

CO₂ 기반 금형 급속 냉각기술의 수치해석적 연구

최재혁^{1,†}

광주대학교 융합기계공학과^{1,†}

Numerical Analysis of CO₂-Based Rapid Mold Cooling Technology

Jae Hyuk Choi^{1,†}

Department of Mechanical Convergence Engineering, Gwangju University^{1,†}

(Received September 14, 2023 / Revised September 22, 2023 / Accepted September 30, 2023)

Abstract: In this study, we developed a simulation methodology for a technology that rapidly cools molds by directly spraying them with CO₂ in its liquefied gaseous state. Initially, a simulation verification process was conducted using ANSYS Fluent's heat transfer analysis based on temperature values measured in prior research experiments, ensuring a comparable temperature could be calculated. Subsequently, the validated analysis method was employed to evaluate design factors that exert the most significant influence on cooling. An evaluation was conducted based on three factors: part thickness, mold thickness, and the melting temperature of material. Using a full factorial design approach, a total of 27 analyses were completed and subsequently calculated through analysis of means. The impact assessment was carried out based on the temperature values at the product's core. The results indicated that the thickness of the mold had the highest influence, while the melting temperature of material had the least.

Key Words: Rapid Cooling, Injection Mold, Heat Transfer Analysis, Joule-Thomson effect

1. 서 론

최근의 사출성형 관련 연구는 사출성형의 장점인 생산성을 더욱 높이기 위한 연구가 중점을 이루고 있다. 기계학습을 이용한 공정 자동화[1-3], 딥러닝을 이용한 품질 관별 자동화^{4,6)}, 복합금형을 이용한 조립 공정의 생략이⁷⁻⁸⁾ 그 사례이다.

전술한 방법론들은 기존의 사출성형에서 고려되지 못했던 방법론들로 연구결과에 따르면 효과적으로 생산성을 개선시킬 수 있는 것으로 확인된다. 특히나 기계학습 및 딥러닝을 기반으로 한 응용기술은 앞으로의 사출성형이 나아가야 할 방향 중에 하나라고 판단된다.

하지만 기본적인 내용 중에 하나인 사출성형의 냉각관련 연구는 많이 사라지고 있는 추세다. 냉각

공정은 일반적으로 전체 공정의 약 50% 이상을 차지하므로 본 공정을 단축시킨다면 효과적으로 생산성을 개선할 수 있다. 한 때 급속 3D프린팅을 이용한 금형 제작이 각광받으면서 냉각회로 구성에 대한 연구가 활발히 수행되었으나^{9,12)} 3D 프린터를 이용한 금형 제작 시 상용성이 나오지 않는 문제로 연구단계를 벗어나지 못했다.

따라서 Kim과 Lee는 획기적으로 냉각공정을 단축시킬 수 있는 액화기체를 이용한 금형의 급속냉각 방법론을 고안하였다¹³⁻¹⁴⁾. 본 방법론의 경우엔 공작기계에는 가공효율을 높일 수 있어 활발히 적용되는 방법론인데¹⁵⁻¹⁷⁾ 전술한 연구 외엔 사출금형에 적용된 사례는 찾기가 어려웠다.

두 연구자들은 각각 다른 종류의 금형에 급속냉각 방법론을 적용하여 그 효과를 실험적으로 검증하였고 물을 사용하는 기존의 냉각 방법대비 효과적으로 냉각시간을 단축시킬 수 있음을 증명하였다. 하지만 실험을 위주로 진행하였기 때문에 실제 금형에 적용 전 효과를 검증하고 설계에 활용할

† 교신저자 : jhchoi@gwangju.ac.kr

* 본 논문에 대한 저작권은 저자들에게 있으며 CC BY-NC-SA를 만족하는 조건으로 이용할 수 있습니다.

수 있는 해석적 방법론에 대한 고찰이 부족했다.

따라서 본 연구에서는 이를 해결하고자 액화기체를 이용한 급속냉각 방법론의 해석적 구현 방법론의 개발을 시도하였다. Kim의 연구결과에서 실제 측정된 온도데이터를 기반으로 연구를 진행하였기에 해석에 사용된 액화기체는 CO₂를 선정하였다.

먼저, 실험에서 측정된 온도데이터를 기반으로 해석을 수행해 실험과 해석의 매칭 작업을 진행하였다. 실험과 동일한 형상으로 해석모델을 생성한 후 실험에 사용된 경계조건들을 활용해 해석을 수행하여 해석의 신뢰도를 평가하였다.

이 때 사용된 해석 프로그램은 ANSYS Workbench 2021이며 그 중에서도 Fluent 모듈을 활용해 열전달 해석을 수행하였다. 본 매칭 작업을 통해 해석의 신뢰도를 확보하고 이를 기반으로 급형 설계작업 시 설계 지침을 마련하기 위한 영향도 평가를 수행했다.

이 때 사용된 설계인자는 제품의 두께, 급형의 두께, 용융온도의 3요소를 선정하였고 3수준으로 변화시킨 후 완전요인설계법(Full Factorial Design)을 통해 총 27회의 해석을 수행하였고 최종적으로 설계인자 중 온도에 가장 영향도가 높은 인자를 선정하였다. 이를 통해 액화기체를 적용한 급형을 설계할 때 해석적으로 충분히 활용할 수 있는 결과를 도출할 수 있었다.

2. 실험값의 해석적 검증

2.1. 실험조건 및 측정결과

Kim의 연구결과를 참고해 측정된 온도데이터를 Fig. 1에 제품의 형상정보 및 센서위치와 함께 나타내었다¹³⁾. 이 때 탁상용 사출기를 이용하여 성형했으며, 사용된 소재는 Lotte Chemical 사의 POP(Polyolefin Plastomer)이고 소재의 용융온도 270℃, 냉각수온도는 20℃ 이다. Fig. 1에 액화기체를 이용한 급속냉각을 수행하지 않고 일반 냉각수만을 이용한 실험 결과와 액화기체를 분사하여 급속 냉각을 30초 동안 수행한 실험 결과를 비교하여 Fig. 1에 나타내었다. 급속냉각을 수행한 실험 결과에서 급속냉각이 수행됨에 따라 온도가 급격하게 감소되는 것을 확인할 수 있다.

2.2. 해석모델 및 경계조건

해석을 수행하기 위한 모델 및 경계조건은 Fig. 2

에 나타내었다. 실제 실험에 사용된 급형과 제품 형상을 동일한 치수를 가지도록 모델링 하였으나 대칭 형상이므로 1/2 형상만 사용하였다. 단, 해석의 단순화를 위해 액체 상태의 CO₂가 분무되면서 기화되는 현상 없이 저온 기체 상태의 CO₂가 직접적으로 분무되는 형태로 정의하였고 이 때의 경계조건은 실험 때 측정된 값을 기준으로 도출하였다. 해석이 시작되는 시점에서 용융 온도를 제품의 초기 온도로 부여하였으며, 냉각이 진행되며 일어나는 온도 변화를 확인하고자 하였다.

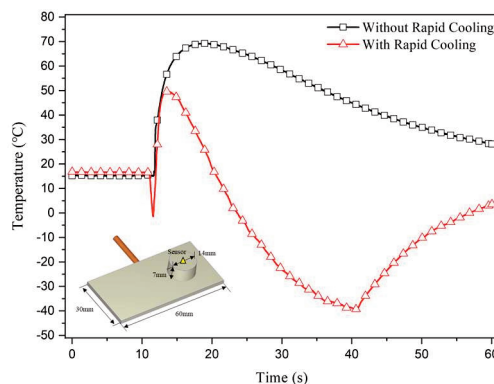


Fig. 1 Results of temperature measurements from previous research

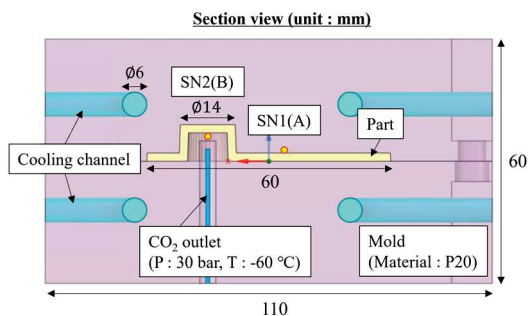


Fig. 2 Analysis model and boundary conditions

2.3. 해석결과

앞절에서 설명한 경계조건과 해석모델을 가지고 열전달 해석을 수행한 후 실험과 동일한 위치에서의 온도를 확인한 결과는 Fig. 3에 나타내었다. 단, 성형이 진행되면서 발생하는 모든 과정을 모사할 필요성이 없기에 급속냉각이 수행된 구간만 해석을 이용 모사를 시도하였다.

Fig. 3을 확인하면 해석값이 실험값 대비 빠른 속도로 냉각이 수행되는 것을 확인할 수 있는데

이는 해석에서는 열접촉 저항을 고려하지 못했기 때문이다. 따라서 상대적으로 빠른 냉각이 수행되었으며 최저점도 실험값보다 조금 더 높게 계산되었다.

그러나 본 현상을 제외하면 해석에서 계산된 온도가 실험값과 매우 유사함을 확인할 수 있어 해석의 신뢰도가 높다고 판단하여 본 해석에 사용된 경계조건을 활용해 영향도 분석을 수행하였다.

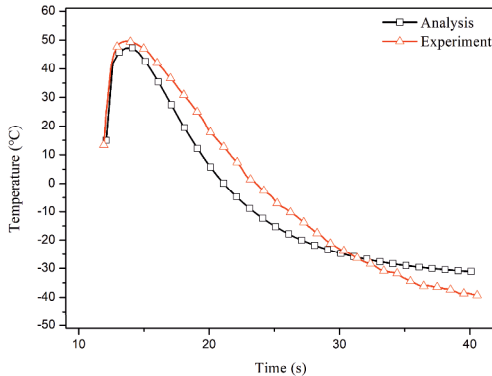


Fig. 3 Results Comparing Analytical and Experimental Data

3. 영향도 분석 해석

3.1. 해석모델

본 해석에서는 설계인자의 영향도 분석을 위해 제품의 형상을 단순화한 후 해석을 진행하였고 Fig. 4에 형상을 나타내었다. 경계조건은 해석의 신뢰도를 확보하기 위해 앞 절의 해석에서 사용된 값과 동일하게 사용하였다. 단, 형상을 축 대칭적으로 만들어서 1/4 형상만 모델링한 후 Symmetry 조건을 부여해 해석시간을 단축시켰다.

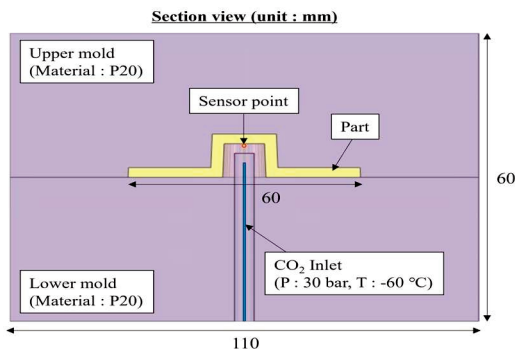


Fig. 4 Rectangular test model for effect analysis

3.2. 설계인자 정의

영향도 평가를 위한 설계인자는 금형의 두께, 제품의 두께, 용융온도 3개를 선정하였다. 다양한 금형 및 제품 설계에의 적용 가능성을 평가하고자 금형과 제품의 두께를, 여러 소재의 용융 온도를 포괄적으로 포함하도록 용융온도를 설계인자로 사용하였다. 이 때 금형의 두께는 CO₂가 분사되는 면과 분사 영역의 제품 표면 사이의 간격을 의미한다. 제품의 두께는 분사 영역뿐 아니라 제품 전체의 두께가 일정하게 변화되도록 하였고 용융 온도는 제품의 초기 온도로 하여 Table 1에서 나타냈듯이 총 3수준으로 변화시켜 영향도 평가를 수행하였다.

Table 1 Design variables for effect analysis

	Part thickness (mm)	Mold thickness (mm)	Melt temperature (°C)
Run1	1	2	240
Run2	2	5	260
Run3	3	8	280

제품의 두께는 일반적인 플라스틱 제품의 두께를 기준으로 정의했으며 금형 두께는 구멍 가공에 사용되는 드릴날의 직경 Ø2를 기준으로 가공 중 변형이 발생되지 않는 최소 깊이를 사용하였다. 마지막으로 온도의 범위는 해석에 사용된 소재인 POP를 기준으로 최소/최대값을 정의하였다.

또한 해석시간이 짧았기에 완전요인배치법(Full Factorial Design)을 사용하여 총 27점의 실험점을 추출하고 해석을 수행하였다. 목적함수의 경우엔 냉각 효과를 분석하기 위해 30초 동안 냉각 후 센서 포인트 위치의 제품 두께 방향 중심에서 온도를 확인하였다. 일반적인 고분자는 열전도율이 낮아 제품 표면온도가 제품 심부 온도를 대변하지 못하기 때문에 중앙면을 평가 기준으로 선정하였다.

3.3. 해석결과

총 30초 동안의 냉각해석을 수행한 후 냉각효과가 가장 좋았던 조건인 제품 두께가 1mm, 금형 두께가 2mm, 용융온도 240°C에서 제품의 온도를 5초 단위로 구분해서 Table 2에 나타내었다. 또한 온도의 변화를 수치적으로 확인하기 위해 제품 두께 방향 중앙면에서 중앙부와 외곽부의 온도도 수치로 같이 표시하였다.

Table 2 Temperature results of effect analysis

Time	Temperature contour plot
5 (s)	
10 (s)	
15 (s)	
20 (s)	
25 (s)	
30 (s)	

중양면의 온도 확인결과 급속냉각이 진행되면서 약 5초이내에 POP의 취출온도에 도달함을 확인할 수 있었다. 냉각 후 10초를 넘어가면 영하의 온도로 낮아지는 것을 확인할 수 있으며 이는 과냉각 현상으로 볼 수 있다.

과냉각현상은 냉각이 많이 수행되어 특정 부위의 온도가 제품의 평균온도보다 지나치게 낮아지는 경우를 의미한다. 제품이 냉각 후 변형이 발생하는 중요 원인이 제품의 온도편차이므로 열이 빠지지 않는 것도 문제지만 현재의 결과처럼 과냉각되는 것도 변형에 악영향을 미친다.

Fig. 6에는 냉각효과가 가장 좋았던 Fig. 5의 경우를 A로, 가장 나쁜 경우를 선정해 B로 정의한 후 단일 그래프 위에 나타내었다. 냉각효과가 나쁜 경

우는 제품의 두께가 3mm, 금형의 두께가 8mm, 용융온도가 280°C인 경우이다. Fig. 6을 참고하면 동일한 급속냉각을 적용하더라도 금형설계 결과에 따라 효과가 큰 차이를 보임을 확인할 수 있다.

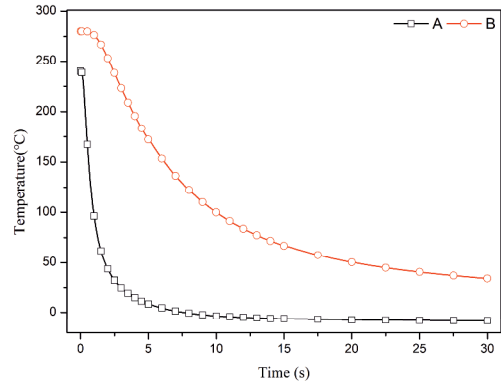


Fig. 6 Comparison of temperature results in the best and worst cases of cooling.

3.4. 영향도 분석 결과

금형의 두께, 제품의 두께, 용융온도 각각이 냉각 효과에 끼치는 영향을 분석하기 위하여 평균 분석(analysis of means, ANOM)을 수행하였다[18]. 평균분석은 설계인자들의 수준별 평균값을 사용하여 상대적인 영향도를 비교한다. 표준편차(σ)가 클수록 수준별 온도 결과의 차이가 큼을 나타내며 영향도가 높은 주요인자라고 볼 수 있다. 실험계획법으로 수행한 27회의 해석을 통해 냉각시간 10초, 20초, 30초의 시점에서의 온도를 확인하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

영향도 분석 결과에 따르면 모든 시간대에서 동일하게 금형의 두께의 영향이 가장 크게 나타났다. 이는 금형 내부에서의 열전달은 기본적인 열전도 과정으로 나타나기 때문으로 판단되며 결국 금형 두께를 가능한 얇게 하는 것이 냉각에 유리하다는 뜻이다.

반대로 용융온도는 영향도가 가장 낮게 나타났다. 고분자 소재의 경우엔 낮은 열전도율을 가지고 있으며 금형과 맞닿는 면에선 빠른 속도로 고화층이 생성되어 더욱 열전달을 억제한다. 따라서 소재의 용융온도는 큰 영향을 미치지 못한다고 판단했다.

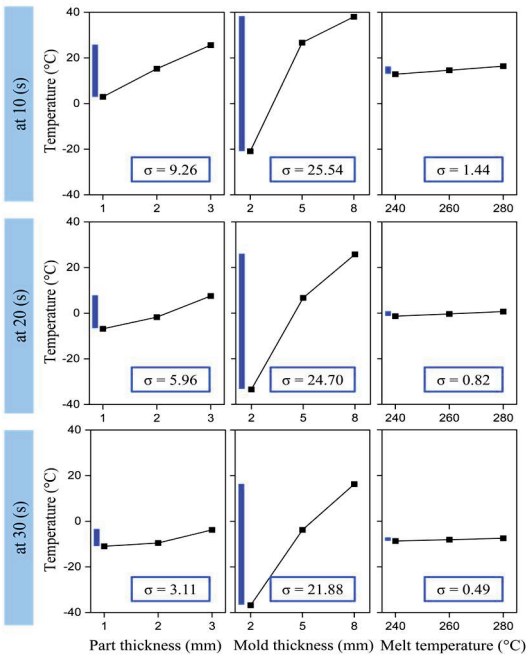


Fig. 6 Results of Analysis of means

세부적인 분석을 위해 제품 두께는 1mm, 금형 두께는 2mm로 동일한 경우에 용융온도만 각각 240℃, 260℃, 280℃인 3개의 해석 결과를 비교해 Fig. 7에 나타내었다. Case 1은 용융온도 240℃, Case 2는 용융온도 260℃, Case 3은 용융온도 280℃일 때의 결과이다. Fig. 7에 의하면 1.3초에 나타난 수지 주입으로 인한 온도 피크점에서만 최대 5.48℃의 차이가 발생했고 냉각이 진행되면서 발생하는 온도차이는 크지 않음을 확인할 수 있다.

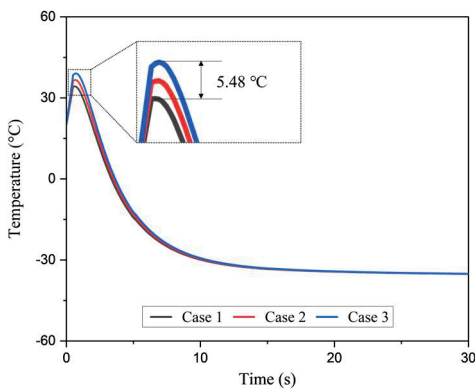


Fig. 7 Temperature Results When Only the Melting Temperature is Varied

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 냉매로 물을 사용하지 않고 액화 기체 상태의 CO₂를 금형에 직접 분사하면서 냉각을 급속도록 수행하는 급속냉각 기술의 해석적 구현 방법론의 개발을 수행하였다. 선행 연구에서는 실험으로 급속냉각의 효과만 검증하였고 해석적 구현방법론을 제안하지 못해 금형설계 시 발생할 수 있는 시행착오를 줄이기 위해 연구를 시작하였다.

먼저, 선행연구의 실험에서 측정된 온도데이터를 해석적으로 동일한 값을 얻을 수 있도록 해석의 신뢰성을 확보하는 작업을 수행하였다. 모든 조건과 형상은 실험과 동일하게 했으나 CO₂가 기체 상태로 분사되는 조건만 달리해 해석 시간 단축을 통한 실용성을 확보했다.

다음으로 정확한 영향도 평가를 수행하기 위해 제품을 단순화하고 액화기체만 분사하는 모델을 만들어 해석을 수행하였다. 제품의 두께, 금형의 두께, 용융온도 3개의 설계인자를 3수준으로 변화시켜서 제품 중심의 온도를 확인하였다.

본 해석은 완전요인배치법을 통해 총 27회의 해석을 수행하였고 평균분석을 통해 영향도 평가 결과를 확인한 결과 금형 두께가 제품 중심의 온도에 가장 큰 영향도를 미치는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 급속냉각을 적용하는 금형을 설계할 때엔 냉각부위의 금형벽면 두께를 가능한 얇게 만들어야지 급속냉각의 효과를 극대화할 수 있음을 확인할 수 있었다.

하지만 본 해석을 통해 과냉각 현상도 관찰되었다. 특히나 제품의 변형 측면에서는 과열로 인한 온도편차나 과냉각으로 인한 온도편차나 동일한 악영향을 미치므로 해석을 통해 과냉각이 되지 않는 적절한 냉각시간의 결정이 중요함을 확인하였다.

향 후 연구에서는 냉각시간의 결정을 위해 급속냉각 제어시점의 최적화를 수행할 예정이다. 특히나 작업자의 개입없이 센서신호 기반으로 동작하는 제어시점 최적화 방법론을 개발해 과냉각 현상도 방지하고 생산성도 높이고자 한다.

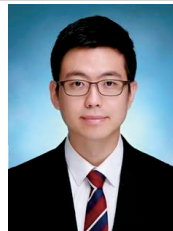
참고문헌

- 1) Jung, H., Jeon, J., Choi, D. and Park, J.Y., "Application of machine learning techniques in injection molding

- quality prediction: Implications on sustainable manufacturing industry”, Sustainability, Vol. 13, No. 8, pp. 4120-4135, 2021.
- 2) Tercan, H., Guajardo, A., Heinisch, J., Thiele, T., Hopmann, C. and Meisen, T., “Transfer-learning: Bridging the gap between real and simulation data for machine learning in injection molding”, Procedia Cirp, 72, pp. 185-190, 2018.
 - 3) Gim, J. and Rhee, B., “Novel analysis methodology of cavity pressure profiles in injection-molding processes using interpretation of machine learning model”, Polymers, Vol. 13, No. 19, pp. 3297-3314, 2021.
 - 4) Kim, G., Choi, J. G., Ku, M., Cho, H. and Lim, S., “A multimodal deep learning-based fault detection model for a plastic injection molding process”, IEEE Access, Vol. 9, pp. 132455-132467, 2021.
 - 5) Im, D., Lee, S., Lee, H., Yoon, B., So, F. and Jeong, J., “A data-centric approach to design and analysis of a surface-inspection system based on deep learning in the plastic injection molding industry”, Processes, Vol. 9, No. 11, pp. 1895-1916, 2021.
 - 6) Chang, H., Su, Z., Lu, S. and Zhang, G., “Application of deep learning network in bumper warpage quality improvement”, Processes, Vol. 10, No. 5, pp. 1006-1025, 2022.
 - 7) Li, X. and Gupta, S. K., “Manufacturability analysis of multi-material objects molded by rotary platen multi-shot molding process”, In ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vol. 37122, pp. 353-365, 2003.
 - 8) Teich, S., Haberstroh, E. and Giese, U., “Experimental and simulative investigation of a multistage 2K injection molding process of PA6 and EPDM”, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 139, No. 3, pp. 51520-51539, 2022.
 - 9) Park, H. S. and Pham, N. H., “Design of conformal cooling channels for an automotive part”, International Journal of Automotive Technology, Vol. 10, pp. 87-93, 2009.
 - 10) Xu, X., Sachs, E. and Allen, S., “The design of conformal cooling channels in injection molding tooling”, Polymer Engineering & Science, Vol. 41, No. 7, pp. 1265-1279, 2001.
 - 11) Venkatesh, G., Kumar, Y. R. and Raghavendra, G., “Comparison of straight line to conformal cooling channel in injection molding”, Materials Today: Proceedings, Vol. 4, No. 2, pp. 1167-1173, 2017.
 - 12) Kanbur, B. B., Suping, S. and Duan, F., “Design and optimization of conformal cooling channels for injection molding: a review”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 106, pp. 3253-3271, 2020.
 - 13) Kim, M. J. and Choi J. H., “Study on the rapid cooling method of an injection mold using the joule-thomson effect”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 31, No. 5, pp. 306-311, 2022.
 - 14) Lee S. H. and Lee H. S., “Rapid cooling of injection mold for high-curvature parts using CO₂ cooling module”, Design & Manufacturing, Vol. 16, No. 4, pp. 67-74, 2022.
 - 15) Sanchez, J. A., Pombo, I., Alberdi, R., Izquierdo, B., Ortega, N., Plaza, S. and Martinez-Toledano, J., “Machining evaluation of a hybrid MQL-CO₂ grinding technology”, Journal of Cleaner Production, Vol. 18, No. 18, pp. 1840-1849, 2010.
 - 16) Abele, E. and Schramm, B., “Using PCD for machining CGI with a CO₂ coolant system”, Production Engineering, Vol. 2, No. 2, pp. 165-169, 2008.
 - 17) Jamil, M., Khan, A. M., Hegab, H., Gong, L., Mia, M., Gupta, M. K. and He, N., “Effects of hybrid Al 2 O 3-CNT nanofluids and cryogenic cooling on machining of Ti-6Al-4V”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 102, pp. 3895-3909, 2019.
 - 18) Yu, J. C., Chen, X. X., Hung, T. R. and Thibault, F., “Optimization of extrusion blow molding processes using soft computing and Taguchi’s method”, Journal of intelligent Manufacturing, Vol. 15, pp. 625-634, 2004.

저자 소개

최재혁 (Jae Hyuk Choi)



- 2015년 2월 아주대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2014년 12월~2018년 7월 LG전자 금형기술훈련 선임연구원
- 2018년 9월~현재 광주대학교 융합기계공학과 조교수

< 관심분야 >

사출성형 자동화, 열경화성 복합소재 성형, 금형 생산성 향상