

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2008.32.6.481

# 고주파 유도가열을 사용한 초박육 플라스틱 제품의 사출성형

박 근<sup>†</sup> · 최 선\* · 이세직\* · 김영석\*\*  
(2007년 11월 5일 접수, 2008년 4월 21일 심사완료)

## Injection Molding for a Ultra Thin-Wall Part using Induction Heating

Keun Park, Sun Choi, Se Jik Lee and Young Seog Kim

**Key Words :** Induction Heating(유도가열), Eddy Current(와전류), Injection Molding(사출성형), Thin Wall Molding(박육 사출성형), Flexspline(플렉스플라인)

### Abstract

Rapid mold heating has been recent issue to enable the injection molding of thin-walled parts or micro/nano structures. Induction heating is an efficient way to heat material by means of an electric current that is caused to flow through the material or its container by electromagnetic induction. It has various applications such as heat treatment, brazing, welding, melting, and mold heating. The present study covers an experimental investigation of induction heating in order to rapidly raise the mold temperature. It is observed that the mold surface temperature is raised up to 200°C in 2 seconds. This induction heating is applied to injection molding of a flexspline for a plastic harmonic drive, which has difficulty in cavity filling because its minimum thickness is only 0.35 mm. The induction heating is then successfully implemented on this ultra-thin wall molding by raising the mold surface temperature around the glass-transition temperature of the molding material.

### 1. 서 론

사출성형시 용융된 고분자수지가 고온, 고속으로 금형 내부로 분사되고, 금형 내부를 채우며 성형이 이루어진다. 사출성형 과정에서 고온의 수지와 상대적으로 온도가 낮은 금형 벽면간의 열전달이 발생하면서 금형과 인접한 부분에서는 급속하게 온도가 저하되어 수지의 응고가 진행된다. 이때 응고된 층의 두께는 일반적으로 편측 0.25mm 정도로 알려져 있으며, 대부분의 경우 전체 두께에 비해 상대적으로 적은 부분으로 전체적인 유동에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 두께가 매우 얇은 제품의 경우 응고층의 상대적 비율이 증가하게 되고, 결

과적으로 수지 유동의 저하를 초래하며 심한 경우 미성형(short shot)을 유발할 가능성이 높다. 따라서 초미세 사출성형의 경우 유동특성을 개선하기 위해 일반적인 경우와는 차별화된 사출성형 조건의 적절한 설정이 필요하다.<sup>(1,2)</sup>

사출성형의 유동특성을 개선하기 위해 높은 사출압력 및 사출속도, 낮은 점성의 수지 사용, 강건한 구조의 금형 설계 등이 적용되고 있는데,<sup>(1)</sup> 이러한 특화된 공정조건은 사출성형기, 수지, 금형구조 등에 많은 제한점을 내포하고 있다. 그밖에 금형을 유리전이 온도 이상으로 가열하여 수지의 응고를 완화시킴으로써 유동특성을 개선하는 방법이 연구되었는데,<sup>(3,4)</sup> 이는 금형의 가열과 냉각에 소요되는 시간이 상대적으로 길어 생산성이 저하되는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 사출금형에 고주파 전류를 인가할 때 발생하는 근접효과(proximity effect)를 이용하여 급속으로 금형을 가열함으로써 박육 사출성형의 유동특성을 개

† 책임저자, 회원, 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부  
E-mail : kpark@snut.ac.kr  
TEL : (02)970-6358 FAX : (02)974-8270

\* 서울산업대학교 대학원 기계설계·자동화공학부

\*\* 서울산업대학교 기계설계·자동화공학부

선하기 위한 실험적인 연구가 수행되었다.<sup>(5,6)</sup> 최근에는 금형 형상에 제한 없이 가열이 가능한 고주파 유도가열(Induction heating)을 적용하여 사출금형의 표면만을 급속으로 가열하기 위한 연구가 진행되어왔다.<sup>(7~10)</sup>

본 연구에서는 소형 플라스틱 하모닉 감속기용 플렉스플라인의 사출성형시 성형성을 향상시키기 위해 고주파 유도가열 기법을 적용하고자 한다. 하모닉 감속기의 원활한 구동을 위해서는 플렉스플라인의 반경방향의 유연성이 요구되는데, 이를 구현하기 위해 제품의 두께를 0.5mm 이하로 감소시켜야 한다. 또한 사용 수지가 난유동 수지이고 치형 끝단의 미성형 가능성이 높아 사출성형시 각별한 주의가 요구된다. 본 연구에서는 이러한 난성형 제품의 성형성을 향상시키기 위해 고주파 유도가열에 의한 급속 금형가열 기법을 적용하고자 한다.

## 2. 고주파 유도가열 시스템

### 2.1 고주파 유도가열의 원리

고주파 유도가열은 교번자계 내부에 놓여있는 도전성 물체 내에 발생하는 와전류손 또는 히스테리시스손을 이용하여 피가열체를 가열시키는 방식이다. 피가열체가 도체인 경우 고주파 유도가열에 의해 피가열체의 표면에 와전류(Eddy current)가 유도되고 이로 인한 저항 손실에 의해 표면에 열이 발생된다. 따라서 피가열체에 에너지를 짧은 시간에 인가할 수 있으므로 급속 가열이 가능하고 표면층만을 가열할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 초기에는 급속을 용해시키는 목적으로 사용되어 왔으며, 최근에는 주조, 열간단조, 열처리 등 다양한 금속의 가공에 이용되고 있다. Fig. 1 에 고주파 유도가열의 기본 원리를 도시하였다.

도체에 고주파전류가 흐를 경우 표면에 내부보다 많은 양의 전류가 흐르는 현상이 발생하는데, 이를 표피 효과(Skin effect)라 한다. 표피 효과에 의해 전류가 표면의  $1/e(36.8\%)$ 만큼 감소하는 침투 깊이(penetration depth)는 아래와 같이 정의된다.

$$\delta = \sqrt{\frac{\sigma}{\pi f \mu \mu_0}} \quad (1)$$

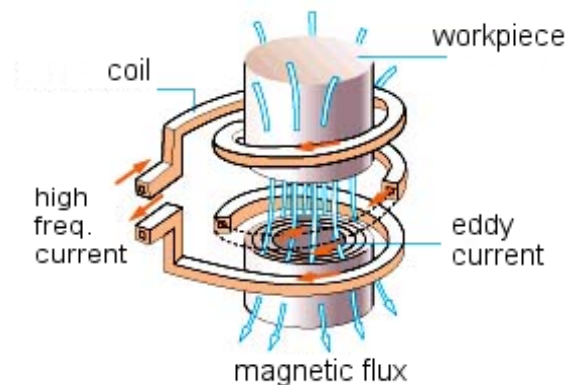


Fig. 1 Schematic description of induction heating

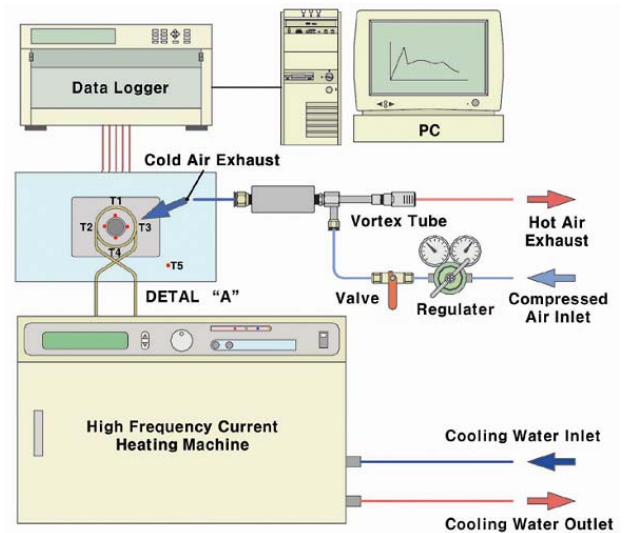
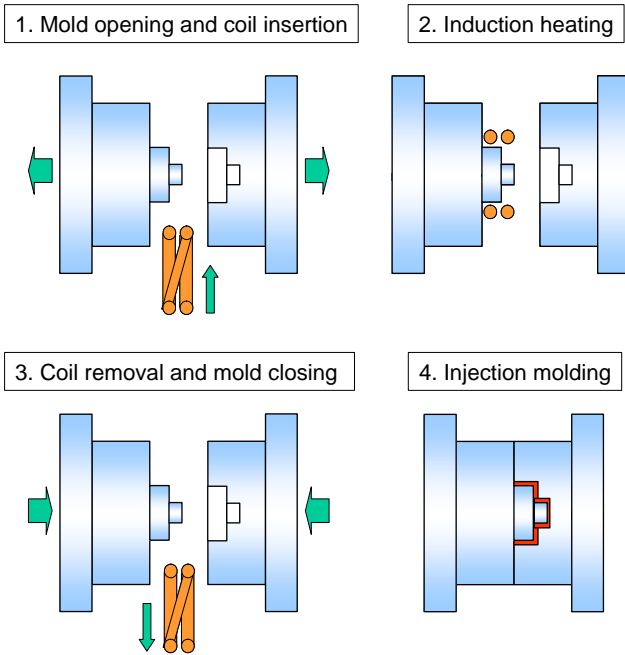


Fig. 2 Experimental setup for the induction heating equipment<sup>(10)</sup>

여기서  $\sigma$ 는 도체의 비저항율(resistivity),  $f$ 는 주파수,  $\mu_0$ 과  $\mu_r$ 는 각각 진공의 투자율(permeability) 및 피가열체의 상대투자율에 해당한다.

### 2.2 고주파 유도가열 시스템 구성

본 연구에서는 사출금형의 급속가열을 위한 고주파 유도가열 시스템을 구축하였다. 구성 요소를 살펴보면 고주파 가열기, 가열코일, 코일이 연결된 보조 컨트롤 박스, 냉각장치(냉각수 및 압축공기) 및 데이터 처리장치로 구성된다. 실험에 사용된 고주파 가열기는 (주)백마고주파의 BMHF-P227 모델을 사용하였으며, 출력전력은 최대 15 kW 이다. Fig. 2에 실험장치의 개략도를 도시하였다. 실험장치는 고주파가열기 및 보조 컨트롤 박스를 이동식 프레임에 장착하여 사출성형기에 삽입이 가능하도록 구성하였다.



**Fig. 3** Induction heating procedure for an injection mold

Fig. 3에 사출금형 가열을 위한 유도가열 과정을 도시하였다. 금형이 열린 상태에서 가열코일을 삽입하여 코어부분 주변에 위치시킨 후 가열을 실시한다. 가열이 완료된 후 코일을 제거하고 금형을 닫은 후 사출을 실시한다. 이때 코일 제거로부터 사출시까지 약 0.5~1초 정도의 시간이 소요된다.

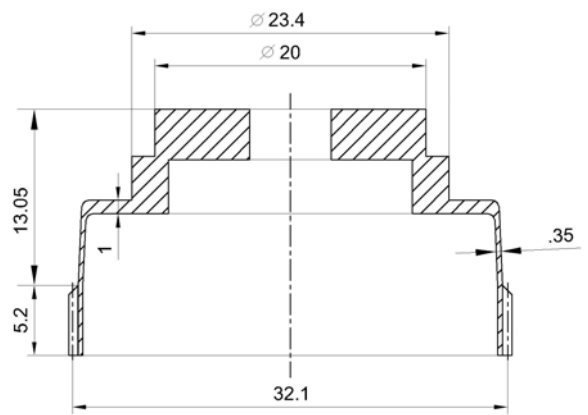
### 3. 플라스틱 플렉스플라인의 특성

본 연구에서는 하모닉 감속기의 경량화와 원가 절감을 위해 기존에 금속으로 제작되던 주요 부품을 고강도 플라스틱으로 대체한 플라스틱 감속유닛을 구현하고자 한다. 이를 위해 강도 및 강성이 높고 충격강도가 우수한 Victrex 社의 150CA30 수지(PEEK 계열)를 사용하였다. Table 1에 재료의 주요 물성을 도시하였는데, 해당 수지는 인장강도가 224MPa에 해당하는 고강도 플라스틱으로 주로 강도 및 고온특성이 요구되는 자동차 부품에 활용되고 있는 재료이다.

Fig. 4에 플렉스플라인의 단면형상 및 주요 치수를 도시하였다. 치형은 잇수 107, 모듈 0.3, 압력 각 20°로 설계하였다. 하모닉 감속기의 구동 과정에서 플렉스플라인의 개구부에 파동발생부(Wave generator)가 삽입되어 강제변형이 발생되는데, 이를 위해 반경방향의 유연성이 요구된다.

**Table 1** Basic properties of PEEK 150CA30

Material	PEEK
Elastic modulus (GPa)	13.0
Tensile strength (MPa)	224
Flexural strength (MPa)	310
Poisson's ratio	0.44
Izod impact strength (kJ/m <sup>2</sup> )	7.9
Material density (kg/m <sup>3</sup> )	1.44
Glass transition temp. (C)	143



**Fig. 4** Sectional configuration of the flexspline

상기 요구조건을 만족시키기 위해 플렉스플라인 치형과 연결된 원주부의 두께를 0.35mm로 설계하였는데, 해당 두께는 성형성 측면에서 볼 때 초박육 사출성형에 해당한다. 또한 사용 수지가 난유동 수지이고 치형의 이끝높이가 0.3mm인 점을 감안할 때, 치형 끝단의 미성형 가능성이 높아 사출성형시 각별한 주의가 요구된다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 고주파 유도가열에 의한 사출성형을 적용하였으며, 다음 장에서 구체적인 결과에 대해 기술하도록 하겠다.

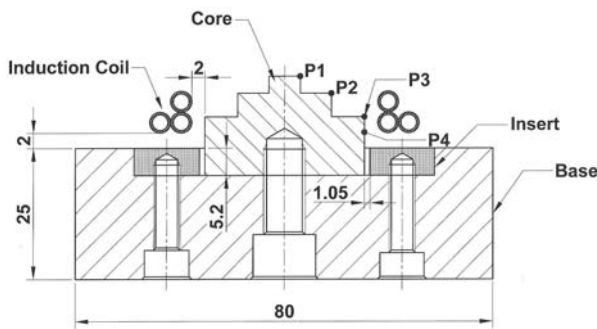
### 4. 고주파 유도가열을 사용한 플렉스플라인의 박육 사출성형

#### 4.1 고주파 유도가열 과정의 유한요소해석

고주파 유도가열을 해석하기 위해서는 일차적으로 유도전류에 의한 전자기장(Electromagnetic field)을 계산하고, 피가열체 내부에 발생하는 저항열을 계산한 후 이를 이용하여 열전달 해석을 수행하는 전자기-열 연계 해석을 실시해야 한다.<sup>(9)</sup> Fig. 5에

**Table 2** Electromagnetic and thermal properties for induction heating analysis

Material	Stavax	Copper
Material Density (kg/m <sup>3</sup> )	7.81	8.96
Specific heat (J/kg-K)	460	385
Thermal conductivity (W/m-K)	16.0	385
Resistivity (x 10 <sup>-6</sup> Ω-m)	0.625	0.170
Relative permeability	400	1.0

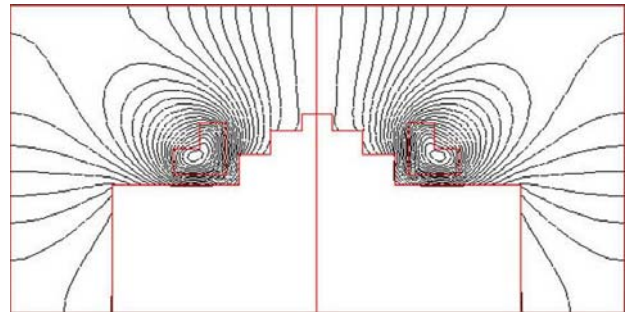


**Fig. 5** Schematic description of the heating section

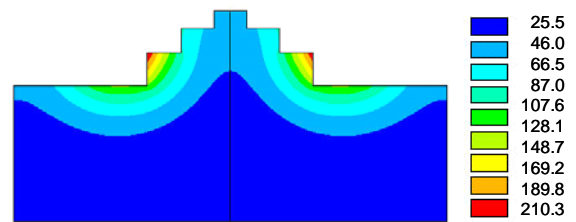
가열부의 개념도 및 주요 치수를 도시하였다. 피가열체는 플렉스플라인 코어에 해당하며, 재질은 금형강(Stavax)을 사용하였고 이를 외경 8mm의 구리 코일이 총 3회 권선되어 둘러싸고 있다. Table 2에 고주파 유도가열 해석을 위한 금형강 및 코일의 열적 및 전자기적 물성을 요약하였으며, 특히 급격한 온도변화가 예상되는 금형강의 경우 온도에 따른 물성변화를 고려하기 위해 비선형 해석을 실시하였다.

고주파 유도가열 과정의 해석을 위해 해석영역을 2차원 축대칭 문제로 단순화시켜 유한요소 해석모형을 구성하였다. 이때 표피 효과를 고려하기 위해 식 (1)을 사용하여 침투 깊이를 계산한 뒤 해당 범위에 대해 4개의 유한요소층을 갖도록 요소망을 생성하였다. 유도가열 과정을 해석하기 위한 경계 조건으로는 코일에 221A, 160kHz의 고주파 전류를 3초간 인가하였다. 가열후에는 자연대류상태에서 4초간 냉각해석을 실시하였다.

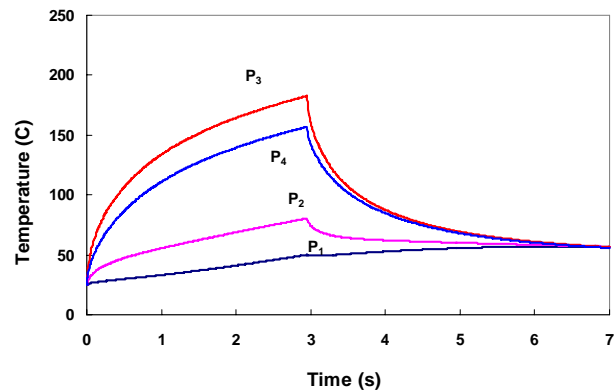
Fig. 6(a)에 해석 결과로부터 얻어진 자속선(flux line)의 분포를 도시하였다. 코일에서 발생한 자기장이 상대적으로 투자율이 높은 금형을 투과하지 못하고 표면에 흡수됨을 알 수 있는데, 흡수된 교변자장은 결과적으로 표면부위에 와전류를 형성하여 표면의 온도 상승을 유발하게 된다.



(a)



(b)



(c)

**Fig. 6** Finite element analysis results: (a) magnetic flux lines, (b) temperature distribution at the end of heating stage, and (c) temperature variation at various location

금형 표면에 유도된 와전류에 의한 저항열 성분을 열원으로 하여 비정상상태 열전달 해석을 수행하였다. Fig. 6(b)에 가열 직후의 금형의 온도분포를 도시하였다. 온도분포를 살펴보면 금형 측면부 표면에서 최대 210.3℃까지 상승되는 것으로 나타나 고분자 수지의 유리전이온도 이상으로 가열됨을 확인할 수 있었다. 반면에 코어의 중심부 온도는 50~80℃, 코일 하단에 위치한 평판의 표면부는 100℃이하로 나타나 금형 코어의 성형부 표면을 집중적으로 가열하고자 하는 의도에 부합함을 확인할 수 있었다.

또한 금형의 위치별 온도변화를 고찰하기 위해 4개의 지점(Fig. 5 참조)에서의 시간대별 온도변화를 Fig. 6(c)에 그래프로 도시하였다. 금형의 상측(P<sub>1</sub> 지점)을 제외한 나머지 3개 지점(P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>, P<sub>4</sub>)에서는 가열시간동안 온도가 급격하게 상승하고 이후 빠른 속도로 감소함을 확인할 수 있었다. 특히 유도전류에 의한 자기장이 집중되는 P<sub>3</sub> 지점의 경우 3초간의 가열시간동안 최대 200°C 이상 온도가 급격하게 상승하고 가열이 종료된 후 3초 이내에 100°C 이하로 온도가 감소되었다. 반면에 자기장의 분포가 약한 P<sub>1</sub> 지점의 경우 완만한 속도로 온도가 상승하며 가열 이후에도 계속적으로 상승함을 알 수 있는데, 이는 해당 부위의 표면이 유도 가열이 아닌 타 부위의 표면온도 상승에 의한 열 전달에 의한 온도 상승 효과로 분석된다.

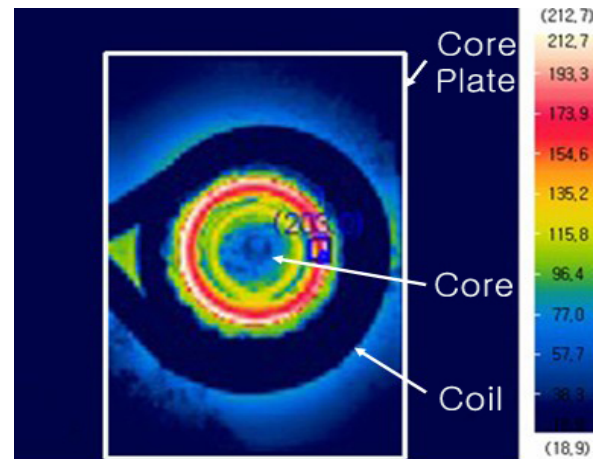
4.2 가열부위에 따른 온도변화 고찰

플렉스플라인 사출성형용 금형의 코어 플레이트를 대상으로 Fig. 7과 같이 고주파 유도가열 실험을 실시하였다. 실험조건은 해석 조건과 동일하게 설정하였으며, 고주파 가열기의 출력은 2.5kW로 설정하였다. Fig. 8(a)에 가동측 금형의 고주파 가열시 열화상카메라로 측정된 온도분포를 도시하였다. 온도분포를 관찰하면 코일 내부의 코어 외측에서 온도상승이 두드러지게 발생함을 알 수 있는데, 이러한 결과로부터 금형 표면이 집중적으로 가열되는 점을 확인할 수 있었다.

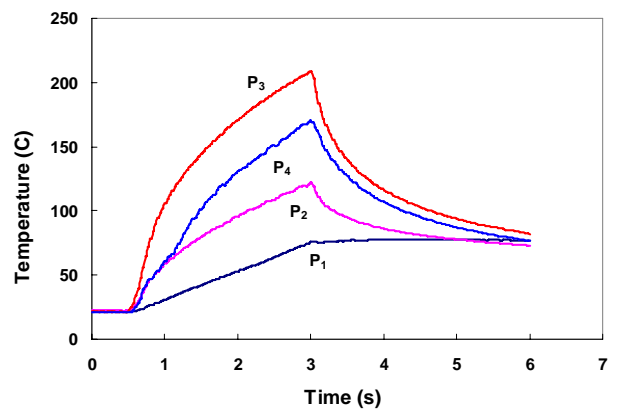
또한 금형의 위치별 온도변화를 해석결과(Fig. 6(c) 참조)와 비교하기 위해 동일한 지점에서의 시간대별 온도변화를 Fig. 8(b)에 그래프로 도시하였다. 해석 결과와 비교하면 전반적인 온도변화 경향, 즉 가열 초기에 온도가 급격히 증가하다 점차적으로 완만하게 증가하고, 가열후 온도가 급격히 감소하다 서서히 평형상태에 이르는 경향이 유사하게 예측되었다. 최대 온도는 역시 P<sub>3</sub> 지점인 것으로 나타났으며, 3초간의 가열시간동안 최대 210°C 이상 온도가 급격하게 상승하고 가열이 종료된 후 3초 이내에 100°C 이하로 온도가 감소되었음을 알 수 있다. 이러한 결과는 해석 결과와 10°C 정도의 편차를 보이는데, 본 연구에서 사용한 전자기열 연성 유한요소해석에서 와전류손에 의한 가열 효과만을 고려하였기 때문으로 판단된다.<sup>9)</sup> 한편 P<sub>1</sub> 지점의 경우 완만한 속도로 온도가 상승하며 가열 이후에도 계속적으로 상승하는 경향을 보여 해석 결과와 일치함을 알 수 있다.



Fig. 7 Experimental setup for the induction heating



(a)



(b)

Fig. 8 Experimental measurements: (a) temperature distribution at the end of heating stage and (b) temperature variations at various locations

#### 4.3 금형온도에 따른 성형성 비교

상기 실험결과를 바탕으로 플렉스플라인 사출성형을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 PEEK 150CA30 수지는 Table 1에 도시한 바와 같이 유리전이온도가 143℃ 이므로 금형온도를 150℃ 이상으로 유지하는 것이 바람직하다. 특히 두께가 얇고 미세 치형을 성형해야 하는 플렉스플라인의 경우 보다 높은 온도(180℃ 이상)로 유지해야 한다. 반면에 성형된 제품의 취출시 발생하는 백화현상을 방지하기 위해서는 취출온도를 유리전이온도 이하로 냉각시켜주어야 한다. 그러나 통상적인 금형 온도조절기를 사용한 경우는 금형 전체적으로 온도가 상승하기 때문에 금형을 가열하거나 냉각시키는데 많은 시간이 소요되어 생산성이 저하되는 단점이 있다.

본 연구에서는 보다 효율적인 온도제어를 위해 고주파 유도가열 시스템을 사용하여 금형 표면만을 급속으로 가열하였다. 가열효율 제고를 위해 금형 온도조절기를 사용하여 금형의 온도를 100℃로 유지시켜준 상태에서 금형표면에 대해 고주파 가열을 수행하였다. 가열 온도는 금형표면의 산화가 발생하지 않도록 최대 190℃로 설정하였고, 가열후 자연대류 상태에서 금형온도가 100℃에 도달할때까지 냉각을 진행시켰다. 실험을 통해 상기 조건을 만족시키는 조건을 결정하였으며, 이때의 가열시간은 1.5초, 냉각시간은 18초로 설정하였다. Fig. 9에 도출된 가열 및 냉각조건에 의한 P<sub>3</sub> 지점(Fig. 5 참조)에서의 온도 변화 프로파일을 도시하였다. 열화상 카메라 시스템을 사용하여 측정된 해당 위치에서의 온도를 시간대별로 추출하여 변환함으로써 그래프로 작성하였다.

Fig. 10에 고주파 유도가열 유무에 따른 플렉스플라인 치형부의 사진을 비교하였다. 우선 고주파가열을 사용하지 않고 금형 온도조절기를 사용하여 금형 온도를 150℃로 유지시킨 상태에서 사출을 수행하였다. 이때 금형 코어부온도를 100℃에서 150℃까지 상승시키는데 30초 이상의 시간이 걸려 상대적으로 많은 시간이 소요되었다. Fig. 10(a)의 성형품을 보면 치형부가 완전히 성형되지 않았고, 특히 끝단에서 미성형이 발생하여 제품의 동력전달 특성에 악영향을 미칠 것으로 판단된다. 반면 고주파 유도가열을 실시한 경우(Fig. 10(b) 참조)는 1.5초의 가열만으로 치형이 완벽하게 성형되어 금형의 온도 상승으로 인해 성형성이 대폭 향상되었음을 알 수 있다.

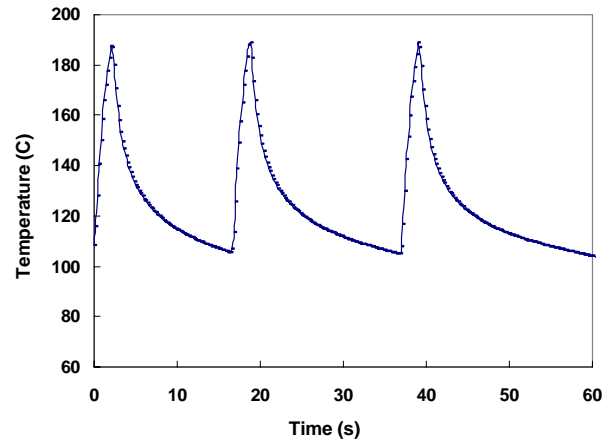


Fig. 9 Temperature profile during heating cycle

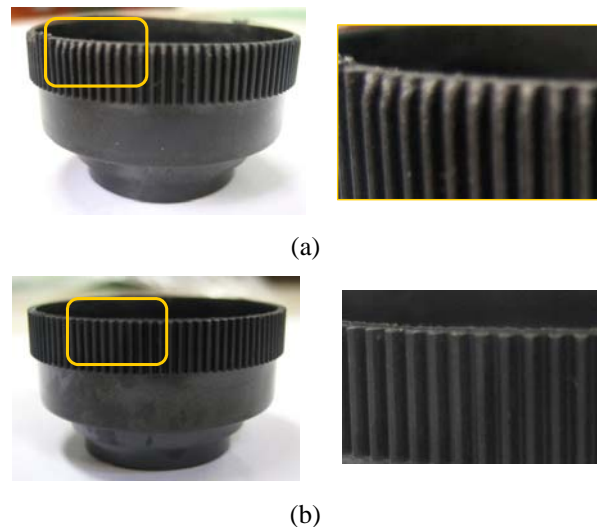


Fig. 10 Comparison of teeth profiles of the flexspline: (a) without induction heating and (b) with induction heating

## 5. 결론

본 연구에서는 난성형 제품인 하모닉 감속기용 플렉스플라인의 성형성 향상을 위해 고주파 유도가열을 적용하였다. 이러한 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 고주파 유도가열의 기본 원리를 고찰하고 사출금형의 급속 가열을 위한 고주파 유도가열 시스템을 구축하였다.

(2) 고주파 유도가열 과정의 이론적 분석을 위해 전자기열 연성 유한요소해석을 수행하였고, 해석 결과로부터 제안된 형태의 유도가열 코일을 사용하여 미성형이 예상되는 금형 코어 측면부의 표면에 온도상승이 집중됨을 확인하였다.

(3) 고주파 유도가열 실험을 실시하여 금형온도 100℃를 기준으로 최대 190℃로 가열하기 위한 시간이 1.5초, 냉각시간 20초 이내로 유지할 수 있음을 확인하였고, 결과적으로 생산성을 크게 저하시키지 않으면서도 효과적으로 성형성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

(4) 개발된 고주파 유도가열 시스템을 적용하여 기존의 금형 온도조절기를 사용하여 형판을 가열하는 방법으로는 성형이 어려웠던 박육 플렉스플라인의 미세 치형(최소두께 0.35mm, 이끝높이 0.3mm)을 치형부의 금형 표면을 급속으로 가열함으로써 성공적으로 성형할 수 있었다.

상기 연구결과로부터 향후 초박육 사출성형, 초미세 사출성형 등의 고부가가치 성형기술에 고주파 유도가열을 적용하여 성형성을 향상시킬 수 있을 것으로 전망된다.

## 후 기

본 연구는 및 「서울시 산학연 협력산업(신기술연구개발 지원사업)」의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

(1) Seldén, R., 2000, "Thin Wall Molding of Engineering Plastics – a Literature Survey," *J. Injection Molding Tech.*, Vol. 4, pp. 159~166.

(2) Jim, F., 1995, "Thin Wall Molding Differences in Processing over Standard Injection Molding," *SPE ANTEC*, Vol. 41, pp. 430~433.

(3) Kim, B. H. and Suh, N. P., 1986, "Low Thermal Inertia Molding," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 25, pp. 73~93.

(4) Jansen, K. M. B. and Flaman, A. A. M., 1994, "Construction of Fast-Response Heating Elements for Injection Molding Applications," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 34, pp. 894~897.

(5) Yao, D. and Kim, B., 2002, "Increasing Flow Length in Thin Wall Injection Molding Using a Rapidly Heated Mold," *Polym. Plast. Technol. Eng.*, Vol. 415, pp. 819~832.

(6) Park, K., Kim, B. and Yao, D., 2006, "Numerical Simulation for Injection Molding with a Rapidly Heated Mold, Part I: Flow Simulation for Thin Wall Parts," *Polym. Plast. Technol. Engng.* Vol. 45, pp. 897~902.

(7) Chen, S. C., Peng, H. S., Chang, W. R. and Jong, W. R., 2004, "Simulations and Verifications of Induction Heating on a Mold Plate," *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, Vol. 31, pp. 971~980.

(8) Chang, J. A., Chen, S. C. and Cin, J. C., 2006, "Rapid Mold Temperature Control on Micro-Injection Molded Parts with High Aspect Ratio Micro-Features," *SPE ANTEC*, Vol. 52, pp. 1275~1279.

(9) Park, K., Hwang, J. J., Kwon, O. K. and Yun, J. H., 2007, "Finite Element Analysis of Induction Heating Process for Development of Rapid Mold Heating System," *Trans. Mat. Proc.*, Vol. 16, pp. 113~119.

(10) Kwon, O. K., Jeong, H. T., Yun, J. H. and Park, K., 2007, "A Study of Rapid Mold Heating System Using High-Frequency Induction Heating," *Trans. J. Kor. Soc. Mech. Engng. (A)*, Vol. 31, pp. 594~600.