

금속 절삭가공 공정의 최적 절삭 조건 및 가공주기 결정 방안 연구

A Study on a Machining Cycle and Optimal Cutting Conditions on Multi-Satations

황 흥 석*, 황 규 완**

Hwang Heung-Suk, Hwang Gyu Wan

* 동의대학교 산업공학과

** 경남전문대학 공업경영과

ABSTRACT

This paper focuses on a automatic selection of optimal cutting conditions and cycle time for multi-spindle metal cutting machines based on machining parameters and tool change schemes which are the two most common terms used in the metal cutting. 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 estimate the system performance evaluation. we developed computer programs for these models and the fitting manufacturing examples are applied to this model and it was shown that the proposed approach has a good potential and offers a valuable tools to analyse the metal cutting system.

Key Word : System Performance Evaluation, Metal cutting, Simulation, Manufacturing System

1. 서론

본 연구는 다축 금속 절삭가공(Multi-Spindle Machine System)공정에서 최적절삭조건들과 가공주기(Cycle Time)를 결정하여 절삭공정의 작업효율을 최대화하는 문제를 다루었다.

금속절삭가공 공정에서 공구수명(Tool Life), 각 가공시간(Machine Time), 가공율(Feed Rate) 및 회전속도(RPM)등으로부터 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 본 연구에서는 공구교체 방법을 다음과 같이 3가지 즉 1) 고장시 연속교체 2) 병행교체 및 3) 계획기간에 따라 교체하는 방법에 따라 가공시스템의 효율을 산정하여 비교하였다. 또한 위의 과정과 실제 작업결과에서 획득한 자료로부터 주요 가공조건 변화에 따른 가공시스템의 효율을 예측하는 방법으로 GMDH(Group Method Data Handling)모델을 사용하여 예측성능과의 오차분석 및 주요작업조건에

따른 성능을 산출할 수 있도록 하였다.

위의 주요 계산과정을 위한 전산화 프로그램을 개발하여 사용하였으며 금구(Fitting)를 가공하는 공정의 예를 통하여 본 연구의 결과를 예시하여 보였다.

2. 절삭가공공정

금속절삭가공 공정계획에서 고려해야할 주요 요인으로 가공성 (Machinability), 공구수명(Tool Life) 및 경제성 등이다. 공구수명은 Taylor 공구방정식에 의해서 산정되며,

$$V \cdot T^n = C \text{ 로 표시된다.}$$

V : 절삭속도(Sfpm)

T : 공구수명(min)

C : 가공성 계수

n : 작업조건에 상수

Pera는 이러한 Taylor의 공구방정식을 다음과 같이 제시하였다.

$$V T^{n1} f^{m1} = C_1$$

n1 : 절삭속도에 따른 상수

따라서 Taylor의 공구방정식은 다음과 같이 표시된다.

$$V T^{n1} f^{m1} d^{m2} = C_2$$

n2 : 절삭 깊이 계수

C2 : 상수

공구 수명방정식은 위에서와 같이 확장된 Taylor식이 가장 널리 사용되고 있으며 본 연구에서도 이를 이용하였다. 그림 1에서와 같이 다 축절삭가공시스템(Multi-spindle Machine System)을 고려하였다.

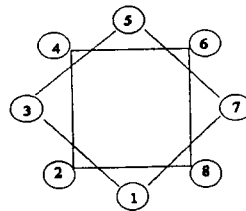


그림 1. 2중 Indexing 8-Spindle Machine

3. 최적절삭가공조건 및 주기결정

금속 절삭 가공공정의 최적조건 및 가공 주기산

정을 위하여 본 연구에서는 그림 2에서와 같이 2단계의 접근방법을 사용하였다. 단계1에서 수리적 모델링(Mathematical Modeling)을 사용하여 절삭 가공 공정들을 산출하는 단계식으로부터 공구 교환방법(Tool Change Scheme)에 따라 가공시스템의 성능을 산정하였다. 단계 2에서는 GMDH-Type Modeling에 의하여 가공시스템의 성능을 예측하는 수식을 구하였다.

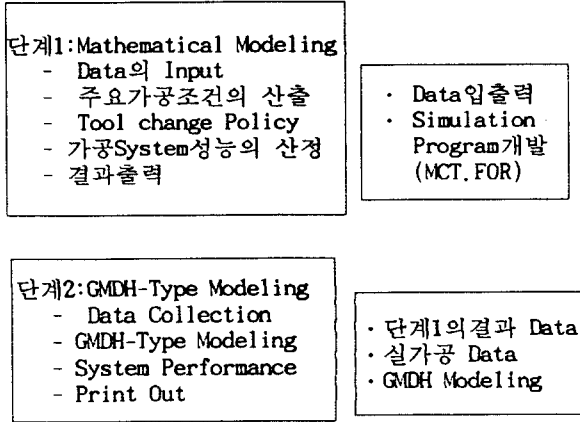


그림 2. Model의 흐름도

3.1 수리적 모델링(Mathematical Modeling)

주요 가공 제한조건 및 절삭공정관련 수식들을 유도하고, 다음과 같은 주요 조건들을 고려하였다.

- 각 Station에서 요구되는 절삭력(Cutting Force)은 다음과 같이 산정된다.

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

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

여기서 HP_i 와 F_{ci} 는 각 Station에서의 허용된 한계범위 내에서 가능하다.

- 절삭속도(Cutting Speed) 제약
 Taylor의 공구수명 관계식,

$$T = k / (V^{1/n} \cdot f^{1/m} \cdot a^{1/n_2}) \quad (1)$$

여기서 n, m, n_2 는 절삭속도, Feed 및 절삭깊이와 관련된 상수이다.

- 작업속도제한(Feed Constraint)

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

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

- 공구수명제한(Tool life Constraint)

공구 설계시 고려되어야 하는 공구수명은 다음 한값의 제한범위 내에서 결정된다.

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

T_{min} : 최소공구수명
 T_i : Station i에서의 공구수명

위의 절삭 작업의 제한조건들을 만족하는 범위 내에서 생산률을 높이고 가공주기(Cycle Time)를 최소화하도록 결정하였다.

3.1.1 공구교환방법(Tool Change Scheme)

본 연구에서는 이를 위하여 다음과 같이 3가지 공구교환정책을 도입하였다.

- 1) 연속적 교체(Series Tool Change)
- 2) 병행 교체(Parallel Tool Change)
- 3) 계획 교체(Scheduled Tool Change)

일반적으로 공구교체에 소요되는 총시간은 다음으로 표시할 수 있다.

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

T_{ss} : 공구교환후 Steady State Time,

N_{ms} : 계획기간의 공구교체로 인한 작업중단기간

N_w : 작업장의 수

N_{ti} : 계획기간 동안 작업장 i에서 소요된 공구의 수

T_{di} : 작업장 i에서의 공구교환 시간

여기서 T_{tc} 의 최소화를 위하여 공구 및 공정계획과 공구교환정책등을 고려하여 최적가공조건을 구하여야 한다. 기타 절삭가공조건 및 가공주기에 관한 제한사항 및 수식들을 전개하여 사용하였다.

3.1.2. 최적 절삭조건 및 공구교환 결정방법

절삭작업주기(Machining Cycle) 및 가공 조건들의 결정은 공구교환의 방법과 연계하여 다음 단계에 따라서 결정된다.

- (1) 각 작업장에서의 작업특성 및 작업장, 작업내용을 결정한다.
- (2) 금속절삭 제한조건을 만족하는 가능한 각 작업

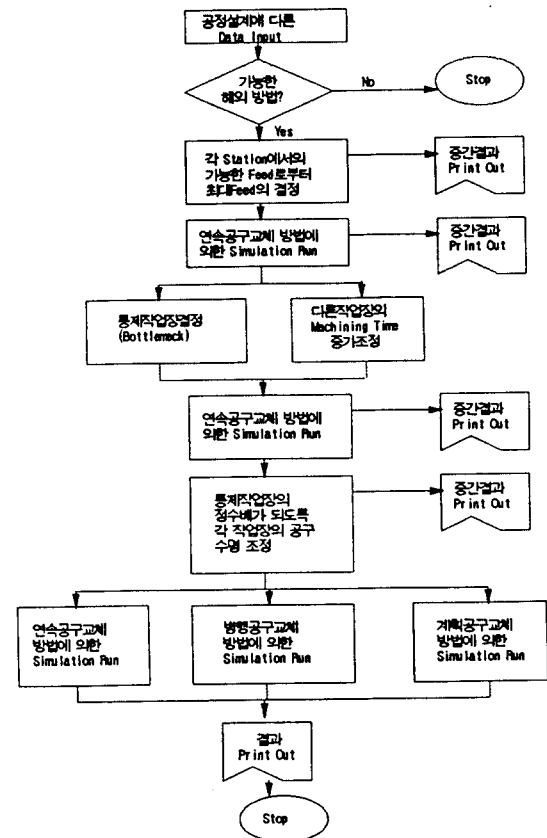


그림 3. 최적 절삭조건 및 공구수명결정 흐름도

의 최대작업속도(Feed)를 결정한다.

(3) 최대의 가공시간(Machine Time)작업을 통제작업으로 정하고 다른 작업장의 작업속도를 조정하여 작업시간을 조정(Balancing)한다.

(4) 각 작업장에서의 평균 공구수명을 통제작업장의 정수배가 되도록 조정한다.

(5) 공구속도를 조정하여 공구수명의 신뢰도를 요구 수준만큼 증가되도록 조정한다.

위의 각 단계의 절차들을 전산 프로그램개발을 위하여 최적 절삭조건 및 공구교체 방법결정을 위한 흐름도를 그림 3에서와 같이 보였다.

3.1.3 모델의 응용

본 연구에서 제안된 모델을 강관 제조설비의 감속기(Reducer)에 사용되는 부품인 금구(Fitting)의 절삭가공 시스템에 응용하였다. 본 절삭가공 시스템은 그림 1에서와 같은 2중 Indexing 다 축 가공시스템(Multi-Spindle System)으로 구성되어 총 8개소의 Work Station중 2개의 Work Station(1,2번)은 Loading 및 Unloading작업으로 사용하고 나머지 6개의 작업공정으로 가공되며 가공품은 그림 4과 같다. 금구 가공 공정을 위하여 각 Work Station에서의 가공단계에 따른 6개 공정을 표시하였다.

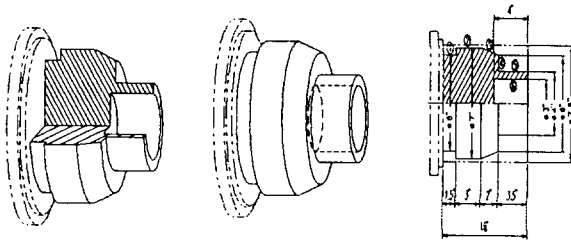


그림 4. 금구(Fitting) 가공공정

입력 데이터는 본 모델의 절삭 조건범위 내에서 시스템성능이 최대가 되도록 결정하였으며 본 금구 가공을 위한 각 Work Station별 주요 입력 데이터는 부록 과 같다(본 예제 출력자료는 부록 참조).

표 1. 최적 작업조건 및 생산률.(출력 예:)

IF WE CHANGE THE TOOLS IN PARALLEL
WE GET THE FOLLOWING INFORMATION

STATION NO.	NUMBER OF TOOLS USED
1	4
2	33
3	11
4	0
5	11
6	6

NUMBER OF PARTS MACHINED = 623
THE TIME TAKEN TO MACHINE THESE PARTS = 1001.35 MIN
NUMBER OF TIMES THE MACHINE IS STOPPED = 33
TIME TO PROCESS 100 PARTS = 160.73 MIN

각 출력 결과를 각각 비교하면 표 2과 같다.

위의 표에서 보면 최적 공구 교체 방법은 본 예제의

표 2. 공구 교체 방법에 따른 출력의 비교

구 분	1. 연속 공구 교체	2. 병행 공구 교체	3. 계획 공구 교체	4. 공구 수명 신뢰도 95%경우
총공구 소요수 (EA)	110	65	72	65
단위 기간 동안의 가공량 (Unit)	538	628	616	562
총가공 시간 (Min)	1000.1	1001.35	1001.2	1003.72
기계의 정지횟수	110	33	36	33
100개가 공당소 요시간 (Min)	185.89	160.73	162.53	178.60

경우 병행 공구교체 방법이고 이 경우의 시스템 생산률은 160.73 Min/100 Unit 이다.

3.2 GMDH-Type Modeling

본 연구에서는 통계적인 발견적 방법중의 한가지인 GMDH(Group Method Data Handling)방법[5]을 사용하였다. 이 방법은 최초 Ivakhnenko[5]에 의해서 개발되었으며, 본 예제를 GMDH방법으로 Modeling 하기 위한 과정을 그림 5에서와 같이 요약하였다.

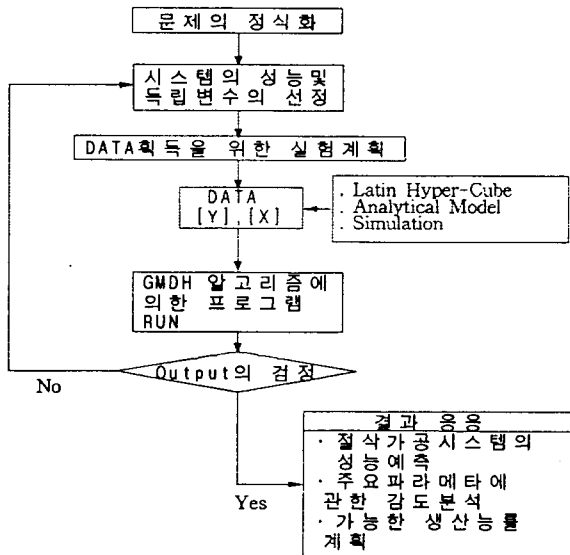


그림 5. GMDH-type Modeling의 흐름도

본 예제에서는 다음과 같은 주요 변수들을 사용하였다.

- 시스템 성능측정(Y)
Y: 100개의 가공품을 가공하는데 소요되는 시간
- 시스템 입력변수(X)
X1: 절삭력(Cutting Force), HP

- X2 : RMP
- X3 : 설비의 비생산 시간(Min)
- X4 : 공구 교체시간
- X5 : 설비효율(η)(Tool Efficiency)
- X6 : 공구 수명(Tool Life), (Min)
- X7 : 절삭속도(Speed Rate) (Ft/Min)

위에서 정의된 시스템의 입력변수(x1, x2, ..., x7) 및 출력변수(y)의 Data는 실측 자료를 이용하여 약 하나 실제 Data의 획득의 어려움 등으로 각 작업장에서의 주요 절삭가공 작업 조건의 Data를 Latin Hyper-cube Model에 의하여 각각 20개 Data Set을 산출하여 Data로 사용하였다(Sample Data와 GMDH 의 입력 Data는 부록참조).

표 3. GMDH 출력 결과

*** Sample GMDH OUTPUT Of FITTING (1996.3.23.)***

 NUMBER OF INDEP VAR = 7
 NUMBER OF OBS. = 20
 NUMBER OF VAR IN TRAINING SET = 10
 FRACTIONAL INCREASE IN VARIABLES = .000

LEVEL NUMBER= 1
 NO. VARIABLES SAVED = 7
 RMIN VALUE (SUMMED OVER CHECKING SET)= .18341E-02
 MULTIPLE CORRELATION (SUMMED OVER TRAINING SET) = .792129

GMDH CONVERGED AFTER 1 GENERATION(S)
 MULTIPLE CORRELATION (SUMMED OVER TRAINING SET) = .792129

NO. OBSERVED VALUE ESTIMATE ERROR PERCENT ERROR

1	.20183000E+03	.19819290E+03	.36370850E+01	.18020540E+01
2	.16674000E+03	.17421310E+03	-.74731140E+01	-.44818660E+01
3	.17281000E+03	.17052920E+03	.22808380E+01	.13198530E+01
4	.18652000E+03	.19080750E+03	-.12875370E+01	-.67936710E+00
5	.18690000E+03	.18235880E+03	.35411990E+01	.19048940E+01
6	.18660000E+03	.19170480E+03	-.51048430E+01	-.27357140E+01
7	.18819000E+03	.18275660E+03	.54343720E+01	.28877050E+01
8	.18860000E+03	.19293950E+03	-.43354490E+01	-.22987530E+01
9	.19226000E+03	.19379930E+01	-.15392910E+01	-.80063010E+00
10	.19301000E+03	.18816350E+03	.48464680E+01	.25109920E+01
11	.17606000E+03	.17235480E+03	.37051850E+01	.21045010E+01
12	.18633000E+03	.18038420E+03	.59458160E+01	.31910140E+01
13	.16823000E+03	.18398270E+03	-.15702670E+02	-.93340470E+01
14	.16706000E+03	.17062290E+03	-.35629270E+01	-.21327230E+01
15	.17334000E+03	.17751370E+03	-.41737060E+01	-.24078150E+01
16	.18702000E+03	.17310260E+03	.13917370E+02	.74416500E+01
17	.17497000E+03	.17805960E+03	-.10894780E+01	-.62266530E+00
18	.17648000E+03	.17871690E+03	-.22369230E+01	-.12675220E+01
19	.19598000E+03	.18890220E+03	.70777890E+01	.36114350E+01
20	.17261000E+03	.17026280E+03	.23471830E+01	.13598190E+01

 IVAKHNENKO POLYNOMIAL

$$Y = A + B \cdot U + C \cdot V + D \cdot U \cdot U + E \cdot V \cdot V + F \cdot U \cdot V$$

A = .3685E+03
 B = -.1368E+01
 C = .9963E+03
 D = .2167E-02
 E = -.1449E+03
 F = -.2395E+01

U = X (1) V = X (3)

본 절삭 가공 시스템의 성능 예측을 위한 GMDH의 출력 결과를 표 3에서와 같이 표시하였다. 이는 사용자가 예측 Model의 식을 입력할 필요가 없이 각 Level에서의 예측 시마다 프로그램 내에서 자동적으로 주어 지도록하였다. 표 3의 출력 결과를 보면 예제의 가공시스템의 성능은 다음 식으로 구해진다.

$$Y = 0.0003685 - 0.01368 X1 + 0.0009963 X3 + 0.0023671 X1 \cdot X1 - 0.00071449 X3 \cdot X3 - 0.02395 X1 \cdot X3$$

본 예측모델의 결과 예측오차가 0.9% 미만으로 매우 작음을 알 수 있으며, 이는 실제 획득 가능한 Data와 비슷한 결과임을 알 수 있다. 여기서 제시한 GMDH-Type Modeling 방법은 기존의 방법들을 이용하여 필요한 입력 Data를 구하고 이를 주요 절삭 가공시스템에 응용하였다. 그 결과 예측 오차가 매우 작았으며, 금속절삭 가공시스템의 성능을 예측하고 최적 가공조건을 구하는데 매우 유용하게 활용 할 수 있음을 알 수 있었다.

4. 요약 및 결론

금속 절삭 가공공정시스템의 최적 절삭조건과 가공주기를 산정하여 시스템의 성능을 최대화하는 연구를 수행하였다. 본 연구는 이를 위하여 절삭공정 계획을 설계하여 제약조건 범위 내에서의 주요 절삭 가공 파라미터들을 산정하였다. 시스템 성능에 영향이 큰 각 작업장에서의 공구수명 및 작업속도 등을 작업장간의 조화(Balancing)를 이루도록 조정하여 3가지의 공구 교체방법(연속, 병행 및 계획 공구교체)에 따라 각각 시스템 성능분석을 할 수 있는 수리적 모델을 개발하고 이에 따른 전산프로그램을 개발 사용하였다. 한편으로 여러 가지 복잡한 작업조건들과 시스템성능 산정수식의 어려움을 고려하여 실제 Data들로부터 GMTH-Type Modeling에 의하여 시스템성능을 예측하는 방법을 사용하였다.

위의 2가지 Modeling방법을 강관 제조설비에 사용되는 감속기의 주요 부품인 금구(Fitting)절삭가공공정의 예를 통하여 위의 2가지 방법이 절삭가공 공정분석에 매우 유용함을 보였다. 자동화되어 가는 현대의 절삭가공 환경에서 적합한 Model이 되도록 개선·연구할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] 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 Research, Vol. 6, pp.15-24, 1966
- [2] Chao, P.Y., Ferreira, P.M., and Liu, C.R., "Applications of GMTH-Type Modeling in Manufacturing", Journal of Manufacturing System, 7, 241-52, 1988.
- [3] Farlow, S.J., Self-Organizing System in Modeling GMTH-Type Algorithms, Marcel Dekker Inc., New York, 1984.
- [4] Grady, P.O., "A Concise Review of Flexible Literature", Manufacturing Systems and FMS Computers in Industry Vol. 7, pp. 115-167, 1986.
- [5] 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.
- [6] Prisker Corporation, "FACTOR/AIM : Finite Capacity Management", 1993.
- [7] Ranky, P., The Design and Operation of FMS, North-Holland, New York, 1983.
- [8] Young K. Son, Simulation-Based Manufacturing Accounting for Modern Management.