[논문] 한국소성가공학회지, 제 15 권 제 6 호, 2006
Transactions of Materials Processing, Vol.15, No.6, 2006

하이드로 포밍용 튜브의 성형 한계선도 측정

한수식#

Forming Limit Diagram Measurement of Tube for Tube Hydroforming Process

S. S. Han

(Received July 28, 2006)

Abstract

The forming limit diagram of tube is required for the part design and the formability analysis of tube hydroforming. The finite element analyses of simple bulge test were done to obtain the various strain combinations on FLC. The finite element analysis results were shown that the bursting at various strain combinations could be induced by simple bulge test. The experiment of tube bulge test was carried out according to the test condition that obtained from finite element analysis and the left hand side of forming limit diagram was built.

Key Words : Bulge Test, Strain Path, Self Feeding, Axial Feeding, Bulge Width

1. 서 론

자동차의 연비와 충돌 안정성 향상에 대한 사회적인 요구 증가로 인하여 자동차 생산에 있어서 차체 경량화와 충돌 안정성을 동시에 확보할 수 있는 부품 가공 방법들에 대한 관심과 요구가 증가하고 있다. 이러한 요구를 만족시키는 부품 성형 기술의 하나로서 튜브 하이드로 포밍 기술이 있다. 최근 들어 국내 기업에서도 튜브 하이드로 포밍 부품의 생산이 가능하게 되어 국내 자동차에 적용하는 부품 수가 날로 증가하고 있다.

튜브 하이드로 포밍 기술은 부품 설계시 다른 판재 성형 공정에 비하여 유한 요소법에 의한 성형 해석 의존도가 매우 높다. 성형 해석에서 터짐 발생을 예측하는 데에 일반적으로 성형 한계선도를 사용하고 있다. 하이드로 포밍에 사용되는 튜브는 판재가 조관 공정을 거쳐 만들어지는데 이 과정에서 판재는 소성변형을 겪게 된다. 즉 튜브는 판재가 예 변형을 받은 것이기 때문에 튜브 하이드로 포밍 해석시 불량 예측에는 튜브에 대하여 도출된 성형한계선도를 사용해야 한다.

튜브 하이드로 포밍 공정에 사용되는 튜브의 성형성에 관하여서 많은 연구가 이루어져 왔다. 이들에 대하여 살펴보면 다음과 같다. 김정등[1]은 연성 파괴 조건과 유한 요소 해석을 통하여 튜브의 터짐을 예측하였으며 조완제등[2]은 튜브의 확관 시험을 통하여 내압과 축 압축량에 따른 튜브의 성형성을 평가하였다. 김봉준등[3]은 알루미늄 튜브에 대하여 온간 성형성을 실험을 통하여 평가하였다. 그리고 김진등[4]은 축 방향 압축 응력과 내압에 따른 튜브의 성형성을 연성 파괴 조건을 이용한 이론적 해석과 실험을 통하여서 평가하고 검증하였다. 이상의 연구들은 모두 여러 가지 성형 조건에서의 튜브 확관시 터짐이 발생할 때까지의 확관률과 같은 성형성에 대하여 평가한 결과이며 성형 시험을 통하여 튜브의 성형 한계

교신저자 : 금오공과대학교 기계공학부,
E-mail : sshan2@hanmir.com

선도를 측정하는 것에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있었다.

튜브 자체의 성형 한계선도를 측정하는 것에 대한 연구로는 한수식등[5]이 수행한 튜브의 상하면에 대하여 변형이 제한된 튜브 확관 시험을 이용하여 평면 변형 모드에서의 튜브의 터짐을 유도하여 FLD0 값을 구하고 판재의 대표 성형 한계선도 형상을 FLD0 값 만큼 평행 이동하여 튜브의 성형 한계선도를 구하는 방법에 관한 연구가 있으며 최근에 김형종등[6]이 알루미늄 튜브에 대하여 T 자형 성형 시험과 자유 확관 시험을 통하여서 성형 한계선도를 측정한 연구 등이 있다.

본 연구에서는 튜브 하이드로 포밍에 사용되는 튜브의 성형 한계선도를 튜브 확관 시험을 통하여 측정하는 방법에 대하여 연구하였다. 유한 요소 해석을 이용하여 성형 한계선도상의 여러 가지 변형 상태를 구할 수 있는 튜브 확관 시험 조건을 도출하였으며 도출된 시험 조건에 따라 튜브 확관 시험을 수행하여 튜브에 대한 성형 한계선도를 구하였다.

2. 성형 한계선도

성형 한계선도란 여러 가지 조합의 주변형률과 부변형률이 발생하는 조건으로 성형 시험을 하여 파단이 발생하는 한계 주변형률과 부변형률을 측정하여 주변형률과 부변형률의 평면상에 도시한 것으로 판재 성형 공정에서 성형 난이도를 평가하는 방법으로 널리 사용되고 있다.

판재의 성형 한계선도는 일반적으로 반구형 펀치를 이용한 장출 성형을 통하여 측정된다. Fig. 1 과 같이 반구형 펀치를 갖는 장출 시험법을 이용하여 시험편의 폭을 변화시켜서 성형 한계선도의 왼쪽인 드로잉 변형 모드 부분을 구하고 윤활 조건을 변화시켜 성형 한계선도의 오른쪽인 장출 변형 모드에서의 한계 변형률을 측정한다.

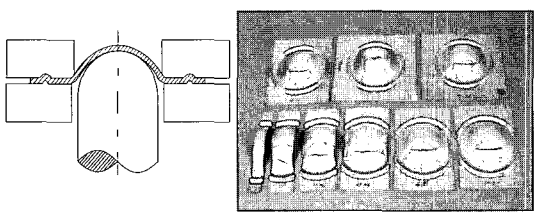


Fig. 1 Schematic diagram of FLD test tool and test samples

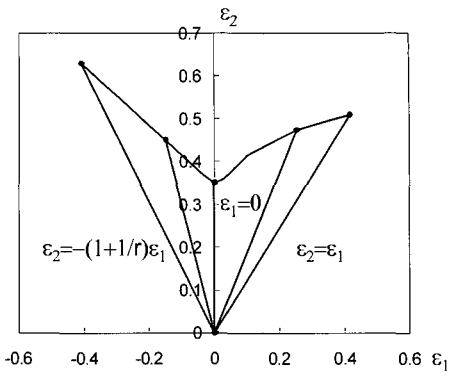


Fig. 2 Strain combinations and strain path of FLD

철강소재의 경우 성형 한계선도의 형상이 유사하기 때문에 철강소재의 성형 한계선도는 대표 성형 한계선도 형상을 그 소재의 FLD0 만큼 이동하여 구하는 것이 가능하다.

판재 성형 공정에 사용되는 성형 한계선도는 Fig. 2 에 나타난 것과 같이 전 변형을 받지 않은 판재에 대하여 비례 하중 경로에서 시험하여 구한다. 즉 성형 한계선도상의 각각의 한계 변형률의 조합은 해당 주변형률과 부변형률이 일정한 비를 갖고 변형되어 한계 변형률에 도달한 것이다. 따라서 튜브에 대하여 성형 한계선도를 측정할 경우에도 튜브 성형 한계선도 평가 시험법이 비례 하중 경로를 재현하는 것이 필요하다.

3. 성형해석을 통한 시험 조건 도출

판재의 경우 성형 한계선도를 측정하기 위한 시험 조건이 잘 알려져 있어 원하는 주변형률과 부변형률의 조합을 얻기 위한 시험 조건을 쉽게 찾을 수 있다. 그러나 튜브의 경우 성형 한계선도를 측정하기 위한 방법에 대하여서는 별로 알려진 바가 없고 현재도 연구가 진행 중이기 때문에 원하는 주변형률과 부변형률의 조합을 구하기 위한 시험 방법을 찾기는 쉽지 않다. 본 연구에서는 성형 한계선도를 작성하기 위하여 필요한 성형 한계선도상의 여러 가지 주변형률과 부변형률의 조합을 구하기 위하여 유한 요소 해석을 사용하였다.

일반적으로 시험법에 대하여 요구되는 사항은 시험 방법이 될 수 있는 한 단순하여 시험하기가 용이할 필요가 있기 때문에 튜브의 성형성 시험으로 널리 사용되는 튜브 확관 시험을 이용하여

여러 가지 주변형률과 부변형률의 조합을 구하고자 하였다.

튜브의 성형 한계선도를 측정하기 위한 성형 시험 조건을 크게 두 가지로 구분하였다. 성형 한계선도의 왼쪽 부분 즉 드로잉 변형 모드에서의 파단 발생 조건을 구하는 것과 성형 한계선도의 오른쪽 부분인 장출 변형 모드에서 파단 조건을 구하는 것이다. 성형 해석 및 시험에는 자동차용 냉연 강판인 SPCEN 1.4t 소재를 ERW를 이용하여 조관한 직경2.5 인치 튜브를 사용하였다. 성형 해석을 위하여 필요한 튜브 소재의 인장 특성은 튜브의 길이 방향으로 방전 와이어 가공을 이용하여 채취된 인장 시편을 사용하여 구하였다. 인장 특성과 성형 해석을 위하여 구한 특성 값들은 Table 1에 나타난 것과 같다. 성형 해석에는 상용 유한 요소 해석 프로그램인 Pam-Stamp 를 사용하였으며 금형과 튜브 사이의 마찰 계수는 0.14를 사용하였다.

단순 확관 시험을 위하여 사용된 금형의 형상 및 주요 치수는 Fig. 3 에 나타내었다. 성형 한계선도의 왼쪽 부분인 드로잉 변형 모드를 재현하기 위하여서는 성형 시험 중 튜브 소재의 축 방향 유입이 필요하다. 튜브 확관 시험에 있어서 축 방향 유입량과 내부 압력 사이에는 적절한 관계가 존재하여 내부 압력에 대한 축 방향 유입량이 적절하지 않으면 시험 중 주름 등이 발생하게 된다. 주름 발생을 방지할 수 있는 압력과 축 방향 유입량의 관계 조건을 구하기 위하여서는 많은 시험이 필요하다. 그리고 이들 압력과 유입량과의 관계는 튜브의 크기, 두께, 튜브 소재에 따라서 달라지기 때문에 튜브의 종류가 달라질 때 마다 이들의 관계를 구하는 시험들을 다시 수행하여야 한다는 것은 가능한 한 단순한 형태의 시험법 개발이라는 본 연구의 목적에도 맞지 않는다.

튜브의 확관 시험을 수행할 경우 압력이 증가함에 따라서 다이 공동부내의 튜브가 점점 확관이 되며 튜브의 양 끝은 다이 공동부내로 빨려 들어오게 된다. 이러한 현상을 일반적으로 Self Feeding 현상이라고 부른다. 성형 한계선도의 왼쪽 부분인 드로잉 변형 모드는 구현을 위하여서 필요한 축 방향의 유입은 이러한 Self Feeding 현상을 이용하였다. 그리고 다이 공동부의 폭 W 를 변화시켜서 드로우 변형 모드의 주변형률과 부변형률의 비를 변화시켰다.

성형 한계선도의 오른쪽 부분인 장출 변형 모드에서의 변형률 조합을 구하기 위하여서 확관 시험중 튜브의 양끝의 유입을 제한하고 다이 공동부의 폭 W를 변화시켜서 주변형률과 부변형률의 조합을 구하는 방법을 사용하였다.

Table 1 Material properties of tube

YS (GPa)	TS (GPa)	T-El(%)	n	R
0.2659	0.315	43.2	0.145	1.675

$\bar{\sigma} = K(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^n$ (GPa)

K	ε_0	n
0.549	0.0559	0.277

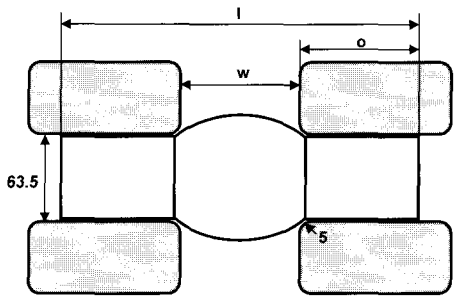


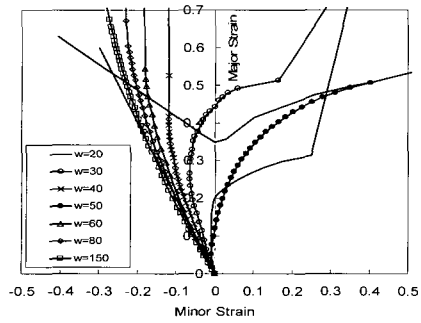
Fig. 3 Schematic diagram of tool for simple tube bulge test

Table 2 FE analysis conditions for FLD measurement of tube

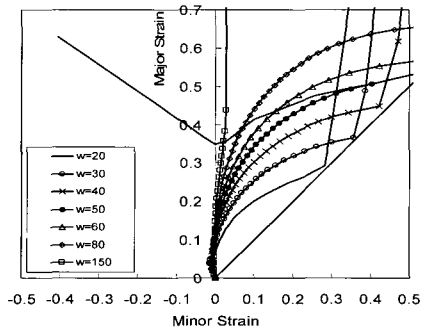
	Bulge Width (W)	Tube Length (L)	Constraint
Case1	20,30,40,50,60,70,80,100,150	Constant Tube Length (L=260mm)	- Fixed End - Free End
Case2		Constant Overlap (O=100mm)	- Fixed End - Free End
Case3		Constant Overlap (O=40mm)	- Fixed End - Free End

성형 한계선도를 얻기 위한 성형 해석 조건은 Table 2에 나타난 것과 같다. 튜브의 양끝을 고정시킨 경우와 튜브 양끝을 자유롭게 두어 성형 시험중에 다이 공동부 쪽으로의 유입을 허용한 경우에 대하여 다이 공동부의 폭 W를 변화시키는 조건으로 성형 해석을 수행하였다.

Table 2 에 나타난 시험 조건인 Case 1 에 대하여 해석한 결과를 평판형 시험법[5]으로 구한 튜브의 성형 한계선도와 함께 Fig. 4 에 나타내었다. 튜브 양단을 자유롭게 하여 성형 한계선도의 왼쪽 부분을 나타낸 Fig. 4(a)의 경우 변형 경로가 비례

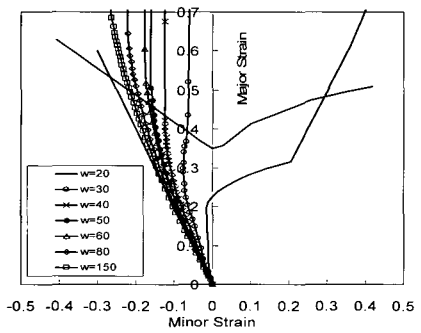


(a)

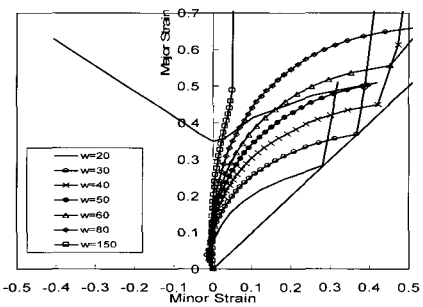


(b)

Fig. 4 Variation of strain path with respect to bulge width W for case 1(a: free end, b: fixed end)

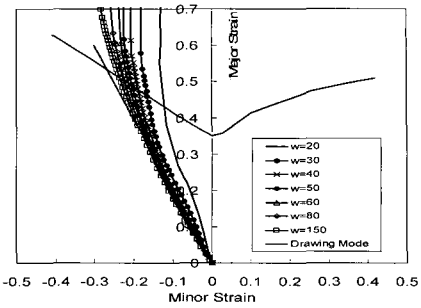


(a)

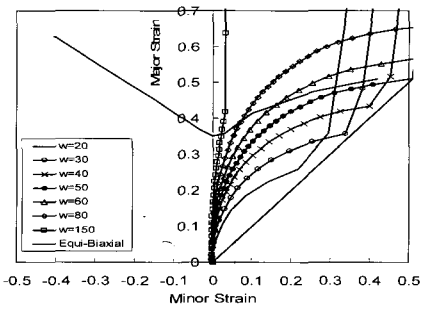


(b)

Fig. 5 Variation of strain path with respect to bulge width W for case 2 (a: free end, b: fixed end)



(a)



(b)

Fig. 6 Variation of strain path with respect to bulge width W for case 3 (a: free end, b: fixed end)

경로와는 매우 다른 양상을 나타내었다. 튜브 양단을 고정하여 장출 변형 모드를 나타낸 Fig. 4(b)의 경우 성형이 진행됨에 따라 변형 경로가 급격히 변화하는 것을 알 수 있다.

Table 2 의 Case 2 에 대하여 해석한 결과는 Fig. 5 에 나타내었으며 Case 3 에 대하여 해석한 결과는 Fig. 6 에 나타내었다. Case 2, 3 의 결과도 Case 1 의 결과와 마찬 가지로 성형 한계선도의 왼쪽인 드로우 변형 모드에 비하여 오른쪽 장출 변형 모드에서의 변형 경로가 성형이 진행됨에 따라서 급격히 변화하는 것으로 나타났다.

튜브의 성형 한계선도 측정을 위한 시험 조건을 도출하기 위하여 해석을 수행한 결과 시험 중 튜브의 양끝을 고정한 경우에는 성형 한계선도의 오른쪽에 위치한 장출 변형 모드의 변형 조건이 구하여지고 튜브 양끝의 유입을 자유롭게 한 경우에는 성형 한계선도의 왼쪽에 위치한 드로잉 변형 모드의 변형 조건이 구하여 지는 것을 알 수 있었다. 그러나 여러 가지 해석 조건을 변화시켜도 튜브 확관 시험을 통하여서는 비례 변형 경로의 변형 조건을 찾는 것은 곤란하였다. 특히 성형 한계선도의 오른쪽에 위치한 장출 변형 모드

에서 변형 경로의 변화가 매우 심하게 나타났다.

튜브 확관 시험을 통하여서 비례 변형 경로의 변형 조건을 구하는 것이 어려운 이유는 Fig. 7 에 나타난 바와 같이 확관이 일어나는 부위의 형상을 살펴보면 알 수 있다. 확관이 진행됨에 따라 길이 방향으로의 소재면의 곡률 변화는 원주 방향으로의 곡률에 비하여 급격히 변화한다. 따라서 시험 초기에는 압력에 의해 발생한 원주 방향 응력이 길이 방향 응력에 비하여 큰 값을 갖으나 변형이 진행됨에 따라 길이 방향 응력이 급격하게 증가하게 된다. 다이 공동부의 폭 W 가 작을수록 이러한 현상은 더욱 심해진다.

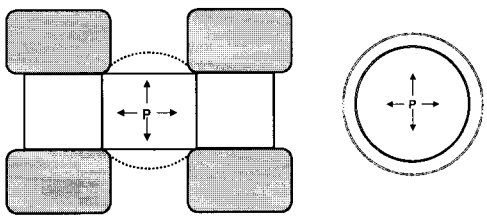


Fig. 7 Deformed shape of tube during tube bulge test

튜브에 대하여 단순 확관 시험법을 이용하여서는 완전히 비례 변형 경로를 갖는 성형 한계선도 상의 한계 변형률 조합을 구하는 것이 곤란하다는 것을 해석 결과를 통하여 알 수 있었다.

4. 실험 결과 및 고찰

성형 해석을 통하여서 도출된 시험 조건을 활용하여 튜브 확관 시험을 수행하였다. 성형 해석을 통하여서 구한 시험 조건 중에서 Table 2 의 Case 3 에서 비교적 변형 경로의 변화가 작게 나타났기 때문에 이러한 조건으로 성형 시험을 수행하였다.

시험 후 파단면 주위의 변형률을 측정하기 위하여 전기 에칭 방법을 통하여 튜브 표면에 원형 그리드를 에칭하였다. Fig. 8 는 시험을 위하여 에칭된 튜브와 확관 시험 후 튜브의 형상을 나타내었다.

먼저 성형 해석 결과를 검증하기 위하여 Case 3 에 대하여 W=150, W=20 인 경우 각각에 대하여 시험 도중에 시험을 중단하고 최대 변형률을 측정하여 성형 해석 결과 구하여진 변형 경로와 비교하여 Fig. 9 에 나타내었다.

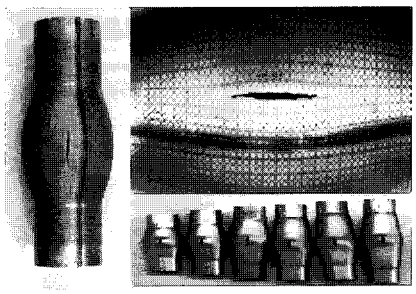


Fig. 8 Deformed shape of tube during tube bulge test

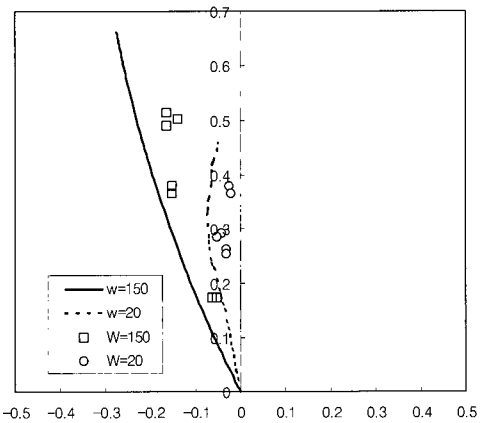


Fig. 9 Strain path for each bulge width

Fig. 9 에 나타난 바와 같이 변형 경로가 변화하는 경향은 실험 결과와 잘 일치하고 있으나 부변형률의 크기가 성형 해석의 경우에 비하여 실험의 경우가 더 작게 나타났다. 이것은 Self Feeding 양이 성형 해석에 비하여 실험의 경우가 더 작다는 것을 의미하며 금형과 튜브 사이의 마찰 계수 값과 유한 요소 해석에 사용된 것 사이의 차이 때문으로 판단된다.

성형 한계 선도의 오른쪽 부분인 장출 변형 모드를 도출하기 위하여서는 시험 중 튜브의 축 방향 유입을 방지하는 것이 필요하다. 여러 방법을 동원하여 축 방향 유입을 방지하려 하였으나 이것이 용이하지 않아 축 방향 유입이 허용되는 경우 즉 드로잉 변형 모드에 대하여서만 성형 한계도 평가 시험을 수행하였다. 시험 결과는 Fig. 10 에 나타내었다. Fig. 10 에 나타난 성형 한계선도는 판재의 대표 성형 한계선도 형상을 평판형 시험법을 이용하여 측정한 튜브의 FLD0 만큼 평행 이동한 것이다. 드로잉 성형 모드에서의 한계 변형률은 FLD0 를 활용하여 예측하는 것 보다 약간

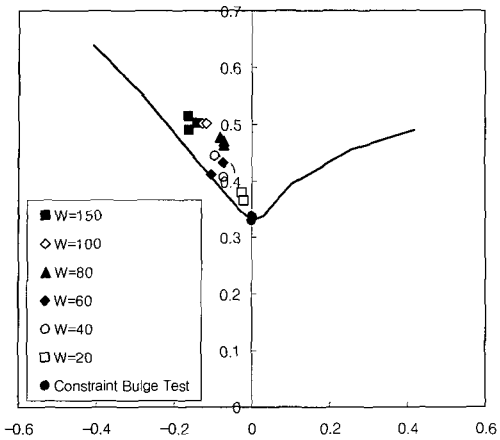


Fig.10 Forming limit diagram for tubular material measured from bulge test

더 위쪽에 치우치는 것을 알 수 있다. 이것은 변형 경로가 완전한 비례 경로를 따르지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

단순 확관 시험을 통하여 튜브 소재에 대한 성형 한계선도를 평가할 수 있는 방법을 제안하고 이를 실험을 통하여서 검증한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단순 확관 시험에서 튜브 양단의 경계 조건과 다이 공동부의 폭을 변화시킴으로써 성형 한계선도상의 다양한 변형률 조합을 구할 수 있음을 알 수 있었다.

(2) 단순 확관 시험시 튜브의 원주 방향으로의 곡률 변화와 길이 방향으로의 곡률 변화량의 차이로 인하여 비례 변형 경로를 갖지 않음을 알 수 있었다.

(3) 드로우 변형 모드에 대하여 성형 한계 선도를 측정한 결과 평판형 시험법으로 구한 성형 한계 선도보다 다소 높게 나타났다.

(4) 튜브의 길이 방향의 유입을 제한할 수 있는 방법이 개발되어 장출 변형 모드에서의 한계 변형률을 구할 수 있다면 단순 확관 시험은 튜브의 성형 한계선도를 측정하는 수단을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국립금오공과대학교의 학술연구비의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] 김정, 김용욱, 강범수, 2003, 심용접 튜브를 사용한 벌지 성형에서의 터짐 불량 예측, 한국소성가공학회 춘계학술대회논문집, pp. 240~243.

[2] 조완제, 이상영, 김영석, 이상용, 2003, 알루미늄 튜브 하이드로포밍의 성형한계, 한국소성가공학회 춘계학술대회논문집, pp. 240~248.

[3] 김봉준, 류종수, 김대현, 김동우, 문영훈, 2004, 알루미늄 튜브 온간 하이드로포밍 성형성에 관한 연구, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 198~201.

[4] 김진, 박춘달, 김영석, 이재용, 2004, 튜브 하이드로포밍 공정의 성형한계 해석, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 214~220.

[5] 한수식, 박기철, 2000, 하이드로 포밍용 소재의 성형성 평가 연구, 한국소성가공학회지, 제9권 6호, pp. 631~637.

[6] 김형종, 김정선, 이진규, 박종연, 이동재, 김헌영, 2005, 액압성형 시험을 통한 알루미늄 튜브 재료의 성형한계도, 한국소성가공학회지, 제14권 제6호, pp. 514~519.