

자동차 브레이크용 튜브의 끝단 성형 공정 설계에 관한 연구

제원수*, 예상돈**, 민병현#

A Study on Design of Forming Process of Tube-end for Brake of Automobiles

Wone-Soo Jea*, Sang-Don Ye**, Byeong-Hyeon Min#

ABSTRACT

End part of the brake tube formed with the shape of snake head is important for the braking of automobile in safety because it has to prevent crack, fracture and defects occurred during the forming process. Especially, the shape of tube end has influence on the ability of brake. Based on the procedure of process design, in this paper, the forming operation is done by finite element method and the design variables are analyzed by Taguchi method. Design variables such as the outer angle of tube end with the shape of snake head(A), the inner angle to make a hole at tube end with the shape of snake head(B) and the forming distance at tube end(C) are used. Optimization of design variables is performed to minimize the damage factor of the tube end occurred during the forming process. The value of damage factor of 0.327 was obtained under the optimal condition like A=114°, B=80° and C=5.3mm, respectively.

Key Words : Brake Tube(브레이크 튜브), Damage Factor(손상도), Finite Element Method(유한요소법), Taguchi Method(다구찌법), Optimization(최적화)

1. 서 론

현재 국내의 자동차용 금속튜브의 끝단부 성형공정은 공유압 및 휠 타입의 수동 성형기를 사용하고 있다. 자동차용 금속튜브는 연료 튜브, 브레이크 튜브, 파워스티어링 튜브 등으로 사용되고 있으며, 자

동차용 브레이크 튜브는 자동차 내에서 브레이크 성능에 중대한 영향을 미치는 핵심 부품중 하나이다. 자동차의 완벽한 제동을 위해 브레이크 튜브는 균열, 파손, 누유 등의 결함에 대하여 완벽하게 품질보증되어야 하기 때문에 정밀성형이 이루어져야 한다. 이를 위해 브레이크 튜브 끝단은 높은 강도를 가져야 하고, 또한 누설을 방지하기 위해 브레이크 튜브 간에 완전체결이 될 수 있는 형상을 가져야 한다. 브레이크 튜브 끝단의 성형공정 시 금형 내부에서 브레이크 튜브의 유동이 원활하게 일어나야 하나, 금형의

* 동의대학교 대학원 기계공학과

** 동의대학교 기계공학과

교신저자 : 동의대학교 기계공학과

E-mail : bhmin@deu.ac.kr

형상, 금형과 소재의 마찰 등으로 인하여 소재와 접하는 금형의 내면에 높은 압력이 작용하게 된다. 이는 금형과 성형 장치의 손상이나 최종품의 형상에 결속, 겹침 등을 일으키기 때문에 이에 대한 예방과 개선이 무엇보다도 필요한 제품이다.^[1~2]

금속성형공정은 저비용으로 고품질의 제품을 대량으로 얻을 수 있는 제조공정이지만, 성형품의 품질에 영향을 주는 입력인자의 수가 너무 많아 모든 경우에 대하여 실험을 수행하는 것은 시간적, 경제적으로 무리이다. 따라서 최근에는 CAE(computer aided engineering) 기법을 활용하여 이러한 실험들을 보조하고 있고, 실험을 최적화하기 위해 실험계획법 및 여러 가지 최적화 기법들이 다루어지고 있다.^[3-10]

본 연구에서는 브레이크 금속튜브 끝단의 성형 품질을 평가하기 위하여 유한요소해석법을 이용하여 성형공정을 해석하였으며, 주변의 잡음에도 강건 설계(robust design)를 할 수 있는 다구찌법(Taguchi's method)을 이용하여 성형품의 손상도(damage factor)를 최소화할 수 있는 결과들을 도출하였다.

2. 유한요소해석

2.1 재료의 거동

실제의 재료거동은 탄성과 소성이 복합적으로 존재하며 재료마다 다양하고 복잡하다. 유한요소에서 재료 거동 형태들은 강체, 탄성체, 완전소성체, 강소성체, 탄-완전소성체 그리고 탄소성체로 단순화 될 수 있다. 그리고 이러한 재료거동을 실제에 근사시키기 위해서는 재료실험을 실시하거나 보다 정확한 기계적 물성치 확보가 해석의 정확성을 결정한다. 본 연구에서 사두형관으로 사용되는 재료는 SPCC(AISI 1008)이며, Table 1은 기계적 재료 물성치이다.

본 연구에서는 관단 성형용 재료를 탄소성체라고 가정하였다. 사두형 관단 성형은 형단조 성형공정보다는 밴딩 성형공정과 유사하므로 탄성의 영향도 고려해야 한다. 따라서 재료를 탄성과 소성의 성질을 모두 표현 할 수 있는 탄소성체라고 가정하고 성형해석을 수행하였다.

Table 1 Mechanical properties of the SPCC pipe

Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRc)
305	170	30	49

2.2 유한요소 모델링

관단 성형 공정을 위한 구조는 브레이크 튜브의 강관(SPCC, AISI 1008)과 관단 성형을 가능하게 하는 펀치 부분 그리고 파이프 튜브를 고정하고 강성을 유지 시켜주는 척형 다이로 구성되어 있다.

실제 펀치 부분의 금형은 금형의 수명과 마모나 파손에 의한 교체를 용이하게 하기 위해 여러 부분으로 나누어서 제작하여 사용하고 있다. 그러나 본 연구에서는 유한요소 해석 시간과 정확성을 고려하여 펀치 부분, 파이프 튜브 부분 및 척형다이 부분을 단일 금형으로 가정하고 모델링하여 성형품을 중심으로 해석결과를 분석하고자 하였다. Fig. 1은 3가지로 나누어진 금형을 단일 금형으로 가정한 금형펀치이며, 유한요소 해석 시 펀치의 설계변수로 사용된다. 본 논문에서 사용한 설계변수로는 사두형 관단 성형제품의 외각(A), 사두형 관단 성형제품의 내부 홀을 만들어 주는 내각(B) 및 관형재료를 척에 물릴 때 척으로부터 제품 끝단까지의 길이(C) 등 3가지를 고려하였다.

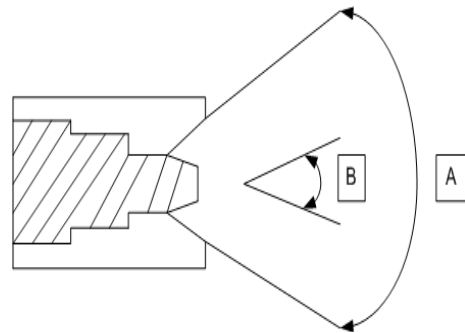


Fig. 1 Schematic diagram of a die punch part

그리고 Fig. 2는 사두형 관단 성형 공정에 있어서 펀치, 파이프 튜브 및 척이 축대칭을 이루고 있어 2D형상의 축대칭 문제로 가정한 모델링 결과이다.

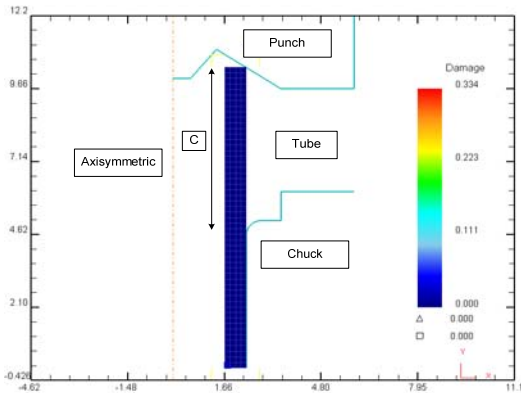


Fig. 2 FEM modeling of forming process of a brake tube-end

2.3 경계조건

사두형 관단 성형 공정의 해석을 수행하기 위해 해석은 축대칭 문제로 단순화하였고, 대변위로 일정 변위가 발생된 후 요소망을 다시 생성 하여 펀치의 최대 스트로크를 입력한다. 펀치는 강체, 브레이크 튜브는 탄소성체, 척은 강체로 정의하고, 브레이크 튜브의 끝단에서 수직방향인 y방향의 속도를 0으로 변위 구속하고, 펀치의 하강 속도는 1 step/s 로 가정하였다.

또한 접촉조건은 일정전단 마찰을 고려하였으며 식(1)에서 m은 일정전단 마찰계수이다.

$$F = mk \quad (1)$$

일반적으로 마찰계수는 비윤활 냉간단조에서는 0.08 ~ 0.1 사이에 있으며, 본 연구에서는 강소재들 사이의 접촉문제라 가정하여 0.08을 선택하였으며, 접촉 형태는 튜브와 튜브의 접촉, 튜브와 펀치와의 접촉, 튜브와 척(다이)과의 접촉 등 총 3개가 접촉하는 것으로 가정하였다.

3. 다구찌법

다구찌법은 종래에 제어 불가능한 환경조건이나 제어하기 어려운 생산조건 등의 원인들이 최종제품의 품질결과에 주는 영향의 정도를 객관적이고 계량적으로 평가할 수 있는 방법을 제시한 것으로, 결과

값 산포의 크기를 손실함수(S/N ratio)로 변환하여 산포를 작게 하는 인자들의 최적 조건을 찾아가는 강건 설계에 주로 사용된다.^[4]

본 연구에서는 사두형상의 관단용 펀치와 다이의 형상에 따라 성형 공정 중에 재료의 파괴, 변형을 또는 결함들을 최소화 할 수 있는 펀치와 다이형상의 설계를 최적화할 필요가 있다.

펀치와 다이의 형상에 따라서 재료의 거동 및 유동형상이 변화하며 이러한 변화는 유동응력이나 변형률, 변형률 속도 등에 영향을 준다. 이러한 재료의 유동응력 등은 재료의 거동 중에 파괴 및 위험정도를 나타내는 척도로 사용될 수 있다. 따라서 이러한 특성치들은 재료가 파괴 되지 않는 범위에서 적용되어야 하며, 본 연구에서는 손상도를 설계최적화를 위한 목적값으로 설정하였다.^[5]

일반적으로 설계 또는 공정 인자의 선택에 있어서 과다한 인자의 수는 오히려 실험의 정밀도를 떨어뜨리므로 목적에 적당한 범위 내에서 최적의 인자를 선택해야 한다. 또한 수준과 수준의 수를 결정하는데 있어서도 제약조건 내에서 결정하며, 불필요한 부분은 제외시키고 최적이라 예상되는 수준은 빠짐없이 포함 시킨다. 본 연구에서는 사두형 관단부가 허용치수 내에서 성형 되도록 하기 위한 펀치부분의 각도 두 개(A, B)와 관형재료를 척에 물릴 때의 길이(C)를 설계인자로 설정하였다. 각각의 인자는 허용치수 및 형상 크기의 제약에 따라 3수준으로 나누었으며, 다구찌 실험계획법에 따른 직교배열표를 작성하였다. 직교배열표는 어떤 수준에 대해서나 다른 열의 전체 수준이 같은 횡수씩 나타나도록 구성되어 있으며, 적은 수의 실험으로 많은 효과를 찾으려는 목적으로 만들어 놓은 표이다. 직교배열표의 작성은 선택된 인자의 수준을 조합하고, 실험의 횡수를 정하는 것으로 여기서는 Table 2와 같은 직교배열표(L₉3³)를 선택하였다.

여기서 사두형 관단 성형제품의 외각(A)는 114°, 114.5°, 115°로 3수준, 사두형 관단 성형제품의 내부홀을 만들어 주는 내각(B)는 80°, 90°, 100°로 3수준 및 관형재료를 척에 물릴 때 척으로부터 제품 끝단까지의 길이(C)는 5.3 mm, 5.5 mm, 5.7 mm로 3수준을 적용하였다.

Table 2 Orthogonal arrays with 3 design variables and 3 levels for the simulation(L₉3³)

#	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

본 연구에서는 상용유한요소해석 프로그램 (DEFORM)을 사용하여 Table 2의 직교배열표에 따라 시뮬레이션을 수행하였다. 설계변수의 조합에 따른 여러 가지 형상의 성형공정에서 발생하는 손상도를 목적값으로 사용하였다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 데이터를 다구찌법을 사용하여 결과를 분석하였는데, 다구찌법에서는 품질개선을 위한 정도를 나타내는 측정치로 SN(signal to noise) 비를 제시한다. SN 비는 손실함수의 종류에 따라 목표치가 주어지는 경우 망목특성(SN₀), 특성치가 작으면 작을수록 좋은 경우 망소특성(SN_s), 특성치의 값이 크면 클수록 좋은 경우 망대특성(SN_i)으로 구분된다.

$$SN_0 = 10 \log \left[\frac{(\bar{y})^2}{V} \right] \tag{2}$$

$$SN_s = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]$$

$$SN_i = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$$

손상도 값이 성형공정 중에 작게 발생하도록 하는 것이 설계 목표이므로 SN 비는 식(2)에서 망소특성(SN_s)에 해당하는 식에 의해 계산된다. SN 비는 높을수록 좋으며, 평균이 같은 두 집단에서는 분산이 작을수록 SN 비는 높아지므로, 각 인자의 SN 비가 최고 일 때의 수준이 선택 인자의 값이 된다.^[6]

4. 결과 및 분석

Table 2의 직교배열표에 따라 수행된 시뮬레이션 결과 얻어진 손상도 값 및 식(2)에 따라 계산된 SN 비 분석 결과를 Table 3에 보여준다. 3가지 설계변수의 수준 조합에 따라 손상도 값이 다르며, 그로부터 SN비 값이 달리 나타남을 알 수 있다.

Table 4는 각 설계인자의 수준별 평균값을 나타내는데, 품위 질삭 값인 델타(δ) 값으로부터 사두형 관단 성형제품의 내부 홀을 만들어 주는 내각(B)가 손상도에 끼치는 영향도가 가장 크고, 관형재료를 척에 물릴 때 척으로부터 제품 끝단까지의 길이(C) 및 사두형 관단 성형제품의 외각(A) 순으로 손상도에 끼치는 영향도가 줄어듦을 알 수 있다.

Table 3 S/N ratio obtained from the FEM simulation according to the orthogonal array

#	A(°)	B(°)	C (mm)	Damage factor	S/N ratio
1	114	80	5.3	0.327	9.70904
2	114	90	5.5	0.347	9.19341
3	114	100	5.7	0.353	9.04451
4	114.5	80	5.5	0.335	9.4991
5	114.5	90	5.7	0.342	9.31948
6	114.5	100	5.3	0.352	9.06915
7	115	80	5.7	0.342	9.31948
8	115	90	5.3	0.337	9.4474
9	115	100	5.5	0.356	8.971

Table 4 Mean value of damage factor from the reaction table

Level	A	B	C
1	0.3423	0.3347	0.3387
2	0.3430	0.3420	0.3460
3	0.3450	0.3537	0.3457
Delta(δ)	0.0027	0.0190	0.0073
Rank	3	1	2

Fig. 3은 Table 4의 결과를 도식적으로 나타낸 것으로 사두형 관단 성형제품의 외각(A)는 수준의 변화에 따라 손상도의 큰 변화가 없고, 사두형 관단 성형제품의 내부 홀을 만들어 주는 내각(B)는 수준의 변화

에 따라 손상도의 변화가 크고, 관형재료를 칩에 물릴 때 칩으로부터 제품 끝단까지의 길이(C)는 2수준 이상에서는 손상도의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 즉, 사두형 관단 성형제품의 내부 홀을 만들어 주는 내각(B)가 성형품의 손상도에 끼치는 영향이 가장 큼을 도식적으로도 알 수 있어 브레이크 튜브의 설계 시 유의해야 할 점이다.

Fig. 4는 3 설계인자, 3 수준의 조합에서 얻어진 손상도를 망소특성 식을 적용하여 구한 SN 비에 대한 반응 값을 나타내고 있는데, A가 114°, B가 80°, 그리고 C가 5.3mm에서 손상도가 가장 큰 값으로 나타났다.

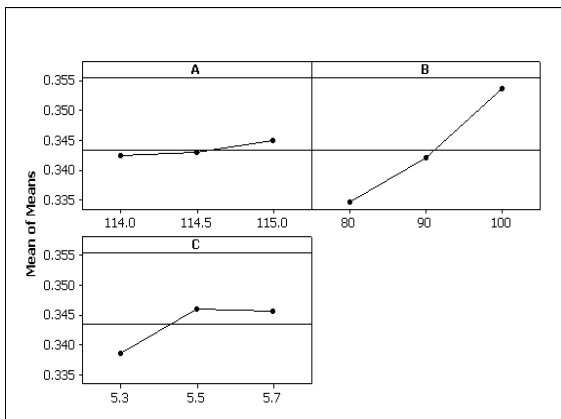


Fig. 3 Mean value of damage factor according to the level of design variables

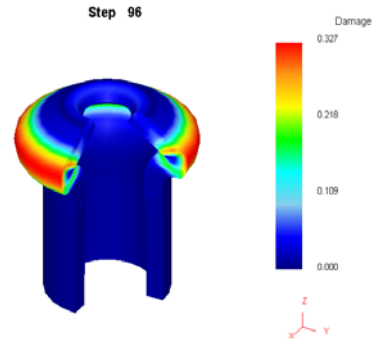


Fig. 6 Distribution of damage factor under optimal design condition like A=114°, B=80° and C=5.3mm

Fig. 5는 Fig. 5에서 SN비를 적게 하는 설계변수의 최적조건인 A가 114°, B가 80°, C가 5.3mm일때 유한요소 해석을 통하여 구한 응력 및 변형률 값을 보여준다. 손상도, 응력 및 변형률 모두 사두형상 외각 부분에 집중적으로 일어남을 알 수 있으나, 재료의 항복강도 보다는 낮은 값을 보여주므로 안전설계가 이루어졌다고 판단할 수 있다.

Fig. 6은 동일한 조건에서의 사두형 관단부 전체 부위에서의 손상도를 나타내고 있으며, 실험계획법에서 얻어진 값과 같이 사두형상 외각 부분에서 최대 손상도가 0.327로 평가되었다.

5. 결론

본 연구에서는 자동차용 브레이크 튜브의 끝단이 사두형인 성형공정에 대해 제품의 손상도가 최소가 될 수 있는 펀치부 형상 설계의 최적조건을 다구찌법과 유한요소 해석을 수행하여 도출하였고, 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 사두형 관단 성형품을 제조하기 위해 사용된 펀치부 설계를 위하여 사두형 관단 성형품의 외각(A), 사두형 관단 성형품의 내부 홀을 만들어 주는 내각(B) 및 관형재료를 칩에 물릴 때 칩으로부터 제품 끝단까지의 길이(C) 등을 설계변수로 사용하였다.
2. 다구찌법을 통해 A 및 B가 작고, 그리고 C가 짧

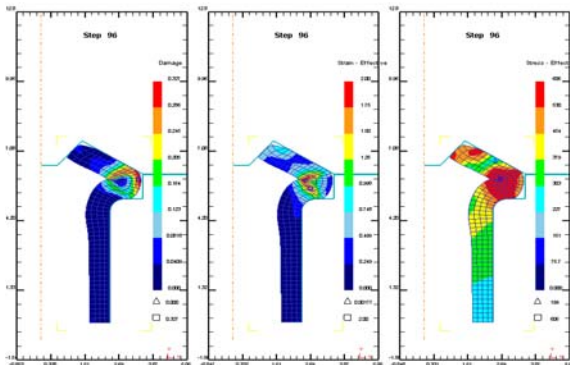


Fig. 5 Distribution of damage factor, stress and strain under optimal design condition like A=114°, B=80° and C=5.3mm

을수록 사두형상 외각부의 손상도가 작게 나타남을 알 수 있었고, 그 중에 튜브 끝단 제품의 내경을 결정하는 설계인자 B가 사두형상 외각부의 손상도에 큰 영향을 끼침을 반응표를 통해 알 수 있었다.

3. 사두형상 외각부의 손상도를 최소화하는 편치부의 최적설계조건은 A가 114°, B가 80° 및 C가 5.3mm 일 때 최소의 손상도 값 0.327을 도출하였고, 유한요소해석을 통하여 확인한 결과 다구찌법에서 구한 손상도와 일치하였다.

한국정밀공학회 춘계학술대회, pp. 825-828, 2001.

후 기

이 논문은 2007학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음.(과제번호 2007AA166)

참고문헌

1. Kini, S. D. and Shivpuri, R., "Precision and Ejection Issues in the Cold Forging of a Fuel Injector Nozzle," Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol.215, pp.927-933, 2001.
2. 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 Technoogy', Vol.46, pp.127-134, 1994.
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, Vol. 119, pp.358-367, 1997.
4. 임희택, 김형중, 이동재, 김현영, "알루미늄 튜브 하이드로포밍 성형 해석 및 성형성 평가," 한국소성가공학회지, 제15권, 제2호, pp. 138-142, 2006.
5. 한수식, "하이드로 포밍용 튜브의 성형 한계선도 측정," 한국소성가공학회지, 제15권, 제6호, pp. 467-472, 2006.
6. 김대식, 문찬용, 김상우, 최형태, 정영득, 김영수, "PA12 튜브의 스프링 백에 관한 연구," 2001년도