

소구경 관단 성형공정 최적화

이정환*[†] · 이승훈* · 오현옥**

*동의대학교 산업경영공학과
**부국산업(주)

A Study on the Forming Process Optimization of a Small Tube

Jung-Hwan Lee*[†] · Seung-Hoon Lee* · Hyun-Ok Oh**

*Dept. of Industrial and Management Engineering, Dongeui University
**Boogook Industry co. Ltd.

The end shape of tube for automobile power steering system has influence on the ability of performance. In this case study, we attempted to optimize the forming process of a small tube using Taguchi experimental design methodology. A preliminary experiment was conducted and four main control factors were selected. The experiment was set up as an $L_9(3^4)$ orthogonal array, and determined the optimal levels of the four factors through the analysis of the experimental results. As a result, the performance characteristic(close adhesion power) of the product was improved about 36%. In addition, the process capability index C_{pk} is enhanced from 0.94 to 6.85.

Keywords : Taguchi Experimental Design Methodology, Forming Process, Orthogonal Array

1. 서론

성형가공은 일반적으로 재결정온도를 기준으로 열간 성형과 냉간성형으로 크게 나누어진다. 열간성형은 재료의 변형저항이 작으므로 매우 복잡한 형상의 부품들을 비교적 용이하게 성형 할 수 있다는 이점이 있지만 열간성형을 하기 때문에 스케일이 발생하고 정밀도가 높은 부품가공을 만들지 못하는 단점이 있다[1, 2]. 따라서 복잡한 형상의 성형을 쉽게 할 수 있으나, 고온에서 작업을 수행하기 때문에 연료비용, 표면불량, 잉여소재 등이 발생된다. 냉간성형은 상온에서 소성가공을 수행하는 가공방법으로 소재 회수율, 제품의 치수정밀도

및 가공경화에 의한 기계적 성질 등이 우수하여 다양한 방면에서 응용되고 있다. 그러나 냉간성형시 금형내부의 소재 유동, 금형의 형상, 금형과 소재의 마찰로 인하여 소재와 접하는 금형의 내면에 높은 압력이 작용하게 된다. 따라서 금형과 성형장치의 손상이나 최종제품의 형상에 결육 및 겹침 등에 대한 예방과 개선이 무엇보다 중요하게 요구되어 진다[3, 4, 5, 6].

소성가공을 통한 성형은 고품질의 제품을 대량을 생산할 수 있는 특징을 가지고 있으나 성형품의 품질에 미치는 인자가 너무 많아 모든 경우의 실험을 실시하여 최적 조건을 찾는 것은 시간과 경제적인 비용 등이 많이 소요되어 산업현장에서는 금속성형공정 설계자의 경험

논문접수일 : 2010년 07월 08일 논문수정일 : 2010년 07월 26일 게재확정일 : 2010년 08월 06일

[†] 교신저자 jhlee@deu.ac.kr

※ 본 논문은 2008학년도 동의대학교 자체 학술연구비(2008AA159)의 지원을 받아 작성되었음.

과 시행착오 방법을 통하여 성형공구 개발 및 공정 최적화를 수행하고 있다. 이 경우 성형공구 개발 및 공정 최적화를 위한 기간과 비용이 높아 제품 단가의 상승을 초래한다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 다구치 방법, 반응표면분석 등 체계적인 기법의 적용이 필요하다. 최근 이러한 기법을 적용한 사례로서, 알루미늄(AI700IT9) 소재 파이프의 Roller Levelling 공정 최적화를 위하여 유한요소 해석과 다구치 방법을 이용한 사례[7], 다구치 방법을 이용하여 알루미늄(AA6061) 소재 파이프의 유동 성형(flow-forming) 공정 최적화를 시도한 사례[8], 초고강도 스틸(advanced high strength steel)의 성형 공정최적화에서 반응표면분석과 다구치 방법을 적용한 사례[9], 원형 컵 형상의 액압 성형(hydronechanical forming) 공정 최적화를 위하여 유한요소해석과 다구치 방법을 이용한 사례[10] 등이 있다.

본 연구에서의 대상 제품은 기계장치 및 동력전달용 소구경 파이프로서 동력전달 및 유체이송 등을 위해 사용되는 소구경 파이프의 끝 단부 성형 형상은 시스템에 중대한 영향을 미치는 부분이므로 정밀성형이 이루어져야 한다. 만약 파이프 끝 단부 및 성형부위의 누유 및 균열 등으로 인한 제품결함이 발생되었을 때에는 설비 및 기계장치의 성능저하 뿐만 아니라 인명손실까지 예상된다. 따라서 본 연구에서는 다구치 방법을 이용하여 소구경 튜브 끝단의 성형형상 최적화를 시도하고자 한다.

<표 1> 소구경 파이프 기계성질

인장강도 (kgf/mm ²)	항복점 (kgf/mm ²)	신장률 (%)	경도
30이상	18이상	25이상	HR30T 65이하

<표 2> 소구경파이프 화학조성비

C	Si	Mn	P	S
Max 0.12%	-	Max 0.50%	Max 0.04%	Max 0.045%

위의 소구경 파이프를 성형한 후의 형상은 <그림 2>와 같다. 이 소구경 파이프는 다른 부품(호스)과 조립되어 유체 및 기체의 흐름 또는 동력전달을 위해 사용된다. 이러한 기능 특성상 상대 부품(호스)과의 밀착력 및 밀폐력 등이 우수하여야 한다. 만일 밀착력 및 밀폐력이 나쁘면 누유 혹은 상대 부품이 이탈되어 해당 시스템(예 : 자동차 파워 스티어링 시스템)에 중대한 결함을 야기하게 된다.

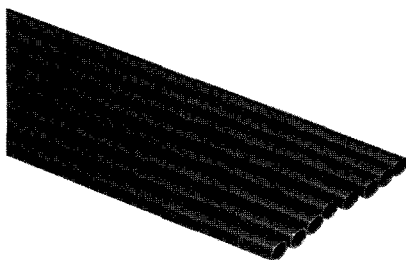


<그림 2> 성형 후의 파이프 형상

2. 다구치 실험계획법을 이용한 최적설계

2.1 대상 제품

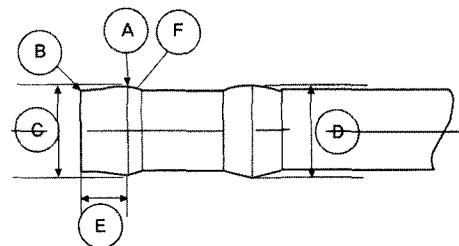
본 연구의 대상 제품인 소구경 파이프는 외경 지름이 Ø 8로서 파이프의 인장장도는 30kgf/mm², 항복점 18kgf/mm² 및 신장률을 25% 이상 되는 금속 소재의 제품이며, 성형 전의 제품 형상은 <그림 1>과 같다. 그리고 이 파이프의 기계적 성질과 화학조성비는 각각 <표 1>과 <표 2>와 같다[11].



<그림 1> 소구경 파이프

2.2 제어인자의 선정

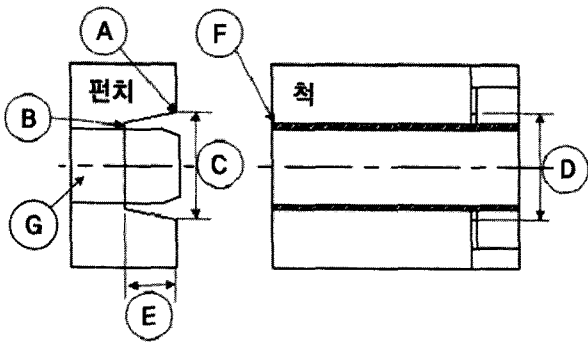
본 연구에서는 밀착력 및 밀폐력에 영향을 미치는 제어인자로 판단 성형 설계 변수와 판단 성형 공구인 척, 펀치 및 설비의 설계 변수를 고려하여 8개의 인자를 선정하였다. <그림 3>은 소구경 파이프의 판단 형상을 위한 설계변수이다. 설계변수 A는 사두(snake head shape) 꼭지점의 표면적, B는 사두 끝 단부 형상, C는 사두 크기,



<그림 3> 소구경 파이프 판단 설계 변수

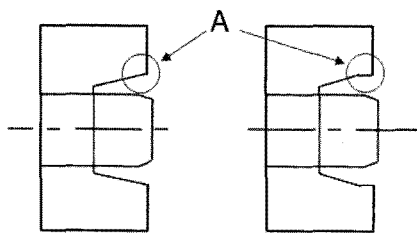
D는 이중 사두 크기, E는 사두와 파이프 끝 단부 사이의 길이, F는 사두 밑 부분 경사를 나타낸다.

소구경 파이프의 관단 형상을 위한 설계변수를 고려하여 이의 성형을 위한 성형공구인 척과 펀치의 설계변수를 제어인자로 선정하였다. 척과 펀치의 설계 변수가 <그림 4>에 나타나 있다. 펀치의 설계변수 A~E는 제품 형상 A~E에 각각 대응되고, 척의 설계변수 F는 제품 형상 F에 대응된다.



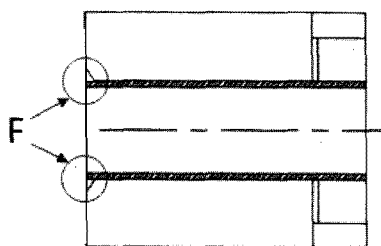
<그림 4> 척, 펀치 설계 변수

펀치의 설계변수 A의 형상의 예가 <그림 5>에 주어 져 있다. 첫 번째 형상의 펀치로 성형하면 제품의 A부분 형상이 뾰족하게 되며, 두 번째 형상의 펀치는 제품의 A부분 형상을 뿔뿔하게 만든다.



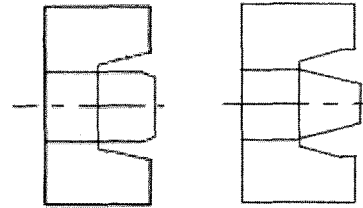
<그림 5> 펀치의 설계변수 A의 형상

그리고 <그림 6>의 척의 설계변수 F는 제품 F부분 형상의 경사도와 관련이 있는 인자이다.



<그림 6> 척의 설계변수 F

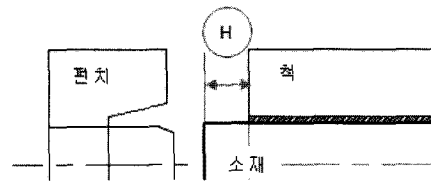
펀치의 설계변수 G는 <그림 7>과 같이 유형 I과 유형 II의 두 가지를 고려하였다.



(a) 유형 I (b) 유형 II

<그림 7> 펀치의 설계변수 G의 종류

그리고 관형 재료를 척에 물릴 때의 소재 길이 H는 <그림 8>과 같다.



<그림 8> 소재 길이

각각의 제어인자의 수준값은 허용치수 및 형상 크기의 제약에 따라 <표 3>과 같이 정하였다.

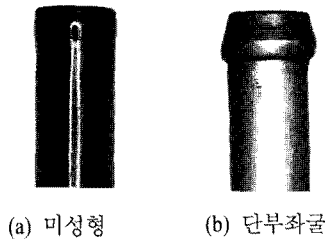
<표 3> 제어인자와 수준

제어인자	수준		
	1	2	3
A	현행	현행+1.0	현행+2.0
B	현행	현행+1.0	-
C	현행	현행+0.3	현행+0.6
D	현행	현행+0.3	현행+0.6
E	현행-4.0	현행	현행+4.0
F	현행-0.5	현행	현행+0.5
G	I형(현행)	II형	-
H	현행-2	현행	현행+2

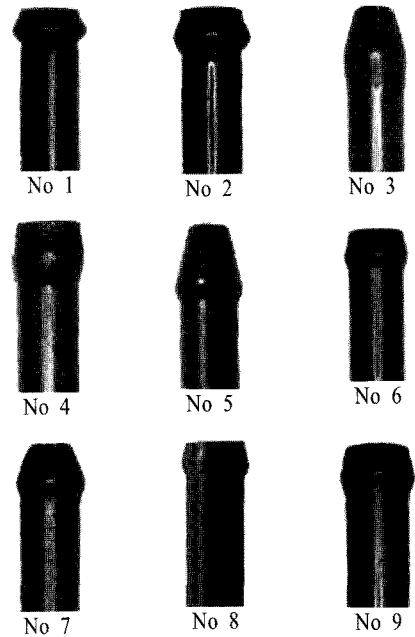
2.3 예비 실험 및 최종 제어인자의 선정

본 연구에서는 직교배열표 배치에 앞서 몇몇 제어인 자들에 대하여 예비실험 및 사전 조사를 실시하였다. 그 결과 제어인자 B는 작업자의 경험과 생산성 등에서 B₁에 비해 B₂가 유리하다고 판단되었다. 그리고 제어인

자 D는 제어인자 C와 동일 조건이므로 실험인자에서 제외하였다. 제어인자 G는 생산성에 미치는 요인으로 예비 실험 결과 G₂가 더 좋은 것으로 나타났다. 또한 척에 물리는 소재 길이(제어인자 H)는 <그림 9>와 같이 H₁에서는 미성형 현상이 발생하였고, H₃에서는 좌굴형상이 나타나, 제어인자 H에 대해서는 H₂로 고정하였다. 따라서 본 연구에서는 A, C, E, F를 최종 제어인자로 선정하였다.



<그림 9> H인자 예비실험 결과



<그림 10> 성형 결과물

2.4 제어인자의 직교배열표 배치 및 성형 결과

예비 실험 결과로부터 최종 선정된 제어인자 A, C, E, F를 <표 3>과 같이 3수준씩 고려하여, 최소의 실험 횟수를 갖는 직교배열표 L₉(3⁴)를 선정하여, <표 4>와 같이 제어인자 A, C, E, F를 L₉(3⁴)의 직교배열표에 각각 1, 2, 3, 4열에 배치하였다.

<표 4> 제어인자의 직교배열표 L₉(3⁴) 배치

No	A	C	E	F
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

<표 4>의 L₉(3⁴) 직교배열표에 의한 각각의 실험조건으로 성형 공구인 펀치와 척을 제작하였다. 여기서 제어인자 A, C, E는 펀치의 설계변수이며, 제어인자 F는 척의 설계변수이므로, <표 4>의 실험조건에 의하여 펀치는 9개, 척은 3개가 제작되었다. <표 4>의 각각의 실험

조건에 의하여 본 연구의 대상 제품인 파이프를 성형한 결과물이 <그림 10>에 주어져 있다.

2.5 잡음인자의 선정

제품의 성능 특성치가 목표치를 유지하지 못하고 산포를 야기하는 원인이 잡음(noise)이며, 잡음에는 외란, 내란, 불안전 제조 등으로 분류된다[12, 13, 14]. 본 연구에서는 파이프 원소재의 신율과 인장강도, 파이프 치수 및 상대 부품(호스) 치수 등의 산포를 잡음인자로 선정하였다. 이는 파이프 원소재와 상대 부품을 외주업체로부터 납품을 받는데, 이 부품의 품질 산포를 고려한 것이다. 이를 위하여 외주업체로부터 납품을 받은 파이프 원소재와 상대 부품의 품질을 조사한 결과 <표 5>와 같은 결과를 얻었다.

<표 5> 잡음인자와 산포 범위

잡음인자	산포 범위
소재신율	25± 3(%)
인장강도	30± 5(kgf/mm ²)
파이프 치수	Ø 8± 0.2
상대품 치수	Ø 10± 0.3

잡음을 실험에 반영하는 방법은 (1) 잡음인자의 수준을 정하여 직교배열표에 배치하여 실험을 행하는 방법

(2) 잡음인자의 수준을 정하지 않고 단순 반복테이터를 얻는 방법 (3) 잡음을 조합하는 방법 등의 3가지가 대표적이다. 본 연구에서는 잡음을 조합하는 방법을 채택하였으며, 출력반응이 낮아지는 경향을 가진 잡음조합 조건(N1)과 출력반응이 높아지는 경향을 가진 잡음조합 조건(N2)을 <표 6>과 같이 정하였다.

<표 6> 잡음인자와 잡음조합 수준

잡음인자	N1	N2
소재신율	22	28
인장강도	25	35
파이프 치수	Ø 7.8	Ø 8.2
상대품 치수	Ø 9.7	Ø 10.3

2.6 성능특성 측정

본 연구에서는 상대 부품(호스)과의 밀착력 및 밀폐력이 중요하므로 이를 측정하기 위하여, <표 4>의 각각의 실험조건에 의하여 성형한 결과물을 상대 부품과 연결한 다음, 내압시험기를 이용하여 일정한 시간동안 압력을 상승시켜 누유 및 부품의 이탈되는 시점의 압력을 측정하였다. 측정된 결과는 <표 7>과 같다. 이 성능특성의 규격은 15kg/cm^2 이상으로 되어 있다.

<표 7> 밀착력 측정 데이터

(단위 : kg/cm^2)

No	A	C	E	F	N1	N2
1	1	1	1	1	15.3	16.7
2	1	2	2	2	20.3	20.9
3	1	3	3	3	19.4	20.3
4	2	1	2	3	16.1	17.2
5	2	2	3	1	19.4	20.3
6	2	3	1	2	22.3	22.8
7	3	1	3	2	18.0	19.1
8	3	2	1	3	17.2	18.5
9	3	3	2	1	21.6	22.1

2.7 실험결과 분석 및 최적조건의 결정

본 연구의 경우 성능특성치는 밀착력(압력)이므로 망대특성에 해당되며 SN비는 아래의 공식에 의해서 계산된다[14].

$$SN_i = -10\log\left\{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{i,j}^2}\right\}$$

<표 7>의 측정 데이터로부터 계산된 SN비 계산결과는 <표 8>에 주어져 있다.

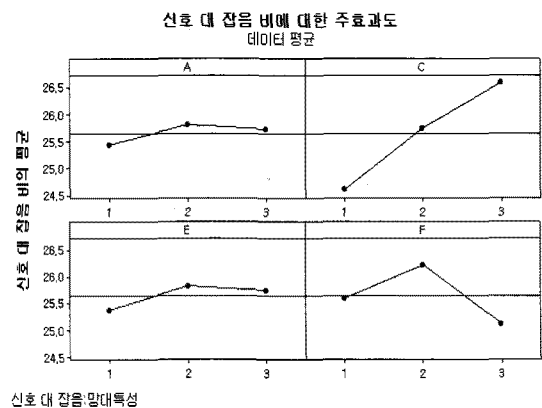
<표 8> 실험결과에 의한 SN비 계산 결과

No	N1	N2	SN비
1	15.3	16.7	24.0575
2	20.3	20.9	26.2746
3	19.4	20.3	25.9485
4	16.1	17.2	24.4141
5	19.4	20.3	25.9485
6	22.3	22.8	27.0613
7	18.0	19.1	25.3554
8	17.2	18.5	25.0155
9	21.6	22.1	26.7873

SN비에 대한 제어인자의 수준별 평균값을 구한 결과는 <표 9>와 같으며, 이에 대한 주효과도(main effect plot)는 <그림 11>과 같다.

<표 9> SN비에 대한 수준별 평균값

Level	A	C	E	F
1	25.43	24.61	25.38	25.60
2	25.81	25.75	25.83	26.23
3	25.72	26.60	25.75	25.13
Delta	0.38	1.99	0.45	1.10
Rank	4	1	3	2

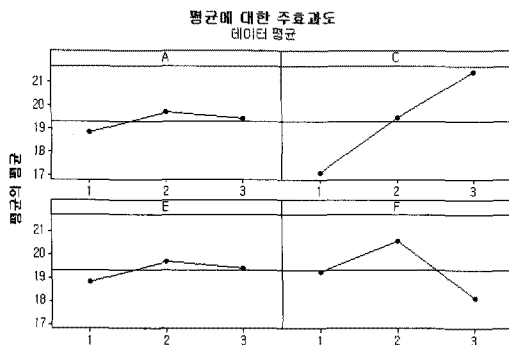


<그림 11> SN비에 대한 주효과도

<표 10> 평균에 대한 수준별 평균값

Level	A	C	E	F
1	18.82	17.07	18.80	19.23
2	19.68	19.43	19.70	20.57
3	19.42	21.42	19.42	18.12
Delta	0.87	4.35	0.90	2.45
Rank	4	1	3	2

그리고 원데이터(평균)에 대한 제어인자의 수준별 평균값을 구한 결과는 <표 10>과 같으며, 이에 대한 주효과도는 <그림 12>와 같다.



<그림 12> 평균에 대한 주효과도

<표 9>의 SN비에 대한 제어인자의 수준별 평균값을 고려하여 보면 성능특성(밀착력)에 제어인자가 미치는 영향은 C, F, E, A 순으로 나타났으며, 특히 제어인자 C와 F가 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

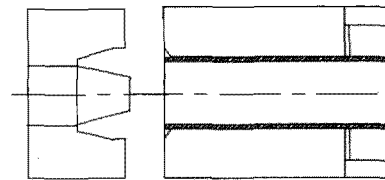
그리고 제어인자의 최적조건은 <표 9>와 <그림 11>로부터 A인자 2수준, C인자 3수준, E인자 2수준 및 F인자 2수준임을 알 수 있다. 이 실험결과를 생산부서의 기술팀과 검토한 결과 기술적인 문제점은 없었으나, 인자 E는 E₂와 E₃수준 간의 차이가 적고 상대부품과의 조립성 및 생산성 등을 고려하여 E₃를 선택하였다. 그리고 현행조건, 최적조건 및 최종조건에 대한 SN비 및 평균에 대한 추정치(예측치)는 <표 11>과 같다.

<표 11> SN비 및 평균에 대한 추정치 비교

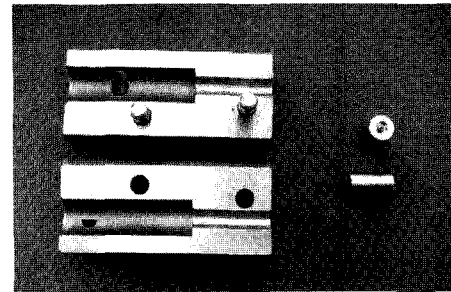
구분	조건	SN비	평균
현행조건	A1C1E2F2	25.1374	18.2333
최적조건	A2C3E2F2	27.5086	23.45
최종선택	A2C3E3F2	27.4341	23.1667

2.8 확인 실험 및 결과 분석

최종 선정된 조건인 A₂C₃E₃F₂는 <표 4>의 9가지 실험 조건에는 없는 조건이므로 확인 실험을 실시하기로 하였다. 이를 위하여 최종 선정된 조건인 A₂C₃E₃F₂ 이외에 인자 B, D, G의 조건인 B₂D₃G₂를 합하여 종합적인 최종조건인 A₂B₂C₃D₃E₃ F₂G₂H₂를 고려하여 파이프 관단 성형을 위한 공구를 개발하였다. <그림 13>는 A₂B₂C₃D₃E₃F₂G₂H₂ 조건에 대한 성형공구인 척, 펀치 스케치도이며, <그림 14>는 최종조건에 의해 제작된 척과 펀치의 실물이다.

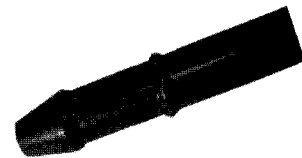


<그림 13> 최종조건인 척, 펀치 설계도



<그림 14> 최종조건인 척, 펀치 실물

최종조건에 의해 제작된 척과 펀치를 이용하여 소구경 파이프를 성형한 결과물은 <그림 15>와 같다.



<그림 15> 최종 조건에서의 성형후의 제품

<그림 15>의 최종조건에 의해 소구경 파이프를 성형한 결과물을 이용하여 성능특성치(밀착력)를 측정하여, 확인 실험에서의 SN비 값과 평균값을 산출한 결과가 <표 12>와 같다. 확인실험 결과, SN비의 추정치(예측치)와 확인 실험의 SN비 값이 유사하게 산출되어 재현성이 있음을 확인할 수 있었다.

개선 효과를 살펴보면, 성능특성(밀착력)의 관점에서 현행 16.46(kg/cm²)에서 개선 후에는 22.45(kg/cm²)로 5.99가 증가하여 36%의 개선효과가 있었다. SN비의 관점에서는 2.7129(db)의 이득이 있으므로,

$$SN_{최종} - SN_{현행} = 2.7129$$

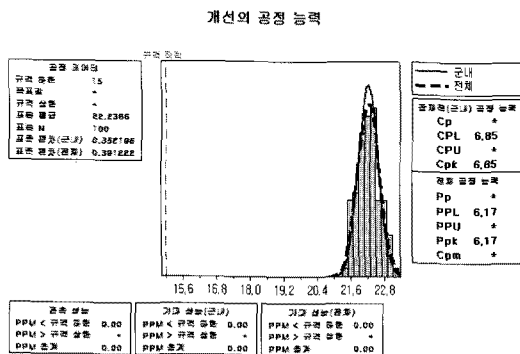
$$\Rightarrow \frac{L_{현행}}{L_{최종}} = 10^{0.27129} = 1.87$$

기대손실의 관점에서 평가할 때 최종조건에서 현행조건에 비해 약 1.87배의 개선효과를 기대할 수 있다.

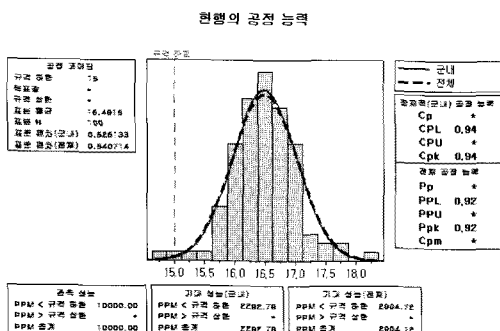
<표 12> 확인실험 결과 분석

구분	추정치		확인실험	
	SN비	평균	SN비	평균
현행조건	25.1374	18.2333	24.3062	16.46
최종조건	27.4341	23.1667	27.0191	22.45
이득	2.2967	4.93	2.7129	5.99

2.9 공정능력분석



<그림 16> 최종조건의 공정능력분석



<그림 17> 현행조건의 공정능력분석

최종조건(A₂B₂C₃D₃E₂F₂G₂H₂)으로 양산 현장에서 제품을 생산하여 공정능력을 조사하였다. 하루에 5개씩 샘플링 하여 25일 동안 데이터를 수집하여 공정능력분석을 실시한 결과 <그림 16>에서와 같이 C_{pk} 값이 6.85로 산출되어, 공정능력이 매우 우수함을 확인할 수 있었다. 참고로, 현행조건의 데이터로 공정능력분석을 실시한 결과는 <그림 17>과 같으며, C_{pk} 값이 0.94이었다.

3. 결론

본 연구에서는 다구치 방법을 이용하여 소구경 파이프의 관단 성형공정의 최적화를 시도하였다. 이를 위하여 먼저 예비실험을 통하여 4개의 주요 제어인자를 선정하였으며, 직교배열표 L₉(3⁴)에 배치하여 이 실험계획에 의하여 척(Chuck) 및 펀치(Punch)를 만들어 9가지 성형품을 제작하였다. 파이프 원소재와 상대 부품의 산포를 잡음인자로 선정하여 잡음조합 조건에서 상대 부품과의 밀착력을 측정하였다. 실험 데이터 분석 결과로부터 각 제어인자에 대한 최적조건을 결정하였으며, 특히 관단 성형사투의 크기가 가장 큰 품질 특성요인이라는 사실을 알 수 있었다. 그리고 확인실험을 통하여 SN비의 추정치(예측치)와 확인실험의 SN비 값이 유사하게 산출되어 재현성이 있음을 확인할 수 있었다. 성능특성(밀착력)의 관점에서 36%의 개선 효과가 있었다. 공정능력지수는 현행 C_{pk} 값이 0.94에서 개선 후에는 C_{pk} 값이 6.85로 증가하는 개선 효과가 있었다. 본 연구에서 개발한 성형공구를 생산현장에 적용하여 품질 향상을 통한 원가 절감 및 생산성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 서영섭, 송광호, 최병도; 소성가공, 기전연구소, 2001.
- [2] 전기찬; 박판금속의 성형, 반도출판사, 1993.
- [3] Seth, S. and Shivpuri, R.; "Simultaneous Consideration of Process Development and Die Design for Forming a Fuel Nozzle," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119 : 358-367, 1997.
- [4] Shivpuri, R., Babu, S., Kini, S., and Pauskar, P.; "Recent Advances in Cold and Warm Forging Process Modeling Techniques : Selected Examples," *Journal of Materials Processing Technology*, 46 : 127-134, 1994.
- [5] 고대철, 이진희, 김병민, 최재찬; "금속성형공정에서 성과 예측", *한국소성가공학회지*, 3(2) : 167-177, 1994.
- [6] 김용석, 김영탁; "축대칭 튜브 하이드로포밍 공정 유한

- 요소 시뮬레이션”, 한국소성가공학회지, 11(1) : 75-83, 2002.
- [7] Huh, H., Heo, J. H., and Lee, H. W.; “Optimization of a Roller Leveling Process for Al7001T9 Pipe with Finite Element Analysis and Taguchi Method,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43 : 345-350, 2003.
- [8] Davidson, M. J., Balasubramanian, K., and Tagore, G. R. N.; “Experimental investigation on flow-forming of AA6061 alloy-A Taguchi approach,” *Journal of Materials Processing Technology*, 200 : 283-287, 2008.
- [9] Chen, P. and Koç, M.; “Simulation of springback variation in forming of advanced high strength steels,” *Journal of Materials Processing Technology*, 190 : 189-198, 2007.
- [10] Sharma, A. K. and Rout, D. K.; “Finite element analysis of sheet Hydromechanical forming of circular cup,” *Journal of Materials Processing Technology*, 209 : 1445-1453, 2009.
- [11] 기술표준원, KS R 2028(자동차 배관용 금속관 규격), 2004.
- [12] Peace, G. S.; *Taguchi Methods : A Hands-On Approach*, Addison-Wesley, 1993.
- [13] Phadke, M. S.; *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice Hall, 1989.
- [14] Taguchi, G.; *Introduction to Quality Engineering*, Asia Productivity Organization, 1986.