

플라즈마 이온주입 공구의 가공조건이 절삭력과 표면 거칠기에 미치는 영향 분석

강성기*

(Manuscript received: Apr, 17, 2012 / Revised: Jul, 26, 2012 / Accepted: Aug, 6, 2012)

Analysis of the Effects of Cutting Force and Surface Roughness in the Cutting Conditions of Plasma Source Ion Implantation Tools

Seong Ki Kang*

Abstract

In this study, three dimensional cutting force components and surface roughness appeared in high speed cutting by using tungsten carbide endmill tools implanted ion or not found mutual relations through several analysis of statistical dispersion. It is showed that cutting force(F_x) is affect with spindle speed and feed rate, cutting force(F_y) is affect with spindle speed and ion implantation time and cutting force(F_z) is affect with feed rate in interaction through the statistical method of ANOVA of cutting force and surface roughness, it is analyzed that it is affected of spindle speed and feed rate in surface roughness.

Key Words : Plasma source ion implantation(플라즈마 이온주입: PSII), High voltage pulse generator(고전압 펄스 발생장치), Main effects plot(주효과 플롯), Analysis of variance(분산분석: ANOVA)

1. 서론

초경엔드밀 공구의 소재인 초경합금은 1980년대에는 0.5 μ m 크기의 입도를 가진 초경합금 제품생산을 통해 현재에는 100nm 크기의 초경 분말을 사용한 최종 소결품의 입자는 200nm 크기를 나타내어 기존 초경합금에 비해 경도와 항절력이 향상된 것으로 나타났으며, 초 미립(ultra-fine) 초경합금은 경도, 강도, 인성 등이 매우 우수한 기계적인 특성을 갖고 있기 때문에 최근 초경산업에 큰 관심을 끌고 있다⁽¹⁾.

초경엔드밀 공구는 반도체 산업뿐만 아니라 정보통신, 우주항공 산업에서도 필수적인 공구로 어떤 공구보다 전체적인 경

제 상황에서 큰 영향을 미치는 특성을 지니고 있다. WC-Co 주성분인 초경 엔드밀 공구는 경도가 높은 육방결정의 구조를 가지는 WC 상에서 연성이 우수한 Co가 결합되어 첨가된 형태로 우수한 내마멸 특성을 나타내어 최근 들어 PSII 장치의 기술 개발 및 소재의 발달로 인하여, WC-Co 초경합금 소재의 내마멸성을 향상시키기 위해서 연구하는 경우가 있으며, 현재 알려진 바에 의하면 공구강, 금형 소재 등에 질소를 이온 주입한 결과 내구성, 수명향상, 마멸에 대한 저항을 증가시키는 것으로 알려져 있다⁽²⁾.

고속정밀 가공에서 공구의 효과적인 가공을 하려면 고속에서 장시간 견딜 수 있는 새로운 공구의 개발이 필요한 실정이며

* 한국폴리텍 VII대학 창원캠퍼스 컴퓨터응용기계설계학과 (kskjh114@kopo.ac.kr)
주소: 642-772 경남 창원시 성산구 외동반림로 51-88번지

기계적 성질과 내마멸성을 복합적으로 갖는 새로운 공구의 표면개질을 갖기 위하여 기존 비 코팅 초경엔드밀 공구를 플라즈마 이온주입(plasma source ion implantation : PSII) 하여 성능을 향상시키고자 하였다. 플라즈마 이온 주입 처리를 이용한 표면개질 방법은 처리 공정이 매우 간편하고 비교적 공정 가격이 저렴하여 많은 연구 그룹들이 이용하고 있는 방법 중의 하나이다⁽³⁻⁶⁾.

본 연구에서는 초경엔드밀을 이온주입한 공구와 미주입한 공구를 이용하여 가공조건에 따른 고속 절삭가공에서 나타나는 3분력을 통하여 플라즈마 이온주입 공구의 가공특성이 표면 거칠기에 어떤 영향을 미치는지 요인 인자에 대한 통계 분산 분석을 통하여 상호 관계를 찾아내어 정밀가공에 대한 신뢰성을 높일도록 하고자 한다.

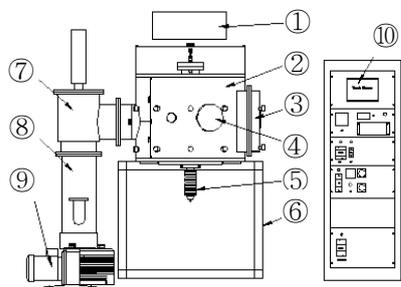
2. 플라즈마 이온주입과 절삭가공 방법

이온 주입에 사용된 공구는 2날 비코팅 초경엔드밀로 Table 1에서 보는바와 같이 화합성분을 나타내고 있다. 엔드밀 공구는 이온주입하기위해 플라즈마 이온주입장치의 샘플스테이지에 꽂고 챔버내 중심센터에 고정하며, 그리드 망 보다 10mm 높게 설치한 후, R/P, 확산펌프(diffusion pump), 히터, 가스압력계까지 스위치를 작동시키고 히팅을 동작한 다음 온도제어 스위치를 작동시킨다. 천천히 전압을 100V로 조정하면 후 로터리 펌프를 가동하여 작업을 진행한다.

저 진공 게이지가 2.0×10^{-3} Torr 될 때까지 유지한 후, 2.0×10^{-5}

Table 1 Chemical composition of tungsten carbide endmill material for high speed cutting

Chemical data	WC	Co	Grain size: 0.6-0.8 micro grain
	90%	10%	



- ① Matching network
- ② Chamber
- ③ Chamber door
- ④ View port
- ⑤ Pulse power feed through
- ⑥ Frame
- ⑦ Main valve
- ⑧ Diffusion pump
- ⑨ Oil rotary pump
- ⑩ Controller

Fig. 1 Schematic illustration of the developed PSII equipment

Torr가 되도록 고 진공상태로 만들며 진공 상태가 완료되면 질소가스를 투입하고, R/F 파워 스플라이 를 동작시키며 이때 냉각 팬도 함께 가동시킨다. 전압을 350W 정도로 높이고 40분간 플라즈마를 충분히 생성되도록 한다.

RF 플라즈마 작업이 완료되면 고전압 펄스 발생장치(high voltage pulse generator)를 주파수 500Hz, Pw:2us와 인가전압(27kV, 35kV, 43kV) 조건에 각각 맞게 설정한 후, Negative pulse bias를 가하면 시료를 둘러싸고 있는 이온들이 가속되어 플라즈마가 시료의 표면에 주입하게 된다. 실험에 사용된 공구는 신뢰성을 갖기 위해 이온 주입시간을 2시간, 4시간, 6시간을 적용하였다. Fig. 1은 플라즈마 이온주입 장치의 구조를 나타낸 것이며 Fig. 2에서는 플라즈마 이온 주입한 공구를 나타내고 있다.

가공실험에 사용된 소재는 냉간용 공구강 STD11이며 열처리하지 않은 소재로 크기는 30mm×60mm×25mm이다. 사용된 공구의 작업 조건은 건식절삭(dry cutting)으로 이온주입한 공구와 이온주입하지 않은 공구를 사용하여 고속가공을 Table 2와 같은 조건으로 실시하였다. CATIA를 이용하여 모델링 및 모의가공을 통하여 NC 데이터를 공구직경 1.5mm 폭으로 겹치게 바깥에서 안쪽으로 스파이럴 방식으로 가공하였다.

Fig. 3에서 보는바와 같이 고속가공에서 절삭 3분력을 측정하기 위하여 고속가공기(OKADA GM 544)의 테이블에 압전 소자형 공구동력계(Kistler, 9257BA)를 설치하여 공구 동력계



Fig. 2 Plasma source ion implanted tungsten carbide endmill

Table 2 Experimental conditions of machining

Spindle speed(rpm)	Feed rate(mm/min)	Depth of cut(mm)
10,000	2000	0.2
17,000	3500	
25,000	5000	



Fig. 3 Experimental equipment of measurement cutting force by tool dynamometer

에서 얻어진 절삭력 신호를 Lab VIEW 프로그램을 이용하여 다채널 증폭기 DAQ Borad(Ni Co, AT-MIO- 16E-1)를 거쳐 내장된 A/D 변환기에서 각 채널의 신호를 이산 신호로 바꾸어 터미널을 통해 자동으로 컴퓨터에 저장되도록 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 이온주입 조건에 따른 절삭력의 분산분석

Table 3은 10000, 17000, 25000rpm에서 가공시 주축회전수, 이송속도, 인가전압 및 이온 주입시간의 조건에 따른 절삭력 실험 결과 평균값에서 2인자 교호작용을 고려한 통계 분산분석 결과 절삭력 Fx는 Table 3과 같이 나타내었으며, Fig. 4는 절삭력

Table 3 Analysis of variance for cutting force Fx

Source	DF	SS	MS	F	P
Spindle speed	2	39,636	19,818	7.95	0.001
Feed rate	2	75,049	37,524	15.05	0.000
Voltage	2	10,655	5,327	2.14	0.129
Time	2	14,569	7,284	2.92	0.063
Spindle speed×feed rate	4	221,900	55,475	22.25	0.000
Spindle speed×voltage	4	8,168	2,042	0.82	0.519
Spindle speed×time	4	13,939	3,485	1.40	0.249
Feed rate×voltage	4	4,549	1,137	0.46	0.767
Feed rate×time	4	7,763	1,941	0.78	0.545
Voltage×time	4	19,296	4,824	1.94	0.120
Residual error	48	119,661	2,493		
Total	80	535,184			

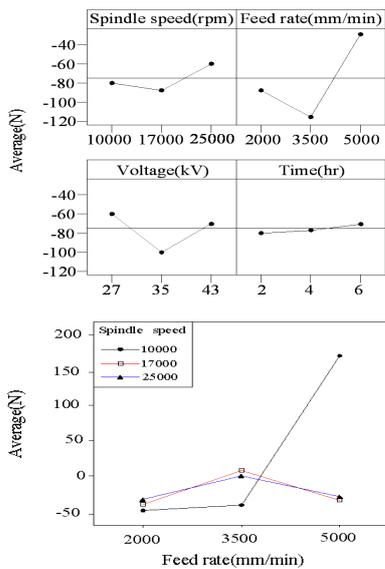


Fig. 4 Main effects plot and interaction plot of average data by cutting forces Fx

Fx의 데이터 평균 주 효과 플롯(main effects plot)과 주축회전수, 이송속도, 인가전압, 이온 주입시간 등 인자를 절삭력 Fx의 데이터 평균에 대한 상호작용 플롯을 나타내고 있다.

Table 3에서 보는바와 같이 주축회전수와 이송속도에서 주축회전수와 이송속도의 교호작용이 절삭력 Fx에 유의한 영향을 주는 것으로 분석되었다.

절삭력 Fy에 대한 분산분석은 Table 4와 같은 결과 값을 나타내고 있으며, 주축회전수와 이송속도 및 이온 주입시간과 주축회전수의 이온 주입시간의 교호작용이 절삭력 Fy에 유의한 영향을 주는 것으로 나타났다. Fig. 5는 절삭력 Fy의 데이터

Table 4 Analysis of variance for cutting force Fy

Source	DF	SS	MS	F	P
Spindle speed	2	56,235	28,118	5.81	0.005
Feed rate	2	28,127	14,064	2.91	0.064
Voltage	2	8,586	4,293	0.89	0.418
Time	2	37,729	18,865	3.90	0.027
Spindle speed×feed rate	4	15,010	3,752	0.78	0.546
Spindle speed×voltage	4	19,678	4,920	1.02	0.408
Spindle speed×time	4	63,751	15,938	3.30	0.018
Feed rate×voltage	4	13,019	3,255	0.67	0.614
Feed rate×time	4	22,099	5,525	1.14	0.348
Voltage×time	4	14,843	3,711	0.77	0.552
Residual error	48	232,130	4,836		
Total	80	511,207			

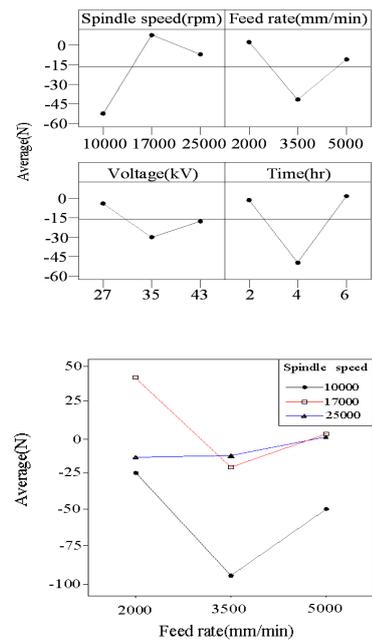


Fig. 5 Main effects plot and interaction plot of average data by cutting forces Fy

평균의 주 효과 플롯과 주축회전수, 이송속도, 인가전압, 이온 주입 시간 등 인자를 절삭력 Fz의 데이터 평균에 대한 상호작용 플롯을 나타내었다. 절삭력 Fz에 대한 분산분석에서는 Table 5와 같은 결과 값이 나타내었고, 이송속도에만 절삭력 Fz에 유의한 영향을 주는 것으로 분석되었다.

Fig. 6은 절삭력 Fz의 데이터 평균 주 효과 플롯과 주축회전수, 이송속도, 인가전압, 이온주입 시간 등 인자를 절삭력 Fz의 데이터 평균에 대한 상호작용 플롯을 나타내었다. 따라서 종합적으로 절삭력에 대한 인자들의 영향을 분석하면, 절삭력 Fx는 주축회전수, 이송속도, 이온주입 시간과 주축회전수 및 이송속도의 교호 작용에 영향을 받으며, 절삭력 Fy는 주축회전수, 이

Table 5 Analysis of variance for cutting force Fz

Source	DF	SS	MS	F	P
Spindle speed	2	10,018	5,009	0.52	0.598
Feed rate	2	111,071	55,536	5.76	0.006
Voltage	2	27,324	13,662	1.42	0.253
Time	2	1,878	939	0.10	0.907
Spindle speed×feed rate	4	52,300	13,075	1.36	0.263
Spindle speed×voltage	4	53,064	13,266	1.38	0.257
Spindle speed×time	4	11,189	2,797	0.29	0.883
Feed rate×voltage	4	27,578	6,895	0.71	0.586
Feed rate×time	4	4,986	1,247	0.13	0.971
Voltage×time	4	63,934	15,983	1.66	0.176
Residual error	48	463,055	9,647		
Total	80	826,398			

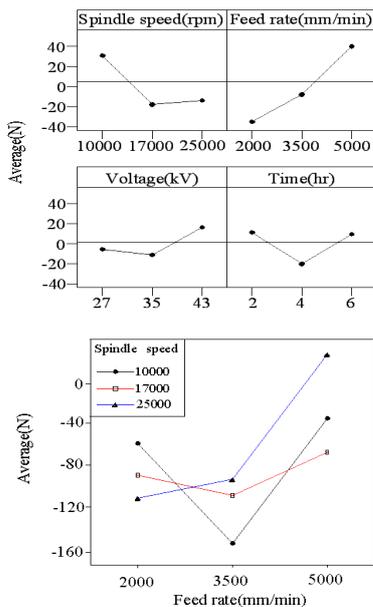


Fig. 6 Main effects plot and interaction plot of average data by cutting forces Fz

송속도, 이온주입 시간과 주축회전수 및 이온주입 시간의 교호 작용에 영향을 받았으나 절삭력 Fz는 이송속도에만 영향을 받는 것으로 분석되었다.

3.2 이온 주입과 절삭력 및 표면 거칠기의 분산분석

표면 거칠기 측정을 위해 사용된 장비는 비 접촉식 표면 거칠기(LASERTEC OPTICS H1200)이며 Table 6은 측정에 사용된 파라메타 설정 값을 나타내고 있다.

Fig. 7에서 보논바와 같이 표면에서 가장 크게 나타나는 길이 가공 방향과 직각 방향인 면을 중심선 평균 거칠기(Ra)로 측정하였다. 중앙에서 양쪽으로 측정 1면과 측정 2면의 화살표 방향으로 주축회전수, 이송속도, 인가전압 및 이온주입 시간의 조건에 따른 고속가공 시험편의 표면 거칠기 값을 3회 측정하여 평균한 값을 Table 7에서 Table 9까지 나타내고 있다.

측정 1면의 표면 거칠기에서 가장 기여도가 높은 설계 변수를 알아보기 위해 2인자 교호작용을 고려한 통계적 분산 분석

Table 6 A sample of measurement parameters

Evaluate Condon List 《Profile =PLS Section=[1]》		Measurement Condition	
Standard	OLDMIX	Measurement Length	15.0mm
Kind of Profile	PLS	Column Escape	5.0mm
Sampling Length(le)	2.5mm	Auto-Leveling	Off
No of Sampling(nle)	1	Speed	0.0mm/s
Le	0.008mm	Over Range	Abort
Kind of Filter	Robust Spline	Pitch	1.0μm
Evlth Length(lm)	12.5mm	Machine	SV-C3000H4
Pre-Travel	0.4mm	Detector	Detecto (0.75mN)
Smooth Connection	Off	Arm Compensation	Off
Mean Line Compensation	Off	Auto-Notch(+)	Off
		Compensation Method	Off

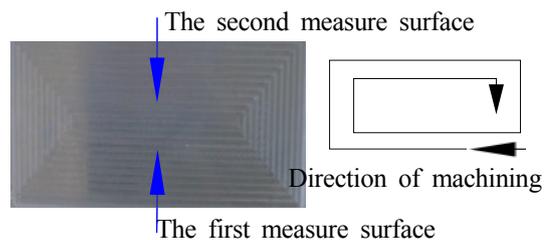


Fig. 7 Measuring direction of the machined surface

Table 7 Surface roughness results of 10,000rpm

Spindle speed 10,000rpm/Depth of cut(0.2mm) /Surface roughness unit(μm)							
Feed rate(mm/min)		2,000		3,500		5,000	
Measure surface		1	2	1	2	1	2
Ion implanted conditions	27kV-2hr	0.826	0.986	1.545	2.129	2.580	3.242
	27kV-4hr	1.387	1.574	1.071	1.011	3.290	3.066
	27kV-6hr	2.462	2.333	1.043	0.986	1.701	1.570
	35kV-2hr	0.906	0.794	0.801	0.621	0.981	0.769
	35kV-4hr	0.963	0.820	1.097	1.502	4.882	3.844
	35kV-6hr	2.542	1.564	1.564	1.550	1.393	1.111
	43kV-2hr	0.393	0.420	0.737	0.675	3.073	2.847
	43kV-4hr	0.950	1.232	1.813	1.540	3.105	2.808
	43kV-6hr	0.818	0.841	1.539	1.451	3.553	3.008
	WC-Co	1.167	1.059	1.595	1.674	3.720	3.055

Table 8 Surface roughness results of 17,000rpm

Spindle speed 10,000rpm/Depth of cut(0.2mm) /Surface roughness unit(μm)							
Feed rate(mm/min)		2,000		3,500		5,000	
Measure surface		1	2	1	2	1	2
Ion implanted conditions	27kV-2hr	1.583	1.799	1.596	1.623	1.93	1.709
	27kV-4hr	1.030	1.849	1.202	1.480	1.969	2.378
	27kV-6hr	0.552	0.469	1.561	1.239	2.337	2.782
	35kV-2hr	0.639	0.616	1.444	1.788	1.335	1.473
	35kV-4hr	0.727	0.578	1.193	1.574	0.975	1.073
	35kV-6hr	0.291	0.475	2.289	2.063	2.295	2.749
	43kV-2hr	0.607	0.575	1.076	1.175	3.395	2.733
	43kV-4hr	0.813	0.836	1.953	1.516	1.230	0.982
	43kV-6hr	1.095	1.215	1.456	1.729	1.397	1.715
	WC-Co	1.181	1.052	2.104	1.852	1.849	1.831

Table 9 Surface roughness results of 25,000rpm

Spindle speed 10,000rpm/Depth of cut(0.2mm) /Surface roughness unit(μm)							
Feed rate(mm/min)		2,000		3,500		5,000	
Measure surface		1	2	1	2	1	2
Ion implanted conditions	27kV-2hr	1.168	0.926	0.426	0.447	1.184	1.067
	27kV-4hr	0.891	0.740	0.804	0.781	1.203	1.156
	27kV-6hr	0.919	0.857	1.184	1.301	1.150	1.323
	35kV-2hr	1.065	1.068	1.036	0.955	1.500	1.376
	35kV-4hr	0.992	0.987	1.460	1.395	0.976	0.946
	35kV-6hr	0.797	0.720	0.802	1.316	1.353	1.307
	43kV-2hr	0.875	0.768	0.830	0.890	0.678	0.629
	43kV-4hr	0.835	1.226	1.150	0.851	1.065	0.943
	43kV-6hr	0.653	0.865	1.161	1.277	1.864	1.864
	WC-Co	1.221	1.132	1.217	1.347	1.408	1.662

(analysis of variance: ANOVA)을 실시하여 각 요인(source)에 대한 자유도(DF), 제곱합(SS), 제곱평균(MS), 분산비(F), 유의확률(P)의 상호관계 특성을 분석한 결과 Table 10과 같은 값을 나타내었는데 주축회전수와 이송속도 및 주축회전수와 이송속도의 교호작용이 측정 1면에 유의한 영향을 주는 것으로 분석되었다.

Table 10 ANOVA for the first measure surface

Source	DF	SS	MS	F	P
Spindle speed	2	5.3341	2.6671	7.76	0.001
Feed rate	2	10.4681	5.2340	15.22	0.000
Voltage	2	0.6635	0.3317	0.96	0.388
Time	2	0.6564	0.3282	0.95	0.392
Spindle speed \times feed rate	4	4.0773	1.0193	2.96	0.029
Spindle speed \times voltage	4	1.1167	0.2792	0.81	0.524
Spindle speed \times time	4	1.3901	0.3475	1.01	0.411
Feed rate \times voltage	4	1.4151	0.3538	1.03	0.402
Feed rate \times time	4	0.0973	0.0243	0.07	0.991
Voltage \times time	4	0.8583	0.2146	0.62	0.648
Residual error	48	16.5056	0.3439		
Total	80	42.5824			

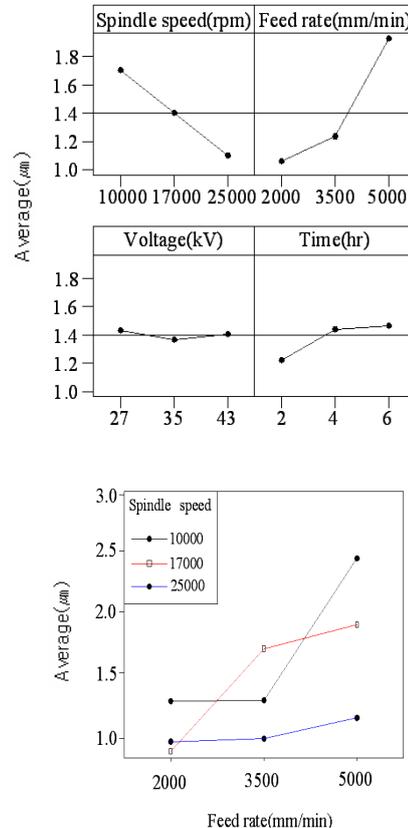


Fig. 8 Main effects plot and interaction plot of average data by the first measure surface

Fig. 8은 측정 1면의 주 효과 플롯(main effects plot)과 평균 데이터의 상호작용 플롯을 나타내고 있다. 측정 2면에 대한 분산분석 결과 값은 Table 11에서 보논바와 같이 주축회전수 및 이송속도와 주축회전수, 이송속도의 교호작용이 측정 2면에 유의한 영향을 주는 것으로 분석되었다.

Fig. 9는 측정 2면의 주 효과 플롯과 측정 2면에 대한 평균 데이터의 상호작용 플롯을 나타내고 있다. 따라서 표면 거칠기 측정결과에서 측정 1면과 측정 2면 모두가 주축회전수, 이송속도의 교호작용에 유의한 영향을 받는 것으로 나타났다.

Table 11 ANOVA for the second measure surface

Source	DF	SS	MS	F	P
Spindle speed	2	6.6860	3.3430	8.02	0.001
Feed rate	2	12.9679	6.4839	15.55	0.000
Voltage	2	0.1086	0.0543	0.13	0.878
Time	2	0.6752	0.3376	0.81	0.451
Spindle speed × feed rate	4	5.9096	1.4774	3.54	0.013
Spindle speed × voltage	4	0.4008	0.1002	0.24	0.914
Spindle speed × time	4	2.4631	0.6158	1.48	0.224
Feed rate × voltage	4	1.5547	0.3887	0.93	0.453
Feed rate × time	4	0.4145	0.1036	0.25	0.909
Voltage × time	4	0.4812	0.1203	0.29	0.884
Residual error	48	20.0133	0.4169		
Total	80	51.6749			

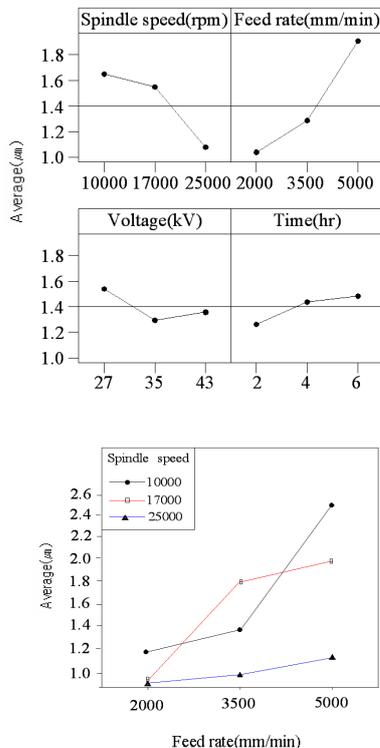


Fig. 9 Main effects plot and interaction plot of average data by the second measure surface

4. 결론

본 논문에서는 고속가공용 공구로 많이 사용하는 초경엔드밀에 플라즈마 이온 주입하여 이온주입 조건(27kV, 35kV, 43kV에서 2시간, 4시간, 6시간)과 가공 조건(주축회전수 10,000, 17,000, 25,000rpm 및 이송속도 2,000, 3,500, 5,000mm/min)으로 STD11 소재를 고속절삭 가공하였다. 절삭 3분력에서 나타난 결과 값을 통계 분산 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

절삭조건에 따른 인자(주축회전수, 이송속도, 이온주입 시간, 인가전압)들의 요인 관계에서 교호작용으로 절삭력 Fx는 주축회전수와 이송속도의 영향을 받았고, 절삭력 Fy는 주축회전수와 이온 주입시간에 영향을 받았고, 절삭력 Fz는 이송속도에만 영향을 받는 것으로 나타났다. 표면 거칠기에 따른 인자들의 요인에서는 표면 거칠기 측정 결과에서 측정 1면과 측정 2면 모두가 주축회전수, 이송속도의 교호작용에 유의한 영향을 받는 것으로 나타났다.

References

- (1) Kim, D. H., Kim, J. S., Woo, Y. W., and Lee, H. H., 2007, "A Study on the Performance Evaluation of End Mill Tool Fabricated by Ultra-Fine WC," *Transactions of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers.*, Vol. 16, No. 6, pp. 1~8.
- (2) Berdichevsky, Y., Khandurina, J., Guttman, A., and Lo, Y. H., 2004, "UV/ozone Modification of Poly (dimethylsiloxane) Microfluidic Channels," *Sensor and Actuat B-Chemical.*, Vol. 97, No. 16, pp. 402~408.
- (3) Lee, S., and Voros, J., 2005, "An Aqueous-based Surface Modification of Poly(dimethylsiloxane) (PDMS) with Poly(ethylene glycol)(PEG) to Prevent Biofouling in Microfluid System Applications," *Langmuir.*, Vol. 21, No. 25, pp. 11957~11962.
- (4) Langowski, B. A., and Uhrich, K. E., 2005, "Oxygen Plasma-treatment Effects on Si Transfer," *Langmuir.*, Vol. 21, No. 14, pp. 6366~6372.
- (5) Hellmich, W., Regtmeier, J., Duong, T. T., Ros, R., Anselmetti, D., and Ros, A., 2005, "Poly (oxyethylene) based Surface Coatings for Poly (dimethylsiloxane) Microchannels," *Langmuir.*, Vol. 21, No. 16, pp. 7551 ~7557.
- (6) Kang, S. K., Wang, D. H., and Kim, W. I., 2011, "Enhancement of Wear Resistance by Low Heat Treatment and the Plasma Source Ion Implantation of Tungsten Carbide Tool," *The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers.*, Vol. 20, No. 2, pp. 121~218.