

## 연삭가공에 있어 비가공 시간 단축에 관한 연구(II)

- 슷돌면의 직접관찰에 의한 드레싱 시기 및 드레싱량 결정-

김 선 호\*, 안 중 환\*\*

### Reducing the Non Grinding Time in Grinding Operations(2nd report)

-Decision of Dressing Chance and Depth by the Direct Measurement of Grinding Wheel Surface-

Sun Ho KIM\*, Jung-Hwan AHN\*\*

#### ABSTRACT

In general, grinding is one of the final machining processes which determines the surface quality of machined products. Since the ground surface is affected by the states of grains and voids on the grinding wheel surface, the wheel should be dressed before the machined surface deteriorates over a quality limit. This paper describes a systematic approach to decide a proper dressing chance and an optimal dressing depth for the working grinding wheel. An eddy current sensor and a laser displacement sensor are used to measure the loading on the working wheel surface and the topography of the dressed wheel surface respectively. The dressing chance can be properly decided through the relational locus between the amount of loading and the machined surface roughness. An optimal dressing depth to guarantee the less wheel loss and the higher wheel surface quality is decided through the analysis of the variance of topography for the dressed wheel surface, which decreases at three different rates according to the accumulated dressing depth.

**Key Words:** Wheel Loading(눈막힘), Dressing Chance(드레싱 시기), Dressing Depth(드레싱량),  
Eddy Current Sensor(와전류 센서), Relational Locus(상관계적), Topography(토포그래피)

#### 1. 서 론

연삭가공은 기계가공의 마지막 단계에 속하는 가공으로서, 연삭가공면의 거칠기 및 형상정도가 제품의 품질에 직접 영향을 주게 된다. 연삭가공면은 슷돌의 입자 및 기

공의 상태 등 슷돌의 표면상태에 의존하기 때문에 연삭가공시에는 주기적인 드레싱 작업이 필요하게 된다. 연삭과정에서 부적절한 드레싱 시기 및 드레싱량의 결정은 비가공시간을 증대 시키고 제품의 품질에도 좋지 않은 영향을 주게 되어 바람직 하지 않다. 아직까지도 대부분의 연삭

\* 한국기계연구원 자동화연구부  
\*\* 부산대학교 기계공학부

작업에서 드레싱작업은 주로 숙련된 작업자에 의존하여 경험에 기초한 작업이 일반적이다. 이러한 방법에 의한 드레싱 작업의 어려움을 극복하기 위해서는 작업중인 슷돌의 표면상태를 평가하는 기술에 대한 연구가 필요하다.

가공면의 품질에 영향을 미치는 슷돌면의 상태를 검출하기 위해 많은 연구가 있어 왔다. 간접적인 방법으로는 연삭가공시 발생하는 불꽃의 색변화를 관찰하여 슷돌의 상태를 추정하거나<sup>(1)</sup>, AE 신호의 에너지값의 변화를 이용해 슷돌면의 눈막힘량을 추정하거나<sup>(2)</sup>, 드레싱시 발생하는 AE 에너지값을 이용해 슷돌의 손상상태를 추정하는 연구<sup>(3)</sup>가 있어 왔다. 그러나 간접적인 방법의 경우, 연삭기의 구조, 센서의 설치위치 등 주변 환경의 영향을 받기 쉬웠다. 직접적인 방법으로는 레이저의 반사강도(Intensity)를 이용하는 방법<sup>(4)</sup>, 광(光) 반사를 이용해 슷돌입자의 마멸면적이나 입자면의 형상을 관찰하는 방법<sup>(5,6)</sup>, 磁氣장치를 통해 눈막힘량을 직접측정하는 방법<sup>(7)</sup>, 와전류 센서를 이용한 슷돌의 눈막힘 측정법<sup>(8)</sup>, 화상을 이용하는 방법<sup>(9,10)</sup> 등이 연구되어 왔으나, 측정시간과 설치문제 등 해결해야 할 과제가 많이 남아있는 실정이다.

연삭에서의 비가공시간은 공연삭, 스파크 아웃(Spark Out) 시간 등 연삭공정중 발생하는 비가공시간과 드레싱, 슷돌교체 등 조정(Conditioning) 공정에서 발생하는 비가공시간이 있으며, 이에 대한 연구들이 있어 왔다.<sup>(11,12)</sup> 본 연구에서는 연삭작업중 부적절한 드레싱 시기 및 드레싱량 결정에 의한 비가공시간을 단축하기 위해, 센서신호에 기초하여 슷돌상태의 감시를 통한 적절한 드레싱 시기 및 최적의 드레싱량을 결정하는 드레싱 전략에 관한 연구를 수행했다. 이를 위해, 와전류센서를 슷돌 주위에 설치하여 슷돌면의 눈막힘량을 비접촉식으로 직접 측정하므로써 슷돌의 상태를 검출했다. 슷돌의 재생작용에 의한 정상연삭(正常研削)과 눈막힘에 의한 이상연삭(異常研削)의 구분은 검출된 눈막힘량과 가공면 표면거칠기의 상관관계(Relational Locus)을 통해 드레싱 시기를 결정했다. 또한 슷돌면의 표면상태를 연삭기의 테이블 위에 설치한 레이저 변위센서를 이용해 측정하고, 3차원 토포그래피(Topography)로 표현했다. 최적의 드레싱량의 결정은 기준 슷돌면의 토포그래피의 분산(Variance)과 드레싱량에 따른 분산 변화 관계를 통해 결정하는 방법을 제안했다. 본 논문에서는 이러한 내용들에 대한 실험적 결과들을 소개한다.

## 2. 드레싱 기능 및 전략

입자, 기공, 결합제로 구성된 슷돌의 수명은 입자의 마멸(Glazing), 칩의 부착으로 인한 눈막힘에 의한 기공 역할의 저하, 연삭 버어닝(Burning) 그리고 결합력의 약화에 의한 입자 탈락에 크게 의존한다. 올바른 연삭조건에 의해 정상적인 연삭이 진행되는 경우, 슷돌은 재생작용에 의해 눈막힘이나 마멸이 발생되어 연삭저항이 크게 작용하는 입자는 떨어져 나가고 새로운 입자가 가공을 담당하게 된다. 이러한 눈막힘 현상 등에 의한 비정상 슷돌영역이 증가되거나 슷돌의 전 면적으로 확대되면, 입자탈락이 가속되어 슷돌은 정상연삭을 할 수 없게 된다. 이렇게 재생작용이 중지되는 걱정한 지점을 선택하여, 적정 드레싱량으로 드레싱을 수행하여 새로운 슷돌작업면을 창성해야 원하는 공작물의 표면을 얻을 수 있다. 이러한 드레싱 전후의 슷돌표면 구조의 변화를 Fig. 1에 나타내었다.

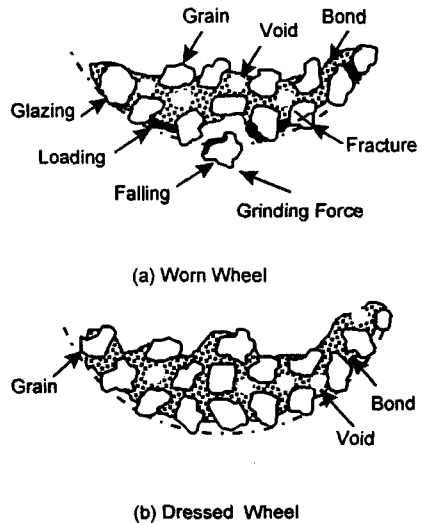


Fig.1 Schematic Structures of Wheel Surface

드레싱 시기 선택의 지연은 가공품질을 떨어 뜨리고, 조기 선택은 생산성을 떨어뜨리게 되며, 또한 적정하지 못한 드레싱량의 선택은 드레싱 효과 및 비용 측면에서 바람직하지 않다. 가장 적합한 드레싱 전략은 언제 어느 정도의 드레싱을 할 것인가를 결정하는 일이다.

## 3. 실험장치

연삭실험은 범용 원통연삭기에서 프리지연삭으로 수행

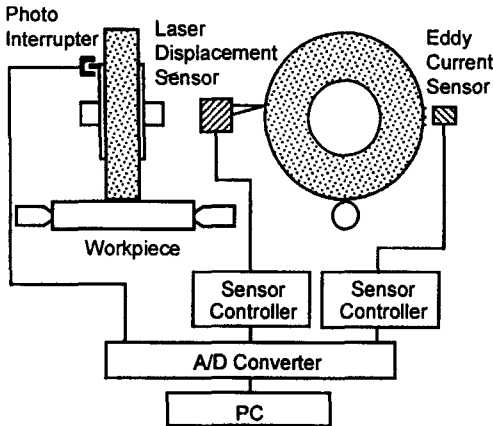


Fig.2 Experimental Setup

되었으며 실험장치 구성을 Fig. 2에 나타내었다. 연삭기의 주축속도는 1,790m/min(2,158rpm) 그리고 이송속도는 0.5mm/min로 고정하여 실험했으며, 사용된 슷돌은 WA60K7V(127X264X25mm)이며 재료로는 SCM4가 사용되었다. 드레싱은 반경 1.5mm를 갖는 다이아몬드 드레싱 휠을 이용해 주축속도 1,790m/min 그리고 이송속도 1,000mm/min 조건에서 수행되었다.

스�돌의 눈막힘을 측정하기 위한 와전류센서는 직경이 22mm이고 가진 주파수가 125kHz인 센서가 사용되었으며, 출력 값을 이용하여 슷돌표면의 눈막힘량을 측정했다. 슷돌의 표면상태를 측정하기 위한 레이저 변위센서는 연삭기 케이블 위에 설치했으며, 30mm 기준 거리에서 ±3mm의 측정범위를 0.2μm 분해능으로 측정이 가능한 센서가 사용되었다. 사용된 센서는 레이저 빔의 면적이 35X20mm이며 센서 제어기에서 최대 20kHz로 변위값을 출력한다. 그림에서 포토 인터럽터는 레이저 변위센서에 의해 연속적으로 측정된 슷돌표면을 토포그래피로 표현하기

Table 1. Specification of experimental apparatus

Grinding Machine	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toyoda GU28-50(JPN)</li> <li>Spindle Motor: 3.7kw</li> </ul>
Sensors & Instrumentation Device	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LASER Displacement Sensor LC-2440(Keyence, JPN)</li> <li>• Eddy Current EX-422(Keyence, JPN)</li> <li>• Photo Interrupter EE-SPX(OMRON, JPN)</li> <li>• Roughness Tester(Taylor Hobson, Form Talysurf 120L, UK)</li> </ul>
Workpiece	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SCM4</li> </ul>
Grinding Wheel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• WA60K7V(Samyang, Korea) 127x264X25mm</li> </ul>
Grinding Conditions	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grinding Wheel Speed : 1,790mm/min(2,158rpm)</li> <li>• Infeed: 0.5mm/min</li> </ul>

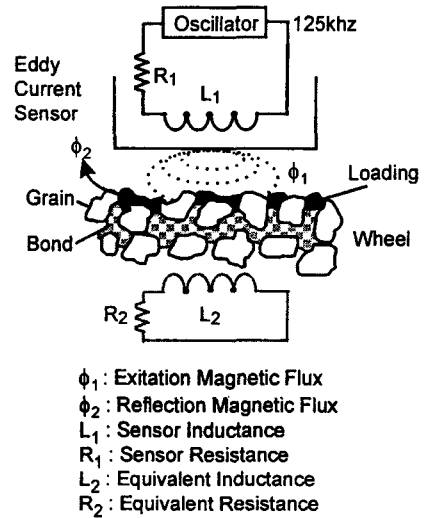


Fig.3 Concept of Wheel Loading Measurement by Eddy Current Sensor

위한 기준원점을 잡기 위해 사용되었다. 연구에 사용된 실험장치의 모델 및 사양을 Table 1에 나타내었다.

#### 4. 슷돌의 눈막힘 측정에 의한 드레싱 시기 선택

##### 4.1 와전류센서에 의한 슷돌의 눈막힘량 측정

스�돌의 기공에 금속성분이 달라붙어 슷돌의 기능을 저하시키는 구조적인 변화를 이용해 슷돌의 눈막힘을 측정하기 위해 와전류센서를 적용했다. Fig. 3은 와전류센서를 이용해 슷돌의 눈막힘을 측정하는 개념을 나타낸 것이다. 눈막힘에 의해 슷돌의 기공에 박힌 금속량을 측정하기 위한 와전류센서는 고주파발전 회로와 코일로 구성된다. 고주파발전회로에 의해 형성된 자속  $\phi_1$  내에 금속물체가 있으면, 물체표면에 등가 인덕턴스와 등가 저항이 형성되고 역기전력이 발생한다. 역기전력을  $e$ , 그리고 자속을  $\phi$  라 하면 다음과 같이 표현 가능하다.

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

여기서  $e$  가 음의 값을 갖는 의미는 음의 방향으로 역자속이 발생하여 센서측 코일의 전력 손실을 발생시킨다는 것을 의미한다. 이러한 원리에 의해 슷돌의 표면 위에는  $\phi_1$  과 반대방향으로 자속  $\phi_2$  가 발생해 발전회로측의 전력손실로 되어 발전회로의 진폭전압의 변화로 나타난다. 따라서 슷돌표면에 발생하는 자속  $\phi_2$  는 눈막힘량에

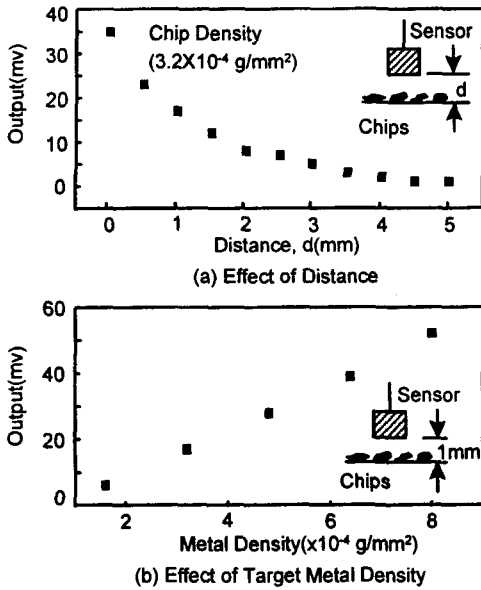


Fig.4 Eddy Current Sensor Outputs

비례하기 때문에 자속  $\phi_2$ 와 관련된 발전회로의 변화를 이용해 슷들의 슷들의 눈막힘량 측정이 가능하다.

스�들의 기공에 붙은 금속량을 와전류센서를 이용한 측정가능성을 검증하기 위한 기초 특성 실험을 수행하였다. 실험은 연삭 칩(Chip) 표면과 센서 사이의 거리 변화에 대한 특성, 그리고 거리는 일정하게 유지하면서 칩의 밀도변화에 대한 특성에 대해 조사했다. 실험결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 일정한 칩의 밀도에 대해 거리를 변화 시켜가면서 출력치의 변화를 나타낸 것으로 거리가 멀어지면 출력값이 급격히 떨어지는 것은 알 수 있다. Fig. 4(b)는 거리는 일정하게 유지하면서 칩의 밀도를 변화시킨 예이다. 역시 칩의 밀도가 높아지면 출력값이 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 와전류센서를 이용해 슷들표면의 눈막힘 현상을 측정하는 것이 가능하다는 것을 알 수 있다.

#### 4.2 드레싱 시기 결정

단위 누적연삭량에 따른 슷들의 눈막힘량과 이것이 연삭가공면의 거칠기에 미치는 영향을 조사했다. Fig. 5는 WA60K7V(127X305X25mm) 슷들을 이용해 SCM4 원형봉을 연삭 실험한 결과이다. Fig. 5(a)는 가로축에 단위 누적연삭량( $\text{mm}^3/\text{mm}$ )을 세로축에 눈막힘량(mV)을 나타

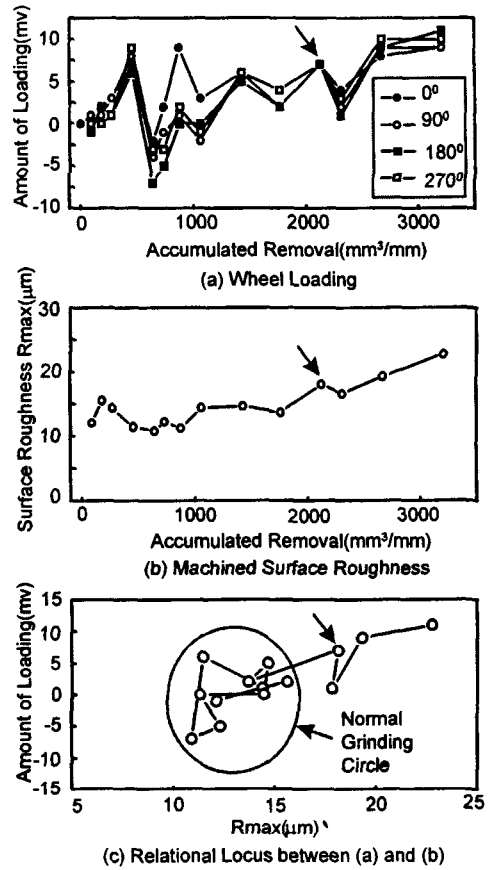


Fig.5 Variations of Loading and Machined Surface Roughness versus Accumulated Removal

내었으며 Fig. 5(b)는 가로축은 동일하며 세로 축은 가공면의 거칠기  $R_{\text{max}}(\mu\text{m})$ 를 나타 내었다. 실험은 14개 시험편을 사용했으며 각각, 연삭을 종료한 후 눈막힘량을 측정하고 시험편의 거칠기를 측정하였다. Fig. 5(a)에서 동일 시험편에 대해 각각 4개의 데이터는 슷들의 외주부분을 90도 간격으로 측정한 결과이다. 그림에서 보듯이 눈막힘은 전 슷들면에 걸쳐 비슷하게 발전하고 있음을 알 수 있다. 초기 시편에서 눈막힘량이 음의 값을 가지는 것은 초기에 磁化된 연삭 칩이 슷들면에 달라 붙는 현상이며 눈막힘은 아닌 것으로 판단된다. 그림에 보듯이 10번 시험편까지는 재생작용이 정상적으로 발생하여 입자의 탈락에 의해 눈막힘이 제거되고 있으나 11번째 시편부터는 재생작용이 발생하지 못하고 눈막힘이 급진전되고 있다. 이러한 슷들의 상태는 (b)와 같이 가공물의 거칠기에 바로 반영되어 거칠기값의 증가 경향이 바뀌고

있다.

숫돌의 눈막힘량과 가공면 거칠기의 상관관계를 Fig. 5(c)에 나타내었다. 그림에 보이듯이 11번째 시편의 경우 이상연삭에 따라 정상연삭을 나타내는 상관관계를 이탈하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 시점을 숫돌수명이 종료되고 드레싱이 필요한 시점으로 판단할 수 있다.

5. 숫돌표면의 직접관찰에 의한 최적 드레싱 깊이 결정

Fig. 6은 레이저변위센서를 이용해 숫돌표면의 토포그래피를 구성하는 방법을 나타낸 것이다. WA60K7V 숫돌의 경우 입자의 크기가 240 $\mu\text{m}$ 이며 입자간 간격이 320 $\mu\text{m}$  정도가 된다. 레이저 변위센서의 샘플링 주파수가 최대 20KHz 인 것을 고려하여 토포그래피 작성시 주축을 2:0rpm으로 회전 시키면서 측정간격을 150 $\mu\text{m}$ 으로 하였다.

센서는 빔이 숫돌표면에 직각이 되도록 설치하고 반사강도가 최대가 되도록 환경을 설정하고, 센서 이송속도(테이블의 속도)를 1,000mm/min로 하여 연속적으로 측정하였다. Fig. 7은 측정된 데이터를 포토 인터럽터를 이용해 주축 1회전씩 끊어서 15개의 원주방향 숫돌표면 상태를 토포그래피로 표현한 것이다. Fig. 7(a)는 연삭이 진행되어 드레싱을 필요로 하는 시점에서 드레싱 전의 숫돌상태이며, Fig. 7(b)는 드레싱을 한 후의 숫돌상태를 나타낸 것이다. 드레싱을 한 후에는 커다란 요철부분이 제거되고 평탄화 되었음을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7에 대한 1회전 토포그래피를 나타낸 것이다. 연삭이 진행되면 숫돌의 표면이 거칠어 지며 특

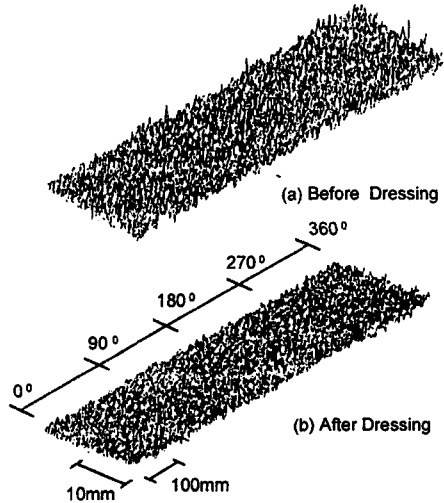


Fig.7 Topographies of Wheel Surface

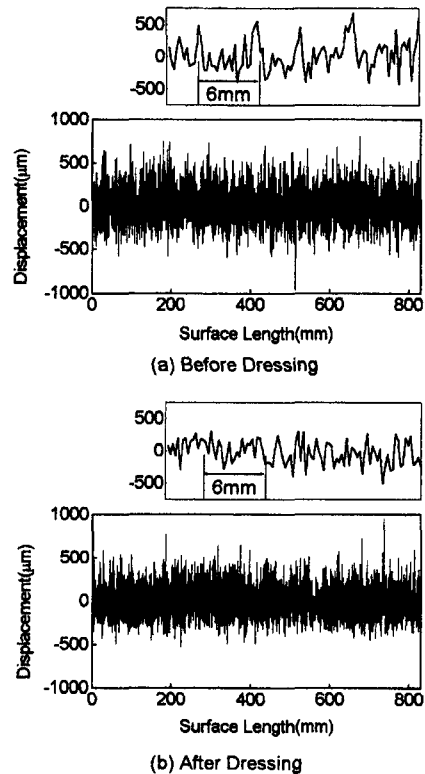


Fig.8 Line-Topographies of Wheel Surface

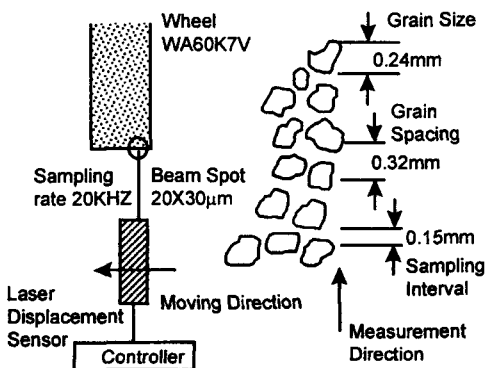


Fig.6 Measurement Scheme of Wheel Surface by Laser Displacement Sensor

히 아래부분 보다는 윗부분의 변화가 크게 나타남을 알 수 있다. 즉, 탈락의 패턴이 윗부분에 크게 나타나는 특징을 가지며 드레싱 후에는 슷들의 표면이 평탄하게 됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 슷들표면의 토포그래피에 대한 변위분포를 나타낸 것이다. 드레싱 전에는 표면 변위가 넓게 분포하는 특징을 가지지만 드레싱 후에는 좁고 높아지는 형상으로 변함을 알 수 있다.

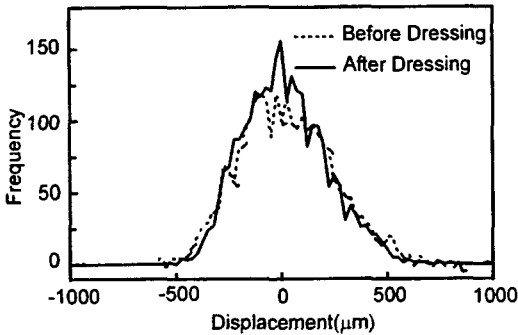


Fig.9 Displacement Distribution of Line Topography

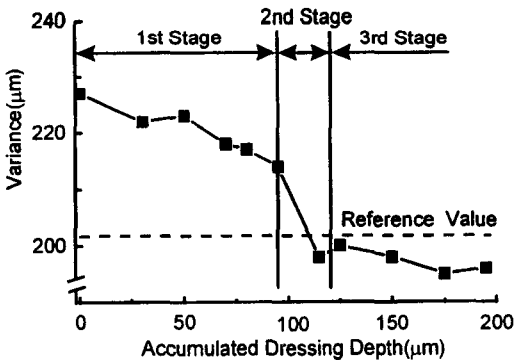


Fig.10 Variations of the Variance of Topography versus the Accumulated Dressing Depth

Fig. 10은 누적 드레싱 깊이에 따른 슷들표면 토포그래피의 분산 변화를 보인 것이다. 드레싱이 진행될수록 슷들표면은 편평해지고 고르게 되기 때문에 분산값은 작아지게 된다. 그림에서 보이듯이 제1단계 드레싱 영역에서는 분산이 완만히 감소하며, 제2단계 영역에서는 급격히 감소하고, 제3단계 영역에서는 아주 완만하거나 변화가 거의 없다. 이러한 결과로부터 드레싱 깊이는 일정량을 넘게 되면 효과가 없음을 알 수 있다. 이러한 누적 드레싱량에 따른 슷들표면 변위의 분산변화 특성으로부터,

연삭작업 특성에 맞는 기준값(Reference Value)을 설정하면, 최적의 드레싱량을 결정할 수가 있다. 그러나 이는 드레싱 및 드레싱 조건에 따라 변화가 달라지기 때문에 다른 조건에 대해서는 조건을 달리 결정할 필요가 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 연삭작업중 부적절한 드레싱 시기 및 드레싱량 결정에 의한 비가공시간을 단축하기 위해 센서신호에 기초하여 슷들상태의 감시를 통한 적절한 드레싱 시기 및 최적의 드레싱량을 결정하는 드레싱 전략에 관한 연구를 수행했다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 슷들의 눈막힘량과 가공면 거칠기의 상관관계(Relational Locus)은 적절한 드레싱 시기의 선택에 유효했다.
- 레이저 변위센서를 이용하여 슷들면의 토포그래피 표현이 가능했으며, 슷들면의 변화에 대한 직접관찰이 가능했다.
- 누적 드레싱량에 따른 슷들표면의 토포그래피 분산변화 특성을 이용해 최적의 드레싱량을 결정하는 방법에 대한 드레싱 전략을 제안했다.

## 감사의 글

본 연구를 수행하는데 있어 실험준비와 자료정리에 많은 도움을 준 부산대학교 대학원 김성렬군에게 감사의 뜻을 전합니다.

## 참고문헌

1. Eda, H., et al., "In-Process Detection of Grinding Burn by Means of Utilizing Grinding Acoustic Emission," J. of JSPE, Vol.49, No.9, pp. 1257-1262, 1983.
2. Dornfeld, D. and Cai, H. G.i, "An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission," Transactions of the ASME, Vol. 106, pp. 28-33, 1984.
3. Inasaki, I. "Monitoring of Dressing and Grinding Processes with Acoustic Emission Signals," Annals of the CIRP, Vol.34/1,

- pp. 277-280, 1985.
4. Murray, M., "Exploratory Investigation of Laser Methods for Grinding Research," *Annals of the CIRP Vol.22/1*, pp. 137-139, 1973.
  5. 須藤徹也, "砥石切れ刃の新しい測定装置," *精密機械*, 34, 9, pp. 606-610, 1968.
  6. 三好隆志, 齊藤勝政, "光學的フーリエ變換による砥石作業面性狀の評價," *精密機械*, 48, 8, pp.1045-1050, 1982.
  7. 山本明, 前田良昭, "磁氣ヘッドを用いた研削目づまりのインプロセス測定," *精密機械*, 37, 4, pp.253-260, 1971.
  8. 小尾誠, 辰巳洋二, 佐田登志夫, "研削加工における砥石目づまりのインプロセス測定," *精密機械*, 39, 10, pp.86-91, 1973.
  9. 後藤英一, "砥粒摩耗のインプロセス測定(第2報)," *精密工學會誌*, Vol.61, No.12, pp.1735-1739, 1995.
  10. 細川昱, "畫像解析による砥石作業面の評價(第1報)," *精密工學會誌*, Vol.62, No.9, pp.1297-1301, 1996.
  11. 김선호, 정병철, 안중환, "원통 프런지 연삭공정의 감시/제어 시스템," *한국정밀공학회지*, 제12권, 제9호, pp. 66-73, 1995.
  12. 김선호, 안중환, "연삭가공에 있어 비가공시간 단축에 관한 연구(I), -음향센서를 이용한 공연삭시간의 단축-", *한국정밀공학회지*, 제14권 제5호, pp. 85-91, 1997.