

다구치 방법을 이용한 튜브 냉간 압출 금형의 최적화

임성식^{1,2} · 임성주¹ · 최호준¹ · 조종두^{2#}

Optimization of Die Design for Tube Cold Extrusion using Taguchi Method

S. S. Lim, S.J. Lim, H. J. Choi and C. D. Cho

Abstract

Nowadays, hollow upper-shaft of monobloc type has been considered for weight reduction and high quality in the automobile industry. To form the upper-shaft under tube cold extrusion, Taguchi method is applied to optimize the die design in this study. Taguchi method for optimum die design is to establish the optimal combination of design parameters and to reduce a number of experiments. Effect of parameters including the die relief, mandrel, die half angle is investigated and analyzed based on FEA analysis using a FEM commercial software MSC_Marc. Furthermore extrusion experiments have been performed to verify the results investigated in the FEM simulations.

Key Words : Cold extrusion, Hollow upper-shaft, Taguchi Method, FEM, Tube

1. 서 론

현재 자동차 스티어링 컬럼 셋트에 들어가는 Upper shaft는 일반적으로 미리 중실재로 기계가공된 샤프트 끝단 부를 튜브에 삽입 후 용접하여 만든다. 그러나 용접공정에 의한 제작방법은 재료의 균일한 소성유동을 얻을 수 없는 단점이 있고 연결부와 단차부의 불연속 지점 발생으로 인한 충분한 비틀림 강성을 확보하지 못하는 문제점이 있기 때문에 타 공정에 비하여 소재의 균일한 소성유동과 요구되는 내구성을 확보 할 수 있는 일체형 성형공정이 필수적이다. 특히 튜브소재를 이용하여 중공 Upper shaft를 냉간압출 성형공정을 이용하여 성형하는 경우 생산원가가 절감되고 부품의 고성능화 측면에서 절삭가공의 배제, 재료이용률의 향상, 자원절감 및 에너지 절감의 장점을 갖는다. 또한 중공 축 도입을 통한 부품의 경량화 및 Compact 화, 품의 일체화, 가공경화에 의한 후열처리 생략 등의 환경 친화적인 효과도 함께 얻

을 수 있다. 그러나 한편으로 냉간 압출 성형공정은 성형하중이 열간에 비하여 매우 높고, 냉간 상태에서 소재 연신률이 낮으며 비교적 성형저항이 크므로 제품 형상의 단순화, 공정 별 성형한계 적용의 협소성 등 문제점 들을 해결해야 한다. 또한 새로운 공정을 개발 할 경우 금형의 제작에서 오는 경제적 부담감과 번거로움 등으로 인하여 실제 현장에서는 성형하중의 예측, 소재와 금형 사이의 작용압력과 이에 따른 금형의 마모, 정확한 금형의 파손 기구 등을 고려하지 못한채 경험에 의하여 금형 설계 및 제작이 진행되고 있다.[1-4]

따라서 본 논문에서는 일체형 중공 Upper shaft 제작을 위한 냉간 압출 금형을 설계하는 과정에서 금형제작의 경제적 부담과 실제 금형제작을 통한 실험의 시행착오를 줄이기 위하여 MSC_Marc[5]를 이용하여 공정 모의실험(Simulation)을 진행하였다. 또한 제품설계 및 공정 설계 또는 개선을 위해 적용되고 있는 다구치의 실험 계획[6]을 이용하여 모의실험에 따른 해석결

1. 한국생산기술연구원

2. 인하대학교

조종두: 인하대학교 기계공학과, E-mail: cdcho@inha.ac.kr

과로부터 데이터를 수집하였고 이로 부터 유도된 SN 비로부터 유도된 SN 비(Signal to ratio)와 분산 분석을 이용하여 최적의 금형 조건을 제시하였다.

2. 직교표를 이용한 실험계획

2.1 계수분류치의 파라미터 설계

계측기술이 부족하거나 문제의 특성상, 관측 데이터가 수치형이 아니라 범주형으로 얻어지는 상황이 현실적으로 많이 존재한다. 예를 들어 본 연구에서의 압출소재 성형 상태에 대한 검사, 용접이나 도금상태에 대한 검사, 인간의 오감에 대한 관능평가, 품목 식별 테스트 등의 실험에서는 특성치가 “좋음”, “보통”, “나쁨” 등의 범주에 속한 개수로 관측되어 지는데 이를 범주형 데이터라고 하며 이러한 범주에 순위가 있는 것을 계수 분류치라고 한다.

품질 특성이 계수 분류치인 경우 최근 다구치는 점수법에 의한 분석방법을 추천하고 있다.

우선 관측된 실험 데이터를 내측의 실험점 별로 Table 1 과 같은 형식으로 정리 한다. 이때, 범주의 개수는 보통 3~5 개인 경우가 대부분이며, 각 실험 점마다 관측수의 합이 다를 수도 있다.

Table 1 Datum of detached coefficients

	Category				Sum
	1	2	...	C	
Observation frequency	f1	f2	...	fc	N

아래는 수집된 데이터가 계수분류치인 경우 SN 비를 구하는 과정을 설명한다.

단계 1. 각 범주에 부여할 점수를 결정한다(S1, S2, ..., Sc) 특성치가 망소, 망대일 때는 가장 좋은 범주에 0 점을 부여하고, 나쁜 범주로 갈수록 점점 큰 양의 점수를 부여한다.

단계 2. 부여된 점수를 계량치의 관측 데이터로 간주한다.

단계 3. 망소특성의 SN 비를 계산한다.

이상 3 단계로 계산된 SN 비를 통하여 최적 실험 조건을 도출해 낼 수 있다. [7]

2.2. 직교표 작성

본 논문에서는 최적의 압출 금형을 찾기 위하여 금형의 릴리프(Die relief) 유무, 맨드렐의(Mandrel) 유무, 다이 반각(Die half angle)을 인자로 선정하고 각각의 인자에 대하여 다음과 같이 두 개의 수준을 고려하였다.

A : A₁ = Die relief 있음 A₂ = Die relief 없음
 B : B₁ = Mandrel 있음 B₂ = Mandrel 없음
 C : C₁ = Die angle 12° C₂ = Die angle 15°

따라서 모든 가능한 수준의 조합은 8 개이며 다구치의 L₈(2³) 직교표를 이용하여 Table 2 에 나타낸 실험조건에 따라 유한요소 해석을 진행하였다.

이때 본 논문에서는 단일 인자에 관한 영향만을 고려하므로 각 인자간의 교호작용은 고려하지 않았다..

Table 2 Orthogonal table for FEM simulation

No	A	B	C	Conditions
1	1	1	1	A ₁ B ₁ C ₁
2	1	2	2	A ₁ B ₂ C ₂
3	2	1	2	A ₂ B ₁ C ₂
4	2	2	1	A ₂ B ₂ C ₁

3. 성형 소재의 기계적 특성 분석

실험에 사용된 소재의 정확한 기계적 특성을 파악하고 유한요소해석 시 소성구간의 응력과 변형을 관계 (Stress-strain curve) 및 물성치 확보를 위하여 인장시험을 수행 하였으며 그 결과는 Table 3, Fig. 1 과 같다..

Table 3 Material properties under tensile test

	Value
Width of tensile specimen [mm]	7.03
Thickness of tensile specimen [mm]	2.80
E [Mpa]	181,000
YS [Mpa]	365.638
UTS [Mpa]	423.85

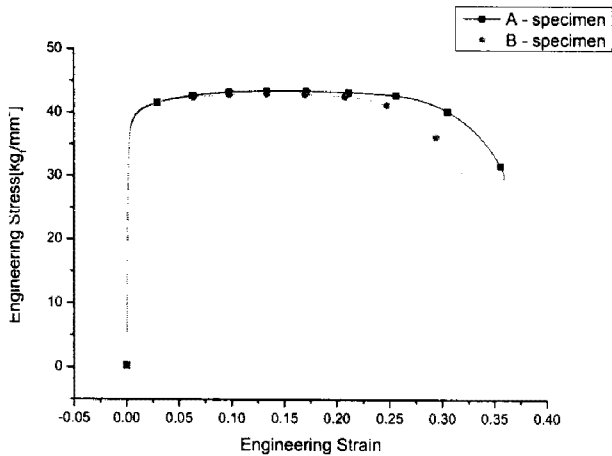


Fig. 1 Stress-strain diagram

4. 성형해석

4.1 해석조건

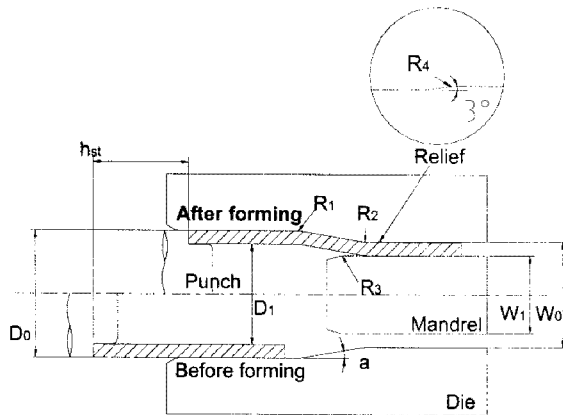


Fig. 2 Schematic geometry in tube cold extrusion

Table 4 Symbols used simulation and analysis

Symbol	Description	Symbol	Description
h_{sh}	Punch stroke	R_1	Collar corner radius
D_0	Initial billet outer dia.	R_2	Die corner radius
D_1	Initial billet Inner dia.	R_3	Mandrel corner radius
W_0	After forming billet outer dia.	R_4	Relief corner radius
W_1	Mandrel dia.	a	Die half angle

Table 5 Preparation of FEM simulation

Workpiece	Number of elements = 1,560	
	Number of nodes = 1,829	
Punch	Speed = 100mm/sec	
Simulation Control	Number of simulation steps	100 step
	Solution steps definition	Equal time increment 0.134 /sec

Fig. 2 는 튜브냉간압출 성형 해석에 사용되어진 변수들을 도식적으로 나타낸 것이다. 그림에서 이동편치(Moving punch)가 오른쪽으로 이동하면 압출이 일어나게 된다.

Table 4 에서는 해석에 사용된 모든 변수들에 대한 기호와 그에 대한 설명을 나타내었고 Table 5 에서는 유한요소해석을 위하여 초기 소재에 부여된 요소망에 관한 정보와 해석조건을 나타내었다.

소재는 외경(D_0)이 26.6 mm, 내경(D_1)이 21 mm, 길이 258.6mm 를 사용하였으며, 편치의 행정거리 (h_{st})는 134.4mm 로 일정하게 하였다. 그 외에 압출 성형 되어진 후 제품의 외경(W_0)은 22mm, 칼라 코너 반경(Collar corner; radius; R_1)은 5mm, 다이 코너 반경(Die corner radius; R_2) 및 릴리프 코너 반경(Relief corner radius; R_4)은 1mm, 맨드릴 코너 반경(Relief corner radius; R_3)은 1mm 로 그리고 마찰계수 값(Friction coefficient: μ)는 0.059 로써 모든 성형해석에 동일하게 적용하였다.

주요 설계변수(Design parameter)는 맨드릴의 유무, 릴리프 유무 그리고 다이반각(a)이다.

4.2 해석결과

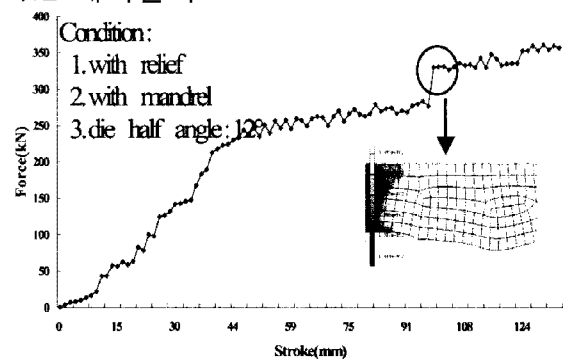


Fig. 3 Load-stroke curve in a case of A₁B₁C₁ simulation

5. 분석

성형해석을 통해 구한 제품의 성형하중, 유효변형률, 성형성 등을 판단하여 값을 (상, 중, 하)의 범주로 나누고 이 범주에 대하여 (0, 1, 3)의 점수를 부여하여 Table 6 과 같이 SN 비를 계산하였다.

SN 비를 계산한 후에 Table 7 과 같이 보조표를 작성하고 분산분석을 수행하였으며 분산분석표는 Table 8 에 제시하였다.

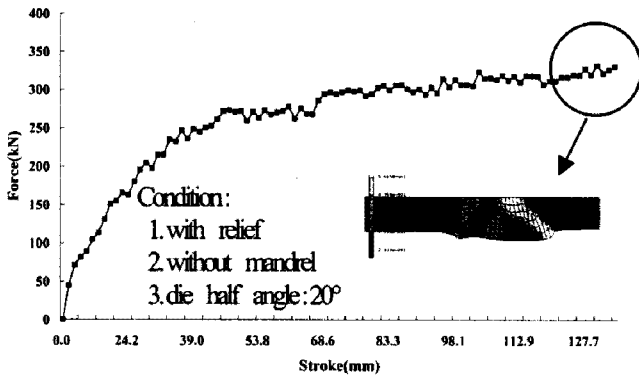


Fig. 4 Load-stroke curve in a case of $A_1B_2C_2$ simulation

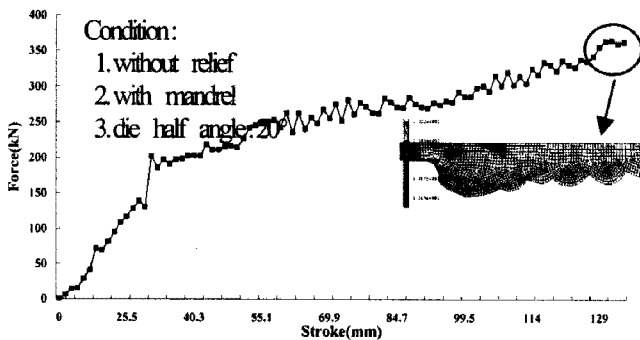


Fig. 5 Load-stroke curve in a case of $A_2B_1C_2$ simulation

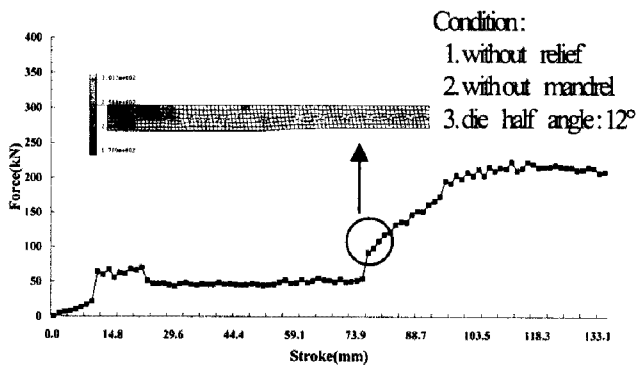


Fig. 6 Load-stroke curve in a case of $A_2B_2C_1$ simulation

Fig. 3 에서 Fig. 6 까지 는 Table 2 의 직교표에 따른 실험조건 별 성형해석 결과이다. Fig. 6 의 4 번째 조건에 따른 해석결과가 가장 양호하였다. 맨드렐을 넣어 성형 할 경우 맨드렐 없이 성형한 경우에 비하여 약 2 배 가까운 하중 증가를 보였고 다이의 반각이 12° 일 경우가 20° 일 때보다 성형후 제품의 형상이 양호하였다.

Table 6 Score and SN ratio

	A	B	C	Data			Score	SN
				Top	Mid.	Bot.		
1	1	1	1	0	2	1	3,1,1	-5.6427
2	1	2	2	0	3	0	1,1,1	0
3	2	1	2	0	0	3	3,3,3	-9.5424
4	2	2	1	2	1	0	0,1,0	4.7712

Table 7 Sum of square and sum of SN ratio

	A	B	C
1	-5.6427	-15.1851	-0.8715
2	-4.7712	4.7712	-9.5424
Sum of square(S)	0.1899	99.5640	18.7962

Table 8 ANOVA

Source of variation	Sum of square (S)	degree of freedom (Φ)	Mean square (V)	Contribution (%)
A	0.1899	1	0.1899	0.16
B	99.5640	1	99.5640	83.98
C	18.7962	1	18.7962	15.86
total	118.5501	3		100

Table 7 에서의 SN 비 분석결과에 따르면 최적성형공정은 $A_2B_2C_1$ 로 예상되었다 또한 Table 8 의 분산분석에 의하면 B 인자(맨드렐의 유무)가 소재의 성형에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단되어 지고, 금형 릴리프의 경우는 이 소재의 냉간 압출 성형에 영향을 거의 미치지 않는 것으로 나타났다. 성형해석 과정 중에도 성형부위를 빠져 나온 소재는 금형 벽면과 접촉되지 않는 모습이 관찰되었다. 하지만 경험적으로 금형에 릴리프가 존재

하는 것이 하중, 성형 후 소재의 표면 거칠기 등에 유리한 것으로 예측되어 A1B2C1의 조건으로 추가 해석을 진행하였으며 그 결과 Fig. 7 과 같은 결과를 얻을 수 있었다.[7-10]

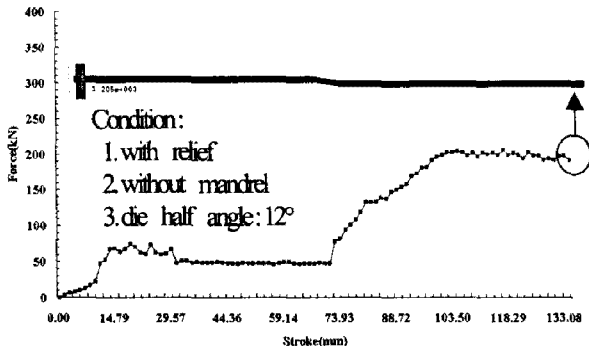
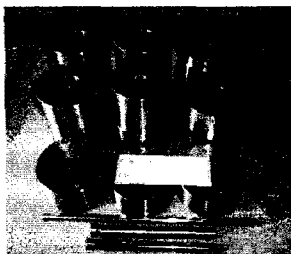


Fig. 7 Load-stroke curve in case of A1B2C1 simulation

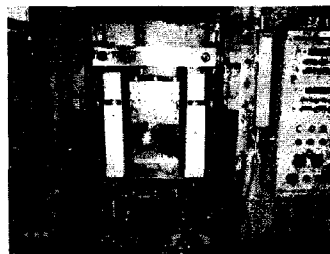
A2B2C1의 해석결과는 A2B2C1의 결과와 거의 유사함을 보였다. 따라서 중공 Upper-shaft 제작을 위한 냉간 압출성형에서 금형의 릴리프는 압출전문가의 경험에 의하여 금형에 릴리프를 적용하는 것이 성형하중과 성형 후 최종 제품형상에 유리한 것으로 알려져 있다.

6. 실험

다구치 방법과 성형해석에서 얻은 결과를 토대로 금형에 릴리프가 있고 다이반각이 12°인 실제 금형을 제작하여 맨드렐 없이 성형실험을 진행하였다.



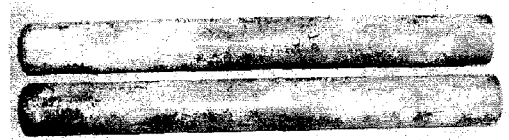
(a) Parts of die set



(b) 500ton Press

Fig. 8 Die and Machine for experimental

Fig. 8은 실험을 위해 사용된 금형 세트와 유압 프레스를 보여주고 있으며 Fig. 9(a)는 성형 전 튜브 소재이고 Fig. 9(b)는 성형된 제품이다.



(a) Work piece as tube type



(b) Formed product

Fig. 9 Work piece and product

소재는 냉간성형에서 적용되고 있는 윤활방식인 본데라이트 처리를 하였다.

성형실험 결과 Fig. 9에서 보는 것과 같이 좌굴이나 소재의 변형 없이 원하는 형상을 얻을 수 있었다.

7. 결론

본 논문에서는 자동차 스티어링 컬럼에 들어가는 Upper-shaft를 냉간에서 압출 성형하기 위한 준비단계로써 압출금형의 릴리프 유무와 맨드렐 유무 그리고 금형 각도가 소재의 성형에 미치는 영향을 다구치 방법과 유한요소해석을 통하여 분석하고 이를 실험을 통하여 증명하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 성형 중 맨드렐이 존재하는 경우 성형하중이 크게 증가하는 경향을 보였으며, 성형 중에 소재 결함이 발생하여 최종 제품의 형상을 성형하지 못하였다.

(2) SN비 분석에 따르면 최적 성형에 알맞은 금형 설계 조건은 금형에 릴리프가 존재하지 않고 맨드렐을 사용하지 않으며 금형의 각도가 12°인 것으로 나타났다.

(3) 분산분석에 의하면 튜브의 냉간압출 성형시 가장 큰 영향을 미치는 인자는 맨드렐이며 금형 릴리프에 의한 영향은 작은 것으로 나타났다.

(4) 이상에서 얻은 결론을 실험에 적용하여 그 타당성을 증명하였으며 원하는 형상의 제품을 얻을 수 있었다

후 기

본 연구는 “고정밀 냉간압출 성형기술을 이용한 다단형 중공 Upper Shaft 부품개발”에 관한 연구의 일부로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 함현욱, 김병민, 1998, 피로와 마멸을 고려한 냉간압출 금형의 최적설계, 대한기계학회 춘계 학술대회 논문집 A, pp. 777~782
- [2] 김성현, 이호용, 2005, 중공축 소재를 이용한 전후방 복합압출의 성형특성, 한국소성가공학회지, 제 14 권, 제 9 호, pp. 772~778
- [3] 강연식, 양동열, 정순길, 이준근, 1998, 세라믹 금형을 이용한 열간 튜브 압출의 축대칭 유한 요소해석, 한국소성가공학회지, 제 7 권, 제 1 호, pp. 72~80
- [4] 산업자원부, 2005, 고정밀 냉간압출 성형기술을 이용한 다단형 중공 Upper shaft 부품개발 1 차년도 중간보고서
- [5] MSC. Marc User's guide version 2005, MSC Corporation
- [6] 염봉진, 고선우, 김성준, 1990, 제품 및 공정 설계를 위한 다구치 방법, 경영학, 제 7 권, pp. 3~21
- [7] 염봉진, 서순근, 이승훈, 김성준, 2005, 실험계획 및 분석: 다구치 방법과 직교표의 활용, 한국과학기술원
- [8] Bharatendra Rai, Nanua Singh, Mustafa Ahmed, 2005, Robust Design of an interior hardtrim to improve occupant safety in a vehicle crash, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 89, pp. 296~304
- [9] Tzeng, Y. F., 2005(in press), Parameter design optimization of computerized numerical control turning tool steels for high dimensional precision and accuracy, Materials and Design
- [10] Wu, D. H., Chang, M. S., 2004, Use of Taguchi method to develop a robust design for the magnesium alloy die casting process, Material Science and Engineering, Vol. 12, pp. 43~57