

박판 금속의 회전 전단가공에 관한 연구

서윤수*(부산대 대학원), 박재우(대우통신(주)), 김영호(부산대)

A Study on the Rotary Shearing Operation of Sheet Metal

Y. S. Seo(PNU), J. W. Park(DTL.), Y. H. Kim(Mech. Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

Rotary shearing using of rotating and locally shear force has been studied. It is possible to be obtained in any case for requested blank diameters. In this paper, different local forming zones, that are clearances between upper roller and vertically taped low roller, were investigated. Required shearing force is calculated by undecided coefficient method for clearances and strokes of upper roller. Rotary shearing is completed undergoing some processes composed of pressing steps and standing steps. The reason for using these processes is to avoid jamming or tearing of blank by means of upper roller during shearing.

Key Words : Sheet Metal (박판 금속), Blank (블랭크), Rotary Shearing (회전 전단), Clearance (틈새), Shearing Fracture (전단 파단), Rollover(로울 오우버), Burnish(버어니시), Penetration depth(투과 깊이)

1. 서론

전단가공은 박판 금속의 제조와 성형작업에서 가장 빈번하게 사용되는 공정 중에 하나이다. 일반적으로, 전단가공은 절단하는 방법이나 목적에 따라 다음과 같이 분류한다. 일정 치수정도를 가지고 절단하여 전단된 것을 이용하는 블랭킹(Blanking), 그것을 버리는 경우를 피어싱(Piercing)이라 하며, 판의 가장자리를 펀치로 찍어누른 자국을 노칭(Notching), 균형을 유지하면서 동시에 두 선을 자르는 작업을 파팅(Parting) 그리고 절단하여 버려지는 것이 없는 전단작업을 슬리팅(Slitting)이라 한다. 또한 가공이 끝난 후 잉여부분을 잘라내는 작업을 트리밍(Trimming)이라 하며, 이들 가공 대부분은 프레스 작업에 의해 이루어지므로 제품의 정도는 프레스 금속의 정밀도에 의해 결정되어진다.^[1]

전단가공에 관한 연구는 1900년대 초기에 시작해서 수년동안에 걸쳐 상당한 발전이 이루어졌다. Chang과 Swift^[2]는 산업체에서 널리 사용되는 몇몇 금속에 대해 틈새(Clearance)와 날끝(Tool Sharpness) 효과에 관한 상세한 실험정보를 나타내었다. Johnson과 Slater^[3]는 블랭킹에 있어서 펀치속도(Punch speed)와

온도 효과에 관한 함리적인 조사를 수행했다. Atkins^{[4][5]}은 크랙 시작에 대한 임계 펀치 이송 거리 조건을 제안했으며, guillotining 공정을 해석하기 위해 강·소성 파단 메커니즘을 사용했다. Jouri와 Junes^[6]는 실험에 의해 알루미늄 합금과 연강으로 노치된 이중 전단시편을 사용해서 크랙 시작과 변형에 관한 충격 에너지를 조사했다. Li^{[7][8]}는 알루미늄의 수직 트리밍에서 자른 표면의 품질과 burr 형성에 관한 실험적 조사와 전단에서 국부 영역의 변형과 파단에 관한 메커니즘을 연구했다. Chen 등은^[9] 파인 블랭킹의 특징을 수치적으로 정확히 시뮬레이션하기 위해 FEM을 사용하여 국부 변형영역에서 응력과 변형률을 계산했다. Faura 등은^[10] 상용 FEM 코드를 이용하여 블랭킹 공정을 시뮬레이션 함으로써 주어진 재료에 대해 최적의 펀치와 다이 틈새를 얻는 방법에 대해 연구했다. 회전 소성가공의 전문가인 Hayama^[11]는 상부 로울러의 회전에 의해 박판 금속에 국부적으로 전단력을 가하여 절단작업을 하는 회전 전단가공의 회전속도, 제품의 표면 상태, 회전 타발기의 가공력을 계산하는 연구를 수행하였다. 상기 연구들은 전단가공 동안 소재가 모두 금형이나 다이에 정적인 상태로 고정되어 작업을 수행하게 된다.

만약 프레스에서 작업할 수 없는 반 무한 직경의 원형 블랭크를 생산해야할 경우 기존 전단가공의 변형 메카니즘과 회전 전단가공의 장점을 이용한다면 가능한 일이다. 즉 반 무한 평판을 일정 압력으로 누른 상태에서 국부적으로 전단할 수 있는 특정 각도로 칼날을 형성하고 있는 상·하부 로울러를 가압시켜서 얻을 수 있다.

그리하여 본 연구에서는 이전의 전단가공에 관한 많은 연구들을 참고하여 회전을 이용하여 국부적으로 전단력을 작용시켜 원하는 직경의 블랭크를 얻을 수 있는 회전 전단가공에 대해 연구할 것이며, 상·하부 전단 날로 사용되는 로울러의 틈새에 따른 국부 변형영역의 영구소성 변형에서 파단에 이르는 현상을 조사하고 진행과정 동안 요구되는 전단력을 계산하고자 한다.

2. 이론 해석

2.1 회전 전단 공정

회전 전단가공의 공정도를 Fig. 1에 나타내었다. 상부 로울러와 수직방향에서 약간 테이퍼진 하부 로울러 사이에 재료를 회전시키면서 가압하면, 재료는 우선 소성 변형하고 이어 전단과정을 거쳐 결국 파단되어 블랭크로서 절단 분리된다.

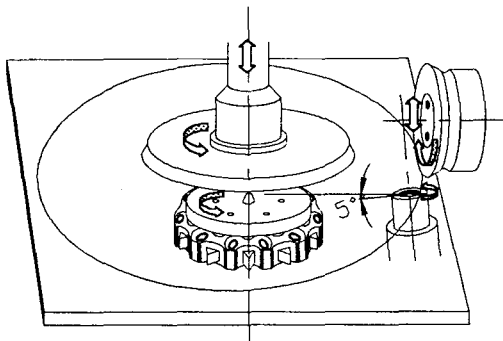
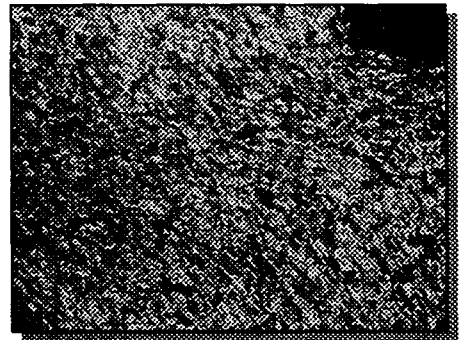
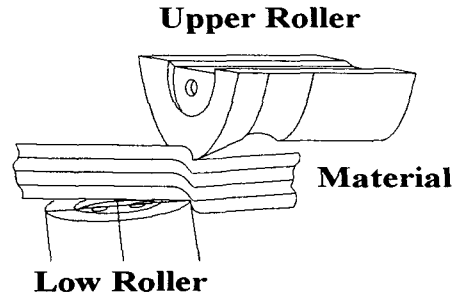


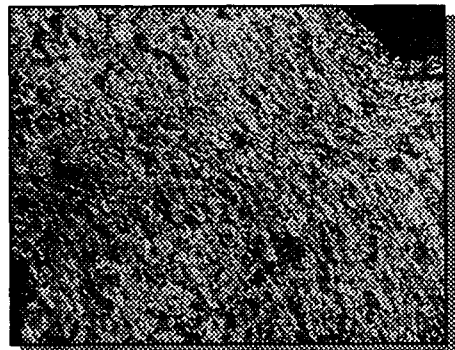
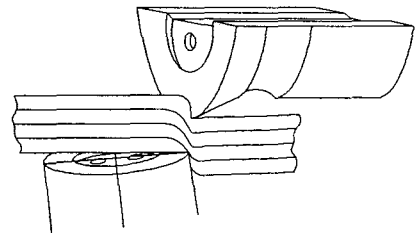
Fig. 1 Rotary shearing process of sheet metal.

전단작용으로 소성변형, 전단변형 그리고 파단되는 3단계의 재료 반응을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2의 (a)에서 상부 로울러가 회전하는 재료표면에 수직으로 압축력을 가하면, 응력이 날 끝부분에 집중적으로 커져서 재료의 표면은 인장응력을 받게 된다. 이 응력은 가공이 진행됨에 따라 재료의 탄성한도를 넘어서면서 소성변형을 일으키게 된다. 이때 날끝부분의 표면이 밀려서 성형되는데 이면을 전단루프 (shearloop)라 한다. 상부 로울러의 가공을 더욱 진행시키면 커팅되는 에지부근의 압축 집중응력이 항복한계를 넘어 재료가 전단되기 시작한다.(Fig.2 (b)) 이

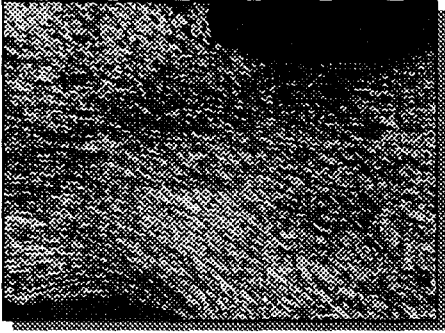
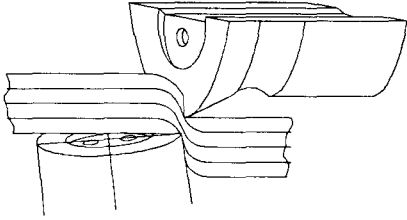
경우 커팅되는 에지의 끝에는 반경방향과 수직방향으로 집중하중이 작용하여 상부 로울러와 수직으로 약간 테이퍼진 하부 로울러의 측면에서 재료의 절단면에 대해 횡압력을 작용시켜 전단면을 버어니싱 (burnishing)하게 된다. 이 전단과정 마지막에 횡압력과 집중압축력이 최대가 되면 재료의 파괴강도에 이르러 크랙이 생기기 시작한다.(Fig.2 (c))



(a) plastic deformation($\times 50$)



(b) shear deformation($\times 50$)



(c) fracture($\times 50$)

Fig. 2 Critical stages of shearing action of sheet metal.

2.2 전단가공에 요구되는 전단력

회전 전단가공을 하는 경우 실제 어느 정도의 전단력으로 가능한가를 아는 것은 공구 설계에 있어서 매우 중요하다. 회전 전단가공에 대해 변형모델을 가정하여 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7은 임의의 스트로크 s 로 회전 전단 중인 전단면을 표시한 것이다. 그림에서 상부 로울러와 판의 접촉영역 OAB에서 1회전당 스트로크 s 를 갖는 상부 로울러에 의해 ABB' 가 새로운 전단면이 된다.

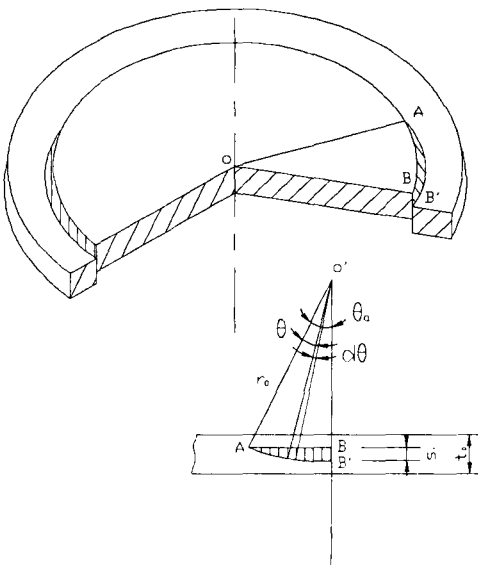


Fig. 3 Schematic of Rotary shear working process.

$$\text{Shearing force} = \text{Shear Strength} \times \text{Perimeter of Cut} \times \text{Sheet metal thickness} \quad (1)$$

일반적으로 전단강도는 극한 인장강도의 50~80% 사이이다. 알루미늄과 알루미늄합금은 보통 50~70% 이다. 저탄소강은 보통 인장강도의 70~80% 이다. 일반적인 박판금속에 대한 전단강도가 Table 1에 나타나 있다.

Table 1 Shear strengths for common sheet metals^[12]

Material	Shear Strength (psi)
Lead	3,500
Tin	5,000
Aluminum	8,000
Zinc	14,000
Copper	22,000
Brass	33,000
Bronze	36,000
Steel, 10C	35,000 annealed
	43,000 cold rolled
Steel, 20C	44,000 annealed
	55,000 cold rolled
Steel, 30C	52,000 annealed
	67,000 cold rolled
Stainless	57,000
Silicon steel	65,000
Nickel	35,000

그러므로,

$$dF = \alpha k r_0 d\theta t_0, \quad 0 \leq \theta \leq \theta_a \quad (2)$$

여기서, α 는 재료에 따라 결정되는 미정계수이고, k 는 전단변형 저항이다.

1회전당 상부 로울러의 압하량 s/t_0 가 적은 경우 요구되는 전단력이 적지만, 압하량의 증가는 가공력의 증가를 가져 온다. 또한 상부 로울러와 하부 로울러 사이의 틈새 c 의 변화에 따라 가공력에 다소 차이가 나타날 수 있으므로,

$$dF = k \left(A \frac{s_i}{t_0} + B \frac{c}{t_0} + D \right) r_0 d\theta t_0 \quad (3)$$

이다. 여기서 A, B, C는 주어진 박판 재료의 압하량과 전단 틈새에 의해 결정되는 미정계수이다.

$$\begin{aligned} F &= \int_0^{\theta_a} k \left(A \frac{s_i}{t_0} + B \frac{c}{t_0} + D \right) r_0 t_0 d\theta \\ &= k \left(A \frac{s_i}{t_0} + B \frac{c}{t_0} + D \right) r_0 t_0 \theta_a \quad (4) \end{aligned}$$

3. 실험 및 데이터 측정

실험장치는 Fig.1의 원리를 이용하여 Fig. 4와 같이 제작하였다. 프레스 액추에이터에 의해 일정 압력(40kg/cm²)으로 소재를 고정시키고 하부에서 구동 모터에 의해 전달된 힘으로 구동 체인을 통해 회전운동을 하게 된다.

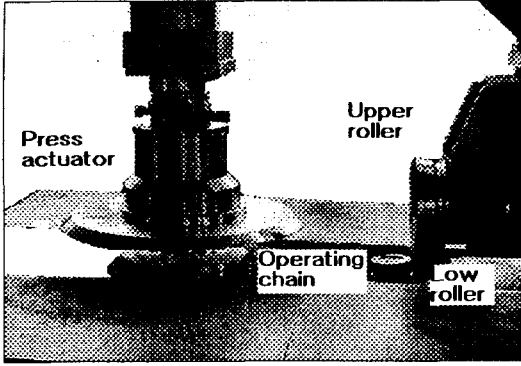


Fig. 4 Experimental set-up of rotary shearing operation

그러면 미리 설정된 상부 로울러와 수직방향으로 약간 테이퍼진 하부 로울러 사이의 틈새(clearance)에 소재를 회전시키면서 가압하여 전단작업을 하게 된다. 일반적으로 피어싱(piercing)이나 블랭킹(blanking)에서는 전단을 위한 펀치의 이송거리(stroke)가 짧기 때문에 이송거리에 따른 펀치의 하중 그래프는 하나의 충격곡선을 그리는 반면 회전 전단에서는 짧은 이송으로 원주길이에 해당하는 전단길이를 형성하면서 여러번 작업을 진행하게 된다. 따라서 한번 가공으로 얻어지는 하중 그래프는 여러번의 충격하중이 나타내게 된다.

이송거리에 따른 하중을 얻기 위해 슬라이딩 레일(sliding rail) 위의 상부 로울러의 측면에 변위 센서(LVDT)를 설치하고, 상부 로울러를 가압하기 위해 유압 실린더로 유입되는 압력을 측정하기 위해 압력 센서를 설치하였다. 얻어진 압력에 실린더의 단면적을 곱하면 요구되는 하중을 얻게 된다.

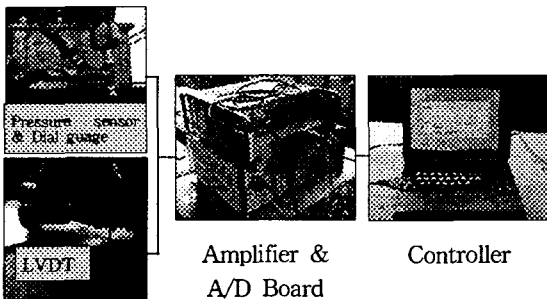
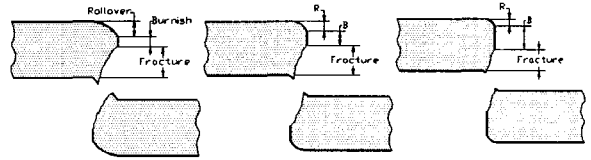


Fig. 5 Acquisition system of measuring data.

변위 센서와 압력 센서로부터 측정된 데이터는 증폭기(amplifier)를 통한 다음 컨트롤러에서 제어되는 A/D 변환을 거쳐 원하는 형태의 데이터로 처리된다. 그에 해당하는 일련의 과정을 Fig. 5에 나타내었다.

4. 결과 및 검토

회전 전단가공은 Fig.6에 나타낸 것처럼 절단되기 전에 소재가 곡면으로 변형을 일으키는 로울 오우버(rollover)와 전단 표면을 만드는 버어니시(burnish) 그리고 상부 로울러에 의해 절단되지 않은 금속이 파단(fracture)되든지, 떨어져 나감으로써 전체 행정을 완성한다.



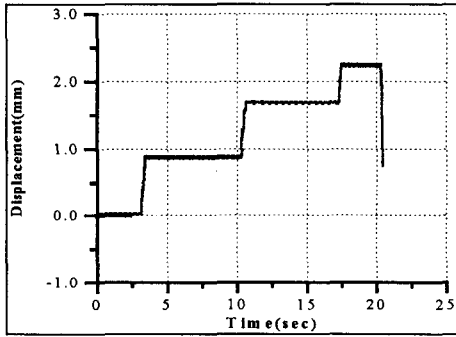
(a) clearance, 17.5%t (b) clearance, 12.5%t (c) clearance, 7.5%t

Fig. 6 Effects of clearance between upper roller and low roller.

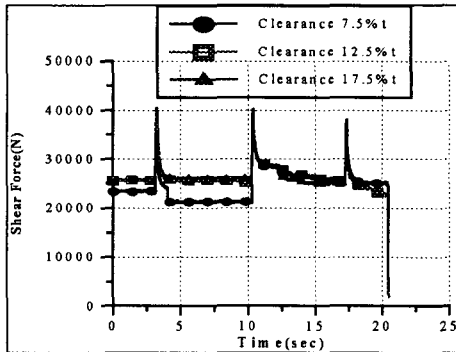
로울 오우버와 버어니시가 합쳐진 깊이를 행정에 대한 투과 깊이(penetration depth)라 하는데, 회전 전단가공에서는 일반 피어싱이나 블랭킹에서와 달리 전단되는 길이가 소재의 원주길이에 해당하므로 상부 로울러를 점진적으로 진행시켜 전체 행정을 마치는 것이 아니라 일정 구간을 나누어서 조금씩 진행시켜서 머무르고, 다시 조금 진행시키는 과정을 몇 번 겪으면서 전체 행정을 완성한다. 그렇지만 투과 깊이는 소재가 파단되든지, 떨어져나가기 전까지 전단력이 발휘되는 동안 상부 로울러의 수직 행정 부분이 된다. 투과깊이의 양은 일반적으로 전체 행정 두께의 몇 %로 표현되는데, 상부와 하부 로울러 사이의 틈새, 소비되는 에너지 그리고 전단력에 영향을 받는다.

상부와 하부 로울러 사이의 틈새는 장비의 작업 효율성과 로울러의 수명에 영향을 미친다. 최적의 틈새는 요구되는 날끝 조건과 로울러 수명이 전체 비용에 미치는 영향에 따라 다르고, 장치에 따라 다르기 때문에 실제 마주치는 모든 상황에 대해 정확하게 최적의 틈새를 규정할 수 있는 표나 수식을 나타내는 것은 불가능하다. 다만 일반적인 기준선(guideline)을 가지고 몇가지 틈새를 시도해서 응용 목적에 맞는 틈새를 설정하는 것이 필요하다. Fig.6에 나타낸 것은 Rockwell B 47~48인 저탄소강에 대

해 세 가지 틈새 조건을 시도했을 때 전단면 형태를 나타낸 것이다. 틈새가 17.5%인 (a) 단면에서는 큰 로울 오우버 반경과 벤딩(bending)이나 성형이 부가된 큰 수직인장 버(burr)를 형성한다. 버어니시 깊이는 가장 작고 파단 깊이는 파단된 표면에 대해 큰 각을 가지면서 깊다. 이러한 단면은 제품의 품질이나 평탄도가 중요하지 않은 응용에서나 쓰일 수 있다. 틈새가 12.5%인 (b)에서는 적당한 로울 오우버 반경, 수직인장 버 그리고 어느 정도의 파단각을 갖는다. 최대 로울러 수명과 큰 버어니시 깊이가 요구되지 않는 일반적인 가공에서 쓰일 수 있다. 틈새가 7.5%인 (c)에서는 작은 로울 오우버 반경, 작은 수직인장 버 그리고 작은 파단각을 갖는다. 이러한 경우는 적은 잔류응력을 가지므로 심한 성형을 겪으면서 가공경화 될 수 있는 재질에 사용하는 것이 바람직하다.



(a) displacement vs time



(b) shear force vs time

Fig. 7 Effects of clearance on the characteristic force curve.

Fig.7은 시간에 따른 상부 로울러의 수직 이송거리 그리고 상부 하부 로울러의 틈새에 따른 전단력 변화를 도시한 것이다. 회전 전단가공 작업은 일반 피어싱이나 블랭킹에서와 달리 전단되는 길이가 소

재의 원주길이에 해당되므로 상부 로울러를 점진적으로 진행시켜 전체 행정을 마치는 것이 아니라 일정 구간을 나누어서 조금씩 진행시켜서 머무르고, 다시 조금 진행시키는 과정을 몇 번 겪으면서 전체 행정을 완성시켜야 소재가 찢어진다는지, 상부 로울러가 소재에 파묻히는 현상을 피할 수 있다. Fig7의 (a)에서는 소재 두께 2t에 대해 0.85mm, 0.8mm 그리고 0.55mm씩 진행시킨 결과를 나타낸 것이다.

일반적으로 피어싱(piercing)이나 블랭킹(blanking)에서는 전단을 위한 펀치의 이송거리(stroke)가 짧기 때문에 이송거리에 따른 펀치의 하중 그래프는 하나의 충격곡선을 그리는 반면 Fig. 7의 (b)에서 회전 전단의 경우 짧은 이송으로 원주길이에 해당하는 전단 길이를 여러번 작업으로 진행하게 된다. 따라서 상부 로울러를 다시 작용시킬 때마다 전단력이 새롭게 얻어지는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

프레스 작업으로 불가능한 반 무한 평판의 블랭크를 얻기 위해 회전을 이용하여 국부적으로 전단력을 작용시켜 원하는 직경의 블랭크를 얻을 수 있는 회전 전단가공을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 소재를 일정 압력으로 눌러서 회전시킨다는 것과 국부적으로 전단할 수 있는 상부 로울러와 수직방향에서 약간 테이퍼진 하부 로울러를 가압하여 전단 작업을 한다는 기본적인 개념을 사용해서 회전 전단가공 장비를 구성하였다.
- 2) 회전 전단가공이 진행되는 동안 국부 전단 영역에서의 소성변형과 전단 그리고 파단에 이르는 일련의 과정을 조사하고, 그에 따른 국부 전단면의 입자 (grain) 변형을 현미경 사진으로 관찰하였다.
- 3) 상부 로울러의 압하량과 전단틈새에 따른 미정계수가 포함된 박판재료의 전단력 식을 유도하였다.
- 4) 주어진 작업에 알맞은 틈새는 일반적인 기준선을 가지고 몇가지 틈새를 시도해서 응용 목적에 맞는 틈새를 설정하는 것이 필요하다.
- 5) 회전 전단가공 작업은 상부 로울러를 점진적으로 진행시켜 전체 행정을 마치는 것이 아니라 일정 구간을 나누어서 조금씩 진행시켜서 머무르고, 다시 조금 진행시키는 과정을 몇 번 겪으면서 전체 행정을 완성시켜야 소재가 찢어진다는지, 상부 로울러가 소재에 파묻히는 현상을 피할 수 있다.

참고문헌

1. Metal Handbook, Vol. 4 Forming, ASM 1970.
2. Chang T.M. and Swift H.W., "Shearing of Metal Bars," Journal of the Institute of Metals 1950.
3. Johnson W. and Slater R. C., "Survey of Slow and Fast Blanking of Metals at Ambient and High Temperatures," Proceedings of the International Conference of Manufacturing Technology CIRP-ASTME, pp. 825, 1967.
4. Atkins A.G., "On Cropping and Related Process," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 22, pp. 215, 1980.
5. Atkins A.G., "On the Mechanics of Guillotining Ductile Metals," Journal of Materials and Processing Technology, Vol. 24, pp. 245, 1990.
6. Jouri W. S. and Jones N., "The Impact Behavior of Aluminum Alloy and Mild Steel Double-Shear Specimens," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 30, pp. 153, 1988.
7. Li M., "An Experimental Investigation on Cut Surface and Burr in Trimming Aluminum Autobody Sheet," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 42, pp. 889, 2000.
8. Li M., " Micromechanism of Deformation and Fracture in Shearing Aluminum Alloy Sheet," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 42, pp. 907, 2000.
9. Chen Z.H., Tang C.Y., Lee T.C. and Chan L.C., "A Study of Strain Localization in the Fine-Blanking Process Using the Large Deformation Finite Element Method," Journal of Materials and Processing Technology, Vol. 86, pp. 163, 1999
10. Faura F., Garcia A. and Estrems M., "Finite Element Analysis of Optimum Clearance in the Blanking Process," Journal of Materials and Processing Technology, Vol. 80-81, pp. 121, 1998.
11. Hayama M., Advanced in Rotary Forming Processes, Kindai Henshu Ltd., Japan 1992.
12. Crane E.F., Plastic Working in Presses, John Wiley & Sons, Inc. New York, 1984, pp.36.