

하이드로 피어싱 시험을 통한 구멍 주위의 꺼짐 현상 분석

한수식[#] · 강연식¹ · 김근환¹

Study of Deflection around Hydropierced Hole with Experiment

S. S. Han, Y. S. Kang, G. H. Kim

(Received November 27, 2006)

Abstract

The hydropiercing process gives a lot of advantages to the tube hydroforming such as cost reduction and high productivity. However it has a drawback, the amount of deflection around the hole is bigger than that of conventional die piercing process. The deflection can cause the problem at the assembly process of stamped parts and hydroformed part. Therefore the reduction of deflection is one of the most important issues for hydropiercing process. In this study, the deflection around hydropierced hole was investigated by experiment. As a result of investigation, the amount of deflection is influenced by the internal pressure, the material thickness and the size of hole. Especially the hole size is most influencing factor on the deflection around the hydropierced hole.

Key Words : Sheared Edge, Internal Pressure, Hydroforming, Rollover, Tapered Pnch

1. 서 론

자동차용 부품의 새로운 성형 기술의 하나로 사용되고 있는 튜브 하이드로포밍 기술의 장점으로서는 밀폐형 단면 부품의 제작을 한번에 행함으로써 부품 생산에 필요한 금형 수와 전체 공정 수가 감소되고 이로 인하여 발생하는 생산 비용 절감이 있다. 튜브 하이드로포밍 공정에 있어서 공정 수 절감을 위하여 사용되는 대표적인 병행 공정이 바로 하이드로 피어싱 기술이다. 하이드로 피어싱 기술은 성형된 하이드로포밍 제품을 다른 부품과 조립하거나 성형 후 제품 내부에 잔류하는 유체의 제거를 용이하게 하기 위하여 필요한 구멍을 제품에 가공하는 기술이다.

하이드로 피어싱 기술은 하이드로포밍시 튜브의 내부에 고압의 유체를 작용하여 제품을 성형한 후 튜브 내부에 가하여진 고압의 유체를 제거

하지 않고 압력을 유지하거나 보다 증가시킨 상태에서 펀치를 제품 표면에 압입하여 구멍을 가공하는 방법이다. 이때 튜브 내부에 작용하는 유체의 압력에 의하여 튜브 벽면이 지지되기 때문에 펀칭을 위한 다이는 필요하지 않으며 간단히 펀치와 이를 작동시킬 가압 장치만 하이드로포밍 금형에 설치하면 되므로 추가 비용 발생이 매우 적다. 하이드로 피어싱 공정에서는 통상적인 펀칭 공정에서의 다이 역할을 고압의 유체가 대신하기 때문에 하이드로 피어싱 공정 중에 발생하는 구멍 주위의 꺼짐 현상은 피할 수 없으며 이때 발생한 꺼짐량은 하이드로 피어싱 공정의 건전성을 결정하는 중요한 척도가 된다[1~2].

튜브 하이드로포밍 부품에서 하이드로 피어싱된 구멍의 역할은 하이드로포밍 부품에 여러 가지 추가 부품들의 장착할 때 안내면 역할을 하게 된다. 따라서 정확하게 부품을 장착하기 위해서는

1. POSCO 기술연구소 자동차가공연구그룹
교신저자: 금오공과대학교 기계공학부
E-mail: sshan2@hanmir.com

안내면의 꺼짐이 최소화되어 면의 평탄도가 유지되어야 한다.

아직까지 하이드로 피어싱된 구멍 부위의 최소 꺼짐량에 대한 기준은 마련되어 있지 않으나 통상적으로 자동차 부품에 요구되는 치수 정밀도를 사용하고 있다.

하이드로 피어싱 공정에 대한 연구 결과는 많지 않으며 최성기 등이 하이드로포밍 공정을 이용하여 사각형 단면 형상의 제품을 성형하고 성형 후 압력을 유지한 상태에서 원통형 펀치를 이용하여 피어싱하는 공정에 대하여 이론적 해석과 실험을 통하여 구멍 주위의 변형 형상과 롤 오버의 관계에 대한 연구 결과를 발표하였다[3].

본 연구에서는 여러 가지 압력 조건과 서로 다른 두께의 판재에 대하여 실 성형에 사용되는 테이퍼형 펀치를 사용하여 하이드로 피어싱 시험을 수행하고 피어싱된 구멍 주위의 꺼짐량에 대하여 분석하였다.

2. 하이드로 피어싱 공정

통상적인 펀칭 공정은 다이와 홀더 그리고 펀치로 구성된 금형을 이용하여 이루어진다. 펀칭 공정을 통하여 성형된 구멍의 전단면 형상은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 롤 오버, 전단면 그리고 파 단면 등으로 구성되어 있다.

통상적인 펀칭 공정에서는 면의 품질 즉 버어의 크기 파단면과 전단면의 비율 등이 매우 중요하다. 이것은 전단면의 품질이 후 공정에 영향을 크게 주기 때문이다. 구멍 주위에 발생하는 변형인 롤 오버는 다이 간극이 증가함에 따라서 증가하지만 통상적인 펀칭 공정에 사용되는 다이 간극에서는 그 양이 크지 않기 때문에 롤 오버에 의한 구멍 주위의 변형은 정밀 전단의 경우를 제외하고는 큰 문제가 되지 않는다.

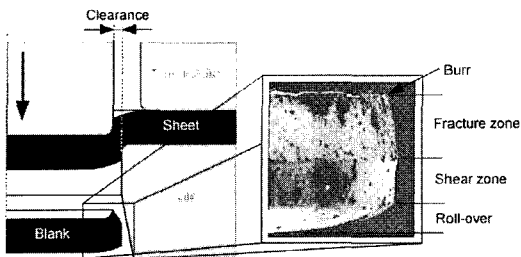


Fig. 1 Punching tools and shape of sheared edge (Figure from A.M.Goijaerts[4])

하이드로 피어싱 공정에서는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 Fig. 1의 펀칭 공정에서의 다이의 역할을 고압의 유체가 대신하게 된다. 다이 역할을 유체가 대신하기 때문에 유체의 압력이 소재의 강도나 소요 전단 하중에 비하여 부족할 경우 구멍 주위에 롤 오버가 심하게 발생하여 펀치의 진행 방향 즉 제품의 공동부 내로 함몰하는 형태로 구멍 주위의 변형이 일어나게 되어 하이드로 피어싱이 완료된 후에 Fig. 3에 나타난 바와 같이 제품에 변형이 남게 된다.

하이드로 피어싱 공정에서 구멍 주위의 꺼짐 발생 부위의 폭, 내부 압력 그리고 하이드로 피어싱에 필요한 펀치 하중과의 관계를 살펴보면 다음과 같다. 인장 강도가 σ_t 이고 두께가 t 인 판재에 대하여 직경이 d 인 구멍을 피어싱할 때 필요한 순수 전단 하중 F_s 는

$$F_s = 0.7\sigma_t \pi d \quad (1)$$

로 표현된다.

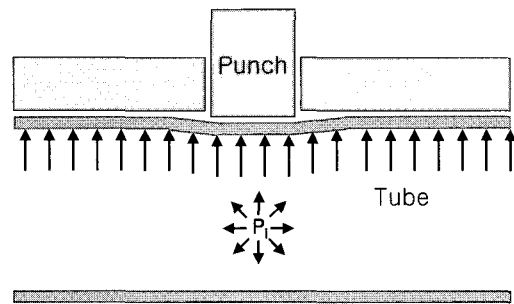


Fig. 2 Schematic diagram of hydro-piercing process for tube

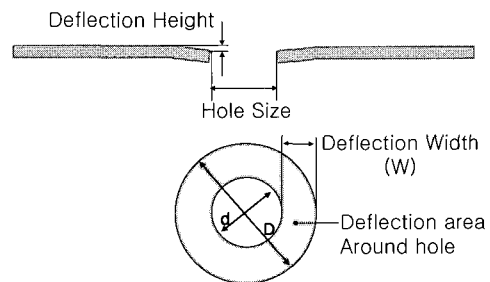


Fig. 3 Deflection around sheared edge after hydro-piercing process

하이드로 피어싱 공정 중에 피어싱에 필요한 전단 하중이 펀치에 의하여 소재의 표면에 작용하게 된다. 하이드로 피어싱 공정에서는 펀치 하중에 대하여 소재의 변형을 방지해줄 수 있는 다이가 없기 때문에 소재의 반대 면에 작용하는 내부 압력과 판재의 굽힘 저항이 다이를 대신하여 소재를 지지해 주어야 한다. 만약 이러한 지지 하중이 펀치 하중보다 작다면 피어싱은 발생하지 않고 소재는 심하게 다이 공동부 내부로 변형될 것이다.

내부에 압력 p_i 가 작용하는 경우 소재의 모든 표면에 작용하는 힘이 펀치 하중에 대한 지지력 역할을 하는 것이 아니라 꺼짐 변형이 발생하는 부위에 작용하는 압력에 의한 하중만이 펀치 하중에 대하여 소재를 지지해주는 것으로 추정할 수 있다. 그리고 꺼짐 변형 발생 부위의 가장 자리 부위에서는 소재의 굽힘 저항에 의하여 지지된다. 이때 전단 작업이 일어나도록 소재를 지지해주는 힘 F_d 는

$$F_d = p_i(D^2 - d^2)\pi / 4 + F_b \quad (2)$$

으로 표현된다. 여기서 D 는 꺼짐이 발생한 부위의 경계부의 직경이고 F_b 는 꺼짐 변형이 발생한 부위의 주변부를 따라서 발생하는 굽힘 변형에 대한 굽힘 저항으로 다음과 같이 표현할 수 있다[5].

$$F_b = \sigma_i \pi D t^2 / (D - d) \quad (3)$$

피어싱 공정이 성공적으로 진행되려면 $F_d \geq F_s$ 이어야 한다. 따라서 구멍의 크기나 소재의 두께가 증가할수록 순수 전단 하중 F_s 는 증가하게 되고 이에 따라 요구되는 F_d 도 증가한다. 내압 p_i 가 일정할 경우 꺼짐 부위의 폭 $W = (D - d) / 2$ 는 증가하게 되고 꺼짐량도 증가한다. 꺼짐 부위의 폭 W 를 감소시켜 꺼짐량을 감소시키기 위해서는 내압 p_i 을 증가시켜야 하는 것을 알 수 있다.

그리고 피어싱 공정에 필요한 펀치 하중 F 는 내부 압력에 의하여 펀치 바닥면에 작용하는 힘과 순수 전단 하중으로 구성되므로 피어싱 공정에 필요한 펀치 하중 F 는

$$F = \pi p_i d^2 / 4 + F_s \quad (4)$$

와 같다. 내압과 소재의 두께가 증가할수록 소요 펀치 하중도 증가하게 되어 하이드로 피어싱용 작업 실린더의 용량 증가를 가져온다.

3. 하이드로 피어싱 실험

하이드로 피어싱 공정에 대한 실험은 튜브를 사용하지 않고 판재를 사용하여 수행하였다. 판재를 사용할 경우 튜브를 사용하는 경우에 비하여 소재의 종류와 두께의 선택이 용이하기 때문이다. Fig. 4는 시험에 사용된 금형의 개략도를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 유체로 가득찬 하부 금형에 판재를 올려놓고 상부 금형으로 가압하여 판재와 하부 금형 내부를 밀봉한 다음 고압의 유체를 작용한다. 유체의 압력이 목표 값에 도달하면 상부 금형의 펀치를 전진시켜서 피어싱 공정을 수행하였다.

하부 다이 공동부의 크기가 크지 않으나 사용 압력이 매우 고압이기 때문에 상하부 금형을 고정시키기 위하여서는 대용량의 프레스가 소요되어 5,000톤 하이드로포밍용 프레스를 사용하여 시험을 수행하였으며 최대 작용 가능한 내압은 2,000bar 이다. 하이드로 피어싱하고자 하는 펀치의 직경이 증가할 경우 식(4)에 나타난 바와 같이 내압에 의한 소요 펀치 하중의 증가가 매우 크므로 하이드로 피어싱을 위하여 대용량의 유압실린더를 사용하였다. Fig. 5는 시험에 사용된 금형을 나타내었다.

하이드로 피어싱 공정으로 통하여 구멍이 가공될 경우 구멍의 가장자리 전 구간에 걸쳐서 동시에 가공이 일어난다는 것은 불가능하다. 하이드로 피어싱 시험에 사용되는 유체가 비압축성이기 때문에 만약 구멍의 가장 자리 중 한 곳에서 파단이 먼저 발생하면 가압된 유체가 파단 부위를 통하여 빠져나가기 때문에 내부의 압력은 급격히 감소하게 되어 추가 공정 진행이 곤란해진다. 이를 방지하기 위하여 실 성형 공정에서 사용되는 Fig. 6과 같은 테이퍼형 펀치를 사용하였다. 하이드로 피어싱 시험시 펀치 행정은 12mm로 설정하였다.

하이드로 피어싱 공정에서 피어싱된 구멍의 건전성에 영향을 주는 영향 인자로는 소재의 두께, 성형시 가압력 등이 있다. 이들의 영향을 분석하기 위하여 두께가 다른 소재에 대하여 여러 가지로 성형 압력을 변화시키면서 시험을 수행하였다.

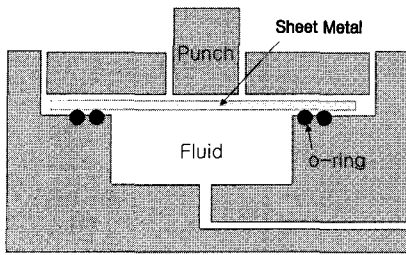


Fig. 4 Schematic diagram of tools for hydro-piercing test

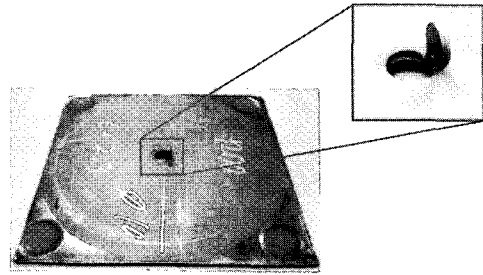


Fig. 7 Specimen after hydro-piercing test

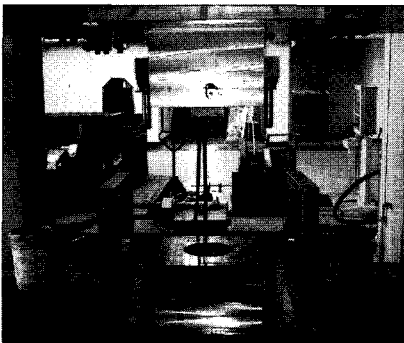


Fig. 5 Tools of hydro-piercing test

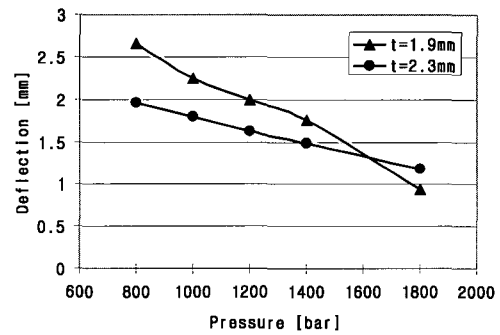


Fig. 8 Deflection near the sheared edge for each material thickness(Hole Dia.=20mm)

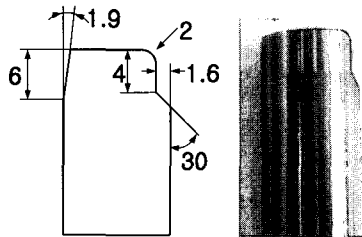


Fig. 6 Geometry of tapered punch for hydro-piercing test

4. 결과 및 고찰

하이드로포밍용 소재인 POS-HF440 을 사용하여 하이드로 피어싱 성형 시험을 수행하였다. Fig. 7 에는 하이드로 피어싱된 시편을 나타내었다. 직경이 20mm 인 펀치를 사용하여 두께가 서로 다른 소재에 대하여 내부 압력을 변화시키면서 하이드로 피어싱 시험을 수행하여 시편의 구멍 주위의 꺼짐량을 측정된 결과를 Fig. 8 에 나타내었다.

내압이 낮은 경우 그림에 나타난 바와 같이 두께가 두꺼운 경우에 비하여 두께가 얇은 경우 꺼

짐량이 더 크게 나타났다. 그러나 내부 압력이 충분히 높은 경우 두께가 얇은 소재의 꺼짐량이 두꺼운 소재의 경우보다 더 작게 나타났다. 이러한 현상은 식 (1)-(3)으로부터 설명이 가능하다. 내압이 작은 경우 식(2)의 지지하중 중에서 굽힘 저항이 차지하는 비중이 내압에 의한 것보다 크다. 두께가 증가할 경우 하이드로 피어싱에 필요한 펀치하중은 증가하게 되나 식(3)의 굽힘 저항 증가량이 더 크기 때문에 두께가 두꺼운 경우가 두께가 얇은 경우에 비하여 꺼짐량이 작게 나타난다. 그러나 내압이 충분히 클 경우 지지하중에서 내압에 의한 부분이 차지하는 비중이 굽힘 저항에 의한 부분보다 더 크기 때문에 두께가 얇은 소재의 경우 두꺼운 경우에 비하여 꺼짐량이 오히려 작게 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 직경이 10mm 인 펀치를 이용하여 하이드로 피어싱 시험한 결과를 나타낸 것이다. 이 경우에도 사용 소재의 두께에 대한 꺼짐량이 크기가 나타내는 경향은 펀치의 직경이 20mm 인 경우와 매우 유사하게 나타났으나 전체적인 꺼짐량의 크기는 상당히 작게 나타났다. 그리고 동일한 내

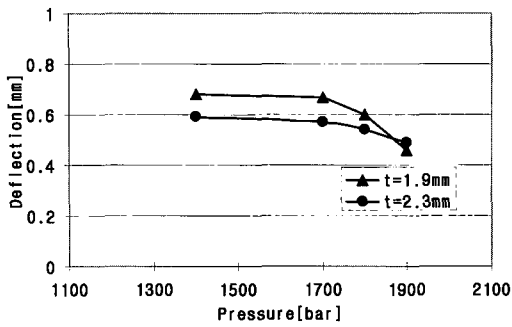


Fig. 9 Deflection near the sheared edge with respect to internal pressure(Hole Dia.=10mm)

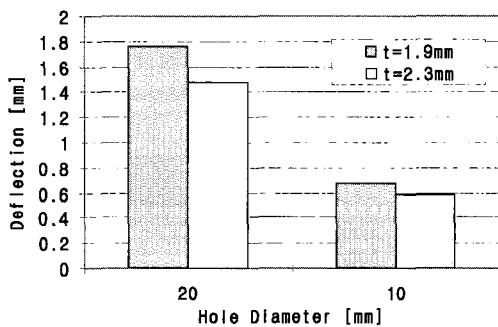


Fig.10 Deflection near the sheared edge for each hole size(Internal Pressure 1,400bar)

압을 작용하는 경우 펀치 직경에 따른 꺼짐량을 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 내압이 동일할 경우 펀치의 직경이 작은 경우가 직경이 큰 경우에 비하여 꺼짐량이 매우 작게 나타났으며 펀치의 직경이 작은 경우에는 사용 소재의 두께에 따른 꺼짐량의 차이가 펀치 직경이 큰 경우에 비하여 훨씬 작게 나타났다.

이상의 결과로 보아 튜브 하이드로포밍 공정에 사용되는 하이드로 피어싱 공정으로 구멍을 가공할 경우 구멍 주위의 꺼짐 변형은 피할 수 없으며 구멍의 직경이 작을수록 보다 우수한 품질의 구멍 가공이 가능한 것을 알 수 있다.

하이드로 피어싱된 구멍 주위의 전단면과 변형된 형상을 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 12에는 구멍에서 분리된 스크랩의 전단면을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 스크랩 부분의 전단면 형상과 구멍 주위의 전단면 형상이 서로 다른 것을 알 수 있다. 구멍 주위의 전단면 형상을 보면 두께 방향으로 거의 대부분이 전단면으로 나

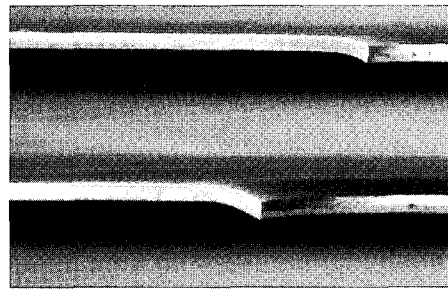


Fig.11 Shape of hole edge sheared by hydro-piercing process

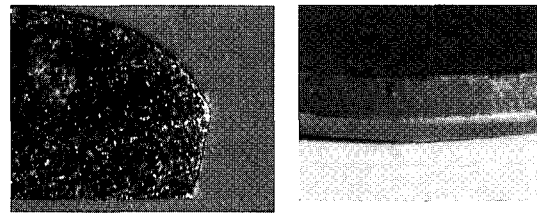


Fig.12 Shape of scrap edge sheared by hydro-piercing process

타나고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 스크랩의 전단면을 살펴보면 롤 오버가 매우 크고 단면의 대부분이 파단면으로 구성되어 있는 것을 알 수 있다. 구멍 주위의 단면 전체가 전단면을 갖는 것으로 나타나는 것은 테이퍼형 펀치를 사용하였기 때문이다. 테이퍼형 펀치가 진행함에 따라 구멍의 단면 부위가 펀치에 의하여 버니싱 형태의 가공을 받기 때문이다. 그러나 스크랩의 전단면 형상으로 보아 성형 초기에는 구멍 주위 부분도 모두 파단면으로 이루어졌을 것으로 예측할 수 있다.

스크랩의 단면 형상으로 판단하면 하이드로 피어싱 공정 중에 전단면에서 발생하는 전단 메커니즘은 일반 전단 공정에서 다이 간극이 소재의 두께에 비하여 매우 커서 단면의 전체가 파단면으로 이루어지는 경우와 유사하다고 할 수 있다. 이 경우 소재는 순수 전단에 의하여 파단이 일어나는 것이 아니고 인장과 전단의 복합에 의하여 발생하게 된다. 하이드로 피어싱 공정에 필요한 하중을 계산할 때 일반 전단 공정의 경우에 사용하는 소재의 전단 저항인 $0.7\sigma_t$ (소재의 인장강도)를 사용하여 하중을 산출하기보다는 소재의 인장강도를 사용하여 소요 하중을 산출하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

5. 결 론

하이드로 피어싱 시험을 통하여 구멍 주위의 꺼짐량에 대하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 하이드로 피어싱 공정에서 내압이 증가할수록 꺼짐량의 감소를 가져오나 두께가 얇을수록 내압 증가에 따른 꺼짐량의 감소 속도가 훨씬 더 크게 나타났다.

(2) 구멍의 크기가 작을수록 꺼짐량은 더 작게 나타났으며 소재의 두께에 대한 영향도 작게 나타났다.

(3) 하이드로 피어싱으로 구멍을 가공할 경우 구멍의 꺼짐량을 완전히 배제할 수 없으며 구멍의 크기가 작은 경우에 적용하는 것이 유리한 것을 알 수 있었다

(4) 하이드로 피어싱 공정 중 가공면에서 발생하는 메커니즘은 다이 간극이 큰 경우의 전단 면

에서 발생하는 메커니즘과 유사한 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] US Patent NO. 5, 974, 846, Nov. 2, 1999, Method of forming and piercing a tube.
- [2] US Patent NO. 5, 398, 533, Mar. 21, 1995, Apparatus for piercing hydroformed part.
- [3] 최성기, 김동규, 문영훈, 2004, 하이드로 피어싱된 튜브 부위의 변형 해석, 한국소성가공학회지, 제 13 권, pp. 154~158.
- [4] A. M. Goijaerts, L. E. Govaert, F. P. T. Baaijens, 2001, Evaluation of ductile fracture models for different metals in blanking, J. Mater. Proc. Tech., Vol. 110, pp. 312~323.
- [5] S. Kalpakjian, Manufacturing processes for engineering materials, 1991, Addison Wesley.