

4 날 엔드밀 가공시 런아웃 모델링과 측정 방법

이기용#, 이동규*, 이근우*, 박진호*, 김정석**

Runout Modeling and Measurement Method in 4-flutes End Milling

Ki-Yong Lee#, Dong-Kyu Lee*, Kune-Woo Lee*, Jin-Ho Park*, Jeong-Suk Kim**

ABSTRACT

Runout causes severe differences among cutting force waveforms due to changes of rotational radii. Thus a runout model must be included in a cutting force model to simulate cutting force accurately. In this paper, a runout modeling method and a measurement method using a dialgauge were developed, which were easy to apply. To calculate runout parameters, a computer program algorithm which obtained runout parameters from measurement values was developed. Cutting force waveforms simulated from cutting force model considering runout effect and measured from experiments had good agreements for their wave size and order.

Key Words : Runout model (런아웃 모델), Cutting force waveform (절삭력 파형), Runout parameter (런아웃 파라미터), Simulation (시뮬레이션), Rotational radius (회전반경)

기호설명

- R = geometric tool radius
- $R(k)$ = k th rotational radius of tool flutes
- ρ = runout offset
- λ = runout phase angle
- $D_1 \sim D_4$ = difference among rotational radius
- α_{hx} = helix angle of the tool
- z : height from tool end position

1. 서론

최근 고품질 제품이 요구됨에 따라 초정밀 가

공에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고 이에 따라 가공시 발생하는 절삭력과 표면 형상 및 거칠기를 시뮬레이션 할 필요성이 대두되고 있다. 시뮬레이션을 위해서는 절삭 모델링이 선행되어야 하므로 다양한 절삭 상태에 따른 절삭 모델이 제시되고 있다.^{1,2}

절삭 모델의 전개에 있어 가장 중요한 부분 중의 하나가 공구 설치시 발생하는 런아웃 모델이며 런아웃 값에 따라 시뮬레이션되는 절삭력이나 표면 형상이 상당한 차이를 보이게 된다. 실제 측정된 절삭력을 관찰하면 각 날에 따른 절삭력 파형이 서로 다른 것을 볼 수 있는데 이는 런아웃에 의한 영향이 지배적이다.³⁻⁵

런아웃은 공구 설치시마다 달라지므로 공구

☎ 2003년 8월 4일 접수; 게재승인일 : 2004년 1월 9일
 # 한국원자력연구소
 Email : ex-kiyong@kaeri.re.kr Tel. (042) 868-8269
 * 한국원자력연구소
 ** 부산대학교 기계공학부

교환시마다 측정할 필요가 있지만 현재까지 정립된 측정방법이 없는 상태이며, 일부 연구에서는 런아웃과 절삭력과 상관을통해 런아웃을 추정하고자 시도한바 있다.^{6,7} 그러나 이러한 연구들은 먼저 절삭력의 측정을 필요로 하므로 런아웃 측정을 위한 방법으로 경비면이나 시간면에서 부적절하고 측정된 절삭력에는 런아웃에 의한 영향뿐만 아니라 공구의 마멸, 진동 등의 다른 여러 가지 요소의 영향이 포함되어 있으므로 계산된 런아웃 값에 대한 신뢰도가 부족하게 된다.

따라서 본 연구에서는 다이얼 게이지를 사용하여 간편하게 런아웃을 측정할 수 있는 방법을 개발하였다. 다이얼 게이지를 통해 측정되는 값은 각 날이 가지는 회전반경의 차이이며 측정값을 사용하여 런아웃 파라미터인 오프셋 값과 위상각을 계산하기 위해 런아웃 모델링을 하였다. 런아웃 측정 방법을 검증하기 위해 계산된 런아웃 파라미터를 사용하여 시뮬레이션한 절삭력과 실험을 통해 측정된 절삭력을 비교하였다.

2. 런아웃 모델링 및 측정방법

런아웃은 공구 홀더의 회전 중심과 장착되는 공구 중심이 달라짐으로 인해 발생한다. 두 중심이 다르기 때문에 각 날의 회전 반경이 원래의 공구 반경과는 달리 각 날마다 달라진다. 따라서 런아웃은 Fig. 1 과 같이 오프셋 ρ 와 위상각 λ 로 정의할 수 있다.

Fig. 1 에서는 4 날 엔드밀의 경우의 런아웃 모델로서 ① ~ ④의 각 날은 ρ 와 λ 의 값에 따라 회전 반경이 달라진다. ①날의 결정은 오프셋 방향의 축에 의해 나누어지는 영역의 우측에 있는 날로서 정의 되며 λ 는 0~90°의 범위를 가진다. 날의 회전반경을 $R_1 \sim R_4$ 라고 하면 기하학적 관계에 의해 식(1)과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \sqrt{(R \cos \lambda + \rho)^2 + (R \sin \lambda)^2} \\
 R_2 &= \sqrt{(R \sin \lambda - \rho)^2 + (R \cos \lambda)^2} \\
 R_3 &= \sqrt{(R \cos \lambda - \rho)^2 + (R \sin \lambda)^2} \\
 R_4 &= \sqrt{(R \sin \lambda + \rho)^2 + (R \cos \lambda)^2}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 R : 공구 반경

날 번호를 k 로 두면 식 (1)은 식 (2)와 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 R(k) &= (R^2 \cos^2(\lambda + \frac{\pi}{2}(k-1)) \\
 &+ \rho^2 + R^2 \sin^2(\lambda + \frac{\pi}{2}(k-1)) \tag{2} \\
 &+ 2R\rho \cos(\lambda + \frac{\pi}{2}(k-1)))^{\frac{1}{2}}
 \end{aligned}$$

여기서, k : 날번호(1~4)

공구를 설치한 후 다이얼 게이지에 의해 측정되는 값은 각 날의 회전반경의 차이로서 R(1)-R(2), R(2)-R(3), R(3)-R(4), R(4)-R(1)의 4 개 값이 측정되며, 이중 R(4)-R(1)은 앞의 3 개의 값에 의해 도출될 수 있는 값이므로 의미가 없다. 따라서 식 (2)와 측정되는 값의 관계를 살펴보면 미지수는 ρ 와 λ 로서 2 개이며, 방정식은 3 개를 만족해야 한다.

이와 같은 관계는 공구의 형상이 기하학적으로 완전한 형상, 적어도 공구의 기하학적 형상 오차가 공구 런아웃에 의한 회전반경의 차이보다는 작다라고 가정하였을 때 성립한다. 즉, 공구 각 날의 반경이 정확히 같고 날 사이의 각이 정확히 90°가 되면 3 개의 방정식이 모두 성립하게 된다. 따라서 본 런아웃 모델은 위와 같이 공구의 형상이 완전하다고 가정하고 전개되며, 측정 데이터 중 2 개 값만을 이용하여 ρ 와 λ 를 계산한다.

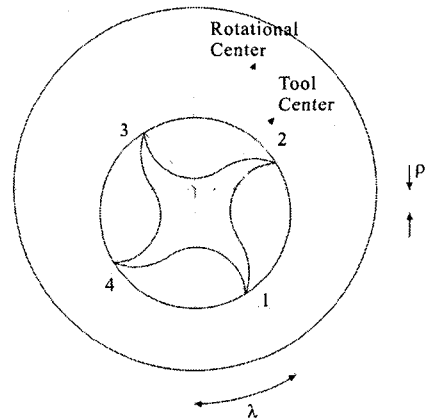


Fig. 1 Definition of runout with ρ and λ

위의 가정을 토대로 하여 런아웃 모델로부터 ρ 와 λ 의 변화에 따른 각 날의 회전 반경을 계산 하면 Fig. 2 와 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 때 시뮬레이션된 공구 반경은 5mm 이다. Fig. 2 는 $\rho = 30^\circ, \lambda = 0.03\text{mm}$ 로 고정한 상태에서 회전 반경의 변화를 살핀 결과로서 다른 값으로 고정하여도 같은 결과를 얻을 수 있다.

각 날의 회전반경은 ρ 의 변화에 따라 그 크기 만 변할 뿐 크기 순서가 바뀌지는 않지만 λ 가 변 할 경우 회전반경의 크기와 순서가 모두 바뀌게 된다. 즉, λ 가 45° 이하일 경우 회전 반경 크기 순서는 ①→④→②→③이며, 45° 이상일 경우 ④→①→③→②이다. 이러한 순서는 런아웃 모델의 회전 반경으로부터 절삭력을 시뮬레이션 할 경우와 다이얼 게이지를 이용하여 회전반경의 차이를 측정

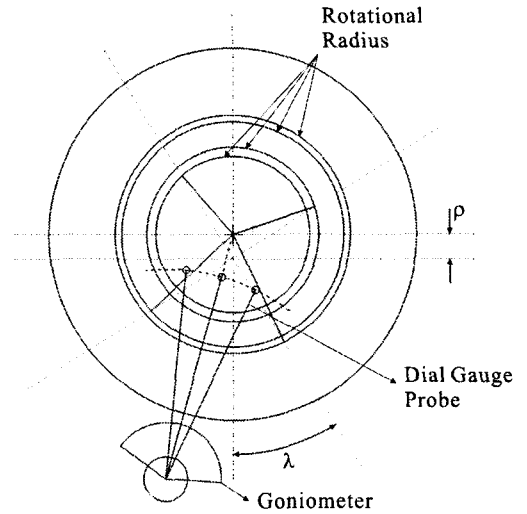


Fig. 3 Measurement of differences between rotational radiuses

할 경우 반드시 고려되어야 할 사항이다.

다이얼 게이지를 사용하여 회전반경의 차이를 측정하기 위해서는 Fig. 3 과 같이 각도계를 설치 하여 다이얼 게이지의 축침을 미소한 각도로 회전 시켜가며 차이를 측정하고 그 차이가 최소가 될 때 다이얼 게이지의 축침이 회전중심을 향하게 되고 이 때의 측정값이 회전반경의 차이가 된다.

회전반경의 차이는 4 개가 측정되며 측정된 값을 각각 $D_1 \sim D_4$ 로 두었을 때($D_1=R(1)-R(2), D_2=R(2)-R(3), \dots$) 가장 큰 회전반경을 가지는 날을 ①로 두고 회전 반대 방향으로 순서대로 ②, ③, ④로 번호를 매긴다. 이 때 측정자는 $D_1 \sim D_4$ 를 측정하였으므로 회전반경을 알 수는 없지만 회전 반경의 크기 순서는 쉽게 정렬할 수 있다. 공구의 형상이 기하학적으로 완전하다면 회전반경의 크기 순서는 Table 1 과 같이 2 가지 경우 중의 하나에 해당하게 된다.

Table 1 Radius order of flutes

Num. of Flutes	①	②	③	④
Radius Order in Case 1	1	3	4	2
Radius Order in Case 2	1	2	4	3

회전반경의 크기 순서를 고려하면(Fig. 2 참조)

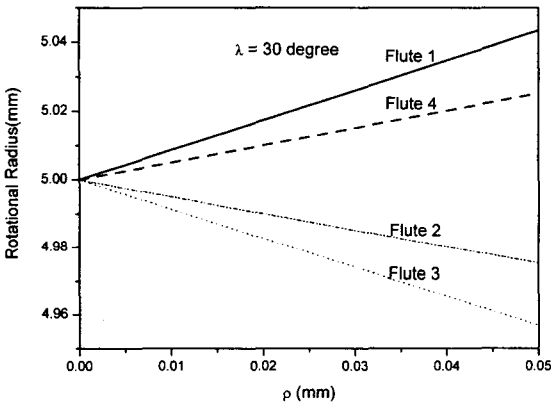


Fig. 2(a) Variation of rotational radius according to ρ

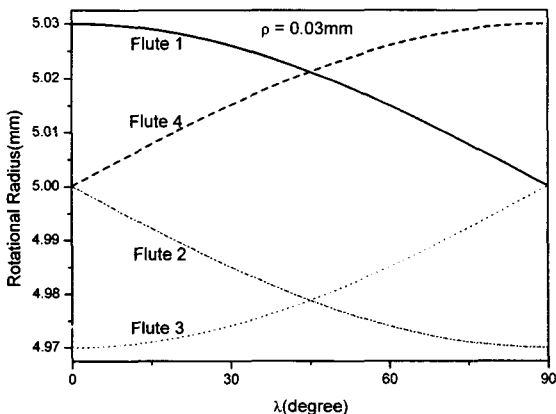


Fig. 2(b) Variation of rotational radius according to λ

Case 1 은 λ 가 $0 \sim 45^\circ$ 의 범위이며 회전반경이 제일 큰 날 번호가 ①로서 처음 번호 매김이 올바르다. Case 2 는 λ 가 $45 \sim 90^\circ$ 의 범위이며 회전반경이 제일 큰 날 번호를 ①로 매겼지만 실제로는 ④가 된다. 따라서 날 번호를 ①→②→③→④에서 ④→①→②→③으로 바꿔주어야 한다. 이렇게 날 번호를 올바르게 매겨야 $D_1 \sim D_4$ 를 정확히 정의할 수 있다. 측정되는 값은 $D_1 \sim D_4$ 로 4 개이지만 D_1, D_2 를 측정하면 $D_3 = -D_1, D_4 = -D_2$ 와 같이 정해진다. 이는 Fig. 4 에 시뮬레이션된 ρ 와 λ 의 변화에 따른 $D_1 \sim D_4$ 값으로부터 알 수 있다. 따라서 측정된 값 중 런아웃 계산에 필요한 값은 D_1, D_2 이며 방정식은 식 (3)과 같다.

$$D_1 = \sqrt{(R \cos \lambda + \rho)^2 + (R \sin \lambda)^2} - \sqrt{(R \sin \lambda - \rho)^2 + (R \cos \lambda)^2}$$

$$D_2 = \sqrt{(R \sin \lambda - \rho)^2 + (R \cos \lambda)^2} - \sqrt{(R \cos \lambda - \rho)^2 + (R \sin \lambda)^2} \quad (3)$$

식 (3)을 전개하여 ρ 와 λ 를 구하는 것은 난이 하므로 수치해석적 방법을 사용하여 해를 구하도록 한다. λ 를 일정하게 두고 ρ 를 적절한 범위에서 미소 증분 만큼 증가시켜가며 대입하여 식 (3)을 만족하는, 즉 주어진 미소 증분에 대해 오차가 최소가 되는 ρ 값을 찾는다. 이 때의 (λ, ρ) 를 하나의 점으로 저장하고 λ 를 미소 증분 만큼 증가시켜 앞의 과정을 반복한다. 이렇게 λ 를 $0 \sim 90^\circ$ 까지 변

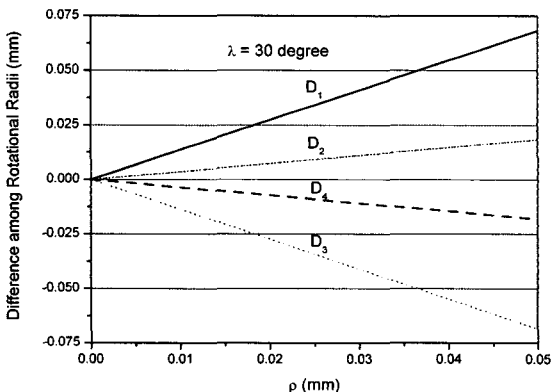


Fig. 4(a) Variation of $D_1 \sim D_4$ according to ρ

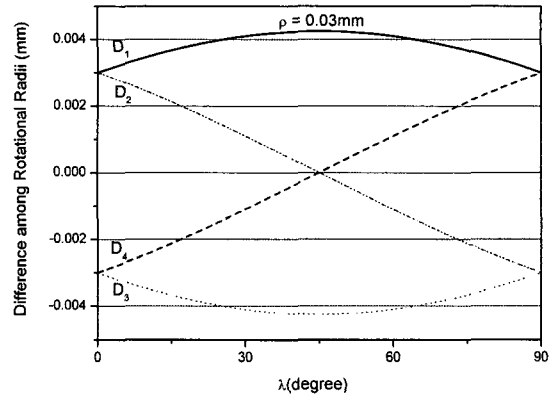


Fig. 4(b) Variation of $D_1 \sim D_4$ according to λ

화시켜가며 각 λ 에 해당하는 ρ 를 구한 후 (λ, ρ) 를 정렬하면 식 (3)에 대한 그래프를 그릴 수 있

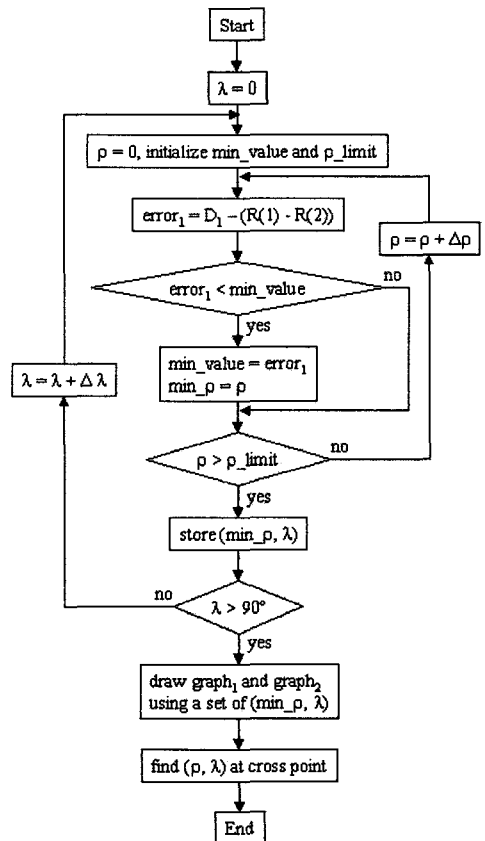


Fig. 5 Flowchart for calculating ρ and λ from D_1 and D_2

다. D_1, D_2 의 그래프를 도시한 후 두 그래프가 만나는 점에서의 ρ, λ 값이 최종적으로 구하고자 하는 런아웃 값이다. 런아웃 값을 구하기 위한 수치 해석 과정을 Fig. 5 에 나타내었다. 식 (3)에서 D_2 에 대한 그래프 $graph_2$ 를 구하는 과정은 $graph_1$ 을 구하는 과정과 동일하므로 생략하였다.

Fig. 5 에서 min_value 는 예상되는 오차보다 큰 값으로, ρ_limit 는 예상되는 ρ 값보다 큰 값으로 적절히 초기화하면 된다. $\rho_limit, \Delta\rho, \Delta\lambda$ 는 계산 시간에 직접 영향을 미치는 인자이므로 정밀한 계산과 컴퓨터 속도를 고려하여 적절히 셋팅하도록 한다.

이렇게 계산된 ρ, λ 는 공구의 맨 아랫부분에 대한 런아웃 파라미터로서 헬릭스각을 따라 위로 진행되면 ρ 는 변함이 없지만 λ 가 바뀌게 된다. 즉 축방향의 위치에 따라 λ 는 변화된다. 따라서 이미 계산된 공구 끝부분에서의 λ 값을 사용하여 축방향 위치에 대한 런아웃 위상각 $\lambda(z)$ 를 구하면 식(4)와 같이 된다.

$$\lambda(z) = \lambda + \frac{z \cdot \tan \alpha_{hx}}{R} \quad (4)$$

여기서, z : 공구끝부분 기준으로 떨어진 거리
 α_{hx} : 공구의 헬릭스각

식(4)에서 계산된 $\lambda(z)$ 를 식(2)의 λ 대신 삽입하면 공구 축방향의 어떤 위치에서도 런아웃이 적용된 회전반경을 계산할 수 있다.

3. 런아웃 모델의 검증

런아웃 모델을 검증하기 위해 실험을 통해 측정된 절삭력과 런아웃 모델을 사용하여 전개한 절삭력 모델로부터 시뮬레이션된 절삭력을 비교하였다. 여기서 절삭력 모델은 Tlusty 등이 제시한 비교적 일반적인 절삭력 모델을 사용하였다.^{8,9}

3.1 실험장치 및 구성

절삭력 측정을 위한 실험장치는 Fig. 6 과 같이 구성하였다. 머시닝센터(Makino V55)에 4 날 초경 엔드밀(대한중석, $\phi 10mm$, 헬릭스각 30°)을 사용하여 측면가공을 수행하였고 절삭력은 동력계(Kistler, 9257B)로 측정하였다. 공작물은 금형강(STD11)을 사용하였고 런아웃 측정을 위해 $1\mu m$ 분해능을 가진 다이얼 게이지로 공구 탈착시마다 공구날 회전

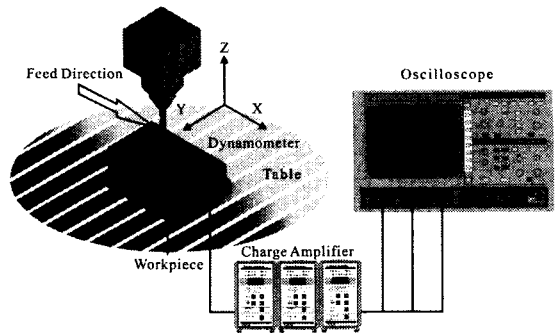


Fig. 6 Experimental set-up

반경의 차이를 측정하였다.

절삭조건은 주축 회전수 2,000rpm, 날당 이송량 0.05mm/tooth, 반경방향 절삭깊이 0.1mm, 축방향 절삭깊이 10mm 로 설정하고 런아웃의 변화에 따른 영향만을 관찰하기 위해 같은 절삭조건으로 절삭력을 측정하였다.

3.2 실험 및 시뮬레이션 결과

총 8 번의 실험을 수행하였으며 각각의 실험시 런아웃 측정 데이터는 Table 2 와 같았다.

Table 2 Measurement data for calculating runout

Experiment Num.	D_1 (μm)	D_2 (μm)	D_3 (μm)	D_4 (μm)
1	16	-14	-16	15
2	24	18	-22	-17
3	19	16	-18	-14
4	21	8	-22	-8
5	29	6	-28	-5
6	15	4	-16	-6
7	38	7	-35	-9
8	57	33	-53	-29

사용된 공구가 기하학적으로 정확한 형상이라 면 D_3, D_4 는 D_1, D_2 에 의해 이미 결정된다. 한 예로 실험 2 에서 이론적으로 $D_3 = -D_1 = -24, D_4 = -D_2 = -18$ 이 되어야 하지만 실제 공구 형상의 오차로 인해 $D_3 = -22, D_4 = -14$ 로 측정되었다. 본 연구에서는 D_1, D_2 만을 사용하여 런아웃 파라미터를 계산하므로 실제 공구 형상의 오차가 미소하게나마 영향을 미칠 것으로 생각된다.

측정된 회전반경의 차이를 사용하여 런아웃 파라미터 오프셋 ρ 와 위상각 λ 를 계산하고 이로부터 각 날의 회전반경을 계산한 결과를 Table 3 에 나타내었다.

Table 3 Runout parameters and rotational radius calculated from D_1 and D_2

Exp. Num.	Runout Parameter		Rotational Radius			
	ρ (μm)	λ (degree)	R(1) (mm)	R(2) (mm)	R(3) (mm)	R(4) (mm)
1	15	86	5.001	4.985	4.999	5.015
2	21	8	5.021	4.997	4.979	5.003
3	18	5	5.018	4.998	4.982	5.002
4	16	24	5.015	4.994	4.985	5.007
5	21	33	5.018	4.989	4.982	5.011
6	11	30	5.010	4.995	4.990	5.006
7	27	35	5.022	4.985	4.978	5.016
8	47	15	5.045	4.988	4.955	5.012

이러한 회전반경의 차이를 고려하지 않고, 즉 런아웃을 고려하지 않은 상태에서 절삭력 파형을 시뮬레이션하였을 경우 Fig. 7 과 같이 동일한 크기와 형태의 파형을 지속적으로 발생하며 이는 실제 측정 파형과는 다르게 된다. Fig. 7 에 런아웃을 고려하지 않은 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교하였다.

각 실험에 대한 측정값과 시뮬레이션 값을 비

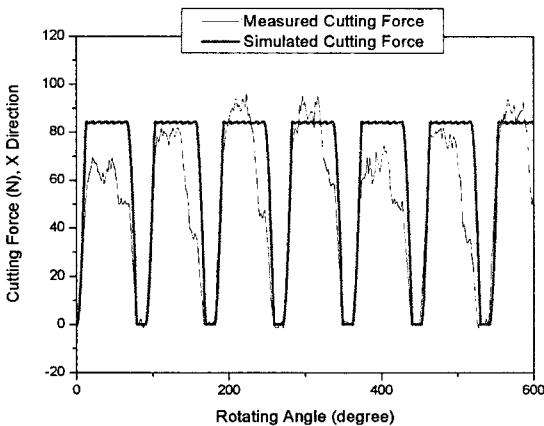


Fig. 7 Measured and simulated cutting force having no regard for runout

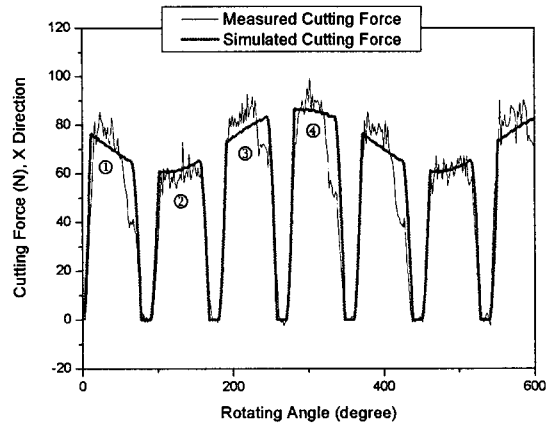


Fig. 8 Measured and simulated cutting force in case of experimental num. 5

교한 결과는 Fig. 8~10 에 나타내었다. 8 번의 실험 결과 중 대표적으로 $0 < \lambda < 45^\circ$ 에 해당하는 실험 5, $45^\circ < \lambda < 90^\circ$ 에 해당하는 실험 1, ρ 값이 가장 큰 경우인 실험 8 에 대해 시뮬레이션과 측정 결과의 절삭력 파형을 비교하였다.

Fig. 8 의 경우 $\rho = 21\mu\text{m}$, $\lambda = 33^\circ$ 로 계산되었으며 이 때 각 날의 회전반경 크기는 ①→④→②→③의 순서이다. 절삭력 파형을 관찰하면 파형의 크기가 ④→③→①→②의 순서인데, 이는 절삭력 파형의 크기가 날의 회전반경의 크기에 좌우되는 것이 아니라 날당이송량에 의해 결정되기 때문이다. 런아웃이 발생할 경우 날당이송량이 각 날마다 바뀌기 때문에 절삭력 파형에 변화가 생기는 것이다. 각 날당 이송량은 해당되는 날의 회전반경과 그 전날의 회전반경의 차이에 의해 달라진다. 즉 ①날의 경우, 런아웃 발생시 날당 이송량 = 원래의 날당 이송량(상수) + $(R(1)-R(4))$ 로 된다. Fig. 8 에서 각 날당 이송량을 계산해보면,

- ①번 날의 이송량 : 0.089mm
- ②번 날의 이송량 : 0.054mm
- ③번 날의 이송량 : 0.077mm
- ④번 날의 이송량 : 0.112mm

와 같이 된다.

위의 결과를 보면 절삭력 파형의 크기 순서는 ④→①→③→②로 되어야 하지만, 실험 결과나 시뮬레이션 결과 모두 ④→③→①→②의 순서이다. 이는 위의 결과는 날 끝에서 발생한 런아웃에 의한 날당 이송량의 변화이고, 헬릭스각의 영향으로

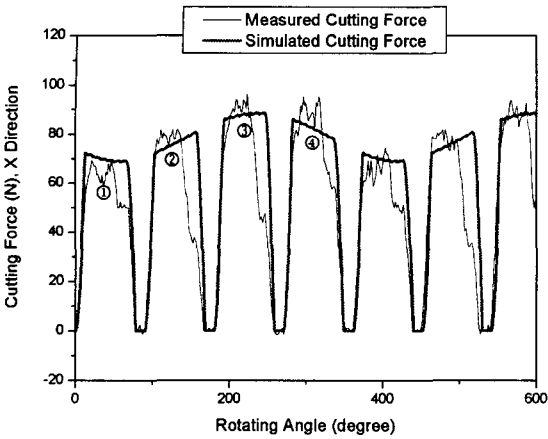


Fig. 9 Measured and simulated cutting force in case of experimental num. 1

공구 윗부분으로 갈수록 런아웃에 변화가 발생하기 때문이다. 축방향 절삭깊이가 10mm 이므로 맨 윗부분에서의 날당 이송량은,

- ①번 날의 이송량 : 0.059mm
- ②번 날의 이송량 : 0.066mm
- ③번 날의 이송량 : 0.107mm
- ④번 날의 이송량 : 0.101mm

와 같이 변화되며, 본 런아웃 모델에서는 식(4)에서 이와 같은 영향을 고려하였으므로 시뮬레이션 결과와 실험결과가 잘 일치한다. 따라서 런아웃에 의해 발생하는 절삭력 파형의 차이는 런아웃 파라미터인 ρ, λ 의 영향 뿐만 아니라 헬릭스각, 절삭깊

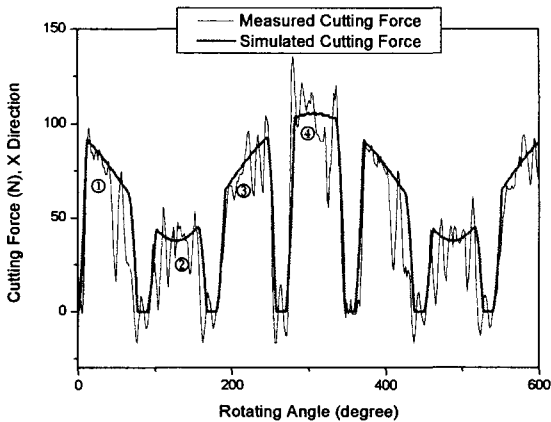


Fig. 10 Measured and simulated cutting force in case of experimental num. 8

이의 영향을 복합적으로 고려하여 시뮬레이션하였을 때 올바른 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 9 의 경우 $\rho = 15\mu\text{m}, \lambda = 86^\circ$ 로 계산되었으며 이 때 절삭력 파형 크기 순서는 ③→④→②→①이며 공구 끝단의 회전반경 크기 순서는 ④→①→③→② 이다. 이 경우도 절삭력 파형과 공구 끝단의 회전반경 크기 순서는 틀리기 때문에 런아웃 파라미터만을 통해 절삭력 파형의 크기를 순서대로 정렬할 수 없으며 반드시 헬릭스각과 절삭깊이의 영향을 고려하여야 한다.

Fig. 9 를 Fig. 8 과 비교해보면 파형의 크기는 비슷한 값을 가지나 크기 순서가 약간 틀려져 있다. Fig. 8 은 가장 큰 파형의 왼편에 있는 파형이 두번째로 큰 파형이지만 Fig. 9 는 오른쪽에 있는 파형이 두번째 파형이다. 이러한 파형의 크기 순서는 런아웃 위상각 λ 에 의해 결정되며 ρ 는 크기 순서에는 아무런 영향을 미치지 않는다.

Fig. 10 의 경우는 ρ 값이 다른 실험값에 비해 비교적 크게 나타났다. $\rho = 47\mu\text{m}, \lambda = 15^\circ$ 로 다른 ρ 값에 비해 2 배 정도 크며 이는 Fig. 10 과 같이 절삭력 파형의 크기에 큰 차이를 가져온다. 가장 큰 절삭력 파형과 가장 작은 절삭력 파형의 차이는 약 2 배정도로서 이러한 큰 차이는 공구의 수명에 악영향을 미치고 진동을 발생시켜 절삭을 불안정하게 만들며 가공 표면 상태도 악화시킬 것으로 생각된다.

이와 같이 런아웃의 차이는 절삭력에 큰 변화를 일으키므로 런아웃 모델은 절삭력 모델에 반드시 포함되어야 하는 중요한 부분이라 할 수 있겠다. 본 연구에서 제시한 런아웃 모델과 측정 방법을 통해 시뮬레이션된 절삭력 파형과 실험을 통해 측정된 절삭력 파형을 비교해본 결과 파형의 형태와 크기에서 두 결과가 잘 일치함을 알 수 있었다. 런아웃 파라미터 중 위상각 λ 는 파형의 순서에 영향을 미치며 오프셋 ρ 는 파형의 크기에 영향을 미침을 알 수 있었다.

4. 결론

4 날 엔드밀 가공시 런아웃 모델링을 제시하고 런아웃 파라미터인 오프셋과 위상각을 쉽게 측정할 수 있는 방법을 개발하였다. 공구 각 날의 차이를 다이얼게이지를 사용하여 측정하고 그 값을 프로그램에 입력하여 런아웃 파라미터와 각 날의

회전반경을 계산하였다. 시뮬레이션된 절삭력 파형과 실험을 통해 측정된 절삭력 파형은 크기와 순서에 있어 잘 일치함을 확인하였다. 런아웃에 의해 발생하는 절삭력 파형의 차이는 런아웃 파라미터의 영향 뿐만 아니라 헬릭스각, 절삭깊이의 영향을 복합적으로 고려하여 시뮬레이션하였을 때 올바른 결과를 얻을 수 있었다. 또한 런아웃 파라미터 중 위상각은 파형의 순서에 영향을 미치며 오프셋은 파형의 크기에 영향을 미침을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 과학기술부 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kuang-Hug Fuh, "A Predicted Milling Force Model for High-speed End Milling Operation," *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, Vol. 37, pp. 969-979, 1997
2. Bayoumi A. E., "An Analytic Mechanistic Cutting Force Model for Milling Operations," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 116, pp. 324-330, 1994
3. Lee Young-Moon, "Effect of Cutter Runout on End Milling Process," *Journal of the KSPE*, Vol. 19, No. 8, pp. 63-70, 2002
4. Ko Jeong Hoon, "Development of a Virtual Machining System : Approximation of the Size Effect for Cutting Force Prediction," *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, Vol. 42, pp. 1595-1605, 2002
5. Zheng H. Q., "Theoretical Modeling and Simulation of Cutting Forces in Face Milling with Cutter Runout," *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, Vol. 39, pp. 2003-2018, 1999
6. Wang J. -J. J., "Identification of Cutter Offset in End Milling without a Prior Knowledge of Cutting Coefficients," *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, Vol. 43, pp. 687-697, 2003
7. Keith A. Hekman, "In-process Monitoring of End Milling Cutter Runout," *Mechatronics*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-10, 1997
8. Tlusty J., "Dynamics of Cutting Forces in End Milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, pp. 21-25, 1975
9. Tlusty J., "An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, pp. 169-175, 1991