

다이아몬드 코어 드릴의 마멸 검출에 관한 연구

유봉환*, 사승윤**, 이명재**, 김광래***, 강신철****

A Study on the Wear Monitoring Technique for Diamond Core Drill

Bong-Hwan Ryu, Seung-Yoon Sa, Myung-Jae Lee, Kwang-Lae Kim, Sin-Cheol Kang,

Abstract

The diagnosis and monitoring system of abnormal cutting condition is necessary to realize precision machining process and factory automation, which are final goal of metal cutting. In order to develop this system, the image processing technique has been investigated in machining process. In this paper, the measurement system of tool wear using computer vision is designed to detect the wear pattern by non-contact and direct method and get the reliable wear information about cutting tool. We measured the area of the side and front part of the diamond core drill which is used in 40 kHz ultrasonic vibration machine.

Keywords : Computer Vision(컴퓨터비전), Diamond Core Drill(다이아몬드 코어드릴), Erosion(에로션) Dilation(디레이션)

1. 서 론

절삭공정의 궁극적인 목표인 정밀한 제품가공과 무인화 가공을 실현하기 위해서는 공구의 정확한 설치와 공구의 절삭날에 대한 형상 및 마멸에 대한 정밀한 측정, 공구의 이상상태 감시 및 진단기술을 개발하는데 있다. 그러나 현재의 생산현장에서는 숙련된 작업자가 가공과정을 직접 관찰하면서 이상이 발생할 경우 작업을 정지시키고 원인을 제거한 후 다시 작업하므로 생산시스템의 완전한 자동화와 무인화를 이룩하기 위해서는 가공중 일어날 수 있는 이상상태 즉,공구마멸, 공구손상, 채터 등을 검출 할 수 있는 시스템이 필요하다.

이러한 요구에 맞춰 반도체 및 컴퓨터의 발달로 인해 실시간으로 처리할 수 있는 영상처리 기술이 기계가공

분야에서 온-라인으로 공구마멸 형상이나 기하학적 형상의 측정에 국 내외에서 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다.^{[1]~[5]} 온-라인 마멸검출 기법에는 직접측정 방식과 간접측정 방식의 두 가지가 있는데 직접측정 방식은 마멸형상에 관련된 변수를 직접측정하는 방식으로 실제 가공중 센서의 접근이 곤란하므로 가공들 사이에 측정하여야 하는 어려움이 있으나 높은 신뢰성 때문에 이 분야에 대한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 간접측정방식은 공구상태 사이의 상관관계를 이용 간접적으로 마멸상태를 판단하는 방식으로 공구손상, 절삭상태 등을 비교적 용이하게 검출할 수 있으나 정량적인 측정이 곤란한 단점이 있다. 본 연구에서는 공구 마멸상태를 비접촉, 직접적방법으로 검출하고 신뢰성이 높은 절삭공구에 관한 마멸정보를 얻기 위해 최근 그 응용범위가 확대되

* 숭실대학교

** 숭실대학교 대학원

*** 인덕전문대학

**** 대우중공업

고 있는 컴퓨터 비전기술을 응용한 공구마멸 측정용 시스템을 구성하였으며 그 측정 대상은 정밀 가공에 적합한 40kHz 초음파 진동가공기에 장착하여 사용하는 다이아몬드 코어드릴(diamond core drill)을 대상으로 마멸량을 정량적으로 분석하였다.

2. 관련 이론

2.1 코어드릴형상의 모델

Fig. 1(a) 및 (b)는 각각 코어링(coring) 전 및 후에 대한 코어드릴의 투영형상을 표시한다. 이와 같이 코어드릴의 형상측정으로부터 코어드릴의 마멸진행은 Fig. 1(c)의 과선과 같이 진행하게 된다. 일반적으로, 코어드릴의 마멸은 초기 마멸영역부터 정상마멸 영역, 과도마멸 영역으로 진전하지만, 코어링에 있어서도 코어링이 진행함에 따라 코어드릴 마멸의 진행정도는 초기에는 에지(edge)부의 마멸이 현저하고(Fig. 1(c)의 과선), 그 후 서서히 완화 되어진다. 이 상태(Fig. 1(c)의 실선)를 정상마멸 영역이라 부르기도 한다.

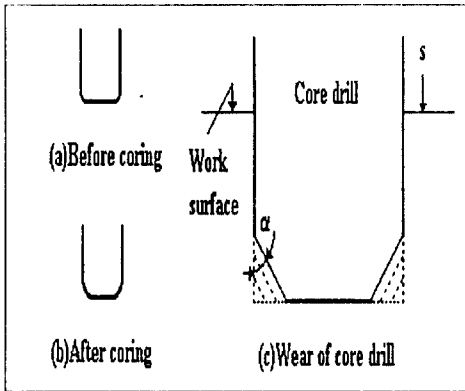


Fig. 1 Specification of wheel wear in core drill

또, 코어드릴의 형상은 걸면부가 마멸되기 쉽고, 코어드릴형상을 단면부에 경사를 갖는 형상이라고 가정한다. 즉, 코어드릴과 공작물의 작용형상 모델을 Fig. 2와 같이 생각할 수 있다. 코어드릴형상은 마멸에 의해서 변화되며 양 단면부(외측과 내측)에 각도 α 가 되는 사면부가

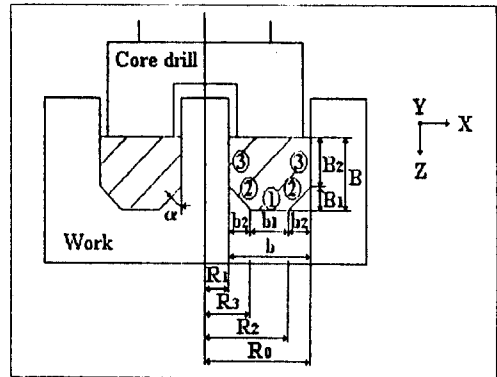


Fig. 2 Model of coring

존재하고 단면부, 사면부(외측과 내측), 측면부(외측과 내측)로 구성되어진다. 여기에, 단면부(Fig. 2-①)을 제 1작용면, 사면부(Fig. 2-②)를 제 2작용면, 측면부(Fig. 2-③)를 제 3작용면이라 한다.

제1, 제2작용면은 공작물을 제거하고 제 3작용면은 제거를 행하지 않고, 제 2작용면의 깎인 나머지에 의한 마찰작용이 추가 되는 부분이라고 생각되어진다. 또 각 작용면이 공작물과 접촉하는 면적에 대해 각각의 접촉면적을 S1, S2, S3라고 하면 제 2, 제 3작용면에 의한 접촉면적 S2, S3에 대해서는 외측과 내측으로 나누고 외측에는 (') , 내측에는 (")으로 붙여서 표시한다. 따라서, $S_2 = S_2' + S_2''$ 이고 $S_3 = S_3' + S_3''$ 이다. 따라서, 접촉면적 $S_1, S_2, S_3(mm^2)$ 은 다음의 식으로 표시된다.

$$S_1 = \pi(R_2 R_3^2) - S_{m1} \tag{1}$$

$$S_1 = S_2' + S_2'' \tag{2}$$

$$= \frac{2\pi b_2 (R_0 R_3 - b_2)}{\sin \alpha} - S_{m2}$$

$$S_3 = S_3' + S_3'' \tag{3}$$

$$= 2\pi(R_0 + R_1)B_2 - S_{m3}$$

여기서 R_0, R_1 : 각각 코어드릴의 외, 내경의 반경(mm),

R_2 : 외측의 제1,2작용면의 경계부의 반경(mm)

R_3 : 내측의 제1,2작용면의 경계부의 반경(mm)

b : 반경방향의 코어드릴폭(mm)

B : 축방향의 코어드릴폭(mm)

α : 경사부와 측면부가 이루는 각

$$(\alpha = \tan^{-1}(b_2/B)) \text{ (rad),}$$

γ : 반경방향 코어드릴폭의 비
 $(b_1=(1-2\gamma)b, b_2=\gamma b)$,
 χ : 축방향 코어드릴폭의 비
 $(B_1=\chi B, B_2=(1-\chi)B)$,
 Sm_1, Sm_2, Sm_3 : 제1,2,3작용면의 면적(mm²)

2.2 코어드릴 연삭날의 분포

코어링 기구를 고려하는데 있어서 코어드릴표면의 연삭날분포와 공작물에 대한 연삭날의 작용을 고려할 필요가 있다. 이제, 코어드릴면에 대한 연삭날분포를 고려하기 위해서, 연삭날은 평균입경 D_g 의 구형이 되고, 코어드릴내부에 균일하게 분포함과 동시에 결합제에 비교하여 충분히 강체에 가깝다고 가정한다. 또한, 입도번호 G , 집중도 c , 지립보지계수 β 를 이용하여 코어드릴 단위 면적당의 연삭날수 N_p 를 구하려면, 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$N_p = \frac{\beta c G^2}{15000\pi} \quad (4)$$

3. 영상처리 알고리즘

3.1 Erosion과 Dilation

Minkowski의 집합 합(set addition)과 집합 차(set subtraction)에 기초한 형태학적 연산에는 erosion과 dilation이 있다^[11]

먼저 dilation의 정의는 두 집합 A와 B에 대해 B에 대한 A의 dilation은 다음과 같이 정의한다.

$$A \oplus B = \{t=R^z/t=a+b, a \in A, b \in B\}$$

위의 식과 같이 표현되는 Minkowski의 합을 형태학적인 dilation이라 한다. 또한 erosion의 정의는 두 집합 A와 B에 대해 B에 대한 A의 erosion은 다음과 같이 정의한다.

$$A \ominus B = \{c=Z^z/c+b \in A, \text{ for every } b \in B\}$$

위의 식을 Minkowski의 차라 하며 형태학적인 erosion의 정의가 된다.

3.2 Opening 과 Closing

Opening은 erosion(\ominus)후에 dilation(\oplus)을 연속으로 수행하여 영상내의 윤곽선을 부드럽게 하거나 노이즈, 작은 돌출 등을 제거 할 수 있다.

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$$

한편 closing은 dilation(\oplus)후에 erosion(\ominus)을 수행하여 작은 조각의 연결, 빈 공간을 채울때, 또는 외곽선을 부드럽게 만들때 사용하며 opening과 closing은 상호 보완적으로 사용한다.

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B$$

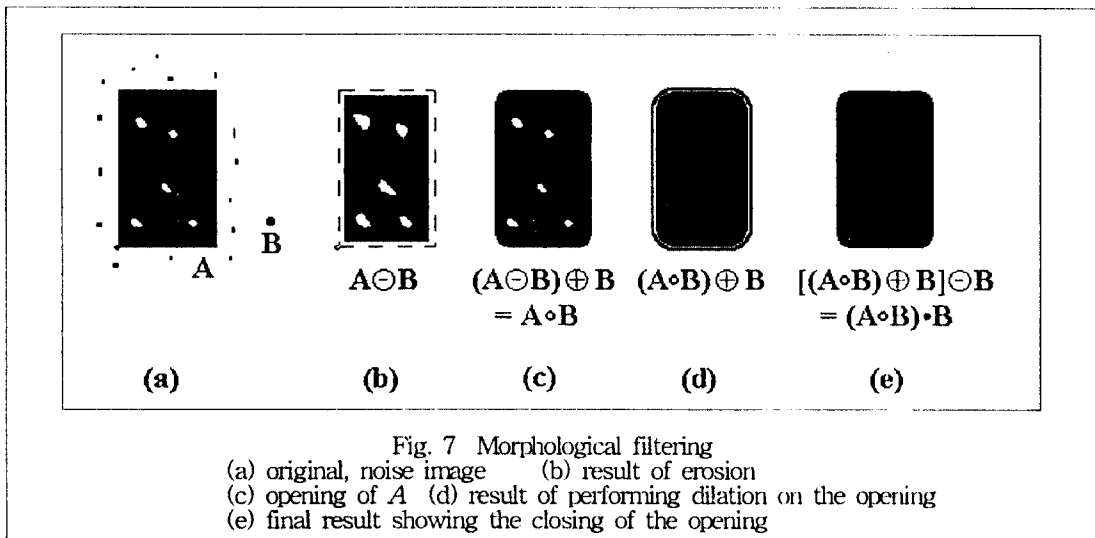


Fig. 7 Morphological filtering
 (a) original, noise image (b) result of erosion
 (c) opening of A (d) result of performing dilation on the opening
 (e) final result showing the closing of the opening

4. 실험

4.1 실험장치

영상처리를 위한 실험장치는 크게 영상입력부, 조명부, 영상처리부로 나눌 수 있으며 전체 실험 시스템 구성도는 Fig. 4와 같다.

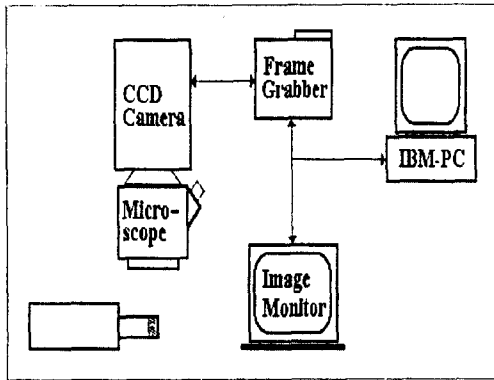


Fig. 4 Schematic diagram of monitoring system

영상입력부에서는 CCD카메라를 이용하여 코어드릴의 마모 형상이나 코어드릴의 표면에 분포되어 있는 지석입자를 관찰하여 한 프레임의 영상으로 얻기위해 사용하였으며 이때 영상의 해상도를 높이기 위하여 현미경의 대물렌즈를 이용한 광학계를 구성하였다. 구성된 광학계로 얻어진 영상은 영상처리부에 입력된다. 입력된 영상을 원하는 영상으로 가공하거나 필요한 정보를 추출해내기 위해 DT2853-60Hz 프레임 그래버를 이용하여 처리 하였다. 또한 CCD 카메라에 맺히는 코어드릴 형상의 밝기는, 코어드릴 형상의 반사특성과 입사광의 분포, 광원(light source)에 의존하게 된다. 이러한 요인들로 인해 조명은 영상처리 결과에 매우 큰 영향을 미치는 인자로 작용한다. 따라서 본 실험에서 광원으로 사용된 광섬유 조명 시스템은 15V, 150W 할로젠 램프(halogen lamp)를 채택하여 조명의 강도를 조절할 수 있도록 한 장치이다.

4.2 실험방법

마멸되지 않은 다이아몬드 코어드릴에 대해 회전속 3000 rpm, 이송속도 5mm/min로 5분간 가공하여 마멸된

다이아몬드 코어드릴을 현미경 밑에 놓고 현미경위에 CCD를 장착하여 영상을 획득하였다. 조명은 광 조절장치를 통해 조절된 빛을 광섬유(optical fiber)를 통해 현미경 밑에서 원형으로 주사하여 빛이 고루 분포하게 하였다. 영상은 측면경사부의 마멸량을 계산하고 단위면적당 다이아몬드 면적을 계산하기 위해 배율을 달리 하여 측면과 정면의 영상을 획득하였다. 측면영상의 획득에 사용된 배율로는 정면의 다이아몬드 분포를 정확하게 감지할 수 없었으며 정면영상의 획득에 사용된 배율로는 측면의 마멸영역이 한 프레임(frame)의 영역을 넘어 배율을 같이할 수 없는 문제점이 있었다.

5. 실험결과 및 고찰

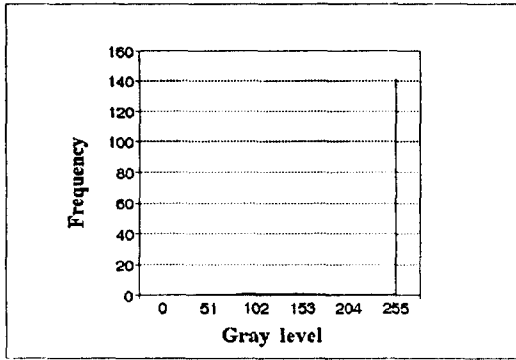
5.1 영상처리 과정 및 결과

[측면부 마멸량]

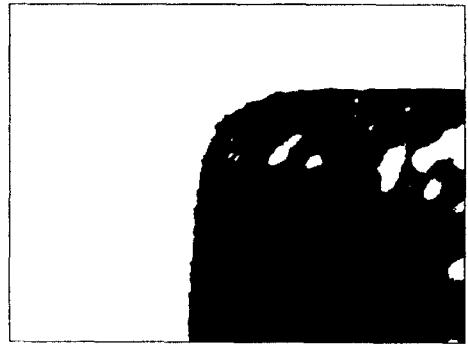
CCD 카메라를 통해 획득한 원영상은 영상획득시 작용하는 많은 노이즈 성분을 가지고있어 이러한 노이즈 성분을 제거하기위하여 매디안필터를 사용하여 제거하였고 엔트로피 쓰레쉬홀딩(entropy thresholding)기법을 이용하여 이진영상(binary image)로 만들었다. 그러나 이렇게 생성된 이진영상에서도 점잡음이나 돌출된 부분으로 인해 기준선(base line)을 설정하기가 곤란하므로 erosion 후 dilation을 하는 형태학적 opening기법을 이용하여 점잡음이나 돌출된 부분을 제거한 후 기준선을 찾아내었다. 일단 기준선이 설정되면 기준선내의 부분과 코어드릴 사이의 화소수를 계산하였다. Fig. 5는 측면부의 마멸량을 계산하는 과정을 나타내었다.



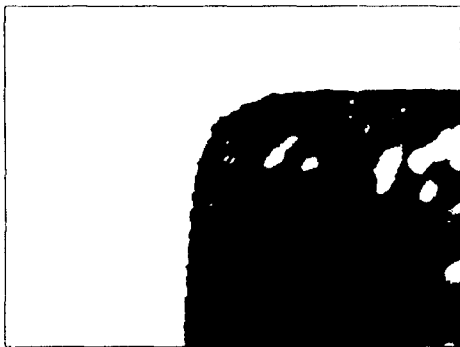
(a) Original image



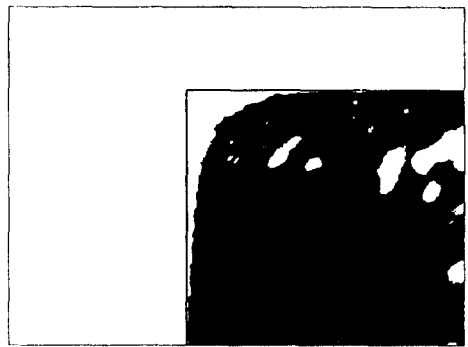
(b) Histogram of the image



(c) Binary image



(d) Noise removed image



(e) Detected baseline image

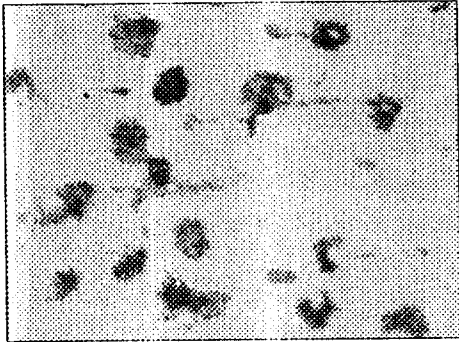


(f) Image processing result

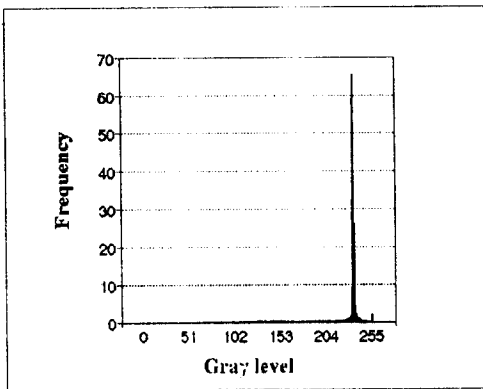
Fig. 5 Image processing procedure 1

[정면부의 다이아몬드 면적비]

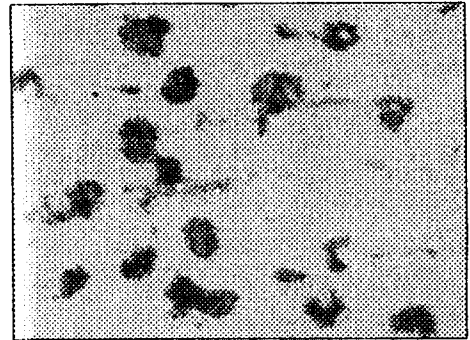
원영상에 포함된 잡음을 제거하기 위해 메디안 필터를 이용하였으며 측면부와 마찬가지로 엔트로피 쓰레쉬홀딩기법을 이용하여 이진영상으로 만들었다.



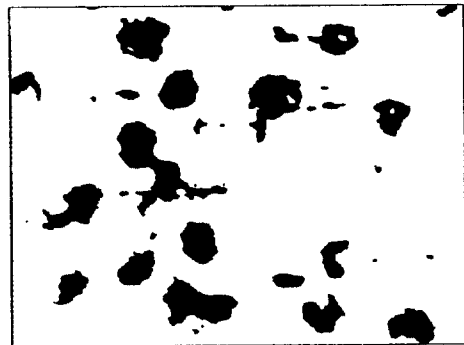
(a) Original image



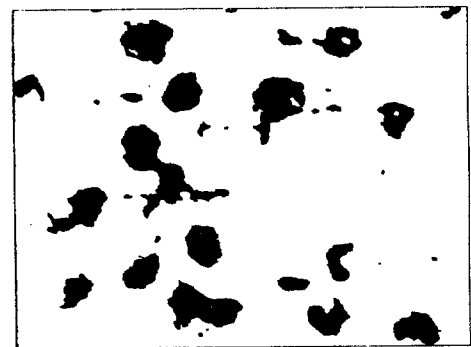
(b) Histogram of the image



(c) Median filtering image



(d) Binary image



(e) Image processing result
(opening and closing)

다이아몬드의 면적비를 계산하기에 앞서 고립점이나 아직도 남아있는 돌출부를 제거하기 위해 opening기법을 이용하였고 내부의 빈 공간을 채우기 위해 closing기법을 이용하여 처리하였다. 이와 같이 정면부의 다이아몬드 면적비를 계산하는 과정을 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6 Image processing procedure 2

영상처리에 있어 측정량은 화소수의 단위로 산출되므로 마멸기준인 mm단위로 환산하기 위해 환산계수(mm/pixel)가 필요하게 된다. 환산계수는 영상을 획득할 때의 광학계에 따라 달라지는데 본 연구에서의 환산계수는 다음과 같다.

[측면부]

$$f_{x1} = 0.00926 \text{ mm/pixel}$$

$$f_{y1} = 0.00725 \text{ mm/pixel}$$

[정면부]

$$f_{x2} = 0.00253 \text{ mm/pixel}$$

$$f_{y2} = 0.00195 \text{ mm/pixel}$$

5.2 고 찰

Fig. 5에서 (a)는 원영상을 나타내며 (b)는 원영상에 대한 히스토그램이다. (c)는 엔트로피를 이용하여 쓰레쉬홀딩한 이진영상으로 이때 평가함수가 최대가 되는 쓰레쉬홀딩 레벨은 219로 이 값을 기준으로 이진영상을 만들었다. 그러나 이렇게 생성된 이진영상에 포함된 점잡음으로 인해 상면 기준선이나 좌측 기준선을 찾는데 있어 전혀 다른 결과를 초래하였다. (d)는 이와 같은 잡음을 제거하기 위해 opening 기법을 적용한 영상이다. 상면 기준선은 영상좌표에서 x를 고정시키고 y를 0에서 511까지 증가시키면서 그레이레벨이 0이 되는 좌표를 찾게 하였고 이때 그레이레벨이 0이 되는 좌표를 찾지 못하면 x를 하나 증가시키고 마찬가지로 y를 0에서 511까지 증가시켰다. 일단 상면 기준선이 설정되면 비슷한 방법으로 좌측 기준선을 찾게 하였는데 이렇게 찾은 기준선영상이 (e)이다. 일단 기준선이 설정되면 기준선내부와 코어드릴 사이의 화소수를 계산하게 되는데 y방향으로 검색하여 계산했을 때 돌출된 부분위의 마멸된 부분에 대해서는 계산할 수 없게 되므로 x쪽에 대해서도 보충적인 검색을 행하였다(f). 기준선과 코어드릴 사이의 화소수는 6204개가 존재하였고 이를 환산계수에 곱하면 측면부 마멸량을 계산할 수 있는데 이렇게 얻어진 측면부 마멸량은 0.4165mm^2 이었다. Fig. 6에서 (a)는 원영상이며 (b)는 원영상에 대한 히스토그램을 나타내었다. 원영상에 포함된 잡음을 제거하기 위해 윈도우내의 중간값을 윈도우의 중앙에 대치하는 메디안 필터를 적용하였을 때 평

균 필터에 비해 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 코어드릴에서 다이아몬드만을 분할(segmentation)하기 위해 Fig. 5에서와 같이 엔트로피기법을 이용하였다(d). 이때 평가함수 ϕ 가 최대가 되는 경계값은 195로 결정되었고 이를 기준으로 쓰레쉬홀딩하였다. 그러나 조명의 영향으로 고려되는 다이아몬드 내부의 밝은 부분으로 인해 빈 공간이 생긴것을 없애고 지협이나 돌출부를 줄이기 위해 closing과 opening기법을 이용하여 좋은 결과를 얻을 수 있었다(e). 이렇게 처리된 영상에 대해 그레이레벨 0인 다이아몬드 부분의 화소수에 환산계수를 곱하여 다이아몬드가 차지하는 부분의 면적을 계산할 수가 있었다. 이때 다이아몬드 부분의 화소수는 32140개이고 면적으로는 0.15856mm^2 이다. 한 프레임 전체면적이 $512 \times 480 \times$ 환산계수 $= 1.212456\text{mm}^2$ 이므로 단위면적(1mm^2)당 다이아몬드가 차지하는 면적은 0.13077mm^2 가 되며 비율로는 약 13.08 %가 된다.

6. 결 론

정밀가공에 적합한 40kHz 초음파 진동가공기에 장착하여 사용되는 다이아몬드 코어드릴을 대상으로 측면부의 마멸량을 검출하고 단위면적당 다이아몬드의 면적을 구하기 위해 영상처리 기법을 적용하는 공구마멸 시스템을 구성하였고 획득한 영상을 가공하는 알고리즘을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 다이아몬드 코어드릴에 대해 비접촉식이며, 직접적인 방법으로 측면부의 마멸량을 검출할 수 있었다.
2. 정면부의 다이아몬드 부분을 감시함으로써 일반 연삭숫돌의 감시에도 확대 적용할 수 있는 가능성을 제시하였다.
3. 광섬유 조명 시스템을 이용하여 광 강도를 조절함으로써 최적의 영상을 얻을 수 있었다.
4. 엔트로피 쓰레쉬홀딩기법을 이용하여 자동으로 임계값을 설정하므로 이상적인 이진영상을 만들 수 있었다.

향후에는 실제 가공중 감시할 수 있는 일체형의 시스템과 실시간 처리가 가능한 빠른 알고리즘에 대한 연구가 수행되어야 한다.

참고문헌

- [1] Giusti, F., Santochi, M. and Tantussi, G., "A Flexible Tool Wear Sensor for NC Lathes", Annals of the CIRP, Vol.33, pp.229-232, 1984.
- [2] Giusti, F., Santochi, M., and Tantussi, G., "On-Line Sensing of Flank and Crater Wear of Cutting Tool", Annals of the CIRP, Vol. 36/1, pp.41-44, 1987.
- [3] Jeon, J.U. and Kim, S.W., "Optimal Flank Wear Monitoring of Cutting Tools by Image Processing", Wear, 127, pp.207-217, 1988.
- [4] Heo, K.H., "A Study on Tool Wear Measurement and Tool Failure Detection using Computer Vision", KAIST,1991.
- [5] Kwon, O.D., "Tool Condition Monitoring Technique using Computer Vision and Pattern Recognition", KAIST,1992.
- [6] Yoshihira K., Hwan, C., Itaru, K., Hiroshi, N., Yoshiaki, K., and Yoshhide, T., " Coring on Ceramics by Machining Center", JSPE, 59-10, 1993, pp. 101-106.
- [7] Louis, J. and Galbiati, Jr., "Machine Vision and Digital Image Processing Fundamentals", Prentice-Hall, 1990.
- [8] Jain, A. K., "Fundamentals of Digital Image Processing",Prentices-Hall International,Inc.,1989.
- [9] Schalkoff, R. J., "Digital Image Processing and Computer Vision", John Wiley and Sons, Inc., 1989.
- [10] Gonzalez R. C. and Paul Wintz, " Digital Image Processing", Addison Wesley, 1987.
- [11] Harley, R.M. and Arthur R.W., "Computer Imaging Recipes in C", Prentice-Hall, New Jersey, 1993.
- [12] Joan, S.W., "A Survey of Threshold Selection Techniques", Computer Graphics and Image Processing, 7, pp.259-265,1978.