

음의 클리어런스를 갖는 AL6061-T6 포일 블랭킹의 유한요소해석

송신형^a, 최우천^{a*}

Finite Element Analysis on Negative Clearance Blanking of AL6061-T6 Foil

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	23	May	2016
Revised	30	June	2016
Accepted	20	July	2016

Keywords:

Finite element method
Blanking
Negative clearance
Aluminum

ABSTRACT

A finite element method (FEM) study was performed on micro-scale blanking of an AL6061-T6 foil with negative clearance. ABAQUS/explicit was used to prepare a simulation model of negative clearance blanking with tools having an edge radius comparable to the foil thickness. The Johnson-Cook plastic flow model was used in the simulations for the material flow. The FEM model was used to study the effects of various blanking parameters on the negative clearance blanking process and quality of the blank. In particular, the projecting edge on the bottom of the blank was observed. Research on negative blanking at the micro-scale is summarized and discussed.

1. 서론

블랭킹 공정은 다이에 놓인 판재를 펀치로 천공하여 다양한 기계 부품을 양산하는 공정이다. 블랭킹에 관한 연구에서 가장 중요한 것은 가공 시의 펀치하중을 절감하는 것과 가공 후의 제품의 단면을 매끄럽게 하는 것이다. 블랭킹 공정에서 펀치하중의 절감은 가공을 위한 투입에너지의 절감과 연결되는 문제로 여러 가지 공정 조건의 영향을 받는다. 블랭킹 가공 후의 단면품질에 관해서는, 두 가지 주요 결과물이 나타나는데 먼저 판재의 소성변형에 의하여 매끄러운 전단면이 생성되고 이후 판재의 파단으로 불균일한 파단면이 생성된다. 그러므로 블랭킹 공정의 제품의 품질에 관한 연구에서는 여러 공정조건을 최적화하여 전단면을 증가시키고 파단면을 최소화하는 것이 핵심이다. 블랭킹의 펀치하중과 제품의 품질에 영향을 미치는 공정의 요소는 여러 가지가 존재하는데 가장 중요한 요소들 중 두 가지는 펀치와 다이 사이의 간극인 클리어런스와 공

구(펀치, 다이)의 모서리의 형상이다.

클리어런스는 블랭킹 공정의 지배적 재료변형이라 할 수 있는 판재에서의 전단변형의 영역크기를 결정하는 중요한 변수로서 블랭킹 가공 시 펀치하중의 증감 및 공정 결과물의 품질 등에 직접적인 영향을 끼친다. 또한 클리어런스는 전단면의 품질 이외에도 버(burr)의 생성과도 관련이 있다¹⁾. 또 클리어런스는 공구의 마모 및 수명과도 관련이 있으며 적절하지 못한 클리어런스 값이 공구 마멸의 가장 큰 원인이라는 연구결과도 보고되었다²⁾. 블랭킹 가공의 클리어런스는 그 적정 값이 가공물의 재료마다 그리고 공정변수마다 다른데 이러한 적정 클리어런스 값을 결정하기 위한 연구가 블랭킹 연구에서는 매우 큰 부분을 차지한다. 공구의 모서리의 형상 또한 블랭킹에 영향을 미치는 중요한 변수이다. 펀치나 다이 같은 블랭킹 공구의 모서리는 보통 정확한 직각형상을 이루지는 않는데 이는 공구의 마모가 진행되었거나 처음부터 공구에 인위적으로 곡률형상 등을 부여했기 때문이며 이렇게 생

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

Fax: +82-2-926-9290

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

성된 공구모서리의 특정 형상 또는 둥근 모서리의 반지름의 크기는 블랭킹에 긍정적 또는 부정적 영향을 야기한다는 결과들이 보고되었다.

예를 들어 공구의 모서리의 곡선형상이 마모에 미치는 영향에 관한 연구에서는^[3] circular, high elliptical, flat elliptical 등 세 가지의 모서리 형상을 가진 펀치의 블랭킹 공정에서의 적용에 관한 연구를 유한요소해석으로 진행하였으며 공구모서리에서의 원형과 high elliptical 형상의 조합이 공구마모를 최소화 시킬 수 있다는 결과를 얻었다. 또한 초고장력강의 냉간 블랭킹에서 공구반지름의 영향을 실험한 연구도 있었는데^[4] 이 연구에서는 극소량의 클리어런스(clearance)를 가진 공정조건 하에서 공구의 모서리에 작은 반지름의 둥근 형상을 부여하는 방법으로 초고장력강의 파단을 지연시켜 전단면을 늘릴 수 있다는 결론을 얻었다. 또한 모따기 형상을 가진 공구 모서리에 관한 연구도 보고되었는데^[5] 이 연구에서는 모서리의 둥근 형상과 모따기 된 형상이 블랭킹에 미치는 영향을 시뮬레이션연구와 실험연구 한 후 모따기 된 형상이 블랭킹 가공 후의 제품의 품질에 더 나은 결과를 가져온다는 결론을 얻었다.

본 연구의 주제는 얇은 금속 포일의 블랭킹 가공 시 클리어런스가 양이 아닌 음의 값을 가질 때 클리어런스 값과 둥근 공구모서리의 반지름의 변화가 블랭킹의 결과에 미치는 영향을 시뮬레이션하는 것이다. 블랭킹 가공에서 클리어런스는 전통적으로 양의 값을 가지는데 이와 관련하여 최근 몇 년 전에 등장한 새로운 시도는 클리어런스를 음의 값으로 하여 블랭킹을 행하는 것이다. 본래 양의 클리어런스를 가진 블랭킹은 판재의 전단변형을 이용하여 제품을 절단하는 방식인데 이 중 취성이 강한 재료의 블랭킹 같은 경우 전단변형이 원활하지 못하여 파단면의 길이를 줄이기 어렵다는 것이 제품의 품질특징상의 문제점으로 인식되어 왔다. 음의 클리어런스를 사용하는 이 새로운 시도는 특히 취성이 상대적으로 강하여 전단면을 증가시키기 어려운 재료를 블랭킹 하는데 있어서 좋은 결과를 얻을 수 있는 것으로 보고되었다^[6-8].

예를 들어, AISI-1045강을 음의 클리어런스로 블랭킹 한 연구에서는^[6] 음의 클리어런스가 블랭크의 치수정확도와 단면품질을 상당히 향상시킨다는 것이 보고되었다. 또한 연성이 강한 A1050-O 알루미늄 합금과 상대적으로 취성이 강한 A5052-H34 알루미늄 합금의 블랭킹에 관한 연구에서는^[7] 취성이 있는 알루미늄 합금을 블랭킹 할 때 음의 클리어런스를 사용하여 파단면이 생성되지 않고 롤오버가 줄어든 결과를 얻을 수 있다는 것이 보고되었다.

Fig. 1은 (a)기존 방식의 양의 클리어런스를 사용한 블랭킹과 (b) 음의 클리어런스를 사용한 블랭킹의 비교를 나타낸다. 양의 클리어런스를 가진 블랭킹은 전형적인 전단변형에 의한 블랭킹으로서 전

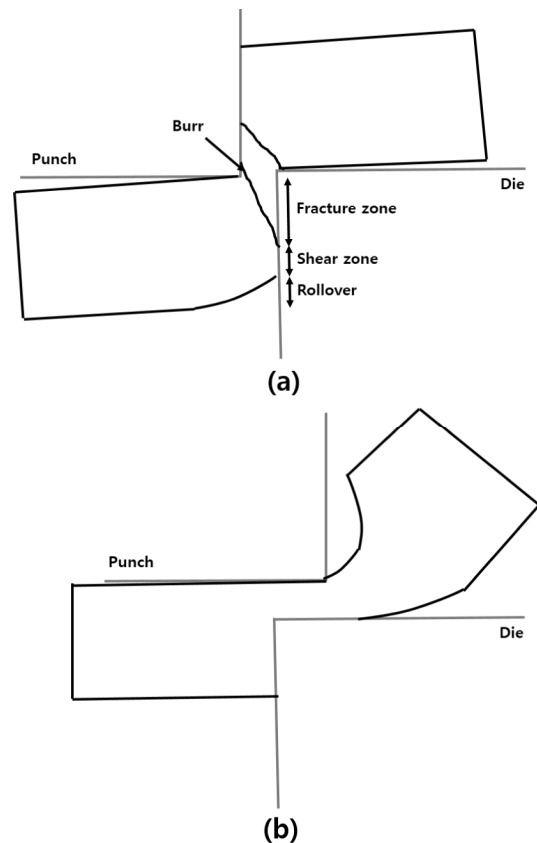


Fig. 1 Blanking with (a) positive clearance and (b) negative clearance

단과정 후에는 롤오버, 전단면, 파단면 그리고 버(burr)에 이르는 형상이 차례대로 생성되는 것이 일반적이다. 음의 클리어런스를 사용한 블랭킹은 이와 다른데 이 공정의 핵심은 판재의 변형부에 압축응력을 증가시켜 정수압(hydrostatic pressure)의 상승으로 인한 가공재료의 연성증대 효과를 일으킨다는 데 있다. 또 공정의 기하학적 특성상 재료를 파단시키는 과정이 없이 공정 내내 전단면을 생성시키는 것이 가능하다는 것도 중요한 점이다.

본 연구에서는 이 음의 클리어런스 블랭킹을 얇은 알루미늄 포일에 적용한 연구를 수행하였다. 최근 전기, 전자부품의 소형화로 마이크로 단위 크기의 정밀부품에 대한 수요가 늘고 있는데 본 연구에서는 이러한 음의 클리어런스 블랭킹 가공의 초소형 부품제작에의 응용에 대한 연구를 시도하였다. 이 연구의 마이크로 스케일의 음의 클리어런스 블랭킹은 둥근 공구모서리의 반지름이 포일의 두께에 비견될 만큼 그 상대적 크기가 크다는 것이 여타 블랭킹 공정과의 차이점이며 본 연구의 핵심이다.

이러한 작은 스케일의 블랭킹에 관해서는 실험연구가 상대적으로 용이하지만은 않은 관계로 이 연구에 효과적이라고 사료되는 유한요소 시뮬레이션의 방법을 사용하여 그 결과를 예측하고자 하였으며 이러한 시뮬레이션 연구의 결과가 향후 실제 실험연구를 위한 실험의 설계에 도움이 되고자 하였다

2. 시뮬레이션

2.1 유한요소 모델

Fig. 2는 블랭킹의 유한요소해석 모델을 나타낸 것이다. 펀치와 다이의 둥근 모서리의 반지름은 같으며 그 크기는 마이크로 스케일로 작으며 포일의 두께와 비슷하다. 클리어런스는 음의 값을 가지고 있으며 전체적인 유한요소해석 모델은 축대칭 모델로 완성되었다. Fig. 2에는 유한요소 모델의 경계조건도 나와 있는데 다이는 x, y 방향으로 고정되었으며 포일의 왼쪽 면은 x축 방향으로 그리고 오른쪽 면은 y축 방향으로 고정되었다. 펀치와 다이는 강체로 모델링 되었으며 포일의 재료는 알루미늄 6061-T6 합금으로 설정되었다. 6061-T6 재료의 소성 유동식은 많은 금속재료의 변형률속도와 온도 의존성 소성유동을 효과적으로 나타낸다고 알려진 Johnson-Cook 모델^[9]을 사용하였다.

Johnson-Cook 모델에서 재료의 유효응력은 아래와 같이 표시된다.

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

여기서, $\dot{\epsilon}^*$ normalized strain rate

ϵ equivalent strain rate

$\dot{\epsilon}_0$ reference strain rate

T^* normalized temperature

이다. 위 식에서 A, B, n, C 는 구성식의 상수이고 normalized strain rate, equivalent strain rate 그리고 reference strain rate의 관계를 표시하면 다음과 같다.

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

소성 유동식의 normalized temperature는 아래와 같이 instan-

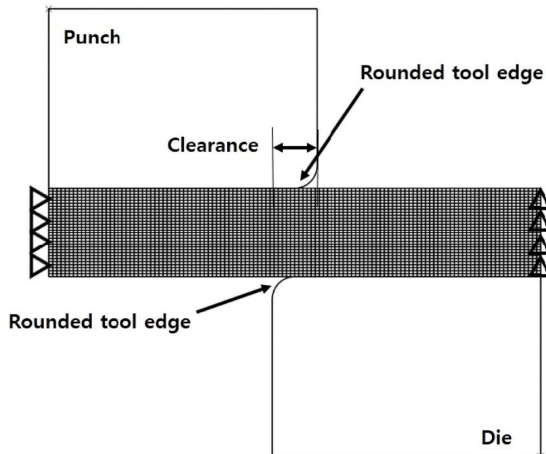


Fig. 2 Simulation model

taneous temperature, transient temperature 그리고 melting temperature를 사용하여 얻을 수 있다.

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

본 연구에서는 마이크로 블랭킹 가공 시의 온도 발생 및 그로 인한 영향이 미미하다고 사료되어 시뮬레이션 중 온도의 효과는 무시되었으며 유동식의 온도 항은 사용되지 않았다. 알루미늄 6061을 위한 Johnson-Cook 재료상수는 Dabboussi 등^[10]의 연구에서 참조하였다.

블랭킹 공정 중의 재료 변형은 유한요소 격자의 극심한 뒤틀림을 야기하는데 이러한 문제를 해결하기 위해 ABAQUS의 ALE adaptive mesh 기법을 사용하였다. 이 기법은 재료의 변형과정을 시뮬레이션 하는 도중 매 단계마다 끊임없이 새로운 격자망을 생성하여 초기 격자망의 일부 격자가 뒤틀리고 시뮬레이션이 멈추는 문제를 방지할 수 있다.

본 연구에서는 블랭킹 공정으로 알루미늄 합금재료의 소형 전자 부품 등을 제조하는 상황을 가정하여 포일의 두께를 400 μm 로 설정하였으며 펀치와 다이가 모두 모서리에 약간의 둥근 형상을 가지고 있으며 100 μm 의 반지름을 가진다고 가정하였다. 또한 펀치의 속도는 부품의 생산성을 높인 블랭킹을 가정하여 40 mm/s의 비교적 빠른 속도로 설정하였으며 연구 중 변화하는 클리어런스의 최초 값은 200 μm 로 설정하였다. 이후, 클리어런스, 공구반지름 그리고 포일의 두께를 변화시켜서 추가로 블랭킹 공정을 시뮬레이션을 수행하고 이들 변수의 영향을 관찰하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 블랭킹

Fig. 3은 블랭킹 공정 중의 알루미늄 합금 포일의 변형과 von Mises 응력의 분포를 나타낸 것이다. 음의 클리어런스 블랭킹에서는 기존의 블랭킹 공정과는 달리 주요 변형영역이 우측상단에서 좌측하단으로 이어지며 형성되는 것이 특징인데 주 변형영역에서는 약 450 MPa 정도의 응력을 받고 있는 반면 펀치의 아랫부분에서는 상대적으로 작은 약 166 MPa 정도의 응력만을 받고 있다.

3.2 돌출부 생성

Fig. 4는 음의 클리어런스를 가진 블랭킹 후에 블랭크의 하단에 돌출부(projecting edge)가 생성된 것을 나타낸다. 이러한 돌출부는 전통적 방식의 양의 클리어런스 블랭킹에서는 볼 수 없던 것이며 기존의 블랭킹에서 roll-over라고 하는, 블랭크의 밑면이 위로 올라가는 현상과는 반대되는 현상이다. 이러한 돌출부가 생성되는

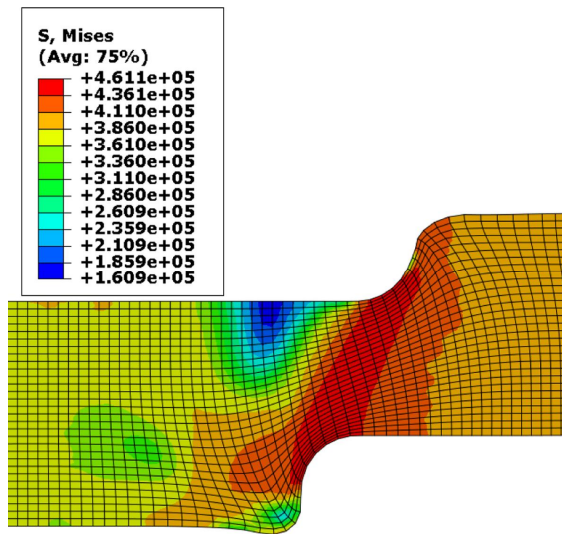


Fig. 3 von Mises stress (kPa)

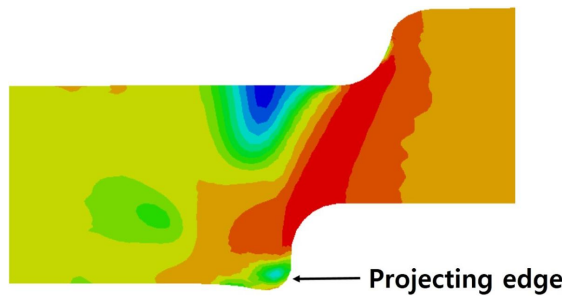


Fig. 4 Projecting edge made after negative clearance blanking

원인은 Fig. 5에 나와 있는 것처럼 블랭킹 공정 중 가공재료가 등근 공구모서리의 양쪽으로 흘러가는 유동을 보이기 때문인 것으로 사료되며 가공물이 포일로 매우 얇아 이러한 돌출부의 크기가 포일의 두께에 비교하여 무시하지 못할 만큼 크므로 블랭크의 품질획득이 방해받을 수 있음을 알 수 있다.

정수압을 증가시키기 위한 특수한 블랭킹에서 제품에 돌출부가 생성되는 것은 양의 클리어런스를 사용한 특수한 형태의 블랭킹에서도 언급된 바가 있다. Cao 등^[11]은 플랜지 성형에서 제품에 정수압을 부여하는 방법으로 재료의 파단을 지연시키기 위해 블랭킹 작용을 하는 상부펀치와 압출 작용을 하는 하부펀치를 동시에 사용하는 공정에 대한 실험연구와 유한요소해석을 수행하였다. 이 연구에서 Cao 등은 하부펀치의 작용으로 재료에 정수압을 부여하는 과정에서 과도한 양의 압력을 가하면 재료의 유동으로 인해 제품에 돌출부가 생성된다는 것을 유한요소해석으로 예측하였다.

본 연구에서는 이러한 돌출부의 생성이 블랭킹의 클리어런스 값과 공구끝 반지름의 두 가지 변수와 관계가 있는지 알아보기 위하여 다른 조건은 일정하게 한 채 클리어런스가 100 μm , 200 μm 그리고 공구 끝 반지름이 40 μm , 60 μm , 100 μm , 200 μm 그리고

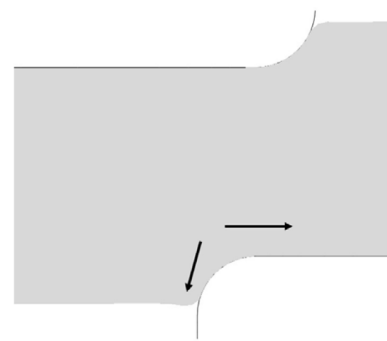


Fig. 5 Material flow around the tool

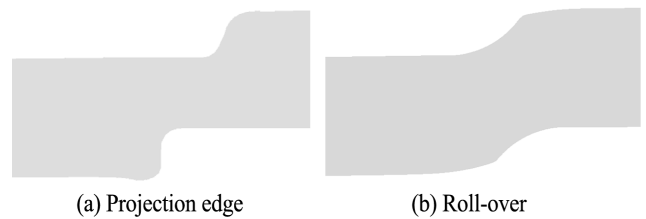


Fig. 6 Blanking with tool edge radius of (a) 60 μm and (b) 300 μm

300 μm 인 경우를 시뮬레이션 하여 관찰하였다.

Fig. 6은 클리어런스가 200 μm 일 때, 공구 끝 반지름이 (a) 60 μm 그리고 (b) 300 μm 일 때의 포일의 변형을 나타낸 것이다. 공구 끝 반지름이 60 μm 일 때는 돌출부가 생성된 반면 300 μm 일 때는 기존 방식의 블랭킹에서 볼 수 있는 roll-over 현상이 나타남을 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과 클리어런스가 200 μm 이며 공구 끝 반지름이 40 μm , 60 μm , 100 μm 그리고 200 μm 일 때는 돌출부가 생성되었으며, 공구 끝 반지름이 300 μm 일 때, 즉 공구 끝 반지름이 클리어런스보다 클 때는 roll-over가 생성되었다. 클리어런스가 100 μm 일 때의 결과도 이와 마찬가지로 공구 끝 반지름이 40 μm , 60 μm , 100 μm 일 때는 돌출부가 생성되었으며, 200 μm 일 때부터 roll-over가 생성되기 시작하였다. 이에 따라 포일의 두께가 공구반지름의 크기와 비견되는 작은 스케일의 음의 클리어런스 블랭킹에서는 공구 끝 반지름이 클리어런스 값보다 작으면 블랭크의 밑면에 돌출부가 생성되며 클리어런스보다 커지면 블랭크의 밑면에 roll-over가 생성된다고 사료되며 실제 블랭킹 가공 시에 이를 주의할 것을 제안할 수 있다.

3.3 포일 두께의 영향

본 연구에서는 음의 클리어런스 블랭킹에서 공구 끝 반지름이 클리어런스보다 크지 않은 경우 즉 블랭크에 돌출부가 생성되는 경우에 포일의 두께가 공정에 미치는 영향을 알아보기 위하여 클리어런스가 200 μm 이고 공구 끝 반지름이 200 μm 일 때 포일의 두께를 400 μm , 600 μm 그리고 800 μm 로 하여 시뮬레이션을 수행하였다.

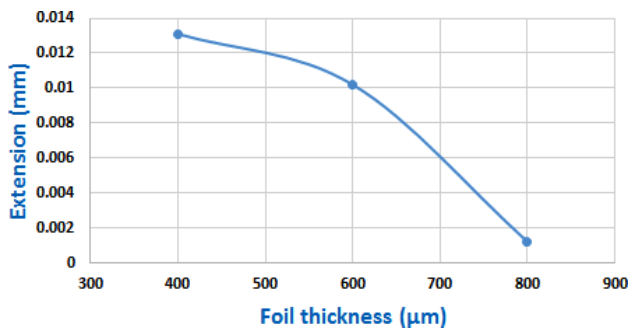


Fig. 7 Extension of projecting edge

Fig. 7은 포일의 두께가 각각 400 μm, 600 μm 그리고 800 μm 일 때 블랭크 아래가 돌출한 길이를 계산하여 표시한 것이다. 포일의 두께가 증가함에 따라 돌출부의 길이가 줄어들을 알 수가 있는데 작은 스케일의 음의 클리어런스 블랭킹에서는 포일의 두께가 공구 끝 반지름에 가깝게 줄어들수록 돌출부의 발생이 더욱 부각된다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 소형 부품 등의 제조를 위한 마이크로 블랭킹을 클리어런스를 음의 값으로 하여 수행했을 때의 특성을 알아보고자 유한요소해석 연구를 수행하였다. 금속재료의 두께가 둥근 공구 끝의 반지름과 비견될 수 있을 정도로 작은 것이 특징인 이 블랭킹 공정의 시뮬레이션 연구 결과, 공구 끝의 반지름이 클리어런스보다 작거나 같은 수준인 경우에는 블랭크 밑면에 돌출부가 생성되는 현상이 예측되었으며 클리어런스보다 공구 끝의 반지름이 큰 경우에는 기존의 블랭킹에서 볼 수 있는 블랭크 밑면의 roll-over 현상이 관측되었다. 또한 돌출부의 생성은 포일의 두께가 커질수록 희박해지는 것으로 나타났다. 실제 블랭킹의 수행 시 본 연구에서 시뮬레이션 연구로 예측된 여러 특성들에 대한 고려를 제안할 수 있다.

References

- [1] Soares, J. A., Gipiela, M. L., Lajarin, S. F., 2013, Study of the Punch-die Clearance Influence on the Sheared Edge Quality of Thick Sheets, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 65:1-4 451-457.
- [2] Lin, J. C., Lin, W. S., 2008, The Optimal Clearance Design of Micro-punching Die, *J. Achievements Mat. Manuf. Eng.*, 29 79-82.
- [3] Wang, X. Z., Masood, S. H., 2011, Investigation of Die Radius Arc Profile on Wear Behaviour in Sheet Metal Processing of Advanced High Strength Steels, *Mater. Design.*, 32:3 1118-1128.
- [4] Mori, K., Abe, Y., 2013, Slight Clearance Punching of Ultra-high Strength Steel Sheets using Punch Having Small Round Edge, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 65 41-46.
- [5] Yiemchaiyaphum, S., Jin, M., 2010, Die Design in Fine-piercing Process by Chamfering Cutting Edge, *Key. Eng. Mat.*, 443 219-224.
- [6] Du, H., Fan, W. F., 2010, Comparative Study of the Process Fracture between Fine-blanking with Negative Clearance and Conventional Blanking, *Advanced Materials Research*, 97:101 191-194.
- [7] Hirota, K., Yanaga, H., 2009, Experimental and Numerical Study on Blanking Process with Negative Clearance, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, 3:2 247-255.
- [8] Fan, W. F., Li, J. H., 2009, An Investigation on the Damage of Aisi-1045 and Aisi-1025 Steels in Fine-blanking with Negative Clearance, *Mater. Sci. Eng.*, 499:1 248-251.
- [9] Johnson, G. R., Cook, W. H., 1985, Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain rates, Temperatures and Pressures, *Eng. Fract. Mech.*, 21:1 31-48.
- [10] Dabboussi, W., Nemes, J., 2005, Modeling of Ductile Fracture using the Dynamic Punch Test, *Int. J. Mech Sci.*, 47:8 1282-1299.
- [11] Cao, C. H., Hua, L., 2009, Flange Forming with Combined Blanking and Extrusion Process on Sheet Metals By FEM and Experiments, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 45:3-4 234-244.