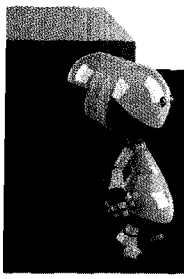


THEME 02

고효율 사출금형 온도제어를 위한 급속가열/냉각기술

박 근 | 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부, 교수 | e-mail : kpark@seoultech.ac.kr
박 창 용 | 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학부, 교수 | e-mail : cypark@seoultech.ac.kr

이 글에서는 고효율 사출금형 온도제어를 위한 급속가열 및 냉각기술(Rapid mold heating and cooling)의 개요에 대해 소개하고, 국내외에 개발되어 있는 급속 금형가열 및 냉각기술의 현황 및 특성에 대한 비교분석을 제시하고자 한다.

사출금형의 급속가열 / 냉각기술 개요

사출성형은 플라스틱 제품의 대량생산에 널리 활용되는 생산공정으로 고분자 소재를 고온에서 가소화시켜 금형 내부에 고속, 고압으로 분사하여 캐비티 내부를 채워 제품을 성형하는 공정이다. 사출성형 제품의 품질 향상을 위해서는 게이트, 냉각회로 등의 금형설계 변수와 사출압력 및 속도, 사출온도 및 금형온도, 보압압력 및 속도, 공정별 시간 등의 성형공정 변수들에 대한 고찰이 필요하다. 상기 공정변수 중 금형온도는 사출성형 시 고분자 유지의 유동특성 및 충전완료 후 금형 내부의 열전달 특성에 영향을 미치는 중요한 변수로서 제품의 유동성, 기계적 특성 등에 영향을 미치고 있다. 금형온도는 성형 시에는 고분자 수지의 유동성 향상을 위하여 비교적 높은 온도로 유지시켜 주어야 하는 반면, 성형 종료 후 금형 냉각을 통한 냉각시간 단축을 위해서는 금형온도를 낮춰 주어야 하는 이중적인 특성을 지니고 있다. 상기 이유로 인해 일반적으로 고분자 수지별로 수지의 성형성과 금형의 냉각특성을 종합적으로 고려한 적정 금형온도가 제시되어 있다.

한편 사용되는 고분자수지의 종류에 따라 금형온도를 상온보다 높게 유지해야 하는 경우가 많은데, 일반적으로 금형 내부의 냉각회로에 냉각수 대신 온수를

표 1 급속 금형가열/냉각기술의 기술요소별 주요 연구내용

금형의 낮은 열용량	• 낮은 밀도, 낮은 비열, 작은 부피 • 다공성 물질 사용, 다층구조, 금형 신소재 개발
급속가열	• 전기 열저항 가열: 저주파 전류(AC or DC), 고주파 전류(코일 유도가열, 근접 유도가열) • Microwave를 이용한 폴리머 가열 • Peltier 효과를 이용한 열전소자 가열 • 대류 열전달 가열: 내부유동가열(고온 oil, 수증기 가열, 고온 가스), 외부유동가열(고온 가스, 증기 응축, 화염 가열) • 복사 열전달 가열: 적외선 가열법 • 접촉 가열: 고온 고체 접촉, 폴리머 용융-간접가열 • 초음파 가열
급속냉각	• 대류 열전달 냉각(물, 공기를 포함하는 저온 기체) • 냉각장치를 통한 냉각(열전소자, vortex 튜브, 응축기 및 증발기 등)

흘려주어 강제 대류를 유발시킴으로써 금형을 냉각시키는 방법을 사용하고 있다. 요구되는 금형온도가 100°C 이상인 경우는 오일 혹은 카트리지 히터를 사용하여 원하는 금형의 온도를 유지해 주고 있다. 이때 금형의 구조적 안정성 측면에서 냉각회로는 통상적으로 성형부와 일정 거리 이상 떨어진 형판부위에 가공하여 사용하게 된다. 따라서 성형부의 온도를 증가시키기 위해서는 금형 전체의 온도가 증가하는 결과를 유발하여 결과적으로 성형 후에 취출까지 소요되는 냉각시간이 증가되어 생산성이 저하되게 된다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 금형의 성형부를 급속으로 가열하고 냉각시키기 위한 기술이 개발되고 있다. 급속 금형가열기술에서 중요한 요소는 크게 금형의 열용량(thermal mass), 가열기술, 냉각기술로 구분할 수 있으며, 각 요소에 대한 주요 연구내용을 표 1에 요약하였다.

사출금형의 급속가열/냉각기술 소개

고온가스(증기)를 이용한 급속 금형가열

고온가스(증기)를 금형 내 채널을 통해 분사하여 금형가열 방법으로 RHCM(Rapid Heat Cycle Mold)이라고도 불린다. 일본 富士精工 및 Daiho 사에서 개발하여 특허권을 보유하고 있다. 비접촉 형태로 금형가열이 가능하며, 기술이 안정화되어 있어 현재 일부 국내업체에서 도입하여 사용하고 있다. 주요 응용분야로는 대형 사출품 표면의 웰드라인 제거 및 표면광택 개선 등에 활용되고 있다.(그림 1 참조)

E-Mold 시스템을 이용한 초고온 금형가열

기존의 고온금형에서 금형 내 히터봉을 삽입하여 전기히터로 가열하는 방법이 널리 사용되어 왔으나. 금형형판 전체가 가열되므로 에너지효율이 낮으며 냉각시간이 과다하게 소요되어 생산성이 저하되는 단점이 있었다. E-Mold 시스템은 이러한 문제점을 극복하기 위해 개발된 방법으로 국내업체인 ㈜나다이노베이션에 의해 개발되어 상용화되어 있다. 기본 원리를 살펴보면 전기히터가 삽입된 금형 가열판을 별도로 구성하여 가열 시에는 가열판이 금형원판과 분리되어 열손실을 방지하고, 냉각 시에는 가열판이 금형원판과 접촉되어 냉각이 진행되는 형태로 기존 전기히터 가열의 단점을 극복하였다. 주요 응용분야로는 사출품 웰드라인 및 플로마크 제거, 도광판 마이크로패턴 전사성 향상, 표면광택 향상 등이 있다.(그림 2 참조)

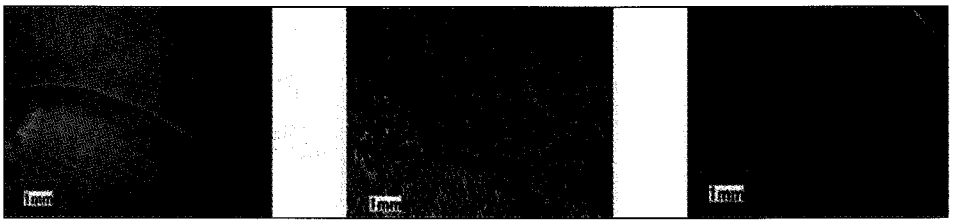


그림 1 RHCM 기법을 적용한 사출품 웰드라인 개선 사례

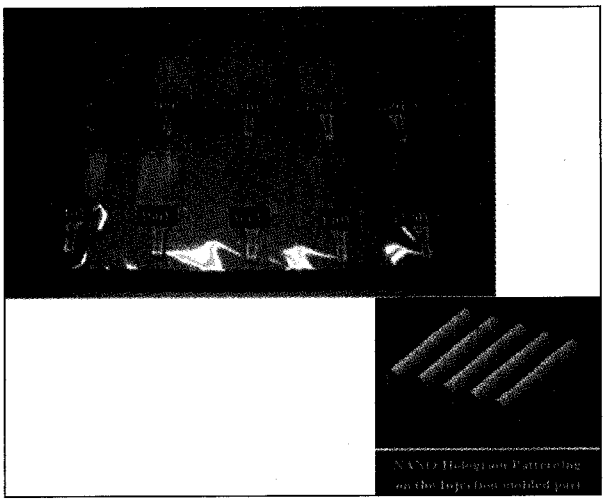


그림 2 E-Mold 공법을 적용한 도광판 마이크로 패턴의 전사성 향상

고주파 근접가열

고주파 근접가열(High-Frequency Proximity Heating)은 미국 University of Massachusetts Amherst에서 개발되었으며, 고주파전류의 표피효과(Skin effect)를 이용하여 금형 표면부만 집중적으로 가열시킴으로써 가열 및 냉각속도를 획기적으로 향상시킨 방법이다. 즉, 금형 내부에

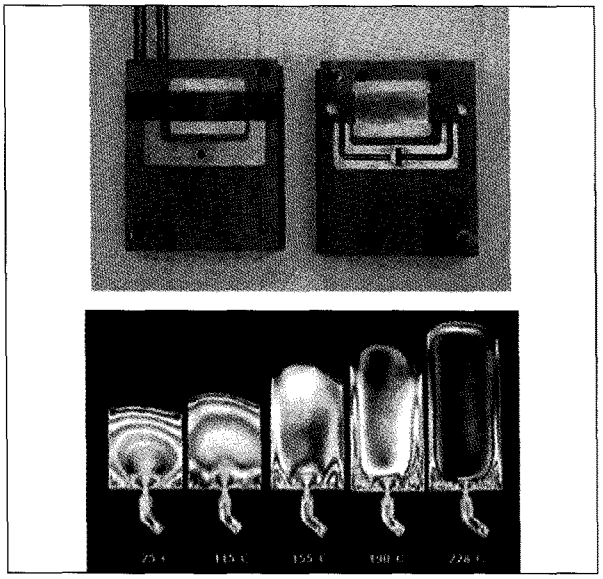


그림 3 금형가열을 적용한 박육사출성형의 유동성 및 복굴절 특성 개선

고주파전류를 관통시켜 근접효과(Proximity heating)에 의해 캐비티 표면 부위만 급속으로 가열하여 가열과 냉각에 소요되는 시간을 획기적으로 단축시킬 수 있다. 고주파 근접가열은 가열효율이 높고(온도변화율 40℃/s), 금형이 닫힌 상태에서 가열이 수행되므로 온도손실이 적다는 장점이 있으며, 이러한 장점을 극대화하기 위해서는 적절한 금형의 절연이 필요하다. 주요 응용분야로는 박육사출의 유동특성 및 초미세 구조물 사출성형의 유동특성 개선, 광학부품의 복굴절 특성 개선 등이 있다.(그림 3 참조)

고주파 유도가열

고주파 유도가열(High-Frequency Induction Heating)은 역시 고주파전류의 표피효과를 이용하여 금형 표면부만 집중적으로 가열하는 방법으로 유도코일을 사용하여 금형 표면에 간접적으로 고주파 와전류를 발생시키는 방법이다. 따라서 기존의 금형을 그대로 사용하면서 비접촉 형태로 가열이 가능하다는 장점이 있다. 고주파 유도가열의 적용을 위해서는 유도코일을 금형 내부로 이송하기 위한 별도의 메커니즘이 필요하며, 최근 이송로봇과 온도센서를 연계한 자동이송시스템이 개발되었다. 주요 응용분야로는 사출품 표면 웰드라인 개선 및 고세장비 마이크로 부품의 성형개선 등이 있다.(그림 4 참조)

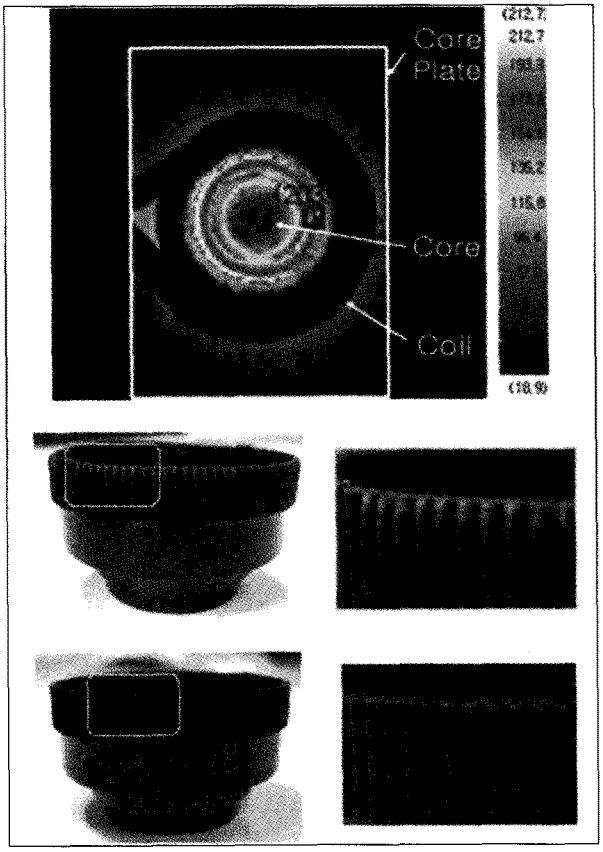
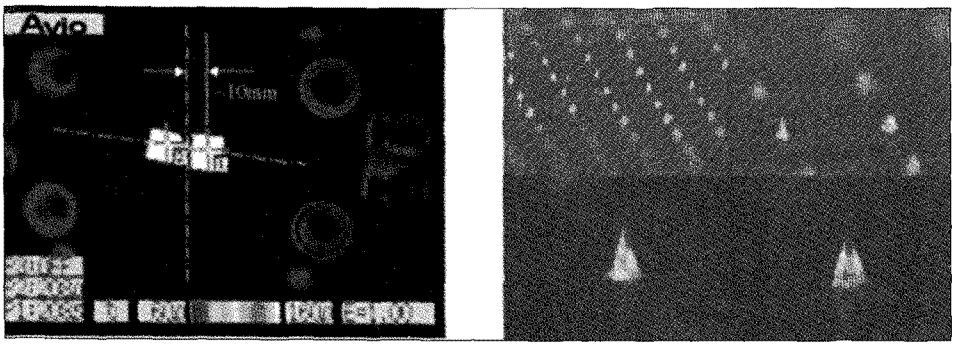


그림 4 고주파 유도가열을 이용한 마이크로 치형의 성형성 향상 적용 사례

적외선 가열(Infrared heating)

금형 내부에 적외선 램프 및 반사경을 설치하여 비접촉 형태로 금형표면을 가열하는 방법으로서 대만 National Cheng Kung University에서 개발되었다. 기존 발표된 사례를 보면 1kW 용량의 적외선램프 4~8개를 사용하는 정도로 설비투자비 및 전력소모가 타 가열기법에 비해 저렴한 것으로 판단된다. 단 금형 내부에 적외선램프와 반사판을 설치해야 하므로 금형구조가 복잡해지며, 가열효율이 타 급속가열비법에 비해 상대적으로 저조(온도변화율 10℃/s)하다는 단점이 있다. 응용사례를 살펴보면 대면적 미세구조물(Micro-probe)의 성형성 향상에 적용된 사례가 있다.(그림 5 참조)



적외선 가열 적용 시 금형표면의 온도분포 및 Microprobe 성형 적용 사례

사출금형의 급속가열/냉각기술의 특성 비교

앞장에서 기술한 바와 같이 현재 사출성형품의 품질 및 생산성 향상을 위해 다양한 사출금형의 급속가열/냉각기술이 개발되어 활용되고 있으며, 이 밖에도 많은 가열기법이 시도되고 있다. 표 2에 현재까지 발표되어 있는 주요 사출금형 급속가열기술에 대한 특성 및 장단점을 비교하였다(출처: D. Yao, S. C. Chen, B. H. Kim, "Rapid thermal cycling of injection molds: An overview on technical approaches and applications," Adv. Polym. Technol., Vol. 27, pp. 233~255, 2008)

표 2 사출금형 급속가열기술에 대한 특성 비교

구분	가열법	장점	단점
전기 열저항 가열	저주파 전류(AC or DC)	표면의 국소적 가열 가능	균일 가열 어려움, 저항 재료선택 어려움, 가열 금형층과 base 사이에 저항체 필요
	고주파 전류(코일)	전기 저항체 없이 표면 급속가열 가능	균일 가열을 위한 코일 설계 어려움, 금형 닫기 이전의 예열 단계에서만 적용가능
	고주파 전류(근접가열)	전기 저항체 없이 표면 급속가열 가능, 금형 닫은 상태에서 적용 가능	유도전류의 집중을 위해 전기 절연과정이 필수, 금형의 형태에 영향을 줌.
Dielectric 가열	Microwave 가열	금형과 폴리머를 동시에 가열할 수 있음.	금형이 절연체 이어야 함. 폴리머의 전자기적 흡수율이 작아 첨가제 또는 대용량의 에너지가 필요
열전소자 가열	Peltier 효과	전극을 바꿈으로 하나의 소자로 가열 및 냉각이 가능	발열부의 열이 급속히 반대쪽 냉각부로 전달됨, 용량이 작고 온도조절이 어려움.
대류 열전달 가열	내부유동 가열(고온 oil, 수증기 가열, 고온 가스)	금형의 전체온도를 일정하게 유지할 수 있음.	금형의 온도를 급속히 올리는 것이 어려움.
	외부유동가열(고온 가스, 증기 응축, 화염 가열)	표면의 국소적 가열 가능	기체 상태의 물질만 사용 가능, 온도조절 어려움, 응축 수 발생
복사 열전달 가열	적외선 가열법	저렴한 가격으로 표면의 국소가열 가능	금형을 닫기 이전의 예열단계에서만 적용가능, 균일한 가열이 어려움.
접촉 가열	접촉 가열법	간단한 표면을 가진 물체에 경제적	금형 전체 온도를 급속히 올리는 것이 어려움. 균일가열이 어려움.