

해석적 방법에 의한 절삭 상태 예측에 필요한 유동응력 결정 The Predictive Machining Performance by An analytical method - Determination of flow stress properties

*#이태홍¹, 박정훈², 심풍수³

*T. H. Lee¹ (leeth@wia.co.kr), J. H. Park², P. S. Shim³
^{1 2 3}위아 주식회사 공작기계 연구소

Key words : Flow Stress Properties, Oxley Machining Theory, Cook and Larke Compression Test, Cutting Forces

1. 서론

공작기계의 정강성 해석 또는 절삭 공구 개발을 위한 중요한 정보 가운데는 절삭과정에서 발생하는 절삭저항(절삭력)의 성분 및 절삭열을 정확히 예측부터 시작한다.

절삭력 예측은 가공 동력을 예측하여 제품 생산물 예측과 신 소재의 가공 시 가공 공정 및 가공 조건 수립에 요구되는 비용과 시간을 또한 절약 할 수 있다.

따라서 절삭력, 절삭온도와 공구마모 예측과 같은 절삭 상태 예측 및 절삭가공 이론은 1800년대 후반부터 연구가 시작되어 1930년대 후반에 기초 이론이 정립 되었으며, 지금도 폭 넓게 연구되고 있는 학문이다. 절삭력 예측은 크게 3 가지 방향으로 연구 되고 있다. 하나는 서로 다른 절삭 조건에 의한 절삭실험으로부터 그 데이터를 바탕으로 수학적 통계 방법을 이용하여 표현 한다. 수학적 표현에서의 Unknown Constants and Exponents 는 Curve fitting 에 의해서 결정 할 수 있다. 두 번째는 절삭력은 실험적 상수(Empirical Coefficients)와 미 변형 칩 면적(Uncut Chip Area)의 관계에 의해서 결정 된다. 그러나 이 두 가지 접근 방법은 많은 가공 실험을 통해서 상수와 Exponent 을 결정해야 하므로 비용과 시간이 많이 소비되는 방법들이라 하겠다. 마지막으로 2 차원 또는 3 차원 절삭이론을 바탕으로 가공 재료의 물성치와 절삭 조건의 관계로부터 절삭력 또는 가공 상태를 예측 한다. 2 차원 절삭이론은 1940년대 Ernst 와 Merchant 에 연속 칩에서 전단면 모델(Shear Plane Model)을 바탕으로 하는 절삭 이론을 제시 하였다. 그러나 이 모델은 재료를 이상적인 완전 강 소성체(Idealized Rigid-Perfectly Plastic Material)로 가정하므로 전단면에서 전단응력이 일정 하며 유동응력(Flow Stress) 또한 일정한 경향을 가진다. 그러나 실제 거의 모든 재료들은 각각 가공경화(Strain Harden), 열연화(Thermal Softening), 변형률 속도 효과(Strain Rate effect) 또는 복합적으로 작용한다. 따라서 1960년대 이후 Oxley[1][2]와 그 동료들은 전단영역(Shear Zone Model)에서의 미끄럼 선장법(Slip line field)을 기초로 하여 피삭재의 화학성분, 유동응력과 같은 재료의 물성치와 공구의 기하학 및 절삭조건으로 전단각, 전단응력, 마찰각등을 계산하여 절삭조건에 따른 절삭력 및 절삭온도 등을 예측 하였다. Oxley 의 예측 가공 이론은 3 차원 절삭가공(Oblique Machining)과 2.5 차원 (Semi-Orthogonal Machining) 절삭 가공들을 해석 하고자 하는 연구가 진행 되었다 [3][4]. Oxley 이론의 2 또는 3 차원 절삭이론에 의한 예측방법에는 피삭재의 온도, 변형률 변형률 속도에의 함수인 유동응력 정보가 필수적이다. 그러나 이러한 유동응력 정보를 구하는 일은 상당한 어려움이 있다. 기존의 Oxley 가공 프로그램에서는 0.52% 탄소 성분의 재료에 대해서만 제공되고 있으며, 몇몇 연구자들은 새로운 재료에 대한 Johnson and Cook 공식을 이용하여 유동응력을 구하고 있으나, 이 또한 실험 상수를 구하기 위해서는 시간과 많은 비용이 필요하다 [3][4]. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 극복하고자 간단한 피삭재의 압축실험을 통하여 절삭가공이론에 필요한 유동응력을 유추 하여, 그 정보를 바탕으로 가공 실험 치와 비교 분석 하였다. 가공예측에 필요한 공식

과 모델링 방법은 지면 관계상 생략하였다 (참조문헌 참조).

2. 피삭재의 압축 실험 및 유동응력 결정

본 논문에서는 열처리 하지 않은 AISI D2 (SKD 11)시편을 압축시험 대상으로 하였다. 압축시험에 의한 Stress 와 Stain 은 Cook and Larke 이 제시한 외삽법 (extrapolation)을 이용하였다. 이는 직경(D₀)와 시편 길이(L₀)의 비 (ratio)가 감소 할수록 마찰영향(effect of friction)이 줄어 든다는 이론적 방법이라 하겠다. 압축 시험은 4 개의 시편으로 직경(D₀) 10mm이며, 각각 길이 (L₀) 5,10,15,20 mm 이다. 직경에 대한 길이 비(ratio)는 각각 2.0, 1.0, 1.666 그리고 0.5 이다. 압축 조건은 Instron 8504 universal instrument 압축 시험기로 속도 1mm/min 이며, 최대 220kN 를 적용 하였다.

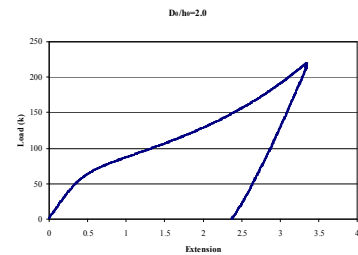
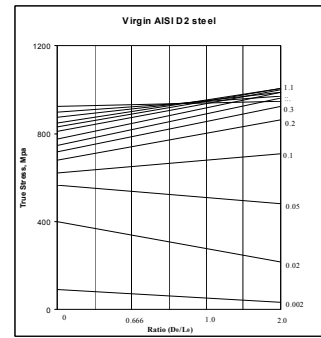
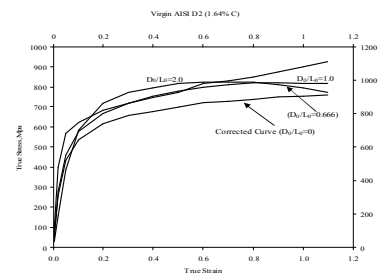


Fig. 1 The result of Compression test for ratio 2.0



(a) Stress versus Strain



(b) Stress versus a diameter to height ratio

Fig.2 Static stress-strain curves for non-heat treated AISI D2 steel using Cook and Larke method

Fig. 1 은 압축 시험 결과를 보여 주고 있다. 지면 관계상 ratio 1.0, 0.666 및 0.5 는 생략 하기로 한다. 여기서 Ratio 0.5 에서의 압축시험은 시편이 지름에 비해서 상대적으로 길어 비 정상적인 결과(편심)가 돌출되어, 사용하지 못하였다. Fig. 2 은 위와 같은 압축 시험을 통하여 유동응력을 유추하는 과정을 보여 주고 있다. Ratio 0.66, 1.0 및 2.0 을 통과하여 Ratio 0 ($D_0/L_0=0$) 에 연장한 지점의 응력 값을 읽는다. 이 응력 값은 마찰영향이 없는 진응력 (True stress) 값이라 한다. Oxley 가공 이론에서는 피삭재의 응력은 다음과 같이 표현한다.

$$\sigma = \sigma_1 \epsilon^n \quad (1)$$

여기서 σ 는 피삭재의 응력은, σ_1 은 $\epsilon=1$ 일 때의 유동응력을 나타낸다. n 은 가공경화 지수이다.

Ratio 0 에서의 응력 값을 Fig 3 에서 보는 바와 같이 log-log 그래프를 이용하여 연선 $\epsilon=1$ 일 때 응력 $\sigma_1=899\text{Mpa}$ 이라는 값을 찾을 수 있으며, 가공 경화 지수 n 은 0.164 이다.

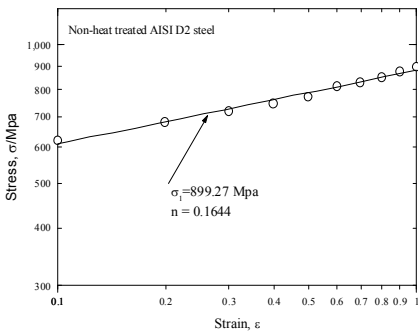


Fig.3 Plot of log stress against log strain for non-heat treated D2 with full line representing the curve $\sigma = \sigma_1 \epsilon^n$

적용 예를 들면, 열처리 AISI D2 steel 과 잘 알 수 없는 비 열처리 AISI D2 응력을 비교 해보자. Fig. 4 에서 와 같이 $\epsilon=1$ 일 때 Johnson and Cook 응력공식에 의한 응력 과 압축 시험을 통한 비 열처리 시편 과 비교하면 약 33 %정도 상온에서 비 열처리 시편 응력이 낮은 것을 볼 수 있다. 여기서 두 재료의 경도(Hardness) 차이는 1/3 정도 차이를 보였다. 따라서 이것을 근거로 가공모델에 적용 가능하다. 여기서 가공 경화 지수 n 의 변화는 온도가 상승 해서 유동 응력 값이 내려가도 지수 n 의 변화는 미비하다 [1] [3]. 따라서 Oxley 절삭가공 모델링에서 열처리 AISI D2 steel 의 유동응력이 비열처리 AISI D2 의 33% 라고 가정한다.

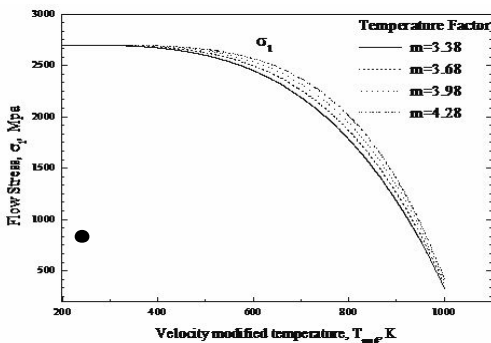


Fig.4 the flow stress value σ_1 for AISI D2 at a strain $\epsilon=1$ derived from the Johnson and Cook constitutive equation for different temperatures; ● - static stress/strain result for non-heat treated D2 steel

3. 절삭력 예측 결과

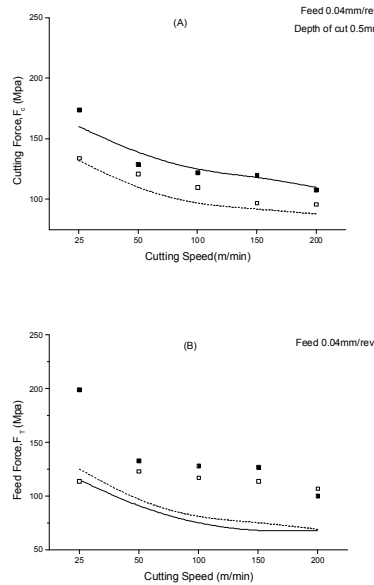


Fig. 5 shows the results of the prediction value in comparison with experimental tests when machining the AISI D2 steel.

Fig.5 는 비 열처리와 열처리한 AISI D2 steel 의 유동응력을 Oxley 가공 이론 Input data 로 사용하여 절삭력과 비교 하였다. Fig. 5 에서 와 같이 주분력 (Cutting Force) 에서 예측 데이터와 실제 가공 데이터가 잘 일치함을 보였다. 이송분력(Feed force)에서는 예측 데이터와 격차가 발생 하는데, 그 이유는 절삭 모델링에서 절삭공구가 완전한 뾰족한 형태라는 가정 때문이다. 따라서 모델링 시 공구의 노즈 반경 및 공구 에지 반경이 고려 되어야 한다. 즉, 공구의 기하학적 정보까지도 고려된다면 이송 분력 예측 데이터가 실제 가공 절삭력 값에 접근 할 것이다[3].

4. 결론

본 논문에서는 Oxley 가공 이론을 이용하여 절삭력 또는 절삭열 등과 같은 절삭상태를 예측하기 위한 중요한 Input data 인 유동응력 유추에 관하여 논하였으며, 실제 가공 데이터와도 비교하였다. 특히 가정된 유동응력 정보를 바탕으로 Oxley 가공 이론 Input data 로 사용하여 절삭력 예측 결과를 도출해내었다.

후기

본 연구는 2008 년도 지식경제부 전략기술개발 사업 IT 부품가공용 고유연성 머시닝센터 개발 (과제번호 10031852-2008-215)에 일부 지원을 받아 발표한 논문임.

참고문헌

1. Oxley P. L. B, Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability, Halsted Press, New York, 1989.
2. P. Mathew and Oxley, P. L. B., Predicting the Effects of very high cutting speeds on cutting forces., Annals of the CIRP, vol.31, pp49, 1982.
3. T.H Lee, An Experimental and Theoretical Investigation for The Machining of Hardened Alloy Steels, Ph.D Thesis, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, the University of New South Wales, NSW, Australia. 2007.
4. T.H Lee and P. Mathew, Experimental and Theoretical Investigation of Machining AISI D2 Hardened Steel with Varying Nose Radius CBN Tools, International Journal of Machining and Machinability of Materials, Vol.2, Issue 2, pp.254~269, 2007.