

# 가상공간의 가공 공정과 상태 구현에 관한 연구

이수훈\*, 김봉석<sup>+</sup>, 홍민성<sup>++</sup>, 김종민<sup>+++</sup>, JUN NI<sup>+++</sup>, 박상호<sup>++++</sup>, 송준엽<sup>++++</sup>, 이창우<sup>++++</sup>, 하태호<sup>++++</sup>

## A Study on Realization of Machining Process and Condition in Virtual Space

oo-Hun Lee\*, Bong-Suk Kim<sup>+</sup>, Min-Sung Hong<sup>++</sup>, Jong-Min Kim<sup>+++</sup>, Jun Ni<sup>+++</sup>, Sang-Ho Park<sup>++++</sup>, Jun-Yeob Song<sup>++++</sup>, Chang-Woo Lee<sup>++++</sup>, Tae-Ho Ha<sup>++++</sup>

### Abstract

This paper presents virtual machining system in order to realize turning process in virtual space. A reliable virtual turning process simulation was developed based on the surface shaping system which is capable of considering geometric model, thermal error model, and vibration model. Accuracy of surface shape resulting from proposed machining simulator was verified experimentally. This paper also developed the watchdog agent that continuously assessed, diagnosed, and predicted performance of products and machines in machining. The Watchdog agent extracted feature signal using time-frequency analysis among various signals from multi-sensor and evaluated machining condition using performance confidence value.

**Key Words :** Virtual machining (가상공정), Surface shaping system (표면형상 시스템), Time-frequency analysis (시간-주파수 분석), Feature extraction (신호추출), Turning machining (선삭가공), Virtual Reality (가상현실)

## 1. 서론

21세기 제조업의 환경변화는 글로벌 경쟁의 강화, e-비즈니스 확산, 고객 서비스 극대화, 환경 친화적 요구의 확대로 제품 선택사양의 다양화 및 고기능화, 제품 수명주기의 단축, 가격 및 납기 경쟁의 심화 등을 야기하고 있는 실정이다. 이에 따라 제조업체들은 급변하는 시장에 효과적이면서도 신속한 대응을 하고 경쟁에서 앞서기 위해 제조 경쟁요소 및 경쟁역량 강화가 반드시 필요하다. 새로운 제

조 환경과 요구에 대처하기 위한 다양한 제조시스템들이 제시되는 상황에서 차세대 생산시스템으로 가상 제조시스템(virtual manufacturing system)이 부각되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

컴퓨터가 발달하고 CAD/CAM 기술이 급성장함에 따라 가상 제조시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고 컴퓨터상에서 기계 시스템과 공정을 구현하는 가상 시스템의 개발은 가상 제조시스템을 구현하기 위한 핵심 모듈이다. 가상 가공의 구현은 사용자가 가공 상태를 미리 경험하여 가공 상황을 예측하여 최적의 가공 조건을 쉽게 산출할 수 있고, 작

\* 주저자, 아주대학교 기계공학부 (slee@ajou.ac.kr)  
주소: 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산5번지  
+ 아주대학교 대학원 기계공학과  
++ 아주대학교 기계공학부  
+++ University of Michigan, Ann Arbor, USA  
++++ 충남대학교  
+++++ 한국기계연구원

업자에 대한 훈련의 효과를 겨둘 수 있다.

본 연구에서는 선삭가공 가상 시스템의 개발을 위하여 여러 절삭인자를 고려할 수 있는 표면형상 예측 시스템을 이용하여 표면형상을 제시해 주고 엄밀한 절삭 시뮬레이션을 구현 하였다. 또한 가공 과정 중 실시간으로 시스템의 성능과 상태를 평가 하고 예측하는 Watchdog Agent 시스템의 개발을 위하여 멀티 센서에서 측정되는 신호로부터 시스템의 성능을 대변하는 특징 신호를 추출하는 신호처리 방법을 연구하였다.

## 2. 가상공간의 절삭 가공 시뮬레이션

### 2.1 가상 절삭공정 모델

가상 가공 공정을 구현하기 위해서는 공구와 공작물의 형상에 의한 역학적 형상 모델과 진동 등을 포함한 동절삭력 모델의 절삭 공정모델과 정밀 가공에 있어서 다양한 오차 중 중요한 부분을 차지하는 열변형 오차를 나타내는 열변형 모델이 요구된다. 본 연구에서는 역학적 형상모델, 열변형 모델, 동절삭력 모델을 고려한 표면형상 예측 시스템을 이용하여 선삭 공정에 대한 컴퓨터 절삭 시뮬레이션을 수행하였다.

### 2.2 열변형 모델

정밀 가공에서 여러 오차 중 열변형 오차는 중요한 부분을 차지하기 때문에 엄밀한 절삭공정을 구현하기 위해서는 고려해야 할 요소이다. 가공 중 공구를 가열하는 열량이 공구 온도를 상승시키고 열변형을 유발하여 공구 형상을 변화시킨다. 공구변형은 절삭 날을 변형시키고 표면형상에 영향을 주어 가공된 부품의 표면 거칠기에 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 열변형량을 수학적으로 모델링하여 선삭에서 공구의 열변형이 표면형상에 미치는 영향에 대해 연구하였다.

가공 중에 칩이 일정한 속도로 공구경사면을 흘러가고, 일정한 마찰열이 공구와 칩 사이에서 발생하게 된다. 예리한 절삭날에 의한 가공과 플랭크 면과 공작물 사이의 접촉은 무시하고 절삭공구의 열원은 공구와 칩 사이에 의해서만 생성된다고 가정하였다. Fig. 1은 열원과 그 크기를 나타내며 지배방정식과 경계조건은 다음과 같다.<sup>(3)</sup>

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{T}{t} \quad (1)$$

$$-\lambda \frac{T}{z} = Q(x, y, t) \quad (2)$$

$$z = 0; 0 \leq x \leq a, 0 \leq y \leq b.$$

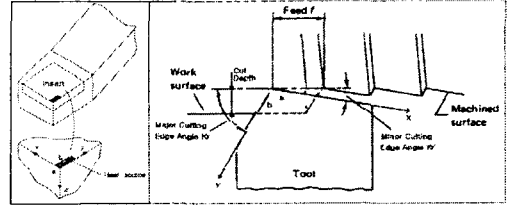


Fig. 1 Heat source and size

$$a = 1.75 f \sin(k_r) \quad (3)$$

$$b = \frac{a_p}{\sin(k_r)}$$

여기서  $T$ 는 온도,  $\lambda$ 는 열전도율,  $\alpha$ 는 열확산율이고,  $a$ 와  $b$ 는 공구 페이스 면에 있는 열원의 공구-칩 사이의 접촉길이를 나타내며,  $Q$ 는 열원의 열량을 나타낸다.

그린함수(green's function)를 적용하여 공구온도를 표현하면 얻고자 하는 공구의 열변형은 다음과 같이 된다.<sup>(3)</sup>

$$\Delta l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \cdot \cos\left(\tan^{-1} \frac{\Delta z}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} - r_0\right) \cdot \cos\left(\tan^{-1} \frac{\Delta x}{\Delta y} - k_r\right) \quad (4)$$

여기서  $r_0$ 는 경사각이고  $k_r$ 은 여유각이다.

### 2.3 진동 모델

절삭과정 중 발생하는 불안한 절삭 현상인 공작기계의 진동은 공작물의 표면을 악화시키고 치수의 부정확으로 제품의 품질을 저하시키는 요인이다. 공구와 공작물 사이에서 발생하는 절삭력( $F_t$ )의 크기는 공구-가공물의 물림과 절삭깊이에 크게 의존한다. 절삭력은 구조물을 탄성적으로 변형시키고, 공구와 공작물의 상대 변위를 일으키며, 또한 상대변위는 공구-가공물 물림을 바꾸는 원인이 된다. 공작기계의 구조물은 Fig. 2와 같이 1자유도의 동력학적 모델링으로 표현할 수 있다.

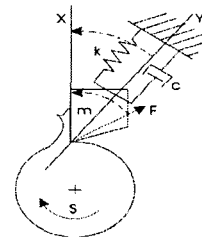


Fig. 2 1-D.O.F mechanical structure

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2x(t) = \frac{F_x(t)}{m} \quad (5)$$

여기서  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ,  $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}}$ 이다.

절삭력( $F_x$ )은 절삭 과정의 동적 요소에 의해 순간 미절삭 칩 두께  $h(t)$ 와 식 (6)과 같은 관련이 있다.<sup>(4)</sup>

$$F_x(t) = K_c b h(t) \quad (6)$$

여기서  $b$ 는 절삭폭,  $K_c$ 는 절삭력계수이다.

Fig. 3과 같이 순간 미절삭 칩두께는  $X$ 축 방향은 칩 두께의 변화와 표면의 파동으로 생성되는데 같은 방향으로 공작물로부터 공구가 이동되는 방향으로 감소한다. 현재 가공경로가  $x(t)$ 이고 이전 가공경로가  $x(t-T)$ 라면 두 경로의 차이는 시간  $T$ 이다. 순간 칩두께는 아래와 같은 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$h(t) = h_m + \mu x(t-T) - x(t) \quad (7)$$

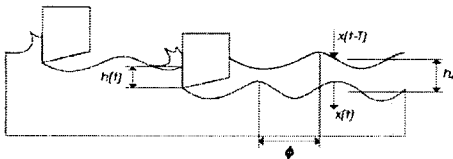


Fig. 3 Regressive chatter vibration

여기서  $h_m$ 은 평균 미절삭 칩두께이고,  $\mu$ 는 오버랩인자로 연속적인 패스의 겹쳐지는 수를 나타낸다. 대부분의 가공에서  $\mu \neq 1$ 이며 이러한 상황은 강한 재생효과를 갖는다.

## 2.4 표면형상 예측 시스템

표면형상 예측 시스템(surface shaping system)은 공작기계의 기구학과 절삭공구의 기하학 및 가공된 표면의 형상의 예측을 목적으로 절삭날 위의 표면 가공점과 공작물과의 상관관계를 나타낸다. 이 시스템은 절삭공구의 기본운동 뿐만 아니라 가공시 발생하는 공구의 런아웃(run out), 기계의 변형, 진동, 고차원 운동(high order motion)까지도 포함할 수 있다. Fig. 4는 단인공구를 이용한 선반작업에서의 표면형상 예측 시스템을 나타낸다. 기본 좌표계  $\{S_0\}$ 에서 절삭날 위의 표면 가공점  $P_k$ 의 벡터  $r_0$ 는 아래와 같이 나눌 수 있다.<sup>(3,4)</sup>

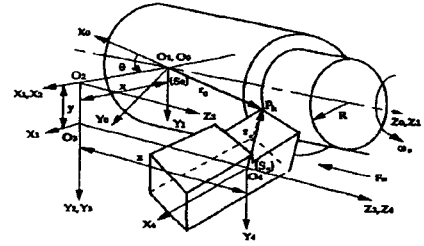


Fig. 4 Surface shaping system of turning process

$$r_0 = B_{0,5} r_5 = {}^N A^6(\theta) {}^N A^1(x) {}^N A^2(y) {}^N A^3(z) {}^E A^1(e_0) r_5 \quad (8)$$

여기서,  ${}^N A^6(\theta)$ 는  $Z$ 축에 의한  $\{S_1\}$  좌표계의 회전 변환행렬,  ${}^N A^1(x)$ ,  ${}^N A^2(y)$ ,  ${}^N A^3(z)$ 는  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  방향에서의 좌표변환,  ${}^E A^1(e_0)$ 는 체터 변형의 오차항을 나타낸다.  $r_5$ 는  $\{S_5\}$  프레임에서 공구의 기하학적 벡터를 나타내며 식 (9)와 같다.

$$r_5 = {}^N A^5(\psi) {}^N A^1(\rho) {}^N A^2(-p_{y_k}) e^5 \quad (9)$$

여기서,  ${}^N A^5(\psi)$ 는  $Y$ 축을 중심으로  $\psi$ 만큼의 회전을 나타내며,  ${}^N A^1(\rho)$ 와  ${}^N A^2(p_{y_k})$ 는 좌표계  $\{S_5\}$ 에서 각각  $X$ 와  $Y$ 축 방향에서  $r_5$ 의  $\rho$ 와  $p_{y_k}$  만큼 이동을 나타낸다.

## 2.5 절삭 가공 시뮬레이션

열변형 모델과 진동 모델이 적용된 선삭 가공 시뮬레이션을 구현 하기 위한 가공조건과 물성치를 Table 1에 나타내었다.

식 (7)에서 시간 지연( $T$ ) 효과는 2개의 Sine 함수가 위상차를 가지고 있는 형태이므로 순간 칩두께는 식 (10)과 같이 전개할 수 있으며, 진동 모델을 고려한 절삭 시뮬레이션을 위한 변위를 구하기 위해서 이를 2차 Runge-Kutta 미분 방정식의 풀이법으로 해석하였다.

$$h(t) = h_m - x_{previous\ cut} + x_{present\ cut} = h_m - A_{p1} \sin(\omega t - \phi) + A_{p2} \sin(\omega t) \quad (10)$$

표면형상 예측 시스템을 통해 얻어진 표면형상은 Fig. 5와 같다. 예측된 표면형상의 검증을 위하여 시뮬레이션과 동일한 조건에서 가공하여 Mitutoyo의 SURF-TEST SV-600을 사용하여 표면 거칠기를 측정하여 보았다. 예측된 형상과 실험 형상을 비교한 결과 값을 Fig. 6에 나타내었다.

Table 1 Simulation condition and material properties

|                     |   |                            |
|---------------------|---|----------------------------|
| Condition           | Cutting speed (mm/min)                        | 200                        |
|                     | Feed (mm/rev)                                 | 0.1                        |
|                     | Depth of cut (mm)                             | 0.5                        |
|                     | Major cutting edge angle (°)                  | 45                         |
|                     | Minor cutting edge angle (°)                  | 45                         |
|                     | Tool nose radius (mm)                         | 1.2                        |
|                     | Back rake angle (°)                           | -5                         |
| Material properties | Tool  | Cabide insert              |
|                     | Thermal diffusivity ( $\alpha$ )              | 0.05 (m <sup>2</sup> /hr)  |
|                     | Coefficient of linear expansion ( $\eta$ )    | 6.0×10 <sup>-6</sup> (/°C) |
|                     | Thermal conductivity ( $\lambda$ )            | 41.28 (Kcal/m · hr · °C)   |
|                     | Relative coefficient of heat transfer ( $H$ ) | 0.25(/m)                   |

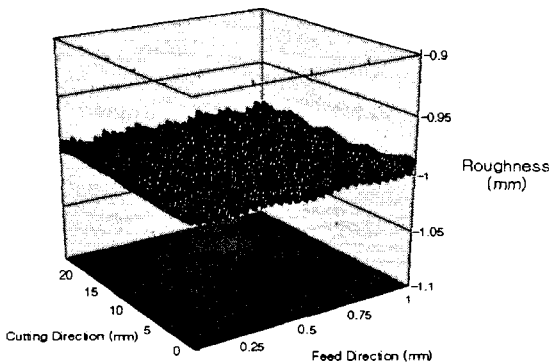


Fig. 5 Simulated, 3D surface

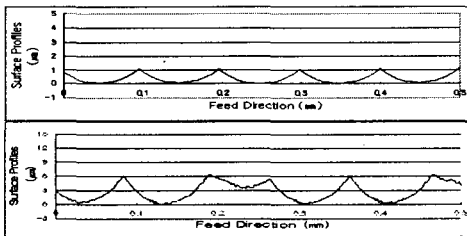


Fig. 6 Comparison with simulation and experiment

### 3. 가공 상태의 성능 평가 시스템

#### 3.1 Watchdog Agent 시스템

오늘날 치열한 경쟁시장 속에서 생산비용, 리드타임, 최적 기계 이용은 어느 기업에게도 꼭 필요한 요소이다. 기계나 공정의 고장과 성능저하(performance degradation)는 시스템의 효

율성의 저하를 유발하기 때문에 제품이나 기계의 수명예측에 대한 방법이 필요하게 되었다. 더불어 대표적인 차세대 생산시스템 중 하나인 재구성형(reconfigurable) 생산시스템의 핵심 기술인 재구성 기술에서 기계 조립과 분해 그리고 부품이나 시스템의 재사용에 대한 신뢰성을 높이기 위해서 시스템의 성능 평가와 예측 기술이 요구되고 있다. 이를 만족시키기 위하여 멀티센서로부터의 데이터를 통해 시스템의 성능 저하를 평가하고 예측할 수 있도록 하는 Watchdog Agent 시스템을 개발하였다. Watchdog Agent 시스템은 고장을 추적하고 양을 측정하는 전통적인 방법에서 공정이나 기계의 성능 저하를 평가하고 예측하기 위한 패러다임의 전환을 필요로 한다. 전통적인 고장과 수선(fail and fix)의 접근방법에서 예측과 예방(predict and prevent)으로의 새로운 패러다임으로 정밀 기계에서 정밀 정보 시스템으로 전환을 의미한다.<sup>(5,6)</sup>

Watchdog Agent 시스템은 진행되는 공정이나 장비가 언제 고장 나는가, 언제 성능의 저하를 가져오는가, 왜 기계나 공정의 성능이 저하되는가에 대한 해답을 제시할 수 있는 지능 시스템이다. Watchdog Agent 시스템에 부여된 평가(assessment) 기능, 예측(prediction) 기능, 진단(diagnosis) 기능을 수행하는 모듈들이 바로 제기된 문제들의 해결 방안이다. Fig. 7은 지능 시스템으로서 폐회로 구조를 갖는 Watchdog Agent에 대한 개념도이다. 본 연구에서는 Watchdog Agent 시스템의 다양한 주요 기능 중에서 제품이나 기계 시스템의 성능을 평가, 예측, 진단하기 위하여 선행되어야 하는 멀티센서로부터 측정되는 다양한 신호에서 특정신호를 추출하고 이를 평가하는 방법을 제시하였다.

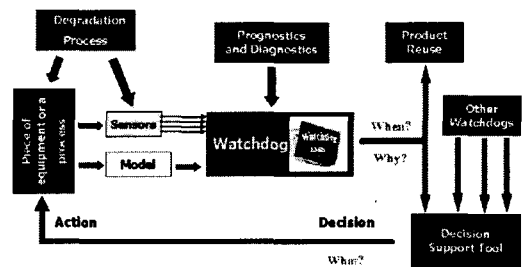


Fig. 7 Schematic representation of Watchdog Agent as intelligent maintenance system

#### 3.2 신호처리와 특징 신호 추출

가공 중에 기계 시스템의 가공 상태를 평가, 예측, 진단하는 기술은 경제적, 시간적 손실을 줄여 생산성을 높일 수 있고 강한 경쟁력을 가질 수 있는 중요한 기술이다. 최근에 들어 시스템이

복잡해지고 기능들이 통합되면서 공정에 대한 예방, 감시, 진단, 예측하는 기술들의 많은 발전이 있어 왔다.

시스템에 대한 감시체제가 구축되기 위해서는 신호를 받는 센서(sensor), 받은 신호에서 시스템의 성능과 특징에 대한 정보를 대변하는 특징 신호를 추출해 내는 신호처리(signal processing), 추출된 신호로부터 현 시스템의 상태를 진단을 하거나 앞으로의 시스템을 예측을 하는 진단(diagnosis) 기술이 필요하다. 센서 기술은 시스템의 특성에 따라 또는 목표하는 과정에 따라 각각의 특성을 대변하기 위하여 2~3개의 센서가 통합되는 센서 융합(sensor fusion) 기술이 많이 연구되고 있다. 신호처리 기술은 시계열분석법이나 주파수 영역 분석법이 널리 사용되었는데 이는 정상신호(stationary signals)에 대한 신호 처리 방법에 유용하지만 실제 대부분의 기계 시스템에서 얻어지는 신호는 비정상신호(non-stationary signals)와 과도신호(transient signals)가 대부분이기 때문에 기존 방법 적용의 어려움을 해결하기 위하여 시간-주파수 분석법이 대두되었다. 대표적인 시간-주파수 분석법으로 많은 연구가 수행되고 있는 방법이 간섭항의 문제를 제거하면서 시간-주파수 분해능을 주파수의 범위에 따라서 향상시키는 웨이블릿 변환(wavelet transform)이다.<sup>(5,6)</sup>

본 연구에서는 여러 신호처리 방법 중 로지스틱 회귀분석(logistic regression)과 Joint TFD(Time Frequency Distribution) 방법을 통해 시스템에서 측정된 신호로부터 특징 신호를 추출하였다. 시스템의 성능을 나타내는 특징 신호를 추출하기 위한 방법으로 푸리에 변환(fourier transform)과 Joint TFD를 이용한 방법을 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 기계시스템의 대부분 신호를 차지하는 비정상신호의 정확한 정보 추출은 푸리에 변환을 통해서서는 어려움을 알 수 있다.

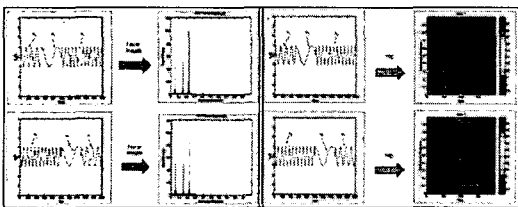


Fig. 8 Comparison with Fourier transform and Joint TFD

### 3.3 기계 및 공정 상태에 대한 성능 평가

기계나 공정 상태의 성능을 평가하는 함수로 본 연구에서는 정상적인 생산 운용 중 과거의 관찰된 신호와 최신의 수집된 신호를 중첩(overlap)시켜 평가하는 성능 신뢰 수치(PCV: Performance Confidence Value)를 이용하였다. 성능 신뢰 수

치는 0~1의 범위를 가지며 수치가 1에 가까운 것은 성능의 정상 을 의미한다. 멀티 센서로부터 고장의 정보를 갖고 있는 최근의 신호가 수집되고 현 상태를 대변하는 특징 신호를 추출하면 시스템의 고장이나 이상 발생 시 발생하는 거동 신호와 견주게 된다. 이러한 비교를 통해 Watchdog Agent 시스템은 특별한 이상 거동을 인지하고 시스템 성능을 평가하여 정상 상태와 가까운 정도를 성능 신뢰 수치로서 제시하게 된다. Fig. 9는 완전히 닳은 직경 6mm의 황동 용접봉(welding electrode)을 이용한 저항용접(spot resistance) 실험에서의 신호를 이용하여 성능을 평가하기 위한 신호 비교과정이다.

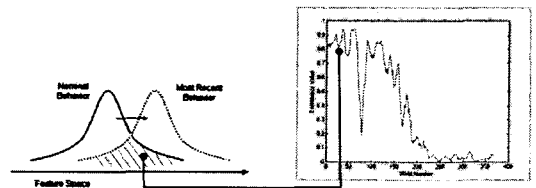


Fig. 9 Performance evaluation of normal and faulty behavior

### 3.4 다양한 시스템 성능 평가 실험

본 연구에서는 시스템의 특징 신호를 실시간으로 추출하고 성능 신뢰수치로 평가하는 과정을 두 가지 실험을 통해서 적용하여 보았다. 첫 번째는 Fig. 10과 같은 엘리베이터 문의 상태를 평가하기 위해서 로지스틱 회귀분석법을 이용한 Watchdog Agent 시스템의 성능 신뢰 수치를 보여주는 실험이다.

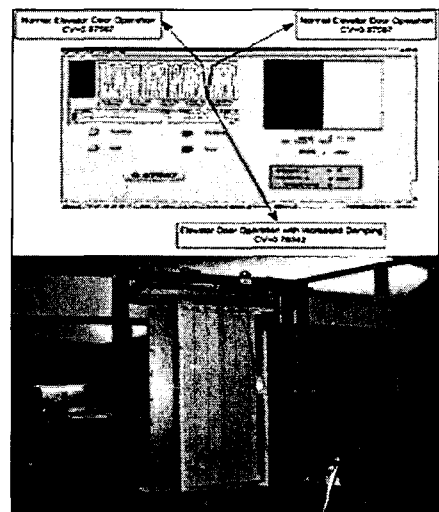


Fig. 10 Elevator door equipment and screen-shot of PCV using logistic regression

Watchdog Agent 시스템에서 평가한 정상 시 성능 신뢰 수치는 0.976이고 문에 사람이 기대 있는 경우 수치는 0.783으로 떨어져 엘리베이터 문의 성능 저하를 나타내 준다.

두 번째는 Fig. 11의 실험 장치에서 4 개의 진동센서를 통해 기어박스의 신호를 실시간으로 받고 Joint TFD 방법을 이용한 Watchdog Agent의 성능 신뢰 수치를 보여주는 실험이다.

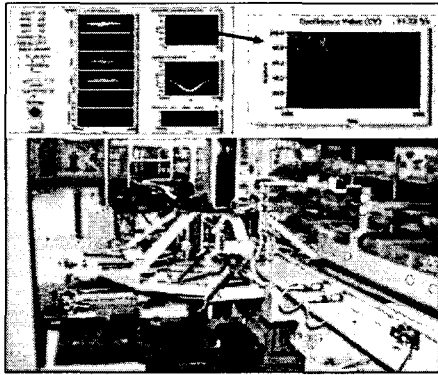
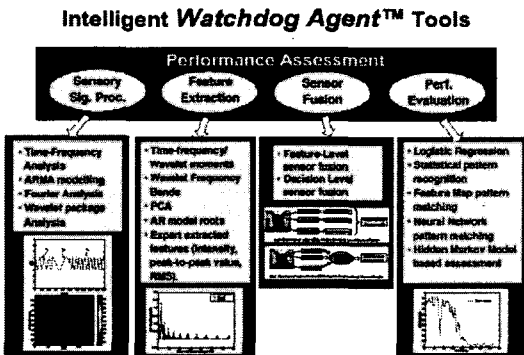


Fig. 11 Gearbox equipment and screen-shot of PCV

시스템을 평가, 예측, 진단하는 Watchdog Agent를 여러 분야에 적용할 수 있도록 다양한 멀티 센서를 통한 신호 수집과 다양한 방법의 신호처리 및 평가를 위해 Fig. 12와 같이 모듈화되어 효율적인 시스템으로 구축될 예정이다.



#### 4. 결론

본 연구에서는 선삭가공을 가상공간에서 구현하는 가상 공정 시스템 개발을 위한 연구를 수행하였다. 가공공정의 엄밀한 시뮬레이션 구축을 위하여 기하 형상 모델, 열변형 모델, 진동 요소 모델을 고려할 수 있는 표면형상 예측 시스템을 이용하여

가상공정 시뮬레이션을 구현하였고 이 시스템을 통해 얻어지는 표면 형상은 실험을 통해 검증하였다. 또한 절삭 중 시스템의 정보를 파악하고 성능 평가를 위한 Watchdog Agent 시스템의 개발을 통해 멀티센서에서 측정된 신호에서 특징 신호를 추출하고 이를 평가하는 방법을 제시하였다. 기계 시스템에서 측정된 신호를 시간-주파수 분석방법을 통해 특징신호를 추출하고 성능 신뢰 수치를 통하여 현재 시스템의 상태를 평가하였다. 추후 표면형상 예측시스템을 바탕으로 한 입체감 부여와 시스템의 성능을 진단하고 예측하는 모듈이 개발되면 가상 절삭 공정 시뮬레이션과 함께 Watchdog Agent 시스템을 구축하게 될 것이다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부의 차세대신기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Onosoto, M. and Iwata, K., 1993, "Development of a Virtual Manufacturing System by Integrating Product Models and Factory Models," *Annals of the CIRP*, Vol. 42, No. 1, pp. 475-478.
- (2) Yun, W. S., Ko, J. H., and Cho, D. W., 2001, "Development of a Virtual Machine Tool," *J. KSPE*, Vol. 18, No. 11, pp. 74-85.
- (3) Lian, Z. M., Shin, K. H., and Hong, M. S., 2001, "A Study on the Effect of Tool Thermal Deformation on Surface profiles for Turning Process," *J. KSMTE*, Vol. 10, No. 4, pp. 33-39.
- (4) Kim, J. M., 2001, "A Study on the Regenerative Chatter Effect Simulation for Turning Process."
- (5) Liu, J., Djurdjanovic, D., Ni, J., and Lee, J., 2002, "Time-Frequency Based on Sensor Fusion in the Assessment and Monitoring of Machine Performance Degradation," *Proc. ASME Int. Mech. Eng. Congress and Exposition*.
- (6) Lee, J., 1995, "Machine Performance Monitoring and Proactive Maintenance in Computer-Integrated Manufacturing," *IJCIM*, Vol. 8, No. 5, pp. 370-380.