

〈논 문〉

재료변수와 공정변수가 스템핑 성형성에 미치는 영향 연구

김영석* · 박기철**

(1996년 2월 14일 접수)

Sensitivity Analysis of Material and Process Variables Affecting on the Stamping Formability

Youngsuk Kim and Keechul Park

Key Words : Stamping Formability(스템핑 성형성), Process Variable(공정변수), Material Variable(재료변수), Deep Drawing Test(딥드로잉 실험), Yoshida Buckling Test(요시다 좌굴실험), Taguchi's Orthogonal Array Experiment(타구치의 직교배열실험법), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract

To investigate the effect of material and process variables on stamping formability of sheet materials, simulations for the cup drawing and the Yoshida buckling test were carried out using ABAQUS, commercial nonlinear finite element analysis code. The various factor effects on stamping formability of sheet materials were analyzed by the designed process according to Taguchi's orthogonal array experiment. Cup drawing simulation showed that local necking was very sensitive to plastic anisotropy parameter of sheet material and friction coefficient between sheet and tool interface. Simulations for the Yoshida buckling test have clarified that buckling behaviour of sheet material was mostly susceptible to yield stress and sheet thickness mostly. However, plastic anisotropy parameter and strain hardening coefficient affect moderately buckling behaviour of steel sheets after the buckling initiation.

1. 서 론

일반적으로 프레스공정 또는 스템핑공정에서의 판재변형은 변형모드에 따라 딥드로잉(deep drawing), 장출(stretching), 장출플랜징(stretch flanging), 굽힘(bending)의 네 가지 모드로 분류된다. 각 변형모드는 부변형률(minor strain)의 크기에 의해서 구분되고 실제 판재의 스템핑공정에서는 이들 네 가지의 변형모드가 단독 또는 혼합되어 나타난다. 설

계가 원하는 형상의 판재를 성공적으로 프레스 가공하기 위해서는 스템핑공정에서 국부네킹, 형상 불량, 주름, 탄성복원 등의 성형불량을 피해야 한다.

스템핑공정에서의 성형난이도와 판재의 성형성을 조사하기 위해 여러가지 모의실험들이 행해지고 있다.⁽¹⁾ 이러한 실험들은 사용된 판재의 성형성에 대한 재료변수와 공정변수들의 영향을 분명하게 한다. 최근에는 유한요소해석을 이용한 컴퓨터원용 모의실험(computer-aided testing, CAT)으로 스템핑 성형성을 조사하고, 판재 성형공정에서 성형 실패의 원인을 규명하려는 연구자 활발히 진행되고

*회원, 경북대학교 기계공학과

**회원, 포항제철(주) 기술연구소

있다. 기존의 실험적 방법들과 비교하면 컴퓨터원용 모의실험은 컴퓨터상에서 가상실험을 통하여 판재의 손상, 변형률, 응력과 같은 재료내부변수들의 값을 평가하고 스템핑 성형성을 적은 비용과 시간으로 조사할 수 있는 등 많은 이점을 갖고 있다. 더욱이 유한요소해석을 이용한 컴퓨터원용 모의실험은 Yate의 알고리즘⁽²⁾이나 Taguchi의 직교배열 실험법⁽³⁾과 같이 잘 계획된 실험들을 이용하는 것에 의해 공정변수, 재료변수 및 제어변수들이 스템핑 성형난이도에 미치는 개별적인 영향을 매우 효과적으로 분석하는 것을 가능케 한다. 최근에는 파단문제뿐 아니라 주름과 탄성복원 등과 같은 형상불량 문제들이 차체의 경량화와 관련된 고강도강의 사용증가와 더불어 자주 문제시 되고 있다. 이들 형상불량은 주로 비대칭변형과 잔류응력에 의해 발생된 모멘트에 의해 야기되는 것으로 알려지고 있다.

본 논문에서는 이러한 성형불량을 피하고 양호한 제품을 제조하기 위하여 데이터베이스의 확보를 위한 기초연구로서 재료변수 및 공정변수들이 프레스 성형성에 미치는 영향을 규명하고자 한다. 여기에서는 상용 비선형 유한요소해석 코드인 ABAQUS Ver 4.8⁽⁴⁾를 사용한 모의해석을 통해 컵드로잉 실험⁽⁵⁾과 요시다 좌굴실험(Yoshida buckling test, YBT)⁽⁶⁾에서 판재의 프레스 성형성에 대한 성형조건들과 판재의 기계적 성질의 영향을 평가하였다. 컵드로잉 실험은 딥드로잉성(deep drawability)에 대한 공구와 판재 경계면에서의 마찰계수와 판재의 소성이방성계수를 조사하는데 널리 이용되고 있다. 이 실험에서 한계드로잉비(limiting drawing ratio, LDR)와 블랭크홀딩력(blank holding force)의 허용범위는 재료의 딥드로잉성 평가에 있어서 중요한 매개변수로 알려지고 있다.⁽⁷⁾ 한편 요시다 좌굴실험은 비균일인장하에서 판재의 좌굴거동에 대한 항복응력과 재료두께의 영향을 연구하기 위해 최근에 자주 이용되고 있다.^(6,8) 요시다 좌굴실험은 대형판넬의 성형과정에서 주로 발생하는 표면처짐변형을 해석하기 위해 고안된 실험방법으로 대각선방향으로 인장되는 정사각형 시편의 좌굴개시와 좌굴성장에 의해서 패넬의 면처짐거동을 묘사하고 있다. 이 논문에서는 타구치의 직교배열실험법(Taguchi's orthogonal array experiment)에 기초를 둔 ABAQUS 모의실험을 통해 이 두 가지 대표적인 실험에서 재료의 프레스 성형성에 대한 여러 인자들의

영향들을 분석하였다.

2. 컵드로잉 실험의 해석

컵드로잉 공정에 대한 ABAQUS 해석을 통하여 판재의 딥드로잉성에 대한 기계적 성질과 공구와 판재 접촉면에서의 마찰의 영향을 평가하였다. 컵드로잉공정에 대한 개요를 Fig. 1에 나타내었다. 컵드로잉공정에서는 대부분의 압축변형이 일어나는 플랜지부와 펀치의 힘을 플랜지로 전달해 주는 컵벽부에서 재료의 거동이 중요한 역할을 한다. 일반적으로 펀치직경(D_p)에 대한 블랭크직경(D_b)의 비(drawing ratio, D_b/D_p)와 공구와 판재 경계면 사이 마찰의 증가에 따라 플랜지부에서 압축변형에 요구되는 힘은 증가한다. 한편 파단발생이 없는 온전하게 드로잉된 컵을 얻기 위해서는 컵벽에 작용하는 힘이 평면변형모드하에 있는 벽부에서의 판재

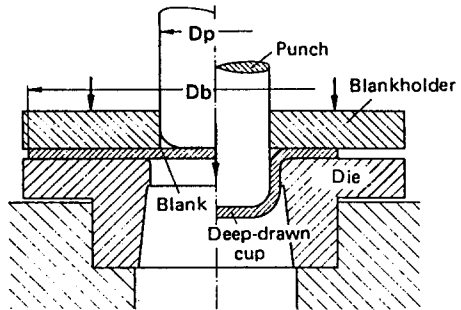


Fig. 1 Schematic illustration of cup drawing process

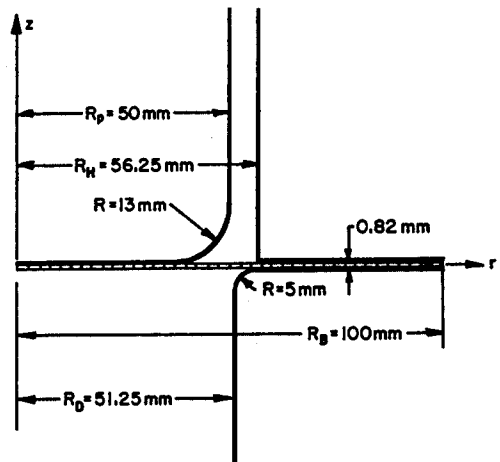


Fig. 2 Tool geometry and mesh discretization of sheet material for cup drawing simulation

강도보다 작아야 한다.

컵드로잉 실험해석에 대한 재료의 요소분할과 공구형상을 Fig. 2에 나타내었다. 해석에는 4개의 절점을 갖는 40개의 축대칭 등매개변수 요소(CAX4R)가 사용되었다. 해석에서 블랭크 홀딩력은 100 KN으로 일정하게 하고 가공깊이는 60 mm으로 하였다. Fig. 3은 변형된 요소형상과 두께변형률을 측정할 위치를 나타낸다. 컵드로잉 공정에서 펀치 윤곽의 반경방향에 근접한 컵벽부에서 국부적으로 얇아지기 쉬워 이 부분에서 주로 파단이 일어나기 때문에 그림의 등근 원안의 변형된 요소중에서 변형률이 가장 큰 값이 컵드로잉 공정에서의 성형난이도를 평가하는 품질특성(quality characteristic)으로써 사용하였다. 즉

$$\epsilon_t = -\log_e(t_{min}/t_0) \quad (1)$$

t_{min} : Fig. 3의 원안의 변형된 요소중에서 최소두께

t_0 : 판재의 변형전 처음 두께

이 값을 품질특성으로 사용함으로써 컵드로잉 문제는 컵벽에서의 두께 변형률이 작을수록 딥드로잉성이 좋아지는(the smaller-the-better) 문제가 된다. 따라서 i 번째 실험에 대한 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, S/N) η_i 는 다음 식으로 나타내진다.

$$\eta_i(dB) = -10 \log_{10}(\epsilon_i^2) \quad (2)$$

S/N비를 최대화 하는 것이 두께감소를 최소화 하는 것이며, 이것은 즉 가장 좋은 드로잉 공정에 대한 조건은 η 를 최대화 하는 것을 의미한다. 딥드로잉성에 주로 영향을 미치는 것으로 고려되는 인자들은 소성이방성계수(r), 가공경화지수(n), 판재와 공구(다이, 블랭크홀더 및 펀치) 접촉면에서의 마찰계수(μ), 인장강도(TS) 등이다. 이 네 가지

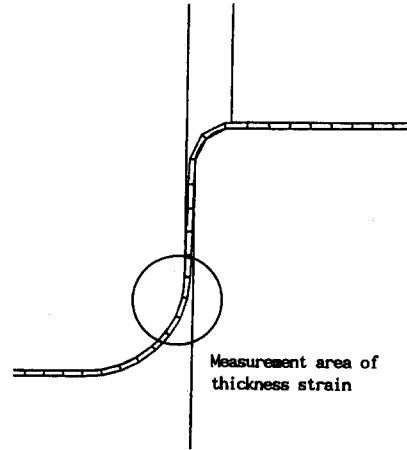


Fig. 3 Deformed shape and area of measurement of the thickness strain

인자들과 각각의 수준을 Table 1에 나타내었다. 각 인자들은 세 수준을 가지고 있고 이들 인자수준들은 드로잉강판(drawing quality, DQ), 딥드로잉강판(deep drawing quality, DDQ), 고강도강판(high strength steel, HSS) 등과 같은 현재 사용되고 있는 여러 자동차용 판넬들의 대표적인 성질을 포함하도록 선정되었다. ABAQUS 해석에서 판재의 소성이방성을 고려에 있어서 Hill의 이방성이론⁽⁹⁾을 따르기 때문에 소성이방성계수를 ABAQUS 해석에 입력하는 방법을 부록에 표시하였다. 인자 C에 의해 인용된 마찰계수는 판재-다이 간의 마찰계수(μ_d) 및 판재-블랭크홀더 간의 마찰계수(μ_h)로 이들 값은 여러 종류의 스템핑 윤활유에 대한 각종 냉연강판과 아연도금 판재에 대한 드로오비드 마찰 실험결과로부터 선정되었다.⁽¹⁰⁾ 본 연구에서는 $\mu_d = \mu_h = \mu$ 로 가정하였으며 한편 판재와 펀치간의 마찰계수(μ_p)는 0.25로 고정하였다.

따라서 세 수준을 가지고 있는 네 개의 인자들에

Table 1 Factors and their levels for the cup drawing simulation

Factor		Levels		
		1	2	3
A	Plastic anisotropy, r	1.4	1.9	2.4
B	Strain hardening, n	0.19	0.23	0.27
C	Friction coefficient, μ	0.10	0.175	0.25
D	Tensile strength, TS (MPa)	274	333	392

Table 2 Matrix experiment of cup drawing simulation with the L_9 orthogonal array

Exp. No.	Column number and factor assignment				Observation of thickness strain	
	A(r)	B(n)	C(μ)	D(TS)	$\epsilon_t(\%)$	$\eta(\text{dB})$
1	1	1	1	1	7.05	-16.96
2	1	2	2	2	11.21	-20.99
3	1	3	3	3	12.99	-22.27
4	2	1	2	3	5.10	-14.15
5	2	2	3	1	14.05	-22.95
6	2	3	1	2	5.12	-14.19
7	3	1	3	2	5.43	-14.70
8	3	2	1	3	3.05	-9.69
9	3	3	2	1	6.61	-16.40

(1) The smaller-the better type : $\eta(\text{dB}) = -10 \log_{10}(\epsilon_t)^2$

대한 실험은 타구치의 직교배열법에 의하면 9자유도를 가지므로 딥드로잉에 대한 인자들의 영향을 조사하기 위해서는 최소한 9번의 실험이 필요하다. 따라서 L_9 직교배열이 타구치의 표준 직교배열표로부터 선정되었다.⁽³⁾ Table 2는 L_9 직교배열에 따른 행렬실험과 실험결과를 나타낸다. 여기서, 각 열의 수는 각 인자들의 수준을 의미한다.

본 연구에서는 각 인자들간의 상호작용은 없는

것으로 간주하여 단지 딥드로잉성에 대한 각 인자의 독립적인 영향만을 평가하였다. 행렬실험에 의한 ABAQUS 해석으로부터 각 인자의 영향에 대한 상대적인 크기를 명확히 알 수 있다. 품질특성에 대한 평균분석(analysis of mean, ANOM)와 분산분석(analysis of variance, ANOVA)는 각 인자들의 독립적인 영향에 대한 이해를 보다 도와줄 것이다. 그 결과들이 Table 3에 표시되었다. 인자 j

Table 3 ANOM and ANOVA table for the cup drawing simulation

Factor		Average η by level (dB)			Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F ratio
		1	2	3				
A	r	-20.07	-17.10	-13.60 ^a	2	62.93	31.47	4.18
B	n	-15.27 ^a	-17.88	-17.62 ^a	2	12.40 ^b	6.20	
C	μ	-13.61 ^a	-17.18	-19.97	2	60.98	30.49	4.05
D	TS	-18.77	-16.63	-15.37 ^a	2	17.73 ^b	8.87	
Error					0	0	-	
Total					8	154.04		
(Error)					(4)	(30.13)	(7.53)	

(1) Over all mean of is -16.92 dB

(2) ^a Indicates the optimum level.

(3) ^b Indicates the sum of squares added together to estimate the pooled error sum of squares shown in parentheses. The F ratio is calculated by using the pooled error mean square.

($j=A, B, C, D$)에 의한 제곱합은 아래 식에 의해서 계산된다.

$$3(m_{j_1} - m)^2 + 3(m_{j_2} - m)^2 + 3(m_{j_3} - m)^2 \quad (3)$$

여기서, m 은 9번의 실험에 대한 η_i 의 전체 평균으로 다음과 같이 정의된다.

$$m = (1/9) \sum_i^9 (\eta_i) = -16.92(\text{dB}) \quad (4)$$

m_{j_i} 는 $m_{j_i} = (1/3) \sum (\eta)_{j_i}$ 에 의해 주어지는 인자 j 의 i 번째 수준($i=1, 2, 3$)와 관련된 η 의 평균이다.

Table 3으로부터 소성이방성계수와 판재-다이 및 판재-블랭크홀더간의 마찰계수의 수준변화는 품질특성에 큰 변화를 야기시킨다는 것을 알 수 있다. 즉, 소성이방성계수와 마찰계수는 각각 전체 제곱합에 대해 40.9%와 39.6%의 영향을 미치며, 이것은 이 두 인자들이 강판의 딥드로잉성에 중요한 영향을 미친다는 것을 의미하므로 이들이 중요한 조절인자(control factor)가 된다. 그러나 가공경화지수와 인장강도는 단지 η 의 전체변화에 대해 각각 8%와 11.5% 정도만 영향을 미치고 있어 소성이방성계수와 마찰계수에 비하면 상대적으로 딥드로잉성에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 간주된다.

딥드로잉성에 대한 평균분석의 결과들을 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림으로부터 소성이방성계수와 마찰계수는 강판의 딥드로잉성에 선형적으로 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 즉 소성이방성계수가 커지면 딥드로잉성은 선형적으로 증가하고 또한 마

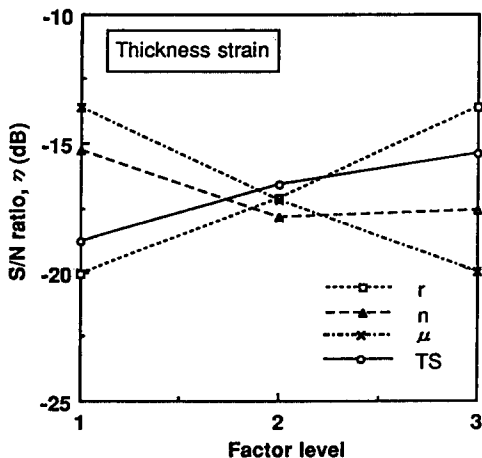


Fig. 4 Showing factor effects on the variation of the S/N ratio

찰계수가 감소함에 따라 딥드로잉성은 선형적으로 증가한다. 그러므로 큰 소성이방성계수를 갖는 판재와 작은 마찰계수를 갖도록 하는 가공조건에 확보가 파단이 없는 성공적인 컵 성형을 위해서 바람직하다는 것을 알 수 있다. 물론 판재-다이 및 판재-블랭크홀더간의 마찰계수가 작아질수록 재료가 과다하게 드로잉되어 좌굴 등의 형상불량이 야기될 수 있으나, 여기서는 파단을 대상으로 검토하고 있기 때문에 이에 대한 고려는 하지 않는다. 품질특성에 의해 나타난 딥드로잉성에 대한 소성이방성계수와 마찰계수의 영향은 각각 40.9%와 39.6%로 거의 같기 때문에 $\Delta\mu = -0.015$ 만큼의 마찰계수의 감소는 소성이방성계수가 $\Delta r = 0.1$ 만큼의 증가로 인한 딥드로잉성에 대한 효과와 같은 영향을 미친다고 간주할 수 있다.

Fig. 4와 평균분석의 결과로부터 컵을 성공적으로 성형하기 위한 최적조건이 $A_3B_1C_1D_3$ 으로 선택되었고, 이것은 Table 2에서 $r=2.4, n=0.19, \mu=0.10, TS=392 \text{ MPa}$ 을 의미한다. 그러므로 η_{opt} 로 나타난 선정된 최적조건들에 대한 S/N비는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \eta_{opt} &= m + (m_{A_3} - m) + (m_{C_1} - m) \\ &= -16.92 + (-13.6 + 16.92) \\ &\quad + (-13.61 + 16.92) \\ &= -10.29(\text{dB}) \end{aligned}$$

이 최적조건하에서의 검증해석에서 $\eta = -9.83(\text{dB})$ 이 얻어지므로 예상오차는 0.46이다. 이 오차는 $\pm 2\sigma = \pm 4.10$ 의 신뢰도 95%이내에 있으므로 이 모델의 ABAQUS 해석을 위한 직교배열 선정은 타당하며 해석결과는 신뢰할 만하다고 간주할 수 있다. 만약 예상오차가 2σ 의 한계를 넘으면 이 모델이 적절하지 않을 수 있으며 각 인자들간의 상호관계도 고려되어야 한다.

3. 요시다 좌굴실험(YBT)의 해석

판재의 좌굴거동에 대한 판재의 기계적 성질과 판재두께의 영향을 조사하기 위해 요시다 좌굴실험에 대한 해석을 행하였다. 요시다 좌굴실험에서는 75 mm 게이지 길이를 갖는 100 mm × 100 mm의 정사각형 판재를 사용하고 사각시편의 대각방향이 판재의 압연방향과 일치하도록 하여 인장에 따른 시편의 좌굴거동을 파악한다. Fig. 5는 시편의 형상

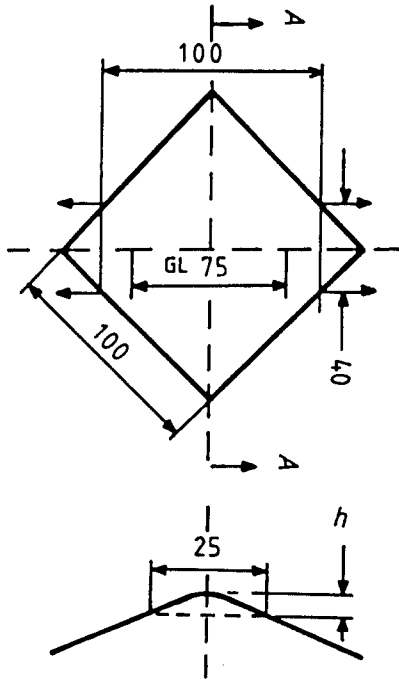


Fig. 5 Specimen geometry and measuring method of buckling height in the YBT

과 실험후 좌굴높이의 측정방법을 나타낸다. 좌굴 높이의 측정은 폭이 25 mm로 고정된 다이얼게이지에 의해서 측정된다. 여기서, 판재의 면외처짐, 즉 좌굴은 사각 시편이 대각방향으로 임계값까지 인장됨에 따라 판재의 중앙부분에서 일어난다. 좌굴이 발생하면 그후는 시편이 인장됨에 따라 좌굴높이가 증가한다.

여기서는 요시다 좌굴실험에 대한 전체모델을 대상으로 해석하였다. 해석에는 각 절점마다 5자유도를 갖는 저감적분을 한 9절점의 240개 쉘요소(S9R5)가 사용되었다. 요소의 두께방향으로의 내부

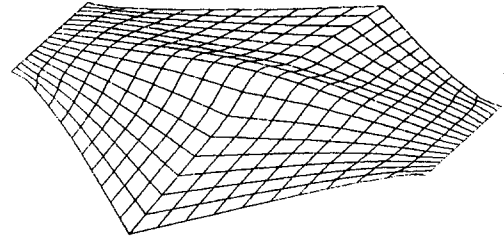


Fig. 6 Deformed mesh shape of the YBT specimen

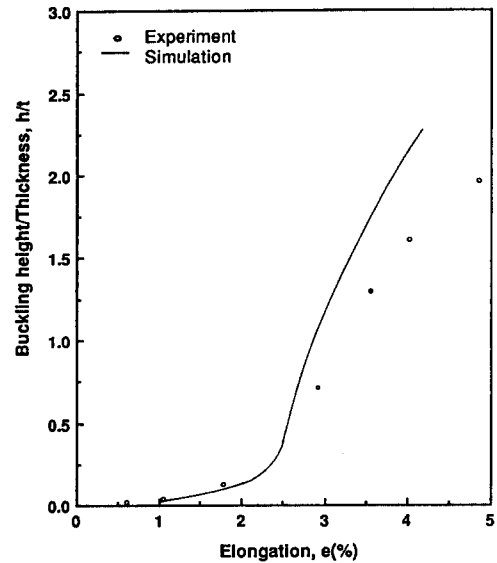


Fig. 7 Comparison of the results of experiment and simulation results for the YBT. The mechanical properties of the sheet tested are $YS=166$ MPa, $TS=291$ MPa, $r=1.85$, $n=0.238$, and $K=517$ MPa. The thickness of the sheet is 1.2 mm

변화를 조사하기 위해 두께방향으로는 5개의 적분점을 갖도록 하였다. 요시다 좌굴실험 시편의 변형된 요소형상을 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 7에

Table 4 Factors and their levels for YBT simulation

Factor		Levels		
		1	2	3
A	Yield stress, YS (MPa)	117	147	176
B	Strain hardening, n	0.21	0.24	0.27
C	Plastic anisotropy, r	1.2	1.6	2.0
D	Thickness, t (mm)	0.75	0.80	0.85

DDQ 판재에 대한 대각방향 인장량과 좌굴높이에 대한 해석결과를 실험결과와 비교하였다. 해석결과와 실험결과는 비교적 잘 일치하고 있기 때문에 요시다 좌굴실험에 대한 모의 유한요소해석이 실제 요시다 좌굴실험에서의 좌굴거동을 잘 나타내고 있다고 볼 수 있다.

기계적 성질과 판재두께가 좌굴거동에 대한 인자의 영향을 측정하기 위해 선택되었고, 인자들과 그 수준을 Table 4에 나타내었다. 항복응력, 가공경화지수, 소성이방성계수에 대한 수준들의 값은 여러 종류의 자동차용 판넬에 대한 실험에서 얻어지는 가능한 모든 값들을 포함하도록 선정되었다. 컵드로잉실험의 해석에서 채택한 L9 직교배열이 역시 네 인자들과 각 인자에 대한 세 수준을 갖는 요시다 좌굴실험 해석에 대해서도 역시 적용되었다. 각 실험조건에 따른 행렬실험과 해석결과를 Table 5에 나타내었다. Fig. 8은 각 실험조건에 따른 인장척에서 측정된 인장량과 좌굴높이의 관계를 보여준다. 각 조건들에 대한 좌굴 민감도를 정량화하기 위하여 두 개의 품질특성을 고려하였다.

- (1) 2% 인장에서 측정된 좌굴높이
 - (2) 좌굴높이가 0.1 mm에 도달하였을 때 측정된 좌굴개시상태에 대한 인장량
- 2% 인장일때 좌굴높이에 의해 측정된 품질특성

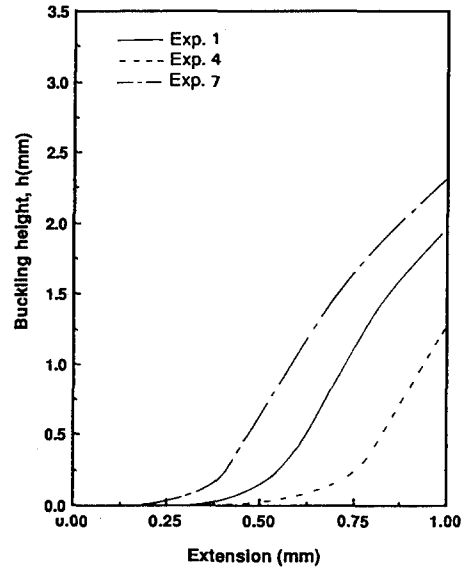


Fig. 8 Relationship between the buckling height and the extension measured at the tensile chuck for 3 test conditions

은 작을수록 좋은(the smaller-the better) 문제가 되고, 0.1 mm 좌굴높이를 나타내는 인장량에 의해 측정된 품질특성은 클수록 좋은(the larger-the better) 문제를 나타낸다. 두 품질특성의 성질에

Table 5 Matrix experiment of YBT simulation with the L₉ orthogonal array

Exp. No.	Column number and factor assignment				Observation of buckling			
	A (YS)	B (n)	C (r)	D (t)	Buckling height at 2% elongation		Extension for buckling initiation	
					h (mm)	η^a (dB)	e (mm)	η^b (dB)
1	1	1	1	1	7.79	-17.8	0.45	-6.94
2	1	2	2	2	4.67	-13.4	0.62	-4.15
3	1	3	3	3	0.75	2.5	0.84	-1.51
4	2	1	2	3	4.68	-13.4	0.63	-4.01
5	2	2	3	1	8.82	-18.9	0.27	-11.40
6	2	3	1	2	8.44	-18.5	0.37	-8.64
7	2	1	3	2	8.85	-18.9	0.32	-9.90
8	2	2	1	3	8.97	-19.1	0.38	-8.40
9	2	3	2	1	11.51	-21.2	0.19	-14.40

(1) The smaller-the better type : $\eta^a = -10 \log_{10}(h^2)$ (2) The larger-the better type : $\eta^b = -10 \log_{10}(e^{-2})$

Table 6 ANOM and ANOVA table for buckling height in the YBT simulation

Factor		Average η by level (dB)			Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F ratio
		1	2	3				
A	YS	-9.57 ^a	-16.9	-19.7	2	164.0	82.0	4.0
B	n	-16.7	-17.1	-12.4 ^a	2	40.7 ^b	20.4	
C	r	-18.5	-16.0	-11.8 ^a	2	68.8	34.4	1.7
D	t	-19.3	-16.9	-10.0 ^a	2	140.0	70.0	3.4
Pooled error			-		2	40.7	20.4	
Total			-		8	413.5		

(1) ^a Indicates the optimum level.

(2) ^b Denotes that the value was used for pooled sum of squares.

따라 S/N비를 각각 다음 식으로 택하였다.

$$\eta^a(dB) = -10 \log_{10}(2\% \text{ 인장시의 좌굴높이})^2$$

$$\eta^b(dB) = -10 \log_{10}(\text{좌굴높이 } 0.1 \text{ mm를 가지는 인장})^{-2} \quad (5)$$

Table 5에서 2% 인장시의 좌굴높이와 좌굴높이가 0.1 mm를 나타내는 좌굴개시점에 대한 인장량의 해석결과를 이용하여 좌굴높이에 대해 평균분석과 분산분석을 수행한 결과를 Table 6에 나타내었다. Fig. 9는 좌굴높이에 대해 S/N비에 대한 인자들의 영향을 보여주는 평균분석의 결과를 나타낸다. 평균분석의 결과와 Fig. 9에 따르면 인자들의 최적조건은 $A_1B_3C_3D_3$ 이고, 이것은 $YS=117$ MPa, $n=0.27$, $r=2.0$, $t=0.85$ mm를 나타낸다. 이것은 Table 5에서 세번째 실험조건을 나타

낸다. 분산분석에 대해서는 가공경화지수인 B 인자가 오차로서 고려되었다. 그러므로 최적조건에 대한 S/N비는 다음과 같이 구해진다.

$$\eta_{opt} = m + (m_{A_1} - m) + (m_{C_3} - m) + (m_{D_3} - m) = -0.57(dB) \quad (6)$$

이 조건에 대한 해석결과를 2.50(dB)이고 예상 오차는 3.07이다. 이 오차는 $\pm\sigma = \pm 3.98$ 의 99% 신뢰도내에 있으므로 그 실험에 대한 결과는 타당하다. 항복응력과 판두께는 좌굴높이 η^a 의 전체변화에 대해 각각 39.6%와 33.8%의 영향을 미치고 있다. 그러나 가공경화지수와 소성이방성계수의 수준변화는 전체변화 η^a 에 대해 9.8%와 16.6%의 적은 변화만을 준다. 그러므로 좌굴높이는 주로 항복응력과 판두께에 의해서 큰 영향을 받지만 소성이방성계수와 가공경화지수에 대해서도 어느 정도 영향을 받는다고 볼 수 있다. 즉 Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이 가공경화지수와 소성이방성계수가 커질수록 좌굴후 좌굴높이는 상대적으로 작아지는 것을 알 수 있는데 이는 참고문헌 (8)의 결과에 의해 입증되고 있다.

한편 좌굴개시에 대한 평균분석과 분산분석을 수행하여 그 결과를 Table 7에 나타내었다. Fig. 10은 좌굴개시에 대해 S/N비에 대한 인자들의 영향을 나타낸다. 좌굴개시의 전체변화 η^b 에 대한 인자들의 영향은 역시 분산분석의 결과로부터 얻어진다. 항복응력과 판두께는 η^b 의 전체변화에 대해 각각 52.2%와 45.4%로 대부분을 차지하고 있으나

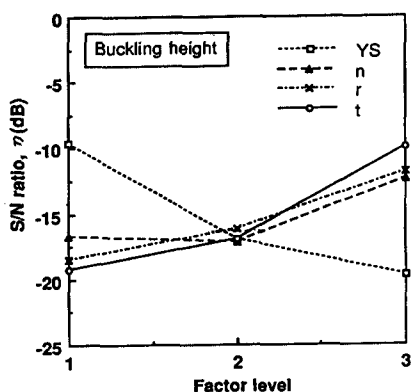


Fig. 9 Analysis of the mean for buckling height

Table 7 ANOM and ANOVA table for buckling initiation in the YBT simulation

Factor		Average η by level (dB)			Degree of freedom	Sum of squares	Mean square	F ratio
		1	2	3				
A	YS	-4.20 ^a	-8.02	-10.9	2	67.80	33.90	45.0
B	n	-6.95 ^a	-7.98	-8.18	2	2.61 ^b	1.31	
C	r	-7.99	-7.52 ^a	-7.60	2	0.38 ^b	0.19	
D	t	-10.90	-7.56	-4.64 ^a	2	58.90	29.40	39.0
Pooled error			-		4	2.99		
Total			-		8	129.69		

(1) ^a indicates the optimum level.

(2) ^b denotes that the value was used for pooled sum of squares.

가공경화지수와 소성이방성계수는 η 에 대해 각각 2.0%와 0.3%만 기여하고 있어 좌굴개시에 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

따라서 요시다 좌굴실험에 대한 이러한 해석으로부터 좌굴시작과 성장을 포함한 판재의 좌굴거동은 주로 항복응력과 판두께에 의해서 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 즉 항복응력이 감소함에 따라 판재 전체에 걸쳐 소성변형이 발생하기 쉬운 경향이 있고 국부적으로 변형축적이 경감되므로 좌굴이 덜 일어나려는 경향이 있다. 또한 좌굴개시에 대해서는 판재두께가 증가함에 따라 압축응력으로 인해 판재 좌굴에 대한 저항이 점점 증가한다는 점에서 판두께가 아주 중요한 역할을 하는 것으로 간주된다. 비록 가공경화지수와 소성이방성계수는 좌굴개시에 실질적으로 영향을 미치지 않지만 좌굴개시 이후에는 좌굴거동에 대해 어느 정도 영향을 미

치고 있는 것을 알 수 있다. 그러므로 자동차 외부 판넬과 같은 대형 판넬 성형공정에서는 좌굴의 발생방지에 있어서는 항복응력이 적을수록 그리고 판두께가 두꺼울수록 유리하다고 결론지을 수 있다.

4. 결 론

범용 비선형 유한요소해석 코드인 ABAQUS를 이용한 컵드로잉 실험과 요시다 좌굴실험에 대한 유한요소해석을 통하여 강판의 스템핑 성형성에 미치는 인자들의 영향을 조사하였다. 이러한 실험들을 대상으로 타구치의 직교배열 실험법에 따라 계획된 실험들을 수행함으로써 스템핑 성형성에 영향을 미치는 중요한 인자들을 쉽게 규명할 수 있었다. 컵드로잉 해석에서는 소성이방성계수와 공구와 판재의 경계면에서의 마찰계수가 판재의 덤드로잉성에 크게 영향을 미치는 중요한 인자이고 반면 인장강도와 가공경화지수는 판재의 덤드로잉성에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판명되었다. 한편 요시다 좌굴실험 해석결과로부터는 항복응력과 판두께는 좌굴의 개시와 성장을 포함한 좌굴거동에서 가장 중요한 인자라는 결론을 얻었다. 그러나 요시다 좌굴실험 해석에서 소성이방성계수와 가공경화지수는 좌굴개시 이후 판재의 좌굴거동에 대해 어느 정도 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 포항제철소의 연구비 지원에 의해 행

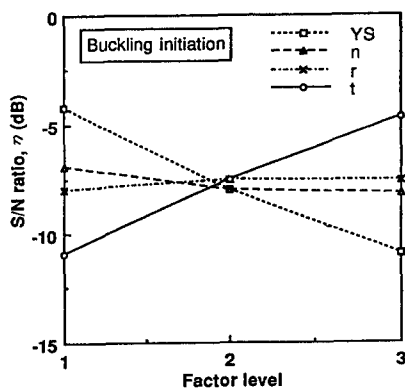


Fig. 10 Analysis of the mean for buckling initiation

해졌으며 저자들은 이에 사의를 표하는 바이다. 아울러 실험을 수행해 준 김정철, 손원근씨께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, Y. S. and Park, K. C., 1993, "A Consideration on the Simulative Tests for Evaluating Stamping Formability," *J. Korea Soc. Mech. Eng.*, Vol. 33, No. 1, pp. 47~65.
- (2) Box, G. B., Hunter, W. G. and Hunter, J. S., 1978, *Statistic for Experiments*, J. Wiley and Sons.
- (3) Phadke, M. S., 1989, *Quality Engineering Using Robust Design*, Prectice-Hall International Editions.
- (4) Hibbit, Karlsson & Sorrensen, 1989, *ABAQUS User's Manual, Ver. 4.8*, Providence, Rhode Island.
- (5) Chung, Y. S. and Swift, H. W., 1951, "Cup Drawing from Flat Blank," *Proc. Inst. Mech. Eng., (London)*, Vol. 165, pp. 199~223.
- (6) Hayashi, H., Hirata, M. and Yoshida, K., 1983, "Buckling Behaviour of a Square Specimen in the Diagonal Tensile Test-Yoshida Buckling Test and its Application," *J. Japan Soc. Technol. Plast.*, Vol. 24, No. 275, pp. 1298~1304.
- (7) Hosford, W. F. and Caddell, R. M., 1993, *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*, Prentice-Hall International Editions.
- (8) Tomita, Y. and Shindo, A., 1988, "Onset and Growth of Wrinkles in the Square Plate Subjected to Diagonal Tension," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 30, No. 12, pp. 921~931.
- (9) Hill, R., 1950, *The Methematical Theory of Plasticity*, Oxford University Press, London.
- (10) Kim, Y. S., Nam, J. B. and Choi, W. J., 1990, "A Study of Frictional Characteristics of Galvanized Sheet Steels for Automobiles," *J. Korea Soc. Mech. Eng.*, Vol. 14, No. 6, pp. 1474~1486.

부 록

일반적으로 압연판재에서 압연방향, 압연방향과

직각인 횡방향과 두께방향을 각각 1, 2, 3이라고 할때 Hill의 소성이방성이론에 따르면 압연된 이방성판재의 세 직교이방성 주축들은 이 1, 2, 3축으로 정해진다. Hill의 이방성 항복함수(anisotropic yield function)는 아래의 형식을 가지고 있다.⁽⁹⁾

$$f(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + g(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + h(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2l\tau_{31}^2 + 2m\tau_{31}^2 + 2n\tau_{12}^2 = \sigma^2 \tag{A1}$$

σ : 상당 항복응력

f, g, h, l, n : 소성이방성의 크기를 나타내는 계수(일정)

이방성재료의 주축방향에 대한 단축인장실험과 전단실험을 통하여 식 (A1)로부터 다음의 식 (A2)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{11}}{\sigma} &= \frac{1}{(g+h)^{1/2}} \\ \frac{\tau_{12}}{\sigma} &= \frac{1}{(2n)^{1/2}} \\ \frac{\sigma_{22}}{\sigma} &= \frac{1}{(f+h)^{1/2}} \\ \frac{\tau_{23}}{\sigma} &= \frac{1}{(2l)^{1/2}} \\ \frac{\sigma_{33}}{\sigma} &= \frac{1}{(f+g)^{1/2}} \\ \frac{\tau_{31}}{\sigma} &= \frac{1}{(2m)^{1/2}} \end{aligned} \tag{A2}$$

소성이방성계수, 즉 r 값은 실험방향에 따라 다르다. 유동법칙을 사용하여 압연방향에 대해 0°, 45°, 90°의 소성이방성계수를 각각 r_0, r_{45}, r_{90} 로 나타내면 다음의 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} r_0 &= h/g \\ r_{90} &= hf \\ r_{45} &= (2n - f - g)/(2f + 2g) \end{aligned} \tag{A3}$$

판재의 두께방향 축에 대한 회전 대칭성, 즉 평면등방성을 갖는 판재의 수직이방성(normal anisotropy)을 고려하면, 식 (A3)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} r_0 &= r_{90} = r_{45} \\ f &= g \\ n &= g + 2h = f + 2h \end{aligned} \tag{A4}$$

여기서, 수직이방성 재료에 대한 소성이방성계수를 r 로 나타내고 Von Mises 항복조건으로부터 $\sigma = \sqrt{3}\tau$, 여기서, τ 는 전단항복응력을 취하면 식 (A2)는 다음 식에 의해 나타내진다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\sigma_{11}}{\sigma} &= \frac{1}{(g(1+h))^{1/2}} \\
 \frac{\tau_{12}}{\tau} &= \frac{3^{1/2}}{(2g(1+2r))^{1/2}} \\
 \frac{\sigma_{22}}{\sigma} &= \frac{1}{(g(1+r))^{1/2}} \\
 \frac{\tau_{23}}{\tau} &= \frac{3^{1/2}}{(2l)^{1/2}} \\
 \frac{\sigma_{33}}{\sigma} &= \frac{1}{(2g)^{1/2}} \\
 \frac{\tau_{31}}{\tau} &= \frac{3^{1/2}}{(2m)^{1/2}}
 \end{aligned} \tag{A5}$$

수직이방성의 가정으로부터 σ_{11}/σ 과 σ_{22}/σ 가 1과 같고 $g = 1/(1+r)$ 이 된다. 수직이방성에 대한 가정과 식 (A2)로부터, $l=m=(3/2)$ 로 택할 수 있

다. 그러므로, 소성이방성계수는 ABAQUS 해석에서 다음의 식 (A6)에 의해 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\sigma_{11}}{\sigma} &= 1 \\
 \frac{\tau_{12}}{\tau} &= \frac{(3(1+r))^{1/2}}{(2(1+2r))^{1/2}} \\
 \frac{\sigma_{22}}{\sigma} &= 1 \\
 \frac{\tau_{23}}{\tau} &= 1 \\
 \frac{\sigma_{33}}{\sigma} &= \frac{(1+r)^{1/2}}{\sqrt{2}} \\
 \frac{\tau_{31}}{\tau} &= 1
 \end{aligned} \tag{A6}$$