

# Optimal Design of Thin Supporting Bracket Considering Product Strength and Manufacturing Cost

## 제품 강도와 제조 비용을 동시에 고려하는 박(薄)형 브래킷 최적 설계

Min Seong Oh<sup>1</sup>, Ho Jun Jeong<sup>2</sup>, Seok Moo Hong<sup>3</sup>

오민성<sup>1</sup>, 정호준<sup>2</sup>, 홍석무<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Student, Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University, Korea, [mslab13@naver.com](mailto:mslab13@naver.com)

<sup>2</sup> Student, Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University, Korea, [jounghojun99@gmail.com](mailto:jounghojun99@gmail.com)

<sup>3</sup> Professor, Department of Future Automotive Engineering, Kongju National University, Korea, [smhong@kongju.ac.kr](mailto:smhong@kongju.ac.kr)

Corresponding author: Seok Moo Hong

**Abstract:** Brackets are used to support shafts, or similar structures. For stable operation, brackets must be designed appropriately considering the environment and conditions which they are used in. However, when a design is overly thick or long for stability reasons or when manufacturing includes cutting, binding, or welding, the economic efficiency generally decreases. In this study, a bracket with low deflection and high safety margin is developed considering both product strength and manufacturing cost. At this time, the amount of deflection is determined by comparing the maximum deformation amount derived from the FEA results, and the safety is determined by comparing the safety factor. First, a commercially available industrial bracket was investigated using structural finite element analysis. Bracket thickness and rib shape, both of which govern product strength and manufacturing cost, were used as design variables. Based on the design variables and factorial design with two elements and five levels, 25 bracket designs were established. Finite element analyses were run for the 25 models and their strength and manufacturing cost evaluated. The parameter pair that provides the highest product strength and the lowest manufacturing cost was then identified. Although compared with the existing bracket, volume×manufacturing cost are 2.28 higher, equivalent stresses are 46% lower and deflection decreased from 0.34 mm to 0.02 mm.

**Keywords:** Bracket, Design Of Experiments, Factorial Design, Finite Element Analysis, Optimization

**요약:** 브래킷(Bracket)은 벽, 기둥에 돌출되어 축 등을 받칠 부속품으로 구조물의 안정적인 구동에 중요한 역할을 하기 때문에 사용되는 환경과 조건에 알맞게 설계되어야 한다. 하지만 안전성을 위한 과도한 두께, 길이의 설계를 하거나 불필요한 절삭, 바인딩, 용접 등의 공정 발생 시 제조 비용의 경제성 저하를 야기할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 브래킷에 대한 설계 보안을 통해 제품 강도와 제조 비용을 동시에 고려한 브래킷을 설계하고자 한다. 이때 FEA 결과로부터 도출된 최대 변형량을 비교하여 처짐량을 결정하고, 안전계수를 비교하여

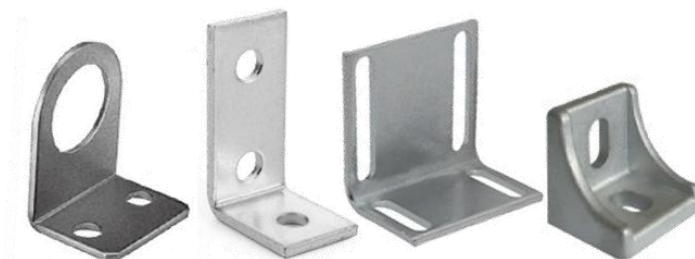
Received: January 08, 2023; 1<sup>st</sup> Review Result: February 22, 2023; 2<sup>nd</sup> Review Result: March 18, 2023  
Accepted: April 30, 2023

안전성을 결정한다. 먼저 상용화된 산업용 브래킷 모델을 기준으로 유한요소해석 중 구조 해석을 진행한 후 브래킷 모델의 제품 강도와 제조 비용을 동시에 조절할 수 있는 2가지 요소(브래킷 두께와 리브 형상)를 다중 목적함수의 설계 변수로 지정했다. 정리된 설계 변수를 기반으로 요인배치법을 적용하여 2요소, 5수준 총 25가지 종류의 브래킷을 모델링 했다. 모델링 된 25가지 브래킷에 대하여 유한요소해석을 이용한 구조 해석 및 식을 이용한 연산을 진행하여 제품 강도와 제조 비용을 정리했다. 정리된 두 값을 비교하여 제품 강도를 최대화하면서도 동시에 상승하는 제조 비용을 최소화하는 설계 변수 값을 확인했다. 최종적으로 제품 강도를 개선할 때 상승하는 제조 비용까지 고려한 브래킷 설계를 제시하여, 기존 브래킷 대비 부피와 제조비용이 총 2.28배 상승하였지만 최대 등가응력이 46 % 향상되었으며, 치짐량이 0.34 mm에서 0.02 mm로 감소했다.

**핵심어:** 브래킷, 실험 설계, 요인 설계, 유한요소해석, 최적화

## 1. 서론

공장, 건설 현장 등의 산업현장에서 사용되는 브래킷(Bracket)은 벽이나 기둥 등에서 돌출되어 있어 축 등의 구조물을 받칠 목적으로 쓰이는 부속품으로써 하중을 받는 다양한 구조물의 안전성에 관하여 중요한 역할을 한다. [그림 1]과 같은 여러 가지 종류의 브래킷이 일반적으로 정하중을 받는 상황부터 높은 정하중과 충격하중을 받는 상황까지 다양한 환경과 조건에 대응하도록 용도에 맞게 설계, 생산 및 사용되고 있다. 잘못된 설계로 생산된 브래킷 사용 시 집중하중에 의한 내구성 부족, 안전을 저하로 인해 구조물 붕괴, 낙하와 같은 안전사고가 발생해 심각한 재산 피해, 인명 피해로 이어질 수 있다. 때문에 브래킷의 안전성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Lee는 특정 하중 조건에서 브래킷의 두께, 형상 등의 설계 변수 변경을 통해 안전율을 검증, 판단하는 연구를 진행하여 브래킷의 최대 응력은 낮추고 안전율을 높이는 최적 설계를 진행한 바 있고[1], Kim 등은 유한요소해석을 이용한 응답 특성 분석, 브래킷 변위 파악, 안전성 비교를 진행하여 명확한 표준 안전지침이 마련되지 않은 브래킷 비계 안전성에 대한 판단 근거의 기준을 제시하였다[2]. 이처럼 브래킷의 안전성에 대한 연구가 수행되고 있는 반면, 사용되는 재료의 양, 제조 과정 등의 브래킷 생산 속 경제성을 고려한 연구는 진행된 바가 없다. [표 1]과 같이 브래킷의 원자재로 사용되는 철강의 가격은 매년 약 10% 내외의 변동성을 지니고 있었지만, 2021년을 기준으로 최소 52%에서 최대 229%까지 상승하였다[3]. 안전성 개선을 위해 과도한 두께(Thickness,  $t$ ), 길이(Length,  $L$ )를 가진 브래킷을 생산하게 될 경우 더 많은 재료(철강)가 사용되어 경제성이 저하된다. 또한 설계 중 불필요한 절삭(Cutting), 밴딩(Banding), 용접(Welding) 등의 추가 공정 발생 또한 브래킷의 제조 비용의 경제성 저하를 야기할 수 있다.



[그림 1] 다양한 종류의 사업용 브래킷

[Fig. 1] Various Typed Commercial Brackets

[표 1] 최근 5년간 주요 원자재 가격 동향(철강부문)

[Table 1] Major Raw Material Price Trends over the Past Five Years (Steel sector)

Spec.	Cold - rolled (\$/t)	Hot - rolled (\$/t)	Rebar (\$/t)	Iron scrap – imported (\$/t)	Iron scrap – domestic (1,000 Won)
2017	900.5	680.5	651.5	335	273.5
2018	1,049.5	912	761.5	410	311.5
2019	842.5	660.5	728.5	360.5	276
2020	849.5	655.5	605.5	336	232
2021	2,038.5	1,776	1,006	567	436
2022	1,960	1,459	1,135	653	577

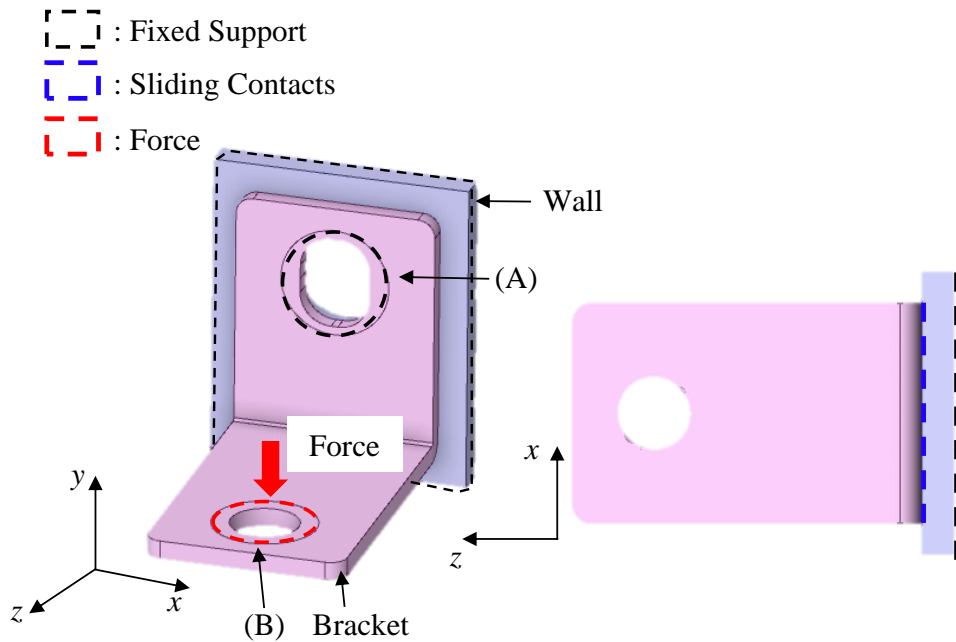
따라서 본 연구에서는 기존 박(薄)형 브래킷의 설계를 보완하여 하중이 가해졌을 때 브래킷의 처짐량과 안전성을 개선함과 동시에 사용되는 재료의 양과 공정 과정을 비교하여 안전성과 경제성을 동시에 고려하는 브래킷을 설계하고자 한다. 이때 처짐량은 FEA 결과로 도출된 최대 변형량 비교를 통해, 안전성은 안전계수(Safety Factor)의 비교를 통해 판단한다. 따라서 상용화된 구조의 브래킷[4] 모델링을 진행한 뒤 유한요소해석 중 구조 해석을 진행하여 해석 결과를 토대로 제품 강도와 제조 비용을 동시에 조절할 수 있는 다중 목적함수를 정의한다. 앞서 정리한 다중 목적함수를 기반으로 최적 설계를 수행하여 제품 강도에 도움이 되는 5가지 Base의 리브(Rib)를 생성한다. 그와 동시에 제조 비용에 영향을 주는 제조 공정을 고려하기 위해 3D CAD 설계 소프트웨어인 Catia Version 5 Release 18의 Sheet Metal Modeling[5]라는 기능을 사용해 앞서 제작했던 5종류의 리브를 적용한 브래킷 모델링을 다양한 두께로 제작한다. 이후 설계 변수를 고려한 브래킷을 기본형 브래킷에 적용한 구조 해석과 동일한 조건으로 해석을 진행한 후 해석 결과와 식을 이용한 연산을 통해 브래킷의 제품 강도와 제조비용에 관해 비교하여 가장 좋은 표본을 최종 모델로 선정하고자 한다.

## 2. 기준 박형 브래킷 유한요소해석

### 2.1 기준 브래킷의 설계 및 경계조건

본 논문은 박형 브래킷의 취약점 파악을 파악하여 정리하고 브래킷 형상을 최적화하는 것을 목적으로 두기 때문에 두께를 3 mm로 가정한 브래킷 모델을 Base 0 및 Case 0로 명명하고 해석하고자 한다. 먼저 3차원 CAD 프로그램인 CATIA V5를 사용하여 실제 판매되는 브래킷의 수치를 참고해 모델링 하였다. 구조 해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 Ansys discovery를 사용하였다[6]. 브래킷을 사용할 때 상단부 구멍에 볼트와 너트가 벽이나 기둥 등에 결속되며, 브래킷 하단부에 볼트, 너트와 결속된 구조물을 버틸 수 있도록 설계된다. 따라서 [그림 2]의 (A) 영역의 뒷면에 사각형 구조물 Wall을 추가하고, 각각 (A)는 구멍에 볼트와 너트로 구속, (B)는 볼트 헤드(Bolt head) 부분만큼의 넓이로 하중을 가하도록 구분 및 설정하였다. 이때 (B) 영역에 가해지는 볼트 헤드의

하중은 물성에 따른 안전계수(Safety factor)를 측정하여 결정한다.



[그림 2] Case 0 브래킷의 경계 조건

[Fig. 2] Boundary Conditions for Thin Supporting Bracket Case 0

## 2.2 브래킷 재료의 기계적 성질

브래킷은 사용 용도에 따라 스틸, 알루미늄, SPHC(Steel Plate Hot Commercial) 등의 다양한 소재로 생산되지만 본 연구에서는 산업용 박형 브래킷을 목적으로 하기 때문에 자동차, 전자, 기계 부품 등에 다양하게 사용되는 열간 압연 소재 중 일반적으로 분류되는 SS400(Steel structural 400)를 적용하고자 한다. 추가로 브래킷 상단부 후면에 위치한 벽(Wall) 같은 경우 일반적인 철강으로 Structural steel, S275N을 적용하였다. 앞서 기술한 2가지 소재에 사용한 물성치 같은 경우 SS400 소재는 선행연구를 참고하여 적용하였고[7-8], Structural steel, S275N은 Ansys 소프트웨어의 기존 물성을 참고하여 적용하였다. 그 내용은 [표 2]와 같다.

[표 2] FEA의 기계적 특성

[Table 2] Mechanical Properties for FEA

Mechanical properties	SS400	Structural steel
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7,850	7,850
Young's modulus (MPa)	206,000	200,000
Poisson's ratio (-)	0.3	0.3
Ultimate tensile strength (MPa)	400	460
Yield tensile strength (MPa)	245	250

## 2.3 해석 결과 및 고찰

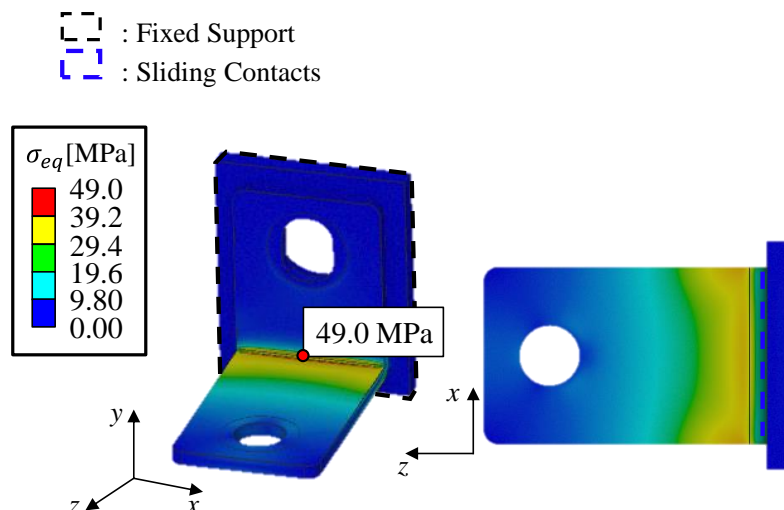
안전계수(Safe factor)란 부재를 작업에 사용할 경우 해당 부재에 허용되는 응력과 항복 응력의 비를 의미한다[2]. 각각의 부재와 환경에 맞는 안전율이 범위 내로 정해져 있으며 이를 통해 연성 재료를 사용한 구조물의 안전율을 파악하여 해당 구조물, 확장된 범위에서 현장의 안전성을 파악하는데 좋은 지표로써 사용되고 있다. 본 연구에서 고려하는 상황은 산업현장이며, 이는 곧 지속적인 정하중이 가해질 뿐만 아니라 순간적인 충격하중 또한 대응해야 한다. 때문에 선행 연구를 참고, 앞서 기술된 다양한 상황에 대한 브래킷의 안전성을 감안하여 충격하중이 정하중의 4배로 설정한 뒤 최소 5 이상의 안전율을 가질 수 있도록 내구성 기준을 설정한다[9]. [표 2]에서 도시한 바와 같이 브래킷에 사용한 물성은 SS400이며 해당 소재의 항복강도(Yield tensile strength)는 245 MPa이다. 하중을 통해 브래킷에서 검출된 3차원 응력을 획득하여 항복 응력과 비교하기 위하여 Von-Mises 등가 응력을 사용하였으며, 주응력(Principal stress)으로부터 식 (1)과 같이 계산된다.

$$\sigma_{eq} = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{eq}$ 는 Von Mises 등가 응력을 의미하고,  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 는 주응력을 의미한다. 위 식을 통해 구한 Von-Mises 등가 응력은 앞서 기준으로 설정한 안전율(Safety Margin, SM)과 함께 안전계수 식 (2)에 사용되며 이를 통해 간단히 최대 허용 응력을 구할 수 있다.

$$SM[-] = \frac{Resistance[N]}{Load[N]} = \frac{\sigma_{yield}[MPa]}{Max \sigma_{eq}[MPa]} \quad (2)$$

여기서 *Resistance*는 저항, *Load*는 부하,  $\sigma_{yield}$ 는 항복응력 그리고  $Max \sigma_{eq}$ 는 최대 등가 응력을 나타낸다. SS400의 항복 강도와 최소 안전율 5를 각각 대입하여 최대 하중을 가했을 경우 최대 등가 응력이 49 MPa에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 브래킷에 가할 수 있는 하중의 최댓값은 56 N으로 해당 값은 안전율 제어 하중의 기준 하중으로 설정한다. 요소망(Mesh)의 크기와 같은 경우 두께의 1/2인 1.5 mm로 지정하였으며, 자세한 하중분포는 [그림 3]과 같다. 추가로 기타 상세 값으로는 Volume은 9,223 mm<sup>3</sup>이며 처짐량은 -Y 방향으로 0.343 mm이다.



[그림 3] Case 0의 FEA 결과 Von-Mises 응력 분포

[Fig. 3] The FEA Result of Von Mises Stress for the Case 0

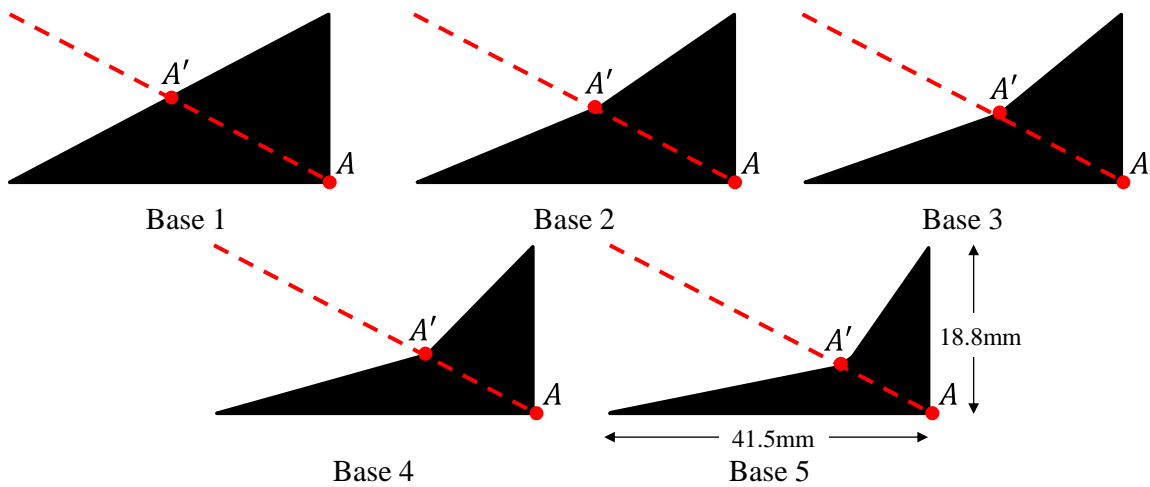
### 3. 다중 목적함수 최적화 브래킷 설계

#### 3.1 설계 요구사항

브래킷에 제품 강도, 제조 비용 개선을 위한 설계를 진행하며 요구되는 설계 사항은 다음과 같다.

##### 3.1.1 제품 강도 강화

소재 변경이 없다는 전제하에 브래킷의 제품 강도를 강화하기 위하여 Von-Mises 응력 혹은 처짐량을 보완해야 한다. L 형 브래킷의 경우 일반적으로 강도를 보장하기 위하여 두께를 두껍게 설계하거나 리브를 용접하여 장착한다. 하지만 두께를 두껍게 설계하게 된다면 박 형 브래킷의 취지를 벗어날 뿐 아니라, 이후 제조 비용 부분의 재료비에 영향을 미치기 때문에 제품 강도 강화에서의 두께 보장은 제외한다. 따라서 본 논문에서는 리브를 장착하여 강도를 보장하기로 한다. 리브 장착 시 마찬가지로 최적화를 판단하는 요소 중 부피에 악영향을 미치기 때문에 기존 두께를 3 mm 에서 0.5 mm 총 5 번 감소시킨다. 리브 모형은 제품 강도를 판단하는 처짐량, 안전율에 영향을 미친다. 리브의 부피가 가장 큰 삼각형을 기본형 Base 1, 기본형 삼각형의 한점 점 A 그리고 A와 마주 보는 변의 중점 A'을 이은 선 AA'을 그어 A'으로부터 1/8, 2/8, 3/8, 4/8 지점만큼 뺀 A'을 이동하며 Base 2~5 총 5 가지 경우의 Base 를 제작하여 정립하였으며 자세한 형상은 [그림 4]과 같다. 이때 해석 중 가해질 응력 집중을 고려하여  $R = 3mm$ 를 부여한다. 이후 브래킷에 장착하여 하중을 가하였을 시 최대 등가 응력을 수식으로 표현하면 식 (3)과 같으며 이 목적함수를  $f_1$ 이라 표기한다.



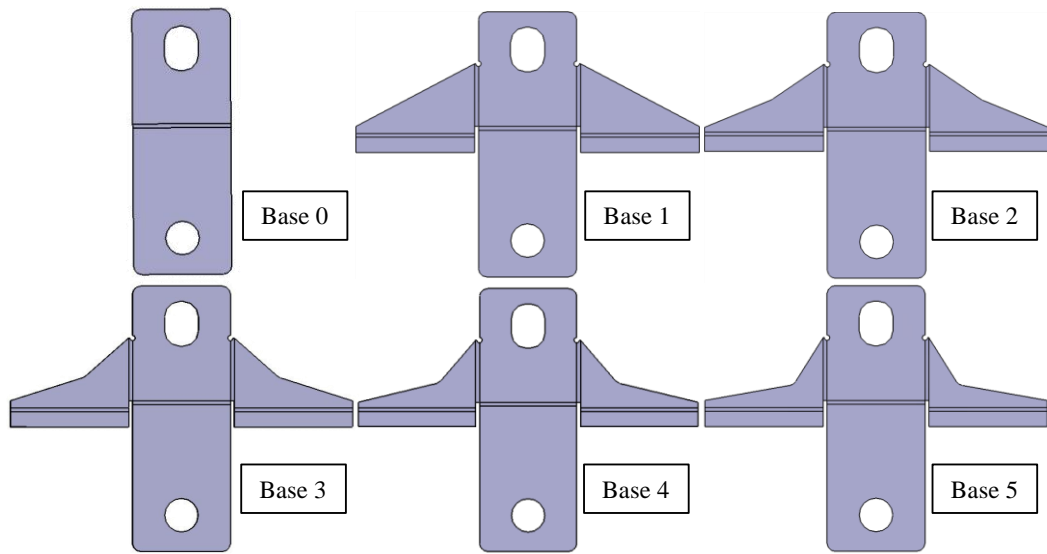
[그림 4] 제품강도를 고려한 5가지 rib

[Fig. 4] Five Typed Ribs Considering Product Strength

$$Min. f_1 = \sigma_{eq} = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

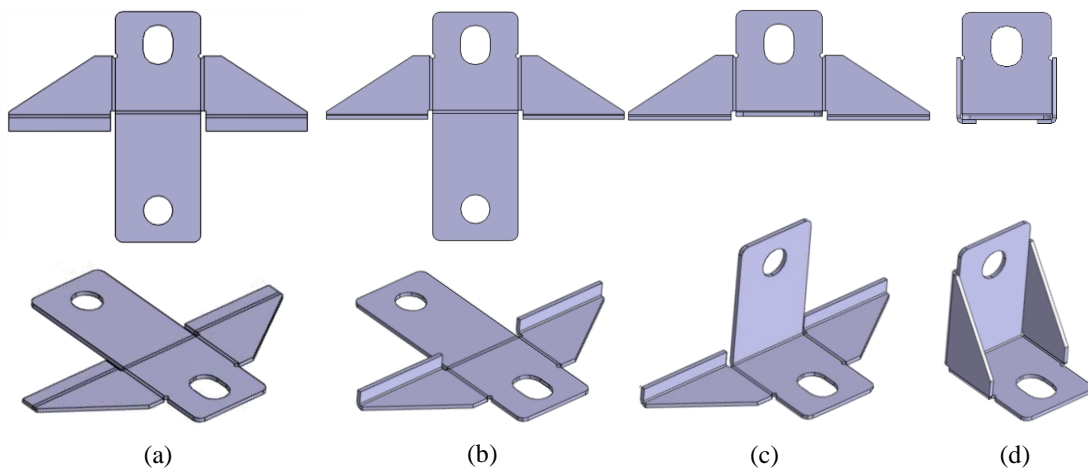
### 3.1.2 제조 비용 최소화

제품의 제조 비용을 감축시키는 방법은 공정 과정을 줄이는 것과 동시에 생산을 진행하는 것이다. 먼저 본 논문에서는 프레스 방식과 레이저 방식의 제조 비용을 비교하기 위해 Case 0 를 200 ton 프레스를 운용하는 프레스 공정, Case 1 을 레이저 가공을 이용하는 레이저 공정을 시행하는 것으로 가정한다. Case 0, 1 의 계산이 끝난 후 제조 비용을 비교하여 경제성이 높은 공정 과정을 이용해 Case 2 ~ 26 을 계산한다. 각 Base 의 공정 이전의 형상은 [그림 5]와 같으며, 제조 공정에 따른 각 브래킷의 형상 변화는 [그림 6]과 같다.



[그림 5] 밴딩 진행 전 Base 0와 Base 1 ~ 5

[Fig. 5] Five Base Geometries and Original Geometry before Bending Process



[그림 6] 밴딩 공정을 통한 브래킷 변형 진행도

[Fig. 6] A Sample Developing View of a Brackets through Bending Process

또한 설계 과정에서 브래킷의 외부, 내부의 길이를 알 수 있으므로 200 ton 프레스에서 동시에 몇 개를 생산할 수 있는지 계산할 수 있다. 식 (4)은 아래와 같다[10].

$$F = \sigma_{\tau} \times (L_{in} + L_{out}) \times t \quad (4)$$

여기서 사용된 기호는 각각  $\sigma_{\tau}$ 는 전단 응력,  $F$ 는 힘,  $L_{in}$ 는 외부 길이,  $L_{out}$ 는 내부 길이,  $t$ 는 두께를 의미한다. 이때 모든 브래킷의  $\sigma_{\tau}$ 는 275 MPa,  $L_{in}$ 의 길이는 84.66 mm이다. 다음으로 제조 간 사용되는 비용이다. 프레스 공정은 선행 보고서를 참고하여 한 공정 당 50원으로 가정한다[11]. 이때 [그림 6]을 통하여 알 수 있듯 개선된 브래킷은 모두 3단계의 공정을 거치며 완성되어 위 공정은 총 150원을 사용하게 된다. 따라서 150원에서 200 ton 미만으로 생산 가능한 총개수를 나누면 단위 개수 당 비용이 산출되며 식 (5)와 같다.

$$C_p [\text{won}] = \left[ \frac{200 \times 1,000 [\text{kg}]}{F [\text{N}]} \times \frac{9.8 [\text{N}]}{1 [\text{kg}]} \right] \times 150 [\text{won}] \quad (5)$$

여기서  $C_p$ 는 1개 당 프레스 공정에 해당하는 비용이며 이를 각각의 브래킷의 부피를 곱하여 최종 제조 비용을 산출할 수 있다. 또한 최종 제조 비용을 최소화하도록 하였으며 이를 수식으로 나타내면 식 (6)과 같다.

$$\text{Min. } f_2 = C_p \times V \quad (6)$$

여기서  $V$ 는 각 브래킷의 부피이며 목적함수는  $f_2$ 라고 표기한다. 추가로 레이저 공정을 통한 가공방법에 대해 계산하여 프레스 공정과 비교하고자 한다. 레이저 공정에 대한 식은 (7)과 같다.

$$\left. \begin{aligned} C_{L/T} [\text{won/s}] &= \frac{(L_{out} + L_{in})}{1,800 \times 60} + N_h \times 5 \\ C_L [\text{won}] &= T \times C_{L/T} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

여기서  $N_h$ 는 홀의 개수,  $C_{L/T}$ 는 레이저 공정의 시간당 비용  $C_L$ 는 1개 당 레이저 공정에 해당하는 비용으로 표기한다. 앞서  $C_L$ 에 대한 식을 정의한 후 최종 제조 비용을 최소화하도록 하는 식은 (8)과 같으며 목적함수를  $f_2'$ 라고 표기한다.

$$\text{Min. } f_2' = C_L \times V \quad (8)$$

### 3.2 설계 변수

앞서 언급된 모든 해석과 식을 이용하여 브래킷의 제품 강도와 제조 비용을 정립하여 프레스 공정을 이용한 Case 0, 레이저 공정을 이용한 Case 1을 비교하고, 결론에 따라 Case 2 ~ 26, 총 27가지 Case의 브래킷에 대하여 비교하고자 한다. 따라서 설계 변수(Design variables)  $x_n$  ( $n = 1, 2$ )에 대하여 정리하였으며, 요인배치법을 적용하여 2요소, 5수준 총 25개의 모델 제작 및 각각 해석을 진행하고자 한다. 설계 변수는 [표 3]과 같다.



[표 3] 설계 변수

[Table 3] Design Variables

No. of Case	$x_1$	$x_2$	No. of Case	$x_1$	$x_2$
	No. of base [#]	$t$ [mm]		No. of base [#]	$t$ [mm]
0	0	3.00	14	3	2.00
1	0	3.00	15	3	1.75
2	1	2.50	16	3	1.50
3	1	2.25	17	4	2.50
4	1	2.00	18	4	2.25
5	1	1.75	19	4	2.00
6	1	1.50	20	4	1.75
7	2	2.50	21	4	1.50
8	2	2.25	22	5	2.50
9	2	2.00	23	5	2.25
10	2	1.75	24	5	2.00
11	2	1.50	25	5	1.75
12	3	2.50	26	5	1.50
13	3	2.25	-	-	-

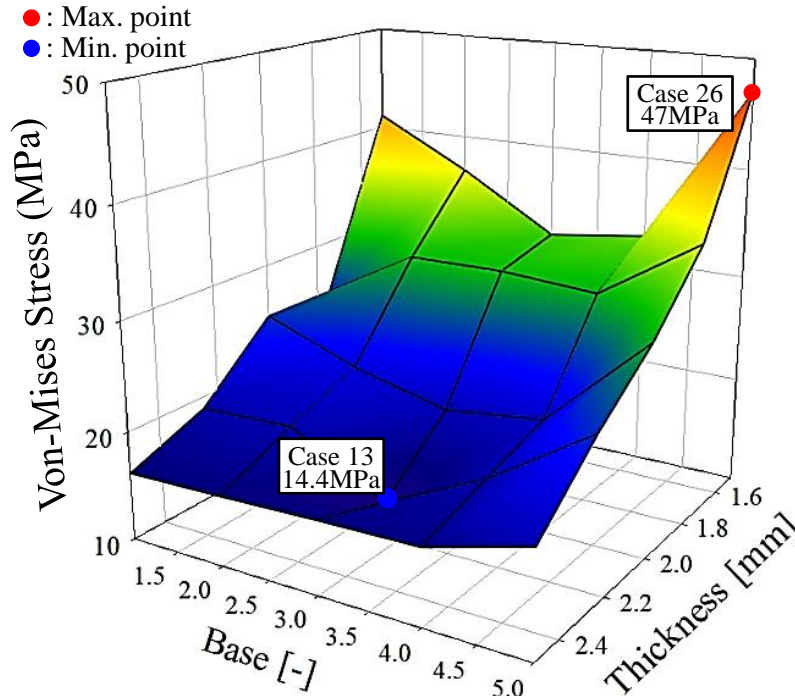
## 4. Case 별 브래킷의 제품 강도와 제조 비용 비교

### 4.1 브래킷의 경계조건

[표 3]에서 정리한 것과 같이 설계 변수에 따라서 Case 별 제품 강도를 확인하기 위해서 Case 0 브래킷 해석과 동일한 조건으로 구조 해석을 진행하였다. 이때 브래킷 상부 후면에 추가된 벽(Wall) 모델링은 강체(Rigid) 상태이며 Ground와 고정되어 있고 브래킷 모델과 Sliding 조건으로 접촉하고 있다. 즉, [그림 2]의 브래킷은 벽(Wall)과 접촉하여 yz면의 방향으로 움직이되 x축 방향으로 움직일 수 없는 경계조건이다. Mesh 크기는 벽과 브래킷의 연결부에 벽에는 1 mm, 브래킷의 모서리(Edge)는 해당 브래킷 t의 절반, 넓은 면은 브래킷의 t 만큼 메시를 생성하였고, 재료 또한 앞선 Case 0 해석과 마찬가지로 벽(Wall)은 Structural steel, S275N, Bracket은 SS400을 사용하였다.

### 4.2 해석 결과

다음으로 구조 해석을 통해 브래킷에 가해지는 Von-Mises 등가 응력 분포를 도출했다. 25가지 모든 해석에서 브래킷 하단부 중 볼트 헤드 부분과 리브 연결부에서 가장 큰 응력을 받고 있으며, 이에 대한 결과로써 [그림 7]에는 각 Base와 두께에 따른 Case 2 ~ 26 각각의 Von-Mises 등가 응력분포를 보여주고 있다. 추가로 [표 4]에는 자세한 해석 결과가 기술되어 있다. 해석 결과에 따르면 가장 안전성이 뛰어난 사례는 Case 13이며 기존 대비 부피 약 16% 상승, Von-Mises 등가 응력 약 3.4배 감소에 따른 안전율이 약 17, 기존 Case 0 대비 약 12 상승하였다.



[그림 7] 25가지 종류의 두께와 베이스 유형에 따른 Von-Mises 응력 분포

[Fig. 7] The Distribution of Von Mises stress according to Thickness and Type of base from 25 FEA Cases

[표 4] 두께 및 베이스에 따른 25개의 Von-Mises 값

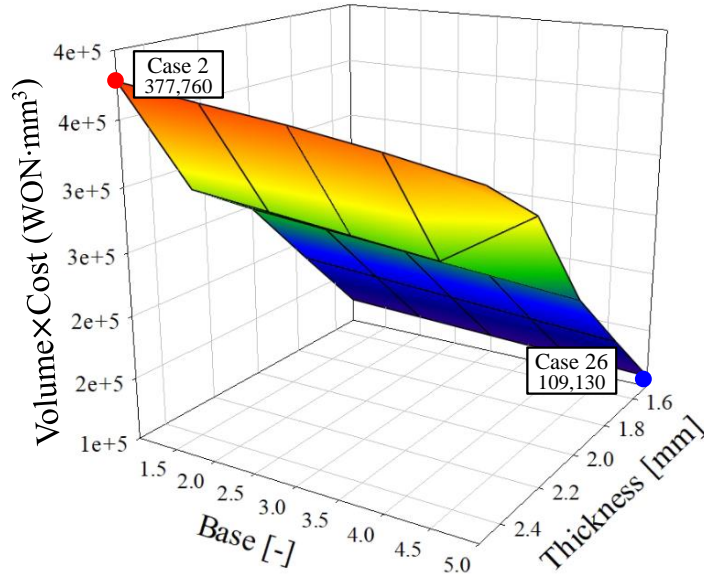
[Table 4] The FE Results of Von-Mises Stress for the Case 2 ~ 26

Thickness (mm)	Von-Mises stress (MPa)				
	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4	Base 5
2.50	Case 2: 16.2	Case 7: 16.4	Case 12: 16.7	Case 17: 16.9	Case 22: 19.5
2.25	Case 3: 18.9	Case 8: 19.2	Case 13: 14.4	Case 18: 18.8	Case 23: 24.9
2.00	Case 4: 25.0	Case 9: 21.7	Case 14: 19.5	Case 19: 20.6	Case 24: 29.4
1.75	Case 5: 24.9	Case 10: 29.9	Case 15: 30.0	Case 20: 29.4	Case 25: 35.4
1.50	Case 6: 41.2	Case 11: 36.6	Case 16: 31.3	Case 21: 32.5	Case 26: 47.0

### 4.3 브래킷 제조 비용 비교

먼저 Case 0 과 Case 1 을 비교하여 같은 형상을 가진 브래킷에 대하여 가공 방법에 따른 발생 비용을 비교하고자 한다. 프레스 공정은 선행 보고서를 참고하여 한 공정 당 50 원으로 가정한다[11]. 이때 Case 0 과 Case 1 의 브래킷 형상과 부피가 같아 식 (6)과 식 (8)을 통해 각각의 공정에서 브래킷 1 개 당 공정 가격을 계산할 수 있다. 공정가격을 비교하면 Case 0 는 개 당 약 7 원, Case 1 은 개 당 약 150 원, 약 21.4 배가 넘는 가격 차이가 발생한다. 따라서 제조 과정은 프레스 공정을 운영하는 것으로 결정하며 이때 [그림 5]를 통하여 알 수 있듯 리브가 추가된 Case 들은 모두 3 단계의 공정을 거치며 완성된다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 위 공정은 총 150 원을 할당하며, 식 (5)를 통해 확인한 200 ton 프레스를 운용한 각 케이스의 최대 생산량과 1 개 브래킷 당 제조 비용을 계산할 수 있었으며 이는 각각 두께가 2.5 mm 일 때 9 개, 17 Won 으로 시작하여 두께 1.5 mm 일 때 5 개, 30 Won, 두께가 줄어들수록, 개수는 줄어들고, 제조 비용은 인상되는

것을 확인하였다. 이때 브래킷 생산 시 소수점 이하의 단위를 사용할 수 없기 때문에 최대 생산량에서 소수점 이하의 숫자는 탈락시켰다. 이후 식 (6)을 이용하여 제조 비용과 부피를 곱한 값에 대하여 [그림 8] 및 [표 5]에 표기하였다.



[그림 8] 25가지 종류의 두께와 베이스 유형에 따른 Volume×Cost 분포

[Fig. 8.] The Distribution of Volume×Cost according to Thickness and Type of base from 25 FEA Cases

[표 5] 두께 및 베이스에 따른 25개의 Volume×Cost 값

[Table 5] Volume×Cost Values of 25 Case Brackets according to Thickness and Base

Thickness (mm)	Volume×Cost (Won·mm <sup>3</sup> )				
	Base 1	Base 2	Base 3	Base 4	Base 5
2.50	Case 2: 377,760	Case 7: 369,984	Case 12: 363,300	Case 17: 354,429	Case 22: 343,389
2.25	Case 3: 281,155	Case 8: 274,498	Case 13: 267,838	Case 18: 261,188	Case 23: 305,448
2.00	Case 4: 247,250	Case 9: 241,338	Case 14: 235,415	Case 19: 229,500	Case 24: 223,595
1.75	Case 5: 183,441	Case 10: 179,001	Case 15: 174,561	Case 20: 170,130	Case 25: 165,699
1.50	Case 6: 120,957	Case 11: 117,997	Case 16: 115,038	Case 21: 112,082	Case 26: 109,130

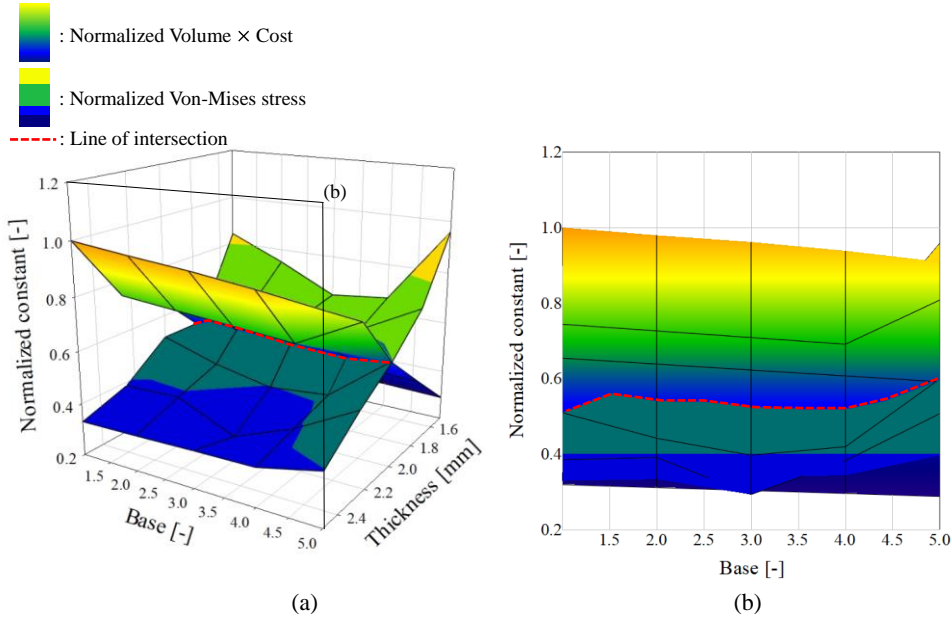
#### 4.4 브래킷 제품 강도, 제조 비용 정규화(Normalized constant) 상수 및 최종 케이스 선별

본 논문은 제품 강도와 제조 비용을 동시에 고려한 최종 케이스를 선별하고자 하기 때문에 2가지 항목을 동시에 고려하는 문제를 정식화하여 식 (9)와 같이 정의하고자 한다.

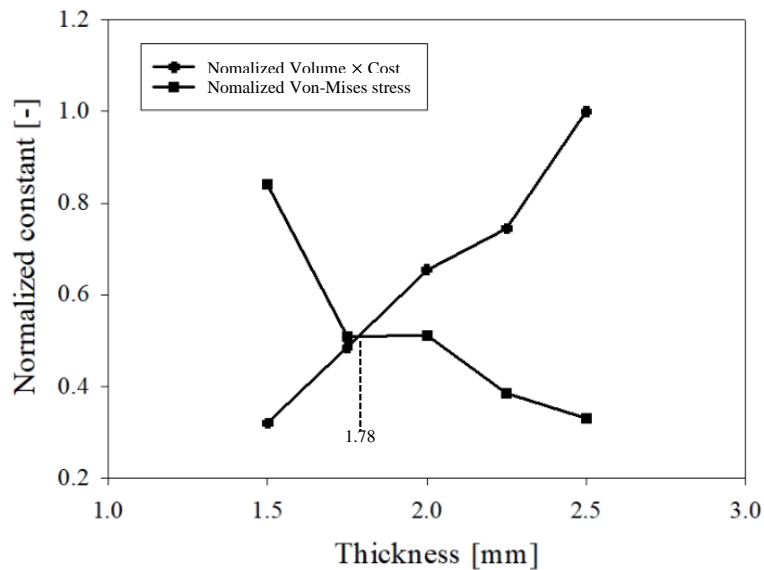
$$\left. \begin{aligned} & \text{Find } x_i, i = 1, 2 \\ & \text{to minimize } w_1 \times \frac{f_1}{s_1} + w_2 \times \frac{f_2}{s_2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

사용된 기호는 각각  $x_i$ 는  $i$  번째의 설계 변수,  $w$ 는 가중치(Weight factor) 그리고  $s$ 는 보정 계수(Scale factor)이다. [그림 9 (a)]는 Von-Mises 응력의 정규화 상수와 부피×제조

비용을 곱한 값의 정규화 상수를 비교한 3차원 그래프이다. 이때 [그림 9 (b)]에서 두 평면의 교선으로 Base가 1 일 때 0.5라는 가장 낮은 값의 상숫값을 가진다는 것을 확인하였다. 또한 [그림 10]은 Base가 1 일 때 두께 값에 따른 정규화된 상숫값을 나타내는 그래프이며 해당 그래프 내에서 Von-Mises 응력 값은 두께 값이 커질수록 작아지며, 부피×제조 비용 값은 두께 값이 커질수록 커지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 두 선이 교차하는 지점을 최대 두께로 정하였으며, 이때 두께 값은 1.78 mm이다.



[그림 9] (a) 두께 및 Base에 따른 정규화 상수 그래프, (b) 정규화 상수 그래프의 교선  
 [Fig. 9] (a) Normalization Constant Graph according to Thickness and Base, (b) Intersection of two Normalized Constant Planes

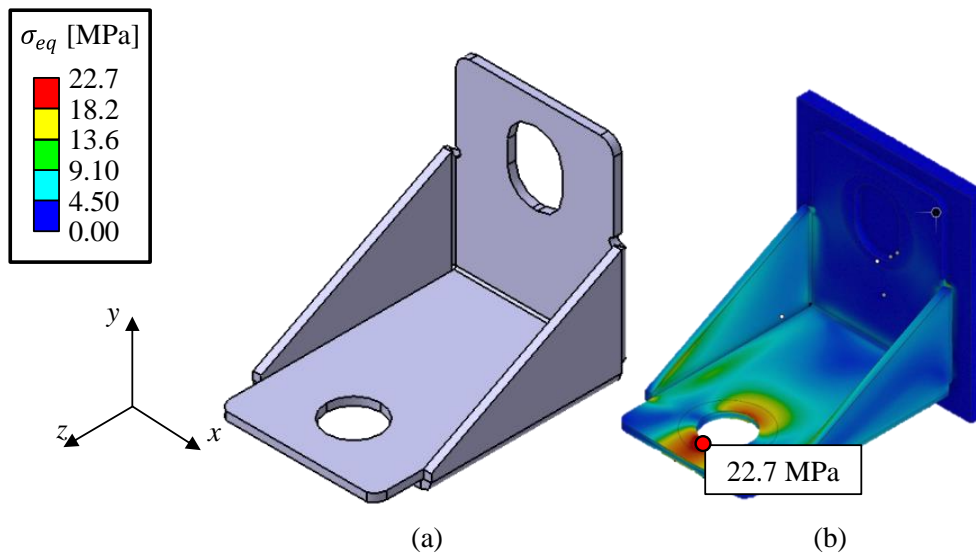


[그림 10] 정규화된 Von-Mises 응력과 표준화된 부피×비용 사이의 관계

[Fig. 10] Relationship between Normalized Von Mises Stress and Normalized Volume×cost at Base 1

#### 4.5 결과에 따른 최적화 브래킷 해석

[그림 10]을 통해 Base가 1이며 두께가 1.78 mm인 브래킷이 최적의 브래킷이라는 것을 특정하였다. 따라서 해당 리브 및 브래킷을 제작하여 Case 27이라 명명하였다. 따라서 앞선 Case 들과 같은 조건으로 해석을 진행할 경우 앞서 정규화된 응력, 정규화된 부피×제조 비용 값과 같은 0.5값을 가지는지 확인하였고 그 결과 Case 27의 브래킷 형상과 Von-Mises 응력 분포는 [그림 11]과 같다. Von-Mises 응력은 22.7 MPa, 정규화된 값은 0.46로 기존 0.50 대비 0.04 낮은 값을 보였다. 그리고 부피×제조 비용 값은 149,870 Won·mm<sup>3</sup>이며 정규화된 값은 0.48로 이 또한 기존 0.50 대비 0.2 낮은 값을 보였다. 이러한 오차는 이전 해석에서 두께 값의 세분화를 고려하지 않았기 때문에 발생한 것으로 판단된다. 추가로 기타 상세 값으로는 부피 8,422.54 mm<sup>3</sup>, 처짐량은 -Y 방향으로 0.02 mm이며, 이는 부피×제조 비용 값은 기존 대비 약 2.28배 상승하였지만 기존 처짐량 -Y 방향으로 0.343 mm 대비 17.15배가 개선되었다.



[그림 11] 사례 27 (a) 공정 후 브래킷 형상 (b) Von-Mises 응력의 최적화된 FE 결과

[Fig. 11] Case 27 (a) Bracket Shape after the Process (b) The Optimized FE Result of Von-Mises Stress

## 6. 결론

본 연구는 기존 산업용 브래킷의 두께와 추가된 리브의 형상을 최적화하였으며, Sheet Metal Modeling 기능으로 공작 과정을 설계함으로써 제조 비용 값은 2.28 배 상승하였지만 Von-Mises 응력 약 2.15배 이상 향상, 처짐량 -Y 방향으로 17.15배 개선됨을 확인하여 제품 강도와 제조 비용을 동시에 고려하는 새로운 박 형 브래킷과 설계 방법을 제시하였다.

(1) 상용화된 브래킷의 모델링으로 두께 3 mm, SS400의 브래킷과 Wall을 모델링 및 유한요소해석을 진행하였다. 이를 통해 안전율 5에 도달하게 되는 하중 값은 56 N으로 하중 기준을 정립하였다.

(2) 제품 강도와 제조 비용을 동시에 고려하는 No. of base, t 총 2개의 설계 변수를 설정하였고, 위 설계 변수를 기준으로 요인배치법을 적용했다. 2요소, 5수준 총 25가지 모델의 브래킷을 모델링 및 해석을 진행했으며 이를 통해 제품 강도와 제조 비용을 극대화하는 브래킷을 선별하였다.

(3) 앞서 정리한 해석 결과 정규화된 Von-Mises 응력과 정규화된 부피×제조 비용의 관계 속 교선을 통해 브래킷이 Base 1일 때 정규화된 상수의 최저점은 0.5이며 이를 만족시키는 t 값은  $t=1.78$  mm 임을 확인하였고, Base 1과 1.78 mm의 두께를 가지는 최종 모델을 제작하였으며 이를 Case 27으로 지정하였다.

(4) Case 27의 구조 해석을 진행하였으며, 구조 해석 및 제조 비용 계산 결과 부피×제조 비용은 기존 대비 2.74배 증가하였지만, Von-Mises 응력은 22.7 MPa으로 기존 49 MPa 대비 약 2.15배 이상 향상, 처짐량 또한 -Y 방향으로 0.02 mm로 기존 -Y 방향으로 0.343 mm 대비 17.15배 개선됨을 확인하여 제품 강도의 안전성과 제조 비용의 가성비를 동시에 고려하는 박 형 브래킷 모델을 제시하였다.

향후 심화된 논문에서는 브래킷 설계 중 설계 변수의 추가 및 민감도에 대한 변수를 확립하여 민감도에 따른 브래킷의 설계 변수를 변경해가며 부품에 대한 안전성 및 생산성에 대한 부분을 향상시키고자 한다.

## 7. 감사의 글

본 과제(결과물)는 2022년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다. (2021RIS-004)

## Reference

- [1] S. Y. Lee, Structural Analysis for Optimal Design of Anchor Bolts and Brackets for Fixing External Finishing Materials, Journal of Energy Engineering, (2020), Vol.29 No.3, pp.91-96.  
DOI: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2020.29.3.091>
- [2] D. H. Kim, H. D. Lee, J. H. Won, S. H. Jung, Investigation of Bracket Deflection Influence on Structural Safety of Scaffold System, Journal of the Korean Society of Safety, (2017), Vol.32, No.3, pp.66-73.  
DOI: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2017.32.3.66>
- [3] [http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx\\_cd=1143](http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1143), Jul 04 (2022)
- [4] <https://kr.misumiec.com/vona2/detail/110302706410/?searchFlow=results2products&KWSearch=%EB%B8%8C%EB%9D%BC%EC%BC%93>, Sept 01 (2022)
- [5] [http://ps-2.kev009.com/CATIA-B18/CATIAfr\\_C2/sheugCATIAfrs.htm](http://ps-2.kev009.com/CATIA-B18/CATIAfr_C2/sheugCATIAfrs.htm), Oct 02 (2007)
- [6] S. O. Kurashkin, D. V. Rogova, Y. A. Tynchenko, Simulation of the electron beam welding process of a bimetallic ring by means of ANSYS, Journal of Physics: Conference Series, (2021), 2094, 042092.  
Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2094/4/042092>
- [6] [http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx\\_cd=1143](http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1143), Jul 04 (2022)
- [7] T. Y. Ryu, S. M. Yang, H. M. Jang, J. B. Choi, K. C. Myung, D. Y. Lee and S. B. Choi, Study on Safety Design of Vertical-Type Heat Recovery Steam Generator Based on Large-Scale Analysis, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A (The Korean Society of Mechanical Engineers), (2012), Vol.36, No.12, pp.1535-1542.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.12.1535>
- [8] J. H. Hong, Structural frame analysis using domestic material (SS400, SM490, SWH400) according to the shape of

plant Modularization, Korean Society of Mechanical Technology, (2019), Vol.21, No.4, pp.736-741.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.17958/ksmt.21.4.201908.736>

- [9] S. Y. Lee, Structural Analysis for Optimal Design of Anchor Bolts and Brackets for Fixing External Finishing Materials, Journal of Energy Engineering(Korean Society for Energy), (2020), Vol.29, No.3, pp.91-96.  
DOI: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2020.29.3.091>
- [10] S. P. Lee, B. H. Min, K. Y. Lee, Y. J Ko, C. Kim and C. h. Kim, Progressive Process planning and die design to improve the formability in fine blanking of the lock plate in car seatbelt, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers (The Korean Society of Manufacturing Process Engineers), (2013), Vol.12, No.6, pp.84-92.  
DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2013.12.6.084>
- [11] <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO202100022222&dbt=TRKO&rn=>, Jul 27 (2021)