

실험 계획법을 사용한 B-Pillar 성형공정에서 블랭크 형상 최적화

윤형원¹ · 최용석¹ · 이창환[†]

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과^{1,†}

Optimization of blank geometry for the stamping process of B-pillar using design of experiments

Hyung-Won Youn¹ · Yong-seok Choi¹ · Chang-Wan Lee[†]

Dept. of Mechanical System Design and Engineering, Seoul National University of Science and Technology^{1,†}

(Received May 06, 2021 / Revised June 28, 2021 / Accepted June 30, 2021)

Abstract: The shape of the blank greatly affects the formability and quality of the product after the stamping process. In this study, the geometry of the B-Pillar blank in the stamping process was optimized using design of experiments. The geometry of the blank for the B-pillar was simplified with the two length values and two radius values. The effects of design variables were studied through the Design of experiments. The stamping process of the B-pillar was predicted with the Finite Element Analysis (FEA). The optimized blank geometry was obtained. It results in the reduced maximum equivalent plastic strain. The local necking and the wrinkling did not occurred with the optimized blank geometry.

Key Words: B-Pillar, Stamping process, Design of experiments, Finite element analysis, Blank geometry optimization

1. 서 론

스탬핑 공정은 자동차용 부품의 제작 공정으로, 펀치와 다이를 사용하여 판재에 소성변형을 일으켜 원하는 제품으로 성형하는 공정이다¹⁾. 이러한 스탬핑 공정은 소재에 압축과 인장이 동시에 발생하는 가공이기 때문에 과한 압축 또는 인장은 주름과 파단을 야기한다. 위와 같은 성형불량을 방지하기 위한 방법으로, 성형 전 블랭크의 형상 설계, 바인더 하중의 크기, 비드의 유무, 성형 하중, 펀치와 다이 사이의 간격 등이 있다²⁾. 이중 초기 블랭크 형상 설계는 성형성에 있어 가장 영향력 있게 작용한다³⁾.

본 연구 대상인 B-pillar는 차체에 있어 상대적으로 충격 흡수 구간이 적은 측면 부분의 충격으로부터 탑승자를 보호할 수 있는 유일한 부분으로, 탑승자의 안전에 크게 기여하는 부분이다. 따라서 높은

강도가 요구되고, 오늘날 연비규제에 따른 차량 경량화의 필요성으로 고장력강 판재가 주로 사용되고 있다. 이 재료들은 성형성이 낮아 성형이 어렵고, B-pillar 형상의 특징상 성형 깊이가 깊고 복잡하여 성형에 어려움이 따른다⁴⁾.

이와 같은 스탬핑 공정에서 초기 소재의 형상을 결정하기 위해 다양한 연구가 진행되었다. Chung and Richmond은 이상적 변형을 가정하여 제품의 역해석을 통해 빠르게 재료의 변형을 예측할 수 있는 방법을 제안하였다^{5,6)}. Park et al.은 사각컵 형상의 성형 공정에서 역해석을 반복 수행하여, 형상 오차를 최소화 할 수 있는 초기 블랭크 형상을 계산하였다⁷⁾. Choi et al.은 역해석을 통해 핫스탬핑 공정에서 성형성에 영향을 주는 초기 블랭크 형상을 최적화 하였다⁸⁾. 또한 Kim et al.은 핫스탬핑 공정에서의 공정설계를 통해 블랭크 형상의 최적화에 대한 연구를 수행하였다⁹⁾. 하지만 대부분의 연구에서 경량화에 따른 재료의 선정으로 고장력강을 사용하였고, 알루미늄 사용에 대한 연구가 부족하였다. 특히 알

1. 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
† 교신저자: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
E-mail: cwlee@seoultech.ac.kr

루미늄을 사용함에 따라 냉간 스템핑공정을 이용할 수 있어 이에 대한 연구가 부족하였다.

본 연구에서는 냉간 스템핑 공정에서 알루미늄재료를 사용하여 초기 블랭크의 형상변수를 선정하고, 이를 최적화 함으로써 형상변수의 영향을 확인하고 B-pillar의 성형성을 개선시키고자 한다.

2. 본론

2.1. 해석모델 및 과정

본 연구에서 B-pillar 제품 성형을 위한 펀치와 다이, 블랭크 홀더의 형상은 NUMISHEET 2008의 Benchmark Problem 3¹⁰⁾의 형상 데이터를 사용하였다. 전체 해석 모델은 다이, 블랭크, 블랭크 홀더, 펀치로 구성되어 있으며, Fig. 1과 같다.

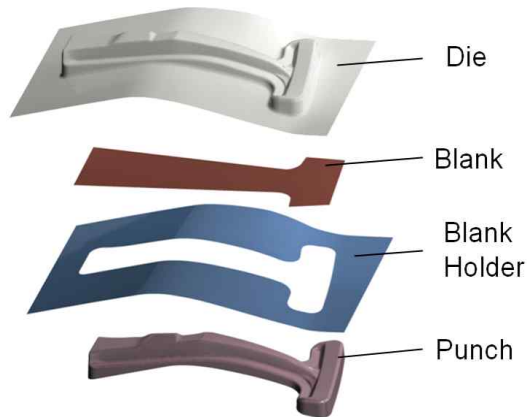


Fig. 1 Modeling of Analysis

해석 공정은 NUMISHEET 2008의 Benchmark Problem 3의 공정과 동일하게 진행하였다. 블랭크 홀더 위로 블랭크가 위치한다. 블랭크에는 일정한 블랭크 홀딩력이 가해지며, 이 때, 다이가 위에서부터 이동한다. 먼저 블랭크 홀더와 다이 사이에 재료가 위치하고, 이 후 이동하여 제품을 성형한다. 이 때, 펀치는 고정되어 있다.

실제 성형 공정과 동일하게 해석을 진행하였다. 먼저, 블랭크 홀더 위에 위치한 재료의 자중 해석을 진행하였다. 이 후, 다이가 하강하며 재료, 블랭크 홀더와 접촉 한다. 접촉한 시점부터 블랭크 홀딩력이 가해진다. 이후 다이, 블랭크, 블랭크 홀더는 같은 속도로 이동하여 고정되어 있는 펀치로 이동한다. 이 때, 다이의 이동 속도는 0.2 m/s 이다.

Table 1 Material properties of aluminum alloy

| Parameter | Value |
|-----------------------------|------------------|
| Young's modulus(GPa) | 68.9 |
| Poisson's ratio | 0.3 |
| Density(kg/m ³) | 2650 |
| Yield strength(MPa) | 110.1 |
| Ultimate strength(MPa) | 220.4 |
| Elongation (%) (25°C) | 25 |
| R-value | $r_0=0.81$ |
| | $r_{45}=0.44$ |
| | $r_{90}=0.67$ |
| Normal anisotropy | $\bar{R} = 0.59$ |

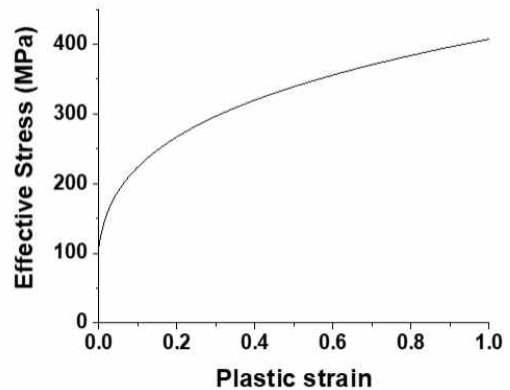


Fig. 2 Flow stress curve of the material

해석은 ABAQUS v6.14 Explicit을 사용하였다. 각 성형 단계에서 재료와 펀치, 다이 사이의 마찰은 쿨럼 마찰로 가정하였고, 마찰 계수는 0.1을 사용하였다. 본 연구에서는 소재의 주름 발생, 두께 감소와 같은 성형성에 관련한 결과를 평가하기 때문에, 성형 공정 이후 스프링백 해석은 진행하지 않았다. 다이, 블랭크 홀더, 펀치는 4절점의 Rigid 요소로 모델링 하였다. 블랭크는 S4R 요소를 사용하였고, 평균 요소 크기는 4 mm 로 요소를 구성하였다. 두께 방향 적분점은 7개를 사용하였다. 재료의 두께는 1.95 mm 이다.

Table 1은 본 연구에서 사용한 알루미늄 합금 판재의 물성치이다. 재료는 평균 이방성을 가정하였고, Hill의 48년 항복식을 사용하여 이방성을 표현하였다. 또한 재료의 유동 응력은 Fig. 2과 같다. 재료의 변형을 의존성, Mass scaling은 고려하지 않았다.

2.2. 블랭크 설계 변수 선정

초기 블랭크의 형상은 Fig. 3과 같이 펀치의 외곽 형상으로부터 투영한 치수를 직선 보간을 하여 단순한 설계변수를 갖도록 만들었다. B-pillar의 성형에서 주로 문제가 발생하는 부분은 자동차의 루프 쪽으로 연결되는 제품의 위쪽 부분이다. 상단부의 연결부에서 두께 감소에 의한 파단, 재료 집중에 의한 주름 등의 문제가 발생한다. 따라서 상단 부분에서의 형상을 주요 설계 변수로 설정하였다.

형상변수 설계 시에는 B-Pillar의 형상하차 위치를 고려하였고, 해석과 기존 연구 사례들을 통한 코너부의 영향들과 재료유입량을 고려하여 L_1 , L_2 , R_1 , R_2 총 4가지로 선정하였다. 여기서 θ_1 과 θ_2 는 L_2 의 치수 값에 종속되어 있다.

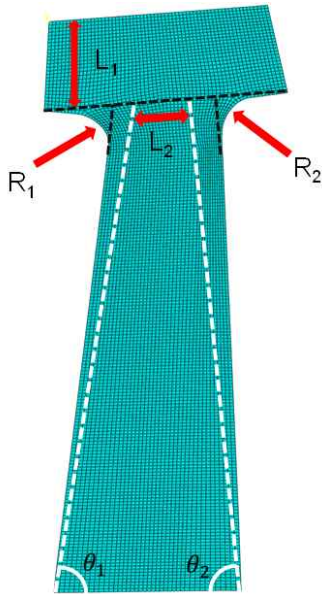


Fig. 3 Design parameter of B-pillar blank

2.3. 반응최적화 분석

반응표면 분석을 통하여 Table 2와 같이 만들어진 9개의 해석 모델을 가지고 분석하였다. 각 설계 변수는 Table 2와 같이, L_1 는 165mm, 155 mm, 145 mm의 3 수준이며, L_2 는 170 mm, 160mm, 150 mm의 3 수준, R_1 과 R_2 는 45 mm, 65 mm, 90 mm의 3 수준으로 실험 계획법을 구성하였다. 4개의 변수, 3개의 수준으로 구성된 실험계획법 모델은 Table 3에 정리하였다. Fig. 4는 Table 2에 따른 Model 1, Model 3의 형상 및 요소 구성을 보여준다.

Table 2 Desogm values

| Level | L1(mm) | L2(mm) | R1(mm) | R2(mm) |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 165 | 170 | 45 | 45 |
| 2 | 155 | 160 | 65 | 65 |
| 3 | 145 | 150 | 90 | 90 |

Table 3 Table of design parameter

| Model Number | L1(mm) | L2(mm) | R1(mm) | R2(mm) |
|--------------|--------|--------|--------|--------|
| Model 1 | 165 | 170 | 45 | 45 |
| Model 2 | 165 | 160 | 65 | 65 |
| Model 3 | 165 | 150 | 90 | 90 |
| Model 4 | 155 | 170 | 65 | 90 |
| Model 5 | 155 | 160 | 90 | 45 |
| Model 6 | 155 | 150 | 45 | 65 |
| Model 7 | 145 | 170 | 90 | 65 |
| Model 8 | 145 | 160 | 45 | 90 |
| Model 9 | 145 | 150 | 65 | 45 |



Fig. 4 Geometry and mesh of the model 1 and model 3

3. 결과

3.1. 스탬핑 해석 결과

Model 1에 대한 스탬핑 해석 결과는 Fig. 5와 같다. 초기 블랭크에서 자중에 의해 변형이 발생한다. 이때 자중에 의해 발생된 변형은 탄성 변형으로 소성 변형은 발생하지 않는다. 이때 자중에 의한 발생

은 탄성 변형으로 소성 변형은 발생하지 않는다. 자중에 의한 해석을 진행하지 않는 경우, 블랭크 홀더와 블랭크가 접촉하는 위치가 달라져, 재료의 변형에 영향을 준다. 따라서 스탬핑 공정에서 자중 해석을 필수로 진행해야 한다.

자중 해석 이후, 다이가 이동하여 재료를 성형한다. 재료에서는 드로잉과 굽힘이 동시에 발생한다. 해석 결과는 Fig. 5와 같다.

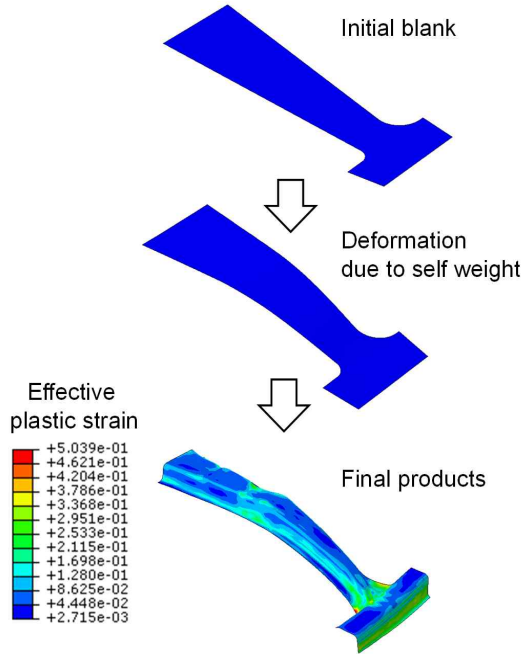


Fig. 5 B-pillar stamping process

3.2. 반응최적화 분석 결과

Table 4은 9개의 해석모델을 해석해본 결과를 나타낸 표이고, Fig. 6은 9개의 데이터를 기준으로 Minitab을 사용하여 반응최적화 도구를 사용해본 결과의 도표이다.

반응최적화 도구를 사용함에 있어서, 주름발생 가능성이 있는 두께 Max 값은 망소특성으로 선정하였고, 파단발생 가능성이 있는 두께 Min 값은 망대특성으로 선정을 하였다. 또한 이 둘의 결과 값은 모두 중요하기에 만족도와 중요도 둘 다 1로 설정하였다. 데이터 분석 후 종합만족도를 확인해 보았을 때, L_1 은 145 mm, L_2 는 150 mm, R_1 은 90 mm, R_2 는 45 mm로 결과 값을 얻을 수 있었다.

Table 4 Table of design parameter

| Model Number | Minimum thickness (mm) | Maximum thickness (mm) |
|--------------|------------------------|------------------------|
| Model 1 | 1.320 | 2.484 |
| Model 2 | 1.447 | 2.522 |
| Model 3 | 1.568 | 2.603 |
| Model 4 | 1.460 | 2.597 |
| Model 5 | 1.436 | 2.477 |
| Model 6 | 1.187 | 2.438 |
| Model 7 | 1.547 | 2.539 |
| Model 8 | 1.231 | 2.513 |
| Model 9 | 1.433 | 2.394 |

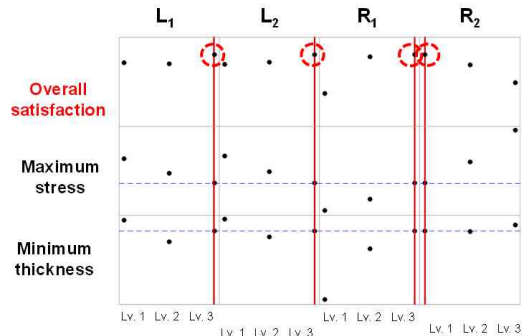


Fig. 6 Result of response optimizer

각 변수의 영향을 분석해 보았을 때, L_1 과 L_2 값이 작아질수록 최대 두께 값이 작아짐을 볼 수 있고, R_1 과 R_2 값이 커질수록 두께 값이 커짐을 확인할 수 있었다. L_1 과 L_2 값은 소재 유입량과 영향이 있으며 성형성에 관여함을 확인하여 치수 값이 작아질수록 유입에 대한 저항이 적어져 성형성이 좋아진다는 결과를 도출할 수 있었다. R_1 과 R_2 값은 응력집중이 발생하고, 파단과 주름에 영향을 미치며 R_1 의 경우 파단에 대한 영향이 크고, R_2 의 경우 주름에 대한 영향이 크기 때문에 제품 형상에 따른 적정 치수선정이 필요하다는 결과를 도출할 수 있었다. 최종적으로 최적조건을 위의 값으로 선정하고 다음과 같이 검증단계를 진행하였다.

3.3. 기존 형상과 최적 형상 비교

앞의 연구 결과를 통해 얻은 최적 블랭크 형상에 대해 스탬핑 해석을 진행하여 해석 모델 중 하나인 Model 1과 결과를 비교하였다. Fig. 7은 Model 1과 최적화 블랭크 형상의 해석에서 두께

분포를 비교한 결과이다. Model 1의 경우, 최소 두께는 1.320 mm, 최대 두께는 2.484 mm가 발생하였다. 최적 블랭크 형상의 경우 최소 두께는 1.504 mm, 최대 두께는 2.355 mm이다. Model 1은 좌측 라운드 연결부에서 소재의 국부 두께 감소가 발생한다. 이는 R_1 값이 낮기 때문에, 스탬핑 과정에서 재료 유입이 부족하여 두께 감소가 발생한다. 또한 Fig. 7에서와 같이, B-pillar 연결부에서 재료 두께가 초기보다 증가하며, 이 부분에서 소재의 주름이 예측된다. 하지만 최적화된 블랭크 해석 결과에서는 최종 블랭크 형상이 기존 B-Pillar의 성형문제였던 파단과 주름이 개선된 점을 확인할 수 있다. 코너부의 소재의 두께는 기존보다 월등히 높아짐을 확인할 수 있었고, 최대 두께 값 또한 낮은 것을 보이며 주름의 가능성 또한 감소하였다.

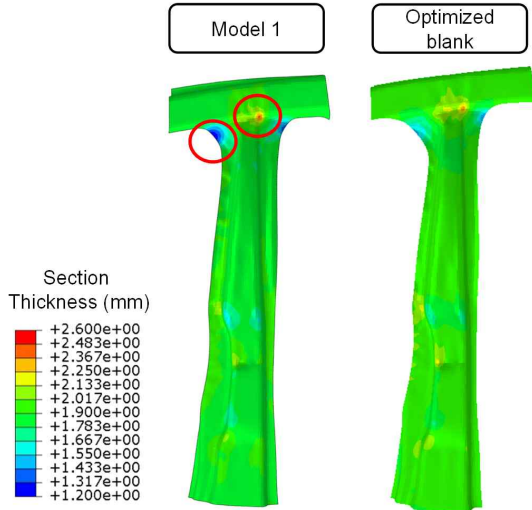


Fig. 7 Comparison of stamping shape between initial blank and optimization blank.

Fig. 8은 Model 1과 최적 블랭크 형상의 유효 소성 변형율을 비교한 그림이다. Model 1의 경우, 최대 유효 소성 변형율은 0.635이며, 최적 블랭크 형상의 경우 0.504의 최댓값을 보였다. 또한 Model 1의 경우 최대 유효 소성 변형율이 제품의 좌측 라운드 연결부에서 발생하였다. 최적 블랭크 형상은 좌측 라운드 연결부와 우측 라운드 연결부에서 유사한 최대 유효 소성 변형율을 보였다. 이는 R_1 은 증가하고, R_2 는 감소하여 최적 블랭크 형상이 재료의 변형을 균등하게 배분하여, 최대 변형율을 감소시킨 것이다.

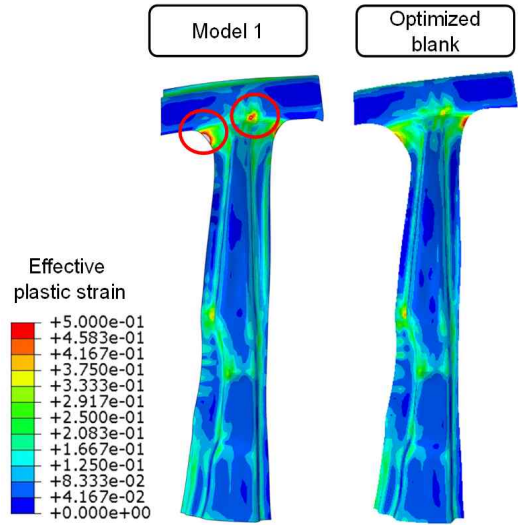


Fig. 8 Comparison of effective plastic strain between initial blank and optimization blank.

4. 결론

본 연구에서는 복잡한 형상을 가진 B-Pillar 형상을 통계적 기법을 통해 성형성을 향상시킬 수 있는 블랭크 형상을 찾아내었다. 그리고 유한요소 해석을 통해 검증했다.

해석의 한 가지 경우인 Model 1의 경우, 최대 두께는 2.484 mm, 최소 두께는 1.320 mm인 반면에 최적화 블랭크에 의한 최종 형상에 있어 최대 두께는 2.355 mm, 최소 두께는 1.504 mm로 기존 블랭크보다 최대 두께는 5.2 % 감소하였고, 최소 두께는 13.9 % 증가하여 주름 발생이 감소하였고, 파단 또한 발생하지 않았다.

본 연구에서는 비교적 간단한 통계적 방법을 통해 성형성을 높일 수 있는 블랭크의 설계변수를 도출하였다. 복잡한 B-pillar 블랭크 형상을 단순화하여 설계 변수를 설정하였지만, 전체 설계의 방향을 잡을 수 있어 해석에 의의가 있다고 할 수 있다. 또한, B-Pillar의 특성상 증횡비가 상대적으로 크기 때문에 스프링백에 대한 영향을 고려하지 않을 수 없지만 본 연구에 있어서 스프링백의 영향을 분석하지 않은 한계가 있다. 또한 성형 공정 내 마찰계수 변화, 재료의 변형률속도 의존성 등을 고려하지 않아 실제 성형된 제품과 차이가 발생할 수 있다.

후기

본 연구는 정부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행되었습니다. (과제 번호: NRF-2020R1C1C1014412)

참고문헌

- 1) M. Karima, "Practical application of process simulation in stamping", Journal of materials processing technology, Vol. 45, pp. 309-320, 1994.
- 2) H. H. Bok, M. G. LEE, E. J. Pavlina, F. Barlat, & H. D. Kim, "Comparative study of the prediction of microstructure and mechanical properties for a hot-stamped B-pillar reinforcing part", International journal of mechanical sciences, Vol. 53. No. 9, pp. 744-752, 2011.
- 3) S. R. Lee, S. M. Park, S. M. Hong, "Optimization of Initial Blank Shape of Multi-stage Deep Drawing for Improvement of Formability", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 17, No. 10, pp. 696-701, 2016.
- 4) R. George, A. Bardelcik, M. J. Worswick, "Hot forming of boron steels using heated and cooled tooling for tailored properties", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212, No. 11, pp. 2386-2399, 2012.
- 5) K. S. Chung, O. Richmond, "Ideal forming—I. Homogeneous deformation with minimum plastic work", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 34, No. 7, pp. 575-591, 1992.
- 6) K. S. Chung, Owen Richmond, "Ideal forming—II. Sheet forming with optimum deformation", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 34, No. 8, pp. 617-633, 1992.
- 7) S. H. Park, J. W. Yoon, D. Y. Yang, Y. H. Kim, "Optimum blank design in sheet metal forming by the deformation path iteration method, International", Journal of Mechanical Sciences, Vol. 41, No. 10, pp. 1217-1232, 1999.
- 8) H. S. Choi, B. M. Kim, C. G. Kang, S. Y. Ha, D. H. Lee, "Optimization of Blank Shape for Hot Stamping of Center Pillar", The Korean Society Of Automotive Engineers. pp. 2439-2445, 2009.

- 9) J. Kim, B. Kim, C. Kang, "Blank Shape Design Process for a Hot Stamped Front Pillar and its Experimental Verification", Transactions of materials processing, Vol. 21, No. 3, pp. 186-194, 2012.
- 10) NUMISHEET 2008, The Numisheet Benchmark Study, Benchmark Problem BM03, Interlaken, Switserzerland, Sept. 2008.

저자 소개

윤 형 원(Hyung-Won Youn)

[학생회원]



- 2020년 2월: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (학사)
- 2020년 3월~현재: 서울과학기술대학교 기계디자인공학부 (석사 과정)

< 관심분야 >

프레스 금형, 유한요소해석, 점진성형공정

최 용 석(Yong-Suk Choi)



- 2020년 2월: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (학사)
- 2020년 3월~현재: 삼성물산 건설 부문

< 관심분야 >

프레스 금형, 유한요소해석, 점진성형공정

이 창 환(Chang-Whan Lee)

[정회원]



- 2014년 8월: KAIST 기계공학과 (공학박사)
- 2014년 9월~2016 8월: KIST 연료전지 연구센터 박사 후 연구원
- 2016년 9월~현재: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 조교수

< 관심분야 >

소성 가공, 점진 성형, 마그네슘 합금 판재