

2차원 선삭시 유한요소법에 의한 고속도강공구의 절삭온도 예측

전 태 옥,* 배 춘 익**

Prediction of Cutting Temperature at High Speed Steel in Orthogonal Turning based on Finite Element Method

Tae-Ok Jun,* Choon-Eek Bae**

ABSTRACT

Temperature distribution on the rake face and 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 both the rake face and 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 than it on the top rake face of the tool because of the difference of the friction velocity on each face of the tool.

Key Words : Orthogonal Turning(2차원선삭), Rake Face(공구경사면), Shear Flow Stress(전단유동응력), Temperature Distribution(온도분포), Flank Face(공구여유면), Finite Element Method(유한요소법)

Nomenclature

h : heat transfer coefficient
 k : thermal conductivity
 l : contact length
 t_1 : undeformed chip thickness
 t_2 : deformed chip thickness
 u : x Component of velocity

v : y Component of velocity
 w : width of chip
 x, y : cartesian coordinates
 A : uncut chip of area
 F : force
 N : shape function
 T : temperature
 V : velocity

* 동아대학교 공과대학 기계공학과

** 경남전문대학 기계설계학과

- α : rake angle
- ϕ : shear angle
- ρ : density
- τ : shear stress
- $\dot{\gamma}$: strain rate

1. 서 론

최근 기계가공 분야에서는 생산성 향상을 위한 자동화 기술과 무인화 공장의 실현을 위하여 시스템 감시(monitoring of system) 기술의 발전을 필요로 하고있다

공장자동화 감시 기술중 가장 강조되는 기본요소의 하나는 기계가공 공정중에 발생하는 공구의 마멸 및 파손에 따른 공구수명의 문제이다. 공구의 마멸은 무인가 공시 제품의 불량발생 및 비가공시간의 증가요인이 되고 가공오차를 발생시키는 직접적인 원인이 된다.

공구마멸의 원인은 여러가지가 있으나 가장 주된 원인으로서는 절삭시 발생하는 절삭열에 기인 된다는 판단이다.⁽¹⁻⁴⁾ 이 절삭열이 공구의 전단면 및 공구의 경사면 등의 저항에 대한 에너지로 소모되므로 절삭온도의 변화가 공구 마멸을 증대시키는 원인이 된다고 생각된다.

또한 공구전단부의 압력에너지의 변화로 절삭온도가 상승하게 되면 마모가 크게 증가되고 공구는 약해지면서 충분한 기능을 발휘하지 못하고 결국 마멸 및 파손이 일어날 수 있을 것이다.

근년 많은 학자들의 공구수명에 대한 연구는 가공중 발생하는 절삭열과 마찰열이 절삭공구의 마멸과 파손에 미치는 원인 규명에 대한 연구로서, 유한요소해석법을 적용하는 경우가 있다. 절삭기공에서 유한요소의 활용은 해석영역을 세분화 할 수 있고 복잡한 경계조건 처리가 유리한 장점이 있다.

수치해석에 있어 유한요소법을 이용한 절삭온도분포 계산은 Stevenson⁽⁵⁾ 등에 의해 처음 기술 되었으며, Klamecki⁽⁶⁾ 등은 칩(chip)의 생성기구를 수치해석 하였고, Wright⁽⁷⁾는 2차원 정상 절삭 상태에서 칩의 형상, 잔류응력 및 변형률에 대한 연구를 하였으며, Mori⁽⁸⁾는 공구인선의 소성변형과 해석을 시뮬레이션(simulation)하였다.

또 Murarka⁽⁹⁾등은 금속절삭시 전단변형 구역의 유출응력에 따른 온도와 변형률에 대한 실험식을 만들었으며, 그의 Tay⁽¹⁰⁾등도 절삭온도분포를 수치해석 하였으나 이들은 구조해석적 차원의 연구에 많이 치중하였다.

실험적연구에 의한 절삭온도 측정은 Iwata⁽¹¹⁾ 및 Boothroyd⁽¹²⁾ 등에 의해 수행되었다.

한편 공구면의 온도분포를 실험적으로 측정된 것으로는, 공구 레이크면 및 플랭크면을 포함하여 공구인선부의 온도해석과 측정결과 등을 대응비교한 예는 있지만, 공구의 활용도에 비하여 그연구 범위가 좁은 편이다.

본 연구에서는 2차원 선삭가공시 가공조건에 따른 레이크면과 플랭크면의 절삭온도를 측정 및 예측하기 위하여 실험적 방법과 수치해석적 방법을 사용하였다.

수치해석은 유한요소해석의 Galerkin근사해법을 사용하여, 가공재, 칩 및 공구의 정상온도 분포를 계산하는 프로그램(program)을 작성하여 절삭조건에 대한 온도분포를 예측하였다.

실험적 방법은 탄소강(SM45C)을 가공재로 하여 고속도강공구에 삽입된 열전대에 의해 전도(conduction)된 공구 선단부의 온도를 측정하므로써 수치해석과 비교 하였으며, 온도분포를 구하기위한 주요 절삭인자는 절삭력, 이송율, 절입깊이 및 절삭속도의 변화를 절삭조건에 활용하였다.

특히 해석해에서는 고속도강뿐만 아니라 여러 종류의 공구 및 가공재에 대한 물성치, 경계조건 그리고 입력조건에 따라 광범위하게 공구수명이 예측되므로 그 활용 가치가 있다고 사료된다.

2. 이 론

2.1 기본방정식

절삭의 영역은 칩, 가공물, 그리고 공구 부분으로 나누며 칩은 공구에 의해 연속적으로 분리 되는 2차원 정상 절삭상태로서 다음과 같이 가정한다.

- 1) 절삭가공중 연속형 칩이 유출된다.
- 2) 가공물의 성분이 균일하고 소성변형에 따른 변형 에너지는 열로 변화 한다.
- 3) 재료 내의 발열상태 및 공구의 온도분포는 일정시간을 경과한 후 정상절삭 상태이다.
- 4) 재료의 물리적 성질은 온도의 함수이다.

그러므로 2차원 절삭영역의 가정을 고려하여 다음과 같이 에너지 방정식을 나타낼 수 있다.

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

$i = 1, 2$ (1)

3.1 수치해석식

해석방법은 경계조건을 고려하여 식(1)을 유한요소 근사해법식(Galerkin Method)에 적용시키면 다음과 같이 표시된다.

$$T = [N]\{T\}^e \quad (12)$$

여기서 $[N]$ 은 형상함수이며 사각형의 요소는 다음의 단순한 형으로 나타 내어진다.

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) \\ N_2 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta) \\ N_4 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 ξ, η 는 고려된 사각요소의 국지 좌표계로서 각각 x, y 방향으로 -1에서 +1까지의 변화로 정의된다.

식(1)에 식(12)를 대입하여 한요소에 대한 전체영역으로 나타내면 식 (14)와 같이된다.

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} N_i \left[\left(k_x \frac{\partial^2}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \right] [N]\{T\}^e + \\ \left[\rho C_p \left(u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] [N] \cdot \{T\}^e + \dot{Q} \right] dx dy \\ = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

식(11)을 그린의 정리(Green's theorem)와, 식(8)~식(11)의 경계요소에 적용시켜 각요소를 전체영역에 대한 수치해석으로 정리하여 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega} \left[k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial [N]}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial [N]}{\partial y} \right] \\ + \rho C_p u N_i \frac{\partial [N]}{\partial x} + \rho C_p v \cdot N_i \frac{\partial [N]}{\partial y} \right] \{T\}^e dx \cdot dy \\ - \iint_{\Omega} N_i \dot{Q} dx \cdot dy + \int_{sq} N_i q \cdot ds + \int_{sh} N_i h [N]\{T\}^e \cdot \\ ds - \int_{sh} N_i h T_0 ds = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 식(15)를 매트릭스(matrices)형으로 나타내 면 식(16)과 같이 표시 된다.

$$[H]\{T\} + \{F\} = 0 \quad (16)$$

3.2 수치해석 방법

수치해석은 가공재의 전단영역으로 부터 가공재, 공 구, 칩등을 4각형 요소로 분할 하였으며, 칩, 가공물, 공구의 요소수는 270, 177, 267요소로 총 714요소이며, 절점수는 각각 308, 191, 314 절점으로 총 813절 점이다. 이 요소분할은 절점번호 538을 기준으로 경계 조건을 구분 할 수 있다.

요소분할에 사용된 절삭후의 칩의 두께는 0.5mm, 가공재의 요소분할 면적은 1×5mm이며, 공구는 폭 12.7×길이 50mm이다.

해석에 사용된 주요 요소 및 절점 번호는 전단 구역에서 의 절점의 수 175, 마지막 요소번호는 142, 칩의 마지막 요소번호는 282, 가공물의 마지막 요소번호는 447이다.

또 요소번호의 매김은 전단의 선단부에서 부터 시작 하여 칩, 공구인선부, 공구 생크 순으로 이들 각각의 요소번호를 확인 할 수 있다.

전단면부와 가공물 사이의 경계를 형성하는 바깥쪽 요소수는 22요소로 이 경계를 따른 온도가 모든방의 온 도로 정해지며, 전단구역의 유선상의 절점의 수는 27절 점이다.

단위요소의 최소 한변의 길이는 0.015mm에서 부터 공구 생크 끝부분의 7.6mm 까지이다.

Fig. 2는 수치해석에 사용된 4각형 요소 및 절점번호를 나타낸다.

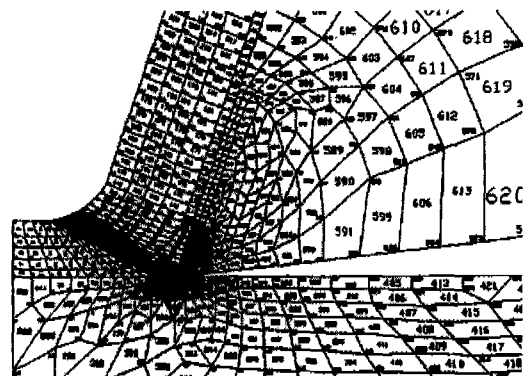


Fig. 2 Expression of quadrilateral elements and nodes number

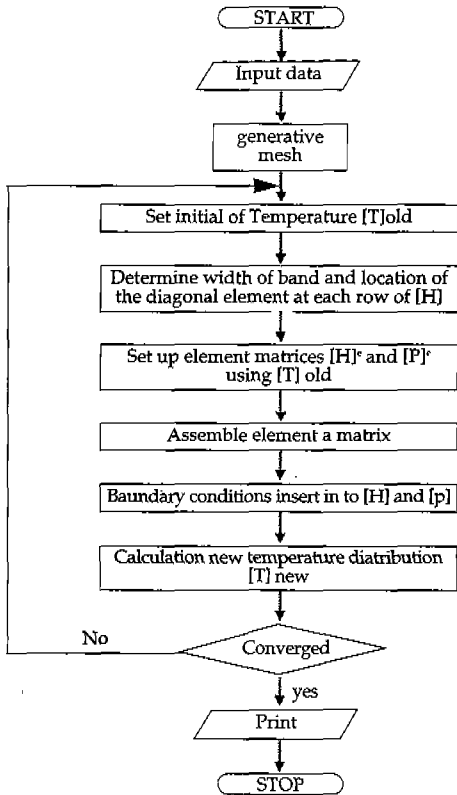


Fig. 3 Flow chart in temperature distributions analysis of program

3.3 수치해석의 유동도

절삭조건의 변화에 따른 절삭온도 분포의 변동 특성을

Table 1 Physical properties

KS D: 1020 Work piece (S45C)				Metals Handbook 1 AISI: M2 Tool (High speed steel)	
Specific gravity (kg/cm ³)	Density (g/cm ³)	Thermal conductivity (cal/cm ² ·cm·s·°C)	Specific heat (cal/g·°C)	Average conductivity of the tool material (cal/cm ² ·cm·s·°C)	
7.857143	0.26000	0.0774996	0.109	0.500000E-03	

계산하기 위한 유동도(flow chart)는 Fig. 3과 같다.

온도분포를 해석하기위한 입력 데이터는 총 요소수 및 절점수이며, 표준이 되는 요소의 기준온도는 22℃이다. 수렴반복 및 횟수의 경우 수렴은 해석반복값 차에 대한 비가 0.05 이하인 경우로 하였으며, 해석의 수렴은 해석반복 횟수가 8인 경우 수렴으로 나타났다.

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

계산에 사용된 재료 데이터의 물리적 성질을 Table 1에 나타내며 입력된 데이터를 기초로하여 열강성 매트릭스 [H]을 계산하고, 그 역행열식을 계산하므로 온도 분포 (T)를 구한다.

전단면 열량 q_1 은, 식 (3)으로 소성영역에서의 발열량으로 계산되어 식 (14)에 입력되었다. 경계조건 s_1 에서 온도는 대기온도 22℃를 기준으로 하고, 경계 s_2 에서의 발생열은 칩과 공구의 마찰열로서 q_2 로써 입력되었다. 그리고 경계 s_3 에서의 대류열전달은 대기온도를 기준으로 하여 계산 수행되며 식 (10)으로 입력되었고, 경계 s_4 에서는 단열로 입력되며 열량의 단위는 Kcal/min cm²이다.

Table 2 Cutting conditione and messured data

Test No.	Cutting speed (m/min)	Vertical component of resultant force (Kg)	Horizontal component of resultant force (Kg)	Depth of cut (mm)	Uncut chip thickness (mm/rev)	Tool-chip contact length (mm)	Shear Angle (degrees)	q_1	q_2	q_3
01	79.257	36.075	7.025	1.20	0.20	1.674	35.6	48765	93	2.063
02	101.562	32.052	6.873			1.527		51258	133	2.420
03	119.023	30.921	6.204			1.402		49800	164	2.590
04	139.267	29.168	5.877			1.106		46137	224	2.921
05	162.426	29.024	5.516			0.982		46035	286	3.251
11	134.274	37.225	9.206	1.20	0.20	1.184	38.72	57984	306	3.930
12		34.072	8.002	1.00		1.202	31.64	62730	261	3.802
13		30.836	7.076	0.90		1.251	28.45	60470	224	3.461
14		25.687	5.934	0.80		1.273	25.45	52850	185	3.005
15		22.664	4.112	0.70		1.273	23.17	51382	155	2.697
21	142.526	30.922	6.804	1.20	0.20	1.200	36.5	48494	238	3.124
22		27.040	5.886		0.15	1.252		56856	198	2.856
23		22.276	4.275		0.10	1.252		72429	156	2.876
24		17.552	3.202		0.07	1.305		82277	116	2.462
25		11.515	2.423		0.04	1.305		91846	80	2.261

수치해석 프로그램에 사용한 절삭 데이터는 Table 2와 같으며, Table의 전단각 측정은 2차원 절삭모델에서 절입의 깊이 변화에 따른 절삭 전후의 칩의 두께비를 계산하여 전단각을 이론적으로 구하고, 이값을 참고하여 탄소강 선삭 실험에서의 시편을 확대경에서 실측하여 비교하므로 전단각의 값을 구하였고, 공구와 칩의 접촉길이는 주어진 절삭조건에 따라 선삭하였을 경우 레이크면에 대한 유출 칩의 마찰 길이를 공구 선단부로부터 실측하므로 구한 값이다.

주어진 절삭조건 변화에 대한 온도 분포계산은 전자 계산기를 사용하여 각각 계산하였다.⁽¹⁵⁾

3.4 수치해석의 결과

Table 2의 절삭조건으로 수치해석을 행 하였을때 각 절점의 온도분포 계산값은 Table 3과 같으며, Fig. 4는 각절점의 온도값 Table 3을 사용하여 해석모델에 등온선 그래프를 나타낸 것이다.

Table 3은 Test No.3의 절삭조건으로 813절점의 절삭온도 분포의 일부분을 나타낸 것이며, Fig. 4는 절삭속도 120m/min, 주분력 31kg, 이송분력 6.2kg, 절입깊이 1.2mm, 이송율 0.2mm/rev의 절삭조건으로 수치해석한 것으로 등온선의 간격은 30℃이며, 해석결과 Table 3에서 보는바와 같이 레이크면의 최고 절삭온도 값은 절점번호 515절점의 601℃이며 이절점은 공구 선단부로부터 레이크면 상으로 0.75mm 떨어진 지점이며, 플랭크면의 최고 온도값은 절점번호 482절점의 425℃로써 이점은 공구선단부로부터 0.45mm 거리를 갖는 곳이다.

절입의 깊이와 이송율을 일정하게 하였을때, 절삭속

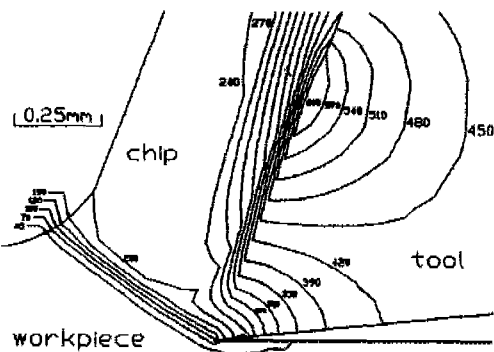


Fig. 4 Typical temperature distributions (Test No.3)

Table 3 Temperature distribution on the node Points in case of Test No.3

NO.	Temp.	NO.	Temp.	NO.	Temp.	NO.	Temp.
473	528,828	474	513,902	475	482,378	476	489,140
477	498,335	478	484,346	479	450,881	480	430,225
481	428,428	482	425,157	483	266,836	484	214,708
485	215,138	486	215,385	487	348,223	488	588,824
489	538,083	490	527,889	491	548,805	492	574,340
493	558,041	494	583,871	495	538,318	496	528,732
497	515,281	498	503,754	499	478,741	500	458,810
501	448,886	502	438,428	503	428,847	504	421,804
505	418,827	506	417,772	507	288,848	508	214,381
509	214,683	510	218,366	511	385,282	512	383,181
513	558,183	514	581,738	515	600,827	516	582,886
517	588,242	518	584,182	519	537,881	520	508,138
521	488,534	522	484,878	523	448,208	524	433,813

도를 100, 120, 140 m/min으로 증가 시킨 경우 절삭 온도분포의 해석결과를 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 5와 Fig. 6은 Test No. 02, 03, 04의 경우로서, 레이크면의 절삭온도 분포를 공구선단부로부터 3.5mm, 플랭크면의 온도분포를 공구선단부로부터 3mm 까지 표시 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 절삭속도가 증가함에 따라 레이크면 및 플랭크면의 절삭 온도분포도 다 같이 증가하며, 레이크면은 공구 선단부에서 부터 0.75mm, 플랭크면은 공구선단부로부터 0.45mm 까지 절삭온도가 급격히 증가하며 그후 온도

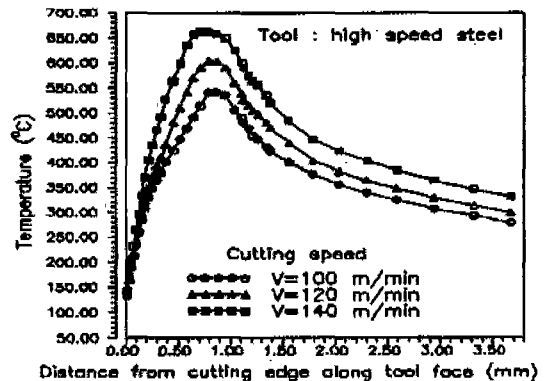


Fig. 5 Effect of cutting speed on rake face temperature

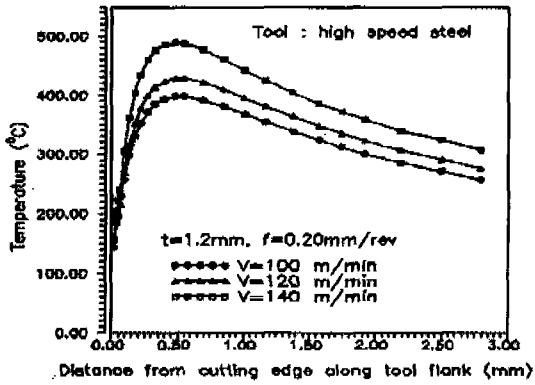


Fig. 6 Effect of cutting speed on flank face temperature

분포의 경향은 급격한 변화없이 전체적으로 일정한 비율로 서서히 감소하여 간다.

절삭조건의 변화에 대한 온도분포를 알아보기 위하여 절삭속도 135 m/min, 이송율 0.2 mm/rev로 일정하게 하고 절입의 깊이를 변화 시켰을 경우 플랭크면의 온도분포의 예를 Fig. 7에 나타내었으며, Fig. 7은 절

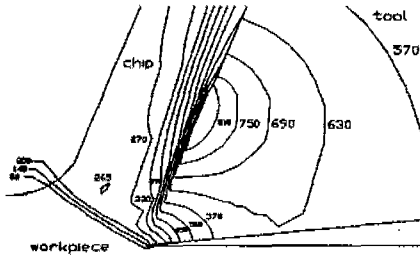


Fig. 7 Isothermals for $V=135\text{m/min}$, depth of the cut 1.0mm (Test No. 12)

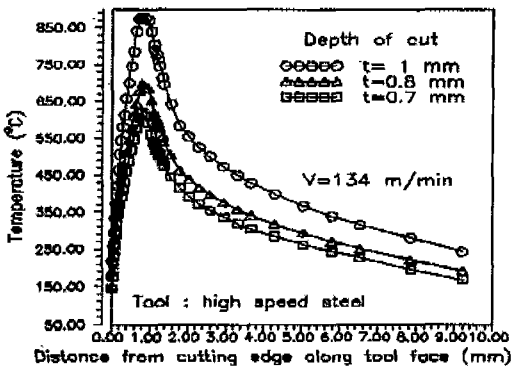


Fig. 8 Effect of depth of cut on rake face temperature

입의 깊이 변화가 1.0mm인 경우이며, 레이크면의 최고온도점은 514절점의 877℃이고, 플랭크면의 최고 온도는 절점번호 482로 629℃이다.

Fig. 8 및 Fig. 9는 Test No. 12, 14, 15의 경우로써 절입을 1.0, 0.8, 0.7mm로 변화 시켰을 경우, 레이크면과 플랭크면의 온도분포를 공구 선단부로부터 표시하였다.

절입의 깊이가 증가함에 따라 온도분포의 계산값도 전체적으로 증가하며 공구 선단부로부터 최고 높은 온도점을 기점으로 면의 길이가 증가 할수록 절삭온도가 점차 감소하여 간다.

이송율의 변화에 따른 공구 인선부의 온도분포를 알아보기 위하여 절삭속도 143m/min, 절입을 1.2mm로 일정하게 하였을 경우 온도분포의 예를 Fig. 10에 표시 하였다.

Fig. 10은 이송율이 0.04mm/rev인 경우이며, 레이크면의 최고 온도점은 514절점인 464℃, 플랭크면의 최고온도점은 절점번호 460인 3580C를 나타내었다.

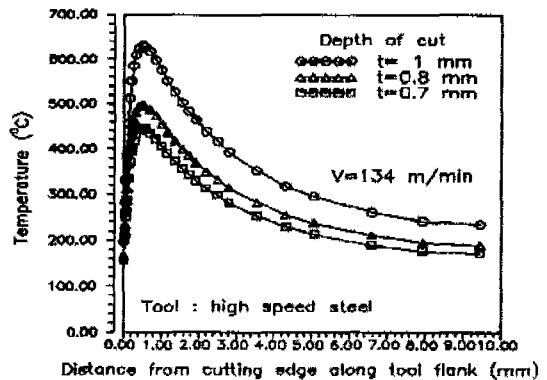


Fig. 9 Effect of depth of cut on flank face temperature

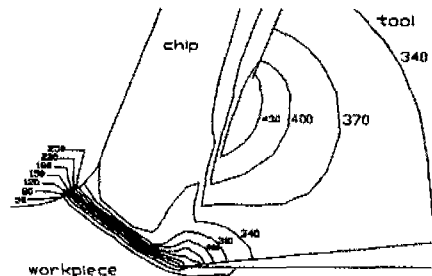


Fig. 10 Isothermals for $V=143\text{m/min}$, uncut chip thickness 0.04mm/rev (Test No. 25)

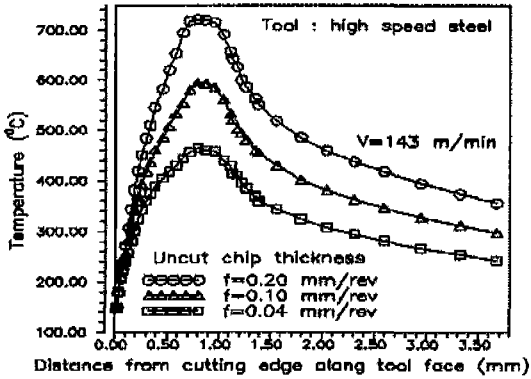


Fig. 11 Effect of uncut chip thickness on rake face temperature

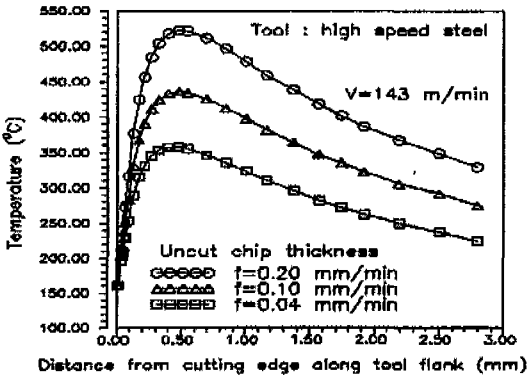


Fig. 12 Effect of uncut chip thickness on flank face temperature

Fig. 11 및 12는 Test No. 21, 23, 25 로써 절삭 속도와 절입을 일정히 하였을때 이송율을 0.2, 0.1, 0.04mm/rev로 변화 하였을 경우 공구선단부로 부터 레이크면을 3.8mm, 플랭크면을 따라 3mm까지의 온도 분포를 나타 내었으며, 이송율이 증가함에 따라, 절삭초기에 발생된 열이 공구쪽으로 확산되어 온도분포의 계산값도 어느 속도이상에서 온도가 급증함을 보이며 전체적으로 증가한다.

이상의 결과에서 절입의 깊이와 이송량이 증가 함에 따라 절삭온도 분포의 계산값도 전체적으로 증가하며, 레이크면 및 플랭크면의 최고 온도점의 위치로 부터 형성된 등온선의 분포는 크레이트(crater) 및 플랭크마모와 유사하다. 이것은 크레이트 및 플랭크마모가 절삭온

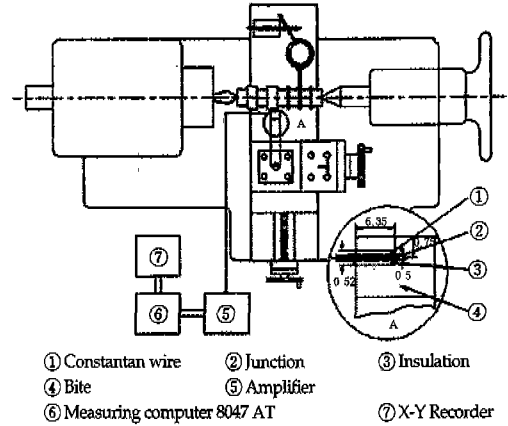


Fig. 13 Schematic lathe of experimental equipment

도와 밀접한 관계에 있다는 것을 표시하며, 이 절삭온도 분포가 공구마모에 직접적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

그러므로 공구의 경도와 강도는 절삭온도의 상승에 좌우되어 공구수명은 온도의 상승과 더불어 감소 되고 마모가 증가하면서 절삭저항은 증가하게 되므로 공구마모의 진행속도는 빨라 질 것이다.

4. 실험

4.1 실험장치 및 방법

고속도강공구의 레이크면 및 플랭크면의 절삭온도를 측정하기 위한 실험장치의 개요를 Fig. 13에 나타내며 가공재 및 공구의 기계적 및 화학적 성질을 Table 4에 표시하였다.

절삭실험은 고속 정밀선반에서 행 하였으며, 절삭속도는 80, 100, 120, 140, 160, 134, 143m/min 으로 변화하였고, 절입은 0.70에서 1.2mm, 이송율은 0.04mm/rev에서 0.2mm/rev까지 변화하였다. 절삭 조건에 따른 절삭동력은 공구동력계(TSM-TH type)를 이용하여 측정하므로 절삭력의 값을 구하였다.

가공재는 직경 40mm, 길이 170mm를 정밀 가공하여 시험편으로 사용하였다. 폭 12.7mm의 고속도강공구가 가공물의 폭 5mm를 절삭할 수 있도록 시험편에 홈가공을 하였으며, 공구의 절입은 레이크각 18°, 플랭크각 8°이다.

Table 4 Mechanical properties and chemical composition of materials

Materials	Mechanical properties				Chemical composition (wt. %)									
	Yielding strength (kg/mm ²)	Tensile stress (kg/mm ²)	Hardness	Elongation (%)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	W	V
SM45C	22	36.75	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

레이크면의 절삭온도를 측정하기 위하여 공구선단부로부터 레이크면 방향으로 0.52mm, 0.75mm, 0.85mm, 1.25mm, 1.55mm의 거리에 두께 0.2mm를 남겨두고 ϕ 0.52mm의 홈을 깊이 6.35mm로 가공하였고, 플랭크면의 절삭온도를 측정하기 위해서 공구선단부로부터 플랭크면 방향으로 0.45mm, 0.7mm, 1mm인 점에 ϕ 0.52mm의 홈을 공구 밀면에서 8°의 경사면을 따라 방전가공(C.N.C wire cut electrical discharge drilling)하였으며, 이 홈에 절연 피막처리를 한 ϕ 0.5mm의 열전대선(constantan-wire)을 삽입하고 내열용 접착제를 절입 봉합 함으로써 열의 유출을 억제 하였으며, 실험에서는 이들의 홈을 갖은 각각의 공구에 열전대선을 심으므로써 실험에 의한 절삭공구의 최고 온도점과 임의점의 온도값을 측정하여 이론값과 비교하고자 했다.

플랭크면에서는 공기 방출열을 억제하고, 온도분포를 관찰하기 위하여 가공물과의 접촉길이를 0.2mm 정도 두고 실험을 행하였다.

Fig. 13에서 공구선단부의 확대도A를 나타내었다. 공구와 공작물의 재료는 열전도율이 다르므로 절삭조건에 따른 절삭온도의 변동특성으로 인하여 공구면에 전도되는 발생열은 절삭점의 온도 상승에 따른 열기전력이 되므로, 열전대에 전달된 이 온도를 열측정기기(measuring computer 8047 AT system)에 입력하여 모니터에서 내용을 관찰함과 동시에 연결된 기록계로 결과의 온도값을 볼 수 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 측정 하므로써, 공구선단부의 온도측정에 극히 제한 되어 있으나 측정이 간단하므로 실험에 많이 이용되고 있으며, 이 측정온도를 절삭온도로 사용하므로써 다른점의 온도를 예측 할 수 있다.

실험에서는 가공물을 양 센타로 지지하여 회전을 원활하게 하였고 절입깊이는 절삭상태에서 일정하게 유지 되도록 공구대 타단에 다이얼게이지(0.001mm)를 설치하여 절입깊이를 확인하며 건식절삭을 하였다.

속도의 변환은 주축의 속도변환기구가 기어식이므로 주축회전수를 변화시키면서 직경감소율에 따른 절삭속도의 범위가 5% 이내가 되도록 유지하였다.

이 열전대 측정은 공구 선단부에서 일정거리 떨어진 위치의 온도값을 되풀이 측정한 값으로 측정값을 수치해석적 방법에의해 구한값과 비교하므로 공구 인선부에 전도된 온도분포 를 예측 할 수 있다.

4.2 실험결과

Fig. 14와 Fig. 15는 2차원 선삭시 고속도강공구 선단부의 레이크면과 플랭크면의 온도분포를 수치해석과 실험으로 구한값을 나타낸 것으로, 절삭조건에 따른 온도분포의 비교값을 공구선단부로부터 1.6mm 및 1mm 까지 표시 하였다. 그림은 절입과 이송율을 일정 하 하고 절삭속도를 변화 하였을 경우이다.

그림에서 보는바와 같이 레이크면 상에서는 공구선단부로부터 칩의 유출방향으로 차차 온도가 상승하며, 선단부로부터 0.75mm 거리에서 절삭온도 최대치를 취

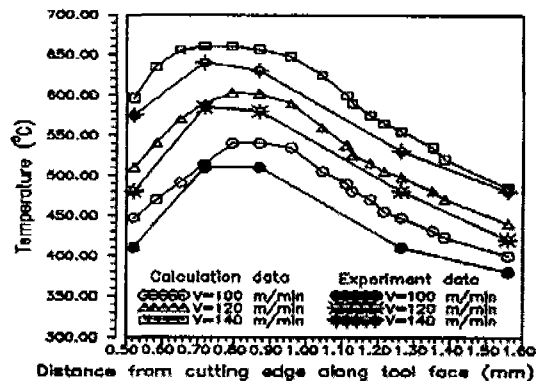


Fig. 14 Effect of cutting speed on rake face temperature for conditions as test No.02,03,04

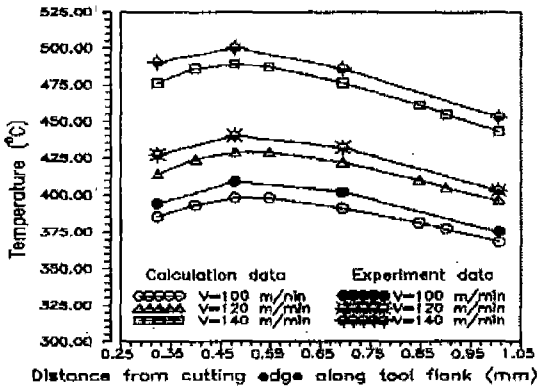


Fig. 15 Effect of cutting speed on flank face temperature for conditions as test No.02,03,04

하고 레이크면 방향으로 올라갈수록 온도가 내려간다.

플랭크면의 온도분포는 공구 선단부로부터 0.45mm 떨어진 곳에서 최대온도를 가지며 전반적으로 등분포 그래프를 그리고, 온도분포의 경향은 절삭속도가 상승하면 함께 서서히 상승하고 점차 상승율이 작아지는 경향을 보이고 있다.

레이크면 상에서 실험치의 절삭온도 값이 20° 정도 낮은 것은 공구선단부의 열전대 흡가공으로 인하여 절삭열의 일부가 공기중으로 방열 되었다고 보며, 플랭크면의 절삭온도의 실험치 값이 수치해석의 값보다 10도내지 15도 범위로 높아져 있다. 이것은 전단면에 있어 전단 변형으로 가열된 가공재가 돌로 갈라져 칩으로된 가공재쪽은 그 두께가 두꺼워진 만큼 감속하여 레이크면을 마찰하여 가열하고 절삭가공면으로된 쪽은 절삭속도로 플랭크면을 마찰하기 때문이다.

또, 레이크면 및 플랭크면에 있어서 전단응력은 거의 같은 값이 얻어 진다고 하였을때 플랭크면 쪽이 절삭비만큼 단위면적당의 발열량이 높아지므로 플랭크면의 실험온도가 공구 선단부에서는 수치해석의 값보다 높아진다고 생각 된다.

절삭조건에 따른 공구 선단부의 절삭온도가 해석결과의 값과 비교하여 일정한 값을 가져 비교적 좋은 일치를 나타내므로 해석방법의 타당성이 입증된다.

5. 결 론

공구의 레이크면 및 플랭크면의 절삭온도 분포를 예측하기 위하여 2차원 영역의 해석모델을 선정하여 수치

해석과 실험을 하였다. 가공재인 탄소강을 절삭조건에 따라 선삭 실험하여 구한 측정값과, 수치해석값을 비교하므로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 2차원 선삭시 정상칩이 유출될 경우 레이크면 및 플랭크면의 절삭온도 분포를, 유한요소해석의 Galerkin 근사해법을 사용한 프로그램으로 예측할 수 있다.

(2) 레이크면의 절삭온도 최고값은 공구선단부로부터 0.75mm 떨어진 절점번호 514 및 515 범위이며, 플랭크면의 절삭온도 최고값은 공구선단부로부터 0.45mm 거리를 둔 460 및 482 절점이다.

(3) 절삭온도 실측값은 칩과 마찰하는 레이크면의 온도에 비해 플랭크면의 온도가 높은 값을 나타내었으며, 실측 온도는 해석값과 5% 이내로 잘 일치 하였다.

(4) Measuring Computer 8047 AT System으로 절삭조건에 따라 실측한 온도점을 참고로, 해석값과 비교하므로 레이크면 및 플랭크면의 실측 온도분포를 예측할 수 있다.

(5) 레이크면 및 플랭크면의 최고 온도점을 중심으로 형성된 등온선의 분포는 크레이터 및 플랭크 마모와 밀접한 관계가 있다는 것을 예측 할 수 있다.

참고문헌

1. Rao, I. V. and Lal, G. K., "Tool Life at High Cutting Speed", Int. J. Mach. Tool Des., Vol. 17, pp. 235-243, 1977
2. Wright, P. K., "Correlation of Tempering Effects with Temperature Distributions in Cutting Tools", ASME Journal of Engineering for Industry., Vol. 100, pp. 131-136, 1978
3. Oxley, P. L. B., "An Analysis for Orthogonal Cutting with Restricted Tool Chip Contact", Int. J. Mech. Sci., Vol. 4, pp. 129-135, 1961
4. Venkatesh, V. C. and Satchithanandam, M., "A Discussion on Tool Life Criteria and Total Failure Causes", Ann. CIRP., Vol. 29, No. 1, pp. 19-22, 1980.
5. Tay, A. O., Stevenson, M. G. and de Vahl Davis, G., "Using the Finite Element

- Method to Determine Temperature Distributions in Orthogonal Machining", Proc. Inst. of Mech. Engrs., Vol.188, pp.627-638, 1974
6. Klamecki, B.E., "Incipient Chip Formation in Metal Cutting-A Three Dimension Finite Element Analysis", Ph. D Thesis., Univ. of Illinois at Urbana Champaign., 1973
 7. Wright, P.K., Stevenson, M.G. and Chow, J.G., "Further Developments in Applying the Finite Element Method to the Calculation of Temperature Distributions in Machining and Comparison with Experiment", Trans. ASME., Vol.105, pp.149-154, 1983
 8. Mori, K., Osakada, K. and Fukuda, M., "Simulation of Severe Plastic Deformation by Finite Element Method with Spatially Fixed Elements", Int. J. Mech. Sci., Vol.25, No.11, pp.775-783, 1983
 9. Murarka, P.D., Hinduja, S. and Barrow, G., "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, 1981
 10. Tay, A.O., "A Numerical Study of the Temperature Distribution Generated During Orthogonal Machining", University of N.S.W., Ph.D.thesis., 1973
 11. Iwata, K., Osakada, K. and Terasaka, Y., "Process Modeling of Orthogonal Cutting by the Rigid-Plastic Finite Element Method", Trans. ASME., Vol.106, pp.132-138, 1984.
 12. Boothroyd, G., Sc.B. and D.Ph., "Temperatures in Orthogonal Metal Cutting", Proc Instn Mech Engrs., Vol.177, No.29, pp.789-803, 1963
 13. Tay, A.O., Stevenson, M.G., de Vahl Davis, G. and Oxley, P.L.B., "A Numerical Method for Calculating Temperature Distributions in Machining. From Force and Shear Angle Measurements". International Journal of Machine Tool Design and Research, Vol.16, 1976. pp.335-349.
 14. Stevenson, M.G. and Oxley, P.L.B., 'An experimental investigation of the influence of speed and scale on the strain-rate in a zone of intense plastic deformation', Proc. Instn. Engrs 1969-70, pp.561-569
 15. Zienkiewicz, O.C., 'The Finite Element Method', McGRAW-Hill Book Company (UK) Limited (Third Edition) 1977, pp.733-756