

절삭력을 이용한 엔드밀링 공정의 실시간 축방향 및 반경방향 절삭깊이 추정

Real-Time Estimation of Radial and Axial Depth of Cuts in End Milling Using the Cutting Forces

김승철*(한양대학교 대학원), 정성중(한양대학교 기계공학부)

S.C. Kim(Hanyang Univ. Graduate School), S.C. Chung(Hanyang Univ.)

Abstract

If the on-line cutting conditions (e.g. speed, feedrate, radial and axial depth of cuts) can be identified in an end milling process, much information about cutting forces will be estimated from the cutting force model. Therefore, those estimated conditions can be applied to monitoring and control areas. In this paper, a real-time estimation algorithm for radial and axial depth of cuts is studied in end milling using the averaging cutting forces per tooth. The analytical estimation models of depth of cuts are derived from the geometric cutting force model. The validity of the estimation models is verified on a horizontal machining center through the experiments in various cutting conditions.

1. 서론

절삭가공에 대한 연구에 있어서 궁극적인 목적은 작업자의 감독이나 도움 없이도 다양한 종류의 원하는 가공을 수행할 수 있도록 자동 조절되는 무인 가공시스템의 개발이다. 이를 실현하기 위해서는 절삭공정의 적응제어 및 상태감시에 대한 해석적 모델의 개발이 중요하다. 그리고 이러한 목적은 현재의 절삭조건 및 상태를 판단하여 적절하게 절삭조건을 조절함으로써 이루어질 수 있다. 여기서 절삭조건 중 회전속도와 이송속도는 엔코더를 가지고 실시간으로 측정할 수 있

지만 반경방향과 축방향의 절삭깊이는 현실적으로 실시간으로 측정할 수 있는 수단이 없으므로 간접적인 추정 방법이 필요하다. 특히 절삭깊이는 절삭력과 더불어 가공상황에 따라 수시로 변하는 값으로서 현재의 공작물과 공구의 가공상태를 추정할 수 있게 하는 중요한 인자가 된다.

절삭깊이는 공구 상태감시 시스템에서 공구 파손과 마멸 등의 이상상태를 판단하는 한계값(threshold)의 설정에 중요한 인자가 되며,⁽¹⁾ 적응제어 시스템에 있어서는 가공오차의 추정에 유용한 정보를 제공함으로써 기준 절삭력을 설정할 수 있도록 도와준다.⁽²⁾ 이와 같이 엔드밀링에서 공작물과 공구형상이 결정되어 있고, 회전속도와 이송속도가 측정되고, 절삭깊이를 알 수 있다면, 기하학적 절삭력 모델로부터 다양한 절삭분력에 대한 정보를 추정할 수 있으므로⁽³⁾ 실시간으로 추정된 절삭깊이는 여러 가지 응용에 적용될 수 있을 것이다.

절삭력은 주어진 절삭조건과 공구형상에 대한 가공 결과를 반영하므로 역으로 절삭력으로부터 절삭깊이를 추정할 수 있을 것이다. Altintas와 Yellowley⁽⁴⁾는 이송방향과 수직방향의 평균절삭력 차와 준평균 절삭합력의 비에 대한 다항식으로 반경방향 및 축방향 절입비를 나타냄으로써 정면밀링에서의 절삭깊이를 추정하였다. 그러나 미리 이송속도에 따른 시험절삭을 통하여 다항식의 계수를 구해야 한다. Altintas와 Yellowley⁽¹⁾는 순각적인 절삭력의 평균제곱값과 준평균 절삭합력의 제곱값의 비로부터 반경방향 절입비를 추정

하는 모델을 제시하여 공구 파손에 적용하였다. 최종근, 양민양⁽²⁾은 엔드밀링 공정에서 절삭력의 형태 변화 주기를 측정하여 반경방향과 축방향의 절삭깊이를 추정하여 가공오차를 예측하였다. 황지홍등⁽⁵⁾은 정면밀링에서 이송방향과 수직방향 절삭분력의 비와 반경방향 절입비 및 비절삭계수와와의 관계식을 유도하여 반경방향 절입비를 추정하였다. 이와 같이 절삭깊이는 가공조건에 따라 변하는 절삭력의 크기와 형태로부터 추정될 수 있다. 그러나 절삭분력의 정적 신호뿐만 아니라 동적 변화까지 필요한 경우에는 절삭력 측정을 위하여 공구동력계가 사용되어야 하므로 실용성에서 제한을 받게 된다.

본 연구에서는 엔드밀링 공정에 대한 기하학적 절삭력 모델을 바탕으로 절삭깊이와 평균절삭분력들과의 관계식을 유도하고, 이 관계식으로부터 추정되는 두 가지의 평균절삭분력을 이용하여 반경방향과 축방향의 절삭깊이를 추정할 수 있는

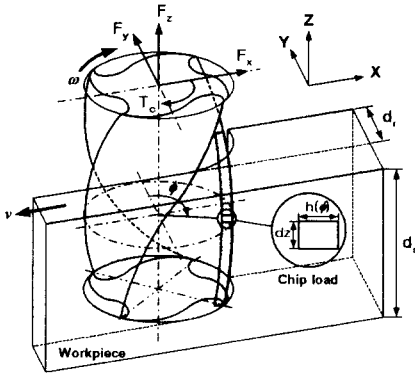


Fig. 1 Cutting forces in peripheral end milling process

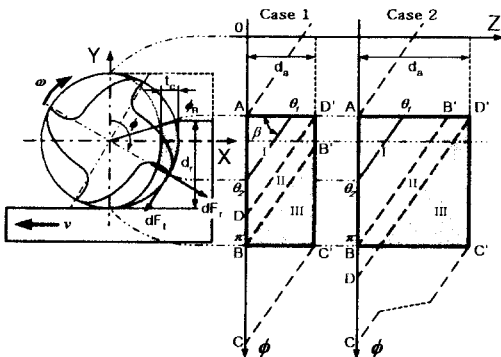


Fig. 2 Cutting mechanism of end milling process

모델을 제시하고자 한다. 이와 같이 평균절삭력을 가지고 절삭깊이를 추정할 수 있는 모델은 모터전류에 의해 간접적으로 추정되는 절삭력을 이용할 수 있으므로 실제 적용이 용이하다. 그리고 이송속도와 반경방향 및 축방향 절삭깊이 등의 절삭조건을 변화시키면서 절삭실험을 수행하여 제시된 추정 모델의 타당성을 검증하였다.

2. 엔드밀링의 절삭력 모델

2.1 평균절삭력 모델

Fig. 1은 측면 하향 엔드밀 공정에서 공구로부터 생성되는 절삭력을 보인 것이다. F_y 는 공구휨에 의한 공작물 가공오차에 영향을 미치는 수직분력이고, F_x 는 이송분력, T_c 는 절삭토크이다. 이러한 절삭분력은 어느 한 순간의 공구회전각위치에서 개개의 절삭날의 미소절삭날에 작용하는 절입부하(chip load)를 적분하여 구할 수 있다.

한 순간의 미소절삭날에 작용하는 절삭력은 다음과 같이 접선방향 절삭분력 dF_t , 반경방향 절삭분력 dF_r , 그리고 축방향 절삭분력 dF_a 로 분해하여 순간 절입부하영역과 비절삭계수의 함수로 표현할 수 있다.

$$dF_t = K_s h(\phi) dz$$

$$dF_r = r_1 dF_t \quad (1)$$

$$dF_a = r_2 dF_t$$

여기서, $dz = (R/\tan\beta)d\phi$ 는 미소절삭날의 축방향 칩두께이며, 비절삭계수인 K_s , r_1 , r_2 는 일반적으로 실험을 통하여 구해지는 평균칩두께 t_a 의 함수로 나타낼 수 있다. 또한, 공구회전속도가 이송속도에 비해 충분히 크다면 순간칩두께 $h(\phi)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$h(\phi) = t_c \sin\phi \quad (2)$$

여기서, t_c 는 절삭날당 이송거리이다.

하향절삭에서 이송, 수직 및 축방향의 각 순

간 절삭분력 dF_x , dF_y , dF_z 는 좌표변환에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} dF_x(\phi) &= dF_t \cos \phi + dF_r \sin \phi \\ dF_y(\phi) &= -dF_t \sin \phi + dF_r \cos \phi \quad (3) \\ dF_z(\phi) &= dF_a \end{aligned}$$

한 순간 기준 절삭날 밑단의 회전각위치를 ϕ 라고 하면 이때 절삭날이 절삭에 참여하는 영역은 $[\theta_1, \theta_2]$ 가 된다. (Fig. 2 참조) 그러므로 한 날에 대한 절삭력은 식 (3)을 이 영역으로 적분하여 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{ti}(\phi) &= K \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \tau d\tau = KC_i(\phi) \\ F_{xi}(\phi) &= K \int_{\theta_1}^{\theta_2} (\sin \tau \cos \tau + r_1 \sin^2 \tau) d\tau \quad (4) \\ &= K\{A_i(\phi) + r_1 B_i(\phi)\} \\ F_{yi}(\phi) &= K \int_{\theta_1}^{\theta_2} (-\sin^2 \tau + r_1 \sin \tau \cos \tau) d\tau \\ &= K\{-B_i(\phi) + r_1 A_i(\phi)\} \\ F_{zi}(\phi) &= Kr_2 \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \tau d\tau = Kr_2 C_i(\phi) \end{aligned}$$

여기서, $A_i(\phi) = 0.25\{\cos(2\theta_1) - \cos(2\theta_2)\}$,
 $B_i(\phi) = 0.5[\theta_2 - \theta_1 - 0.5\{\sin(2\theta_2) - \cos(2\theta_1)\}]$,
 $C_i(\phi) = \cos \theta_1 - \cos \theta_2$, $K = K_s R t_c / \tan \beta$ 이며,
 절삭깊이에 따른 적분구간을 Table 1에 도시하였다. R_r 는 반경방향 절입비, R_a 는 축방향 절입비이다. 그리고 절삭날의 개수가 N 일 때 공구에 작용하는 절삭력은 임의의 회전각위치에서 각 절삭날에 작용하는 절삭력의 합으로 얻어진다.

$$\begin{aligned} F_t(\phi) &= \sum_{i=1}^N F_{ti}(\phi) = KC(\phi) \quad (5) \\ F_x(\phi) &= \sum_{i=1}^N F_{xi}(\phi) = K\{A(\phi) + r_1 B(\phi)\} \\ F_y(\phi) &= \sum_{i=1}^N F_{yi}(\phi) = K\{-B(\phi) + r_1 A(\phi)\} \\ F_z(\phi) &= \sum_{i=1}^N F_{zi}(\phi) = Kr_2 C(\phi) \end{aligned}$$

Table 1 Contact ranges of tooth of end mill

$R_r = \frac{d_r}{R}$	$\phi_r = \cos^{-1}(R_r - 1)$, $\phi_a = R_a \tan \beta$		
$R_a = \frac{d_a}{R}$	$\phi_A = \phi_r$, $\phi_B = \pi$, $\phi_D = \phi_r + \phi_a$, $\phi_C = \pi + \phi_a$		
	Phase	Ranges of ϕ	Interval of integration [$\theta_1(\phi)$, $\theta_2(\phi)$]
Case 1 $\phi_r + \phi_a \leq \pi$	I	$[\phi_A, \phi_D]$	$[\phi_r, \phi]$
	II	$[\phi_D, \phi_B]$	$[\phi - \phi_a, \phi]$
	III	$[\phi_B, \phi_C]$	$[\phi - \phi_a, \pi]$
Case 2 $\phi_r + \phi_a > \pi$	I	$[\phi_A, \phi_B]$	$[\phi_r, \phi]$
	II	$[\phi_B, \phi_D]$	$[\phi_r, \pi]$
	III	$[\phi_D, \phi_C]$	$[\phi - \phi_a, \pi]$

각 절삭분력에 대한 절삭날당 평균은 절삭영역 $[\phi_A, \phi_C]$ 에 대한 전체 절삭력을 절삭날 주기 $\phi_N = 2\pi/N$ 으로 나누어 구할 수 있다.

$$F_{ave} = \frac{1}{\phi_N} \int_{\phi_A}^{\phi_C} F_i(\phi) d\phi \quad (6)$$

즉, 평균절삭분력은

$$\begin{aligned} F_{at} &= KR_a C_r \\ F_{ax} &= KR_a (A_r + r_1 B_r) \quad (7) \\ F_{ay} &= KR_a (-B_r + r_1 A_r) \\ F_{az} &= Kr_2 R_a C_r \end{aligned}$$

$$C_r = \frac{\tan \beta}{\phi_N} R_r, \quad A_r = \frac{\tan \beta}{2\phi_N} (R_r^2 - 2R_r)$$

$$B_r = \frac{\tan \beta}{2\phi_N} \{(R_r - 1)\sqrt{2R_r - R_r^2} - \phi_r + \pi\} \text{이다.}$$

이와 같이 엔드밀링에서 절삭날당 평균절삭력은 반경방향과 축방향 절입비와 비절삭계수의 관계식으로 표현된다.

2.2 비절삭계수 규명

식 (7)에서 절입비와 평균절삭력과 해석적인 모델을 얻기 위해서는 비절삭계수에 대한 값을 알아야 한다. 일반적으로 비절삭계수는 평균 칩두께 t_a 의 함수로 주어진다.

$$t_a = \int_{\phi_A}^{\phi_B} h(\phi) d\phi / (\phi_B - \phi_A) = \frac{t_c R_r}{\pi - \phi_r} \quad (8)$$

두께 16mm인 SB40 공작물과 지름 16mm, 절삭날이 4개인 고속도강에 대하여 회전속도를 600rpm으로 고정시키고, 이송속도와 반경방향 절입비를 변화시켜가면서 엔드밀링 실험을 수행하였다. 그리고 절삭날당 이송거리 0.1042, 0.2083, 0.2333, 0.4167 그리고 0.4667mm/tooth에 대하여 평균칩두께에 따른 비절삭계수들의 변화를 Fig. 3에 도시하였다. 비절삭계수들은 실험 결과로부터 식 (7)을 이용하여 최소오차자승법으로 구해진다. 그리고 다음과 같이 평균칩두께에 대한 지수함수로 비절삭계수의 모델을 얻을 수 있다. Table 2는 각 비절삭계수 모델의 변수이다.

$$K_s = k_s t_a^{p_s}, \quad r_1 = k_1 t_a^{p_1}, \quad r_2 = k_2 t_a^{p_2} \quad (9)$$

3. 절삭깊이 추정 모델

식 (7)과 (9)로부터 두 가지의 평균절삭력을

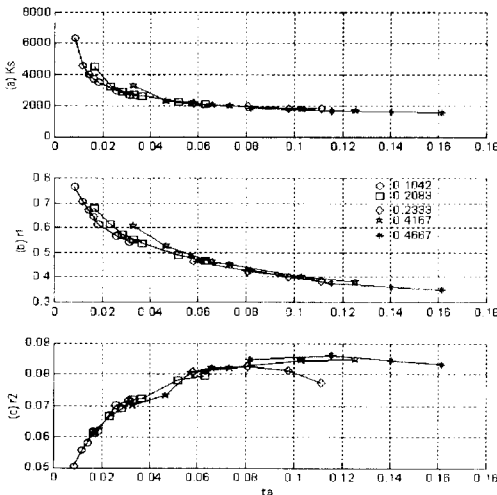


Fig. 3 Cutting force coefficients for average chip thickness

Table 2 Parameters of cutting force coefficients

	K_s	r_1	r_2
k	646.08	0.2201	0.1244
p	-0.4362	-0.2667	0.1702

측정하면 반경방향과 축방향 절입비를 추정할 수 있다. 평균절삭력은 직접 공구동력계에 의해 측정하는 경우와 구동모터전류에 의해 간접적으로 측정하는 경우가 있다. 일반적으로 직접 공구동력계를 사용한다면 F_{ax} , F_{ay} , F_{az} 가 측정가능하고, 절삭토크로부터 F_{az} 를 측정할 수 있다. 그러므로 직접 절삭력을 측정할 수 있다면 임의의 두 가지 절삭력으로부터 절입비를 추정할 수 있다. 그러나 구동모터전류에 의해 절삭력을 추정하는 경우, 이송모터전류에 의해서는 이송방향 절삭분력 F_{ax} 만을 추정할 수 있고, 주축모터전류에 의해서는 접선방향 절삭분력 F_{az} 를 추정할 수 있으므로 이 두 절삭분력을 가지고 절입비를 추정한다.⁽³⁾

3.1 반경방향 절삭깊이 추정

F_{ax} , F_{ay} 에 의한 반경방향 절입비 추정

식 (7)로부터 이송분력을 절삭합력으로 나누어 축방향 절입비를 제거하면 반경방향 절입비와 이송속도에 대한 관계식을 얻을 수 있다.

$$f_x = \frac{F_{ax}}{\sqrt{F_{ax}^2 + F_{ay}^2}} = \frac{A_r + r_1 B_r}{\sqrt{(1 + r_1^2)(A_r^2 + B_r^2)}} \quad (10)$$

이 식은 R_r 에 대한 비선형 함수로 f_x 와 t_c 에 대하여 해석적으로 풀 수 없다. 그러므로 R_r 을 f_x 에 대한 다항식으로 나타내고, 이 다항식의 계수를 t_c 에 대한 다항식으로 표현함으로써 반경방향 절입비 추정 모델을 구하였다.

$$R_r = a_0 + a_1 f_x + a_2 f_x^2 + a_3 f_x^3 + a_4 f_x^4 + a_5 f_x^5$$

$$a_i = b_{0i} + b_{1i} t_c + b_{2i} t_c^2 + b_{3i} t_c^3 + b_{4i} t_c^4 + b_{5i} t_c^5 \quad (11)$$

t_c 에 대한 a_i 의 변화는 매우 복잡하기 때문에 저차의 다항식으로 전체 구간을 표현할 수 없다. 그래서 절삭날당 이송거리 0.08mm/tooth를 기준으로 분리하여 Table 3과 같은 다항식의 계수를 구하였다.

Table 3 Model parameters for R_r estimation
(Up : $t_c \geq 0.08\text{mm/tooth}$, Down: $t_c \leq 0.08\text{mm/tooth}$)

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
a_0	1.0025	3.4923	-11.623	21.686	-20.461	7.5984
	0.48209	35.217	-949.34	15433	-131787	453367
a_1	1.9136	-0.19059	-0.06742	0.72142	-0.99634	0.44387
	1.6708	18.147	-617.33	10869	-96461	339318
a_2	0.25847	-3.5744	12.287	-23.303	22.155	-8.2614
	0.69838	-27.238	644.45	-9779.0	80459	-270859
a_3	-0.39152	-0.54253	1.7496	-4.1310	4.5050	-1.8290
	-0.01002	-23.504	641.61	-9802.3	78650	-257044
a_4	-0.21953	0.16053	-4.1888	9.6520	-9.7718	3.7465
	-0.03118	-24.362	1024.9	-20092	188567	-685683
a_5	-0.00415	-1.3243	2.0759	-2.1582	1.2153	-0.27103
	-0.32220	22.946	-816.17	14382	-127382	447205

F_{ax}, F_{at} 에 의한 반경방향 절입비 추정

이 경우도 접선방향 절삭분력으로 이송분력을 나누어 축방향 절입비를 제거하면 반경방향 절입비와 이송속도에 대한 관계식을 얻을 수 있다. 그러므로 앞과 같은 다항식 모델로 반경방향 절입비를 추정할 수 있다.

$$f_{xt} = \frac{F_{ax}}{F_{at}} = \frac{A_r + r_1 B_r}{C_r} \quad (12)$$

위의 절입비 추정 모델의 정확도를 확인하기 위하여 모델 규명에 사용한 실험결과를 가지고 역으로 절입비 추정을 평가한 결과 10% 이내의 오차를 확인할 수 있었다.

3.2 축방향 절삭깊이 추정

식 (11)에 의해 추정된 반경방향 절입비를 식 (7)에 적용하면 축방향 절입비를 추정할 수 있다.

$$R_a = \frac{F_{ax}}{K(A_r + r_1 B_r)} = \frac{F_{ay}}{K(-B_r + r_1 A_r)} \quad (13)$$

4. 실험장치

Fig. 4는 절삭깊이 추정을 위한 실험장치의 개략도이다. 실험에 사용된 머시닝센터는 통일중공업의 수평형 MCH-5F이며 FANUC 15MA가 장착되어 있다. 절삭력 측정은 Kistler사의 공구동력계

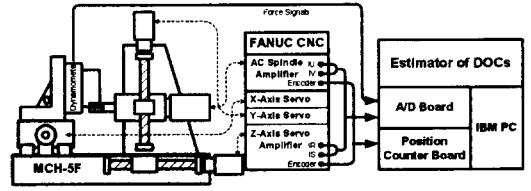


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup

를 이용하였으며, 각 축의 이송속도 및 주축 회전속도는 모터에 연결된 엔코더 신호로부터 위치 측정정보를 이용하여 측정한다. 또한 모터의 전류신호는 서보앰프의 체크단자에서 A/D 보드를 이용하여 직접 측정한다. 그리고 주축모터의 엔코더 신호로부터 회전수와 동기된 날당 평균절삭력을 계산할 수 있도록 하였다.

5. 실험결과

반경방향과 축방향 절삭깊이 추정 모델의 타당성 검증 실험은 비절삭계수 규명실험과 동일한 공작물과 공구를 가지고 수행하였다. 공구회전속도를 600rpm으로 일정하게 유지시키고, 이송속도와 반경방향 및 축방향 절삭깊이를 변화시키면서 절삭실험을 수행하여 추정된 절삭깊이를 평가하였다.

Fig. 5는 절삭날당 이송속도가 0.1042mm/min, 축방향 절삭깊이가 16mm로 일정하게 유지되고, 반경방향 절삭깊이가 1mm에서 8mm로 연속적으로 변할 때 평균절삭력에 의한 절삭깊이를 추정한 결과이다. 절삭깊이의 추정에 절삭날당 평균절삭력을 사용하므로 공구가 공작물에 진입하거나 나오는 순간은 절삭공정의 동적인 특성이 반영되므로 추정오차가 크게 발생함을 볼 수 있다. 그러나 반경방향 절삭깊이가 완만하게 변하는 경우에는 추정 결과가 10% 이내에서 아주 잘 일치함을 보이고 있다.

Fig. 6은 절삭날당 이송속도 0.2083mm/min, 반경방향 절삭깊이가 2mm로 일정하게 유지하면서, 축방향 절삭깊이를 6, 11, 16mm로 변화했을 때의 실험 결과이다. 이 결과도 Fig. 5와 동일하게 축방향 절삭깊이의 변화에 대해서도 10%이내에서 추정할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 축방향 절삭깊이를 2mm로 일정하게 하고, 반경방향 절삭깊이가 1.5mm에서 8mm로 연속

적으로 변할 때 이송속도를 1000(0.4167), 500(0.2083) 그리고 250(0.1042)mm/min(mm/tooth)로 가변시켜 추정 모델의 신뢰성을 확인하였다. 이 실험

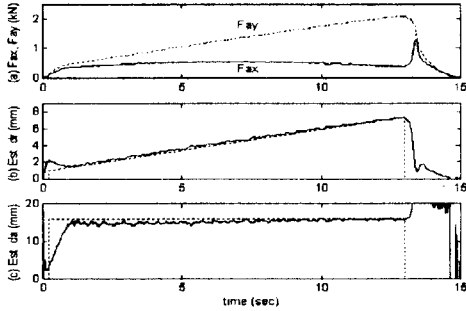


Fig. 5 Estimations for various radial immersion ratios (600rpm, feed 0.1042mm/tooth, $d_a=16\text{mm}$, $d_r=1\sim 8\text{mm}$)

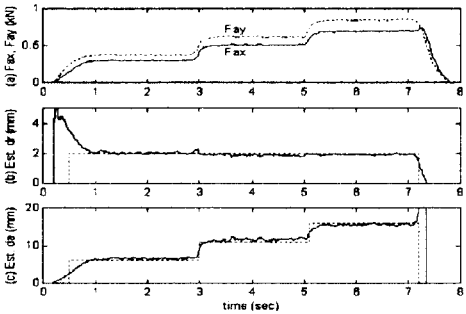


Fig. 6 Estimations for various axial immersion ratios (600rpm, feed 0.2083mm/tooth, $d_a=6, 11, 16\text{mm}$, $d_r=2\text{mm}$)

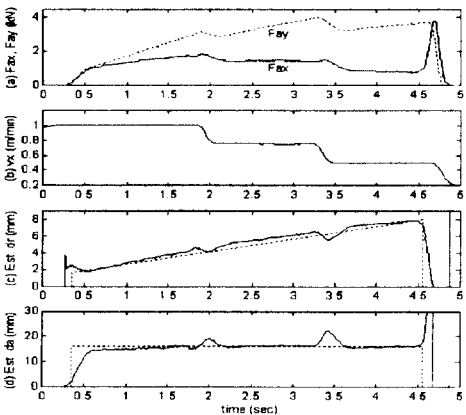


Fig. 7 Estimations for various radial immersion ratios and feed (600rpm, feed 0.4167, 0.2083, 0.1042mm/tooth, $d_a=2\text{mm}$, $d_r=1.5\sim 8\text{mm}$)

결과도 절삭조건이 완만하게 변하는 경우는 추정결과와 실제값이 잘 일치함을 볼 수 있다. 그러나 이송속도가 순간적으로 크게 변하는 경우는 이송계 속도제어기 및 절삭공정의 동적특성의 영향으로 오차가 다소 크게 나타난다.

이와 같이 엔드밀링 절삭공정에서 절삭날당 평균절삭력을 이용하여 경우에는 완만한 절삭조건의 변화에 대하여 10% 오차범위 이내에서 실시간으로 반경방향과 축방향의 절삭깊이를 추정할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 엔드밀링 절삭공정에서 절삭날당 평균절삭력을 이용하여 실시간으로 반경방향과 축방향 절삭깊이를 추정할 수 있는 해석적 모델을 제시하고, 다양한 절삭조건의 변화에 대한 실험을 수행하여 추정 모델의 타당성을 확인하였다. 실험을 통하여 완만한 절삭조건의 변화에 대하여 10% 오차범위 이내에서 실시간으로 반경방향과 축방향의 절삭깊이를 추정할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Y. Altintas, I. Yellowley, 1989, "In-Process Detection of Tool Failure in Milling Using Cutting Force Models", Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, pp.149-157.
- (2) 최종근, 양민양, 1998, "엔드밀 가공중 절입깊이의 실시간 추정을 이용한 가공오차 예측", 한국정밀공학회지, 제15권 제2호, pp.114-123.
- (3) 김승철, 정성중, 1998, "밀링공정에서 이송모터와 주축모터의 전류를 이용한 절삭력 추정", 대한기계학회논문집 A권, 제22권 제11호, pp.2029-2038.
- (4) Y. Altintas, I. Yellowley, 1987, "The Identification of Radial Width and Axial Depth of Cut in Peripheral Milling", Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 27, No. 3, pp.367-381.
- (5) 황지홍, 오영탁, 권원태, 주종남, 1999, "정면밀링에서 절삭력을 이용한 반경방향 절입비의 실시간 추정", 한국정밀공학회지, 제16권 제8호, pp.178-184.