

정면 밀링의 절삭력 해석을 위한 평균 비절삭저항 모델의 개발

이 병 철*, 황 정 철*, 백 대 균*, 김 희 슌**

Development of Mean Specific Cutting Pressure Model for Cutting Force Analysis in the Face Milling Process

Byung-Cheol Lee*, Jung-Chul Hwang*, Dae-kyun Baek*, Hee-Sool Kim**

Abstract

In order to design and improve a new machine tool, there is a need for a better understanding of the cutting force. In this paper, the computer programs were developed to predict not only the mean specific cutting pressure but also the cutting force.

The simulated cutting forces in X, Y, Z directions resulted from the developed cutting force model were compared with the measured cutting forces in the time and frequency domains. The simulated cutting forces resulted from the new cutting force model have a good agreement with the measured forces in comparison with these resulted from the existing cutting force model.

Key Words : Cutting Force Model(절삭력 모델), Face Milling(정면 밀링), Mean Specific Cutting Pressure Model(평균 비절삭저항 모델), Mean Specific Cutting Coefficients(평균 비절삭계수)

1. 서 론

새로운 공작기계 나 절삭공구의 설계 및 개선을 위하여 절삭 공정 중 발생하는 절삭력 성분을 정확히 예측하는 것이 필요하다. 특히 최근 공작기계 정밀화와 자동화로 인한 공작기계의 고가화는 효율적인 가공공정계획의 수립에 필요한 연구를 더욱 증대시키고 있는 실정이다.

지금까지의 절삭력 예측을 위한 연구들은 에너지방법, 유동응력특성, 매트릭스 표시법 등을 이용한 방법이 제시되었으나, (1, 2, 3) 측정에 의해서 결정되는 파라미터들의 정확도와 신뢰성 때문에, 최근에 실험에 의하여 측정된 절삭력을 공구의 기하학적 형상과 절삭조건에 의하여 결정되는 절삭날과 접촉하고 있는 변형을 일으키기전의 절삭면적

(미변형 칩단면적)으로 나눈값을 비절삭저항으로 하여, 절삭력을 미변형 칩단면적과 비절삭저항의 곱으로 표시하는 간단한 방법이 제시되었다.^(4, 5, 6, 7, 8, 9, 10) 특히 공구의 회전각에 따라 미변형 칩단면적이 연속적으로 변하는 절삭력 예측이 비교적 복잡한 정면밀링의 절삭력 해석에 있어서도 비절삭저항을 평균값으로 처리한 평균 비절삭저항을 적용함으로써 단순화된 절삭력 모델이 제시되었다.⁽¹¹⁾ 그러나 이러한 모델에서는 평균 비절삭저항을 평균 미변형 칩단면적에 측정구간 전체의 측정절삭력의 평균값을 대응시켜 구하고 있다. 밀링 작업은 선삭과는 달리 절삭점이 커터의 회전각에 따라 이동한다. 그러므로 같은 크기의 미변형 칩단면적을 절삭하는데 있어서도 절삭 순간에 발생하는 접선, 반경, 축방향 절삭력의 크기는 같아도 절삭위치에 따

* 영남대학교 기계공학과 대학원

** 정회원, 영남대학교 기계공학과

라 그 분력의 방향이 달라지므로 X,Y,Z방향 분력의 합인 X,Y,Z축방향 추정절삭력은 그 크기가 달라진다. 따라서 평균 비절삭저항을 결정하는데 있어서 상당한 오차가 발생한다.

인서트 위치오차 및 커터의 편심은 커터가 1회전 할 동안의 추정절삭력속에 반영되어 나타남을 이용하여, 본 연구에서는 평균 미변형 칩단면적과 커터가 1회전 할 동안 인서트의 수에 해당하는 평균 미변형 칩단면적이 나타나는 순간의 추정절삭력들의 평균값으로 평균 비절삭저항 및 비절삭계수를 구하는 모델을 개발하고, 이를 기본 절삭력 모델에 적용하여 절삭력 예측 정밀도가 우수한 새로운 절삭력 예측 모델을 제시함과 아울러, 개발된 평균 비절삭저항 모델을 적용해 얻어진 평균 비절삭저항 및 계수와 절삭조건과의 관계도 규명하고자 한다.

2. 이론 해석

2.1 기본 절삭력 모델

정면 밀링작업과 같은 3차원 절삭가공시 발생하는 절삭력은 공구와 공작물간의 기하학적 형상에 의하여 회전각에 따른 미변형 칩단면적을 계산하여 실험적인 방법에 의해서 결정된 비절삭저항과의 곱으로 구할 수 있다. Fig. 1은 절삭조건과 공구의 기하학적 형상을 고려한 한개의 인서트에 작용하는 절삭력성분을 도시한 것이다.

Fig. 1에서 커터가 ϕ 만큼 회전할 때 i 번째 인서트에 의한 X,Y,Z방향의 절삭력성분은 다음과 같이 표시된다.⁽¹⁾

$$F_x(i, \phi) = eK_T [\cos \gamma_A (\cos \gamma_R \sin(\theta_i(\phi)) + \sin \gamma_R \cos(\theta_i(\phi))) + \cos \gamma_L (\sin \gamma_R \sin(\theta_i(\phi)) - \cos \gamma_R \cos(\theta_i(\phi))) K_R + (\cos \gamma_L \sin \gamma_A \sin(\theta_i(\phi)) + \sin \gamma_L \cos(\theta_i(\phi))) K_A]$$

$$F_y(i, \phi) = eK_T [-\cos \gamma_A (\cos \gamma_R \cos(\theta_i(\phi)) - \sin \gamma_R \sin(\theta_i(\phi))) - \cos \gamma_L (\sin \gamma_R \cos(\theta_i(\phi)) K_R - (\cos \gamma_L \sin \gamma_A \cos(\theta_i(\phi)) - \sin \gamma_L \sin(\theta_i(\phi))) K_A]$$

$$F_z(i, \phi) = eK_T [-\sin \gamma_A + \sin \gamma_L K_R + \cos \gamma_L \cos \gamma_A K_A]$$

(단, $e = \frac{f_t \sin(\theta - i(\phi)) d}{\cos \gamma_A \cos \gamma_R}$)

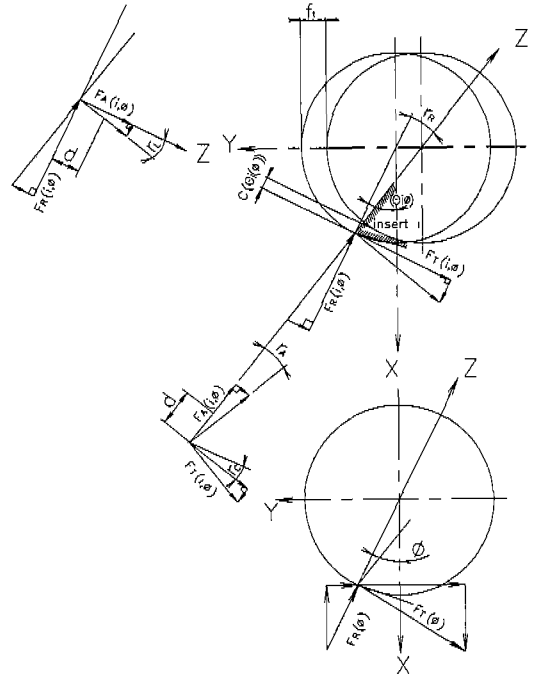


Fig. 1 The force components according to cutter and cutting geometry

이때의 순간절삭력은 동시에 절삭작업에 관여하는 각각의 인서트들의 절삭력성분의 합으로 나타난다.

$$\begin{bmatrix} F_x(\phi) \\ F_y(\phi) \\ F_z(\phi) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^Z \begin{bmatrix} F_x(i, \phi) \\ F_y(i, \phi) \\ F_z(i, \phi) \end{bmatrix}$$

2.2 평균 비절삭저항 모델

일반적으로 비절삭저항은 순간 미변형 칩단면적에 따라 변화한다. 따라서 정면 밀링 작업에서와 같이 커터의 회전각에 따라 연속적으로 순간 미변형 칩단면적이 변하는 경우 매 절삭 순간마다 변하는 비절삭저항을 적용하여 절삭력을 예측한다는 것은 현실적으로는 그 적용이 어렵기 때문에 평균 비절삭저항을 사용하고 있다. 기존 절삭력 모델에서는 평균 절삭력으로 측정구간 전체의 추정절삭력의 평균값(이하 전체 평균 추정절삭력)을 사용하고 있다. 그러나 앞서 설명한 이유로 전체 평균 추정절삭력은 평균 절삭력과 상당한 오차가 있다.

본 연구에서는 인서트의 위치오차 및 커터의 편심은 커터가 1회전 할 동안의 측정절삭력속에 반영되어 나타남을 이용하여, 평균 미변형 칩단면적이 나타나는 순간의 측정 절삭력들의 평균값(이하 지점 평균 측정절삭력)으로 평균 비절삭저항 및 비절삭계수를 구하는 모델을 개발하고자 한다.

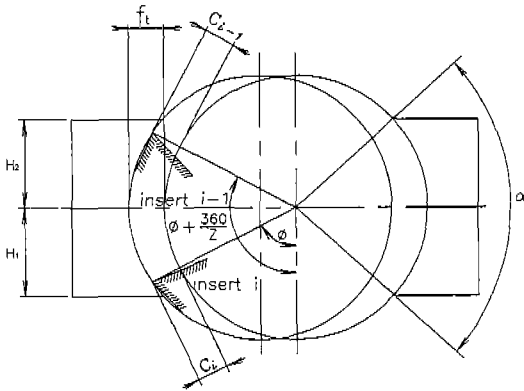


Fig. 2 The instantaneous undeformed chip thickness according to insert and workpiece geometry.

Fig. 2는 공작물의 폭 및 절삭위치에 따른 절삭 작업에 관여하는 인서트들에 의한 순간 미변형 칩두께를 도시한 것이다. Fig. 2에서 커터의 회전각이 ϕ 일때 순간 미변형 칩두께의 합 $C_w(\phi)$ 는 절삭 작업에 관여하는 인서트에 의한 순간 미변형 칩두께의 합으로 아래와 같이 표시되며

$$C_w(\phi) = C_i(\phi) + C_{i-1}(\phi + \frac{360}{Z}) + \dots + C_{i-(Z-1)}(\phi + \frac{360(Z-1)}{Z}) \quad (3)$$

$$C_i(\phi) = ft \sin \phi, \quad \cos^{-1}(\frac{H_1}{R}) \leq \phi < \cos^{-1}(\frac{H_1}{R}) + \frac{360}{Z} \text{ or } 90 + \sin^{-1}(\frac{H_2}{R})$$

$$C_{i-1}(\phi + \frac{360}{Z}) = ft \sin(\phi + \frac{360}{Z}),$$

$$\cos^{-1}(\frac{H_1}{R}) + \frac{360}{Z} \leq \phi + \frac{360}{Z} <$$

$$\begin{aligned} & \cos^{-1}(\frac{H_1}{R}) + \frac{2 \times 360}{Z} \text{ or } 90 + \sin^{-1}(\frac{H_2}{R}) \\ & C_{i-(Z-1)}(\phi + \frac{360(Z-1)}{Z}) \\ & = ft \sin(\phi + \frac{360(Z-1)}{Z}), \quad \cos^{-1}(\frac{H_1}{R}) \\ & + \frac{360(Z-1)}{Z} \leq \phi + \frac{360(Z-1)}{Z} < \cos^{-1} \\ & (\frac{H_2}{R}) + 360 \text{ or } 90 + \sin^{-1}(\frac{H_2}{R}) \end{aligned}$$

샘플링 시간(sampling time)동안에 커터가 회전하는 각 θ_t 는 다음과 같고

$$\theta_t = 6N \cdot S \quad (4)$$

정면 밀링 작업에서는 인서트와 인서트 사이의 회전각 ($360^\circ / Z$)마다 절삭력이 주기적으로 나타나므로, 한 절삭력 주기 동안의 샘플링 수 N_t 및 순간 미변형 칩두께 수 N_q 는 아래와 같다.

$$N_t = \frac{360}{Z \cdot \theta_t} \quad (5)$$

$$N_q = (Z_c - 1) \cdot N_t + \frac{(\alpha - (Z-1) \frac{360}{Z})}{\theta_t} \quad (6)$$

(6)

여기서 α 는 공작물 접촉각도로서 다음과 같다.

$$\alpha = \sin^{-1}(\frac{H_2}{R}) + \sin^{-1}(\frac{H_1}{R}) \quad (7)$$

따라서 한 절삭 주기 동안의 순간 미변형 칩두께의 총합 C_{ww} 및 평균 미변형 칩두께 C_m 은 다음과 같이 나타나고

$$C_{ww} = C_w(\phi) + (\phi + \theta_t) + C_w(\phi + 2\theta_t) + \dots + C_w$$

$$(\phi + (N_t - 1)\theta_i) \quad (8)$$

$$C_m = \frac{C_{vw}}{N_q} \quad (9)$$

i번째 인서트에 의해서 발생하는 순간 미변형 칩두께가 평균 미변형 칩두께와 같은 커터의 회전각 ϕ_m 은 아래와 같이 나타낸다.

$$ft \cdot \sin \phi_m = C_m$$

$$\phi_m = \sin^{-1} \left(\frac{C_m}{ft} \right) \quad (10)$$

i번째 인서트의 회전각이 ϕ_m 일 때의 절삭 작업에 관여하고 있는 인서트에 의한 순간 미변형 칩두께의 합을 나타내는 (3)식과 이 때의 공구동력계로부터 얻어진 측정절삭력을 이용하면 기본 절삭력 모델의 식 (1) 및 식 (2)는 아래와 같이 나타낼 수 있고

$$F_X(i, \phi_m) = \bar{e} \cdot K_{MT} [\cos \gamma_A (\cos \gamma_R \cdot \sin(\theta_i(\phi_m)) + \sin \gamma_R \cdot \cos(\theta_i(\phi_m))) + \cos \gamma_L (\sin \gamma_R \cdot \sin(\theta_i(\phi_m)) - \cos \gamma_R \cdot \cos(\theta_i(\phi_m))) \cdot K_{MR} + (\cos \gamma_L \cdot \sin \gamma_A \cdot \sin(\theta_i(\phi_m)) + \sin \gamma_L \cdot \cos(\theta_i(\phi_m))) \cdot K_{MA}]$$

$$F_Y(i, \phi_m) = \bar{e} \cdot K_{MT} [-\cos \gamma_A (\cos \gamma_R \cdot \cos(\theta_i(\phi_m)) - \sin \gamma_R \cdot \sin(\theta_i(\phi_m))) - \cos \gamma_L (\sin \gamma_R \cdot \cos(\theta_i(\phi_m)) + \cos \gamma_R \cdot \sin(\theta_i(\phi_m))) \cdot K_{MR} - (\cos \gamma_L \cdot \sin \gamma_A \cdot \cos(\theta_i(\phi_m)) - \sin \gamma_L \cdot \sin(\theta_i(\phi_m))) \cdot K_{MA}]$$

$$F_Z(i, \phi_m) = \bar{e} \cdot K_{MT} [-\sin \gamma_A + \sin \gamma_L \cdot K_{MR} + \cos \gamma_L \cdot \cos \gamma_A \cdot K_{MA}] \quad (11)$$

(여기서,

$$\bar{e} = ft \cdot \sin(\theta_i(\phi_m)) \cdot d / (\cos \gamma_A \cdot \cos \gamma_R)$$

$$F_X(\phi_m) = F_X(i, \phi_m) + F_X(i-1, \phi_m + \frac{360}{Z}) + \dots + F_X(i-(Z-1), \phi_m + \frac{360(Z-1)}{Z})$$

$$F_Y(\phi_m) = F_Y(i, \phi_m) + F_Y(i-1, \phi_m + \frac{360}{Z}) + \dots + F_Y(i-(Z-1), \phi_m + \frac{360(Z-1)}{Z}) \quad (12)$$

$$F_Z(\phi_m) = F_Z(i, \phi_m) + F_Z(i-1, \phi_m + \frac{360}{Z}) + \dots + F_Z(i-(Z-1), \phi_m + \frac{360(Z-1)}{Z})$$

지점 평균 측정절삭력

$\overline{F_X}(\phi_m)$, $\overline{F_Y}(\phi_m)$, $\overline{F_Z}(\phi_m)$, 은 아래와 같이 나타낸다.

$$\overline{F_X}(\phi_m) = \frac{F_X(\phi_m) + F_X(\phi_m + \frac{360}{Z}) + \dots + F_X(\phi_m + \frac{360(Z-1)}{Z})}{Z}$$

$$\overline{F_Y}(\phi_m) = \frac{F_Y(\phi_m) + F_Y(\phi_m + \frac{360}{Z}) + \dots + F_Y(\phi_m + \frac{360(Z-1)}{Z})}{Z} \quad (13)$$

$$\overline{F_Z}(\phi_m) = \frac{F_Z(\phi_m) + F_Z(\phi_m + \frac{360}{Z}) + \dots + F_Z(\phi_m + \frac{360(Z-1)}{Z})}{Z}$$

따라서 식 (11)을 식 (12)에 적용하고, 식 (12)의 $F_X(\phi_m)$, $F_Y(\phi_m)$, $F_Z(\phi_m)$ 을 식 (13)의 K_{MT} , K_{MR} , K_{MA} 를 미지수로 가지는 3계 1차 연립방정식이므로 평균 비절삭저항 및 계수를 구할 수 있다

3. 실험장치 및 방법

본 실험에 사용된 공작기계는 범용 수직 밀링머신이고, 실험장치의 개략도는 Fig. 3과 같다. 개략도에서와 같이 테이블 위에 3축방향의 절삭력을 측정할 수 있는 압전식 (piezo electricity type) 절삭력 센서인 공구동력계(tool dynamo-meter)를 부착하고, 공구동력계 위에 공작물을 장착한 치구를 설치한다. 이 때 커터에 삽입된 각 인서트의 런 아웃은 Tool Free Set을 이용하여 최소화 시켰다.

절삭과정중의 인서트의 마모를 고려하여 매 절삭조건마다 인서트를 교환하면서 Table 1과 같은 실험조건으로 절삭실험을 행하고, 공구동력계로부터 발생되는 절삭력 신호를 전하 증폭기(charge amplifier)에서 증폭시켜 오실로스코프를 통해 모니터링(monitoring)함과 동시에 A/D 변환기(analog/digital converter)를 통해 퍼스널 컴퓨터에 저장하였다. 이 때에 X, Y, Z축방향의 절삭력을 2000HZ로 샘플링하고, 한 샘플(sample)당 데이터의 수는 0.52초 동안 1024개를 획득하여 퍼스널 컴퓨터에 저장하였다. Table 2는 본 실험에 사용된 기계 및 계측기의 제원이며, Fig. 4는 평균 비절삭저항 및 절삭력을 계산하기 위한 흐름도이다.

Cutting Speed (m/min)	108.65	237.07
Feed Rate (mm/tooth)	0.02	0.03 0.04 0.05
Depth of Cut (mm)	0.1	0.11 0.16 0.2
Diameter of Cutter (mm)	100	
Number of Insert	6	
Insert Lead Angle (degree)	15	
Insert Rake Angle (degree)	0	
Insert Axial Angle (degree)	7	
Sampling Frequency (Hz)	2000	
Number of Data	1024	
Workpiece	SM 45 C	

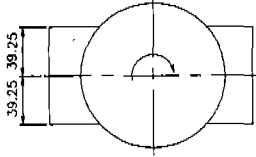


Table 1 Experimental Conditions

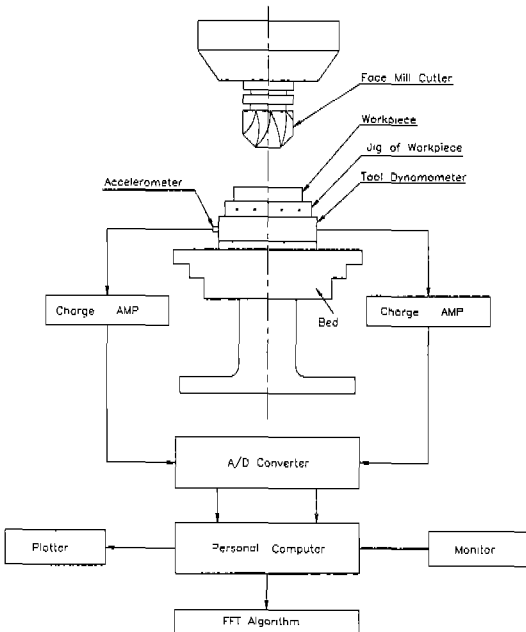


Fig. 3 Schematic diagram for experimental setup.

Milling Machine	통일 TMV-2 (1100 2700)
Tool Dynamometer	KISTLER (type 9257 A)
A/D Converter	Lab MASTER conversion rate: 30 KHz resolution : 12 bit input range : ± 10 V
Computer	32 bit LOGIX compatible PC
Oscilloscope	TEKTRONIX (2201 Digital Storage Oscilloscope)
Charge Amplifier	KISTLER (type 5008 EDPM -2300)
Filter	KISTLER
Cutter	대한중석 M115SP 04R/L-12
Insert	대한중석 SPKN 1203 EDR/L

Table 2 Specifications of Experimental Setup

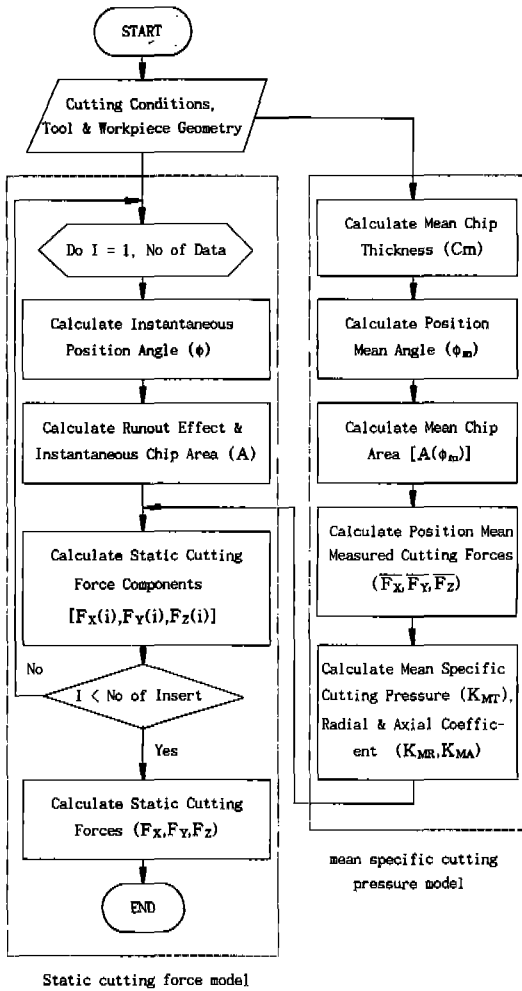


Fig. 4 The flow chart for mean specific cutting pressure, coefficient and cutting simulation.

4. 결과 및 고찰

Table 3은 Table 1과 같은 실험조건에서 Table 2에 나타난 실험장치로 절삭실험에 의해서 얻은 절삭력을 새로운 평균 비절삭저항 모델 및 기존 절삭력 모델에 각각 적용하여 얻은 결과이다. Table 3에서 나타낸 바와 같이 동일한 절삭조건하에서 두 모델 각각으로부터 얻어진 평균 비절삭저항 및 계수의 값이 크게 상이함을 나타내고 있다. 이것은 두 모델 각각으로부터 계산되는 평균 미변형 칩단면적은 같은데 반해 지점 평균 추정절삭

력 ($\overline{F}_X, \overline{F}_Y, \overline{F}_Z$) 과 전체 평균 추정절삭력의 크기가 다르기 때문이다. 이와 같이 지점 평균 추정절삭력과 전체 평균 추정절삭력의 크기가 다른 이유를 구체적인 예를 들어 설명하면, Fig. 5는 절삭위치에 따른 접선 및 반경방향 절삭력 성분들을 도시한 것이다. 커터의 회전각이 $(90 - \beta)^\circ, (90 + \beta)^\circ$ 일 때 두 절삭점에서의 순간 미변형 칩두께(C) 및 접선 및 반경방향 절삭력 성분(F_T, F_R)의 크기는 동일하다. 그러나 절삭력 성분의 방향이 달라지므로 그 분력의 합인 X, Y축방향 절삭력의 크기는 달라진다. 따라서 평균 미변형 칩단면적을 절삭할 때 발생하는 평균 절삭력과 전체 평균 추정절삭력의 크기는 같지 않음을 알 수 있다.

Table 3 Cutting condition, the mean specific pressures and coefficients

NEW MODEL													EXISTING		
V	ft	d	N _t	θ _t	C _m	φ _m	F _X	F _Y	F _Z	K _{MT}	K _{MR}	K _{MA}	K _{MT}	K _{MR}	K _{MA}
108	0.03	0.5	99	1.03	26.1	62.8	155	-88	158	6200	0.90	0.90	5639	0.88	0.98
	0.04					34.8	212	-119	216	6357	0.89	0.90	5627	0.86	0.98
	0.05					43.7	241	-157	270	5733	1.02	0.98	5124	0.96	0.97
	0.1					87	393	-235	435	4680	0.96	0.98	4293	0.83	0.95
	0.2					174	624	-287	575	3773	0.75	0.84	3397	0.67	0.81
	0.03	1.0				26.1	254	-178	161	5309	0.90	0.49	4723	0.87	0.51
	0.04					34.8	333	-227	191	5251	0.87	0.44	4694	0.85	0.50
	0.05					43.5	382	-255	240	4790	0.87	0.49	4493	0.82	0.48
	0.1					87	672	-402	372	4241	0.78	0.44	3850	0.70	0.45
	0.2					174	1107	-499	545	3501	0.61	0.43	3188	0.54	0.41
	0.03	1.5				26.1	329	-207	133	4687	0.76	0.30	4026	0.77	0.39
	0.04					34.8	414	-277	181	4413	0.81	0.32	4073	0.76	0.35
	0.05					43.5	505	-337	221	4306	0.81	0.32	3854	0.75	0.35
	0.1					87	908	-574	369	3882	0.76	0.30	3545	0.65	0.33
	0.2					174	1443	-718	527	3086	0.62	0.30	2845	0.52	0.31
	0.11	2.0				96	1192	-651	382	3454	0.65	0.24	3102	0.53	0.33
	0.16					139	1462	-788	440	2973	0.64	0.23	2592	0.47	0.32
237	0.03	0.5	45	2.26	26.1	62.8	163	-89	168	6508	0.88	0.92	5149	0.73	0.59
	0.04					34.8	209	-121	239	6187	0.95	1.02	4260	0.72	0.66
	0.05					43.5	247	-138	276	5863	0.92	1.00	4080	0.68	0.64
	0.1					87	382	-191	420	4542	0.85	1.00	3789	0.62	0.62
	0.02	1.0				17.4	209	-136	168	6445	0.91	0.66	5638	0.93	0.70
	0.03					26.1	266	-174	188	5527	0.88	0.57	5011	0.90	0.61
	0.04					34.8	333	-233	236	5188	0.93	0.56	4628	0.88	0.59
	0.05					43.5	411	-243	258	5144	0.79	0.51	4355	0.82	0.55
	0.1					87	659	-345	356	4158	0.69	0.45	3522	0.70	0.47
	0.02	1.5				17.4	268	-162	98	5746	0.80	0.31	3977	0.77	0.38
	0.03					26.1	314	-226	121	4499	0.84	0.26	4098	0.75	0.33
	0.04					34.8	416	-253	180	4429	0.75	0.33	3947	0.71	0.34
	0.05					43.5	504	-312	200	4309	0.75	0.30	3885	0.69	0.33
	0.1					87	901	-467	320	3859	0.64	0.29	3379	0.59	0.31
	0.11	2.0				96	1201	-637	334	3452	0.62	0.21	3216	0.47	0.36
	0.16					139	1498	-739	388	3035	0.58	0.20	2686	0.51	0.26

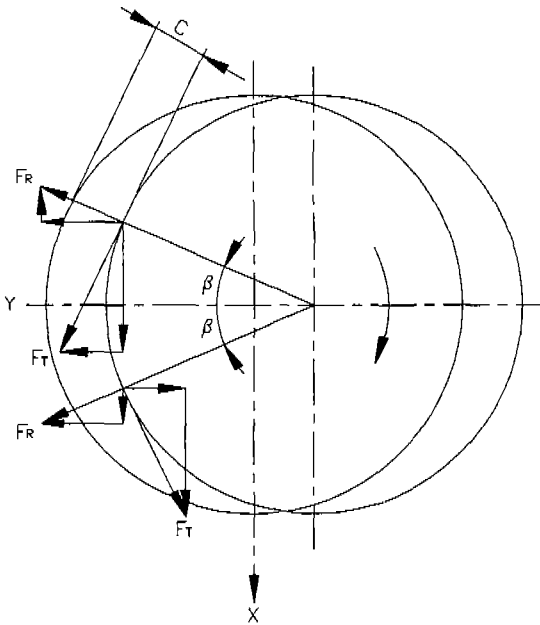


Fig. 5 Tangential and radial cutting force components according to cutting position.

새로운 절삭력 모델의 타당성을 검증하기 위해 Fig. 6 과 Fig. 8은 절삭속도 108m/min(346rpm), 날당이송 0.1mm/tooth(207mm/min), 절삭깊이 0.5mm인 실험조건에서 새로운 절삭력 모델로부터 시뮬레이션한 예측절삭력을 시간 및 주파수 영역에서 나타낸 것이며, Fig. 7과 Fig. 9는 공구동력계로부터 측정된 절삭력을 시간 및 주파수 영역에서 나타낸 것이다. Fig 6과 Fig 8 및 Fig. 7과 Fig. 9에서 나타난 바와 같이 새로운 절삭력 모델로부터 시뮬레이션한 절삭력과 동적 성분이 제거된 측정절삭력이 비교적 잘 일치함을 보여 주고 있다.

기존의 절삭력 모델과 새로운 절삭력 모델에 의한 예측 절삭력의 정확도를 비교하기 위해 커터가 1회전 하는 동안에 나타나는 Z개의 절삭력 주기에 대하여 커터의 회전각에 따른 각 위치에서의 측정절삭력 평균값(이하 주기 평균 측정절삭력)과 기존의 절삭력 모델로부터 시뮬레이션한 예측절삭력을 비교하여 도시한 것이 Fig. 10이고, 또한 새로운 절삭력 모델로부터 시뮬레이션한 예측절삭력을 비교하여 도시한 것이 Fig. 11이다. Fig. 10에서 X, Y, Z축방향의 절삭력이 피크값에 달하는 절삭 작업에 관여하는 첫번째 인서트의 위치각은 71.28°, 93.94°, 55.83° 일 때 이

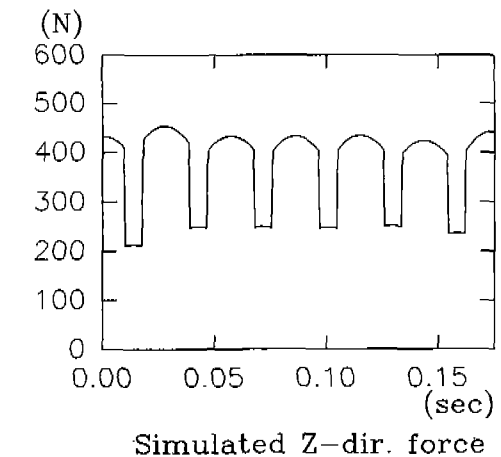
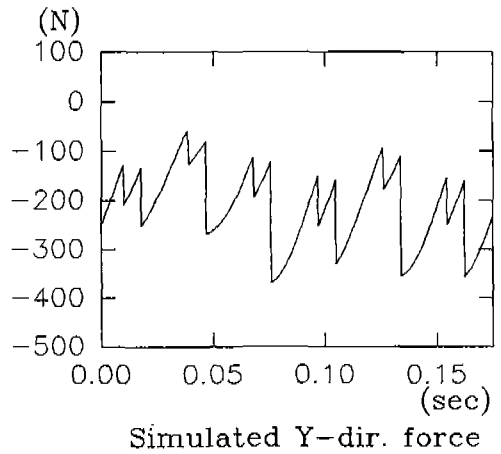
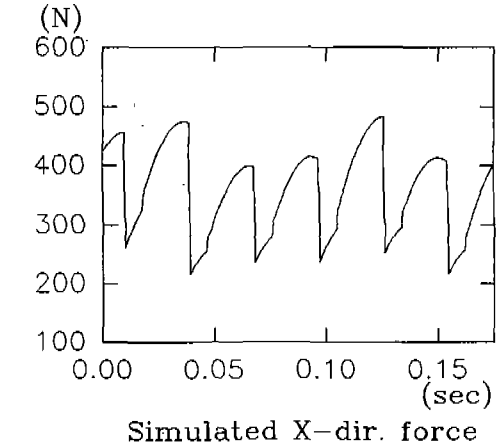


Fig. 6 Simulated cutting forces in time domain.

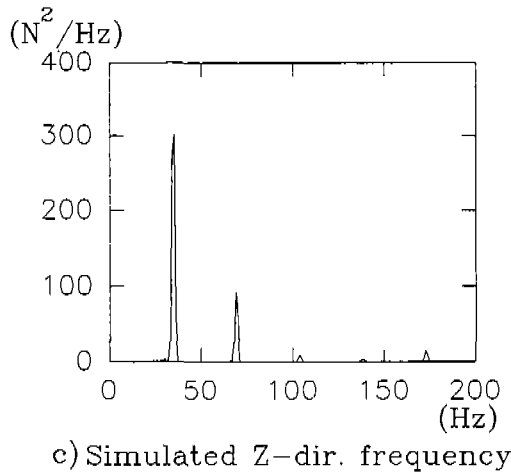
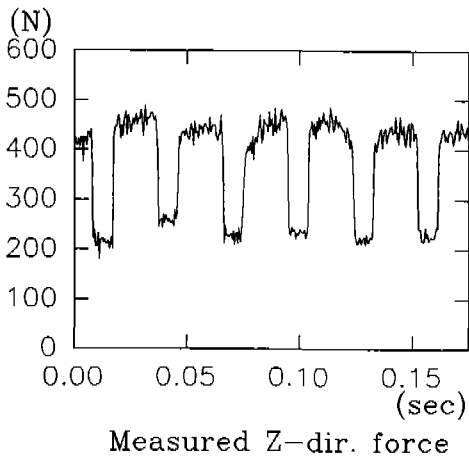
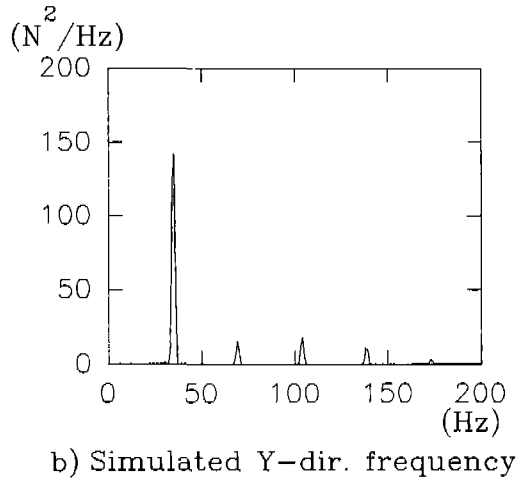
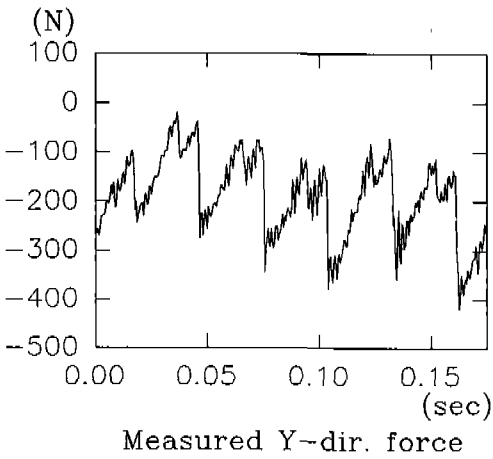
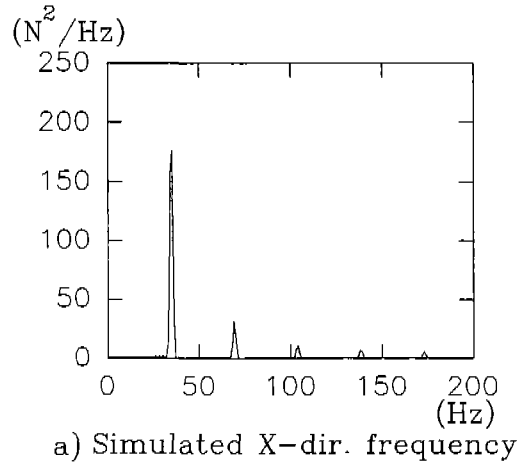
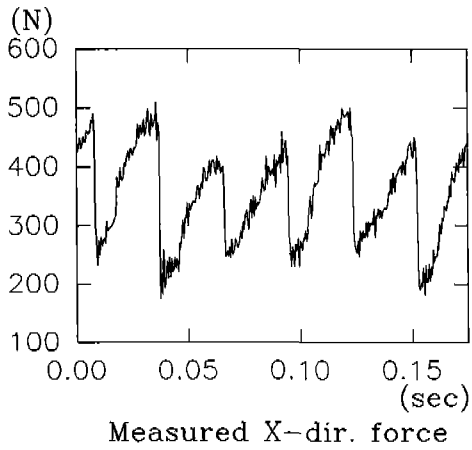
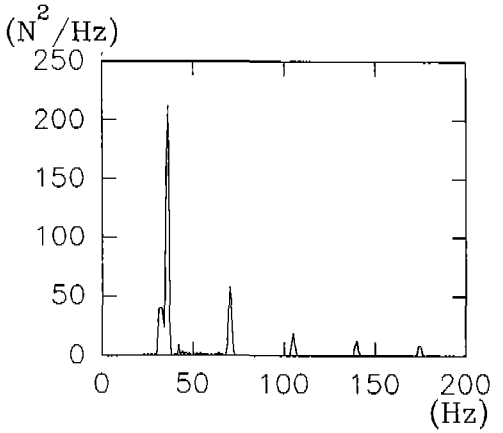
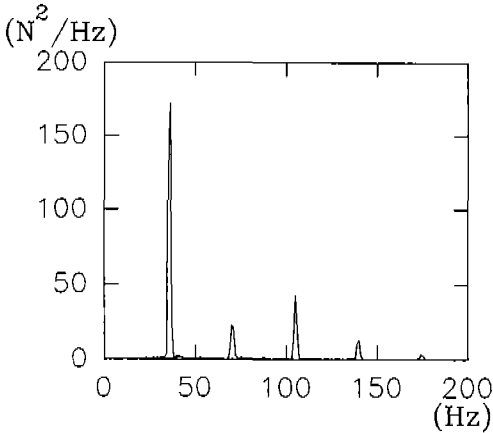


Fig. 7 Measured cutting forces in time domain.

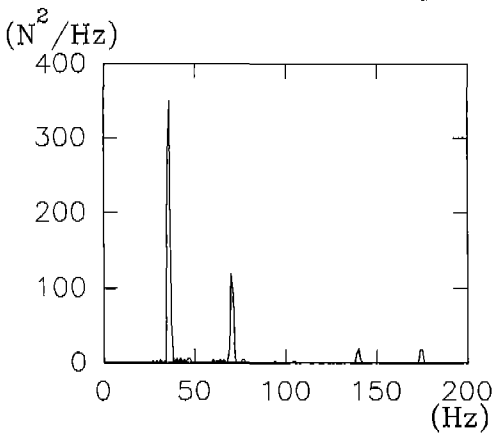
Fig. 8 Simulated cutting forces in frequency domain



a) Measured X-dir. frequency



b) Measured Y-dir. frequency



c) Measured Z-dir. frequency

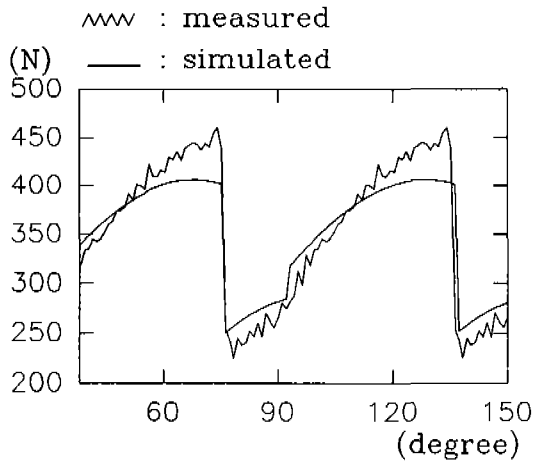
Fig. 9 Measured cutting forces in frequency domain

며, 이때의 주기 평균 측정절삭력은 442N, -326N, 437N 이고, 기존 절삭력 모델로부터의 예측절삭력은 405N, -279N, 376N으로 절삭력 예측오차는 37N, 47N, 61N이고, Fig. 11에서 새로운 절삭력 모델로부터의 예측절삭력은 413N, -305N, 435N으로 절삭력 예측오차는 29N, 21N, 2N이며, 또한 절삭력의 평균값에 있어서도 주기 평균 측정 절삭력의 평균값은 352N, -190N, 365N인데, 기존 절삭력 예측오차는 59N, 31N, 40N이고, 새로운 절삭력 모델에 의한 시뮬레이션한 절삭력의 평균값은 346N, -210N, 376N으로 절삭력 예측오차는 6N, 20N, 11N으로 기존의 절삭력 모델에 비해서 새로운 절삭력 모델로부터 시뮬레이션한 예측절삭력이 주기 평균 측정절삭력과 훨씬 잘 일치함을 알 수 있다. Table 3에 제시된 모든 실험조건에서 주기 평균 측정절삭력과 시뮬레이션한 절삭력을 비교한 결과 상기와 같은 현상이 나타남을 알 수 있었다.

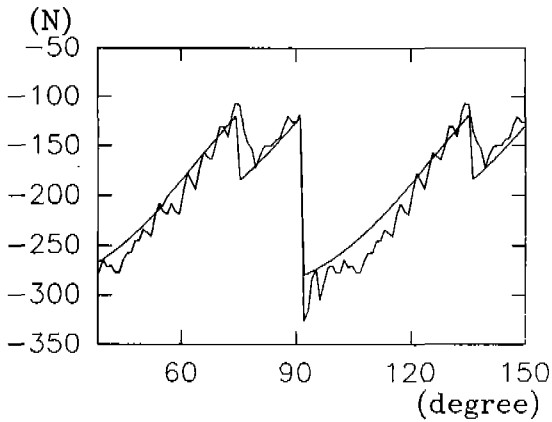
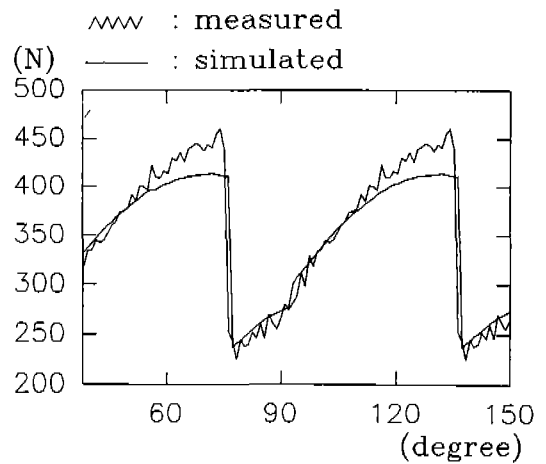
Fig. 12와 Fig. 13은 Fig. 3에 제시된 절삭조건 중 절삭속도 108m/min(346rpm), 절삭깊이 1.5mm인 절삭조건들에 대한 측정구간 전체의 측정절삭력들과 두 모델 각각 으로부터 시뮬레이션한 절삭력들의 평균값과 피크값을 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 것과 같이 각 축방향 측정치들과 새로운 모델의 예측치들의 평균값 및 피크값은 잘 일치하고 있으나, 기존 모델에 의한 예측치는 측정치에 비해 대체적으로 절대값이 낮게 나타났다. 이것은 전체 평균 측정절삭력이 지점평균 측정절삭력보다 작아 Table 3에 나타난 바와 같이 새로운 모델에 비해 기존 모델에 의한 접선방향 평균 비절삭저항 및 반경방향 비절삭계수가 작은 값을 가지기 때문이다.

Fig. 14와 Fig. 15는 각각의 실험조건에 대하여 미변형 칩단면적에 따른 접선방향 평균 비절삭저항 및 반경방향 평균 비절삭계수는 미변형 칩단면적의 증가에 따라 지수함수의 형태로 감소함을 보여주고 있고, 절삭속도에 대해서는 거의 영향을 받지 않음을 나타내고 있다.

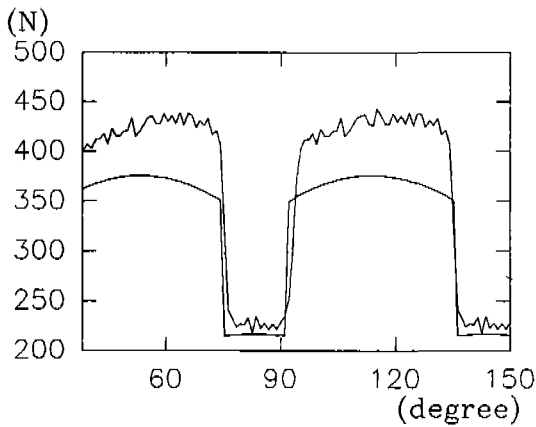
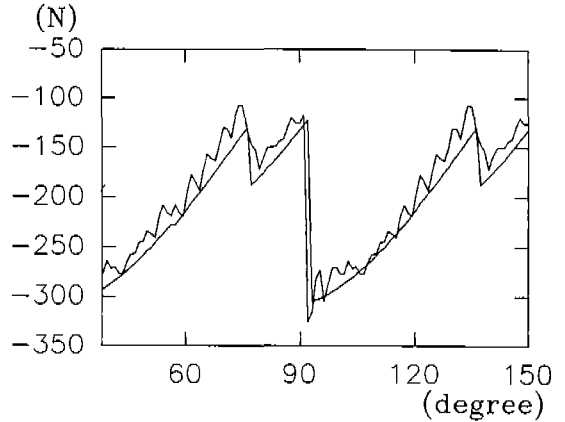
Fig. 16은 절삭깊이에 따른 축방향 평균 비절삭계수를 도시한 것이다. 축방향 평균 비절삭계수는 미변형 칩단면적의 영향은 거의 받지 않고, 절삭깊이의 증가에 따라서 지수함수의 형태로 감소현상을 나타내고 있으며, 절삭속도에 대해서는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16에서 나타나고 있는 바와 같이 접선방향 평균 비절삭저항 및 반경방향 평균 비절삭계수는 미변형 칩단면적의 함수로, 축방향 평균 비절삭계수



X-dir. force



Y-dir. force



Z-dir. force

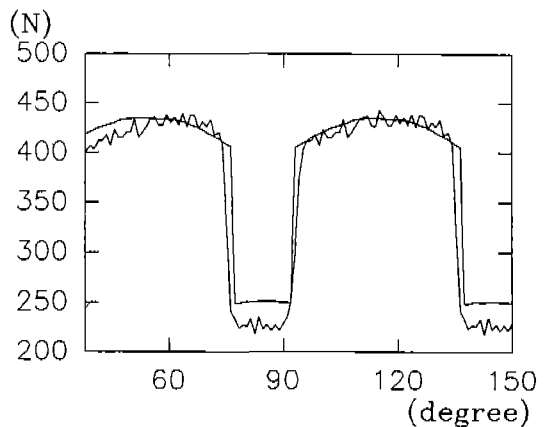


Fig. 10 The comparison between measured and simulated (existing model) periodic mean forces.

Fig. 11 The comparison between measured and simulated (new model) periodic mean forces.

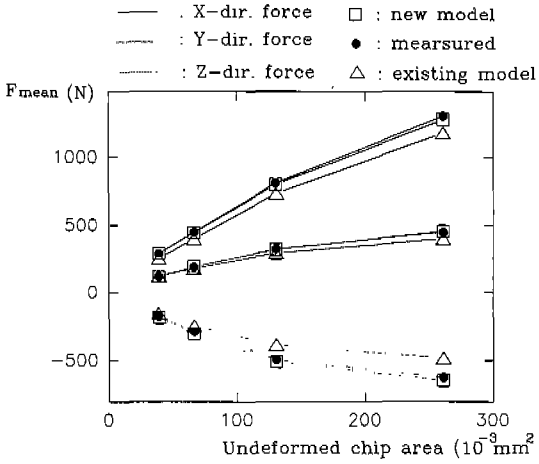


Fig. 12 The comparison between measured and simulated mean forces according to various cutting conditions .

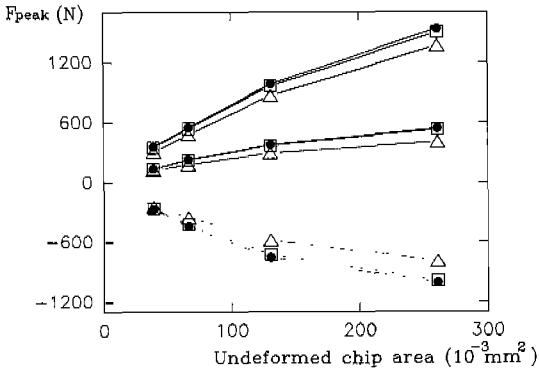


Fig. 13 The comparison between measured and simulated peak forces according to various cutting conditions.

는 절삭깊이의 함수로 아래와 같은 실험식으로 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 K_{MT} &= 4244.1e^{-0.029A} + 3582 \\
 K_{MR} &= 0.397e^{-0.011A} + 0.568 \\
 K_{MA} &= 1.795e^{-1.590d} + 0.138
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

여기서 A는 미변형 칩단면적을 나타내고, d는 절삭깊이를 나타낸다.

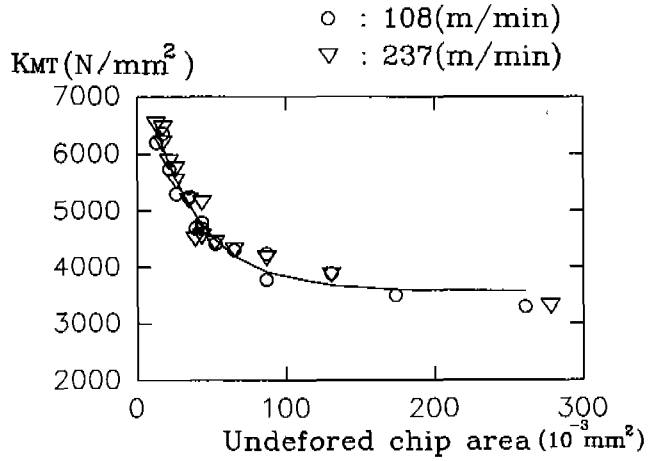


Fig. 14 Variation of mean specific cutting pressure according to undeformed chip area.

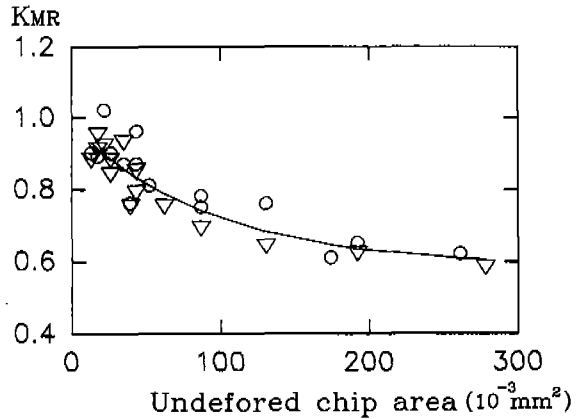


Fig. 15 Variation of radial direction mean specific cutting coefficient according to undeformed chip area.

5. 결 론

정면 밀링 작업에 있어 기존의 절삭력 모델에 커터의 회전각에 따라 매순간 변하는 비절삭저항을 평균값으로 처리한 평균 비절삭저항 모델을 적용한 절삭력 모델을 개발하고 시뮬레이션과 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 평균 비절삭저항 모델을 적용해 개발된 절삭력 모델은 기존의 절삭력 모델에 비해 시뮬레이션 절삭력과 측정

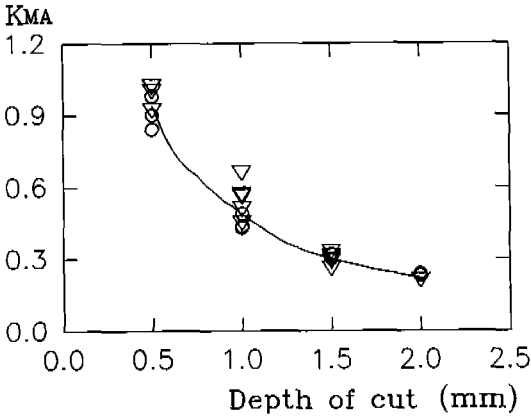


Fig. 16 Variation of axial directional mean specific cutting coefficient according to depth of cut.

절삭력이 잘 일치하고 있음을 보여 주므로 그 타당성을 입증할 수 있었다.

2. 개발된 평균 비절삭저항 모델을 적용해 얻어진 평균 비절삭저항 및 계수는 절삭조건들과 다음과 같은 관계가 있다.

1) 접선방향 비절삭저항 및 반경방향 비절삭계수는 미변형 칩단면적의 증가에 따라 지수함수의 형태로 감소하며, 실험식은 아래와 같다.

$$K_{MT} = 4244.1e^{-0.029A} + 3582$$

$$K_{MR} = 0.397e^{-0.011A} + 0.568$$

2) 축방향 비절삭계수는 절삭깊이의 증가에 따라 지수함수의 형태로 감소하며, 실험식은 아래와 같다.

$$K_{MA} = 1.795e^{-1.590d} + 0.138$$

NOMENCLATURE

- A(ϕ_m) : 평균 미변형 칩단면적(mm²)
- C($\theta_i(\phi)$) : 커터의 회전각이 ϕ 일 때 i번째 인서트의 순간 미변형 칩두께(mm)
- Cm : 평균 미변형 칩두께(mm)

- Cw(ϕ) : 커터의 회전각이 ϕ 일 때 절삭작업에 관여하는 인서트에 의한 순간 미변형 칩두께의 합(mm)
- Cww : 한 절삭 주기 동안의 순간 미변형 칩두께의 총합(mm)
- d : 절삭깊이(mm)
- F_x($i\phi$) : 커터의 회전각이 ϕ 일 때 i번째 인서트에 작용하는 X방향의 절삭력(N)
- F_y($i\phi$) : 커터의 회전각이 ϕ 일 때 i번째 인서트에 작용하는 Y방향의 절삭력(N)
- F_z($i\phi$) : 커터의 회전각이 ϕ 일 때 i번째 인서트에 작용하는 Z방향의 절삭력(N)
- F_x(ϕ) : 커터의 회전각이 ϕ 일 때 절삭중인 인서트에 작용하는 X방향의 절삭력(N)
- F_y(ϕ) : 커터의 회전각이 ϕ 일 때 절삭중인 인서트에 작용하는 Y방향의 절삭력(N)
- F_z(ϕ) : 커터의 회전각이 ϕ 일 때 절삭중인 인서트에 작용하는 Z방향의 절삭력(N)
- $\overline{F_x}(\phi_m)$: 커터가 1회전 할 동안의 평균 미변형 칩두께가 나타날 때의 X방향의 추정절삭력의 평균값(N)(지점 평균 추정절삭력)
- $\overline{F_y}(\phi_m)$: Y방향의 지점 평균 추정절삭력(N)
- $\overline{F_z}(\phi_m)$: Z방향의 지점 평균 추정절삭력(N)
- ft : 인서트 낱당 이송량(mm/tooth)
- H₁, H₂ : 커터의 중심으로부터의 공작물의 폭(mm)
- K_T : 접선방향의 비절삭저항(N/mm²)
- K_R : 반경방향의 비절삭계수(접선방향의 절삭력과 관련된 무차원상수)
- K_A : 축방향의 비절삭계수(접선방향의 절삭력과 관련된 무차원상수)
- K_{MT} : 접선방향의 평균 비절삭저항(N/mm²)
- K_{MR} : 반경방향의 평균 비절삭계수(접선방향의 절삭력과 관련된 무차원상수)
- K_{MA} : 축방향의 평균 비절삭계수(접선방향의 절삭력과 관련된 무차원상수)
- K_{MT} : 기존의 절삭력 모델에 의한 접선방향의 평균 비절삭저항(N/mm²)
- K_{MR} : 기존의 절삭력 모델에 의한 반경방향의 평균 비절삭계수 (무차원상수)
- K_{MA} : 기존의 절삭력 모델에 의한 축방향의 평균 비절삭계수(무차원상수)

N : 커터의 회전수(rpm)

N_0 : 한 절삭력 주기 동안의 순간 미변형 칩두께 수

N_s : 한 절삭력 주기 동안의 샘플링 수

R : 커터의 반경(mm)

S : 샘플링 타임(sec)

Z : 커터에 장착된 인서터의 수

Z_c : 절삭작업에 참여중인 인서터의 수

V : 절삭속도(m/min)

γ_A : 인서터의 축방향의 경사각(degree)

γ_R : 인서터의 반경방향의 경사각(degree)

γ_L : 커터의 리이드 각(degree)

$\theta_i(\phi)$: 커터의 회전각이 ϕ 일때 i 번째 인서터의 위치
(degree)