

## 나일론/금속 접합을 위한 유도가열공정의 분석

장윤상 · 박정웅\*

수원대학교 기계공학과  
\*국립천안공업대학 신소재열공정과

## Analysis of the Induction Heating Process for the Joint of Nylon and Metal

Yoonsang Chang and Jung-ung Park\*

Dept. of Mechanical Engineering, The University of Suwon, 445-743, Korea  
\*Dept. of Advanced Material Eng., Cheonan National Technical College, 330-717, Korea

**Abstract.** The characteristics of the induction heating process are analyzed for the joint of nylon and metal. The temperature of metal surface is measured using thermocouples. The relations of temperature and induction heating parameters are analyzed. Heat equation models are constructed and the temperature distribution is predicted using Fluent. The effects of heating parameters on the joint strength are evaluated. Finally, the optimal parameters of induction heating process are proposed as 16kW and 6 seconds.

(Received July 19, 2002)

**Key words:** Induction heating, Heat transfer model, Adhesion, MC nylon, Joint strength

### 1. 서 론

기어, 베어링, 캠 등 마찰기계요소들의 마찰성능을 향상시키고 윤활 문제를 해결하기 위하여 금속재료를 기계적 성질이 우수한 플라스틱으로 대체하려는 많은 노력이 있어왔다. 플라스틱은 값이 싸고 성형이 용이하며 건조마찰계수가 작다는 등 여러 가지 장점을 갖고 있다. 그러나 강도가 금속보다 작고 응력 집중에 취약하여 하중을 많이 받을 수 없으며 열전도 계수가 커서 열의 축적에 의한 소성변형도 비교적 크게 일어난다[1]. 마찰과 강도 문제를 동시에 해결하기 위하여 금속재료의 접촉부에 마찰성능이 좋은 플라스틱을 접합한 재료를 사용할 수 있다. 플라스틱의 표면을 녹이고 널링(knurling)가공된 금속과 취사에 의하여 억지끼워맞춤하면 비교적 단순한 제작 공정과 낮은 비용으로 금속 보강재와 접합시켜 마모와 강도 문제를 동시에 해결할 수 있다.

접착제의 역할을 대신하는 플라스틱의 용융부를 만들기 위해서는 유도가열에 의한 국부적 가열방식이 효율적이다. 고주파를 이용한 유도가열은 가열 효율이 높고 제어 및 작업성이 용이하며 깨끗한 작업환경 등의 장점을 가지고 있어서 일반적인 금속용해 및 열처리뿐만 아니라 단조 가열, 용접, 브레이징(brazing) 등 여러 용용

분야에 효율적으로 사용되고 있다[2]. 특히, 유도가열의 국부적 가열 기능은 플라스틱의 가열없이 자성체인 금속의 표면만 가열이 가능하여 플라스틱과 금속의 끼워맞춤 상태에서 접착시키는 재료의 접합공정에 적합하다.

플라스틱과 금속의 접합부의 전단강도는 플라스틱의 강도에 비하여 상당히 작기 때문에 접합공정의 변수를 최적화 하여 최대의 강도를 유지할 수 있는 안정적인 제조공정의 설계가 필요하다. 플라스틱 용융, 금속 널링, 억지끼워맞춤 등 접합공정 중에서 유도가열은 접합력에 가장 영향을 많이 끼치는 공정이다. 본 연구에서는 윤활성이 기존의 금속보다 우수한 MC(Monomer Casting) 나일론과 강도를 보완하기 위한 금속 보강재를 접합하는 마찰기계요소 재료의 제조공정 중 유도가열 공정의 특성을 분석하였다. MC 나일론은 최근 기계부품 소재로 주목을 받고 있는 엔지니어링 플라스틱 중 하나이다. MC 나일론은 분자구조가 일반적으로 많이 사용되는 나일론 6과 동일하나 용매의 존재없이  $\epsilon$ -caprolactam을 음이온 중합시킴으로서 얻어진다. MC 나일론은 분자량 및 결정화도가 매우 높고 인장강도, 가공성 등이 우수하여 철강 가공용 소재로 응용될 수 있는 장점이 있다[3]. 마찰기계 요소는 사용하는 대상에 따라서 평관형, 외부마찰 원통형, 내부마찰 원통형 등으로 나눌 수 있다. 본 연구는 기어

등으로 가장 많이 사용되고 가공이 비교적 용이한 외부 마찰 원통형 기계요소를 대상으로 하였다. 유도가열에 의한 금속의 온도 특성을 실험값과 이론적 모델에 의한 예측값의 비교에 의하여 분석하고 최적 접합 조건을 제시한다. 또한 접합강도를 측정하여 접합 강도에 영향을 미치는 인자들의 특성을 분석한다.

## 2. 실험방법

실험에 사용한 MC 나일론은 (주)한국 폴리펜코에서 상업용으로 제작한 제품이며 금속 보강재는 S45C 강이다. 나일론과 금속의 접착성을 향상시키기 위해서는 물리·화학적으로 여러 가지 접합 방법이 있으나 경제성 및 생산성을 고려하여 가능한 한 단순한 기계적 방법들을 선택하였다. Fig. 1은 접합공정도로서, 접합성을 향상시키기 위한 널링(knurling), 억지끼워맞춤(joining), 유도가열접합(induction heating) 등 여러 가지 가공 단계들을 포함하고 있다.

우선 나일론의 중합 제조과정에서 발생한 내부응력을 제거하기 위하여 140°C로 예열된 로안에서 18시간 가열한 다음 로냉으로 어닐링(annealing)을 실시하였다. 그리고 나일론을 건식으로 길이 50 mm, 내경  $\phi$ 30 mm으로 선삭 가공하였다. 길이 50 mm의 금속 보강재는  $\phi$ 30 mm으로 외경가공 후 널링가공을 실시하였다. 널(knurl)은 다이아몬드 형상으로 16 및 20 tpi(teeth per inch)를 사용하였다. 금속 보강재는 널링 후 유기용매(hexane)로 세척하여 표면의 기름 또는 금속가루 등

을 제거하였다. 억지끼워맞춤이 필요한 대부분의 시편은 나일론의 용점이 216°C인 것과 열팽창계수를 고려하여 나일론을 로안에서 130°C로 가열하여 약 0.5~0.6 mm의 지름 팽창을 만들었다. 가열 팽창된 나일론에 수동 유압프레스를 사용하여 금속보강재를 삽입하였다.

결합된 시편을 고주파 유도가열에 의하여 점착시켰다. 고주파 유도가열 장치를 제작하는 PSTek사와 협의하여 Fig. 2와 같은 장치를 제작하였다. 대상 시편인 지름 30 mm의 강을 약 5초 정도 가열함으로써 목적하는 나일론의 용융을 얻기 위하여 표피효과(skin depth)가 약 0.05 mm인 주파수 15 kHz에 대하여 열용량을 계산하고 최대 20 kW의 출력을 얻을 수 있도록 하였다. 주파수의 변동은 어려우므로 출력을 조정하여 최적의 용융 접합 조건을 얻을 수 있도록 하였다. 가열코일의 권선 직경은 103 mm, 높이는 82 mm이며 시편 회전장치는 34 rpm으로 회전하며 시편을 고르게 가열할 수 있도록 하였다.

마지막으로 고주파 가열 후 녹아서 유출된 나일론을 분리하기 위하여 선삭하였다. 준비된 시편에 대하여 두 재료사이의 전단력에 견디는 접합강도를 측정하기 위하여 Testmetric 만능시험기를 사용하여 압축 속도 10 mm/min, 전하중(pre-load) 10 N으로 압축실험을 하였

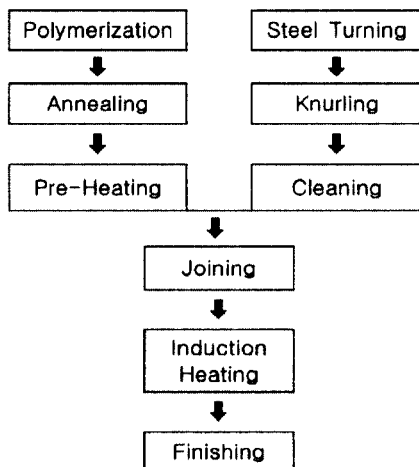


Fig. 1. Nylon/metal joint process.

다. Fig. 3은 외부 나일론과 내부 금속으로 구성된 원통형 접합재료 시편을 보여준다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 보강재 가열 온도

유도가열 조건을 결정하기 위하여 13~18 kW의 출력으로 3~6초를 가열하며 보강재 표면의 온도를 측정하였다. 온도측정은 접촉식 열전대 온도계를 사용하였다. 나일론/금속 접합은 가열할 때의 접합면 온도 상승도 중요하지만 가열 정지 후 계속 보유된 열 에너지에 의하여 용융접합이 이루어진다. 또한 유도가열은 금속표면의 온도를 급속히 향상시키며 표면에서의 거리에 따라 온도차이가 많기 때문에 금속재의 온도가 거의 평형을 이루었다고 예상되는 가열 종료 3초 후의 온도를 측정하였다. 온도측정은 나일론이 접합되지 않은 상태에서 실시되었기 때문에 대류에 의하여 실제의 나일론 용융 조건과는 약간의 차이가 있으리라고 예상된다. Fig. 4는 장치의 출력과 가열시간에 대한 온도의 크기를 나타낸

다. 출력과 시간의 곱에 의한 가열 에너지(kW·sec)에 대하여 온도상승을 조사한 결과 Fig. 5에서 보는 바와 같이 온도상승은 가열 에너지에 비례한다. 회기분석에 의하여 에너지(E)와 보강재 표면온도(T)의 관계 모델을 다음과 같이 구하였다.

$$T = 3.42E + 49.98 \quad (1)$$

#### 3.2 온도 분포 해석

나일론과 금속의 접합면은 접근이 어려워 적외선을 이용한 온도측정이 불가능하며 위에서 언급한 바와 같이 접촉식 열전대 온도계를 이용한 온도측정은 정확한 온도의 분포를 측정하기가 어렵다. 따라서 시편의 형상 및 열전달 모델을 이용한 수학적 해석이 시편의 가열 특성을 분석하는데 더 적당하다. 비정상상태(unsteady)의 일반적인 원통좌표계 열방정식[4]으로부터 시편의 길이가 지름에 비하여 커서 축방향의 열전달이 없다고 가정하면 적절한 2차원의 열방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $C_p$ 는 비열,  $k$ 는 열전도도,  $r$ 은 반경,  $T$ 는 온도를 나타낸다. 식 (2)로부터 보강재 및 나일론의 열방정식은 아래첨자 S와 N에 의하여 각각 다음과 같이 표시된다.

$$\rho_S C_{pS} \frac{\partial T_S}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_{Sr} \frac{\partial T_S}{\partial r} \right) \quad (3)$$

$$\rho_N C_{pN} \frac{\partial T_N}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( k_{Nr} \frac{\partial T_N}{\partial r} \right) \quad (4)$$

나일론과 보강재의 경계면에서 초기조건은 다음과 같다.

$$T_S(r, 0) = T_N(r, 0) = T_i \quad (5)$$

또한 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial T_S}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (6)$$

$$T_S(r_S, t) = T_N(r_S, t) \quad (7)$$

$$q'' = -k_S \frac{\partial T_S}{\partial r} - k_N \frac{\partial T_N}{\partial r} \text{ at } r = r_S \quad (8)$$

$$-k_N \frac{\partial T_N}{\partial r} = h[T_N(r = r_N) - T_\infty] \text{ at } r = r_N \quad (9)$$

식 (3), (4)의 모델과 식 (5)~(9)의 조건에 대하여 열 분석 프로그램 Fluent 5.4[5]를 이용하여 온도 분포를 예측하였다. 사용된 재료의 물성 데이터는 Table 1과 같다. 열원은 16kW로 하고 코일의 권선 반경과 높이, 보강재의 직경과 길이에 대한 근접효과(proximity effect)를 고려하여 60%의 효율로 9.6kW를 적용하였다. 또한 표피효과(skin Effect)가 15kHz에서 약 0.05 mm인 것을 고려하여 열원이 보강재 표면 0.1 mm안에서 발생하는 것으로 가정하였다. Fig. 6은 6초 후 가열이 종료된 시점의 온도 분포를 나타낸다. 보강재 표면은 약 590°C, 중심부는 약 280°C까지 상승하며 나일론은 접합부위만 국부적으로 온도가 상승하여 용융 접합됨을 보여준다. 한편 Fig. 7의 가열 종료 3초 후 온도분포를 보면 보강재 표면온도는 약 440°C로 내려가고 열은 보강재 내부로 침투하여 거의 같은 온도를 만들어 준다. 나일론은 여전히 접합면만 국부적으로 가열되어 용융상태가 지속됨을 보여준다.

열전대 온도계를 이용하여 보강재 표면의 온도를 측정하였을 때 16 kW로 가열한 경우 보강재의 온도는 약 380°C로 측정되어 해석결과인 440°C와는 약 60°C의 차이가 있다. 이유는 두 가지로 해석할 수 있다. 첫째는 원통형 재료의 길이방향 끝단의 온도가 대류에 의하여 해석된 중간 부분의 온도보다 낮다는 것이다. 둘째는 참고문헌 [2]의 근접효과가 재료의 길이가 코일의

높이보다 클 때의 자료로서, 본 실험에서와 같이 재료의 길이가 작을 경우에는 가열효율이 더 낮아진다는 것이다. 이 경우는 자료가 없어서 효율을 50%로 가정하여 8kW의 열원을 적용하여 다시 해석한 결과 가열 종료 3초 후 380°C의 보강재 온도를 얻었다. Fig. 8은 가열시간에 따른 보강재 표면의 최고온도의 변화를 나타낸 그림으로 유도가열 장치의 효율을 60%와 50%로 가정하였을 때의 보강재 온도변화를 비교하여 볼 수 있다.

### 3.3 접합강도 평가

나일론/금속 접합재료는 유도가열된 금속에 의하여 두 재료의 경계층에서 용융된 나일론을 매개체로 접착된 나일론부와 금속부의 접착관계로 볼 수 있다. 그러므로 두 재료의 접합강도에는 용융된 나일론의 접착제

Table 1. Material property data

	Steel	Nylon	Air
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7800	1140	1.225
Specific Heat (J/kgK)	460	1680	1006.43
Thermal Conductivity (W/mK)	50	0.25	0.0242
Convection Coeff. (W/m <sup>2</sup> K)			8

Fig. 6. Temperature distribution after 6 seconds.

(adhesive)로서의 특성이 가장 큰 영향을 미친다. 용융 나일론의 점착성은 반데르발스(Van der Waals)힘에 의하여 설명될 수 있다[6]. 점착제와 접합물 사이의 점착력은 두 물질의 기계적 성질, 즉 물질의 표면 에너지 관계에 의하여 결정되며 액체상태의 점착제에서의 표면 에너지는 표면장력을 의미한다. Young-Dupre 관계식으로부터 두 물질 사이의 점착력을 높이려면 액체인 점착제의 표면장력이 크고 점착제와 접합물 사이의 접촉각이 작아야 한다. 점착제의 표면장력은 열역학적인 인자로 이론적으로는 점착제의 두께 등 다른 물리적 성질은 점착력에 영향을 미치지 않는다[6]. 접촉각을 작게 하려면 기본적으로 용매를 사용하여 접합물 표면을 세정하고 에칭, 표면처리 등의 방법으로 특정한 미시적 표면 형상 및 조도를 갖게 함으로써 접촉각을 작게 하고 점착력을 높일 수 있다[7]. Fig. 1의 접합공정에서 유기용제를 이용한 세정 및 금속 보강재의 널링공정은 접촉각의 감소로 접합력을 높이기 위한 방법이다.

나일론/금속 접합공정에서 접합부의 강도에 대한 영향이 가장 크다고 예상되는 용융 점착력이 외력에 견딜 수 있을 만큼 충분히 크다면 금속 보강재의 널링공과 나일론의 예열 과정이 불필요하게 된다. 또한 금속의 세척 및 프레스에 의한 가압공정이 쉬워진다. 유도가열에 의한 접합공정에서 용융 점착력에 의한 접합강도가 어느 정도가 되는지 알아보기 위하여 널링가공을 하지 않은 보강재와 20 및 16 tpi의 널로 가공한 보강재의 접합력을 비교하였다. Fig. 9의 결과에서와 같이 널링가공을

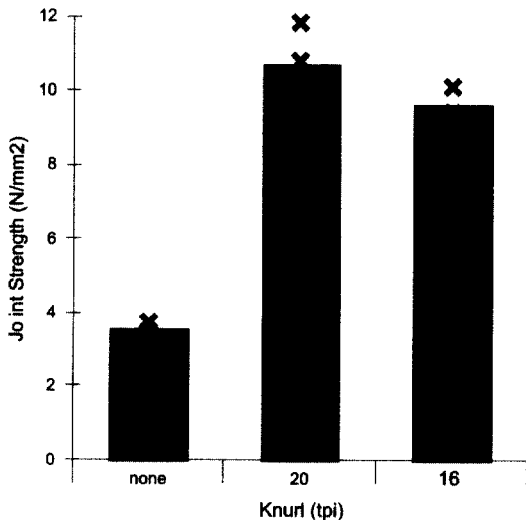


Fig. 9. Adhesion effect of melted nylon.

Fig. 10. Joint strength of nylon and steel with heating power and time.

하지 않은 3개의 시편은 평균 3.57 N/mm<sup>2</sup>의 접합강도를 보인다. 이 값은 선삭시 직경차이는 없고 20 및 16 tpi의 널링가공만으로 취세와 돌출 형상을 부여한 시편의 접합력 10.72, 9.65 N/mm<sup>2</sup>과 비교하여 결합력의 약 35%를 설명하고 있음을 보여준다. 나머지 65%는 널링에 의한 표면 형상 변화 및 표면적의 증가로 인한 점착력의 증가. 널 형상에 따른 전단응력의 수직응력화, 직경차이에 의한 조임력 등으로 설명할 수 있겠다.

나일론의 용점이 216°C이므로 Fig. 4의 결과로부터 15 kW 이상의 전력으로 4초 이상 가열하면 나일론의 용융점합이 가능하다고 예상되었다. 접합강도에 대한 유도가열 조건의 영향을 평가하기 위하여 15~17 kW의 전력으로 4~7초의 시간동안 보강재를 가열 접합하였다. 보강재와 나일론은  $\phi 30$  mm로 가공하고 보강재는 20 tpi의 널링가공을 한 것이다. Fig. 10은 유도가열 조건의 변화에 따른 나일론과 보강재의 접합력 실험 결과이다. 15~17 kW의 전력으로 4초를 가열하였을 때 결합력은 4.8~6.2 N/mm<sup>2</sup> 정도로 상당히 작은 값을 보인다. 온도는 270°C 정도로 올라가지만 전단실험 후 나일론 시편을 절개하여 보았을 때 표면은 충분히 녹지 않고 용융결합이 되지 않은 것을 볼 수 있었다. 15 kW로 7초와 16 kW로 6초 가열하였을 때 각각 14.2, 13.8 N/mm<sup>2</sup>으로 최대의 결합력을 보였으며 16 kW와 17 kW로 7초를 가열하면 과열되어 오히려 접합력이 6 N/mm<sup>2</sup>대로 저하됨을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

마찰기계요소를 위한 MC 나일론과 금속 보강재의 접

합공정에서 용융 나일론의 점착을 위한 유도가열 공정의 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 열전대 온도계를 이용한 보강재 표면의 온도 측정으로 전력 및 가열시간의 유도가열 조건과 온도의 관계 모델을 구하였다. 보강재 표면온도는 가열에너지( $\text{kW} \cdot \text{sec}$ )에 비례하여 증가한다.

2) 보강재 및 나일론의 열전달 모델을 구성하고 열분석 프로그램 Fluent를 이용하여 온도 분포를 예측하였다. 근접효과를 50%로 가정하였을 때 측정값과 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

3) 유도가열에 의하여 발생한 용융 나일론의 점착력을 평가하였다. 용융 나일론의 점착력은 접합강도의 약 35%를 나타내었다.

4) 접합강도에 대한 유도가열 조건의 영향을 평가하였다. 16 kW로 6초 동안 가열하였을 때 약  $14 \text{ N/mm}^2$ 으로 최적의 결합력을 보였다.

5) 유도가열은 금속 표면만을 국부적으로 가열함으로써 나일론의 결정화를 유지시켜 본래 나일론이 갖고있는 고유의 성질을 유지시키며 접합을 가능하게 하는 적절한 접합방법임을 알수 있다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-000-00218-0) 지원으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. M. I. Kohan: Nylon Plastics Handbook, Hanser Publisher, New York, (1995).
2. 부리전기로: Induction Heating, (1994).
3. G. Champetire and H. Sekiguchi: "Mechanism and Kinetics of Adiabatic Anionic Polymerization of Caprolactam in the Presence of Various Activators," J. of Poly. Sci., (1960).
4. 이택식, 이재현, 이준식: 열전달, SciTech, (1998).
5. Fluent Inc: Fluent 5 User's Guide, (1998).
6. A. V. Pocius: Adhesion and Adhesives Technology, Hanser/Gardner Pub., (1997).
7. A. J. Kinloch: Adhesion and Adhesives, Chapman and Hall Ltd, (1987).