

편칭 효과를 고려한 허브홀의 파단 예측기법 개발

이종섭¹ · 고윤기² · 허훈 · 김흥기 · 박성호

Development of the technique for prediction of the hub-hole crack with the punching effect

J. S. Lee, Y. K. Ko, H. Huh, H. K. Kim and S. H. Park

Abstract

The hub hole is usually formed with a flanging process followed by a blanking process of a hole. Since the hole is made by blanking, the blanked surface is so rough that the formability in the region is rather poor. The emerging task is to identify the formability of the blanked region in the forming simulation and to relate the criterion to the real forming process by experiments. In this paper, hole expansion tests are carried out with respect to various hole conditions to verify the hole condition effect on the hole expansion ratio. The hole of specimens is made by machining or punching. In the case of punching, two different punching clearances are used for making the hole. From the results of test, fracture mechanism of the hole expansion is explained.

Key Words : Hole Expansion Ratio (구멍확장비), Ductile Fracture Criterion(연성파괴기준), Punching Clearance(편칭 클리어런스)

1. 서론

박판성형공정 중 하나인 홀 플랜징(hole flanging)성형은 구멍을 확장시키면서 구멍 주위에 플랜지(flanging)를 만들어 구멍 주위의 강도 및 설계상의 목표를 충족시키기 위한 공정 중 하나이다. 홀 플랜징 성형의 경우와 같이 구멍을 확장시키는 공정의 경우에 재료의 성형성을 고려하기 위하여 구멍확장성 시험(hole expansion test)을 수행하여 구멍확장비(hole expansion ratio, HER)를 측정하게 된다.

홀 플랜징 공정에는 구멍을 제조하기 위한 공정으로 편칭(Punching), 드릴링(drilling)등이 선행되므로 재료의 성형성을 파악하고자 구멍확장성 시험을 수행할 경우, 기존의 인장시험과는 달리 구멍 제작에 따른 효과를 고려해야 한다. 따라서 시험 과정은 좀더 복잡할 수 밖에 없으므로 유한

요소 해석을 이용하여 구멍확장성 시험 중 구멍주위의 균열을 예측하여 문제점을 해결할 필요가 있다.

재료의 구멍확장비를 연성파괴기준을 적용한 유한요소해석을 통하여 예측하고자 한 연구들이 진행되어 왔으나^{(1),(2),(3),(4),(5),(6),(7)}, 주로 드릴링을 통하여 제작한 구멍의 경우에만 한정되어 왔다. 이는 편칭으로 제작된 구멍주위의 결함을 유한요소 해석으로 고려하는데 어려움이 있기 때문이다. 유한요소 해석으로 편칭으로 제작된 구멍의 확장비를 구하기 위하여 구멍확장비에 대한 편칭 효과의 고찰이 선행되어야 한다.

이를 위하여 본 연구에서는 구멍확장성 시험기를 제작하고 기계가공과 편칭으로 만들어진 구멍의 확장성 시험을 수행하였다. 편칭 조건의 경우에는 편칭 클리어런스(punching clearance)와 구멍확장속도를 달리하여 구멍확장비에 미치는 영향을 알아보았다.

1. 한국과학기술원 기계공학과

2. POSCO 기술연구소

한국과학기술원 기계공학과, E-mail: goddad78@kaist.ac.kr

2. 구멍확장성 실험

2.1 실험조건

구멍확장성 실험에 사용된 시편 및 tool set 의 치수는 Fig. 1 과 같다. 구멍확장비는 초기 구멍의 직경과 최종 파단 시 구멍의 직경비로 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$HER = \frac{D_{final} - D_{initial}}{D_{initial}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

표 1 은 실험 조건을 정리한 것이다. 실험은 FB590, CT440 두 강종에 대하여 펀칭과 기계가공 두 개의 구멍조건에 대하여 수행되었으며 구멍의 초기 직경은 10 mm 이다.

Table 5-2 condition of the hole expansion test

재료	구멍 조건	Punching Clearance	펀치 속도 (mm/min)	개수
FB590	펀칭	16 %	10	8
			50	8
		8 %	10	4
	기계가공	-	10	8
CT440	펀칭	16 %	10	8
			50	8
		8 %	10	4
	기계가공	-	10	8

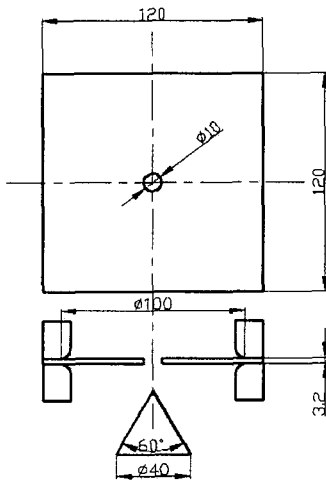


Fig. 1 Dimension of specimen and tool set of hole expansion test

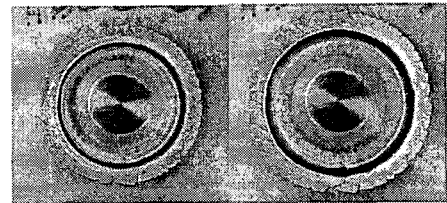
펀칭 클리어런스와 구멍확장속도의 구멍확장비에 대한 영향을 파악하기 위하여 펀칭으로 제작된 구멍의 경우, 펀칭 클리어런스 8%, 16%와 구멍확장속도 10mm/min, 50mm/min 에 대하여 시험이 수행되었으며, 구멍주위의 균열발생양상을 비교하기 위하여 구멍확장 과정은 캠코더로 촬영이 되었다.

펀칭 클리어런스는 구멍을 제작할 때, 펀치와 블랭크 홀더의 간격 (d)와 시편의 두께(t)의 비(d/t)다. 펀치 속도는 구멍확장성 시험 중, 구멍을 확장시키는 펀치의 이동 속도를 의미한다.

2.2 구멍확장과정의 고찰

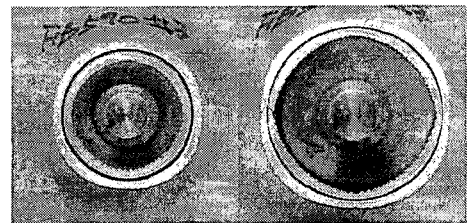
Fig. 2 는 FB590, 펀칭 클리어런스 8 %, 펀치 이동 속도가 10 mm/min 인 경우, Fig. 3 은 FB590 의 기계가공, 펀치 이동 속도 10 mm/min 로 시험한 경우의 구멍확장과정을 찍은 사진이다.

펀칭으로 만들어진 구멍의 경우, 구멍이 확장되어 감에 따라 구멍의 바깥 쪽에서부터 균열이 발생한다. 시편의 두께 방향으로 두 개의 층이 확연히 구분이 되며, 균열은 바깥쪽 부분에서는 균열이 쉽게 발생하나 안쪽 부분으로는 전파되지 않음을 알 수 있다. 최종파단은 바깥쪽에서 발생된 균열 중 변형이 집중된 하나의 균열이 구멍



(a) (b)

Fig. 2 pictures of the edge of the hole manufactured by punching for FB590: (a) 32 sec; (b) final fracture



(a) (b)

Fig. 3 Pictures of the edge of the hole manufactured by machining for FB590: (a) 120 sec; (b) final fracture

안쪽으로 진전되면서 발생한다.

기계가공 된 구멍의 경우, 구멍확장과정 중 균열은 발생하지 않다가 국부적인 네킹에 의한 최종적인 순간에 파단이 발생한다. 최종 파단시점 또한 편칭조건의 경우보다 지연되며, 이는 초기 균열에 의한 응력집중현상이 편칭조건과는 달리 기계가공조건에서는 발생하지 않기 때문이다.

Fig. 4 는 편칭으로 만들어진 구멍의 단면을 SEM 으로 촬영한 사진이다. 두께방향으로 두 개의 층이 분명하게 구별이 되는데, 이것은 편칭에 의하여 생긴 전단면(shearing zone)과 파단면(fracture zone)이다. 파단면은 상대적으로 표면이 매우 거칠며 많은 버(burr)가 존재한다.

Fig 4 에서 보이는 바와 같이 파단면의 경우, 전단면보다 표면이 더 거칠어서 균열이 보다 쉽게 발생되고, 진전할 수 있다. 파단면에서 발생한 균열이 파단면과 전단부의 경계까지는 진전이 되나, 전단면에서부터는 연성파괴(ductile fracture)와 같은 경향으로 네킹에 의하여 전파되게 된다.

위의 두 결과를 통하여, 기계가공 조건의 시편의 경우에는 연성파괴에 의하여 파단이 일어나며 편칭조건의 경우 파단면에서 균열의 발생에 의한 응력집중현상과 전단면에서의 연성파괴가 순차적으로 일어나는 것을 알 수 있다.

2.3. 구멍 확장비

Fig. 5 와 Fig. 6 은 각각 CT440 과 FB590 의 구멍 확장비를 나타낸 그래프이다.

두 재료 모두 편칭조건과 기계가공조건과의 구멍확장비가 큰 차이를 보이는 데, 이는 앞에서 기술한 바와 같이 구멍 주위의 결함에 따른 파단

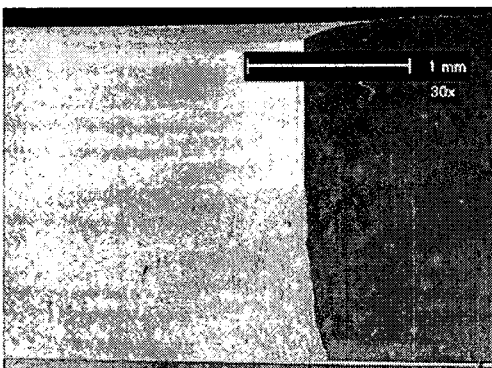


Fig. 4 Section view of the hole manufactured by punching of the specimen

양상의 차이 때문에 발생한다.

편칭조건에 대하여, 편칭 클리어런스가 8 %에서 16 %로 증가함에 따라 구멍확장비도 약간 증가한다. 펀치 이동속도가 증가함에 따라 구멍확장비의 경향성은 보이지 않는다. 이러한 변화는 실험값의 오차 범위 안에 있을 정도로 미미하다.

편칭 클리어런스가 변화함에 따라 구멍의 두께 방향으로 파단면과 전단면의 비율이 달라진다. 파단면과 전단면의 파단경향이 다르므로, 파단면과 전단면의 비율이 구멍확장비에 관계가 있음을 예측할 수 있다.

시험 결과를 관찰하면 구멍확장비의 산포가 존재한다. Fig. 7 은 CT440 의 편칭 클리어런스 16%, 펀치 이동 속도 15 mm/min 으로 수행한 시험의 구멍확장비를 나타낸 그래프이다.

1 번 시편과 8 번 시편의 구멍확장비는 약 60 %만큼 차이가 난다. 이러한 구멍확장비의 산포

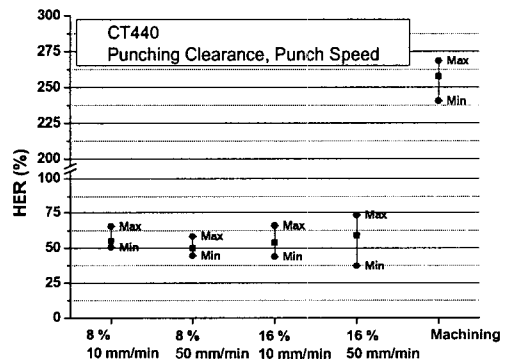


Fig. 5 Hole expansion ratio with respect various hole conditions of CT440

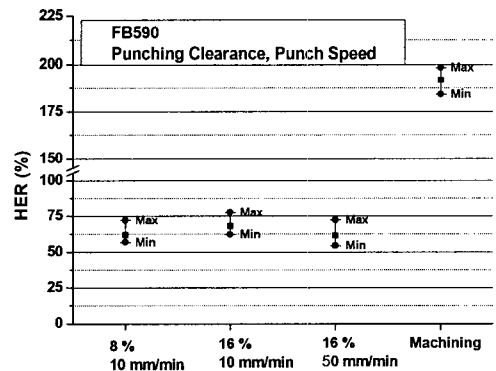


Fig. 6 Hole expansion ratio with respect various hole conditions of FB590

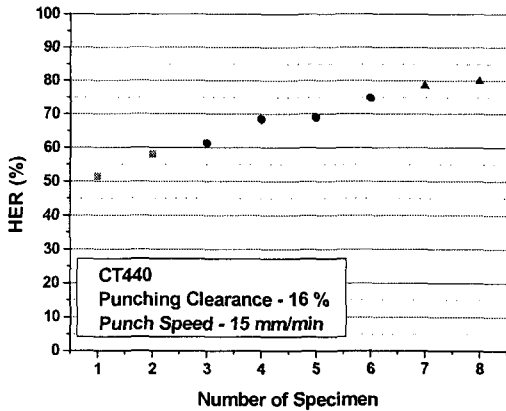


Fig. 7 hole expansion ratio of CT440 with 16% of punching clearance and 15 mm/min of punch speed

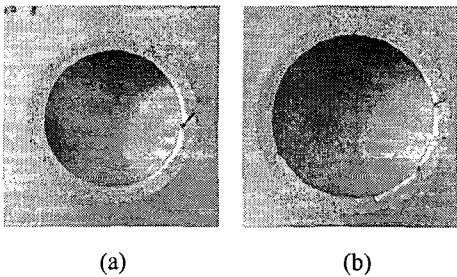


Fig. 8 picture of the hole of the specimen at the final fracture: a) specimen 1; b) specimen 8

는 구멍주위에 발생하는 균열의 수와 분포에 의하여 결정된다. Fig. 8 은 두 시편의 최종 파단 순간 구멍 주위의 균열 분포를 나타낸 그림이다.

Fig. 8 을 관찰하면 구멍 주위에 발생하는 균열의 수에 비례하여 구멍확장비가 증가함을 알 수 있다. 구멍이 확장되면서 균열이 발생하면 변형이 균열 주위에 집중되게 되는 데, 균열의 수가 많을 수록, 변형이 분산되면서 균열이 진전되는 속도가 감소하게 된다. 시편 1 과 시편 7 과 같은 경우는 특수한 경우이므로 측정값 중 최소값과 최대값을 가지는 시편은 고려하지 않는 방법으로 구멍확장성의 산포를 합리적으로 줄이고자 하였다.

4. 결론

본 논문에서는 구멍의 제작조건이 구멍확장성비에 미치는 영향을 알아보기 위하여 기계가공과 펀칭으로 제작된 경우의 구멍확장성 시험을 수행

하였다. 펀칭의 경우에는 펀칭 클리어런스를 8 %, 16 %의 두 가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 또한 구멍확장속도에 따른 구멍확장성비의 영향을 파악하기 위하여 구멍확장을 위한 펀치 이동속도를 10 mm/min 과 50 mm/min 으로 달리하여 실험을 수행하였다. 이를 통하여 다음과 같은 사실을 확인할 수 있었다.

(1) 펀칭으로 제작된 구멍의 확장성비는 기계가공으로 제작된 경우보다 약 2 배 가량 저하된 값을 갖는다. 이는 펀칭으로 제작된 경우에 구멍주위의 결함으로 인하여 균열이 쉽게 발생하기 때문이다.

(2) 펀칭 클리어런스가 8 %에 16 %로 증가함에 따라 구멍확장비는 약 5 % 증가하나 구멍확장 속도에 따른 경향성은 확인할 수 없다.

(3) 펀칭으로 제작된 구멍의 확장비는 구멍주위에 발생하는 초기 균열의 수에 반비례하며 이러한 이유로 필연적으로 실험값의 산포가 발생하게 된다.

참고 문헌

- [1] M. G. Cockcroft and D. J. Latham, 1968, "Ductility and workability of metals", J. Inst. Metals, Vol. 96, pp. 33~39.
- [2] P. Brozzo, B. DeLuca and R. Rendina, 1972, "A new method for the prediction of formability limits in metal sheets", Proceedings of the 7th biennial conference of the international deep drawing research group.
- [3] M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto and S. Shima, 1980, "Criteria for ductile fracture and their application", J. Mech. Work. Tech., Vol. 4, pp. 65~81.
- [4] S. E. Clift, P. Hartley, C. E. N. Sturgess and G. W. Rowe, 1990, "Fracture prediction in plastic deformation process", Int. J. Mech. Sci., Vol. 32, pp. 1~17.
- [5] D. Brokken, W. A. M. Brekelmans and F. P. T. Baaijens, 1998, "Numerical modeling of metal blanking process", J. Mater. Process. Tech., Vol. 83, pp. 192~199.
- [6] Y. K. Ko, J. S. Lee, H. Huh, H. K. Kim and S. H. Park, 2005, "Transaction of Material Processing", (submitted)