  $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 열편차를 보였다. 하이브리드 롤의 경우는 열균일도를 위해 삽입된 열매체가 고르게 분포되

기 이전에는  $\pm 3\sim 4^\circ\text{C}$ 의 열편차를 보였고 100°C도달까지 75분이 소요되어 가열에까지 15분이 더 소요되었지만 100°C이상의 온도에서는 열매체가 자켓 내부에 고르게 퍼져나갔기 때문에  $\pm 1\sim 2^\circ\text{C}$ 로 히트파이프 방식 히팅롤의 열균일도와 대등한 성능을 보였다. 대부분의 공정이 100°C 부근에서 이뤄지기 때문에 가열시간의 미비하게 차이가 나지만 공정 효율 측면에서는 히트파이프 방식 히팅롤과 하이브리드 롤은 동등한 성능을 보임을 알 수 있었다. 이는 자켓방식을 채택한 하이브리드 롤의 열전달 측면에서 설계가 제대로 되었다는 것을 알 수 있다.

하이브리드 롤의 경우 롤의 냉각을 위해 냉동기를 이용하여 냉각수를 롤 내부로 유입하였기 때문에 빠른 속도로 냉각이 이루어졌다. 30분이라는 실험시간동안 약 92.5°C의 온도가 떨어졌다.

이에 반해 기존의 자연냉각방식의 히트파이프 방식 히팅롤의 경우 같은 시간에 약 36°C의 온도가 떨어졌다. 이후에 상온에 도달하는 시간까지 히트파이프 방식 히팅롤은 9시간이 걸렸다. 이는 냉각 시간대비 냉각성능에서의 약 18배의 냉각성능을 보였으며 이러한 롤 냉각시간의 단축은 공정조건의 변화에 신속한 대응이 가능하며, 대면적화를 이루는 롤 투 롤 핫엠보싱 공정의 미세 패턴 심도에 따른 공정조건을 찾는 과정에서 많은 이점이 있다. 공정조건을 찾기 위해 많은 시간이 소요 되는 히트파이프 방식 히팅롤 보다 월등한 냉각성능을 보이기 때문에 하이브리드 롤의 냉각성능측면에서 설계가 제대로 되었다는 것을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 미세 패턴 가공을 위해 유도가열 및 수냉이 가능한 하이브리드 롤 개발을 위해 열전달 해석과 구조해석을 통해 열매체 충전 관로 수량과 쉘 두께를 선정하였다. 이를 하이브리드 롤에 적용하여 같은 사양의 히트파이프 방식 히팅롤과 함께 가열과 냉각성능 비교 실험을 통해 목표성능에 부합하는 설계가 되었음을 증명하였다.

본 연구를 통해 얻은 구체적 결과는 다음과 같다.

- (1) 열전달 해석과 구조해석을 통해 하이브리드 롤의 목표성능에 부합하는 설계변수 값을 선정하여 유도가열과 수냉식 냉각이 가능한 하이브리드 롤을 설계 개발하였다.
- (2) 같은 실험조건의 열전달 측면에서 135분의 실험시간동안 하이브리드 롤의 경우 최고온도 129°C, 히트파이프 방식 히팅롤의 경우 최고온도 129.8°C로 대등한 성능을 보였다. 100°C이상의 온도에서는 온도편차 또한  $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 대등한 성능을 보였다.
- (3) 같은 실험조건의 냉각성능 측면에서는 30분의 실험시간동안

하이브리드 롤의 경우 약 92.5°C가 냉각되었고 히트파이프 방식 히팅롤의 경우 약 36°C가 냉각되었으며, 상온에 까지 도달하는 냉각 시간으로 보았을 때 약 18배 이상의 월등한 성능을 보였다. 이는 능동적인 온도 제어가 필요한 미세 패턴 가공 공정과 대면적화의 공정온도조건을 찾는 과정에서 빠른 시간 안에 온도조건에 도달하기 때문에 공정효율면에 많은 이점이 있다.

이와 같이 실험을 통해 위와 같은 하이브리드 롤의 능동적인 온도제어와 공정조건에 빨리 도달하는 공정효율 측면에 대해 검증하였다. 개발된 하이브리드 롤은 강제 냉각기능이 추가되어 있기 때문에 공정 온도 변경에 빠르게 대응이 가능하다.

이에 냉각기능이 추가된 하이브리드 롤은 플렉시블 디스플레이의 폴리머뿐만 아니라 플렉시블 기판과 같은 유연성 재료의 변경에 따른 공정온도 설정 변경에 빠르게 대응할 수 있으며, 미세 패턴 가공 분야뿐만 아니라 히팅롤과 냉각롤 두 개의 롤이 같이 사용되어야 하는 제철공정에서의 마그네슘 합금 압연 공정에도 적용이 가능할 것으로 사료된다.

본 논문에서는 하이브리드 롤의 설계에 관한 연구를 수행하였고, 향후 설계된 하이브리드 롤을 이용하여 유연성 재질에 따른 각 인롤에 미치는 영향과 최적의 공정온도에 관한 연구를 수행하여 미세 패턴 공정의 기준을 마련할 것이다.

## References

- [1] Ahn, S. H., Guo, L. J., 2008, High-Speed Roll-to-Roll Nanoimprint Lithography on Flexible Plastic Substrates, *Advanced Materials* 20 2044-2049.
- [2] Kim, J. H., Shin, K. H., 2007, Development of a Hot-Embossing Process using Ceramic Glass Molds for Polymer Micro Structures, *KSMTE* 16:6 168-174.
- [3] Kim, D. S., Lee, H. S., Lee, J. H., Lee, K. H., Kwon, T. H., 2006, Manufacture of High-Aspect-Ratio Polymer Nano-Hair Arrays by UV Nano Embossing Process, *KSME-A* 30:7 773-778.
- [4] Lee, C. W., Kim, N. S., Kim, C. W., 2012, Matching Technology Between Nip Roll Characteristics and Quality of Print Pattern in Roll-to-Roll Printed Electronics Systems, *KSME-A* 36:2 173-178.
- [5] Lee, C. W., Kim, N. S., Kim, C. W., 2013, Statistical Analysis for Thickness and Surface Roughness of Printed Pattern in Roll-to-Roll Printed Electronics System, *KSME-A* 37:3 287-294.
- [6] Lee, T. M., Kim, I. Y., Park, S. H., Kim, B. M., 2011, Analysis of Synchronization Error in R2R Gravure Off-set Printing Process, *KSPE* 28:10 1141-1145.
- [7] Kim, J. I., Kang, H. K., Shin K. H., 2006, Compensator-Roll-Type Register Error Modeling on Roll-to-Roll Flexible Display, *KSME* 537-541.
- [8] Kim, D. M., Choi, J. G., Kim, H. S., 2010, Precision Film Control of Roll to Roll System for RFID Printing, *KSMTE* 19:6 867-874.