

위상최적화 기법을 이용한 사출 금형 최적 설계

김미진*, 최재혁**, 백경윤**,#

*광주대학교 미래융합기술공학과 **광주대학교 융합기계공학과

A Study on Injection Mold Design Using Topology Optimization

Mi-Jin Kim*, Jae-Hyuk Choi**, Gyeong-Yun Baek**,#

*Department of Future Technology Convergence Engineering, Graduate school of Gwangju Univ.

**Department of Mechanical Convergence Engineering, Gwangju Univ

(Received 06 January 2022; received in revised form 07 February 2022; accepted 03 March 2022)

ABSTRACT

Topology optimization is applied for the optimal design of various products to ensure weight reduction and productivity improvement. Reducing the weight of the mold while maintaining its rigidity can ensure shortening of the production cycle, stabilization of the mold temperature, and reduction of mold material costs. In this study, a topology optimization technique was applied to the optimal design of the injection mold, and a topology-optimized model of the mold was obtained. First, the injection mold for the square specimens was modeled. Subsequently, a structural analysis was performed by implementing a load condition generated during the injection molding process. Topology optimization was performed based on the structural analysis results, and the models of the initial and topology-optimized designs were manufactured at 1/4 magnification using a 3D printer. Consequently, compared with the existing model, the weight of the topology-optimized model decreased by 9.8%, and the manufacturing time decreased by 7.61%.

Keywords : Topology Optimization(위상최적화), Injection Mold(사출 금형), Weight Reduction(경량화), 3D Printing(3D 프린팅), FEA(유한요소해석)

1. 서 론

사출성형 공정은 플라스틱 제품을 제조하는 가장 일반적인 방법이며, 전 세계적으로 가장 널리 사용되는 제조 공정 중 하나이다. 사출성형 공정은 고분자 수지를 용융시켜 금형에 주입한 후 고화시켜 복잡한 형상을 제조할 수 있으며, 설계 유연성과 치수 정밀도가 높은 제품 생산이 용이하

다. 또한, 다양한 형태와 여러 성질을 가진 모습으로 변형이 가능하여 기계 부품을 비롯하여 전자제품, 가전제품 등 다양한 제품에 적용되고 있다. 이러한 사출성형 공정은 형체와 충전, 보압, 냉각, 취출의 단계로 진행되는데, 이 중 냉각 단계가 주로 전체 사이클 타임의 50% 이상을 차지한다.

즉, 냉각시간을 감소시키는 것이 생산성 향상과 직결된다. 따라서, 냉각시간을 단축시키기 위한 연구들이 많이 수행되고 있다. Park 등^[1]은 3D 프린팅을 이용한 나선형 냉각관 설계를 통해 자동차 부품 제작 금형의 냉각 시간을 단축시켰다. Khan

Corresponding Author : gybaek@gwangju.ac.kr

Tel: +82-062-670-2860, Fax: +82-062-670-2279

등^[2]은 컨포멀 냉각관 설계에 대해 해석적으로 접근하여 다양한 냉각관 형태에 대해 비교해 냉각 시간을 최소화 시키는 냉각관 최적 설계를 연구하였다. Ahn 등^[3]은 열전도도를 고려한 이중 재료 금형 설계에 대해 연구하여 마우스 제작 사출 금형의 냉각 성능을 향상시켰다. Yao 등^[4]은 사이클 감소시키고자 급속 가열층과 산화 단열층을 이용한 사출 성형용 급속 냉난방 시스템에 대해 연구하였다. Xu 등^[5]은 컨포멀 냉각관 설계에 대하여 체계적인 방법을 제시하여 복잡한 형태의 금형에서의 냉각 시간을 단축시켰다.

종래에는, 사출품의 생산성을 높이기 위하여 금형의 소재 변화와 제품의 두께를 고려한 최적 설계에 대한 연구, 냉각관의 최적 배치에 대한 연구들이 주로 수행되었다. 하지만, 사출 금형의 체적 변화를 통한 연구는 보고된 바가 없다. 금형의 체적이 감소할 경우, 금형 온도 안정화까지의 사이클 감소, 냉각 시간 단축, 금형 재료비 절감 등의 효과를 얻을 수 있다. 하지만, 내압에 따른 강성이 고려되지 않는다면, 금형 결함과 제품의 결함을 야기시킬 수 있다. 따라서, 금형의 내하중을 고려한 금형형상의 최적설계가 필요하다. 금형 형상의 최적 설계를 위하여 위상최적화 기법을 사출금형 설계에 적용하고자 한다. 위상최적화 기법은 제품의 성능 목표를 만족시키면서, 주어진 하중 및 경계 조건에 대해 주어진 설계 공간 내에서의 재료 분배를 최적화하는 효과적인 접근 방식으로 성형품부터 철도, 선박 구조물까지 다양한 제품의 경량화에 적용되고 있다. Jang 등^[6]은 위상최적화 기법을 이용하여 차체 구조물 부위별 복합재료 선정을 통한 경량화를 수행하였다. Im 등^[7]은 위상최적화 해석기법을 이용한 링크 구조물의 경량화를 통해 수륙양용보트의 주행안정성을 확보하였다. Han 등^[8]은 철도 차량 설계에 위상 및 치수 최적 설계 기법을 적용하여 차체의 중량을 감소시켰다. Ko 등^[9]은 위상최적화를 통해 전기자동차 탑재형 전력변환장치의 경량화 설계를 수행하였다. Cha 등^[10]은 진공 그리퍼의 설계에 위상최적화를 적용하였고 제품의 구조해석 결과와 연관지어 위상최적 설계안을 분석하였다. Kim 등^[11]은 연비 향상의 목적으로 벌크 트레일러의 경량 설계를 위하여

위상최적화를 수행하였다. Kim^[12]은 밸브 디스크 부품의 위상최적 설계를 수행하였고 해석을 통해 경량화된 설계안의 강성을 검증하였다. Cha 등^[13]은 밀도법을 통해 도출된 위상최적 모델을 3D 프린터로 제작하였고 실험을 통한 최적 모델의 검증을 수행하였다. 이와 같이, 사출금형 설계에서 사출을 위한 내구성을 만족하면서 부피를 감소시킬 수 있는 최적화를 하게 되면, 생산공정에서 가열과 냉각시간이 단축된다. 향후, 3D 프린팅과 같은 공정을 이용하여 금형을 제작하게 된다면, 금형 제조과정에서 부피가 줄어들기 때문에 원재료 절감과 생산시간 또한 단축되어 그 효과는 더욱더 높아질 것으로 예상된다.

본 연구에서는 사출금형 설계에서 사출성형 공정을 위한 강성을 만족하면서 금형 형상을 최적화할 수 있는 위상최적화 기법을 이용한 사출 금형 설계를 수행하였다. 먼저 제품 형상에 따른 구조 해석을 수행하였으며, 그 결과에 기반하여 강성을 만족할 수 있는 위상최적화된 모델을 도출하였다. 그리고, 금형을 3D 프린팅으로 각각 출력하여 생산 속도와 부피 변화, 중량 감소를 비교하였고 실제 생산 가능성을 평가 하였다.

2. 유한요소법

2.1 재료 및 방법

본 연구에서는 해석 프로그램인 Moldex3D 2021을 사용하여 사출성형 해석을, ANSYS 2021 R1을 사용하여 구조 해석 및 위상최적 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 금형의 소재는 AISI P20 소재를 사용하였으며, 제품 소재는 열가소성 수지인 폴리프로필렌(Polypropylen, PP)을 사용하였다. AISI P20 소재는 저탄소 금형강으로 크롬과 몰리브덴 합금강이며, 경도 34~39HRC를 나타낸다. 경도와 기계가공성, 치수안정성에서 강점을 나타냄에 따라, 플라스틱 블로우 금형, 플라스틱 사출 금형에 주로 쓰이고 있다. 제품의 소재로 사용된 폴리프로필렌은 160℃의 용융온도로 성형이 쉽기 때문에 성형가공 특성이 우수하고 치수 안정성이 뛰어나다. 따라서 각종 플라스틱 성형품 제조와 파이프, 섬유 등 다양한 용도로 사용되고 있다. 본

연구에서 사용된 소재의 화학조성과 물성은 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다.

2.2 유한요소 모델

구조해석을 위한 사출금형을 ANSYS Space Claim을 사용하여 Fig. 1과 같이 각각 모델링 하였다. 사출금형의 형상은 일반적인 직육면체로

Table 1 Chemical composition of AISI P20 and Polypropylens(wt%)

Element	C	Mn	Si	Cr	Mo	Cu	O
AISI P20	0.3	0.6	0.2	1.4	0.3	0.25	
Polypropylens	95.24						4.72

Table 2 Material properties for FEA

	AISI P20	Polypropylens
Density [kg/m ³]	7,200	939.2
Thermal conductivity [W/m°C]	52	0.269
Specific heat [J/kg°C]	447	1,845
Young's modulus [GPa]	207	
Poisson's ratio	0.3	
Tensile yield strength [GPa]	0.85	
Compressive yield strength [GPa]	0.862	
Melting temperature [°C]		160
Enthalpy [J/m ³]		1E-10 (at 0[°C]) 1.8216E+07 (at 120[°C]) 10.56E+07 (at 160[°C]) 12.93E+07 (at 300[°C])

상형(400mm x 400mm x 200mm)과 하형(400mm x 400mm x 200mm)으로 하였으며, 하형부 중앙에 직경 10mm의 반원 형상으로 수지 주입구를 모델링 하였다. 사출 시제품의 형상은 150mm x 200mm x 20mm의 사각 시편으로 모델링하였으며, 제품 크기에 맞춰 냉각관을 3개씩 상형과 하형에 각각 모델링 하였다. Mesh는 Hex와 Tetra Mesh로 하였으며, Mesh Element size는 10mm로 지정하였고, Cooling Channel에 5mm, Part에 2mm로 Local size를 부여하였다. 그 결과 총 748,700개의 요소와 1,285,331개의 절점이 생성되었다.

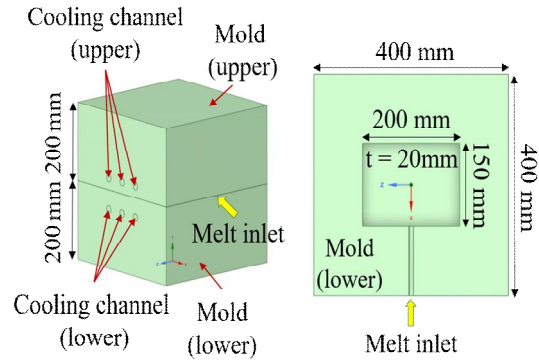


Fig. 1 Finite element modeling for structural analysis

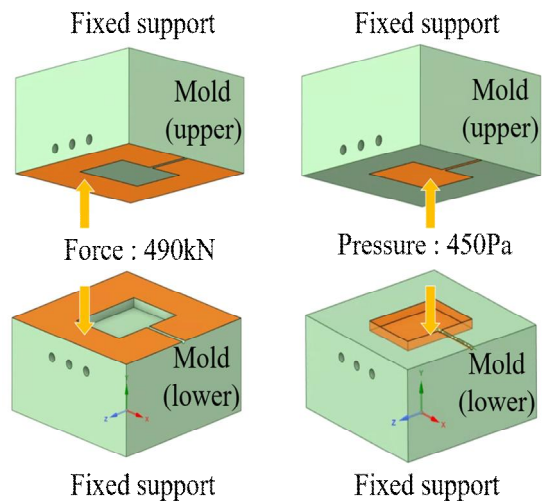


Fig. 2 Load conditions for structural analysis

3. 유한요소해석

3.1 구조해석

사출성형 공정에서 금형에 부여되는 하중과 응력변화를 관찰하기 위하여 사출 유동해석과 구조 해석을 수행하였다. Fig. 3과 같이 ANSYS Static Structural 해석을 통해 사출 성형 시 금형에 가해지는 하중 조건을 구현하여 변형과 응력의 정도를 확인하였다. 해석에서 실제 사출기의 형체력(50ton)과 동일하게 상형과 하형이 서로 접촉하는 파팅면에 압축 방향으로 50ton, 즉 490kN의 하중 조건을 부여하였다. 또한 충전된 수지로 인해 금형 내부에 가해지는 사출 압력값은 사출성형 해석 프로그램인 Moldex3D를 사용하여 제품의 충전 해석을 수행한 결과, 충전 완료 시점에서 제품의 평균 압력 450Pa을 도출하였다. 따라서, 본 해석에서 금형이 제품과접하는 면에 압축방향으로 450Pa의 하중 조건을 부여하였다.

구조해석의 결과로 Total Deformation, Equivalent Stress, Equivalent Elastic Strain 결과를 확인하였고 최대값, 최소값, 평균값을 Table 3에 나타내었다. Total Deformation은 변형량을 나타내는 값이고, Equivalent Elastic Strain은 등가변형률 값으로 물체의 변형률을 나타내며 Equivalent Stress와 관련이 있는 값이다. Equivalent Stress는 Von Mises Stress라고도 불리는 등가응력 값으로, 물체의 파괴를 예측하기 위해 쓰인다. 이 중 주요 관찰값인 Equivalent Stress의 최대값은 상형과 하형이 맞는 파팅면의 국소부위에서 발생하였으며, Mold의

Table 3 Maximum, minimum and average value of analysis result

	Max. value	Min. value	Avg. value
Total deformation [mm]	5.90E-2	0	4.92E-4
Equivalent stress [Pa]	7.70E+5	26.33	6,769.1
Equivalent elastic strain	1.42E-5	9.85E-8	5.07E-10

소재로 사용한 P20의 파괴강도(=850MPa)의 0.1퍼센트 이하의 값으로 나타났다. 주로 파팅면과 그 부근에서 비교적 높은 응력값이 분포되어 있었고 그 외의 영역에선 최소값에 가까운 값이 나타났다. 이로써 모델링된 Mold가 사출 공정 과정에서 발생하는 하중에 대하여 안정적인 것을 확인하였다. 기존의 금형 설계가 충분한 구조적 안정성을 가지고 있다고 판단하였고 최적 설계의 가능성을 확인하였다.

3.2 위상최적화

금형의 최적설계를 위하여 ANSYS Topology Optimization 모듈을 이용하여 구조해석 결과에 기반한 위상최적화를 수행하였다. 우선 구조물에 필수적으로 존재해야 하는 부분들이 위상최적화 과정에서 제거되는 것을 방지하기 위하여 설계 영역과 비설계 영역을 구분하였다. 설계 영역은 위상최적화가 진행될 부분을, 비설계 영역은 위상최적화를 진행하지 않고 기존 형태대로 남겨둘 영역을 의미한다. 금형의 구조와 금형이 기능하는 과정을 고려하여 금형과 냉각관의 접촉면, 상형과 하형의 접촉면, 금형과 Part의 접촉면, 금형이 사출기와 체결될 상형의 윗면과 하형의 아랫면을 비설계 영역으로 지정하였다. 비설계 영역인 면들을 제외한 부분을 설계 영역으로 지정하였다.

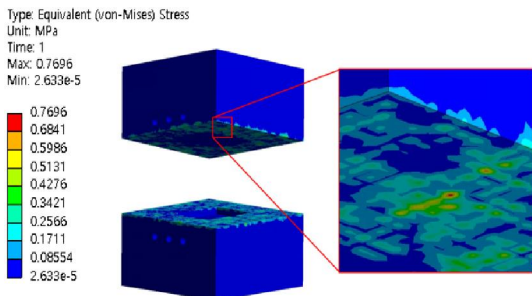


Fig. 3 Contour plots of the computed equivalent stress after FEA

$$\text{Minimize } f_i = \text{Compliance} \quad (1)$$

$$\text{Subject to mass fraction} < n \quad (2)$$

위상최적화 문제를 정의한 식 (1)엔 강성을 최

대화하는 조건을, 식 (2)엔 질량 감소 구속조건을 나타내었다. 컴플라이언스는 하중벡터, 변위벡터, 강성행렬에 관련한 값이며 컴플라이언스 최소화는 모델의 강성 최대화, 변위 최소화를 뜻한다. 식 (2)에서 n 값에 변화를 주어 총 4개 Case에 대한 위상최적화 해석을 수행하였다. 위상최적 기법인 SIMP(Solid Isotropic Material with Penalization)방법에 따라 상대밀도가 0.0~0.4인 영역은 제거되고, 상대밀도가 0.4~1.0인 영역은 유지되도록 위상최적화 해석을 수행하였고 결과적으로 Table 4에 나타낸 바와 같이 초기 모델 대비 질량을 감소시킨 4가지 Case의 위상최적 모델을 얻었다.

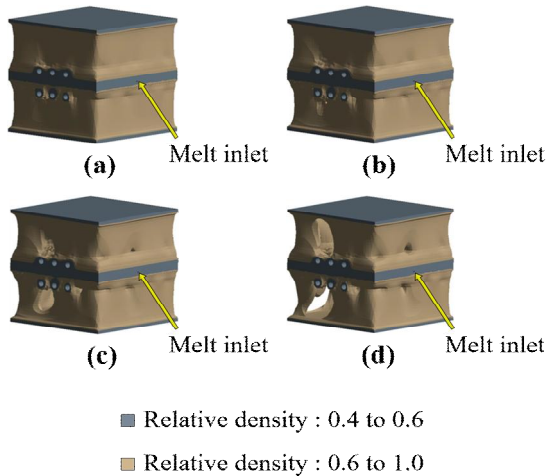


Fig. 4 Result of topology optimization; (a) 5.04% reduction in mass, (b) 10.08% reduction in mass, (c) 16.67% reduction in mass and (d) 24.51% reduction in mass

Table 4 Result of topology optimization

	Mass [kg]	Rate of mass reduction [%]
Initial design	451.05	0
(a)	428.31	5.04
(b)	405.85	10.08
(c)	375.86	16.67
(d)	340.50	24.51

각 Case별 위상최적화 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 비설계 영역으로 지정한 영역과 구조해석에서 응력이 집중됨을 확인한 파팅면 부근에서 상대 밀도가 0.6~1.0으로 높은 값을 가짐을 확인할 수 있었다.

4. 사출금형 모형 제작

본 연구에서 진행된 사출금형 형상과 위상최적화된 금형 형상의 모형을 FDM방식의 3D 프린터(3DWOX DP200, Sindoh)를 이용하여 제작하였으며, 각각의 모델의 생산제조 시간 및 중량을 비교하였다. 위상최적화된 모델은 451.05kg에서 405.58kg으로 질량이 45.47kg, 즉 10% 감소된 위상최적 모델로 선정하였다. 우선 기존 모델과 위상최적 모델의 형상 파일을 G-code 파일로 변환한 후 3D 프린터와 PLA소재의 필라멘트(3DWOX filament 1.75mm PLA, Sindoh)를 사용하여 제작하였다.

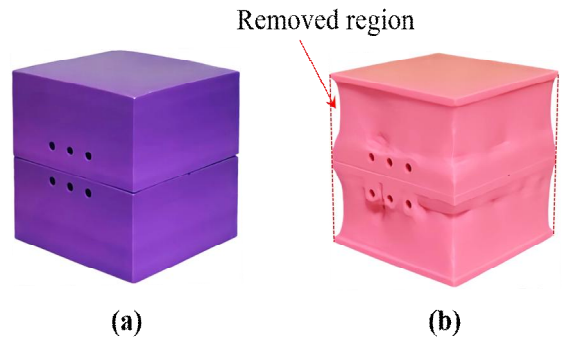


Fig. 5 Printed products; (a) Initial design and (b) optimal design

Table 5 Detail of printed products

	Initial design	Optimal design	Reduction
Production time [min]	5,845	5,400	445 (7.61%)
Weight [g]	1,239.9	1,118.4	121.5 (9.80%)

제작 시간과 제작된 모형의 중량을 비교한 결과, 기존 모델의 경우 제작 시간은 5,845min, 중량은 1,239.9g으로 나타났으며, 위상최적 모델의 경우 제작시간은 5,400min, 중량 1,118.4g이 나타났다. 이로써, 위상최적화를 통해 금형 모형 제작 시간을 445min(7.61%) 단축시켰고 중량은 121.5g(9.80%) 감소시킬 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 사출성형 공정의 최적화를 위하여, 통상적인 사출 금형의 기존 형태에서 더 나아가 최적화된 설계안을 얻고자 금형 설계에 위상최적 기법을 적용하였다. 냉각 속도 감소 및 재료 절감을 위해 부피를 감소시킴과 동시에 기존의 강성은 유지하도록 사출 금형의 위상최적 설계를 수행하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 구조해석 결과, 상형과 하형이 접촉하는 파팅면 부근에서 응력이 집중되었고, 그 외 부분은 안정적으로 나타났다. 사출 성형 공정 중 금형에 발생하는 불균일한 응력 분포로부터 금형의 위상최적 설계 가능성을 확인하였다.
2. 구조해석 결과에 기반하여 응력이 집중되는 파팅면 부근 등 강성이 필요한 부분과 비설계 영역은 유지하고, 비교적 강성이 필요하지 않은 부분은 제거하도록 위상최적화를 수행하였다. 위상최적화 결과, 중량을 약 5~25%까지 감소시킬 수 있는 최적화 모델을 도출하였다.
3. 위상최적화된 모델의 검증을 위하여 기존 모델과 위상최적 모델(중량 10% 감소)을 3D 프린팅으로 제작하였다. 결과적으로 기존 모델 대비 위상최적 모델에서 생산 시간을 7.61%, 투입되는 재료의 중량을 9.80% 감소시킬 수 있었다.

본 연구에서 위상최적화 기법을 사출금형 설계에 적용하여 기존 강성을 유지하면서 경량화할 수 있도록 최적화된 금형설계를 제안하고, 3D 프린팅을 이용하여 금형을 제작하였다. 금형의 최적화 설계로 인한 경량화로부터 원가 절감, 냉각 시간 단축 등의 효과를 얻을 수 있다. 하지만, 최적화 이론 등이 실제 산업에 적용되기 위해서는 실제 금형을 제작하여 실험을 통한 냉각 시간 단축 및 금형 운

도 안정화 시간 단축의 효과 검증이 필요하다. 뿐만 아니라, 반복되는 하중에 의한 피로 특성에 대해서도 깊이 있는 연구가 필요하다. 따라서, 향후에는 실제 금형을 제작하여 내구성과 피로파괴 등에 대한 연구를 수행할 계획이다.

후 기

본 논문은 2022년도 광주대학교 교내연구지원사업 및 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.(No. 2019R1G1A1008125).

REFERENCES

1. Park, H. S., Dang, X. P., and Song, X. P., "Improving the Cooling Efficiency for the Molding of a Complex Automotive Plastic Part by 3D Printing Technology", Transactions of KSAE, Vol. 25, No. 4, pp. 508-515, 2017.
2. Khan, M., Afaq, S. K., Khan, N. U., and Ahmad, S., "Cycle Time Reduction in Injection Molding Process by Selection of Robust Cooling Channel Design", International Scholarly Research Notices, Vol. 2014, pp. 8, 2014.
3. Ahn, D. G., Kim, H. W., and Lee, K. Y., "Design of the Thermally Conductive Mould to Improve Cooling Characteristics of Injection Mould for a Mouse", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 33, No. 3, pp. 201-209, 2009.
4. Yao, D., and Kim, B., "Development of Rapid Heating and Cooling Systems for Injection Molding Applications", Polymer Engineering and Science, Vol. 42, No. 12, pp. 2471-2481, 2002.
5. Xu, X., Sachs, E., and Allen, S., "The Design of Conformal Cooling Channels in Injection Molding Tooling", Polymer Engineering and Science, Vol. 41, No. 7, pp. 1265-1279, 2001.
6. Jang, H. J., Shin, K. B., and Han, S. H., "A Study on the Lightweight Design of Hybrid

- Modular Carbody Structures Made of Sandwich Composites and Aluminum Extrusions Using Optimum Analysis Method”, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 36, No. 11, pp. 1335-1343, 2012.
7. Im, J. M., Kim, J. Y., Shin, K. B., and Kim, D. Y. “Lightweight Design of Link Structures for Amphibious Boat using Topology Optimization Method”, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 35, No. 11, pp. 1085-1092, 2018.
8. Han, S. W., and Jung, H. S., “Weight Reducing of Aluminum Extrusion Profiles of a Railway-Car Body Based on Topology and Size Optimization”, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 35, No. 2, pp. 213-221, 2011.
9. Ko, D. S., Lee, H. K., and Hur, D. J., “Using Topology Optimization, Light Weight Design of Vehicle Mounted Voltage Converter for Impact Loading”, Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 31, No. 6, pp. 353-358, 2018.
10. Cha, E. D., Kim, T. Y., Ha, T. H., and Park, G., “Lightweight Design of a Vacuum Gripper for Inspection Equipment Using Topology Optimization”, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 38, No. 9, pp. 683-690, 2021.
11. Kim, J. S., Roh, H. S., Min, Y. J., Hur, S. H., Shin, S. J., and Jang, I. G., “Lightweight Design of a Bulk Trailer Using Topology Optimization” Transactions of Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 25, No. 5, pp. 548-554, 2017.
12. Kim, T. H., “Shape Design based on Topology Optimization for Manufacturing of Lightweight Valve Disc by 3-D Printing”, Journal of Energy Engineering, Vol. 27, No. 4, pp. 13-19, 2018.
13. Cha, S. H., Lee, S. W., and Cho, S. H., “Experimental Validation of Topology Design Optimization”, Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea, Vol. 26, No. 4, pp. 241-246, 2013.