

<기술논문>

## 산업용 로봇을 이용한 3차원 차체측정 시스템

김문상\* · 조경래\*\* · 박 강\*\* · 신현오\*\*\*

(1995년 9월 29일 접수)

### Three Dimensional Car Body Measuring System Using Industrial Robots

Mun-Sang Kim, Kyung-Rae Cho, Kang Park and Hyun-Oh Shin

**Key Words:** Car-Body Measurement (차체측정), 3-Dimensional Measurement (3차원 측정), Measuring Robot (측정 로봇)

#### Abstract

Inspecting the dimensional accuracy of a car-body in assembly line is a very important process to assure high productivity. Now there exist two common inspecting methods in practice. One is to measure a sampled car-body with three dimensional measuring machine, and the other is to measure car-body with three dimensional measuring machine, and the other is to measure car-body in assembly line using many sensors fixed to a large jig frame. The former method takes too long to inspect a sampled car-body of a same sort, and cannot therefore give an useful error trend for the whole production. On the other hand, the latter lacks flexibility and is very cost-intensive. By using industrial robots and sensors, an in-line Car-Body Measuring(CBM) system which ensures high flexibility and sufficient accuracy was developed. This CBM cell operates in real production line and measures the check points by the non-contact type using camera and laser displacement sensor(LDS). This system can handle about 15 Measuring points within a cycle time of 40 seconds. A process computer controls whole process such as data acquisition, file handling and data analysis. Robot arms changes in length due to ambient temperature fluctuation affecting the measuring accuracy. To compensate this error, a robot arm calibration process was developed.

#### 1. 서 론

자동차 차체의 조립공정중에 발생하는 차체의 형상오차와 그 경향을 알기 위하여서는, 생산되어지는 모든 자체를 측정하고 가능한 많은 부분을 측정하는 것이 이상적이다. 현재 일반적으로 사용되어지는 차체의 오차측정방법으로는 측정실 등과 같은

열외(off-line)에서 레이아웃 머신(layout machine) 등을 이용하여 측정하는 샘플링(sampling) 방법이나, 거대한 지그(jig) 위에 레이저 측정 센서 등을 장착하여 생산 라인에서 직접 측정하는 방법이 이용되고 있다. 그러나 상기된 두 방법은 샘플링에 의한 데이터의 신뢰성 문제, 또한 지그에 장착한 측정장치의 비유연성으로 인한 장비 가격의 고가화, 품종 변화에 대한 대응이 어렵다는 단점 등이 지적되고 있다.

빠른 측정과 유연성을 확보하기 위하여 카메라와 레이저 거리측정센서 등을 장착한 산업용 로봇 시

\*회원, 한국과학기술연구원 기전연구부

\*\*한국과학기술연구원 기전연구부

\*\*\*현대자동차(주) 생산기술개발부

시스템이 위의 요구에 대응하기 위하여 개발되었다. 일반적으로 산업용 로봇 시스템은 기준 좌표계에 대한 절대 정확도(absolute accuracy)는 떨어지지만 교시(teaching)된 지점으로의 반복 정확도(repeatability)는 높은 특성을 가지고 있다. 본 연구를 통해서 CAD 데이터와 실차사이에 표준모델(reference model)을 설정하고 표준 모델과 실차와의 상대오차만을 측정함으로써 궁극적으로는 CAD 데이터와 실차간의 형상오차를 구하는 시스템을 구현하였다. 즉 표준 모델을 측정하는 측정기의 절대 정확도와 로봇의 반복 정확도를 이용하여 차체의 형상오차를 구하였다. Fig. 1은 이러한 과정을 보여주고 있다. 또한 주위 온도변화에 따른 로봇 팔 길이 보정 모듈을 개발하여 설치함으로써 온도변화가 심한 현장에서 사용 가능하도록 하였다.

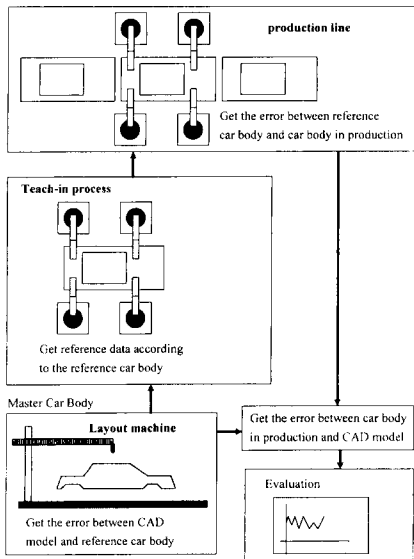


Fig. 1 Concept of error calculation process between CAD reference data and measured data of real carbody

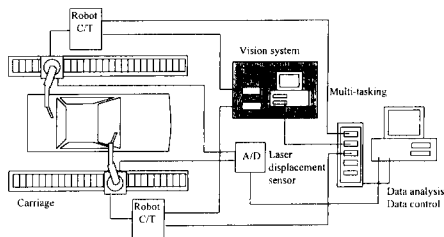


Fig. 2 Configuration of hardware

## 2. 전체 시스템의 구조 및 측정 원리

측정 로봇 시스템은 Fig. 1과 같이 두 대의 산업용 로봇과 이들을 위한 두 대의 이송대(carriage), 다중처리(multi-tasking) 기능의 프로세스 컴퓨터, 그리고 CCD-카메라(charge coupled device-camera)를 이용한 영상처리 시스템과 레이저 거리 측정센서, 그리고 오차보정을 위한 보정용 지그로 이루어져 있다.

CCD-카메라들은 차체의 구멍의 중심위치들을 주로 측정하고 레이저 거리측정센서들은 로봇의 끝단으로부터 차체까지의 상대거리를 측정한다. 교시된 측정점에서의 CAD 데이터에 대한 표준 모델의 편차 값과 이 표준모델에 대한 실제 차체의 측정 오차를 합산함으로써 CAD 데이터에 대한 실제 차체의 절대오차를 구할 수 있는 표준 모델에 대한 측정 상대오차 값은 Fig. 3과 같이 차체 좌표계로 변환되어지고 표준모델의 CAD 데이터에 대한 오차를 보정하여 줌으로써 CAD 데이터에 대한 3차

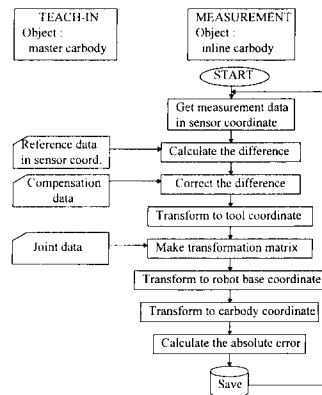


Fig. 3 Process of the calculation of absolute 3 dimensional error

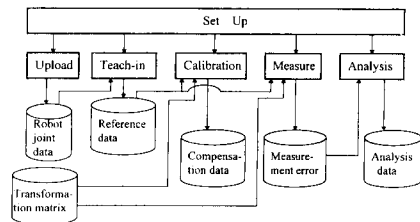


Fig. 4 Configuration of software

원 절대오차가 얻어지게 된다. 이송대 위를 이동하는 측정 로봇은 자체의 전 부분을 포괄한다. 프로세스 컴퓨터는 다중처리 기능을 이용하여 로봇 제어기와 영상처리 시스템 등과의 통신 및 제어를 실시간 처리한다.

Fig. 4는 로봇 제어기에서 컴퓨터로의 화일전송(upload), 교시(teach-in), 보정(calibraton), 측정(measure), 그리고 분석(evaluation) 부분으로 소프트웨어의 구조와 각 모듈간의 데이터의 입출력을 설명하고 있다. 준비부분에서는 새로운 차체에 대한 초기치 입력이 메뉴에 의한 방식으로 손쉽게 이루어진다.

교시된 로봇의 작업 프로그램은 화일전송 부분에 의해 각 축의 각도값이 컴퓨터에 전송됨으로써 후에 각 측정점의 변환행렬(transformation matrix)를 만들어공구좌표계에서 측정오차에 대한 정기구학(forward kinematics)을 계산할 때 사용되어진다. 교시 부분에서는 차체와 온도 보정용 지그의 기준데이터를 얻는다. 전자의 데이터는 후에 실 라인상의 차체측정 데이터와의 상대 오차를 계산하는데 이용되며, 후자는 주의 온도변화에 따른 로봇 팔 길이 변화량을 계산할 때 이용된다.

### 3. 오차의 분류

생산라인에서 측정하고자 하는 차체의 조립 오차는 CAD 모델과 실제 생산되어지는 차체와의 상대 오차로 표시되어진다. 이러한 조립오차를 야기하는 원인으로는 많은 요인들이 있다. 이를 분류하면 Fig. 5와 같이 정리할 수 있다.

오차를 크게 분류하면 표준모델에 대한 layout machine상에서의 기복적인 측정오차와 사용된 측정 로봇 시스템의 측정오차로 나눌 수가 있다. 사용 가능한 측정 시스템의 요구되어지는 측정 정확도는 약 ±0.2 mm 정도이고 이러한 오차는 주변 온도가 일정하다는 조건하에서 가능하다. 그러나 산업용 로봇의 기구부의 재질이 대부분 알루미늄

(Aluminum)으로 이루어져 있고, 실제 생산라인의 주변 온도를 일정하게 유지할 수 없기 때문에 위의 요구되어지는 측정오차를 유지할 수가 없다. 실험적으로 관찰된 온도변화에 의한 공구선단에서의 오차는 소형 로봇(arc welding 용)의 경우 ±20°C 변화에 대해 최소 ±1 mm 이상의 오차를 야기한다.

### 4. 온도 보정

주변 온도변화에 따른 기구학적 운동계의 오차에 대한 보정을 행하는 방법들은 동작기계를 중심으로 하여 여러 가지 시도가 이루어지고 있다.<sup>(1~5)</sup> 그러나 대부분의 시도되고 있는 방법은 매우 복잡한 측정장치를 이용한 해당하는 계수의 직접 보정의 방법을 이용하고 있어 실제 생산라인에 장착 전에 로봇에 적용하기에는 많은 문제점을 가지고 있다. 따라서 온도변화에 의한 로봇 기구학 계수의 변화를 손쉽게 알아내는 새로운 방식의 보정장치 및 알고리즘이 개발되었다. 사용되어진 센서를 적절히 이용하여 로봇의 기구학적 변환을 결정하는 기구학적 계수를 측정되어지는 위치오차로부터 역으로 인식하는 방법을 이용하여 구했다.

#### 4.1 계수 인식 알고리즘

로봇 기구학을 기술함에 있어 구동축에 관련된 링크계수로 기술되는 수학적 모델은 다음의 식 (1)로 주어질 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$x = f(\theta, \underline{l}) \tag{1}$$

여기에서  $x$ 는 공구 선단의 교시된 카테시안 좌표점을 나타내며,  $\theta$ 는 Link변수를, 그리고  $\underline{l}$ 는 로봇의 팔길이를 나타낸다.  $x'$ 가 온도변화후 공구 선단의 측정점을 표시한다고 하면, 미소변위량  $\Delta x$ 는 다음과 같이 표시되어진다.

$$\Delta x = x' - x = f(\theta, \underline{l} + \Delta \underline{l}) - f(\theta, \underline{l}) \tag{2}$$

값  $\Delta \underline{l}$ 은 계수 보정과정을 통해 계산되어진다. 입력량  $x'$ 은 로봇의 다양한 자세  $i=1, 2, \dots, k$ 에서 구해지며, 따라서 식 (1)은 다음과 같이 다시 쓰여질 수 있다.

$$x'_i = f(\theta_i, \underline{l} + \Delta \underline{l}), \quad i=1, 2, \dots, k \tag{3}$$

기구학적인 변환을 표시하는 함수  $f$ 는 해석적이며, 따라서 식 (4)로 테일러 급수 전개이론

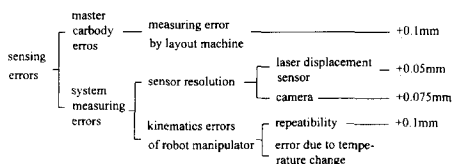


Fig. 5 Classification of errors

(Taylor series expansion theory)에 의해 변환되어 진다.

$$\underline{f}(\underline{\theta}, \underline{l} + \Delta \underline{l}) = \underline{f}(\underline{\theta}, \underline{l}) + \frac{\partial}{\partial \underline{l}} \underline{f}(\underline{\theta}, \underline{l}) \cdot \Delta \underline{l} + R(\Delta \underline{l}) \quad (4)$$

만약 오차계수  $\Delta \underline{l}$ 이 충분히 작으면 잔여오차  $R(\Delta \underline{l})$ 는 무시되어질 수 있다. 따라서 식 (5)로 표시되어지며

$$\Delta \underline{x} = \frac{\partial}{\partial \underline{l}} \underline{f}(\underline{\theta}, \underline{l}) \cdot \Delta \underline{l} = \underline{J}(\underline{\theta}) \cdot \Delta \underline{l} \quad (5)$$

$\underline{J}(\underline{\theta}) = \frac{\partial}{\partial \underline{l}} \underline{f}(\underline{\theta}, \underline{l})$ 는 자코비안 행렬(Jacobian matrix)로 링크길이오차  $\Delta \underline{l}$ 과 그로 인해 야기되는 위치오차  $\Delta \underline{x}$ 의 선형관계를 기술한다. 이 선형모델은 최소자승법(least squares method)에 의해 값  $\Delta \underline{l}$ 이 계산되어 지도록 각  $k$  위치에서 계산되어 진다.

$$\Delta x_i = J(\theta_i) \cdot \Delta l_i, \quad i=1, 2, \dots, k \quad (6)$$

여기서,

$\Delta \underline{x}$  : (3, 1) 벡터(vector)

$\Delta \underline{l}$  : (n, 1) 벡터

$n$  : 로봇 팔의 갯수

$k$  : 보정지그의 측정위치의 갯수

이다. 이  $k$  개의 방정식은 하나의 식으로 표현되어질 수 있다.

$$\Delta \underline{X} = \underline{J} \cdot \Delta \underline{l} \quad (7)$$

여기서,

$$\Delta \underline{X} = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_k \end{bmatrix} ; (3k, 1) \text{ 벡터}$$

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} \underline{J}(\theta_1) \\ \underline{J}(\theta_2) \\ \vdots \\ \underline{J}(\theta_k) \end{bmatrix} ; (3k, n) \text{ 행렬}$$

여기서,

$$\underline{x}, \Delta \underline{x} \in R^3 ; \Delta \underline{X} \in R^{3k} ; \underline{J} \in R^{3k \times n}$$

이 된다.

값  $\Delta \underline{l}$ 을 계산하기 위하여, 적어도  $3k \geq n$ 의 조건을 만족하는 위치에서 입력 값이 측정되어야 한다. 최소자승법의 원리는 값  $\|\Delta \underline{X} - \underline{J} \cdot \Delta \underline{l}\|$ 이 최

소가 되는 계수  $\Delta \underline{l}$ 를 계산하여 낸다. 만약 행렬  $\underline{J}$ 가 특이(singular)하지 않다면 우리는 다음식과 같이 의사 역행렬(pseudo-inverse)의 형태를 얻는다.

$$\Delta \underline{l} = (\underline{J}^T \underline{J})^{-1} \cdot \underline{J}^T \cdot \Delta \underline{X} \quad (8)$$

#### 4.2 오차 보정의 구현

먼저, 차체의 각 측정점의 기준 측정값을 기준값으로 하고 팔길이가 변했을 때의 측정값과의 차이를 계산함으로써  $\Delta \underline{x}$ 를 구한다. 이 값을 식 (8)에 적용하여 팔길이 변화량( $\Delta \underline{l}$ )을 계산되어진 팔길이 변화량을 식 (2)에 대입하면 팔길이 변화에 따른 오차 보정값을 얻을 수 있다. Fig. 6은 이러한 과정을 보여주고 있다.

다양하고 충분한 로봇의 측정위치를 얻기 위하여 Fig. 7과 같이 계수보정용 지그를 제작 설치하였다. 재질은 일반 상온에서 열변형률이 거의 없는 정반용 틀을 사용하였고, 기본적인 모양은 그림에

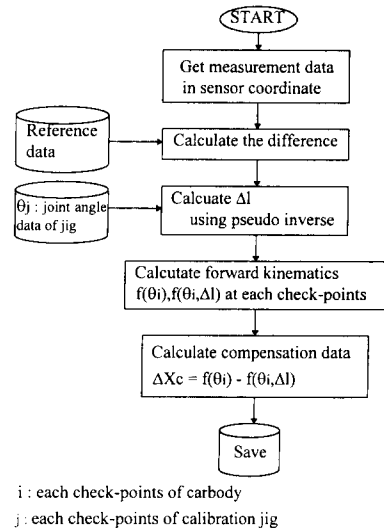


Fig. 6 Calculation of correction data

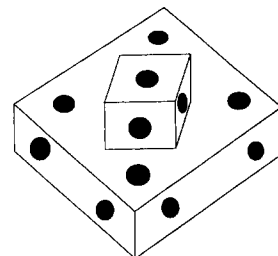


Fig. 7 Calibration jig

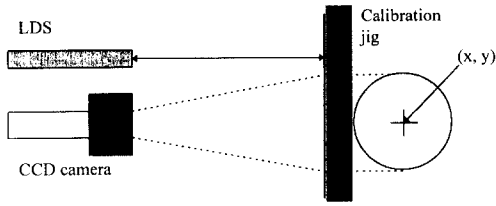


Fig. 8 3-D measurement using camera and LDS

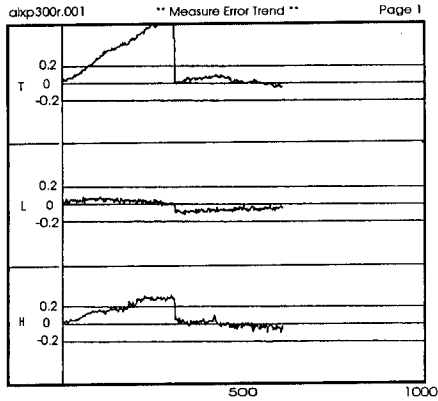


Fig. 9 Effect of calibration

서 보는 바와 같이 작은 직육면체가 좀 더 큰 직육면체 위에 포개져 있는 것과 같은 형상을 취하고 있다. 각 면 위의 작은 등근점들이 측정되어지는 점들로서 Fig. 8와 같이 카메라로는 원의 중심을 측정하고 레이저 거리센서로는 원 주변의 면까지의 상대거리를 측정한다. 면 위에 위치한 모든 원들을 측정함으로써 앞 절에서 설명되어진 바와 같이 온도변화 후의 상대오차  $\Delta x$ 를 얻게 된다.

4.4.1 절의 보정 개정에 의한 온도 보정효과가 실제 실험에 의해 조사되었다. 온도차는 센서를 포함한 로봇 시스템을 특수제작한 가열 부스(booth)에 넣어 강제로 가열시킨 후 얻어 내었다. 온도는 약 20°C 내외까지 상승시켜 충분한 변화를 관찰하였다. Fig. 9는 20°C 정도의 온도변화가 있을 때 로봇의 팔 끝 센서 부위에서 약  $\pm 1$  mm 정도의 오차를 유발하다가 계수보정 후 이 오차가  $\pm 0.2$  mm 이내로 감소하는 것을 보여주고 있다.

5. 시스템의 구현

시스템은 산업용 386컴퓨터를 이용하여 전체 시스템을 제어, 감시, 분석 등의 기능이 가능하도록

하였다. 사용된 시스템의 거리측정센서는 해상도 0.01 mm이고 표준 측정거리가 40 mm인 근접 센서를 이용하였고 비전 시스템은 Nachi 4000을 이용하였다. 로봇은 반복 정확도  $\pm 0.1$  mm의 성능을 가지는 용접용 Nachi 7603을 이용하였고, 로봇 이송대는 서보모터를 이용하여 로봇의 7축으로 설치하였다. 그리고 두 대의 로봇 제어기와 한 대의

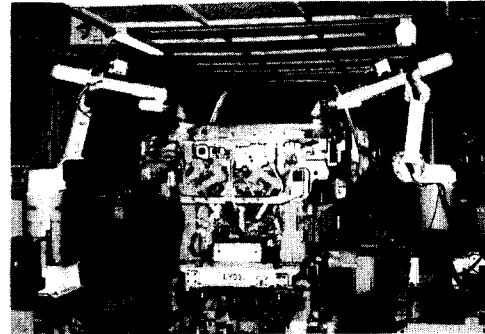


Fig. 10 Hardware setup

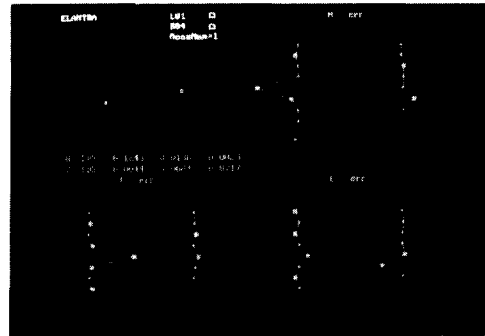


Fig. 11 Monitoring computer screen

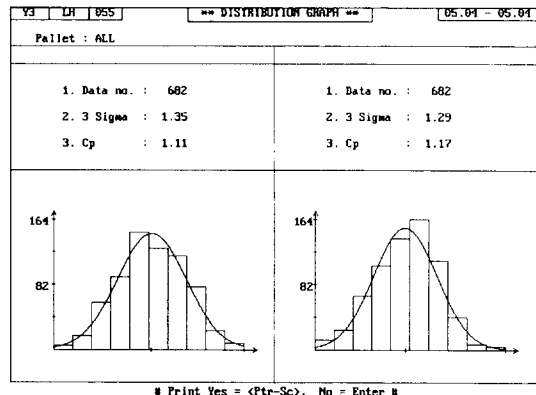


Fig. 12 Data analysis

비전 시스템으로부터의 데이터를 RS-232C를 통해 실시간적으로 받기 위해서 ARTIC(A Real Time Intreface Coprocessor)을 이용하였다.<sup>(7)</sup> Fig. 10은 설치된 시스템의 외관도이다. 실제 측정이 이루어지는 동안 Fig. 11과 같이 실제 측정오차가 화면에 표시되어지며 모든 측정결과는 화일에 수록되어진다. 측정된 데이터는 분석부분에서 표준편차, 평균값, 그리고 오차 경향분석 등의 여러가지 방법으로 해석되어진다. (Fig. 12)

## 5. 결 론

산업용 로봇과 비접촉 센서를 이용하여 기존의 3차원 측정장치에 비해 고속 측정이 가능한 시스템이 구성되었다. 산업용 로봇의 기능을 이용하여 차종 변화에 손쉽게 대응하고 실제 생산라인에서 모든 생산차에 대한 측정이 가능하게 되었다. 생산라인에서 발생할 수 있는 온도변화, 공구(tool)의 위치변화에 따른 오차를 실시간으로 보정하는 알고리즘을 장착함으로써 신뢰성 있는 데이터의 수집이 가능하게 되었다. 구성된 시스템의 실제 생산 라인에서 CAD 데이터에 대한 절대 측정 정확도  $\pm 0.2$  mm를 제시하는 것이 실험을 통해 확인되었다. 실제적인 활용을 위해 다양한 사용자 인터페이스와 통계처리 및 레포트 기능이 추가되었다.

본 시스템을 이용하여 현재 생산되고 있는 차체의 조립오차 및 그 경향을 정확하게 측정함으로써 조립오차의 발생요인을 신속하게 발견하고 이를 보정함으로써 조립품질을 획기적으로 개선할 수 있는 기반이 마련되었다. 산업용 로봇을 이용한 측정 시스템은 자동차 차체뿐만이 아니라 대량생산되어지

는 여러 종류의 생산품의 형상 정확도를 측정하는데 매우 유용하게 쓰여질 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- (1) Lingard, P. S., Purss, M. E., Sona, C. M., Thwaite, E. G. and Mariasson, G. H., 1991, "Temperature Perturbation Effects in a High Precision CMM," *Precision Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 41~51.
- (2) Okushima K. and Kakino, Y., 1975, "Compensation of Thermal Displacement by Coordinate System Correction," *Ann. CIRP*, Vol. 24, No. 1, pp. 327~331.
- (3) Bryan, J. B., 1968, "International Status of Thermal Error Research," *Ann. CRIP*, Vol. 16, pp. 203~325.
- (4) Rayhunath, V. and Barash, M. M., 1986, "Thermal Effect on the Accuracy of Numerically Controller Machine Tool," *Ann. CIRP*, Vol. 35, No. 1, pp. 256~258.
- (5) Balsamo, A., Marques, D. and Sartori, S., 1990, "A Method for Thermal Deformation Corrections of CMMs," *Ann. CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 557~560.
- (6) Schwefel, H. P., 1981, *Numerical Optimization of Computer Models*, Wiley, New York.
- (7) 한국 IBM주식회사, *Introduction to Industrial Computer & ARTIC*.
- (8) *RS/1 Users Guide*, 1990, BBN Software Producta Corporation