

절삭력 간접 측정을 통한 웹기반 금형가공공정 감시 시스템

김건희[#] · 신봉철¹ · 최진화¹ · 신광호² · 윤길상² · 조명우³

Web-based Monitoring System for Mold Manufacturing Process by Indirect Measurement of Cutting Force

G. H. Kim, B. C. Shin, J. H. Choi, G. H. Shin, G. S. Yoon, M. W. Cho

(Received September 9, 2005)

Abstract

In this paper, the web-based monitoring system is developed for the effective process monitoring of mold manufacturing using web. In developed system, the cutting force for monitoring the manufacturing condition is measured using hall-sensor that is low cost and useful to be installed in a machine tool indirectly. Specially, the current of main spindle in a machine tool is converted into cutting force by various experiments. For effective web-based monitoring, the program which runs in the local computer of client is made to exchange message between a server and a client by making of ActiveX control and the result of manufacturing is shown on web-browser by Ch language. The developed system in this study is the foundation of establishing E-manufacturing in mold factory.

Key Words : Web-based Monitoring, Cutting Force, Mold Manufacturing, E-manufacturing, Ch Language

1. 서 론

금형 생산을 포함한 전반적인 생산현상에서 최근 IT 기술이 적용되기 시작하면서 생산 기술 디지털화의 중요성이 날로 높아지고 있다. 이는 전반적인 생산 제조업에서 인터넷과 IT 를 접목하여 제조업의 업무 프로세스, 관리방식, 거래 및 구매 등 사업 방식을 혁신하고 통합하여 나아가 기업의 ERP(Enterprise Resource Planning)를 구축함에 있어서 필수적인 요소이기 때문이다. 이러한 환경에 맞추어 최근들어 많은 연구가 진행되고 있는데, 이는 인터넷을 통한 분산환경에서의 동시 정보 교환 기술과 제품 생산 공정, 품질관리에 연계된 모든 정보의 DB 화 및 지식화를 추구하는 것이 산업 경쟁력을 확보하는데 유리할 수 있음을 입

증한다.

전형적인 제조 산업으로 분류되는 금형 생산 분야에서도 가공 기술의 고도화(Hi-tech), 다품종 소량생산, 정밀 금형 수요 증가 추세에 따라 생산 공정 상의 많은 혁신이 요구되고 있다. 매 제품마다 신제품 개발과 동일한 프로세스를 거치는 금형 생산 공정에서는 E-manufacturing 의 하부 부류인 MES(Manufacturing Execution System)의 적용을 통하여 공정 혁신을 이룸으로써 제작 금형의 정밀도 향상, 납기 단축 등의 목적을 이룰 수 있다. Fig. 1 에 E-manufacturing 과 MES 관련 다이어그램을 나타내었다.

실제로 현재 공작기계에서 진행되는 공정을 모니터링 하기 위한 많은 방법들이 제시되고 있고, IT 를 적용하여 원격지에서도 쉽게 공정 관리를

1. 인하대학교 기계공학과 대학원
2. 한국생산기술연구원 정밀금형팀
3. 인하대학교 기계공학부
교신저자: 인하대 대학원, E-mail:venkey@empal.com

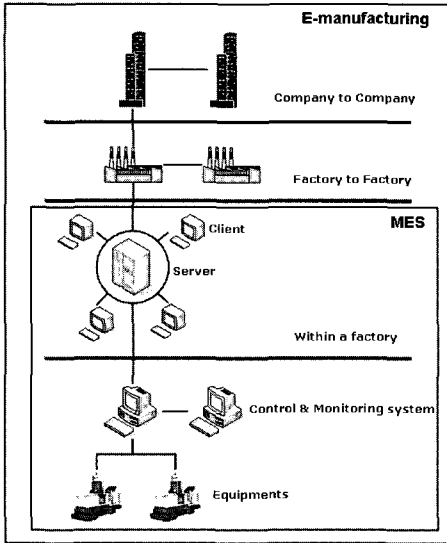


Fig. 1 Diagram of E-manufacturing and MES

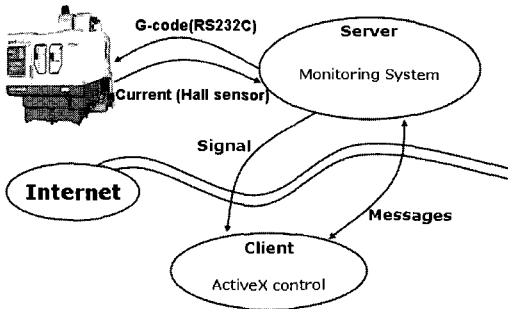


Fig. 2 Basic structure of system

할 수 있도록 하는 웹 기반 감시 시스템에 관한 많은 연구가 진행되고 있다[1~5]. 또한, 공작기계 컨트롤러 제작 업체에서도 IT 접목의 편의성과 가공 데이터의 DB 화를 용이하게 하기 위한 제품들이 개발되어 판매되고 있다. 그러나, 기존의 공작 기계에 새로운 컨트롤러를 설치하는 것은 추가적인 기술과 경제적인 부담이 발생함에 따라 각 현장에 맞게 커스터마이징(customizing)하는 것이 매우 어렵다.

본 논문에서는 현 금형 가공 현장에서 운용되고 있는 기존의 공작 기계에 별도의 컨트롤러의 교체없이 저렴한 비용으로 시스템 확장이 용이하고, 현장 적용이 가능한 웹기반 금형가공공정 감

시 시스템을 개발하였다. 가공공정을 감시 하기 위한 도구로써 홀 센서(Hall sensor)를 이용하였고, 전류 신호와 공구 동력계의 신호를 비교, 분석하는 실험을 수행하여 주축의 전류를 절삭력으로 환산하는 식을 유도하였다. 특히 홀 센서는 공작 기계의 가공 공정 중 아무런 영향을 미치지 않고 주축과 이송축의 전류를 검출함으로써 절삭력을 간접적으로 측정할 수 있고 저렴한 비용으로 시스템 구성할 수 있는 경제적인 장점도 가지고 있다. Fig. 2 에 개발된 감시 시스템의 개념도를 나타 내었다.

개발된 시스템은 가공을 수행하고 있는 공작 기계의 가공 데이터를 실시간으로 획득, 처리하여 웹 상에서 실시간으로 원격지 감시를 가능하게 하고 현재 가공 되는 금형 파트의 정보와 가공 진행 상황에 대해서 동시에 알려줌으로써 현재 공정감시 신호에 대한 이해를 돕는다. 효율적인 양방향 통신을 구현하기 위하여 1:1 소켓(socket) 통신을 구축하였으며, 클라이언트(client)측 웹 구동 프로그램을 ActiveX control 로 제작하였다. 또한 다양한 프로그래밍 언어의 장점을 가진 Ch 언어를 이용하여 가공 정보 파일 업로드 및 가공 결과 등을 웹 상에서 효과적으로 보여줄 수 있도록 인터페이스를 구축하였다.

2. 홀 센서를 이용한 절삭력 측정

2.1 기본 이론

일반적으로 2 차원 밀링 절삭의 절삭 경로는 공 구 반경보다 작다는 가정 하에 원호로 근사할 수 있다. 이러한 경우에 절삭토크(T_c)는 접선 방향의 절삭력(F_t)과 공구 반경(R)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$T_c = F_t \times R \quad (1)$$

공구가 회전하면서 절삭을 진행함에 따라 날당 최대 절삭 토크는 접선 방향의 절삭력이 최대일 때 발생한다. 또한 4 날 이하의 완전 절입 조건과 절입각이 90° 일 때의 조건 하에서는 미 변형 절삭두께가 최대가 되며, 이 때 접선 방향 절삭력과 공구 동력계에서 측정된 Y 방향 절삭력은 동일해 진다. 이와 같은 조건으로 식 (2)와 같은 비례 관계를 유도할 수 있다.

$$F_{c\max} = \frac{\sqrt{1+r^2}}{R} \times T_{c\max} \quad (2)$$

2.2 AC 모터 전류와 모터 토크와의 관계

공작기계에는 인입되는 모터 전류로 정류자와 브러쉬의 마찰로 인한 열 발생과 유지 보수의 어려움이 있는 DC 모터 대신에 AC 모터가 주로 사용된다. AC 모터의 회전자계를 얻기 위하여 사용되는 3 상 전류의 경우 U,V,W 의 3 상권선에 전류가 각각 인가되고, 이와 동시에 계자 자속이 자속 밀도의 형태로 인가된다. 각 상에서 인가된 전류와 자속 밀도에 의하여 발생하는 총 토크량 T_m 은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_m = T_u + T_v + T_w = \frac{3}{2} K I_m B_m \quad (3)$$

위 식에서 T_u, T_v, T_w 는 U, V, W 각 상 토크량, K 는 모터상수, I_m 은 모터 총전류, B_m 는 모터 자속 밀도를 의미한다.

동기 모터의 경우 영구 자석이 사용되므로 토크는 전류의 영향만 받게 된다. 이를 위해 3 상 전류를 D-Q 변환을 이용하여 등가직류로 변환할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos n_p \theta & \cos(n_p \theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(n_p \theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin n_p \theta & \sin(n_p \theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(n_p \theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_u \\ I_v \\ I_w \end{bmatrix} \quad (4)$$

(n_p :이송모터 극수, θ :영구자석 로터 회전각)

3 상 유도 모터의 경우는 동기 모터와 달리 D-Q 변환이 매우 복잡하고, 로터 전류의 단락 때문에 측정이 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 유도 모터의 등가 직류 전류를 도출하기 위하여 RMS(Root Mean Square)값을 이용하여 계산하였다. 이를 식 (5)에 나타내었다.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{I_u^2 + I_v^2 + I_w^2}{3}} \quad (5)$$

RMS 변환은 방향성에 대한 정보를 알 수 없는 스칼라(scalar) 변환이므로 로터의 회전각 측정이 필요 없다. 또한 동기 모터에서 절삭 공정이 정상

상태일 때 식 (4)의 I_q 와 식 (5)의 I_{rms} 는 $\sqrt{3}$ 의 상수배 차이만 나고 변환 후 전류 변화 양상은 동일하다. 식 (1)-(5)를 정리하면 주축의 전류와 절삭토크, 모터토크, 절삭력은 각각 비례 관계에 있음을 알 수 있다[6].

$$F_c \propto T_c \propto T_m \propto I_{rms} \quad (6)$$

2.3 절삭력 환산 실험

주축, 이송축의 모터 전류를 이용하여 절삭력을 간접 측정하기 위하여 실험을 수행하였다. 실험 장비 구성은 Fig. 3 과 같으며, 실험 조건은 Table 1 과 같다.

주축과 이송모터의 전류를 측정하기 위하여 각 모터 동력의 인입선 중 U, V 상에 홀 센서를 설치하였다. 주축 모터의 경우는 최대 출력이 11kw, 이송축의 경우는 최대 1.8kw 의 출력이 나오므로 주축의 경우에 맞게 50A/4V 사양의 센서를 각각 설치하였다. 홀 센서는 온도 변화와 전자기 유도 현상을 이용하는 것이기 때문에 노이즈에 민감하고 주파수 대역에 제한을 받을 수 있다.

본 연구에서는 홀센서의 단점을 보완하고자 500Hz의 저역 통과 필터(Low pass filter)를 사용하여 홀 센서의 고주파 잡음을 제거하였고, 여과된 전류 데이터와 공구 동력계의 절삭력 데이터를 A/D board를 이용하여 동시에 획득하였다. 가공 중 절삭력을 간접 측정하기 위한 전류값으로 주축의 RMS 전류값을 이용하였다. 각 이송축의 경우 공작기계의 칩 커버 마찰, 공작물의 하중 등의 많은 외부 오차 변수들이 존재하기 때문에 가공 진행 모니터링을 위한 신호로써만 사용하고 공구 동력계의 절삭력과 주축의 RMS 전류값을 연관지어 결과를 도출하였다.

실험 조건은 이송 속도(Feed rate)는 20mm/min부터 25mm/min 씩 증가시켰으며, 절삭깊이(Depth of cut)는 0.5mm, 절삭 속도(Cutting speed)는 200rpm씩 증가시키면서 각 조건마다 주축의 RMS 전류값과 공구 동력계의 절삭력 변화를 고찰하였다. Fig. 4는 각 조건의 실험 결과를 종합한 데이터를 나타낸 그래프이다. 절삭력과 전류의 관계는 약 96.5%의 정확도와 선형적인 관계를 나타내고 있어 식 (7) 과 같이 관계식을 정립하였다.

$$F = 143.70396M - 790.15769 \quad (7)$$

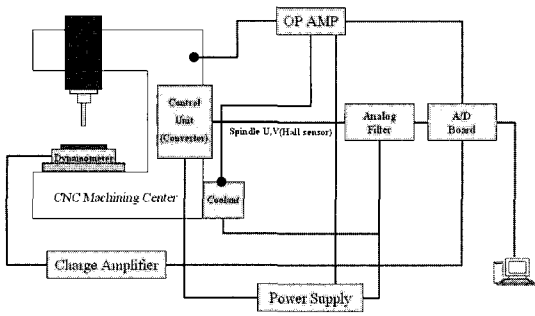


Fig. 3 The structure of experiment setup

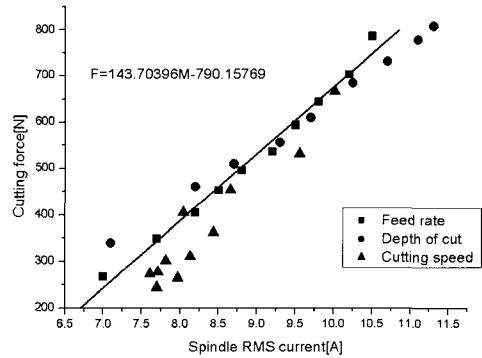


Fig. 4 Spindle RMS current vs. Cutting force along the experimental conditions

Table 1 Specification of the experimental apparatus

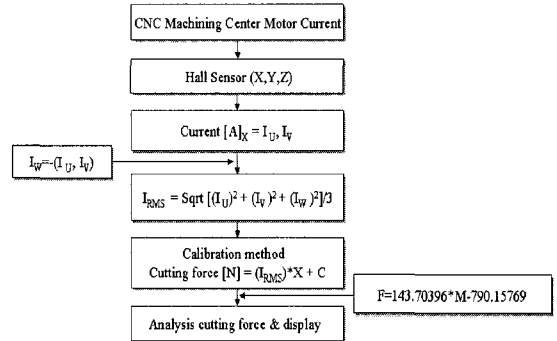
CNC machine	HYUNDAI HiMac V-100
Dynamometer	Kistler 社 9272 model
A/D board	ADLINK 社 PCI-9112
Tool	φ 20 4 teeth flat endmill φ 20 2 teeth flat endmill
Workpiece	S40C, SM45C
Feed rate	20mm/min~200mm/min
Depth of cut	0.5mm~4.5mm
Cutting speed	500rpm~2000rpm

주축의 RMS 전류값과 공구 동력계의 절삭력이 선형적인 관계를 나타냄으로써 주축 전류값으로 절삭력을 간접 측정할 수 있음을 확인하였고, 개발된 시스템에서는 검증된 관계식을 이용하여 실시간으로 획득되는 RMS 전류값을 절삭력으로 환산하였다(Fig. 5). 실시간 모니터링의 특성 상 RMS 전류값의 경우 미소한 시간 지연 현상과 절삭력 크기와 경향을 알기 위한 수단으로써 적합한 것으로 판단된다.

3. 시스템 설계 및 개발

3.1 웹 기반 시스템의 구성 요소

본 연구에서는 개발된 시스템은 서버(Server)와 클라이언트(Client)의 원활한 메시지 송·수신부를 소켓 통신으로 구현하였다. 클라이언트 측 프로그램은 Visual C++을 이용하여 ActiveX control로 제작하였으며, 이를 Internet Explorer를 통해 서버에



● RMS: Root Mean Square, X: multiplication factor, C: shift factor, D: depth

Fig. 5 The conversion process of RMS current into cutting force

최초 접속하는 클라이언트의 로컬 컴퓨터(Local computer)에 자동으로 다운로드되어 전용 뷰어(Viewer)를 설치하도록 하였다. 이러한 방법을 통하여 서버에 원활하고 빠른 접속을 가능하게 하고 효율적인 양방향 통신을 할 수 있게 된다.

웹 페이지를 구성하는 기본 요소로서 Soft-Integration의 Ch 언어(Fig. 6) 중 Ch-CGI와 HTML을 이용하여 구성하였다[7]. 원격지의 클라이언트는 가공 정보인 G-code 파일을 Ch-CGI로 구현된 파일 업로드 모듈을 통해 손쉽게 서버 측으로 전송할 수 있다. 또한 Ch-CGI를 이용한 Dynamic Web-plot 기능을 이용해서 가공 중 Server에 저장된 모니터링 신호를 웹 상에서 보여줌으로써 가공 결과를 클라이언트가 효과적으로 판단할 수 있는 인터페이스를 구현하였다.

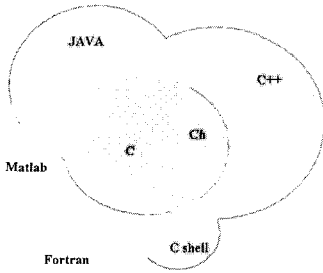
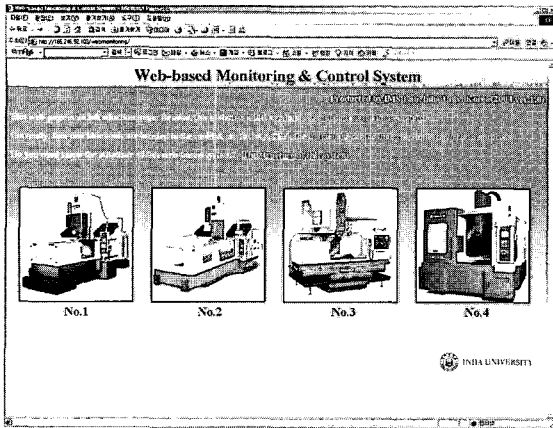


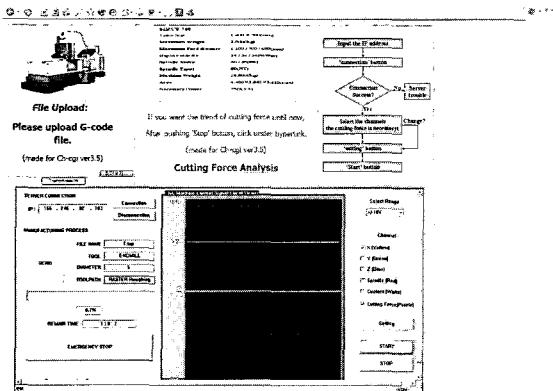
Fig. 6 Relation between Ch and other language

치가 용이하고 경제적인 부담이 적다.

개발된 시스템은 가공 정보 모듈, 가공 감시 모듈, 가공 결과 분석 모듈 등 3 개의 모듈로 구성되어 있으며, 가공 정보 모듈과 가공 감시 모듈은 ActiveX control 로 한 개의 프로그램으로 제작되었다. 클라이언트가 서버에 접속하면 현재 가공중인 공작기계를 선택하게 되고 해당되는 웹 페이지로 연결된다. Fig. 7 은 본 시스템의 웹 페이지를 나타낸 것이다.



(a) Main web page of developed system



(b) Monitoring web page of developed system

Fig. 7 Web pages of developed system

3.2 시스템 개발

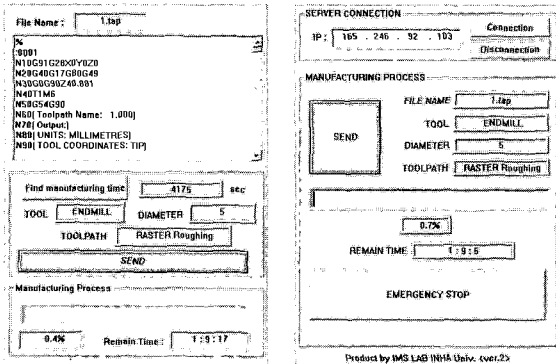
본 연구에서 구축한 시스템의 개발 환경은 Table 2 와 같다. 웹 서버(Web server) 구축을 위해 이용된 IIS 5.0 은 Window O/S 의 구성요소로서 설

3.2.1 가공 정보 모듈과 감시 모듈

서버는 가공 정보 모듈과 감시 모듈에 의해 공작기계에서 진행되고 있는 가공 상황과 장비에 설치된 홀 센서로부터 들어오는 전류 신호를 절삭력으로 환산하여 접속한 클라이언트에게 전송한다.

기존의 감시 시스템은 단순히 공작기계에 설치된 각종 센서로부터 수신되는 신호를 모니터링하는 방법을 이용함으로써 현재의 가공 상태와 공작기계의 상태는 알 수 있지만 생산 공정 관리에 실질적으로 필요한 현재 공정에 관한 정보는 알 수 없다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 본 연구에서 개발된 시스템은 원격지 클라이언트로부터 전송받은 가공 정보 파일(G-code)를 분석하여 클라이언트에게 전달하고 클라이언트는 서버로부터 전송받은 가공 정보를 확인 후 가공의 시작을 클라이언트가 직접 컨트롤 할 수 있는 인터페이스를 가지고 있다. 즉 가공이 시작됨과 동시에 수신되는 신호를 공정 흐름과 맞물려 파악할 수 있도록 황삭, 중삭, 정삭 등의 가공 단계, 가공 소요 시간, 사용되는 공구 등의 정보를 원격지의 클라이언트에게 알려줌으로써 가공 불량으로 인한 재 가공 소요, 측정 공정에 대한 소요 파악 등을 신속하게 결정할 수 있는 판단 기준을 제공하는 것이다. 또한 감시 중 이상 신호 발생 시에는 클라이언트에게 알려줌으로써 가공 불량으로 인한 재 가공 소요, 측정 공정에 대한 소요 파악 등을 신속하게 결정할 수 있는 수단의 역할을 할 수 있다. 또한 감시 중 이상 신호 발생 시에는 클라이언트가 현장의 관리자에게 비상정지 등의 다양한 정보를 메시지 호출 방식으로 알릴 수 있도록 구현되었다. Fig. 8 은 서버와 클라이언트 측의 동일한 감시 프로그램의 인터페이스를 나타낸 그림이다. 두 프로그램 모두 ActiveX control 로 제작되어 클라이언트 측에 배포된다.

절삭력 간접 측정을 통한 웹기반 금형가공공정 감시 시스템



(a) Server viewer

(b) Client viewer

Fig. 8 Process information viewer of developed system

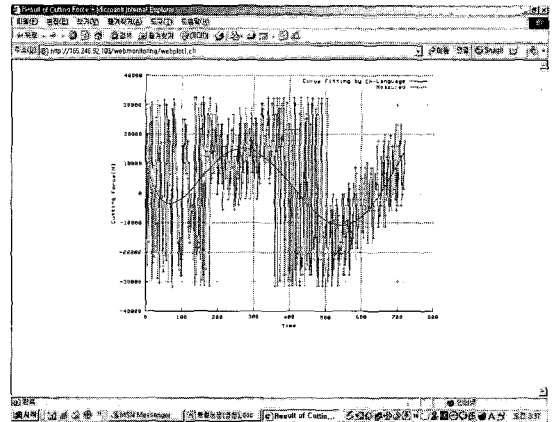


Fig.11 Example of web plot of cutting force

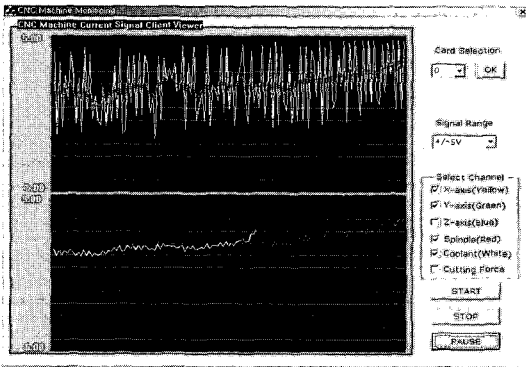


Fig. 9 Monitoring program of developed system

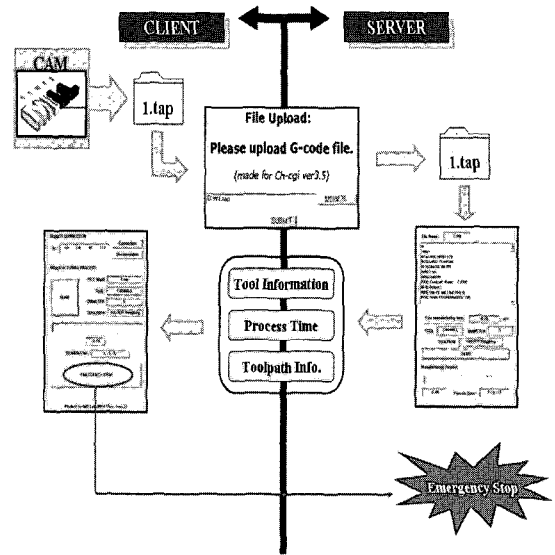


Fig.12 Process flow of web based monitoring system

현재까지의 가공 공정에 대한 확인을 클라이언트가 요청할 경우 기본 데이터(low data)와 커브 피팅(Curve fitting)을 거친 데이터를 동시에 웹 페이지 상에서 plot함으로써 클라이언트가 단계별 가공 평가를 용이하게 할 수 있도록 하는 보조적인 역할을 한다. 각 단계별 절삭력의 경향(trend)을 쉽게 확인함으로써 완료된 공정에 대한 평가와 후 공정에 대한 유연한 계획 수립을 할 수 있는 기반을 마련하였고 가공 단계 완료 후 불필요한 측정 소모를 줄이고, 그 단계에서 이상 신호가 확인 되는 경우 후 공정 진행 전에 OMM(On Machine Measurement)을 요청할 수 있는 판단 기준을 제시함으로써 측정 계

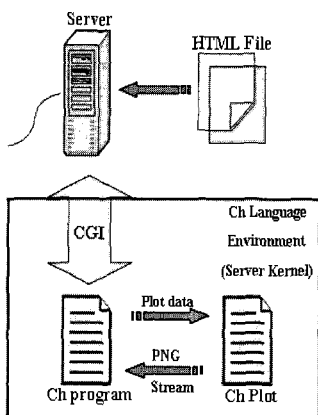


Fig.10 Web plot process by Ch-CGI 3.51

3.2.2 가공 결과 분석 모듈

본 모듈은 감시 모듈에 의해 획득된 데이터를 파일로 저장하여 한 단계의 가공이 완료되거나,

획 수립의 효율성도 극대화 할 수 있을 것으로 사료된다. 본 모듈은 Ch-CGI 3.51로 제작되었으며, Fig. 10은 가공 결과 분석 모듈의 운용 구조를 나타낸 것이며, Fig. 11은 가공 결과 분석 데이터의 예시를 나타낸 것이다. Fig. 12는 개발된 시스템의 전체적인 구동 프로세스를 나타낸 차트이다.

4. 결 론

본 논문에서는 금형 가공 공정의 효율적인 감시를 위한 웹 기반 감시 시스템을 개발하였다. 본 시스템을 금형가공업체에 적용함으로써 전통적인 산업의 IT 화를 용이하게 하고 ERP 구축의 기반을 마련할 수 있을 것을 판단되며 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 기존의 공작기계에 저렴한 비용으로 설치 및 적용이 용이하고 가공 활동에 간섭이 없는 홀 센서를 이용하여 금형 가공 상태를 모니터링 하였다.

(2) 여러 실험 조건 하에 공구 동력계의 절삭력 값과 주축의 RMS 전류값의 변화 양상 분석을 통하여 전류값과 절삭력 간의 관계식을 제시하였다.

(3) 개발된 시스템은 가공 정보 모듈, 가공 감시 모듈, 가공 결과 분석 모듈로 구성되어 있으며, 원격지에서도 금형 가공 공정에 대한 유연한 대처와 효율적인 공정 파악을 위한 인터페이스를 구축하였다.

후 기

이 논문은 2005 년도 학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2005-202-D00046).

참 고 문 헌

- [1] Kazuo Muto, 2003, Advanced Technology for manufacturing engineering development: XML technology on a system that enables user to view required information from the work shop through a web browser, JSAE Review 24, pp. 303~312.
- [2] Jay Lee, 2003, E-manufacturing - fundamental, tools, and transformation, Robotics and Computer Integrated Manufacturing 19, pp. 501~507.
- [3] C. F. Cheung, W. B. Lee, 2003, A framework of virtual machining and inspection system for diamond turning of precise optics, Journal of materials processing technology 119, pp. 27~40.
- [4] Y. J. Cho, J. J. Kang, Y. M. Heo, M. W. Cho, B. C. Shin, 2003, Development of the MES Framework for Injection Mold Plant, Proceedings of the Korea Society of Precision Engineering Conference, pp. 1239~1242.
- [5] H. S. Park, M. S. Jung, B. S. Kim, 2001, Architecture of Web-Based Real-Time Monitoring Systems, Journal of Control, Automation, and System Engineering, Vol.7, No.7, pp. 632~639.
- [6] B. C. Shin, 2004, Cutting process monitoring system development for E-manufacturing, M.S. thesis, Inha University, pp. 18~24.
- [7] Quigcang Yu, Bo Chen, Harry Chang, 2004, Web-Based Control System Design and Analysis, IEEE Control System Magazine June, pp. 45~47.