

문서세단기의 커터날 형상, 크기, 배열과 절단특성에 관한 연구

이위로*, 이동규#, 김민호**

The Study on Cutting Characteristic according to a Shape, Size and Array of Cutter for Paper Shredder

Lee Wi Ro*, Lee Dong Gyu# and Kim Min Ho**

ABSTRACT

The aim of this study is to find the best cutting conditions as analyzing cutting process of paper shredder and shape of cutter. The test has been done variation of torque and cutting velocity according to load. When shape of cutter and distance between cutter and shaft are changed, The variation of cutting force according to cutting angle and load is geometrically analyzed. The result of geometrical analysis is presented that the radius and array of cutter is the method to improve torque of paper shredder. In this paper it is presented as basic method of design to improve cutting performance of paper shredder.

Key Words : Angle of twist(비틀림각), Cutting angle(절삭각도), Cutter array(커터날 배열), Length of cutter axis(커터축간 거리), Shape of cutter(절삭날 형상), Paper shredder(문서세단기)

1. 서론

현대 사무환경에서 문서의 생산과 파기는 서로 분리할 수 없는 관계를 가지고 있다. 최근 문서의 보안은 중요성이 매우 커졌다. 문서를 파기하기 위하여 사용되는 문서세단기(paper shredder)는 모터를 사용하여 커터를 회전시켜 문서를 아주 조그만 조각으로 세단하여 보안을 요하는 문서의 내용을 인식할 수 없게 하는 기계이다.¹

문서세단기의 주요 구성부는 크게 모터, 동력전달부, 절단부와 제어부 등으로 되어 있다. 이중 절단부는 세단기의 성능을 좌우하는 핵심부분이다.

절단부는 부하량을 적절하게 분산할 수 있게 일정 각도로 커터날을 배열한 커터축과 복잡한 형상을 지닌 다수의 커터날로 구성되어 있다.

이와 같은 문서세단기의 성능을 평가하기 위해 커터날의 형상과 재질에 대한 품질기준과, 세단능력 즉 세단속도와 최고 세단능력에 대한 평가방법, 세단시 발생하는 소음기준, 절단 후 칩(Chip) 크기에 따른 보안등급 분류방법, 역회전, 커터날정지 등 과부하시 제품보호기능과 효율적인 파쇄 동력 전달 구조(기어식, 체인식) 및 파쇄 메커니즘에 대한 연구가 진행되고 있다.^{2,3,4}

본 논문에서는 문서세단기의 절단과정을 분석

접수일: 2005년 3월 10일; 게재승인일: 2005년 11월 10일

* 산업자원부 기술표준원

교신저자: 경희대학교 기계공학과

E-mail aimecha@khu.ac.kr Tel. (031) 201-2512

** 경희대학교 대학원

하여 절단성능을 향상시킬 수 있는 방법을 연구하였다.

먼저 부하량에 따른 토크변화를 측정하였고, 내구성 실험을 대체할 수 있는 방법에 관하여 연구하였다. 다음으로 절단과정을 분석하여 커터날의 직경과 배열에 따른 토크의 변화를 계산하였다. 마지막으로 커터부의 성능을 향상시키기 위해 커터날 형상에 따라 절단각도와 절단속도의 관계를 분석하였다.

2. 부하량에 따른 절단토크의 변화

2.1 실험장치

문서세단기(paper shredder)는 크게 동력부(power), 동력전달부(power connector), 절단부(cutter) 및 제어부(control)구성되어 있다. 이 중에서 절단부는 세단지를 직접적으로 절단하는 부분이며, 부하량에 따라 IC칩에 입력되어지는 전압값이 상승하게 된다. 또한 과부하가 발생할 경우 IC칩에 입력되는 전압값이 상승하여 특정전압값 이상이 될 경우 모터를 역회전 시켜 모터를 보호한다. 실제적으로 부하량에 따른 모터의 토크를 측정하기가 어려우므로 부하량을 증가할 때, 제어부의 IC칩에 입력되는 전압값을 측정하였다.

실험에 사용된 문서세단기는 모터의 정격용량이 200W이고, 모터의 동력은 체인을 통해 절단부로 전달한다. 부하량에 따른 토크변화를 측정하기 위하여 Fig. 1과 같이 제어회로에 있는 IC칩(PIC16C71X)의 아날로그 입력신호인 전압을 측정하였다. 전압신호는 National Instrument 社의 Resolution 16bit, Sampling rate 200kS/s인 PIC 6014 DAQ보드를 이용해 측정하였으며, Sampling time은 약 100S/s이고, Sampling Duration은 10sec이다. 실험에 사용된 문서세단기의 사양은 Table 1과 같다.

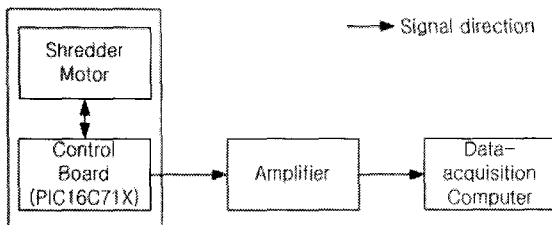


Fig. 1 Diagram to measure voltage according load

Table 1 Specification of experiment machine and specimen

Workpiece Property	Tensile Strength		width (mm)	hight (mm)
		75g/m2		210
Cutter Property	SS45C	Yield Strength	Tensile Strength	C (%)
		205 (MPa)	410 (MPa)	0.30
Aixs Property	SS400	Yield Strength	Tensile Strength	Shear modulus
		235 (MPa)	400 (MPa)	79.3 (GPa)
Motor	Out-put	200W		
	rmp	1720		
	Gear ratio	30:1		

2.2 절단토크의 변화

부하량이 증가함에 따라 요구되어지는 토크는 증가하게 되며, 세단속도는 저하되게 된다. 세단기의 주요성능 평가항목 중 세단능력인 세단소요시간은 부하량 증가에 따라 요구되어지는 절단력과 저항의 증가로 인해 절단속도의 변화가 발생하며, 낱장 세단시 소요시간은 4.55sec고 최대세단매수의 70% 세단시는 5.37sec이다.

또한 세단기의 성능평가 항목중 내구성 평가는 일종의 파괴실험이므로 이와 같은 실험을 보다 효율적으로 수행하기 위하여 초기상태에서 부하량에 따른 토크 변화를 측정후 일정기간 사용후 토크를 측정하여 초기상태와 비교하므로써 성능저하 정도를 파악할 수 있는 등가해석 방법에 대하여 연구하였다. 즉, 실험을 통해 최대 출력토크와 부하량 변화에 따른 정상상태에서의 토크변화를 곡선회귀식으로 구한 후, 일정시간 사용 후 토크를 측정하여 실험식과의 오차를 통하여 점진적인 상승저하 여부를 판단하는 방법이다.

제어부의 IC 칩에서 아날로그 입력단자는 부하량에 따라 전압값이 변하는데 일정이상의 전압값이 입력될 경우 역회전을 한다. 최대부하량은 모터가 역회전 하는 시점으로 정하고 무부하 상태와 최대 부하량 사이의 부하를 가할 경우 입력단자의 전압값을 측정하여 토크를 산출하였다. 무부하상태에서 모터의 정격용량에 의해 발생하는 출력토크는 Eq.1로 구할 수 있다.

$$P(\text{watt}) = 2\pi N(\text{rev/s}) T(N \cdot \text{m}) \times S_f \quad (1)$$

여기서 S_f 는 모터의 효율상수로 기어박스가 3축 일 경우 0.9^3 이고, N 은 출력축의 회전수이다.

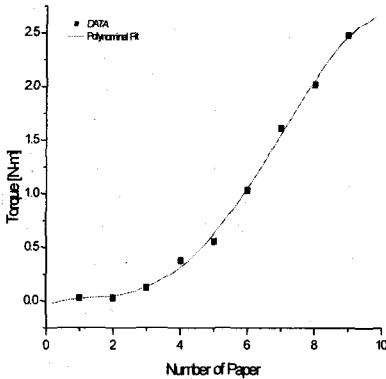


Fig. 2 The graph of Torque-load and curve fitting

Fig. 2는 정상상태에서 절단부하에 따른 토크변화와 곡선회귀식을 나타내고 있으며, m 차 곡선회귀는 Eq. 2와 같다.

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^{m+c} \quad (2)$$

부하량에 따른 토크의 변화는 Table 2의 전압과 토크의 보정표를 통하여 구할 수 있다.

Table 2 Calibration of Torque and voltage

Volt (V)	1.850	1.883	1.970	2.032	2.198	2.399	2.540	2.700
Torque (kgf-m)	0.032	0.127	0.377	0.556	1.034	0.612	2.018	2.479

곡선회귀식의 적절한 차수를 정하기 위하여 결정계수(coefficient of determination)를 사용하는데 차수가 증가함에 따라 결정계수도 증가하나 결정계수가 현저히 감소하는 하는 m 값이 있을 때 $m-1$ 의 값을 선택한다. 다항회귀식의 결정계수는 Eq.3을 이용해 구할 수 있다.⁵

Eq. 3에서 SST는 총변동을 SSR은 잔차변동을 나타낸다. \bar{y} 는 측정값의 평균을 y_i 는 모수 a_0, a_1, \dots, a_m 의 추정값이다. 정상상태에서 문서세단기의

부하-토크의 실험식의 차수를 결정하기 위한 결정계수는 Table 3과 같다. 적절한 곡선회귀식의 차수는 4차이며 4차 곡선회귀식은 Eq. 4와 같다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{\sum \hat{y}_i^2 - n(\bar{y})^2}{\sum y_i^2 - n(\bar{y})^2} \quad (3)$$

Table 3 Coefficient of determination according to order

order	1	2	3	4	5
R^2	0.926	0.993	0.996	0.998	0.998

$$y = -0.036 + 0.109x - 0.071x^2 + 0.021x^3 - 0.001x^4 \quad (4)$$

분산분석표는 Table 4이며, P-value에 의하여 추정된 회귀식은 의미가 있음을 알 수 있다.

Table 4 Analysis of Variance

	자유도	제공합	제공평균	F 비	유의한 F
회귀	3	0.814	0.271	464.450	0.000
잔차	5	0.003	0.001		
계	8	0.817			

3. 절단메커니즘과 커터날 배열에 관한 연구

3.1 절단과정 분석

시스템을 모델링하기 위해서는 절단과정을 분석하는 것이 선행되어야 한다. 문서세단기의 절단은 커터날의 배열과 형상에 의해 세단의 특성이 크게 변화한다. 커터날의 배열은 Fig. 4와 같이 부하량의 적절한 분포에 영향을 미치고 세단지의 절단 길이를 결정한다. 또한 커터날의 형상은 기하학적으로 Fig. 3과 같이 3단계에 걸쳐 절단하며 각 단계는 다음과 같다.

- (1) Side cut : 커터날부의 직경이 일정하며, 커터날의 간격에 의해 세단침의 폭이 결정되어 진다. 세단지의 양쪽을 동시에 절단한다.
- (2) Top cut : 커터날의 끝단에서 가로방향으로 절

단을 하며 커터의 원주길이가 커터날에 딸린 끝단의 수에 의해 세단길이가 결정된다. 끝단의 연마정도, 절단각도, 커터날 간격에 의해 양호한 절단과 뜯김현상이 발생하며, 세단칩크기에 가장 큰 영향을 미친다.

- (3) Both side cut : 커터날의 직경변화가 크고 기하학적 형상에 의해 세단진행방향과 역방향으로 동시에 절단한다.

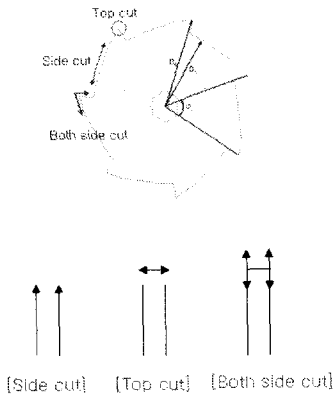


Fig. 3 Shape of cutted paper

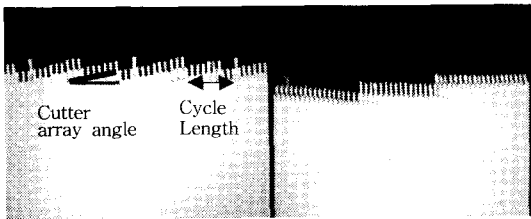


Fig. 4 Process of cutting

세단시 소요되는 절단력은 Both side cut >> Top cut > side cut 순으로 소요된다.

동일한 모터를 사용하여도 커터날의 배열각도 및 형상에 따라 소요되는 토크와 세단시간이 다르므로 다음절에서 보다 큰 토크를 출력하기 위한 커터날의 배열과 직경에 대한 분석을 하였다.

3.2 커터날 직경과 배열에 따른 토크변화

절단부는 다수의 커터날을 지닌 두 개의 축이 서로 마주보며 세단을 하는 구조이다. 이때 커터날의 배열은 동일한 세단지를 절단할 때 걸리는 부하

를 적절하게 분배하고 세단지가 겹치지 않게 하며 축의 중심점을 기준으로 서로 마주보는 형태로 구성되어 있다. 이번 절에서는 보다 효율적인 세단을 위해서는 동일 부하시 큰 토크를 출력할 수 있는 커터날의 배열과 커터날 직경을 선정에 관해 연구하였다. 실제 커터날의 배열과 형상은 상당히 복잡한 구조로 되어 있기 때문에 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) 커터배열각도는 기준길이(cycle length: x_i)에 의하여 결정되어지며 Fig. 4와 같다.
- (2) 절단부하는 미절단된 세단지 양에 비례하고, 커터날에 걸리는 부하는 분포하중의 형태이다.
- (3) 축의 형상은 비틀림에 의해 단면변화가 없는 원형단면이며, 토크의 크기는 비틀림각과 비례한다.
- (4) 축 끝단은 변위와 회전을 구속하였다.

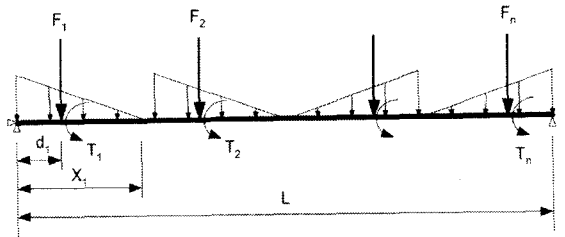


Fig. 5 Diagram of shredder's cutting load

Table 5은 계산에 사용된 조건으로 커터직경과 배열간격이며 이탤릭 치수는 실제 문서세단기의 치수이다. Fig. 5는 분석에 사용된 모델이다.

Table 5 Cutting condition for analysis torque

Torque	29.2964 (N-m)
Aixs radius	11.5 (mm)
Cutter radius	31.5, 29.5, 27.5, 25.5, 23.5 (mm)
Width of Xi	17.5, 21.0, 26.3 , 35.0, 52.5 (mm)

실제 문서세단기의 출력토크를 구한 후 커터 직경(D_0)과 기준길이(X_i) 값을 변화시키며 Eq.5를 이용하여 비틀림각을 구한 결과는 Fig. 6과 같다. Fig.5에서 F_n 은 기준길이에서 분포하중시 집중하중

이 발생하는 위치를 나타낸다.

$$\phi = \sum_{i=1}^n \frac{T_i L_i}{J_i G_i} \quad (5)$$

여기서 T_i 는 집중하중이 걸리는 곳에서의 토크이고, L_i 는 기준폭(Section Width)이며, J_i 는 극관성 모멘트, G_i 는 전단계수이다.³

분석결과 문서세단기의 성능을 향상시키기 위해선 기준길이(cycle length, X_i)가 짧고, Cutter의 직경이 크게 할수록 비틀림각이 증가하며 보다 큰 토크를 낼 수 있음을 알 수 있다. 보다 큰 토크는 세단기의 절단성능이 향상되는 것을 의미한다.

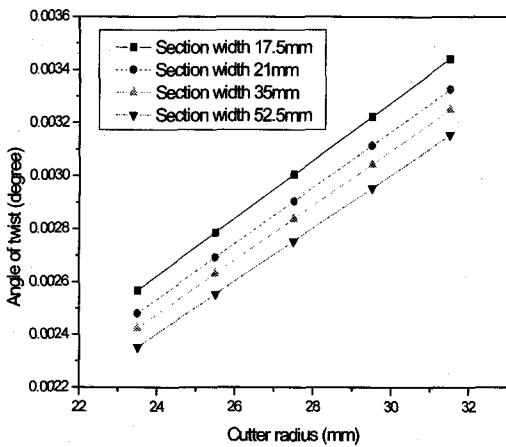


Fig. 6 Angle of twist according to cutter radius and cycle length

4. 커터날 형상과 절단각도에 관한 연구

4.1 커터날 형상분석

절단시 커터날의 절삭점은 회전하면서 그 위치가 변화한다. 회전시 절삭점에서 접선각도를 구하기 위해서는 커터날의 위치정보(x, y)가 필요하다. 커터날의 기하학적 위치정보를 측정하기 위하여 3차원 비접촉식 측정기(Mahr perthometer PGK 120)을 이용하여 커터날을 측정하였다. 측정은 Image processing의 Edge following 기법을 사용하여 경계선을 검출후 1 μ m간격으로 데이터를 획득하였다.

커터날의 형상은 51.4°를 주기로 가지며 0.025°간격으로 접석각도를 계산하였다. 측정된 커터날의 형상은 Fig. 7과 같다.

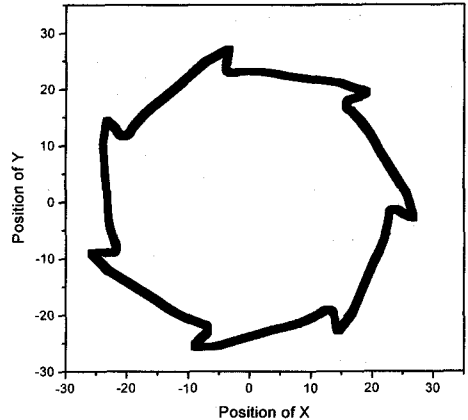


Fig. 7 Shape of cutter

4.2 커터축 거리에 따른 절단각도 및 특성분석

앞절에서 측정된 커터날의 위치정보(x, y)를 바탕으로 절단각도와 세단높이를 분석하였다. 모터에 의해 발생하는 토크는 절단력으로 변환되며 이 절단력은 Fig. 8과 같이 크게 접선력(F)과 세단지를 절단하는 절단력(F_y)과 세단지를 이송시키는 이송력(F_x)으로 구성되어 있다. 커터축간 거리가 일정하더라도 커터날 형상에 의해 절단각도가 변화하며, 이에 따라 접선력은 일정하더라도 절단력 및 이송력(세단지의 이송속도)의 크기가 변화하게 된다.

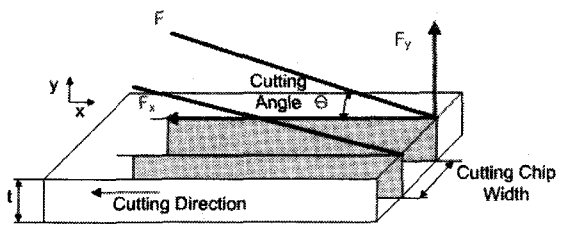


Fig. 8 Diagram of cutting force on paper

문서세단기의 절단성능에 영향을 미치는 주요인자(Primary factor)는 커터날의 형상, 배열각도, 세단량 및 축간거리이며, 부차적인자(Secondary factor)는 세단지의 물성치(인장강도, 수분함유량, 점도)이다. 이와 같은 인자중에서 커터날 형상에 따른 절단각 변화를 분석하기 위하여 커터축간거리를 15~45mm까지 10mm씩 증가할 때와, 부하량 증가에 따른 절단점의 변화(Fig.9에서 C→B)시 절단각도의

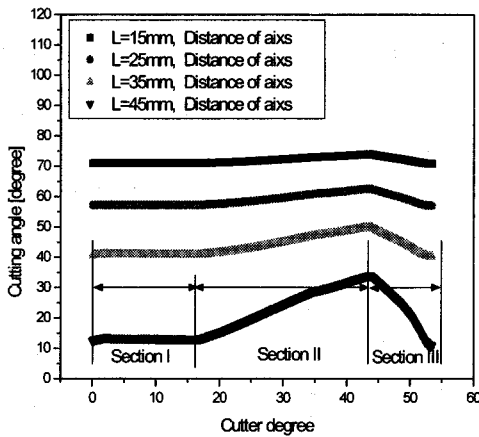


Fig. 11 Cutting angle according to distance of axis

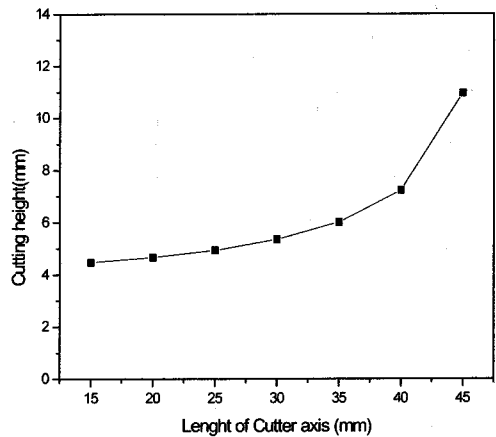


Fig. 12 Cutting height according to distance of axis

Fig. 12는 커터축의 간격을 조절할 때 절단높이(h)의 변화이다. 축간 간격이 증가함에 따라 절단높이가 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 최대외경과 최소외경이 정해질 경우 축간거리를 증가시키는 것이 문서세단기의 절단성능을 향상시키는데 유리하다는 것을 나타낸다.

세단량이 증가하면 Fig.8과 같이 절단점은 C에서 E로 이동하게 되며 이에 따라 절단각은 기하학적으로 증가하게 된다. 증가된 부하량에 의해 요구되어지는 절단력은 증가하고, 이송속도(V)는 이송력의 감소로 작아지게 된다.

문서세단기의 절단력은 세단날의 형상, 세단량과 축간거리에 의해 가변적으로 변하며, 부하량이 클 때는 축간거리를 크게하여 절단력을 증가시키고 작을 때는 축간거리를 감소시켜 이송속도를 크게하는 것이 유리하다.

5. 결론

문서세단기의 절단과정을 분석하여 절단부의 성능을 향상시키는 방안에 관하여 연구하였다.

문서세단기의 성능평가 항목 중 내구성 평가를 파괴시험대신 등가해석방법인 성능저하 정도를 평가하는 방법을 제시하였다. 또한 커터날의 배열, 직경에 따른 토크의 변화를 분석하여 각인자에 따른 영향을 분석하였다.

마지막으로 커터날 형상(절단각도)과 축간거리에

다른 영향을 분석하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 문서세단기의 점진적인 성능저하를 판단할 수 있는 방법으로 정상상태에서 부하량에 따른 토크 변화율을 다항회귀식으로 구하였다.
- (2) 커터날의 배열을 작게하고 직경을 크게 할 수록 보다 큰 토크를 출력한다.
- (3) 커터날 형상에 의해 발생하는 접선각도의 변화는 접선력의 분력을 발생시키며, 접선각도가 클 수록 절단력은 증가하고 이송력은 감소한다.
- (4) 커터날 축간거리가 증가할수록 접선각도와 세단높이가 증가하여 세단기의 성능이 향상한다.
- (5) 절단부하의 증가(세단량의 증가)는 접선각도를 증가시킨다.

후 기

본 연구는 산업자원부 기술표준원에서 지원하는 경상연구과제의 연구결과임을 밝히며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Germany Standrd, "Size Reduction Machine- Part3: Safety Requirement for shredders," DIN32757
2. Kiser, R., "Adaptive Device Design for a Disabled

- Person to Operate a Paper Shredder,” Southern biomedical engineering conference, pp.334-337, 1996.
3. Shih, S., “The simulation of the liberation and size distribution of shredder products under the material characteristic coding method,” 01 The 6th International Symposium of East Asian Resources Recycling Technology, pp.693-698, 2001.
 4. Sheehan, C.J., “Paper shredders make data security easy, affordable,” The Office, 118(1), pp.34-5, 1993
 5. Steven, G., “Numerical Methods for Engineers,” McGraw-Hill Korea, pp.466 ~ 500, 1999.