

용접 판재 유압 성형을 적용한 승용차용 서브프레임 설계

박영배* · 김현영** · 전병희***·오수익*

Design of Automobile Subframe for Applying Welded Blanks Hydroforming

Y. B. Park, H. Y. Kim, B. H. Jeon and S. I. Oh

Abstract

As the demands for lightweight construction and precision grow, there is an increasing interest on hydroforming technology. This paper deals with designing automobile subframe for applying welded blanks hydroforming. In applying welded blanks hydroforming to automobile subframe, it is a serious problem that blanks wrinkle in deformed shape. To suppress wrinklings in blanks, the sections of the die where blanks wrinkled is modified. In addition to this, it is intended that the sum of thickness variation about wrinkling regions be minimized. For this purpose, parameters for influencing formability are selected and evaluated using orthogonal array. Among these parameters, parameters having a major effect on formability are selected again. Using CCD(central composite design) with the selected parameters, response surface is build up and optimal design is performed.

Key Words : Hydroforming, Design of Experiment, Subframe, Response Surface Method, CCD

1. 서 론

최근에 자동차 업계가 직면하고 있는 경량화 및 고품질 확보에 대한 사회적 욕구를 만족시키면서 가격 경쟁력이 있는 자동차를 생산하기 위한 기술로서 유압 성형 기술은 미국, 일본과 같은 선진국을 중심으로 널리 사용되기 시작하고 있고, 최근 몇 년간 유압 성형에 있어서 많은 발전이 있었다.⁽¹⁾ 유압 성형 기술은 자동차에 들어가는 여러 가지 부재(cross member, subframe, pillar 등)에 적용할 수 있는 방법이며 기존의 스탬핑 공정에 비하여 많은 장점을 가지고 있다. 유압 성형 공정에서는

기존의 스탬핑 공정에서 소재를 성형하기 위해 필요한 공정수나 부품의 개수를 크게 줄일 수 있다.^{(2),(3)} 또한 이로 인하여 생산비를 감소시킬 수 있으며 생산시간을 단축할 수 있으므로 경제적이다. 유압 성형 기술은 크게 관재(tube)를 이용한 유압 성형과 용접 판재를 이용한 유압 성형으로 나눌 수 있다. 관재 유압 성형 공정은 단면이 원형인 튜브를 최종 형상의 중심선을 따라 굽힌 후 금형 내에서 튜브의 내부에 유체를 채워 내압을 가함으로써 튜브를 확장시켜 원하는 형상을 얻는 공정이며, 용접 판재 유압 성형 공정은 두 개의 판재를 용접한 후 판재 사이에 유체를 채워 내압을 가함으로써 원하는 형상

* 서울대학교 기계항공공학부

** 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부

*** 인덕대학교 기계설계과

을 얻는 공정이다. 판재 유압 성형의 경우 많은 연구가 진행되어 왔으며 기존의 스탬핑으로 생산된 자동차의 여러 부품들이 판재 유압 성형으로 생산된 부품으로 대체되고 있다.^{(4),(6)} 그러나 용접 판재 유압 성형의 경우 판재 유압 성형에 비하여 진행된 연구가 많이 없는 것이 사실이다. 이는 유압 성형을 이용하여 대체하려는 부품들이 단면 형상이 비교적 작고 단순하며 길이가 긴 부품들이었으므로 판재 유압 성형을 적용하기 용이하였기 때문이다. 또한 용접 판재 유압 성형의 경우 예비 형상으로 소재를 제작하고 용접해야 하므로 판재 유압 성형에 비하여 시간과 비용이 더 들기 때문이다. 그러나 단면 형상이 복잡한 경우에는 판재 유압 성형을 적용할 경우 판재의 성형 한계를 넘어 원하는 형상의 제품을 얻기가 힘들다.⁽⁶⁾ 이러한 경우 용접 판재 유압 성형이 대안이 될 수 있다.⁽¹⁷⁾ 본 연구에서는 용접 판재를 이용한 유압 성형시 발생하는 문제점을 분석하고, 실제 승용차용 부품에 적용하기 위한 설계 변수와 설계 변수의 최적화된 값을 제시하고자 한다. 이를 위한 부품으로 승용차용 서브프레임을 선택하였다.

에서 성형한 서브프레임을 보여준다. Fig. 2에서 보이듯이 서브프레임의 단차가 있는 네 부분에 소재에 접힘이 발생하였다. 본 연구에서는 용접 판재 유압 성형을 서브프레임에 적용할 경우 나타나는 소재의 접힘을 막고 그 부위의 두께의 편차를 줄이고자 한다. 서브프레임의 구조가 좌우 대칭이므로 왼쪽 부재를 설계 대상 영역으로 고려하였다.

2. 승용차용 서브프레임의 설계

2.1 용접 판재 유압 성형을 서브프레임에 적용할 경우 발생하는 문제점

용접 판재 유압 성형을 적용할 서브프레임은 국내자동차사의 양산차량을 대상으로 연구를 수행하였다. 유압 성형을 위하여 초기에 설계한 서브프레임의 FE모델을 세이딩하여 Fig. 1에 나타내었으며 물성치 및 성형조건을 Table 1에 나타내었다. Fig. 2에서는 초기 설계 금형

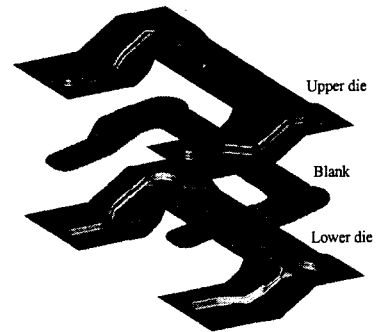
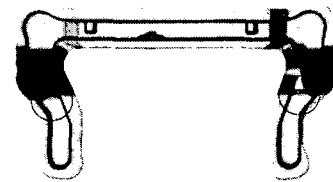


Fig. 1 FE model of subframe for hydroforming analysis

Table 1 Material properties and analysis condition

Density [kg/mm ³]	7.8E-06
Young's modulus [MPa]	206E+03
Poisson's ratio	0.3
Yield strength [MPa]	276.91
K [MPa]	629.6
n	0.184
ϵ_0	0.002
Upper blank thickness	2.6
Lower blank thickness	2.3
Flow rate[mm ³ /msec]	300,000
Die closing velocity[m/sec]	5



(a) Top view



(b) Rear view

Fig. 2 Wrinklings in deformed shapes

2.2 설계 변수

2.2.1 접합 발생 억제를 위한 설계 변수

용접 판재 유압 성형시에 접합이 발생하는 이유는 다음과 같다. 첫 번째로는 Fig. 2(b)의 A-A' 단면에서 소재와 금형을 살펴보았을 때 하부소재의 길이가 하부 금형의 길이보다 길기 때문이다. 그러므로 유압이 생길 경우 소재의 한 부분은 금형과 접촉하지 못하게 되며 이 부분의 소재가 접합을 유발하게 된다. A-A' 단면에서의 성형 과정을 Fig. 3에 나타내었다. 두 번째로는 초기 소재의 위치로 인한 압축력의 발생이다. 단차가 있는 부분에서 금형 분할면이 중간에 위치할 경우 소재 또한 금형이 닫히고 난 후 중간에 위치하게 된다. 이와 같이 단차가 있는 부분에서 소재가 중간 부분에 위치하게 된다면 Fig. 3(c)에서 보이듯이 A, C 부분이 먼저 팽창하면서 B 부분에 압축력을 가하게 되어서 소재의 접합을 유발하게 된다. 종합하면 접합 발생을 억제하기 위해서는 소재와 금형과의 접촉길이의 차를 없애야 하며 B 부분에 걸리는 압축력을 제어해야 한다. 이를 위해서 다음과 같은 설계를 하였다. 첫 번째 원인을 제거하기 위하여 소재에 부가적인 변형을 가하였다. 소재의 접합이 발생하는 단차가 있는 부분에 일종의 비드 형상을 주었다. Fig. 4에 금형 수정 전후의 B-B' 단면의 변화를 나타내었다. 비드 형상의 폭과 높이를 조절하여 금형의 접촉길이를 길게 하였다. 이 경우 하부 금형의 길이가 길어져 하부소재가 모두 접촉할 수 있게 된다. 두 번째 원인을 제거하기 위하여 소재의 초기 위치를 조절하였다. 유압이 생길 경우 A와 C부분의 팽창이 너무 크지 않다면 B 부분에 걸리는 압축력도 약해질 것이다. 그러므로 초기 소재의 위치를 하부 금형쪽으로 내린다면 A와 C부분의 과도한 팽창을 막을 수 있고 압축력이 약해져 접합 발생을 억제할 수 있다. 초기 소재의 위치는 금형 분할면의 이동으로 조절할 수 있다. 금형 분할면의 이동 방향과 범위를 Fig. 5에 나타내었다. 주의할 점은 금형 분할면이 이동하면 상부 판재와 하부 판재의 내부 접촉 길이의 차가 발생하게 된다. 이는 하부 판재에는 접합을 유발할 수 있고 상부 판재에는 용접부의 전단력을 증가시켜 용접부를 파단시킬 수 있다. 그러므로 금형 분할면을 이동하는 부분은 그 부분의 금형 형상의 변화를 주어 내부 접촉 길이차를 없애야 한다. 본 연구에서는 Fig. 4에 제시하였던 단면 형상의 변화로 내부 접촉 길이차를 없게 하였다. 결국, 금형 단면의 수정과 금형 분할면의 이동은 동시에 이루어져야 한다. 이상의 설계 변수를 Table 2에 나타내었으며 여러번의 해석을 시도하여서 접합을 억제할 수 있는 설계 영역을 제시하였다. 금형 수정 후 접합 발생을 없앤

서브프레임의 형상을 Fig. 6에 나타내었다.

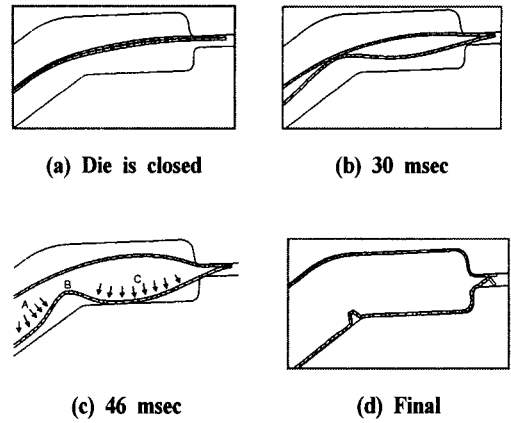


Fig. 3 Blank shape in each forming stage

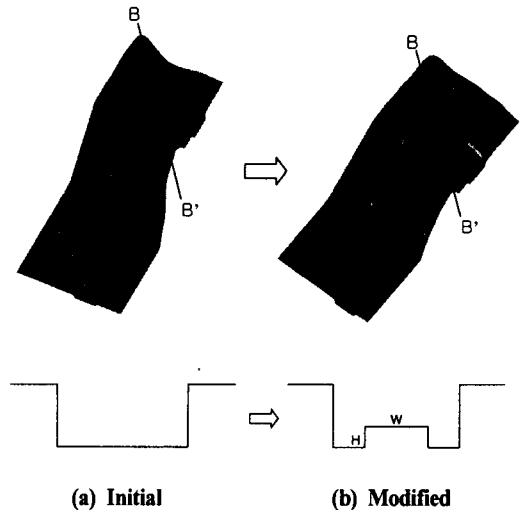


Fig. 4 Modification of section B-B'

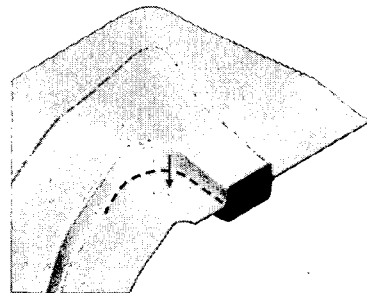
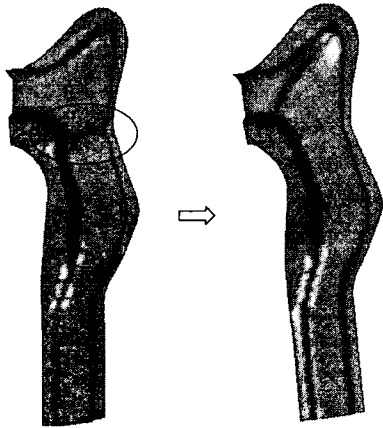


Fig. 5 Movement of parting line



(a) Initial (b) Suppressed

Fig. 6 Suppressed wrinkling in deformed shape

2.2.2 두께 편차의 최소화를 위한 설계 변수

위의 설계 변수를 통하여 서브프레임에 발생하는 접힘을 억제할 수 있었다. 다음으로 접힘을 억제하는 범위 내에서 소재의 두께에 영향을 주는 다른 인자를 설계 변수로 선정하여 앞 장의 설계변수와 함께 설계 영역의 두께 편차를 최소화하고자 한다. 선정된 변수는 블랭크 홀딩력과 유압 성형이 시작되는 시간이다. 기본적으로 용접 판재 유압 성형도 판재 성형 공정의 하나이다. 그러므로 블랭크 홀딩력을 통하여 소재의 유입을 조절할 수 있으며 이는 소재의 두께에 영향을 끼친다. 또 유압 성형의 관점에서 유압 성형이 시작되는 시간을 변수로 선정하였다. 즉, 상부 금형이 움직이는 중간에 유체를 불러 넣어 줄 것인지 상부 금형이 하부 금형과 맞물려 완전히 닫힌 후에 유체를 불러 넣어 줄 것인지에 대한 것이다. 블랭크 홀딩력과 유압 성형이 시작되는 시간에 대한 설계 범위는 다음과 같다. 블랭크 홀딩력의 범위는 소재가 잘 유입될 수 있는 8,000kN과 소재의 유입을 억제하는 9,500kN 범위 사이에서 조절하였다. 그 이상의 경우 소재의 파단이 심하게 발생하며 그 이하의 경우 접힘에 영향을 주기 때문이다. 유압 성형이 시작되는 시간은 상부 금형과 하부 금형이 완전히 닫히고 난 후 유압 성형이 시작되는 닫히기 전에(상부금형이 90%진행하였을 경우) 유압 성형이 시작되는 사이에서 결정하였다. 이상의 모든 설계 변수를 Table 2에 설계범위와 함께 나타내었다.

Table 2 Design variables and its range

	Contents	Range
A	Parting Line	2-4mm
B	H in Fig. 4	8-12mm
C	W in Fig. 4	130-150mm
D	Holding Force	8,000-9500kN
E	Initial Blowing	90% - 100%

3. 최적화 기법

3.1 실험계획법 및 직교 배열표

서브프레임 유압 성형 해석은 블랭크 요소의 수가 몇 만개 수준이므로 상당한 시간을 요한다. 그러므로 변수에 대한 각각의 영향력을 평가하기에는 너무나 많은 시간이 걸린다. 이 경우 직교 배열표를 이용하면 각 변수의 영향력을 해석의 횟수를 크게 줄여서 평가할 수 있다. 직교 배열표에 의한 실험계획법은 실험계산치에 영향을 미치는 변수의 수가 많아 변수의 수준별로 모든 조합에 대한 실험을 행할 수가 없을 때, 직교배열에 의해 적은 실험 횟수로 원하는 정보를 얻기 위해 사용하는 방법이다. 직교 배열표는 주효과와 기술적으로 있을 것 같은 2변수 교호작용을 검출하고, 기술적으로는 없으리라 생각되는 2변수 교호작용 및 고차의 교호작용을 희생시켜서 실험횟수를 적게 할 수 있는 실험계획을 짤 수 있도록 만들어 놓은 표이다.⁽²¹⁾ 본 연구에서는 실험대신 해석을 위하여 직교 배열표를 사용하였으며 이를 통하여 각 변수의 영향력을 평가하였다.

3.2 최적화 과정

설계 영역의 목적함수를 최적화하기 위한 과정은 다음과 같다. 먼저 직교 배열표를 사용하여 각 변수의 영향력을 평가하였다. 평가된 변수 중 영향력이 큰 세 변수를 선택하여 중심 합성 설계를 적용하였다. 중심 합성 설계의 값으로 반응 표면을 구성하였고 분산분석표를 사용하여 구성된 반응 표면의 신뢰성을 검증하였다. 마지막으로 반응 표면식에서 변수들의 최적화 값을 찾고 이를 다시 성형해석에 적용하여 검증하였다. 이와 같은 설계 과정을 Fig. 7에 나타내었다.

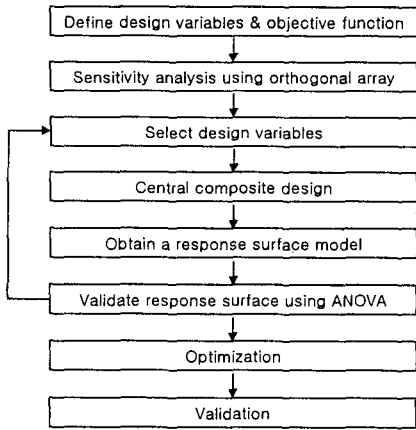


Fig. 7 Design process

3.3 금형의 구성

이와 같은 설계 방안을 적용하여 성형해석을 하기 위해서는 금형의 수정과 금형의 요소망 작업이 필요하다. 금형의 치수나 형상을 변경하고자 할 때마다 금형의 요소를 다시 구성해야 하기 때문에 많은 시간이 걸리게 된다. 이러한 작업을 피하기 위하여, 금형의 요소망 구성시 단면을 연결하여 요소망을 구성하였다. Fig. 8에 이를 나타내었다. 단면을 이용하여 요소를 구성하는 경우 금형 수정을 요하는 부분의 단면의 치수나 형상을 변경함으로써 빠르게 요소망을 구성할 수 있으며 모델링에 걸리는 시간을 크게 단축할 수 있다.

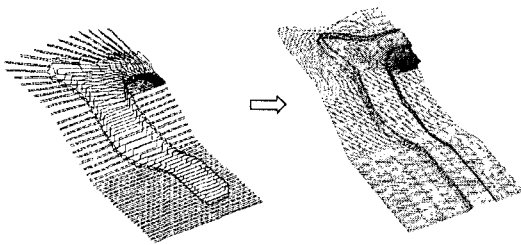


Fig. 8 Construction of FE mesh from section geometry

4. 성형 최적화

이상과 같은 최적화 기법을 이용하여 설계 영역의 두께 편차를 최소화하는 문제를 수행하였다.

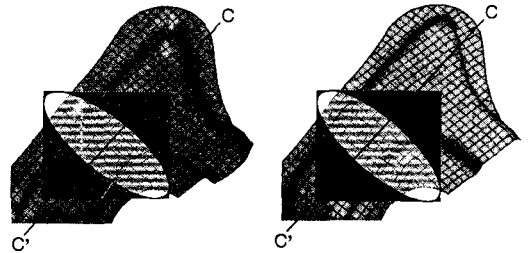
4.1 목적 함수 및 설계 변수

두께 편차를 최소화하고자 하는 영역은 초기 해석시 접힘이 발생했던 부분이다. 설계 영역을 변형된 유한 요

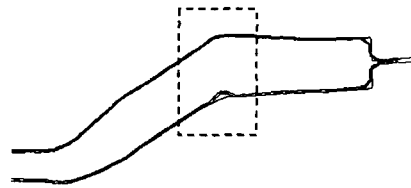
소 형상에서 보았을 때와 단면 C-C'에서 보았을 때에 대하여 각각 Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)에 나타내었다. 목적함수는 설계 영역의 요소 변형률의 합이며 다음과 같다.

$$f = \sum \left(\left| \frac{t_i - t_0}{t_0} \right|^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

각 변수들의 수준은 설계 범위에서 등간격으로 나누어 결정하였으며 이를 Table 3에 나타내었다.



(a) Design area in deformed shape



(b) Design area in section C-C'

Fig. 9 Design area

Table 3 Design variables and its range

	Contents	Level 1	Level 2	Level 3
A	Parting Line	2mm	3mm	4mm
B	H in Fig. 4	8.5mm	10mm	11.5mm
C	W in Fig. 4	130mm	140mm	150mm
D	Holding Force	8,000kN	8,500kN	9,000kN
E	Initial Blowing	90%	95%	100%

4.2 직교 배열표

직교 배열표를 선택하기 위해 자유도를 계산하였다. 자유도를 계산하기 위해서는 각 변수사이의 교호 작용을

고려해야 한다. 선정된 변수 중 교호작용이 있을 것이라고 판단되는 변수들은 금형의 치수와 관련이 있는 변수들이다 그러므로 교호작용의 변수들로는 $A \times B$, $B \times C$, $C \times A$ 를 선택하였다. 총자유도는 다음과 같다.

$$\text{총자유도} = 5 \times 2 (A, B, C, D, E * 2) + 4(A \times B) + 4(B \times C) + 4(C \times A) = 22$$

따라서 자유도가 22보다 큰 직교 배열표중에서 자유도가 26인 $L_{27}(3^{13})$ 를 선택하였다.

4.3 변수들의 영향력 평가

$L_{27}(3^{13})$ 직교 배열표에 의한 해석 결과를 가지고 각 변수들의 영향력을 분석하였다. 각 변수들의 영향력은 반응 그래프를 통하여 알 수 있다. 반응 그래프는 변수에 따른 각 수준별 합계를 나타낸 그래프로써, 변동의 폭이 크면 클수록 그 변수가 목적 함수에 영향력이 크다는 것을 의미한다. 반응 그래프를 Fig. 10에 나타내었다. 영향력 분석 결과 영향력이 큰 변수의 순서는 $A > B > D > C > E$ 임을 알 수 있다. 금형 분할면의 이동이 두께 변화에 가장 큰 영향이 있으며 다음으로 비드 형상의 높이, 블랭크 홀딩력의 순서로 영향이 컸다. 비드 형상의 폭, 초기 유압 성형 시간은 두께 변화에 거의 영향이 없었다.

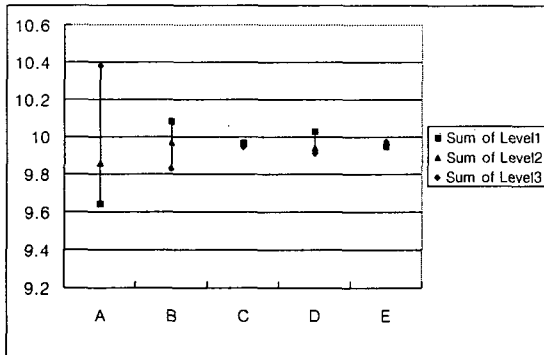


Fig. 10 Response graph

4.4 반응 표면식의 구성

반응 표면식을 구성하기 위한 실험표의 구성은 중심 합성 설계(CCD)를 이용하였다. 중심합성설계는 2^k 부분 실시법에 축점과 중심점에서의 실험횟수를 더하여 직교성과 회전성을 만족하도록 설계하는 방법이다. 본 연구에서는 영향력이 큰 변수인 A, B, D에 대하여 중심 합성 설계를 수행하였으며 Table 4에 초기 설계값과 설계 범위를 나타내었다. 중심 합성 설계에 의한 실험표와 결

과값은 Table 5에 나타내었다. 각 변수들은 -1과 1사이로 스케일링 되었다.

Table 4 Design variablea for CCD and its regions

Design variable	Initial design value	Experimental regions
A	3.5mm	$\pm 0.25\text{mm}$
B	11mm	$\pm 1.5\text{mm}$
D	9000	$\pm 250\text{kN}$

Table 5 CCD and results

($\alpha=1,215$)

Run	$x_1(A)$	$x_2(B)$	$x_3(C)$	Result
1	-1	-1	-1	1.194760
2	-1	-1	1	1.226483
3	-1	1	-1	1.200610
4	-1	1	1	1.230899
5	1	-1	-1	1.186748
6	1	-1	1	1.232936
7	1	1	-1	1.180589
8	1	1	1	1.229073
9	0	0	0	1.197891
10	$-\alpha$	0	0	1.217788
11	α	0	0	1.209367
12	0	$-\alpha$	0	1.197591
13	0	α	0	1.193719
14	0	0	$-\alpha$	1.179838
15	0	0	α	1.237429

Table 5의 결과에 의하여 추정된 반응표면식은 식 (2)과 같다.

$$y = f(x_1, x_2, x_3) = 1.200098 - 0.003071x_1 - 0.000407x_2 + 0.020695x_3 - 0.00864x_1^2 - 0.0035x_2^2 + 0.005291x_3^2 - 0.002536x_1x_2 + 0.000108x_2x_3 + 0.0040831x_1x_3 \quad (2)$$

4.5 반응 표면식의 검정

추정된 반응표면식의 신뢰성을 검증하기 위해서는 분산분석표를 작성해야 한다. 분산분석표를 작성하기 위하여 고려해야 할 사항은 다음과 같다.

하나의 측정값 y_i 와 y_j 들의 평균 \bar{y} 와의 차이를 총편차라고 하며 이를 다음과 같이 분해할 수 있다.

$$y_i - \bar{y} = (y_i - \hat{y}_i) + (\hat{y}_i - \bar{y}) \quad (3)$$

여기서 \hat{y}_i 는 반응표면식에서의 함수값을 나타낸다. 식 (3)의 양변을 제곱하고 모든 i 에 대하여 합하며 다음과 같다.

$$\sum_i (y_i - \bar{y})^2 = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (4)$$

식 (4)에서 좌변항을 총변동(SST: Total Sum of Square)이라고 하며 총변동을 분해한 우변의 첫번째 항을 잔차 제곱합(SSE: Residuals Sum of Square)이라고 하며 우변의 두번째항은 회귀 제곱합(SSR: Regression Sum of Square)이라고 한다. 잔차 제곱합은 목적함수값의 변동을 나타내는 것으로서 회귀 모형 함수에 의하여 설명이 되지 않는 변동을 말한다. 회귀제곱합은 회귀 모형 함수에 의하여 설명이 되는 변동을 말한다. 위의 변동들을 각각의 자유도로 나눈 것을 분산이라고 하며 이를 표로 나타낸 분산분석표를 Table 6에 나타내었다. 분산 분석 결과 구성된 반응표면의 F값이 위험률 5%의 F값 3.59보다 크므로 반응 표면식은 위험률 5%로 유의하다.

Table 6 Analysis of variance

	S	f	V	F	F(0.05)
SSR	0.005482	3	0.001827	1134.54	3.59
SSE	0.00005	11	0.000005		
SST	0.005535	14			

4.6 반응 표면식의 최적화

반응 표면식의 신뢰성이 4.5절에서 검증되었으므로 다음과 같이 최적화 문제를 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } y = f(x_1, x_2, x_3) \\ & \text{subject to } -1 \leq x_i \leq 1 \end{aligned} \quad (5)$$

최적값의 계산을 위하여 BFGS⁽¹⁸⁾를 사용하였다. Table 7에 최적화 결과를 나타내었다.

Table 7 Optimal value

Variable	Optimal value
Parting line	3.625
H in Fig. 4	11.45
Holding force	9000kN

4.7 최적화 결과

최적화 전후의 두께 분포를 Fig. 11에 나타내었다. 목적함수의 값이 최적화전 1.1361에서 최적화후 1.0920으로 개선되었다. Fig. 11의 O점으로부터의 최적화 전후의 설계 영역의 두께 분포를 Fig.12에 나타내었다. 최적화전 설계 영역의 평균 두께가 2.372에서 최적화 후 2.360으로 낮아졌으며 초기 두께 2.3에서 개선되었음을 알 수 있다.

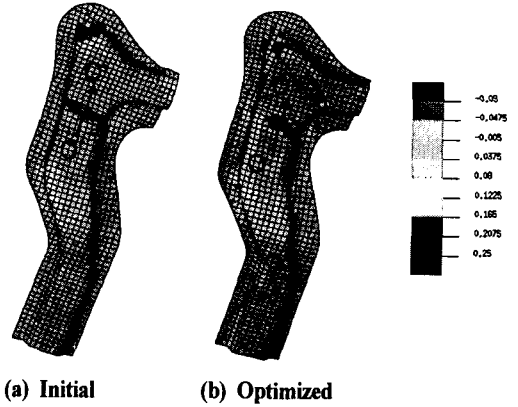


Fig. 11 Thickness strain distribution

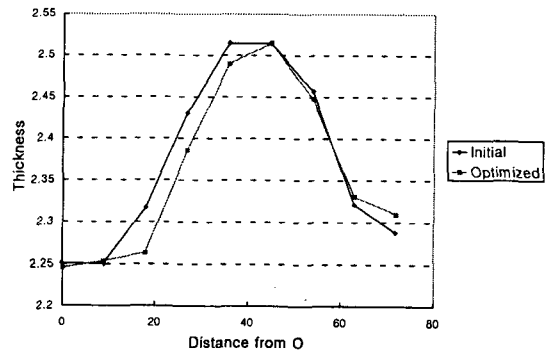


Fig. 12 Thickness in section O-O'(initial thickness : 2.3)

5. 결론

본 연구에서는 용접판재 유압 성형시 단차부근에 발생하는 접힘을 억제하고 유압 성형시 두께에 영향을 미치는 인자들의 영향을 분석하여 두께 분포에 대한 최적화 해석을 수행하였다. 이상의 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 금형 분할면의 이동은 용접판재 유압 성형시 소재의 변형에 가장 큰 영향을 미쳤다. 그러므로 금형 분할면의 적절한 설계는 성형의 성공 여부를 결정짓는 가장 큰 요소라고 하겠다.

(2) 금형 분할면이 이동하면 상부판재와 하부 판재의 내부 접촉 길이의 불균형이 발생하게 된다. 이는 한쪽 판재에는 접합을 유발할 수 있고 다른 한 쪽 판재에는 용접부의 전단력을 증가시켜 용접부를 파단시킬 수 있다. 그러므로 금형 분할면의 이동은 금형 단면 형상의 변화와 함께 이루어져야 한다. 본 연구에서는 일종의 비드 형상을 주어서 이 차이를 없게 하였다.

(3) 용접판재 유압 성형은 튜브와는 달리 판재를 가지고 성형을 하므로 블랭크 홀더력의 조절로 소재의 유입을 조절할 수 있었으며 이는 판재의 성형성에 큰 영향을 미쳤다.

(4) 유압이 금형이 닫히기 전에 작용하여 성형이 진행되는 공정과 금형이 닫힌 후 작용하여 진행되는 공정을 비교하였다. 이에 대한 차이가 성형성에 미치는 영향은 거의 없었다. 다만 실제적으로 성형을 할 경우 판재의 움직임을 막기 위하여 금형을 닫고 유체를 넣어주는 것이 보통이다. 그러므로 판재가 움직이지 않는 범위에서 금형이 닫히기 전 유압 성형을 시작한다면 성형 시간을 단축할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업기반기술산업인 “박판 유체 성형을 이용한 엔진 마운트 브라켓 및 서브프레임의 개발” 과제의 일환으로 수행되었으며 (주) 화신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Hannibal, T. A. and Dieffenbac, J. R., 1998, "Hydroformed Structural Elements An Economics Evaluation of The Technology", SAE Technical paper series, No.980435, pp.161~165.
- (2) Ahmetoglu, M., Sutter, K., Lee, X. J. and Atlan, T., 1999, "Tube Hydroforming-Currend Research, Applications and Need for Training", Engineering Research Center for Net Shape Manufacturing, The Ohio State University, Columbus, Ohio.
- (3) Srinivassan, T.M., Shaw, J. R. and Thompson, K., 1998, "Tubular Hydroforming : Correlation of Experimental and Simulation Results", SAE Technical paper series, No. 980448, pp.131~137.
- (4) Wu, L. and Yu, Y., 1996, "Computer Simulation of Forming Automotive Structural Patrs by

- Hydroforming Process", Numisheet'96, pp.324~329.
- (5) Liu, S. D. and Meuleman, K. T., 1998, "Analytical and Experimental Examination on Tubular Hydroforming Limits", SAE Techical paper series, No. 980445, pp.139~150.
- (6) Dohmann, F. and Hartl, C., 1997, "Tube hydroforming-research and practical application", J. of Material Processing Technology, pp.174~186.
- (7) Manabe, K. and Nakamura, S., 1999, "Finite Element Simulation of Hydroforming Process of Pre-bent Circular Tubes", Numisheet'99, pp.503~508.
- (8) Robbert, S., 1999, "Process Limits for The Hydroforming of Sheet Metal Pairs", Advanced Technology of Plasticity, Vol. II, Proceedings of the 6th ICTP, pp.1261~1266.
- (9) Zang, S. H., Kang, D. C., Lang, L. H. Danckert, J. and Nielsen, K. B., 1999, "Finite Element Analysis of Hydromechanical Deep Drawing", Numisheet'99, pp.463~466.
- (10) Kim, H. J., Jeon, B. H., Kim, H. Y. and Kim, J. J., 1993, "Finite Element Analysis Liquid Bulge Forming Process of T-Shape Pipe by An Explicit Code", Advanced Technology of Plasticity, pp.545~550.
- (11) Muammer Koc, Taylan Altan, 2001, "An overall review of the tube hydroforming (THF) technology", Material Processing Technology 43, pp.1009-1026
- (12) B. Carleer, G. van der Kevie, L. de Winter, B van Veldhuizen, 2000, "Anaysis of the effect of material properties on the hydroforming process of tubes", Material Processing Technology 104, pp.158~166
- (13) Rama, S. C. and Zhang, J. M., 1999, "A Numerical Approach to Analyze Tubular Hydroforming", Numisheet'99, pp.497~502.
- (14) Siegert, K., Schwager, A., Rieger, R. and Haussermann, M., 1999, "New Machine Concept for Hydroforming Tubes And Extrusions", SAE Technical paper series, No. 1999-01-0678.
- (15) 양재봉, 이한남, 전병희, 오수익, 1999, "Hydroforming을 위한 Tube bending에 관한 연구", 한국소성학회 '99춘계학술대회 논문집, pp.35~38.

- (16) 양재봉, 2001, 외연적 유한요소법에 기초한 민감도 해석을 이용한 하이드로포밍 성형공정 및 블랭크 형상 최적 설계, 서울대학교 대학원 기계항공공학부 박사학위논문
- (17) 김현영, 신용승, 홍춘기, 전병희, 오수익, 2001, "자동차 엔진마운트 브래킷의 관재 및 용접판재 유압 성형에 대한 성형해석", 한국소성가공학회지, 제10권 1호
- (18) Arora, J. S., 1989, Optimum Design , McGraw-Hill
- (19) Glen Stuart Peace, 1993, Taguchi methods. Addison-Wesley publishing company
- (20) 박성현, 1995, 현대실험계획법, 민영사, 서울
- (21) 다구치 겐이치 , 1991, 품질설계를 위한 실험계획법, 한국공업표준협회
- (22) Vera B. Anand, 1992, Computer Graphics and Geometric Modeling for Engineers, Wiley