

드릴링 작업의 적응제어에 관한 연구*

이 수 한 · 박 성 태

기 계 공 학 과

(1984. 4. 30 접수)

<요 약>

기존의 드릴링 기계를 적응제어공작기계로 변환하였다. 절삭속도를 제어변수로 선택하였는데, 수학적 모형에 의한 드릴링작업의 해석으로 그 타당성을 밝혔다. 변환된 드릴링 기계로 실험한 결과 공절삭시간 및 실절삭시간이 상당히 줄어 생산성이 향상되었고 기계를 안전하게 사용할 수 있었다.

A Study on the Adaptive Control System for Drilling Process

Lee, Soo-Han · Park, Sung Tai

Dept. of Mechanical Engineering

(Received April 30, 1984)

<Abstract>

The adaptive control system has been developed with conventional drilling machine. The cutting velocity is selected as controlling variable by the result of the analysis of the mathematical model of drilling process. The machining tests shows that the adaptive control system developed is very efficient in reducing air cutting time and metal cutting time, and is reliable in several operating conditions.

I. 서 론

수치제어 공작기계는 초기 설비 투자 및 관리유지가 기존의 공작기계에 비하여 크므로 효율적인 운용이 필요하다. 그러기 위해서는 기계의 용량등을 감안하여 적절한 절삭조건으로 작업이 행하여져야 되는 데 일반적으로는 자료집이나 작업자의 경험에 의하여 절삭조건이 결정되어 왔다. 그러한 절삭조건은 기계의 용량과는 무관하게 결정되었으므로 기계를 충분히 이용하지 못하거나 기계에 무리를 줄 경우도 있다. 또한 초기에 적절한 절삭조건을 선정했다 하더라도 공구의 마모나 가공물 재질의 불균일에 의해서 최적의 절삭조건은 계속 변하므로 기계를 효율적으로 사용한다고는 할 수 없다. 따라서 수치제어 공작기계의 효율적인 사용을 위해서는 절

삭현상의 변화를 작업중에 검출하여 자동적으로 그 상황에 적당한 절삭조건으로 작동하게 하는 것이 바람직하다.

공작기계의 적응제어 방식은 보통 최적적응제어⁽¹⁻⁴⁾, 구속적응제어⁽⁵⁻⁸⁾ 및 정도(精度) 적응제어^(10,11) 3가지로 분류할 수 있다. 본 연구는 구속적응제어에 대한 것으로 이는 예기치 못한 과부하에 의한 기계 및 공구를 보호하고 생산성을 높이는 데 그 의의가 있다.

드릴링 작업의 절삭조건 즉, 제어변수는 절삭속도와 이송인 데 이들은 공작기계의 효율에 관계되는 변수에 의하여 제한을 받으며 또한 공구의 보호에 관계되는 변수에 의해서도 제한되는 것으로 알려져 있다.⁽¹²⁾ 그러나 제어변수와 제한조건들 사이에는 상호 연관이 있으므로 모든 제한조건들이 절삭중에 동시에 가해지는 것은 아니다.

* 본 연구는 1983년도 문교부 학술연구 조성비에 의한 것임.

본 연구에서는 제어변수와 제한조건들 사이의 상호연관을 검토하여 최소한의 제한조건과 제어변수를 결정하고 이의 실험을 위하여 기존의 드릴링기계를 μ -computer를 이용하여 적응제어 공작기계로 변환하더 완성된 적응제어계에 제어전략을 장착하여 실험으로 그 성능향상을 검토하는 데 역점을 둔다.

II. 구속조건과 제어변수

제어변수인 이송 및 절삭속도를 제한하는 구속조건은 기계의 보호 및 공구의 보호 등의 관점에서 결정되어야 한다. 드릴링 작업의 경우에는 기계자체의 성능에 의하여 모우터의 동력, 토오크, 이송 및 절삭속도 등이 구속조건이 되고 공구의 관점에서는 추력, 토오크 및 이송이 구속조건이 된다. 이들을 제어변수에 관한 항으로 나타내면 아래와 같다.

1. 절삭속도

주축 모우터의 특성 및 기어비에 의해서

$$N_{\min} \leq N \leq N_{\max} \quad (2-1)$$

이므로 지름 d [mm]인 드릴의 경우 절삭속도 V [m/min]은 아래의 범위에 있다.

$$\frac{\pi \cdot d \cdot N_{\min}}{1,000} \leq V \leq \frac{\pi \cdot d \cdot N_{\max}}{1,000} \quad (2-2)$$

또한 이 범위는 작업자에 의해서 정해 질 수도 있다. 식에서 칩자 \min 은 최소값, \max 는 최대값을 뜻하고 N 는 주축 모우터의 회전속도 [rpm]이다.

2. 이 송

이송 모우터의 특성 및 기어비에 의해서

$$V_{f\min} \leq V_f \leq V_{f\max} \quad (2-3)$$

이므로 이송 f [mm/rev]는 아래의 범위에 있다.

$$f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \quad (2-4)$$

이 식에서 f_{\max} 는

$$\frac{V_{f\max}}{N_{\min}} \geq f_{\max} \geq \frac{V_{f\max}}{N_{\max}} \quad (2-5)$$

이고 f_{\min} 은

$$\frac{V_{f\min}}{N_{\min}} \geq f_{\min} \geq \frac{V_{f\min}}{N_{\max}} \quad (2-6)$$

이다. 또한 이송의 범위는 작업자에 의해서 정해 질 수도 있다. 식에서 이송속도 V_f 의 단위는 mm/min이다.

3. 모우터의 동력

절삭에 필요한 동력은 회전엔 필요한 동력 P_T [KW]와 이송에 필요한 동력 P_f 이지만 P_f 는 P_T 에 비하여 무시할 수 있으므로⁽¹³⁾

$$P_T = 3.267 \times 10^{-4} \cdot T \cdot V / d \quad (2-7)$$

이고 절삭토오크 T [kg-mm]는 일반적으로⁽¹⁴⁾

$$T = C_t \cdot f^\alpha \cdot d^\beta \quad (2-8)$$

와 같으므로 주축 모우터 허용 동력 P_M [KW]과의 관계에서

$$f^\alpha \cdot V \leq \frac{\gamma \cdot P_M \cdot d^{1-\beta}}{3.267 \times 10^{-4} \cdot C_t} \quad (2-9)$$

이다. 단 위의 식 C_t , α 및 β 는 상수이고 P_M 은 조건 1) 하에서 상수로 가정할 수 있다.

4. 모우터의 토오크

절삭 토오크 T 와 기어비를 고려한 모우터의 허용 토오크 T_M [kg-mm]과의 관계에서

$$f \leq \left(\frac{T_M \cdot d^{-\beta}}{C_t} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2-10)$$

인데 T_M 과 P_M 의 관계를 고려하면

$$f^\alpha \cdot V \leq \frac{\gamma \cdot P_M \cdot d^{1-\beta}}{3.267 \times 10^{-4} \cdot C_t} \quad (2-11)$$

되므로 이 조건은 조건 3)과 일치된다.

5. 칩(Chip)제거

드릴의 기하학적인 형상 때문에 칩이 충분히 빠져 나오기 위해서는 아래의 조건을 만족해야 된다.⁽¹²⁾

$$f \leq C_1 \cdot d^a \quad (2-12)$$

그런데 d 에 비하여 절삭깊이 L [mm]가 3배 이상 일 경우는 아래와 같다.

$$f \leq \left\{ 1 - 0.059 \left(\frac{L}{d} - 3 \right) \right\} C_1 d^a \quad (2-13)$$

위에서 C_1 및 a 는 상수이다.

6. 추 력

절삭시에 추력 F [kg]는 일반적으로

$$F = C_f \cdot f^r \cdot d^\delta \quad (2-14)$$

이고⁽¹³⁾ 드릴이 좌끝에 걸리기 위해서는

$$F \leq \frac{\pi^2 \cdot E \cdot (\pi \cdot D_{AV})^4}{D_L^2 \cdot 64} \quad (2-15)$$

이므로⁽¹²⁾

$$f \leq \left\{ \frac{\pi^2 \cdot E \cdot (\pi \cdot D_{AV})^4 \cdot d^\delta}{64 \cdot D_L^2 \cdot C_f} \right\}^{\frac{1}{r}} \quad (2-16)$$

이다. 위의 식에서 C_f , r 및 δ 는 상수, E 는 탄성 계수, D_L 은 드릴의 길이 [mm]이고 D_{AV} 는 $0.7d$

이다.

7. 절삭 톨오크

전단에 의한 드릴의 파괴를 막기 위해서는 절삭 톨오크 T 는 아래 식을 만족해야 된다.

$$T \leq \frac{\pi \cdot D_{AV}^2 \cdot \tau}{16 \cdot s} \quad (2-17)$$

이 식과 절삭 톨오크 식과의 관계에서

$$f \leq \left(\frac{\pi \cdot D_{AV}^2 \cdot \tau \cdot d^{-\beta}}{16 \cdot s \cdot C_t} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2-18)$$

이다. 위에서 τ 는 허용 전단응력 [kg/mm²]이고 s 는 앞전계수이다.

이상의 제한조건들을 부록에 주어진 값들로 계산한 결과를 Fig. 1에 표시하였다. Fig. 1은 가공물이 SAE 1035강인 경우이지만 다른 재질에 대해서도 유사한 경향을 나타낼 수 있었다. 따라서

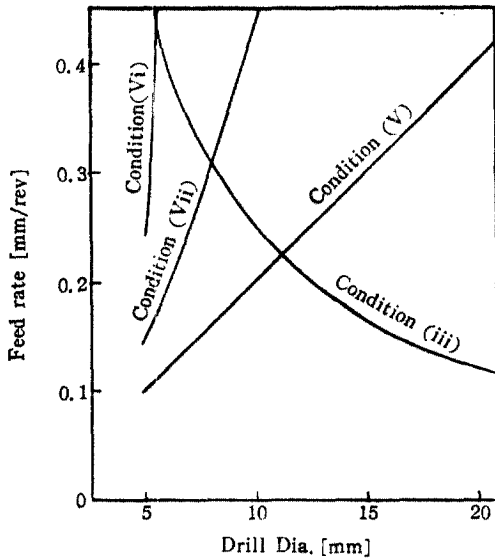


Fig. 1 Feedrate constraints against drill diameters.

이송의 최대값은 일반적으로 조건 3)과 5)에 의해서 제한 받음을 알 수 있다. 그런데 절삭속도보다는 이송이 큰 것이 유리하다는 경제적인 측면⁽¹⁵⁾과 제어계의 단순화 면을 고려할 때 이송을 조건 5)에 의한 값으로 두고 절삭속도만을 변화하여 제한조건을 만족하게 하는 것이 바람직하다. 즉, 이송을 최대로 두고 허용 동력내에서 작업을 행하는 것이 바람직하다. 또 조건 5)가 최소 절삭속도에서도 조건 3)을 만족 못시키는 경우에도 제어전략에 의해서

해결할 수 있다.

절삭동력을 구하려면 절삭 톨오크를 알아야 되는데 절삭 톨오크는 가공물의 재질에 따라서 달라질 뿐만 아니라 절삭중인 재료의 불균일성 및 드릴의 마모에 의해서도 달라지므로⁽¹⁶⁾ 절삭 톨오크는 절삭 작업 중에 검출해야 한다. Fig. 2에서는 드릴링 작업시의 제한조건들을 부록의 값으로 계산한 결과를 보인다.

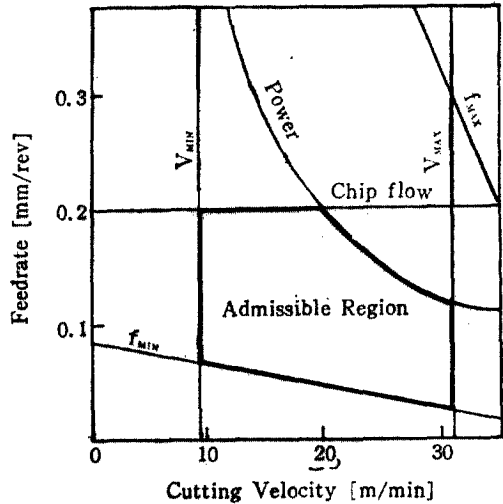


Fig. 2. Field of admissible cutting conditions.

III. 적응제어계

기존의 공작기계를 속도가변 모터와 μ -computer를 이용하여 적응제어가 가능하도록 변환시키고 절삭 톨오크와 절삭추력을 검출하게끔 드릴동력계를 제작하여 μ -computer에 연결시켜 적응제어계를 완성시켰다. Fig. 3에 그 개요도를 표시했다. 추력은 공회전과 실절삭의 관정을 위해서 측정했다. 실제 공회전 시간이 짧을 수록 경제적이므로 공

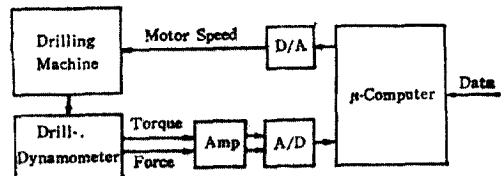


Fig. 3. Schematic diagram for adaptive control system.

회전 시에는 드릴이 최대속도로 가공물에 접근하도록 하였다.

1. 드릴 동력계

Fig. 4에서 볼 수 있듯이 추력을 측정하기 위해서 양단지지보를 4개 배치하였고 토오르크를 측정하기 위하여 감도가 민감한 팔각링을 사용하였다. 이들의 재질은 알루미늄이고 추력은 최대 400kg, 토오르크는 최대 1,500kg-mm 까지 측정할 수 있도록 설계했다. 동적실험에 의하면 추력방향의 고유진동수는 350Hz 정도였고 토오르크방향의 고유진동수는 280Hz 정도였다. 정적 보정실험에 의하면 토오르크가 추력에 미치는 영향은 무시할 수 있었으나 추력이 토오르크에 미치는 영향은 비교적 컸으므로 이를 μ -computer 내에서 보정해 주었다.

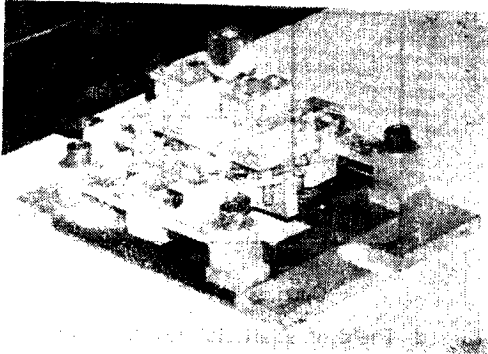


Fig. 4. Drill-Dynamometer.

2. 회전속도제어

가변속도 모우터의 속도제어기 회로 중에서 두선을 뽑아내어 직류전압 공급장치로 외부에서 전압을 가하여 회전속도와 가한 전압의 관계를 구해 본 결과 Fig. 5를 얻었다. Fig. 5에서도 볼 수 있듯이 300 rpm 부터 1,000rpm 범위까지는 거의 선형적이었고 그 기울기는 280rpm/volt 였다.

3. 제어방식

제한조건 내에서 절삭효율을 최대로 높이기 위해 제어변수를 변화시키는 방법은 여러가지가 있을 수 있으나 본 논문에서는 계단식으로 변화시키는 방법을 택했다. 즉, 절삭동력이 설정된 동력이하이면 절삭속도를 ΔV 만큼 증가시키고 그 이상이면 $n \cdot \Delta V$ 만큼 감소시키게끔 하였다. 또 계의 안정성을 위하

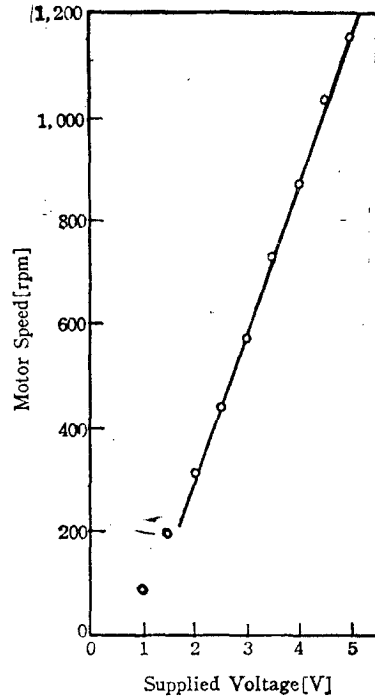


Fig. 5. Motor speed against supplied voltage.

여 설정된 동력은 어느 정도의 허용 폭을 가지게끔 하였다.

공회전 시간을 최소로 줄임으로서 기계의 생산율을 상당히 높일 수 있으므로 공회전 시에는 드릴이 최대속도로 가공물에 접근하도록 제어변수를 설정하며 드릴이 가공물에 닿는 순간에 추력에 의해서 판정한다. 절삭작업의 적응제어 시에는 계의 안정성을 고려하여 약 3초 간격으로 제어하지만 공회전 시에는 아주 빠른 간격(약 2ms)으로 추력을 검출하여 드릴과 가공물간의 충돌을 방지하였다.

드릴의 지름, 초기속도 및 최대허용 속도등 필요한 모든 자료는 CRT를 통한 대화 형식이 되도록 했고 최소허용 속도에서도 제한조건을 벗어 날 경우에는 모우터를 멈추고 이상의 감소를 지시하도록 프로그램을 만들었다.

IV. 실험 및 결과

본 연구에 사용한 드릴링 기계는 Meddings사의 중형드릴였으며 주축모우터는 1.5kW 용량의 속도

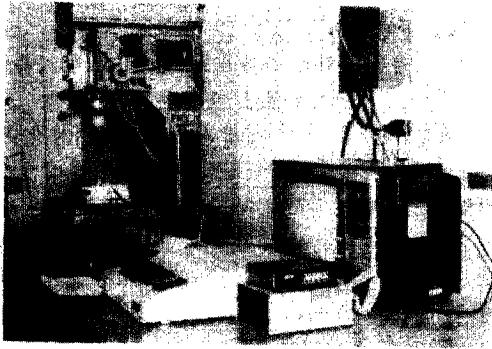


Fig. 6. Experimental setup.

가변모터(이천전기)로 대체하였고 이들의 제어용인 μ -computer는 64K 용량의 TriGem(삼보컴퓨터)이었다. Fig. 6에 실험장치를 보인다.

실험 중에 동력의 허용폭은 허용동력의 $\pm 10\%$ 로 하였고 절삭속도는 식(2-2)에 의한 제한과 동시에 아래 범위를 제한조건으로 하였다.

$$V_{max} = 1.5V_0$$

$$V_{min} = 0.5V_0$$

단, 위의 식에서 V_0 는 초기절삭속도이다. 절삭속도 변화 ΔV 는 1m/min로 하였고 n 은 2로 하였다. 실험의 편의상 이송은 항상 0.1mm/rev로 두었고 모든 시편의 길이는 70mm로 하였다.

Fig. 7에 나타낸 것은 SM45C 강을 초기속도는 25m/min로 두고 최대허용동력은 0.4kW로 가정

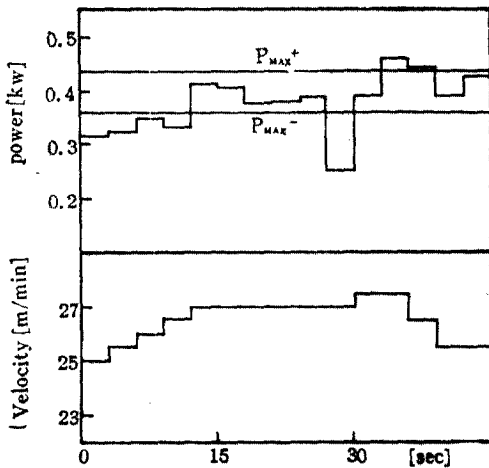


Fig. 7. Cutting velocity and power while machining under AC; Drill Dia., 10 mm; workpiece, SM45C.

하고 절삭실험을 행한 결과이다. Fig. 7에서 절삭이 허용최대동력 하에서 이루어 질 수 있도록 속도가 제어됨을 볼 수 있고 절삭시간은 약 45초이다. 적응제어를 하지않고 초기속도로 절삭이 행하여 질 경우는 절삭시간은 53초 정도이므로 공절삭시간의 단축은 고려하지 않더라도 약 5%정도 절삭시간이 단축됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 지름이 8mm인 드릴로 SM45C 강을 절삭할 경우인 데 초기속도는 10m/min이고 최대 허용동력은 0.3kW로 가정하였다. 이 경우는 속도 ($1.5 \cdot V_0$)와 동력 모두가 제한받음을 그림에서 볼 수 있다. 초기속도로 절삭이 행하여 질 경우 절삭시간은 105초 정도이므로 이 경우는 적응제어에 의해서 약 14%의 절삭시간이 단축되었다. 동력 변화가 약 30초 이후에 심한 것을 Fig. 8에서 볼 수 있는데 이는 비정상적인 칩 흐름으로 토크의 변화가 컸기 때문이다.

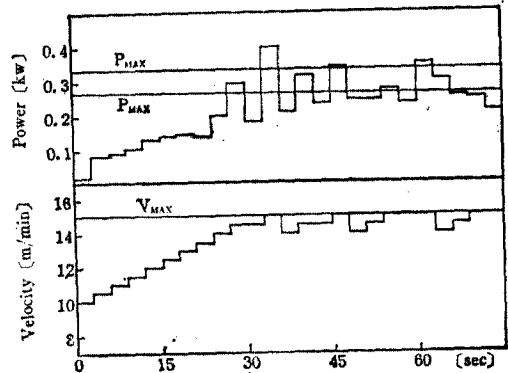


Fig. 8. Cutting velocity and power while machining under AC; Drill Dia., 8mm; workpiece, SM45C.

Fig. 9에 나타낸 실험의 시편은 길이가 35mm인 SM45C와 35mm인 황동을 용접한 것이고 절삭실험시에 SM45C가 먼저 절삭되게 배치하였다. 이 경우의 제한은 기계의 최대동력(1.5kW)과 회전수(900rpm으로 가정)였는 데 절삭시에 동력이 항상 허용범위 내에 있으므로 절삭속도가 증가하여 최대 허용치로 수렴함을 알 수 있다. 초기속도로 절삭이 행하여 질 경우 절삭시간은 66초 정도이므로 적응제어에 의하여 약 18%의 절삭시간이 단축되었다.

Fig. 10은 불균일한 재질에 대한 적응제어 효과를 보기 위한 것으로 Fig. 9에 나타낸 실험과 동일

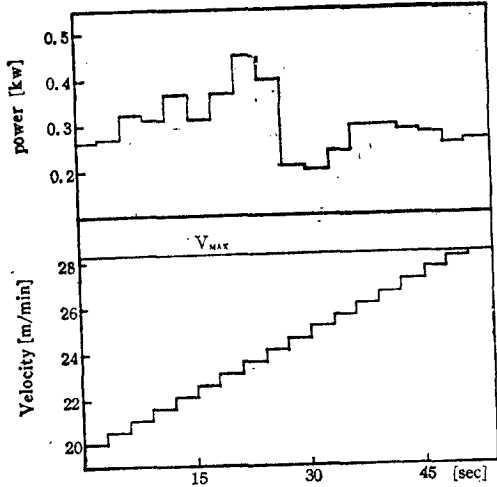


Fig. 9. Cutting velocity and power while machining under AC; Drill Dia., 10 mm; workpiece, SM45C(35mm)-Brass (35mm).

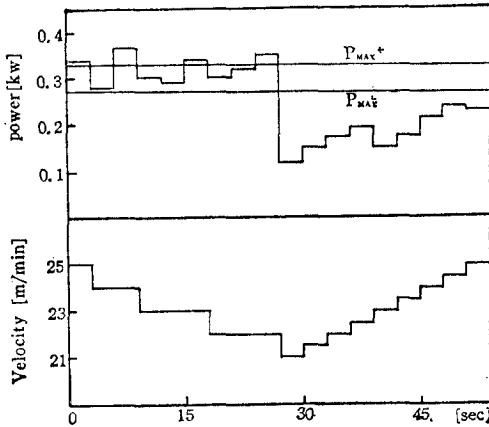


Fig. 10. Cutting velocity and power while machining under AC; Drill Dia., 10 mm; workpiece, SM45C(35mm)-Brass (35mm).

한 시편을 동일하게 배치하고 단지 허용동력만을 0.3kW로 제한하여 실험한 경우이다. 이 경우에도 공작기계의 적응제어에 의하여 절삭작업이 기계의 안전영역에서 이루어 지고 또한 효율을 높일 수 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

드릴링 작업의 구축적응제어에 관한 본 연구에서는 기존의 드릴링 기계를 속도가변 모우터, 드릴

동력계 및 μ -computer를 이용하여 적응제어 공작기계로 변환했다.

절삭작업을 수학적 모형으로 해석하여 절삭속도를 절삭변수로 선정하였다.

개발된 적응제어제로 실험한 결과 공절삭시간 및 실절삭시간이 상당히 줄어들어 생산성 향상이 입증되었으며 기계를 안전하게 사용할 수 있었다.

적응제어가 가능한 수치제어 공작기계의 상품화를 위해서는 검출기, 이송 및 제어장격의 단축에 대한 연구가 요구된다.

후 기

본 연구는 1983년도 문교부 학술연구조성비에 의하여 연구되었기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) R. M. Centner and J. M. Idelson, "Adaptive-controller for a Metal Cutting Process," IEEE: on Appl. & Ind. Vol. 83, No. 72, pp. 154-161 (1964).
- 2) R. M. Centner and J. M. Idelson, "Application of Adaptive Control to Manufacturing Process," Session 27, Paper 27.C., Machine Tool and Material Sorting, 22nd June 1966.
- 3) H. Takeyama, H. Sekikuchi and K. Taketa, "One Approach of Optimizing Control in Metal Cutting" Annals of CIRP, Vol. 18, pp. 345-352 (1970).
- 4) J. Hub, "A Study on the Adaptive Control System for Turning Process," Ph. D. Thesis of KAIS (1980).
- 5) Ledergerber, "Adaptive Control for Turning Operations," Proc. of the 12th MTDR Conf., pp. 7-13 (1972).
- 6) J. Meyer and G. Sautter, "Sinumeric with Adaptive Control for Machine Tools," Siemens Review XXXVII, No. 4, pp. 236-241 (1970).
- 7) R. Bedini, G. G. Lisini and P. C. Pinotti, "Enperiments on Adaptive Control of a Milling Machine," ASME. J. of Engr. for Ind.

- pp. 239—244 (1976).
- 8) R. Bedini, P. C. Pinotti and G. Presciuttini, "Adaptive Control in Drilling," Int. J. of MTDR Vol. 17, pp. 91—102 (1977).
- 9) R. Bedini and P. C. Pinotti, "Experiments on Adaptive Constrained Control of a CNC Lathe," ASME J. of Engr. for Ind. pp. 139—150(1982).
- 10) M. G. Jona, "Contribution to the Development of Geometrical Adaptive Control in Turning," Proc. of the 11st MTDR Conf. pp. 429—445 (1970).
- 11) J. Frisch and P. Mahrs, "On the Use of Analog Digital Conversion During DNC Metal Cutting," Proc. of North American Metal Cutting Research Conf. May (1973).
- 12) S. Hinduja, et al, "An Operator-Directed Control System for N. C. Drilling Machines," Int. J. of MTDR, Vol. 23, No. 4, pp. 262—278 (1983)
- 13) 金東垣 著, 機械工作法, pp. 410—412, 清文閣, (1976).
- 14) 藤永夏編著, 最新工作機械, pp. 209—212, 東明社, (1975).
- 15) Nathan H. Cook, Manufacturing Analysis, pp. 148—180, Addison-Wesley, Reading (1966).
- 16) K. Subramanian and N. H. Cook, "Sensing of Drill Wear and Prediction of Drill Life," ASME, J. of Engr. for Ind. pp. 295—301 (1977).

부 록

$N_{min}=300\text{rpm}$, $N_{max}=1,000\text{rpm}$, $d=10\text{mm}$,
 $V_{fmin}=20\text{mm/min}$, $V_{fmax}=300\text{mm/min}$, $C_t=60.5$,
 $\alpha=0.78$, $\eta=0.7$, $P_M=1.5\text{kW}$ (Fig. 1의 경우),
 $P_M=1\text{kW}$ (Fig. 2의 경우), $C_1=0.023$, $a=0.95$,
 $C_f=21,620$, $\gamma=0.87$, $\delta=2.12$, $E=3\times 10^4\text{kg/mm}^2$,
 $D_L=100\text{mm}$, $\tau=150\text{kg/mm}^2$, $S=5$.