

切削工程의 適應制御에 關한 研究

金 南 京*, 宋 地 復**

A Study on Adaptive Control of Cutting Process

Nam-Kyung Kim*, Ji-Bok Song**

ABSTRACT

Conventionally, model equation for cutting process has been used at adaptive control. But in this paper, the cutting force is discerned by piezo electric dynamometer and is controlled adaptively using fuzzy inference so that the constant load feeding is possible.

Main conclusions are as follows: (1) with proper design of fuzzy label, more active cutting force control is possible. (2) adaptive control is possible with only qualitative knowledge instead of model equation of cutting process.

1. 緒 言

現在 切削 加工에 있어서 生産性 向上을 위해 工作 機械의 知能化에 의한 장기간 無人化 운전이 推進되고 있으며 加工 內容을 보다 충실히, 그리고 生産性을 한층 더 높이기 위해 空切削 時間의 短縮과 양호한 效率로 定負荷 移送機能를 갖는 實切削의 必要性이 강하게 대두되고 있다.

또한 切削 加工 특히 金型 加工에 있어서는 工作物 의 形狀 變化가 많아 이에 따른 最適의 移送速度를 NC program 한다는 것은 극히 어려운 일이다.

이와 같은 問題를 해결하기 위해 切削 Torque 또는 切削力등, Process의 特定한 變數에 주목하여 Process상태를 安定하게 하기 위한 適應 制御⁽¹⁻⁴⁾가 개발되어 있지만 Sensor의 신뢰성과 정확성, 그리고 切削機構의 理論的, 實驗的 이해에 때문에 아직도 實用화되어 있지 않고 있다.

따라서 本 研究에서는 從來의 適應制御에 필요로 하

였던 加工 Process의 Model식 대신 壓電形 Dynamometer를 利用, 切削力을 Inprocess狀態에서 식별, 이를 Fuzzy推論에 의해 適應制御 함으로써 效率인 定負荷 移送 기능의 실현을 시도 하였으며 金型 加工時 많이 이용되는 Endmill가공을 대상으로 그 妥當성과 實用性を 檢討하였다.

2. 切削力의 力學的 特性

Endmill에 의한 切削加工은 外周 또는 端面에 있는 切刃이 工作物과의 相對 移送에 의해 점차적으로 그리고 斷續적으로 行해지므로 切削力의 크기와 方向은 언제나 變하고 있으며 이는 所要動力, 加工精度, 工具 壽命 등에 直,間接으로 影響을 미치고 있다.⁽⁷⁾

때문에 切削力 變動이 심하지 않아야 하며 이를 위 해 切削力을 減少시키면 加工能率이 떨어져 加工費가 증가하므로 효율적인 切削力 制御를 이룩하기 위해 그 變動因자를 정확히 규명하여야 할 것이다.

* 국립전주농림전문대학(정회원)

** 부산대학교 공과대학(정회원)

2.1 實驗

Fig. 1은 모의 실험을 하기 위한 장치의 概略圖이다. 壓電形 切削 動力計에 의해 檢出된 信號를 Charge amplifier를 통하여 電氣的 信號로 바꾸었으나 이에는 多刃 工具의 斷續 切削에 의한 狀態變化에 따른 靜的 成分과 動的 成分이 모두 포함되어 있기 때문에 정확한 절삭 상태의 變化를 알기 위해 Lowpass filter를 통하여 動的 成分을 除去 시켰다.

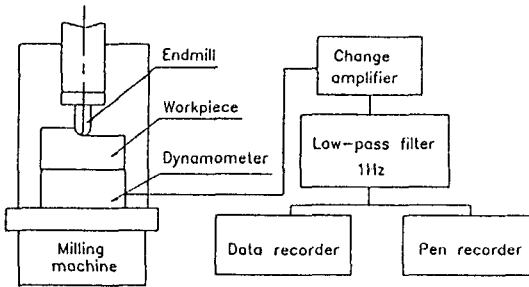


Fig. 1 Experimental set up

2.2 加工 條件에 따른 切削力의 變化

1) 切削 깊이의 影響

Fig. 2는 切削 깊이에 따라 變化하고 있는 抵抗力의 狀態를 표시한 것이다.

Fig. 2 a)에서 主分力은 切削깊이에 따라 增加하고 있으나 初期 切入 狀態에서 그 Pattern이 다름을 보여 주고 있다.

이는 主分力이 Fig. 3과 같이 2개의 切刃을 갖고 刃 先의 半徑이 5mm인 半球狀으로 되어 있는 工具가 工作物에 接하고 있는 弧의 길이에 比例하기 때문이며 이때 切削 깊이에 따라 그 값은

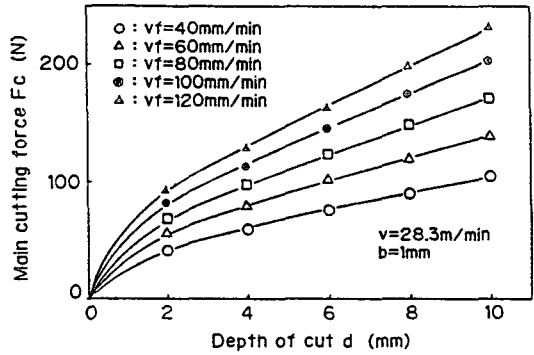
$$F_c = K \cdot r \cos^{-1}(1 - d/r) \quad (0 \leq d \leq r)$$

$$F_c = K \cdot (d - r + r \cos^{-1} \theta) \quad (d > r) \quad \text{-----(1)}$$

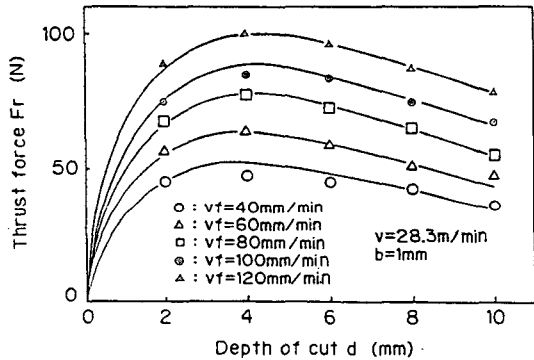
이 된다.

한편 切削깊이에 따라 移送分力의 變化가 主分力의 경우와 흡사함을 보여준 것은 그 接觸 Pattern이 같기 때문으로 여겨진다.

fig. 2 b)에서 背分力은 절삭깊이 5mm(工具 先端의 球狀 部分의 切刃만으로 切削할 경우)까지 增加하나



a) Main cutting force



b) Thrust force

Fig. 2 Cutting force according to depth of cut

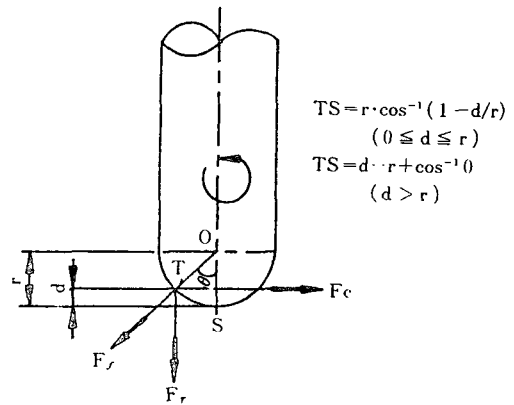


Fig. 3 Experimental tools form

그 후 圓柱 部分의 切刃에 의한 切削이 移行되면서 오히려 減少하는 경향을 보여 주고 있음은 Ball

Endmill의 圓柱 部分에 나선형으로 되어 있는 절인이 강제적으로 Chip을 排出하면서 工作物를 끌어 올리는 힘이 생기기 때문이다.

2) 移送速度의 影響

主分力과 移送速度와의 상관關係를 나타낸 것이 Fig. 4이다.

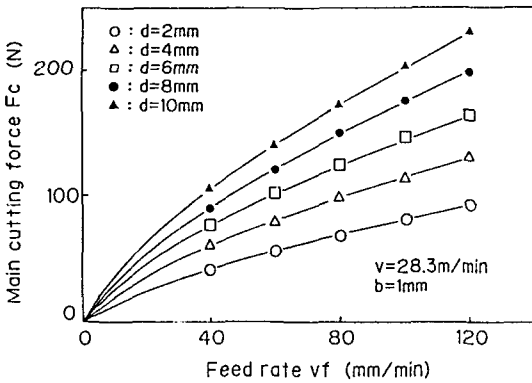


Fig. 4 Relation between main cutting force and feed rate

그림에서와 같이 主分力은 移送分力의 증가에 따라 단조롭게 증가하고 있으며 이송분력과 背分力에서도 같은 경향을 나타내었다.

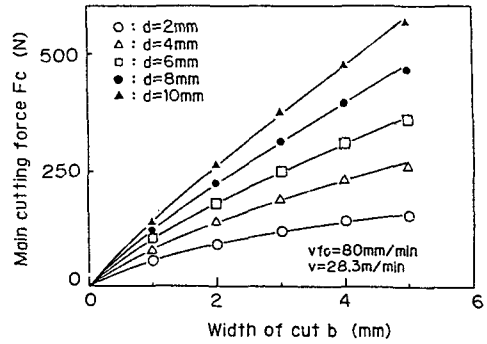
3) 切削幅의 影響

Fig. 5에서 切削幅이 증가하면 工具 1 回轉當 除去하는 칩적이 증가하기 때문에 主分力과 背分力이 증가하고 있으나, 移送分力은 2mm를 기점으로 감소하고 있음을 알 수 있다.

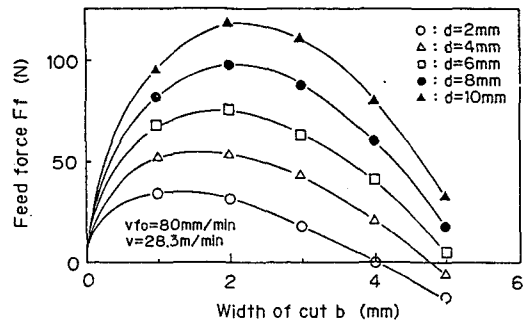
이는 移送 Servomotor에 의해 생기는 압력과 절삭에 의한 저항력과 合力이 移送分力이 되기 때문에 切削幅이 작을 때는 이송 Moter에 의한 힘이 지배적이지만, 절삭폭이 增加하면 切刃의 절삭 거리가 길어져 절삭에 의한 힘의 영향이 커지기 때문으로, 그 한 예로써 Fig. 5 b)에서 절삭 깊이 2mm인 경우 절삭 폭이 4mm일 때 양쪽 값이 같아져 이송분력이 0이되나 5mm가 되었을때 陰의 값을 갖게 된다.

2.3 切削力의 特異性

이상의 切削 모의실험에서 特定 切削조건의 變化에



a) Main cutting force



b) Feed force

Fig. 5 Cutting force according to width of cut

따라 移送 分力과 背分力은 상반된 결과를 가져오고 있으나 主分力은 언제나 일정한 경향을 나타내고 있으므로 어떠한 切削 狀態의 變化에 대해서도 대응이 가능하도록 制御 System을 구성하기 위해 切削力 制御 Parameter로써 主分力에 注目하였다.

3. Fuzzy 推論에 의한 切削力 制御

切削 加工에 있어서 切削條件은 과거의 切削 Data와 知識 그리고 經驗에 의해 결정되어 지지만 不確定한 요인 때문에 加工中 狀態를 檢出하여 即興的 制御를 행하면 가공능률을 보다 向上시킬 수 있을 것이다."

이와 같은 관점에서 本 研究에서는 공구를 보호하고 加工時間을 短縮시켜 生産性を 높이기 위해 切削力을 一定하게 유지할 수 있게 移送速度 (加工變數中 절삭 깊이와 폭은 공구경로에 관계되므로 일반적인 경우 그 실용상 조작량으로 移送 速度만을 생각한다.)를 Fuzzy 推論에 의해 適應制御 하였다.

3.1 Fuzzy推論의 Algorithm⁹⁾

Fuzzy制御는 인간이 갖는 定性的인 知識을 Fuzzy 추론에 의해 실행되는 것으로 그 Algorithm은 檢出되는 主分力(F)과 主分力の 時間 變化率(ΔF)를 入力變數로하고 移送速度 制御를 위한 Override量(ΔV)을 出力變數로 하여 다음과 같이 정리하였다.

(1) 空切削

切削이 이루어지지 않고 있는 空切削에서는 主分力과 主分力の 時間 變化率이 0이 되기 때문에 切削時間을 短縮하기 위해서는 최대의 이송속도가 되겠끔 최대의 Override量 (150%)을 가하도록 하였다.

(2) 實切削

工具가 工作物에 接觸하는 순간 이송속도는 최대의 값을 갖고 있으므로 그대로 切削을 行하면 主分力이 급격히 增加하여 工具가 파손 될 위험이 있다. 따라서 이송속도를 감소시키는 方向으로, 또한 主分力이 設定值에 接近하면 그 速度를 維持할 수 있도록, 그리고 主分力이 設定值를 하회할 경우 移送速度를 增加할 수 있게 Override量을 加하여야 할 것이다.

이상의 諸般事項을 바탕으로 하여 Fuzzy 推論機構를 Class 分類, 推論, 評價, Override量의 결정 등의 4段階로 構成하였으며 이들의 關係를 圖示한 것이 Fig. 6이다.

여기서 PB=Positive Big, PM=Positive Medium, PS=Positive Small, ZR=Zero, Ns=Negative

Small, NM=Negative Medium, NB=Negative Big 를 뜻하며 Fuzzy 函數의 모든 集合 Label은 均等 分割을 原則으로 하였다.

지금 시간 n에 있어서 최적의 이송 속도 V_n는

$$V_n = V_{n-1} \cdot \Delta V_n \text{ ----- (2)}$$

이나 n-1 시간에서는 V_{n-1}=V_{n-2}·ΔV_{n-1}이 되어 (2)식은

$$V_n = V_{n-2} \cdot (\Delta V_{n-1} \cdot \Delta V_n) \text{ ----- (3)}$$

와 같이 되고 NC program 상에 설정되어 있는 이송 속도 V₀로 치환 정리하면

$$V_n = V_0 (\Delta V_0 \cdot \Delta V_1 \dots \Delta V_n) \\ = V_0 \Delta V'_n \text{ ----- (4)}$$

가 된다. 따라서

$$\Delta V'_n = \Delta V_0 \cdot \Delta V_1 \dots \Delta V_n \\ = \Delta V'_{n-1} \cdot \Delta V_n \text{ ----- (5)}$$

인 數列式으로 ΔV'를 表示할 수 있기 때문에 切削力을 一定하게 移送速度를 制御할 수 있도록 2制御 Rule (入力變數 ΔV₀와 ΔV'_{n-1}, 出力 變數 ΔV'_n) System 을 Fig. 7과 같이 構築하였다.

3.2 切削力 制御 System¹⁰⁾

Fig. 8은 切削抵抗을 일정하게 유지키 위해 移送速度를 制御할 목적으로 구성된 System 이다.

Low pass filter를 통해 動的 成分이 除去된 主分力과 differential Circuit에서 求해진 主分力の 時間 變化率이 Fuzzy controller에 입력되면 Fuzzy推論에

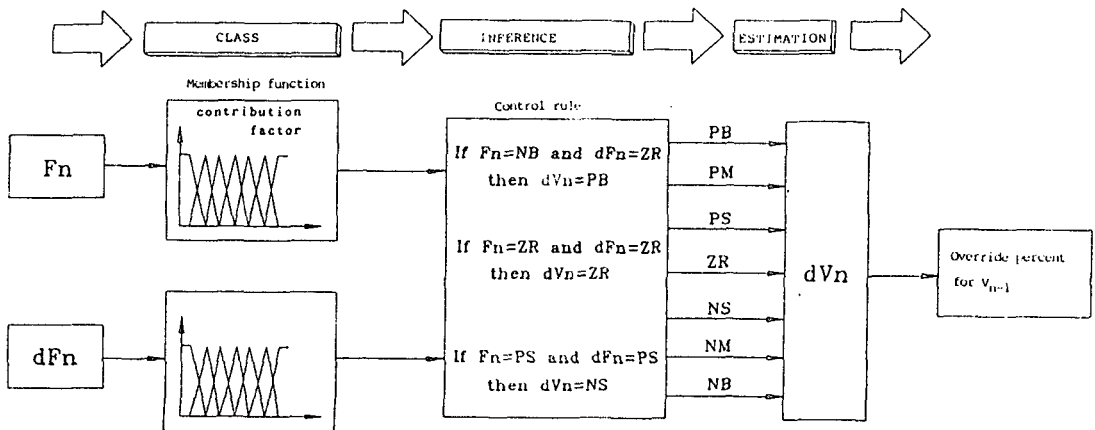


Fig. 6 Fuzzy inference mechanism

의해 最適의 移送速度가 되는 出力 信號(-5V~5V인 전기적 信號)가 Programmable Controller에서 Override 信號로 변환된다. NC controller에서는 P/C로부터 送入된 Override量과 NC program에서 設定되어 있는 移送速度와의 積에 의해 求해진 값으로 공구가 움직이게끔 Motor Servo Unit에 이송 速度를 指令하게 된다.

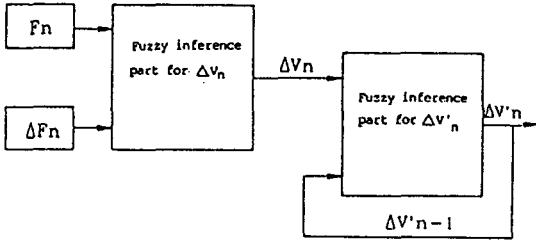


Fig. 7 Rule of cutting force control

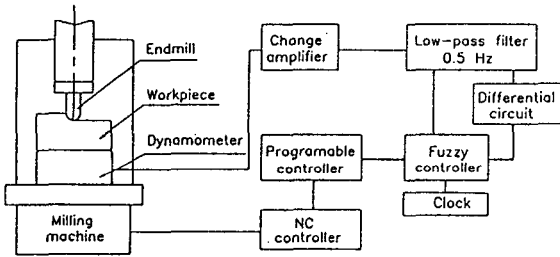


Fig. 8 Controller system for cutting force

3.3 制御 System의 評價

Fig. 9는 開發된 本 System을 評價하기 위해 切削性 實驗에 쓰인 工作物의 形狀을 나타낸 것이다.

切削 加工 現場에서는 절삭 깊이가 最大로 되었을 때 切削力이 許容上限値가 되겠끔 移送速度를 定하여 切削을 行하지만 本 研究에서는 切削力의 許容上限値와 下限値의 中間값을 그 設定値로 하였다.

Fig. 10의 세션은 從來의 切削方法에 의해 切削을 行하였을 경우이고 굵은 실선은 Fuzzy 制御를 적용하였을 경우이다. 대체적으로 加工時間이 16% 가까이 短縮되고 있으나 절삭 깊이의 變化에 對한 切削力과 移送速度가 심한 變動을 하고 있으므로 적절한 制御가 이루어 지지 않고 있음을 알 수 있다. 이는 制御 變數의 各 Fuzzy Label이 3角 모양으로 均등하게 나누어졌기 때문에 일어난 현상으로 그 해결을 위해서는

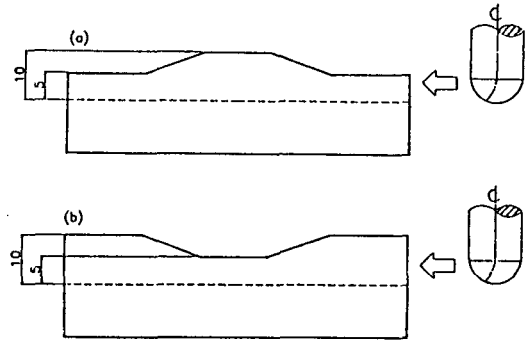


Fig. 9 Workpiece form using cutting force control

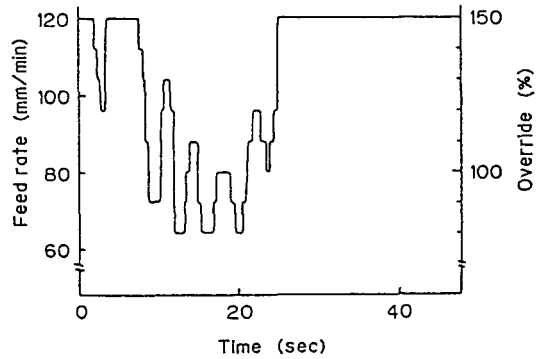
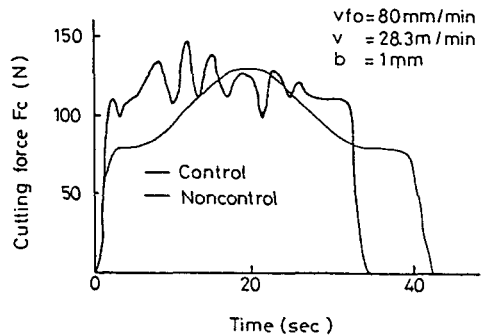


Fig. 10 Cutting force and feed rate according to time change

- (1) PB, PM, PS, NS, NM, NB의 各 範圍를 比例적으로 設定値 부근의 ZR에 가까울수록 좁게 分割하고,
 - (2) Fuzzy Label의 모양은 各 Label이 겹쳐 있는 部分이 넓어져 중심 移動이 용이하겠끔 사다리꼴 모양으로 구상 하였다.
- 이상의 (1), (2)를 基準으로 設計된 各 Label에 對

한 Fuzzy membership 함수를 표시 한 것이 Fig. 11이다.

Fig. 12는 Fig. 11의 Membership 함수를 이용하여 절삭한 결과를 나타낸 것이다.

절삭 개시 직후 工具의 損傷을 방지하기 위해 이송 속도가 다소 減少하고 있으나 이내 設定値에 接近하여 양호한 效率로 절삭이 이루어 지고 있으며 또한 工作物의 形狀을 바꾼 Fig. 9 b)에 대해서도 유사한 결과를 가져 왔다.

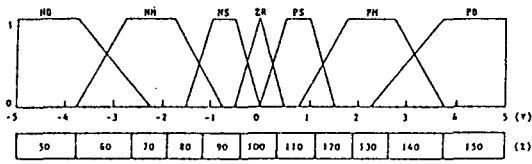


Fig. 11 Membership function of control variables

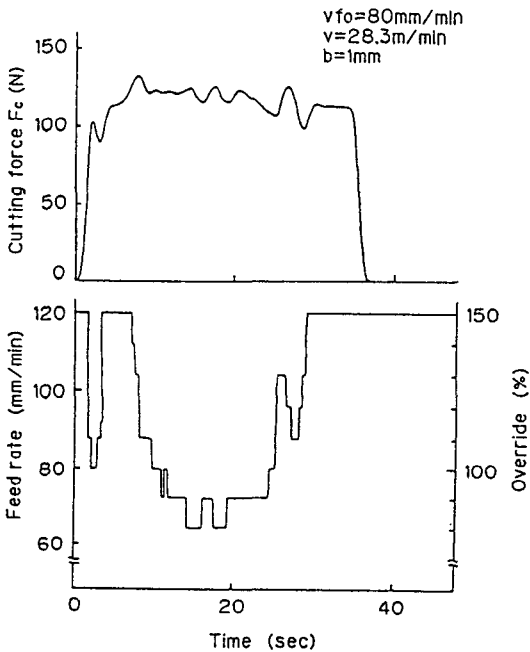


Fig. 12 Cutting force and feed rate by reviewed membership function

Fig. 13은 切削幅 變化에 따른 有効성을 檢討하기 위해 그 값을 2mm로 하였을 때의 結果를 表示한 것이다.

그림에서와 같이 切削力은 이내 設定値에 接近하고 加工時間은 14% 정도 短縮되었으며, 3mm인 절삭폭에 대해서도 21%의 시간 단축을 확인 할수 있었다.

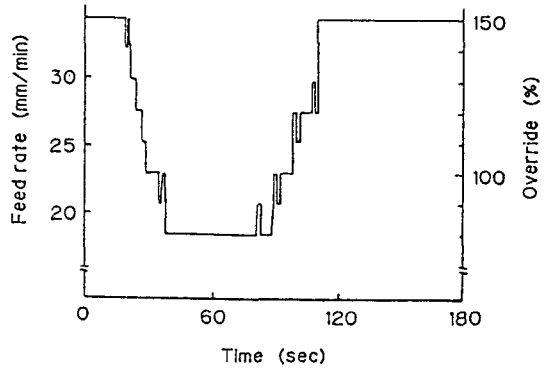
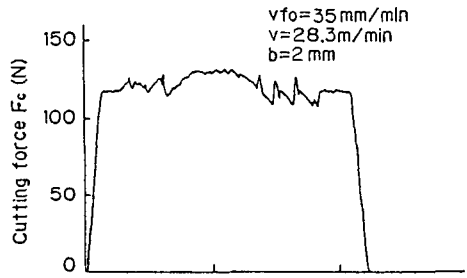


Fig. 13 Cutting force and feed rate at cutwidth

4. 結 言

生産性を 높이기 위해 定負荷 移送 機能을 갖는 Fuzzy 適應制御技法을 開發하여 Endmill加工을 대상으로 그 妥當性和 實用性を 檢討, 다음과 같은 結果를 얻었다.

1. Fuzzy 推論에 의해 所定の 切削力 制御가 가능하며 Fuzzy Label의 適切한 設計에 의해 보다 效率的 加工 結果를 얻을 수 있었다.
2. 從來의 適應 制御에서 必要로 하였던 加工 Process의 Model式 대신 定性的인 知識만으로 適應 制御가 가능하였다.

謝 辭

本 論文은 1990년도 교수 국비 해외 파견 연구 계획에 의해 수행되었으며, 이에 심심한 사의를 표합니다.

參考文獻

1. R. Bedini, G. G. Lisini and P. C. Pinotti, "Experiments on Adaptive Control of A

- Milling Machine", Journal of Engineering for Industry, Transactions of The ASME, February 1976, pp 239.
2. A. Galip Ulsoy, Y. Koren and F. Rasmussen, "Principle Developments in the Adaptive Control of Machine Tools", Journal of Dynamic system, Measurement and control Transactions the ASME, June 1983, Vol. 105, pp 107.
 3. O. Masory and Y. Koren, "Stability Analysis of A control Force Adaptive Control System for Turning", Journal of Engineering for Industry, Transaction of the ASME, November 1985, Vol. 107, pp 295.
 4. 송지복, 이만형, 이시복, 김선호, "절삭공정의 적응제어에 관한 연구(I)", 한국 정밀 공학회지, Vol. 2, No. 3, pp 63~72. 1985.
 5. Shield Bao-Hsin Lin and Oren Masoly, "Gains selection for A variable Gain Adaptive Control system for Turning", Journal of Engineering for Industry, Transactions of The ASME, November 1987, Vol. 109, pp 399.
 6. 정충영, 오준호, "밀링머신의 절삭력 제어를 통한 표면 굴곡도 향상에 관한 연구", 87 한국 자동 제어학회, 논문집 pp 232, 1987.
 7. 本多庸悟, "切削加工의 適應制御", 機械技術研究所 報告 第 83號 pp 72.
 8. 臼井英治, "現代 切削理論" pp 352, 1990.
 9. R. M. Tong, "Synthesis of Fuzzy Models for Industrial Processes", Int. J. General System, Vol. 4, pp 146~162, 1978.
 10. 山崎 菅野, "ファジィ制御, システムと制御, Vol. 28, No. 7, pp 442~446, 1984.