

고속도강공구의 플랭크면 절삭온도 예측에 관한 연구

전 태 옥* · 배 춘 익**

A Study on Prediction of Cutting Temperature in Flank Face at High Speed Steel

T. O. Jun · C. E Bae

Key words : Orthogonal turning(2차원 선삭), Flank face(공구여유면), Temperature distribution(온도분포)

Abstract

Temperature distribution on flank face in orthogonal turning with cutting tool of high speed steel is studied by using a finite element method and experiments. Experiments are carried out to verify the validity of the temperature measurement by using a thermoelectric couple junction imbedded in a cutting tool of high speed steel. Good agreement is obtained between the analytical results and the experimental ones for the temperature distributions on flank face of cutting tool with high speed steel. The analytical results show that the temperature on the top flank face of a tool is higher because of the difference of the friction velocity on each face of the tool.

1. 서 론

근년 기계가공 분야에서는 제품의 정밀도와 생산성 향상을 위한 자동화 기술과 무인화 공장의 실현을 위한 시스템 감시(Monitoring of System) 기술의 발전을 절실히 요구하고 있다.

공장자동화 감시 기술중 가장 강조되는 기본 요소의 하나는 기계가공 공정중에 발생하는 공구의 마멸 및 파손에 따른 공구수명의 문제이다. 공구의 마멸은 무인가공시 제품의 불량발생 및 비가공시간의 증가요인이 되고 가공오차를 발생시키는 직

접적인 원인이 된다.

공구마멸의 원인은 여러가지가 있으나 가장 주된 원인으로는 절삭작업에서 발생하는 절삭열에 기인된다는 판단이다.^{1)~4)}

최근 많은학자들의 공구수명에 대한 연구는 가공중 발생하는 절삭열과 마찰열이 절삭공구의 마멸과 파손에 미치는 원인 규명에 대한 연구로서 유한요소해석법을 적용한 예가 있다. 절삭기구에서 유한요소법의 활용은 해석영역을 세분화 할 수 있고 복잡한 경계조건의 처리가 유리한 장점이 있다.

수치해석에 있어 유한요소법을 이용한 절삭온

* 동아대학교 공과대학

** 경남전문대학

도분포 계산은 Stevenson⁵⁾ 등에 의해 처음 기술되었으며, Klamecki⁶⁾는 칩 생성기구를 수치해석하였고, Wright⁷⁾는 2차원 정상 절삭 상태에서 칩의 형상, 잔류응력 및 변형율에 대한 연구를 하였으며, Mori⁸⁾는 공구인선의 소성변형과 해석을 시뮬레이션 하였다.

Murarka⁹⁾ 등은 금속절삭시 전단변형 구역의 유출응력에 따른 온도와 변형율에 대한 실험식을 만들었으며, 그외 Tay¹⁰⁾ 등도 절삭온도분포를 수치해석 하였으나 이들은 구조해석적 차원의 연구에 많이 치중하였다.

실험적 연구에 의한 절삭공구의 온도측정은 Iwata¹¹⁾ 및 Boothroyd¹²⁾ 등에 의해 수행되었다.

한편 공구면의 온도분포를 실험적으로 측정 한 것으로서는, 공구 레이크면의 크레이터마모에 관한 보고가 있으나 플랭크면의 온도해석과 측정결과 등을 대응비교한 예는 드물다.

생산성 향상을 위한 공구마모의 예측은 공구수명의 문제로서 대단히 중요하다.

본 연구에서는 절삭공구의 대표적인 마모인 플랭크마모에 따른 온도분포를 알아 보기 위하여 주어진 가공조건에 따라 2차원 선삭가공 하였다.

플랭크면의 온도분포를 예측하기 위하여 수치해석적 방법과 실험적 방법을 사용 하였으며 수치해석은 유한요소법의 Galerkin 근사해법에 의한 프로그램을 작성하여 절삭온도분포를 예측하였고, 실험적 방법은 탄소공구강(SM45C)을 가공재로 하여 고속도강 공구에 삽입된 열전대에 의해 전도된 공구선단부의 온도를 측정하므로써 수치해석과 비교검토 하였다.

플랭크면의 온도분포 해석을 위한 모델 제시는 앞으로 절삭인자 규명을 위한 문제와 더불어 무인화 및 자동화기술을 위한 시스템 감시기술의 한 자료로서 활용 될것이다.

2. 기본이론 및 경계조건

해석영역은 칩, 가공물, 그리고 공구부분으로 나누며 다음과 같은 가정하에서 이론식을 전개한다.

절삭칩의 유출형태는 2차원 정상 절삭상태 하에

서 공구에 의해 연속적으로 분리되는 유동형 칩이며, 가공물의 성분은 균일하고 소성변형에 따른 변형에너지는 열에너지로 변화한다.

또 재료내의 발열상태 및 공구의 온도분포는 일정시간을 경과한 후 정상 절삭 상태에 있고 재료의 물리적 성질은 온도의 함수이다.

종래에는 이와같은 절삭온도의 문제를 비정상 의 문제로서 풀고 그것을 되풀이 하므로써 최종적인 정상온도 상태가 되어왔다. 그러나 가능하면 처음부터 일정시간을 경과한 후의 정상적인 절삭상태의 문제라고 생각하여 취급하는 것이 계산시간 등의 제한에 벗어날수 있다.

또 재료정수를 온도에 따라 변경하여 되풀이 계산하는것도 용이하게 된다.

본연구에서는 절삭흐름의 어떤장에서의 정상열전도 방정식을 이용하여 수치해석 하였다.

Fig. 1은 플랭크면의 온도분포를 계산하기위한 절삭영역을 표시하며, 하첨자 c와 t는 수직방향 및 축방향의 분력을 나타낸다.

2차원 절삭영역의 가정을 고려하여 다음과 같은 에너지 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \left(k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \dot{Q}_i = 0$$

$i = 1, 2$ (1)

여기서 ρ 는밀도 k 는열전도율 u 와 v 는 xy 방향의 속도 성분이며, x 와 y 는 좌표,

T 는 절삭온도를 나타낸다. \dot{Q}_i 는 단위체적내 발생되는 열로서 $i=1$ 은 칩의 소성변형에 따른 발생열, $i=2$ 는 공구와 칩의 경계에서 발생하는 마찰열로 나타낼 수 있다. 소성변형이 일어나는 전단영역

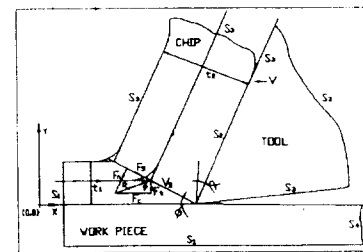


Fig. 1 Typical cross-section of the orthogonal machining process with force diagrams and boundary condition

의 한점에서 발생열 dQ_1 에 대해 고려하면 식(2)로 쓸 수 있다.

$$dQ_1 = C \dot{\gamma} w \quad (2)$$

C는 상수 w 는 칩의 폭이며 γ 는 소성 변형 영역에서의 평균 전단유동응력(Average Shear Flow Stress)으로서 소성영역내의 한점 에서 한점사이의 변화된 값으로 나타낸다.

소성영역에서 발생하는 총에너지 발생은 소비된 동력의 항으로 표시하여 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{Q}_1 = F_s V_s \quad (3)$$

식 (2)를 적분하여 식 (3)과 동일하게 하면,

C의 값은 식 (4)로 된다 F는 힘 V는 속도, 하첨자 s는 전단 (Shear)을 표시한다.

$$C = \frac{F_s V_s}{w \int_A \dot{\gamma} dA} \quad (4)$$

A는 절삭면적이며 가공물과 공구 사이의 마찰열은 절삭인선(Cutting edge)에서 임의의 x까지 거리의 열로써 식 (5)로 된다.

$$d\dot{Q}_2 = \tau v_n w \quad (5)$$

τ 는 전단 유동응력으로 V_n 는 칩이 공구와 경계를 이루는 면을 따라 지나는 속도를 나타내며 Tay^n 등은 식 (6)으로 나타낸다.

$$V_n = \frac{1}{3} v \sqrt{1 + \frac{8x}{l}} \quad (6)$$

n은 경사면 방향을 나타내며 l은 접촉길이 이다. 따라서 마찰에 의해서 발생되는 전열량은 식 (6)을 식 (5)에 대입하여 적분하면 다음식으로 표시된다.

$$\dot{Q}_2 = \frac{26}{36} w l \tau v \quad (7)$$

2차원 정상에너지식을 풀기 위한 경계조건도 Fig. 1처럼 고려된다. 여기서 S_1 은 가공물의 외벽이 주위공기와 접하고 있는 경계로서 주위의 공기 온도를 고정값으로 하며, S_2 는 칩과 공구가 마찰되는 영역을 나타낸다. 그리고 S_3 은 칩과 공구의 외벽이 주위공기와 접하고 있는 경계를 보여준다.

1) 경계 S_1 에서는 주위의 온도와 제1종 경계 조

건을 가지므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$x=0$, 그리고 $y=0$ 에서

$$T_w = T_a \quad (8)$$

이며, a 는 공기, w 는 벽면을 표시한다.

2) 경계 S_2 에서는 일정한 열이 발생된다고 고려하므로 제2종 경계조건이 취급된다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = q \quad (9)$$

3) 경계 S_3 에서는 주위와 대류열전달이 일어나므로 제3종 경계조건을 고려할 때 다음과 같이 표시된다. h 는 대류 열전달계수 이다

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_w - T_a) \quad (10)$$

4) 경계 S_4 에서는 가공물의 끝이 무한이라고 고려하면 단열로써 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

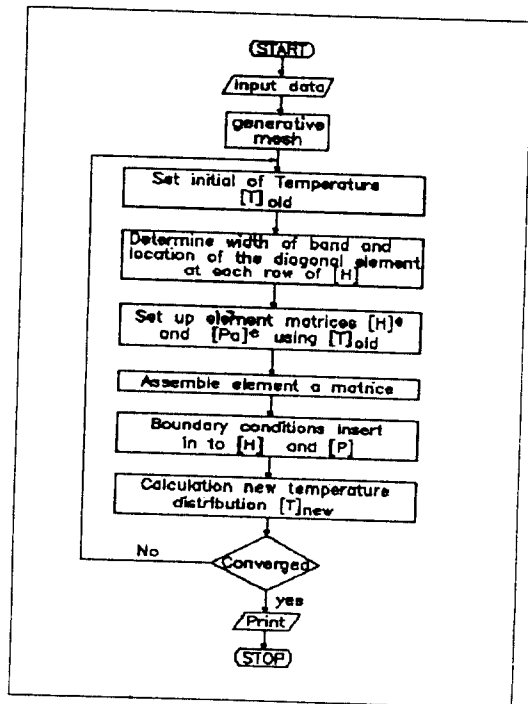


Fig. 2 Flow chart in temperature distributions analysis of program

3. 수치해석의 유통도

절삭조건에 따른 절삭온도 분포의 변동 특성을 계산하기 위한 유통도를 Fig. 2에 나타낸다.

온도분포를 해석하기 위한 입력 데이터(Data)는 요소수 714, 절점 813, 표준이 되는 요소의 기준온도는 22℃이다. 수렴반복 및 횡수의 경우 수렴은 해석반복값 차에 대한 비가 0.05 이하인 경우로 하였으며 해석의 수렴은 해석반복 횡수가 8인 경우 수렴으로 나타났다.

일반적으로 재료정수는 온도에 따라 변화하므로 재료정수를 구하여진 온도에 대해 수정하고 다시 매트릭스의 계산에서 같은 수순을 반복한다.

계산에 사용한 재료 데이터의 물리적 성질을 Table 1에 나타내며 입력된 데이터를 기초로하여 열강성 매트릭스[H]를 계산하고, 그 역행열식을 계산하므로 온도분포 [T]를 구한다.

발열량은 전단면 열량 q₁, 레이크면 열량 q₂, 플랭크면 열량 q₃를 각각 절삭실험에 의해 측정된 공구 레이크면 및 플랭크면의 응력에 기초하여 경계의 각 요소에 넣었다.

Table 1 Physical properties

KS D : 1020 Work piece(SM45C)				AISI : M2 Tool (High speed steel)
Specific gravity kg/m ³	Density g/cm ³	Thermal conductivity cal/cm ³ · cm · s · °C	Specific heat cal/g · °C	Average conductivity of the tool material cal/cm ³ · cm · s · °C
7.857143	0.28000	0.077499	0.109	0.500000E - 03

Table 2 Cutting conditions and measured data

Test No.	Cutting speed m/min	vertical component of resultant force Kg	Horizontal component of resultant force Kg	Width of the cut mm	Uncut chip thickness mm/rev	Tool - chip contact length mm	Shear angle degrees
01	79.257	36.075	7.025			1.674	
02	101.562	32.052	6.873			1.527	
03	119.023	30.921	6.204	1.20	0.20	1.402	35.6
04	139.267	29.168	5.877			1.106	
05	162.426	29.024	5.516			0.982	
11		37.225	9.206	1.20		1.184	38.72
12		34.072	8.002	1.00		1.202	31.64
13	134.274	30.836	7.076	0.90	0.20	1.251	28.45
14		25.687	5.934	0.80		1.273	25.45
15		22.664	4.112	0.70		1.273	23.17
21		30.922	6.804		0.20	1.200	
22		27.040	5.886		0.15	1.252	
23	142.526	22.276	4.275	1.2	0.10	1.252	36.5
24		17.552	3.202		0.07	1.305	
25		11.515	2.423		0.04	1.305	
Tool material : HSS				Tool clearance angle : 8 degrees			
Remark	Work piece : SM45C			Room temperature : 22°C			
	Rake angle : 18 degrees						

수치해석 프로그램에 사용된 절삭 데이터는 Table 2와 같으며, 이 계산은 소형전산기(main processor : 80486 DX 33MHz, RAM : 8MB)로 행하고 절삭조건에 따른 각 데이터의 온도분포를 계산하는 시간은 약 5분 정도이다.

4. 수치해석의 결과

입력된 데이터를 기초로하여 열강성 매트릭스 $[H]$ 을 계산하고, 그 역행열식을 계산하므로 온도분포 $T(x)$ 를 구하였다.

수치해석에 사용된 절삭 데이터 Table 2의 조건으로 정상절삭을 행하였을 때의 칩과 플랭크면의 온도분포의 계산치의 한예를 Fig. 3에 나타 내었다.

Fig. 3은 Test No. 3의 조건으로 절삭속도 119 m/min 주분력 31Kg 이송분력 6.2Kg 절입깊이 1.2mm 이송을 0.2mm/rev 인경우로서 플랭크면의 등온선의 간격이 30° 인것을 표시하고있다.

또 공구의 프랭크면의 최고온도점은 공구선단부에서 부터 0.75mm 거리를 둔점의 425(°C)이다.

이송과 절입 깊이를 일정히 했을때, 절삭속도를 80, 100, 120, 140, 160 m/min으로 증가 시킨 경우 플랭크면의 온도분포의 결과를 Fig.4(Test No. 1) Fig.5(Test No. 5)에 나타낸다.

그림에서 보는 바와 같이 절삭속도가 증가하면 플랭크면의 온도분포는 증가하며 이온도분포의 영향은 거의 변하지 않고 전체적으로 상승하여 간다.

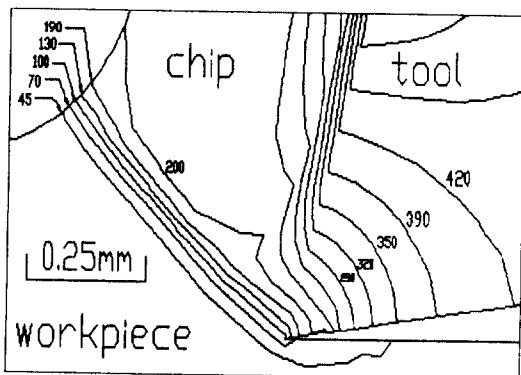


Fig. 3 Typical temperature distributions (Test No.3)

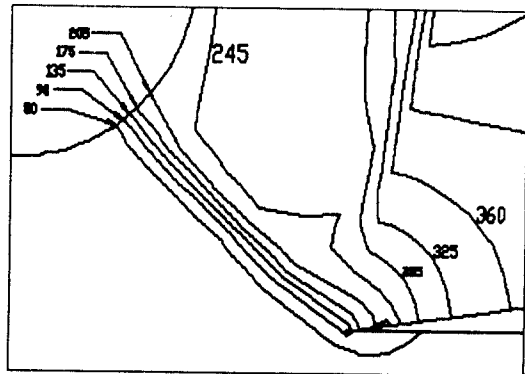


Fig. 4 Isotherms for V = 80m/min (Test No. 1)

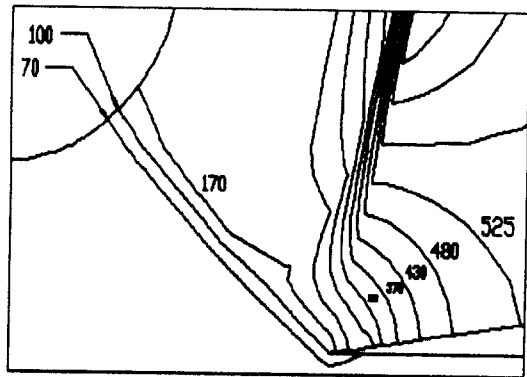


Fig. 5 Isotherms for V = 160m/min (Test No. 5)

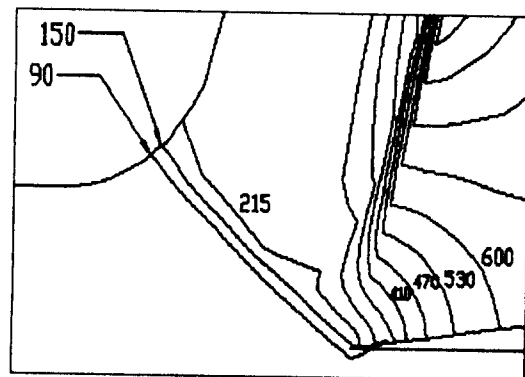


Fig. 6 Isotherms for V = 135m/min, width of the cut 1.20mm (Test No.11)

Fig.8(Test No. 22)과 Fig.9(Test No. 24)은 절삭 속도가 일정할 때 이송의 변화에 따른 플랭크면의 온도 분포를 나타내고 있다.

이 결과에서 절입의 깊이와 이송량이 증가함에

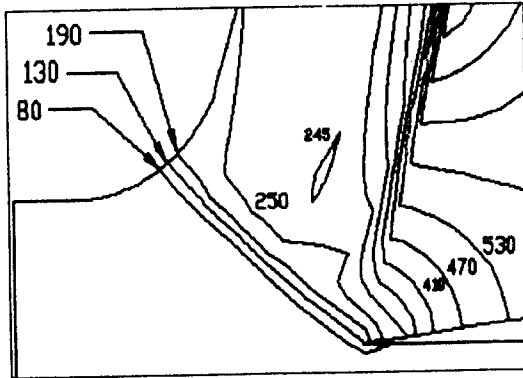


Fig. 7 Isothermals for V=135m/min. width of the cut 0.90mm(Test No.13)

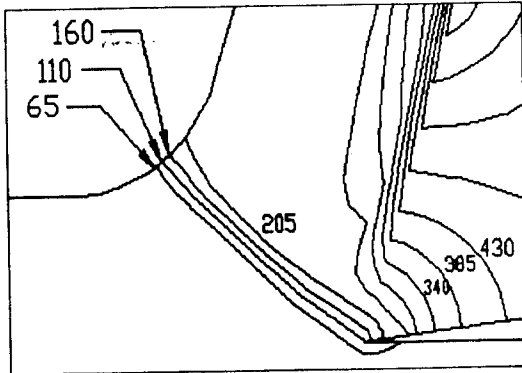


Fig. 8 Isothermals for V=140m/min.uncut chip thickness 0.15mm(Test No.22)

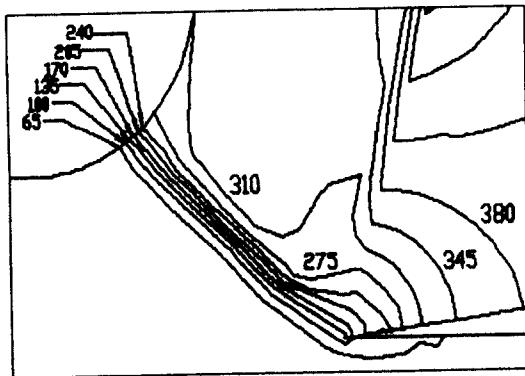


Fig. 9 Isothermals for V=140m/min. uncut chip thickness 0.07mm(Test No.24)

따라 절삭온도 분포의 계산치도 전체적으로 증가함을 보여주고 있다.

또, 그림에서 보는바와 같이 공구선단부로 부터 0.75mm 떨어진 플랭크면의 표면부근에 형성된 등온선의 분포는 플랭크마모와 유사하다. 이것은 플랭크마모와 절삭온도가 밀접한 관계에 있다는 것을 표시하며 이 절삭온도 분포가 공구마모에 직접적인 영향을 미친다.

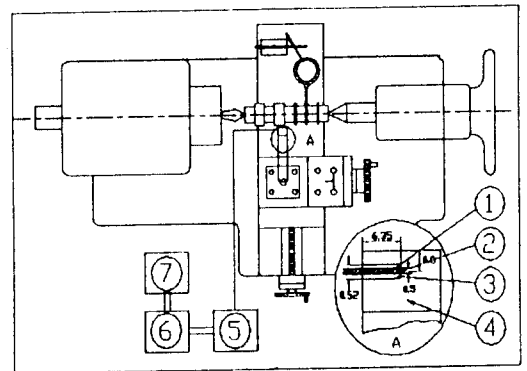
5. 실험

5. 1 실험장치 및 방법

절삭공구의 플랭크면의 온도분포를 측정하기 위한 실험장치의 개요를 Fig. 10에 나타내며, 가공재 및 공구의 기계적 및 화학적 성질을 Table 3에 나타낸다.

절삭실험은 고속 정밀선반에 의한 2차원 절삭으로 절삭조건은 80, 100, 120, 140, 160 m/min으로 변화하였으며 절입의 깊이 1.2mm, 이송 0.2mm, 절삭폭 3mm로써 절삭속도에 따른 절삭동력은 공구동력계를 이용하여 측정하므로 절삭력의 값을 구하였다.

가공재는 직경 40mm 길이 170mm를 건식절삭 상태에서 정밀가공 하여 시험편으로 사용하였으며 공구의 절입은 레이각 18도 플랭각 8도이다.



Measurement of cutting temperature

- ① Constantan wire ② Junction ③ Insulation
- ④ Bite ⑤ Amplifier ⑥ Measuring computer 8047 AT ⑦ X Y Recorder

Fig.10 Schematic lathe of experimental equipment

Table 3 Mechanical properties and chemical composition of materials

Materials	Mechanical properties				Chemical composition(%)									
	Yielding strength	Tensile stress	Hardness	Elongation	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V
	kg/mm ²	kg/mm ²		%										
SM45C	22	38.75	115 HRB	25.5	0.43	0.25	0.65	0.022	0.024					
H.S.S	92	182	64 HRC	14	0.825	0.37	0.23	0.020	0.021	4.27	0.28	5.28	6.56	1.96

플랭크면의 온도분포를 측정하기 위해서 공구 선단부로부터 경사면 방향으로 0.46mm인 점을 센타로 하여 공구밀면에 $\phi 0.52$ 의 홈을 공구선단부로부터 0.75mm를 남겨두고 Ag-W 전극을 사용하여 방전가공(C. N. C Wire Cut Electrical Discharge Drilling)한 홈에 절연 피막처리를 한 $\phi 0.5mm$ 의 열전대선(Constantan - Wire)을 삽입하고 내열용 접착재를 절입 불합함으로써 열의 유출을 최대한 억제하고, 공구선단부로부터 플랭크면 상으로 0.75mm 인점에 전극의 센타를 심으로써 플랭크면의 최고 온도점을 알고자 했다.

플랭크면에서의 공기 방출열을 억제하고 플랭크마모를 관찰하기 위하여 가공물과의 접촉길이를 0.2mm 정도 두고 실험을 행하였다.

Fig. 10에서 공구선단부의 확대도 A를 나타내며, 공구와 공작물 재료는 다른 열전능을 가지므로 절삭조건의 변화에 따른 절삭온도의 변동특성으로 인하여 공구면에 전도되는 발생열은 절삭점의 온도 상승에 따른 열기전력이 되므로 열전대에 전달된 이온도는 열측정기기(Measuring Computer 8047 AT System)에 입력 되어 모니터에서 내용을 관찰함과 동시에 연결된 기록계로 결과의 온도값을 볼수 있다.

그러나 공구 측정부에 홈을 파므로써 측정점의 온도가 상승하여 측정치에 오차가 생길것으로 생각되나 열전대에 전달된 열이 방열의 효과를 가져오므로 상쇄 될 것으로 본다.

열전대 측정법은 한점의 온도를 측정하므로 선단부의 온도측정에 극히제한 되어있어 절삭점 부근의 온도분포를 측정하는데는 적당치 않으나 측정이 간단하므로 실험에 많이 이용되고 있으며 이 측정온도를 절삭온도로 사용하므로써 다른점의 온도를 예측할 수 있다.

실험에서는 가공물을 양센타로 지지하여 회전을 원활하게 하였고 절입깊이는 절삭상태에서 일정하게 유지되도록 공구대 타단에 다이얼게이지(0.001mm)를 설치하여 절입깊이를 확인하며 건식절삭을 하였다. 속도의 변환은 주축의 속도변환 기구가 기어식이므로 주축회전수를 변화시키면서 적경감소율에 따른 절삭속도의 범위가 5% 이내가 되도록 유지 하였다.

이 열전대 측정은 공구 선단부에서 일정거리 떨어진 위치의 한점의 측정값이므로 공구면에 전도된 온도분포 상태는 측정된 온도값을 이용한 해석적방법에 의해 예측할 수 있다.

5.2 실험결과

Fig. 11은 2차원선삭시 고속도강 공구의 플랭크면의 온도분포를 수치해석과 실험에서 구한것을 표시한 것이다.

절삭조건에 따른 온도분포의 해석값은 실선으로 표시 하였으며 한편 선단부의 한 포인트의 온도값은 실험으로 구하여 이 값을 부호로 같은 그림안에 표시하고 있다. (Test No.1,3,5)

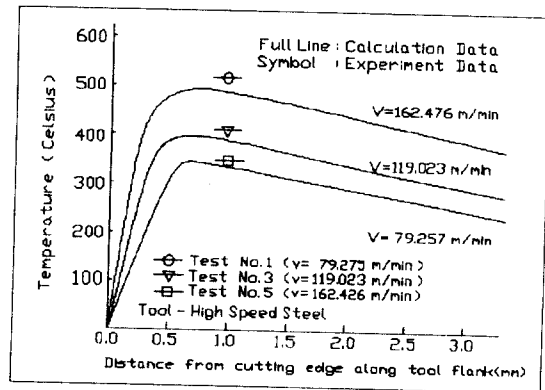


Fig. 11 Effect of cutting speed on flank face temperatures for conditions as test No. 1.3.5

플랭크면의 온도분포는 공구선단 부로부터 0.75mm 떨어진 곳에서 최대온도를 가지며 전반적으로 등분포 그래프를 그리며 온도분포의 경향은 절삭속도가 상승하면 함께 서서히 상승하고 점차 상승율이 작아지는 경향을 보이고 있다.

Fig. 11에서 보는바와 같이 플랭크면의 절삭온도의 실험치 값이 수치해석의 값보다 약간 높아져 있다. 이것은 전단면에 있어 전단변형으로 가열된 가공재가 돌로 갈라져 칩으로된 가공재쪽은 그 두께가 두꺼워진만큼 감속하여 공구경사면을 마찰하여 가열하고 절삭가공면으로된 쪽은 절삭속도로 플랭크면을 마찰하기 때문이다.

공구경사면 및 플랭크면에 있어서 전단응력은 거의 같은 값이 얻어진다고 생각하였을때 공구플랭크면 쪽이 절삭비만큼 단위면적당의 발열량이 높아져 그때문에 공구플랭크면의 실험온도가 공구선단부에서는 수치해석의 값보다 높아진다고 생각된다.

또 절삭초기에 발생한 이열은 공구플랭크면 쪽으로 확산되어 어느절삭속도 이상에서는 온도가 급증함을 보여주고 있다.

절삭조건의 변화에 따른 플랭크면의 절삭온도가 해석결과의 값과 비교하여 일정한 값을 가져 비교적 좋은 일치율을 나타내고 있으므로 해석방법의 타당성이 입증된다.

실험결과 절삭폭에 대한 온도변화는 거의 없음을 알 수 있었다.

6. 결 론

주어진 절삭조건이 플랭크 마모에 미치는 영향을 알아보기 위하여 고속도강 공구로서 탄소강을 2차원 선삭하여 수치해석 및 측정을 하므로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 2차원 선삭시 수치해석법에 의해 플랭크면의 절삭온도 분포는 쉽게 구할수 있다.
- 2) 플랭크면의 실측온도는 해석값과 5%이내로 잘일치 하였다.
- 3) 플랭크면의 절삭온도 최대치는 공구선단부로부터 0.75mm 떨어진 곳에 나타났다.
- 4) 플랭크면의 최고 온도점의 위치를 중심으로

형성된 등온선의 분포는 플랭크 마모에 직접적인 영향을 미친다.

참고문헌

- 1) Rao, I. V. and Lal, g. k., 1977, "Tool Life at High Cutting Speed", Int. J. Mach. Tool Des., Vol. 17, pp.235 - 243.
- 2) Wright, p. K., 1978, "Correlation of Tempering Effects with Temperature Distributions in Cutting Tools", ASME Journal of Engineering for Industry., Vol.100, pp. 131 - 136.
- 3) Oxley, P. L. B., 1961, "An Analysis for Orthogonal Cutting with Restricted Tool Chip Contact", Int.J.Mech. Sci., vol. 4, pp. 129 - 135.
- 4) Venkatesh, V. C. and Satchithanandam, M., 1980 "A Discussion on Tool Life Criteria and Total Failure Causes", Ann.CIRP., Vol. 29, No. 1, pp. 19 - 22.
- 5) Tay, A. O., Stevenson, M. G. and de Vahl Davis, G., 1974, "Using the Finite Element Method to Determine Temperature Distributions in Orthogonal Machining", Proc. Inst. of Mech. Engrs., Vol. 188, pp. 627 - 638.
- 6) Klamecki, B. E., 1973, "Incipient Chip Formation in Metal Cutting - A Three Dimension Finite Element Analysis", Ph.D Thesis., Univ. of Illinois at Urbana Champaign.
- 7) Wright, P. K., Stevenson, M. G. and Chow, J. G., 1983, "Further Developments in Applying the Finite Element Method to the Calculation of Temperature Distributions in Machining and Comparisons with Experiment", Trans. ASME., Vol. 105, pp. 149 - 154.
- 8) Mori, K., Osakada, K. and Fukuda, M., 1983, "Simulation of Severe Plastic Deformation by Finite Element Method with Spatially Fixed Elements", Int. J. Mech. Sci., Vol. 25, No. 11, pp. 775 - 783.
- 9) Murarka, P. D., Hinduja, S. and Barrow, G., 1981, "Influence of Strain, Strain - Rate and Temperature on the Flow Stress in the Primary Deformation Zone in Metal Cutting", Int. JMTDR., Vol. 21, No. 3/4, pp. 207 - 216.

- 10) Tay, A. O., 1973, "A Numerical Study of the Temperature Distribution Generated - During Orthogonal Machining" University of N.S.W., Ph. D. thesis.
- 11) Iwata, K., Osakada, K. and Terasaka, Y., 1984, "Process Modeling of Orthogonal Cutting by the Rigid - Plastic Finite Element Method", Trans. ASME., Vol. 106, pp. 132 - 138.
- 12) Boothroyd, G., Sc, B. and D, Ph., 1963, "Temperatures in Orthogonal Metal Cutting", Proc Insten Mech Engrs., Vol. 177, No. 29, pp. 789 - 803.