

가공변질층 깊이의 수학적 모델링

Mathematical Modeling for the Depth of Deformed Layer in Machining

박영우(충남대학교 공대)
Young-Woo Park(Chungnam National Univ)

ABSTRACT

The development and empirical validation of a mathematical model for predicting the depth of deformed layer in a machined surface are presented. The main assumption for developing this model is that there is a linear relationship between plastic strain and the depth to which it extends. The model relates the work required to shear the workpiece material to the work needed to compress the workpiece material ahead of the cutting tool. The results show that the percent difference between the calculated and the measured depth of deformed layer ranges from 4 percent to 19 percent. An improvement of the model is suggested through application of actual distribution data of plastic strain.

Key Words: deformed layer(변질층), residual stress(잔류응력), microstrain(마이크로스트레인), plastic strain(소성변형률), plastic deformation(소성변형), surface integrity(표면품질), elastic-plastic boundary(탄-소성 경계), x-ray diffraction(x-선 회절)

1. 서론

절삭으로 칩이 발생할 때 공구의 날끝이 가공물을 압축하여 날끝에서 가공물의 내부로 확대되면서 전단되는 과정으로 볼 수 있다. 전단변형은 심한 소성 변형으로서 변형의 정도는 균등하지 못하다. 그러므로 가공면은 모재와 사뭇 다른 특성을 가진다. 이러한 가공면의 특성은 표면품질(surface integrity)라는 용어로 표현할 수 있으며 표면거칠기, 가공변질층, 잔류응력, 미세조직 등이 이에 속한다¹.

가공변질층은 금속재료의 절삭가공시에 발생하는 가공표면의 변형층으로 정의될 수 있으며 결정입자의 미세화, 결정입제의 절삭방향으로의 유동, 내부의 큰 잔류응력 등의 특징을 가지고 있다. 가공변질층은 절삭가공에 있어서 표면의 성능을 결정하는 중요한 항목으로서 가공변질층의 존재는 후가공처리에서도, 그 부품을 사용하는 단계에 있어서도 유해하다. 구체적으로는 잔류변형력, 표면처리성, 반사율, 전도성, 내식성, 내마모성 등에 영향을 준다. 따라서, 가공변질층은 제로 또는 가능한 한 얇은 편이 바람직하다.

이러한 사실에도 불구하고, 가공변질층의 깊이를 예측할 수 있는 이론적 모델은 거의 없다². Barash와 Schoech은 가공변질층의 깊이를 계산할 수 있는

슬립라인 모델을 제시했지만, 순전히 형상 모델이다³. Sedgwick은 유한요소모델을 이용하여 가공변질층의 깊이를 계산하였지만, 실험치와 비교하지 않았다⁴. Park 등은 최초의 재료의 물성을 근거로한 수학적 모델을 개발했지만, 문헌상에 있는 데이터를 이용하여 개발된 모델의 적합성을 입증했다⁵.

따라서, 본 연구의 목적은 가공변질층의 깊이를 예측할 수 있는 수학적 모델을 개발하고, 개발된 모델을 실험적으로 입증함을 목적으로한다.

2. 이론적 모델링

Fig. 1에 나타난 바와 같은 2차원 절삭모델을 생각해 보자. Fig. 1에서 AB와 CDE는 각각 전단면과 탄-소성 경계를 나타낸다. 공구는 예리하고 경사면 상에는 마찰이 존재하지 않는다, 가공물은 경화가 가능하고 가공면은 전단면과 같은 소성변형률을 가진다, 가공물의 측면퍼짐이 없다 등의 가정이 사용된다.

Merchant의 해석에 따르면, 비전단에너지 (E_S)는 전단구역에서 가공물의 단위체적을 전단하는데 사용되는 에너지를 말하며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$E_S = \tau_s \gamma_s \tag{1}$$

여기서, τ_s 와 γ_s 는 각각 전단응력과 전단변형률으로써 다음 식들에 의해 계산되어진다:

$$\tau_s = \frac{F_H \sin \Phi \cos \Phi - F_V \sin^2 \Phi}{b_1 t_1}; \gamma_s = \frac{\cos \alpha}{\sin \Phi \cos(\Phi - \alpha)}$$

단, F_H =주절삭력, F_V =배분력, Φ =전단각, b_1 =절삭폭, t_1 =절삭깊이.

인장이나 압축 시험으로부터 가공물의 진응력-변형률 곡선을 얻을 수 있다(Fig. 2). Fig. 2에서 ϵ_E 와 ϵ_S 는 각각 절삭가공시의 탄-소성 경계와 전단면에 대응하는 진변형률을 나타낸다. 소성변형은 약 2%의 진변형률을 경험하는 ϵ_E 에서 시작된다고 알려져 있다⁶. ϵ_S 의 값은 절삭가공시의 전단변형률을 이용하여 계산할 수 있다. 즉, $\epsilon_S = \frac{\gamma_s}{\sqrt{3}}$ 소성변형에 사용된 총 비에너지는 ϵ_E 와 ϵ_S 의 값들에 의해 경계가 되는 진응력-변형률 곡선 아랫부분의 면적과 동일하다. 이러한 관계는 수학적으로 다음과 같이 표현된다.

$$E_T = \int_{\epsilon_E}^{\epsilon_S} K \epsilon^n d\epsilon \quad (2)$$

우선, 소성변형률은 가공변질층의 깊이 (X)와 선형적 관계에 있다고 가정하면

$$\epsilon = AX + C \quad (3)$$

단, A와 C=상수.

식 (3)에 대하여 두 개의 경계조건이 존재한다. 즉,

$$\epsilon = \epsilon_E \text{ at } X=0; \quad \epsilon = \epsilon_S \text{ at } X=X_T \quad (4)$$

이러한 경계조건들을 이용하여, 식 (3)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\epsilon_S = AX_T + \epsilon_E \quad (5)$$

식 (5)를 X에 대하여 미분한 결과와 식 (5)를 식 (2)에 대입하면, 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$E_T = \frac{K}{1+n} [(AX_T + \epsilon_E)^{n+1}]_0^{X_T} \quad (6)$$

식 (6)과 식 (1)과 같다고 두고 X_T 에 대해 풀면

$$X_T = \frac{1}{A} \left[\left[\frac{(n+1)}{K} \tau_s \gamma_s + \epsilon_E^{n+1} \right]^{\frac{1}{n+1}} - \epsilon_E \right] \quad (7)$$

유도된 모델 (식 (7))을 살펴보면 가공변질층의 깊이는 가공물의 진응력-진변형률 특성, 전단면에서의 전단 응력과 전단 변형률, 가공면 아래의 소성변형률의 분포의 함수임을 알 수 있다.

3. 실험

3.1 가공실험

냉간가공된 알루미늄 3003 판이 가공재료로 사용되어진다. 가공재료의 실제 화학조성은 Table 1에 주어진다. Fig. 3은 가공물의 3차원 형상을 나타내며 V는 절삭속도를 나타낸다. 절삭공구는 공구강을 이용하여 만들어졌으며 공구동력계위에 설치된 공구생크의 끝단에 장착된다. 가공물 홀딩 장치가 만들어져 면판위에 부착되어 가공물을 홀딩한다.

Table 1 chemical Analysis (%) of Al 3003

	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Ti	Al
%	0.21	0.62	0.16	1.14	0.02	<0.01	97.4

절삭속도(V), 절삭깊이(t_1), 경사각(α), 그리고 냉간가공의 정도(CW) 등의 네가지를 독립변수로 선택한다. 2차원 절삭가공이 20마력의 LeBlond 1610 선반을 이용해 행해진다. 절삭조건을 제외한 모든 절삭조건들은 각 실험이 행해지기 전에 세팅된다. 절삭방향은 가공재료가 냉간가공시 압연되었던 방향과 평행하도록 계획되어진다. 절삭력은 압전형의 공구동력계에 의해 측정되어져 다채널 증폭기를 통해 Tektronix 2630 퓨리어 분석기로 보내어진다. Fig 4는 가공실험을 위한 셋업의 개략도를 나타낸 것이다. 개략도에서 S와 W는 각각 슬레노이드와 가공물을 나타낸다. 칩의 두께는 최대 70배율의 Vidicom Qualifier 1210을 사용하여 측정하였다.

2.2 가공면 특성분석 프로토콜

가공물 특성분석 프로토콜은 가공재료의 초기 특성분석으로부터 시작한다. 초기 특성분석값은 나중에 가공면의 특성분석값과 비교가 이루어진다. 준비된 시편은 x-ray회절기내에 놓여지고 가공표면의

잔류응력이 측정된다. 가공면 내부의 잔류응력은 일정한 두께의 표면층을 제거한 후 새로운 표면에 주목하여 측정한다. 표면층의 제거는 부식, 기계적 방법, electropolishing 등을 이용할 수 있으나 아직 지는 신뢰성을 가진 방법은 없으며 연구자에 따라 다른 방법들이 사용되고 있다. 본 연구에서는 표면층의 제거를 위하여 electropolishing을 사용하며 제거된 두께를 측정하기 위하여 3차원 측정기를 이용한다. 이렇게 표면층을 제거하였을 경우에는 잔류응력의 상태가 변하기 때문에 제거된 두께만큼의 응력보정이 필요하다⁷. 이러한 과정은 측정값이 초기 특성 분석 값과 같을 때까지 반복한다.

4. 실험 결과 및 분석

측정된 칩의 두께를 이용하여 전단각을 계산한다. 계산된 전단각과 측정된 절삭력을 이용하여 전단응력과 전단 변형률을 계산한다. 이러한 값들은 가공변질층의 깊이의 계산에 이용된다.

가공면 아래의 깊이에 따른 마이크로스트레인의 분포는 Fig. 5에 나타난다. Fig. 5를 통해서 마이크로스트레인의 크기는 가공면에서 최대이며 가공면 아래쪽으로 내려가면서 감소한다는 사실을 관찰할 수 있다.

가공변질층의 깊이는 가공물의 내부에서 소성변형률의 수준이 일정하게 유지되기 시작하는 깊이로 정의된다. 본 연구에서는 마이크로스트레인의 분포로부터 가공변질층의 깊이를 알아내기 위해 그래픽칼 방법이 사용되어진다. 결과가 Table 2에 관련 절삭 조건과 더불어 나타난다. Table 2에서 $X_T(\text{실})$ 과 $X_T(\text{계})$ 은 각각 그래픽칼 방법에 의해 측정된 가공변질층의 깊이와 식 (8)에 의해 계산된 가공변질층의 깊이를 의미한다. 차이와 %차이는 각각 $X_T(\text{실})$ 과 $X_T(\text{계})$ 의 차이값과 차이값을 $X_T(\text{실})$ 으로 나눈 값을 의미한다. 본 연구에서 행한 실험내에서 %차이가 평균 12 퍼센트 정도이다. 이러한 차이는 본 연구에서 가정한 소성변형률과 가공변질층의 깊이의 선형적 관계에 기인하며 Fig. 5에서 나타난 바와 같이 소성변형률과 가공변질층의 깊이는 선형적 관계가 아니다.

5. 결론 및 향후 연구방향

첫째, 마이크로스트레인의 크기는 가공면에서 최대이며 가공면 아래쪽으로 내려가면서 감소한다.

둘째, 측정된 가공변질층의 깊이와 계산된 가공변질층의 깊이 사이의 %차이는 평균 12 퍼센트 정도

Table 2 Summary of Measured and Computed X_T

V m/min	t ₁ mm	α deg	CW %	X _T (계) mm	X _T (실) mm	차이 mm	% 차이
76	0.06	15	25	0.057	0.061	0.004	6.6
76	0.12	0	50	0.036	0.041	0.005	12.2
76	0.24	-15	70	0.151	0.163	0.012	7.4
152	0.06	0	70	0.058	0.069	0.011	15.9
152	0.12	-15	25	0.076	0.082	0.006	7.3
152	0.24	15	50	0.117	0.112	-0.005	-4.5
304	0.06	-15	50	0.059	0.071	0.012	16.9
304	0.12	15	70	0.106	0.089	-0.017	-19.1
304	0.24	0	25	0.074	0.064	-0.010	-15.6

이다.

셋째, 소성변형률과 가공변질층의 깊이는 선형적 관계가 아니다.

향후의 연구방향은 소성변형률과 가공변질층의 깊이 사이의 비선형관계를 모델링하여 실험치와 비교하고자한다.

참 고 문 헌

1. Kahles, J.F., and Field, M., "Surface Integrity Guidelines for Machining", SME Technical Paper No. IQ71-240, 1971.
2. Park, Y.W., A Model and Empirical Validation of Plastic Deformation in a Machined Surface, Ph.D. Dissertation, The Pennsylvania State University, 1994.
3. Barash, M.M., and Schoech, W.J., "ASemi-Analytical Model of the Residual Stress Zone in Orthogonal Machining", Proceedings of 11th International Machine Tool Design and Research Conference, Vol. A, Pergamon Press, pp. 603-613, 1970.
4. Sedgwick, R.T., "Numerical Modeling of High Speed Machining Processes", ASME PED-Vol. 12, pp. 141-155, 1984.
5. Park, Y.W., Cohen, P.H., and Ruud, C.O., "The Development of a Mathematical Model for Predicting the Depth of Plastic Deformation in a Machined Surface", Materials and Manufacturing Processes, Vol. 8, No. 6, pp. 703-715, 1993.
6. Ramalingam, S., and Black, J.T., "On the Metal Physical Considerations in the Machining of Metals", Journal of Engineering for Industry,

7. SAE, Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction-J784a, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, 1971.

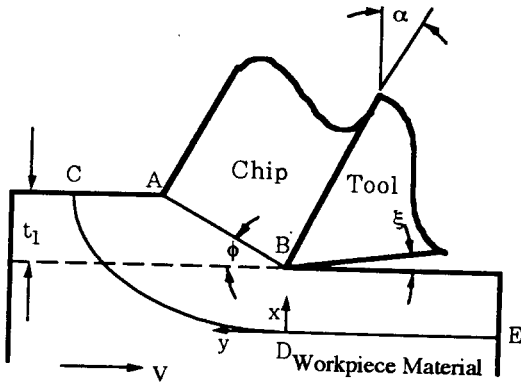


Fig. 1 Proposed Model

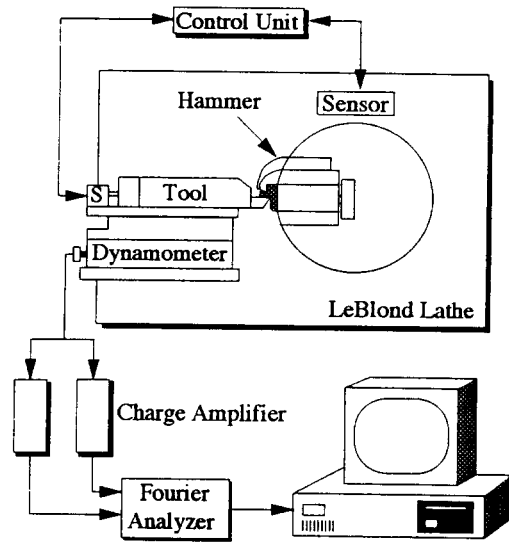


Fig. 4 Experimental Setup

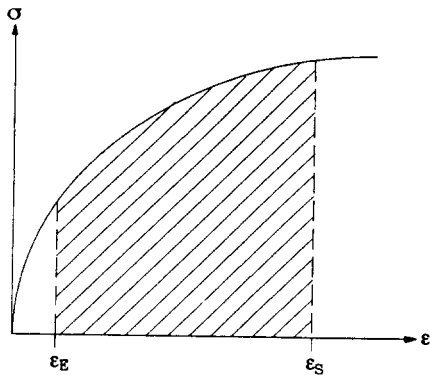


Fig. 2 True Stress-Strain Diagram

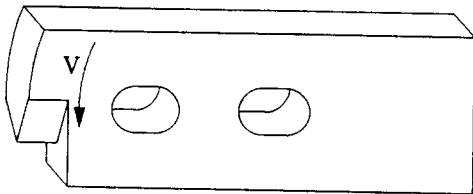


Fig. 3 Workpiece

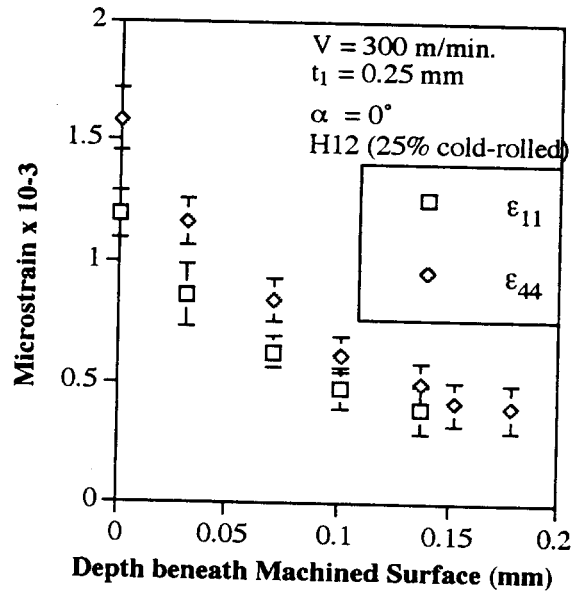


Fig. 5 Microstrain Distribution