결함을 가지는 모델을 이용한 허브 홀 확장에서의 파단 예측

이종섭*· 허훈*

(년 월 일 접수)

Prediction of fracture in hub-hole expansion with a defected-edge model

Jong-Sup Lee and Hoon Huh

Abstract

The hub hole is usually formed with a stretch 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, the blanked region of a hole surface is modeled by a defected-edge finite element for stretch flanging simulation. The analysis deals with the level of defect in the blanked region in order to identify the formability in the real process. The analysis provides the formability depending on the level of defect and seeks the way to match the level of defect to that of the real surface. The approach makes the analysis possible to deal with the formability of the high strength steel and predict the fracture at the hole surface during the stretch flanging simulation.

Key Words : Hole expansion test(구멍 확장 시험), Stretch flanging(신장 플랜지), Hub hole(허브 홀)

1. 서 론

박판 성형 공정의 수치적 해석법은 컴퓨터의 성능과 관련된 수치기법의 발전으로 인해 유용한 도구가 되어왔다. 홀 플랜징(hole flanging) 성형은 자동차 휠(wheel)의 제작에 있어서 중요한 공정으로 성형된 허브 홀(hub hole)의 특성은 휠의 피로 성능등에 많은 영향을 미치게 된다. 허브 홀은 일반적으로 블랭킹(blanking)공정에 이은 신장 플랜지 성형(stretch flanging)성형을 통해 제작된다. 신장 플랜지 성형시 허브 홀의 경계에서 파단을 예측하기 위한 기준들이 제시되어왔다.[(1),(2)]

한편 허브 홀은 블랭킹 공정에 의해서 생성됐기 때문에 허브 홀 주변의 결함이 발생하게 되고 이에 의한 플랜지 성형에서 성형성 저하가 발생하게 된다. 플랜지 성형에서 파단을 예측하기 위한 기준에 블랭킹 공정에 의한 홀 주변의 결함을 고려해야 할 필요가 있다.

본 논문에서는 강판의 플랜징 성형성을 파악하기 위한 구멍 확장성 시험(Hole expansion test)의 수치해석을 결함을 가지는 유한요소모델을 이용하여 수행하였다. 결함의 형상과 분포를 달리한 해석의 결과 비교를 통하여 실제의 경우와 유사한 결함의 모델링을 시도하였다.

*한국과학기술원 기계공학과

2. 허브 홀 확장 해석

2.1 해석 조건

허브 홀 확장 시험을 위한 시편과 공구는 Fig.2.1 과 같다. 해석을 위해서 구성한 유한 요소 모델은 Fig. 2.2 와 같다. 허브 홀 확장 시험에서 블랭크 홀딩력은 블랭크의 인입을 방지할 수 있는 충분한 크기를 부과한다. 본 논문에서는 허브 홀 확장 해석시 블랭크의 인입이 없다고 가정하여 블랭크 홀더를 모델링하지 않고, 블랭크의 가장자리의 변위를 고정시켰다. 한편, 해석의 효율성을 위하여 1/4 모델링이 바람직하나 결함을 대칭적으로 부과하기 위하여 1/2 모델을 사용하였다.

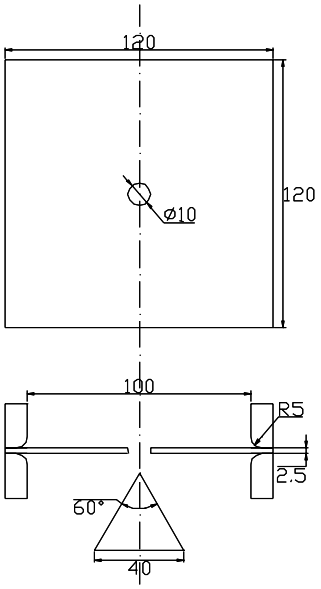


Fig. 2.1 Hole expansion test specimen and tooling

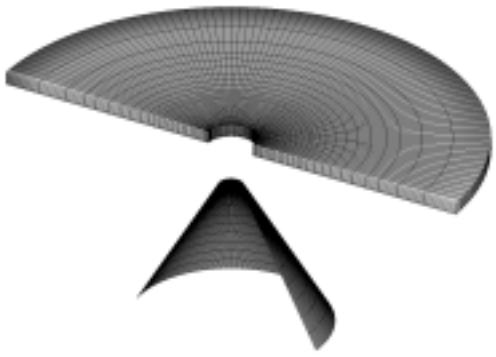


Fig. 2.2 Finite element modeling of hole expansion test

시편의 크기에 비해 상대적으로 작은 결함을 구멍의 가장자리에 부과하기 위하여 구멍의 주위는 매우 작은 크기의 요소를 사용하여 모델링을 하였다. 원주 방향으로 90 개의 요소를 사용하여 1 개의 요소가 2 °를 묘사하게 된다. 해석에 사용된 코드는 LS-DYNA3D 이며 적용된 재료의 물성은 식(1)과 같다.

$$\bar{\sigma} = 768.5(0.02 + \bar{\varepsilon}^{p})^{0.283} MPa \quad (1)$$

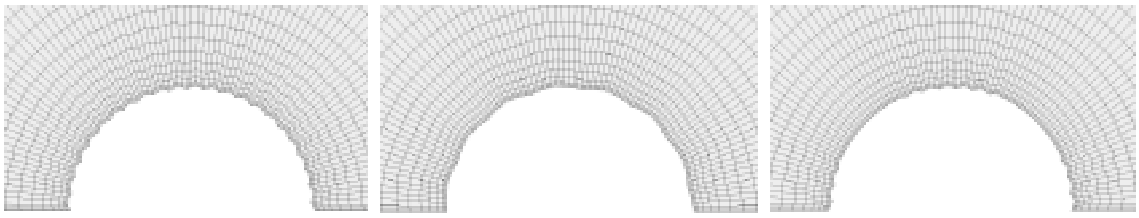
펀치의 이동속도는 3 mm/sec, 해석시간은 10 초이다.

2.2 결함의 모델링

블랭킹 공정에서 구멍치수의 정확도는 구멍의 크기와 판재의 두께에 따라서 달라진다. 일반적인 블랭킹 공정에서의 구멍의 공차는 Table 1 과 같다.[3] 본 논문의 경우에는 최대의 공차는 약 0.08 mm 이다. 구멍의 주위에 존재하게 되는 결함을 본 논문에서는 Fig. 2.3 와 같은 톱니모양으로 모델링을 하였다. 일반적인 블랭킹 공정에서는 시편의 두께방향으로 전단면과 파단면이 존재하여 주로 파단면에서 구멍의 정확도가 떨어지는 결함이 분포하게 되나 본 논문에서는 시편의 두께방향으로는 균일하게 결함을 부과하였다. Fig. 2.2 (a)의 경우에는 결함의 피치는 4 °, 결함량은 0.08 mm 이며 원주방향으로 모든 부분에 결함을 부과하였다. 결함의 모델링에 따른 결과를 비교하기 위하여 결함량, 결함의 피치(pitch)와 결함의 분포를 Fig. 2.2(b),(c) 와 같이 달리하여 해석을 수행하였다.

Table 1 Tolerance for Piercing

Sheet thickness, mm	Hole dimension, mm		
	~10	10 ~ 50	50 ~ 150
Achievable accuracy without special measures, mm			
0.2-1.0	0.05	0.08	0.12
1.0-2.0	0.06	0.10	0.16
2.0-4.0	0.08	0.12	0.20
4.0-6.0	0.10	0.15	0.25
Achievable accuracy with special measures, mm			
0.2-1.0	0.02	0.04	0.08
1.0-2.0	0.03	0.06	0.10
2.0-4.0	0.04	0.08	0.12
4.0-6.0	0.06	0.10	0.15



(a) **(b)** **(c)**

Fig. 2.3 Modeling of defects:(a) defect with 8 mm depth and 4° pitch; (b)defect with 8 mm depth and 12° pitch; (c) defect with 8 mm depth, 4° pitch and 45° interval

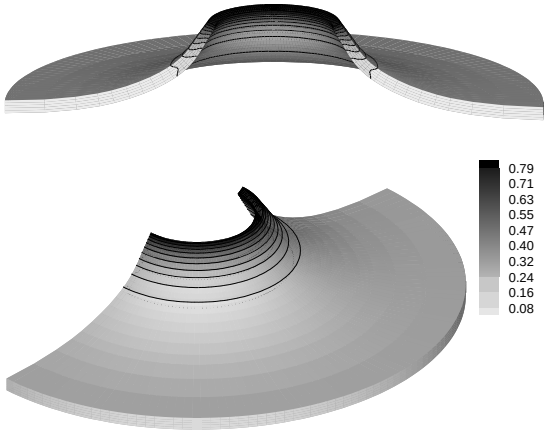


Fig. 3.1 Deformed shape and effective strain distribution of a hub hole

3. 해석결과

3.1 결함이 없는 경우

Fig. 3.1 은 구멍의 가장자리에 결함을 부과하지 않았을 경우에 최종변형형상과 유효변형률(effective strain) 분포이다. 변형은 대부분 구멍의 주위에서 집중되며, 원주방향(circumferential direction)으로는 유효변형률이 균일함을 알 수 있다. 구멍의 가장자리에서 유효변형률은 두께방향으로 위쪽으로 올라갈수록 커지게 된다.

3.2 결함량에 따른 비교

결함의 피치는 4 °로 고정한 후, 결함량을 0.04 m 에서 0.08 mm 까지 변화를 주고 결과를 비교하였다. 구멍 가장자리의 위쪽부분의 유효변형률을

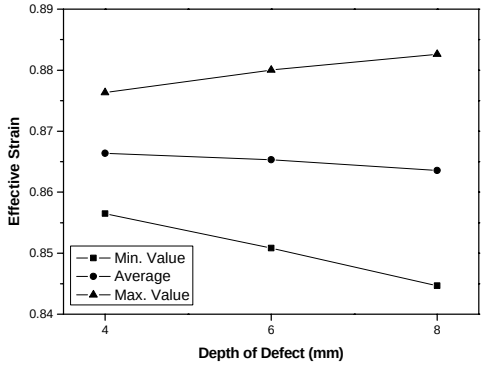


Fig. 3.2 Effective strain with respect to depth of defects

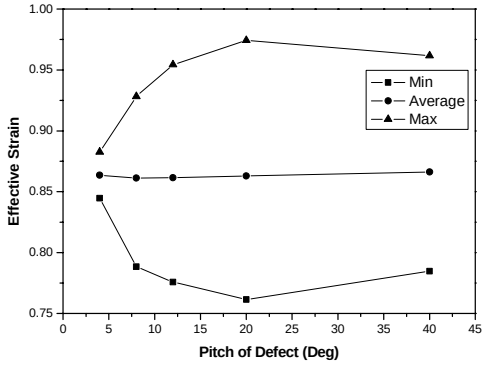


Fig. 3.3 Effective strain of model using 90 elements in circumferential direction with respect to pitch of defects

Fig. 3.2 에 나타내었다. 결함량이 증가함에 따라, 유효변형률의 최대값과 최소값이 비례하여 증가한다.

3.2 결함의 피치에 따른 비교

결함량을 0.08 mm 로 고정한 후, 결함의 피치

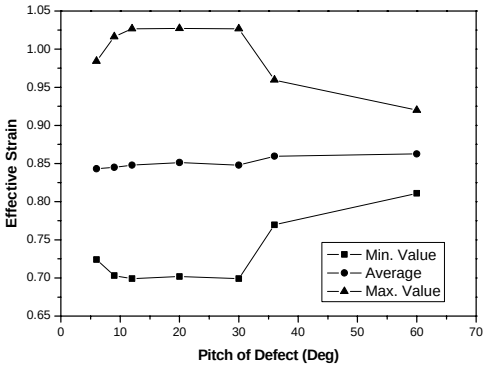


Fig. 3.4 Effective strain of model using 180 elements in circumferential direction with respect to pitch of defects

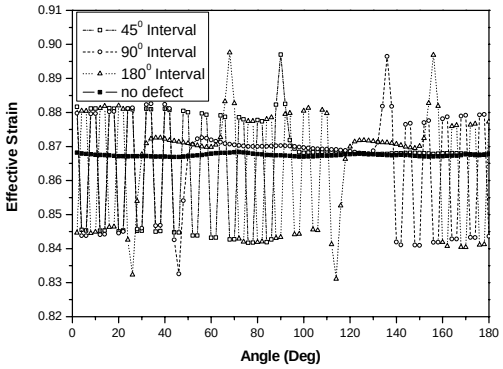


Fig. 3.5 Effect strain distribution of edge of a hole with respect to interval of defects

를 변화시켜갈 때의 유효변형률의 최대값과 최소값을 Fig. 3.3 에 나타내었다. 피치가 증가함에 따라 유효변형률의 극값이 증가하다 20°를 전후하여 다시 감소한다. 1 개의 요소의 각도는 2°이므로 8°의 피치를 가지는 결함은 4 개의 요소로 결함을 묘사하게 된다. 피치의 크기가 증가할수록 결함의 묘사하는 데 사용되는 요소의 수도 증가하게 된다. 피치의 값이 증가하게 될수록 응력의 집중현상이 완화된다고 생각할 수 있다. 본 논문에서는 결함을 묘사하는 데 사용되는 요소의 수의 영향을 살펴보기 위하여 원주방향으로 180 개의 요소를 사용하여 1 개의 요소의 각도가 1°가 되도록 하였다. 두 배의 요소를 원주방향으로 사용하였을 때의 피치의 변화에 따른 유효변형률의 최대, 최소값을 Fig. 3.4 에 나타내었다. 결함을 묘사하는 데 사용된 요소의 수가 적은 경우에는 유효변형률의 극값이 작으나, 일정한 수의 요소를 이용하여 결함을 묘사한 경우는 유효변형률의 최대, 최소값이 일정하게 된다. 이 결과를 통해 피치의 크기에 따른 응력의 집중효과보다 결함을 묘사하는 요소 수에 의한 효과가 훨씬 크다는 사실을 알 수 있다. 피치가 40 도를 넘는 경우에는 응력의 집중이 작아지면서 변형양상이 달라지게 된다.

3.3 결함의 분포에 따른 비교

결함이 구멍의 원주방향으로 불균일하게 분포하는 경우에 원주의 방향에 따른 유효변형률 분포는 Fig. 3.5 와 같다. 결함량은 8mm, 피치는 4°일 때 각각 45°,90°,180° 간격으로 결함을 부과하였다. 결함이 부과되어있다가 제거되는 요소에서 유효변형률의 집중이 발생하나 불균일한 분포에 의한 영향은 크지 않다.

4. 결 론

허브홀의 확장시험의 수치해석을 결함을 가지는 유한요소를 사용하여 수행하였다. 결함량, 결함의 피치와 결함의 분포를 달리하여 각 경우에, 구멍의 가장자리의 유효변형률 분포를 비교하였다. 유효변형률의 최대값과 최소값은 결함량에 비려하며, 결함의 피치의 값에 따라서는 피치가 커져서 변형양상이 달라지는 경우를 제외하고 일정한 값을 가진다. 결함의 정확한 묘사를 위해서는 많은 수의 요소를 사용하여야 한다. 결함의 불균일한 분포에 따른 유효변형률의 변화는 없다.

참 고 문 헌

(1) H. Takuda, K. Mori, H. Fujimoto and N. Hatta, 1997, "Fracture prediction in stretch forming usiong finite element simulation combined with ductile fracture criterion", Arch. Appl. Mech., Vol. 67, pp. 143 150.

(2) C. T. Wang, G. Kinzel and R. Altan, "Failure and wrinkling criteria and mathematical modeling of shrink and stretch flanging operation in sheet-metal forming", 1995, J. Mater. Process. Tech., Vol. 53, pp. 759~780.

(3) K. Lange, 1958, "Handbook of metal forming", McGraw-Hill.