

## 유연성 디스크 연삭가공

유승민\*, 김영진\*

### Flexible Disk Grinding Process

Song Min Yoo\*, Young Jin Kim\*



#### 1. 서론

최근에 고조된 생산기술에 대한 관심은 자동화 기술을 선두로 이와 관련이 있는 로봇, 컴퓨터 및 제어 요소에 관한 기술개발로 집약되고 있다. 생산기술의 근본인 가공 기술에 대한 관심도도 따라서 증가되고 있으며 마무리 작업(finishing process)으로서 큰 비중을 차지하는 연삭 가공 등의 중요성도 부각되고 있다. 그러나 대부분의 연삭작업이 아직 근대적인 방식으로 숙련자의 경험에 의지하는 등 작업 의존도가 크며 자동화가 이루어지지 않고 있는 비능률적인 작업이라는 오명을 벗어나고 있지 못하는 실정이다.<sup>(1)</sup> 또한 연삭가공은 숙련자에 의존하더라도 동일한 제품에 대한 균질의 가공 효과(정밀도, 정확도등)를 기대하기가 어렵기 때문에 어떠한 형태라도 가공물의 균질성(consistency)을 보장하기 위한 공정의 자동화가 더욱 시급하게 이루어져야 하는 실정이다. 극단적인 경우

에는 동일한 규격의 타사 제품의 공구를 사용할 때 동일한 작업 결과를 기대하기 어려운 경우도 있다. 이러한 문제의 근본적인 해결책은 연삭공정에 영향을 미치는 가공 작업 요소를 정의하고 이러한 입력 요소에 대한 출력 결과인 가공물의 품질간에 상관관계를 파악하여 동일한 작업을 수행할 때는 항상 동일한 작업 조건이 자동적으로 선정될 수 있도록 하는 것이 가장 시급한 일로 지적되고 있다.

연삭가공에 대한 연구는 일반적으로 숙련자에 의존하던 작업을 컴퓨터의 발전과 더불어 자료화하여 비숙련자가 작업을 진행시켜도 동일한 결과를 얻고자 하는 취지에서 진행되어 왔다. 초기의 연삭작업에 영향을 미치는 인자에 관한 연구로는 스톨의 회전속도, 절삭저항, 절삭량 및 이송속도 등의 요소들이 가공물의 형성에 영향을 미치는 현상을 규명하는 방향으로 진행되었다.<sup>(2,3,4)</sup> 이때에 진행된 연구는 대체적으로 다음과 같이 요약될 수 있다.

\* 경희대학교 기계산업시스템공학부

- 1) 이송속도 및 절삭깊이와 절삭저항 및 절삭량과의 관계<sup>(5)</sup>,
- 2) 디스크의 회전속도, 이송속도 및 절삭깊이 와 절삭저항 및 표면거칠기와의 관계<sup>(2,6,7)</sup>
- 3) 디스크의 마모와 절삭력<sup>(8,9)</sup>, 절삭량<sup>(10)</sup> 및 표면거칠기<sup>(11,12)</sup>와의 관계
- 4) 절삭동력<sup>(13)</sup>
- 5) 절삭온도<sup>(14)</sup>

일반적으로 연삭가공이 공작물의 최종 가공 작업으로 가공면의 정밀도를 향상시키는 목적으로 사용되는 것에 반하여 유연성 디스크를 이용한 연삭가공작업은 선박 및 자동차산업 분야에서 활발히 사용되는 가공작업으로 용접잔류물(bead)의 제거 또는 가공 후에 남는 가공잔류물(burr)의 제거용 및 대형의 공작물 가공용으로 사용되어 왔다. 특히 robot의 end-effector에 장착하여 연삭공구의 자유도(degree of freedom)를 증가시켜 여하한 형태의 공작물도 손쉽게 가공할 수 있도록 하는 연구가 MIT를 중심으로 시작되었으며 특히 CSDL(charles stark draper laboratory)를 중심으로 절삭저항 및 영상 인식 신호에 의한 정보를 활용하는 로봇에 장착된 연삭기가 개발된 이후 이의 활용도가 더욱 넓어지게 되었다. 이러한 가공기기는 연삭입자가 입혀진 디스크형(coated abrasive disk)의 공구를 유연성을 갖는 지지대에 장착하여 공작물과 공구가 가공작업이 진행됨에 따라 지지대와 센서 사이에 마치 스프링을 장착한 것과 같은 효과를 지니도록 하였다. White는 추가적으로 이러한 기기에 적용될 수 있는 기본적인 모델을 개발하였으며 이를 토대로 실제 가공된 가공물의 표면거칠기를 가공물 후반부에 장착된 LVDT(linear variational displacement transformer)를 이용하여 측정후 검증하였다. 이 모델은 유연성효과(compliance)에 의한 공구의 변형이 실제로 회전축선상에서 일어난 연삭기계의 경우에 국한되었기 때문에 추후 개발된 다른 유형의 compliance효과를 이용한 연삭기에는 적용되지 않는다. 또한 로봇을 이용한 연삭기는 제작비가 많이 소요되기 때문에 실제로 가공작업비를 높게 책정하여야 한다는 단점을 지니고 있다. 또 다른 형태의 유연성 디스크 연삭가공 방식은 연삭입자가 입혀진 직포 또는 종이를 고무디스크에 부착시켜 디스크 상에서의 변형 작용에 의한 가공 작업이 진행되도록 한 것이다. 실제로 후자의 경우는 간단한 수작업연삭에 많이 활용되고 있다. 이러한 디스크 변형형 유연성 연삭작업에 대하여 가공중의 변형 지점을 고려한 동력학적인 모델이

개발되었으며 이의 타당성 또한 가공물의 표면형상을 실험결과와 비교하여 입증되었다.

유연성을 지닌 디스크를 이용한 연삭공정을 이해하기 위하여 소요되는 자료를 추적하여야 하며 특히 자동화 공정을 포함한 평면에 가까운 면을 형성하기 위한 방안을 모색하는 것이 중요하다. 수작업에 의존하는 전형적인 연삭작업을 개선하고 자동화시키기 위한 방안으로 우선적으로 소요되는 것은 제반 작업 요소간의 상관관계를 자료화시키는 것인데 일단 이러한 작업이 완료되면 측정된 자료가 차기 작업 시에 이정보로서 사용될 수 있기 때문에 그만큼 이의 활용도는 지대하다고 할 것이다.

여기에서는 유연성디스크의 기초가 되는 모델링을 기반으로 활용될 수 있는 제어변수 중 디스크의 회전속도를 변화시켰을 때의 변화를 고찰하였다. 또한 여러 가지 공구의 상태에 따라 측정된 신호를 처리하여 이상상태를 진단할 수 있는 통계에 기반을 둔 처리법을 적용시킨 결과를 소개하고자 한다.

이러한 작업에 기초가 될 수 있도록 제기된 모델링에 관한 내용은 다음과 같다.

## 2. 공정 모델

### 2.1 특성 방정식

유연성 디스크 연삭가공은 공구와 공작물이 이루는 경사각의 변화에 따라 가공이 진행되어 최종적인 완성품의 형상이 결정된다(Fig. 1). 이러한 형상을 결정하는 경사각의 변화 추이는 기존 Kurfess의 특성 방정식에 의하여 다음과 같이 초기에 제안되었다(Fig. 2).

$$\dot{\alpha} = -\frac{v_{fx} \sin \alpha}{R_s} + \frac{1}{A_r R_s} [k_1 w \mu K_s (\alpha_0 - \alpha) - k_2]$$

이때

$\alpha_0$  : 디스크 초기 배럴각

$\alpha$  : 디스크의 현재각

$\dot{\alpha}$  : 디스크의 회전각속도

$\mu$  : 마찰계수(공구와 공작물간)

$K_s$  : 디스크의 변형계수

$R_s$  : 디스크중심에서 접촉중심까지의 거리

$v_{fx}$  : 이송속도

$w$  : 디스크회전속도  
 $A_r (= AD)$  : 디스크와 공작물의 접촉면적  
 $k_1, k_2$  : 상수  
 $A$  : 접촉길이  
 $D$  : 공작물두께, 절삭폭

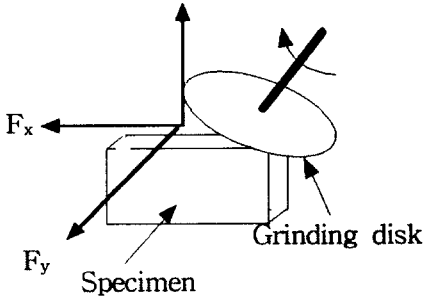


Fig. 1 Grinding process

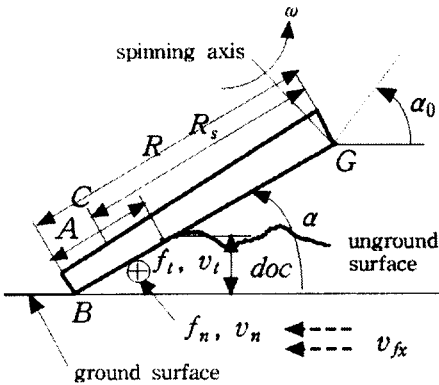


Fig. 2 Grinding Process Schematics

또한 새로운 기하학적인 관계에 근거하여 다음과 같은 새로운 모델이 도입되었다(Fig. 3).

$$\dot{\alpha} = -\frac{v_{fx} \sin \alpha}{R_{sm}} + \frac{1}{A_r R_{sm}}$$

$$[k_1 \omega \mu K_s (\alpha_0 - \alpha) - k_2]$$

수평 및 수직이송속도를 변화시키는 새로운 관계식을 고려할 때 전체적인 시스템의 특성방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

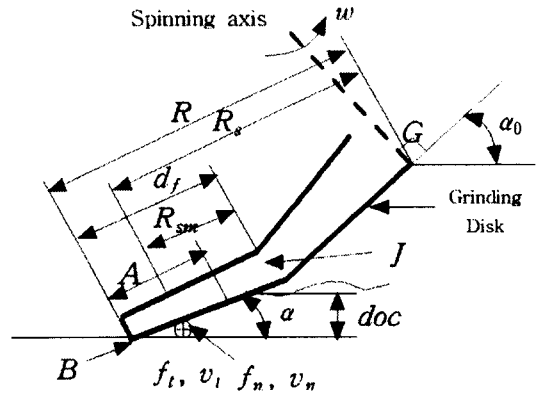


Fig. 3 Modified model schematic diagram

$$\dot{\alpha} = -\frac{v_{fx} \sin \alpha + v_{fy} \cos \alpha}{R_{sm}} + \frac{1}{A_r R_{sm}}$$

$$[k_1 \omega \mu K_s (\alpha_0 - \alpha) - k_2]$$

상기의 관계식중 가장 중요한 인자인  $A_r$  및  $R_{sm}$ 의 값은 경사각의 존재로 인하여 정의되는 기하학적인 가공 단계에 따라 다르게 정의된다. 이러한 가공 단계는 초기(Fig. 4 에서 디스크 위치 1 → 디스크위치 2), 중기(디스크위치 2 → 디스크위치 3) 및 말기(디스크위치 3 → 디스크위치 4)의 3 단계로 구분된다.

## 2.2 공정단계

앞에서 언급한 바와 같이 공정의 단계는 초기, 중기 및 말기의 3단계로 구분되며 상기의 특성방정식에서 요구되는 변수  $A_r$  및  $R_{sm}$ 의 값의 변화는 이러한 단계에 따라 달라지게 된다. 이는 디스크 및 공작물간에 접촉면적이 변화하며 따라서 디스크의 변형중심에서 접촉면중심까지의 거리가 달라지기 때문이다. 그러므로 이를 단계별로 구분하여 정의하고 이들과 공정변수간의 관계를 설정하여야 한다.

### 2.2.1 초기단계

초기단계에서는 디스크가 작업시작 후부터 공작물과 접촉을 시작하여 디스크의 끝부분이 완전히 잠입되기까지의 시점으로 다음과 같은 관계를 나타낼 수 있다(Fig. 5).

기하학적인 관계를 나타내는  $A_r$  및  $R_{sm}$ 의 관계식은 다

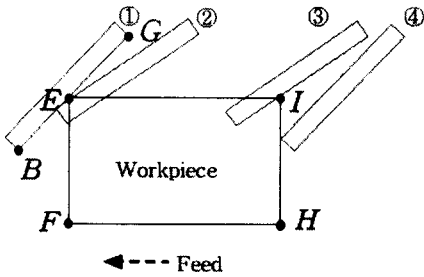


Fig. 4 Grinding process stages

하는 단계로 정의된다.

$$A_r = AD = \left(R_{sm} \frac{h}{\sin \alpha}\right)D$$

$$R_{sm} = \frac{A}{2} + \frac{h}{\sin \alpha} = \frac{2}{R_m} + \frac{h}{\sin \alpha}$$

이때 절삭 깊이  $doc$ 와  $h$ 는 다음과 같은 관계를 나타낸다.

$$doc = R \sin \alpha - h$$

### 2.2.3 말기단계

최종 단계인 말기 단계에서는 디스크가 벗어나기 시작하는 중기 단계 이후부터 작업 종료 시점까지를 나타낸다. 이때  $A_r$  및  $R_{sm}$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Fig. 6).

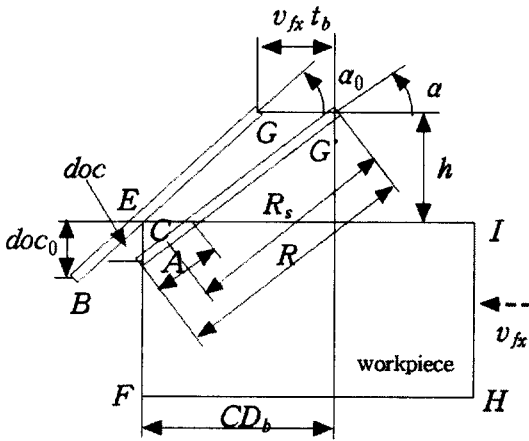


Fig. 5 Geometry of entrance stage

$$A_r = \left(R - \frac{1}{\cos \alpha} \left(\frac{h}{\tan \alpha_{e0}} + v_{fx} t_e\right)\right)D$$

$$R_{sm} = \frac{R}{2} + \frac{1}{2 \cos \alpha} \left(\frac{h}{\tan \alpha_{e0}} + v_{fx} t_e\right)$$

이때  $\alpha_{e0}$  및  $t_e$ 는 각각 말기 단계 시작점에서의 경사각 및 말기 단계 이후 경과 시간을 나타낸다.

음과 같다.

$$A_r = AD = \left[\frac{1}{\cos \alpha} \left(\frac{h}{\tan \alpha_0} + v_{fx} t_b\right) - \frac{h}{\sin \alpha}\right]D$$

$$R_{sm} = \frac{h}{\sin \alpha} + \frac{A}{2}$$

이때  $\alpha_0$  및  $t_b$ 는 각각 초기 경사각 및 초기 단계의 경과 시간을 나타낸다.

### 2.2.2 중기 단계

중기 단계는 디스크의 끝부분이 완전히 공작물에 잠입되어 공정이 진행되며 이후 디스크가 공작물을 벗어나기 시작하는 지점까지로 정의되는 정상 상태에 이르기 시작

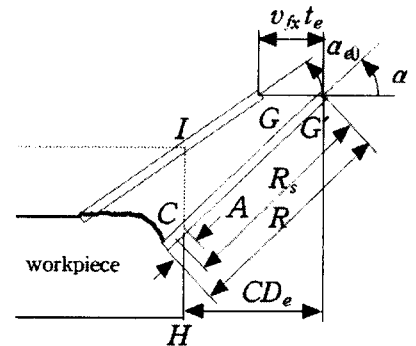


Fig. 6 Geometry of exit stage

Fig. 7은 이러한 Kurfess의 모델과 제안된 신모델의 결과를 나타내고 있으며 신모델이 실험치와 잘 일치하고 있다. Fig. 8은 최초의 모델과 수정된 모델에 대한 변형점 및 관련제원을 표시하고 있다.

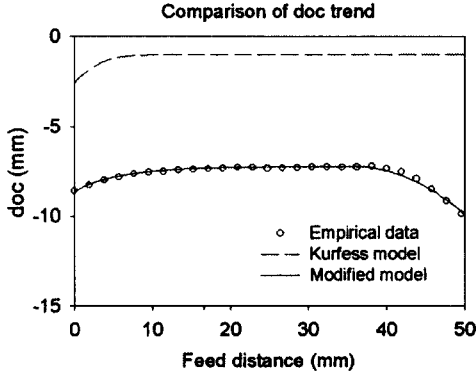


Fig. 7 Comparison of doc trend

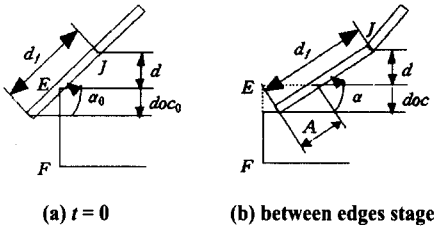


Fig. 8 Modified model description

### 3. 절삭 속도의 변화

개발된 모델을 토대로 절삭 속도를 변화시켜 평면에 가까운 형상을 얻기 위하여 단계별로 적절한 형태로 변화를 시도하였다. 절삭속도는 디스크의 목표각과 현재각과의 차에 비례하여 변화하는 것으로 하였다. 이때 제어상수,  $k_p$ 의 변화는 가공단계와 상관없이 일정하게 적용시키며 단지 역회전 또는 정지를 방지하기 위하여 최소수치의 회전속도를 설정한다.

가공중에 가공속도 즉 절삭속도를 변화시켜 유연성디스크 연삭가공에 의한 곡면가공형상을 개선시키고자 하는 것으로서 각종 가공인자의 영향을 분석함으로써 공정계획수립에 필수적인 기본자료를 구축한다. Fig. 9는 가공이 진행됨에 따른 절삭저항의 추이를 나타내는 것으로서 제어상수의 크기에 따라 변화하는 것을 보여주고 있다. 제어상수가 작은 경우( $k_p = 10$ )에는 절삭저항의 최대값이 다른 경우에 비하여 크게 나타나고 있는데 이는 절삭속도의 변화가 크지 않아 디스크각도의 변화가 적기 때문이다. 초기단계에서는 계속 상승하다가 중기단계에서 어느 정도

로 정상상태를 유지하고 있으며 말기단계에서는 급속히 감소한다. 일반적으로 절삭저항은 제어상수의 크기가 커짐에 따라 변화정도가 작은 것으로 나타났다. 절삭깊이의 변화추이는 Fig. 10에서 나타나는 바와 같이 중기단계에서 평면을 유지하고 있으며 본 연구에서 시도한 제어상수 범위에서는 그 크기가 클수록 평면에 가까운 형상을 만들고 있다. 그림에서 표시된 바와 같이 가공시작 후 약 2.5초까지가 초기단계로 정의된다.

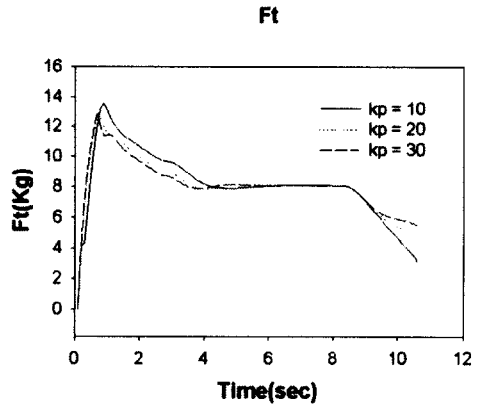


Fig. 9 Cutting Force Comparison

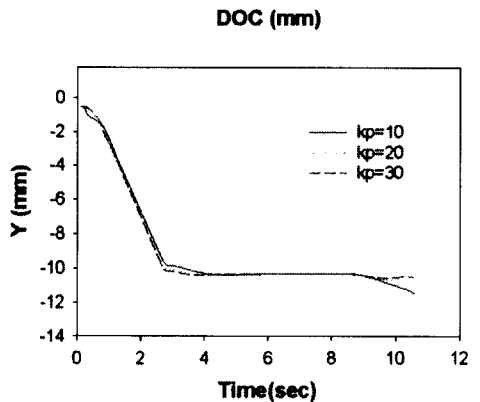


Fig. 10 Depth of Cut Comparison

연삭디스크는 초기에 설정한 디스크 각도를 기준으로 약  $5^\circ$  정도의 변화를 보이도록 제어하고 있다. Fig. 11에서는 가공중에 디스크각도의 변화를 나타내고 있으며 중기 단계에서는 Figs 8-9에서 유추할 수 있는 것과 같이 작은

제어상수값에서 큰 변화를 보이고 있으며 중간단계에서는 대체로 일정한 값을 유지하고 있다. 초기단계와 말기단계에서는 디스크각의 변화가 심하며 결과로 Fig. 10의 가공면 형성에 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 12는 디스크각과 절삭속도의 변화를 비교하고 있다. 제시된 디스크각이 35°로서 중기단계초기(3에서 4.5 초 사이) 부분에서 기준각도 전후로의 변화에 따른 절삭속도의 증가와 감소를 나타내고 있다. 즉 디스크각이 제시된 기준각에 미달할 경우에는 절삭속도를 증가시키며 초과할 때에는 속도를 감소시킨다. 이러한 것은 초기단계와 말기단계에서는 명확하게 나타나지 않고 있으며 이는 각도변화 산출시 접촉면적의 변화정도를 고려하지 않았기 때문이다.

Fig. 12는 공정 중에 절삭속도를 제어한 경우와 제어하지 않은 경우에 대한 디스크각의 변화를 비교하고 있다.

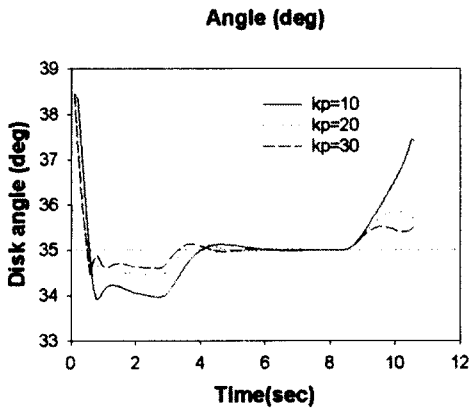


Fig. 11 Disk Angle Comparison

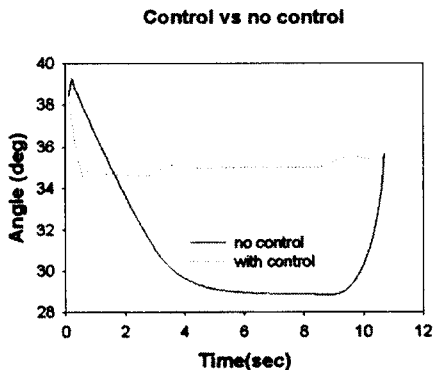


Fig. 12 Angle vs Cutting Speed

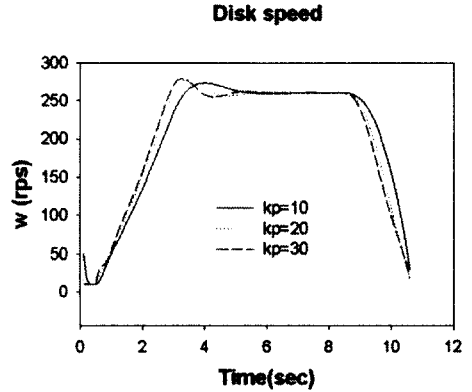


Fig. 13 Cutting Speed Comparison

공정을 제어하지 않은 경우에는 디스크각의 변화정도가 심하며 이에 따라 절삭깊이의 변화가 커지고 곡면형상의 표면이 생성되는 것으로 나타난다. 결론적으로 Fig. 13에서와 같이 제어상수의 크기가 커질수록 절삭속도의 변화는 커지나 이에 따른 가공면의 생성은 양호한 것으로 나타나고 있다(Fig. 10).

#### 4. 통계적분석 및 불확실성치에 의한 이상상태분석

본 장에서는 연삭가공시 발생하는 공구의 마모상태를 감시하기 위해 공구대에 공구동력계 및 음향방출(acoustic emission) 센서를 부착하여 취득되는 절삭 데이터를 시간 영역에 따른 통계적 방법을 사용하여 절삭공정의 이상상태를 감지하고 복잡한 진단문제의 해결에 대단히 효과적인 인플루언스 다이어그램(influence diagram)을 이용하여 각각의 절삭력 데이터와 연삭재의 이상상태 즉, 마모상태와의 상관관계를 확실적인 값으로 나타내고자 한다. 공구상태의 감시는 공구의 마모상태 검출을 의미한다.

센서값의 취득내지는 추출된 센서값의 해석과정에는 필연적으로 불확실성치가 포함된다. 따라서 이러한 불확실성치를 표현할 수 있는 방법이 고려되어야 한다. 본 장에서는 동적인 센서값에 대한 통계적 분포를 사용하여 시스템의 정상상태하에서 추출한 평균( $\mu$ )과 표준편차( $\sigma$ )와 같은 몇가지 통계값과 시스템 작동자의 경험적 지식을 이용하여 산출한 경고 한계값을 설정함으로써 그 분포가 고려하고자 하는 영역내에서 어떻게 존재하는가를 파악하고자 하였다. 따라서 현 시스템에 대한 상태정보는 산출된

경고한계값을 기준으로 ‘높음’, ‘정상’, ‘낮음’의 세 가지 상태에 대한 이산적 확률값을 구함으로써 나타낼 수 있다. 경고 상한값과 경고 하한값은 시스템의 성능이 저하됐음을 의미하는 경계값이 된다. 여기서 구한 이산적 확률값들은 특정한 이상증상에 대한 이상원인을 추론하기 위한 인플루언스 다이어그램의 입력값으로서 사용된다. 특정 변수에 대한 확률값은 간단한 적분공식에 의해 구할 수 있다.<sup>15)</sup>

4.1 진단추론방법

4.1.1 인플루언스 다이어그램

인플루언스 다이어그램은 서로 다른 상태변수사이에 존재하는 조건부 확률의 인플루언스와 독립성을 명확하게 표현할 수 있다. 두 개의 상태변수 x, y가 존재할 때 상태변수 x가 주어진 표본 공간내에서 또하나의 상태변수 y에 대하여 독립일 때 y는 x에 대하여 인플루언스가 없다고 한다. 그 역 또한 상태변수 y의 확률값이 0이 아니라는 조건하에서 성립한다.

인플루언스 다이어그램은 인간의 사고과정을 모방한 3 가지 단계를 취하는데 위상적단계(topological level), 수치적단계(numerical level), 그리고 기능적단계(functional level)가 그것이다. 위상적단계에서 인플루언스 다이어그램은 위상적 기호(nodes)와 그 기호를 연결해주는 관계선(arcs)의 조합을 통하여 대상의 상태를 간단하게 묘사하게 되며 이러한 위상적 기호는 변수를 표시하고 또 관계선은 변수간의 기능적 관계를 나타낸다.<sup>16)</sup>

4.1.2 인플루언스 다이어그램의 적용과 베이즈법칙 (Bayes' Theorem)

다른 유형의 의사결정에서 빈번히 사용되는 확률 트리와 본 연구에서 사용하고 있는 인플루언스 다이어그램의 차이는 모두 동일한 결합 확률 분포에 적용이 가능하지만 인플루언스 다이어그램은 확률 트리에 비해 관련 변수들 사이의 복잡한 조건적 독립성 관계의 명확하고 정형화된 도식적 표현이 가능하다는 점이다. 진단 과정에 인플루언스 다이어그램을 적용하기 위해서는 목적 시스템의 전체 문제영역내 모든 변수들 사이에 상호배반 (mutually exclusive) 속성과 집합적으로 남김 없는 (collectively exhaustive)속성이 존재함을 밝혀야 한다.<sup>16)</sup>

베이즈 법칙(Bayes' theorem)은 적용된 인플루언스 다이어그램의 해석 과정에서 중추적인 역할을 담당하며 프로세스의 복잡한 특성을 추론하는데 사용된다. 베이즈법칙

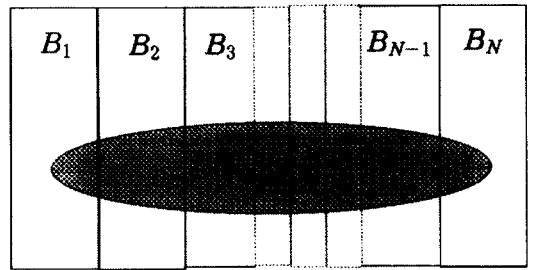
을 이용한 확률식은 다음과 같다.

$$\Pr(B_r | A) = \frac{\Pr(B_r) \Pr(A | B_r)}{\sum_{i=1}^N \Pr(B_i) \Pr(A | B_i)}$$

$B_1, B_2, \dots, B_n$  : 질병의 종류

A : 임의의 이상증상

여기서  $\Pr(B_r | A)$ 의 확률상 의미는 어떤 질병이 A 라는 증상을 보였을 때 그 질병이  $B_r$ 일 확률을 의미한다. 또  $\Pr(A | B_i)$ 는 질병  $B_i$ 에 대한 증상 A의 확률값이다. 공학적인 영역에서  $B_i$ 는 특정 기계나 시스템이 가질 수 있는 고장이나 이상원인들의 집합이며 A는 이상증상 즉 센서의 값 혹은 인간의 관찰이 될 것이다. Fig. 14와 Fig. 15는 진단의 대상이 되는 문제영역을 벤 다이어그램으로 표시한 후 인플루언스 다이어그램으로의 변환을 도시한 그림이다.



Universal sample space

Fig. 14 Mutually exclusive and collectively exhaustive events space in a universal sample space

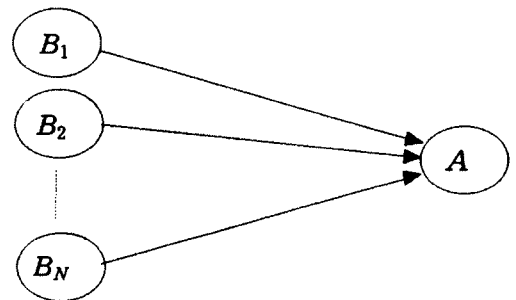


Fig. 15 Influence Diagram for Fig. 15

Fig. 16의 (a)와 같이 3개의 상태기호, 즉 이상원인(F), 중간과정(I), 그리고 센서(S)로 이루어진 인플루언스 다이어그램에서 위상적 변환과 기능적 평가로 구성된 센서에 기초한 추론의 과정을 고려한다.<sup>(16)</sup> 센서를 기초로 한 추론은 센서의 값을 측정 한 후 발생 가능한 이상원인을 추측하는 것이며  $Pr(F|S)$ 로 표현될 수 있다. 이러한 결론은 알려진 변수의 값, 즉  $Pr(F)$ ,  $Pr(I|F)$ ,  $Pr(S|I)$ 를 이용하여 기능적 평가를 함으로써 얻어질 수 있다.

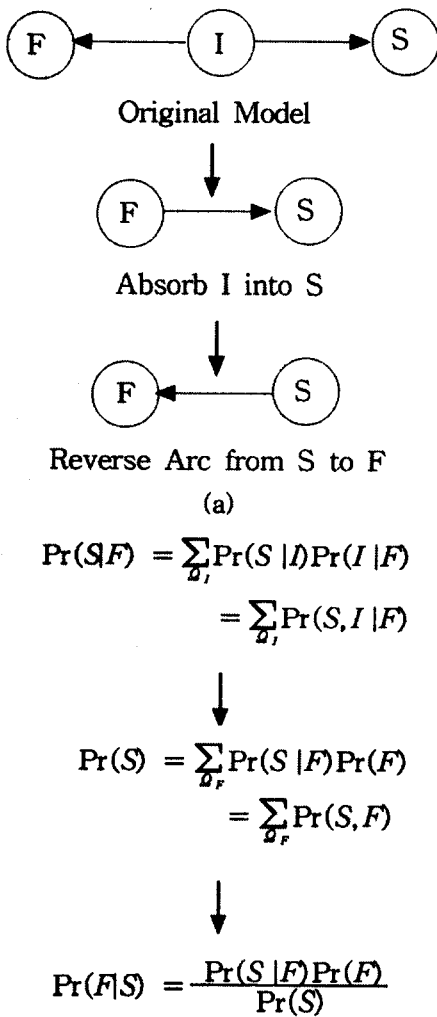


Fig. 16 (a) Topological transformation of sensor-based inference with Goal:  $Pr(F|S)$   
 (b) Functional evaluation of sensor-based inference with goal:  $Pr(F|S)$

## 4.2 실험을 통한 이론의 검증

### 4.2.1 가공공정

가공공정의 상태를 판별할 수 있는 신호의 종류로서는 일반적으로 실시간 개념으로 추론될 수 있는 절삭저항 및 AE (Acoustic Emission) 등이 있으며 이들의 신호는 각각 online 또는 offline 상태에서의 측정방식으로 기록된다.

상기 과정을 수행하기 위한 실험과정은 여러가지 조건에 따라 수행되는 가공공정 및 이들 공정을 특징적으로 나타내는 신호처리에 의한 정량치 (Quantitative value) 정보수집의 두 가지로 구분된다.

- 1) 기계가공조건의 선정: 언급한 바와 같이 분석대상 가공공정으로 선정된 연삭가공공정을 수행하며 공정의 진행상태 정보를 포함하는 대상물(가공시편)을 생성하는 과정으로서 데이터의 다양화를 도모하기 위하여 여러가지 가공작업조건 (디스크 grit size, 이송속도 및 절삭깊이)을 선정하였다.
- 2) 정보수집: 전술한 바와 같이 가공공정의 진행상태 등을 online방식으로 관찰할 수 있는 것으로서는 절삭저항 및 AE신호가 있다. 본 장에서는 가공중에 발생하는 online 신호를 선정하여 가공상태 진단에 활용하고자 한다.

이러한 가공공정은 공구의 마모, 파손 및 공구와 공작물 사이에 상호작용등 다양한 원인에 의하여 여러가지의 다른 신호를 발생하게 되며 각각의 경우 특징형상의 추출이 가능하므로 이러한 신호를 분석하여 이상의 원인을 규명할 수도 있다.

본 실험에서 사용할 시험편은 각봉재를 일정한 길이로 절단하여 제작하며 이들의 정확한 제원을 가공전의 시편 제원으로 기록한다. 이러한 시편은 연삭기를 통하여 가공되며 이때 다양한 작업조건(디스크 grit size, 이송속도 및 절삭깊이)에 따라 실험을 수행한다.

유연성 디스크 연삭가공공정에서 예상될 수 있는 이상 또는 비정상적인(Abnormal operation) 운전상태의 요인으로는 다음과 같은 것이 있다.<sup>(17)</sup>

- 1) 공구마모 (Tool wear): 연삭공구의 마모로 인한 입자의 과도한 마모 또는 입자간에 공작물의 과도한 메움 (Loading)으로 인하여 비정상적인 작업이 진행되는 경우로 절삭저항치의 극심한 증대 및 표면손상이 우려된다.



2) 공구장착이상 (Poor tool setting): 공구의 장착상태이상 또는 공작물과 공구가 이루는 경사각이 작업을 위한 조건과 상이한 경우에 발생하며 센서로부터의 신호가 정상수치 이하로 감소되는 경향이 있다.

#### 4.2.2 실험장치구성

연삭재의 마모실험을 위하여 Fig. 17과 같이 실험장치를 구성하였다. 실험장치는 크게 연삭재실험에서의 절삭력 신호를 얻기 위한 공구동력계로 구성된 센서부와 수집된 공구동력계의 신호를 처리하는 신호처리부, 그리고 최종적으로 인플루언스 다이어그램을 이용하여 신호값에 근거한 시스템의 상태를 판정하는 진단부로 구성되어있다.

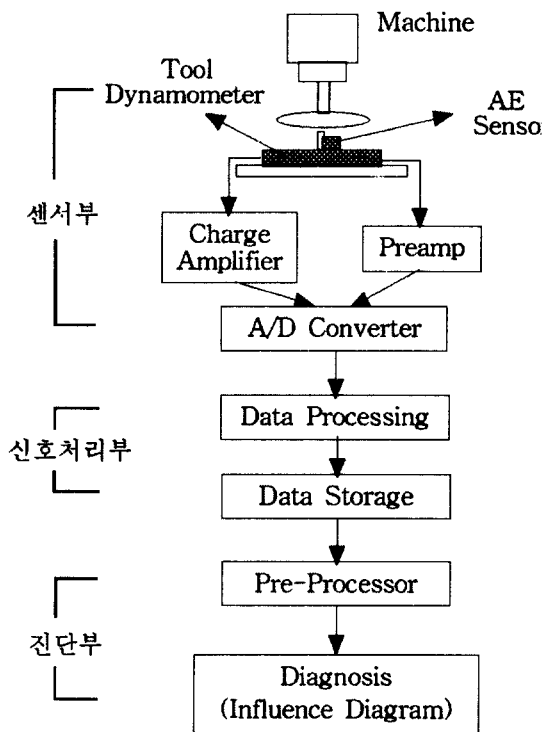


Fig. 17 Experimental setup

실험은 크게 두 가지 경우에 대하여 수행되었는데 첫 번째 경우는 시스템의 정상상태하에서 정상적인 공구를 사용하여 공구당 4회씩 정해진 각 절삭조건별로 시편을 가공하였다. 두 번째 경우는 공구가 마모되어 가공면에 손

상이 나타나는 경우에 대하여 첫 번째 경우와 동일한 조건으로 실험을 수행하였다. 이 두 가지 경우의 실험으로부터 알려진 센서값의 통계적 확률값에 기반한 인플루언스 다이어그램모델 생성이 개발하고자하는 이상진단 알고리즘의 기본골격이다. Table 1은 가공시 연삭저항의 성분과 연삭재실험의 절삭조건을 나타낸다.

Table 1 Process conditions

Classification	Condition
Grit size	#36, #50, #100
RPM	600(rpm)
Feed	185(min/min)
Depth of cut	3(mm)
Disk orientation	30°

#### 4.2.3 전처리프로세서의 개발

불확실성치를 포함한 센서값을 통계적 확률값으로서 처리하여 진단과정에서 인플루언스 다이어그램의 입력값으로 부여하기 위해 이를 전달할 전처리프로세서의 필요성이 요구된다. Window용 응용 프로그램 개발 언어인 Visual Basic4.0을 사용하여 센서값의 수치데이터 출력 및 몇 가지 필요한 통계적 특성값의 계산을 비롯하여 센서값의 신호형태를 관찰할 수 있는 오실로스코프 기능, 센서값에 고유한 불확실성치를 계산하기 위해 확률밀도함수생성과 경고한계값에 의한 특정영역의 이산 확률값산출기능을 갖춘 프로그램을 일종의 전처리프로세서로서 개발하였으며 Fig. 18은 프로그램의 구성화면이다.

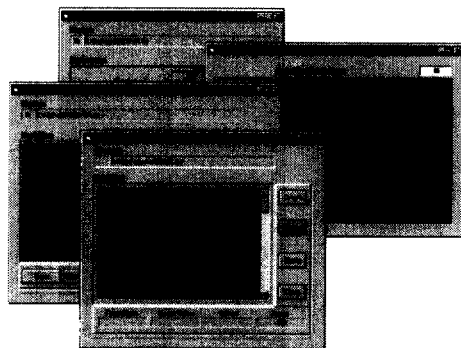


Fig. 18 Pre-processor window

### 4.3 결과 및 고찰

유사한 이상원인이 존재할 때 실제 진단에서 어떤 변수가 중요한 변수인가를 찾아내는 능력은 인플루언스 다이

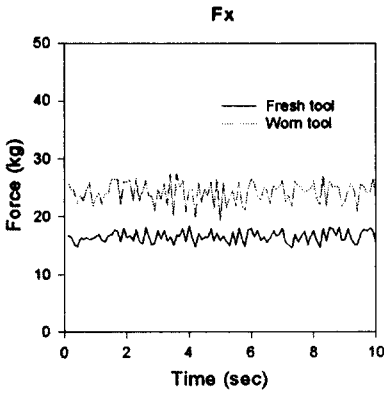


Fig. 19 Comparison of  $F_x$

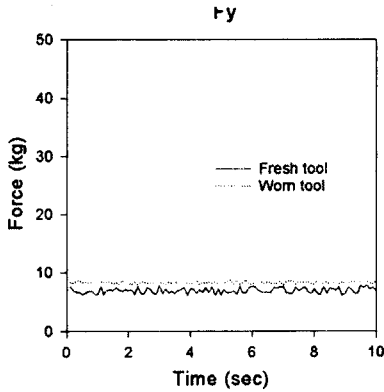


Fig. 20 Comparison of  $F_y$

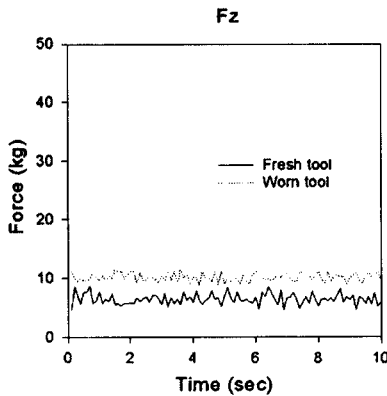


Fig. 21 Comparison of  $F_z$

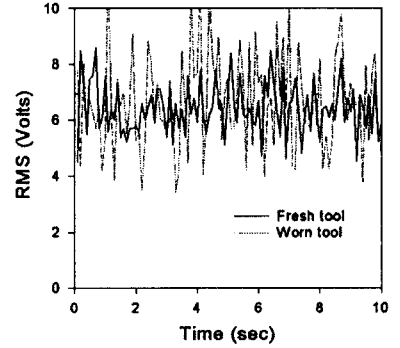


Fig. 22 Comparison of AE RMS

아그램이 갖고 있는 가장 큰 장점 중의 하나이다. 본 장에서는 인플루언스 다이어그램을 이용하여 제안한 공구의 자동교환시기알고리즘을 검증하기 위한 단계로서 2가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 먼저 이러한 검증을 위해서는 과거실험을 통하여 연삭재의 정상상태하에서 수

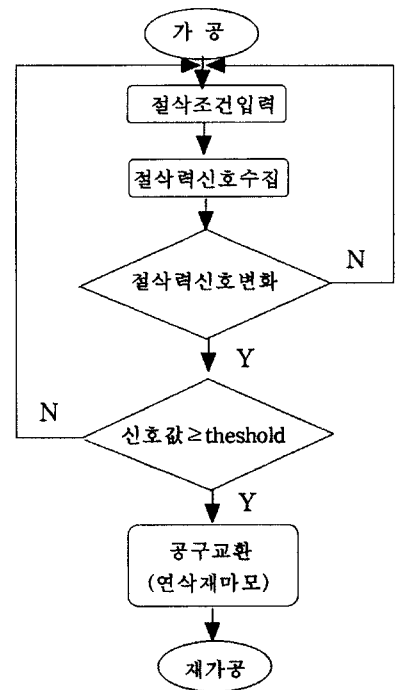


Fig. 23 The flow chart of tool wear monitoring and diagnosis algorithm

**Table 2 Experimental output using Influence Diagram**

F <sub>x</sub>	M	Pr(M   F <sub>x</sub> )		
		실험 1	실험 2	실험 3
Low	True	0.0001	0.0004	0.0031
Normal	True	0.0001	0.0110	0.0039
High	True	0.3055	0.8014	0.8110
Low	False	0.9999	0.9996	0.9969
Normal	False	0.9999	0.9890	0.9961
High	False	0.6945	0.1986	0.1890

F <sub>y</sub>	M	Pr(M   F <sub>y</sub> )		
		실험 1	실험 2	실험 3
Low	True	0.0001	0.0004	0.0004
Normal	True	0.0001	0.0110	0.0001
High	True	0.3068	0.8014	0.8161
Low	False	0.9999	0.9996	0.9996
Normal	False	0.9999	0.9890	0.9999
High	False	0.6932	0.1986	0.1839

F <sub>z</sub>	M	Pr(M   F <sub>z</sub> )		
		실험 1	실험 2	실험 3
Low	True	0.0001	0.0004	0.0004
Normal	True	0.0001	0.0004	0.0006
High	True	0.3070	0.8160	0.8156
Low	False	0.9999	0.9996	0.9996
Normal	False	0.9999	0.9996	0.9994
High	False	0.6930	0.1840	0.1844

**Table 3 Final output for sample data**

마모확률	실험 1	실험 2	실험 2
P ( M )	0.67	0.86	0.84

실험 1: depth of cut 3mm, grit size 36

실험 2: depth of cut 3mm, grit size 50

실험 3: depth of cut 3mm, grit size 100

집된 reference data와 현재 시스템에 대한 상태정보를 담고 있는 sample data가 요구되는데 연삭재의 일부분을 마모시킨 상태에서 얻어진 절삭력데이터를 sample data로서 취하였다. sample data를 분석한 결과 연삭재의 마모시 절삭력은 이송분력, 주분력, 배분력 모두 평균수치가 큰 폭으로 증가하는 경향을 보였으며 AE신호는 RMS의 변동폭이 증가하였다 (Figs. 19-22).

최종적인 마모확률값을 산출하기 위한 파라미터 값으로서 입력되는 센서값의 각 분력에 대한 conditional probability를 Table 2에 제시하였다. 본 연구에서 얻어진 마모확률값은 Table 3에서 알 수 있듯이 각각 실험의 경우 0.67, 0.86, 0.84 에 이르는 비교적 만족스러운 결과를 보였다.

실제 가공시 제안되고 있는 Fig. 23과 같은 알고리즘을 적용할 때 공작물과 공구의 종류 등과 더불어 절삭조건을 고려하여 센서값에 대한 적절한 통계적 특성값의 선정과 산출된 마모확률값에 대한 한계값(threshold)의 신중한 결정은 신뢰성 높은 공구의 이상진단을 보장할 것이다.

## 5. 결 론

유연성 디스크 연삭가공을 중심으로 이를 가공작업에 활용하고 가공물의 품질을 개선할 수 있도록 하는 작업조건 등이 설정되었고 여러 가지 제약조건에 따른 최적가공조건을 설정할 수 있는 영역을 도식하였다. 기계가공공정의 이상상태를 진단할 수 있는 기법을 유연성디스크 연삭가공공정에 적용하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 가공공정의 분석: 몇몇 실험을 통하여 특성방정식의 인자설정 및 활용을 위한 자료를 획득하였다.
- (2) 가공제어모델의 개발 및 응용: 개발된 모델을 토대로 평면에 가까운 형상을 얻을 수 있었으며 이에 소요되는 절삭속도의 추이를 계산하였다. 이를 토대로 실제 가공의 응용할 수 있는 기반을 구축하였다.
- (3) 제어조건에 따른 가공변수의 추이를 산출하였다.
- (4) 동적인 센서값에 의한 시스템의 진단에는 불확실성치를 고려한 확률분포의 사용이 필요하다.
- (5) 진단추론에는 시스템의 정량적인 정보와 인간의 정성적인 지식을 같이 고려하는 인플루언스 다이어그램의 기법이 적용되었다.
- (6) 완전한 진단 시스템의 개발을 위해서는 다양한 증상과 이상상태에 대한 고려가 있어야 한다.

제어법칙은 단순한 비례법칙을 적용하였으나 초기 및 말기단계의 기하학적인 복잡성 및 비선형성을 고려한다면 추가적인 미분 또는 적분제어를 활용하거나 비선형 제어기법을 적용시켜야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- (1) R. L. Kegg, "Industrial problems in grinding", *Annals of the CIRP*, Vol. 32, No. 2, pp. 559~561, 1983.
- (2) R. I. King and R. S. Hahn, "Handbook of Modern grinding technology", Chapman and Hall, New York, 1986.
- (3) R. S. Hahn, "Computer-Aided Grinding Process Modeling", *Proceedings of the 1985 ASME WAM Miami Beach, FL*, pp. 1~10.
- (4) R. P. Lindsay, "On the Surface Finish-Metal Removal Relationship in Precision Grinding", *Trans. of ASME, J. Eng. Ind.*, Vol. 95, No. 1, pp. 815~820, 1973.
- (5) G. Pahlizsch, "Internationaler atand der forschung auf dem gebiet des schleifen von holtz", *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol. 28, No. 9, pp. 329~343, 1970.
- (6) R. Snoeys and A. Decneut, "Review of Results of the Cooperative Research Program of the CIRP Grinding Group", *Annals of the CIRP*, Vol. 21, No. 2, pp. 507~512, 1971.
- (7) R. Snoeys, "The Mean Understanding Chip Thickness as a Basic Parameter in Grinding", *Annals of the CIRP*, Vol. 21, No. 1, pp. 183~190, 1972.
- (8) S. Malkin and N. H. Cook, "The Wear of the Grinding Wheel, Part I. Attritious Wear", *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, Vol. 93, Series B, pp. 1120~1128, 1971.
- (9) S. Malkin and N. H. Cook, "The Wear of the Grinding Wheel, Part II. Fracture Wear", *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, Vol. 93, Series B, pp. 1129~1138, 1971.
- (10) J. Shibata, "The Relationship Between the Wear of Grain Cutting Edges and their Metal Removal Ability in Coated Abrasive Belt Grinding", *Wear*, Vol. 55, pp. 331~244, 1974.
- (11) T. Yuhta, S. Igarashi and R. Okuno, "On the Surface Nature of Diamond Wheel in the Process of Grinding Carbon Steel", *Annals of the CIRP*, Vol. 27, No. 1, pp. 255~259, 1978.
- (12) P. A. Leitch, "An Experimental Investigation of the Transient Behavior of the Grinding Process", *Proc. 12th NAMRC*, pp. 322~329, 1984.
- (13) J. N. Brecker and M. C. Shaw, "Specific Energy in Single Point Grinding", *Annals of the CIRP*, Vol. 23, No. 1, pp. 93~94, 1974.
- (14) H. K. Tonshoff, E. B. Brinksmeier and H. Choi, "Abrasive and their influence on forces, temperatures and surface", *Proc. 15th NAMRC, SME, Lehigh Univ., Bethlehem Pennsylvania*, pp. 70~89, 1987.
- (15) 김영진, "진단전문가 시스템의 개발: 연산적 센서 검증", *대한기계학회논문집*, 1993, 11.
- (16) 김영진, "인플루언스 다이어그램을 기초로 한 이상진단 지식베이스의 개발", *대한기계학회 논문집*, 1993, 9.
- (17) 유송민, "유연성 디스크 정밀연삭 가공중 평면가공에 관한 연구", *한국정밀공학회지*, 13권, 7호, 158~166.