

연강 판재의 속도에 따른 블랭킹의 유한요소해석

송신형^a, 최우천^{a*}

FEM Analysis of Blanking of Mild Steel Sheet at Various Punch Speeds

Shin-Hyung Song^a, Woo Chun Choi^{a*}^a School of Mechanical Engineering, Korea University, 145, Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	19	October	2016
Revised	4	December	2016
Accepted	7	December	2016

Keywords:

Blanking
Rate dependent
FEM
Mild steel

ABSTRACT

In this study, a finite element analysis for high-speed blanking of mild steel is performed. A thermomechanically coupled simulation model of a blanking process was developed using ABAQUS/Explicit. Through a simulation of the high-speed blanking process of mild steel, the influence of the punch speed, tool edge radius, and work material thickness on the development of the plastic heat and punch load were studied. The results of the study revealed that a higher punch speed caused thermal softening of the work material and decreased the punch load. Decreasing tool edge radius could help reduce the punch load. In addition, the results of the study revealed that the thermal softening effect was more dominant in the blanking of a mild steel sheet with a greater thickness as compared to that in the blanking of a mild steel sheet with a lower thickness.

1. 서론

고속블랭킹 공정은 판재에서 다양한 형상의 제품을 생산성을 높여 빠른 펀치속도로 생산하는 공정이다. 이러한 고속블랭킹은 SPM(strokes per minute)이 보통 수백 이상인데 특히 소형 전자 부품의 양산 등에 많이 사용되고 있다. 이러한 고속블랭킹 공정은 높은 생산성을 가진다는 장점은 있으나 가공 재료의 고속도 변형에 의한 변형률 의존성 거동이 전통적인 블랭킹 공정과는 다른 가공 결과를 가져온다고 알려져 있다. 특히, 블랭킹 공정에서는 펀치하중의 크기와 블랭크의 단면의 품질이 중요한데 이러한 펀치하중과 블랭크 품질에 가공재료의 변형률 의존성 거동이 직접적 영향을 미칠 수 있다.

구체적으로는 블랭킹 공정의 결과로 롤오버, 전단면, 파단면 그리고 버(burr)가 차례대로 생성되는데 블랭크의 품질 면에서는 매

끄러운 전단면을 늘리고 버어, 롤오버 그리고 불규칙한 파단면을 줄이는 것이 중요하다. 또한 블랭킹의 펀치하중에 관해서는 펀치의 하중이 공정의 에너지 소비량 및 공구의 수명 등과 관련이 있기 때문에 블랭킹 공정 중의 펀치의 하중을 절감하는 것이 중요하다. 이러한 블랭킹과 관련해서는 다양한 연구들이 실험 및 유한요소해석^[1,2] 등의 방법으로 진행되고 있다.

상기한 바와 같이, 블랭킹 공정의 결과들은 펀치의 속도를 증가시켜 재료에 변형률속도 의존성 변형을 가하게 되면 전통적인 블랭킹 공정의 결과와는 달라지는데 이와 관련해서 많은 연구가 이루어졌다.

먼저 고속블랭킹의 펀치하중에 관한 많은 연구가 이루어졌는데^[3-7] 13% 크롬강(13% Cr steel)의 고속블랭킹에 관한 연구에서는^[5] 실험연구와 유한요소해석에 의한 연구가 이루어졌다. 연구결과, 저속 영역의 펀치속도에서는 재료 변형의 변형률 의존성 거동

* Corresponding author. Tel.: +82-2-3290-3361

Fax: +82-2-926-9290

E-mail address: wcchoi@korea.ac.kr (Woo Chun Choi).

의 효과가 미미했지만 고속 영역에서는 이러한 변형률 의존성 거동이 펀치하중에 미치는 효과가 뚜렷한 것으로 나타났다. Fesi^[6]의 블랭킹에 관한 연구에서는 펀치의 속도를 23 mm/s에서 123 mm/s로 변화시켜서 연구가 이루어졌는데 펀치하중의 크기가 펀치속도가 증가할수록 증가하였으며 변형률 의존성 구성방정식을 사용하여 펀치하중의 변화를 정확히 모델링할 수 있음을 보였다.

반면에, 펀치속도가 증가할수록 펀치하중이 감소한다는 연구 결과도 있다^[4]. C40의 블랭킹에 관한 이 연구에서는 특수한 블랭킹 실험장치를 고안하여 실험연구를 수행하였는데 펀치의 속도가 10.6 m/s에서 18.1 m/s인 영역에서 연구를 수행한 결과 펀치의 속도의 증가에 따라 펀치의 하중이 오히려 감소한다는 것을 보였다.

고속블랭킹의 블랭크 품질에 관한 다양한 연구도 다양하게 이루어졌다^[3-7]. 연강 등의 재료를 사용한 블랭킹 연구에서는^[3] 고속영역과 저속영역 전체에서 실험이 이루어졌는데 일반적으로 고속의 블랭킹이 저속의 블랭킹보다 더 나은 블랭크의 품질을 생성한다는 것이 보고되었다. Fig. 1에서는 연강과 2024-T4 알루미늄 합금에 관한 저속(0.13 m/s)과 고속(10 m/s) 블랭킹에 의한 품질을 나타내고 있는데 고속블랭킹에 의한 단면의 품질이 더 양호한 것을 알 수 있다. 반면에 인칭동에 관한 고속블랭킹 연구^[7]에서는 실험연구와 유한요소해석이 이루어졌는데 펀치속도를 증가시키더라도 블랭크 품질의 향상이 일반적인 속도의 블랭킹과 비교했을 때 미미한 것으로 나타났다. 고속블랭킹의 펀치의 하중과 블랭크의 품질에 관한 연구에서는 이렇게 펀치속도에 따라 다양한 결과가 나타나는 이유가 존재한다.

고속블랭킹의 중간영역의 펀치속도 하에서는 변형률속도의 증가로 인하여 펀치하중이 증가한다. 이후 속도가 일정 이상 증가하면 가공 재료에서 소성열이 발생한다. 이 때 철계 금속재료는 일반적으로 열전도율이 낮으므로 소성열의 발생이 좁은 영역에서의 단열 현상으로 이어지는데 이 과정에서 재료의 연화 현상이 일어나고 이 때문에 펀치하중이 오히려 감소하게 된다. 이러한 고속영역의

펀치하중 하에서는 블랭크의 품질에 관해서도 마찬가지로 현상이 일어나는데 열전도율이 낮은 철계 금속재료는 소성열에 의한 연화 현상으로 블랭크의 전단면이 증가하여 품질이 향상된다. 하지만 열전도율이 높은 비철금속 같은 경우 소성열이 발생하더라도 주변부로 빠르게 소산하게 되며 이 때문에 연화 현상으로 인한 품질의 향상이 미미하다.

이러한 특성을 가진 고속블랭킹 공정은 최근 들어 활발한 연구가 이루어지고 있지만 연구 상의 몇 가지 어려움이 있다^[8]. 우선 일반적인 블랭킹에 비해 고가이며 복잡한 고속프레스 장비가 필요하다. 구체적으로, 고속블랭킹의 중요한 변수들은 일반적인 산업용 프레스를 사용하여 탐구하기가 어렵다^[9]. 고속블랭킹의 연구를 위해서는 힘과 온도의 정확한 측정이 필요하지만 센서의 설치 및 측정 등이 용이하지 않다. 특히 동적인 특성이 강한 고속블랭킹 공정에서는 힘의 정확한 측정이 어렵다^[4]. 마찬가지로 고속블랭킹 과정에서의 온도 측정에 관한 연구는 최근의 한 건 정도만 이루어진 상태이다^[9]. 따라서 이러한 상황에서는 고속블랭킹의 연구를 위하여 시뮬레이션을 사용한 접근이 매우 효과적이라고 볼 수 있는데 이러한 시뮬레이션 연구를 통해 고속블랭킹 공정 중 블랭크 재료의 소성열의 발생 및 펀치하중과의 관계를 효과적으로 관찰 및 분석할 수 있으며 이러한 시뮬레이션 연구가 실험의 설계에도 도움을 줄 수 있다.

본 연구에서는 연강의 고속블랭킹 공정의 유한요소 시뮬레이션 연구를 수행하였다. 구체적으로, 연강의 고속블랭킹 중 펀치속도, 다이 및 펀치 등 공구의 모서리 반지름 그리고 가공 재료의 두께 등을 변화시켰을 때 소성열의 발생량이 어떻게 변화하는지 관찰하였고 그에 따라 펀치하중이 어떻게 변화하는지 관찰하였다. 이렇게 하여 고속블랭킹에서 공정변수의 변화와 소성열 및 펀치하중의 관계를 찾아내고자 하였다. 결과적으로, 고속블랭킹에서 소성열의 발생 및 펀치하중의 변화가 펀치의 속도뿐만 아니라 블랭킹의 여러 공정변수들과도 관계가 있음을 보인 실험연구가 충분하지 않은 상황에서 시뮬레이션을 사용한 본 연구가 고속블랭킹의 연구에 도움이 되고자 하였다.

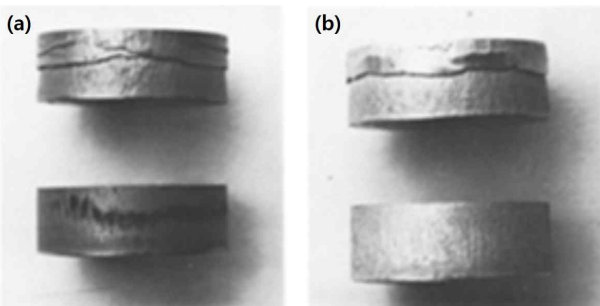


Fig. 1 Blanking using low punch speed (top) and high punch speed (bottom); (a) mild steel, (b) aluminum alloy 2024-T4^[3]

2. 시뮬레이션

Fig. 2는 고속블랭킹 공정의 유한요소해석 모델을 나타낸다. 유한요소해석 모델은 축대칭 모델로 완성되었으며 일정한 크기의 모서리 반지름을 가진 펀치와 다이는 강체로 모델링되었다. 모델에서 재료부분의 왼쪽 끝은 축대칭 모델의 중심이자 원형 블랭크의 중심 부이므로 x축 방향으로 이동하지 않는다고 가정하여 고정되었다. 이러한 구속조건은 Hu 등^[7]의 해석모델에서도 적용된 바 있다. 또한 재료부분의 오른쪽 끝은 y축 방향에 대하여 고정되었다. 가공

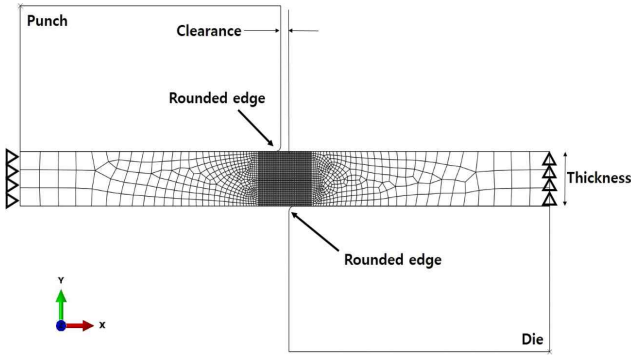


Fig. 2 Simulation model

재료는 연강(mild)이며 연강의 소성변형은 Johnson-Cook 소성모델 10을 따르는 것으로 가정하였다. Johnson-cook 소성모델은 아래와 같다.

$$\bar{\sigma} = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0 \quad (2)$$

여기서, $\dot{\epsilon}^*$, $\dot{\epsilon}$, $\dot{\epsilon}_0$ 그리고 T^* 는 각각 정상화된 변형률속도, 등가 변형률속도, 기준 변형률속도 그리고 정상화된 온도이다. 정상화된 온도 T^* 는 아래와 같이 나타낸다.

$$T^* = (T_{inst} - T_{trans}) / (T_{melt} - T_{trans}) \quad (3)$$

여기서, T_{inst} , T_{melt} 그리고 T_{trans} 는 각각 순간온도, 용융온도 그리고 전이온도를 나타낸다.

본 연구에서 사용된 시뮬레이션 도구는 ABASUS/explicit이며 thermo-mechanically coupled analysis를 사용하였다. 연구에 사용된 가공 재료인 연강의 Johnson Cook 상수^[11]와 열변형 관련 상수는 문헌에서 인용하였다^[12]. 또한 시뮬레이션 중 유한요소 격자가 뒤틀리고 시뮬레이션이 멈추는 일을 방지하기 위해 시뮬레이션 중 계속하여 새로운 유한요소 격자망을 생성하는 ALE adaptive mesh 기법을 적용하였다.

본 연구에서는 이러한 유한요소 시뮬레이션 모델을 사용하여 펀치의 반지름이 15.75 mm, 연강 판재의 두께가 3 mm 그리고 펀치와 다이의 모서리 반지름이 0.3 mm인 경우를 해석하였다. 그리고 이러한 조건 하에서 펀치의 속도가 30 mm/s, 40 mm/s, 50 mm/s 그리고 60 mm/s인 경우의 고속블랭킹을 시뮬레이션하여 펀치하중의 변화를 관찰하였다. 또한 각각의 펀치속도 하에서 판재에서의 소성열의 발생을 비교분석하였다. 이후 펀치와 다이의 모서리 반지름을 0.5 mm, 0.7 mm 그리고 0.9 mm로 변화시켜 펀치하중의 변화를 관찰하였으며 마찬가지로 판재에서의 소성열의 발생을 관찰하였다. 마지막으로 본 연구에서는 판재의 두께를 6 mm로 변화시켜 펀치의 속도가 30 mm/s에서 50 mm/s로 증가할 때의 펀치하중의 변화를 관찰하여 판재의 두께가 3 mm일 때 펀치의 속도가

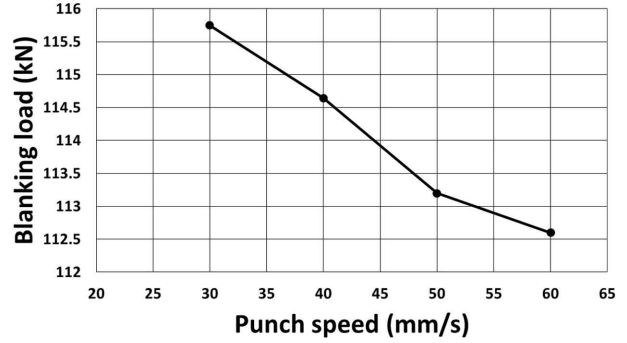


Fig. 3 Blanking load vs. punch speed

Table 1 Punch speed vs. Blanking load

Punch speed	Punch load	Percent rate
30 mm/s	115.7 kN	
40 mm/s	114.6 kN	-0.95%
50 mm/s	113.2 kN	-1.26%
60 mm/s	112.6 kN	-0.53%

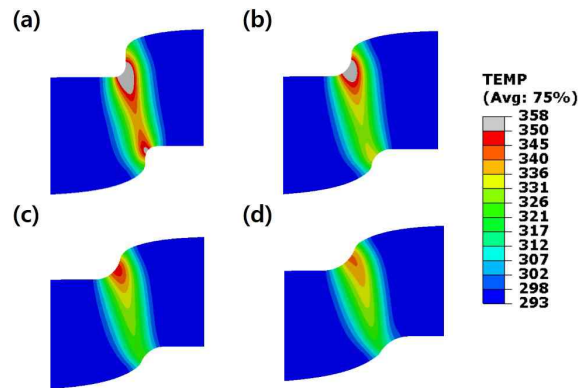


Fig. 4 Temperature (K) in the blank with a tool edge radius of (a) 0.3 mm, (b) 0.5 mm, (c) 0.7 mm, (d) 0.9 mm

Table 2 Tool edge radius vs. temperature

Tool edge radius	Temperature	Percent rate
0.3 mm	402.9 K	
0.5 mm	387.1 K	-3.92%
0.7 mm	367.9 K	-4.96%
0.9 mm	358.3 K	-2.61%

30 mm/s에서 50 mm/s로 변화하는 경우의 펀치하중의 변화와 비교하였다.

3.3 판재 두께의 영향

Fig. 5는 판재의 두께가 3 mm 그리고 6 mm일 때 펀치속도가 각각 30 mm/s에서 50 mm/s로 변화할 때의 펀치하중의 변화를 나타낸 것이다. 판재의 두께가 3 mm일 때는 펀치속도가 30 mm/s

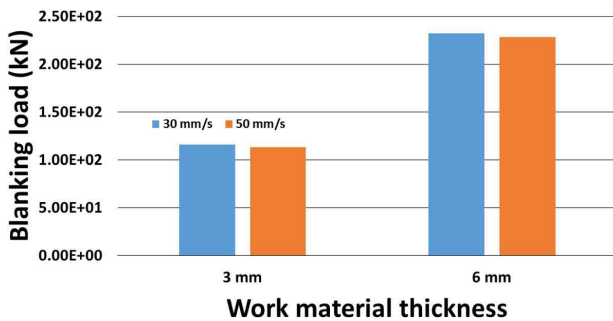


Fig. 5 Blanking load vs. work material thickness

에서 50 mm/s로 증가하면 펀치하중은 2.55 kN만큼 감소하는데 반해 판재의 두께가 6 mm일 때는 펀치속도가 30 mm/s에서 50 mm/s로 증가하면 펀치하중은 3.756 kN만큼 감소하는 것을 알 수가 있다. 이 결과를 볼 때 판재의 두께가 증가하면 소성열의 발생으로 인한 펀치하중의 감소가 더욱 뚜렷해지는 것으로 사료되며 이러한 결과는 Garudilliere 등^[8]의 실험연구의 결과와도 일치한다. C40강의 고속블랭킹에 관한 이 실험연구에서는 판재의 두께가 3 mm 이상인 경우 펀치속도의 증가로 인한 하중 감소의 효과가 더욱 뚜렷해지는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 생산성을 높이기 위한 고속블랭킹 공정에서 다양한 공정변수, 소성열의 발생과 펀치하중과의 관계를 탐구하고자 유한요소 시뮬레이션 연구를 수행하였다.

먼저 펀치의 속도가 30 mm/s에서 60 mm/s까지 증가할 때 펀치하중의 크기는 115.7 kN에서 112.6까지 감소하였는데 이는 높은 변형률 속도로 인한 소성열의 발생 및 그로 인한 연화현상 때문인 것으로 사료된다. 펀치의 속도가 30 mm/s에서 60 mm/s까지 증가할 때 최대 온도는 340.8 K에서 416.6 K로 감소하였다.

또한 블랭킹 공정의 여러 공정변수들과 소성열의 발생과의 관계를 알아보기 위해 공구 모서리 반지름을 증가시켜서 시뮬레이션을 수행한 결과 공구 모서리 반지름이 0.3 mm에서 0.6 mm까지 증가하면 최대 온도는 402.9 K에서 358.3 K로 감소하여 소성열이 감소하며 펀치하중은 113.2 kN에서 125.1 kN으로 증가함을 알 수 있었으며 공구 모서리 반지름의 감소가 펀치하중의 절감에 도움이 되는 것으로 나타났다.

마지막으로 판재의 두께를 증가시킨 결과 변형률속도의 증가로 인한 펀치하중 감소의 효과는 두꺼운 판재에서 더욱 두드러지는 것으로 나타났다. 결과적으로 이 논문에서는 고속블랭킹 공정의 소성열 발생 및 펀치하중의 증감이 펀치의 속도뿐만 아니라 블랭킹의 여러 공정변수들에 의해서도 좌우될 수 있는 것으로 나타난

것에 의미가 있다.

References

- [1] Song, S. H., Choi, W. C., 2016, Finite Element Analysis on Negative Clearance Blanking of AL6061-T6 Foil, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 25:4 290-294.
- [2] Bahn, G., S., Suh., E., K., 2004, A Study on the Characteristics for the Blanking of Lead Frame with the nickel alloy Alloy42, Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, 13:6 87-93.
- [3] Jana, S., Ong, N., 1989, Effect of Punch Clearance in the High-speed Blanking of Thick Metals using an Accelerator Designed for a Mechanical Press, Journal of Mechanical Working Technology, 19:1 55-72.
- [4] Gaudilliere, C., Ranc, N., 2010, Investigations in High Speed Blanking: Cutting Forces and Microscopic Observations, ASME J. Appl. Mech., 32:4 592-597.
- [5] Stegeman, Y. W., Goijaerts, A. M., 1999, An Experimental and Numerical Study of a Planar Blanking Process, Journal of Materials Processing Technology, 87:1 266-276.
- [6] Marouani, H., Ismail, A. B., 2009, Numerical Investigations on Sheet Metal Blanking with High Speed Deformation, Materials & Design, 30:9 3566-3571.
- [7] Hu, D.-C., Chen, M.-H., 2015, Finite Element Analysis of the Thermal Effect in High-Speed Blanking of Thick Sheet Metal, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 80:9-12 1481-1487.
- [8] Gaudilliere, C., Ranc, N., 2013, High Speed Blanking: An Experimental Method to Measure Induced Cutting Forces, Experimental Mechanics, 53:7 1117-1126.
- [9] Slavi, J., Bolka, S., 2014, A Novel Laboratory Blanking Apparatus for the Experimental Identification of Blanking Parameters, Journal of Materials Processing Technology, 214:2 507-513.
- [10] Johnson, G. R., Cook, W. H., 1983, A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures, Proc. of the 7th International Symposium on Ballistics, 541-547.
- [11] Iqbal, M. A., Senthil, K., 2015, The Characterization and Ballistic Evaluation of Mild Steel, International Journal of Impact Engineering, 78 98-113.
- [12] Seli, H., Awang, M., 2013, Evaluation of Properties and FEM Model of the Friction Welded Mild Steel-Al6061-Alumina, Materials Research, 16:2 453-467.