

피삭재와 공구재종의 상관관계에 근거한 절삭조건의 최적화 (II) Optimization of Cutting Condition based on the Relationship between Tool Grade and Workpiece Material (2nd. Report)

한동원 (건국대 대학원), 고성림 (건국대 기계설계학과)
Dong-Won Hahn (Graduate School, Kon-Kuk Univ.), Sung-Lim Ko (Kon-Kuk Univ.)

ABSTRACT

In optimizing cutting condition for face milling operation, tool wear is an important machining factor. For the purpose of establishing the relationship between various machining factor and tool wear, cutting tests have been performed. As a result, hardness and chemical composition of workpiece material, chemical composition and grain size of cutting tool and cutting speed have been selected as machining factor. In addition, relationship between feed rate and workpiece hardness has been observed. Prior to utilizing cutting condition recommended by 'Machining Data Handbook(MDH)' as a knowledge base, an analysis for the validity has been provided. Based on this analysis, tool life criteria applied by MDH has been modified. Finally, using MDH recommended data for neural network training, we can compensate the result from the trained neural network for optimizing cutting condition for some given workpiece and cutting tool.

Key Words : Optimal Cutting Condition(최적 절삭조건), Machining Factor(가공인자), Cutting Variable(절삭변수), Chemical Composition(화학성분), Neural Network(신경회로망)

1. 서론

정면 밀링(face milling)작업에 있어서의 최적 절삭조건의 정의는 절삭작업의 종류에 따라 달라질 수 있다. 절삭작업을 크게 두 가지로 나눈다면 우선 황삭과 정삭으로 나눌 수 있는데 황삭의 경우에는는 소재제거율(Material Removal Rate, MRR)로 표현되는 가공 능률을 극대화 시키는 절삭조건과 선정과 공구비용과 공구 교환시간으로 표현되는 가공 비용을 최소화하는 절삭조건 사이를 절충하는 것이 중요하다고 할 수 있다.

정삭의 경우는 최종 가공면의 치수오차가 허용공차안으로 들어가야 하며 표면 거칠기가 최소가 되어야 한다. 정면 밀링의 경우 엔드밀 작업등에 비하여 상대적으로 절삭계의 강성이 매우 크므로 공구의 처짐에 의한 치수오차는 무시할 수 있다. 오히려 절삭작업 진행에 따른 공구의 마모에 의한 치수 오차가 발생하므로 공구마모량의 예측이 중요한 문제가 된다. 그리고 절삭계의 떨림과 함께 공구의 마모나 절삭은 가공면 거칠기 불량에 한 원인이 된다.

두 작업의 경우 모두 공구의 마모와 그에 의해 결정되는 공구의 수명이 공통적으로 중요한 요소가 된다. 따라서 본 연구에서는 정면 밀링 작업에서 공구수명을 기초로 적정한 절삭 조건을 결정하는 절삭조건 최적화를 행한다.

2. 공구수명에 영향을 미치는 인자와 그 상관관계

절삭작업에 있어서 공구수명에 영향을 미치는 인자들은 매우 다양하다. 이들중 피삭재, 공구의 형상, 공구의 재종, 공작 기계의 종류, 절삭유제의 종류와 이의 사용여부 등은 작업자가 최종 가공을 시작하기 전에 결정되어 있는 내용이고 절삭 속도, 이송량, 절삭깊이, 공구의 수명을 결정하는 한계 마모량 등은 작업자가 절삭가공시 최종적으로 직접 결정해야하는 내용이다. 본 연구에서는 분류의 편의를 위하여 전자를 가공인자(machining factor), 후자를 절삭변수(cutting variable)이라고 칭하기로 한다. 결국 절삭조건의 최적화라함은 주어진 서로 다른 가공인자에 대한 적절한 절삭변수의 결정이라고 할 수 있다.

우선 절삭조건의 최적화를 행하기 전에 양자가 공구마모에 미치는 영향을 검토하여 최적화에서 고려해야할 인자를 결정할 필요가 있다.

2.1 절삭변수와 공구수명과의 상관관계

(1) 이송량과 공구수명

이송량이 공구수명에 미치는 영향을 보기위하여 회전당 이송량을 변화시키면서 절삭실험을 행하였다. 피삭재는 SCM4(HBN 175), 공구재종은 대한중석의 초경 P재종, 절삭 속도는 120m/min으로 고정하였다. 또한 인서트(규격

SEKN1203EDTR)는 직경 125mm의 커터에 1개의 날만 장착하여 절삭깊이는 2.0mm로 건식절삭을 하였는데 이는 이하의 모든 실험에 동일하게 적용되었다.

그 결과 실제 절삭날의 절삭량을 비교해 볼 수 있는 공구마모 경향을 지나간 횟수에 따른 공구의 마모경향을 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 회전당 이송량과 관계없이 마모의 경향이 유사하다는 것을 알 수 있다.

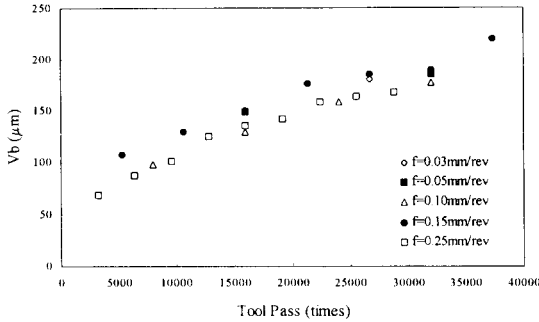


Fig. 1 Tool Wear for Various Feed Rate
(V=120m/min, t=0.2mm, workpiece=SCM4, tool grade=Carbide P Grade)

한편 본 연구 이전에 행해진 연구에서 미국 MDC에서 발행한 Machining Data Handbook(이하 '핸드북')[1]에서 추천하고 있는 적정 이송량을 관찰한 바 있는데[2], 경도가 증가함에 따라서 적은 이송량을 추천하고 있다. 또한 동일한 피삭재 경도에서는 화학성분 조성에 관계없이 동일한 이송량을 추천하고 있다. 즉 이송량의 적용에 영향을 미치는 인자로서 피삭재의 경도를 고려할 수 있다.

(2) 절삭속도와 공구수명

Cook[3]에 의하면 공구수명과 절삭변수 사이의 관계는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$T = aV^{-b}f^{-c}t^{-d} \quad (1)$$

여기에서 $T(\text{min})$ 는 공구수명, $V(\text{m/min})$ 는 절삭속도, $f(\text{mm/rev})$ 는 이송량, $t(\text{mm})$ 는 절삭깊이이고, a, b, c, d 는 실험적으로 결정되는 상수이다. 일반적인 절삭작업에서 절삭깊이는 고정되어있으므로 절삭깊이의 영향은 무시할 수 있다. 또한 이송량은 위에서 살펴본 바와 같이 공구 수명에 직접적인 영향을 미치지 않는다고 생각되어 무시할 수 있다.

결국 위 식(1)은 Taylor[4]가 제안한 바와같이 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$VT^n = C \quad (2)$$

여기에서 n 과 C 는 실험적으로 결정되는 상수이다. 이들 상수가 결정되면 일정한 절삭속도 하에서의 공구수명을 예측할

수 있으므로 식(2)는 실용적으로 중요한 의미를 가진다.

2.2 가공인자와 공구수명과의 상관관계

(1) 피삭재와 공구수명

아래 Fig. 2는 피삭재와 공구마모의 상관관계를 알아보기 위하여 서로 다른 피삭재에 대해 동일한 절삭조건을 적용한 절삭실험의 결과이다. 공구는 대한중석의 초경 P재종을 사용하였고, 절삭속도는 120m/min, 이송량은 0.15mm/rev으로 고정하였다. 피삭재는 중탄소강인 S45C (HBN 175), 크롬-몰리브덴강인 SCM4 (HBN 210), 니켈-크롬-몰리브덴강인 SNCM8 (HBN 212)을 시편으로 사용하였다. 흥미로운 사실은 SCM4와 SNCM8의 경우 두 피삭재의 경도가 거의 동일함에도 불구하고 SCM4의 경우에 비하여 SNCM8의 경우 공구 수명이 극히 짧다는 사실이다. 또한 피삭재의 상온에서의 물성치가 되는 인장강도와 항복강도는 SCM4의 경우 각각 100kgf/mm², 85kgf/mm², SNCM8의 경우 각각 100kgf/mm², 90kgf/mm²으로서 크게 차이가 나지 않는데도 피삭성에서는 큰 차이를 보였다. 일반적으로 공구의 마모는 피삭재와 공구가 접촉하는 부분에서 국부적인 고온, 고압이 발생하면서 양자간의 화학반응에 의해 진행된다고 알려져 있는데[4], 이는 위의 실험의 결과와도 잘 일치한다. 따라서 피삭재에서 공구수명에 영향을 미치는 가공인자로서 피삭재의 화학성분조성을 중요한 인자로서 고려할 수 있다.

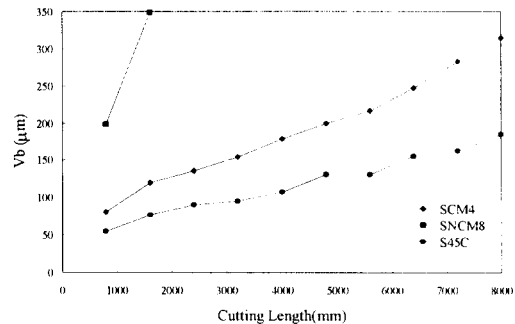


Fig. 2 Tool Wear for Various Workpiece Material
(V=120m/min, f=0.15m/rev, t=2.0mm, tool grade=Tungsten Carbide P)

한편 이전의 연구에서 피삭재의 경도가 공구마모에 미치는 영향을 보기 위하여 핸드북의 추천 절삭조건을 탄소강과 합금강에 대하여 검토한 바 있다[2]. 여기에서 피삭재의 경도가 높아짐에 따라 높은 절삭속도를 추천하고 있음을 관찰하였다. 그런데 본 핸드북에서는 공구 수명이 30-60분이 되는 절삭속도를 적정 절삭속도로 하고 있으므로, 피삭재의 경도 또한 공구수명에 영향을 미치는 인자로서 고려할 수 있다.

(2) 공구 재종

절삭작업이 고속화됨에 따라 고온특성이 좋은 공구재종이

계속하여 개발되어왔다. 초경재종의 개발이후 코팅공구, 서멧(Cermet)공구등이 차례로 개발되어 왔다. 이들 공구재종들은 절삭속도와 피삭재, 그리고 공구 메이커에 따라 상이한 절삭 성능(내마모성, 내치핑성, 적정 절삭속도 등)을 보인다. 공구 재종의 특징을 결정하는 인자들로써 공구의 화학성분 구성, 모재의 입자크기, (코팅공구의 경우) 코팅층의 종류와 두께 등을 고려할 수 있다[2].

3. Machining Data Handbook의 추천 절삭조건에 대한 검토

지금까지 기존의 적정 절삭조건 데이터를 지식 베이스(knowledge base)화 하여 이를 토대로 적정 절삭조건을 예측하려는 노력이 있었다[5],[6]. 본 연구에서는 적정 절삭조건 예측 시스템의 지식 베이스로서 핸드북 이용하였는데, 이 핸드북은 초경재종 개발 초기인 1980년에 발행된 것으로서 여기에서 추천하고 있는 데이터에 대한 검증이 필요하다. 이를 위하여 대한중석의 초경 P재종에 대하여 마모 실험을 행하였다. 피삭재는 SCM4(HBN 175), 이송량은 0.15mm/rev으로 하였고 절삭속도는 80m/min, 120m/min, 250m/min의 세 가지로 하였다. Fig. 3은 위 실험의 결과를 나타낸 것이다.

일반적으로 초경 재종에 대해서는 플랭크 마모량 $V_b=0.3\text{mm}$ 를 정상상태의 마모가 진행되는 한계마모량으로 정하고 있다[4]. 아래의 데이터에서 플랭크 마모량 $V_b=0.3\text{mm}$ 일때의 절삭거리 $L_{V_b 0.3}(\text{mm})$ 을 산출하여야 한다.

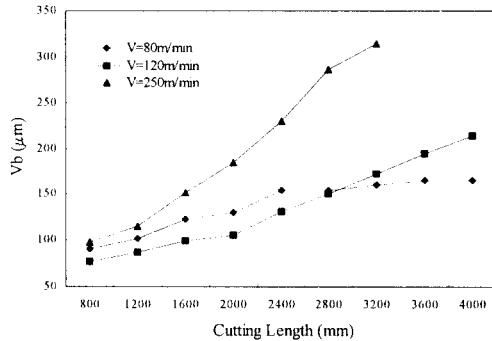


Fig. 3 Tool Wear for Various Cutting Speed
($t=0.2\text{mm}$, $f=0.15\text{mm/rev}$, workpiece=SCM4)

Taylor[7],[8]는 절삭시간에 대한 플랭크 마모폭을 다음과 같이 정하고 있다.

$$V_b = KT + V_{b0} \quad (3)$$

위에서 T 는 절삭시간, V_{b0} 는 공구의 초기마모폭이며 K 는 실험적으로 구할 수 있는 상수이다.

위의 식에서 공구가 정상상태에서 마모된다면 그 마모량은 절삭시간에 비례한다는 것을 알 수 있다. 이러한 근거로 위의 절삭실험 데이터를 공구의 초기마모가 400mm절삭 이전에 모

두 진행된 것으로 가정하여 400mm 절삭 이후부터 linear fitting하여 $L_{V_b 0.3}$ 을 찾는다. 그리고 이렇게 구한 $L_{V_b 0.3}$ 과 V 로부터 $V_b=0.3\text{mm}$ 가 될 때까지의 공구수명 $T_{V_b 0.3}(\text{min})$ 으로 환산한다. 이 결과를 Table. 1에 나타내었다.

V (m/min)	(Vb-L) equation	$L_{V_b 0.3}$ (mm)	$T_{V_b 0.3}$ (min)
80	$V_b=0.0364318L+45.22723$	6993.1425	228.850
120	$V_b=0.04725L+22.318182$	5876.8638	128.213
250	$V_b=0.093667L+11.133333$	3083.9748	32.295

Table. 1 Relationship between V, $L_{V_b 0.3}$, $T_{V_b 0.3}$

식 (2)와 위에서 구한 V와 T의 관계를 이용, 최소자승법으로 오차가 최소인 V-T 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$T = 924263.7 V^{-1.854103} \quad (6)$$

위 식과 실험에서 얻은 결과는 Fig. 4에서도 알 수 있듯이 잘 일치하고 있다는 것을 알 수 있다.

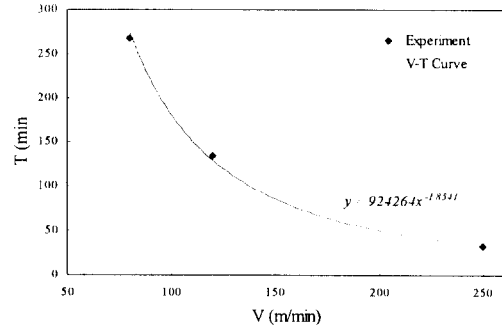


Fig. 4 V-T Curve of Carbide P Grade for cutting SCM4

한편 핸드북에서는 이와 동일한 조건에서의 절삭속도로 $V=150\text{m/min}$ 을 추천하고 있다. 위의 V-T관계식으로부터 $V=150\text{m/min}$ 인 경우의 T를 구하면 86.3275min이 된다. 이는 핸드북에서 80년 이전에 생산된 공구에 적용하고 있는 30-60분 가량의 공구수명을 현재의 공구에 대해서는 공구수명 80분으로 수정하여 적용할 수 있다는 것을 의미한다. 또한 여타의 재종에 대해서도 이러한 방법으로 적정 조건을 수정하여 적용할 수 있을 것이다.

4. 적정 절삭조건 예측을 위한 신경회로망의 구성

위와 같은 검토를 토대로 핸드북의 적정 절삭조건 데이터를 신경회로망 학습에 적용하여 현재 생산되고 있는 공구에 대한 적정 절삭조건 예측을 행한다. 신경회로망 학습을 위한 입력패턴으로는 3절에서 공구마모와 상관관계가 검증된 인자들을 사용한다. 피삭재 화학성분값은 각국의 공업규격과 핸드북의 분류를 대조하여 구했다. Table. 2는 각 피삭재 family 별 신경회로망의 구성을 나타낸 것이다. 피삭재 그룹을 명시

하지 않은 항목은 모든 그룹에 대해 공통적으로 적용되었다.

Input Vector	Carbon Steel	Workpiece : Hardness(HBN), C, Mn Tool Grade : WC, TiC+TaC, Co, Grain Size, Coated/Uncoated
	Alloy Steel	Workpiece : Hardness(HBN), C, Mn, Ni, Cr, Mo Tool Grade : WC, TiC+TaC, Co, Grain Size, Coated/Uncoated
	Stainless Steel	Workpiece : Hardness(HBN), C, Mn, P, Si, Cr, Ni Tool Grade : WC, TiC+TaC, Co, Grain Size, Coated/Uncoated
Target	Optimal Cutting Speed(V_{opt}), Optimal Feed Rate(f_{opt})	
Number of Hidden Layer	2	
Number of Hidden Layer Node	Carbon Steel	9
	Alloy Steel	12
	Stainless Steel	15

Table. 2 Structures of Neural Network for each Workpiece Family

5. 예측결과

위와 같은 구성의 신경회로망을 10000epoch동안 반복학습시킨 후의 총 오차제곱의 합(Squared-Sum Error)은 탄소강의 경우 0.010786%, 합금강의 경우 0.01854%, 스테인레스강의 경우 0.013798%로서 수렴성이 매우 양호하게 나타났다.

학습에서 얻은 신경회로망을 이용하여 특정 피삭재와 공구에 대한 데이터로 전방향 전파(forward propagation)를 수행하면 적정 절삭속도와 적정 이송량을 얻을 수 있다.

신경회로망의 전방향 연산에는 대한중석의 초경 P재종과 PVD코팅재종, 서멧재종의 데이터를 이용하였고, 피삭재는 SCM4로 하였다. 우선 이들을 Alloy Steel에 대해 학습된 신경회로망에 입력하여 전방향 전파를 행하였고, 각각 실험을 통해 얻어진 V-T곡선을 이용하여 신경회로망에서 출력된 절삭조건(V_{neural} , f_{neural})에서의 공구 수명(T_{neural})을 살펴보았다. 단 V-T선도를 작성하는데 있어서 각 공구의 한계마모량은 일반적으로 공구 수명으로 정하고 있는 플랭크 마모량을 사용하였는데, PVD코팅공구는 $V_b=0.15\text{mm}$, 서멧공구는 $V_b=0.1\text{mm}$ 를 각각 한계마모량으로 하였다. 이렇게 얻어진 V-T선도에서 $T=80\text{min}$ 가 되는 절삭속도($V_{T=80}$)를 구해 이와 V_{neural} 과의 오차(%)를 비교하였다. 그 결과를 Table. 3에 나타내었다.

	Carbide P	PVD Coated	Cermet
V_{neural} (m/min)	148.548	213.7718	190.338
f_{neural} (mm/tooth)	0.2265	0.2569	0.0443
n, C at $VT^n=C$	$n=-1.854103$ $C=8.68 \times 10^{-12}$	$n=-1.404055$ $C=1.16 \times 10^{-7}$	$n=-2.279553$ $C=2.23 \times 10^{-17}$
T_{neural} (min)	90.191	50.585	132.539
$V_{T=80}$ (m/min)	159.021	149.218	238.863
E(%)	7.05	-30.197	25.49

Table. 3 Comparison of Experiment Result and Neural Network Output

신경회로망은 초경재종과 일반코팅재종에 대해서만 학습이 되어있으므로 초경재종에 대한 전방향 연산 결과는 양호한 반면, PVD코팅재종과 서멧재종에 대한 예측은 신경회로망의 예측범위(hypothesis space)를 많이 벗어난 입력에 대한 예측이므로 오차가 크게 발생했다고 생각된다.

6. 결론

(1) 절삭가공에 관련되는 인자중 공구 마모에 영향을 미치는 요소로서 피삭재에 관한 것을 피삭재 화학성분과 경도, 공구에 관한 것은 공구 재종의 화학성분과 입도크기를 고려할 수 있음을 알았고, 이들이 절삭속도와 이송량에 대해 갖는 경향성을 실험을 통하여 검증하였다.

(2) 절삭속도에 따른 공구마모실험을 통하여 절삭속도-공구 수명선도를 얻었고, 이를 이용하여 적정 절삭조건 결정을 위해 핸드북에서 설정하고 있는 공구수명에 대한 보정을 수행하였다.

(3) 핸드북의 추천 절삭조건 데이터를 입력으로 하는 신경회로망 학습과 이의 결과로 얻어지는 가중치와 바이어스를 이용해 적정 절삭조건 예측을 수행하였다.

(4) 신경회로망에 학습되어있는 데이터와의 상대오차를 산출함으로써 학습의 범위에서 벗어난 공구 재종에 대한 오차를 관찰하였다.

참고문헌

1. Machinability Data Center, "Machining Data Handbook - 3rd Edition", Vol. 1, Metcut Research Associates Inc., 1980
2. 한동원, 고성립, "피삭재와 공구재종에 근거한 절삭조건의 최적화 (I)", 한국정밀공학회 '97년도 춘계학술대회논문집, 1997, pp.1038~1043,
3. N. H. Cook, "Tool Wear and Tool Life", Journal of Engineering for Industry, Trans. of ASME, 1973, pp.931~938
4. 손명환, "절삭가공론", 문운당, 1992
5. 松村 隆, 井原 秀, 白樫高洋, 井英治, 1990, "最適切削條件選定用エキスパートシステムの開発に關する研究(第1報)", JSPE, Vol. 59, No. 7, pp. 1274-1279
6. 정성종, 1992, "적용제어 수치제어 시스템의 개발(1)-신경회로망 기법에 의한 절삭계수의 지적인 선정, 대한기계학회 논문집, 제16권 제7호, pp. 1223-1233
7. Taylor J., Int. J. of Mach. Tool Des. and Res., 2, 1962, pp. 119
8. Taylor J., Int. Res. in Prod. Engng. NY. ASME 1963, pp. 130