

2019 대학생 자작자동차대회

Altair Design Award 보고서



학교명	국민대학교	팀명	KUST
차량번호	206	팀장	정재우
차량	이름	RAON	
	제원	길이 2927.86 mm × 폭 1452.64 mm × 높이 1177.53 mm (무게 220kg)	

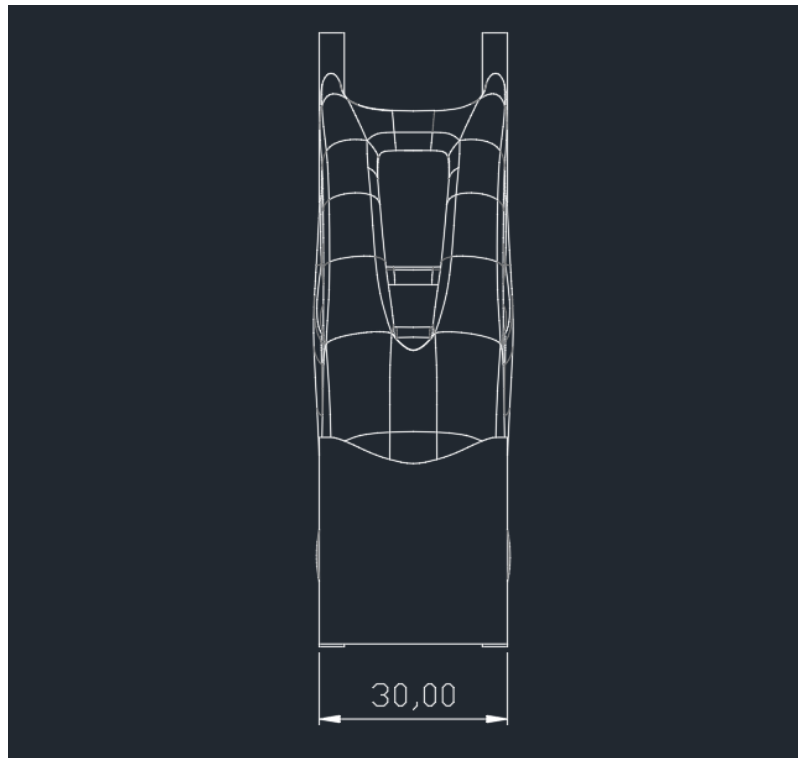
상기 참가팀은 2019 대학생 자작자동차대회의 Altair Design Award 부문 보고서를 다음과 같이 제출합니다.

2019 년 7 월 31 일

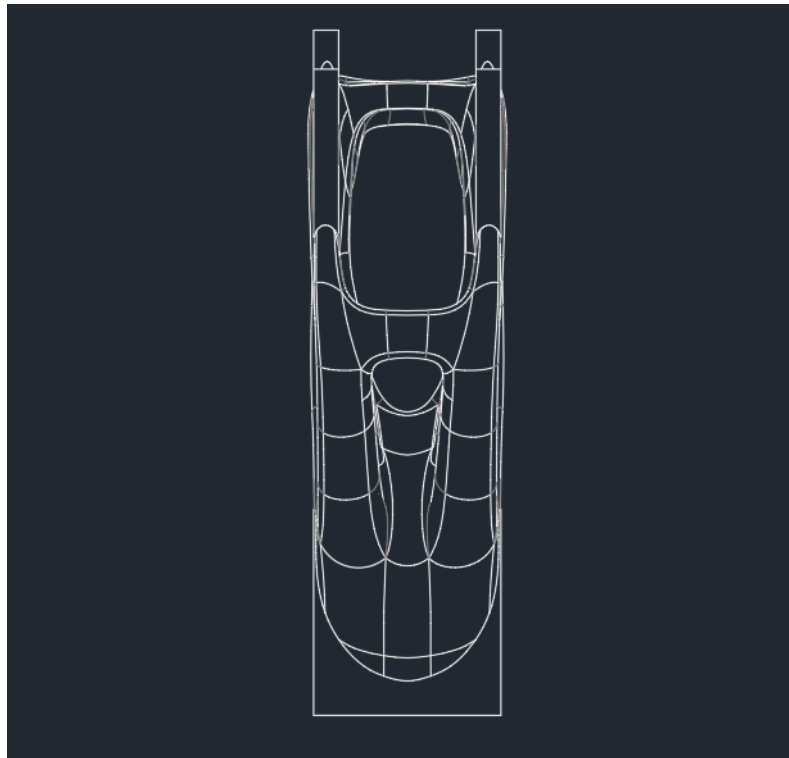
대학생 자작자동차대회 조직위원회 귀중

1. 도면

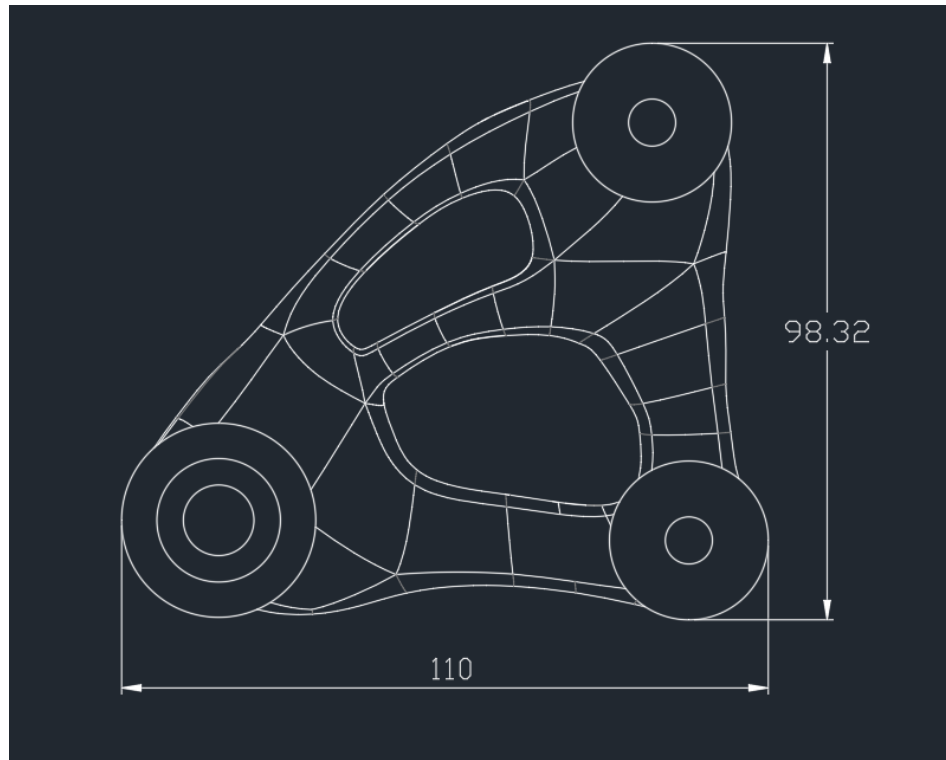
1) 정면도



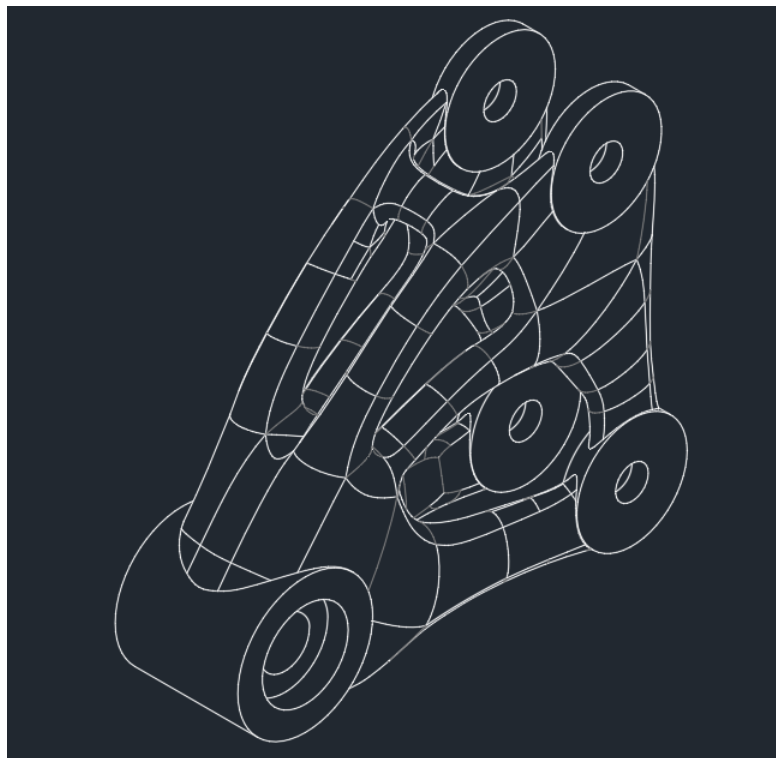
2) 평면도



3) 측면도



4) Isometric view



설계 보고서 : EV-Formula 차량의 모션 위상 최적설계 기반 금속 3D 프린트 부품 설계

서민석, 유준재

국민대학교 KUST 팀

요약 : 고풍력 EV-Formula 차량의 금속 3D 프린트 부품의 모션 위상 최적설계 과정

본 설계 보고서에서는 모션 위상최적화에 기초한 금속 3D 프린트 벨 크랭크 부품의 최적 설계가 수행되었다. 기존 벨 크랭크 모델의 주요 하드포인트는 유지하며 불필요한 부분을 최적화해 성능은 높이며 경량화하고자 했다. 최적화 과정은 다음과 같다. 주행 상황의 파손 시나리오를 통해 로드 케이스를 구성한다. 이후 모션 위상최적화를 이용한 PolyNURBS 모핑 방법으로 벨 크랭크 모델을 구성하고 Inertia relief 를 이용한 검증해석으로 설계 기준의 달성여부를 확인하는 방법을 사용하였다. 기존모델과 동일 하중 조건에서의 최대 응력과 변위를 비교해 금속 3D 프린트된 부품의 구조적 안전성과 우수성을 확인하였다.

1. 설 계

KSAE EV-Formula는 실제 차량에 준하는 고풍력으로 정해진 코스를 빠르게 완주하는 부문이다. KUST는 유일한 300V, 80kW EV-Formula 차량으로 대회 특성상 차량 구조물의 높은 동적 성능과 강도를 요구한다. 특히 현가 부품은 끊임없이 변하는 하중과 역동적인 움직임으로 인해 응력이 발생되어 파괴가 일어나기 쉽다. 따라서 차량의 최대의 성능을 발휘하기 위해 부품 경량화와 동시에 높은 강도와 강성을 고려해 설계해야 한다.

벨 크랭크는 지면으로부터 입력되는 충격을 현가장치로 전달하기 위한 부품이다. 또한, 공간과 공기역학적 설계제약에서 자유롭고 차량 동역학 성능을 향상시키는 역할을 한다. 이때 벨 크랭크는 설계된 동적 하드 포인트를 유지할 수 있도록 충분한 강성을 지녀야 한다. 따라서 한정된 부피에서 높은 강성을 얻기 위해 강성 최대화를 목적함수로 한다.

이전 대회의 벨 크랭크는 정확한 해석이 수행되지 않아 현가 부품의 파괴를 막기 위해 두껍고 무겁게 설계되었다. 따라서 2019 KSAE에서는 경량화를 위해 모션 위상 최적설계를 시도하였다. 벨 크랭크의 경우 서스펜션의 완충장치가 반응하기 이전과 반응하는 과정 그리고 이후의 하중이 모두 고려되도록 단일 하중 조건의 위상 최적화가 아닌 모션 하중 기반 위상 최적화를 실시하였다.

또한, 최적화된 결과를 금속 3D 프린터로 출력함으로써 위상 최적화 결과를 극대화한 형상을 지닌 벨 크랭크의 설계를 진행한다.

벨 크랭크의 초기모델링은 다음과 같은 부분을 고려하여 설계하였다. 전체 파트를 어셈블해 차량이 위, 아래 25mm로 Bump 될 때 기구학적으로 다른 파트와의 간섭이 발생하지 않도록 한다. 이 조건에서 위상 최적화를 위한 최적 형상의 자유도를 위해 최대 부피를 가지도록 Fig. 2와 같이 모델링 되었다.

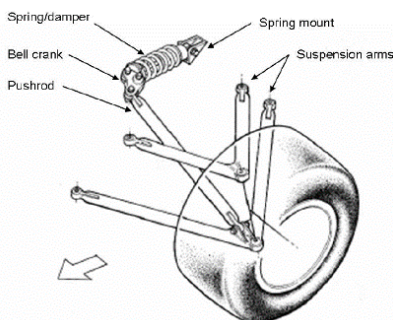


Fig. 1 Typical pushrod suspension¹⁾

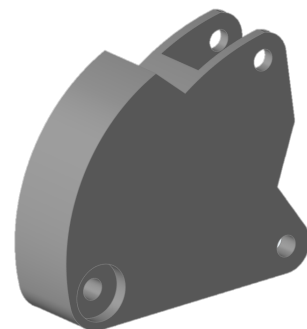


Fig. 2 Simplified bell crank modeling

* 팀장: 정재우, E-mail: automotive.min@gmail.com

2. 해석

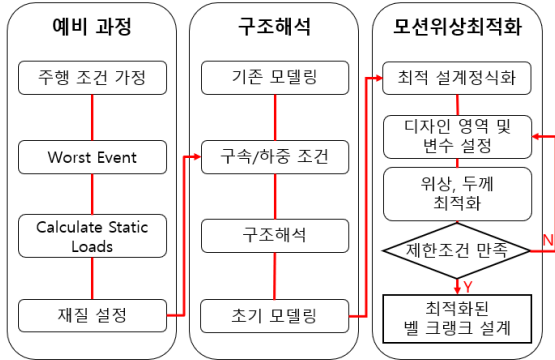


Fig. 3 Bell crank optimization flow chart

벨 크랭크의 파손 시나리오는 Bump에 의한 바운드 또는 리바운드 과정에서 급작스러운 현가장치의 하중 입력에 의한 파손이다. 따라서 현가장치는 급격한 하중 입력에 대한 반응을 하기 이전, 강체로 거동한다고 가정하였다.

이를 바탕으로 검증해석의 경우 주행 중의 Worst Event 입력 하중을 Case 1(Bound), Case 2(Rebound) 두 가지로 나눈다. 각 지지부의 하중을 계산한 후 이를 Inertia-Relief 선형 정적 해석으로 실시한다.

Table 1 Comparison of mechanical properties

Material	E (GPa)	S_y (MPa)	ρ (kg/m ³)
Al 6061-T6	75	241	2700
AlSi ₁₂	55	200	2685

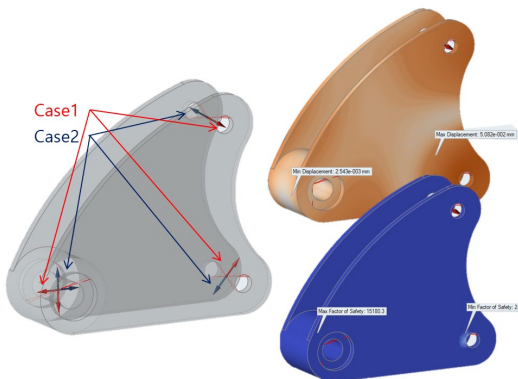


Fig. 4 2018 bell crank FEA results

2018 FSAE에 출전한 차량의 벨 크랭크는 Al 6061-T6 재질의 3축 가공 모델이며 파손 시나리오에 의한 정적해석 결과 최대변위 5.082e-2mm, 최대 Von Mises 응력은 89.259MPa이며 안전계수 2.7, 질량은 310g이다.

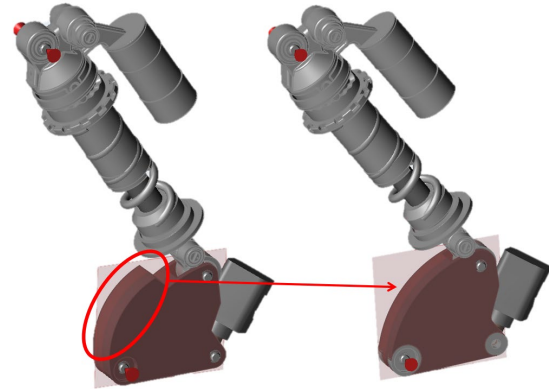


Fig. 5 1st and 2nd motion T.O constraints

모션 위상 최적화를 위한 해석조건은 Fig. 5와 같다. 스프링 상수는 250lb/in, 대칭 형상 조건, 현가장치의 최대 인장 압축 거리와 각도를 고려해 사인함수로 가진된 선형 액추에이터로 모델을 구성하였으며 제약조건은 진동하는 하중에 대해 충분한 강도를 갖도록 안전계수 3.0 이상과 경량화를 위해 250g 미만으로, 목적함수는 강성 최대화로 설정하였다.

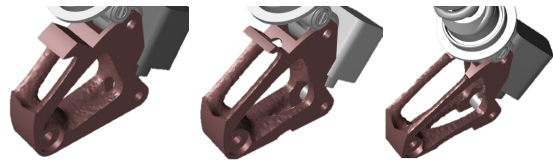


Fig. 6 Bell crank 1st motion T.O results

1차 모션 최적화 결과 설계 기준을 만족하는 세 가지 형상을 얻을 수 있었다. 그러나 적합하지 않은 끊어지는 형상이 포함된 결과로 디자인 영역을 Fig. 5와 같이 수정해 2차 모션 최적화를 실시한다.

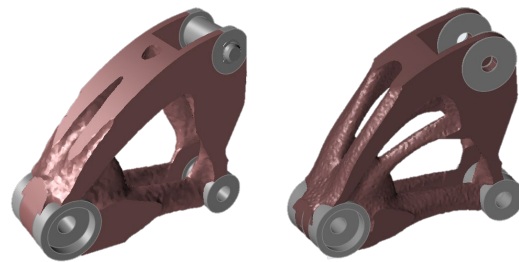


Fig. 7 Bell crank 2nd motion T.O results

2차 모션 최적화 결과 모핑 과정을 수행하지 않은 형상 중 Fig. 7의 오른쪽 모델을 기준으로 최대 경직도 40% 조건에서 질량 180g, 최소안전율 2.776으로 설계 기준을 만족한다. 따라서 이 모델을 기준으로 PolyNURBS 과정을 거쳐 완만한 곡선을 가질 수 있는 형상으로 수정해 검증 해석을 실시한다.



Fig. 8 PolyNURBS process and FEA results

파손 시나리오의 두 가지 입력 하중에 의한 해석 결과 최대변위 4.391e-2mm, 최대 응력은 111.1MPa로 안전계수 1.8, 질량은 247g이다. 이는 프레임과 벨 크랭크가 연결되는 부위에서 응력 집중이 발생한 것이 원인이다. 따라서 3차 최적화 과정으로 게이지 최적화를 통해 취약부위의 두께를 조절한다.



Fig. 9 3rd optimization : gauge optimization result



Fig. 10 Final modeling FEA results

게이지 최적화 이후 해석 결과 최대변위 1.656e-2mm, 최대 Von Mises 응력은 47.6MPa로 안전계수 4.2, 질량은 231g이다. 따라서 목표로 하였던 설계 기준을 만족하였다.

Table 2 Comparison of bell crank FEA results

Variable	2018	2019	Result
Weight (g)	310	231	-25.48%
Displacement(mm)	5.082e-2	1.656e-2	-67.41%
Max stress (MPa)	89.26	47.6	-46.67%

검증 해석 결과 기존 모델보다 질량은 25.48% 감소하며 동시에 변위와 응력은 각각 67.41%, 46.67%가량 감소하였다. 기존의 모델에 비해 설계 초기 목표로 하였던 경량화와 높은 강성으로 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

3. 제작

금속 3D 프린트는 기존의 절삭, 주조 공정과는 다른 적층 제조 공정이다. 그중 벨 크랭크에는 Direct Metal Print 방식의 금속 3D 프린트 방식을 사용하였다. 이 방식에는 출력물을 지지하기 위한 서포트가 필요하다. 또한 고온의 열로 제조하는 공정의 특성상 열변형이 발생하여 열응력 해소를 고려해야 한다.

따라서 전체적인 과정은 다음과 같다. 가공 시간을 최소화하는 것은 가공 비용을 줄이는 것으로 서포트를 최소화하는 방향으로 구배분석 한다.

이후 제조 과정에서의 열 응력 분석을 통해 불량이 예상되는 곳에 서포트를 추가로 생성한다. 서포트가 형성되는 곳에는 다음과 같이 제거가 용이한 형상으로 지지가 되어있다. 이를 제거하고 남은 곳은 추가적인 절단 공구를 통해 다듬는다.

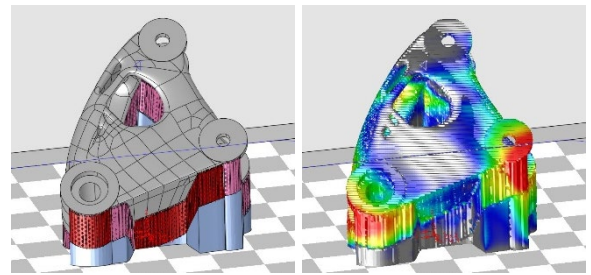


Fig. 11 Support building and thermal stress analysis results in 3DXpert



Fig. 12 3d printed bell cranks

4. 검증, Test 결과

3차원 프린트는 직교 이방성인 물성을 가지며 균일한 등방성 원자 구조를 가정하는 일반 가공 방법의 재료와는 다른 특성을 가진다. 따라서 기계 부품의 강도와 강성을 보장하기 위해 출력물의 적층 조건에 따른 물성 변화를 적용하고자 했다. 이에 따라 만능 인장 시험기

를 통해 출력 방향에 의한 강도 특성의 연구를 수행하고 3차원 프린터의 이해를 높이고자 하였다.

본 실험에서는 FDM 방식 3D 프린터로 출력한 PLA 재질의 ASTM D638 시편을 사용하였다. 시편 제작조건은 Fig. 13과 같이 X_0 , X_{90} , Y , Z 네 가지 방향으로 각각 3회 실험을 수행하였다.

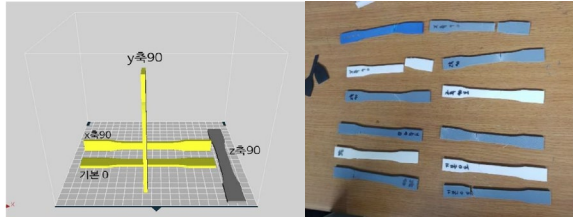


Fig. 13 Building directions of the tensile test specimens

Table 3 Comparison of properties according to the printing direction

Building direction		X_0	X_{90}	Y	Z
Tensile strength (MPa)	σ_{u1}	45	51	27	40
	σ_{u2}	44	51	30	43
	σ_{u3}	47	51	28	45

상기 결과로부터 적층 방향에 따른 기계적 물성의 차이를 확인하였다. 출력 방향에 따라 Y방향(수평 방향) 적층의 강도가 X축 90도 조건의 강도보다 최대 1/2 이하로 낮게 나타난다. 이를 토대로 금속 3D 프린트 부품의 설계 시 출력 방향별 물성의 차이를 고려한 유한요소 해석이 수행되었다. 벨 크랭크 검증해석 시에는 구배분석 결과에 의한 출력 방향을 예측할 수 없으므로 출력 방향에 따른 AISi_12의 물성치 중 가장 낮은 Y방향(수평 방향) 적층의 물성치를 기준으로 하였다.

또한 Fig. 12와 같이 설계하중의 기준인 Worst event를 실제 테스트에서 구현해 안정성을 검증하였다.



Fig. 14 Bell crank as installed on vehicle

5. 원가 절감 사례

- 1) 제작 과정에서 출력물의 구배 분석으로 사용되는 지지대를 최소화하였다. 이를 통해 가공 시간을 단축하고 동시에 사용되는 재료의 양을 감소시킨다.
- 2) 3D 프린트는 Fig. 13 과 같이 기존의 가공 방법보다 형상의 복잡도에 의한 영향을 크게 받지 않는다. 이는 한정된 공간에서 최대한의 기계적 성능을 내야 하는 Formula 부문에 가장 적합한 가공 방법이다.

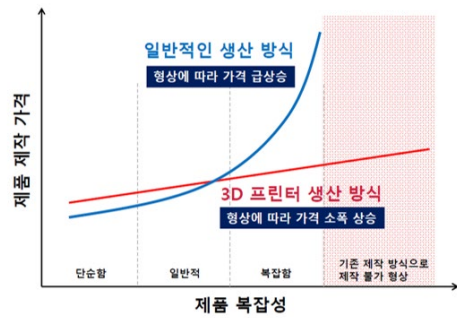


Fig. 15 3D 프린터 원가절감²⁾

6. 결론

본 보고서에서는 모션 위상최적화를 이용해 벨 크랭크를 설계하고 금속 3D 프린터를 이용해 제작하였다. 주요 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 체계화된 위상최적화 과정은 설계단계와 해석단계를 단일화함으로써 시간 단축을 하고 설계자 간의 숙련도에 의한 차이를 줄일 수 있다.
- 2) 모션 위상최적화를 이용한 최적 설계를 통해 질량은 25%가량 감소하였으며 최대 변위와 최대응력은 각각 67.41%, 46.67% 감소함을 확인하였다.
- 3) 본 보고서에서 실시한 벨 크랭크 이외에도 Fig. 3의 최적화 방법을 활용하여 차량에 들어가는 다수의 부품을 설계하였다. 이를 통해 약 10kg의 경량화를 달성하였다.
- 4) 조형 방향을 최적화하는 구배 분석을 통해 서포트를 최소화함으로써 제작 소요 시간 및 원재료를 줄여 제작 비용을 절감 할 수 있었다.
- 5) 최적 설계된 벨 크랭크를 실제 차량에 장착해서 도로 주행 테스트를 실시함으로써 안정성을 검증하였다.

References

- 1) Fornace, L. V (2006). Weight Reduction Techniques Applied to Formula SAE Vehicle Design: An Investigation in Topology Optimization(Master of Engineering Sciences (Mechanical Engineering)). University of California, San Diego.
- 2) 김진호 KTC. (2018). 금속 구조에서의 3D 프린팅 활용 사례. Additive Manufacturing with Digital Twin: Altair Blog.
- 3) 김태형 (2018). 3 차원 프린팅에 의한 경량 벨브 디스크 제조를 위한 위상최적화 기반의 형상 설계. 에너지공학, 27(4), 13-19
- 4) 이지은, 임영은, 박근 (2016). 3 차원 프린팅으로 제작된 개인맞춤형 안경테의 유한요소해석. 대한기계학회 논문집 A 권, 40(1), 65-71
- 5) 이석재, 이종일, 양건모, 서갑호, 서진호, 손동섭 (2018). 메탈 3D 프린팅을 이용한 기계부품 위상최적화 경량화 설계 기술 개발. 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, 481-482
- 6) 전득재, 박성호, 박영진, 박윤식, 김형의 (2005). 벨 크랭크 구조를 가지는 6 자유도 진동 시험기의 추적 제어. 한국소음진동공학회 학술대회논문집, 306-309
- 7) 김지연, 김정호, 이창진, 김용석 (2014). 위상 최적화 및 두께 최적화를 적용한 차체 동강성 개선에 관한 연구. 한국자동차공학회 춘계학술대회, 829-838
- 8) 박종현, 공경환, 정수호 (2016). 위상최적화를 활용한 후륜 너클의 성능개선. 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, 1137-1142
- 9) 이은서, 최해준, 이문영, 김남훈 (2018). 전기자동차 외장 부품의 경량화를 위한 위상 최적화기반 적층제조 적합 설계. 대한기계학회 춘추학술대회, 146-147
- 10) 정종재, 채중범, 지대욱, 김지훈, 신대영, 차웅 (2018). 항공기 메커니즘 브라켓의 위상최적화 설계. 한국항공우주학회 학술발표회초록집, 156-157
- 11) 오동권. (2017). 변형을 고려한 자동차 통풍 시트의 유량 평가. 한국자동차공학회논문집, 25, pp. 787-793.
- 12) Additive Manufacturing with Digital Twin 발표 자료 다시보기 . (2019년 7월 20일).
<http://blog.altair.co.kr/53395>.