

CO₂ 냉각모듈을 적용한 고곡률 성형품의 사출금형 급속냉각

이세호¹ · 이호상[†]

한국교통대학교 항공·기계설계학과^{1,†}

Rapid cooling of injection mold for high-curvature parts using CO₂ cooling module

Se-Ho Lee¹ · Ho-Sang Lee[†]

Dep. of Aeronautical & Mechanical Design Eng., Korea Nat'l Univ. of Transportation^{1,†}

(Received December 06, 2022 / Revised December 27, 2022 / Accepted December 31, 2022)

Abstract: Injection molding is a cyclic process comprising of cooling phase as the largest part of this cycle. Providing efficient cooling in lesser cycle times is of significant importance in the molding industry. Recently, lots of researches have been done for rapid cooling of a hot-spot area using CO₂ in injection molding. The CO₂ flows under high pressure through small, flexible capillary tubes to the point of use, where it expands to create a snow and gas mixture at a temperature of -79°C. The gaseous CO₂ removes heat from the mold and releases it into the atmosphere. In this paper, a CO₂ cooling module was applied to an injection mold in order to cool a large area cavity uniformly and quickly, and the cooling performance of the injection mold was investigated. The product was a high-curvature molded part with a molding area of 300x100mm. Heat cartridges were installed in a stationary mold, and CO₂ cooling module was inserted inside a movable mold. Through structural analysis, it was confirmed that the maximum deformation of mold with CO₂ cooling module was 0.09mm. A CO₂ feed system with a heat exchanger was used for cooling experiments. The CO₂ was injected into the holes on both sides of the supply pipe of the cooling module and discharged through hexagon blocks to cool the mold. It took 5.8 seconds to cool the mold from an average temperature of 140°C to 70°C. Through the experiment using CO₂ cooling module, it was found that a cooling rate of up to 12.98°C/s and an average of 10.18°C/s could be achieved.

Key Words: Cooling Module, Carbon Dioxide, Mold Cooling, Structural Analysis, Cooling Rate

1. 서론

사출성형 공정에서 냉각단계는 전체 사이클 시간의 50~80%를 차지하기 때문에 냉각시간 단축은 생산성과 원가절감에 매우 중요하다^{1,2)}. 또한 냉각공정에서 성형품 위치에 따라 발생하는 온도편차는 최종 성형품에서 휨 변형의 주요인이 되고 있다. 따라서 금형을 빠르고 균일하게 냉각하는 것이 매우 중요하다. 그동안 성형품의 품질을 유지하면서 냉각 시간을 단축시키기 위한 많은 연구가 수행되었다.

금형을 냉각하기 위한 가장 일반적인 방법은 금

형 안에 냉각회로를 가공한 이후에 냉각수 또는 기름을 순환시키는 방식이다. 그러나 금형의 열관성이 크고, 면 냉각이 아닌 선 냉각 방식이기 때문에 금형의 각 부분에서 온도편차가 크게 발생하는 문제점이 있다. 아울러 냉각회로를 드릴로 가공할 경우 직선형 형상으로 제한되기 때문에 곡면이나 두께가 두꺼운 영역에서 냉각효율이 낮은 단점이 있다³⁾.

수년 전부터 적층 제조공법을 사용한 형상 적응형 냉각회로를 적용하는 방법^{4,7)}이 시도되고 있으며, 직선형 냉각회로에 비해 냉각시간을 약 40% 단축시킬 수 있다고 보고되어 있다⁸⁾. 그러나 사용 중 냉각회로의 막힘, 부식, 슬러지 부착 등 다양한 문제가 빈번히 발생하고, 이때 곡선형 냉각회로의 특성상

1. 한국교통대학교 항공·기계설계학과

† 교신저자: 한국교통대학교 항공·기계설계학과

E-mail: lhs@ut.ac.kr

금형 수리가 어렵기 때문에 양산 공정에 적용하는데 한계가 있다.

또한 적층 제조공법을 기반으로 열전달을 극대화시킬 수 있는 방법으로서 삼중 주기적 최소 곡면(Triply periodic minimal surfaces; TPMS)을 적용한 격자구조물을 제작하여 핫 스팟 영역에 적용할 경우 냉각시간을 기존 냉각채널 대비 40%이상 줄일 수 있음이 보고되어 있다⁹⁾.

최근에는 CO₂를 사용하여 사출성형 제품의 핫스팟 영역을 급속 냉각하려는 시도가 이뤄지고 있다. 일반적으로 CO₂는 불활성, 불연성, 무색 가스이며, 72.8bar 이상으로 압축하고 31℃ 이상이 되면 액체와 기체의 물성을 나타내는 초임계상태에 이르게 된다. 압축된 CO₂가 분사되면 압력강하로 인해 급격한 단열팽창이 일어나고, Joule-Thomson 영향^{10,11)}으로 대기압에서 -79℃까지 온도가 떨어진다.

Seidl 등¹²⁾은 구멍이 있는 내부 구조물과 두께가 얇은 표면층으로 구성된 구조물 안에 액상의 CO₂를 주입하여 냉각효과를 분석하였으며, 물을 사용한 경우에 비해 약 3배 정도 빠르게 냉각이 이루어짐을 보고하였다.

Linde North America에서는 몰드 코어에 지름 2mm의 구멍을 가공하고, 구멍 안에 외경 0.8mm의 스테인리스 튜브를 삽입한 이후에 60bar의 압력으로 액상의 CO₂를 주입하여 냉각시간을 50% 단축시킬 수 있음을 발표하였다¹³⁾.

또한 Choi 등은 보스가 있는 성형품 금형에 모세관을 설치하고 CO₂를 주입하여 기존 공정에 비해 약 3배 정도 냉각속도가 빠름을 보고하였다¹⁴⁾.

본 연구진에서는 선행 연구¹⁵⁾를 통해 CO₂ 공급장치와 핫 플레이트를 제작하고, 실험계획법을 적용하여 CO₂ 주입 공정조건이 핫 플레이트의 냉각에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 특히 내경 0.9mm인 모세관 튜브 1개를 통해 CO₂가스를 도출할 때 반지름 5mm 영역의 면적에 대해 7.5℃/s의 냉각속도를 구현할 수 있음을 확인하였다.

또한 넓은 면적의 캐비티를 갖는 사출금형을 균일하고 급속하게 냉각하기 위한 추가적인 연구¹⁶⁾를 통해 CO₂적용 냉각모듈을 설계, 제작하였으며, 냉각실험을 통해 열교환기를 사용하고 CO₂를 양방향에서 공급할 경우 최대 5.78℃/s, 평균 4.9℃/s의 냉각속도를 구현할 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서는 넓은 면적을 갖는 고곡률 성형품

을 빠르고 균일하게 냉각하기 위하여 선행 연구를 통해 개발한 CO₂ 냉각모듈을 사출금형에 적용하였으며 냉각성능을 고찰하였다.

2. 냉각모듈 적용 사출금형 설계

2.1. 적용대상 및 냉각모듈

적용대상은 Fig. 1과 같이 성형면적 300x100mm, R50, 두께 1.5mm인 고곡률 성형품이다. 고정측 금형에는 히트 카트리지를 설치하여 금형을 가열하고, 가동측 금형에는 CO₂냉각 모듈을 적용하여 금형을 냉각할 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 가동측 코어금형 내부에 삽입되는 CO₂ 냉각모듈의 조립도를 나타낸 것이다. 저장탱크 안에 있는 이산화탄소를 압력부스터를 통해 100bar 이상으로 압축한 이후 CO₂컨트롤러에서 설정된 압력으로 이산화탄소를 분배기 안으로 주입한다. 분배기에 연결된 각각의 호스가 공급파이프의 입구에 연결되며, 공급파이프 안으로 주입된 CO₂는 공급파이프와 연결된 육각블록 및 수정블록을 통해 도출되어 넓은 면적의 코어금형을 냉각할 수 있도록 하였다. 분배기, 베이스 블록, 공급 파이프, 육각블록 등 냉각모듈을 구성하는 각 요소에 대한 상세 설계는 참고 문헌¹⁶⁾에 기술되어 있다.

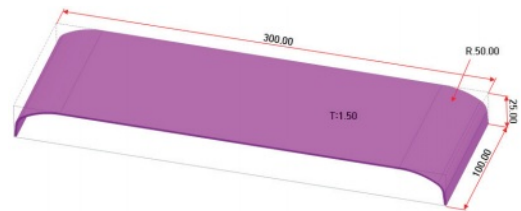


Fig. 1 Part model

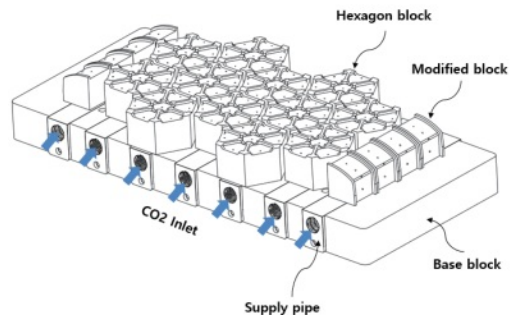


Fig. 2 CO₂ cooling module

2.2. 가동측 금형

Fig. 3은 CO2 냉각모듈을 적용하기 위한 가동측 금형의 분해도를 나타낸 것이다. NAK 80 소재로 가공된 두께 8mm의 하측 코어 내부에 냉각모듈을 삽입하고, 하측 코어를 몰드베이스와 조립하였다. 또한 냉각모듈을 지지하기 위하여 서포트 블록을 설치하였다. Fig. 4는 최종적인 하측금형 조립도를 나타낸 것이며, 선행연구¹⁶⁾ 결과를 반영하여 냉각모듈에 설치된 공급파이프의 양쪽에서 CO2를 동시에 주입할 수 있도록 하였다.

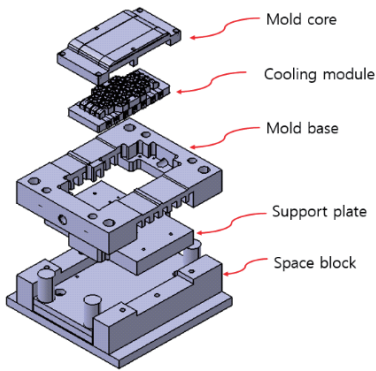


Fig. 3 Exploded view of movable mold with cooling module

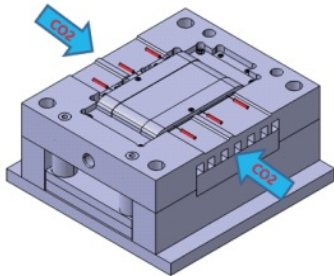


Fig. 4 Assembled view of movable mold

2.3. 구조해석

하측코어의 두께가 두꺼울 경우 CO2에 의한 냉각성능이 떨어지며, 반대로 얇은 경우 사출성형 공정에서 발생하는 수지 압력에 의해 코어가 변형되는 문제가 발생한다. 본 연구에서 적용된 냉각모듈의 경우 두께 8mm의 하코어 바로 아래 육각블록이 조립되며, Fig. 3에서 언급한 바와 같이 서포트 블록과 스페이스 블록에 의해 지지된다. 따라서 사출압력에 의해 하코어 및 냉각모듈에서 발생하는 변형량과 응력을 예측하기 위하여 구조해석을 수행하였

으며, 이때 ANSYS Workbench를 사용하였다.

CO2 토출위치와 냉각되는 금형 면과의 거리가 2mm일 때 냉각효과가 가장 큰 것으로 나타났으며 16), 이를 반영하여 육각블록을 Fig. 5와 같이 모델링 하였다. 육각블록의 상부 표면에 형성된 직경 0.9mm를 갖는 7개의 작은 구멍은 CO2가 토출되는 출구를 나타낸다.

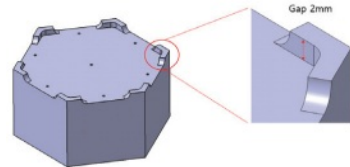


Fig. 5 Hexagon block(initial design)

하코어, 냉각모듈, 몰드베이스, 서포트 블록 등을 해석영역으로 설정하여 Fig. 6과 같이 모델링하였으며, 서포트 블록은 강체로 가정하여 변위경계조건에서 반영하였다.

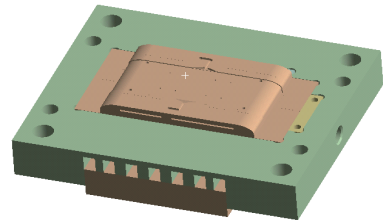


Fig. 6 Structural analysis modeling

사출성형 공정해석을 수행한 결과 사출성형에 사용할 PP 수지의 경우 최대 35MPa의 사출압력이 발생하는 것으로 예측되었다. 따라서 Fig. 7과 같이 하코어의 성형부 전면에 35MPa의 압력경계조건을 설정하였다.

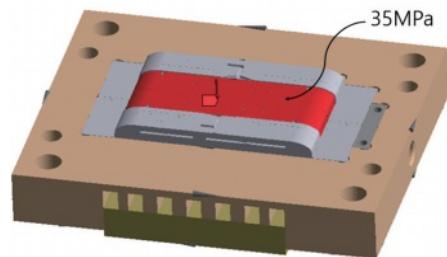


Fig. 7 Pressure boundary condition

또한 Fig. 8과 같이 몰드베이스와 서포트 블록을 지지하는 스페이스 블록의 접촉 영역에서 고정 변위경계조건을 설정하였다. 해석을 위한 물성치로서 육각블록과 공급블록의 경우 SUS 소재의 탄성계수 193GPa, 그리고 다른 부품들은 모두 NAK80 소재의 탄성계수 201GPa를 사용하였다.

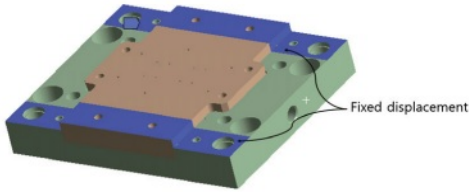


Fig. 8 Displacement boundary condition

Fig. 9는 사출압력에 의한 변형량 분포를 나타낸 것으로 하측코어 중앙부에서 약 0.15mm의 최대 변형이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 10은 등가응력 분포를 나타낸 것으로 좌측 육각블록의 리브 끝단에서 최대응력 1,547MPa의 응력집중이 발생하며, 리브 기단부에서 최대 889MPa의 응력이 발생하고 있다. 두 지점 모두 SUS의 허용 응력인 586MPa를 초과하므로 이를 개선하기 위해 육각블록을 보강하고 추가적인 해석을 수행하였다.

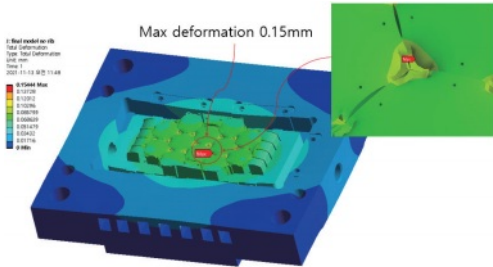


Fig. 9 Total deformation

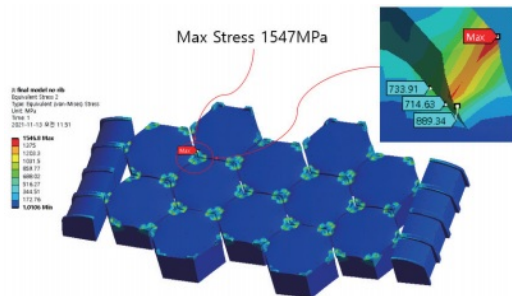


Fig. 10 Equivalent stress

육각블록 중심의 빈 공간을 포함하여 출구 주변을 두께 2mm, 높이 2mm인 리브로 보강하고, Fig. 11과 같이 설계를 수정하였다.

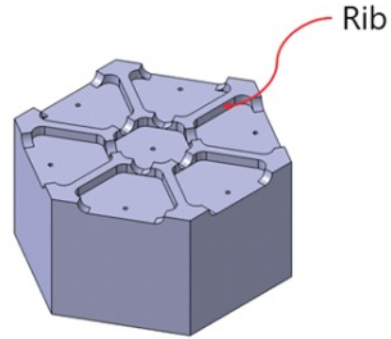


Fig. 11 Hexagon block(modified design)

Fig. 12는 수정된 육각블록을 적용한 경우에 대한 변형량 분포를 나타낸 것이다. 최대 변형량은 0.09mm로 초기 모델에 비해 0.06mm 감소한 것으로 나타났다. Fig. 13은 등가응력 분포를 나타낸 것으로 우측하단의 육각블록 리브에서 최대응력 626MPa이 발생하고 있다. SUS의 항복강도 586MPa를 초과하지만, 게이트로부터 멀리 떨어진 영역이므로 실제 압력은 훨씬 작게 작용하기 때문에 문제되지 않을 것으로 판단하였다.

Fig. 14는 최대 사출압력이 발생하는 영역을 나타낸다. 게이트와 가까운 육각블록에 대해 응력을 확인한 결과 Fig. 15와 같이 응력집중이 발생하는 리브 끝단에 최대응력 570MPa이 발생하고, 리브 기단부에서는 최대 140MPa이 발생하고 있음을 알 수 있다. 결국 두 지점 모두 SUS 허용응력인 586 MPa보다 낮은 응력이 발생하였으며, 해석결과를 반영한 수정모델을 적용하여 육각블록을 제작하였다.

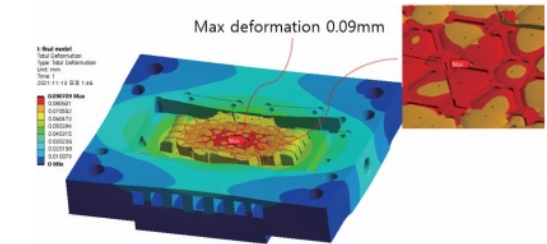


Fig. 12 Total deformation for modified hexagon block

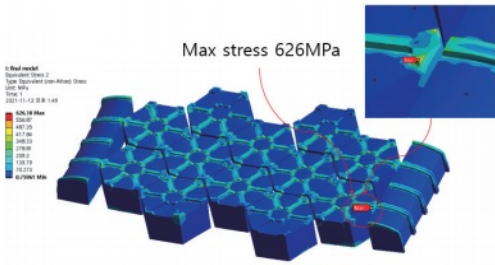


Fig. 13 Equivalent stress for modified hexagon block

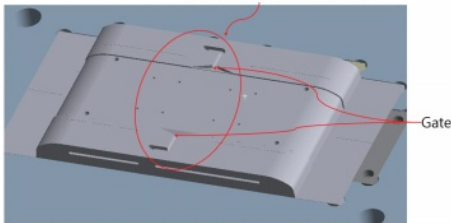


Fig. 14 Gate position and maximum injection pressure area

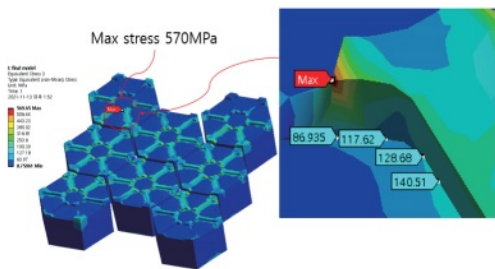


Fig. 15 Equivalent stress at maximum injection pressure area

3. 실험 및 고찰

3.1. 실험장치 및 방법

Fig. 16은 저장탱크, 압력부스터, 열교환기, 컨트롤러 등으로 구성된 CO₂ 공급장치와 냉각모듈을 포함한 가동측 금형 제작사진을 나타낸 것이다. 고압으로 압축된 CO₂ 가스를 열교환기에서 냉각시키고 컨트롤러를 통해 토출압력, 토출시간 등을 제어할 수 있도록 하였다(15). 여기서 열교환기는 5개의 실린더가 직렬로 연결되어 있으며, 각 실린더 안에 길이 6m인 코일 형태의 SUS배관을 설치하였다. 콘덴서를 이용해 -5℃ 이하로 냉각된 부동액이 순환하

면서 배관 내부의 CO₂를 냉각할 수 있도록 하였다(16).

본 연구진에서 20초 동안 진행한 선행 냉각 실험결과에 따르면 열교환기를 사용한 경우가 사용하지 않은 경우에 비해 약 10℃ 정도 냉각효과가 증가하는 것으로 나타났다(16). 또한 CO₂를 양쪽에서 주입한 경우는 한쪽에서 주입한 경우에 비해 약 8℃ 정도 냉각효과가 증가하였으며, 위치별 냉각 균일도는 약 10% 향상되는 것으로 나타났다(16). 따라서 본 실험에서 열교환기를 사용하고, CO₂를 양쪽에서 주입하도록 하였다.

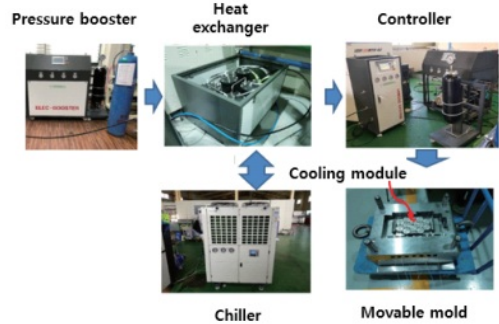


Fig. 16 CO₂ feed system and movable mold with cooling module

CO₂ 를 적용한 금형 냉각효과를 측정하기 위하여 Fig. 17과 같이 우측과 좌측에 각각 #1~#3, #4~#6의 온도센서(K-type)를 설치하였으며, 이때 하측코어 표면으로부터 깊이 1.5mm위치에 설치하였다. 또한 상측 금형에는 8개의 히트 카트리지(1,200W)를 설치하여 금형을 가열하였다.

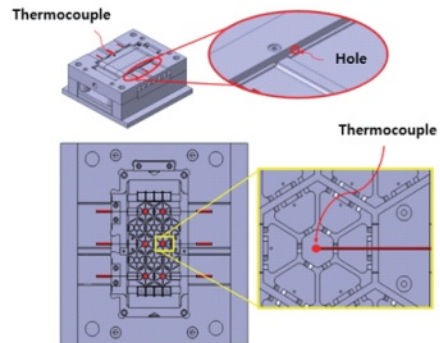


Fig. 17 Position of thermocouples in movable mold

Fig. 18은 히트 카트리지가 설치된 고정측 금형과 냉각모듈이 설치된 가동측 금형의 제작 사진을 나

타낸 것이다. 히트 카트리지에 의해 가열된 상측 금형의 열이 형폐후 열전달에 의해 하측 금형으로 최대 온도 140℃까지 전달되도록 하였으며, 냉각모듈을 통한 CO₂ 토출에 의해 발생하는 급형 냉각효과를 측정할 수 있도록 하였다.

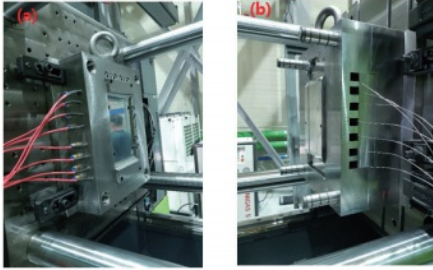
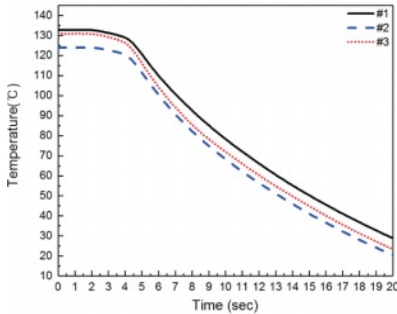


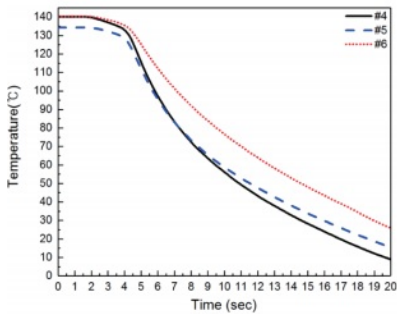
Fig. 18 Photograph of (a) stationary mold and (b) movable mold

3.2. 실험결과 및 고찰

Fig. 19는 금형을 닫은 상태에서 온도센서가 설치된 6개 지점에 대하여 CO₂ 토출에 의해 발생하는 시간에 따른 온도변화를 나타낸 것이다. 컨트롤러 안의 용기에 저장된 CO₂가 육각블록을 통해 토출되어 온도센서가 설치된 부분에서 냉각이 시작되는데 까지 소요되는 지연시간이 약 4초임을 알 수 있으며, 온도센서 #1, #2, #3에 비해 온도센서 #4, #5, #6에서 다소 빠르게 냉각되었다.

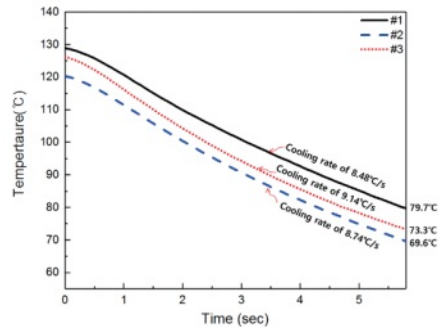


(a) Thermocouple #1, #2, #3

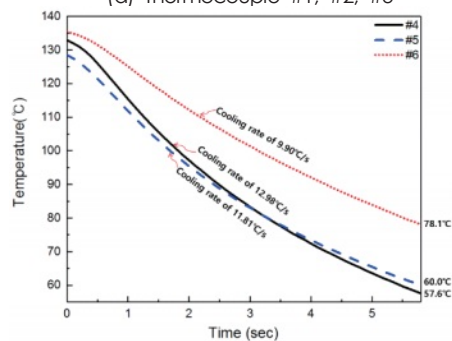


(b) Thermocouple #4, #5, #6
Fig. 19 Temperature trace during 20 sec at each position of thermocouples

사출성형에서 적용하는 수지의 취출온도를 고려하고, 지연시간 4초를 제외할 경우 하코어에 설치된 6개 온도센서의 평균온도를 70℃까지 냉각시키는데 소요되는 시간은 5.8초로 나타났다. 급형표면 형상 중심을 기준으로 6개 포인트에서 측정된 온도를 기준으로 냉각성능을 평가하였으며, 초기온도에서 냉각목표온도 까지의 온도 감소량을 냉각시간으로 나눈 값을 냉각속도로 정의하였다. Fig. 20은 6개의 온도센서 지점에서 냉각이 시작되는데 까지 소요되는 지연시간 4초를 제외한 0초-5.8초 사이의 온도변화와 함께 냉각속도를 나타낸 것이다. 냉각속도는 최소 8.48℃/s, 최대 12.98℃/s, 평균 10.18℃/s로 나타났다. 따라서 CO₂ 냉각모듈을 사출금형에 적용할 경우 10℃/s 이상의 냉각속도 구현이 가능할 것으로 판단된다.



(a) Thermocouple #1, #2, #3



(b) Thermocouple #4, #5, #6

Fig. 20 Temperature trace during 5.8 sec and cooling rate at each position of thermocouples

4. 결론 및 토의

본 논문에서는 CO₂ 냉각모듈을 고곡률 성형품용

사출금형에 적용하였으며 냉각성능을 고찰하였다. 성형면적 300x100mm, R50, 두께 1.5mm인 고곡률 성형품을 적용대상으로 하였으며, 고정측 금형에는 히트 카트리지를 설치하여 금형을 가열하고, 가동측 금형에는 CO₂냉각 모듈을 적용하여 금형을 냉각할 수 있도록 하였다. 두께 8mm의 하측 코어 내부에 냉각모듈을 삽입하고, 하측 코어를 몰드베이스와 조립하였다. 또한 냉각모듈을 지지하기 위하여 서포트 블록을 설치하였다.

육각블록 중심의 빈 공간을 포함하여 출구 주변을 두께 2mm의 리브로 보강하였으며, 구조해석을 통해 최대 변형량 0.09mm, 그리고 허용응력 범위에서의 응력 발생을 확인할 수 있었다.

냉각실험을 위하여 열교환기를 사용하고, 냉각모듈의 양쪽에서 CO₂를 주입하도록 하였다. 이때 CO₂를 적용한 금형 냉각효과를 측정하기 위하여 6개의 온도센서(K-type)를 하측코어 표면으로부터 깊이 1.5mm위치에 설치하였다. 히트 카트리지에 의해 가열된 상측 금형의 열이 형폐후 열전달에 의해 하측 금형으로 최대온도 140℃까지 전달되도록 하였으며, 냉각모듈을 통한 CO₂ 토출에 의해 발생하는 금형 냉각효과를 측정하였다. 하코어에 설치된 6개 온도센서의 평균온도를 140℃에서 70℃까지 냉각시키는데 소요되는 시간은 5.8초로 나타났다. 0초~5.8초 사이의 냉각속도는 최소 8.48℃/s, 최대 12.98℃/s, 평균 10.18℃/s로 나타났다. 결론적으로 CO₂ 냉각모듈을 사출금형에 적용할 경우 10℃/s 이상의 냉각속도 구현이 가능할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 2022년 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음.

참고문헌

- Meckley, J. and Edwards, R., "A study on the design and effectiveness of conformal cooling channels in rapid tooling inserts", The Technology Interface Journal, Vol. 10, No.1, 2009.
- Altaf, K., Raghavan, V. R. and Rani, A. M. A., "Comparative thermal analysis of circular and profiled cooling channels for injection mold tools", Journal of Applied Sciences, Vol.11, pp. 2068-2071, 2011.
- Park, S., and Kwon, T., "Optimal cooling system design for the injection molding process", Polym. Eng. Sci., Vol.38, pp. 1450-1462, 1998.
- Sachs, E., Wylonis, E., Allen, S., Cima, M., and Guo, H., "Production of injection molding tooling with conformal cooling channels using the three dimensional printing process", Polym. Eng. Sci., Vol.40, pp. 1232-1247, 2000.
- Shayfull, Z., Sharif, S., Zain, A. M., Ghazali, M., and Saad, R. M., "Potential of conformal cooling channels in rapid heat cycle molding: A review", Adv. Polym. Tech., Vol.33, Paper No. 21381, 2014.
- Kim, W. S., Hong, M. P., Park, J. S., Lee, Y. S., Cha, K. J., Sung, J. H., Jung, M. H., and Lee, Y. H., "Case studies on applications of conformal cooling channel based on DMT technology", J. Kor. Soc. Manuf. Process Eng., Vol.14, pp. 9-14, 2015.
- Kim, C.-H., Oh, S. A., and Park, K., "Investigation of the functional characteristics of injection molds with conformal cooling channels", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol.44, pp. 681-688, 2020.
- Saifullah, A.B.M and Masood, S. H., "Cycle time reduction in injection molding with conformal cooling channels", Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering, Dhaka, Bangladesh, pp. 29-31, 2007.
- Oh, S.-H., Ha, J.-W., and Park, K., "Adaptive conformal cooling of injection mold using additively manufactured TPMS structures", Polymer, Vol.14, pp. 181-194, 2022.
- Mayatal, B.-Z. and Shavit, A., "On the integral Joule-Thomson effect", Cryogenics, Vol.34, pp. 19-23, 1994.
- Matin, N. S. and Haghghi, B., "Calculation of the Joule-Thomson inversion curves from cubic equation of state", Fluid Phase Equilibrium, Vol.175, pp. 273-284, 2000.
- Seidl, M., Bobek, J., Safka, J., Habr, J., Novakova, I., and Behalek, L., "Utilizing of inner porous structure in injection moulds for application of special cooling method", Journal of Physics: Conference Series 709 012203, pp. 1-5, 2016.
- Linde North America, "Liquid CO₂ spot cooling gets into tight spots in molds", Plastics Technology, pp. 11, 2013.

- 14) Kim, M. J. and Choi, J. H., “Study on the rapid cooling method of an injection mold using the Joule - Thomson effect”, J. of Korean Soc. Manuf. Tech. Eng., Vol. 3, pp. 306-311, 2022.
- 15) Bae, H. S., Park, D. H., and Lee, H. S., “Experimental study on hot-plate cooling with CO₂ gas”, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol.45, pp. 489-495, 2021.
- 16) Bae, H. S., Park, D. H., and Lee, H. S., “Design of cooling module with CO₂ for rapid cooling of injection mold”, J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 39, pp. 477-484, 2022.

저자소개

이 세 호(Se-Ho Lee)

[학생회원]



- 2021년 8월 : 한국교통대학교
항공기계설계학과 (공학사)
- 2021년 9월~현재: 한국교통대학교
항공기계설계학과 석사과정

< 관심분야 >
사출성형 및 금형

이 호 상(Ho-Sang Lee)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교
기계설계학과 (공학박사)
- 1989년 1월~1995년 2월 : LG전자
생산기술원, 책임연구원
- 1995년 3월~1996년 7월 : 고등기술
연구원, 책임연구원
- 1996년 8월~현재: 한국교통대학교
항공기계설계학과, 교수

< 관심분야 >
사출성형 및 금형, CAE해석