

공학박사 학위논문

고속가공에서 절삭공구 성능평가 및
고속연삭용 슛돌 개발



2007년 2월

부경대학교 대학원

기계공학부

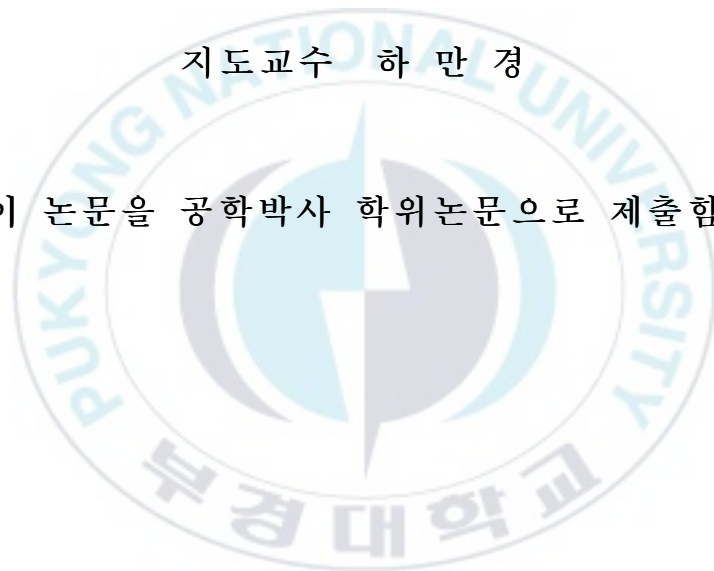
이 상 진

공학박사 학위논문

고속가공에서 절삭공구 성능평가 및
고속연삭용 슷돌 개발

지도교수 하 만 경

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함



2007년 2월

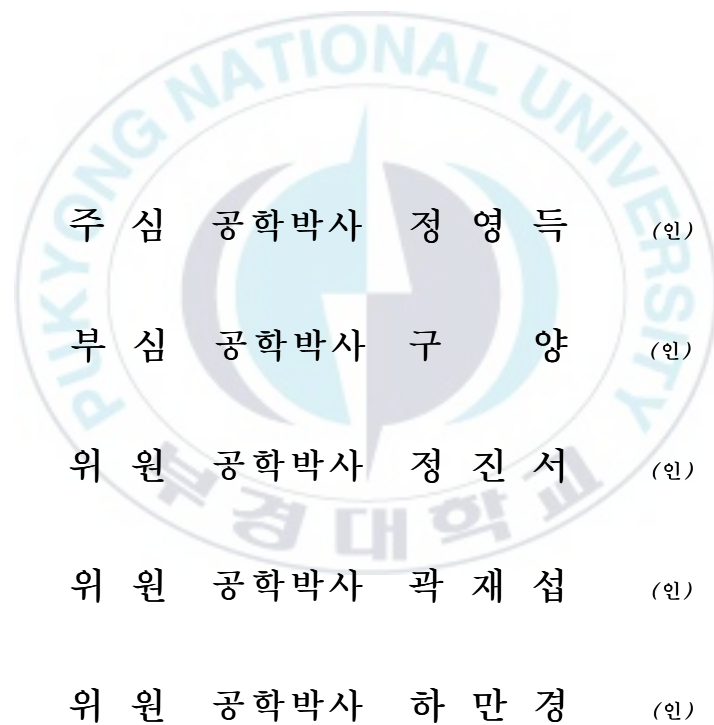
부경대학교 대학원

기계공학부

이 상 진

이상진의 공학박사 학위논문을 인준함

2006년 12월 18일



목 차

<i>List of Figures</i>	iii
<i>List of Tables</i>	vii
<i>List of Photographs</i>	viii
<i>Nomenclature</i>	ix
제 1 장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구동향	4
1.3 연구목적	7
1.4 논문의 구성	9
제 2 장 이론적 배경	10
2.1 절삭이론	10
2.2 절삭저항 측정	12
2.3 엔드밀의 형상	15
2.4 공구마모	17
2.5 표면거칠기	22
2.6 고속가공의 온도	27
2.7 가공온도측정 기술	30
제 3 장 고속가공용 엔드밀의 성능평가	31
3.1 고속가공	31
3.2 실험장치	35

3.3 실험방법	38
3.4 엔드밀의 성능평가 방법	40
3.5 엔드밀 랜드부 표면거칠기에 의한 성능평가	45
3.6 엔드밀 여유각에 의한 성능평가	51
3.7 결 언	54
 제 4 장 고속가공에서 열발생 특성	55
4.1 실험	55
4.2 실험 조건 및 방법	56
4.3 실험결과 및 고찰	58
4.4 결 언	68
 제 5 장 고속연삭용 슷돌 개발 및 가공특성 평가	69
5.1 고속연삭 슷돌 개발	69
5.2 실험장치 및 방법	74
5.3 실험결과 및 고찰	79
5.4 잔류응력변화	87
5.5 결 언	104
 제 6 장 결 론	105
 참고문헌	107
 Abstract	112

List of Figures

Fig. 2-1	Cutting force of endmill	10
Fig. 2-2	Geometry of flat endmill	16
Fig. 2-3	Wear shape of endmill	20
Fig. 2-4	Flank wear of endmill	21
Fig. 2-5	Flank wear of coated endmill	21
Fig. 2-6	Terms of surface characteristic	22
Fig. 2-7	Center line average height, R_a	23
Fig. 2-8	Maximum height roughness, R_{max}	23
Fig. 2-9	Ten point average roughness, R_z	24
Fig. 2-10	Optical cut method	26
Fig. 2-11	Salomon's hypothesis	27
Fig. 2-12	Graph of temperature vs. cutting speed	29
Fig. 3-1	Configuration of experimental system	35
Fig. 3-2	Phenomenon of during 1 sec suppling volts	41
Fig. 3-3	Behavior of principal force lapse for cutting time	42
Fig. 3-4	Relationship between flank wear and cutting time	44
Fig. 3-5	Cutting force(average) in $1.7\mu m$ surface roughness	46
Fig. 3-6	Cutting force(deviation) in $1.7\mu m$ surface roughness	46
Fig. 3-7	Cutting force(average) in $4.7\mu m$ surface roughness	47
Fig. 3-8	Cutting force(deviation) in $4.7\mu m$ surface roughness	47
Fig. 3-9	Cutting force(average) in $7.4\mu m$ surface roughness	48
Fig. 3-10	Cutting force(deviation) in $7.4\mu m$ surface roughness	48
Fig. 3-11	Relationship between R_{max} of land part and principal force	49

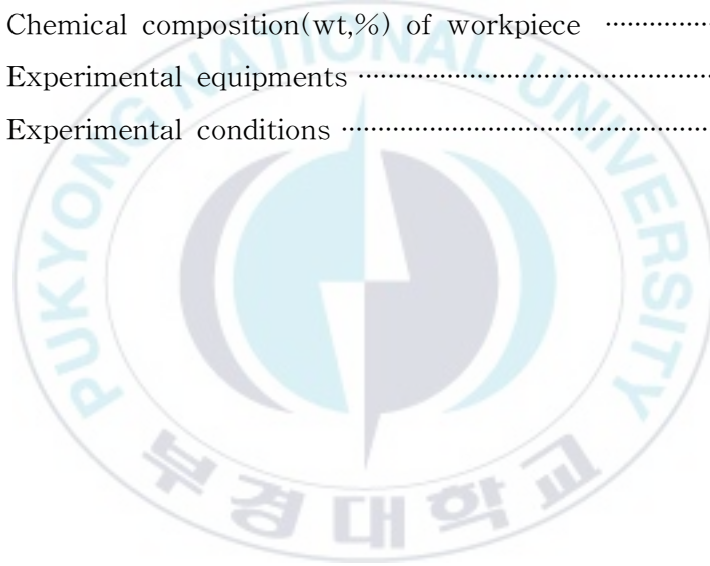
Fig. 3-12	Relationship between R_{max} of land part and force increasing rate	50
Fig. 3-13	Relationship between clearance angle and principal force	52
Fig. 3-14	Relationship between clearance angle and force deviation	53
Fig. 4-1	Schematic explanation of cutting process	57
Fig. 4-2	Cutting temperature characteristics by speed of revolutions	59
Fig. 4-3	Cutting temperature by cutting feeds	63
Fig. 4-4	Cutting temperature by cutting depths	64
Fig. 4-5	Cutting temperature characteristics by cutting directions	65
Fig. 4-6	Cutting temperature characteristics by cutting oils	66
Fig. 4-7	Cutting temperature characteristics by cutting oils	67
Fig. 5-1	Electro-plated CBN grinding wheel with cast alloy tool steel shank	70
Fig. 5-2	Sintered CBN grinding wheel with sintered carbide shank	71
Fig. 5-3	Electroplated CBN grinding wheel with sintered carbide shank	72
Fig. 5-4	Experimental specimen	73
Fig. 5-5	Tool path	78
Fig. 5-6	Coordinate direction on specimen	78
Fig. 5-7	Variation of surface roughness according to depth of cut in high speed grinding	80
Fig. 5-8	Variation of surface roughness according to depth of cut in high speed cutting	81
Fig. 5-9	Variation of surface roughness according to spindle speed in high speed grinding	82

Fig. 5-10	Result of 3 dimensional coordinate measurement by high speed cutting (depth of cut : $1\mu\text{m}$)	84
Fig. 5-11	Result of 3 dimensional coordinate measurement by high speed grinding (depth of cut : $1\mu\text{m}$)	85
Fig. 5-12	Result of 3 dimensional coordinate measurement by high speed grinding (depth of cut : $2\mu\text{m}$)	85
Fig. 5-13	Result of 3 dimensional coordinate measurement by high speed grinding (depth of cut : $5\mu\text{m}$)	86
Fig. 5-14	Result of 3 dimensional coordinate measurement by high speed grinding (depth of cut : $10\mu\text{m}$)	86
Fig. 5-15	Residual stress in workpiece	87
Fig. 5-16	Measuring points of residual stress on specimen	89
Fig. 5-17	Variation of residual stress according to depth of cut	91
Fig. 5-18	Variation of residual stress according to spindle speed	92
Fig. 5-19	Specimen surface after high speed cutting (depth of cut : $1\mu\text{m}$)	93
Fig. 5-20	Specimen surface after high speed cutting (depth of cut : $2\mu\text{m}$)	93
Fig. 5-21	Specimen surface after high speed cutting (depth of cut : $5\mu\text{m}$)	94
Fig. 5-22	Specimen surface after high speed cutting (depth of cut : $10\mu\text{m}$)	94
Fig. 5-23	Specimen surface after high speed grinding (depth of cut : $1\mu\text{m}$)	95
Fig. 5-24	Specimen surface after high speed grinding (depth of cut : $2\mu\text{m}$)	95

Fig. 5-25	Specimen surface after high speed grinding (depth of cut : $5\mu\text{m}$)	96
Fig. 5-26	Specimen surface after high speed grinding (depth of cut : $10\mu\text{m}$)	96
Fig. 5-27	Specimen surface after high speed grinding (depth of cut : $1\mu\text{m}$, rpm : 20,000)	97
Fig. 5-28	Specimen surface after high speed grinding (depth of cut : $1\mu\text{m}$, rpm : 40,000)	97
Fig. 5-29	Surface condition of grinding wheel before grinding	99
Fig. 5-30	Surface condition of grinding wheel after grinding (depth of cut : $1\mu\text{m}$)	100
Fig. 5-31	Surface condition of grinding wheel after grinding (depth of cut : $2\mu\text{m}$)	101
Fig. 5-32	Surface condition of grinding wheel after grinding (depth of cut : $5\mu\text{m}$)	102
Fig. 5-33	Surface condition of grinding wheel after grinding (depth of cut : $10\mu\text{m}$)	103

List of Tables

Table 2-1	Names of roughness (KS B 0161)	24
Table 3-1	High speed machine(RFM-760) specifications	33
Table 3-2	Experimental equipments	37
Table 3-3	Experimental conditions	39
Table 3-4	Chemical composition of endmill	39
Table 4-1	Specifications of infrared camera	56
Table 5-1	Chemical composition(wt,%) of workpiece	73
Table 5-2	Experimental equipments	76
Table 5-3	Experimental conditions	78



List of Photographs

Photo. 3-1	High speed machine used in experiment	32
Photo. 3-2	Thermal expansion chuck	34
Photo. 3-3	Tool cleaning jet	34
Photo. 3-4	Photograph for experimental working	36
Photo. 3-5	Tool microscope observation of cutting edge on endmill	43
Photo. 4-1	Infrared thermal image camera	55
Photo. 4-2	Picture of temperature	58
Photo. 4-3	Examples of infrared picture	62
Photo. 5-1	Schematic of diagram for high speed grinding	74
Photo. 5-2	Surface roughness tester	75
Photo. 5-3	3D coordinate measuring device	75
Photo. 5-4	X-ray diffractometer	76

Nomenclature

a_p	: Axial depth of cut(mm)
a_e	: Radial depth of cut(mm)
C_o	: Cobalt
C_r	: Chromium
d	: Depth of cut(mm)
dF_x/dt	: Principal force increasing rate(N/min)
f	: Feed(mm/rev)
f_n	: Natural frequency(cps)
f_z	: Feed per tooth(mm)
F	: Table feed rate(mm/min)
F_x	: Principal force(N)
F_y	: Feed force(N)
F_z	: Thrust force(N)
H	: Depth of residual stress(μm)
k	: Spring constant
L	: Length of cut(mm)
m	: Mass
N	: Revolution(rev/min)
R_a	: Center line average height(μm)
R_{max}	: Maximum height roughness (μm)
R_z	: Ten point average roughness(μm)
T_a	: Temperature in V_1 and V_2 ($^{\circ}\text{C}$)

T_{cr} : Critical cutting temperature (°C)
 t : Cutting time(sec)
 V_1 : Cutting speed in static mode (m/min)
 V_2 : High speed cutting velocity (m/min)
 V_B : Flank wear(mm)
 V_{cr} : Cutting speed in critical temperature (m/min)
 V_C : Vanadium
 V_c : Cutting velocity(m/min)
 W : Tungsten
 Y_b : Yttrebium
 Z : No. of teeth
 β : Angle of reflected light (°)
 σ_r : Residual stress(kg/mm²)

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

최근 산업의 급속한 발전과 더불어 금형산업에서도 다양한 제품에 대한 생산성향상, 원가절감 등의 요구조건을 만족시키면서 가공표면의 정밀성을 추구하는 고품위 가공기술을 절실히 요구하고 있다.

이러한 요구에 가장 적절히 대응할 수 있는 가공기술은 고속가공(high speed cutting)이며, 전 세계적으로 확산 일로에 있다. 그러나 기존의 일반 절삭에 의해서는 각종공구 및 공작물재질에 따른 절삭조건에의 제한으로 이러한 요구에 부응하지 못하고 있는 실정이다. 특히 금형제품은 단품 및 주문 생산에 의존하고 있어, 제품의 정밀도향상, 납기단축 그리고 제조경비절감(cost down)을 가져올 수 있는 제작방식을 채택하지 않으면 경쟁력을 잃고 만다. 여러 공업선진국에서 활발히 연구가 진행되고 있는 고속가공은 이러한 문제점을 해결할 뿐만 아니라 지금까지 절삭가공으로 불가능했던 고 경도강재 등의 난삭재도 절삭가공이 가능하다는 등 많은 장점을 가지고 있다. 고속절삭에서는 주축속도를 증가시킴으로써 높은 절삭속도(cutting speed)를 얻을 수 있고, 절삭속도의 증가에 따라 기존의 이송속도(feed rate)보다 훨씬 빠른 이송속도로 절삭이 가능하다. 이런 빠른 이송속도에 의한 가공시간의 대폭적인 감소가 고속가공의 큰 잇 점이다. 그러나 고속가공에 있어 공작기계의 강성과 구조, 공구의형상, 가공기술, 가공조건 등에 의해 고속가공은 많은 영향을 받게 된다.

고속가공기술을 적용하게 되면 절삭시의 낮은 전단력에 의한 고속이송속도로 고정도·고능률 가공이 가능하게 되고, 절삭열이 칩과 함께 고속으로 배출됨으로써 냉각효과 및 가공변형방지 등의 효과를 얻을 수 있으리라 기대된다.^[1~6]

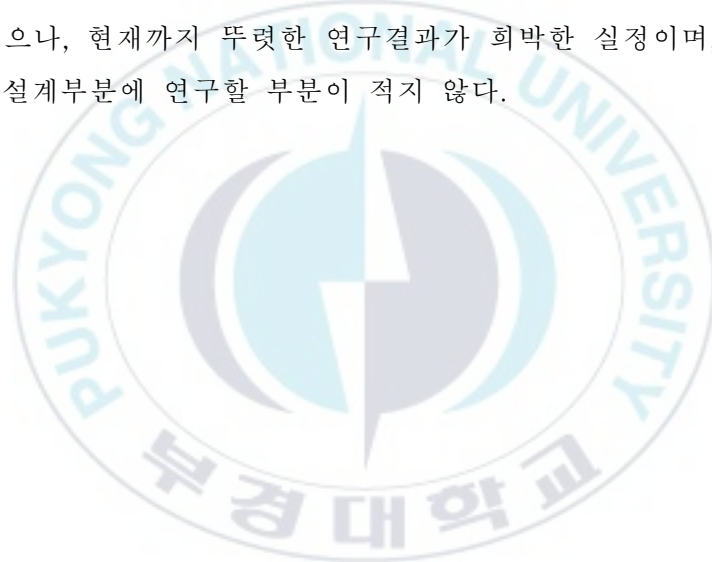
고속가공의 개념은 절삭가공시 발생하는 절삭온도와 절삭속도의 근거를

두고 있다. 즉 절삭온도는 어떠한 임계속도에서 최대치가 되며 그 임계속도를 초과하면 온도는 감소한다는 1924년 독일의 C. Salomon이 주장한 이론에 근거하며, 1931년 독일특허를 받으면서 시작되었다.^[7~11]

이러한 시대적 요구에 부응한 고속가공의 실현은 생산성향상과 고품위 제품생산을 위한 가장 유력한 수단으로 현재 유럽, 일본, 북미 등 가공기술의 선진국들에 의해 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 알루미늄 합금 등의 경금속제품에 대해서는 고속가공이 보편화되고 있다. 여기서 대두되는 과제는 고속으로 고정밀도 가공을 가능하게 하는 공작기계의 개발과 절삭공구의 개발이다. 일반적으로 절삭능률, 즉 단위시간당 칩 배출을 늘리기 위해서는 절삭속도, 이송, 절입량 중 어느 하나를 크게 하여 높일 수 있으나, 실제적으로 경제성과 기술적인 면에서 이들 3요소를 자유자재로 조작하는 것은 어렵다. 예를 들어 주축을 고속으로 회전시켜 이송속도를 증가시킨다는 일반적인 방식으로는 고속가공을 할 수 없다. 이송속도를 증가시키면 형상오차는 커지게 되고, 주축의 회전을 증가시키면 진동이 커지게 되어 공구수명이 짧아지게 되며 절삭온도에 의해 정밀도가 저하된다.^[12] 따라서 고속가공의 수행 시 고속에 적합한 가공법, 고속의 주축, 고속이송, 고속이송에서의 정밀도가 저하되지 않는 제어방법, 고속을 제어할 수 있는 기계장성 및 열변형이 작은 기계구조가 요구되어지며 이와 더불어 고속가공에서 충분한 성능을 발휘하기 위하여 고속가공에서 장기간 견딜 수 있는 공구의개발도 필연적이라 할 수 있다.^[13] 따라서, 공작기계의 성능개선과 절삭공구의 개발은 상호 밀접한 관련을 가지며, 이들 모두의 발달이 이루어져야만 완전한 고속가공이 가능해진다. 하지만, 머시닝센터 등에서 주축의고속화와 이송속도의 고속화는 상당수준으로 발전한 반면에 그에 따른 절삭공구의 개발은 아직도 연구와 개발이 미진한 상태이다. 특히 고속가공에서는 가공속도가 매우 빠름으로 인하여 기계적, 열적 그리고 화학적 환경이 매우 열악하여 기존의 공구로써는 제 역할을 할 수 없는 실정이므로 이들의 문제점을 최소화하는 공구의개발이 절실히 요구된다.^[14]

특히 금형가공에 있어서는 그것을 구성하는 각종 요소기술의 개발이나 코팅한 초경합금공구 등의 성능이 향상됨으로서 종래에 방전가공이나 연삭가공에 의존하고 있었던 자동차부품용의 주조나 단조 등에 이르기까지 공정집약, 고효율가공에 유용한 고속가공기의 사용빈도가 점차 증가하고 있는 추세에 있다. 이에 따라 정형가공기술의 발달로 인하여 허용공차 이내로 표면정도를 유지하면서 가공시간을 감소시킬 수 있는 고정도의 가공기술이 필요한 실정에 있다.

고속가공 수행을 위한 절삭공구의 개발과 성능향상을 위하여 소재성분의 선택, 공구형상의 최적설계, 공구가공기법의개선 등을 통한 다방면의 연구가 진행되고 있으나, 현재까지 뚜렷한 연구결과가 희박한 실정이며, 특히 공구형상의 최적설계부분에 연구할 부분이 적지 않다.



1.2 연구동향

고속가공은 절삭속도와 함께 이송속도를 증가시킴으로써 피삭재 제거율을 극대화시켜 가공시간을 단축시키고, 공구경로의 간격을 감소시킴으로써 최종 표면의 품질을 향상시켜 기존의 일반 절삭가공으로는 불가능했던 고경도 강재 등의 난삭재도 절삭가공이 가능하다는 많은 장점을 가지고 있다. 이러한 장점들 때문에 고속가공은 몰드(mold)나, 다이(die)를 만드는 금형산업에서 많은 관심의 대상이 되고 있고, 이미 항공기산업에서는 경금속 절삭의 경우에 많은 성능을 나타내고 있다. 그러나 공작기계의 고속화는 상당한 수준으로 발전한 반면에, 그에 따른 고속가공용 공구개발은 아직 미진한 상태이다. 이는 고속가공기술이 일반화되지 못한 관계로 고속가공 시의 가공특성과 공구성능을 평가할 수 있는 기술에 대한 연구결과가 많이 나오지 못했기 때문이다. 특히, 금형소재의 고속 가공을 위한 엔드밀에 대해서 공구형상의 최적설계부분에 대한 연구 분야가 적지 않으며, 이를 위한 엔드밀 형상 제작의 기초데이터 및 제작 지침마련을 위한 공구성능평가에 대해 많은 연구가 진행 중 이다.

Rahman 등^[15]은 대표적인 정삭가공의 절삭조건하에서 경화공구강의 고속 슬롯밀링에 대해 다루고 고속가공동안에 텅스텐 초경공구, 초경공구 및 CBN공구의 성능을 평가하였다.

Schulz^[16]는 볼 엔드밀의 수직경사각에 따른 칩의 순간단면적을 분석하였고 이를 바탕으로 최적경사각을 구하였으며, Shamoto^[17]는 절삭특성에 가장 큰 영향을 미치는 전단각의 예측을 위하여 최대전단응력과 최소 에너지법을 사용하였다.

Wertheim^[18]은 플랫 엔드밀링 시 칩의 생성을 분석하였으며 이를 바탕으로 기존 절삭날의 형상을 수정설계 하였다.

T. I. EL-Wardany 등^[19]은 Al_2O_3TiC 세라믹 공구를 이용하여 고경도 소재인 AISI 1552(HRc 60~65)와 초내열합금인 인코넬 718의 절삭시 여유면의

절삭온도에 의한 영향을 실험과 유한요소법에 의해 해석하였다. 실험은 절삭조건, 공구기하학, 공구상태, 절삭날의 온도에 의한 피삭재의 영향에 대해 실험하였고, Narutaki 등^[20]은 세라믹공구에 의한 인코넬 718의 고속가공에 의한 절삭특성을 관찰하였는데 공구마모와 절삭온도, 그리고 공구와 피삭재 간의 화학반응을 관찰한 결과, 절삭속도가 100~300m/min의 영역에서는 Sic계의 세라믹공구가 뛰어난 성능을 발휘하며 그 이상의 절삭속도에서는 TiC성분이 첨가된 세라믹공구가 내마멸성이 좋지만 인코넬 718의 절삭가공에 있어 세라믹공구는 정상적인 플랭크마모(flank wear)보다는 노치마모(notch wear)가 주로 이루어져 이의 개선이 필요함을 주장하였다.

국내에서 송재도^[21]는 고속가공에서 절삭력과 공구마모를 측정하여 공구형상변화(헬릭스각, 날수, 경사각)에 따른 공구마멸량을 측정하고 공구 마멸시 까지 절삭력을 획득하여 가공시 공구에 걸리는 부하를 측정함으로써 공구의 성능을 평가하였고, 고성립 등^[22~23]은 절삭공정 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 고속가공 시 엔드밀의 형상, 즉 공구경사각, 공구여유각, 인선부 길이와 절삭속도가 공구의 절삭거동에 미치는 영향을 분석함으로써 성능을 평가하였다. 김홍규 등^[24]은 초미립 초경소재의 엔드밀을 사용하여 절삭시 절삭력, 공구마멸량 측정 및 공구마멸에 따른 표면거칠기를 관찰함으로써 공구성능을 평가하였으며, 김정훈 등^[25]은 초경플랫 엔드밀에 의한 회주철의 고속가공시 공작기계의 진동특성을 조사하여 절삭속도에 따른 표면거칠기 및 공구수명을 평가하였다.

이춘만 등^[26~27]은 STD11 금형공구강의 고속가공에서 이송속도, 회전수 등의 가공조건을 선정 Z축 가공오차와 표면거칠기 향상을 위한 가공조건을 제시하였고, 또한 볼 엔드밀의 고속가공에서 절삭력분석 및 평가에 관한 연구를 하였다.

배효준 등^[28]은 엔드밀의 고속가공시 표면정도를 향상을 위한 가공인자의 영향분석을 통하여 이송속도, 주축속도, 절삭깊이가 표면거칠기에 미치는 영향에 대하여 연구를 하였다.

상기에서 서술한바와 같이 고속가공에 관련한 실험이나 연구들은 절삭공구수명이나, 절삭성에 관하여 다양한연구들이 이루어졌으나, 이들 연구의 대부분이 공구재종에 따른 성능평가나, 공구마멸량, 절삭력, 표면거칠기에 대한 연구이다.

따라서 본 연구에서는 엔드밀의 주분력과, 주분력의 증가율을 사용하여 엔드밀 랜드부의 표면거칠기 및 여유각변화에 따른 절삭공구의 성능평가와, 적외선 열화상카메라를 활용하여 열발생 특성을 파악 고속가공에 있어 열발생에 대한 최적절삭조건을 제시하였으며, 또한 고속가공에서 사용이 가능한 고속연삭용 슷들을 개발하여 고속가공에 적용할 수 있도록 하였다.



1.3 연구목적

본 연구에서는 산업현장에서 일반적으로 사용되어지는 금형소재인 합금공구강(STD11)재료를 초미립 초경합금(WC)제로 제작되어진 엔드밀을 사용하여 절삭작업을 수행하였을 때, 엔드밀의 공구형상 즉, 엔드밀 랜드 부의 표면거칠기와 1차 여유각이 공구성능에 미치는 영향을 파악함으로써, 향후 고속가공수행 시 엔드밀 형상제작의 기초데이터를 확보함과 동시에 실용적인 고속가공용 엔드밀 제작의 지침을 마련하고자 한다.

고속가공은 항공 산업분야에서도 높은 단위시간당 칩(chip)배출능력을 이용한 경합금의 고능률가공 및 작은 절삭력에 의한 얇은 리브(rib)형상이 많은 알루미늄 부품가공에 활용되고 있으며,^[29~33] 금형산업분야에서는 고 경도재료를 이용한 금형제작에 많이 사용되고 있는데, 연한재료에 EDM 가공과 연마작업을 이용하여 제작하던 종래의 재래식방법을 탈피하여, 고 경도의 재질을 고속가공을 이용하여 직접 가공하는 것이다.^[34~37] 절삭에서 절삭유제의 사용은 냉각작용, 윤활작용 등의 목적으로 사용하고 있으나, 특히 냉각작용은 절삭유제를 사용하는 가장 큰 이유이다. 절삭시 절삭유제의사용은 절삭력을 향상시키며 나아가 생산품의 정도향상에 기인하지만 사용된 절삭유에 의한 환경파괴의 영향이 크게 나타나고 있어서 절삭유제의 사용이 제한되고 있는 실정이다. 환경친화적인 절삭가공을 위해서는 절삭시 절삭열 발생분포특성을 미리 파악하는 것이 중요하며, 절삭유제사용 시 발생하는 다양한 파라미터를 선정하여 그 온도분포를 파악하는 것이 중요하다.^[38~40]

이번 실험에서는 고속가공에서 다양한 파라미터변화에 대한 절삭열 분포특성을 파악하고^[41~44], 건식절삭 및 절삭유제 사용량에 따른 냉각효과와 절삭성을, 적외선 열화상 카메라를 이용 열발생 측정방법을 확립하며 가공시의 열발생 특성을 고찰하고, 그리고 금형의 높은 표면품질 및 가공비를 획기적으로 절감시킬 수 있는 고속연삭기술을 실현시키기 위해서는 고속연삭 환경에 맞는 공구개발과 공구성능 및 가공특성 평가가 필요하다.

특히 금형제작에서 2차 공정 수작업시간을 단축시켜 경면(mirror like surface)가공에서 요구되는 금형생산을 보다 효율적으로 수행하기 위해서 고속연삭^[44~47]의 도입은 필연적이다. 그러므로 고속연삭에 적합한 고속연삭용 슷돌을 개발하여, 가장 기초가 되는 가공인 평면가공을 통하여 가공특성을 평가하는데 목적을 두어, 고속절삭과 고속연삭 후 공작물의 표면거칠기(R_a , R_{max} , R_z)를 측정하여 가공조건이 공작물의 표면성상에 미치는 영향을 통해서 적절한 가공조건을 제시하고자하며, 공작물표면의 잔류응력상태를 비접촉, 비 파괴적으로 측정할 수 있는 X선 회절법^[48~49]에 의한 잔류응력상태를 파악하여 표층의 결정구조를 검출하여 가공 후 재료표층구조의 정보를 얻고자한다. 그리고 공작물표면의 좌표값을 3차원측정기를 사용해서 읽어 그 프로파일을 3차원 공간상에 구현함으로서 전체적인 프로파일을 통하여 가공품위를 분석하려한다. 또한 공작물의 표면성상과 관련하여 부하된 작용하중을 추정하는 것은 최적가공을 확보하는 관점에서 대단히 중요하며, 이와 관련하여 가공후의 공작물과 연삭입자의 탈락 및 본드(bond)의 마모를 미시적으로 관찰하여 가공조건을 적절성을 평가하여 고속가공에 있어 효과적인 절삭가공의 목표를 달성하는데 최종목적을 두고 있다.

1.4 논문의 구성

본 논문은 전체 6장으로 구성되어 있으며 다음과 같은 내용을 포함하고 있다.

제1장은 서론으로서 본 연구에 대한 연구배경과 지금까지의 연구동향 및 연구가 진행되어온 과정을 검토, 분석한 내용과 연구의 목적 등을 기술하였다.

제2장은 관련이론으로 본 연구와 관련된 절삭이론, 절삭저항, 공구마모, 표면거칠기, 절삭온도측정기술에 대하여 기술하였다.

제3장은 고속가공에서 절삭공구인 엔드밀을 사용하여 절삭작업시 주분력과, 주분력의 증가율을 활용하여 엔드밀 랜드부의 표면거칠기와, 1차 여유각이 절삭공구성능에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

제4장은 고속가공 중 발생한 열을 측정하기위해 적외선 열화상카메라를 이용하여, 열화상촬영법(thermovision technique)으로 주축속도, 이송속도, 절삭깊이, 절삭방향, 절삭유제의변화에 따른 열발생 특성에 대하여 고찰하였다.

제5장은 고속가공기에서 고속절삭과 고속연삭의 복합화에 관한연구를 하기위하여, 텅스텐카바이드생크에 CBN입자를 니켈본드로 단일층(one layer)으로 전착(electro)하여, 고속연삭에서 사용이 가능한 연삭숫돌을 개발 고속절삭과 고속연삭 후 표면거칠기, 잔류응력측정, 공작물과 연삭입자의 탈락 및 본드(bond)의 마모를 미시적으로 관찰하여 가공조건의 적절성을 평가하였으며, 본 실험을 통하여 개발된 고속연삭숫돌이 고속가공에 적용할 수 있음을 확인하였고, 연삭숫돌의 가공특성에 대하여 제시하였다.

끝으로 제6장은 결론으로서 본 논문의 연구의 전체적인 결과를 나타내었다.

제 2 장 이론적 배경

2.1 절삭이론

2.1.1 절삭저항

공구가 공작물을 절삭할 때 공작물은 소성변형 하여 칩이 발생하며 이때 공구가 받는 저항력을 절삭저항이라고 하며 그 크기는 가공조건에 따라 다르다. 절삭저항은 Fig. 2-1과 같이 절삭방향으로 작용하는 주분력 배분력 이송분력으로 나뉜다. 주분력은 이송분력에 직각방향, 즉 다듬질면에 수직 방향으로 작용한다. 따라서 가공면에 발생하는 거칠기, 기복, 기울기 등 공정밀도를 좌우하는 중요한 요인이 된다. 이송분력은 상향절삭의 경우 이송과 같은 방향으로 작용한다. 하향절삭의 경우에는 이송과 반대방향으로 작용한다. 배분력은 오른 날, 오른 비틀림 각을 갖는 보통의 엔드밀에서는 콜렛척에서 엔드밀을 빼내는 방향으로 작용한다. 가공물 측에서 보면 가공물을 위로 끌어올리려는 힘이다.

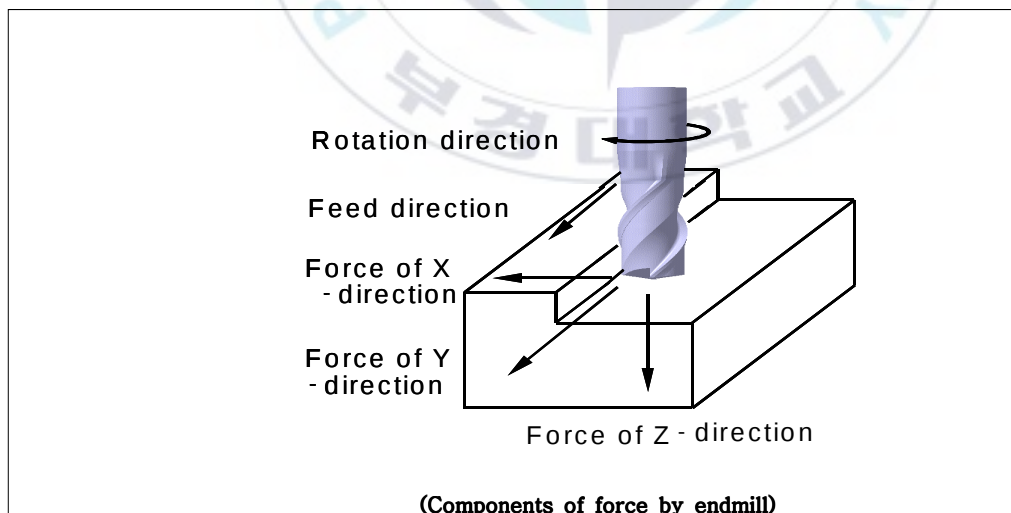


Fig. 2-1 Cutting force of endmill

2.1.2 절삭조건

① 절삭속도(Cutting velocity)

절삭속도 V_c 는 공구와 공작물간의 최대상대속도이며, $V_c = \pi DN/1000$ 으로 구하고 단위는 m/min로 표시한다. (D : 공작물 지름, N : 회전수)

일반적으로 절삭속도가 증가하면 절삭저항의 감소를 가져오는데 이는 절삭속도가 증가하면서 발생하는 열에 의해서 공작물의 경도가 떨어져서 절삭저항도 함께 감소를 하게 되는 것이다. 또한 절삭속도는 공구수명, 가공정밀도, 절삭률 등과 크게 관계를 하며 절삭에 있어 가장 기본적인 변수이다.

② 절입깊이(depth of cut)

절입깊이 d 는 절삭공구가 공작물표면 아래로 파고 들어간 거리를 말하는 것으로 단위는 mm를 사용한다. 절삭가공시 절입의 증가는 온도상승, 절삭저항의 증가 및 공구수명을 감소시키는 결과를 초래한다.

③ 이송(feed)

이송 f 는 절삭 중 공구와 공작물간의 축방향의 상대운동크기를 말하며 매 회전 당 상대변위라고도 한다. 단위로는 mm/rev를 쓴다. 이송의 증가는 절삭동력을 증가시키고 이로 인해서 절삭저항이 증가하게 되고 공구수명의 감소를 가져온다.

④ 엔드밀의 절삭 관계식

- 절삭률 = 절삭속도 $\times$ 절삭깊이 $\times$ 이송

- 날 당 이송속도 $f_z = \frac{F}{Z \times N}$

- 테이블 이송속도 $F = f_z \times Z \times N$

- 가공시간 $t = \frac{L}{F}$

(N : revolution, Z : no. of teeth, L : length of cut)

2.2 절삭저항 측정

절삭저항은 절삭현상을 취급하는 데 있어서 대단히 중요하다. 즉, 절삭저항은 절삭에 필요한 동력을 결정하는데 필요할 뿐 아니라 재료의 피삭성(machinability)을 판정하는 데에도 기준이 된다. 그 외에 공구의 기하학적 형상, 절삭깊이, 이송(feed), 절삭속도와 같은 절삭조건의 적부를 판정하는데 사용되며 특히 자동화 및 무인 절삭시스템에서의 공구마모, 구성인선, 채터 진동과 같은 주요트러블의 감시에 매우 중요한 역할을 한다. 절삭저항의 측정법에는 간접적인 측정, 칼로리미터에 의한 측정 및 공구동력계에 의한 측정 등이 있으나 공구동력계에 의한 측정법이 가장 정확하고 쉬운 방법이다.

2.2.1 공구동력계에 요구되는 기본 특성

동력계는 강성과 감도를 요한다. 그런데, 이들은 서로 상반되는 작용을 한다. 감도가 좋은 동력계라면 측정치의 오차가 $\pm 1(\%)$ 이내에 있어야 한다. 강성조건을 지배하는 것은 동력계 고유진동수(natural frequency)이다. M. C. Shaw에 의하면 절삭저항이 동력계의 진동에 영향을 주지 않으려면 동력계의 고유진동수가 여자진동수(frequency of exciting vibration)의 4배 정도는 되어야 한다.

진동해석을 위하여 동력계를 스프링에 지지되어 있는 질량으로 생각할 수 있다. 이런 계의 고유진동수 f_n 은

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [cps] \quad (2.1)$$

여기서 k : 스프링 상수, m : 질량, 동력계의 지지중량을 $W_d(kg)$ 라 하면

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{980k}{W_d}} \quad (2.2)$$

예로서 연삭숫돌의 회전수 $N=3600[\text{rpm}]$ 이라 하면 여자진동수 f_e 는

$$f_e = \frac{N}{60} = 60 \text{ [cps]} \quad (2.3)$$

이며, 따라서 동력계의 고유진동수 f_e 는 적어도 $240[\text{cps}]$ 가 되어야한다. 또한 동력계는 x, y, z 방향의 3분력을 동시에 측정할 수 있어야하며, 이때 이들 분력들 간의 횡방향의 감도가 없어야한다. 즉, x방향의 절삭저항을 측정할 때 y, 또는 z방향의 저항의 영향을 받지 않아야한다. 만일, 상호간섭이 있다면 각 방향의 분력을 결정하기 위하여 연립방정식을 풀어야 하는 번거로움이 따를 뿐 아니라 실험결과를 즉시 판단할 수 없다. 그리고 동력계는 시간, 온도, 습도 등에 대하여 안정되어야 한다.

2.2.2 절삭저항 측정의 일반적인 단계

절삭저항의 측정은 일반적으로 다음 3단계로 이루어진다.

- ① 변환장치를 통하여 절삭저항은 기계적, 전기적 등의 신호의 형태로 바뀌 준다.
- ② 신호를 확대 및 여과하고 안정되게 한다.
- ③ 출력신호를 지시, 기록 및 감시한다.

2.2.3 피에조전기변환기

어떤 물질은 기계적인변형을 받을 때 전압이 발생하는 성질, 또는 반대로 전압을 받을 때 치수가 변하는 성질을 갖고 있다. 이것은 압전효과(piezoelectric effect)로 알려져 있다. 이러한 물질 중에서 현저한 것은 석영(quartz), 로셀염(rochelle salt :주석산카리소다), 적절히 편극 시킨 티탄산바륨(barium titanate), 전기석(tourmaline) 등이다. 이 효과를 나타내는 물질 중에서 안전성, 고출력, 외부온도, 습기에 대한 무 영향성 및 요구되는 임의 형체로 만들 수 있는 등의 필요한 성질을 전부 갖춘 것은 하나도 없다. 수정은 가장 안정되어 있으나 출력이 극히 낮고, 한편 로셀염은 다른 것에 비

해 가장 큰 출력을 내지만 공기 중에서 습기에 대한 방법이 필요하고 또한 45℃ 이상에서 사용할 수 없다. 그러나 도자질의 티탄산바리움은 어떤 형태로도 만들 수 있으며 습기에 대하여 안정하지만 압전효과를 나타나게 하기 위하여 특별한 처리가 요구되는 등 각각의 특성을 갖고 있다.

피에조전기변환기는 외력에 의하여 정전하를 발생시키며, 이 전하는 일반적으로 전하증폭기(charge amplifier)를 사용함으로써 조절된다. 본 실험에 사용한 공구동력계는 석영(quartz)을 압전소자로 사용한 Kistler사의 Piezo-electro dynamometer로서 3분력을 동시측정이 가능한장치이다. 이 공구동력계는 우수한주파수 응답, 큰 강성도(stiffness), 높은 분해능을 갖는다. 한편 Piezo-electro dynamometer를 기계에 설치할 때에는 다음과 같은 사항에 유의하여야 한다.

① 동력계를 공작기계나 측정 장치에 조립하기 전에, 조립 면을 평평하게 한다. 평평하지 않은 지지면은 내부응력을 야기하고 이는 각각의 센서에 부가적인 전단응력을 제공하게 되고 측정오차를 발생시킨다.

② 동력계를 조립할지지 면은 동력계의 아래 면처럼 연삭하고 조립 전에 접촉면을 깨끗이 닦아야 한다.

③ 동력계는 기계의 장착부에 부착 시 공간을 없애도록 한다. 비록 작은 공간이라도 바람직하지 않은 탄성과 측정 장치의 공진 주파수 저하를 야기한다.

④ 또한 동력계에 연결되는 케이블의 조립부는 청결을 유지하고 가능한 영구적으로 접속시켜두며, 작업 시 절단되거나 찢어지지 않도록 위치시킨다.

2.3 엔드밀의 형상

일반적으로 엔드밀공구는 가늘고 긴 세장형태로서 정면, 측면, 단, 홈, 구멍가공 등 다양한 가공영역에 사용되고 있으며 엔드밀의 형상은 Fig. 2-2와 같다.

공구성능을 결정하는 공구현상 인자들은 크게 헬릭스각(helix angle), 날수, 경사각(rake angle), 여유각(clearance angle) 등이 있다.

2.3.1 헬릭스각(helix angle)

헬릭스각은 공구의 비틀림 정도를 결정하는 인자로 헬릭스각이 커지면 절삭 날이 더 많은 시간동안 절삭에 참여함으로써 긴 칩을 배출하게 되고 그만큼 절삭 날에 수직방향의 절삭력을 감소시키는 역할을 하게 된다. 주로 15° 근방의 저 헬릭스각 공구는 키, 홈 가공 등에 쓰이고, 고경도재를 가공할수록 50°근방의 고 헬릭스각 공구가 사용된다.

2.3.2 날수

날수는 엔드밀의 칩 포켓(chip pocket)의 크기를 결정하는 인자이다. 결론적으로 칩 배출이 문제시되는 저속의 홈 가공 등에는 칩 포켓의 크기를 증가시키기 위해서 적은 날수의 공구를 사용하고 칩 배출 보다는 공구의 강성이 중요한 고경도재 가공의 경우에는 날이 많은 공구로 가공하게 된다.

2.3.3 경사각(rake angle)

경사각은 절삭시 전단각을 결정하는 인자로 경사각이 커지면 절삭날이 예리하게 되어 절삭저항은 감소하나 칩핑(chipping)발생의 우려가 커진다. 반면 경사각을 적게 하면 강성을 크게 할 수 있는 장점이 있다.

2.3.4 여유각(*clearance angle*)

여유각은 절삭날과 가공물과의 마찰을 적게 하는 인자로 여유각이 크면 재료침투가 용이하고 여유각이 작으면 절삭날을 강화시킬 수 있다.

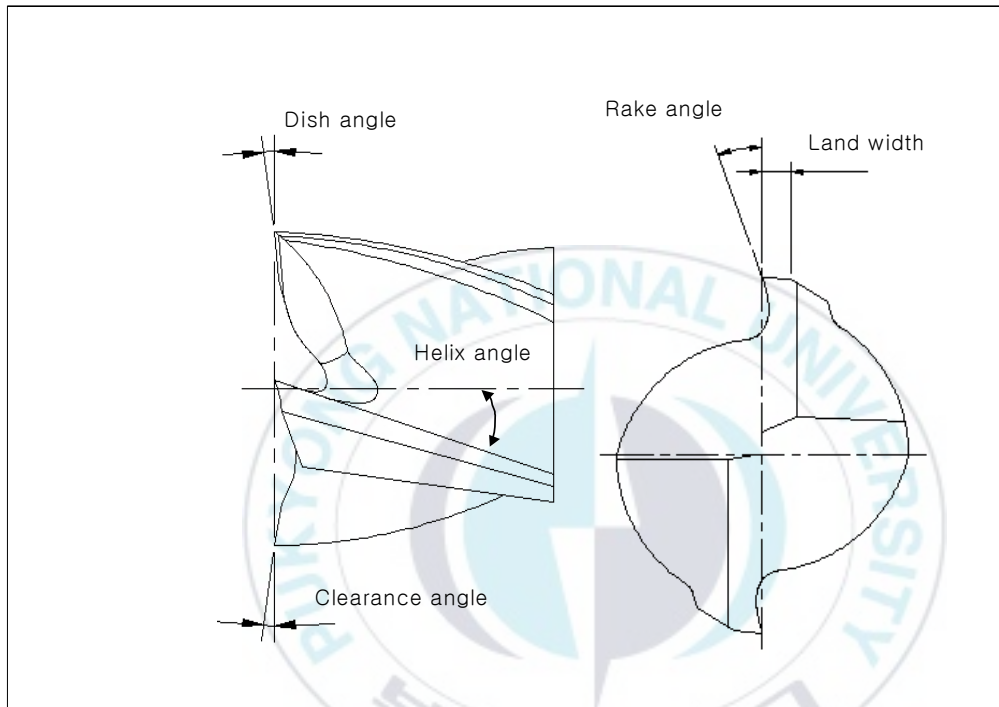


Fig. 2-2 Geometry of flat endmill

2.4 공구마모

2.4.1 공구마모의 종류

절삭 중 공구의 절삭날 부분의 공구상면, 측면 및 앞면은 공작물과 칩에 의하여 고압을 받고 절삭작용과 칩의 유출 작용으로 전단열과 마찰열에 의하여 지속적으로 고온 하에 놓여져서 접촉 이동하는 가혹한 상태이다. 따라서 여러 가지 손상을 받게 된다. 공구마모의 종류는 플랭크마모, 크레이터마모, 선단마모, 노치마모, 칩핑, 소성변형, 급작스런 전파손 등으로 구분한다.

① 플랭크마모(flank wear)

절삭공구의 마모는 앞 향 에서와 같이 여러 가지 형태가 있으나 보통 안정된 연속절삭에서는 플랭크마모와 크레이터마모가 가장 중요하다. 플랭크마모는 플랭크면에 발생하는 공구마모의 형태로써 피삭재의 새롭게 생성된 피삭면과 공구 플랭크면과의 마찰에 의하여 생긴다. 이 마모는 마모영역(wear land)을 형성하게 되고, 이 영역의 폭으로 플랭크 마모량을 정의하여 사용하고 있다.

② 크레이터마모(crater wear)

크레이터마모는 공구의 상면(face)에 발생하는 것으로 공구와 칩 사이의 마찰에 의한 고온상태에서 공구의 열연화(熱軟化)나 고상확산(固狀擴散, solid state diffusion)등에 의하여 발달하게 된다. 달 표면의 분화구와 같은 형상을 하게 되어 크레이터마모라 불리며 이것의 최대깊이를 크레이터 마모량으로 정의하여 사용한다.

③ 선단마모(minor cutting edge wear)

선단마모는 선단면에 발생하는 것으로 새로이 생성된 피삭면과 공구마찰에 의하여 발달하게 된다. 마모의 특성은 공구의 이송(feed)과 같은 파형을 갖는 파형마모라는 것이다.

④ 노치 마모(notch wear)

노치마모는 경계마모(boundary wear)라 불리기도 하는데, 플랭크마모의

경계부위에서 일어나는 보통 플랭크마모 보다 깊고 큰 형태로 나타난다. 이것은 공구의 날 끝(edge)으로부터 절삭깊이 만큼 떨어진 거리에 피삭재의 표면과 공구사이에서 발생하며 피삭재가 표면처리 등이 되어 내부보다 경한 재질일수록 심하게 발생한다.

⑤ 칩핑(chipping)

칩핑이란 정상적인 공구마모가 아닌 손상으로 급작스럽게 공구의 일부분이 떨어져 나가는 것을 말한다. 이는 공작기계의 진동이나 단속절삭과 같은 기계적작용에 의하여 생기기 쉽고 국부적응착이나 열적충격에 의하여 생기는 수도 있다. 일반적으로 칩핑은 취성이 큰 초경합금이나 세라믹공구 등에 생기기 쉽고 고속도강의 경우는 적다. 또 구성인선이 공구에 미소크랙을 발생시키며 이 크랙이 점차 발달하여 구성인선의 탈락 시 공구재의 일부를 함께 떼어나갈 때 생기는 수도 있다.

⑥ 소성 변형(plastic deformation)

이것은 고온고압 상태에서 일어나는 공구의 소성변형이다. 절삭속도가 커지고 절삭력이 증가되면 공구는 고온고압상태가 되고 절삭력이 공구의 한계응력을 넘게 될 경우 소성변형이 일어나게 된다. 소성변형은 주로 고속도강에서 볼 수 있으며 초경공구의 경우는 텅스텐카바이드 입자의 결합재인 코발트가 변형을 일으킬 경우에 나타나게 된다.

⑦ 급작스런 전파손(catastrophic failure fracture)

이것은 대규모의 소성변형과 크랙에 의한 파손이 일어나는 것으로 작업자에게 위험할 뿐만 아니라 공작기계, 피삭재, 공구홀더 등 모두에 좋지 않은 영향을 미치며 아직 사용하지 않은 절삭날을 사용불능 상태로 만들기도 한다. 이러한 파손을 피하기 위해서는 물론 충격에 강한 재질이나 형상의 공구를 선정해야겠으며 수명이 다한 공구를 무리하게 사용하지 않으며 좀더 두꺼운 인서트를 사용하는 것이 좋다. 또한 이송이나 절삭깊이 등을 줄여 절삭력을 낮추도록 한다.

2.4.2 엔드밀의 마모

엔드밀에는 Fig. 2-3과 같이 외주 여유면 마모, 경계 마모, 경사면 마모, 코너마모 및 외경마모가 발생한다. 엔드밀 절삭가공 수행 시 주로 외주 여유면을 따라서 마모가 진행된다. 그리고 절삭길이가 증가하는데 따라서 크레이터의 폭과 깊이가 커지고 마침내 크레이터의 립(lip)이 파손되어 Fig. 2-4와 같이 절삭날의 후퇴나 외경마모가 현저하게 증가할 때가 있다.

코팅처리 된 엔드밀은 코팅층이 있기 때문에 크레이터 및 외주 여유면의 마모가 억제되어 절삭날이 무너지지 않고 예리한 모양을 유지한다. 여유면 마모는 Fig. 2-4와 같이 절삭깊이 전체를 통해서 거의 균일한 폭으로 된다. 홈 가공과 같이 외주날과 앞날을 계속해서 사용해서 절삭하는 경우, 엔드밀에서 제일 마모되기 쉬운 것은 코너부이다. 코너부는 경사면, 외주 옆면 및 앞날 여유면의 교점이다. 앞날에서 코너부를 보면 외주날에 가까운 곳은 갈고리(hook) 모양으로 되어 있어서 겉으로 보아 가장 약한 부분인 것을 알 수 있다. 그리고 절삭 시에는 외주날과 앞날면에서 열과 압력을 받는다. 오른 날이 우회전해서 가공면에 최초로 파고 들어가는 것은 코너부이기 때문에 파고 들어갈 때 스트레스와 충격력을 정면으로 받게 된다. 이와 같이 코너부는 기본적으로 마모·치핑의 문제를 안고 있다. 코너마모를 작게 하는데 날 끝의 내치핑성을 늘릴 대책이 필요하다. 엔드밀의 재종이나 열처리방법의 개선도 한 방법이지만 쉽게 치핑 되지 않을 모양으로 만드는 것이 효과적이다. 그래서 코너부에 모따기부를 설정함으로써 코너마모가 작게 된다.

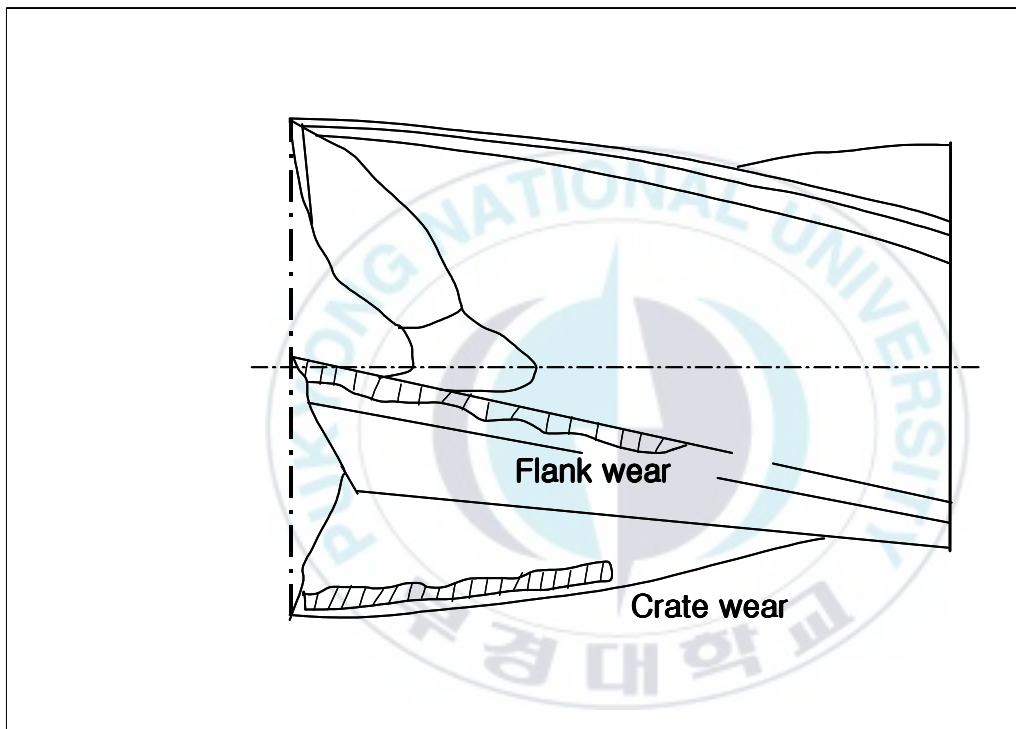


Fig. 2-3 Wear shape of endmill

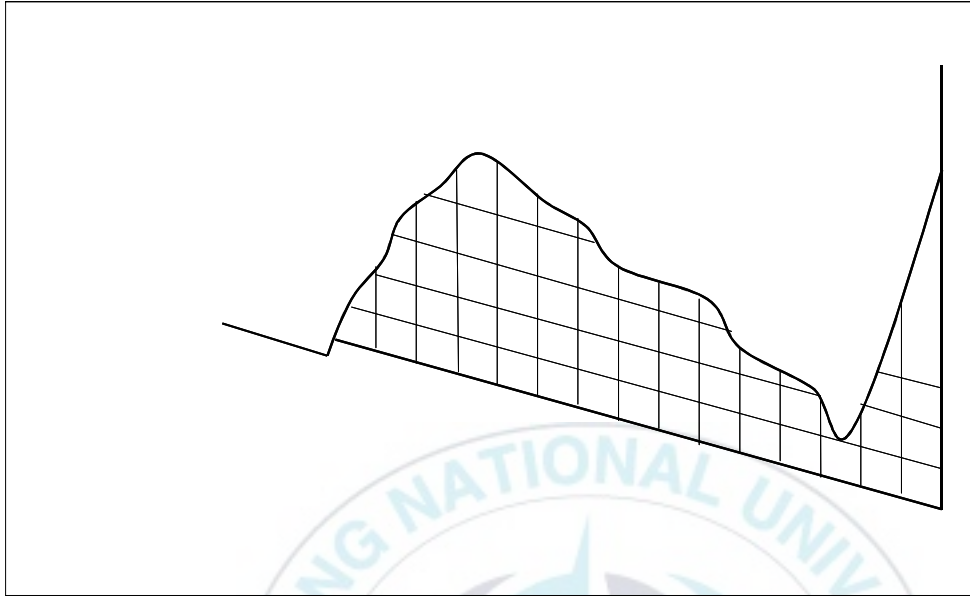


Fig. 2-4 Flank wear of endmill

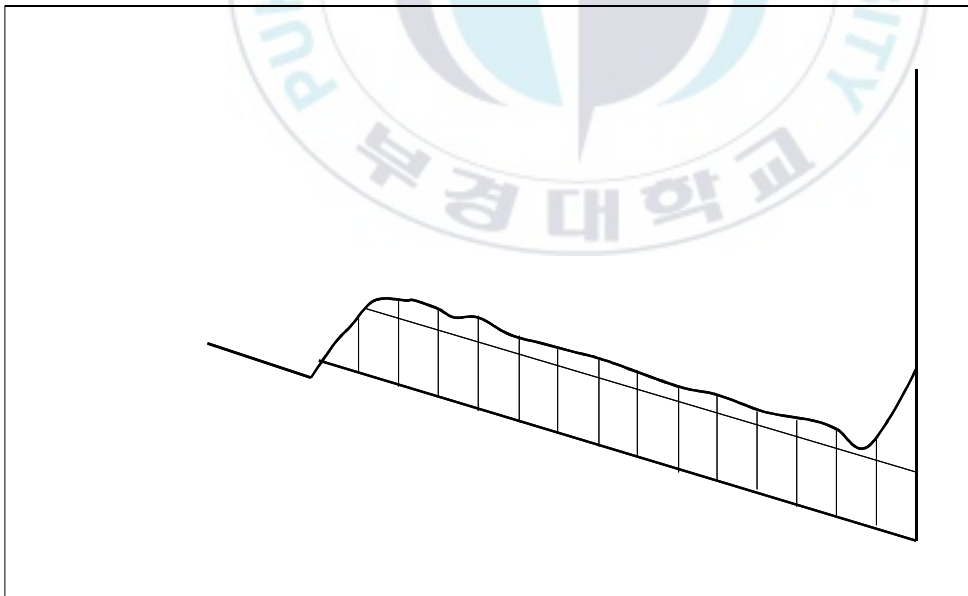


Fig. 2-5 Flank wear of coated endmill

2.5 표면거칠기

Fig. 2-6에서와 같이 가공면을 현미경으로 보면 요철을 볼 수 있다. 이와 같이 일정한 간격사이에 나타나는 요철빈도의 크기를 표면거칠기(roughness)라 하며, 정밀도를 정하는 중요한 인자이다. 표면거칠기가 작은 것이 정밀도가 좋다고 말할 수 있고, 표면거칠기는 마찰, 마모 및 내식성과도 밀접한 관계를 갖고 있다.

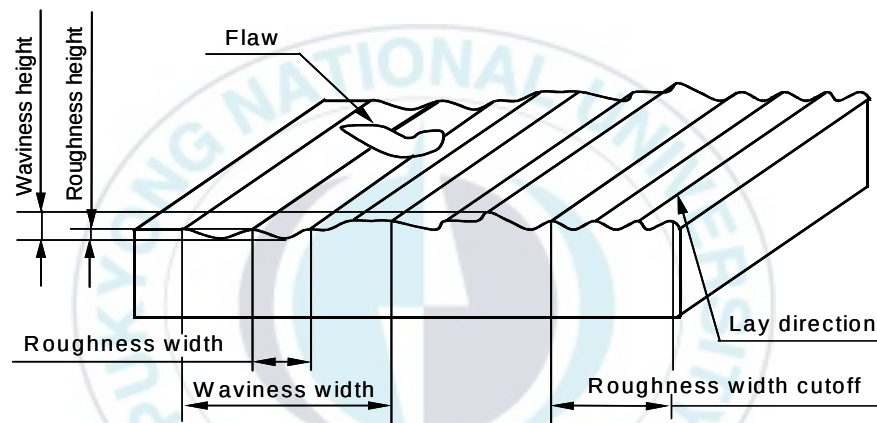


Fig. 2-6 Terms of surface characteristic

2.5.1 중심선 평균거칠기(*center line average height, R_a*)

중심선 평균거칠기(R_a)는 거칠기 곡선으로부터 그 평균선의 방향에 기준 길이 만큼 뽑아내어 그 표본부분의 평균 전 방향에 X축을, 세로방향에 Y축을 잡고, 거칠기곡선을 $y = f(x)$ 로 나타내었을 때, 다음 식에 따라 구해지는 값을 μm 로 나타낸 것을 말한다.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx \quad (2-4)$$

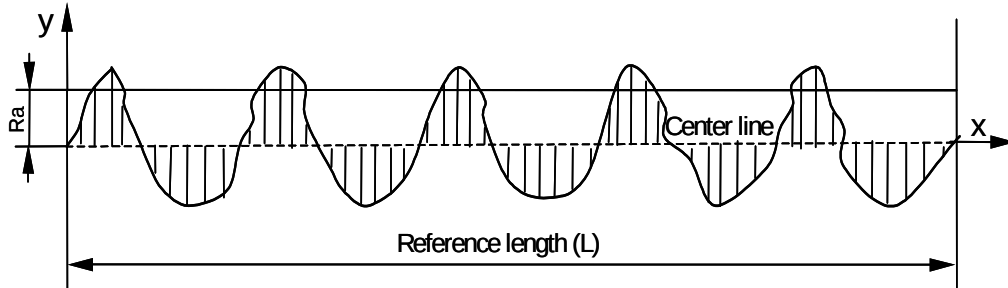


Fig. 2-7 Center line average height, R_a

2.5.2 최대높이 거칠기(maximum height roughness, R_{max})

Fig. 2-8에서와 같이 R_{max} 는 단면곡선에서 기준길이 만큼 채취한 부분의 평균선을 지나는 2직선을 평행하게 그었을 때, 2직선의 간격을 단면곡선의 세로배율 방향으로 측정하여 μm 로 표시한다.

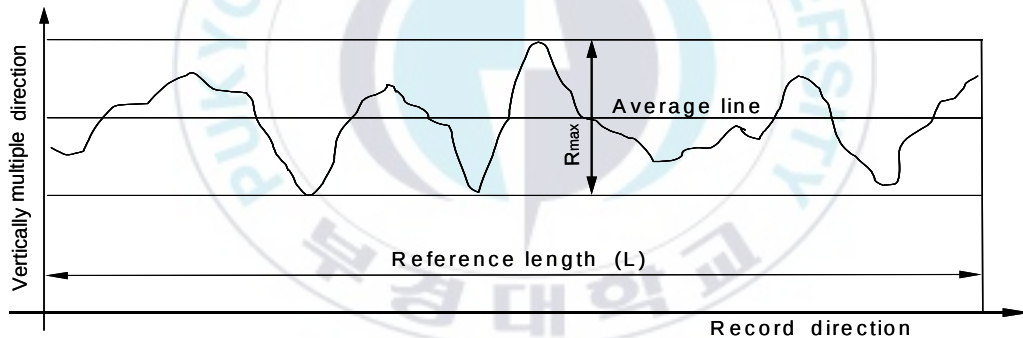


Fig. 2-8 Maximum height roughness, R_{max}

2.5.3 10점 평균거칠기(ten point average roughness, R_z)

Fig. 2-9와 같이 KS에서는 단면곡선의 평균선에 평행하고, 상하에서 각각 3번째의 최고정점과 골을 통과하는 평행선사이의 거리를 세로배율 방향으로 측정하여 μm 로 표시한다.

ISO에서는 기준길이 내의 가장 높은 봉우리에서 5번째까지의 평균 높이와 가장 낮은 골에서 5번째까지의 골 평균깊이와의 거리를 세로배율 방향으로

로 측정하여 μm 로 표시한다. Table 2-1은 표면거칠기의 호칭을 나타낸 것이다.

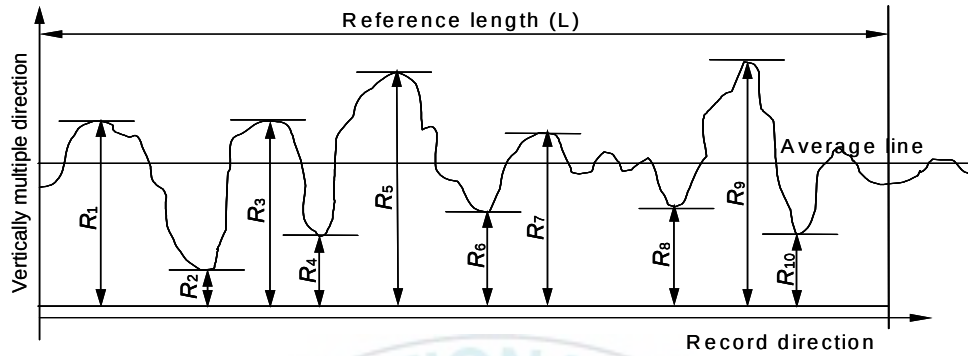


Fig. 2-9 Ten point average roughness, R_z

Table 2-1 Names of roughness (KS B 0161)

Roughness	Units
Maximum height roughness(R_{max})	Maximum height roughness $\cdots\mu\text{m}$, Reference length $\cdots\text{mm}$, or $\cdots\mu\text{m}$ R_{max} , $L\cdots\text{mm}$
Ten point average roughness(R_z)	Ten point average roughness $\cdots\mu\text{m}$, Reference length $\cdots\text{mm}$, or $\cdots\mu\text{m}$ R_z , $L\cdots\text{mm}$
Center line average height(R_a)	Center line average height $\cdots\mu\text{m}$, Cut-off $\cdots\text{mm}$, or $\cdots\mu\text{m}$ R_a , $\lambda_c\cdots\text{mm}$

표면거칠기의 측정법에는 두 가지가 있다. 하나는 표준표면에 대한 비교 측정이고, 다른 하나는 측정기에 의한 직접측정이다. 전자는 최종가공이 다 될 때에는 오판을 가져올 경우가 있으므로, 같은 제작공정의 공작물 또는 같은 종류의 공작물을 다수 비교할 때에 편리하다. 후자의 직접

측정법에는 축침법, 광절단법, 광파간섭법, 접촉측정법 등이 있으며, 표준편 또는 비교편을 필요로 하지 않는다.

① 촉침법

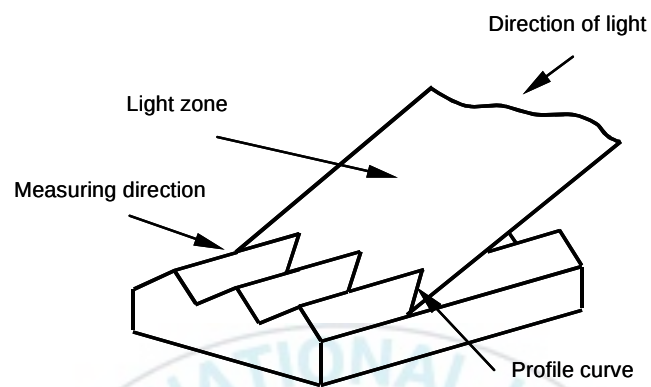
표면거칠기의 실제의 정량적 측정을 위하여 촉침식 측정기가 사용된다. 예리한 다이아몬드 촉침이 암의 일단에 고정되어 주어진 속도로 표면 위를 전후로 운동하며, 행정을 조정하여 표준길이를 택한다. 촉침이 표면 위를 통과할 때 표면거칠기에 비례하여 상하로 움직이며, 이 때 상하의 움직임이 확대되어 기록되는 광학 또는 전기적 반응을 일으킨다.

② 광 절단법

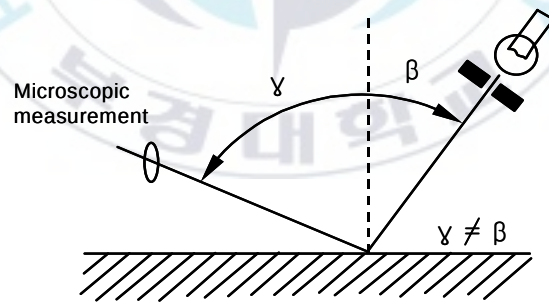
Fig. 2-10(a)과 같이 광대를 표면에 투사시켜 직각방향으로부터 Fig. 2-10(b)처럼 각 γ 를 현미경으로 측정한다. 이 광절단식 측정기는 여러 가지 양식이 있는데, 투영광축과 관측 현미경축이 피측정면과 이루는 각에 따라 명시야 관찰($\beta=\gamma=45^\circ$) 및 암시야 관찰($\beta\neq\gamma$)로 크게 분류할 수 있으며, 일반적으로 사용되는 명시야 관찰법에 의하면 면의 거칠기가 실제의 $\sqrt{2}=1.41$ 배로 보이게 된다.

광절단법의 장점은 취급이 간편하고, 신속하고 확실하며, 측정면의 단면곡선을 촬영할 수 있다는 것과 압력접촉이 없다는 것이다. 결점으로는 경사지게 절단하기 때문에 윤곽이 변형되어 나타나며, 단면곡선을 상하로 크게 확대할 수 없으므로 사용한계가 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 라는 것과, 관측할 수 있는 단면곡선의 길이가 짧다는 것이다.

앞에서 설명한 촉침법, 광절단법 외에도 광파간섭법 및 공기마이크로미터(micrometer)에 의한 측정법 등이 있다.



(a) Projection sense



(b) Measurement optical system

Fig. 2-10 Optical cut method

2.6 고속가공의 온도

1924년 Salomon 박사는 고속가공시 절삭속도의 증가에 따라 최고의 절삭온도에 도달하는 임계절삭속도가 있으며, 절삭속도를 계속 증가하면 온도는 감소하는 경향을 나타낸 이론을 제안하였다. 즉 임계온도에 도달하는 절삭속도가 존재한다는 것이다. 이 이론이 제안된 이후에 대부분의 논문에서 절삭속도의 증가에 따라 온도가 감소하지 않는다는 것으로 결론을 내렸는데, 그 중에 하나인 McGee^[30]는 절삭온도는 절삭속도의 증가에 따라 최고온도에 도달하게 되는데 이 최고온도는 재료의 녹는점과 거의 일치한다고 제안하였다. 즉, 고속가공에서 온도의 감소는 일어나지 않는다는 것이다.

McGee는 알루미늄 합금의 녹는점(약 660℃)은 초경합금이나 세라믹 공구가 그 경도를 상실하기 시작하여 공구의 마모가 급속히 진행되는 온도보다 낮기 때문에 가공 최고온도가 존재하지 않는다고 설명하였다.

역으로, Trent는 알루미늄보다 녹는점이 높은 강은 가공시의 열발생이 중요한 변수가 된다고 하였다. Fig. 2-11에는 Salomon이 제안한 각 재질별 임계온도를 나타내고 있으며, Fig. 2-12의(a)와 (b)에는 Salomon과 McGee의 곡선을 각각 나타내고 있다.

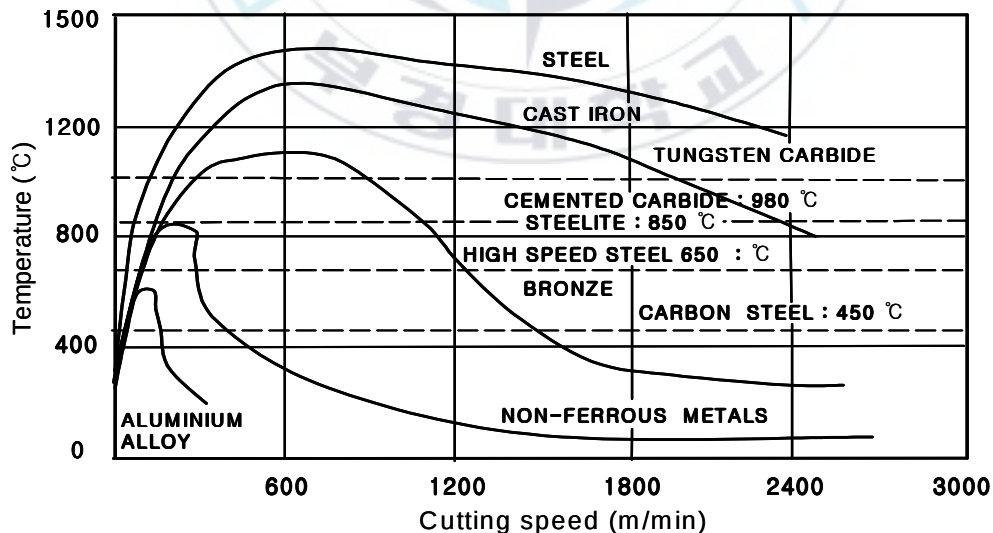
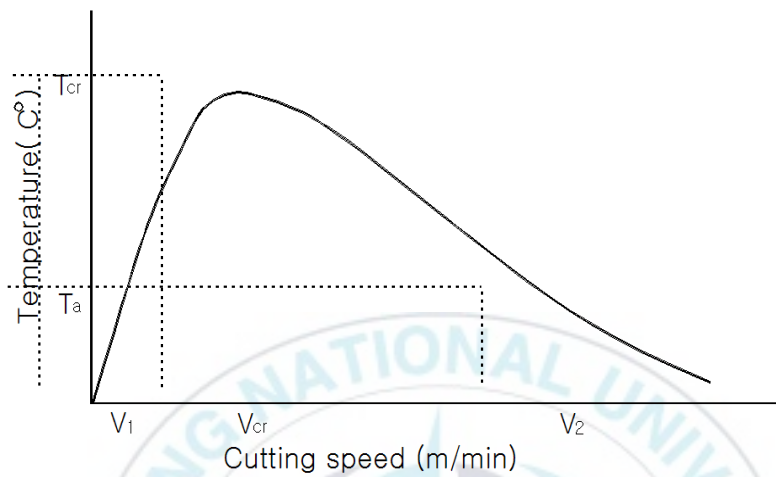


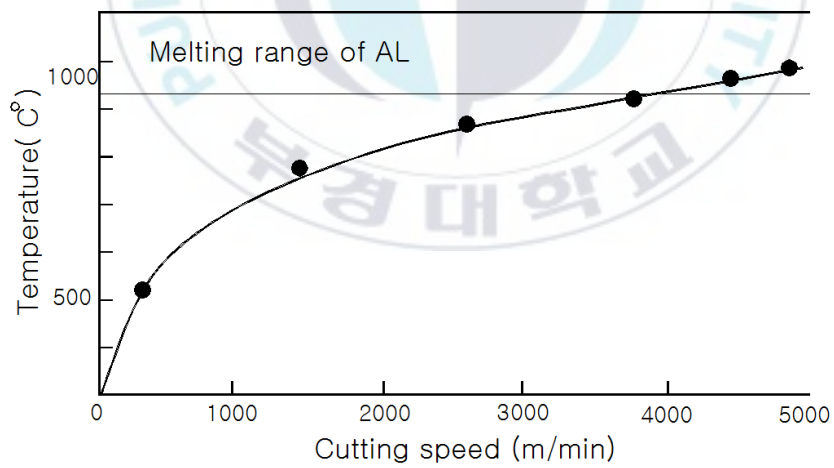
Fig. 2-11 Salomon's hypothesis

Fig. 2-8의 (a)는 V_1 에서는 절삭속도가 증가하면 온도도 비례적으로 상승하여 최고치 T_a 에 도달하게 된다. 즉 절삭온도가 최대가 되는 임계절삭속도 V_{cr} 이 존재하며 속도가 더 증가하면 온도가 떨어질 것으로 예측하였다. Saiomon은 V_{cr} 의 양측에는 공구가 아주 격심한 온도와 힘을 견디지 못해 절삭 불가능한 영역이 존재할 것이라고 제안하였고, 곡선의 형태는 피삭재의 특성에 따라 달라진다고 생각하였다. 일반적으로 절삭속도가 높아져 절삭이 불가능해지는 영역 (이 절삭속도 영역을 죽음의 계곡이라고 부름)을 넘어 더욱 초고속 영역 V_2 로 들어가면 정상절삭속도 V_1 영역에서의 온도 T_a 를 고속절삭속도 V_2 에서도 실현될 수 있다고 제창 하였다.





(a) Salomon's curve



(b) McGee's curve

Fig. 2-12 Graph of temperature vs. cutting speed

2.7 가공온도측정 기술

절삭온도는 절삭시 절삭점 전단면에서의 소성변형에너지에 의해 발생하는 열, 칩과 공구사이의 마찰열에 의해서 발생하는 열, 공구마모 시 피삭재의 표면의 마찰에 의해서 발생하는 열에 의해서 영향을 받으며 이러한 열을 측정하는 방법은 크게 아래와 같은 방법들이 활용된다.

1) Tool-workpiece thermocouple technique

Braiden에 의해 시도되었는데 이것은 공구와 재료가 서로 다른 재질이므로 서로 온도차이가 발생한다는 것에 착안한 것이며, 단속절삭에서 WC계열의 공구를 사용하여 실험하였다.

2) Thermocouple-insert technique

Kuster는 많은 공구를 이용하여 재료의 내부에 열전쌍을 삽입하여 온도를 측정하였으며, Usui는 0.01mm의 열전쌍을 인서트 팁에 삽입하여 온도를 측정하였다. 이 방법은 열전쌍을 재료나 공구에 삽입하는데 많은 어려움이 따른다.

3) Thermovision technique

Schwerd는 가공시 방출되는 열을 적외선을 측정함으로써 측정하였는데, 이 방법은 재료와 공구와의 접촉에 의해 가공에 의해 발생하는 열을 직접 측정할 수 없다는 단점이 있다.

4) Metallographic technique

온도에 따른 경도의 값의 변화를 측정하여 온도를 측정하는 방법으로 재료가 가지는 고유의 온도에 따른 경도 값과 비교하여 온도 값을 측정하는 것이다.

5) Thermosensitive paints or liquid crystal technique

이 방법은 Schallbrock와 Lang에 의해 시도되었으며, 열에 민감한 도료나 액체 등을 공구나 재료에 도포하여 그 열을 측정하는데, 가공중에 보이는 면에서만 측정이 가능하며 실제 마모되어 도포된 도료가 손실된 공구에서는 정밀도가 떨어진다.

제 3 장 고속가공용 엔드밀의 성능평가

3.1 고속가공

제품의 정밀도나 질을 떨어뜨리지 않는 가운데서 높은 재료 제거율에 도달하는 더 높은 주축속도(spindle speed)와 이송속도(feed rate)로 가공하는 것을 고속가공이라 일반적으로 정의한다. 고속가공은 난삭재에 대하여 절삭속도의 고속화는 절삭능률 향상이라는 장점이 있지만은 절삭온도의 상승으로 절삭공구의 수명단축, 가공물에 남는 잔류응력, 가공변질층 등의 단점이 있다. 이러한 단점을 피하기 위하여 고속회전, 고속이송하면서 절입량을 줄여 가공 중 절삭저항의 변동을 줄임과 동시에 일정한 절삭저항을 유지하도록 하여 트리블발생을 최대한으로 억제하며 생산성을 향상 시키고자 하는 것이다.

고속가공을 금형가공에 적용하면 가공시간을 단축시켜 가공능률향상, 생산성향상을 가져오며 고속주축회전은 패스(pass)당 표면정도의 향상으로 2차 공정을 감소시키거나 생략할 수 있고, 또한 작은 직경의 공구를 효율적으로 사용할 수 있으며, 얇고 취성이 있는 소재를 효율적으로 가공되고, 절삭력의 감소로 공작물로의 열전달을 줄여 절삭에 의해 발생하는 열을 칩에 의해 제거된다. 따라서 열에 의한 공작물의 변형을 감소시키기 때문에 상대적으로 좋은 정밀도의 가공품을 얻을 수 있다.

3.1.1 고속가공기

본 실험에 사용한 장비는 독일 뢰더스(Roeders)사에서 제작한 고속가공기로서 모델(model)명은 RFM-760이다. 이 장비의 주요특징은 유한요소분석에 의한 견고한 주철설계로 최적화된 포탈(portal)형 구조로 되어 있고, 특수 플라스틱 슬리브가 적용되어 주축에 의해 획득된 최적 진동 감소 기능이 있다. 그리고 조화된 가이드웨이와 재순환 볼스크류는 고강성과 높은 수

명을 보장하며, 밀폐형 캐빈구조는 어떤 제약이나 특수 장치 없이 흑연, 유리 보강섬유 또는 입자재료의 가공이 가능하고, 고 정밀작업에 대하여 전체 기계프레임의 온도의 안정성이 확보되고, 칩 제거가 원활하며, 가공부분에 대한 좋은 가시성을 확보되며, 두면의 문을 통한 가공부분의 접근성 매우 좋고 스프레이 냉각방식을 적용하여 환경친화적이다. Photo. 3-1은 본 실험에 사용한 고속가공기(RFM-760)의 사진이며, Table 3-1에는 사양을 나타내었다.



Photo. 3-1 High speed machine used in experiment

Table 3-1 High speed machine(RFM-760) specifications

Stroke	X axis(mm)	760
	Y axis(mm)	550
	Z axis(mm)	485
Table size(mm)		860×550
Spindle speed(rpm)		42,000
Spindle power(kW)		14
Feed-rate(mm/min)		30,000
Gross weight(kg _f)		5,200
Workpiece weight(kg _f)		800
Controller		Window NT based PC controller Block processing time : 0.1ms/block Polynomial spline interpolation Look ahead window : 10,000 block Simultaneous 5 axis control Hard disk : 17GB
Additional(standard)		Remote box, Chip collector Ethernet card, Panel air-conditioner Cooling unit ATC(automatic tool changer) Tool holding device Laser tool measuring device

3.1.2 부속장치

Photo. 3-2는 공구열간 압입기의 사진이다. 공구홀더에 공구를 클램핑 하기위한 가장 일반적인 방법은 콜릿(collet)을 사용하는 것이다. 그러나 구심도의 편차가 크기 때문에, 그리고 사용 중 가하는 힘에 의해 공구표면에 마모가 발생되어 고속정밀가공에 한계가 있다. 따라서 공구 열간 압입기를 사용하였다. 이는 구심도가 $10\mu\text{m}$ 이하를 유지시켜 주며 클램핑포스(clamping force)자체도 콜릿(collet)보다 높고 공구표면의 마모도 방지한다.

Photo. 3-3은 공구 클리닝젯(tool cleaning jet)의 사진이며 가공의 전후에 고압의 공기를 불어내어 레이저공구측정 장치로 공구의 직경과 길이변화 측정을 용이하게 해준다.



Photo. 3-2 Thermal expansion chuck



Photo. 3-3 Tool cleaning jet

3.2 실험장치

본 실험에서는 Photo. 3-1과 같은 고속가공기(RFM-760 Roeders, Germany)를 이용하여 절삭작업을 수행하였으며, 피삭재료는 금형재료로 일반적으로 사용되고 있는 합금공구강(STD11)을 사용하였다. 절삭가공 중에 발생하는 절삭저항은 압전소자형 공구동력계(9257B, Kistler)를 사용하여 절삭저항의 3분력(F_x , F_y , F_z)을 측정하였다. Fig. 2-1의 엔드밀의 기하학적 모식도에서 표시되어진 엔드밀의 1차 여유각 θ 와 공구인선부의 플랭크마모 (V_B)는 공구현미경(MF-1030TH, Mitutoyo)을 사용하여 측정 및 관찰하였다.

또한 엔드밀 랜드부의 최대표면거칠기는 축침식 표면거칠기 측정기(SURFTTEST SV-2000N2 Mitutoyo)를 이용하여 측정하였다.

본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도는 Fig. 3-1에 실험장치 사진은 Photo. 3-4에 나타내었으며, 실험장치의 사양은 Table 3-2와 같다.

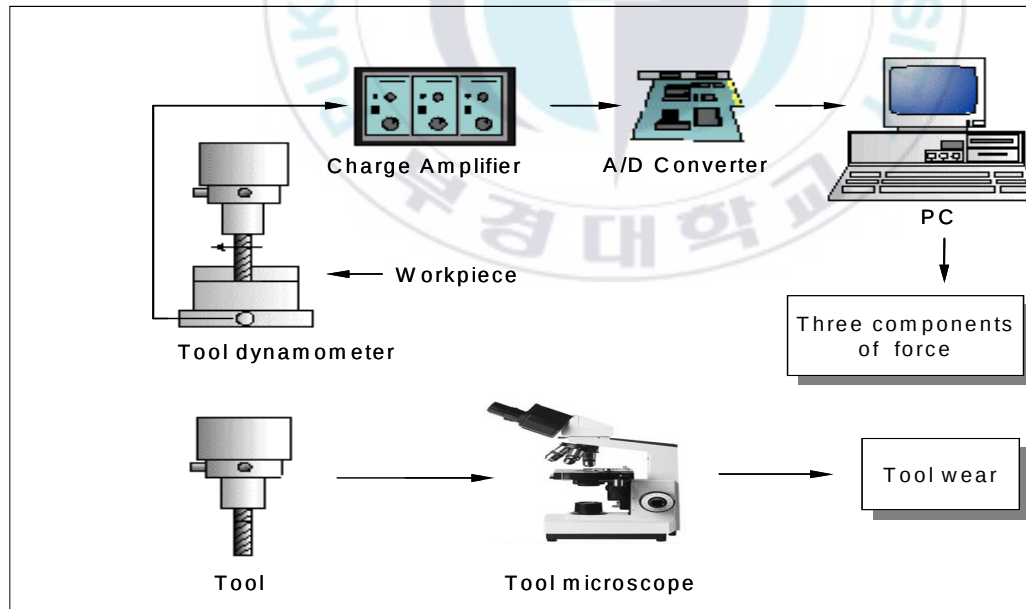


Fig. 3-1 Configuration of experimental system

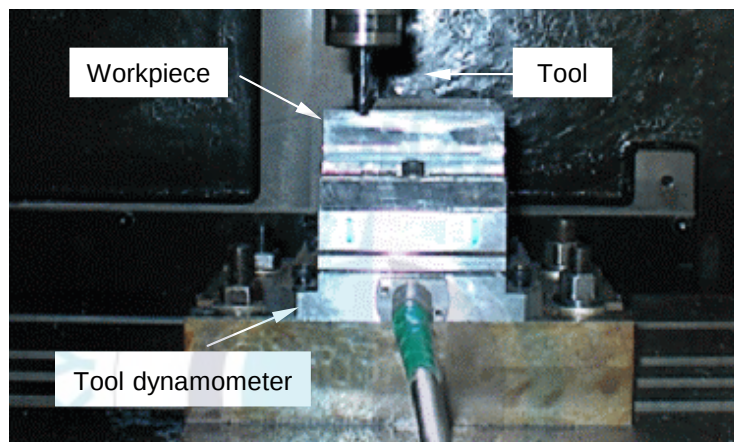


Photo. 3-4 Photograph for experimental working

Table 3-2 Experimental equipments

Instruments	Specifications
High speed machine	Model : RFM-760, (Germany) Spindle : 42,000rpm Feed : 30,000mm/min
Tool dynamometer	Model : 9257B(piezo type, Kistler) Type : 3 Component forces Normal component : 50N Tangential component : 50N Axial component : 100N
Charge amplifier	Model : 5019A(Kistler) Type : 3 channel Range : 0~10V
A/D converter	Model : PCL-812PG(Advantech) Channel : 16ch. Resolution : 12bits
Tool microscope	Model : MF-1030TH(Mitutoyo) Magnifications : X10, X30, X50, X100
Roughness tester	Model : SURFTEST SV-2000N2(Mitutoyo) Cut off : 0.025~510mm Feed : 80mm/s Measuring range : 100m(0.05 μ m) Measuring speed : 0.02~0.5mm/s

3.3 실험방법

본 실험은 Table 3-3과 같은 실험조건으로 절삭속도, 이송 및 절입깊이 등의 절삭조건을 일정하게 설정하고 절삭작업을 수행하여 절삭저항을 측정함으로써 엔드밀인선의 변화를 간접적으로 파악하였다.

절삭시 절삭유제는 사용하지 않고 건식으로 절삭작업을 수행하였다. 엔드밀의 1차 여유각은 엔드밀 제작사로부터 특별 제작 후 공구현미경을 사용하여 여유각을 측정, 확인하고 사용하였다. 그리고 엔드밀 랜드부 표면거칠기에 따른 엔드밀 성능평가를 위하여 입도가 서로 다른 연삭숫돌을 이용하여 랜드부 조도를 인위적으로 변화시킨 후, 축침식 표면거칠기 측정기를 이용하여 최대거칠기를 10회 측정한 후 최대거칠기의 평균값을 구하여 실험에 사용하였다.

엔드밀의 성능평가를 위해서 절삭저항측정이 용이하고 가장 정확한 공구동력계(9257B, Kistler)를 사용하였으며, 검출된 절삭저항신호로부터 계산되어진 주분력(F_x)과 주분력변동폭(ΔF_x) 및 단위시간당 주분력증가율(dF_x/dt)을 사용하여 공구성능을 평가하였다. 그리고 엔드밀의 인선변화는 절삭작업 진행과정에서 일정한 간격으로 엔드밀 선단의 마모를 공구현미경을 이용하여 관찰하였다.

본 실험에 사용한 초 미립 초경엔드밀의 화학성분은 Table 3-4에 나타내었다.

Table 3-3 Experimental conditions

Items		Conditions
Rotational speed(rev/min)		5000
Feed(mm/min)		200
Depth of cut(mm)		1.0
Width of cut(mm)		4.0
Workpiece		STD11
Tool	Material	TiAlN coated flat endmill
	Diameter(mm)	ø10
	Clearance angle(°)	4, 6, 8, 10
	R _{max} of land part(μm)	1.7, 4.7, 7.4
Cutting fluid		Dry

Table 3-4 Chemical composition of endmill(wt %)

Element	W	Co	Yb	Cr	V
Weight(%)	85.999	10.587	2.791	0.378	0.245

3.4 엔드밀의 성능평가 방법

절삭작업에 있어서 절삭저항의 측정은 공구의 성능을 평가하는데 있어서 중요한 정보를 제공한다. 본 연구에서는 절삭저항을 측정하기 위하여 공구 동력계(9257B, Kistler)를 이용하였으며, 얻어진 절삭저항신호를 다채널 증폭기를 통하여 증폭시킨 후, 컴퓨터에 장착된 A/D 변환기에 의해 변환시킨 후 활용하였다.

Fig. 3-2는 절삭가공 수행 시 측정된 3분력 중 1초간에 변환된 주분력신호의 변화를 보여주는 그림이다. 그림에서 절삭저항폭의 규칙적인 변화는 2날 엔드밀의 긴 날과 짧은날의 영향에 의한 것으로, 절삭저항의 주분력을 계산하여 엔드밀의 성능평가에 활용하였다.

Fig. 3-3은 2날 플랫 엔드밀 Ø10을 사용하여 주축속도 5,000rpm, 이송속도 200mm/min, 절삭깊이 1.0mm, 절삭폭 4.0mm로 설정하여 80분간 절삭작업을 수행하였을 때, 측정되어진 절삭저항신호로부터 계산되어진 주분력을 절삭시간에 따라 도시한 그림이다. Fig. 3-3에 표시되어있는 ①~⑧의 점은 절삭가공 중 공구인선의 변화상태를 관찰하기 위하여 10분 간격으로 공구현미경으로 공구인선을 관찰한 시점을 나타낸 점이며, 공구현미경으로 관찰한 사진은 Photo. 3-5에 나타내었다. Fig. 3-3에서 보는바와 같이, 절삭시간 진행됨에 따라 주분력이 점진적 증가추세를 보이고 있으며 이는 엔드밀의 인선부의 여유면 마모가 증가함에 따라, 절삭저항이 증가하고 있음을 의미하고 있다. 따라서 본 논문에서는 엔드밀의 주분력과 단위시간당 주분력증가율(dF_v/dt)을 사용하여 엔드밀 랜드부의 표면거칠기 및 여유각의 변화에 따른 공구성능을 평가하였다.

Fig. 3-4는 절삭시간의 증가에 대한 랜드부의 플랭크마모(V_B)의 변화를 나타낸 그림으로 Photo. 3-5의 공구인선의 변화를 관찰한 사진과 더불어 Fig. 3-3에서 절삭시간이 진행됨에 따라 주분력 증가가 랜드부 마모폭을 증가시키는 원인으로 판단되어진다.

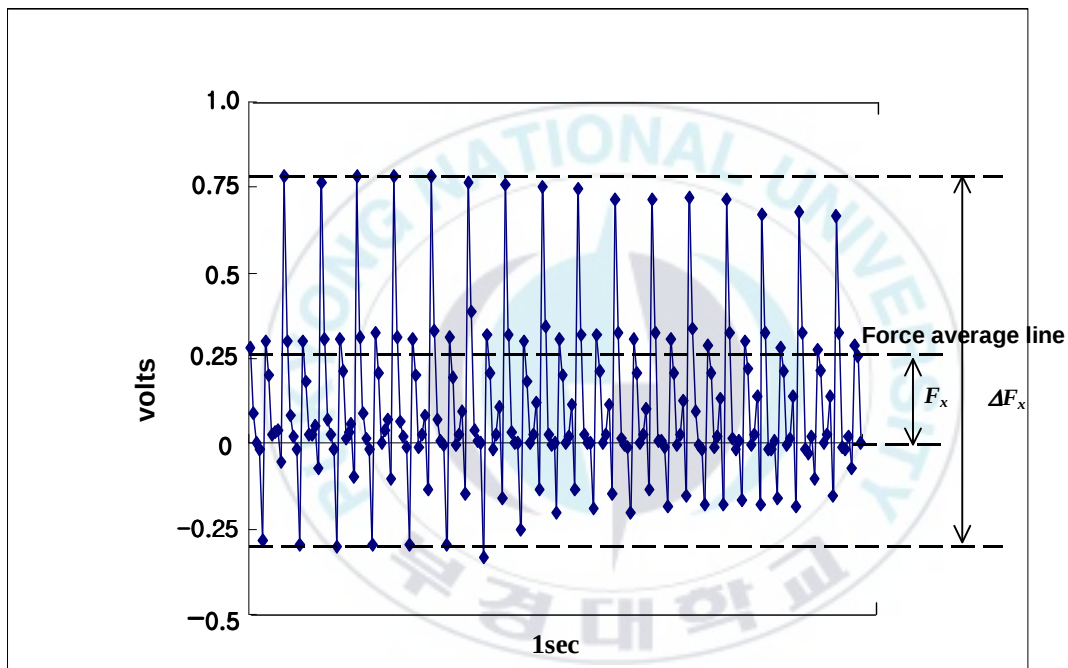


Fig. 3-2 Phenomenon of during 1sec suppling volts

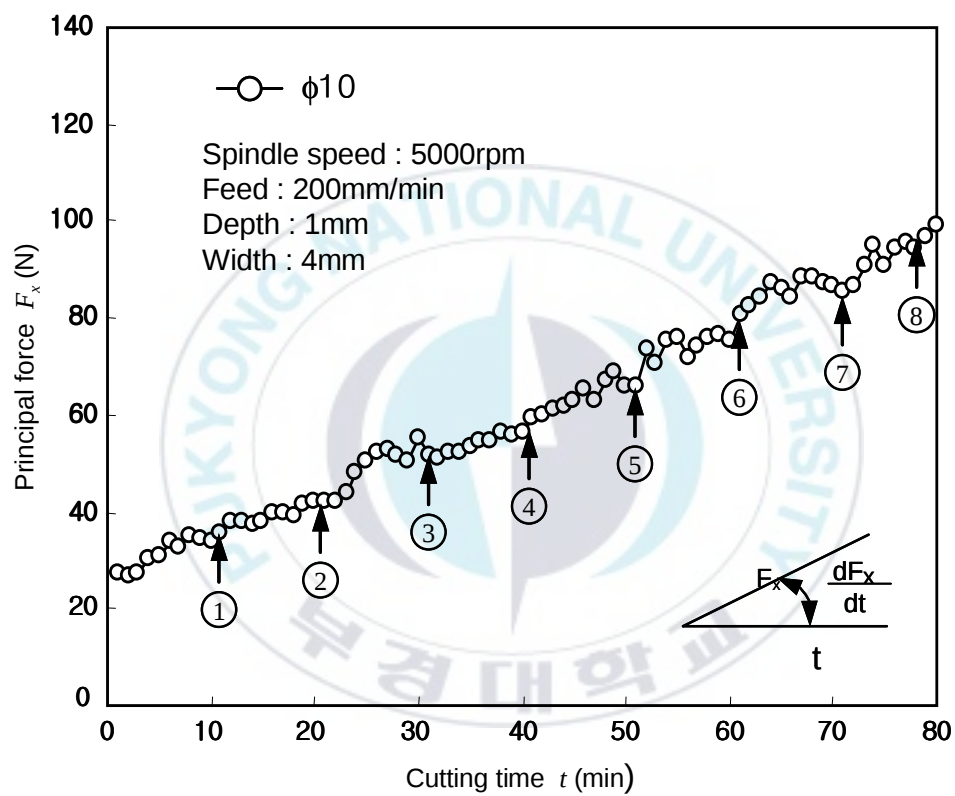


Fig. 3-3 Behavior of principal force lapse for cutting time

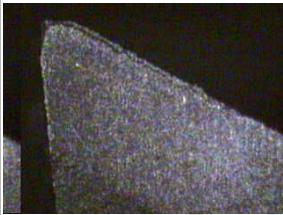
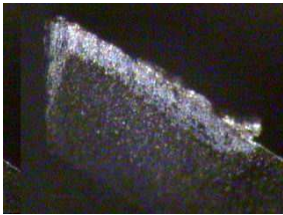
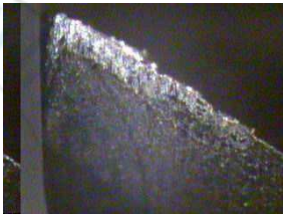
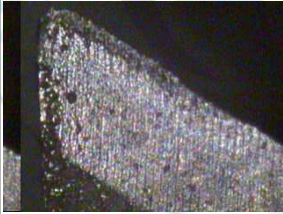
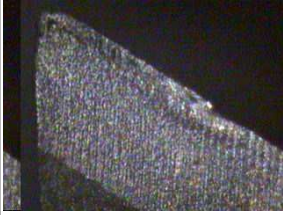
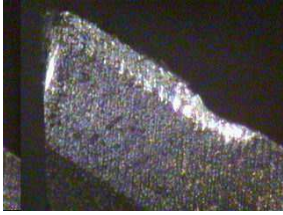
Cutting time	30 magnifications	Cutting time	30 magnifications
① 10min		⑤ 50min	
② 20min		⑥ 60min	
③ 30min		⑦ 70min	
④ 40min		⑧ 80min	

Photo. 3-5 Tool microscope observation of cutting edge on endmill

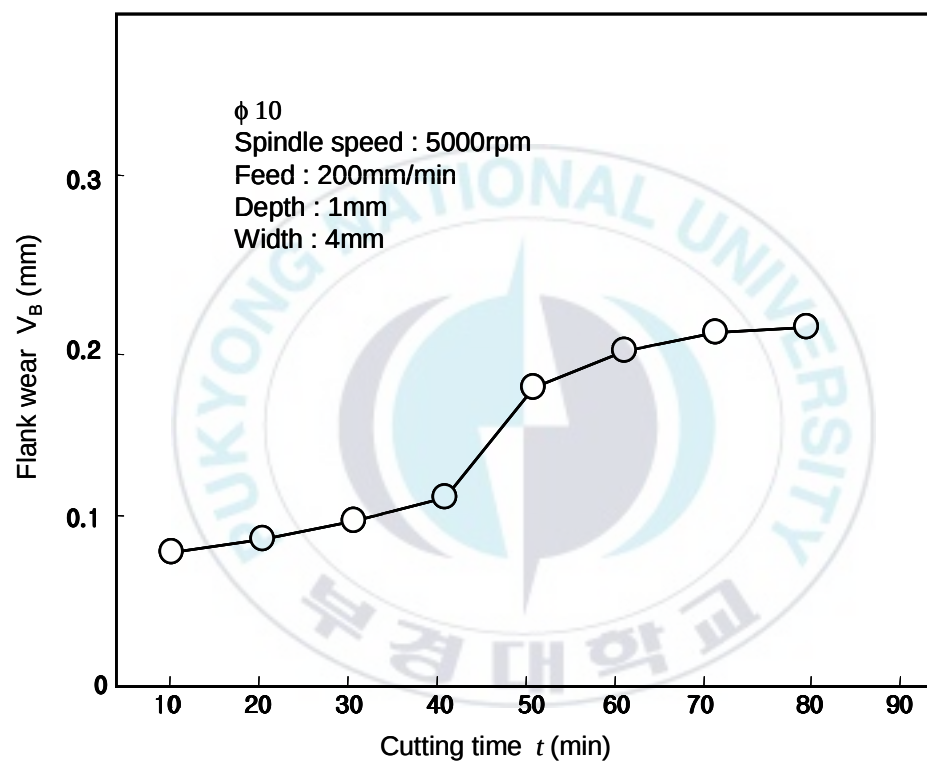


Fig. 3-4 Relationship between flank wear and cutting time

3.5 엔드밀 랜드부 표면거칠기에 의한 성능평가

엔드밀의 성능을 평가하는 중요한 요소로는 여러 가지가 있으나 그중에서 특히, 랜드부의 표면거칠기는 엔드밀의 성능에 큰 영향을 미친다. 랜드부의 표면거칠기가 나쁘면 가공을 진행하는 도중에 엔드밀의 마모가 격심하게 일어날 것으로 예상된다.

Fig. 3-5~Fig. 3-10은 2날 플랫폼 Ø10 엔드밀로 주축속도 5,000rpm, 이송속도 200mm/min, 절입깊이 1.0mm, 절삭폭 4.0mm로 설정하여 랜드부 표면거칠기(R_{max})가 각각 $1.7\mu m$, $4.7\mu m$, $7.4\mu m$ 인 엔드밀을 사용하여 절삭가공을 수행하였을 때의 절삭저항과 절삭저항의 변동폭변화를 나타낸 그림이다. Fig. 3-5~Fig. 3-10의 그림에서 보는바와 같이, 랜드부 표면거칠기가 $1.7\mu m$, $4.7\mu m$ 인 엔드밀로 절삭가공을 수행하였을 때는 절삭저항과 절삭저항 변동폭의 증가량이 완만하였으나, Fig. 3-9에서는 랜드부 표면거칠기가 $7.4\mu m$ 인 엔드밀은 절삭저항과 절삭저항의 변동 폭이 급격함을 알 수 있다.

Fig. 3-11은 Fig. 3-5~Fig. 3-10의 측정결과를 바탕으로 랜드부 표면거칠기에 따른 주분력의 초기값을 표시한 그림이다. 그림에서 보는바와 같이, 엔드밀 랜드부의 표면거칠기가 나뉠수록 초기 절삭저항이 크게 작용하며, 이는 랜드부 표면거칠기가 나빠지면 엔드밀과 피삭재간의 마찰저항이 증가하게 되고 이로 인하여 절삭력이 증가하는 것으로 사료되어진다.

Fig. 3-12는 Fig. 3-5, Fig. 3-7, Fig. 3-9의 절삭저항 그림에서 주분력의 증가율(dF_x/dt)을 나타낸 그림이다. 그림에서 엔드밀 랜드부의 표면거칠기가 나뉠수록 주분력의 증가량이 크게 되는 것으로 보아 랜드부 표면거칠기가 나쁘면 절삭시간의 증가에 따라 공구마모가 더욱 격심하게 되어진다는 것을 알 수 있다. 따라서 공구 제작시 랜드부의 표면을 양호하게 연마할 필요가 있다.

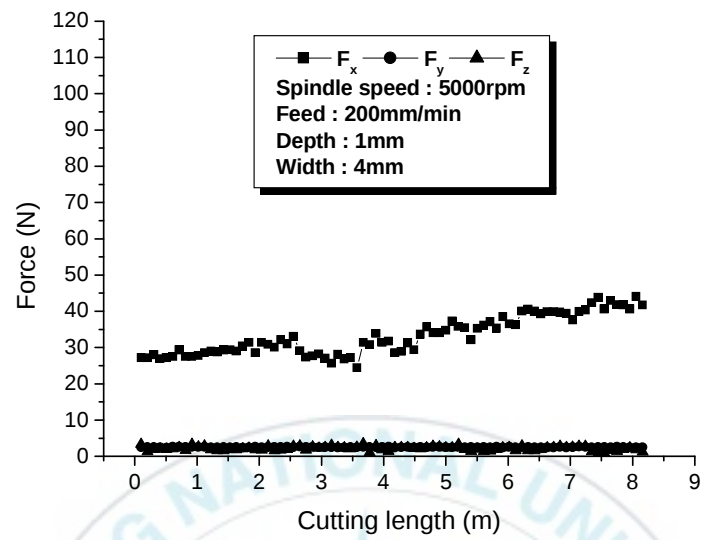


Fig. 3-5 Cutting force(average) in $1.7\mu\text{m}$ surface roughness

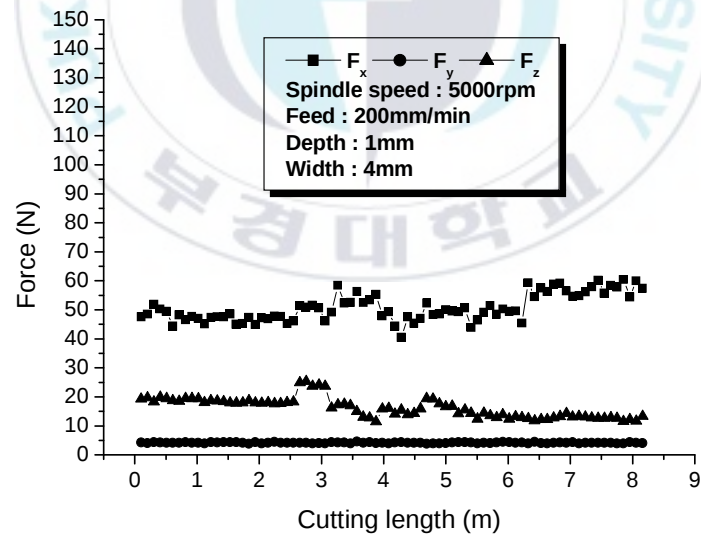


Fig. 3-6 Cutting force(deviation) in $1.7\mu\text{m}$ surface roughness

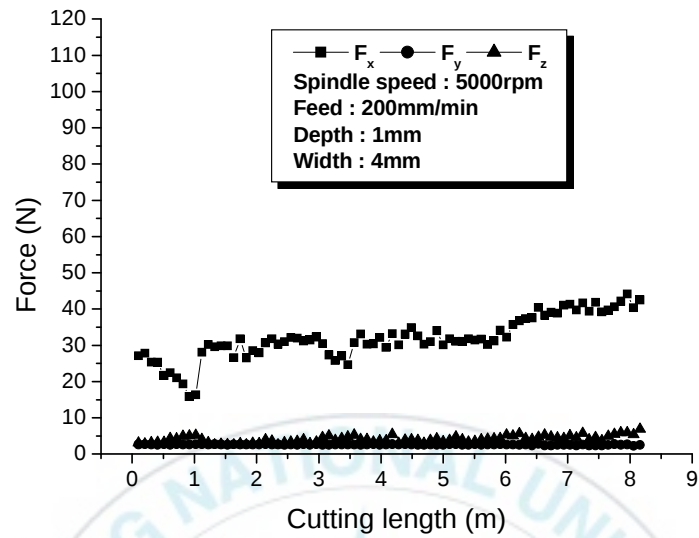


Fig. 3-7 Cutting force(average) in $4.7\mu\text{m}$ surface roughness

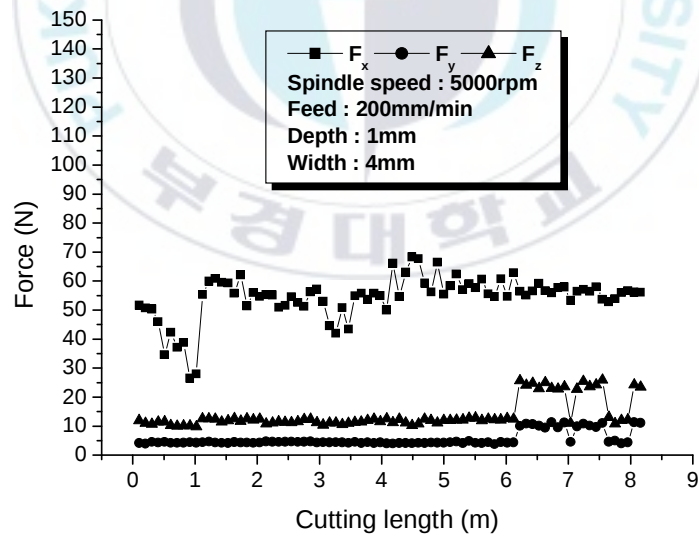


Fig. 3-8 Cutting force(deviation) in $4.7\mu\text{m}$ surface roughness

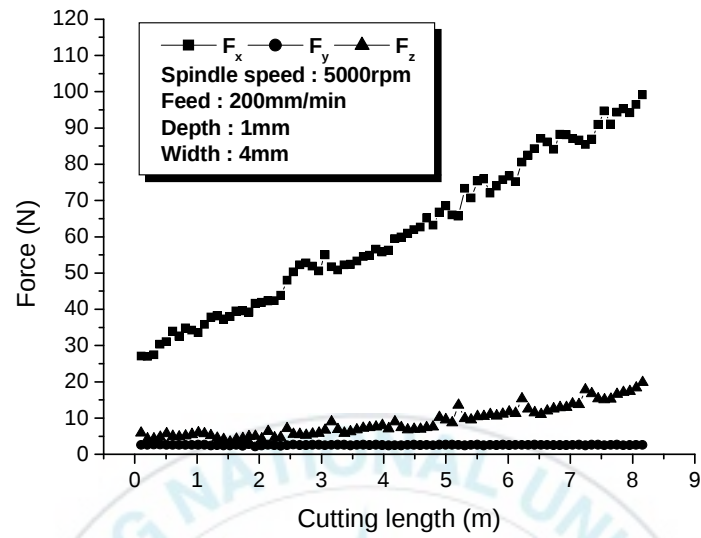


Fig. 3-9 Cutting force(average) in $7.4\mu\text{m}$ surface roughness

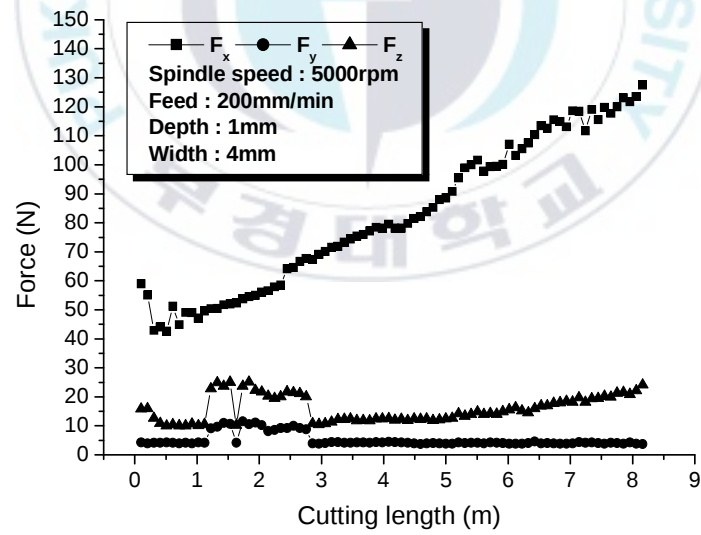


Fig. 3-10 Cutting force(deviation) in $7.4\mu\text{m}$ surface roughness

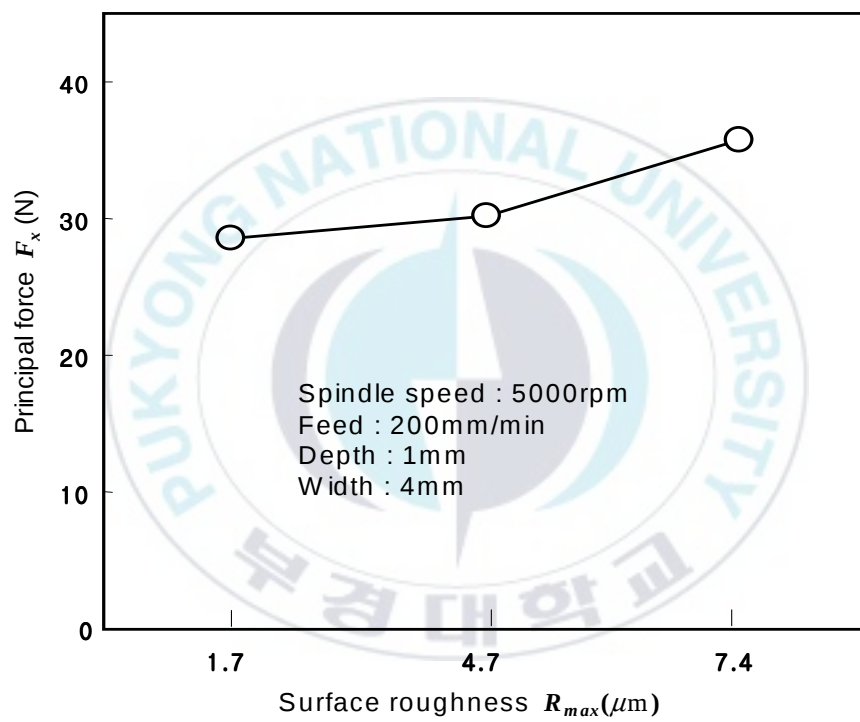


Fig. 3-11 Relationship between R_{max} of land part and principal force

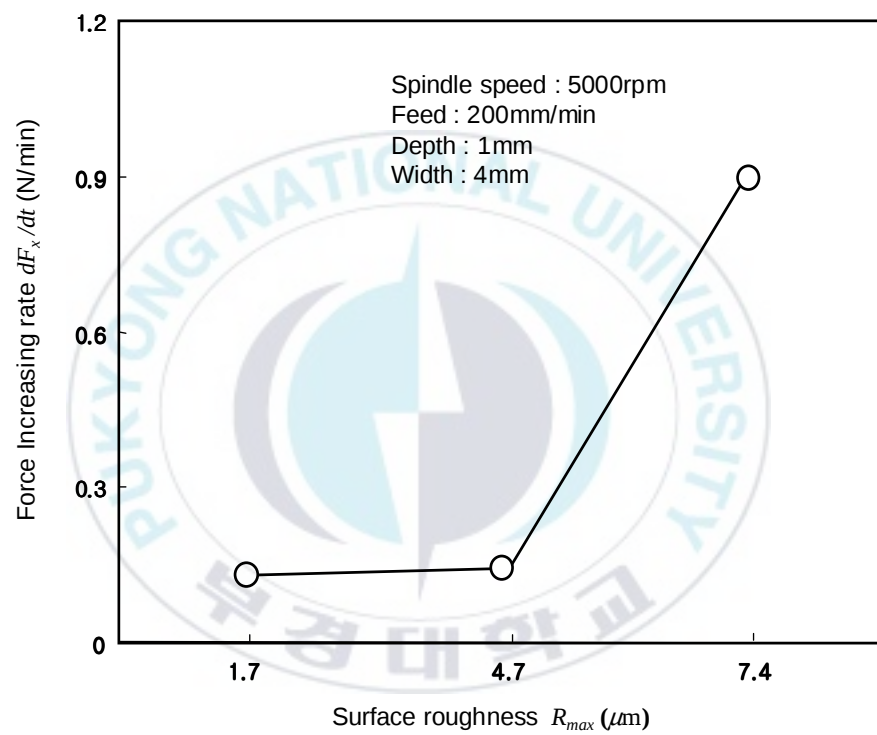


Fig. 3-12 Relationship between R_{max} of land part and force increasing rate

3.6 엔드밀 여유각에 의한 성능평가

엔드밀의 여유각은 그 크기에 따라 절삭성과 공구수명에 직접적으로 영향을 미치므로 엔드밀의 성능을 결정하는 중요한 요소로, 여유각의 크기에 따라 절삭가공시 엔드밀의 인선이 피삭재와 접촉하는 접촉면이 달라지고, 엔드밀마모에 따른 접촉면의 증가로 인하여 엔드밀수명에 큰 영향을 미친다.

본 실험에서는 2날 Ø10 플랫폼 엔드밀의 옆날 1차 여유각을 4, 6, 8, 10°로 변화시켜 절삭작업을 수행하였다.

Fig. 3-13은 엔드밀 1차 여유각을 변화시켜 절삭작업을 수행하였을 때 가공거리에 따른 주분력의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 3-13에서 보는바와 같이 4°에서 8°로 엔드밀 1차 여유각이 커짐에 따라 주분력이 감소함을 알 수 있다. 그러나 10°에서는 8°와 비교하여 주분력이 다소 증가함을 알 수 있다. 이러한 원인은 여유각이 증가할수록 여유면과 피삭재의 마찰면적은 감소하게 되고, 이로 인한 마찰저항의 감소는 절삭저항의 감소로 이어진다. 그러나 여유각이 적정수준보다 더 클 경우 엔드밀 인선부가 취약해짐으로 인하여 치핑에 의한 엔드밀 수명감소를 초래하게 되고 절삭저항도 증가하게 된다.

Fig. 3-14는 가공길이에 따른 주분력 변동폭을 나타낸 그림이다. Fig. 3-13에서와 마찬가지로 4°에서 8°로 엔드밀 1차 여유각이 증가함에 따라 주분력 변동폭이 감소함을 알 수 있고, 그러나 8°에서는 10°와 비교하여 주분력 변동폭이 다소 감소함을 알 수 있다. 이러한 원인은 여유각이 증가함에 따라 피삭재와의 마찰면적이 감소하여 날 부의 댐핑효과의 증가로 인하여 진동이 감소하였기 때문이라 생각되어진다. 그리고 10°의 여유각에서는 날 부의 강성이 떨어지고 이로 인하여 진동이 증가하였기 때문이라 생각되어진다. 본 실험에서는 최적의 엔드밀 여유각이 존재함을 알 수 있었고, 여유각이 8°일 때가 가장 우수하였다.

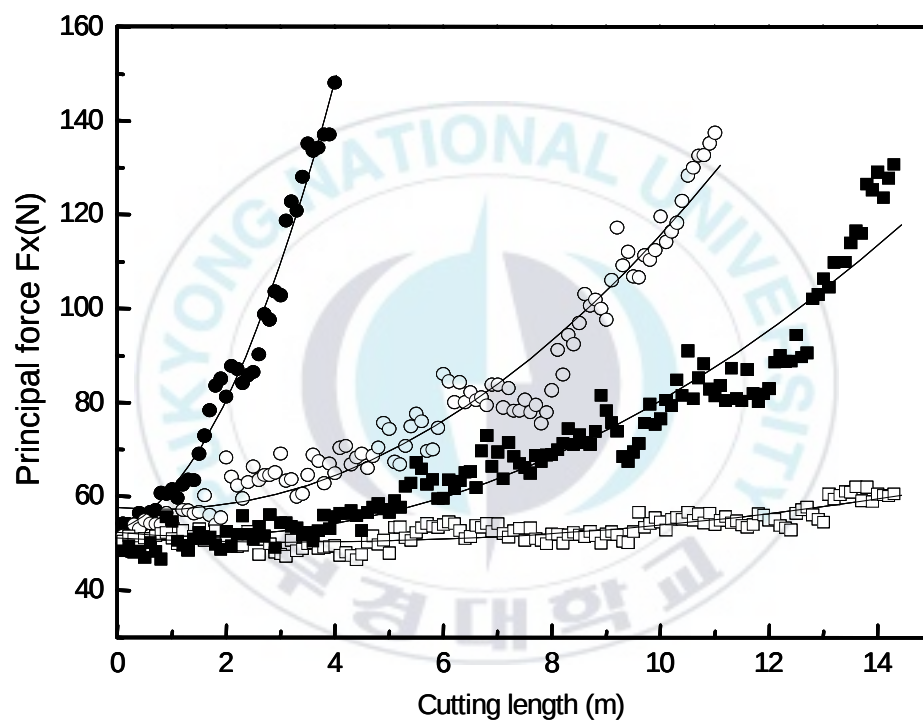


Fig. 3-13 Relationship between clearance angle and principal force

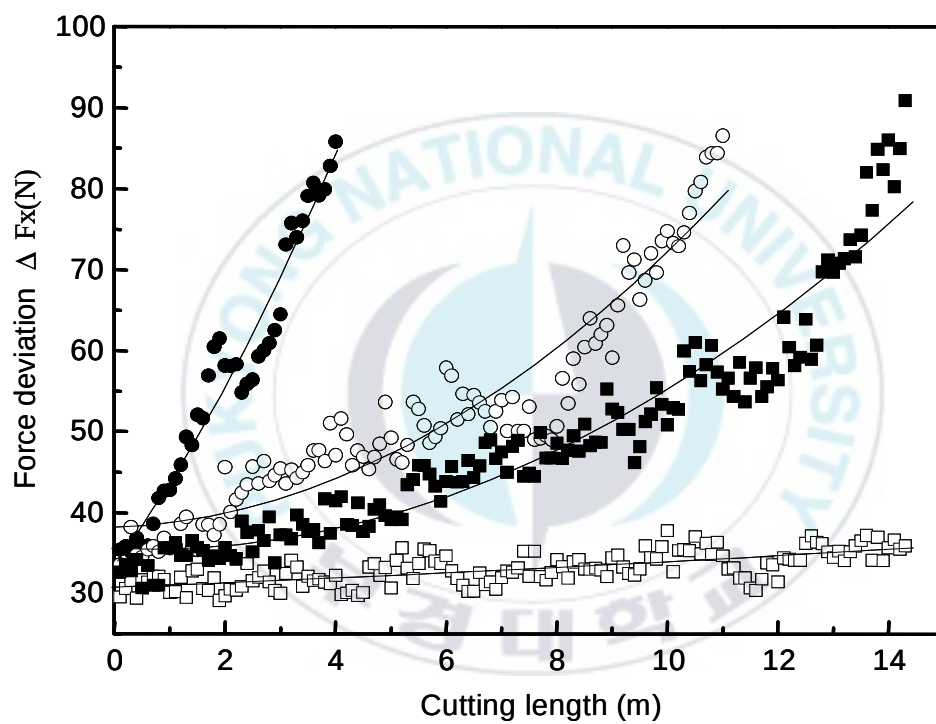


Fig. 3-14 Relationship between clearance angle and force deviation

3.7 결 언

본 장에서는 초 미립 초경합금재로 제작되어진 2날 플랫폼 Ø10 엔드밀로 주축속도 5,000rpm, 이송속도 200mm/min, 절입깊이 1.0mm, 절삭폭 4.0mm로 설정하여 랜드부 표면거칠기(R_{max})를 1.7, 4.7, 7.4 μm 로 1차 여유각을 4, 6, 8, 10°로 변화시켜 금형공구강(STD11)을 절삭하였을 때 발생하는 절삭저항으로부터 주분력과 주분력 변동폭의변화 관점에서 공구의 성능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 절삭시간의 증가에 따라 플랭크마모(V_B)량은 마모가 크게 발생하였으며, 주분력 증가가 랜드부 마모폭을 증가시키는 원인으로 판단되고, 절삭저항의 주분력과 주분력변동폭을 활용한 공구성능평가가 가능함을 알 수 있었다.
2. 랜드부 표면거칠기가 1.7, 4.7 μm 일 경우는 절삭저항과 절삭저항 변동폭의 증가량이 완만하였으나, 7.4 μm 일때는 엔드밀은 절삭저항과 절삭저항의 변동 폭이 급격하게 상승하는 경향을 보였으며, 표면거칠기를 좋게 할수록 공구수명도 증가함을 알 수 있었다.
3. 엔드밀 여유각을 변화시켜 성능을 평가한 결과, 최적의 엔드밀 여유각이 존재함을 알 수 있었고 본 실험의 절삭조건에서는 여유각 8°일 때가 가장 우수하였다.

제4장 고속가공에서 열발생 특성

4.1 실험

4.1.1 실험장치

본 실험에서는 가공 중 발생된 열을 측정하기 위해 실험에 Photo. 4-1과 같은 적외선 열화상 카메라를 사용하였으며, 이 측정 장비의 특징은 절삭 시 발생하는 열을 카메라로 실시간으로 촬영하여 즉시 이미지분석과 저장을 할 수 있으며, 실온에서 사용이 가능하고, 비 접촉으로 절삭 열을 측정할 수 있는 장점이 있다. 또한 온도복사에 민감하고 8~12 μm 까지의 적외선 파장에 반응을 하여 원하는 작동범위에서 측정이 가능하다. 절삭열 측정을 위해 열화상촬영법(thermovision technique)을 택하였는데 이 측정방법의 단점은 공구와 재료와의 접촉면 열을 직접 측정할 수 없다는 것이다. 이번 실험에서는 가공에 필요한 다양한 파라미터의 변화에 따른 열 발생의 경향과 절삭유제의 영향에 따른 열 발생특성과악에 그 초점이 맞추어져 있으므로 이러한 문제는 무시하고자 한다. Photo. 4-1은 적외선 열화상 카메라이며, Table 4-1에는 그 사양을 나타냈다.



Photo. 4-1 Infrared thermal image camera

Table 4-1 Specifications of infrared camera

Item	Value
Detector	120 element linear array of uncooled thermoelectric detectors, 50 μ m square pixel
Measurement temperature	0 to 350 $^{\circ}$ C (custom ranges available within -30 $^{\circ}$ C to 1,200 $^{\circ}$ C)
Accuracy	2 $^{\circ}$ C or 2% of reading
Image scan time	1.5sec
Spectral band	8 μ m to 12 μ m

4.2 실험 조건 및 방법

본 실험에 사용한 공작물은 금형재료로 사용되고 있는 금형강(STD11)을 150mm(L), $\times$ 40mm(W), $\times$ 25mm(H)로 제작하여, 공구는 $\varnothing$ 10으로 TiAlN 코팅된 고능률 솔리드 6날 엔드밀을 사용하였으며, 주축속도, 이송속도, 절삭깊이의 변화와, 상·하향절삭, 절삭유의 사용유무 및 량 등의 파라미터 변화에 대한 열 발생특성을 파악하였으며, 절삭유제의 영향을 파악하기 위하여 건식절삭, 압축공기, 압축공기와 오일미스트를 혼합한 것을 그 량을 다르게 4가지의 경우와 축방향절입량(axial depth of cut, a_p), 반경방향절입량(radial depth of cut, a_e)의 변화 및 절삭속도 등의 가공파라미터에 대하여 실험을 실시하였다. 가공시작 전에 재료와 공구의 절삭열을 파악하기 위하여 적외선사진을 촬영 하였으며, 이를 바탕으로 절삭열의 변화를 파악하였고, 사진촬영은 절삭가공이 끝나는 부위에서의 실시하였다.

측정방법은 적외선 열화상카메라로 IR SnapShot(Infrared Solutions Inc, USA)을 활용하여, 열화상촬영법을 사용하였다. Fig. 4-1은 가공방법 및 적외선 카메라의 촬영방향을 나타내고 있다.

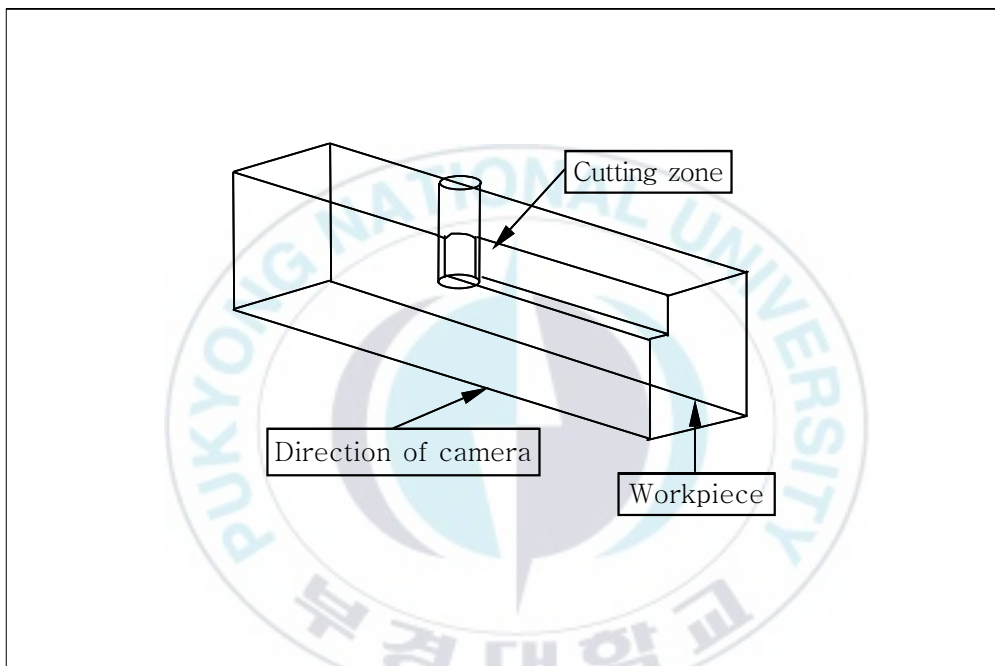


Fig. 4-1 Schematic explanation of cutting process

4.3 실험결과 및 고찰

4.3.1 주축속도에 따른 열발생 특성

Photo. 4-2는 이송속도는 220m/min로 고정하고, 절삭유제는 사용하지 않았으며, 주축속도와 축방향절입량(a_p), 반경방향절입량(a_e)을 변화시켜 절삭열의 변화관계를 나타낸 사진이다.

Photo. 4-2에서 나타난 바와 같이 절삭열 측정에서는 가공직전 절삭열이 Photo. 4-2(a)에서는 18.1℃ 이였으나, 주축속도를 10,000rpm, 축방향절입량을 5mm, 반경방향절입량을 1mm로 하여 절삭시에는 절삭열은 Photo. 4-2(b)에서는 175℃에 이르고 다시 반경방향의 절입량을 2mm로 증가하면 그 절삭열은 26%가 증가하여 Photo. 4-2(c)에서와 같이 222.2℃로 상승하며, 다시 주축속도를 20,000rpm으로 증가시키면 그 절삭열은 Photo. 4-2(d)와 같이 335℃까지 증가하여 102%의 절삭열 증가율을 보인다. 다시 주축속도는 30,000rpm, 축방향절입량을 1mm, 반경방향절입량은 0.5mm로 감소시키면 절삭열은 Photo. 4-2(e)와 같이 139℃까지 감소하는 경향을 보였다. 따라서 Photo. 4-2(c)와 Photo. 4-2(d)에서 절삭열의 상승원인은 절삭폭이 넓어지면 접촉 면적이 증가하기 때문에 나타나는 원인이며, 이는 공구날의 회전당 공작물에 접촉하는 부분이 많아지기 때문에 절삭열이 방출되는 시간이 더 길리고 절삭열은 상대적으로 빨리 상승하게 된다. 또한 주축속도와 절입깊이가 절삭열의 증가에 영향을 주는 것도 무시할 수는 없다. Photo. 4-2는 가공시 촬영된 절삭온도 측정사진이다.

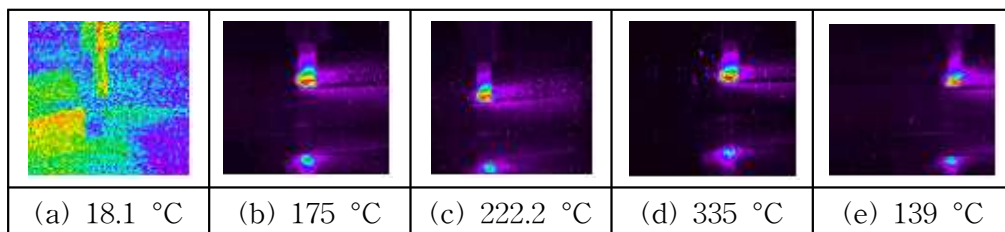


Photo. 4-2 Picture of temperature

Fig. 4-2는 이송속도 220m/min, 주축속도를 10,000~40,00rpm으로 축방향 절입량(a_p)을 0.5mm, 반경방향절입량(a_e)은 0.2mm로 하고 절삭유제를 사용하여 하향절삭시 회전수변화에 따른 절삭열의 변화관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와 같이 절삭열의 경향은 Photo. 4-2에서의 절삭조건에서 보다는 전체적으로 낮은 온도분포가 나타났는데 이는 축방향절입량(a_p)의 감소와 절삭유제의 사용에 따른 영향으로 판단되며, Fig. 4-2에서는 절삭속도가 증가하면 절삭열은 증가하는 경향을 나타내다가 주축속도 20,000~30,000rpm 사이에서 감소하는 경향을 보이다가 주축속도 30,000rpm에서 다시 증가하는 경향을 보였으나, 주축속도 20,000~30,000rpm 사이에서는 절삭열이 안정된 경향을 나타내고 있는데 이는 이때의 절삭열이 융점에 가까운 온도가 유지되는 것으로 보여지며, 주축회전수 40,000rpm에서 절삭열이 상승하는 경향이 나타나는데 이는 고속으로 가공할 때 발생하는 열이 미처 분산되지 못하고 재료가 연화된 상태에서 다음 절삭이 진행되어 나타나는 현상으로 판단된다.

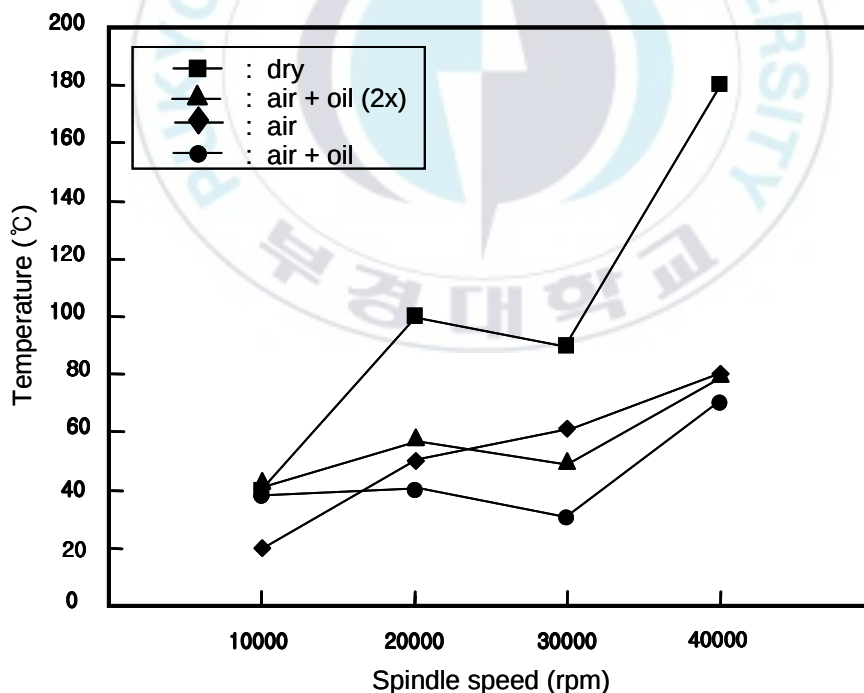
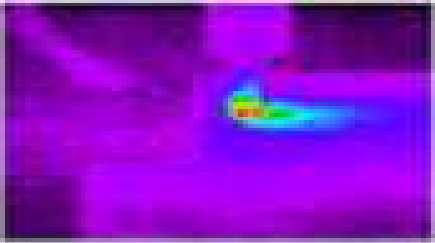
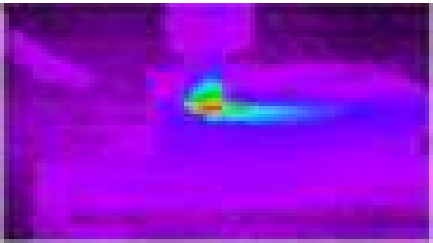
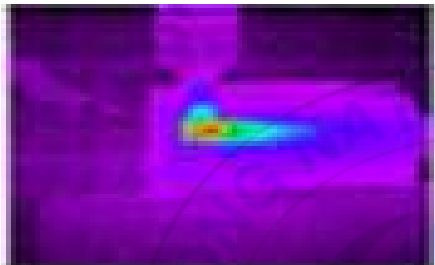
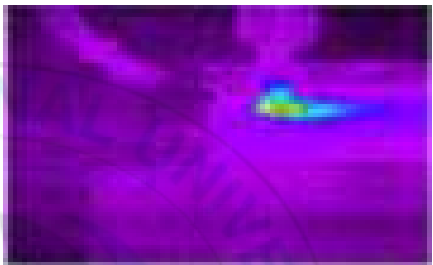
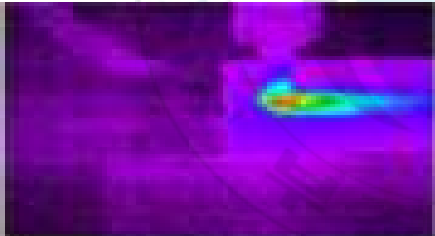
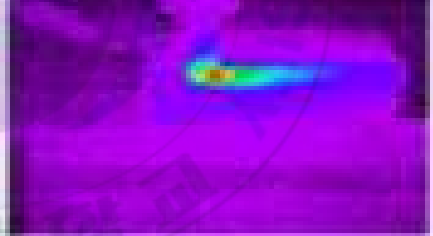
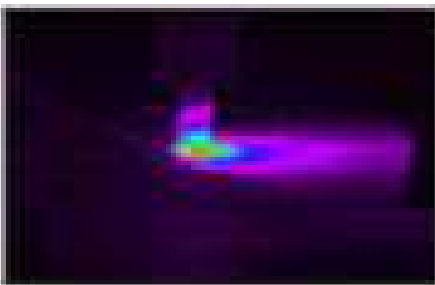
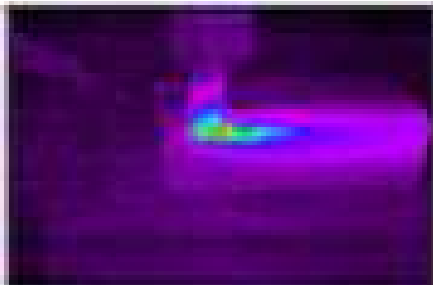
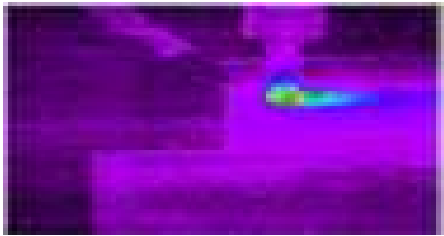
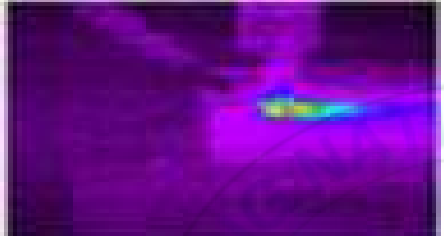
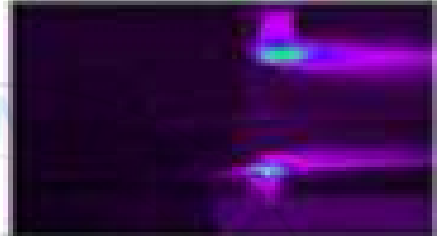
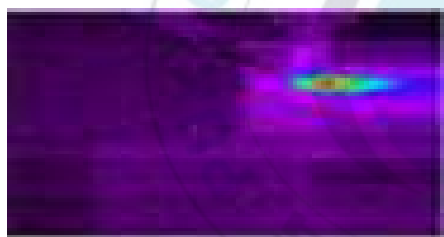
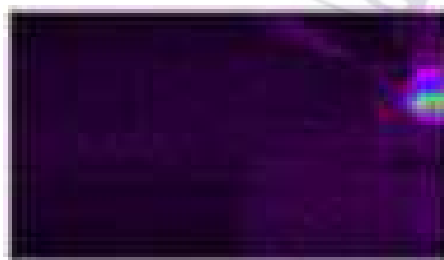
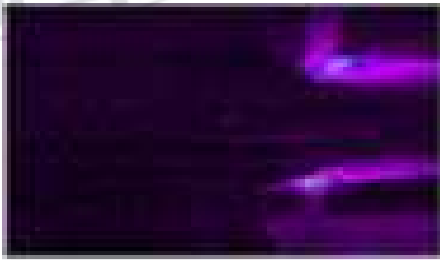


Fig. 4-2 Cutting temperature characteristics by speed of revolutions

Photo. 4-3은 절삭가공시 촬영된 절삭열 측정사진이다. 절삭열 측정 사진에서는 절삭유제를 사용하지 않고 건식(dry)으로 절삭하였을 경우는 적외선 파장(spectral band)이 길고, 절삭유제를 사용할 수 록 적외선파장은 짧게 나타났으며, 주축속도증가에 따른 경우는 적외선파장은 큰 변화는 없었으며, 촬영된 절삭열 측정사진에서도 절삭열 발생경향에 대하여 관찰 할 수 있었다.



dry	air
	
10,000 rpm	10,000 rpm
	
20,000 rpm	20,000 rpm
	
30,000 rpm	30,000 rpm
	
40,000 rpm	40,000 rpm

air + oil	air + oil (2x)
	
10,000 rpm	10,000 rpm
	
30,000 rpm	30,000 rpm
	
30,000 rpm	30,000 rpm
	
40,000 rpm	40,000 rpm

feed : 220m/min, $a_p : 0.5mm$, $a_e : 0.2mm$

Photo. 4-3 Examples of infrared picture

4.3.2 이송속도에 따른 열발생 특성

Fig. 4-3은 축방향절입량(a_p)을 0.5mm, 반경방향절입량(a_e)을 0.2mm, 이송속도를 380과 1,180mm/min으로 하향절삭시 이송속도(feed rate)의 변화에 따른 절삭열의 변화를 나타낸 그림이다. 이송속도가 3배 증가하면 열발생은 전체 절삭속도에 대해 약 1.75배 감소하는 경향을 보였다. 본 실험에서는 절삭속도가 작을수록 이송량에 대한 절삭열의 차이는 크게 나타났으며 절삭속도가 증가하면 절삭열의 차이는 작아지는 경향을 보였다. 실험재료가 절삭조건에 미치는 영향이 줄어들었음을 확인할 수 있으며, 즉 실험에 사용한 재료에 대해서는 이송속도를 고려한 실험에서 어느 정도의 이송속도와 스피indle 회전수가 가공에 미치는 영향이 줄어들었다는 것을 확인할 수 있다. 본 실험에서 이송속도에 따른 열발생 특성에서 나타난 결과로 본다면 난삭재를 가공을 할 때 시간 및 비용을 줄이기 위해 고속가공을 하는 것이 가능하다고 판단된다.

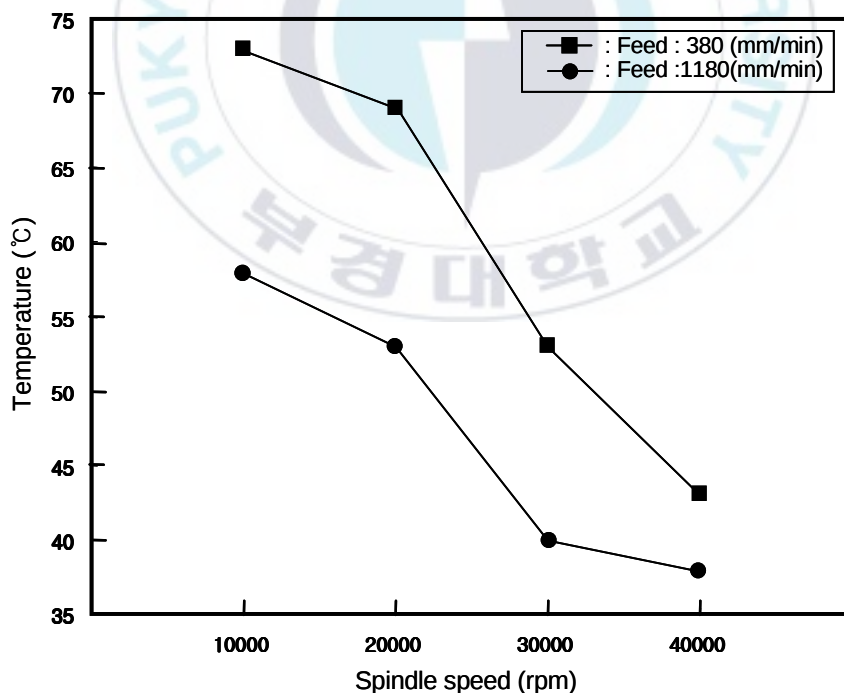


Fig. 4-3 Cutting temperature by cutting feeds

4.3.3 절삭깊이에 따른 열발생 특성

Fig. 4-4는 이송속도 380mm/min, 반경방향절입량(a_e)을 1.0mm로 고정하고, 하향절삭시 축방향 절삭깊이의 변화에 따른 절삭열의 변화를 나타낸 그림이다. 절삭깊이가 2배 증가하면 온도의 증가차이는 전체 절삭속도에 대하여 약 1.6배 증가하여 이송량의 변화에 따른 절삭열의 차이와 같은 경향을 나타내었다. 이는 축방향절입량이 절삭폭 보다 작아 접촉면적이 작아지므로 절삭온도가 낮아지는 것으로 판단되고, 절삭깊이가 작은 경우는 피삭재에 소성변형이 일어나기 때문이며, 또한 공구의 열전도율이 좋아 피삭재의 열적영향을 적게 받은 것으로 사료된다.

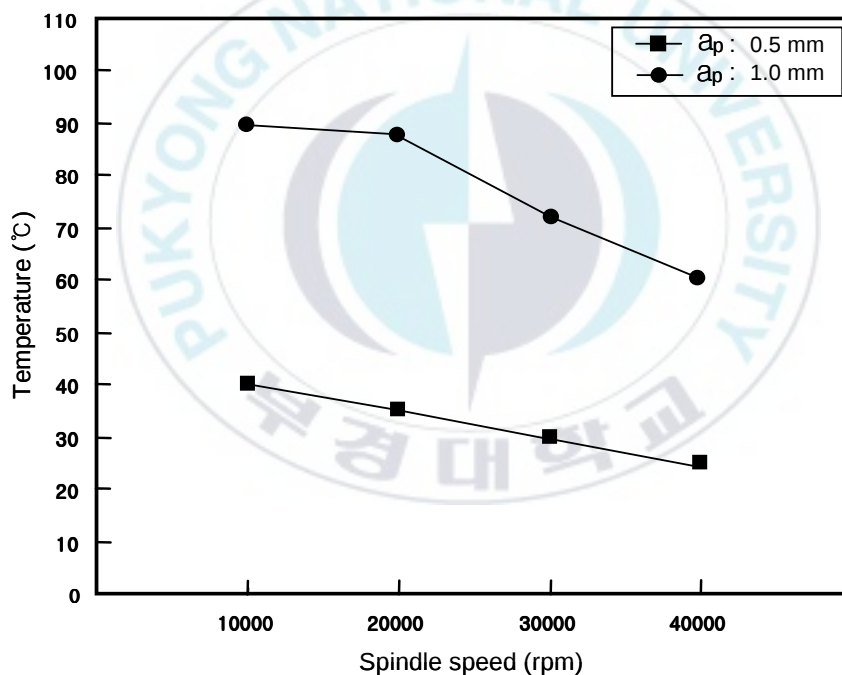


Fig. 4-4 Cutting temperature by cutting depths

4.3.4 상 · 하향 절삭에 따른 열발생 특성

Fig. 4-5는 축방향절입량(a_p)을 0.5mm, 반경방향절입량(a_e)을 1.0mm, 이송 속도 380mm/min으로 하여 상 · 하향절삭에 따른 절삭열의 변화를 나타낸 그림이다. 하향절삭에서는 절삭속도가 증가할수록 절삭열은 감소하는 경향을 보였으나, 상향절삭에서는 절삭속도의 증가에 따라 절삭열이 증가하는 경향을 보였다.

이것은 고속가공의 그 특성상 큰 칩은 발생하지는 않으나 상향절삭에서는 절삭시 칩(chip)배출이 원활하지 않아 피삭재와 공구간의 마찰 열 때문으로 판단된다. 일반적으로 절삭열의 70~80%는 칩에 의해 배출되는데 칩 배출이 절삭 열에 커다란 영향을 미친다고, 판단되고, 이러한 경향을 관찰하기 위해서는 더 넓은 범위의 절삭속도에서 실험을 해야 하며 실제 절삭발열이 발생하는 공구, 재료접촉부에서의 온도를 측정할 수 있는 방법이 강구되어져야 한다.

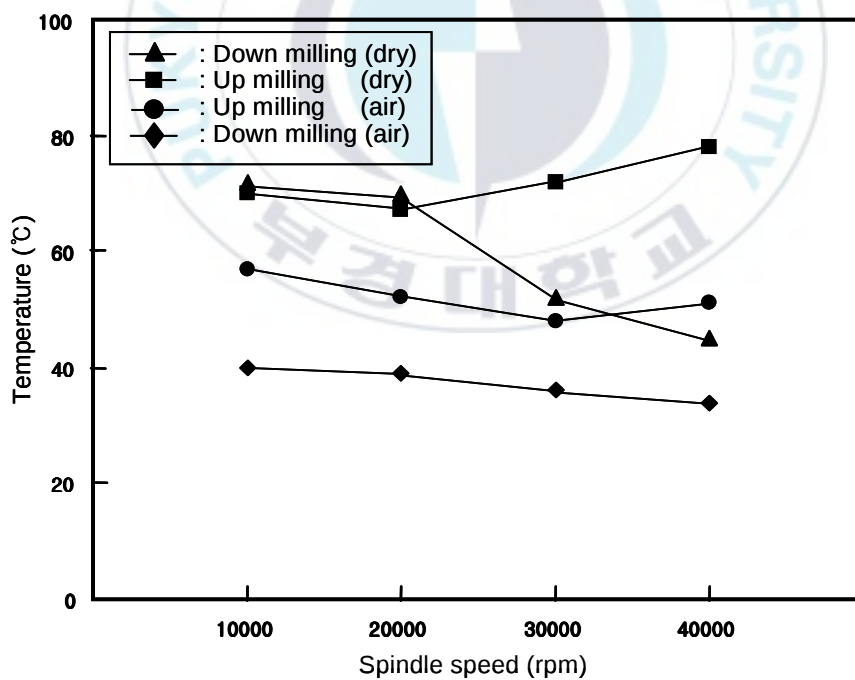


Fig. 4-5 Cutting temperature characteristics by cutting directions

4.3.5 절삭유제에 따른 열발생 특성

Fig. 4-6은 축방향절입량(a_p) 0.5mm, 반경방향절입량(a_e)을 1.0mm, 이송속도를 380mm/min로 상향절삭시 절삭유제에 따른 절삭열의 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 4-6에서 알 수 있듯이 절삭유제의 영향은 압축공기와 오일 미스트를 혼합할 경우 제일 좋은 냉각성능을 보였으며, 압축공기 그리고 건식절삭일 경우의 순서로 좋은 냉각성능을 보였다. 압축공기와 오일미스트를 사용할 경우 절삭조건에 따라 다르겠지만 어느 정도 사용량이 되면 사용량에 따른 냉각작용에서의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. Fig. 4-7은 위와 같은 절삭조건으로 하향절삭에서는 온도가 크게 감소하는 경향을 나타냈다.

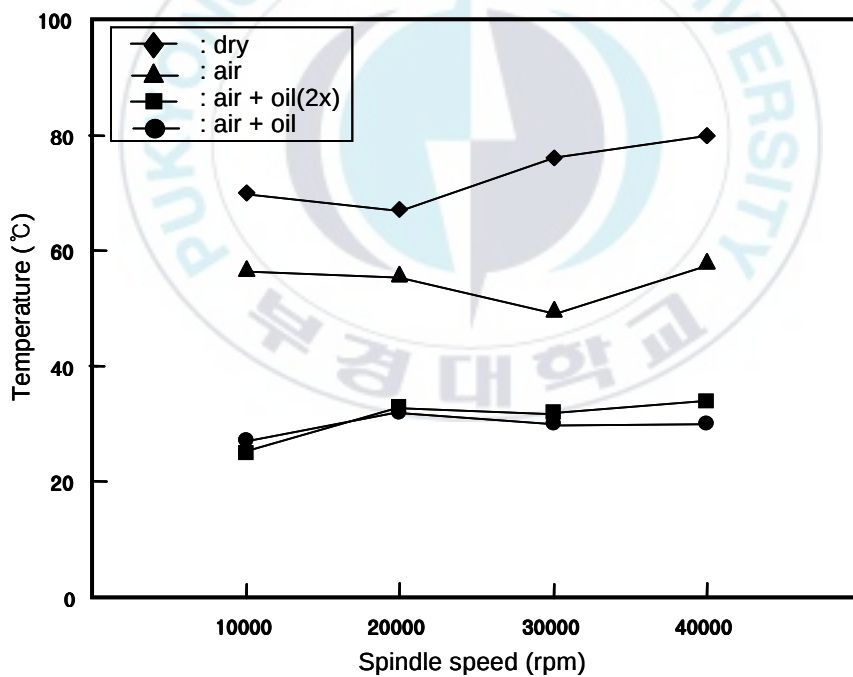


Fig. 4-6 Cutting temperature characteristics by cutting oils

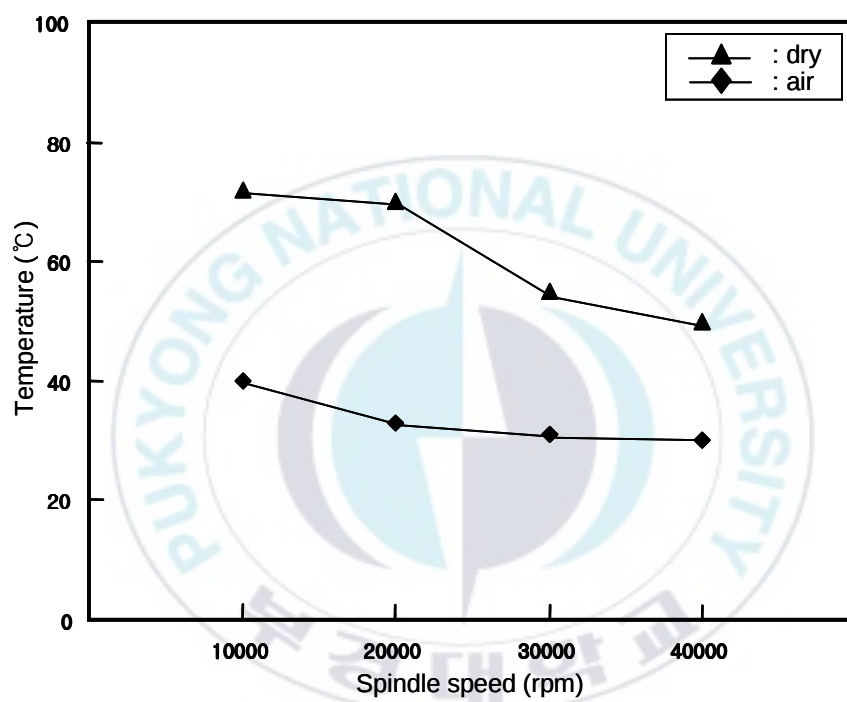


Fig. 4-7 Cutting temperature characteristics by cutting oils

4.4 결 언

본 장에서는 고속가공에서 발생하는 열을 측정하기 위하여 적외선 열화상 카메라로, Ø10 TiAlN 코팅된 고능률 솔리드 6날 엔드밀을 사용하여, 주축 속도, 이송속도, 절삭깊이의 변화와 상·하향절삭, 절삭유의 사용유무 및 사용량과 축방향절입량(a_p), 반경방향절입량(a_e)의 변화 등의 가공파라미터에 대한 열발생 특성실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 주축속도 20,000~30,000rpm 사이에서 절삭열이 안정된 경향을 보였으며 rpm에서 절삭열이 상승하는 경향은 절삭열이 미처 분산되지 못하고 재료 연화된 상태에서 다음 절삭이 진행되어 나타나는 현상이 원인임을 알 수 있었다.
2. 이송속도와 절삭깊이의 변화에 따른 열발생은 주축속도가 빠를수록 열발생은 이송속도 변화에서는 1.75배, 절삭깊이 변화에서는 약1.6배 감소하는 경향을 보였으며, 이는 피삭재에 소성변형과 공구의 열전도율이 좋아 열적영향을 적게 받음 알 수 있었다.
3. 하향절삭에서는 절삭열이 안정적이었으며, 상향절삭일 경우는 절삭열이 계속 증가하는 경향으로 나타났으며, 이것은 절삭저항과 칩 배출이 원활하지 않음을 알 수 있었다.
4. 절삭유제의 영향은 압축공기와 오일미스트와의 혼합할 경우 제일 좋은 냉각 성능을 보였으며, 압축공기 및 건식 절삭 순으로 좋은 냉각성능을 보임을 알 수 있었다.

제 5 장 고속연삭용 스톤 개발 및 가공특성 평가

5.1 고속연삭 스톤 개발

고속가공은 금형제작에 있어서 고속절삭이 크게 각광을 받고 있으며 그 이유는 표면거칠기, 표면품질, 형상정밀도를 향상시켜 수작업에 의한 2차공정인 그라인딩(grinding)이나 폴리싱(polishing) 등의 수작업공정을 생략하거나 작업시간을 줄여서 납기를 단축 할 수 있기 때문이다.

금형가공 시 수작업에 의한 마무리 공정은 기술자의 숙련도에 절대적으로 의지하고 작업시간 또한 전체가공시간의 많은 부분을 차지하고 있다. 더구나 수작업은 핸드그라인딩(hand-grinding)에 의존하므로 에러발생 요인을 내재하고 있고, 심하면 금형시험단계에서 금형을 파손 시켜 재가공으로 인한 손실을 입을 수도 있다. 이러한 수작업에 의한 2차공정 작업을 해결하기 위해서는 공작기계에서 수행되는 대표적인 가공방법들인 절삭과 연삭은 앞으로 계속해서 가공방법의 주류가 될 것으로 판단되며, 소량생산방식에서 생산성을 극대화시키기 위해서는 다양한 제품의 가공특성에 대응하는 여러 가지 가공방법들이 선택 및 조합되어야 한다.

본 실험에서는 하나의 공작기계에서 이러한 요구들을 만족시키기 위해서는 고속가공기에서 연삭, 즉 고속절삭과 고속연삭의 복합화에 대한 연구를 하기위하여, Fig. 5-3과 같이 텅스텐 카바이드생크에 CBN(#800)입자를 니켈 본드로 단일층(one layer)으로 전착(electroplating)하여 고속연삭에서 사용이 가능한 연삭스톤을 개발 하였다.

5.1.1 탄소공구강 생크에 CBN 입자 전착

Fig. 5-1은 직경 6mm에 전착 될 부위의 직경을 4mm로 줄어드는 형상을 취하여 공구의 강성을 높인 탄소공구강으로 제작된 생크에 CBN입자를 전착시킨 슷돌의 도면과 사진을 나타낸 것이다. 탄소공구강 생크로 제작하였을 경우 척에 삽입은 가능하였으나 탈거하기 위해 열을 가했을 경우 생크의 직경도 함께 늘어나는 현상이 발생하여 탈거가 힘들었으며, 생크의 일부가 마모, 탈락하여 척에 부착되는 현상이 발생하였다. 이는 척의 정도를 떨어뜨리고 척을 사용할 수 없는 결과를 초래하였으며, 열간 압입 척에 사용이 부적절하였다.

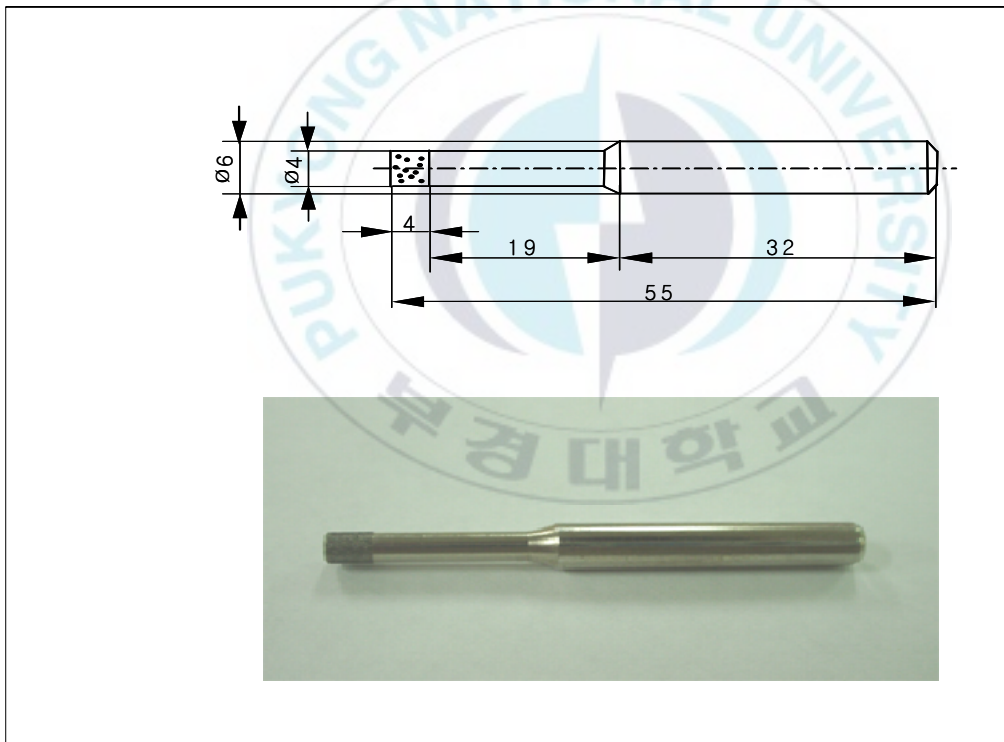


Fig. 5-1 Electro-plated CBN grinding wheel with cast alloy tool steel shank

5.1.2 초경 생크에 CBN입자 소결

Fig. 5-2는 초경생크를 직경 4mm, 길이 50mm가 되도록 제작하여 여기에 CBN입자를 소결한 숫돌의 도면과 사진이다. 생크는 초경소재를 이용하여 강성은 높일 수 있었으나 소결한부분과 결합부위에 증공이 발생하고 정확하게 진원의 형상으로 제작하기 어려운 단점을 동반하여 사용이 부적절하였다.

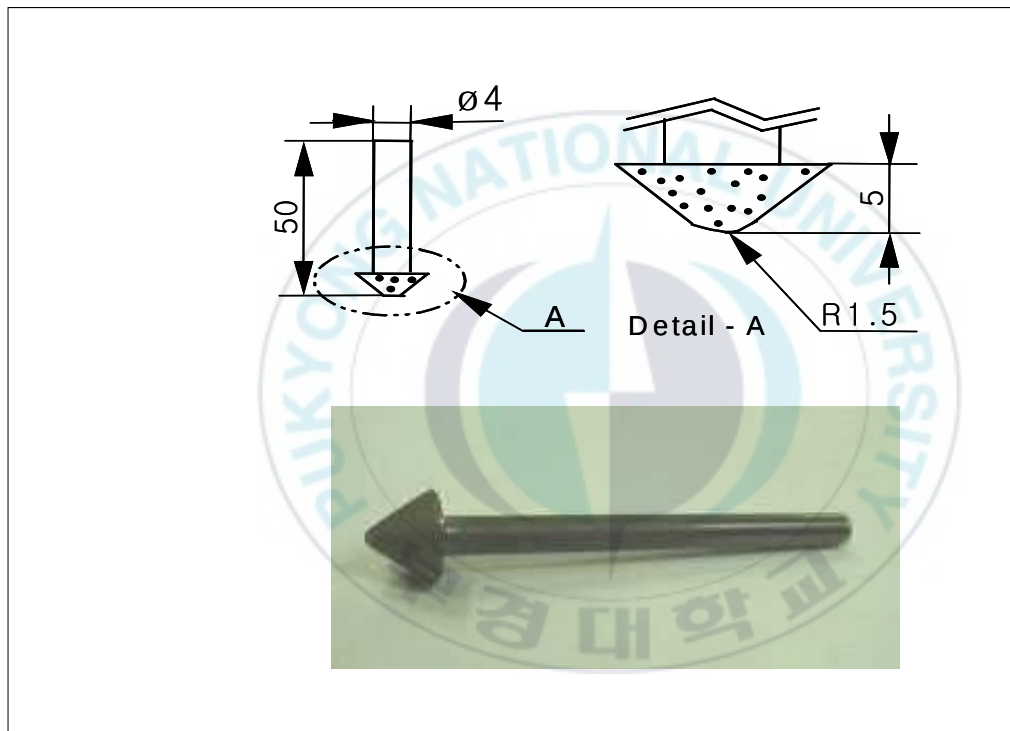


Fig. 5-2 Sintered CBN grinding wheel with sintered carbide shank

5.1.3 텅스텐 카바이드샙크에 CBN 입자 전착

Fig. 5-3은 본 실험에 최종적으로 사용한 슷돌로서 직경 3mm 텅스텐 카바이드샙크에 CBN입자를 니켈본드로 단일층으로 전착하여, CBN입자가 전착될 부위의 직경을 2.8mm로 가공하여 실제 전착될 두께를 감안한 공구이며 직접 설계한 도면을 토대로 제작하였다. 탄소공구강샙크로 제작 시 척에서 탈거의 어려움과 슷돌 자체강성을 해결하였으며, 소결한 슷돌의 단점이었던 정도를 완벽하게 보완한 슷돌이다. 또한 전착스�돌은 다른 종류의 본드를 사용했을 때보다 모양 유지성이 가장 우수하며 가장 높은 속도에서 사용이 가능하다.

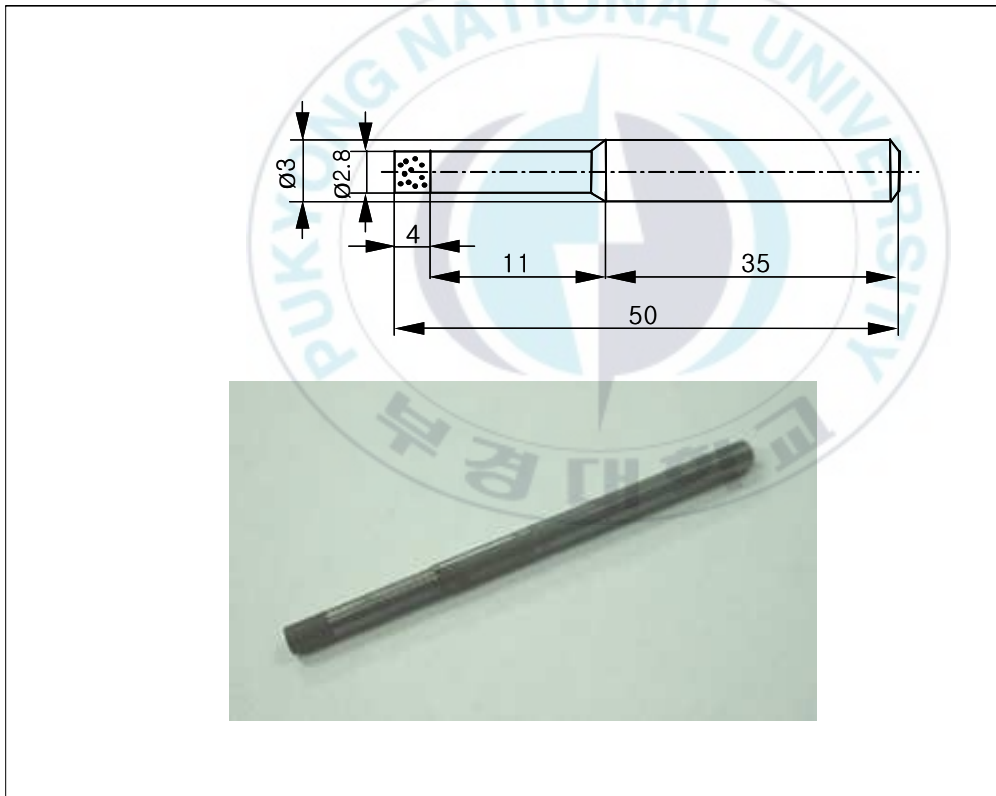


Fig. 5-3 Electroplated CBN grinding wheel with sintered carbide shank

5.1.4 공작물

본 실험에 사용한 공작물은 금형재료로 사용되고 있는 금형강(STD11)을 길이(L) 150mm, 폭(W) 40mm, 높이(H) 15mm로 제작하였으며, 시편 윗면에 길이 40mm, 폭 10mm, 깊이 2mm, 가공할 면간거리 18mm 요철을 만들어 하나의 시편으로 6회의 실험을 수행할 수 있도록 하였다. 시편 재료의 화학적 조성성분비는 Table 5-1과 같다. Fig. 5-4는 본 실험에 사용된 공작물의 치수와 형상을 각각 나타낸 것이다.

Table 5-1 Chemical composition(*wt, %*) of workpiece

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
1.55	0.35	0.4	0.025	0.025	0.25	12	0.91	0.35	0.25

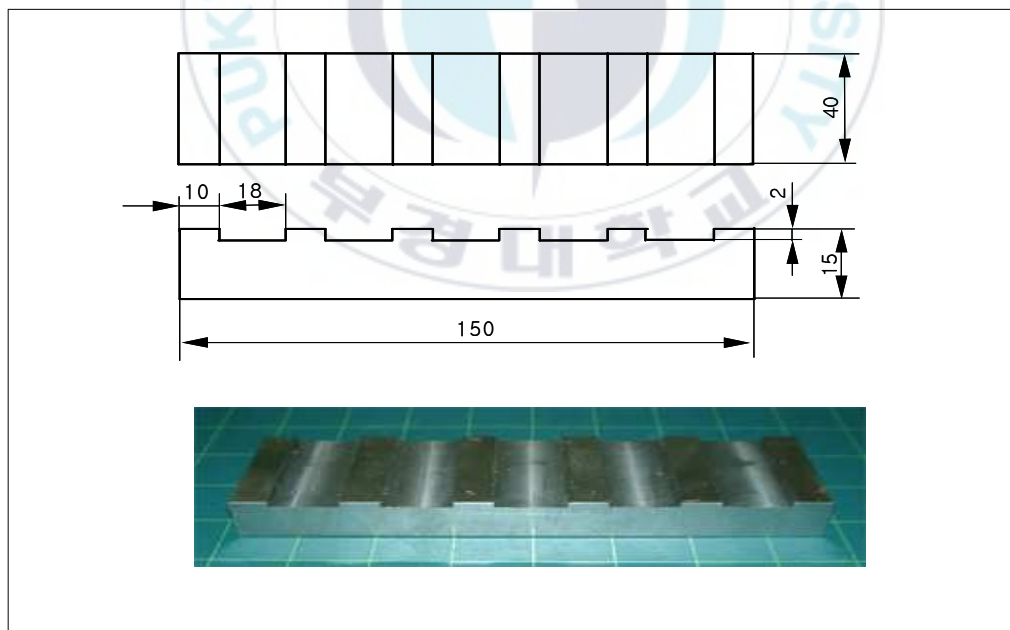


Fig. 5-4 Experimental specimen

5.2 실험장치 및 방법

5.2.1 실험장치

본 실험에 사용된 고속가공기(RFM-760 Roeders, Germany)는 직접 구동식(built in spindle) 주축과 고강성 포탈형 구조로 되어 있으며, 연삭숫돌은 텅스텐 카바이드생크에 CBN입자를 니켈본드로 전착시킨 CBN전착 핀(pin)형 단일층 연삭숫돌을 사용하였다. Photo. 5-1은 고속연삭을 수행하는 사진이다.

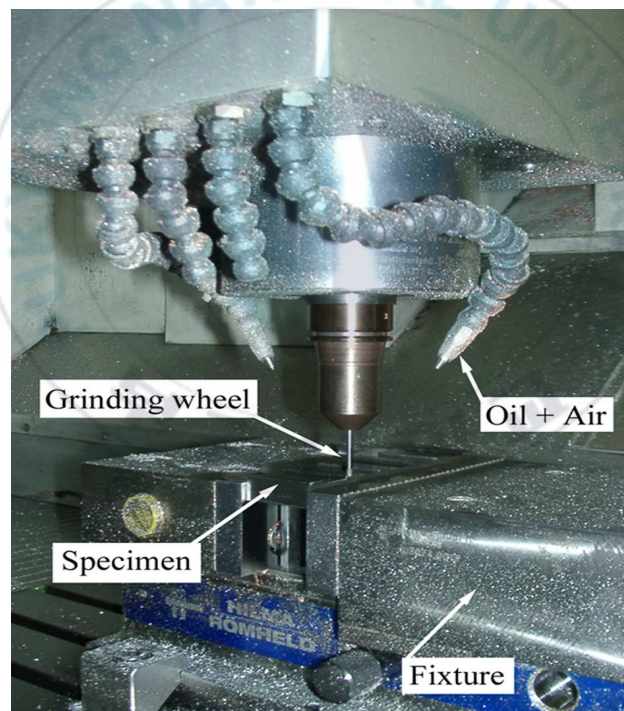


Photo. 5-1 Schematic of diagram for high speed grinding

Photo. 5-2는 축침식 표면거칠기 측정기(SURFTEST SV-2000N2 Mitutoyo, Japan)의 사진이며, PC와 연결되어 측정한 데이터를 PC에서 PC로 바로 전송할 수 있는 장점이 있다. Photo. 5-3은 3차원측정기(OMS-600 Mahr, Germany)의 사진이며, 측정범위는 $570 \times 600 \times 320$ (가로×세로×높이)mm이다. 접촉식과 비접촉식 모두 사용가능하며 광학식 센서와 레이저 프로브 및 터치 프로브에 의해 측정된다. 본 실험에 적용한 방식은 레이저 프로브로서 측정하였다. Photo. 5-4는 잔류응력측정을 하기위해 사용한 X선 회절장치(STRAINFLEX MSF-2M Rigaku, Japan)의 사진이며, 고니오미터(goniometer), X선발생기, 정보처리 제어장치, 그리고 열교환기로 구성된다. Table 5-2는 측정 장비사양이다.



Photo. 5-2 Surface roughness tester

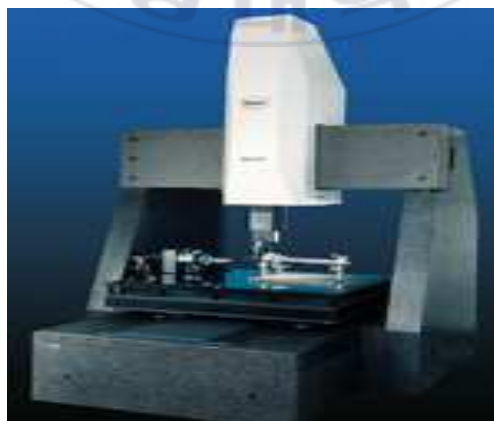


Photo. 5-3 3D coordinate measuring device

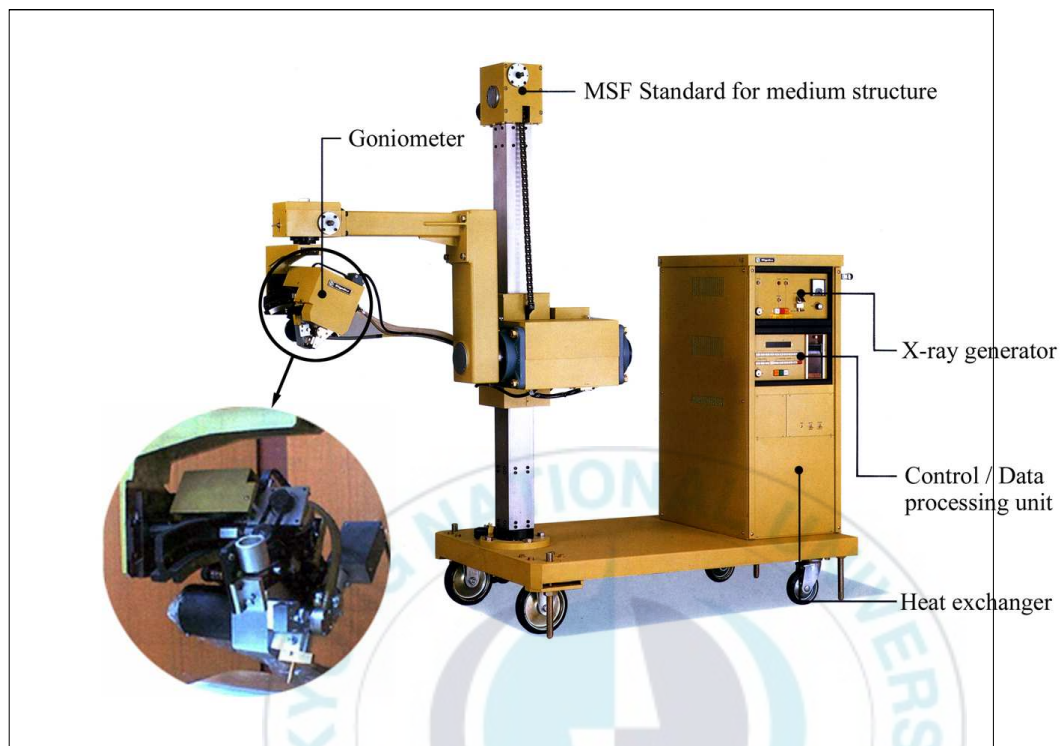


Photo. 5-4 X-ray diffractometer

Table 5-2 Experimental equipments

Instrument	Model
Roughness tester	SURFTTEST SV-2000N2 (Mitutoyo, Japan)
3D coordinate measuring device	OMS-600 (Mahr, Germany)
X-ray diffractometer	STRAINFLEX MSF-2M (Rigaku, Japan)
Optical microscope	TEM-TS (Dongwon, Korea)
SEM	S-2400 (Hitach, Japan)

5.2.2 실험방법 및 조건

본 실험에서는 개발한 고속연삭숫돌을 사용하여 금형강의 고속연삭특성을 알아보기 위해 이송속도를 1,000mm/min으로 고정하고 주축속도는 20,000, 30,000, 40,000rpm의 3단계로 하고, 절입깊이를 1, 2, 5, 10 μ m의 4단계로 변화시키면서 Fig. 5-5와 같이 지그재그(gig-zag)방법으로 고속연삭 및 고속절삭실험을 실시하였다. 공작물의 표면거칠기(R_a , R_{max} , R_z)는 공작물의 가공방향으로 측정하였고, 시편의 각 면마다 11회 측정하여 R_a 값을 기준으로 최고치와 최저치를 각각 두개씩 제외하고 나머지 일곱 개의 조건변화에 따른 실험에서 얻어진 표면거칠기를 축침식 표면거칠기(SURFTEST SV-2000N2 Mitutoyo, Japan)를 사용 R_a , R_{max} , R_z 의 값을 측정하였으며, 3차원 프로파일(profile)형상 측정은 3차원측정기(OMS-600 Mahr, Germany)로 Fig. 5-6과 같은 방법으로 X방향으로 1mm단위로 측정하였으며, Y방향으로 진행시켜 Z방향의 값을 읽어 3차원 공간상에 그 프로파일(profile)형상을 관찰하였고, 그리고 잔류응력의 측정을 하기위하여 X선 회절법을 활용 잔류응력측정기로 X선 입사각을 0, 15, 30, 45°의 4점 입사시켜 잔류응력측정을 실시하였으며, 가공 후 시편의 가공표면을 금속현미경(TEM-TS Dongwon, Korea)으로 촬영 관찰하였고, 연삭숫돌의 측면(side surface)과, 밑면(bottom surface)을 주사전자현미경(S-2400 Hitach, Japan)으로 숫돌변화상태를 관찰하였다. Table 5-3은 본 실험에 사용된 실험조건을 나타낸 것이다.

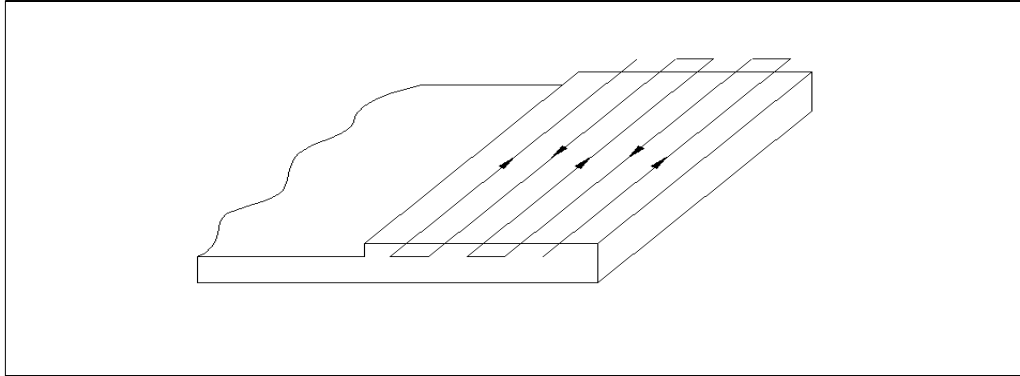


Fig. 5-5 Tool path

Table 5-3 Experimental conditions

Item	Conditions
Spindle speed(rpm)	20,000, 30,000, 40,000
Feed-rate(mm/min)	1,000
Depth of cut(μm)	1, 2, 5, 10
Coolant	Oil + Air (mist)

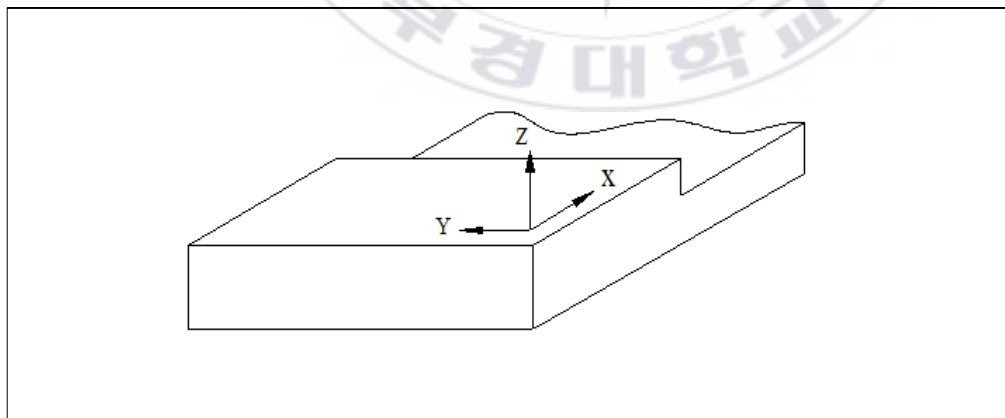


Fig. 5-6 Coordinate direction on specimen

5.3 실험결과 및 고찰

5.3.1 표면거칠기 변화

Fig. 5-7과 Fig. 5-8은 개발된 고속연삭숫돌로 고속연삭과 고속절삭으로 가공한 시편을 절입깊이의 변화에 따른 표면거칠기 변화를 살펴보기 위해 주축속도는 30,000rpm, 이송속도를 1,000mm/min으로 고정하고 절입깊이를 1, 2, 5, 10 μ m의 4단계 변화시켰을 때의 R_a , R_{max} , R_z 의 값을 각각 나타낸 것이다.

Fig. 5-7에서 고속연삭가공의 경우 절입깊이의 변화에 따른 R_a 의 변화는 거의 일정하며 R_{max} 와 R_z 는 절입깊이가 2 μ m이상에서 조금 상승하여 5 μ m까지 유지되나 5 μ m부터는 다시 감소하기 시작하였다. 절입깊이 2 μ m,와 5 μ m 경우에 조금 크게 나타났으나 초기 표면거칠기 영향에 의한 것으로 생각되어진다. 따라서 절입깊이에 따른 영향은 없는 것으로 사료되며, 숫돌의 마모와 연삭시간을 고려하여 작업조건을 선정하여야 할 것으로 생각된다.

Fig. 5-8의 고속절삭에서는 고속연삭과 비교하여 대체로 양호하지 못한 표면거칠기 값으로 나타났다. 절입깊이에 따른 R_a 변화는 거의 일정했으며, R_{max} 와 R_z 는 절입깊이가 2 μ m에서 급격하게 상승한 후 10 μ m까지 서서히 감소하는 경향이 나타났다.

Fig. 5-9는 고속연삭에서 주축회전수에 따른 표면거칠기변화를 살펴보기 위해 절입깊이는 1 μ m로 고정하고, 최종가공깊이는 10 μ m가 되도록 하여 이송속도를 1,000m/min으로 고정했을 때의 R_a , R_{max} , R_z 값을 나타낸 결과이다. 전체적으로 주축속도 30,000rpm부근에서 양호한 표면거칠기값을 보여주며 상대적으로 20,000, 40,000rpm에서는 높게 나타났다.

특히 R_{max} , R_z 는 30,000rpm에 비해서 표면거칠기가 급격히 상승함을 알 수 있었다. 일반적인 연삭에서는 절삭속도가 증가할수록 입자 당 가공면적이 적어지고 표면거칠기가 향상되는 것이 정상이지만, 일정속도 이상의 고속에서는 모든 입자가 효율적으로 가공에 참여할 수 없고 연삭입자와 공작물의 슬립현상^[44]

으로 인해 표면거칠기가 저하됨으로 본 실험에서는 절입깊이 $1\mu\text{m}$, 이송속도 $1,000\text{m/min}$ 의 가공조건으로 연삭할 때의 최적 주축속도는 $30,000\text{rpm}$ 부근임을 알 수 있었다.

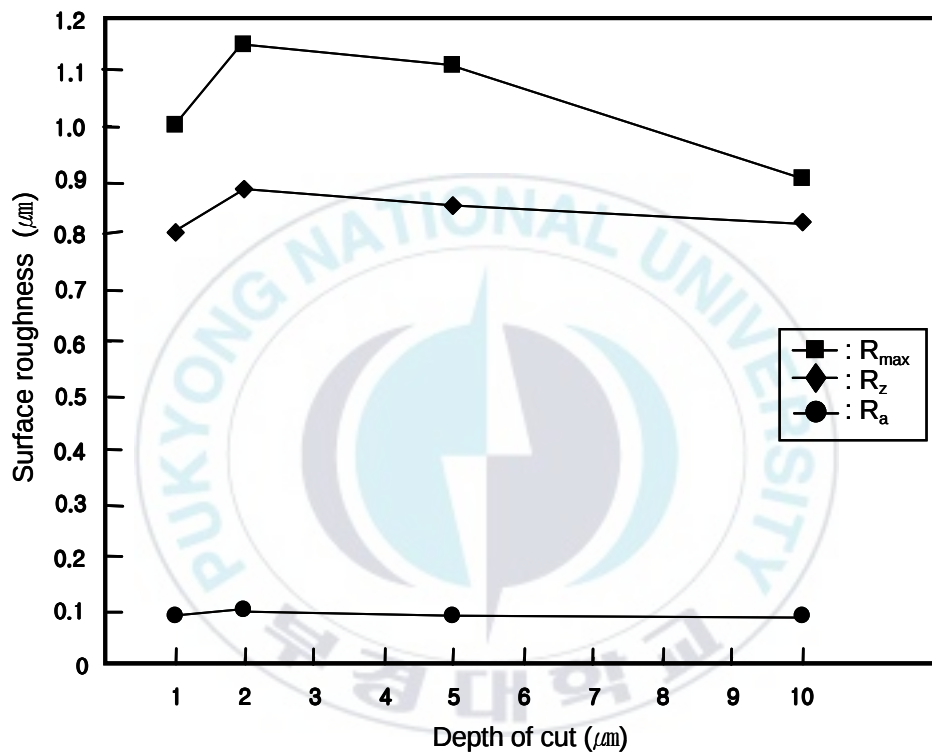


Fig. 5-7 Variation of surface roughness according to depth of cut in high speed grinding

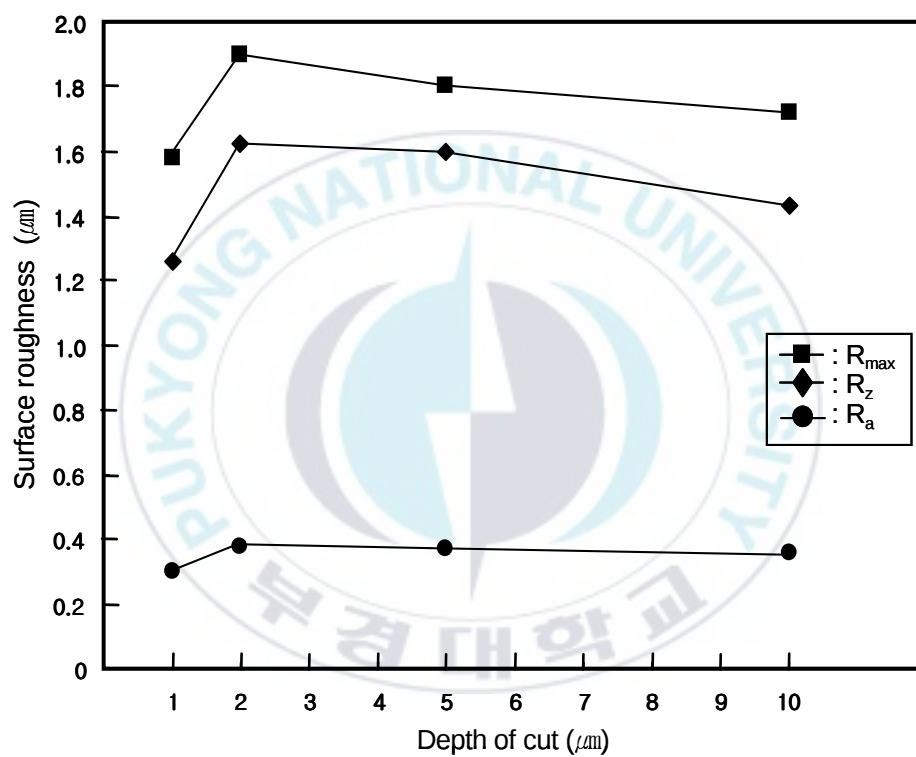


Fig. 5-8 Variation of surface roughness according to depth of cut in high speed cutting

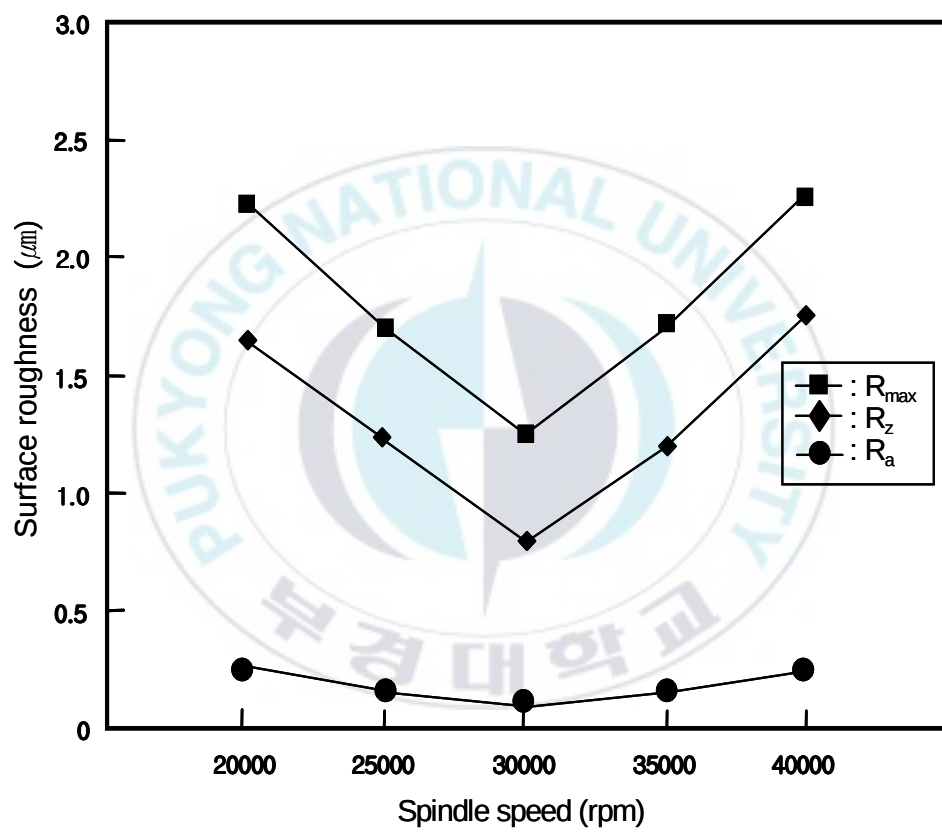


Fig. 5-9 Variation of surface roughness according to spindle speed in high speed grinding

5.3.2 3차원 측정 결과

본 실험에서는 3차원 측정기(OMS-600 Mahr, Germany)로 가공된 시편의 좌표값을 X방향으로 1mm단위로 측정하였으며, Y방향으로 진행시켜 Z방향의 값을 읽어 3차원 공간상에 그 프로파일(profile)을 구현한 결과, Fig. 5-10은 이송속도는 2,000mm/min, 주축속도는 30,000rpm, 절입깊이는 10 μ m로 1회 고속절삭으로 가공한 시편의 3차원측정 좌표값을 그래프로 나타낸 것이며, 고속절삭에서는 고속연삭에서 보다 Z방향의 값은 전체적으로 높은 성향을 나타내고 있다.

Fig. 5-11~Fig. 5-14까지는 개발된 고속연삭숫돌을 이용하여 이송속도는 1,000mm/min, 주축속도는 30,000rpm으로 고정하고 깊이변화를 각 가공면에 대하여 1 μ m로 10회, 2 μ m로 5회, 5 μ m로 2회, 10 μ m로 1회 변화시켜 최종연삭 깊이는 10 μ m가 되도록 가공한 시편의 표면을 3차원측정으로 얻어진 좌표값을 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 5-11은 전체적으로 Z방향의 값이 낮고 균일한분포를 보여주었다. 이는 절입깊이를 작게 한 결과 각각의 연삭입자에 부하가 작게 걸리므로 연삭숫돌의 탈락이나 본드의 훼손이 거의 없으므로 양호한 프로파일을 나타나는 것으로 보인다.

Fig. 5-12는 매우 불균일하고 높게 나타났다. 절입깊이 2 μ m에서는 상대적으로 높은 입자가 탈락하여 앞의 표면거칠기 실험과 마찬가지로 급격한 변동 즉, 불안정한 프로파일을 나타냄을 알 수 있었다.

Fig. 5-13은 전체적으로 Z방향의 값이 높게 나타났고, Fig. 5-14에서는 부분적으로 불균일한 분포를 나타내었다. 절입깊이 2 μ m에서 상위 입자가 탈락하고 다시 하위입자의 돌출로 인한 프로파일의 변화는 절입깊이 5 μ m에서 다소 불안정하지만 절입깊이 10 μ m에서 다시 균일한 상태로 돌아가고 있음을 알 수 있었다. 그러나 단일층의 연삭입자로 구성된 전착숫돌이기 때문에 입자의 과도한 탈락은 연삭숫돌로서의 기능을 상실함을 의미한다. 따라서 고속연삭의 경우 절입깊이를 1 μ m로 가공하는 것이 시편의 표면성상(shape of

surface waviness)이 제일 양호함을 알 수 있었으며, 절입깊이 $2\mu\text{m}$ 부터 불균일한 연삭숫돌입자 중에 상대적으로 높은 입자가 탈락함으로 인해서 표면성상 나빠지고 낮은 위치에 있는 하위 입자들의 돌출로 연삭은 계속 진행될 수 있는 것으로 사료된다.

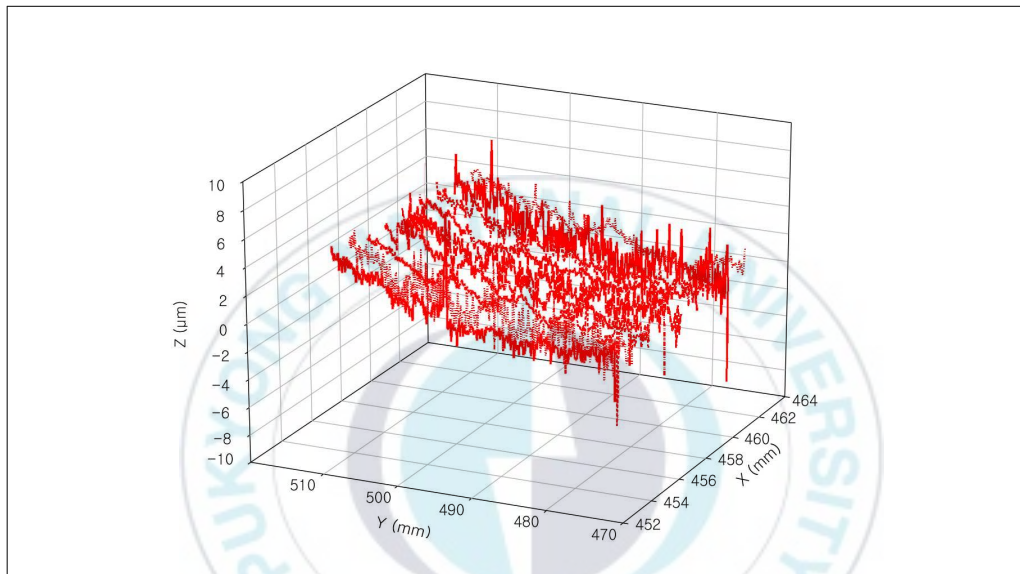


Fig. 5-10 Result of 3 dimensional coordinate measurement by high speed cutting (depth of cut : $1\mu\text{m}$)

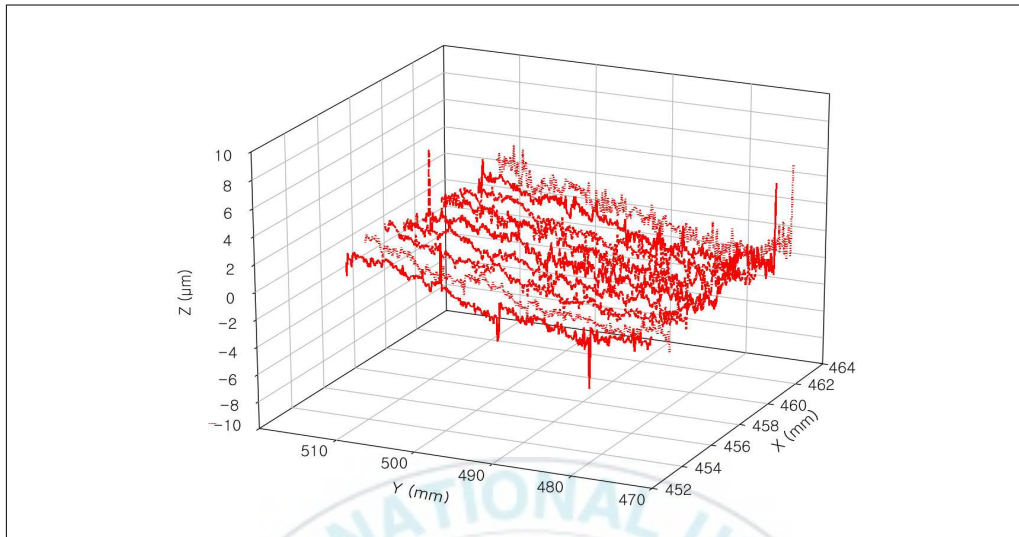


Fig. 5-11 Result of 3 dimensional coordinate measurement by high speed grinding (depth of cut : 1 μ m)

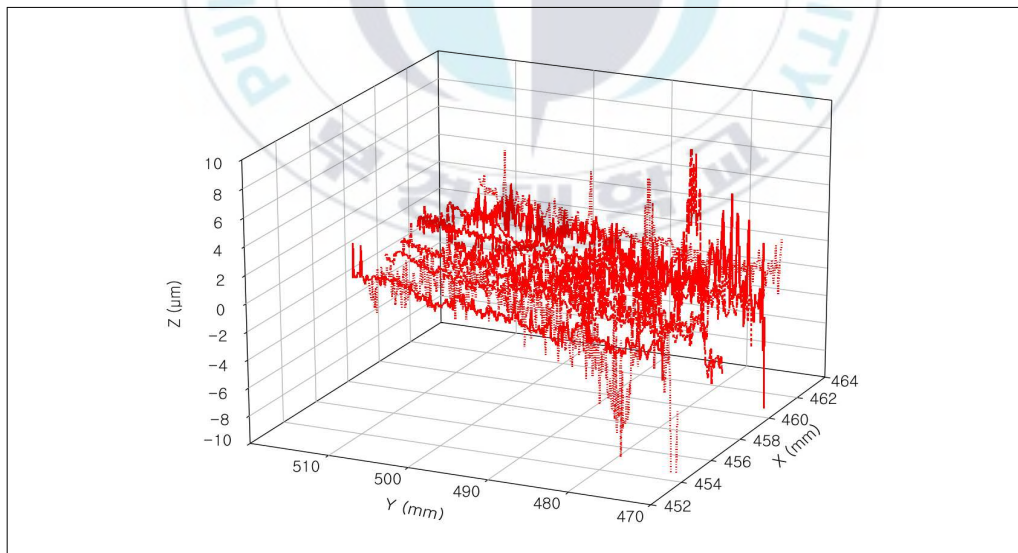


Fig. 5-12 Result of 3 dimensional coordinate measurement by high speed grinding (depth of cut : 2 μ m)

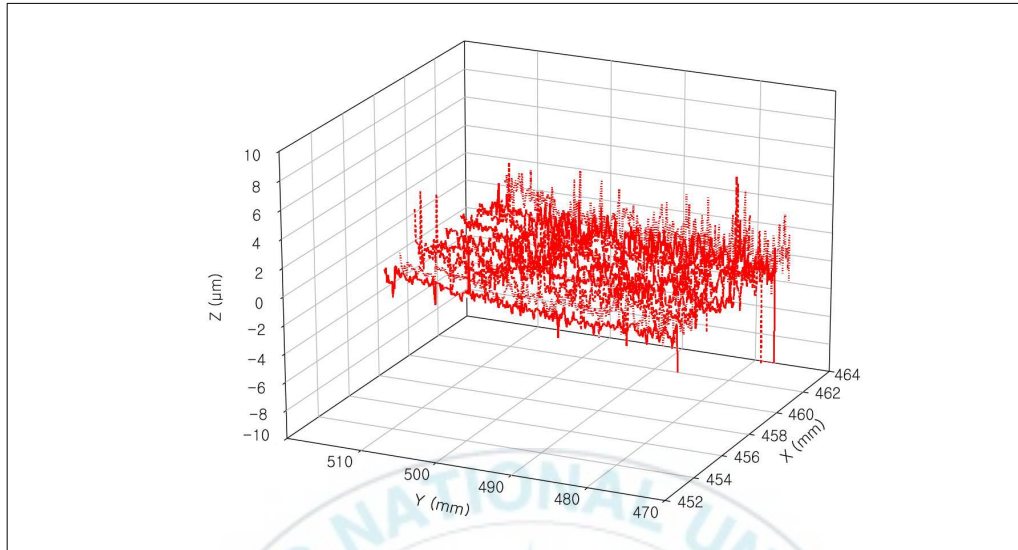


Fig. 5-13 Result of 3 dimensional coordinate measurement by high speed grinding (depth of cut : 5μm)

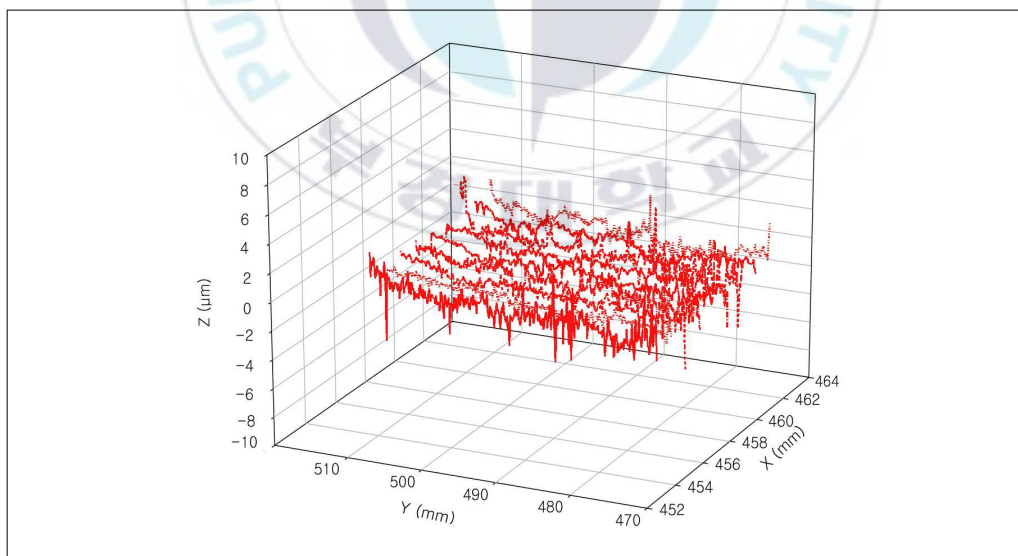


Fig. 5-14 Result of 3 dimensional coordinate measurement by high speed grinding (depth of cut : 10μm)

5.4 잔류응력 변화

5.4.1 잔류응력 이론

가공면의 잔류응력(residual stress)을 구하기 위하여 비파괴적 방법으로 결정격자의 스트레인을 측정할 수 있는 X선 회절법과 전단스트레인에 의한 마그네틱스트레인(magnetic strain)을 이용하는 방법이 있다. 마그네틱 스트레인현상에는 사용되는 주파수가 영향을 주며, X선법은 부식에 의하여 내부 응력분포를 구하는 경우, 새로 생긴 표피에 주목하여 측정하므로 실제의 것과 다르게 나타나는 것이 결점이다. 부식변형법은 시편의 형상에 제한을 받는다.

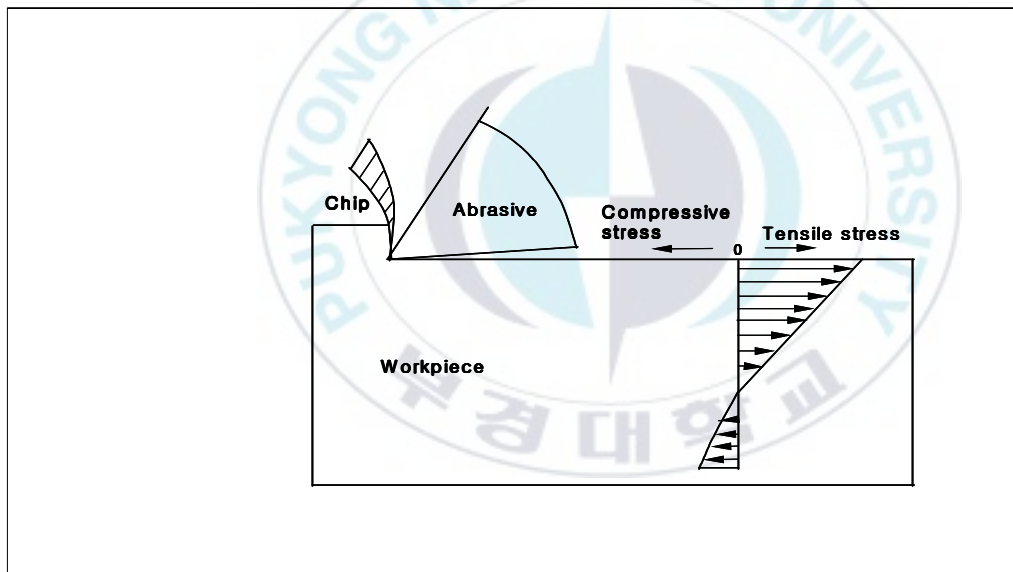


Fig. 5-15 Residual stress in workpiece

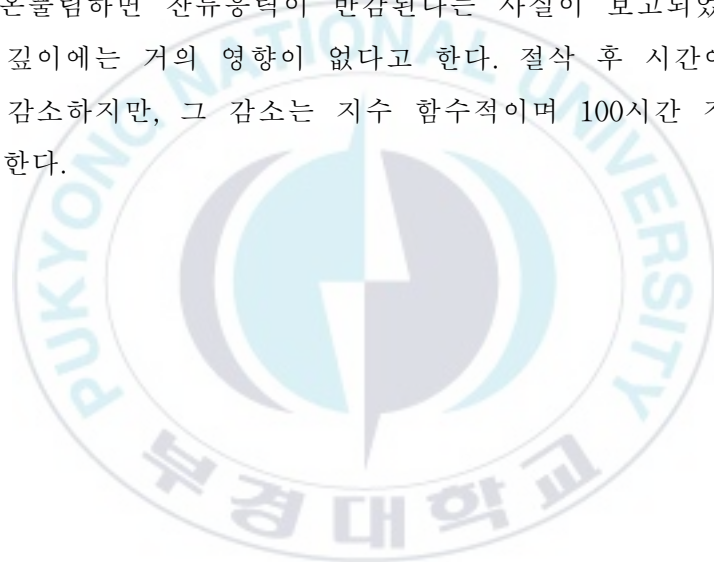
Fig. 5-15에서와 같이 일반적으로 공구인선이 그 전방의 재료를 압축하면서 진행하고, 후방의 표피는 인장되므로 절삭 후에 가공면에는 압축응력이 남아 있는 경우가 있다. 잔류응력 층의 깊이는 변질 층의 깊이와 대략 일치

한다. 잔류응력층의 깊이 $H(\text{mm})$ 와 잔류응력 $\sigma_r[\text{kg}/\text{mm}^2]$ 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.^[50]

$$\text{바이트가공에서} : \sigma_r = (60 \sim 100) \cdot H^{0.61} \quad (5-1)$$

$$\text{밀링가공에서} : \sigma_r = (40 \sim 70) \cdot H^{1.72} \quad (5-2)$$

일반적으로 잔류응력은 가공면이 거칠수록, 공구면의 절삭각이 증가할수록 증가된다. 또한 절삭유를 사용하면 30~50%정도 감소한다. 200℃에서 12시간 정도 저온풀림하면 잔류응력이 반감된다는 사실이 보고되었다. 그러나 잔류응력의 깊이에는 거의 영향이 없다고 한다. 절삭 후 시간이 경과하면 잔류응력이 감소하지만, 그 감소는 지수 함수적이며 100시간 정도 후에는 일정하다고 한다.



5.4.2 잔류응력 측정

잔류응력은 가공특성을 평가하는 중요한 방법 중 하나이며, 아무리 훌륭한 표면성상이라 할지라도 가공 후 공작물에 높은 잔류응력이 존재한다면 표면의 변질, 변형 등에 의해 제 기능을 발휘할 수 없을 것이다.

본 실험에서는 정확한 측정을 위하여 가공이 끝나고 잔류응력값은 잔류응력측정기(STRAINFLEX MSF-2M Rigaku, Japan)로 X선회절법에 의해 측정하였으며, 잔류응력의 측정은 24시간 이내에 끝날 수 있도록 하였고, 측정을 하기위하여 X선 입사각을 조정하여 0, 15, 30, 45°의 각도로 입사시켜 측정하였으며, 발산각도를 조절하는 발산슬릿(divergence slit)의 직경은 2mm로 설정하였다.

Fig. 5-16은 시편상의 잔류응력을 측정하기 위한 X선 입사지점을 나타낸 것이며, 각 시편마다 세 지점에서 나온 잔류응력의 평균값을 사용하였다.

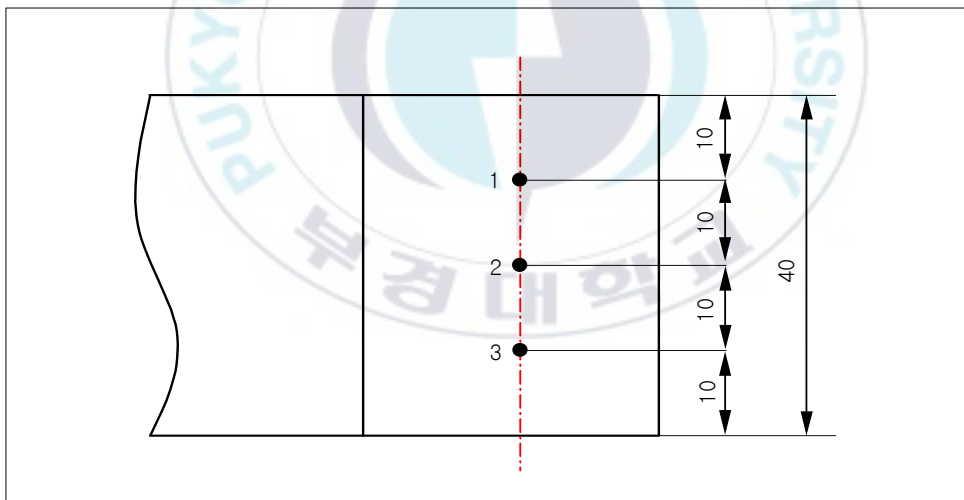


Fig. 5-16 Measuring points of residual stress on specimen

Fig. 5-17은 고속절삭과 고속연삭에서 절입깊이에 따른 잔류응력값을 나타내었다. 고속절삭의 경우는 절입깊이 $1\mu\text{m}$ 일 때 37.15kg/mm^2 , $2\mu\text{m}$ 일 때 41.20kg/mm^2 , $5\mu\text{m}$ 일 때 46.85kg/mm^2 그리고 $10\mu\text{m}$ 일 때는 48.10kg/mm^2 로 나타났다. 고속연삭의 경우는 절입깊이가 $1\mu\text{m}$ 일 때 잔류응력이 가장 작은 32.90kg/mm^2 로 나타났으며, $2\mu\text{m}$ 에서 37.60kg/mm^2 으로 급격하게 증가하여 $5\mu\text{m}$ 일 때 37.40kg/mm^2 , $10\mu\text{m}$ 일 때 38.8kg/mm^2 로 비슷한 값을 나타내었다. 따라서 고속절삭의 경우 절입깊이 변화에 따른 잔류응력의 변화는 급격하게 증가하는 경향을 나타냈으며, 고속연삭의 경우 $2\mu\text{m}$ 에서 급격한 증가 후 일정한 값을 나타냄을 보여주었다. 이것은 $1\mu\text{m}$ 에서 약 11.4%, $2\mu\text{m}$ 에서 8.7%, $5\mu\text{m}$ 에서 20.2% 그리고 $10\mu\text{m}$ 에서 19.4%의 수치적 차이를 보이며, 고속연삭시 표층잔류응력상태가 개선된 효과를 보여주었다. 잔류응력 측정도 표면거칠기변화 실험 데이터와 마찬가지로 $1\mu\text{m}$ 에서 가장 적은 잔류응력값이 나타났다.

본 실험에서는 개발한 고속연삭숫돌의 경우 절입깊이 $1\mu\text{m}$ 가 가장 적절함을 알 수 있었고, 절입깊이에 따른 잔류응력은 양의 값으로 나타났으며, 이는 인장응력임을 알 수 있었다.

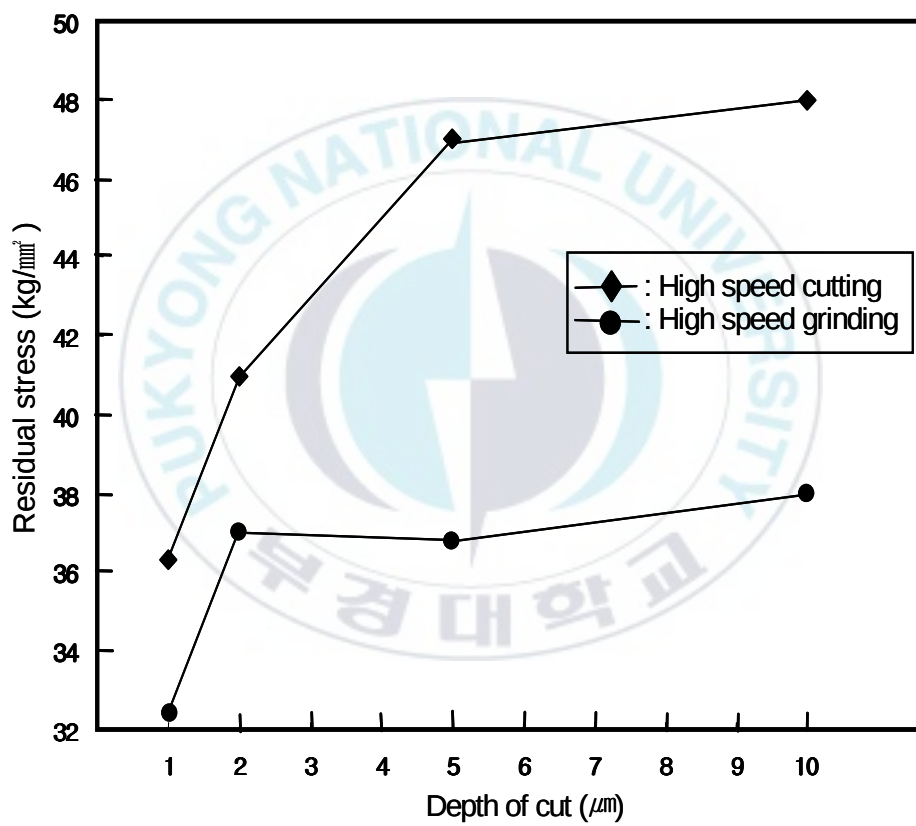


Fig. 5-17 Variation of residual stress according to depth of cut

Fig. 5-18은 주축속도를 20,000~40,000rpm의 변화에 따른 잔류응력 측정 결과를 나타낸 그림이다. 주축속도변화에 따른 실험에서도 표면거칠기변화 실험테이터와 마찬가지로 주축회전수 30,000rpm부근에서 잔류응력이 가장 적은 32.90kg/mm²의 값을 나타내었으며, 20,000rpm에서는 37.75kg/mm²으로 30,000rpm을 기준으로 12.8% 높은 값이며, 40,000rpm에서는 43.90kg/mm²으로 30,000rpm을 기준으로 25.1% 높게 나타났다. 주축속도변화에 따른 잔류응력도 양의 값으로 모두 인장응력이 작용하고 있음을 알 수 있었다.

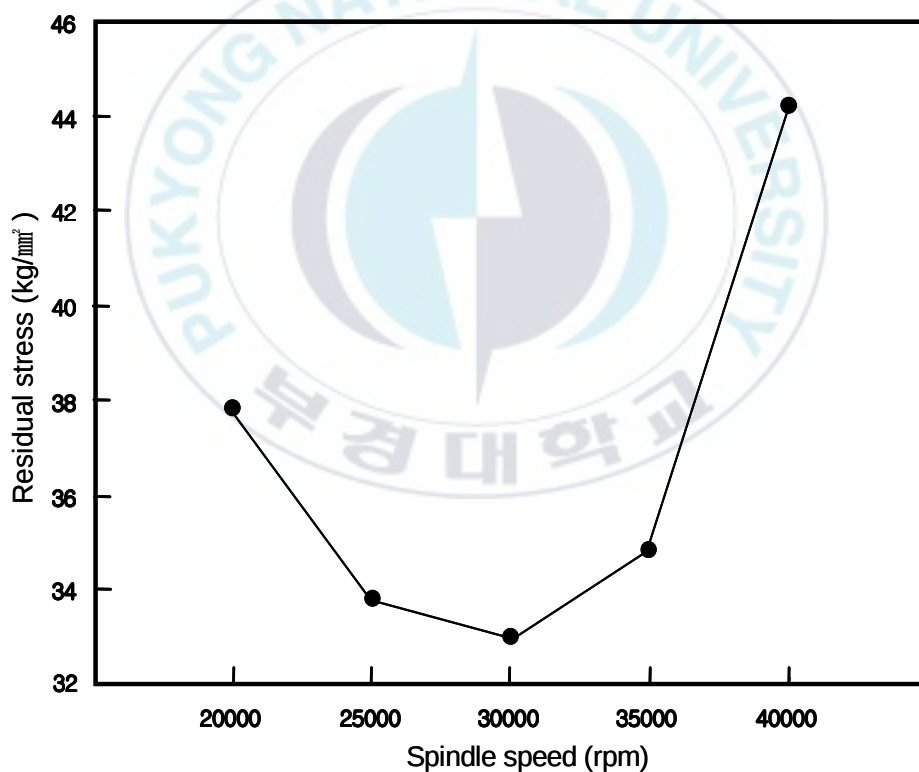
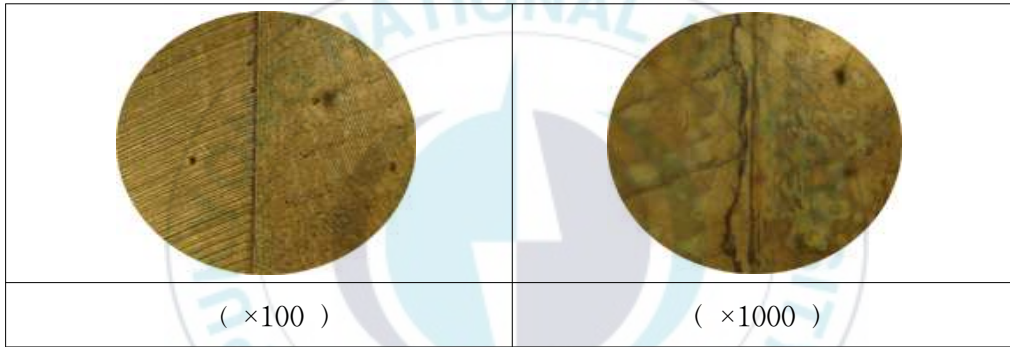


Fig. 5-18 Variation of residual stress according to spindle speed

5.4.3 공작물표면의 미시적 변화

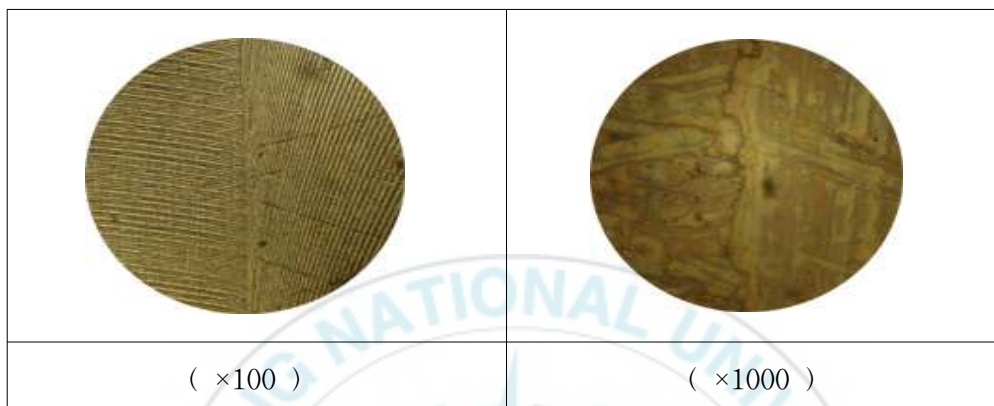
Fig. 5-20~Fig. 5-22까지는 고속절삭으로 이송속도 1,000mm/min, 주축속도는 30,000rpm, 절삭깊이를 $1\mu\text{m}$ 로 10회, $2\mu\text{m}$ 로 5회, $5\mu\text{m}$ 로 2회, $10\mu\text{m}$ 로 1회씩 단계별로 고속절삭 했을 때 금속현미경(TEM-TS Dongwon, Korea)을 통해서 각각의 가공조건에 따른 공작물표면의 미시적인변화를 촬영한 것이다. 전체적으로 100배의 배율에서 공구경로로 인한 톨마크가 확연하게 보이며 1,000배의 배율에서 피크피드(peak feed) 경계면에서 불규칙한 절삭면을 보여주며, 소성변형으로 미쳐 절삭되지 못한 부분이 사진의 가운데 세로선을 경계로 양쪽이 구배가 있음을 알 수 있었다.



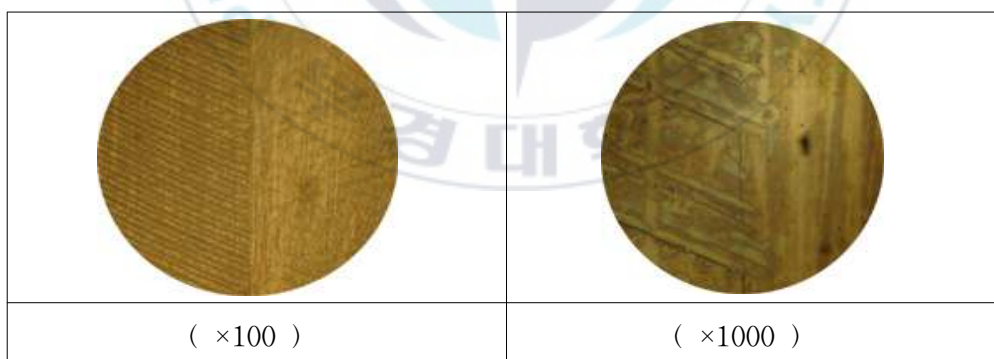
**Fig. 5-19 Specimen surface after high speed cutting
(depth of cut : $1\mu\text{m}$)**



**Fig. 5-20 Specimen surface after high speed cutting
(depth of cut : $2\mu\text{m}$)**



**Fig. 5-21 Specimen surface after high speed cutting
(depth of cut : 5 μ m)**

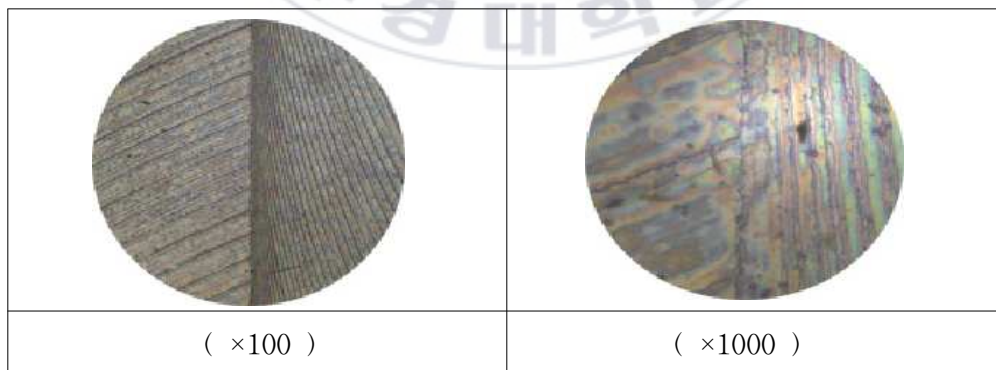


**Fig. 5-22 Specimen surface after high speed cutting
(depth of cut : 10 μ m)**

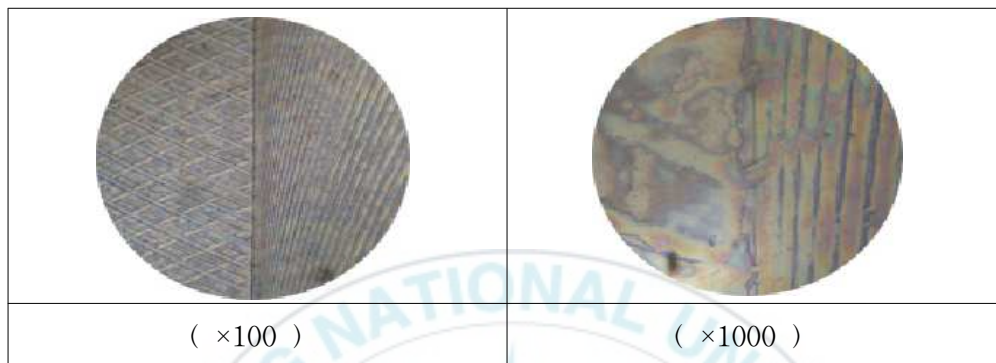
Fig. 5-24~Fig. 5-26은 개발된 고속연삭숫돌로 절삭깊이를 1, 2, 5, 10 μ m 이송속도 1,000mm/min, 주축속도는 30,000rpm으로 가공조건에 따른 공작물표면의 미시적인변화를 금속현미경(TEM-TS Dongwon, Korea)을 통해서 촬영한 것이다. 100배의 배율에서는 플랫엔드밀로 고속절삭 했을 때와 큰 차이점은 발견할 수 없었으나, 1,000배의 배율에서는 고속절삭에서 시편상의 공구경로가 겹치는 부분에서 산 형상의 미 절삭부분이 남아 표면품질을 저하하는 요인으로 작용하며, 이는 고속절삭 후 남아있는 돌출된 부위가 고속연삭을 거치면서 표면품질이 개선된 것으로 사료된다.



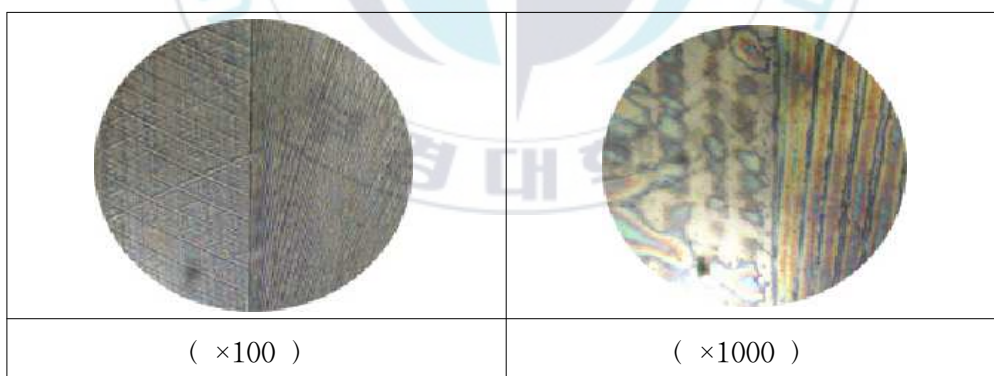
**Fig. 5-23 Specimen surface after high speed grinding
(depth of cut : 1 μ m)**



**Fig. 5-24 Specimen surface after high speed grinding
(depth of cut : 2 μ m)**



**Fig. 5-25 Specimen surface after high speed grinding
(depth of cut : 5 μ m)**



**Fig. 5-26 Specimen surface after high speed grinding
(depth of cut : 10 μ m)**

Fig. 5-27과, Fig. 5-28은 이송속도 1,000mm/min, 절입깊이 $1\mu\text{m}$, 최종가공 깊이가 $10\mu\text{m}$ 가 되도록 하고, 주축속도를 20,000rpm과 40,000rpm으로 고속연삭했을 때의 시편표면사진이다. 20,000rpm의 경우 상위 연삭입자가 탈락 하면서 채터가 발생하여 시편의 표면성상이 좋지 않게 나타났고, 40,000rpm의 경우는 채터는 발생하지 않았으며, 연삭상태는 30,000rpm에 비해 표면성상은 떨어졌다. 이것은 연삭입자와 공작물간의 슬립현상이 원인으로 판단된다.



Fig. 5-27 Specimen surface after high speed grinding
(depth of cut : $1\mu\text{m}$, rpm : 20,000)



Fig. 5-28 Specimen surface after high speed grinding
(depth of cut : $1\mu\text{m}$, rpm : 40,000)

5.4.4 슷돌표면의 미시적 변화

Fig. 5-29~Fig. 5-33은 개발된 고속연삭스�돌로 절삭깊이를 1, 2, 5, 10 μm 이송속도 1,000mm/min, 주축속도는 30,000rpm,의 가공조건에 따른 고속연삭 후 슷돌 미시적인변화를 주사전자현미경(S-2400 Hitach, Japan)으로 촬영한 것이다. 슷돌표면의 미시적인변화의 관찰에서는 본드 및 입자가 가장 많이 손상되는 측면(side surface)과 밑면(bottom surface)의, 끝단을 집중적으로 촬영 관찰하였으며, 본드 및 입자가 많이 손상된 부분은 그림에 표기하였다.

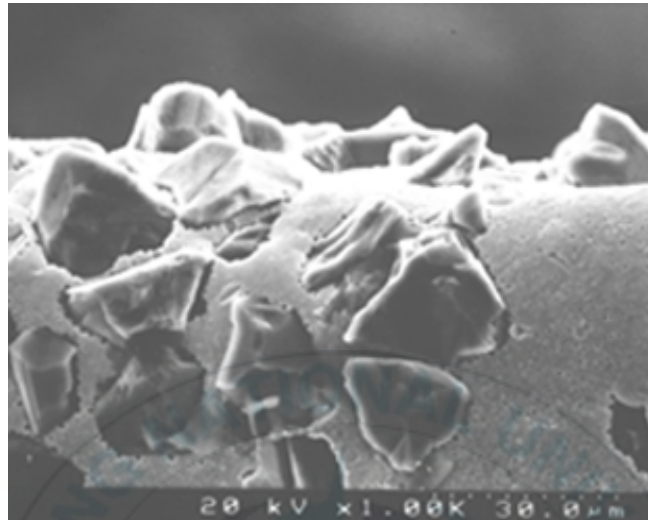
Fig. 5-29는 실험을 실시하기전의 슷돌표면상태를 나타낸 사진이다.

Fig. 5-30은 절입깊이 1 μm 로 10회 가공하여 총 절입깊이는 10 μm 가 되도록 고속연삭 하였을 때의 슷돌의 상태이며 입자와 본드 모두 가공전과 비교하여 거의 손상되지 않았다.

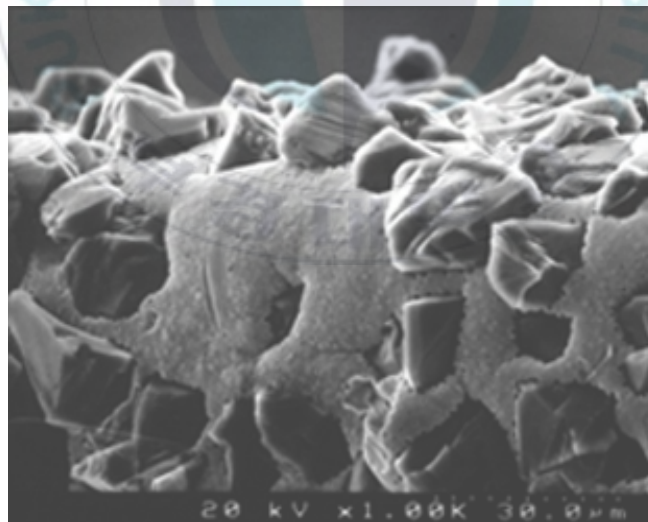
Fig. 5-31은 2 μm 로 5회 가공하여 총 절입깊이 10 μm 가 되도록 고속연삭 하였을 때의 슷돌상태이며 본드가 손상을 입고 슷돌입자가 일부 탈락한 것을 보여준다.

Fig. 5-32는 절입깊이 5 μm 로 2회가공한 슷돌의 표면상태를 보여주는 것이며, 슷돌입자가 탈락되고 본드가 손상된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5-33은 절입깊이 10 μm 로 1회가공한 슷돌의 표면상태를 보여주는 것이며, 상당수의 슷돌입자가 탈락되고 본드 또한 손상된 정도가 심각한 것을 확인할 수 있다. 이러한 본드손상, 즉 굽힘은 연삭 시 발생한 칩이 강력한 원심력으로 연삭입자 사이의 공간을 통하여 배출 될때 결합력이 약한 입자가 탈락시 본드를 훼손시키는 과정에서 발생하는 것으로 사료된다. 또한 절입깊이 증가에 따라 결합력이 약한 슷돌입자의 탈락과 니켈본드의 마모가 발생하는 현상으로, 연삭스�돌의형상변화 및 연삭입자 수 감소의 원인으로 사료된다.

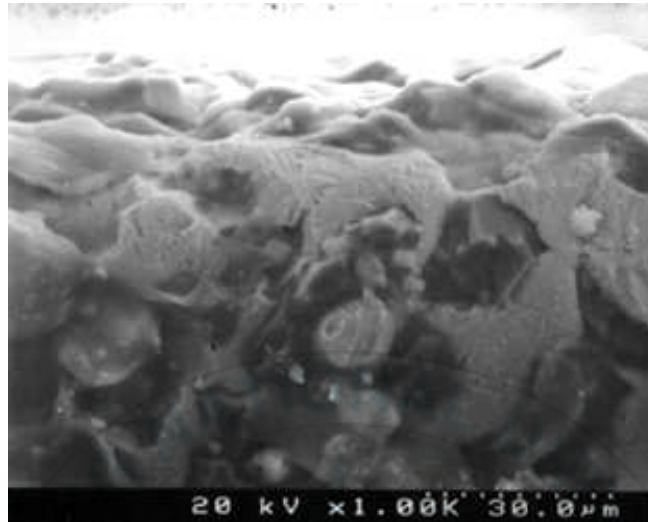


(a) Side view of grinding wheel surface

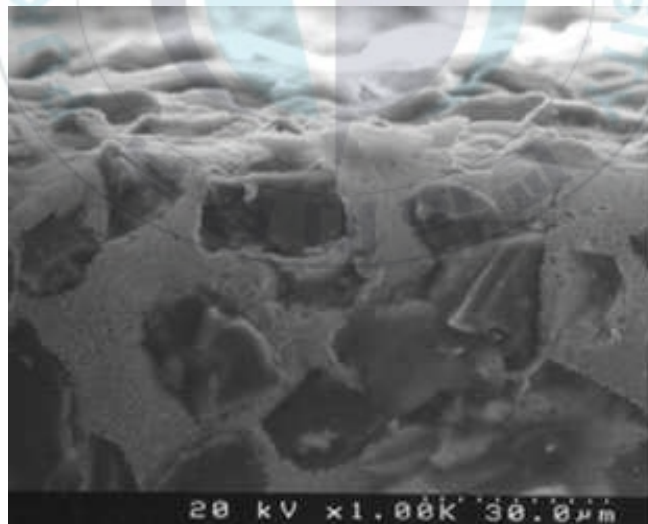


(b) Bottom view of grinding wheel surface

Fig. 5-29 Surface condition of grinding wheel before grinding

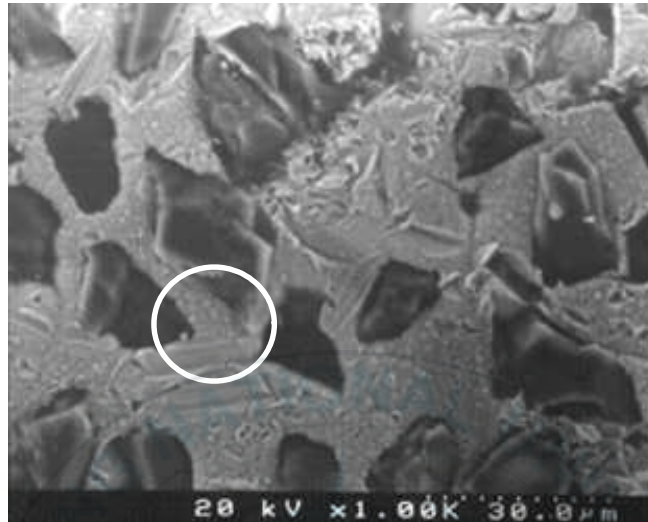


(a) Side view of grinding wheel surface

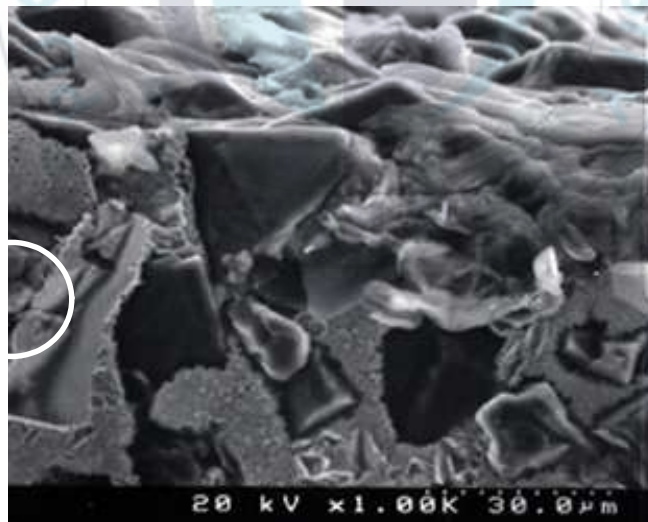


(b) Bottom view of grinding wheel surface

Fig. 5-30 Surface condition of grinding wheel after grinding
(depth of cut : $1\mu\text{m}$)

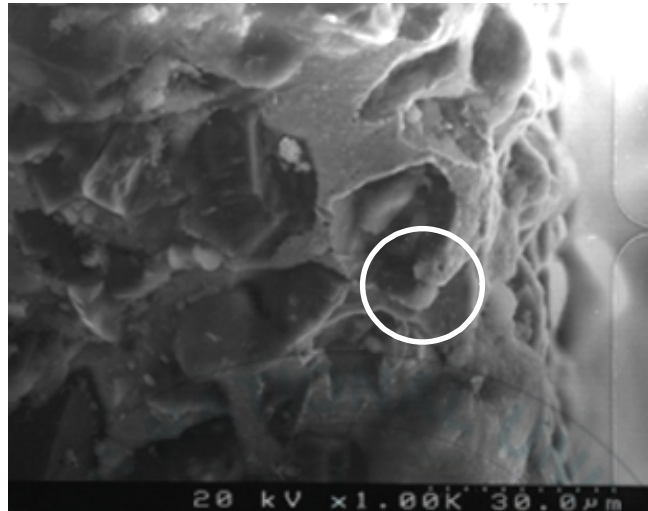


(a) Side view of grinding wheel surface

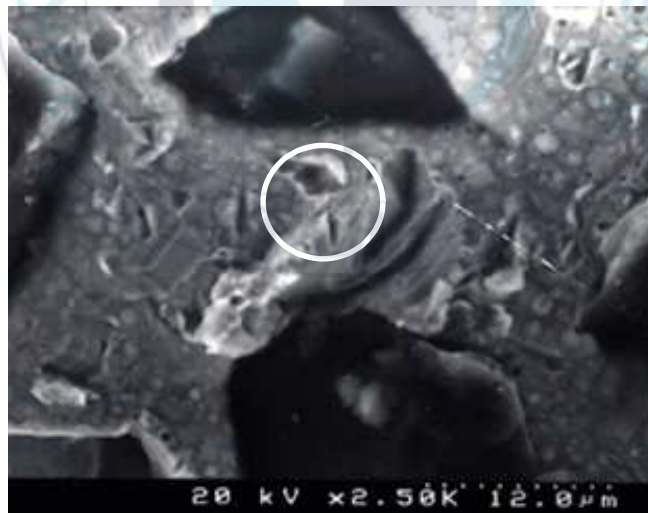


(b) Bottom view of grinding wheel surface

Fig. 5-31 Surface condition of grinding wheel after grinding
(depth of cut : $2\mu\text{m}$)



(a) Side view of grinding wheel surface

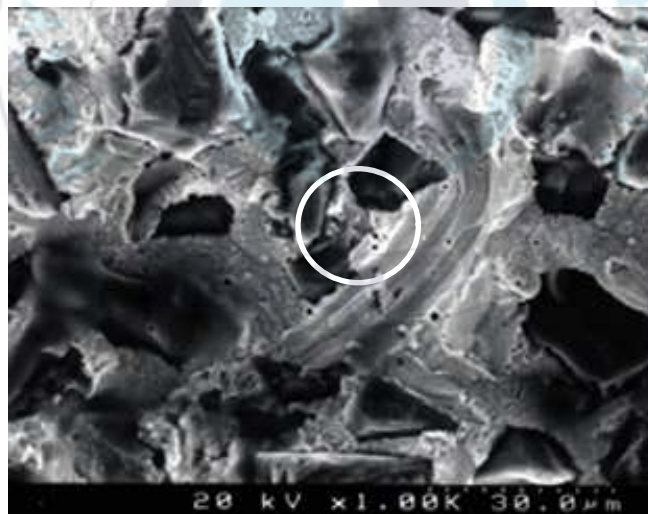


(b) Bottom view of grinding wheel surface

Fig. 5-32 Surface condition of grinding wheel after grinding
(depth of cut : $5\mu\text{m}$)



(a) Side view of grinding wheel surface



(b) Bottom view of grinding wheel surface

Fig. 5-33 Surface condition of grinding wheel after grinding
(depth of cut : $10\mu\text{m}$)

5.5 결 언

본 장에서는 고속가공기에서 고속절삭과 고속연삭의 복합화에 관한연구를 하기위하여, 텅스텐 카바이드생크에 CBN입자를 니켈본드로 단일층으로 전착하여 고속연삭에서 사용이 가능한 연삭숫돌을 개발하였다. 고속절삭과 고속연삭 후 금형공구강을 이송속도 1,000mm/min로, 고정하고 주축속도는 20,000~40,000rpm, 절입깊이를 1, 2, 5, 10 μ m의 4단계로 변화시키면서 표면거칠기, 잔류응력측정, 시편의 표면변화와 숫돌의 변화를 고속절삭과 고속연삭과의 비교 실험을 통하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 표면거칠기 R_a , R_{ms} , R_z 의 값 모두 고속연삭이 고속절삭 보다 양호 하게 나타났으며, 특히 R_a 가 가장 좋고 이송속도 1,000m/min, 절입깊이 1 μ m, 가공조건으로 고속연삭 할때의 최적주축속도는 30,000rpm 부근임을 알 수 있었다.
2. 잔류응력변화는 고속연삭과 고속절삭 모두 증가하는 경향을 나타내었고, 연삭은 잔류응력 개선효과가 있으며 30,000rpm에서 잔류응력이 가장 낮으며 연삭력이 가장 적게 부하되는 것을 알 수 있었다.
3. 공작물 표면상태는 개발한 연삭숫돌로 고속연삭 후 돌출된 부분의 표면이 향상된 것을 확인할 수 있었고, 숫돌표면의 변화는 1~2 μ m에서는 공구의 손상이 거의 없었으며, 5~10 μ m에서 칩의 배출과 결합력이 약한 연삭입자의 탈락으로 본드의 손상된 정도가 급격히 진행됨을 확인 할 수 있었다.

제 6 장 결 론

본 연구에서는 초 미립 초경합금재로 제작되어진 플랫폼 엔드밀의 랜드부 표면거칠기 및 여유각을 변화시켜 STD11을 절삭하였을 때 발생하는 절삭 저항으로부터 주분력과 주분력 변동율의 변화 관점에서 공구의 성능을 평가하였다. 고속가공에서 적외선 열화상 카메라를 이용하여 열 발생 실험을 하였으며, 고속연삭에 사용할 수 있는 연삭숫돌을 개발하여 표면거칠기, 잔류응력, 시편의 표면변화상태와 숫돌의 변화 고속절삭과 고속연삭과의 비교 실험을 통하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 엔드밀 랜드부의 표면거칠기는 공구수명에 큰 영향을 미치며 표면거칠기를 좋게 할수록 공구수명도 증가하고, 여유각을 변화시켜 성능을 평가한 결과, 최적의 엔드밀 여유각이 존재함을 알 수 있었고 본 실험의 절삭조건에서는 여유각이 8° 일때가 가장 우수하였다.
2. 열발생은 주축속도 20,000~30,000rpm 사이에서 절삭열이 안정된 경향을 보였으며, 40,000rpm에서 절삭열이 상승하는 경향은 절삭열이 미쳐 분산되지 못하고 재료가 연화된 상태에서 다음 절삭이 진행되어 나타나는 현상이 원인임을 알 수 있었다.
3. 이송속도와 절삭깊이의 변화에 따른 열발생은 주축회전수가 빠를수록 이송속도 변화에서는 1.75배, 절삭깊이 변화에서는 약 1.6배 감소하는 경향을 보였으며, 이는 피삭재에 소성변형과, 공구의 열전도율이 좋아 열적영향을 적게 받음을 알 수 있었다.
4. 표면거칠기는 R_a , R_{max} , R_z 의 값 모두 고속연삭이 고속절삭 보다 양호하게 나타났으며, 특히 R_a 가 가장 좋고 또한 고속연삭은 잔류응력 개선효과가 있으며, 이송속도 1,000m/min, 절입깊이 $1\mu m$ 의 가공조건으로 고속연삭 할때의 최적주축속도는 30,000rpm 부근임을 알 수 있었다.

5. 공작물 표면상태는 개발한 연삭숫돌로 고속연삭 후 돌출된 부분이 표면이 향상된 것을 확인할 수 있었고, 숫돌표면상태의 변화는 1~2 μm 에서는 공구의 손상이 거의 없었으며, 5~10 μm 에서 칩의배출과 결합력이 약한 연삭입자의 탈락시 본드의 훼손으로 인하여 입자의 탈락 및 본드의 손상된 정도가 급격히 진행됨을 확인 할 수 있었다.
6. 개발된 연삭숫돌은 수작업으로 이루어지던 2차 공정작업을 고속가공기에서 연삭하는 방법으로 즉 고속절삭과 고속연삭의 복합화가 가능함을 알 수 있었다.



참고문헌

1. H. Schuiz, "High speed Milling of Dies and Moulds-Cutting Conditions and Technology", CIRP, Vol. 44, 1995.
2. J. D. Song, "Machinability Evaluation according to Variation of Endmill Shape for High Speed Machining". 공학석사 학위논문, pp. 1-2, 2001.
3. T. Moriwaki, High Speed Machining, CIRP, Vol. 41, 1992.
4. K. Okuni, "超高速切削加工を可能にする工具材種", 形技術セミナー、1992.
5. 有本, "工具から見た高速切削の現状と課題", JSPE, 第210回講習會, 1994.
6. S. E. Draby, D. R. Hayburst, "Development of Models for Tool Wear Monitoring in NC Metal Cutting", Int. J. Mech. Sci 33(2), pp. 125~138, 1991.
7. C. H. Choi, "High Speed Machining & Technology of Tooling for Die and Mold Making", Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18 No. 8, pp. 18-19, 2001.
8. C. salomon, Verfahren zur bearbeitung von metallen oder bei einer bearbeitung durch schneidende werkzeuge sich ähnlich verhaltenden werkstoffen, German Patent no. 523594, 1931.
9. G. L. Criger, High speed machining in production, SAMPE Quarterly, 12 April 1981.
10. J. Tlusty, High speed milling, Proceedings of the 6th IMEC, Osaka, Japan, pp 35-42, 1994.
11. J. R. Coleman, No myth high speed machining, Manuf. Eng. 61, Oct 1992.
12. J. K. Lee, J. H. Lyu, M. K. Kim, J. H. Kook, "A Study on the Evaluation of End Mills for High Speed Machining", Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, pp. 833-837, 2000.

13. J. C. Lee, "High Speed Machining", Proceedings of the Korean Society of Machine Tool Engineers Conference, pp. 5-10, 1998.
14. T. Ikeda, "高速切削の現状技術動向", 形技術セミナー, 1992.
15. Mustafizur Rahman, Md. Shamsuddin Chowdhung, "Influence of Different Tool Materials on High Speed Machining of Hardened Tool Steel", The 5th International Conference on Die and Mould Technology, pp. 25-30, Singapore Expo, 21 to 23 March 2000.
16. Schuit, H. Hock, St., "High speed Milling of Dies and Moulds-Cutting Conditions and Technology", CIRP, Vol. 43, pp. 63-67, 1994.
17. Shamoto, E., Hiltinas, Y., "Prediction of Shear Angle in Oblique Cutting with Maximum Shear Stress and Minimum Energy principles", MED-Vol. 6-1, Manufacturing Science and Technology, Vol. 1, ASME, pp. 121-128, 1997.
18. Wertheim, R., Satran, H., and BerH., "Modifications of the Cutting Edge Geometry and Chip Formation in Milling", CIRP, Vol. 43, pp. 63-67, 1994.
19. T. I. EL-Wadany, E. Mohammed and M. H. Elbestawi, "Cutting Temperature of Ceramic Tools in High Speed Machining of Different-to-Cut Materials", Int. J. Mach. Tools Manufact, Vol. 36, No. 5, pp. 661-634, 1996.
20. N. Narutaki, Y. Yamane, K. Hayashi, T. Kitarawa, "High Speed Machining of Inconel718 with Ceramic Tools", Annals of the CIRP Vol. 42, pp. 103-106, 1993.
21. 송재도, "고속가공용 엔드밀 형상변화에 따른 가공성 평가", 공학석사 논문, 부산대, 2001.

22. S. L. Ko, S. K. Lee, S. M. Bea, "Study on the Design of End Mill Geometry", Korean Society of Precision Engineering Vol. 18, No. 8, 2001.
23. M. K. Ha, S. J. Lee, S. T. Lee, "Performance Evaluation of High Speed Machining for Fair Type Endmill" Journal of Korean Society of Technical Education and Training Vol. 10, No. 4, pp. 13-20, 2005.
24. H. K. Kim, J. T. Seo, J. H. Kwon, J. S. Kim, M. C. Gam, "Machinability Evaluation of Endmill Tool through Development of Ultra-fine Grain Grade Cemented Tungsten Carbide Material", Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, pp. 865-869, 1997.
25. J. H. Kim, K. S. Kim, C. M. Kim, D. W. Lee, J. S. Kim, Y. H. Bea, J. W. Lee, "Machining characteristic of gray cast iron in high speed machining with tungsten carbide endmill", Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, pp. 147-150, 1997.
26. C. M. Lee, C. H. Choi, T. J. Ko, J. Y. Jung, E. J. Jung, "Selection of Machining Condition in High Speed Machining of STD11", Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 20, No. 8, pp. 30-38, 2003.
27. C. M. Lee, S. P. Lyu, T. J. Ko, J. Y. Jung, W. J. Jung, "A study on the Analysis and Evaluation of Cutting forces for High Speed Machining by a Ball-end mill", Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 22, No. 5 pp. 167-174, 2005.
28. H. J. Bea, H. S. Baek "Analysis of Working Factors for Improvement of Surface Roughness on High Speed End-Milling", Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 21, No. 6, pp. 52-59, 2004.

29. J. Gough, "High speed machining for tool making applications", Prec. Toolmaker 8, 1990.
30. H Schulz, "High speed machining-some of the latest developments", Metalworking World 3, 1994.
31. F. J. McGee, "High speed machining - study : method for aluminium workpiece", Am, Machanist, 1979.
32. E. M. Trent, Metal cutting, 3rd edition, Butterworth, London, ISBN 0750610689, 1991.
33. T. Moriwaki, "High-Speed Machining", CIRP, Vol.41, 1992.
34. H. Schut, "High-Speed milling of Dies and Moulds-Cutting Condition and Technology", CIRP, Vol.44 1995.
35. Nam-Sub Seo, Metal Cutting Theory, Dong myoung sa, Korea, 1985.
36. Young-Ha Yum, The Cutting Theory of Machine Tool, Dong myoung sa, Korea, 1992.
37. D. G Flom, R. Komanduri and M. Lee, High Speed Machining of Metals, Annual Review of Materials Science, Vol.4, pp.231, 1984.
38. R. I. King and R.I. Vaughn, A Synoptic Review of High Speed Machining from Salomon to the Present, Proc. of ASME, High Speed Machining Conf, PED 12, 1984.
39. Zhijie Tang, "Tool replacement strategies and the precision of tool monitoring system in advanced manufacturing system", Transaction of NAMRI/SME, Vol. 26, pp. 255-260, 1995.
40. Di Yan, T. I. EI-wardany, M. A. Elbestawi, "A multi-sensor strategy for tool failure detection in milling", MTM, Vol. 35, No. 3, pp. 383-398, 1995.
41. H. Schulz, "Hochgeschwindigkeits-bearbeitung", HANSER, 1996.
42. 中川威雄, 金型の高速 ミーリングを考える, 型技術, Vol. 13, No. 3, 1998.

43. H. Schulz, "High speed milling of Dies and Moulds-Cutting Condition and Technology", CIRP, Vol.44, 1995.
44. T. W. Hwang, C. J. Evans, S. Malkin, "An Investigation of High Speed Grinding with Electroplated Diamond Wheels", Annals of CIRP, Vol. 49, No.1, 2000.
45. M. K. Ha, S. J. Lee, W. K. Park, S. T. Lee, W. Y. Lee, "Characteristics of Heat Generation in time of High-speed Machining using Infrared Thermal Imaging Camera" Journal of Manufacturing Process Engineers Vol. 2, No. 3, pp.26-33, 2003.
46. M. J. Jackson, C. J. Davis, M. P. Hitchiner, B. Mills, "High Speed Grinding with CBN Grinding Wheels - Application and Future, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 110, No.1, pp. 78-88, 2001.
47. Akinori YUI, Hwa-Soo LEE, "Surface Grinding with Ultra High Speed CBN Wheel", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 62, No.1, pp. 393-396, 1996.
48. 홍순혁, "원자력발전소 저압 터빈블레이드의 파손해석 및 안전성 평가에 관한연구", pp. 44~51, 동아대학교 공학박사 학위논문, 2001.
49. 기술표준원, 금속재료시험, pp. 257-265, 산업자원부, 2001.
50. 서남섭, 금속절삭이론, pp. 242~243, 동명사, 1997.

*A Study on Evaluation of Tool performance and Novel
Grinding wheel Development for High Speed Milling*

Lee, Sang-Jin

School of Mechanical Engineering

Graduate School of Pukyong National University

ABSTRACT

In recent years, it is essential to adopt the non-traditional machining technologies to produce the products getting a miniature and a precision in many application areas such as electric, electronic, automobile, aerospace and mechanical industrials. But in the cases of using the non-traditional machining technologies, generally the production rate is very low and the initial investment cost is more expensive. Thus there is a need to develop the new technology or the competitive machining method by improving capability of the conventional machine, tooling system and tool in itself.

High speed machining has been thought to be a kind of alternatives for the non-traditional machining technologies in the past and recently it became a popular method of the machining technologies to produce better surface

roughness of the precision products with high productivity. Here the term, high speed machining, means that machine tools are driven at higher rotation speed in a main spindle or at faster feed-rate in a table moving speed. In the high speed machining, the spindle rotation speed usually reaches about 20,000~100,000rpm. The high speed machining brings many benefits such as lower cutting force, smaller thermal damage, less residual stress and possible to cut easily the difficult-to-cut-materials. But the high speed causes inherently machine tools itself to increase temperature rise and cutting tool edges to accelerate the abrasive wear.

This study presented some machining characteristics in a high speed cutting using an end-mill tool. Cutting forces by a 3-axis tool dynamometer and temperature generation by an infrared camera were measured during the high speed cutting operation. Tool wear also was evaluated after the high speed cutting to know the effect of applied cutting conditions on the wear. The development of a high speed grinding tool and a characteristic assessment of the high speed grinding were also shown in this study. The high speed grinding could be conducted after the high speed cutting operation without generating new tool paths. It was seen that the high speed grinding tool developed was suitable to apply die and mold making because of possibility to get better surface by the high speed grinding. As a result of this study, an achievement of a compound machining technology with the high speed cutting and the high speed grinding came true and the high speed grinding was proposed to obtain the high quality product.

Key words : High speed cutting, Cutting force, Tool wear, Heat generation, Grinding tool development, Compound machining technology

감사의 글

본 논문이 완성되기까지 넓고 깊은 사랑으로 지도와 격려를 해주시고 학문의 길로 인도하여 오늘의 영광이 있도록 보살펴주신 하 만경 지도교수님께 진심으로 감사드립니다. 또한 저의 논문을 심사하여 주시고 미처 깨닫지 못한 여러 부분을 세심하게 지도하고 조언해 주신 정 영득 교수님, 구 양 교수님, 곽 재섭 교수님, 한국폴리텍V대학 정진서 학장님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다.

박사학위 과정동안 학문에 매진할 수 있도록 용기를 베풀어주신 한국폴리텍VIII대학 최 무철 학장님, 양 장홍 처장님, 부산대학 최 수준 학장님, 울산대학 최 학규 학장님, 자동화시스템과 교수님, 그리고 격려와 조언을 해주신 모든 교직원님들께 감사드립니다.

학위기간 동안 실험실에서 동고동락 하면서 힘든 박사과정을 걸어온 한국폴리텍VIII대학 박 후명 교수님, 오 상록 교수님, 황 영모 교수님, 그리고 전재익 박사님께 감사드리고, 최 진환님, 김 상오님, 허 광태님 에게도 감사의 뜻을 전합니다.

본 연구를 수행하는 동안에 항상 염려하여 주시고 물심양면으로 도와주신 이 상태 교수님, 조 종래 박사님께 감사드립니다.

오늘이 있기까지 지극한 정성으로 보살펴주신 아버님과 어머님, 형님과 형수님, 두 여동생 내외와 장인, 장모님께도 감사의 마음을 올리며, 처남들 내외분, 동서들 내외분께도 감사의 마음을 전합니다.

어려운 여건에서도 오랜 기간동안 지극 정성으로 뒷바라지 해준 사랑하는 아내 여 경애에게 가장 큰 영광과 보람을 사랑과 함께 전합니다. 또한 어느덧 훌쩍 자라서 부모의 곁을 떠날 나이가 된 사랑하는 두 딸들과도 이결실의 기쁨을 함께 하고자 합니다.

끝으로 한평생 오직 자식만을 위하여 헌신하시다 이 작은 결실을
보지 못하시고 타계하신 아버님께 불효를 용서바라며 하늘에서 가장
기뻐해주실 아버지 영전에 이 논문을 바칩니다.

2006 년 12월

이 상 진 올림

