한국기계가공학회지, 제15권, 제1호, pp.95~102(2016.2) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.15 No.1, pp.95~102(2016.2) ISSN 2288-0771(Online)
http://dx.doi.org/10.14775/ksmpe.2016.15.1.095

마하라노비스 다구찌(Mahalanobis Taguchi) 시스템을 이용한 박판 성형 공정의 최적화

김경모*,#
*금오공과대학교 산업공학부

Optimization of Sheet Metal Forming Process Using Mahalanobis Taguchi System

Kyung-Mo Kim*,#
*School of Industrial Engineering, Kumoh National Institute of Technology
(Received 2 October 2015; received in revised form 1 December 2015; accepted 22 December 2015)

ABSTRACT

Wrinkle, spring-back, and fracture are major defects frequently found in the sheet metal forming process, and the reduction of such defects is difficult as they are affected by uncontrollable factors, such as variations in properties of the incoming material and process parameters. Without any countermeasures against these issues, attempts to reduce defects through optimal design methods often lead to failure. In this research, a new multi-attribute robust design methodology, based on the Mahalanobis Taguchi System (MTS), is presented for reducing the possibilities of wrinkle, spring-back, and fracture. MTS performs experimentation, based on the orthogonal array under various noise conditions, uses the SN ratio of the Mahalanobis distance as a performance metric. The proposed method is illustrated through a robust design of the sheet metal forming process of a cross member of automotive body.

Key Words : Sheet Metal Forming(박판 성형), Mahalanobis Taguchi System(마하라노비스 다구찌 시스템), Mahalanobis Distance(마하라노비스 거리), Multi-attribute Robust Design(다특성 강건 설계)

1. 서 론

박판 성형 공정은 저비용 고생산성으로 인해 가전제품이나 자동차 부품의 대량생산에 적합하다. 그러나 성형조건을 적절히 선정하지 못하면 주름, 파단, 그리고 스프링백(spring-back)과 같은 성형불량이 발생한다[1-3]. 주름은 성형공정 중 제품 표면적과 소재의 표면적이 큰 부위에서 판재 내부의 압축응력이 국부적으로 작용하면서 발생하며, 파단은 판재 내부에서 주변형률(major strain)과 부변형률(minor strain)의 조합이 임계값을 넘는 경우에 발생한다. 또한 스프링백은 판재가 강제적 변형을 겪은 후 새로운 정적 평형상태를 찾아가는 과정에서 발생한다.

최근 고강도강의 사용이 증가하면서 스프링백이 중요한 문제가 되고 있다. 특히 자동차 업계에서는 AHSS(advanced high strength steel)를 이용한 차체 경량화를 추진해 왔다. 그러나 경량의 고강도강인 AHSS는 주름과 파단이라는 전통적 성형불량 외에도 스프링백이라는 새로운 문제를 해결하여야 한다[2,4]. 따라서 현장에서는 주름, 파단, 그리고 스프링

Corresponding Author : kmkim@kumoh.ac.kr
Tel: +82-54-478-7653, Fax: +82-54-478-7679

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

백이라는 3가지 성형불량을 동시에 줄이기 위한 실용적인 설계방법의 필요성이 증대되었다.

지난 40년간 박판 성형 공정에서 성형불량을 줄이기 위한 다양한 연구들이 수행되었다[3-7]. 특히 드로비드 구속력의 작용기전과 성형공정에의 응용에 대한 다양한 연구 결과가 제시되었다[8-10]. 이들 연구들은 대부분 주름이나 스프링백과 같은 단일한 성형불량을 대상으로 최적 설계방법을 제시하고 있다. 또한 최근 일부의 연구[1-3,11]를 제외하고는 설계과정에 설계자가 통제할 수 없는 변동요인(이하 잡음)을 고려하지 않고 있다. 그러나 박판 성형 공정은 소재물성이나 성형조건에 잡음이 존재하므로, 설계과정에 이를 고려하지 않으면 성형불량의 발생 가능성이 높아진다.

따라서 본 연구에서는 이러한 박판 성형 공정의 특성을 고려하여 잡음이 존재하는 상황에서 주름, 파단, 그리고 스프링백이라는 3가지 성형불량을 동시에 최소화시키는 새로운 다특성 강건 설계 방법(multi-attribute robust design method)을 제시하고, 제시된 방법의 유용성을 사례적용을 통해서 보이고자 한다.

2. Mahalanobis Taguchi System(MTS)

마하라노비스 거리(MD)는 통계학자인 마하라노비스에 의해 개발되었다. 처음에는 주로 패턴인식에 사용되었으나, 품질공학자인 다구찌가 MTS라는 방법을 개발하면서 설계과정에 체계적으로 사용되게 되었다. MD는 마하라노비스 공간상에서 정상 집단의 원점에서 주어진 평가대상인 점(이하 평가점)까지의 거리를 의미한다. 즉 MD는 다수의 측정항목을 갖는 다변량 데이터를 하나의 종합적 평가점수로 나타내는 유용한 도구이다. 여기서 정상 집단은 평가의 기준이 되는 데이터 집단을 의미한다. 그러나 현재까지 정상 집단을 결정하는 명확한 기준은 없으며, 일반적으로 전문가가 판단하여 높은 평가점수를 받는 데이터 집단으로 결정한다[12].

MD는 다수의 측정항목간의 상관관계를 고려하여 결정된 거리이기 때문에, 상관관계를 고려하지 않는 다른 유형의 거리에 비해 보다 정확한 평가가 가능하다. 예를 들어 측정항목 X_1과 X_2 사이에 Fig. 1과 같이 양의 상관관계가 있다고 할 때, 유클리드 공간에서는 원점 X에서 평가점 A까지의 거리와 원점 X에서 평가점 B까지의 거리는 같으나 마하라노비스 공간에서는 점 A가 점 B보다 원점 X에 가까이 있다. 따라서 다수의 측정항목들 간에 상관관계가 존재하는 다변량 데이터의 평가에서 상관관계를 무시하면 평가점을 정확하게 평가할 수 없게 된다. 즉 점 A와 점 B가 원점 X에서 같은 거리에 있다고 평가하게 된다.

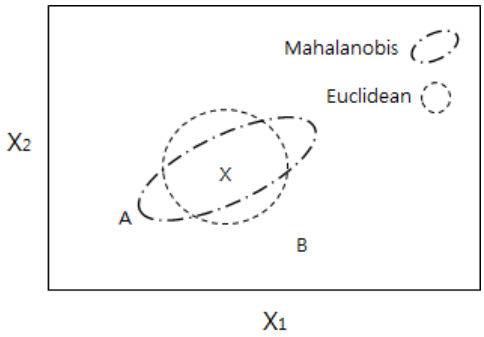


Fig. 1 Mahalanobis and Euclidean distance

다구찌에 의해 개발된 MTS를 설계 최적화에 적용하는 절차는 다음과 같다. 첫째, 설계 평가에 사용할 측정항목들을 결정한다. 둘째, 정상 집단에 속하는 데이터를 수집한다. 셋째, 각 실험조건에서 측정된 다변량 데이터로부터 MD를 계산한다. 넷째, MD의 SN비를 계산하고 이로부터 최적조건을 결정한다.

3. 박판 성형 공정의 강건 설계

본 연구의 사례에서 고려할 부품모델과 금형형상은 다음과 같다. Fig. 2는 Numisheet 2005의 벤치마크 문제로 제시된 차체 cross member 부품모델로서, 두께 1.6mm 인 고강도강(DP 600)으로 성형한다[6]. 그리고 Fig. 3은 성형에 사용된 드로우 금형으로, 성형을 하고자 하는 부품이 대칭 형상이므로 해석에서는 Fig. 2에 제시된 모델의 반쪽만을 사용한다.

설계 최적화를 위한 실험에 다음과 같이 설계변

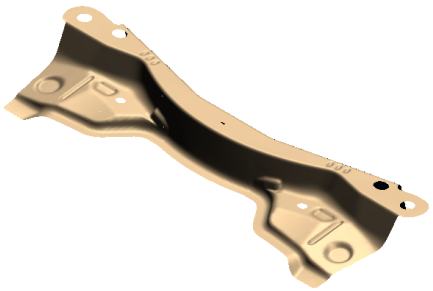


Fig. 2 Cross member model

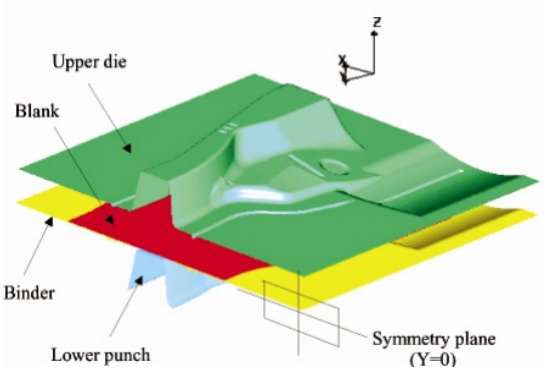


Fig. 3 Tool setup

수를 선택하였다. 일반적으로 드로잉 공정에서 금형형상이 결정된 이후에 설계자가 변경할 수 있는 변수는 드로비드 구속력(DBRF, draw bead restraining force)과 블랭크 홀딩력(BHF, blank holding force)이다. DBRF는 드로비드에 의해 판재 유입에 반대방향으로 가해지는 구속력을 의미하며, BHF는 블랭크 홀더에 의해 판재의 가장자리를 누르는 힘을 의미한다. 전체 금형에서 동일한 DBRF를 갖는 구간을 결정하기 위해 다음과 같이 성형해석 프로그램 *AutoForm*[13]을 사용한 예비해석을 실시하였다. 우선 Fig. 4의 전체 구간에 대해 동일한 DBRF를 적용하여 얻은 첫 번째 해석결과를 토대로 전체 구간을 몇 개의 동일한 DBRF를 갖는 구간으로 나누고, 각 구간의 DBRF와 BHF에 대해 경험적 조정을 실시한다. 이러한 조정은 현장의 엔지니어에 의해 통상적으로 실행되는 방식이며, 조정된 조건을 이용하여 두 번째 해석을 실시한다. 이와 같은 해석과 조정을 10회 실시하였으며, Fig. 5는 첫

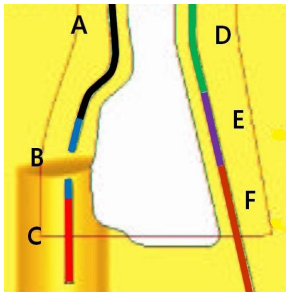
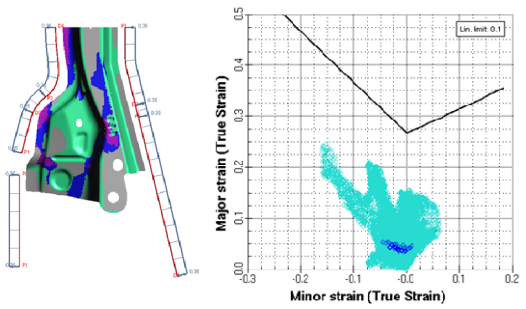


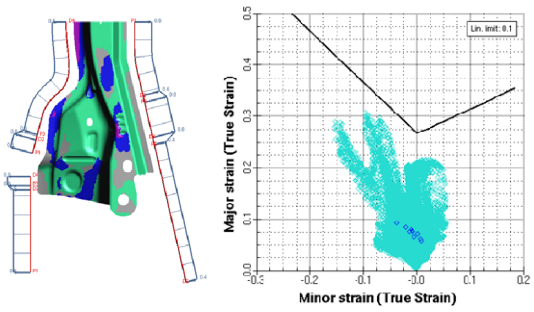
Fig. 4 Pictorial description of design variables

번째와 열 번째 해석결과를 나타낸다. 이와 같은 절차를 통해 Fig. 4와 같이 6개의 동일한 DBRF를 갖는 구간을 결정하였다. 그리고 최종 해석에서 구해진 각 구간의 DBRF와 BHF를 기준조건(baseline)으로 선택하였다. 기준조건은 경험적인 방법으로 얻어진 설계안으로서, 추후에 최적조건과의 비교를 위한 기준이 된다. 이러한 과정을 통해 강건 설계 실험의 설계변수로 Fig. 4 각 구간의 DBRF와 BHF를 선택하였다. 여기서 AD는 Fig. 4의 구간 A에서의 DBRF, BD~FD는 B~F 각 구간에서의 DBRF를 의미한다. 그리고 GB는 블랭크 홀딩력이다. 실험범위는 예비해석에서 구한 기준조건을 2수준으로 하고 적절한 탐색범위를 고려하여 Table 1과 같이 선택하였다.

잡음변수는 초기 소재의 판 두께(T), 금형과 소재간의 마찰계수(L), 판재의 압연방향과 이루는 각도가 0인 경우의 이방성계수 R값(R_0), 그리고 항복응력(Y)을 선택하였다. 판재 위치나 코일에 따른 압연방향에 대한 판재의 R값(0도, 45도, 90도)의 변동이 판재의 동일 위치에서 독립적으로 생기는 것으로 보기 어려우므로, 서로 의존적이라고 보는 것이 타당하다. 따라서 0도에서의 R값만을 잡음변수로 선택하였고, 나머지 45도와 90도에서의 R값의 변동경향은 0도에서의 R값의 경향을 따르는 것으로 하였다. 마찬가지로 항복응력과 인장강도도 하나의 인장곡선에서 얻어지는 것이므로 서로 독립적으로 변한다고 볼 수 없으므로, 변동의 경향이 서로 비슷할 것이므로 서로 의존적이라 보는 것이 타당하다. 따라서 항복응력만을 잡음변수로 선택하고 인장강도는 항복응력의 변동 경향을 따르는 것으로 하였



(a) 1^{st} trial



(b) 10^{th} trial

Fig. 5 Drawbead configurations and forming limit of the preliminary analysis

다. 여기에 박판 성형 공정에서 일상적으로 발생하는 잡음변수의 변동범위를 고려하여 Table 2와 같이 잡음수준으로 선택하였다.

강건 설계 실험은 다음과 같이 구성하였다. 설계변수는 L_{18} 직교표의 2열에서 8열까지 AD~GB를 알파벳 순서로 배치하였고, 잡음변수는 L_9 직교표의 1열에서 4열까지 T, L, R_0, Y의 순서로 배치하였다. 각 실험조건에서의 *AutoForm* 해석결과로부터 MWC(maximum wrinkling criterion), MFC(maximum failure criterion), SSD(square-sum of spring-back displacement)를 계산하였다. 여기서 MWC는 주름의 발생정도를 평가하는 지표이고, MFC는 파단의 정도를 나타내는 지표로서 성형 후 임의의 위치에서 측정한 주변형률과 부변형률의 성형한계곡선까지의 상대적 위치에 따라 정해지는 지표이다. SSD는 전체적인 스프링백의 크기를 평가하는 지표로서 스프링백 측정점들에서 계산된 스프링백의 변위 제곱합이다. MWC는 예비해석에서

Table 1 Control factors and levels

control factor	unit	level 1	level 2	level 3
AD	-	0.35	0.40	0.45
BD	-	0.50	0.60	0.70
CD	-	0.45	0.50	0.55
DD	-	0.45	0.5	0.55
ED	-	0.50	0.60	0.70
FD	-	0.25	0.30	0.35
GB	kN	900	1000	1100

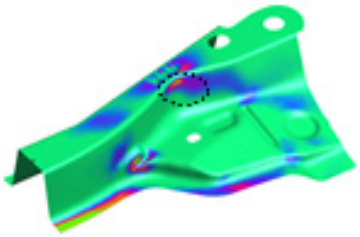
Table 2 Noise factors and levels

noise factor	unit	level 1	level 2	level 3
T	mm	1.52	1.6	1.68
L	-	0.108	0.12	0.132
R_0	-	0.67	0.74	0.81
Y	Mpa	383	393	403

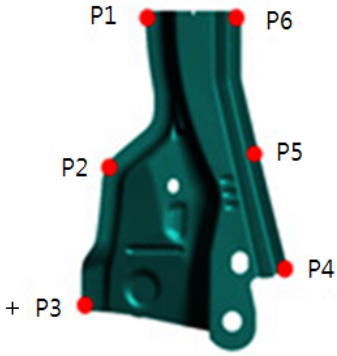
주름이 발생할 가능성이 높은 지점(Fig. 6의 (a) 점선 부위)을 선택하여 계산하였고, MFC는 Fig. 6의 (a) 전체영역에서 계산하였으며, SSD는 Fig. 6의 (b) 6개의 점을 기준으로 계산하였다. AutoForm 해석결과로부터 MWC, MFC, SSD를 계산하는 방법은 저자의 이전 연구에 상세히 설명되어 있다[2,11].

설계조건 m과 잡음조건 n에서 계산된 MWC, MFC, SSD 데이터는 각각 y_{1mn}, y_{2mn}, y_{3mn} ($m=1,...,M$, $n=1,...,N$) 이고, 여기서 설계조건의 개수 $M=18$ 이고 잡음조건의 개수 $N=9$ 이다.

실험 데이터로부터 MD와 SN비를 계산하는 과정은 다음과 같다. 첫째, MWC, MFC, SSD를 측정항목으로 선택한다. 둘째, 정상 집단의 데이터를 다음과 같이 선택한다. 전체 실험 데이터 (y_{1mn}, y_{2mn}, y_{3mn})에 대해 측정항목별로 크기에 대한 순위(rank)를 구하고, 이를 (R_{1mn}, R_{2mn}, R_{3mn}) 이라고 한다. (y_{1mn}, y_{2mn}, y_{3mn})의 종합순위는 측정항목별 순위



(a) Measurement area of wrinkle and fracture



(b) Measurement points of spring-back

Fig. 6 Measurement points of main experiment

의 가중평균 $w_1R_{1mn}+w_2R_{2mn}+w_3R_{3mn}$ 으로 구한다. 여기서 가중치 w_i 는 측정항목의 상대적 중요도를 고려하여 설계자가 결정한다. 본 사례에서는 스프링백의 개선이 가장 중요한 문제라고 생각하여, $w_1=0.1$, $w_2=0.1$, $w_3=0.8$ 을 부여하였다. 각 측정항목은 모두 망소특성이므로, 전체 실험 데이터 (y_{1mn}, y_{2mn}, y_{3mn}) 중 종합순위가 상위 15% 이내에 속하는 25개의 데이터를 정상 집단(Table 3)으로 선택하고, 이를 (x_{1j}, x_{2j}, x_{3j}) 으로 나타내었다.

셋째, MD를 계산한다. 각 실험조건에서 얻은 데이터를 식(1)을 이용하여 정규화 한다.

$$Z_{imn}=(y_{imn}-m_i)/s_i \qquad (1)$$

여기서, Z_{imn} 는 y_{imn} 의 정규화 데이터 ($i=1,2,3$, $m=1,2,...,M$, $n=1,2,...,N$), m_i와 s_i는 x_{ij} ($j=1,2,...,J$) 의 평균과 표준편차이다. 설계조건 m 과 잡음조건 n 에서의 데이터 (y_{1mn}, y_{2mn}, y_{3mn})의

Table 3 Normal group for cross member

j	MWC	MFC	SSD
	x_{1j}	x_{2j}	x_{3j}
1	0.0175	0.785	122.8
2	0.0235	0.789	79.2
3	0.0126	0.757	143.3
4	0.0167	0.710	147.9
5	0.0156	0.774	152.4
6	0.0152	0.672	180.1
7	0.0172	0.785	114.8
8	0.0172	0.734	139.9
9	0.0243	0.842	120.9
10	0.0124	0.725	162.3
11	0.0164	0.732	131.8
12	0.0269	0.806	96.5
13	0.0197	0.823	113.2
14	0.0224	0.781	109.1
15	0.0275	0.845	85.8
16	0.0170	0.782	113.4
17	0.0289	0.794	122.2
18	0.0150	0.744	133.2
19	0.0225	0.755	103.3
20	0.0312	0.732	115.7
21	0.0301	0.717	126.4
22	0.0182	0.793	98.0
23	0.0230	0.800	123.3
24	0.0254	0.911	72.5
25	0.0335	0.761	85.0
m_i	0.0212	0.774	119.7
s_i	0.0060	0.050	26.2

MD는 식(2)와 같이 계산된다.

설계조건 m 과 잡음조건 n 에서의 데이터 (y_{1mn}, y_{2mn}, y_{3mn})의 MD는 식(2)와 같이 계산된다.

$$MD_{mn}=\frac{1}{3}Z_{mn}R^{-1}Z_{mn}^{T} \qquad (2)$$

여기서, $Z_{mn}=(Z_{1mn},Z_{2mn},Z_{3mn})$, $X_{ij}=(x_{ij}-m_i)/s_i$, $R=[r_{vw}]_{3\times3}$, $r_{vw}=\sum_{j=1}^{J}X_{vj}X_{wj}/(J-1)$ $(v,w=1,2,3)$, $J=25$ 이다.

넷째, MD_{mn}의 SN비를 계산한다. 본 설계상황에서 MD는 망소특성이므로, 실험조건 m $(m=1,2,...,M)$

Table 4 Results of main experiment

(a) MWC

L_{18}	N_1	N_2	⋯	N_8	N_9
1	0.018	0.019	⋯	0.017	0.015
2	0.033	0.023	⋯	0.022	0.016
3	0.035	0.027	⋯	0.022	0.019
4	0.033	0.028	⋯	0.024	0.020
5	0.041	0.030	⋯	0.027	0.017
6	0.035	0.021	⋯	0.018	0.013
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
13	0.030	0.027	⋯	0.024	0.017
14	0.035	0.024	⋯	0.023	0.013
15	0.042	0.030	⋯	0.027	0.023
16	0.036	0.030	⋯	0.029	0.022
17	0.035	0.029	⋯	0.028	0.024
18	0.036	0.030	⋯	0.030	0.018

(b) MFC

L_{18}	N_1	N_2	⋯	N_8	N_9
1	0.635	0.647	⋯	0.710	0.672
2	0.679	0.706	⋯	0.781	0.732
3	0.743	0.759	⋯	0.844	0.796
4	0.703	0.712	⋯	0.789	0.750
5	0.742	0.750	⋯	0.812	0.782
6	0.692	0.756	⋯	0.768	0.721
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
13	0.707	0.746	⋯	0.812	0.785
14	0.674	0.719	⋯	0.755	0.757
15	0.685	0.721	⋯	0.790	0.718
16	0.695	0.756	⋯	0.782	0.753
17	0.744	0.828	⋯	0.845	0.842
18	0.712	0.794	⋯	0.775	0.785

에서의 SN비는 식(3)과 같이 계산된다. 여기서 N는 잡음조건의 개수이다.

$$SN_m = -10\log\left(\sum_{n=1}^{N} MD_{mn}/N\right)\ (dB) \qquad (3)$$

(c) SSD

L_{18}	N_1	N_2	⋯	N_8	N_9
1	218.1	182.0	⋯	147.9	180.1
2	180.5	124.8	⋯	109.1	131.8
3	161.4	105.7	⋯	84.4	112.9
4	143.2	100.8	⋯	79.2	101.2
5	143.3	104.1	⋯	81.2	113.4
6	188.1	137.5	⋯	120.7	142.6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
13	151.5	105.4	⋯	88.9	114.8
14	182.3	128.0	⋯	103.3	143.3
15	174.5	101.1	⋯	87.0	114.0
16	144.0	97.0	⋯	76.6	106.9
17	149.9	104.3	⋯	85.8	120.9
18	158.6	108.4	⋯	94.2	122.8

(d) MD and SN ratio

L_{18}	N_1	N_2	⋯	N_9	SN
1	6.90	2.77	⋯	1.96	-10.5
2	8.23	1.00	⋯	0.49	-10.2
3	8.20	0.51	⋯	0.18	-9.42
4	3.71	2.24	⋯	1.36	-8.46
5	8.76	1.03	⋯	0.45	-10.1
6	12.2	0.23	⋯	0.86	-12.7
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
13	3.32	0.79	⋯	0.36	-6.55
14	10.2	0.67	⋯	0.69	-11.1
15	11.2	1.99	⋯	1.13	-13.4
16	5.49	1.08	⋯	0.55	-7.33
17	6.11	1.04	⋯	1.81	-8.02
18	7.09	0.89	⋯	0.19	-8.46

설계실험에서 계산된 MWC, MFC, SSD는 Table 4의 (a)-(c)와 같고, MD와 SN비는 Table 4의 (d)와 같다. 최적의 강건한 성형조건은 SN비에 대한 평균

Table 5 Comparison of MD and SN ratio of baseline and optimal solutions

Solution	N1	N2	…	N8	N9	SN
Baseline	8.01	1.14	…	0.33	1.45	-10.4
Optimal	1.67	0.62	…	1.64	0.11	-3.43

분석을 통하여 $A_3B_1C_2D_3E_1F_3G_3$ 으로 결정되었다. 평균분석에 대한 상세한 절차는 Taguchi[14]에 설명되어 있다. 설계 최적화에 따른 개선 성과를 평가하기 위해 Table 5와 같이 최적조건과 기준조건($A_2B_2C_2D_2E_2F_2G_2$)에서의 MD와 SN비를 확인실험을 통하여 Table 5와 같이 구하였다.

앞에서의 계산 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 첫째, Table 5에서 보는 것과 같이 기준조건에 비해 최적조건에서 MD는 감소하였고, SN비는 -10.4(dB)에서 -3.43(dB)로 6.97(dB)가 증가하였다. 이러한 증가는 최적조건에서의 MD의 분산이 기준조건에서의 MD 분산의 20%(=$1/2^{6.97/3}$) 수준으로 감소하였음을 의미한다. 이것은 현장의 엔지니어들이 경험적 방식으로 결정한 성형조건에 비해서, 본 연구에서 제안된 강건 설계 방법이 잡음이 있는 상황에서 성형불량을 안정적으로 줄일 수 있음을 의미한다. 둘째, Table 4의 (d)에서 보는 것과 같이 잡음 수준에 따라 MD의 변화가 상당히 크다. 이는 주름, 파단, 스프링백에 대한 잡음인자의 영향력이 크다는 것을 의미한다. 따라서 박판 성형 공정에서는 재료물성이나 공정변수의 변동을 고려하지 않으면 안정적인 성형조건을 구하기 힘들다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

다양한 기계가공공정에서 공정조건을 최적화하는 문제는 그간 현장의 주요한 관심사가 되어왔다. 특히 설계대안의 평가에 다수의 특성이 고려되거나 특성에 영향을 주는 변수들에 불확실성이 존재하는 경우 전통적인 최적화 방법으로는 한계가 있었다. 또한 특성들 간에 상관관계가 존재하는 경우에는 설계대안의 평가에 오류가 발생할 수 있음에도 불구하고 거의 대부분의 기존 연구에서 이를 고려하지 않았다.

본 연구에서는 이러한 상황을 고려하여 잡음이 존재하는 박판 성형 공정에서 MTS를 사용하여 상관관계가 존재하는 3가지 성형불량을 최소화시키는 다특성 강건 설계 방법(multi-attribute robust design method)을 제시하였다. 사례적용을 통하여 제안된 강건 설계 방법을 활용하여 박판 성형 공정의 강건성(robustness)을 획기적으로 개선할 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 위해 수행된 계산 경험을 토대로 판단할 때, MD는 정상 집단의 선정에 비교적 큰 영향을 받는다. 따라서 MTS를 적용하는 경우 매우 신중하게 정상 집단을 선정하여야 하며, 이에 대한 추가적 연구가 필요한 것으로 생각된다. 또한 본 연구에서 제안된 MTS를 이용한 다특성 강건 설계 방법은 박판 성형 공정뿐만 아니라 다양한 기계가공공정에 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

"이 논문은 2013년도 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음."

REFERENCES

1. Kim. K. M., Yin. J. J. and Suh. Y. S., "Process optimization of sheet metal forming using operating window", ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, pp. 1-8, 2009.
2. Kim. K. M. and Yin. J. J., "Robust design of springback in sheet metal forming", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 12, No. 2, pp. 41-48, 2013.
3. Zhang. W. and Shivpuri. R., "Probabilistic design of aluminum sheet drawing for reduced risk of wrinkling and fracture", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 94, No. 2, pp. 152-161,

2009.

4. Chen. P. and Koc. M., "Simulation of springback variation in forming of advanced high strength steels", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 190, No. 1, pp. 189-198, 2007.
5. Zhang. Z. T., and Lee. D., "Effects of process variables and material properties on the springback behavior of 2D-draw bending parts", SAE Technical Paper, No. 950692, pp. 11-18, 1995.
6. Song. J. H., Huh. S. H., Kim. S. H. and Park. S. H., "Springback reduction in stamping of front side member with a response surface method", Proceedings of the 6th International Conference, Numisheet, pp. 303-308, 2005.
7. Li. Y. Q., Cui. Z. S., Ruan. X. Y. and Zhang. D. J., “Application of six sigma robust optimization in sheet metal forming”, PAIP Conference Proceedings, Vol. 778, No. A, pp. 819, 2005.
8. Bae. G. H., Song. J. H., Huh. S. H., Kim. S. H. and Park. S. H., "Simulation-based prediction model of the draw-bead restraining force and its application to sheet metal forming process", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187, pp. 123-127, 2007.
9. Stoughton. T. B., "Model of drawbead forces in sheet metal forming", Proceedings of the 15th Biennial IDDRG Congress, pp. 205-215, 1988.
10. Liu. G., Lin, Z. and Bao. Y., "Optimization design of drawbead in drawing tools of autobody cover panel", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 124, No. 2, pp. 278-285, 2002.
11. Kim. K. M. and Yin. J. J., “Optimization of sheet metal forming process by using decision-making theory”, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 2, pp. 125-136, 2012.
12. Jugulum. R., Taguchi. G., Taguchi. S., and Wilkins. J., Discussion on “A review and analysis of Mahalanobis-Taguchi system”, Technometrics, Vol. 45, No. 1, pp. 16-21, 2003.
13. AutoForm, Autoform Engineering GmbH and ETH, Zurich, 2013.
14. Taguchi. G., Chowdhury. S., and Wu. Y., TAGUCHI’S Quality Engineering HANDBOOK, Wiley, New Jersey, pp. 318-330, 2004.