

절삭력에 의한 공구와 공작물의 상대적 변형량 예측 [1]

Prediction of Relative Deformation between Cutting Tool and Workpiece by Cutting Force [1st paper]

황영국¹, 이춘만^{1,✉}

Young-Kug Hwang¹ and Choon-Man Lee^{2,✉}

¹ 창원대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design and manufacturing, Changwon National University)

✉ Corresponding author: cmlee@changwon.ac.kr, Tel: 055-213-3622

Manuscript received: 2009.12.29 / Revised: 2010.4.15 / Accepted: 2010.6.7

Any relative deformation between the cutting tool and the workpiece at the machining point, results directly in form and dimensional errors. The source of relative deformations between the cutting tool and the workpiece at the contact point may be due to thermal, weight, and cutting forces. Thermal and weight deformations can be measured at various positions of the machine tool and stored in the compensation registers of the CNC unit and compensated the errors during machining. However, the cutting force induced errors are difficult to compensate because estimation of cutting forces are difficult. To minimize the error induced by cutting forces, it is important to improve the machining accuracy. This paper presents the pre-calculated method of form error induced by cutting forces. In order to estimate cutting forces, Isakov method is used and the method is verified by comparing with the experimental results. In order to this, a cylindrical-outer-diameter turning experiments are carried out according to cutting conditions.

Key Words: Form Error (형상 오차), Cutting Force Prediction (절삭력 예측), Turning (선삭가공), Machining Accuracy (가공 정밀도), Relative Deformation (상대 변형량)

1. 서론

일반적으로 기계부품의 가공정도를 나타내며 오차범위를 평가할 수 있는 요소들로서 크게 진직도, 진원도, 원통도와 같은 형상공차와 치수공차 그리고 표면조도 등이 있다. 정밀 절삭 가공을 위해서는 공작기계 변수, 절삭조건 변수, 가공재료 변수 등이 이러한 치수 정밀도, 형상 정밀도 및 표면 거칠기 등 기하학적인 인자에 미치는 영향이 규명되어야 한다.

Fig. 1 은 가공오차에 영향을 미칠 수 있는 변수들을 나타내고 있다.¹ 현재 가공오차와 그에 영향을 미치는 변수들의 상관관계에 대한 연구는 주로

실험을 통해 이루어지고 있다. 그러나 Fig. 1 에 보이는 바와 같이 공작물의 가공오차에 영향을 미치는 변수들은 다양하고, 서로 상호 영향을 미치는 경우가 많으므로 실험을 통해 분석하기 위해서는 많은 비용과 시간이 소모된다.

이에 최근에는 실험을 통하여 직접 가공면을 형성하지 않고 이론적으로 가공오차를 예측하는 연구가 많이 이루어지고 있다. J. M. Zhou 등²은 하드터닝 공정에서 가공오차에 영향을 미치는 인자들에 대해 고찰하고, 가공오차들을 보상하는 방법에 관하여 연구하였다. E. Budak³은 절삭력, 공구와 소재의 구조모델 등을 통합하여 밀링공정에서 형상오차를 예측할 수 있는 해석적 모델에 관하여

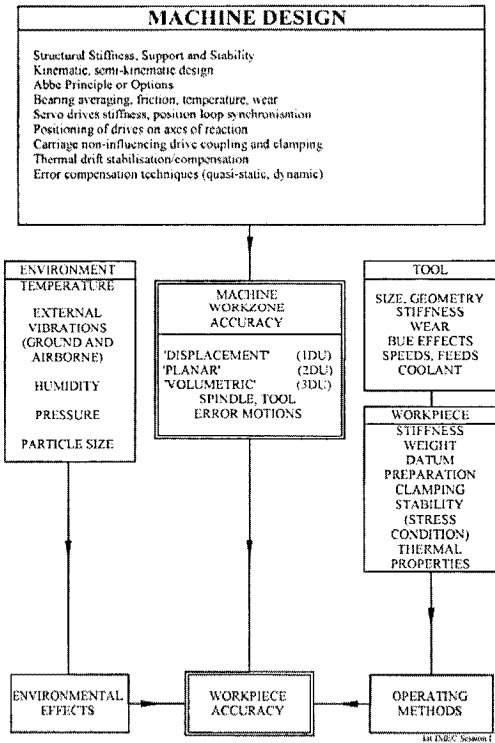


Fig. 1 Factors affecting workpiece accuracy¹

연구하였다. M. Wan 등⁴은 밀링공정에서 정적 형상 오차를 계산할 수 있는 알고리즘에 대하여 연구하였으며, 류시형 등⁵은 엔드밀 가공에서 공구 변형을 고려하여 형상 오차를 예측하는 방법에 대하여 연구하였다.

이들 연구들은 대부분 절삭력을 예측하기 위한 모델과 형상 오차를 예측하기 위한 모델에 대한 연구로 이루어져 있다. 즉, 절삭력을 예측하고, 절삭력에 의한 공구와 공작물의 변형을 계산하여 최종적으로 공작물의 형상오차를 예측하는 연구가 대부분이다. 형상오차를 정확히 예측하기 위해서는 우선 가공조건에 따른 절삭력을 정확히 예측할 수 있어야 한다.

현재 절삭력 예측을 위한 절삭가공 모델링에는 Merchant 전단면 해로 대표되는 단면 형태의 해석적 모델링, DeVor의 힘과 칩 두께의 해석으로 대표되는 기계적인 모델링, Sandstrom의 고속가공 연구로 대표되는 유한요소 모델링 등 다양한 방법들이 보고되고 있다.⁶ 이들 방법에서는 절삭력 예측을 위해 특정 실험계수 값이 필요한 경우가 대부분으로 3차원 절삭의 경우 계산이 복잡하다.

본 연구에서는 선삭가공에 대해 많은 비용과 시간이 소모되는 실험을 통하지 않고 가공정도에 영향을 미치는 요인들 중 절삭력에 의한 공구와 공작물의 상대적 변형량을 예측하는 기존의 방법을 고찰하고, 그 타당성을 확인하고자 한다. 절삭력 예측을 위해서는 실험을 통하지 않고 3차원 절삭에서 절삭력을 손쉽게 예측할 수 있는 Isakov의 방법을 소개하고, 실험을 통하여 그 정확성을 검증하였다. 절삭력에 기인한 형상오차는 원통외경 선삭의 경우에 대해 가공축에 따른 공작물의 변형을 예측하여 유효절삭 깊이를 계산하였다.

2. 절삭력 예측

절삭작업에 소요되는 절삭력 예측은 중요하다. 공작기계를 적절하게 설계하기 위해서는 절삭력에 관한 자료가 필요하다. 즉, 공작기계의 요소부품이 과도하게 변형되지 않고, 진동과 채터를 발생시키지 않으면서 가공품의 치수정확도를 유지하려면 절삭력에 대하여 충분한 강성을 가지도록 설계해야 한다. 또한, 공작물의 치수공차를 유지하려면, 절삭력으로 인해 공작물에 과도한 변형이 생기지 않아야 하므로 절삭력에 대한 자료가 필요하며, 공작기계의 적합한 용량을 선정하기 위해서도 절삭력을 알아야 한다.

본 장에서는 공작물의 과도한 변형에 의한 치수정밀도 저하를 방지하기 위해 절삭력을 예측하고자 한다. 절삭력 예측을 위한 여러 연구결과들 중 Isakov에¹⁰ 의해서 제안된 절삭조건과 피삭재의 종류와 경도를 이용하여 절삭력을 예측하는 방법을 소개하고자 한다. 이 방법은 기존의 기계적 모델, 유한요소 모델에 의한 방법들에 비해 손쉽게 3차원 절삭에서 절삭력을 예측할 수 있는 방법이다.

2.1 Isakov 방법

선삭공정에서 절삭력은 주분력(tangential force, F_t), 배분력(radial force, F_r), 이송분력(feed force, F_f)의 조합이며, 이들은 공구동력계를 통해 정확히 측정할 수 있다.

주분력은 절삭동력의 95% 이상을 소비하고, 주축에서 토크를 발생시킨다. 따라서 절삭공정에서 주분력을 계산하는 것은 대단히 중요하다. Isakov에 따르면 주분력은 식(1)로 계산된다.¹⁰

$$F_t = 60,000dfK_{pa} \text{ [N]} \quad (1)$$

여기서 d 는 mm 로 표시되는 절삭깊이, f 는 mm/rev 로 표시되는 이송량이다. K_{pa} 는 수정 동력 계수(adjusted power constant)로 식(2)로 계산된다.

$$K_{pa} = K_p CC_w \text{ [kW/cm}^3\text{/min]} \quad (2)$$

여기서 K_p 는 피삭재의 정도와 종류 등을 고려한 동력 계수이고, C 는 이송량에 대한 수정계수, C_w 는 공구마모에 대한 수정계수이다.

Isakov 는 실험과 여러 참고문헌 결과를 활용하여 동력 계수(Table A1-A3)와 공구마모에 대한 수정계수(Table A4), 이송량에 대한 수정계수(Table A5)들을 부록과 같이 제시하였다.¹⁰

일반적으로 주분력이 가장 크고 그 다음 이송분력, 배분력 순이다. 이송분력과 배분력을 예측하기 위해 다음과 같은 간단한 추정식(3), (4)가 많이 사용된다.

$$F_f = 0.5F_t \quad (3)$$

$$F_r = 0.25F_t \quad (4)$$

하지만 이 식들의 정확성은 크게 높지 않다. 형상오차 측면에서 절삭력에 의한 공작물의 변형을 정확히 예측하기 위해서는 배분력에 대한 정확한 계산이 중요하다. 이에 Isakov 에 의해 소개된 이송분력과 배분력을 추정하기 위한 식을 소개하고자 한다.

Isakov 는 이송분력과 배분력에 대한 예측의 정확성을 높이기 위해 피삭재를 부록에 나타난 Table A6 와 같이 7 가지로 분류하였다.

피삭재를 7 가지 분류로 세분화 한 후 각 분류를 기준으로 주분력과 이송분력, 주분력과 배분력의 관계에 대하여 Table 1 과 같이 제시하였다.

2.2 Isakov 방법 검증

Isakov 의 식에 의해 계산된 절삭력을 실제 실험값과 비교하여 그 정확성을 확인하고자 한다.

절삭력 측정을 위해 Table 2 와 같은 실험 장치를 사용하였다.

실험에 사용된 시편의 재질은 Al6061 이며, Fig. 2

와 같은 형상과 치수로 가공하여 사용하였다.

절삭공구는 노즈 반경이 0.4mm, ISO 분류로 K10 인 카바이드 인서트(CCGT 120404 FL, TaeguTec)를 사용하였으며, 공구홀더는 외경 선삭용으로 옆날각(approach angle)과 앞날각(end cutting edge angle)이 각각 5° 이고 절입각(entering angle)은 95° 인 홀더를 사용하였다.¹¹

Table 1 Formulas for feed and radial forces versus tangential force¹⁰

Group of work materials	Feed force formula	Radial force formula
1	$F_f=0.460F_t$	$F_r=0.221F_t$
2	$F_f=0.683F_t$	$F_r=0.382F_t$
3	$F_f=0.486F_t$	$F_r=0.269F_t$
4	$F_f=0.532F_t$	$F_r=0.242F_t$
5	$F_f=0.675F_t$	$F_r=0.411F_t$
6	$F_f=0.609F_t$	$F_r=0.373F_t$
7	$F_f=0.429F_t$	$F_r=0.211F_t$

Table 2 Instruments and specifications

Instrument	Company	Specification
Turning machine	HWACHEON	Hi-ECO 10
Dynamometer	Kistler	9257B
Charge amplifier	Kistler	5019



Fig. 2 Dimension of the specimen

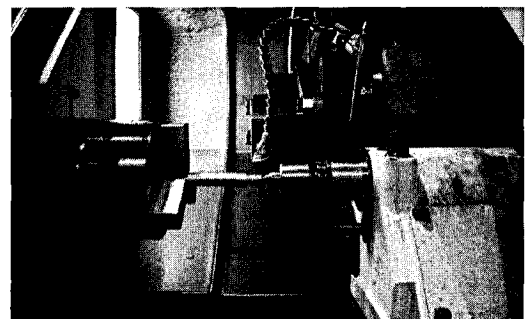


Fig. 3 Experimental set up

Table 4 Experimental conditions

Run order	Cutting speed [m/min]	Feed rate [mm/rev]	Depth of cut [mm]
1	250	0.15	0.5
2	250	0.05	0.5
3	50	0.15	0.5
4	250	0.15	1.0
5	50	0.05	1.0
6	50	0.05	0.5
7	250	0.05	1.0
8	50	0.15	1.0

실험은 Fig. 3 에 보이는 바와 같이 심압대를 이용하여 시편을 고정한 후 Table 4 에 나타난 실험 조건으로 원통의경 선삭을 실시하였다. 공구 마모에 의한 영향을 배제하기 위해 매 실험마다 인서트를 교체하였다.

절삭력은 선반의 공구대 위에 공구를 장착한 공구동력계를 부착하여 측정하였다.

Table 5 Experimental results for cutting forces

Run order	Cutting force [N]		
	F_t	F_r	F_f
1	86.05	43.14	12.7
2	38.17	26.93	7.34
3	82.75	36.79	10.66
4	174.73	49.16	36.55
5	58.7	17.20	14.12
6	32.05	13.35	6.39
7	74.68	29.54	14.21
8	169.07	73.63	37.01

Table 6 Estimated results for cutting force

Run order	Cutting force [N] (error %)		
	F_t	F_r	F_f
1	78 (10.3)	33 (30.7)	16 (20.6)
2	32 (19.3)	14 (92.3)	7 (4.8)
3	78 (6.1)	33 (11.5)	16 (33.4)
4	156 (12)	67 (26.6)	33 (10.7)
5	63 (6.8)	27 (36.3)	13 (8.6)
6	32 (0.2)	14 (4.64)	7 (8.7)
7	63 (18.5)	27 (8.3)	13 (9.3)
8	156 (8.8)	67 (9.9)	33 (12.1)

Table 5 는 실험결과 얻은 주분력, 이송분력, 배분력을 보여주고 있으며, Table 6 은 Isakov 의 방법에 의한 예측값을 나타내고 있다. 본 논문에서 실험한 피삭재의 경우 예측값 계산을 위해 Table 1 의 피삭재 그룹 7 번에 해당된다.

전 실험조건 범위에서 주분력의 경우 19% 오차범위 이내에서 일치하는 것으로 나타났으며, 절삭속도가 고속인 경우가 저속인 경우에 비해 더 큰 오차를 보이는 것으로 나타났다. 배분력의 경우 이송속도가 작은 0.05mm/rev 인 경우는 9.3% 오차범위 이내에서 비교적 잘 일치하였다. 하지만 그 이외의 경우에는 10-30%의 상당히 큰 오차가 발생하였다. 이송분력의 경우는 모든 실험조건 범위에서 오차가 크게 나타났다. 이송분력에 대한 예측값의 신뢰성은 보장할 수 없는 것으로 판단된다.

Isakov 방법의 경우 절삭력 예측에서 절삭속도의 영향은 고려되지 않고, 특정 절삭조건에서는 비교적 큰 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 하지만 소재의 종류와 경도, 절삭조건에 대한 간단한 정보만으로 주분력과 배분력의 경우 상당히 유용한 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

3. 형상오차 예측

절삭점에서 공구와 공작물 사이에 상대적인 변형량은 가공물의 원하는 치수로부터 오차를 유발한다. 즉, 치수형상오차(dimensional form error)의 원인이 된다. 절삭점에서 공구와 공작물 사이의 상대적 변형량이 발생하는 원인으로는 열적인 영향, 절삭부하에 의한 영향, 자중에 의한 영향 등이 있다.

공작기계는 회전하고 이동하는 부품들을 가지고 있으며, 이들 부품들은 마찰에너지에 의해 가열된다. 이때 이들 부품 사이의 온도상승은 열원의 위치, 열팽창 계수 등의 차이에 의해 일정하지 않게 되고, 그 결과 열변형이 발생하게 된다. 또한, 주축계 헤드, 테이블과 같은 가공부의 위치는 공작물에 대한 절삭점의 좌표가 바뀔 때 따라 변하게 된다. 이런 가공부의 무게 중심 변화가 절삭점에서 공구와 공작물 사이의 상대적 변형량이나 전체 시스템의 강성에 영향을 미치게 된다. 이런 열적, 자중에 의한 변형량은 공작기계 테이블이나 주축계 헤드의 다양한 위치에서 측정할 수 있고, CNC 장치의 보상기를 통해 수정될 수 있다. 즉, 공작기계가 운전될 때 발생하는 열적, 자중에 의한 변형

오차는 각 위치에 대한 오차값이 보상기를 통해 읽혀지고 CNC 장치에서 전달되는 추가적인 이동값에 의해 보상할 수 있다.⁷ 하지만, 절삭부하에 기인한 오차는 사전에 정확히 예측하기가 힘들다. 이는 절삭부하가 가공조건, 공구, 공작물 등 다양한 변수들에 영향을 받아 정확히 예측할 수 없기 때문이다. 따라서 현재 절삭부하에 기인한 오차를 줄이기 위해서는 열적, 자중에 의한 오차를 줄이기 위한 방법과 같은 오차보상에 의한 방법보다는 공작기계가 견딜 수 있는 강성 범위내로 절삭력을 줄여 오차를 줄이는 방법이 많이 연구되고 있다.

이에 본 장에서는 선삭공정에서 배분력의 크기가 공구와 공작물 사이의 변형에 얼마만큼의 영향을 미치는지 알아보려고 한다. 이를 위해 배분력에 의한 공작물의 변형량을 예측하는 방법을 소개하고, 앞선 장에서 구한 배분력을 이용하여 형상 오차를 예측해보았다.

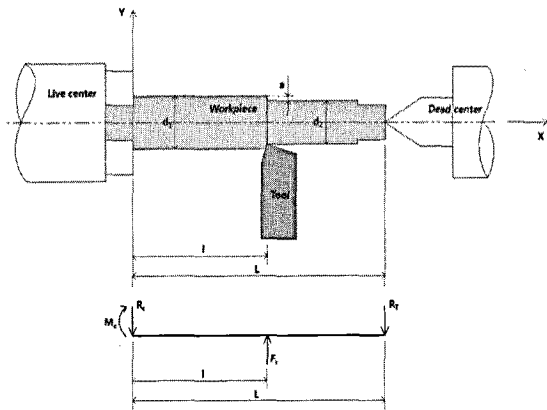


Fig. 4 Form errors in cylindrical turning of a shaft

Fig. 4 는 전형적인 원통외경 선삭공정을 보여주고 있다. 만약 공구가 충분한 옆날각이나 공구선단 반경(nose radius)을 가진다면 선삭공정은 가공면에 수직한 반경방향 힘이 0 이 아닌 3 차원 절삭형상(oblique cutting geometry)을 가진다. 이때 반경방향 힘에 대한 시스템의 유연성은 가공면이 생성되어지는 지점에서 공구와 공작물 사이의 상대적인 변형을 유발시키게 된다.

원통외경 선삭공정의 구조는 심압대로 지지되는 점에서는 핀으로 모델링 하고, 주축의 척(chuck)에서는 굽힘 모멘트를 지지하는 핀으로 모델링 할 수 있다. 주축의 평균 직경은 단순화를 위해 제거된 반경방향 절삭깊이를 고려한 직경으

로 계산할 수 있다. 반경방향 절삭력(F_r)이 척으로부터 l 만큼 떨어진 지점에 작용된다면 축 방향 위치 x 에서 부재의 반경방향 변형량은 식(5)로 구할 수 있다.⁷

$$y(x) = \frac{1}{EI} \left[-\frac{R_c}{6} x^3 + \frac{F_r}{6} (x-l)^3 + \frac{M_c}{2} x^2 \right] \quad (5)$$

여기서 E 는 종탄성계수이고, I 는 작업물의 단면 2 차 단면모멘트이다.

척에서의 반력 R_c 와 굽힘 모멘트 M_c 는 식(6), (7)로 구해진다.

$$R_c = \frac{F_r(L-l)}{2L^3} [3L^2 - (L-l)^2] \quad (6)$$

$$M_c = \frac{F_r l(L-l)(2L-l)}{2L^2} \quad (7)$$

변형량은 공구가 공작물과 접촉하는 지점에서 일어난다. 즉, $x=l$ 지점에서 발생된다. 소재의 경우 공구로부터 반경반향으로 $y(l)$ 양 만큼 변형되게 된다. 이 경우 지령된 절삭깊이가 a 라면 실제 반경방향 절입깊이는 $a-y(l)$ 이 될 것이다. 그러므로 가공된 소재의 반경은 $x=l$ 위치에서 $y(l)$ 만큼 여분의 두께를 가질 것이다. 여기서 공구가 척 쪽으로 움직일 경우 빔의 강성은 변한다. 따라서 가공면에 발생하는 형상 오차는 공작물의 축을 따라 달라지고, 최대 형상 오차는 최대 변형량이 발생하는 공작물의 중간위치에서 발생할 것이다. 최종적으로 가공된 공작물의 경우 더 이상 원통형상이 아닌 배부름 현상(barreling)이 발생될 것이다. 배부름 현상이 발생된 공작물을 한 번 더 외경 선삭가공 할 경우, 유효 절삭깊이는 더 이상 일정하지 않게 되고 축을 따라 변할 것이다. 즉, 식(8)과 같이 변할 것이다.

$$a_{effective} = a + y(l) \quad (8)$$

Fig. 5 는 식(5)-(7)과 앞선 장에서 실험을 통하여 구한 배분력을 사용하여 계산한 공구와 공작물 사이의 상대적 변형량을 나타내고 있다.

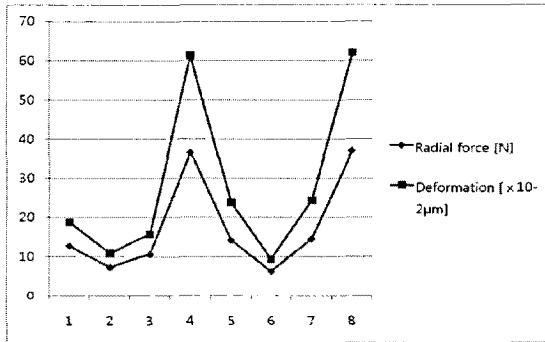


Fig. 5 Results for relative deformation between cutting tool and workpiece

계산결과 가공 전 직경 33mm, 길이 180mm 환봉을 가공할 경우 배분력이 가장 큰 8 번 가공조건인 경우 지령된 절삭깊이에 비해 0.62 μm 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

일반적으로 절삭력의 크기는 절삭깊이에 비례하고, 반경방향 절삭력과 공작물의 강성은 축을 따라 변할 것이므로 Fig. 5 에서 계산한 바와 같이 공구와 공작물 사이의 상대적 변형량에 의한 형상오차가 가공면에 남게 된다. 따라서 정삭공정의 경우 이에 대한 영향을 줄이기 위해 일반적으로 작은 절삭깊이와 이송이 추천된다. 공정계획자는 공작물 중심에서의 강성과 원하는 치수공차를 고려하여 절삭깊이와 이송량을 계산하여야 한다. 본 논문에서 소개한 절삭력 예측방법과 공작물 변형량 계산방법을 이용할 경우 절삭조건 선정에 위한 기본적인 정보를 얻을 수 있을 것이다.

4. 결론

선삭공정에서 공작물의 가공정도를 유지하기 위해서는 절삭력에 의해 공작물에 과도한 변형이 발생되지 않아야 한다. 이런 절삭력에 기인한 형상오차를 줄이기 위해서는 절삭력에 대한 정확한 예측과 함께, 절삭력에 의해 발생하는 공구와 공작물 사이의 상대적 변형량을 예측할 수 있어야 한다. 본 논문에서는 기존에 소개된 이론들 중 실험을 통하지 않고 3 차원 절삭에서 절삭력을 예측할 수 있는 방법과 절삭력에 의한 공구와 공작물 사이의 상대적 변형량을 예측하는 방법을 소개하고, 그 타당성을 확인하였다.

절삭조건, 피삭재의 종류와 정도에 대한 정보

만을 이용하여 절삭력을 예측할 수 있는 Isakov 에 의해 제안된 방법을 소개하고, 실험을 통하여 검증하였다. 소개한 방법의 경우 절삭속도와 이송량이 작은 경우 주분력과 배분력 예측에 유용한 결과를 제공하는 것으로 나타났으며, 이송분력의 경우 그 정확성이 보장되지 않는 것으로 나타났다.

배분력에 의한 공구와 공작물 사이의 상대적 변형량을 예측하는 방법을 소개하고, 계산하였다. 계산결과 배분력이 실제 절삭깊이 변화에 상당한 영향을 미치므로 공정계획자는 주분력뿐만 아니라 배분력도 고려하여 가공조건을 계산하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

본 논문에서 소개한 절삭력 예측방법과 변형량 계산방법을 이용할 경우 초기 절삭조건 선정에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 절삭력에 의한 구조적 변형만을 고려하여 공구와 공작물 사이의 상대적 변형량을 계산하였다. 향후 절삭열에 의한 공구와 공작물의 열팽창을 같이 고려한 계산모델에 대한 연구를 진행할 계획이다. 또한, 절삭력 예측에서 절삭속도에 의한 영향 등을 고려하여 더욱 정확하게 절삭력을 예측할 수 있도록 Isakov 방법의 개선에 대한 연구를 수행할 계획이다.

후 기

이 논문은 2009~2010 년도 창원대학교 연구비와 지식경제부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Dornfeld, D. and Lee, D. E., "Precision Manufacturing," Springer, pp. 37-48, 2007.
2. Zhou, J. M., Andersson, M. and Stahl, J. E., "Identification of cutting errors in precision hard turning process," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 153-154, pp. 746-1750, 2004.
3. Budak, E., "Analytical models for high performance milling. Part 1: cutting forces, structural deformations and tolerance integrity," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, No. 12-13, pp. 1479-1488, 2005.
4. Wan, M. and Zhang, W. H., "Efficient algorithms for

- calculations of static form errors in peripheral milling,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 171, No. 1, pp. 156-165, 2006.
5. Ryu, S. H. and Chu, C. N., “Form error prediction in side wall milling considering tool deflection,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, No. 6, pp. 43-51, 2004.
 6. Trent, E. M. and Wright, P. K., “Metal Cutting,” Butterworth-Heinemann, 2000.
 7. Altintas, Y., “Manufacturing Automation-Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design,” Cambridge University Press, pp. 65-116, 2000.
 8. Shirase, K. and Altintas, Y., “Cutting force and dimensional surface error generation in peripheral milling with variable pitch helical end mills,” International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 36, No. 5, pp. 567-584, 1996.
 9. Yum, Y. H., “Metal Cutting Principles of Machine Tools,” Dongmyungsa, 2004.
 10. Isakow, E., “Engineering Formulas Metalcutting,” Industrial Press, 2004.
 11. TaeguTec LTD., “Catalogue-Turning Application,” 2003.

부 록

Table A1 Power constants, K_p for cast irons, using sharp cutting tools

AISI Grades	Brinell Hardness	K_p [kW/cm ³ /min]
Gray cast irons	100-120	0.0127
	120-140	0.0159
	140-160	0.0173
	160-180	0.0237
	180-200	0.0273
	200-220	0.0323
	220-240	0.0414
Malleable cast irons	150-175	0.0191
	175-200	0.0259
	200-250	0.0373
	250-300	0.0537

Table A2 Power constants, K_p for carbon steels, using sharp cutting tools (AISI resulfurized, free-machining grades)

AISI Grades	Brinell Hardness	K_p [kW/cm ³ /min]
1108, 1109, 1110, 1115, 1116, 1117, 1118, 1119, 1120, 1125, 1126, 1132.	100-120	0.0187
	120-140	0.0191
	140-160	0.0200
	160-180	0.0218
	180-200	0.0228
1137, 1138, 1139, 1140, 1141, 1144, 1145, 1146, 1148, 1151	180-200	0.0232
	200-220	0.0250
	220-240	0.0259
	240-260	0.0282

Table A3 Power constants, K_p for alloy steels, using sharp cutting tools

AISI Grades	Brinell Hardness	K_p [kW/cm ³ /min]
Medium-carbon alloy steels, carburizing alloy steels: 4130, 4320, 4615, 4620, 4626, 5120, 8615, 8617, 8620, 8622, 8625, 8630, 8720.	140-160	0.0255
	160-180	0.0268
	180-200	0.0282
	200-220	0.0296
	220-240	0.0318
	240-260	0.0337
	260-280	0.0350
	280-300	0.0364
	300-320	0.0378
	320-340	0.0405
Carburizing alloy steels, medium-carbon alloy steels:	140-160	0.0282
	160-180	0.0296
	180-200	0.0314
4023, 4024, 4027, 4028, 4032, 4037, 4042, 4047, 4137, 4140, 4142, 4145,	200-220	0.0328
	220-240	0.0346
	240-260	0.0364
	260-280	0.0382

4147, 4150, 4340, 4640, 4815, 4817, 4820, 5130, 5132, 5135, 5140, 5145, 5150, 6118, 6150, 8637, 8640, 8642, 8645, 8650, 8740.	280-300 300-320 320-340 340-360	0.0396 0.0414 0.0437 0.0455
Manganese alloy steels: 1330, 1335, 1240.	160-180 180-200	0.0359 0.0378

Table A6 The work materials groups

Groups	
1	All steels with Brinell hardness range of (80-280) HB.
2	All steels (280-400) HB. Hard brass, and bronze
3	Gray cast irons (100-240) HB. Medium brass, and bronze
4	Ductile and malleable cast irons (150-300) HB.
5	Titanium alloys (275-340) HB.
6	Nickel-based and cobalt-based high temp. alloys (165-375) HB.
7	Aluminum alloys (100-150) HB. Copper alloys: soft and leaded brass

Table A4 Tool wear factors, C_w , for power constant adjustment

Type of operation	C_w
Finish turning (light cuts)	1.1
Normal rough and semi-finish turning	1.3
* In a sharp cutting edge, the tool wear factor = 1.0	

Table A5 Feed factors, C, for power constant adjustment

Feed rate [mm/rev]	C	Feed rate [mm/rev]	C
0.02	1.70	0.35	0.97
0.05	1.40	0.38	0.95
0.07	1.30	0.40	0.94
0.10	1.25	0.45	0.92
0.12	1.20	0.50	0.90
0.15	1.15	0.55	0.88
0.18	1.11	0.60	0.87
0.20	1.08	0.70	0.84
0.22	1.06	0.75	0.83
0.25	1.04	0.80	0.82
0.28	1.01	0.90	0.80
0.30	1.00	1.00	0.78
0.33	0.98	1.50	0.72