

E-manufacturing을 위한 가공공정 모니터링 시스템 개발

신봉철*, 윤길상⁺, 최진화⁺, 김동우⁺, 조명우⁺⁺

Cutting process monitoring system development for E-manufacturing

B. CH. Shin*, G. S. Yoon⁺, J. H. Choi⁺, D. W. Kim⁺, M. W. Cho⁺⁺

Abstract

Recently, with the rapid growth of information technology, many studies have been performed to implement web-based manufacturing system. Such technologies are expected to meet the need of many manufacturing industries those want to adopt E-manufacturing system for the construction of globalization, agility, digitalization to cope with the rapid changing market requirements. In this research, a real-time web-based machine tool and machining process monitoring system is developed as a first step for implementing E-manufacturing system. In this system, main spindle motor current and feed current are measured using hall sensors. And the relationship between the cutting force and the spindle motor RMS current at various spindle rotational speed is obtained. Also, a rule-based expert system is developed in order to monitor the machining process effectively. Finally, developed system is applied to real machining process to verify the effectiveness.

Key Words : Real-time(실시간), Hall Sensor(홀 센서), Cutting force (절삭력), Monitoring(모니터링), WEB(웹), Internet(인터넷)

1. 서론

최근 들어 점점 더 사회가 정보화, 디지털화 되어가면서 공작기계에서도 많은 변화가 요구 되고 있다. 생산 현장의 인원 투입과 부대비용을 줄일 수 있으면서도, 동시에 현장에서의 공정을 언제 어디서나 한눈에 알 수 있고 경제성, 편리성 그리

고 안전성 등의 문제점들을 해결할 방법으로 E-manufacturing이 요구되고 있다. 이로 인한 공작기계의 자동화, 무인화, 고속화, 고정도화에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 현재의 산업현장에서는 절삭가공 중 공구의 과부하를 피하기 위해 작업자가 수작업으로 공작기계를 직접 제어하거나, 가공시간을 단축하기 위해 자

* 인하대학교 기계공학과 (g2021023@inhavision.inha.ac.kr)

주소 : 402-751 인천광역시 남구 용현동 253번지

+ 인하대학교 기계공학과 대학원

++ 인하대학교 기계공학부

동화를 한다 해도 가공중 가공실수, 공구파괴, 충돌 등의 문제를 피하기 위해 일정수의 작업자가 항상 배치되어 있어야만 했다.⁽¹⁾ 무인가공을 위한 연구로는 공작기계의 이상 현상등과 같은 공구의 과부하, 공구의 파손, 마모, 채터등을 특정센서를 이용해 검출 및 진단하는 무인가공을 위한 연구는 오래전부터 진행되어 왔다.⁽²⁾ 그러나 산업현장에서 공구동력계, 가속도계, AE센서 등의 특정센서를 사용하기에는 가격이 비싸고, 적용하기에는 무리가 있다.⁽³⁾ 본 연구에서 개발한 가공공정 모니터링 시스템은 이러한 고가의 장비를 사용하지 않고 홀 센서를 이용하여 절삭공정에 아무런 영향을 주지 않고 저렴한 가격으로 공작기계 상태를 측정가능하다. 개발된 모니터링 시스템은 홀센서를 이용하여 가공중 절삭력과 이송속도, 주축rpm을 간접 측정할 수 있으며, 주축과 coolant motor의 온도를 측정하여 절삭 공정중에 온도의 변화를 살펴볼 수 있다. 또한 이상의 데이터를 가지고 전문가 시스템을 이용해 절삭 공정중 발생하는 공작기계의 상태를 절삭력과 함께 Web server로 실시간 전송하게 된다. 이와 같이 관리자나 Client가 인터넷을 통해 공작기계의 공정상태를 실시간으로 monitoring을 하는데 연구의 목적이 있다.

2. 이론적 배경

2-1. E-manufacturing

E-manufacturing이란 모든 연계된 개인과 조직을 위한 전략이다. 즉, 제조업에 필요한 각종업무를 인터넷 및 IT기술과 통합하여 실시간 정보공유, 통합된 설계, 계획, 생산과 공급에 양호한 의사결정에 내부, 외부 업무 프로세스에 대한 정보 통합화를 말한다. 이것의 주된 목적은 다음과 같다.

1. 유통 경로 혁신 : 고객과 유통경로상의 업무방식이 정보전달 방식으로 개선. (Availability, Speed, Inventory, Transportation, 로지스틱스 비용)

2. 외주 관리 개선 : 공급업체로 부터의 구매를 자동화, 통합화. (Sourcing, 구매비용, 물류 및 재고비용 감축, 납품정확도, 품질 개선)

3. 제품개발 혁신 : 공급업체와의 제품개발 협업 과정을 통합, 정보 공유체계 혁신. (제품개발기간 단축, 오류감소 및 품질제고, 개발비용)

4. 제조프로세스 혁신 : 납기단축, 재고감축과 같은 문제점에 대응. (제조 장비를 공장의 인터넷으로 원격 진단 및 유지보수)

비즈니스 프로세서로 수행되는 E-manufacturing은 전체 제조 업무의 정보 통합을 시스템을 지원한다. 즉 고객과 제품 관계를 실시간 생산 정보시스템과 결합 되어 이로 인해 고객 중심 대량 맞춤 제품에 대한 소싱, 제조와 공급에 대한 최상의 비용측면 효과적인 방법을 구현할 수 있다.

2-2. 전문가 시스템 이용한 가공공정 진단

공작기계의 고장 증상은 매우 다양하여 그 체계를 확립하기가 매우 까다롭다. 하지만 크게 나누어 보면 미작동, 오동작, 가공 불량 등으로 나눌 수 있다. 그러나 이러한 증상에 대해 전문가가 아닌 이상 일반 사용자가 실제로 판단하기는 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 신경 회로망, 전문가 시스템, Fuzzy등과 같은 인공지능 시스템을 적용할 수 있는데,⁽⁴⁾ 이중 전문가 시스템은 특정분야의 전문가의 지식을 인위적으로 프로그램화 한 것으로 그들의 경험과 지식을 비전문가가 자문을 구하는 시스템이다. 전문가 시스템은 다양한 표현기법으로 구성된 지식 베이스와 추론 엔진 등으로 구성 되어 있어 가공공정에서 일어날 수 있는 문제점들과 해결책을 제시하기에는 가장 적절하다. 본 논문에서는 절삭 가공 공정 상태에서 나오는 데이터를 이용하여 전문가 시스템의 알고리즘 중에 기본적인 IF... THEN의 Rule을 이용하여 가공중 공작기계의 상태를 판단하는 진단 알고리즘을 구현하였다.

2-3. 절삭력과 절삭토크

2차원 밀링 절삭에서 절삭토크(T_C)는 접선방향의 절삭력(F_T)과 공구반경(R)을 곱함으로써 구할 수 있다.

$$T_C = R * F_T \quad (1)$$

공구가 회전하면서 절삭함에 따라 날당 최대 절삭 토크는 접선 방향 절삭력(F_T)이 최대일 때 발생한다. 즉 날당 최대 절삭력은 최대 절삭토크와 비례한다.

2-4. 3상 교류 모터토크

직류(DC)모터의 경우 모터 토크(T_m)는 모터전류(I)에 비례하므로 모터 토크는 모터전류(K)와 모터토크 정수를 곱함으로써 구할 수 있다.

$$T_m = K * I \quad (2)$$

그러나 과거와는 달리 요즘에는 정류자와 브러시의 마찰

로 인한 열 발생, 유지보수의 어려움이 있는 직류모터 대신에 교류모터를 많이 사용하고 있다.

교류3상 모터에서는 직류모터에서와 달리 교류전류를 직류 전류로 변환 하여야 하는데 이러한 등가직류로의 변환은 D-Q변환 식에 의해 이루어진다.⁽⁵⁾

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}}$$

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

(n_p : 이송모터 극수(number of poles))

(θ : 영구자석 로우터 회전각)

D-Q 변환이란 3 상의 교류 모터에서 회전자 좌표계를 고정자 좌표계의 D 축과 Q 축으로 환산하는 변환이며, 만약 3상의 완전한 정현파를 D-Q 변환시키면, D 축의 전류는 0 이 되고, 진폭의 $\sqrt{\frac{3}{2}}$ 배에 해당하는 Q 축의 전류가 나온다. 그러나 3 상유도 모터에서의 D-Q 변환은 동기 모터에서의 변환보다 상당히 복잡하며 특히 유도 모터에서 3 상의 로터 전류는 단락이 되어 있어 측정할 수 없다. 그러므로 유도모터에서 3상의 교류 전류에서 등가의 직류 전류로 도출하기 위해서는 다른 방법이 요구된다.

3 상의 교류 전류로 등가한 직류 전류의 성분을 도출하는 방법은 3상 교류 전류의 실효값(RMS: root mean square)을 이용하는 것이다. 실효 값은 3상의 교류 전류를 식 4 와 같이 간단한 방법으로 자승 평균하여 등가의 직류 전류로 환산하는 방법이다.⁽⁶⁾

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{I_u^2 + I_v^2 + I_w^2}{3}} \quad (4)$$

I_q 전류를 얻기 위한 D-Q변환은 방향성이 존재하는 벡터 변환인 반면, 식. 4의 I_{rms} 전류를 얻기 위한 RMS변환은 방향성에 대한 정보를 알 수 없는 스칼라 변환이다. 그러나 D-Q 변환은 정확한 로터의 회전각을 알기 위해 엔 코더 측정이 필요한 반면 로터의 회전각 측정이 필요 없는 RMS변환은 매우 간단하기 때문에 모터 토크를 측정하기 위한 등가의 직류 전류를

얻는 방법으로 널리 쓰이고 있다. 또한 동기 모터에서 절삭 공정이 정상상태 (steady-state)일 때 I_{rms} 전류와 I_q 전류는 $\sqrt{3}$ 의 상수배 차이만 나고 변환 후 전류의 변화 양상은 똑같다.

유도모터에서 유도되는 모터토크는 외부에서 전류 센서로 측정할 수 있는 주축의 전류와 비례하고 절삭토크 및 모터 토크에 비례한 절삭력은 식. 5와 같이 비례 관계가 있음을 알 수 있다.

$$F_c \propto T_c \propto T_m \propto I_{rms} \quad (5)$$

3. 실험 및 고찰

3-1. 모니터링 시스템

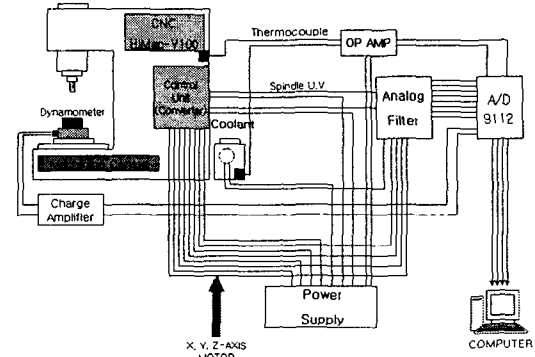


Fig.1 A design of monitoring system

실험에서 사용된 CNC공작기계는 현대 중공업의 머시닝 센터 HiMac-V100을 사용하였다. 절삭력을 측정하기 위해 Kistler사의 Dynamometer 9272를 사용하였고 이로부터 들어온 신호는 Charge Amplifier를 이용해 필터링 및 스케일을 조정하여 데이터를 획득하였다.

주축과 이송모터의 전류를 측정하기 위해서 동력의 인입선 중 U, V상에 홀 센서를 설치하였다. 주축 모터는 최대 11kw까지 나오므로 50A/4V를 설치하였고 이송축은 주축보다 낮은 1.8kw가 나오므로 주축과 같은 홀 센서를 설치하였다. 이러한 홀 센서는 절삭 공정중 기계 자체에 아무런 영향을 미치지 않고 저렴한 가격으로 전류의 변화로 절삭력을 간접적으로 측정할 수 있다는 장점이 있는 반면에 온도 변화와 전자기 유도현상을 이용한 것이므로 주파수 대역에 제한을 받을 수 있다는 단점을 가지고 있다.⁽¹⁾

하지만 홀 센서의 주파수 대역을 측정한 결과 1khz까지 주파수 대역에 문제가 없으므로 주축과 이송축에 설치한 홀 센

서에 고주파 잡음을 제거하기 위해 차단 주파수가 500Hz인 아날로그 필터를 제작 사용하였다. 절삭력과 전류신호의 데이터를 획득하여 비교하기 위해 AD LINK사의 AD9112를 사용하여 Visual Basic으로 모니터링 시스템을 구축하였다. 실험에서 사용된 공작물은 S40C를 사용하였고 공구는 Ø20황삭용 4날 엔드밀과 Ø20초경 2날 엔드밀로 병행하여 가공실험을 하였다. Table. 1 에서와 같이 절삭 깊이, 이송 속도, 절삭 속도를 각각의 조건들을 변화하며 절삭력과 전류 RMS값의 변화를 보았다.

Table.1 Experimental specification

CNC	HYUNDAI HiMac-V100
Tool	Ø 20mm 4teeth Flat Endmill Ø 20mm 2teeth Flat Endmill
Workpiece	S40C, SM45C
Feed rate	20mm/min ~ 200mm/min
Depth of Cut	0.5mm ~ 4.5mm
Speed	500rpm ~ 2000rpm

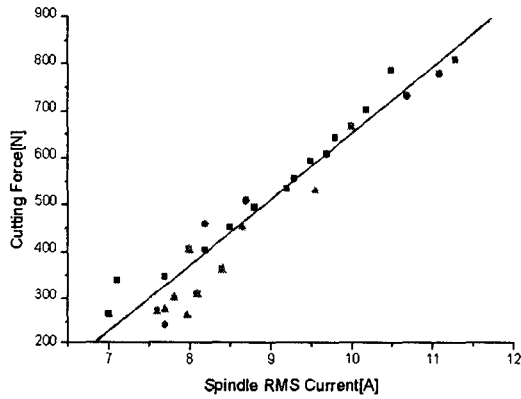
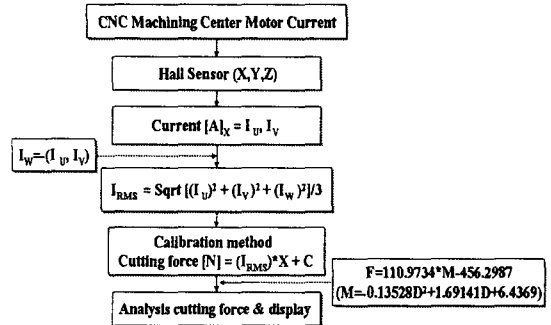


Fig.2 Relation of cutting force and Spindle RMS current

Fig.2 데이터를 분석한 결과 절삭력과 전류의 관계는 정확도가 96.5%의 관계를 가지고 선형적으로 변화하는 것을 확인할 수 있었고 이로써 어떠한 조건 변화에서도 주축 전류로 절삭력을 간접적으로 예측할 수 있었다.

전류RMS값을 Fig.3의 알고리즘을 이용해 보정하여 Fig.4와 같이 모니터링을 한 결과 절삭력과 전류RMS값은 약간의

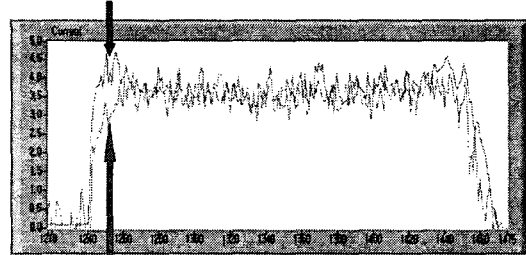
시간 지연이 있었고 절삭의 시작부분과 절삭의 끝 부분에서는 오차가 발생하나 절삭시 절삭력의 크기와 경향을 알 수 있었다.



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

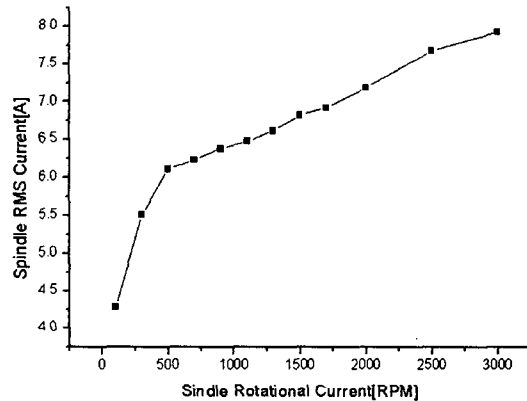
Fig.3 Flowchart of calibration algorithm

Tool dynamometer



Hall sensor signal

Fig.4 Monitoring



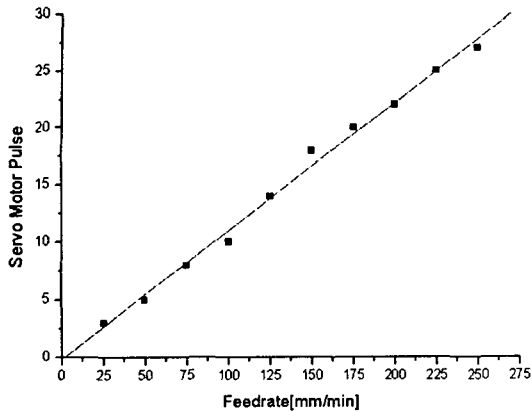


Fig.5 Indirect measurement of main spindle rpm and feed rate

Fig.5는 주축을 무부하 상태로 rpm을 증가하면서 전류 값과 이송속도를 증가하면서 펄스의 개수 각각 측정하였다. 이로써 주축 rpm과 이송속도를 간접 측정할 수 있었고 절삭시 rpm을 변화하며 가공할 때 절삭력과 주축 전류의 선형성을 유지할 수 있다.

3-2. 전문가 시스템의 적용

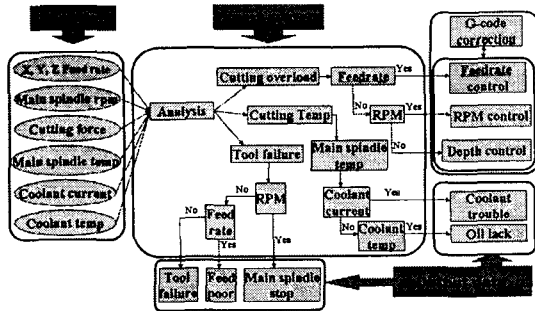


Fig.6 Rule of expert system

Fig.6의 전문가 시스템은 절삭력의 상승과 급격한 변화, 주축 온도 변화 등의 데이터를 가지고 문제점의 원인을 찾아내었다.

1. 절삭시 과부하 : 우선적으로 이송속도를 검사하고 문제가 없을 시에는 다음 단계인 rpm을 검사하게 된다. 이거 또한 문제가 없을 경우에는 이송속도가 빠르지를 확인하고 이상이 없을 시에는 절삭 깊이에 문제가 있음을 알리고 수정이 필요함을 알리게 한다. 이런 식의 질문은 절삭력에 영향을 주는 인자로는 rpm, feedrate, depth of cut이므로 순차적으

로 질문하게 된다.

2. 주축의 온도가 상승 : 온도에 영향을 주는 coolant에 관련해서 질문하게 된다. 우선 coolant모터의 고장을 확인하고 이상이 없을 시에는 다음 문제점인 oil의 유무를 판단하여 사용자에게 알리게 된다.

3. 절삭력이 급변할 경우 : 우선 rpm을 확인하게 된다. 다음으로는 이송속도를 확인하게 되는데 이유는 이 system의 절삭력은 주축으로부터 나오는 전류로 간접 측정하므로 rpm이 정지할 경우나 이송이 정지 시에는 절삭력이 급변하기 때문이다. 이러한 질문에 문제가 없을 시에는 공구 파괴로 인식하여 사용자에게 알려 준다.

3-3. WEB system 구조

웹 기반 모니터링 시스템은 모니터링을 하기 위해 CNC의 데이터를 저장하는 역할을 하는 Monitoring Server로 구성된다. 먼저 모니터링 대상인 CNC공작기계에서 홀 센서를 통해 들어온 데이터는 A/D보드를 통해 PC에 전송 되고 IIS와 Monitoring Server가 실행된다. 실시간으로 들어오는 데이터는 전문가 시스템과 데이터 가공 두 부분으로 나뉘어진다. 전문가 시스템은 들어오는 데이터를 이용해 문제점과 원인을 판별하여 Web상에 알람을 표시하게 된다. 다른 한쪽에서는 Web에 전송시 시간 지연을 줄이기 위해 데이터 가공을 통해 대표되는 특정 데이터를 추출해 전송하게 된다. 이런 데이터는 Server에 실시간으로 전송하여 웹 브라우저에 항상 출력된다.

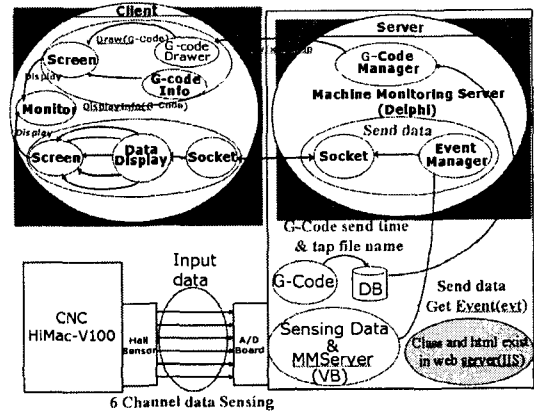


Fig.7 Structure of WEB program

WEB server와 client의 연동 방법은 Browser의 JVM을 이용하여 JAVA Applet을 실행하면 절삭력 디스플레이와

CAM데이터의 시뮬레이션을 수행한다. 또한, 웹 서버에 내장되어 있는 G-code분석 모듈을 이용하여 현재 CNC에서 운영되는 가공 G-code를 모니터 할 수 있다. CNC에서 획득한 절삭력 신호를 클라이언트의 웹 브라우저에 전송하는 프로그램 세부 모듈 구조도가 Fig.7에 나타나 있고 인터넷을 통한 CNC 공작기계 모니터링은 Fig.8과 같이 구현하였다.

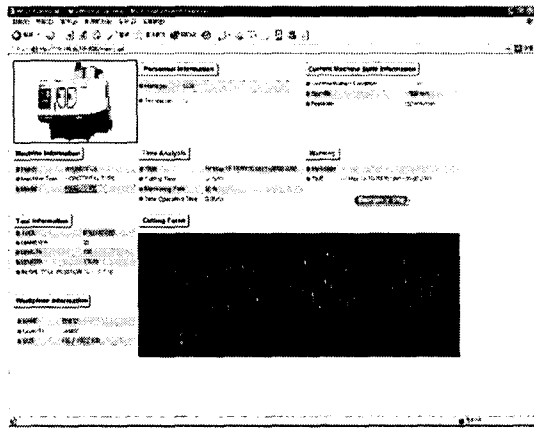


Fig.8 WEB-based monitoring system for CNC

4. 결론

본 논문에서는 가공 공정상태 모니터링 시스템을 개발하였다. 실험적 검증으로서, CNC공작기계에서 절삭 공정 중 Hall sensor를 이용하여 주축전류로 절삭력과 주축rpm를 간접 측정하였고, 이송축 전류로는 이송상태 감지와 이송속도를 간접 측정하였다. 전문가 시스템을 이용해 CNC공작기계 상태를 Server를 통해 데이터를 실시간으로 Internet에 전송하여 Client가 모니터링을 하였으며 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. AC Spindle motor의 전류 절삭방향과 절삭 조건의 관계 없이 절삭력을 신뢰도 있게 예측할 수 있었고 RPM도 간접 측정할 수 있었다.
2. 이송 모터 전류로 펄스의 주기로 Feedrate를 측정할 수 있었고 이송 상태감시를 하였다.
3. 측정된 데이터를 전문가 시스템을 이용해 공작기계의 공정상 발생하는 error현상을 추출하여 Web상에서 알람을 통해 Client에게 문제점과 해결책을 제시하였다.
4. CNC공작기계 대한 Web 기반 기계운전 원격 모니터링 기술을 개발하였다. S/W 개발을 위하여 플랫폼에 독립적인 JAVA를 사용하였으며, 원격 모니터링을 위한 매개로

TCP/IP 통신이 가능한 인터넷을 활용하였다.

5. 데이터의 처리로 인해 Web상에서의 모니터링은 시간 지연이 있었으나 무난하게 유지되었다.

현재 개발된 시스템이 하나의 CNC공작기계를 대상으로 하였기 때문에 실제 산업 현장에 적용하기 위해서는 차후 Cell단위의 기계를 대상으로 하는 연구 및 분산시스템을 구현하기 위한 정보기술에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- (1) Gi D. Kim, W. T. Kwon, C. N. Chu, 1997 "Indirect Cutting Force Measurement and Cutting Force Regulation Using Spindle Motor Current", *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 14, No. 10 pp15-27
- (2) H. Y. Kim, J. H. Ahn, 1995 "Monitoring System for Abnormal Cutting States in the Drilling Operation using Motor Current" *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 12, No. 5 pp98-107
- (3) S. H. Kim, J. H. Ahn, H. Y. Park, 1995 "Tool Breakage Detection using Pattern Characteristics of Feed Motor Current in Milling Operations" *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 12, No. 2 pp23-36
- (4) D. K. Seo, M. J. Kang, 1999 "Development of an Expert System for Diagnosing Machine Tool Failures" *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 16, No. 10 pp217-224
- (5) J. M. Lee, I. K. Huh, W. T. Kwon, C. N. Chu, 1995 "Tool Breakage Monitoring by Feed Motor Current during Milling Process" *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 12, No. 13 pp63-72
- (6) Gi D. Kim, Y. J. Choi, Y. T. Oh, C. N. Chu, 1997 "Friction Behavior and Indirect Cutting Force Measurement in a Machining Center Using Feed Motor Current", *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp78-87