

# 금속 절삭가공 시스템의 성능평가에 관한 연구

## A Study on Performance Evaluation in Metal Cutting System

황규완 (경남전문대학 공경과)  
김순경 (동의공업전문대학 자동차과)  
황홍석 (동의대학교 산공과)

### ABSTRACT

This paper was performed on the automatic selection of cutting condition on multispindle machine. the several mathematical relationships were formulated for simultaneous selection of machining parameters and tool changing scheme. In this research we used two step generative approach ; step 1 is mathematical modeling for the selection of optimal cutting conditions and the other is GMDH-TYPE modeling to find prediction equation of system performance. thus in this paper, mathematical machining models combined with a heuristic GMDH-TYPE modeling to estimate the system performance. these models are developed computer programs for practical application and it was shown that the proposed approach has a good potential and offers a valuable tools to performance evaluation for metal cutting system.

### 1. 서론

금속절삭 가공 공정에 있어서 최적 절삭공정에 따른 가공주기 결정 및 공구수명을 사전 예측하여 공구교체시기를 최적화 하고 공구의 경제적 사용 및 생산성 향상을 위한 많은 노력이 진실히 요구되어진다.

본 연구는 금속절삭가공 시스템에서의 최적절삭조건들과 가공주기(Cycle Time)를 결정하여 절삭공정의 작업효율을 최대화하는 문제를 다루었다. 금속절삭 가공 공정에서 공구수명, 각 작업장에서의 가공시간 가공율 및 회전속도등으로부터 가공능율을 최적화 하는 조건들을 구하기 위하여 먼저 공정설계자로부터 준비된 자료를 가지고 위의 주요조건들을 결정하고 수식을 전개하여 공구 교체 방법들을 결정하고 이에 따른 가공주기 및 가공성능(단위시간당 생산량)을 산출하는 방법을 제시하였다. 이를 위하여 우선 각 작업장의 작업능력을 산출하여 관련작업 조건들을 조정(Balancing)하는 과정을 통하여 각 작업장의 공구교체주기(Tool Change Cycle)의 최적화에 따른 작업조건을 결정하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 공구교체 방법을 다음과 같이 3가지 즉 1) 고장시 연속교체 2) 병행교체 및 3) 계획기간에 따라 교체하는 방법으로 가공시스템의 효율을 산정하여 비교하였다. 또한 주요 가공조건 변화에 따른 가공시스템의 효율을 예측하는 방법으로 GMDH(Group Mothed Data Handling)모델을 사용하여 예측성능과의 오차분석 및 작업조건에 따른 성능을 산출할 수 있도록 하였다.

### 2. 절삭가공

#### 1) 주요 고려요인

금속절삭가공 공정계획에서 고려해야할 주요 요인으로 가공성 (Machinability), 공구수명(Tool Life) 및 경제성 등이다. 가공성은 주로 가공품에 따라 다르며 공구수명은 작업과 공구의 연관 관계에 따라 결정된다.

#### - 공구수명

공구수명에 관련되는 주요 인자들을 들면 절삭속도, 절삭길이, RPM 및 가공품의 특성 등과 관련이 있으며 공구수명은 공구교체로 인한 작업중단시간, 실비의 자동효율 등에 크게 영향을 미친다.

#### - 가공성

가공성<sup>1)2)</sup>의 주요 개념은 가공의 용이성, 표면처리의 용이성, 공구의 마모율, 특정작업에의 동력의 소요, 절삭력, 가공물의 오차 등으로 표현될 수 있다.

#### - 경제성

절삭가공 공정계획은 단순한 가공성 위주로 계획하는 것은 비효율적이다. 가공공정은 경제성을 수반해야하며 가공공정의 경제성 기준으로 최소비용, 최대생산량과 최대이익을 가져올 수 있도록 가공조건을 결정하는 것을 고려할 수 있다.<sup>3)4)5)</sup>

### 2) 다축가공시스템(Multi-Spindle Machine System)

다축 가공시스템에서 각 작업장(Work Station)에서의 고장 및 공구교체 등으로 인한 작업중단은 전체 생산능률에 크게 영향을 주며 매우 복잡한 문제를 가져온다. 그러나 이러한 다축 가공시스템은 단위 가공품의 가공시간을 크게 단축할 수 있다.<sup>6)</sup>

2중 Indexing System에서는 홀수작업장은 1번 작업장이, 짝수작업장에서는 2번 작업장이 Loading 및 Unloading 작업장으로 사용된다.

### 3. 최적절삭가공조건 및 주기결정

금속 절삭 가공공정의 최적조건 및 가공 주기산정을 위하여 본 연구에서는 그림 1에서와 같이 2단계의 접근방법을 사용하였다. 단계1에서 수리적 모델링(Mathematical Modeling)을 사용하여 절삭 가공공정들을 산출하는 단계식으로부터 공구 교환방법(Tool Change Scheme)에 따라 가공시스템의 성능을 산정하였다. 단계 2에서는 GMDH-Type Modeling에

의하여 가공시스템의 성능을 예측하는 수식을 구하였다.

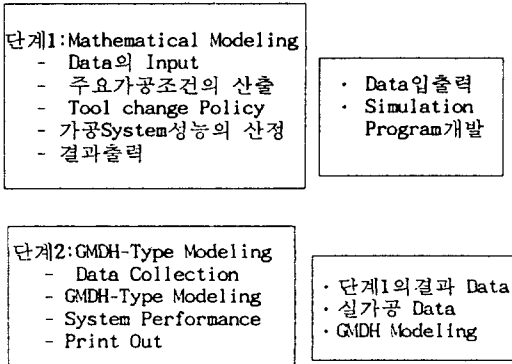


그림 1. Model의 흐름도

1) 수리적 모델링

금속절삭가공의 최적조건의 선택과 가공주기의 산정문제는 수리적모델링(Mathematical Modeling)의 방법으로 Computer의 Program에 의한 해를 구하고 가공품(Work Piece) 및 가공공구(Machine-Tool)의 제한조건을 만족하는 최적해를 구한다.

- 1) 금속절삭가공제한조건(Metalcutting Constraints)
  - 전삭력 (Cutting Force)

$$HP_i = \frac{F_{ci} \cdot V_i}{33000}$$

$F_{ci}$  : Station i에서의 전삭력(lbs)  
 $V_i$  : Station i에서의 절삭속도(ft/min)

- 절삭속도(Cutting Speed)제약  
 Taylor의 공구수명 관계식,

$$T = k / (V^{n_1} \cdot f^{n_2} \cdot d^{n_3}) \quad (1)$$

$n_1, n_2, n_3$ : 전삭속도, Feed 및 전삭깊이와 관련된 상수이다.

위의 식에서 V는 일반적으로 "Taylor 속도범위"라 불리는 상하한값  $V_{i,max}$ 와  $V_{i,min}$ 의 범위 내에서 계획된다. 이 경우 각 Station i에서의 RPM의 상하한값은 다음과 같이 주어진다.

$$N_{i,max} = 12V_{i,max} / \pi D_i$$

$$N_{i,min} = 12V_{i,min} / \pi D_i$$

$D_i$  : Station i에서의 가공품의 직경

각 공구의 최적 절삭속도는 위의 "Taylor 속도범위" 및 각 Spindle에서 가용한 속도범위 내에서 선정된다.

즉  $(N_{i,max}, N_{i,min})_{i,max} \leq N_i \leq (N_{i,max}, N_{i,min})_{i,min}$   
 $N_{i,max}, N_{i,min}$ : 각 공구의 Spindle의 가용한 속도범위  
 -작업속도제한(Feed Constraint)

각 공구의 가용한 작업속도  $f_{i,min}, f_{i,max}$ 의 범위 내에서 작업속도가 결정된다.

$$f_{i,min} \leq f_i \leq f_{i,max}$$

- 공구수명제한(Tool life Constraint)

공구 설계시 고려되어야 하는 공구수명은 다음 하한값의 제한범위 내에서 결정된다.

$$T_i \geq T_{min} \quad (2)$$

$T_{min}$  : 최소공구수명

$T_i$  : Station i에서의 공구수명

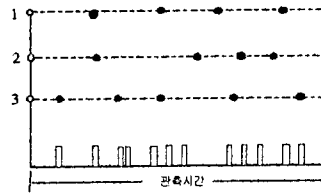
위의 제한조건들을 만족하는 범위 내에서 생산률을 높이고 가공주기(Cycle Time)를 최소 화하도록 결정하는 문제를 다루었으며 본 연구에서는 이를 위한 알고리즘을 개발하고 이를 전산화하여 사용하였다.

2) 공구교체방법

본 연구에서는 각 작업장에서의 공구수명(Tool Life) 및 고장시기가 다른 것으로 가정하고 있다. 또한 적절한 공구교환 정책은 시스템 정지 및 Steady State Time을 상당수준 줄일 수 있기 때문에 다음과 같이 3가지 공구교체정책을 사용하였다.

- (1) 연속적 교체(Series Tool Change)

:공구가 고장발생시 마다 즉시 교체하는 방법

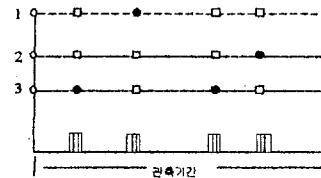


- : 새로운 공구의 작업시작점
- : 고장으로 인한 공구교체 주기
- ▮ : 공구교체로 인한 작업지연시간

그림2. 연속공구교체 방법

- (2) 병행 교체(Parallel Tool Change)

:이때 특정Group의 공구가 고장발생시 같은 Group의 모든 공구를 함께 교체하는 방법.

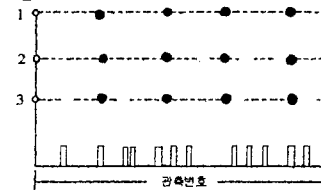


- : 새로운 공구의 작업시작점
- : 고장나지 않은 공구의 병행교체주기
- : 고장으로 인한 공구교체 주기
- ▮ : 공구교체로 인한 작업지연시간

그림3. 병행공구교체 방법

- (3) 계획교체(Scheduled Tool Change)

:계획된 교체기마다 여러 종류의 Tool들을 한꺼번에 교체하는 방법



- : 새로운 공구의 작업시작점
- : 계획된 공구 교체
- ▮ : 공구교체로 인한 작업지연시간

그림4. 계획공구교체 방법

공구교체에 소요되는 총시간은 다음으로 표시할 수 있다.

$$T_{tc} = T_{ss} \cdot N_{ms} + \sum_{i=1}^{N_{wc}} (N_{ti} \cdot T_{di}) \quad \text{----- (3)}$$

$T_{ss}$  : 공구교체후 Steady State Time,  
 $N_{ms}$  : 계획기간의 공구교체로인한 작업중단기간  
 $N_{wc}$  : 작업상의수  
 $N_{ti}$  : 계획기간동안 작업장 i에서 소요된 공구수  
 $T_{di}$  : 작업장 i에서의 공구교체 시간  
 $T_{tc}$ 의 최소화를 위하여 공구 및 공정계획과 공구교체정책등을 고려하여 최적가공조건을 구하여야 한다.

### 3) 절삭가공공정의 조건 및 가공주기

적절한 공구교체 방법을 고려한 절삭가공 주기 및 절삭관련 제약조건들을 결정하기 위하여 우선 가공품의 수량 및 각 작업장에서의 절삭깊이를 계획하고 다음으로 가능한 작업속도  $f_i$ 범위 내에서 최대 가능한 작업속도를 다음 식에서와 같이 결정한다.

$$\begin{aligned} SHP_i &= HP/Q_i \\ &= F_c V_i / 33000 (12d_i \cdot f_i \cdot V_i) \\ &= F_c / 396000 \cdot d_i \cdot f_i \geq SHP_{min} \\ &= f_i \leq \frac{f_{ci}}{396000 d_i SHP_{min}} \quad \text{----- (4)} \end{aligned}$$

$SHP_i$  : 단위 절삭동력(hp/cu · in/min)

식 (4)로부터

$$f_i \leq F_{cmax} / 39600 \cdot d_i \cdot SHP_{min}$$

또한 각 작업장의 공구를 최대마력으로 작업할 경우의 공구작업속도  $V_i$ 는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$V_i \leq (33000 \eta HP_{max}) / F_{cmax} \quad \text{----- (5)}$$

$\eta$  : 공구효율

HP : 공구의 최대마력

$F_{cmax}$  : 최대절삭력

또는 공구 i의 속도(Tool Feed)를  $N_i$ 라 두면

$$N_i = 12V_i / \pi D_i \leq 39600 \eta HP_{max} / \pi D_i F_{cmax} \quad \text{--- (6)}$$

식 (1) 및 (2)로부터

$$T_i \geq T_{min}$$

$$\text{또는 } \frac{k_i}{V_i^{1/n} \cdot f_i^{1/m} \cdot d_i^{1/nz}} \geq T_{min}$$

$$\text{여기서 } N_i \leq \frac{12}{\pi D_i} \left[ \frac{k_i}{T_{min} f_i^{1/m} d_i^{1/nz}} \right]^n \quad \text{--- (7)}$$

식(6)과(7)로부터

$$\begin{aligned} N_i &= \min \left[ \frac{396000 \eta HP_{max}}{\pi D_i F_{cmax}}, \right. \\ &\quad \left. \frac{12}{\pi D_i} \left( \frac{K_i}{T_{min} f_i^{1/m} d_i^{1/nz}} \right)^n \right] \end{aligned} \quad \text{----- (8)}$$

위 식으로부터  $f_i$ 와  $N_i$ 를 산출하여 가능한 제약조건을 만족하면 사용할 수 있다. 또한 각 Work Station에서의 공구수명이 계획된 정비기간에 가깝게 고장이 발생하도록 가공조건을 조정한다. 이를 위하여 공구수명과 각 제품 공구시간의 비율을 산정하여 이용하였다.

$$R_i = T_i / T_{ci}$$

즉 각 Work Station에서의 공구고장이 R의 정수배의 시간에서 일어나도록 한다.

### 4) 최적절삭조건 및 공구교체 결정방법

절삭작업주기의 결정과 작업조건들의 결정은 공구교체의 방법과 연계하여 다음 단계에 따라서 결정된다.

- (1) 공정설계를 통하여 각 작업장에서의 작업특성 및 작업장, 작업내용을 결정한다.
- (2) 급속절삭 제한조건을 만족하는 가능한 각 작업의 최대작업속도(Feed)를 결정한다.
- (3) 최대의 가공시간(Machining Time)작업을 통제 작업으로 정하고 다른 작업장의 작업속도를조정하여 작업시간을 조정(Balancing)한다.
- (4) 각 작업장에서의 평균 공구수명을 통제작업장의 정수배가 되도록 조정한다. 이는 절삭속도를 조정하여 얻을 수 있다.
- (5) 평균공구수명의 경우 공구수명의 신뢰도는 50%로 볼 수 있으며 평균속도를 조정하여 공구수명의 신뢰도를 요구수준만큼 증가되도록 조정한다.
- (6) 통제작업장에서의 공구를 일정기간만큼 사용 후 비율 R이 1인 다른 작업장의 공구와 함께 교체하고, R이 2 및 3인 경우도 비슷한 방법으로 교체하도록 한다.

위의 각 단계의 절차들을 전산 프로그램개발을 위하여 최적 절삭조건 및 공구교체 방법결정을 위한 흐름도를 그림 5에서와 같이 보였다.

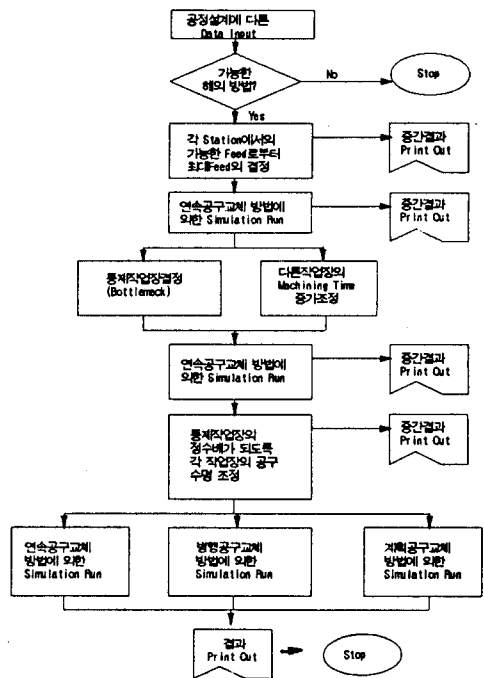


그림 5. 최적절삭조건 및 공구수명결정 Logic흐름도

### 4. 모델의 응용

#### 1) 시스템개요

위의 절삭가공 시스템의 수리모델을 카플링(coupling)의 절삭 가공에 응용하였다. 본 절삭가공 시스템은 2중 Indexing 다축 가공시스템(Multi-Spindle System)으로 구성되어 총 8개소의 Work Station중 2개의 Work Station(1,2번)은 Loading 및 Unloading작업으로 사용하고 나머지 6개의 작업공정으로 가공되며 단계별 작업내용은 다음과 같다.

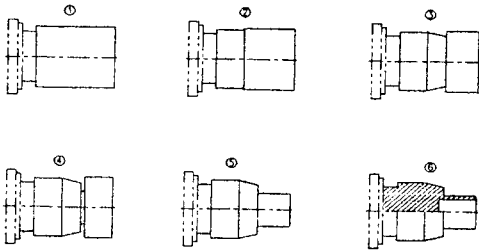


그림6. 가공 단계별 작업내용

2) 모델의 응용 결과

입력 데이터는 본 모델의 질삭 조건범위 내에서 시스템 성능이 최대가 되도록 결정하였으며 각 Work Station에서 공구수명을 산출하고 이로부터 각 작업장간의 공구수명을 조정하여 재 사용하였다. 여기서 보면 Work station 2에서의 공구수명이 64.844 Min으로 최소값이 되며 작업장 2가 통제되어야 할 작업장이 된다. 여기서 제조정된 공구 수명자료는 표 1에서와 같다.

표 1. 조정 공구수명 자료

ARRANGE THE TOOL LIVES AS FOLLOWS

STATION NO.	TOOL LIFE MIN	MACHINING TIME(MIN)	RATIO OF TOOL LIFE
1	74.94	.507	147.928
2	77.81	1.200	64.844
3	75.50	.735	102.718
4	297.60	.493	603.084
5	75.34	.700	95.401
6	72.41	.696	108.679

POSITION 2 IS THE CONTROLLING STATION WITH CYCLE TIME= 1.200

POSITION 2 IS THE STATION WHICH CONTROLS THE TOOL CHANGING

RATIO OF STANDARD DEVIATION AND MEAN= .1667

표 1의 질삭 작업조건에 따른 3가지의 공구 교체방법으로 가공한 결과는 표2와 같다. 최대의 생산률을 가지는 조건이 표 2에서와 같이 각 작업장에서의 작업공구를 병행 교체방법으로 할 경우이다.

표 2. 작업조건 및 생산률 비교

STATION NO.	NUMBER OF TOOLS USED			
	SERIES	PARALLEL	SCHEDULED	RELIABILITY (95%)
1	16	4	4	4
2	24	33	36	33
3	25	11	12	11
4	3	0	1	0
5	23	11	12	11
6	19	5	7	7
계	110	65	72	66

표 3. 공구 교체 방법에 따른 출력의 비교

구 분	series	parallel	scheduled	reliability
총공구 소요수 (EA)	110	65	72	66
1000분 동안의 가공량 (Unit)	538	623	616	562
총가공 시간 (Min)	1000.1	1001.35	1001.20	1003.72
기계의 정지횟수	110	33	36	33
100개가 공당소 요시간 (Min)	185.89	160.73	162.53	178.60

위의 표에서 보면 최적 공구 교체 방법은 본 예제의 경우 병행 공구교체 방법이고 이 경우의 시스템 생산률은 160.73 Min/100 Unit 이다.

5. GMDH-Type Modeling 및 응용

1) 시스템 모델링

본연구에서는 GMDH(Group Method Data Handling)방법<sup>7)(8)(9)(10)(11)</sup>을 사용하여 시스템 가공 성능에 관련된 주요한 파라미터를 설정하고 이를 금속절삭가공 시스템의 성능평가에측에 확장 응용하였으며 그림7과 같다.

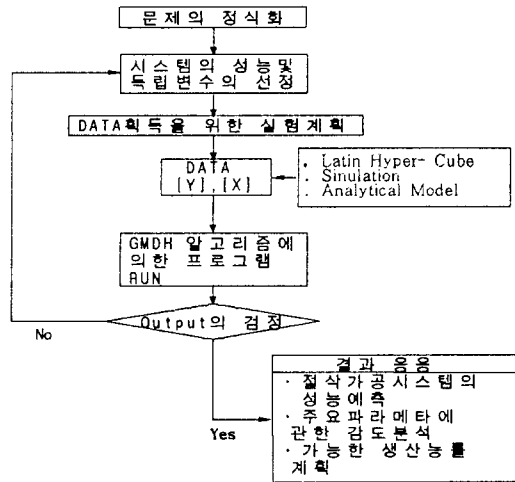


그림 7. GMDH-type Modeling의 흐름도

본 연구에서 고려한 주요변수는 다음과 같다.

- 시스템 성능(Y)  
Y: 100개의 가공품을가공하는데 소요되는시간
- 시스템 입력변수(X)  
X1 : 질삭력(Cutting Force), HP

참 고 문 헌

- X2 : RMP
- X3 : 실비의 비생산 시간(Min)
- X4 : 공구 교체시간
- X5 : 설비효율(%)
- X6 : 공구 수명(Min)
- X7 : 절삭속도(Ft/Min)

시스템의 입력변수(x1, x2, ..., x7) 및 출력변수(y)의 Data는 Latin Hyper-cube Model에 의하여 각각 20개 Data Set을 산출하여 사용하였다.

2) GMDH 출력 결과

본 절삭 가공 시스템의 성능 예측을 위한 GMDH의 출력 결과를 표 4에서와 같이 표시하였다.

표 4. GMDH 출력 결과

NO.	OBSERVED VALUE	ESTIMATE	ERROR	PERCENT ERROR
1	206300E+03	198920E+03	73700E+01	3.569E+01
2	166400E+03	174130E+03	-747140E+01	-4.4896E+01
3	17210E+03	176290E+03	-228880E+01	-13.293E+01
4	186200E+03	190875E+03	-46750E+00	-2.509E+01
5	189000E+03	182580E+03	64190E+01	3.394E+01
6	187700E+03	197480E+03	-97480E+01	-5.197E+01
7	181900E+03	187550E+03	-54650E+01	-2.999E+01
8	188900E+03	192350E+03	-34500E+01	-1.827E+01
9	182700E+03	193910E+03	-11200E+00	-0.613E+01
10	183100E+03	181630E+03	14700E+01	0.803E+01
11	177600E+03	172350E+03	52450E+01	2.954E+01
12	183300E+03	183840E+03	-5400E+01	-2.944E+01
13	182200E+03	184220E+03	-20200E+01	-11.144E+01
14	167900E+03	176220E+03	-83300E+01	-4.962E+01
15	173300E+03	175330E+03	-20300E+01	-1.172E+01
16	187000E+03	179300E+03	77000E+01	4.118E+01
17	178700E+03	176660E+03	20400E+00	1.141E+01
18	178900E+03	178100E+03	8000E+01	0.447E+01
19	184800E+03	189200E+03	-4400E+01	-2.382E+01
20	172800E+03	180670E+03	-78700E+01	-4.554E+01

IVAKHENKO POLYNOMIAL

$$Y = A + Bx_1 + Cx_2 + Dx_3 + E\sqrt{x_1} + F\sqrt{x_2}$$

$$A = 338E+03$$

$$B = -138E+01$$

$$C = 983E+03$$

$$D = 216E+02$$

$$E = -144E+03$$

$$F = 236E+01$$

$$U = X(1) \quad V = X(2)$$

표 4의 출력 결과에서 보면 예제의 가공시스템의 성능은 다음 식으로 구해진다.

$$Y = 0.0003685 - 0.01368 X_1 + 0.0009963 x_3 + 0.002167 X_1 \cdot X_1 - 0.0001449 X_3 \cdot X_3 - 0.02395 X_1 \cdot X_3$$

표 4에서 보면 본 예측모델의 경우 예측오차가 매우 작음을 알 수 있다.

6. 결론

금속 절삭 가공공정에 있어서 최적 절삭조건과 가공주기를 산정하여 시스템의 성능을 최대화하는 연구를 수행하였다.

본 연구는 시스템 성능에 영향을 미치는 공구수명 및 작업속도 등을 작업장간의 조화를 이루도록 조정하여 3가지 공구 교체방법에 따른 시스템 성능 평가가 가능한 수리적 모델을 개발하고 이를위한 전산프로그램을 개발하였다. 또한 GMDH-Type 모델링에 의한 시스템 성능예측 방법을 사용하여 커플링(coupling) 절삭가공의 예를 통한 본 모델의 우수성을 보였다.

- 1) Armarego, E.J.A. and Brown, R.H., The Machining of Metal Prentice Hall, Inc., 1969.
- 2) Parsons, N.R., N/C Machinability Data System, Society of Manufacturing Engineering, Dearborn, Michigan, 1971.
- 3) Armarego, E.J.A. and Russell, J.K., "Maximum Profit rate as a Criterion for the Selection of Machining Conditions". International Journal of Machine Tool Design
- 4) Gilbert, W.W., "Economics of Machining", Machining-Theory and Practice, American Society for Metals, Cleveland, Ohio, 1950. Research, Vol. 6, pp.15-24, 1966
- 5) Wu, S.M. and Ermer, D.S., "Maximum Profit as the Criterion in Determination of the Optimum Cutting Conditions", Trans. A.S.M.E., Journal of Engineering for Industry, Vol.6, No.4, pp.435-442, 1966.
- 6) Beletskit, D.G., "Using Multi-Spindle Vertical Turning Machine in Small Batch Production". Russian Engineering Journal, Vol. XLVII, No. 12, pp.46-49, 1957.
- 7) Farlow, S.J., Self-Organizing System in Modeling GMDH-Type Algorithms, Marcel Dekker Inc., New York, 1984.
- 8) Ikeda, S., Ochiai, M., and Sawaragi, Y., "Sequential GMDH Algorithm and its Application to River Flow Prediction", IEEE Transaction on System Man, and Cybernetics, SMC-6, 473-79, 1976.
- 9) Ivakhnenko, A.G., "The Group Method of Data Handling a Sival to Stochastic Approximation", Soviet Automatic Control, 13, 43-55, 1968.6. Ivakhnenko, A.G., "Group Handling of Data in Identification of the Static Characteristic of a Multi-External Plant", Soviet Automatic Control, 14, 30-37, 1969.
- 10) Ivakhnenko, A.G., "Polynomial Theory of Complex System", IEEE Transactions on System. Man, Machine Cybernetics, SMC-1, 364-78, 1971.
- 11) Ivakhnenko, A.G. (1988), Sorting Methods for Modeling and Clusterization (Survey of GMDH Papers for the Years 1983-1988) The Present stage of GMDH Development, Soviet Journal of Automation and information Sciences, Vol.4, PP.1-13.