

전산모사 프로그램을 이용한 E-MOLD의 Heating Line 배치의 최적화 설계에 관한 연구

정재엽¹, 김동학^{1*}

Development of simulation method for heating line optimization of E-Mold by using commercial CAE softwares

Jae-Youp Chung¹ and Dong-Hak Kim^{1*}

요 약 일반사출성형에서는 수지가 캐비티 내를 흐르면서 냉각으로 인한 점도의 상승으로 전사성이 급격히 나빠지기 때문에 미세패턴을 가진 성형품을 제작하는데 많은 어려움이 따른다. 이를 해결하는 방법으로 금형온도를 용융된 수지온도 수준까지 순간적으로 표면만을 가열하여 성형시킨 후 급속히 냉각하는 다양한 순간금형가열방식이 있고, 그 중 본 연구에서는 전열가열방식인 E-Mold를 채택하였다. 특히, 마이크로/나노 부품 성형에 필수적인 E-Mold 금형 설계에 있어 heating line의 배치는 금형의 온도 제어 및 균일한 온도 분포에 절대적인 영향을 미치므로 최적화된 heating line의 배치가 필수적이다. 본 연구에서는 사출공정의 사이클 타임을 최소화하면서 다양한 해석 프로그램을 사용하여 E-Mold의 최적화 설계를 전산모사 하였고, 이를 실험결과와 비교하였다. 먼저, 3D CAD 프로그램인 Pro-Engineer Wildfire 2.0 을 사용하여 E-Mold 금형을 설계하고, ANSYS사의 ICEMCFD 프로그램을 사용하여 MESH 생성하고, ANSYS사의 FLUENT 프로그램을 사용하여 금형의 초기온도 60℃에서 120℃와 180℃까지 가열하는데 걸리는 시간과 냉각시키는데 걸리는 시간 등을 전산모사 하였다. 그리고 Polycarbonate를 이용하여 LGP 도광판을 실제 사출성형하여 얻은 데이터와 비교 분석을 하였다. 전산모사와 실제 사출결과에서 3~4초가량의 차이가 나타났지만 실제 사출시 고온의 용융된 플라스틱 수지에 따른 냉각시간의 오차를 생각한다면, 전산모사와 실험결과는 거의 일치한다고 볼 수 있다. 따라서 본 체계적인 전산모사방법을 통해 E-Mold의 Heating Line 최적화 설계가 가능하다는 것을 확인하였다.

Abstract To produce plastic parts that have fine pattern through conventional injection molding, a lot of difficulties follow. Therefore, rapid heating and cooling methods are good candidates for manufacturing injection-molded parts with micro/nano patterns. In this study, we adopted the E-Mold patent technology. The mold for E-Mold technology has a separate heated core with micro heaters. It is very important to optimize the lay-out of the heaters in heated core because it influences both control and distribution of mold temperature. We developed a optimization method of heating line lay-out by using commercial softwares and compared the output with the experimental results. We used Pro-Engineer Wildfire 2.0 for the mold design, ICEMCFD for mesh generation, and FLUENT for heat transfer simulation. The simulation results showed the temperature profile from 60℃ to 120℃ or 180℃ during heating and cooling process which were compared with the injection molding experiments. We concluded that the simulation could well explain the experimental results. It was shown that the E-Mold optimization design for heater lay-out could be available through the simulation.

Key Words : electrically heated mold, E-Mold, Simulation, Injection Molding, Heat&Cool

본 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행됨

본 연구는 중소기업청의 산학공동기술개발지원사업으로 수행됨

¹순천향대학교 나노화학공학과

*교신저자 : 김동학(dhkim@sch.ac.kr)

접수일 08년 10월 08일

수정일 08년 12월 12일

계재확정일 08년 12월 16일

1. 서론

최근 디스플레이 장치나 정보 저장 매체의 발전으로 인해 마이크로 사출성형에 대한 관심이 높아지고 있다. 마이크로 사출성형은 제품의 전체 크기가 수 mm 이하인 정밀 부품의 사출성형 기술로 생각할 수 있는데, 마이크로 기어 등이 대표적인 예이다. 한편 전체 제품의 크기는 수십 mm 이상의 대면적에 마이크로 혹은 나노 스케일의 미세 구조물이 포함된 경우도 역시 마이크로 사출성형으로 간주할 수 있는데, CD, DVD 등의 광디스크나 LCD 백라이트용 도광판 등이 이러한 범주에 해당한다.[1]

특히 후자의 경우 사출성형시 응용된 고분자 수지가 미세패턴 충전시 유동성이 급속하게 저하되어 패턴의 전사에 많은 어려움이 뒤따른다.[2]

미세패턴 충전시 유동특성을 개선하기 위해 높은 사출 압력 및 사출속도, 낮은 점성의 수지사용, 강건한 구조의 금형 설계 등이 적용되고 있다.[1] 그러나, 이러한 특화된 공정조건으로 인해 사출성형기, 수지, 금형구조 등에 많은 제한을 받게 된다. 그 해결방법으로 금형을 유리전이 온도 이상으로 가열하여 수지의 응고를 완화시킴으로써 유동특성을 개선하는 방법이 연구되고 있다.[3,4,5,6]

유변학적 특성상 수지의 충전 형상은 점도에 따라서 달라진다. 일반적으로 금형온도가 높을수록 수지의 점도가 낮아져 흐름성이 좋아진다. 이는 금형온도가 높아질수록 용융된 수지와 금형온도의 차이를 최소화 시킴으로써 고화되는 시간이 느려지고, 고화층이 얇게 형성되어 흐름성이 좋아지게 된다.[7,8]

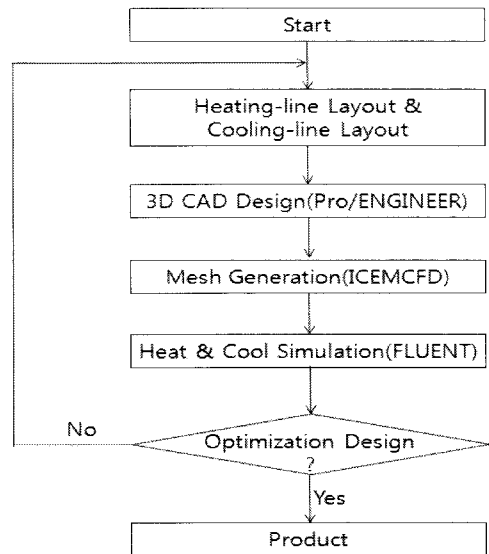
금형가열방식 중 하나인 전열가열방식(E-MOLD)은 이중코어로 만들어진 금형에 전열장치(마이크로히터, 센서)를 이용하여 금형의 표면만을 가열하여 금형의 온도를 수지의 용융점인 200℃ 이상으로 가열하여 성형할 수 있다. E-MOLD는 가열시간과 냉각시간을 효율적으로 제어할 수 있어 사이클 타임의 지연을 최소화할 수 있고, 금형을 지속적으로 가열하여 온도를 유지하는 것이 아니라 필요시간만 금형을 가열하기 때문에 에너지 소비비용도 적다. 따라서 미세패턴 사출성형에 적합한 사출기술 중 하나이다.[9]

본 연구는 미세패턴 사출성형이 가능한 전열가열방식(E-MOLD)의 금형설계 최적화 기법을 개발하는 것으로서, 먼저 상업화된 Software를 이용하여 금형과 Heating-Line과 Cooling-Line 배치에 대한 3D CAD Modeling을 하여 Mesh를 생성한 후, 열 유체 해석 Program을 통해 금형 내의 위치 및 시간에 따른 온도변화를 전산모사 함으로써 최적의 Heating-Line 과 Cooling-Line 설계를 구현하였다. 한편, 이러한 전산모사

의 타당성을 검증하기 위하여 실제 E-MOLD금형을 이용하여 사출성형 실험결과를 구하여 이를 전산모사 결과와 비교/분석하였다.

2. 최적화설계를 위한 전산모사

최적화 설계를 위한 Simulation 알고리즘은 그림1과 같다. 알고리즘을 통해 Heating-Line과 Cooling-Line을 설계하고 3D CAD Design 후, Mesh를 생성하고, 열유체 해석 프로그램을 통하여 Heat&Cool 해석을 하여 최적화 조건에 부합되는지 평가한다. 일반적으로 Cooling-Line은 제품 형상에 따라 설계를 하며, 스프루나 게이트 등 금형 온도가 제일 높은 곳에 냉매가 우선 유입되도록 설계를 하고, 가장 단순한 설계로 최고의 효율을 낼 수 있는 Cooling-Line 설계가 필요하다. E-MOLD 공정의 가장 중요한 조건은 원하는 금형표면의 고른 온도분포를 갖는 Heating Line 설계가 중요하다. 따라서 알고리즘을 통하여 Target Surface의 온도분포가 고르게 가열되고, Cycle Time이 원하는 범위 내에 포함되는 Heating-Line & Cooling-Line의 최적화설계 System을 구축하였다.

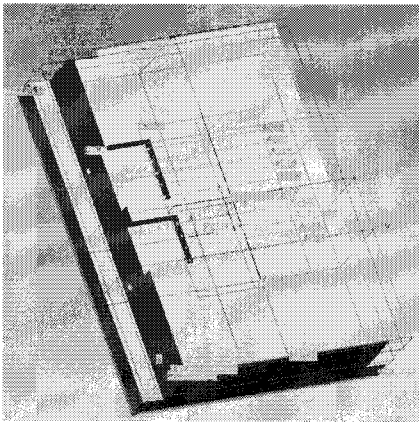


[그림1] CAE Simulation의 알고리즘

2.1 3D CAD Modeling

본 연구에서는 E-MOLD 금형의 Simulation을 위해 E-MOLD형 금형을 제작하였다. E-MOLD형 금형은 금형의 상측 가열코어에 Micro Heater와 Sensor를 설치하여

금형 표면을 가열하고 시간에 따른 온도DATA를 얻는다. E-MOLD 금형 설계가 완료되면 Simulation을 위해 3D CAD Program을 이용하여 Model을 Design 한다. 그림 2는 Pro-Engineer Wildfire 2.0 을 이용하여 E-MOLD 금형의 가열과 냉각 Simulation을 위한 상측 부분을 Modeling한 것이다. 금형 전체 폭은 300mm 이고 높이는 400mm, 두께는 100mm이다. 또 가열부분인 가열코어의 폭은 140mm 이고 높이는 210mm, 두께는 15mm이다. 금형부에 직경 8mm 로 Cooling Line을 설계하고, 가열코어내에 직경 5mm인 Heating Line 4개를 설계하였다.



[그림 2] E-Mold 금형설계(Pro/Engineering)

2.2 Mesh 생성

Pro-Engineer Wildfire 2.0 을 통해 Design한 3D CAD Model을 Mesh생성 프로그램중 하나인 ANSYS사의 ICMCFD 10.0 Program을 통해 Mesh를 생성하여 Mesh File로 변환하여 저장한다. 그림 3은 ANSYS사의 ICMCFD 10.0 Program을 통해 Mesh 생성후의 Model이다. Simulation에서 시간에 따른 온도 DATA를 얻기 위해 가열코어부에 Target Surface를 따로 생성하여 원하는 부분의 DATA를 얻을 수 있다. Mesh 생성 과정이 완료가 되면 열유체 해석 Program 인 ANSYS사의 Fluent Program에서 인식이 가능한 파일로 변환하여 저장한다.

2.3 Heat&Cool Simulation

Mesh생성 후 변환 저장되어진 파일을 ANSYS사의 Fluent 프로그램에서 Import 하여 Heat&Cool Simulation 실험을 하였다. Simulation은 두 가지 CASE로 실시하였다. CASE.1 의 경우 초기 금형온도 60℃에서 120℃까지 가열하는데 소요되는 시간과 다시 초기 온도로 냉각까지 소요되는 시간을 Simulation 하여 DATA를 얻었고, CASE.2 의 경우 초기 금형온도 60℃에서 180℃까지 가

열하는데 소요되는 시간과 다시 초기 온도로 냉각까지 소요되는 시간을 Simulation 하여 DATA를 얻었다. Mesh 생성 시 설정했던 Target-Surface 부분의 시간에 따른 온도변화를 FLUENT 프로그램에서 DATA로 기록 및 저장한다. 금형의 초기 온도는 60℃이고, 최대 가열한 온도는 각각 120℃, 180℃이다. 또한 Heater Capacity 는 50W/cm² 이고 냉각온도는 20℃이다. 그림 4(a)는 120℃까지의 Heat&Cool 의 공정을 나타낸 것이고, 그림 4(b)는 180℃까지의 Heat&Cool의 공정을 나타낸 것이다.

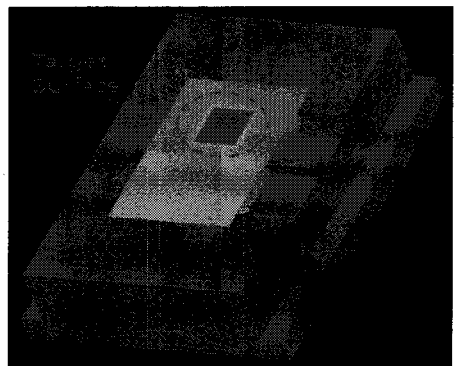
2.4 E-MOLD 사출성형

실험에 사용한 사출성형기는 Selex S-50으로 토글타입의 고속정밀 사출기이다. 사용수지는 폴리카보네이트(PC) 수지를 사용하였다. 표 1은 성형조건으로 금형온도를 제외한 다른 인자인 사출압력, 보압, 속도, 위치, 시간(가열 및 냉각), 냉각수 온도는 일정하게 하였다.

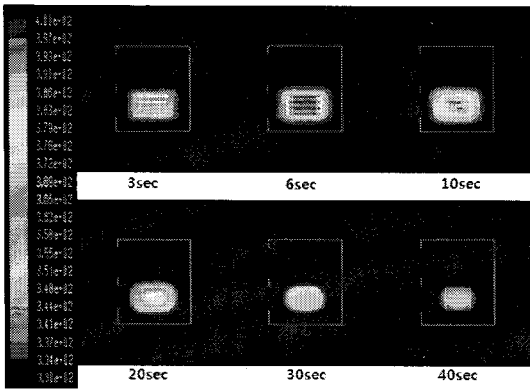
Stroke (mm)	압력 (kg/cm ²)	속도 (%)	보압 (kg/cm ²)	시간(sec)		온도(℃)	
				성형	냉각	실린더	냉각수
46.2	90	30	100	4	40	280	20

[표 1] 사출성형 조건

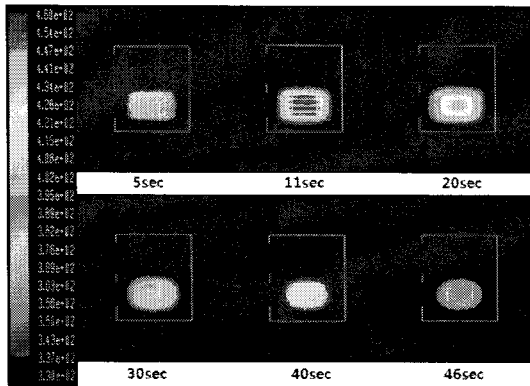
금형온도는 이동측은 금형온도조절기와 칠러(chiller)를 사용하여 가공된 냉각수로를 통하여 냉각수를 순환시켜 금형온도를 60℃로 설정하였고 고정측은 E-MOLD를 제거기를 통해 금형온도를 60 ~ 180℃로 설정하였으며, 금형에 삽입된 센서에 의해 시간에 따른 금형의 온도변화를 제거기에서 DATA로 나타내어진다. 그림 5는 일반사출방식과 E-MOLD 방식일 때 온도 프로파일을 비교한 것이며, 그림 6은 가열에 사용된 E-MOLD 시스템의 개략도이다. 그림 7은 사용금형의 사진이다.



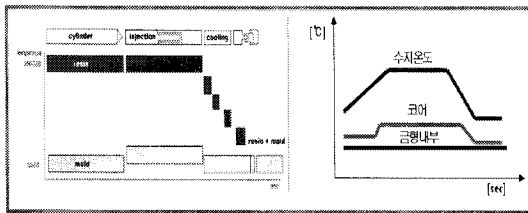
[그림 3] 유한요소 생성(ICMCFD)



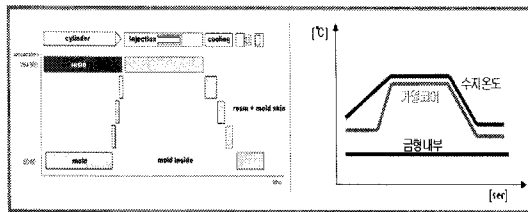
(a) Max. Temp. 120℃



(b) Max. Temp. 180℃
[그림 4] 가열 & 냉각해석(Fluent)

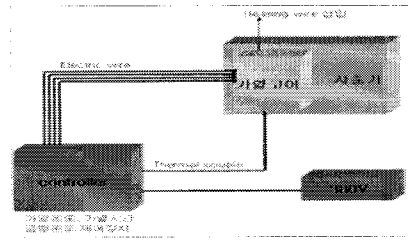


(a) 일반사출



(b) E-MOLD

[그림 5] 일반사출과 E-MOLD의 온도변화 비교
(a) 일반사출 (b) E-MOLD



[그림 6] E-MOLD 시스템

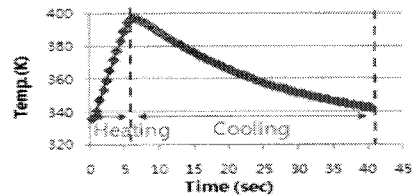


[그림 7] E-MOLD 사출성형 금형

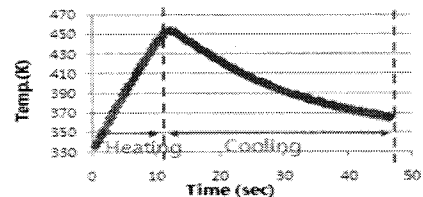
3. 결과 및 토론

3.1 Heat&Cool Simulation 결과

Heat&Cool의 공정의 Simulation 결과에서 Log file DATA를 이용해 그래프를 얻는다. 그림 8(a)는 120℃까지의 Heat&Cool의 공정에서 Target Surface에 대한 시간에 따른 온도변화 그래프를 나타낸 것이고, 그림 8(b)는 180℃까지의 Heat&Cool의 공정에서 Target Surface에 대한 시간에 따른 온도변화 그래프를 나타낸 것이다.



(a) Max. Temp. 120℃



(b) Max. Temp. 180℃

[그림 8] 시간의 따른 온도변화 해석 결과

3.2 Injection Molding 결과

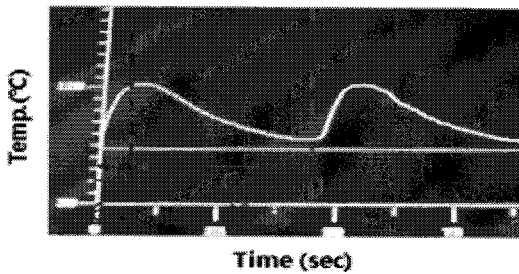
사출기 E-MOLD 제어판 모니터에 나타난 온도분포 그래프를 얻는다. 그림 9(a)는 120℃까지의 Heat&Cool의 공정에서 코어에 장착된 센서를 통해 측정된 시간에 따른 온도변화 그래프를 제어기모니터를 통해 나타낸 것이고, 그림 9(b)는 180℃까지의 Heat&Cool의 공정에서 코어에 장착된 센서를 통해 측정된 시간에 따른 온도변화 그래프를 제어기 모니터를 통해 나타낸 것이다.

3.3 Simulation과 Injection Molding 비교

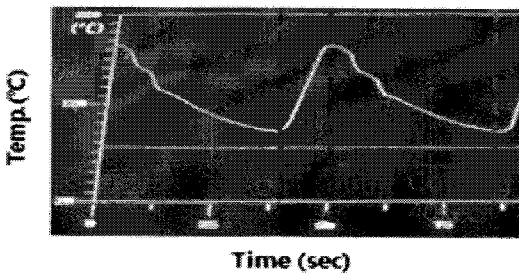
표 2는 초기 금형온도 60℃에서 120℃와 180℃까지 Heat&Cool에 대한 시간을 Simulation DATA와 Injection Molding DATA를 비교하여 나타내었다.

[표 2] E-MOLD 가열&냉각 및 사이클 타임

	Max. Temp. 120℃			Max. Temp. 180℃		
	Heating Time	Cooling Time	Cycle Time	Heating Time	Cooling Time	Cycle Time
Simulation	6	36	42	11	37	48
Inj. Molding	6	40	46	12	40	52



(a) Max. Temp. 120℃



(b) Max. Temp. 180℃

[그림 9] E-MOLD 사출의 시간에 따른 온도변화

4. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) E-Mold 공정의 핵심인 금형 내 히터라인을 최적화하기 위한 체계적인 알고리즘을 개발하였다. 이는 상용화 Software인 Pro-Engineer Wildfire 2.0, ANSYS사의 ICEMCFD와 FLUENT 등을 상호 활용하여 구현하였다.
- 2) 전산모사 결과의 타당성을 검증하기 위하여 실제 금형을 이용한 사출성형 실험결과를 구하였고 이를 전산모사와 비교하였다. 이 결과에 의하면, 냉각시간의 3~4초의 편차를 제외하고는 전산모사가 실험결과와 일치함을 확인하였다. 이러한 냉각시간의 차이는 사출시 고온의 용융수지에 의해 온도 상승효과로 추정된다.
- 3) 본 연구에서 개발한 전산모사를 이용한 금형의 최적화 설계기법은 타당성이 증명되었기에 앞으로 금형 가열 방식을 이용한 성형가공분야에서의 산업적인 활용이 기대된다.

참고문헌

- [1] Yoo, Y. E., Seo, Y. H., Je, T. J. and Choi, D. S., "Injection Molding Technology for Micro/Nano Pattern," J Kor. Soc. Precision Engng, Vol. 22, pp. 23~29, 2005
- [2] Yu, L., Koh, C. G., Lee, L. J. and Koelling, K. W., "Experimental Investigation and Numerical Simulation of Injection Molding with Micro -Features," Polym. Eng. Sci., Vol. 42, pp. 871~888., 2002.
- [3] Kim, B. H. and Suh, N. P., "Low Thermal Inertia Molding" Polym Plast. Technol. Eng., Vol 25, pp. 73~93., 1986
- [4] Jansen, K. M. B and Flaman, A. A. M., "Construction of Fast-Response Heating Elements for Injection Molding Applications," Polym. Eng. Sci., Vol. 34, pp. 894~897., 1994.
- [5] Yao, D. and Kim, B., "Development of Rapid Heating and Cooling Systems for Injection Molding Applications, Polym. Eng. Sci., Vol. 42, pp. 2471~2481., 2002.
- [6] Yao, D. and Kim, B., "Injection Molding High Aspect Ratio Microfeature," J injection Molding Tech., Vol. 6, pp. 11~17., 2002.
- [7] O. K. Kwon, J. H Yun, K. Park, "Improvement of Moldability for Ultra Thin-Wall Molding with Micro-Patterns", KSME Journal A, Vol.31(5), pp.

556-561, 2007

- [8] L. Yu, C. G. Koh, L. J. Lee, K. W. Koelling, "Experimental Investigation and Numerical Simulation of Injection Molding with Micro-Features" Polym. Eng. sci., Vol. 42, pp. 871-888, 2002
- [9] D. H. Kim, O. S. Kwak, "Surface improvement of Polypropylene structural foam by foaming agent amount" 산학기술학회학술대회논문집, pp. 292-295, 2004

김 동 학(Dong-Hak Kim)

[정회원]



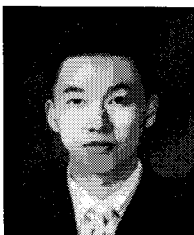
- 1986년 : 서울대학교 화학공학과 (공학사)
- 1988년 : KAIST 화학공학과 (공학석사)
- 1993년 : KAIST 화학공학과 (공학박사)

<관심분야>

고분자가공, 유변학 및 이동현상

정 재 엽(Jae-Youp Chung)

[준회원]



- 2007년 : 순천향대학교 화학공학과(공학사)

<관심분야>

고분자가공, CAE