

스펙트럼 해석을 이용한 연삭숫돌 마멸거동

유은이*, 사승윤*, 유봉환**

The Behavior of Grinding Wheel Wear Using Spectrum Analysis

Eun Yi Yu*, Seung Yoon Sa*, Bong Hwan Ryu**

Abstract

Grinding System is very difficult to examine closely wear phenomenon or dynamic characteristic, because it is very complex and different from a general cutting system. Considering automatization and precision, it is very important to examine closely grinding system. In this study, grinding wheel surface is acquired by using computer vision system in order to explain wear and loading phenomenon. We investigate the relationship between wear and Fourier spectrum of acquired image, and observe the entropy variation in the process of manufacturing.

Key Words : Computer Vision System(컴퓨터 비전 시스템), Grinding Wheel(연삭 숫돌), Entropy(엔트로피), Fourier Spectrum(푸리에 스펙트럼)

1. 서론

오늘날의 절삭가공 분야는 주로 선삭 가공중에 발생할 수 있는 이상상태 감지를 위한 인프로세스 측정에 관한 연구나, 절삭 메카니즘 등에 관한 많은 연구로 무인생산시스템 구현이 점차로 실현되고 있다. 그러나, 연삭 시스템은 다른 절삭가공과는 달리 근본적으로 매우 복잡하여, 마멸현상이나 동적 특성 등 연삭 가공시 발생하는 현상을

규명하는 일이 매우 어렵다. 이러한 현실 때문에 대부분의 연삭가공은 경험적인 요소에 의한 추측으로 이루어지고 있는 실정이다. 그러므로, 연삭 시스템의 현상을 규명하고 그 과정을 알아내는 것은 자동화, 정밀화라는 관점에서 매우 중요한 사실이다.

연삭 시스템의 가공과정 중에 발생하는 이상상태로는 연삭 채터, 연삭 버어닝, 크랙, 가공물의 재질 또는 형상의 변화 등이 있으며, 이러한 현상은 연삭 숫돌의 눈막힘이나

* 숭실대학교 대학원
** 숭실대학교

마멸에 의하여 발생하게 된다. 이러한 이상상태 이외에도 적절한 드레싱시기가 지나게 되면 가공면의 정밀도는 상당히 저하하게 된다. 연삭가공에서 드레싱은 보통 주기적으로 시행되고 있으나, 이것은 비가공시간의 증대 및 불필요한 연삭숫돌을 소모시키게 되고 제품의 품질에 좋지 않은 영향을 끼칠 수 있다. 그러므로, 적절한 드레싱 시기와 드레싱량을 판별하는 것은 매우 중요한 일이다.

현재까지 연삭공정을 감시하고 그 현상을 규명하기 위한 연구가 많이 시도되고 있다. 그 중 AE신호를 이용한 연구가 가장 활발히 이루어지고 있다. 이러한 연구는 주로 AE 신호의 FFT 분석을 통하여 버어닝과 크랙을 탐지하거나, AE 에너지가 눈막힘량과 관련 있음을 이용하여 그 양을 추정하는 것이다.^{1) 2)} 이 외에도 간접적인 측정 방법으로는 연삭열을 측정하거나 연삭력을 측정하는 연구들이 있어왔다.³⁾ 그러나, 이러한 방법들은 연삭기의 구조나 센서의 부착 위치, 주위 환경에 의한 영향이 매우 크다는 단점이 있다.

이러한 단점을 극복하기 위하여 가공면이나 연삭숫돌을 직접적으로 관찰하는 방법들이 제안되고 있는데, 직접 측정 방법의 대표적인 것이 레이저 변위센서를 이용하는 것과 컴퓨터 비전을 이용하는 것이다.^{4) 5)} 이 중 컴퓨터 비전을 이용한 방법은 알고리즘의 변화에 따라 다각도로 적용이 가능하기 때문에 연구가 활발히 진행되고 있는 분야이다.

본 연구에서는 연삭숫돌 표면의 변화를 직접 관찰하여 마멸과 눈막힘의 정도를 판단하고 적절한 드레싱 시기를 찾아내는 것에 연구의 초점을 맞추었다. 숫돌 표면을 직접 관찰하기 위하여 컴퓨터 비전 시스템을 이용하였으며, 마멸량과 눈막힘량의 정보를 판단하기 위하여 FFT 알고리즘과 엔트로피 기법을 사용하였다.

2. 영상 정보의 판별

2. 1 엔트로피

일반적인 의미로 엔트로피(entropy)란 혼란의 정도를 의미한다. 영상에 있어서 엔트로피란 정보의 양과 관련이 있다. 엔트로피가 증가할수록 영상의 정보가 더 많아진다는 것을 의미한다.

명암도의 발생 빈도수를 나타내는 영상의 히스토그램은 Fig. 1과 같이 대비(contrast)가 뚜렷하지 않은 영상일수록 피크(peak)와 밸리(valley)가 명확하게 나타나지 않고 여러 가지 확률분포 값을 갖는다. 대비가 확실하게 나타나는 영상(Fig. 1(a))은 bimodal 형태의 히스토그램(Fig. 1(b))을

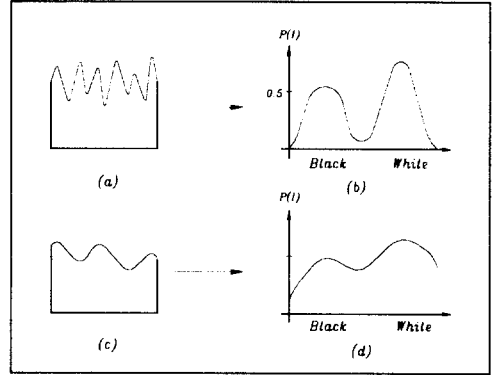


Fig. 1 Intensity histogram of grinding wheel surface

나타내게 된다. 또한 대비가 뚜렷하지 않은 영상(Fig. 1(c))은 피크와 밸리가 뚜렷하지 않은 히스토그램(Fig. 1(d))을 가지게 된다.

이와 같은 원리로 새 숫돌의 경우 가공에 참여하는 입자와 그 외 부분과 높이의 차이가 확연하게 드러나기 때문에 입자 부분만 밝게 빛나고 나머지는 어둡게 나타나므로, 대비가 뚜렷하게 되어 정보량이 작게 된다. 그러나, 마멸이 많이 일어나거나 눈막힘이 일어난 숫돌은 입자와 그 밖의 부분과 높이차가 확연하지 않기 때문에 대비가 낮아져서 경계부분에 많은 정보량을 갖게 된다. 이러한 원리에 의하여 마멸이 진행될수록 엔트로피 값은 증가하게 된다.

영상의 엔트로피 E는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = -\sum_i P(I) \ln P(I), \quad P(I) \neq 0 \quad (1)$$

여기서 $P(I)$ 는 명암도 I 에서의 발생 빈도수, 즉 발생 확률을 의미한다.

E 가 최대값을 갖는 경우는 모든 $P(I)$ 값이 같을 때이며, 최소값을 갖는 경우는 I 값이 하나로만 존재할 때이고, 이 때 하나의 I 값에 대하여는 확률 $P(I)$ 가 1이 되고 나머지에 대하여는 0이 된다.⁶⁾

2. 2 FFT

영상의 푸리에 변환은 영상의 공간 주파수 분포를 제공한다. 또한, 영상에 있어서 고주파 에너지는 날카로운 윤곽 성분을 나타내므로 파워 스펙트럼에서 고주파 에너지의 양이 많을수록 더 뚜렷한 영상임을 나타낸다. 이러한 원리에 의하여 숫돌입자와 그 밖의 부분과의 대비가 좋은

새 슷들의 경우 마멸이 많이 일어난 슷들보다 고주파 에너지의 양이 많다고 볼 수가 있다.

본 연구에서는 슷들 표면의 특성을 파악하기 위하여 2차원 푸리에 스펙트럼을 사용하였다.

3. 연삭스틀 표면의 획득

연삭 실험은 평면연삭기를 사용하였으며, 가로×세로×높이가 130×43×30mm인 SM45C 시편을 건식으로 가공하였다. 연삭스틀은 WA80kmV를 사용하였으며, 휠의 원주속도는 1922 m/min, 테이블의 이송속도는 2.5m/min 이고 연삭깊이는 15 μ m의 가공조건에서 가공하였다.

연삭스틀의 표면을 관찰하기 위한 컴퓨터 비전 시스템은 Fig. 2와 같다.

CCD카메라를 연삭스틀의 표면과 수직하도록 지그를 제작하여 고정시키고 한 눈금당 4 μ m로 이송시킬 수 있는 미소이송장치 위에 슷들을 고정시켜 가장 초점이 잘 맞는 위치를 찾을 수 있도록 하였다. 연삭 슷들면을 확대하기 위하여 카메라와 렌즈 사이에 120mm의 경통(25mm 2EA, 20mm, 50mm)을 제작하여 그 길이를 조절하면서 최적의 배율(3 μ m/pixel)에서 영상을 획득할 수 있도록 하였다. 조명은 광섬유(optical fiber)를 사용하여 고른 조명분포를 가질 수 있도록 하였다. CCD 카메라를 통하여 획득된 영상은 DT3155 보드로 샘플링하고 PC에서 프로세싱을 하였다.

영상의 획득은 시편을 5회 가공한 후마다 이루어졌으며, 각 영상의 엔트로피 값과 푸리에 스펙트럼(Fourier spectrum)의 값에 대한 가공회수와와의 관계를 살펴보았다.

Fig. 3은 카메라 렌즈가 연삭에 참여하는 입자에 초점이

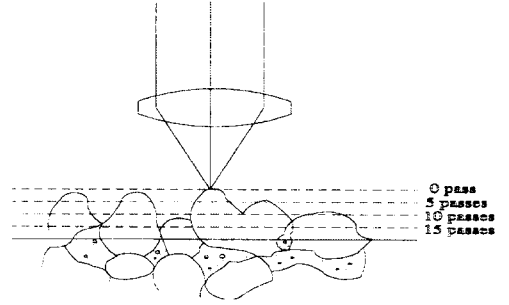


Fig. 3 Grinding wheel surface

맞은 상태를 나타내고 있다. 연삭입자 중 가장 높은 지점은 반사량이 가장 많기 때문에 밝게 빛나고 이 부분에 초점을 맞추면 나머지 부분은 어둡게 나타나게 된다. 따라서 가공회수가 늘어남에 따라 연삭입자와 결합체 사이 거리는 짧아져 초기의 영상과 비교하여 광강도의 대비나 고주파 성분 등의 변화가 발생하게 된다. 따라서, 엔트로피와 스펙트럼 값의 변화를 계산하여 연삭스틀의 거동과 비교한다.

4. 드레싱 시기의 결정

가공이 진행됨에 따라 마멸현상이 어떠한 형태로 나타나는지를 관찰하기 위하여 5회 가공 후마다 영상을 획득하였다. Fig. 4는 가공하기 전의 슷들 표면의 영상이고 Fig. 5는 30회 가공한 슷들표면을 나타내고 있다. Fig. 4의 경우 연삭입자 부분은 밝게 잘 나타나 보이지만 그 밖의 부분은 어둡고 흐리게 나타난 것을 볼 수 있다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 입자가 돌출된 부분에 초점이

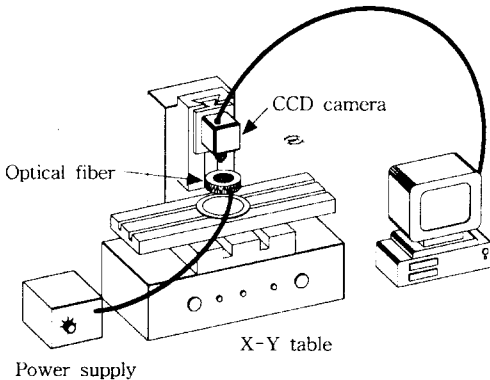


Fig. 2 Schematic diagram of image acquisition system

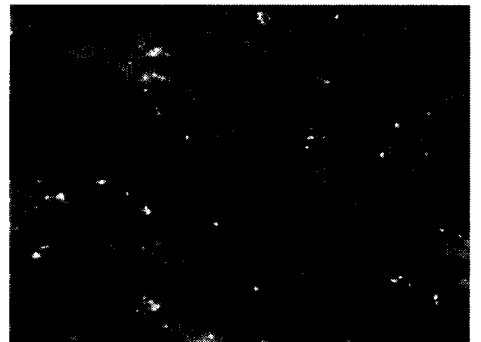


Fig. 4 Grinding wheel surface image of before grinding

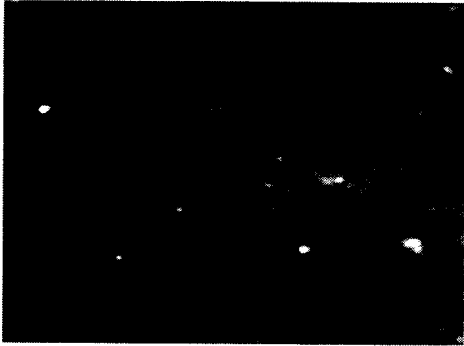


Fig. 5 Grinding wheel surface image of 30 passes Grinding

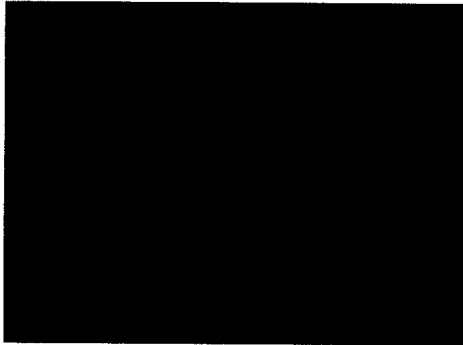


Fig. 6 Fourier spectrum image of before grinding



Fig. 7 Fourier spectrum image of 30 passes grinding

부분이 많이 감소하였음을 볼 수 있다. 그러므로, 여러번의 가공을 통하여 연삭입자의 날카로운 부분들이 마멸되어 Fig. 4의 영상보다 고주파 성분들이 많이 감소하였음을 알 수 있다. 또한 영상에서 일부 검게 나타나는 부분은 가공물의 칩이 부착하여서 발생한 것이다.

Fig. 6과 Fig. 7은 각각 Fig. 4와 Fig. 5의 영상을 2차원 FFT 처리를 통하여 얻어진 푸리에 스펙트럼 영상을 나타낸 것이다. Fig. 6은 Fig. 7에 비하여 중심영역이 좁고 밝게 나타나고 있는 것을 볼 수가 있다. 이는 Fig. 4의 영상에서와 같이 날카로운 입자부분에서 빛의 반사가 매우 강하게 나타나고 있으므로 픽셀의 성분들이 공간영역에서 높은 강도값을 가지고 있기 때문이다. 따라서, 푸리에 공간에서는 고주파 성분으로 작용하게 된다. 또한 고주파 성분들에 의하여 스펙트럼 값은 커지게 된다. 한편 30회 가공 후 획득된 영상의 푸리에 스펙트럼은 Fig. 7과 같다. 이 경우, 연삭입자와 결합체 사이의 높낮이가 줄어들어 공간영역에서의 영상의 명암도 변화가 완만하여 그 값도 평균적으로 낮은 값을 갖는다. 이는 가공전의 날카로운 입자들이 여러회의 가공을 통하여 마멸되어 반사강도는 크지 않기 때문이다. 따라서 푸리에 스펙트럼은 고주파 성분들이 가공전의 영상보다 적어졌으므로 Fig. 6 보다 낮은 스펙트럼 값을 나타낸다.

Fig. 8은 5회 가공한 후마다 획득된 영상의 푸리에 스펙트럼 변화를 관찰하기 위하여 로그 스케일로 나타낸 그래프이다. Fig. 8(a)는 가공전의 스펙트럼 분포를 나타내는 것으로 주파수 변수 u, v 가 0일 때 크게 나타나며 u, v 의 변화에 따라 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다.

또한 Fig. 8의 (b)~(f)에서와 같이 가공회수가 5회씩 증가함에 따라 스펙트럼의 피크(peak)값이 조금씩 감소하면서 주변의 변화도 점차로 완만해짐을 관찰할 수 있으며, Fig. 8(f)의 경우는 Fig. 7의 스펙트럼 영상에서와 같이 피크값 주위의 변화가 완만하게 퍼져있는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 가공회수 증가에 따른 연삭숫돌 표면 영상의 엔트로피 값과 푸리에 스펙트럼값을 비교한 것이다. 여기서, 가공회수가 증가함에 따라 엔트로피 값은 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 초기 영상에서 연삭입자의 광분포가 높은 강도를 가지는 반면에 입자와 결합체 사이의 거리차이가 있어 광강도의 대비는 좋다고 볼 수 있다. 그러나, 가공이 진행될수록 입자와 결합체 사이의 높낮이가 줄어들기 때문에 광강도의 변화가 완만하게 되어 여러 명암도 값이 분포하게 되었다고 해석된다. 이 결과 초기 숫돌의 히스토그램은 bimodal의 형태를 띄고 있으나 점차 히스토그램의 정보량이 많아지게 되어 엔트로피의 값은 커지게 되었다.

맞았기 때문에 나타나는 현상이다. Fig. 5는 입자와 그 밖의 부분이 거의 비슷한 높이를 이루고 있기 때문에 Fig. 4의 경우에 비해 전체적으로 명암대비가 작고 밝게 빛나는

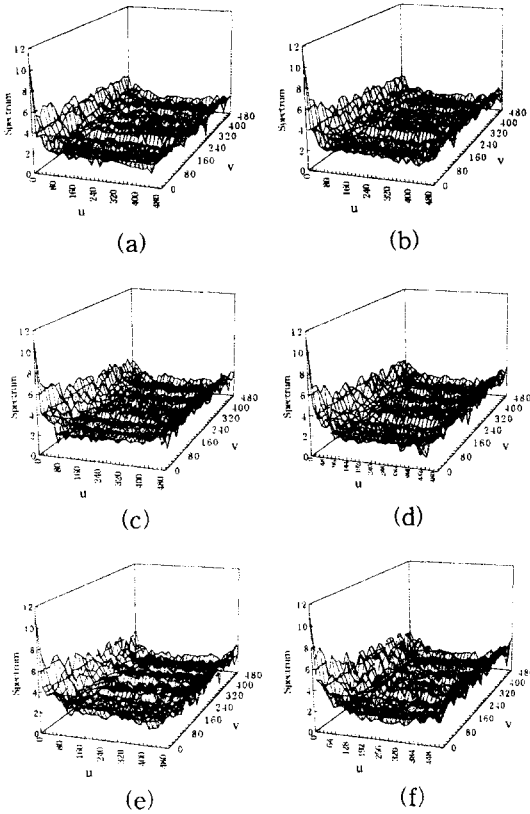


Fig. 8 The variation of Fourier spectrum

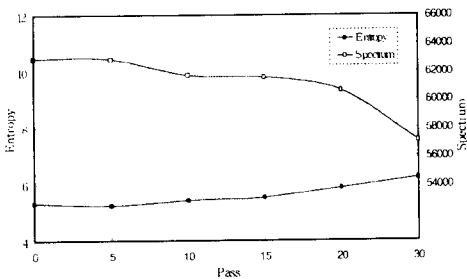


Fig. 9 Comparison of entropy and spectrum

그러나 엔트로피의 변화의 경우 그 변화량이 미소할 뿐만 아니라, 복잡한 영상에 적용할 경우 오차 발생 확률이 높아지게 된다. 하지만 푸리에 스펙트럼의 경우 마멸이 심해질수록 그 변화도 급격하게 나타나게 되어 이 시기를 드레싱 시기로 판별할 수 있다. 본 실험의 경우, 20회 가

공 이후의 푸리에 스펙트럼의 변화가 급격하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 그러므로 이 때 드레싱을 하는 것이 적절하다고 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구는 컴퓨터 비전 시스템을 이용하여 직접적으로 연삭 스톨 표면을 관찰하여 적절한 드레싱 시기를 찾는 방법을 제안한 것으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 푸리에 스펙트럼의 값은 영상의 광강도의 크기를 대표하고 있으므로 영상의 분석에 편리하게 쓰일 수가 있다.
- (2) 푸리에 스펙트럼의 변화는 연삭 입자의 마멸이 커질수록 크기가 급격히 감소하므로 적절한 드레싱 시기 판별을 할 수가 있었다.
- (3) 연삭 입자의 마멸이 진행될수록 영상의 엔트로피 값은 점차로 증가하지만, 영상이 복잡할 경우 어느 정도의 오차를 동반한다.

참고 문헌

- (1) Dornfeld, D. and Cai, H. G., 1984, "An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission", Trans. of ASME, Vol. 106, pp.28~33.
- (2) Inasaki, I., 1985, "Monitoring of Dressing and Grinding Process with Acoustic Emission Signals", Annals of CIRP, Vol.34/1, pp.277~280.
- (3) Eiss, N. S., 1967, "Fracture of Abrasive Grain in Grinding", Trans. of ASME, pp.463~470.
- (4) Nakazona, H., Yasui, H., Kurusu, M., and Hosokawa, A., 1990, "Studies on Dressing of the Resin-Bond CBN Grinding Wheel(1st Report)", Bull. Japan Soc. of Proc. Engg., Vol. 24, No.1, pp. 51~56.
- (5) Peng, Z., Kirk, T. B., and Xu, Z. L., 1997, "The Development of Three-Dimensional Imaging Techniques of Wear Particle Analysis", Wear, pp. 418~424.
- (6) E. Krotkov, 1987, "Focusing", Int.J. of Computer Vision, Vol. 1, pp.223~237.
- (7) 유봉환, 유은이, 사승운, 이명재, 공재향, 1998, "정밀측정을 위한 최적영상에 관한 연구", 한국공작기계학회지 제7권 제3호, pp.126~131.