

강관의 Guillotine 전단날 형상 설계

조해용#, 이상민*, 이정길*, 김용연**

Shape Design of Guillotined Shear Cutters for Steel Pipes

Haeyong Cho#, Sangmin Lee*, Jungkil Lee* and Yongyun Kim**

ABSTRACT

The guillotined cutting process for the pipe was studied in this paper. Until now guillotining mechanism can not be practically applied in the industries because of the deformation of sheared section around cutting area, the coarse sheared surface, and the burs. To find optimum shapes of blade, several types of blade were experimentally studied. The cutting force normal to the axial direction of the pipe was compared with the theoretical result based on the cutting energy. The experimental maximum cutting forces were very good agreement with the theoretical results. It also discussed that the design parameters of guillotining system such as the blade shape and the clearance between the blade and the die made effects to the deformation of the cutting cross section area. The results show that the guillotining method can be applicable to the pipe cutting system by optimizing the blade shape and the clearance between the blade and the die of the guillotined cutting system with respect to the sheared pipe material.

Key Words : Guillotined cutting (기요틴전단), Cutting force (전단력), Energy method (에너지법), blade (전단날)

1. 서론

산업체 전반에 걸쳐 광범위하게 사용되는 강관은 용도에 따라 요구 치수만큼 절단하여 사용된다. 그 중 대표적인 파이프 절단방법은 프레스 절단, 원형나이프 압입절단, 용융절단, 기계적 제거 절단(연삭, 절삭)으로 크게 4가지로 분류된다. 프레스절단은 파이프의 두께비가 작은 경우에는 굽힘 변형이 발생하므로 맨드릴을 필요로 하여 금형에서 가

공결과물의 탈착이 어렵고, 가공속도는 빠르나 복잡한 금형으로 인해 금형 조립시간이 오래 걸리고 가공소재의 형상에 따라 고가의 금형이 구비되어야 하는 문제점이 있다. 절단롤러가 파이프와의 압입회전으로 전조절단과 피로절단이 이루어지는 원형나이프 압입절단의 경우에는 가공소재 두께가 크면 나이프 인선각이 작아야하므로 가공범위의 제약이 따르며, 인선파괴가 쉽고 나이프 인선각이 큰 경우에는 가공결과에 V자형 인선에 의한 테이퍼 버어

접수일: 2004년 8월 27일; 게재승인일: 2004년 11월 19일

교신저자: 충북대학교 기계공학부

E-mail: hycho@chungbuk.ac.kr Tel. (043) 261-2464

* 충북대학교 대학원 정밀기계공학과

** 충북대학교 기계공학부

의 처리가 어렵다. 그리고 두께가 제한된 증공원형 소재의 경우에 직경에 제약을 받지 않으나 원형이 외의 단면은 불가능하므로 가공조건이 극히 제한된 가공방식이다. 용융절단은 레이저나 가스와 같은 열원에 의해 증공소재를 절단하는 방식으로 레이저 빔의 경우는 고가의 장비를 사용하여 가공비용의 문제가 있고 가스절단의 경우는 증공소재 절단으로 열원의 불연속에 의한 가공트러블이 발생하기 쉽다. 기계적 제거절단은 절삭과 연삭공구를 사용하여 소재를 연속 제거하는 방법으로, 선삭가공은 소재가 회전해야하는 특성과 칩 처리문제 등으로 자동화라인이 어렵고 다인 커터의 회전에 의한 가공은 공구마모와 소음이 심해 대량생산이 어렵다. 현재 가장 널리 사용되는 방법인 휠 커터에 의한 연삭절단방식은 파이프 절단공정 중에 기준치 이상의 소음과 진동 그리고 분진이 발생하고 Fig. 1에서와 같이 가공면의 열변형으로 인해 전단면에 버어가 발생하여 이를 제거하기 위한 후가공을 필요로 한다.



Fig. 1 Pipe cutting with wheel cutter

이에 반해 소성가공인 기요틴전단(Guillotined shear)은 돌기형의 전단날(shear blade)이 지그로 고정된 소재에 대해 상하왕복운동기구에 의한 소재전단 및 발생된 칩을 처리하는 순간절단방식으로 가공 시에 소음이 발생하지 않으며 절단 칩으로 처리되어 금속분진이 발생하지 않게 된다. 또한 가공시간은 다른 방식에 비해 월등하게 단축되어 생산성 향상을 가져올 수 있으며 기존의 공정라인에 간단한 유압이나 공압 기구를 부착하고 가공소재의 형상과 재질에 따라 전단날과 고정 지그만 갖추면,

어떠한 전단작업도 가능한 유연 가공시스템이 구성될 수 있다.

기요틴 전단에 관한 연구는 새로운 전단 기술에 대한 관심이 고조되면서 다양한 연구가 행하여지고 있다. Nakagawa¹는 환봉과 파이프의 절단방법을 소개하면서 기요틴 기구의 형태에 관하여 기술하였고, Atkins²는 기요틴 전단방법을 이용하여 연질금속에 대한 판재전단 메커니즘을 소성이론에 입각하여 이론적으로 전단과 굽힘 현상, 그리고 파단면에 대해 분석하여 결과를 기술하였다. Zhou 등³은 취성 금속 판재의 티어링(tearing)과 블랭킹(blanking)에서 인장 모델을 이용하여 소성저항과 소성 일을 이론적으로 예측하였고, Lim⁴은 클리어런스(clearance) 및 전단 속도 등의 각종 전단 공정변수들이 제품 품질에 미치는 영향을 연구하여 최적 전단 금형 설계를 위한 제한된 금형 설계기준과 양질의 제품을 생산할 수 있는 기본적인 데이터를 제공하였다. 최근에는 Lu 등⁵,⁶이 준정적 조건하에서 편치에 의한 정사각 튜브의 에너지 흡수 특성에 관하여 연구하였고, Kasuga 등⁷은 사각파이프의 프레스 전단 연구를 통하여 파이프 두께와 편치 각에 따른 전단력과 파단면의 관찰을 통하여 편치의 각을 120°이하로 제안하고, 전단변수들이 파이프 전단에 미치는 영향을 고찰하여 사각 파이프에 관한 평가식을 제시하였다.

본 연구에서는 많은 문제점을 가지고 있는 기존 파이프 절단 방법을 대체하고자 새로운 가공방법인 기요틴전단 방법에 대한 연구를 수행하였다. 연구 내용은 전단날 및 지그의 형상을 설계하고 에너지법을 이용하여 전단날의 형상에 따른 전단력을 예측하였다. 또한 파이프 전단실험을 수행하여 에너지법에 의한 전단력 예측의 유효성을 검증하였다.

2. 절단에너지에 의한 guilloting mechanism

단위 부피당 금속을 실제 가공하는데 필요한 총 에너지 E_t 는 단위 부피당 소성 변형 에너지 E_p , 단위 부피당 마찰에너지 E_f , 단위 부피당 전단 변형 에너지 E_s 의 합과 같다. 즉,

$$E_t = E_p + E_s + E_f \quad (1)$$

따라서 파이프를 전단하기 위하여 필요한 전단

력 F 는 소성 변형에 의한 힘 F_p 와 전단 변형에 의한 힘 F_s , 그리고 전단면과 전단날의 마찰에 의한 힘 F_f 의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = F_p + F_s + F_f \quad (2)$$

파이프의 전단에서 전단력을 계산하기 위해서 강소성체의 Mises항복조건과 Levy-Mises유동조건을 만족하는 축대칭변형에 대해 기하학적 모델링에 의한 전소요 하중을 에너지법(Energy Method)으로 유도하였다.

전단날의 행정에 따라 증공원형소재의 횡단면 행정에 대해 도시하면 Fig. 2와 같다.

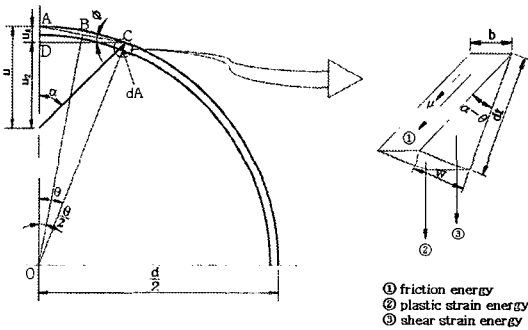


Fig. 2 Free body diagram of guillotined cutting mechanism

전단행정 u 를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u_1 &= \overline{CD} \times \tan \phi \\ u_2 &= \frac{\overline{CD}}{\tan \alpha} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} u &= u_1 + u_2 \\ &= \overline{CD} \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \tan \phi \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\overline{CD} = \frac{d}{2} \sin \theta \quad (5)$$

여기서, 선분 \overline{OB} 는 선분 \overline{AC} 를 수직 이등분하는 선이므로 $\triangle ABO$ 는 직각삼각형이 된다. 또한 $\triangle ABO$ 와 $\triangle ACD$ 는 $\angle BAO$ 를 공통각으로 하

는 닮은꼴 삼각형이 된다. 따라서 ϕ 는 $\theta/2$ 가 되어 전단행정 u 는 다음 식과 같이 된다.

$$u = \frac{d}{2} \sin \theta \left(\frac{1}{\tan \alpha} + \tan \frac{\theta}{2} \right) \quad (6)$$

일반적으로 금속재료는 소성 가공 중에 가공경화하고 있기 때문에 변형의 각 단계에서 가공경화에 의한 유동응력의 증가를 고려하여야 하지만 여기서는 변형의 각 단계에서 평균유동응력 σ 가 작용한다고 가정하였다. 평균유동응력은 파이프 소재의 인장강도를 사용하였으며 Table 1에 명시되어 있다.

전단날의 양옆에서 파이프가 이중으로 전단이 이루어지므로, 소성 변형에 의해 작용하는 전단력은 다음과 같이 된다.

$$F_p = 2\alpha d A \quad (7)$$

전단변형에 의한 힘은 전단변형 에너지와 전단행정간의 관계로 다음과 같이 된다.

$$F_s = \frac{\alpha d A t}{u} \quad (8)$$

파이프의 전단면과 전단날의 마찰에 의해 발생하는 힘은 마찰이 작용하는 방향으로 작용한다. 전단날의 두께가 b 이고, 전단날과 전단면이 접촉길이는 미소두께 dt 에 의해 나타낼 수 있다. 또한 전단에 영향을 미치는 힘은 마찰력의 수직분력이므로 다음과 같이 된다.

$$F_f = \sigma \cdot \mu \cdot b d t \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha - \theta)} \quad (9)$$

따라서 파이프의 양쪽에서 전단이 이루어지고 있으므로 전단력 F 는 위의 각각의 항들의 합의 두 배가 되어 다음과 같이 된다.

$$F = \left[2\alpha d A + \frac{\alpha d A t}{u} + \frac{\mu b d t \cos \alpha}{\cos(\alpha - \theta)} \right] \times 2 \quad (10)$$

3. 실험방법

3.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 파이프 전단기구와 전단력 측정 시스템으로 구성하였다.

파이프 전단기구의 구성은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 파이프를 전단하기 위한 전단날과 파이프와 전단날을 고정하기 위한 지그, 그리고 전단행정을 제어하기 위한 리미트 스위치로 구성되어 10ton의 유압프레스에 설치하여 사용할 수 있도록 하였다.

전단력 측정 시스템은 Fig. 4와 같이 전단날에 부착된 스트레인게이지(Kyowa strain gages)와 측정된 저항을 증폭하여 전압으로 변환하기 위한 증폭장치(SOHWA 5384), 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하기 위한 A/D변환기(AD-30), 그리고 변환된 데이터를 수집하여 변형률로 계산하는 프로그램(LABTECH Version 12X)으로 구성하여 변형률에 의해 전단력을 측정할 수 있도록 하였다.

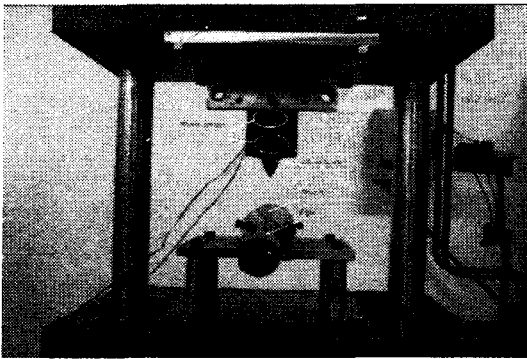


Fig. 3 Experimental system

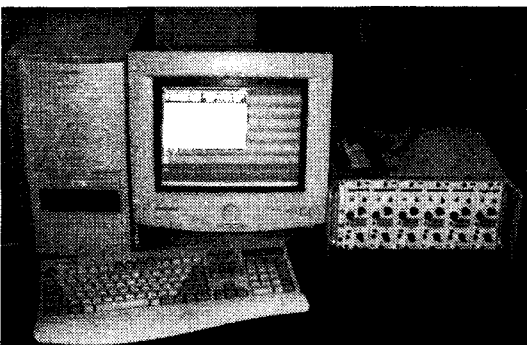


Fig. 4 Measuring system of cutting force

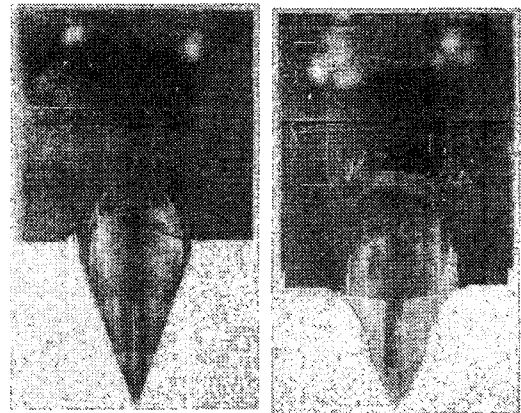
3.2 재료와 공구

냉간압연강(SPCC) 파이프와 얇은 강 파이프 두 종류를 사용하여 전단 실험을 하였다. 파이프의 기계적 특성과 단면의 형상은 Table 1과 같다.

Table 1 Mechanical properties of the pipe

Materials	SPCC	Steel
Diameter(mm)	35	53
Thickness(mm)	1.2	0.3
Ultimate tensile strength(MPa)	420	330
Yield strength(MPa)	350	285
Modulus of elasticity(GPa)	205	205
Hardness, Vickers(Hv)	126	98

전단날은 각각의 파이프에 대하여 설계를 하였다. 냉간압연강 파이프의 경우에는 Fig. 5에서와 같이 전단날의 반각이 22.5°로 직선적으로 설계한 두께 1.2mm인 쐐기형 전단날과 전단면과 전단날의 접촉각이 45°로 유지되게 기하학적으로 설계한 두께 2mm인 전단날을 이용하여 전단 실험을 하였고, 얇은 강 파이프의 경우에는 Fig. 6에서와 같이 전단날의 반각이 60°로 직선적으로 설계한 쐐기형 전단날과 파이프와 지름이 같은 원주형 형상의 전단날, 그리고 두 가지를 조합한 형상의 전단날을 두께 0.5mm로 제작하여 실험하였다. 전단날의 기계적 특성은 Table 2와 같다.



(a) semi-angle 22.5°

(b) contact-angle 45° on the shear surface

Fig. 5 Shapes of shear blade for SPCC pipe

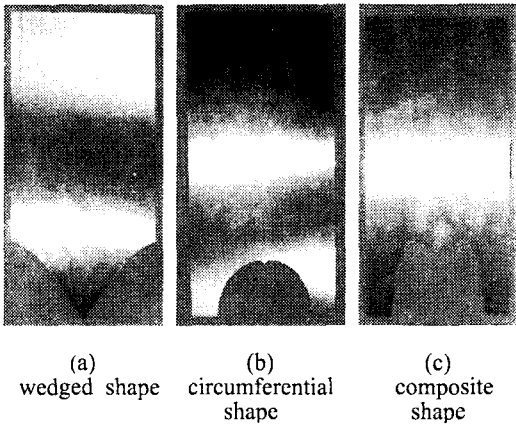


Fig. 6 Shapes of shear blade for thin walled steel pipe

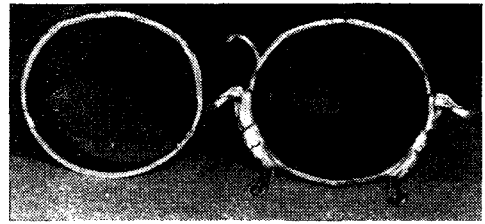
Table 2 Mechanical properties of the blade

Materials	HSS
Yield strength(MPa)	2374
Modulus of elasticity(GPa)	220.7
Fracture strength(MPa)	5836

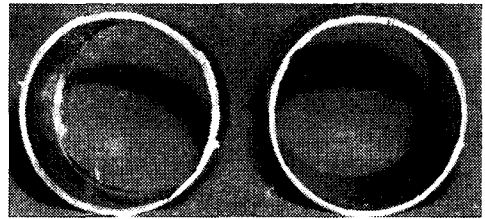
4. 결과 및 고찰

4.1 전단날의 형상

냉간압연강 파이프 전단에서 전단날의 반각을 22.5°로 한 췌기형의 전단날로 파이프를 전단한 경우 전단이 이루어지면서 칩 유동이 파이프 바깥쪽으로 전개되어 블레이드에 의해 아랫부분이 전단되면서 수직성이 조정되지 않아 클리어런스의 균형이 어긋나서 칩이 완전히 분리가 되지 않고 Fig. 7(a)에서와 같이 파이프의 한쪽 면에 붙어 버어를 형성하였다. 반면에 파이프의 전단면과 전단날의 접촉각이 45°각도를 유지하게 하여 설계한 전단날의 경우에는 전단이 이루어지면서 칩 유동이 파이프 내부로 이루어져 전단면에서 슬립현상이 발생하지 않아 Fig. 7(b)에서와 같이 파이프가 완전하게 전단이 되어 버어가 발생하지 않았고 양호한 전단면을 나타내어 전단날의 반각을 22.5°로 한 경우보다 전단에



(a) semi-angle 22.5°



(b) contact-angle 45° on the shear surface

Fig. 7 Shear surfaces of SPCC pipe for each cutter

유리하다는 것을 알 수 있었고, 전단 시 원활한 칩 유동과 날의 좌굴을 방지할 수 있는 전단날의 형상 설계가 가능했다. 설계된 전단날을 이용하여 전단 장치를 구성하면 기존 파이프 절단 방법을 대체할 수 있을 것이라 생각되었다.

얇은 강 파이프의 경우 Fig. 6(a)와 같이 반각을 60°로 한 췌기형 전단날로 파이프를 전단한 경우에는 상부 전단 시에는 칩 유동이 파이프 내부로 진행되어 원활한 전단이 이루어지나 하부 전단 시에는 슬립현상이 발생을 하여 파이프가 전단이 되는 것이 아니라 구멍을 뚫는 것과 같이 되어 칩이 완전히 분리되지 않고 한쪽 면에 남아 Fig. 8(a)와 같이 티어링에 의한 버어가 형성된 반면 Fig. 6(b)와 같이 원주형의 형상을 갖는 전단날로 전단을 한 경우에는 Fig. 8(b)와 같이 상부에서 초기 전단부의 과도한 저항으로 인하여 굽힘 현상이 발생하여 파이프가 심하게 일그러지고 하단부에서는 칩 유동이 파이프 내부로 이루어져 원활한 전단이 이루어졌다. 파이프의 상·하단부의 전단 결과가 극단적으로 나타나는 결과로부터 두 형상을 조합하여 Fig. 6(c)와 같은 형상으로 전단날을 설계하여 실험을 한 결과 Fig. 8(c)에서 보는 것과 같이 원주형 형상의 전단날로 전단하였을 때와 유사한 현상을 보였다.

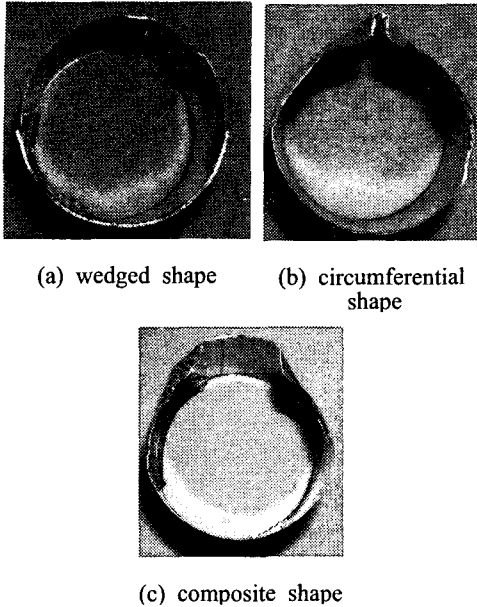


Fig. 8 Shear surfaces of thin walled steel pipe for each cutter

이는 초기 전단부 전단 시에 파이프와 전단날이 선 접촉이 아닌 면 접촉을 하여 이로 인해 파이프에 과도한 저항이 발생하여 파이프 상부가 변형된다고 생각된다. 실험 결과를 통하여 얇은 강관의 전단 시 썩기형 형상의 전단날이 텐팅 현상도 발생하지 않고 전단면도 양호한 것으로 보아 원주형보다는 유리하다는 것을 알 수 있었다.

4.2 블레이드와 다이의 공차

전단가공에서는 Fig. 9와 같이 블레이드와 다이 사이에 어느 정도의 클리어런스가 필요하다. 이 클리어런스에 의해 편치력이 모멘트로 전환이 되고, 이 모멘트에 의해 응력이 발생되어 소재는 전단응력과 함께 변형을 받게 되어 파단이 발생하게 된다. 따라서 전단가공에서는 클리어런스가 중요한 인자이다. 만약 클리어런스가 작을 경우에는 소재는 다이와 편치 부근에서 전단이 발생을 하여 두개의 전단면을 형성하여 편치력이 급증하게 되고, 클리어런스가 큰 경우에는 편치가 절삭을 일으키며 소재가 받는 압축력이 인장력으로 바뀌며 소재에 굽힘이 발생하여 전단면에 버어가 발생하게 된다.

클리어런스는 중요한 절단공정 변수로 0.2, 0.5, 그리고 0.8mm 변화를 주어 실험을 하였다. 클리어런

스가 0.2mm인 경우에는 Fig. 10(a)와 같이 파이프가 완전히 절단되어 버어가 발생하지 않고 절단면도 비교적 양호하였으나, 0.5mm이상에서는 Fig. 10(b)와 같이 칩이 완전히 분리되지 않고 굽힘 변형을 받아 파이프 한쪽 면에 붙어 버어를 형성하였고 절단면도 불규칙적인 형상으로 나타났다.

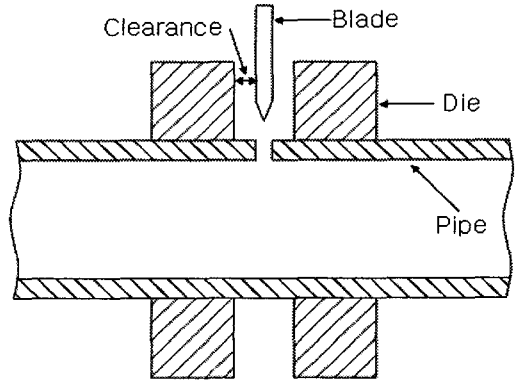
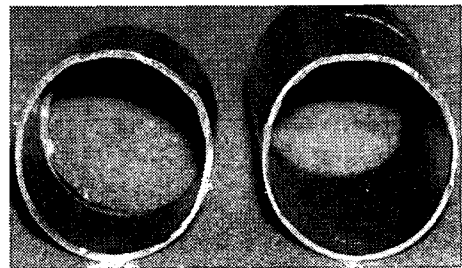
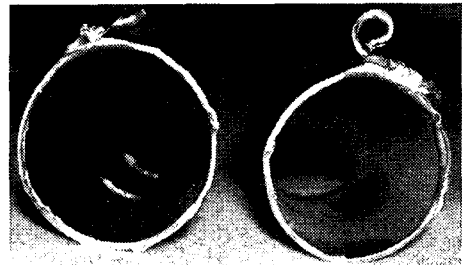


Fig. 9 Schematic illustration of clearance



(a) clearance 0.2mm



(b) clearance 0.5mm

Fig. 10 Shear surfaces of SPCC pipe for clearance

Table 3과 Fig. 11은 전단력과 클리어런스의 관계를 나타낸 것으로 클리어런스에 따라 전단력의

변화가 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 클리어런스가 0.5mm인 경우에는 0.2mm인 경우보다 전단에 필요한 힘이 부분적으로 증가하게 된다. 이는 클리어런스가 증가하면 파이프가 압축력을 받아 전단가공이 이루어져야 하는데 가공 공정 중에 증가된 클리어런스에 의해 압축력이 인장력으로 바뀌어 전단공정이 이루어지게 되어 발생하는 것으로 생각된다. 따라서 파이프는 전단가공 시에 칩 형태로 배출이 되지 않고 인장력에 의해 굽힘 변형이 발생하게 되어 Fig. 10(b)와 같이 버어를 형성하여 파이프에 붙어 전단날의 진행을 방해하게 되어 부분적으로 전단에 필요한 힘이 증가하게 된다. 또한 0.8mm인 경우에는 버어로 인한 굽힘 변형의 현상이 더욱 두드러져서 전체적인 공정 동안 높은 하중을 받는 것을 볼 수 있다.

Table 3 Measured Maximum load for each clearance

Condition	Clearance(mm)	F_{max} (kgf)
d : 35mm	0.2	839.82
t : 1.2mm	0.5	899.80
v : 30mm/s	0.8	899.80

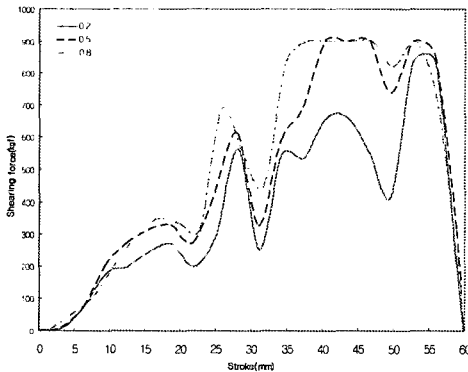


Fig. 11 Measured cutting force for clearance

실험을 통하여 클리어런스가 전단력과 버어를 발생시키는 중요한 요인이라는 것을 알 수 있었다. 클리어런스가 작을수록 제품의 정밀도 측면에서는 유리하나, 전단력 감소와 버어가 없는 깨끗한 단면을 얻기 위해서는 클리어런스를 0.2mm 정도로 하는 것이 적당하다고 생각된다.

4.3 전단력 예측

최대전단력을 예측하는 것이 중요하므로 전단력과 전단날의 반각의 관계를 이론식을 통하여 알아보았다. 파이프의 직경 35mm이고 두께 1.2mm 그리고 전단날의 두께 2mm에 대해 식(4)을 적용하여, 최대 전단력과 그 작용점 행정과 중심각을 평가한 결과는 Table 4와 같다. Fig. 12는 전단날 반각의 변화에 따른 계산된 전단력을 나타낸 것으로 전단날의 각이 증가할수록 초기에는 전단력이 증가하지만 최대전단력은 감소하는 것을 볼 수 있다.

Table 4 Calculated maximum cutting force by semi-angle

$\alpha(^{\circ})$	u(mm)	$\theta(^{\circ})$	F_{max} (kgf)
30	50.1	98.64	848.92
45	40.6	113.65	826.26
60	36.3	128.64	796.44
70	34.8	138.66	774.83

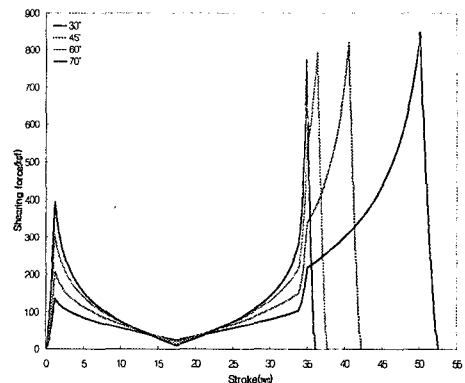


Fig. 12 Calculated cutting force by energy method

Kasuga 등⁷은 사각 파이프의 프레스 전단에 관한 연구를 통하여 전단날의 각이 증가할수록 전단면이 일그러지는 현상이 커진다고 하였는데 이것은 본 연구결과와 일치하였다.

전단날의 각이 전단면의 형상에 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있었고, Kasuga 등의 연구결과와 이론식에 의해 예측된 결과로 보아 강관의 전단 시

전단날 반각의 각도는 45°정도가 적합하다고 생각된다.

4.4 실험값과 이론식의 전단력 비교

Fig. 13은 전단력과 전단행정과의 관계를 도시한 그래프로, 최대하중은 실험값이 839.8kgf로 나타났고 에너지법에 의한 이론식의 값은 831.5kgf로 거의 일치하였으나 다른 부분에서는 차이를 보이고 있다.

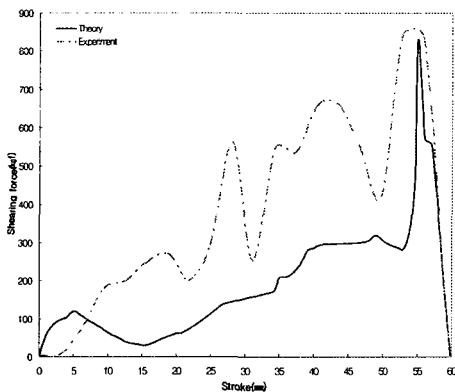


Fig. 13 Comparison of cutting force theoretical and experimental

이는 에너지법에 의하여 이론적으로 전단력을 해석할 때 칩 유동에 의한 영향과 가공경화에 의한 것은 고려하지 않아 실험에 의해 측정된 값과 이론식의 값이 차이가 발생할 것으로 생각된다. 그러나 에너지법은 근사적인 해를 구하기 위한 것이고 중요한 것은 실험과 이론식을 통하여 장치의 용량을 결정하는 것이므로 최대 전단력이 거의 일치하는 것으로 보아 에너지법에 의한 이론적인 계산 결과는 실험과 잘 일치한다고 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 기요틴 전단방법을 이용한 파이프 전단에 대하여 전단 실험 결과와 에너지법을 이용한 이론해석을 통한 결과와 비교해 봄으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이론적인 계산 결과와 전단실험 결과 분석을 통하여 두께 1.2mm의 냉간압연강 파이프 전단 시에는 전단날의 각도가 45°정도가 적합하다는 것을

알 수 있었다.

2. 절단제품의 절단면 품질을 좌우하는 인자는 절단날과 파이프 고정지그 사이의 클리어런스 영향이 가장 크고, 소재의 원활한 이송을 위한 절단날과 지그 사이의 클리어런스는 0.2mm범위가 적당함을 알 수 있었다.
3. 에너지법에 의한 이론식은 파이프를 전단하기 위한 전단장치의 용량을 결정하는데 유용할 것이라 생각된다.
4. 강관절단공정에 대한 기존시스템의 문제점들에 대한 파악과 새로운 방법에 대한 연구로 기요틴 전단을 개선 발전시킨다면 기존시스템에 대체 가능하다.

참고문헌

1. 中川威雄, "管材のプレスせん断," 塑性と加工, Vol. 23, No. 255, 1982.
2. Atkins, A. G., "On the mechanics of guillotining ductile metals," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 24, pp. 245-257, 1990.
3. Zhou, Qing, Wierzbicki, Tomasz, "A tension zone model of blanking and tearing of ductile metal plates," International journal of Mechanical Sciences, Vol. 38, No. 3, pp. 303-324, 1996.
4. Lim, S. J., Choi, S. W., Yoon, D. J., Park, Y. B. and Na, K. H., "A Study on the Characteristics of High Speed Precision Bar Cropping," Journal of KSTP, Vol. 9, No. 7, pp. 769-775, 2000.
5. Lu, G., Wang, X., "On the quasi-static piercing of square metal tube," International journal of Mechanical Sciences, Vol. 44, pp. 1101-1115, 2002.
6. Huang, X., Lu, G., Yu, T. X., "On the axial splitting and curling of circular metal tubes," International journal of Mechanical Sciences, Vol. 44, pp. 2369-2391.
7. Kasuga, Y., Machida, T. & Kato, N., "Effect of cutting conditions on press cutting of a square pipe," Journal of Materials Processing Technology, Article in Press, 2003.