



박 근 | 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부, 교수 | e-mail : kpark@seoultech.ac.kr
김 병 훈 | Univ. of Massachusetts Amherst, 교수 | e-mail : kim@ecs.umass.edu

이 글에서는 고주파 유도가열(High-frequency induction heating)을 사용하여 사출금형 표면을 급속으로 가열하기 위한 기술을 소개하고, 국내외 적용사례(마이크로 패턴의 성형성 향상, 외관제품의 표면특성 향상 등)에 대해 소개하고자 한다.

고주파 유도를 사용한 급속 금형가열기술

고주파 유도가열(High-frequency induction heating)은 도체에 고주파 전류를 인가할 때 금형표면에 전류가 집중되는 표피효과(Skin effect)를 이용하여 피가열체의 표면을 급속으로 가열하는 기법으로서, 피가열체에 에너지를 짧은 시간에 인가할 수 있어 급속가열이 가능하고 표면층만을 가열할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 초기에는 급속을 용해시키는 목적으로 사용되어 왔으며, 이후 주조, 열간단조, 열처리 등 다양한 금속의 가공에 이용되고 있다. 최근 들어 고주파 유도가열을 사출성형에 적용하여 생산성을 크게 저하시키지 않으면서도 금형 표면을 급속으로 가열하기 위한 연구가 수행되어 왔으며, 박육 사출성형 및 마이크로형상의 성형성 향상, 웰드라인 개선 등에 응용되고 있다.[1-5]

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 급속가열이 가능하고 표면층만을 가열할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 표피 효과에 의해 전류가 표면의

1/e(36.8%)만큼 감소하는 침투깊이(penetration depth)는 아래와 같이 정의된다.

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

여기서 σ 는 도체의 비저항률(resistivity), f 는 주파수, μ_0 과 μ_r 는 각각 진공의 투자율(permeability) 및 피가열체의 상대투자율에 해당한다. 예를 들어 상대투자율이 200이고 비저항률이 $0.162 \mu\Omega\cdot m$ 인 탄소강의 경우 150kHz의 고주파전류가 인가될 때 침투깊이는 $65.55 \mu m$ 로 계산되어 표면층만이 국부적으로 가열됨을 알 수 있다.

고주파 유도가열 시 유도코일의 형상에 따라 피가열체인 금형에 인가되는 와전류의 분포에 차이가 발생한다. 따라서 효과적인 가열을 위해서는 금형 형상, 특히 집중적으로 가열이 필요한 부분의 위치에 따라 유도가열의 형상을 설계해주어야 한다. 예로서 그림 1에 나타난 4가지 형태의 코일을 사용하여 3초간 유도가열을 실시한 경우에 대해 유한요소해석을 실시한 결과 얻어진 금형의 온도분포를 그림 2에 나타내었다[6]. 유도가열 효과가 가장 좋게 나타난 Type 3의 경우 최대온도가 $184.5^\circ C$ 로 예측되었으며, 표피효과로 인해 금형 표면의 온도가 집중적으로 상승됨을 확인할 수 있다. 또한 금형 표면의 온도상승 패턴이 코일의 형상과 유사함을 알 수 있다.

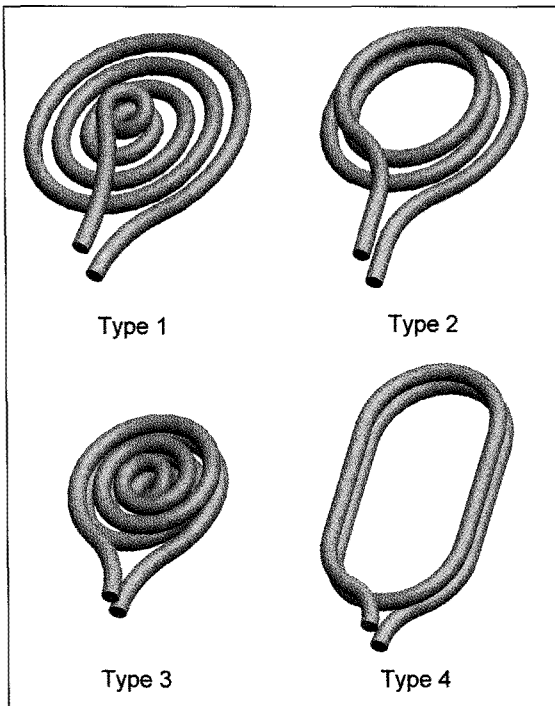


그림 1 네 가지 형태의 유도코일 형태

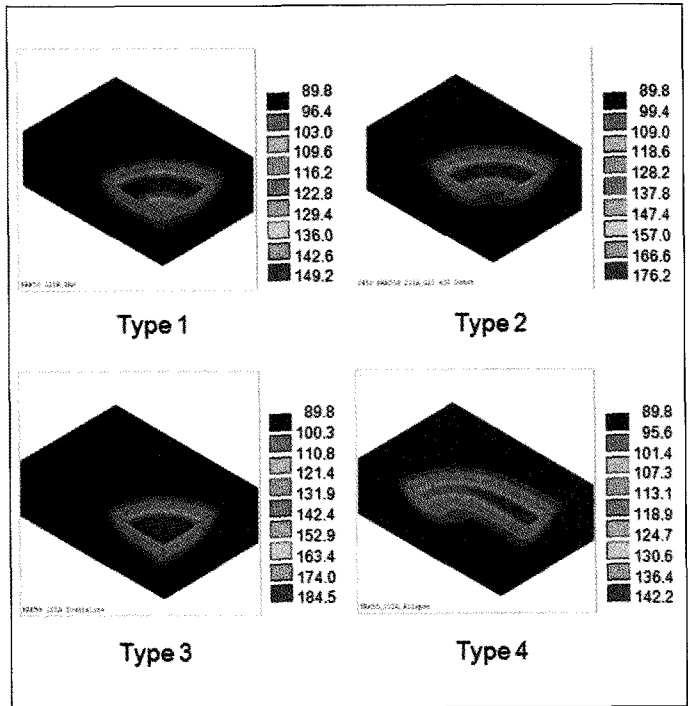


그림 2 유도코일 형상에 따른 금형온도 분포(단위: °C)

고주파 유도가열을 적용한 마이크로 패턴의 성형성 향상

사출성형 과정을 살펴보면 고온으로 분사된 고분자 수지가 금형 벽면을 채우며 성형이 이루어지는데, 이 과정에서 고온의 수지와 상대적으로 온도가 낮은 금형 벽면간의 열전달이 발생하게 된다. 고온의 수지 내부에서 금형면으로 열전달이 발생하면서 금형과 인접한 부분에서는 급속하게 온도가 저하되어 수지의 응고가 진행된다. 이때 응고된 층의 두께는 일반적으로 편축 0.25mm 정도로 알려져 있으며, 두께가 매우 얇은 제품의 경우 수지 유동의 저하를 초래하며 심한 경우 미성형(Short shot)을 유발할 가능성이 높다. 따라서 박육 제품이나 초미세 형상의 사출성형의 경우 유동특성을 개선하기 위해 통상적인 조건보다 높은 금형온도의 유지가 필요하다.

특히 광디스크나 LCD 백라이트용 도광판 등과 같이 전체 제품의 크기는 수십 mm 이상의 대면적에 마이크로 혹은 나노 스케일의 미세 구조물이 포함된 경우 사

출성형시 용융된 고분자수지가 미세패턴 충전 시 유동성이 급속하게 저하되어 패턴의 전사에 많은 어려움이 뒤따른다. 따라서 마이크로 사출성형의 경우 사출성형시 발생하는 고화층을 제거함으로써 고분자수지의 유동특성을 개선하기 위해 일반적인 경우와는 차별화된 사출성형 조건의 설정이 필요하며, 최근 고주파 유도가열을 적용한 마이크로/나노 패턴의 전사성을 향상시키기 위한 연구가 수행되고 있다. Chen 등[1]은 고주파 유도가열을 사용하여 고세장비 마이크로 채널의 사출성형에 활용하였고(그림 3 참조), Kim 등[2]은 도광판 나노 패턴의 전사성 향상을 위해 고주파 유도가열을 적용하였다.(그림 4 참조)

웰드라인 제거를 통한 표면특성 개선

웰드라인(Weldline)은 사출성형 과정에서 상호간에 분리되어 있는 유동선단(Flow front)이 서로 다른 방향에서 이동하다가 만날 때 형성된다. 사출성형에서 웰드라인은 다점 게이트를 사용할 경우, 제품에 구멍이나

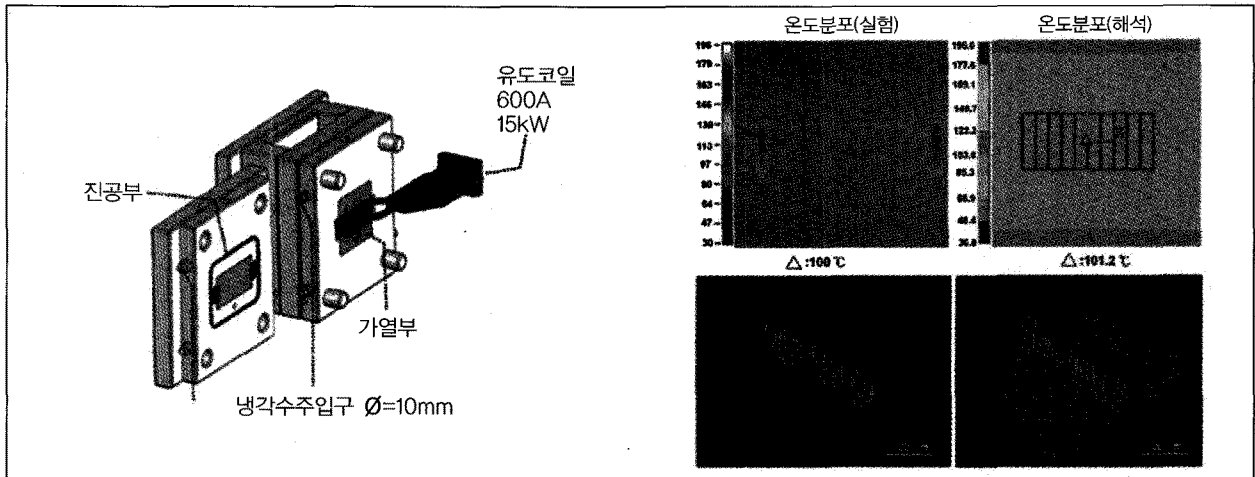


그림 3 고세장비 마이크로 채널의 성형성 향상 적용사례[1]

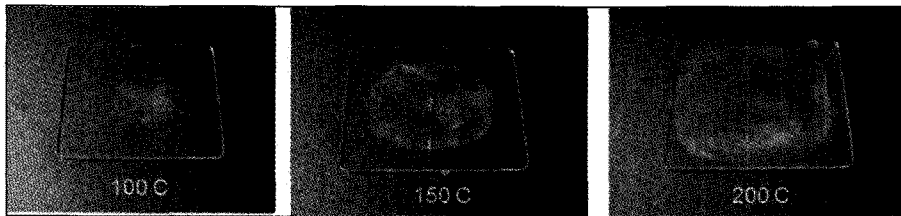


그림 4 도광판 나노패턴의 전사성 향상 적용사례[2]

노치(Notch)가 발생하며, 이러한 취약부위는 제품의 기계적 특성 저하는 물론 증착, 도장, 도금 등 후공정에 여러 가지 문제를 유발하게 된다.

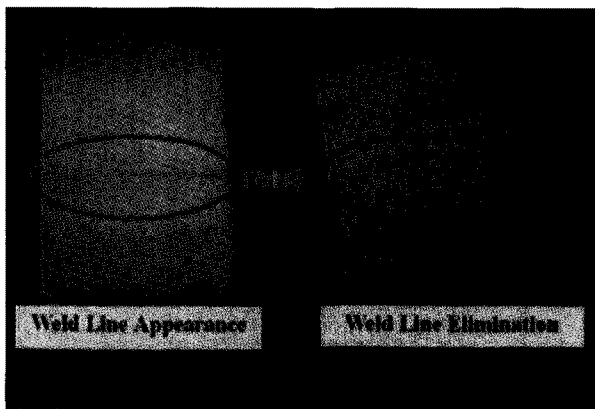


그림 5 고주파 유도가열 적용 웰드라인 개선 사례[3]

웰드라인을 개선하기 위해서, 통상적으로 수지온도 및 금형온도를 증가시켜 웰드 발생 위치에서의 유동선단의 온도를 높여주는 방안이 사용되고 있는데, 금형온도 증가 시 금형의 냉각에 소요되는 시간이 증가하여 생산성이 저하되는 문제점이 있다. 따라서 금속 금형가열을 통해 충전과정에서 금형의 온도를 유리전이온도 이상으로 유지시켜줌으로써 외관 제품의 웰드라인을 개선하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 고주파 유도가열 기술을 적용한 결과도 최근에 발표되고 있다. Chen 등[4]은 양측 게이트로 구성된 인장시편 금형에 고주파 유도가열을 적용하여 웰드라인을 감소시키고, 가열시간에 따라 시편의 인장강도가 향상됨을 확인하였다(그림 5 참조). Park 등[5]은 휴대폰 커버제품 표면의 웰드라인을 제거하기 위한 고주파 유도가열 일체화 사출성형 시스템을 개발하여 성공적으로 적용하였다.(그림 6 참조)

인서트 존재하는 경우, 제품의 두께가 극심하게 변화되어 유동의 정체가 발생하는 경우 등에 생성된다. 웰드라인이 발생한 부위는 마치 크랙(crack)처럼 보여 외관상 좋지 않다. 따라서 외관 제품의 경우 제품 표면에 웰드라인이 발생하면 도장 등의 후공정을 통해 웰드라인을 보이지 않도록 처리해 주는데, 이러한 과정에서 부가적인 경비와 시간이 소요되는 단점이 있다 또한 웰드라인 발생 부위에서는 웰드부에서의 V자 형태의

선택적 유도가열에 의한 국부 금형가열기술

고주파 유도가열 시 피가열체의 자기적 특성에 따라

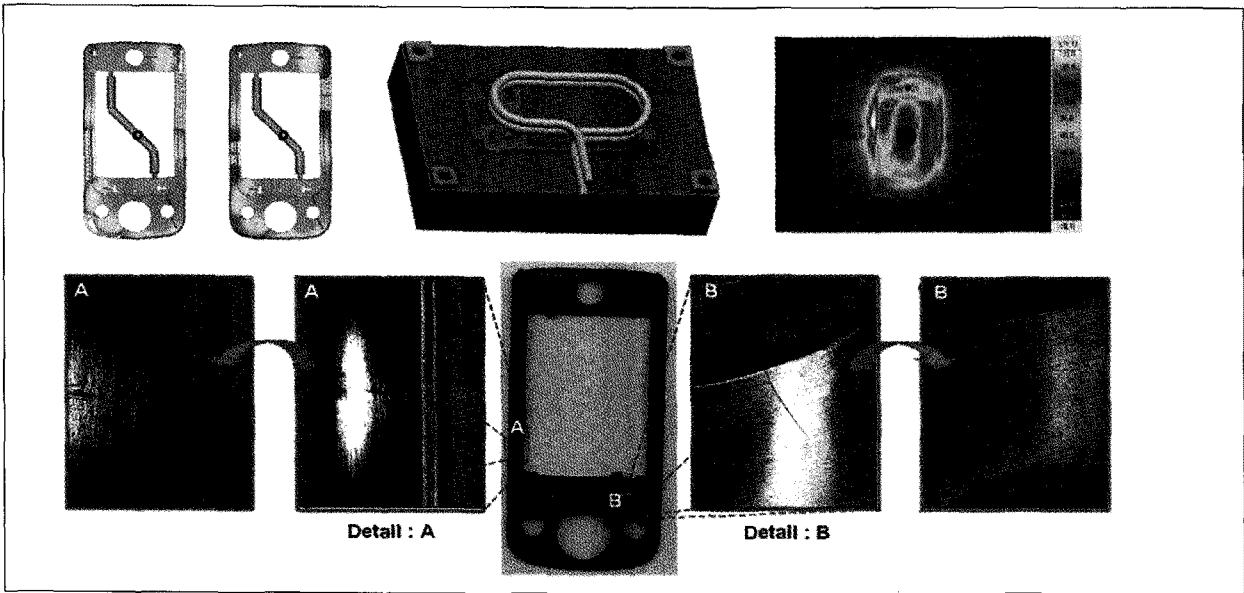


그림 6 고주파 유도가열 적용 휴대폰 웰드라인 개선 사례[4]

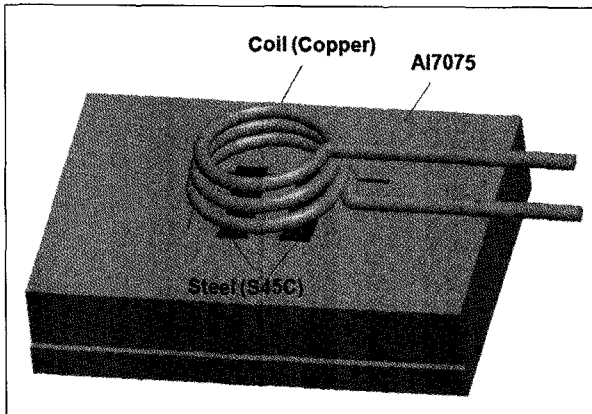


그림 7 선택적 유도가열기법의 개념도

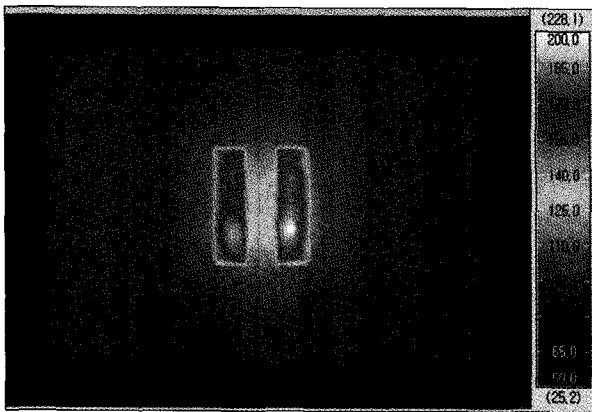


그림 8 이종재료 사출금형 유도가열 시 온도분포

가열효율에 많은 차이가 발생한다. 자성체의 경우 시변 자장의 영향을 크게 받아 비자성체에 비해 많은 와전류가 유도된다. 특히 식 (1)에서 알 수 있듯이 자성재료의 경우 상대투자율의 증가로 인해 침투깊이가 얕아져 비자성체에 비해 표면가열의 효율이 더욱 증대된다.

상기 특성을 이용하여 재료를 선택적으로 사용함으로써 금형을 국부적으로 가열할 수 있는 선택적 유도가열 기법이 개발되었다. 그림 7에 선택적 유도가열기법의 개념도를 나타내었다. 금형 형판은 비자성체인 알루미늄 합금(Al7075)을 사용하였고, 가열 부위에 자성체인 탄소강(S45C)을 사용하여 인서트 물을 삽입하였다. 결과적으로 투자율이 높은 탄소강 인서트 부위에 유도전류가 집중되어 금형 표면의 국부적인 가열이 가능하다. 그림 8에 이종재료 사출금형에 대한 고주파 유도가열 실험결과를 나타내었다. 온도분포를 관찰하면 상대적으로 투자율이 높은 S45C 주변에서 온도상승이 집중되어 국부가열의 효과를 확인할 수 있었고, 이러한 결과로부터 이종재료의 사용에 의해 고주파 유도가열의 국부가열 및 급속가열 효과를 한층 더 높일 수 있다. 그림 9에 고세장비 마이크로 채널(두께 60um, 세장비 16.7) 성형공정에 선택적 유도가열을 적용하여 성형부를 국부적으로 급속 가열함으로써 기존의 고주파 유도가열

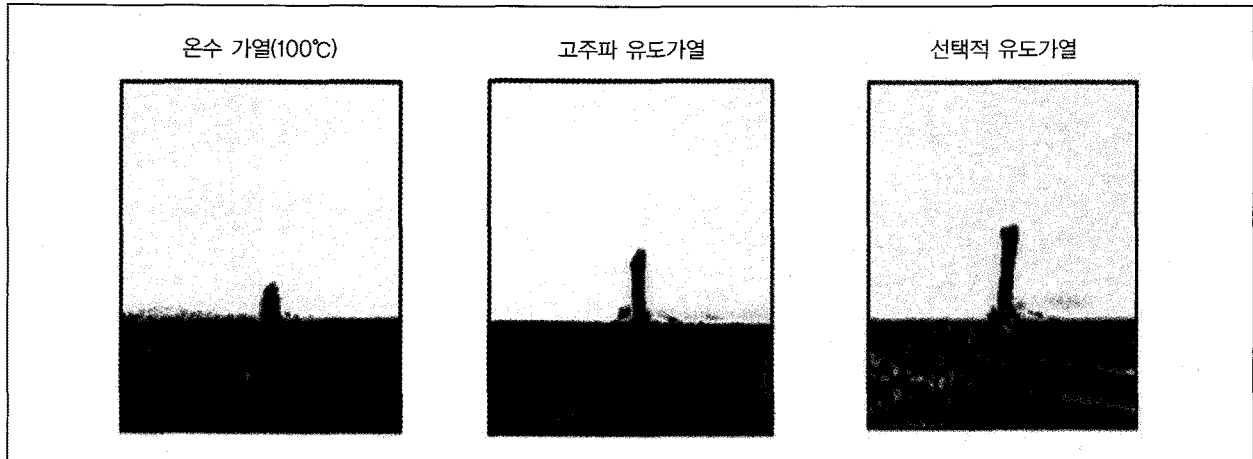


그림 9 선택적 유도가열을 적용한 고세장비 마이크로 채널의 성형성 향상[5]

에 비해 성형성을 향상시킨 연구결과를 나타내었다.

참고문헌

- [1] S. C. Chen, W. R. Jong, Y. J. Chang, J. A. Chang, J. C. Cin, 2006, Rapid mold temperature variation for assisting the micro injection of high aspect ratio micro-feature parts using induction heating technology, J. Micromech. Microeng., Vol. 16, pp. 1783~1791.
- [2] S. Kim, C. S. Shiau, B. Kim, D. Yao, 2007, Injection molding nanoscale features with the aid of induction heating, Polym. Plast. Technol. Eng., Vol. 46, 1031~1037.
- [3] S. C. Chen, W. R. Jong, J. A. Chang, 2006, Dynamic mold surface temperature control using induction heating and its effects on the surface appearance on weld line, J. Appl. Polym. Sci., Vol. 101, pp. 1174~1180.
- [4] K. Park, D. H. Sohn, K. H. Cho, 2010, Eliminating weldlines of an injection molded part with the aid of high-frequency induction heating, J. Mech. Sci. Technol., Vol. 24, pp. 149~152.
- [5] K. Park and S. I. Lee, 2010, Localized mold heating with the aid of selective induction for injection molding of high aspect ratio micro-features, J. Micromech. Microeng., Vol. 20, 035002.
- [6] D. H. Sohn, Y. S. Seo, K. Park 2010, Three-dimensional finite element analysis of the induction heating procedure of an injection mold, Trans. Mater. Process., Vol. 19, pp. 152~159.



기계 용어해설

유효전력(Effective Electric Power)

교류회로에서 전압의 실효값을 V , 전류의 실효값을 I , 위상차를 ϕ 하였을 때, 유효전력 P 일 때, $P = VI \cos \phi$.

유효장력(Effective Tension)

벨트나 로프 등의 전동에서 당기는 축의 장력으로부터 느슨한 축의 장력을 뺀 힘이 원동차에서 종동차로 전해지는 것.