

## 미세 임프린팅용 금속몰드의 급속가열을 위한 유도가열기구 개발

홍석관 · 이성희 · 허영무 · 강정진\*

### Development of Induction Heating Apparatus for Rapid Heating of Metallic Mold

S.K. Hong, S. H. Lee, Y. M. Heo, J. J. Kang

#### Abstract

Hot embossing, one of Nanoimprint Lithography(NIL) techniques, has been getting attention as an alternative candidate of next generation patterning technologies by the advantages of simplicity and low cost compared to conventional photolithographies. A typical hot embossing usually, however, takes more than ten minutes for one cycle of the process because of a long thermal cycling. Over the last few years a number of studies have been made to reduce the cycle time for hot embossing or similar patterning processes. The target of this research is to develop an induction heating apparatus for heating a metallic micro patterning mold at very high speed with the large-area uniformity of temperature distribution. It was found that a 0.5 mm-thick nickel mold can be heated from 25°C to 150°C within 1.5 seconds with the temperature variation of  $\pm 5^\circ\text{C}$  in 4-inch diameter area, using the induction heating apparatus.

**Key Words** : Hot Embossing, Rapid Heating, Induction Heating, Nanoimprint Lithography (NIL)

#### 1. 서론

최근 고가의 장비와 긴 공정시간 등의 문제점을 안고 있는 전통적인 고분자 패터닝 기술의 한계를 극복하기 위하여 나노 임프린트 리소그래피(nanoimprint lithography, NIL)와 같은 대체 기술들이 세계적으로 관심을 받고 있다[1].

NIL 기술 중의 하나인 핫엠보싱(hot embossing) 기술은 기판(substrate) 위에 열가소성 수지나 열경화성 수지를 도포한 다음 압력을 가해 마치 도장을 찍듯 패턴을 전사하는 나노 소자 제작 방법으로, 기존 노광 공정에 비해 단순하고 비용이 낮은 장점이 있어 차세대 패턴 형성 기술로 주목 받고 있다[2].

핫엠보싱 공정은 성형장치의 진공챔버 안에 몰드(mold)과 가공 소재를 장착하는 정렬단계, 진공

챔버를 진공상태로 만드는 진공화단계, 진공챔버 내에 장착된 가공소재와 몰드를 일정온도 이상으로 가열하는 가열단계, 나노 또는 마이크로 스케일의 패턴이 각인되어 있는 몰드로 가공 소재를 유리전이온도 이상(150°C 내외)에서 10~30bar의 압력으로 성형하는 가압단계, 상기 가압단계가 완료된 후 가공소재를 일정 온도 이하로 냉각하는 냉각단계, 몰드와 소재를 분리하는 이형단계로 이루어 진다[3].

이와 같은 공정의 총 사이클 타임은 수 분에서 수십 분이 소요된다. 여기서 가열과 냉각단계의 소요시간이 많은 비중을 차지하고 있다. 이렇게 비교적 긴 공정시간은 본 기술을 양산화에 적용시키는 데 걸림돌이 되고 있으며, 이를 해결하기 위해서 많은 연구가 진행 중에 있다[4].

한국생산기술연구원 정밀금형팀

# 교신저자: 한국생산기술연구원 정밀금형팀.

E-mail: doublej@kitech.re.kr

Chang 등은 핫엠보싱의 사이클타임을 줄이기 위해서 적외선(IR), 증기(steam), 오일(oil), 핫플레이트(hot plate)를 이용하여 몰드를 가열하는 연구를 수행한 바 있다[5]. 상기의 연구에서 적용한 가열 방식들 중에 적외선 방식이 가장 빠른 가열속도를 얻었으나 핫엠보싱의 가압단계에서 몰드와 가공소재가 접촉하고 있을 때에는 가열하기가 어렵다는 단점이 있다.

김병훈 등은 고주파 전류를 몰드 인서트(mold insert)에 흘려 표피효과(skin effect)를 이용해서 몰드의 표면만 급속하게 가열하는 RTR(rapid thermal response)기술을 핫엠보싱에 적용하여 20 초안에 미세 패턴을 성형한 바 있다[6].

그러나 상기의 방법은 고주파 전류를 흘리기 위해 사용되는 두 전극의 거리가 멀수록 온도 균일도에 불리하여 대면적 성형에 어려운 점이 있다[7].

본 연구에서는 몰드를 급속으로 가열하기 위해 유도가열방식을 적용하였다. 또한 4인치 대면적 온도 균일도를 향상시키기 위해 유한요소해석을 활용하여 유도가열기구의 설계인자를 분석하였으며, 실험을 통해 성능을 테스트하였다.

## 2. 유도가열 기구 설계

### 2.1 기능적 목적

유도가열은 코일에 고주파 전류를 흘려주면 코일 주변에 교류전류에 의한 교번자속이 발생하고 이 자계속에 놓인 도전체에는 와전류(eddy current)가 유도되며, 이때 도전체의 고유저항에 의해 줄(Joule)열이 발생하는 원리를 이용하는 기술이다[8].

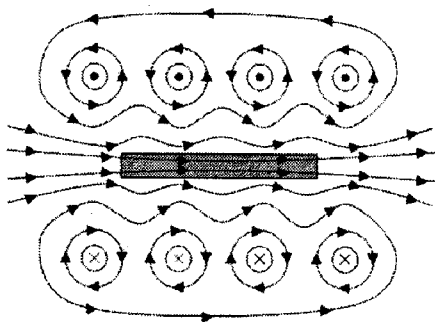


Fig. 1 Schematic illustration of induction heating for metallic mold

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 금속 몰드를 상부와 하부에서 감싸도록 코일을 평행하게 나란히

위치시키고, 상·하부 코일의 전류 방향을 다르게 하여 중심부에 자기장이 같은 방향으로 흐르도록 유도함으로써 금속몰드의 온도를 균일하게 가열할 수 있는 유도가열 기구의 기능적 목적을 제안하였다.

유도가열은 표피효과에 의해 국부적인 급속가열이 가능하고 필요한 부분만 선택적으로 가열할 수 있으며, 히터로부터 열을 전도시켜 피가열물을 가열하는 간접가열방식이 아닌 피가열물만을 직접적으로 가열할 수 있는 장점을 가지고 있다.

따라서 핫엠보싱에 적용함에 있어 가공 소재(열가소성 수지)와 접촉하고 있는 금속몰드만 급속으로 가열하여 가공소재의 표면만 유리 전이 온도( $T_g$ )이상으로 가열한 뒤 가압하여 성형하고 코일의 전류를 끊어 금속몰드를 냉각시켜 디몰딩(demolding)하는 공정(이하 RTP : Rapid Thermal Pressing using Induction Heating)을 고안하였다.

### 2.2 코일 형상 특성

유도가열 장치는 크게 고주파를 발생시켜주는 고주파발전기, 코일 및 주변장치 등을 냉각시켜주는 냉각기, 매칭기, 코일 부를 갖추고 있는 가열부로 구성되어 있다.

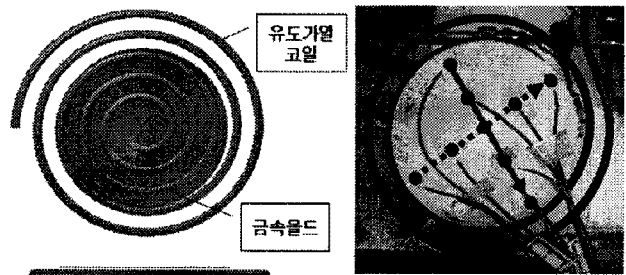


Fig. 2 Shape of spiral coil and measurement points

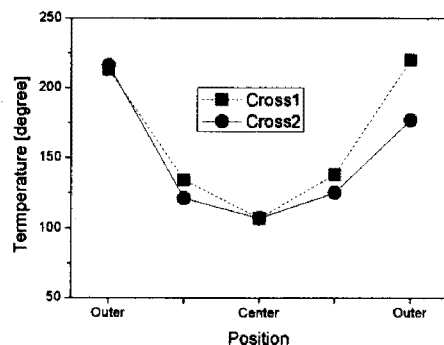


Fig. 3 Temperature distribution in metallic mold after induction heating using spiral coil

코일의 형상은 온도균일도를 결정하게 되는 중요한 인자이다. Fig. 2는 평판을 가열하기 위해 일반적으로 적용되고 있는 스파이럴 형태의 유도가열 코일을 보여주고 있다. 상기의 유도가열 코일 형상이 온도분포에 미치는 영향을 관찰하기 위해 시제작하여 온도균일도를 측정하였다. 측정결과 Fig. 3과 같이 가운데와 가장자리의 온도가 120℃ 이상 심하게 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이는 피가열물의 가운데 부분은 코일의 끝단처리 때문에 빈 공간이 불가피하게 생겨서 유도가 되지 않아 온도가 낮고, 가장자리 부분은 코일이 중첩되어 온도가 상대적으로 높아지며, 나선형의 특성상 원주 방향을 따라 가장자리와 코일과의 거리가 다르므로 본 코일의 형상은 온도 균일도 측면에서 불리하다.

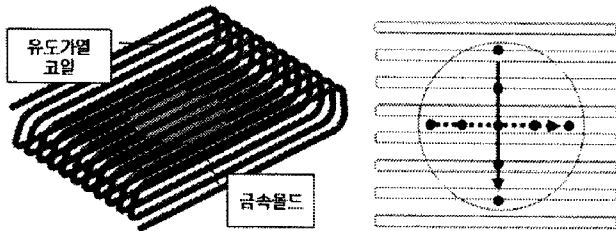


Fig. 4 Shape of longitudinal coil and measurement points

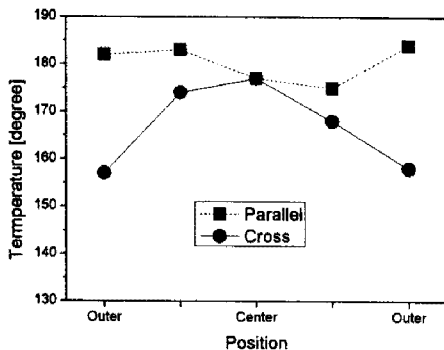


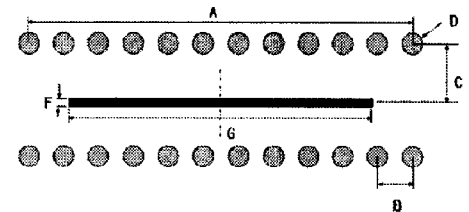
Fig. 5 Temperature distribution in metallic mold after induction heating using longitudinal coil

상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여 Fig. 4와 같은 코일 형태로 수정하였다. 중앙부와 가장자리 부분의 온도차를 개선하기 위하여 나선형으로 형성하되, 피가열물을 상하에서 평행하게 감싸도록 형성함으로써 Fig. 1의 원리로 미세 임프린팅용 금속 몰드를 균일하게 가열할 수 있도록 하였다. 따

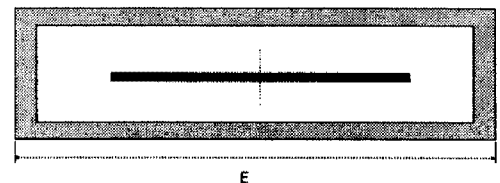
라서 Fig. 5에 도시한 측정결과에서도 알 수 있듯이 4인치 금속(니켈) 몰드의 대면적 온도 분포에 있어서 최고온도와 최저온도의 편차가 30℃로 이전의 스파이럴 코일의 온도편차인 120℃ 보다 크게 줄어드는 효과가 있었다. 따라서 본 코일 형상을 적용하면 온도 편차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

### 2.3 설계인자 분석

앞서 수행된 실험으로부터 검토되어 결정된 초기 모델의 설계인자는 Fig. 6에 도시한 바와 같이 코일의 개수, 코일 간의 피치, 코일과 피가열물간의 거리, 코일의 직경, 피가열물의 두께 등 고려되어야 하는 인자가 많다. 이들 인자가 가열속도와 온도분포에 미치는 영향을 파악하기 위해서 앞서 검토된 초기 모델을 대상으로 유도가열 해석을 수행하였으며, 실험결과와 비교하였다. 해석은 상용 코드인 ANSYS를 활용하여 수행하였다.



(a) Front view



(b) Side view

Fig. 6 Schematic drawing of design factors in the induction heating apparatus

Table 1 Design factors in the induction heating apparatus (F : fix, C : control)

Sym.	Design factor	Con.	Level	Unit
A	transverse length (coil)	F	200	mm
B	pitch (coil)	C	13   18	mm
C	proximity length (coil)	C	10   20	mm
D	diameter (coil)	F	6.4	mm
E	longitudinal length (coil)	F	200	mm

F	thickness (disk)	C	0.5	5	mm
G	diameter (disk)	F	100		mm
H	current density (coil)	F	1.5E+07		A/m <sup>3</sup>
I	frequency (coil)	F	195		kHz

요인 실험법에 의한 해석을 수행하기 위해 Table 1과 같이 설계인자를 도출하였다. 설계 변경이 가능한 3개의 인자를 제어인자로 택하여 2수준으로 총 4회의 해석을 수행하였다. 제어인자로 코일의 피치, 코일과 피가열물간의 근접거리, 피가열물의 두께를 선정하였고, 나머지는 고정하였다.

Fig. 7은 해석 검증을 위해 Fig. 4의 초기 모델을 기준으로 모델링하여 해석한 결과이다. 코일의 수직방향으로 가장자리 부분의 온도가 낮게 예측되어 측정된 온도분포와 유사한 온도분포를 보였다.

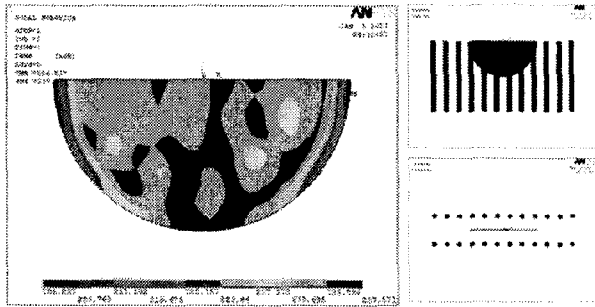
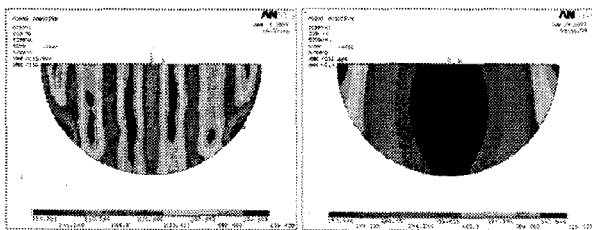
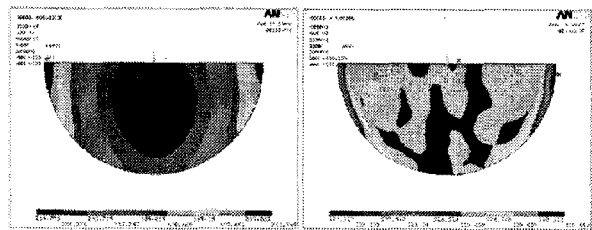


Fig. 7 Predicted temperature distribution for initial design



(a) B : 18, C : 10, F : 0.5 (b) B : 18, C : 20, F : 5



(c) B : 13, C : 10, F : 5 (d) B : 13, C : 20, F : 0.5

Fig. 8 Predicted temperature distribution for factorial experiment design (unit in caption : mm)

Fig. 8은 요인실험법에 의해 수행된 해석결과를 나타낸 그림이다. 이를 바탕으로 각 인자의 주 효과를 분석해보면, 온도편차에 대해서는 Fig. 9에 도시한 바와 같이 코일의 피치가 클수록, 소재가 두꺼워 질수록, 근접거리가 가까울수록 온도편차가 벌어지는 것으로 예측되었다.

같은 출력에 같은 온도까지 도달하는데 걸리는 시간은 급속가열 모듈의 효율과 관련이 있다. 따라서 가열시간이 적을 수록 효율측면에서 유리하다. 가열시간에 대해서 분석해보면 Fig. 10에 나타내었듯이 소재의 두께가 두꺼울수록, 근접거리는 멀수록, 가열하는 시간을 늘어나는 것으로 예측되었다. 하지만 코일의 피치에 대한 영향은 수준 범위의 차가 적어 효과를 확인하기 어려웠다.

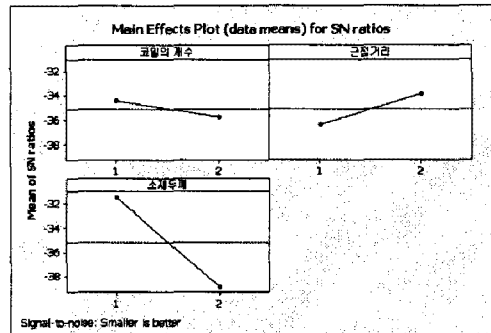


Fig. 9 Main effects plot for temperature uniformity

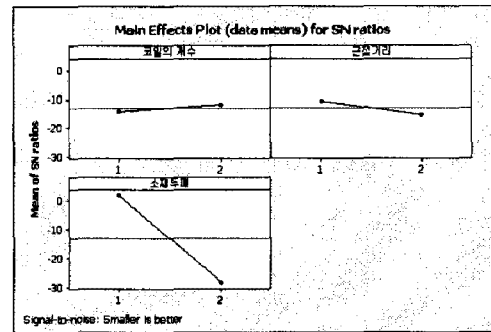


Fig. 10 Main effects plot for heating rate

### 3. 실험적 검증

#### 3.1 유도가열 기구 제작

Fig. 11에 유도가열 기구의 개념도를 도시하였다. 핫엠보싱의 각 공정 단계를 수행하기 위해서는 크게 진공장치, 가열장치, 가압장치, 측정 및 제어장치가 필요하다. 본 연구에서는 가능성을 확인하기 위한 연구의 초기단계로서 우선 급속가열에 초점을 맞추었다. 급속가열을 위한 유도가열 코일, 가공소재와 금속몰드를 장착하기 위한 작업 공간,

금속 몰드를 가압하기 위한 기구들로 구성된 초기 모델을 상기에서 수행한 해석 결과를 바탕으로 설계, 제작하였다. Fig. 5의 실험결과에서 볼 수 있듯이 금속몰드의 끝 단부에서 온도편차가 발생하였고, 피 가열물의 두께를 다르게 가공하거나, 코일과 피 가열물간의 근접거리를 조절하거나, 코일의 피치를 비대칭하게 조정하면 온도편차의 보정이 가능하다는 것을 상기에서 수행한 인자분석 결과를 통해 알 수 있었다. 그러나 전주도금 방식으로 제작되는 금속 몰드는 두께를 원하는 크기로 제작하기가 쉽지 않다. 또한, 코일의 근접거리를 조정하는 방법은 작업공간의 확보를 위해 제약 받는다. 따라서 코일의 피치를 조절하여 금속몰드의 온도편차를 보정하고자 하였다.

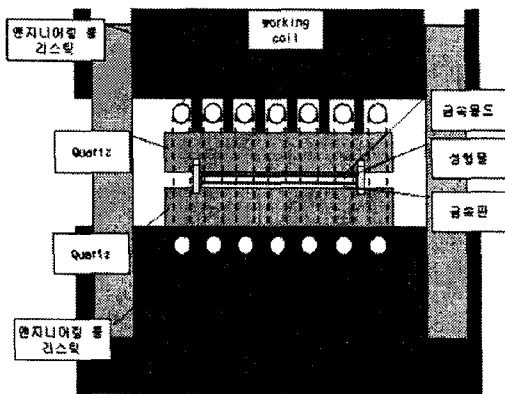


Fig. 11 Concept of induction heating apparatus for rapid heating of metallic mold

### 3.2 급속 가열 테스트

Fig. 12은 제작된 유도가열 기구를 나타낸 사진이다. 온도편차를 보정하기 위해서 유도가열 코일의 피치가 양쪽 끝부분에서 보다 촘촘하게 설치된 것을 볼 수 있다.

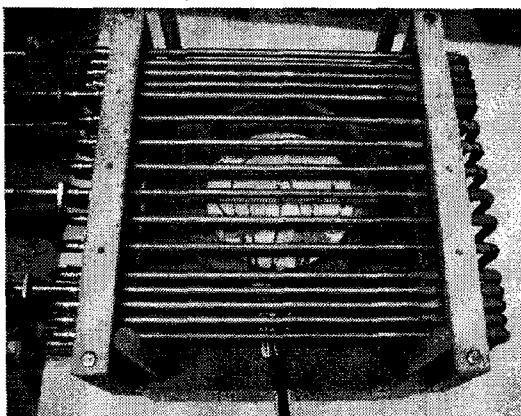


Fig. 12 Developed induction heating apparatus

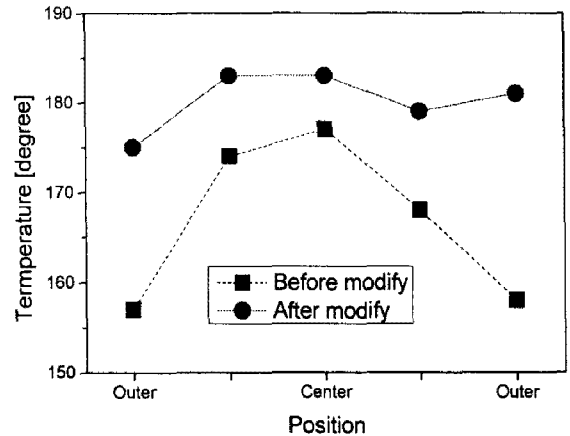


Fig. 13 Temperature distribution in metallic mold after the modification of coil pitch

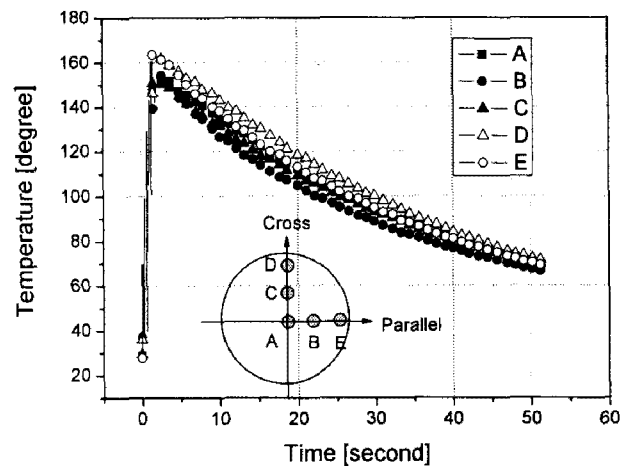


Fig. 14 Temperature variations for induction heating and natural convection cooling

Fig. 13는 상기의 유도가열 기구를 이용하여 금속몰드를 급속가열 하였을 때 최고 온도시점에서 측정된 수직방향의 온도분포도이다. 코일의 피치를 수정하지 않았을 때보다 끝부분의 온도가 개선되었음을 알 수 있다.

Fig. 14는 출력전력 18kw, 주파수 190 kHz를 코일에 인가하였을 때 금속몰드의 위치별 온도 이력곡선을 나타낸 그림이다.

가열온도 및 속도 제어는 PID 컨트롤을 통해 이루어지며, 온도측정은 T-type thermocouple를 사용하였다. 측정 위치는 유도가열코일과 평행한 방향과 수직인 방향으로 총 5점을 설정하였다. 금속몰드는 지름 4인치, 두께 0.5mm의 니켈 소재이며, 전주도금을 통해 제작하였다(측정오차  $\pm 2.5^\circ\text{C}$ ).

상온에서 150°C까지 가열에 1.5초가 소요되었다. 중심부의 측정 위치인 A, B, C의 온도는 각각 154,

155, 152°C로  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 의 온도편차를 보였다. 가장 자리의 측정위치 D, E의 온도는 161, 163°C로 중심부보다 약 10°C 더 높게 측정되었다.

여기서 측정위치 D는 코일의 피치를 수정하여 온도가 보정된 것으로 정확하게 보정하기 위해서는 코일 간 피치의 미세한 조정이 필요하다. 측정위치 E는 전자기장 필드에서 나타나는 edge effect의 영향으로 온도편차를 보이는 것으로 판단된다 [8]. 마지막으로 냉각은 자연냉각을 하였으며 150°C 에서 70°C까지 냉각에 약 50초가 소요되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 4인치 금속몰드를 급속으로 가열하기 위해 유도가열방식을 적용하였고, 온도균일도를 유지하기 위한 코일형상을 제안하였다. 또한 핫엠보싱 공정을 수행하기 위해 유도가열기구를 제작, 시험하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 스파이럴 코일을 이용하여 평판 디스크를 가열하였을 때 중심부와 가장자리의 온도편차가 심하게 발생하였다.

(2) 피가열물을 감싸도록 코일형상을 변경하여 온도편차를 개선하였으며, 초기모델로 결정하였다.

(3) 설계인자들의 주 효과를 분석하기 위해서 CAE를 활용하였으며, 온도분포에 대한 반응은 코일의 피치가 클수록, 소재가 두꺼워 질수록, 근접거리가 가까울수록 온도편차가 벌어지는 것으로 예측되었다. 또한 소재의 두께가 두꺼울수록, 근접거리는 멀수록, 가열하는 시간을 늘어나는 것으로 예측되었다.

(4) 초기모델에서의 온도편차를 보정하기 위해 코일 간의 피치를 불균일하게 조정하여 수정 전 모델보다 더 좋은 온도균일도를 얻었다.

(5) 유도가열기구를 제작하여 테스트한 결과 상온에서 150°C까지의 가열에 1.5초가 소요되었으며,  $\pm 5^\circ\text{C}$  온도 편차를 보였다.

#### 후 기

본 연구는 2010 생산기반혁신기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. Y. Chou, P. R. Krauss, P. J. Renstrom, 1996, Imprint Lithography, J. Vac. Technol. B, Vol. 14, No. 6, pp. 4129 ~ 4133.
- [2] R. W. Jaszewski, H. Schiff, J. Gobrecht, P. Smith, 1998, Hot embossing in polymers as a direct way to pattern resist, Microelectronic Engineering, 41/42, pp. 575 ~ 578.
- [3] H. Becker, U. Heim, 2000, Hot embossing as a method for the fabrication polymer high aspect ratio structures, Sensors and Actuators, 83, pp. 130 ~ 135.
- [4] W. Liu, T. Kimerling, D. Yao, B. Kim, 2004, Rapid thermal response (RTR) Hot embossing of microstructures, ANTEC, pp.933 ~ 935.
- [5] J. H. Chang, S. Y. Yang, 2005, Development of fluid-based heating and pressing systems for micro hot embossing, Microsystem Technologies, Vol. 11, pp. 396 ~ 403.
- [6] T. Kimerling, W. Liu, B. Kim, D. Yao, 2006, Rapid hot embossing of polymer microfeatures, Microsyst Technol, Vol. 12, pp. 730 ~ 735.
- [7] D. Yao, B. Kim, 2003, Developing rapid heating and cooling systems using pyrolytic graphite, Applied Thermal Engineering, Vol. 23, pp. 341 ~ 352.
- [8] V. Rudnev, D. Loveless, R. Cook, M. Black, 2003, Handbook of induction heating, Marcel Dekker, New York, pp. 99 ~ 183.