

# 냉연 초고강도강 적용 차량용 리어 크로스 멤버 형상 설계 변수 최적화

김준영<sup>1,2</sup>, 김상훈<sup>3</sup>, 최돈현<sup>4</sup>, 홍석무<sup>5,#</sup>

## Design Optimization of Automotive Rear Cross Member with Cold-rolled Ultra High Strength Steel

J. Y. Kim, S. H. Kim, D. H. Choi, and S. Hong

(Received January 31, 2024 / Revised February 19, 2024 / Accepted February 20, 2024)

### Abstract

With the increasing global interest in carbon neutrality, the automotive industry is also transitioning to the production of eco-friendly cars, specifically electric vehicles. In order to achieve comparable driving distances to internal combustion engine vehicles, the application of high-capacity battery packs has led to an increase in vehicle weight. To achieve light-weighting and durability requirements of automotive components simultaneously, there is a demand for research on the application of Ultra-High Strength Steel (UHSS). However, when manufacturing chassis components using UHSS, there are challenges related to fracture defects due to lower elongation compared to regular steel sheets, as well as spring-back issues caused by high tensile strength. In this study, a simulated specimen that is not affected by the property changes of four materials was designed to improve formability of the rear cross member, which is the most challenging automotive chassis component. The influence and correlation of material-specific variables were analyzed through finite element analysis (FEA) for each material with tensile strength of 440, 590, 780, and 980 MPa grades, resulting in the development of a predictive equation. To validate the equation, the simulated specimens of 980 MPa grade were produced from the test molds. Then the reliability of the FEA and predictive equation was verified with measured specimen data using a 3D scanner. The results of this study can be proposed to improve the formability of UHSS chassis components in future researches.

**Keywords** : Ultra-high strength steel (UHSS), Design variable, Rear cross member, Full factorial design, Formability

## 1. 서론

자동차 새시(chassis)는 차량 주행 중 노면으로부터 발생하는 충격을 흡수해 차체 강도를 보존하는 역할을 하는 부품이다. 또한, 조종 안정성 향상에 큰 영향을 미치기 때문에 새시 설계는 자동차 설계

단계에서 중요한 사항으로 고려된다. 새시는 크게 리어 크로스 멤버(rear cross member) 및 프론트 크로스 멤버(front cross member)로 구분되며, 차체(body)와 휠(wheel)을 연결하는 주요 부품이다. 그 중 리어 크로스 멤버의 구조는 Fig. 1과 같고 크게 NO.1 멤버, NO.2 멤버, 사이드 멤버(side member), 각종 부시(bush)류로 나눌 수 있다. 최근 자동차 산업에도 탄소 중립을 실현하기 위해 부품 경량화를 빠르게 적용하고 있다. 특히 차량에서 비교적 중량 비중이 높은 새시 부품의 경우, 연비 효율성 향상을 위한 경량화 및 높은 하중 조건을 만족하기 위한 초고강도강(Ultra-High Strength Steel, UHSS) 적용에 대한 많은

1. 공주대학교 기계공학과, 석사과정  
2. ㈜화신 기술연구소 선행연구팀, 주임연구원  
3. ㈜화신 기술연구소 선행연구팀, 책임연구원  
4. 현대모비스 금속재료셀, 책임연구원  
5. 공주대학교 미래자동차공학과, 그린카기술연구소 교수  
#Corresponding Author: Department of Future Automotive Engineering  
Kongju National University, E-mail: smhong@kongju.ac.kr,  
ORCID: 0000-0001-5569-6285

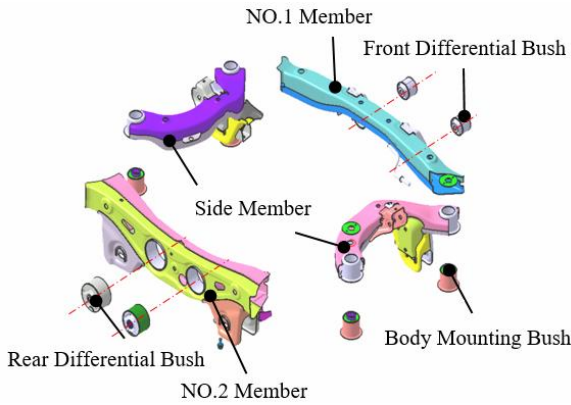


Fig. 1 Structure of rear cross member

연구 개발이 이루어지고 있다[1-5]. 그러나 초고강도강을 적용한 제품 생산 시, 기존 공정에 비해 보다 정밀한 기술이 요구되며 이에 따라 초고강도강을 적용한 효율적인 기술 개발이 이슈화되고 있다[6-8].

일반적으로 새시 부품 설계 전 파단 및 스프링백 (springback) 등과 같은 고질적인 품질 문제점 예상 부를 검토 후 설계에 반영하고 있지만, 경량화를 위해 소재 물성이 변경될 때마다 설계 담당자 관점에서 예상 문제부를 파악해야 하며 제품 설계의 신뢰성 확보에 많은 어려움을 겪고 있다.

때문에 본 연구에서는 리어 크로스 멤버 부품 중 성형성 확보가 어려운 NO.2 멤버를 대상으로 소재 물성 변경에 영향을 거의 받지 않는 최적 설계 예측식을 제안함으로써, 설계 담당자가 소재 물성 변경에 대한 영향을 고려하지 않더라도 예측식을 통해 설계 변수 최적화를 수행할 수 있도록 하는데 있다. NO.2 멤버에서 주로 결함이 발생하는 신장 플랜지 형상을 기반으로 모사시편을 설계하고 유한요소해석(finite element analysis, FEA)를 진행하고 설계 변수와 목적함수를 설정하였다. 최적에 근사한 성형 조건을 찾아내기 위해 완전요인 배치법에 따른 조건으로 440, 590, 780, 980 MPa급 소재에 대하여 각 물성별로 성형해석을 진행하였으며, 이후 성형해석 결과에 대한 분석을 통해 예측식을 개발하여 변수 최적화를 진행하였다.

최적화된 설계 변수를 적용한 시험 금형을 제작하여 최종적으로 980 MPa급 소재를 반영한 결과를 3D 스캐닝하여, 성형해석 및 회귀방정식 결과와 비교하였고 최적 설계에 대한 신뢰성 검증을 통해 추후 초고강도강을 적용한 새시 부품의 양산 적용 가능성을 확인하고자 하였다.

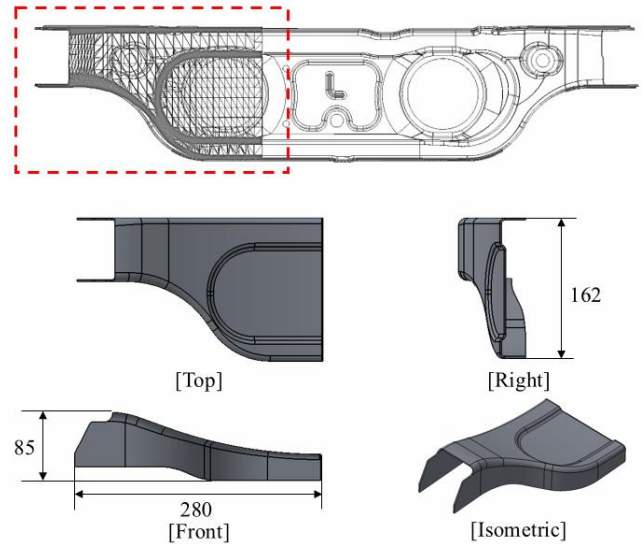


Fig. 2 Design simulated specimen of NO.2 member

## 2. 유한요소해석 및 실험계획법

### 2.1 모델링 및 해석 조건

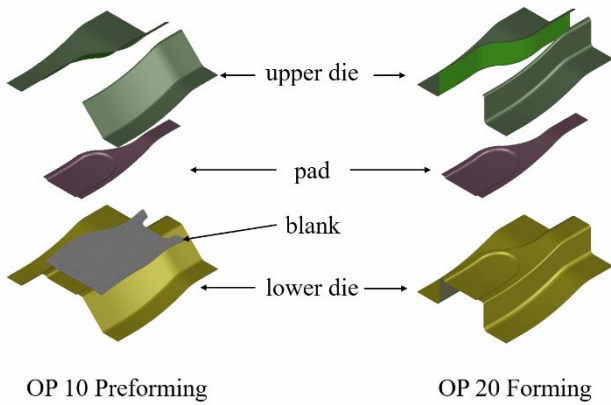
본 연구에서 선정한 NO.2 멤버 부품의 형상과 설계한 모사시편 모델링을 Fig. 2에 나타내었다. 점선으로 표시된 곳이 NO.2 멤버의 결함이 지속적으로 발생하는 부위다. 또한 시험금형 제작 비용 절감 및 신장 플랜지부 성형성 평가에 중점을 두어 다른 부위는 단순화하였다. 양산 조건을 고려하기 위해 초기 블랭크(blank) 형상을 확보하는 블랭킹(blanking), 상부 형상을 성형하고 측벽 플랜지부를 45° 성형하는 예비 포밍(preforming), 최종 형상으로 성형하는 포밍(forming) 공정 순으로 설정하였다.

### 2.2 유한요소해석

4개의 물성을 적용한 NO.2멤버의 성형성 판단을 위해 상용 유한요소해석 프로그램인 AutoForm R10을 사용하였으며[9, 10], 해석에 사용된 소재의 유동응력 곡선은 식 (1)의 swift model을 사용하였다.  $\sigma_f$ 는 유동응력,  $K$ 는 강도계수,  $\epsilon_0$ 는 초기 변형률,  $\epsilon$ 는 유효 변형률,  $n$ 은 가공경화지수,  $r_0$ 는 압연방향의 이방성계수이며, Table 1에 각 소재별 data를 나타내었다. 성형해석 결과의 정확도 향상을 위해 제품 형상에 대한 최소 요소 크기는 0.3 mm로 설정하였고, 이때 요소 개수는 7721개이며, 마찰계수는 0.15, 패드(pad) 하중은 29.4kN으로 적용하였다. Fig. 3에 공정별 유한요소 모델링을 나타내었으며, 하형금형(lower

**Table 1** Material properties of each material

Material	440 1.6t	590 1.6t	780 1.6t	980 1.6t
K (MPa)	823.6	995.5	1166	1550
n(-)	0.185	0.162	0.113	0.115
$\epsilon_0$ (-)	0.0083	0.0023	0.001	0.001
$r_0$	0.806	0.795	0.789	0.894



**Fig. 3** Finite element modeling for process OP10~OP20

die)은 고정되어 있는 상태에서 패드가 먼저 하강하여 상부 폼 형상을 성형시킴과 동시에 블랭크를 고정하는 역할을 하고, 상형 금형(upper die)이 하강하면서 측벽 플랜지부를 성형시킨다.

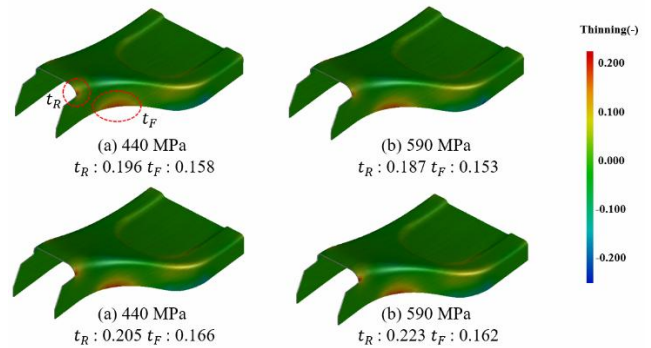
$$\sigma_f = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n \quad (1)$$

### 2.3 물성별 성형해석 결과

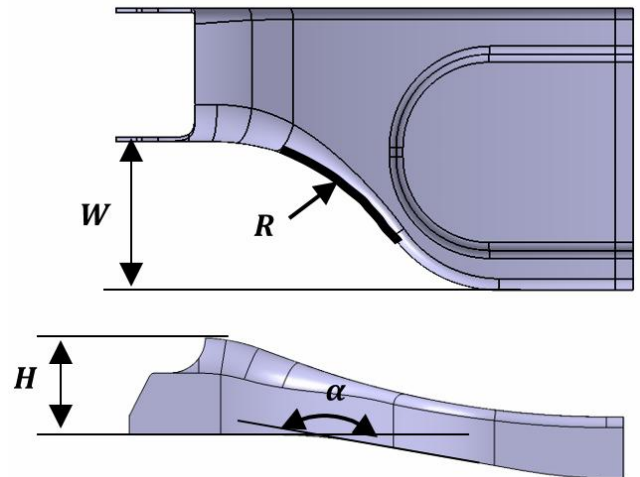
앞서 진행한 물성별 성형해석을 통해 각 해석에서 두께감소율 값을 도출하였으며, 이에 대한 결과를 Fig. 4에 도시하였다. NO.2 멤버의 어깨 R부 및 신장 플랜지부에서 두께감소율 값이 크게 분포하였으며, 이는 현재 양산 공정에서 생산 시 발생하는 결함부와 일치함을 확인하였다. 또한, 소재 물성 변경에도 결함부는 모두 동일하였다. 때문에 제품 형상을 재설계하여 어깨 R부 및 신장 플랜지부의 두께감소율 값을 낮추고자 한다.

### 2.4 최적설계

1대의 자동차를 제조하기 위해 약 2~3만개의 부품이 필요하며 각 부품들은 정해진 규격을 만족해야 제조 시 문제가 발생하지 않는다. 따라서 자동차



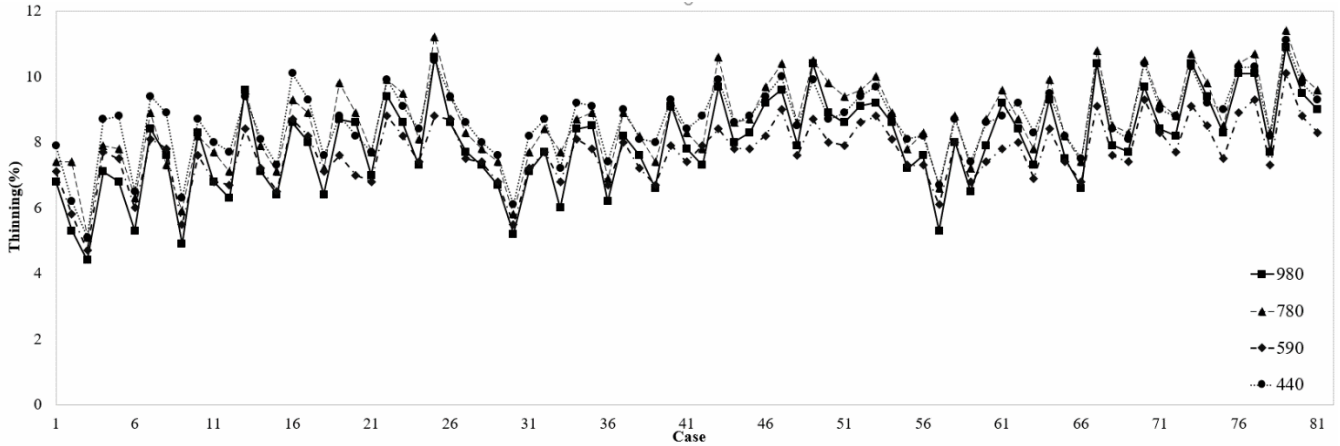
**Fig. 4** Comparison of thickness reduction(thinning) from FE results after metal forming: (a) 440 MPa~(d) 980 MPa



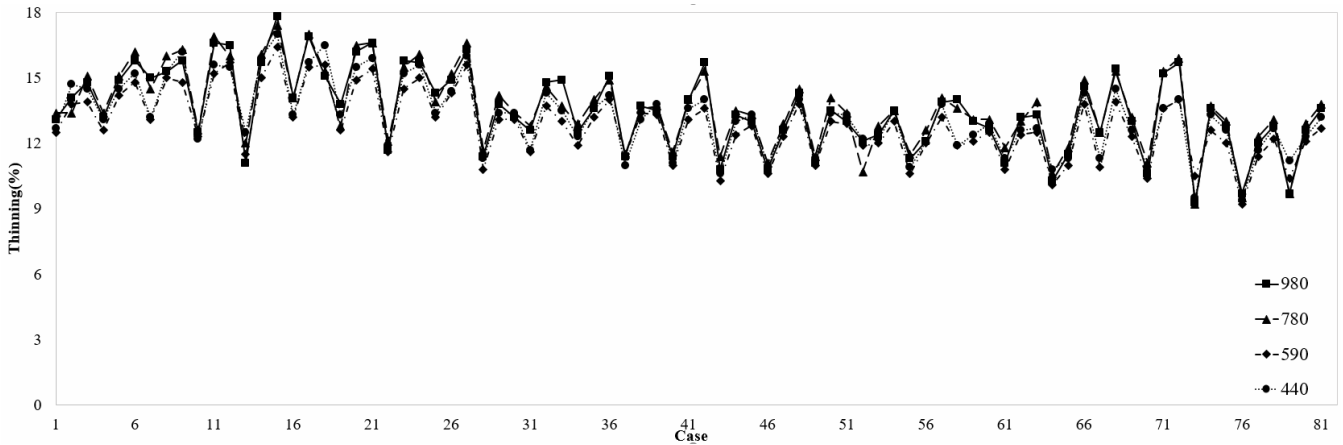
**Fig. 5** Design variables of simulated specimen

새시 부품 중 중요 요소인 리어 크로스 멤버의 경우, 자동차 설계 단계부터 차체와 휠을 연결하는 주요 부위의 형상 및 치수가 고정되며 다른 부품과의 간섭을 방지하기 위해 선정할 수 있는 설계 변수가 제한된다. 이를 고려하여 NO.2 멤버의 형상적 요소 중 4개를 설계 변수(design variables)로 선정하였다 (Fig. 5). 타 제품과의 체결성 확보 및 간섭 방지를 위해 설계 변수의 구속조건(constraints)을 설정하였으며 Table 2에 나타내었다.

Fig. 4에 도시한 어깨 R부 두께감소율( $t_R$ ) 및 신장 플랜지부 두께감소율( $t_F$ )의 최소화를 목적 함수(object function)로 설정하여 설계 변수가 목적 함수에 미치는 영향을 파악하였다. 또한 각 소재별 물성이 변경됨에 따라 두께감소율의 경향을 파악하기 위해 완전 요인 배치법(full factorial design)을 적용하여 각



(a)



(b)

Fig. 6 Comparison of thinning by each material properties: (a) Thinning of  $t_r$ ; (b) Thinning of  $t_f$

Table 2 Objective function and constraints

Object Function	Min $F(x) = t_r$
	Min $F(x) = t_f$
Constraints	$110 < \text{Profile } R, R \text{ (mm)} < 130$
	$51 < \text{Flange Height, } H \text{ (mm)} < 55$
	$76 < \text{Width, } W \text{ (mm)} < 80$
	$160 < \text{Trim line angle, } \alpha \text{ (}^\circ\text{)} < 170$

소재별로 4가지 요소 및 3수준으로 총 81회의 유한 요소해석을 실시하고(Table 3) 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 또한 상관분석을 활용한 민감도 분석을 통해 얻은 결과를 Tables 4-7에 나타내었다.  $t_r$ 에 대한 상관관계는  $H$ 가 가장 높고  $\alpha, R, W$  순서이다.  $t_f$ 의 경우  $\alpha, R$ 이 상대적으로 상관관계가 높으며  $H,$

$W$ 는 0에 수렴하는 수평적인 결과를 가진다. 440 MPa 급부터 980 MPa 급까지 상관분석 결과 경향이 대체로 비슷함을 확인하였다. 상관분석이란 두 개 이상의 변수에 대해 서로 상관되는 인자가 어떠한 관련성이 있고, 관련성에 대한 정도를 수치적으로 분석하는 것이다[11]. 상관분석은 변수가 관련된 정도에 초점을 맞춘 것이기에 회귀분석을 통한 예측식 개발에 상관분석에서 수치가 0에 수렴하는 변수들이 수학적 관계식에서는 사용될 수 있다.

### 3. 해석결과 분석 및 예측식 개발

#### 3.1 소재별 해석결과 분석

Fig. 6에 도시된 바와 같이 NO.2 멤버 성형해석 결과,  $t_r$  및  $t_f$  값이 소재 물성이 변경됨에도 불구하고

**Table 3 Full factorial design**

Case	Parameters				Case	Parameters				Case	Parameters			
	R	H	W	$\alpha$		R	H	W	$\alpha$		R	H	W	$\alpha$
1	110	51	76	160	28	120	51	76	160	55	130	51	76	160
2	110	51	76	165	29	120	51	76	165	56	130	51	76	165
3	110	51	76	170	30	120	51	76	170	57	130	51	76	170
4	110	51	78	160	31	120	51	78	160	58	130	51	78	160
5	110	51	78	165	32	120	51	78	165	59	130	51	78	165
6	110	51	78	170	33	120	51	78	170	60	130	51	78	170
7	110	51	80	160	34	120	51	80	160	61	130	51	80	160
8	110	51	80	165	35	120	51	80	165	62	130	51	80	165
9	110	51	80	170	36	120	51	80	170	63	130	51	80	170
10	110	53	76	160	37	120	53	76	160	64	130	53	76	160
11	110	53	76	165	38	120	53	76	165	65	130	53	76	165
12	110	53	76	170	39	120	53	76	170	66	130	53	76	170
13	110	53	78	160	40	120	53	78	160	67	130	53	78	160
14	110	53	78	165	41	120	53	78	165	68	130	53	78	165
15	110	53	78	170	42	120	53	78	170	69	130	53	78	170
16	110	53	80	160	43	120	53	80	160	70	130	53	80	160
17	110	53	80	165	44	120	53	80	165	71	130	53	80	165
18	110	53	80	170	45	120	53	80	170	72	130	53	80	170
19	110	55	76	160	46	120	55	76	160	73	130	55	76	160
20	110	55	76	165	47	120	55	76	165	74	130	55	76	165
21	110	55	76	170	48	120	55	76	170	75	130	55	76	170
22	110	55	78	160	49	120	55	78	160	76	130	55	78	160
23	110	55	78	165	50	120	55	78	165	77	130	55	78	165
24	110	55	78	170	51	120	55	78	170	78	130	55	78	170
25	110	55	80	160	52	120	55	80	160	79	130	55	80	160
26	110	55	80	165	53	120	55	80	165	80	130	55	80	165
27	110	55	80	170	54	120	55	80	170	81	130	55	80	170

**Table 4 Correlation analysis result (440 MPa)**

	R	H	W	$\alpha$	$t_R$	$t_F$
R	1					
H	0	1				
W	0	0	1			
$\alpha$	0	0	0	1		
$t_R$	0.237	0.525	0.358	-0.567	1	
$t_F$	-0.600	-0.064	0.078	0.636	-0.529	1

**Table 5 Correlation analysis result (590 MPa)**

	R	H	W	$\alpha$	$t_R$	$t_F$
R	1					
H	0	1				
W	0	0	1			
$\alpha$	0	0	0	1		
$t_R$	0.275	0.541	0.366	-0.557	1	
$t_F$	-0.599	-0.063	0.067	0.627	-0.516	1

**Table 6 Correlation analysis result (780 MPa)**

	R	H	W	$\alpha$	$t_R$	$t_F$
R	1					
H	0	1				
W	0	0	1			
$\alpha$	0	0	0	1		
$t_R$	0.292	0.619	0.263	-0.553	1	
$t_F$	-0.515	-0.129	0.100	0.609	-0.549	1

**Table 7 Correlation analysis result (980 MPa)**

	R	H	W	$\alpha$	$t_R$	$t_F$
R	1					
H	0	1				
W	0	0	1			
$\alpha$	0	0	0	1		
$t_R$	0.301	0.607	0.273	-0.569	1	
$t_F$	-0.524	-0.113	0.087	0.585	-0.562	1

하고 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이를 통해 기존 양산에 적용되는 440 MPa 급 소재부터 초고강도강인 980 MPa 급 소재까지 하나의 예측식 개발을 통해 NO.2 멤버의 설계 변수 최적화가 가능하다고 판단된다.

### 3.2 회귀분석을 통한 예측식 개발

회귀분석은 독립변수와 종속변수 간의 관계를 추정하는 통계적 방법이다[12]. 주로 독립변수가 종속변수에 미치는 영향을 확인하고자 사용하는 분석 방법으로 본 연구에서는 다중회귀분석을 사용하였다. 회귀방정식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.  $X$ 는 독립변수,  $Y$ 는 종속변수,  $\beta_0$ 는  $Y$ 절편,  $\beta_1 \sim \beta_k$ 는 각 독립변수 별 기울기를 나타낸다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k \quad (2)$$

회귀분석의 목표는 해석이나 실험을 통해 얻은 데이터를 분석하여 위 식의 상수 및 계수를 구하는 것이다. 각 소재별 해석 결과를 토대로 다중회귀분석을 시행한 결과, 식 (2)에서의 상수 및 계수를 얻었으며 이를 Table 8에 나타내었다.

**Table 8 Regression coefficient**

	Parameter	980	780	590	440	Average
$t_R$	$\beta_0$	-11.86	-10.03	-8.85	-7.54	-9.57
	$\beta_R$	0.05	0.05	0.03	0.03	0.04
	$\beta_H$	0.52	0.48	0.31	0.35	0.42
	$\beta_W$	0.23	0.21	0.21	0.24	0.22
	$\beta_\alpha$	-0.20	-0.17	-0.13	-0.15	-0.16
$t_F$	$\beta_0$	-16.95	-18.33	-14.47	-17.16	-16.73
	$\beta_R$	-0.12	-0.11	-0.11	-0.12	-0.12
	$\beta_\alpha$	0.27	0.27	0.24	0.26	0.26

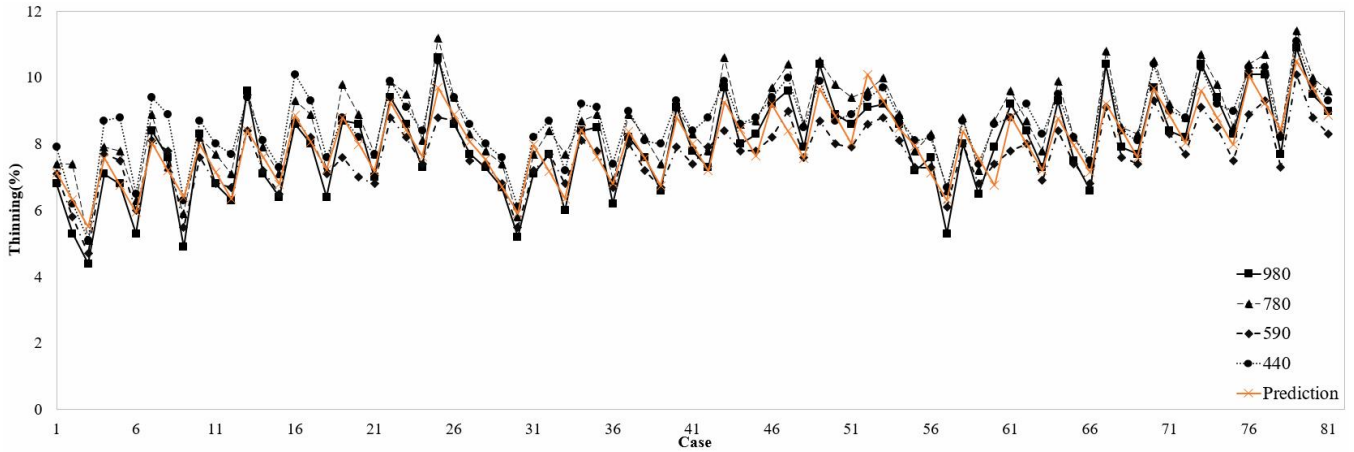
본 연구의 목표는 소재 물성 변경에 영향을 거의 받지 않는 최적설계 예측식을 제안하는 것이다. 이를 위해 소재별 회귀분석을 통해 얻은 상수 및 계수의 평균값을 도출하여  $t_R$  및  $t_F$ 의 예측식을 개발하였으며 식 (3)과 식 (4)에 나타내었다.  $t_F$ 에 대한 예측식에서 H, W에 대한 p-값이 0.05 이상으로 예측식에서 제외하였다.

$$t_R = 0.04X_R + 0.42X_H + 0.22X_W - 0.16X_\alpha - 9.57 \quad (3)$$

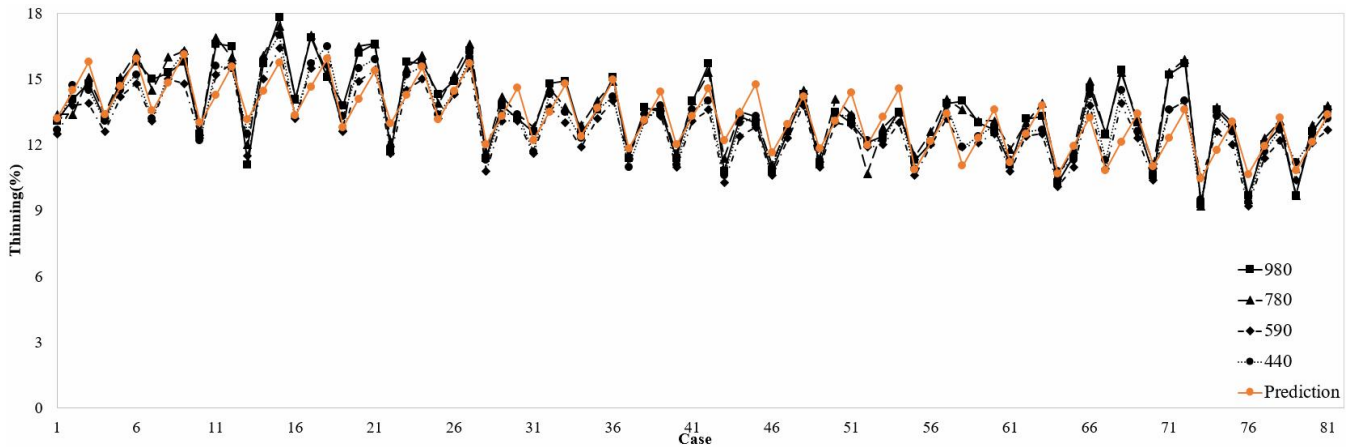
$$t_F = -0.12X_R + 0.26X_\alpha - 15.9 \quad (4)$$

Fig. 7에 식 (3), (4)를 적용한 예측값과 성형해석에서 나온 두께감소율 값을 도시하였다. 예측식에서 얻은 두께감소율 값이 대체로 비슷한 것을 확인하였다. 앞서 Table 8에 나타낸 소재별 예측식 타당성을 확인하고자 조정된 결정계수(adjusted coefficient of determination,  $R^2_{adj}$ )를 사용했으며 Table 9에 나타내었다.

결정계수는 0에서 1까지의 값으로 표현되며, 1에 근접할수록 예측 함수의 결과가 유효함을 뜻한다. 각 소재별 예측 함수의 조정된 결정계수는 0.61~0.85로 상대적으로 예측 함수의 신뢰성이 낮게 나왔다. 이는 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 예측식과 성형해석 결과 차이가 최대 3%로 비교적 크게 느껴질 수 있지만, NO.2 멤버의 경우 두께가 1.6 mm로 두께감소율 3% 차이는 두께 약 0.05 mm로 무시가 가능하며 예측값이 해석 데이터와 거의 유사하기에 개발한 예측식의 활용이 가능하다고 판단된다. 개발한 예측식을 활용하여 최소 두께감소율을 갖는 최적값을 도출해보니



(a)



(b)

Fig. 7 Comparison of thinning by each material properties: (a) Thinning of  $t_R$ ; (b) Thinning of  $t_F$

Table 9 Adjusted coefficient of determination

	440	590	780	980
$t_R$	0.77	0.80	0.83	0.85
$t_F$	0.76	0.74	0.63	0.61

프로파일 R부가 130 mm, 플랜지부 높이가 55 mm, 제품 폭이 76 mm, 트림 외곽라인 각도가 160° 일 때  $t_R$  두께감소율은 9.61%,  $t_F$  두께감소율은 10.47%로 예측되었다. 예측식에서 얻은 최적 설계 변수를 적용한 성형해석을 시행하였으며 예측식 값과 비교하였다.  $t_R$  두께감소율은 최대오차 1.09%,  $t_F$  두께감소율은 최대오차 1.17%로 성형해석의 오차 수준 및 현장에서의 허용범위(신장 플랜지부 끝단 기준 최대 5% 이내) 등을 감안하면 예측값과 성형해석 데이터가 거의

유사하게 나타난 것으로 판단된다. 앞서 얻은 예측값을 적용한 시험금형을 제작하고, 최종적으로 초고강도강인 980 MPa급 소재로 시편을 제작하여 본 연구의 타당성을 검증하고자 한다.

#### 4. 시편 제작 및 검증

##### 4.1 시험금형 및 시편 제작

회귀분석을 통해 얻은 공정 변수를 적용하여 시험금형을 제작하였다. 성형해석 조건과 동일하게 패드 압력과 스트로크(stroke) 등을 고려하여 시험금형을 설계하였으며, 추후 양산 공정 적용 가능성을 고려하여 양산 금형과 동일한 사양의 재질 적용 및 열처리 등을 거쳐 제작하였다. 완성된 금형 및 공정별 제품 사진을 Fig. 8에 나타내었다.

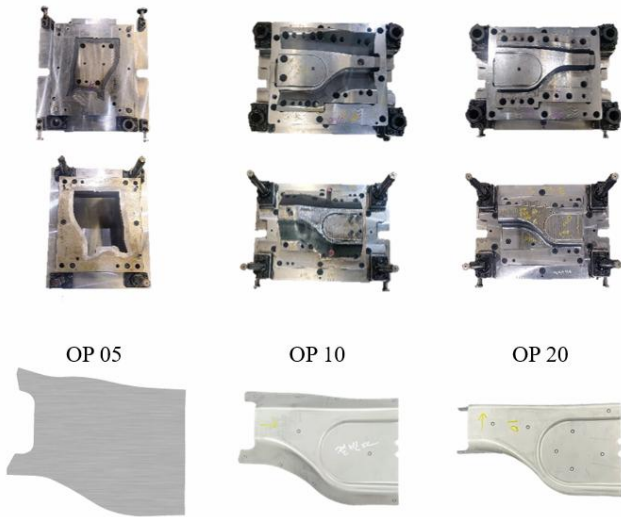


Fig. 8 Stamping dies and deformed specimens after forming from OP05 to OP20

#### 4.2 모사 시편 측정 및 결과 비교

어깨 R부 및 신장 플랜지부의 두께감소율을 정량적으로 비교하기 위하여 3차원 광학식 스캐너인 ATOS Q 12M 장비를 활용하여 제작된 모사 시편을 스캔하였다[13, 14]. 시편 두께감소율의 반복성 획득을 위해 100개의 시편을 제작하였으며 그 중 10개 시편에 대해 스캐닝을 실시하였다.

제품 Data와 3D 스캐닝 메쉬의 정확한 얼라인먼트(Alignment)를 위해 시편의 끝단부에 반원 타입으로 블랭크 윤곽을 적용하여 X, Y축을 규제하였고, Z는 3점을 적용하였다. 측정된 10개 시편의 두께감소율 차이는 약 0.3% 정도로 측정 장비 오차 범위 안쪽이었다. 측정된 스캔 데이터를 ATOS Professional 2021 프로그램을 사용하여 3D CAD 데이터와 비교 검증하였다(Fig. 9). Fig. 10과 같이 어깨R부 두께감소율의 경우 성형해석에서 얻은 결과값과 측정된 데이터값의 차이가 0.9%, 신장 플랜지부 두께감소율의 경우 약 1.2%의 차이를 보였으며 이를 통해 회귀 방정식 적용을 통한 설계 가이드의 제작이 가능하다고 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 선정된 리어 크로스 멤버 부품에 한하여 440 MPa 급부터 980 MPa 급 소재 물성 변경에 영향을 거의 받지 않는 설계 변수 최적화를 진행하여 예측식을 개발하였으며, 성형해석 및 시편

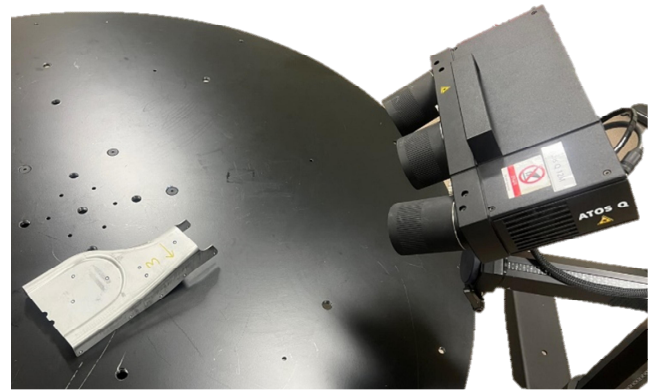


Fig. 9 3D measurement by 3D scanner after stamping

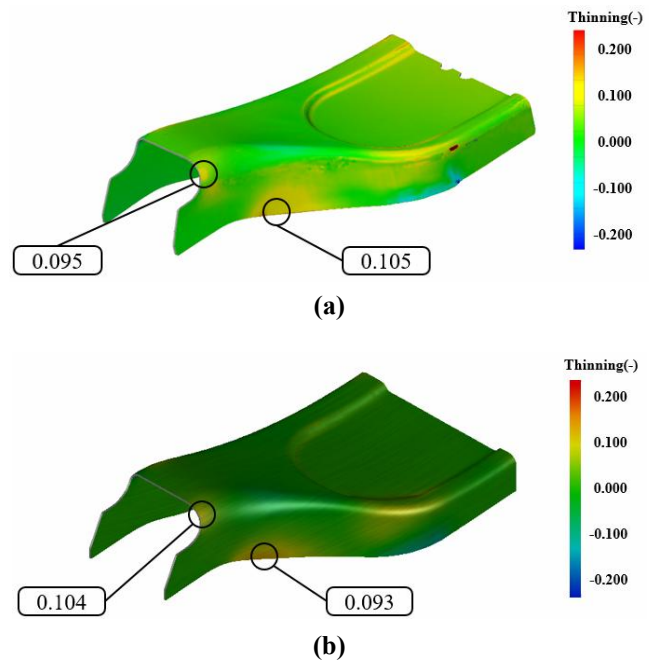


Fig. 10 Comparison of thinning between the result from: (a) simulation result; (b) 3D scanning result

제작을 통해 두께감소율 최적화에 대한 신뢰성 검증을 진행하였다. 본 연구에서 수행한 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 선정된 4개의 설계 변수와 2개의 반응에 대한 완전요인 배치법을 기준으로 각 소재 물성을 적용한 성형해석을 수행하였다. 또한 민감도 해석을 통해 설계 변수와 목적 함수간의 영향을 파악하였다.

(2) 성형해석 데이터 분석 결과, 결함이 발생하는 어깨 R부 두께감소율( $t_r$ ) 및 신장 플랜지부 두께감소율( $t_f$ )이 소재 물성 변경에 영향을 받지 않고 유



사한 것을 확인하였다. 이를 통해 440~980 MPa급의 물성 변경에도 영향을 받지 않는 예측식 개발이 가능함을 확인하였다.

(3) 회귀분석을 통해 두께감소율에 대한 설계 변수 최적화를 실시하고, 최적화된 조건으로 성형해석 및 시편 제작을 진행하여 그 결과를 비교하였으며, 두께감소율이 거의 유사함을 확인하였다.

(4) 본 연구에서 제안하는 설계 변수 최적화 방법을 바탕으로 추후 이방성 및 스프링백을 고려하여 적용한다면 보다 효율적인 제품 설계 및 우수한 품질의 제품 생산이 가능할 것으로 기대된다.

## REFERENCES

- [1] S. S. Han, H. Y. Lee, 2022, Study on Stretch Flangeability Test Method with Straight Shear Line Specimen, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 31, No. 1, pp. 23~28, <http://doi.org/10.5228/KSTP.2022.31.1.23>
- [2] D. H. Park, H. H. Kwon, 2016, Development of Automotive Seat Rail Parts for Improving Shape Fixability of Ultra High Strength Steel of 980MPa, *J. Kor. Soc. Manuf. Process Eng.*, Vol. 15, No. 5, pp. 137~144, <http://doi.org/10.14775/ksmpe.2016.15.5.137>
- [3] C. M. Lee, J. H. Kim, W. J. Oh, B. H. Ryu, 2017, A Study on the Analysis for Upper Seat Track of Automobile Using 1180 MPa Ultra-High Strength Steel, *J. Kor. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 34, No. 8, pp. 525~531, <https://doi.org/10.7736/KSPE.2017.34.8.525>
- [4] D. H. Park, Y. H. Tak, H. H. Kwon, 2018, Process Design of Automobile Seat Rail Lower Parts using Ultra-High Strength, DP980 Steel, *J. Kor. Soc. Manuf. Process Eng.*, Vol. 15, No. 5, pp. 137~144, <http://doi.org/10.14775/ksmpe.2018.17.2.160>
- [5] J. S. Kang, M. H. Song, J. Y. Lim, 2017, A Preliminary Study on the Structural Performance of the Bumper-Beams for High-Strength Steel Applications, *J. Kor. Acad. Ind. Coop. Soc.*, Vol. 18, No. 6, pp. 78~84, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.6.78>
- [6] S. H. Kim, D. T. Do, J. K. Park, and Y. S. Kim, 2021, Study on the Optimization of Parameters for Burring Process Using 980MPa Hot-rolled Thick Sheet Metal, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 30, No. 6, pp. 291~300, <https://doi.org/10.5228/KSTP.2021.30.6.291>
- [7] S. H. Cha, S. K. Lee, D. C. Ko, B. M. Kim, 2009, A Study on the Forming of Automotive Front Side Member Part with Ultra High Strength Steel of DP980, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 18, No. 1, pp. 39~44, <https://doi.org/10.5228/KSPP.2009.18.1.039>
- [8] Y. S. Lee, J. Y. Kim, J. S. Kang, and S. Hong, "Multiple Regression Analysis for Piercing Punch Profile Optimization to Prevent Tearing During Tee Pipe Burring," *Trans. Mater. Process.*, Vol. 26, No. 5, pp. 271~276, <https://doi.org/10.5228/KSTP.2017.26.5.271>
- [9] G. H. Bae, 2021, Spring-back Improvement According to the Shape Bead Arrangement of Cabin Sunroof in Construction Equipment, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 30, No. 2, pp. 69~73, <https://doi.org/10.5228/KSTP.2021.30.2.69>
- [10] G. B. Bang, H. S. Seong, H. S. Kwak, C. Kim, 2017, A Study on Stamping of the Center Pillar (High-Strength Steel-780MPa) Using Finite Element Analysis, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 26, No. 2, pp. 87~94, <https://doi.org/10.5228/KSTP.2017.26.2.87>
- [11] E. S. Kim, J. M. Lee, B. M. Kim, 2008, Selection of the Optimum Seaming Condition for Spin Drum Using Statistical Method, *J. Kor. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 25, No. 1, pp. 99~107.
- [12] R. H. Myers, 2009, *Response Surface Methodology Process and Product Optimization using Designed Experiments*, Third Ed., John Wiley & Sons, New Jersey, pp. 13~62.
- [13] S. H. Kwon, H. S. Lee, Y. S. Lee, S. W. Kim, C. Y. Jung, S. Hong, 2016, Compensation Design to Reduce Springback in Sheet Metal Forming of 1.2GPa Ultra High Strength Steel, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 25, No. 5, pp. 301~305, <https://doi.org/10.5228/KSTP.2016.25.5.301>
- [14] S. M. Hong, J. H. Hwang, 2014, Bead Optimization to Reduce Springback of Sheet Metal Forming using High Strength Steel, *J. Kor. Soc. Manuf. Technol. Eng.*, Vol. 23, No. 4., pp. 350~354, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2014.23.4.350>