

Flexible Flat Cable 생산성 향상을 위한 가압용 히팅롤러의 온도제어개선

전경진[#], 김재학*, 이호중*

Temperature Control Improvement of Pressure Heating Roller for Flexible Flat Cable Production

Keyoung Jin Chun[#], Jae Hak Kim*, Ho Jung Lee*

ABSTRACT

Pressure heating rollers with temperature control were mounted to a flat cable laminating machine (FCLM). Pressure heating rollers should be heated up to the setting temperature (175°C) and kept on to producing good quality flexible flat cables (FFC). Existing Pressure heating rollers took more than 70minutes to the setting temperature and did not keep on the setting temperature in production. Temperature controller, electric power controller, material and diameter of rollers and heat capacities were changed to improve the temperature control of the pressure heat rollers for better production of the FFC. Thus, the reaching time to the setting temperature (RT), temperature stability time (TST) and temperature hunting (TH) were measured and compared with the existing pressure rollers case.

The RT of A roller was shortened by 50minutes, and B roller was shortened by 15minutes. The TST of A roller was shortened by 13minutes, and B roller was shortened by 8minutes. The THs of both A and B rollers were settled up to $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Finally, the productivity of the FCLM and the quality of the FFC were increased.

Key Words : Computational heat transfer analysis(전산열전달해석), Computational structure analysis(전산구조해석), Flat cable laminating machine(평판 케이블 라미네이팅 기계), Flexible flat cable(가용성 케이블), PID(비례적분미분), Pressure heating roller(가압용 히팅롤러), Setting temperature(목표온도), Temperature control unit(온도제어부), Temperature hunting(온도현행), Temperature stability time(온도 안정시간)

1. 서론

평판 케이블 라미네이팅 기계(FCLM)은 Fig. 1과 같이 절연체(Insulator)들과 도선(Conductor)들을

기계의 좌우측에서 가압용 히팅롤러부(Pressure heating roller unit)로 투입하여 가열 및 압착 시켜 Fig. 2와 같은 Flexible flat cable (FFC)를 만들어 내는 기계이다. 가압용 히팅롤러부는 Fig. 3과 같이

* 접수일: 2005년 2월 11일; 개재승인일: 2005년 5월 13일

교신저자: 한국생산기술연구원

E-mail kjchun@kitech.re.kr Tel. (041) 589-8414

* 한국기술교육대학교

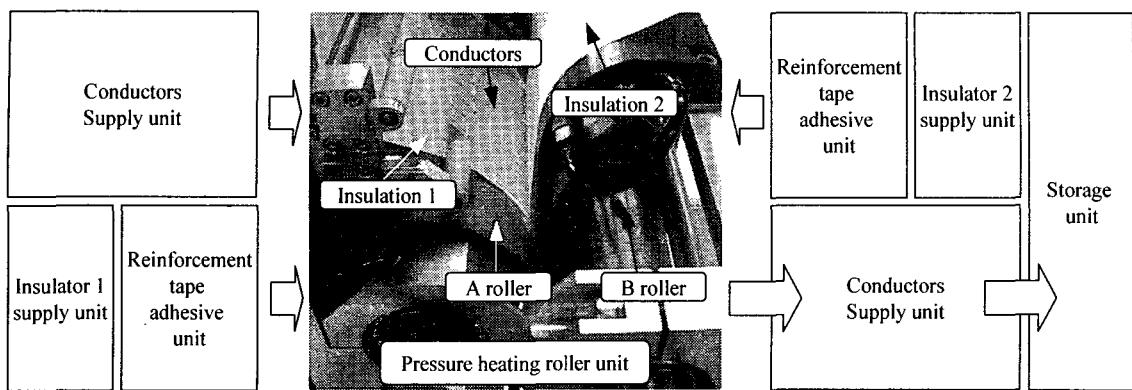


Fig. 1 Flat cable laminating machine

A 히터와 B 히터가 삽입되어 있는 가압용 히팅롤러인 A 률러와 B 률러, 히터가 삽입되어 있지 않은 1개의 가압용 률러로 구성되어 있다.

FFC를 생산하기 위해서는 가압용 히팅롤러를 생산에 적합한 목표온도(175°C)까지 가열하고 유지해야 한다. 기존의 가압용 히팅롤러를 가열시켜 FFC를 생산하는 과정을 시간과 온도변화를 기준으로 나누면 세 단계로 나눌 수 있으며 개선전 각 단계별로 다음과 같은 결과가 나온다. A, B 두 률러를 실내 온도에서 목표온도까지 가열시키는데 70분(목표온도도달시간)이상 소요되었고, 생산시작(Production start)시 발생하는 A, B 두 률러의 온도변화가 생산에 적합한 온도범위로 안정되는데 20분(롤러온도안정시간)이상 걸렸으며, FFC 생산 중에 률러의 실제온도는 설정 값 주위에서 진동하는 현상¹인 온도현텅(Temperature hunting)이 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ (온도현텅)정도 발생했다. 목표온도도달시간과 률러온도안정시간으로 인한 시간낭비가 있었고, 온도현텅이 커 제품불량의 원인이 되었다.

본 연구의 목적은 목표온도도달시간(Time to the setting temperature)과 률러온도안정시간(Temperature stability time of roller)이 단축되고, 온도현텅이 작아지도록 온도제어를 개선하는 것이다. 개선은 기존의 메커니즘을 유지한 상태에서 온도제어에 필요한 온도제어기(Temperature controller), 전력조정기(Power controller), 률러의 재질, 히터용량을 변경함으로써 이루어졌다.

롤러의 열전도와 강성, 온도제어를 모두 고려한 개선이 필요했으나 기존의 사례가 없어 기초적인

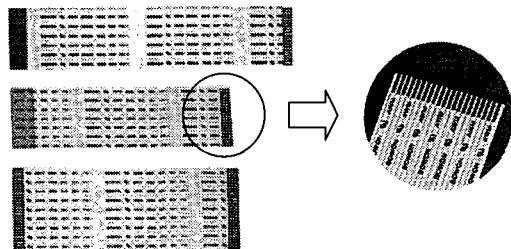


Fig. 2 Flexible flat cable

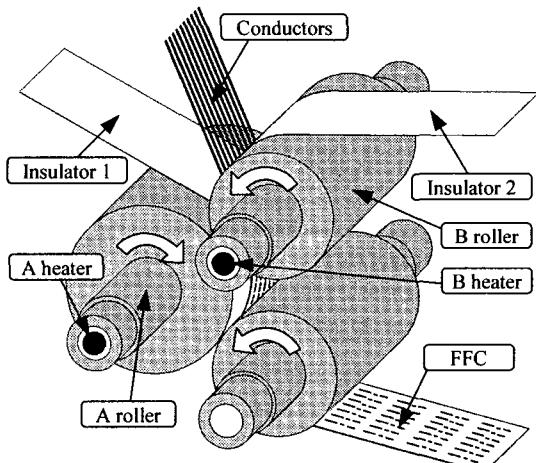


Fig. 3 Pressure heating roller unit

자료는 실험을 통해 수집했다. 분해능이 0.08°C (30°C 기준)인 열화상측정기(ThermaCAM 649 Package, FILR SYSTEM, SWEDEN)를 이용하여 롤러 표면의 온도를 측정했으며, 전산열전달해석프로그램(FLUENT6.1, FLUENT Inc, USA)을 이용하여 롤러의 열전도율과 히터용량 변화에 따른 목표온도도달시간을 계산해 보았다. 가압용 히팅롤러의 재질변경에 따른 기계적 강성문제를 알아보기 위해 전산구조해석프로그램(SolidMech ver1.0, 한국기술교육대학교, KOREA)을 이용하여 최대인장응력과 최대압축응력, 최대변위를 계산했다.

2. 재료 및 방법

2.1 기존의 온도제어부

기존의 온도제어부(Temperature control unit) 구성 과 제어과정을 살펴보면 Fig. 4와 같다.

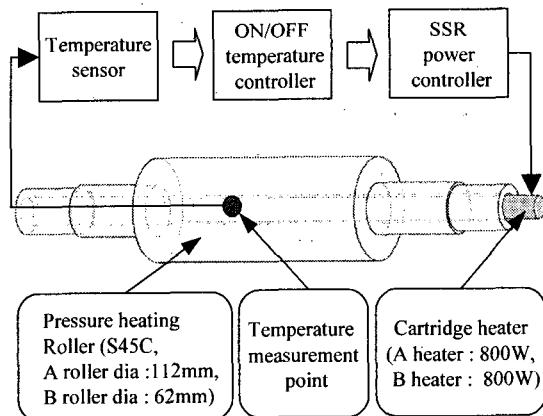


Fig. 4 Existing temperature control unit

기존의 온도제어부는 온도센서(Temperature sensor), ON/OFF 온도제어기(ON/OFF temperature controller), SSR 전력조정기(Solid state relay power controller), 카트리지 히터(Cartridge heater), 가압용 히팅롤러로 구성되어 있다. 온도센서가 온도 측정지점(Temperature measurement point)의 온도를 측정하여 측정값을 온도제어기로 전달한다. 온도제어기는 온도센서로부터 입력된 온도와 설정되어 있는 목표온도의 크기를 비교해 신호를 출력한다. 전력조정기는 온도제어기로부터 전달된 신호에 맞는

전압을 히터로 출력한다. 롤러에 삽입된 카트리지 히터가 전원을 받아 발열한다.

온도제어기의 제어방식은 ON/OFF 방식이고, SSR 출력을 내보낸다. 전력조정기는 입력되는 신호에 맞춰 0V 또는 220V의 전압을 출력한다. 가압용 히팅롤러의 재질은 S45C이며, 히터용량은 Fig. 4에 표기되어 있듯이 A, B heater 둘 다 같은 800W이다. A 롤러의 직경은 112mm이고, B 롤러의 직경은 62mm이다.

기존의 온도제어부를 통해서 얻어진 목표온도 도달시간(RT), 롤러온도안정시간(TST), 온도현팅(TH)을 세부적으로 살펴보면 Table 1과 같다.

Table 1 Measuring results of the existing temperature control unit

	RT [minutes]	TST [minutes]	TH [$^{\circ}\text{C}$]
A roller	70	20	± 50
B roller	30	15	± 50

A, B 두 롤러의 목표온도도달시간은 40분 차이가 나고, 롤러온도안정시간은 5분 차이가 난다. 온도현팅은 A, B 두 롤러 모두 $\pm 50^{\circ}\text{C}$ 정도 발생하고 있다.

2.2 열화상측정 및 전산해석

온도제어를 개선하기 전 열화상측정, 전산열전달해석, 전산구조해석을 실시하였다. 열화상측정은 가압용 히팅롤러의 표면에 나타나는 온도분포도를 알기 위해 측정하였으며, 전산열전달해석은 가압용 히팅롤러의 열전도율과 히터용량의 변화에 따라 목표온도도달시간이 어떠한 경향성을 가지고 변해가는지 알아내기 위해 실시하였으며, 전산구조해석은 가압용 히팅롤러의 재질변경에 따른 기계적 강성문제와 안전성여부를 알아보기 위해 실시하였다.

2.2.1 열화상측정

온도현팅단계 중 카트리지 히터에서 발열되는 열이 가압용 히팅롤러의 표면에 균등하게 전달되는지를 알기 위해 측정했다. 온도현팅단계에 접어들었을 때 A 롤러와 B 롤러의 표면온도를 촬영하였으며 그 결과값은 Fig. 5와 Fig. 6에서 확인할

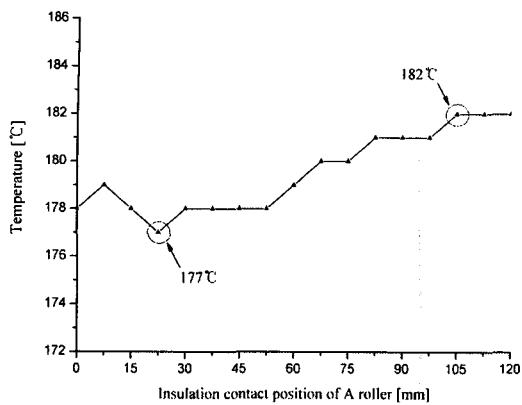


Fig. 5 Temperature of insulator contact position of A roller in temperature hunting

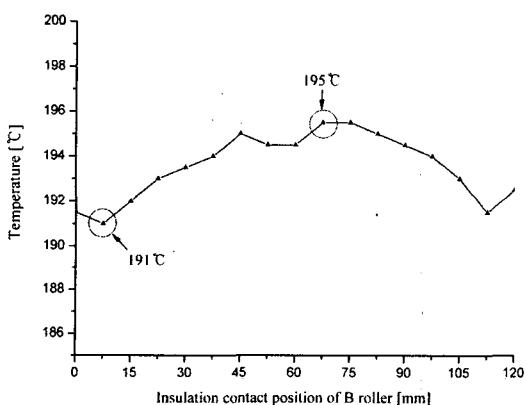


Fig. 6 Temperature of insulator contact position of B roller in Temperature hunting

수 있다. 그라프의 가로축은 Insulator 의 폭 치수인 120mm 를 나타내며 세로축은 Insulator 과 접촉하고 있는 둘러의 표면온도를 가리킨다. Fig. 5 는 A 둘러의 온도분포 값이고, Fig. 6 은 B 둘러의 온도분포 값이다. A 둘러 부위의 최고온도는 182°C이고, 최저온도는 177°C로 5°C의 차이를 보이고 있다. B 둘러의 최고온도는 195°C이고 최저온도는 191°C이며, 4°C의 온도차가 발생하고 있다.

2.2.2 전산열전달해석

가압용 히팅롤러의 재질 변경으로 인한 열전도율 변화와 히터용량의 증가가 목표온도 달시간에

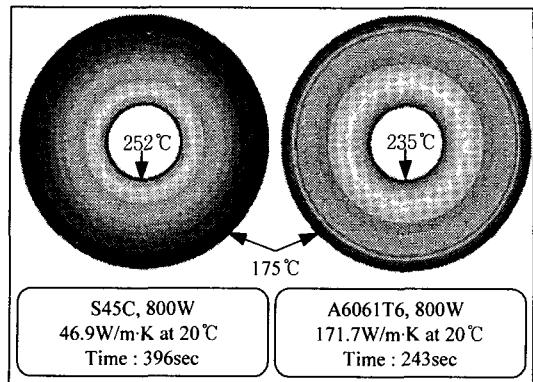


Fig. 7 Calculation result of time to the setting temperature when heat capacity 800W

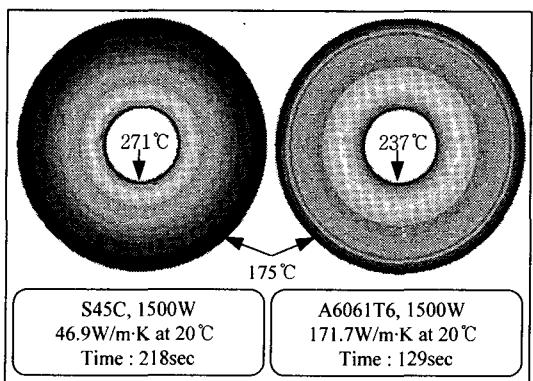


Fig. 8 Calculation result of time to the setting temperature when heat capacity 1500W

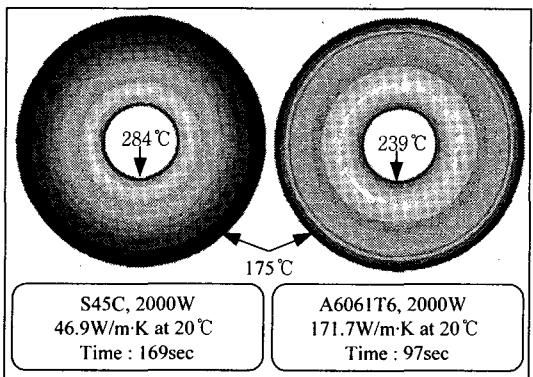


Fig. 9 Calculation result of time to the setting temperature when heat capacity 2000W

미치는 경향성을 알기 위해 Fluent 6.1 버전을 이용하여 열전도율²과 히터용량의 변화에 따른 목표온도(175°C) 도달시간을 계산했다. 기존의 가압용 히터롤러의 경우 외경 70mm, 내경 24mm로 모델링되었으며, 재질은 S45C를 이용하였고, 열전도율은 상온에서 측정한 열전도율 값인 $46.9 \text{ W/m} \cdot \text{K}^3$ at 20°C 를 사용하였다. 새로운 가압용 히터롤러의 모델링 치수는 기존 가압용 히터롤러와 같으며, 재질은 A6061-T6^{2,3}를 사용하였고, 열전도율의 값은 상온(Room temperature)에서 측정한 열전도율 값인 $171.7 \text{ W/m} \cdot \text{K}^3$ at 20°C 를 사용하였다. 히터용량은 800W, 1500W, 2000W를 프로그램에 맞게 변환하여 대입했다. 목표온도는 175°C 로 설정하였다. 열전도율과 히터용량의 변화에 따른 목표온도도달시간 계산에 관한 전산열전달해석의 결과값을 Fig. 7~9 과 Table 2에서 나타내었다.

Table 2 Time to the setting temperature calculated by heat transfer analysis

Material	Heater capacity [W]	RT [sec]
S45C	800	396
	1500	218
	2000	169
A6061-T6	800	243
	1500	129
	2000	97

히터용량이 같고 열전도율이 다른 경우 열전도율이 높은 A6061-T6가 목표온도도달시간이 짧았으며, 열전도율이 같고 히터용량을 증가시킨 경우에는 히터용량이 클수록 목표온도도달시간이 짧아졌다.

2.2.3 전산구조해석

가압용 히터롤러는 인슐레이션들과 도선들을 압착한다. 이때 가압용 히터롤러에 작용하는 힘에 의해 가압용 히터롤러에 변형이 일어난다. 재질을 변경하면서 생길 수 있는 구조적인 문제를 알기 위해 전산 구조해석을 실시하였다.

경량성, 강성, 적은 비용^{4,5}을 고려하여 S45C를 대체할 재질로 A6061-T6를 선택했다. 모델링은 세가지 경우로 나누어서 했다. 첫번째 경우(Case 1)

는 기존의 가압용 히터롤러의 치수와 재질을 사용하여 모델링하였다. 재질은 S45C를 이용하였으며, A 롤러의 외경은 112mm, 내경은 24mm, 길이는 320mm로 모델링하였다. B 롤러의 외경은 62mm, 내경은 24mm, 길이는 320mm로 모델링 하였다. 두 번째 경우(Case 2)는 기존의 가압용 히터롤러의 치수를 그대로 사용하고 재질만 A6061-T6로 바꾼 경우이다. 세 번째 경우(Case 3)는 가압용 히터롤러의 직경을 변경하였고 재질은 A6061-T6를 사용한 것이다. A 롤러는 외경 116mm, 내경 24mm, 길이를 320mm로 모델링하였다. B 롤러의 외경은 86mm, 내경은 24mm, 길이는 320mm로 모델링하였다. 이 치수는 A 롤러의 외경이 4mm, B 롤러의 외경이 24mm 커진 것이다.

A 롤러에는 3923N의 힘이 작용하고, B 롤러에 2086N의 힘이 작용하며, 하중은 분포하중으로 가해진다. S45C의 탄성계수는 206.84Gpa⁵을 사용하였고, A6061-T6의 탄성계수는 68.94Gpa⁵을 사용내었다. 전산구조해석의 결과들을 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Stress and deflection of A and B Roller

Material (Case no)		A roller	B roller
S45C (Case 1)	MTS [Mpa]	1.1	3.6
	MCS [Mpa]	-1.1	-3.6
	MD [μm]	1.0	6.0
A6061-T6 (Case 2)	MTS [Mpa]	1.1	3.6
	MCS [Mpa]	-1.1	-3.6
	MD [μm]	3.1	18.2
A6061-T6 (Case 3)	MTS [Mpa]	1.0	1.3
	MCS [Mpa]	-1.0	-1.3
	MD [μm]	2.7	4.8

최대인장응력(Maximum tensile stress, MTS), 최대 압축응력(Maximum compressive stress, MCS)은 Case 3에서 A 롤러 ± 1.0Mpa, B 롤러 ± 1.3Mpa로 가장 작게 나왔으며 최대변위(Maximum deflection)는 A 롤러의 경우 Case 1에서 $1.0 \mu\text{m}$, B 롤러의 경우 Case 3에서 $4.8 \mu\text{m}$ 로 가장 작게 나왔다.

S45C의 항복응력은 530Mpa⁶이고, A6061-T6의 항복응력은 240Mpa⁷이며, FFC의 두께는 1mm이

다. 항복응력을 기준으로 안전계수를 구해서 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Calculated factor of safety

Material (Case no)	Factor of safety	
	A roller	B roller
S45C (Case 1)	464	145
A6061-T6 (Case 2)	210	65
A6061-T6 (Case 3)	233	179

각각의 경우마다 안전계수가 작게는 65에서 많게는 464가 나왔다. Case 1의 A 롤러가 가장 높은 값이 나왔으며 Case 2의 B 롤러가 가장 작은 값이 나왔다.

2.3 온도제어 개선

기존의 온도제어부에 적용된 ON/OFF 제어방식은 설정값(목표온도)으로 ON/OFF하게 되어 있어서 약간의 온도 변화에 대해서도 출력이 빈번하게 변화하며, 히터연결 사용시 SSR은 전압출력의 온도 조절기와 조합하여 히터 개폐에 사용된다.¹ 이와 같은 이유로 온도현팅이 크게 발생하기 때문에 온도제어기와, 전력제어기를 개선하였다. 이론적으로 보았을 때 실제적인 열전달률은 매질의 성질인 열전도율에 달려 있고, 물질의 내부에너지가 상승할 때 그것의 온도 또한 상승한다.² 그리고 전산열전달해석 결과 열전도율과 히터 용량이 높을수록 가압용 히팅롤러의 온도 상승이 빨라졌다. 이와 같은 이유로 롤러재질과 히터용량을 바꾸었다.

2.3.1 온도제어기 및 전력조정기

열유동 제어와 관련하여 가장 보편적으로 사용되는 제어기는 PID (Proportional Integral Differential)제어기로서 귀환되는 출력신호와 설정치 간의 차이에 대하여 비례, 적분 및 미분동작을 수행하는 제어요소의 각 상수 값을 적절히 정해줌으로써 시스템의 응답이 원하는 설정치로 수렴해 가게 하며,³ 정격초과 및 전기히터의 포화를 발생시키지 않으며 시스템의 응답특성을 향상시킬 수 있다.⁴ PID 제어는 비례동작으로 현팅이 없는 원활한 제어를 하고, 적분동작으로 오프셋을 자동으로 수정한다.⁵ 새로운 온도제어기는 PID 제어방식

이 채택된 온도 콘트롤러(PX7, HANYOUNG ELECTRONIC CO. LTD., KOREA)이며, 목표온도와 실제온도와의 차이를 계산하여 4~20mA 전류를 탄력적으로 출력한다. 전력 조정기는 4~20mA의 전류입력을 받아 4mA 일때 0% (0V) 전압 출력, 20mA 일 때 100% (220V) 전압을 출력하는 SCR (Silicon-controlled rectifier)방식을 적용한 전력 조정기(TPR-2, HANYOUNG ELECTRONIC CO. LTD., KOREA)를 사용하였다.

2.3.2 롤러재질 및 직경

2.2.2 절의 전산열전달해석의 결과에 따르면 열전도율이 높을수록 목표온도에 도달하는 시간이 빨라지는 경향성이 나타났다. 상온에서 측정한 A6061-T6의 열전도율은 $171.7 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ at 20°C 이다. 이 값은 상온에서 측정한 S45C 열전도율 값인 $46.9 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ at 20°C 보다 3배 이상 높은 값이다.

2.2.3 절의 전산구조해석 결과에 따르면 가압용 히팅롤러의 직경이 커질수록 용력과 변형량이 작아지며, 탄성계수가 작은 재질을 사용하면 변형량이 커지는 것으로 나타났으며, 안전 계수는 가장 작은 값이 65인 것으로 나타났다. A, B 롤러의 최대 변위를 합친 결과는 Case 1의 경우 $7.0 \mu\text{m}$, Case 2의 경우 $21.3 \mu\text{m}$, Case 3의 경우 $7.5 \mu\text{m}$ 인 것으로 나타났다.

이러한 결과를 토대로 새로운 가압용 히팅롤러의 재질은 열전도도가 뛰어난 A6061-T6로 선정하였으며, 가압용 히팅롤러의 직경은 항복응력 대한 안전계수가 크고 변형량이 기존의 가압용 히팅롤러와 비슷한 치수인 A 롤러 외경 116mm, B 롤러 외경 86mm로 결정하였다.

2.3.3 히터용량

앞의 2.2.2의 전산열전달해석의 결과에 따르면 히터용량이 증가함에 따라 목표온도에 도달하는 시간이 빨라지는 경향성이 나타났다. 이 결과를 토대로 히터의 용량을 A 히터 2000W, B 히터 1500W로 증가시켰다. A, B 두 롤러의 직경차이를 고려하여 삽입되는 히터들의 용량에 500W 차이를 두었으며, 기계에 투입되는 전원을 고려하여 히터 용량이 2000W를 넘지 않도록 했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 결과

개선된 온도제어부의 구성을 Fig. 10에서 나타내었다.

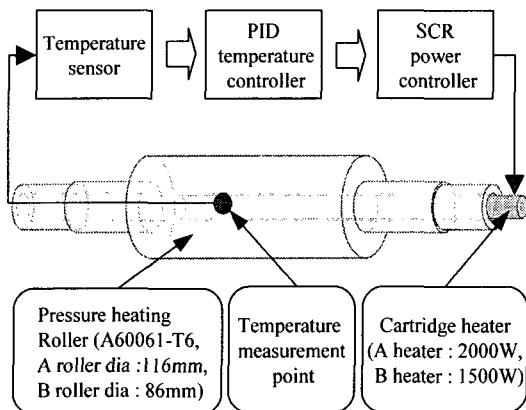


Fig. 10 Improved temperature control unit

Fig. 11은 목표온도 도달시간을 측정한 그래프이다. 상온 30°C에서 목표온도 175°C까지 가열하였으며 목표온도에 도달하는데 걸린 시간을 살펴보면 A 롤러의 경우 15 분(T1), B 롤러의 경우 20 분(T2) 소요되었다.

Fig. 12는 룰러온도 안정시간을 측정한 그래프이다. A 롤러는 2 분(T3)을 기점으로, B 롤러는 2 분

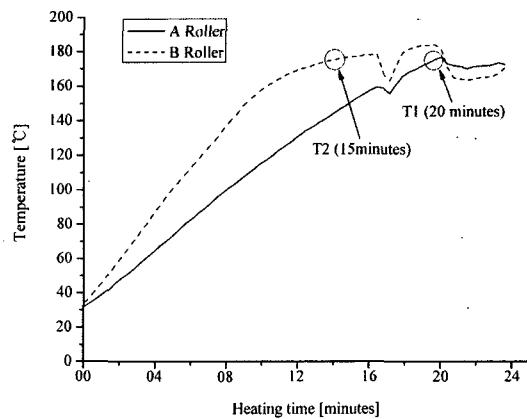


Fig. 12 Temperature stability time of the roller (TST)

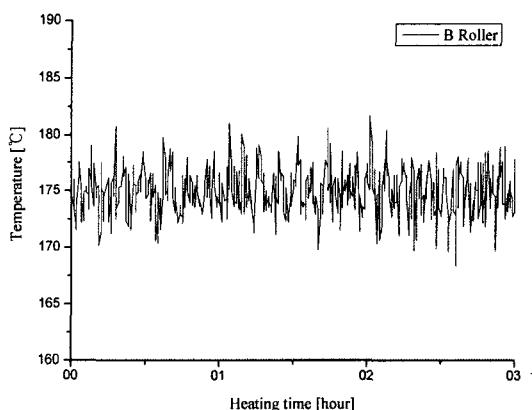


Fig. 13 Temperature hunting (TH) of A roller

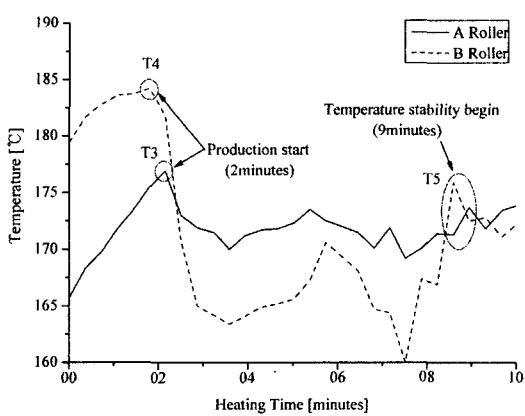


Fig. 11 Reaching time to the setting temperature (RT, 175°C)

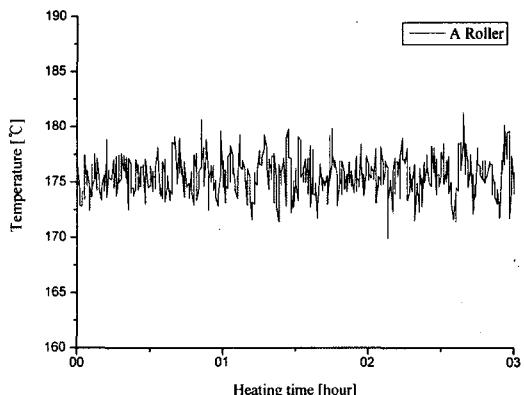


Fig. 14 Temperature hunting (TH) of B roller

(T4)을 기점으로 온도가 하강하고 있다. 생산을 시작하는 초기부분에 A 롤러와 B 롤러의 온도하강 현상이 발생하는데, 이를 근거로 온도안정시간 2 분 (T3, T4)을 기점으로 생산이 시작되었음을 알 수 있다.

가압용 히팅롤러의 온도가 낮아지면 온도제어기는 히터 발열신호를 출력하여 가압용 히팅롤러의 온도를 생산에 적합한 온도인 목표온도까지 상승시키게 된다. 온도안정시간 9 분(T5)을 기점으로 A, B 두 롤러의 표면온도가 170°C~175°C 사이에서 안정된 것을 확인할 수 있다. 온도가 안정되는데 7 분 정도 소요되었다.

Fig. 13 와 Fig. 14 은 A 롤러와 B 롤러의 온도현상을 나타낸 그래프이다. A 롤러와 B 롤러의 온도현장을 3 시간 동안 측정하였다. A, B 롤러의 온도변화가 목표온도 175°C를 기준으로 ± 5°C 정도에서 유지되고 있으며, A 롤러가 B 롤러보다 좀 더 안정적인 온도변화를 보이고 있다.

개선된 결과값을 수치화하여 Table 5 에 나타내었다.

Table 5 Measuring results of the improved temperature control unit

	A roller		B roller	
	Before	After	Before	After
RT (minutes)	70	20	30	15
TST (minutes)	20	7	15	7
TH (°C)	±50	±5	±50	±5

목표온도도달시간은 A 롤러의 경우 20 분이었고, B 롤러 경우 15 분이었다. 롤러온도안정시간은 A, B 두 롤러 모두 7 분이었다. 온도현장은 A, B 두 롤러 모두 ± 5°C였다.

3.2 고찰

온도제어기, 전력조정기, 롤러의 재질 및 직경, 히터용량을 개선 교체함으로써 얻어진 결과들인 Fig. 11 ~ Fig. 14 를 분석하여 Table 6 에 나타내었다.

목표온도도달시간은 A 롤러의 경우 70 분에서 20 분으로 단축되었고, B 롤러의 경우 30 분에서 15 분으로 단축되었다. 롤러온도안정시간은 A 롤러의 경우 20 분에서 7 분으로 단축되었고, B 롤러의 경

Table 6 Comparison of measuring results before and after the improvement

	RT [minutes]	TST [minutes]	TH [°C]
A roller	20	7	± 5
B roller	15	7	± 5

우 15 분에서 7 분으로 단축되었다. 온도현장은 A, B 두 롤러 모두 ± 50°C에서 ± 5°C로 감소되었다. 생산적인 시각에서 봤을 때 제품을 양산 할 수 있는 작업시간이 60 분 가량 늘었으며, 온도현장이 1/10로 안정되어 양질의 FFC를 대량 생산을 할 수 있는 기반을 마련하게 되었다.

4. 결론

온도제어와 관련된 비효율적인 구조를 개선함으로써 가압용 히팅롤러의 온도제어개선을 이끌어내었다. A 롤러의 Reaching time to the setting temperature (RT)와 Temperature stability time (TST)는 각각 50 분과 13 분씩 단축되었으며, B 롤러의 Reaching time to the setting temperature (RT)와 Temperature stability time (TST)는 각각 15 분과 8 분씩 단축되었다. A, B 롤러의 Temperature hunting (TH)은 ± 5°C로 안정되었다. Flat cable laminating machine 의 생산성이 향상되었으며, 양질의 Flexible flat cable 을 대량 생산할 수 있게 되었다. 본 연구의 방법 및 결과를 가압용 히팅롤러를 사용하는 유사한 생산시스템분야에서 응용할 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 2004년도 산업자원부 부품소재기술 지원사업에 의해 수행되었으며, 연구수행에 도움을 주신 KOREA FINE (주) 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

1. Omron Industrial Automation, “온도조절기 종합 카탈로그,” OMRON INDUSTRIAL AUTOMATION, pp. 전 34-전 35, 2004.

2. Kreith, F., Bohn, M. S., "PRINCIPLES OF HEAT TRANSFER," SCIENCE & TECHNOLOGY, pp. 4, 2002.
3. ASM Handbook Committee, "ASM HANDBOOK EIGHTH EDITION (properties and selection)," ASM, pp. 55, 1977.
4. Yoon, Y. K., Kim, G. K., Yoon, H. S., "A Study of the Mechanical Properties of Patch-Bonded and Riveted Repairs on Cracked Al6061-T6 Alloy Structure," International Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol 001. No. 002, 2000.
5. Rilley, Sturges, Morris, "Mechanics of Materials," SciTech, pp. 1, 2000.
6. ASM International, "ASM Handbook Volume I ,," ASM, pp. 197-199, 1990.
7. ASTM, "1995 ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS SECTION 2 ,," ASTM, pp. 294, 1995.
8. Shin, Y. G., Ko, Y. H., Kim, Y. I., Jeong, K. H., "Optimal PID control of an electric heater," The Society of Air Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Proceeding of the SAREK 1999 Summer Annual Conference, pp. 1026-1030, 1999.
9. Chang, Y. J., Park, Y. C., Chang, K. S., "A Electric Heater Control for the Supply Air Temperature Control in PEM," The Society of Air Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea Proceeding of the SAREK 2004 Summer Annual Conference, p p. 1337-1342, 2000.