

고장력 열연강판의 드릴 가공시 공구마멸에 관한 연구

신형곤*, 김성일**, 김태영***

A Study on Tool Wear in Drilling of Hot-rolled High Strength Steel

Hyung-Gon Shin*, Seong-Il Kim**, Tae-Young Kim***

Abstract

Drilling is one of the most important operations performed in the machining industry. And the material of the workpiece has a profound effect on the tool life, the surface finish produced and the overall economy of the process. Hot-rolled high strength steels have been used for automobile structural material, owing to high hardness and machinability of the material. However, in the drilling of hot-rolled high strength steels, the current knowledges of tool wear and machinability are insufficient. Therefore, it is desirable to monitor drill wear status and hole quality changes during the hole drilling process. Accordingly, this paper deals with the cutting characteristics of the hot-rolled high strength steels using common HSS drill. The performance variables include the drilling thrust, torque and drill wear data obtained from drilling experiments conducted on the workpiece. Also drill wear is measured by acoustic emission system and computer vision system.

Key Words : Hot-rolled high strength steel(고장력 열연강판), Drill wear(드릴마멸), Computer vision system(컴퓨터 비전 장치)

1. 서론

드릴작업은 가공산업에서 수행되는 매우 중요한 작업의 하나이다. 자동차 부품에서 항공기 부품에 이르기까지 거의 모든 가공제품은 조립이나 유체의 이동을 위하여 드릴링된 구멍들이 필요하다. Billau와 Heginbotham⁽¹⁾의 연구에 따르면 드릴링, 보링, 태핑과 같은 구멍을 만드는 작업들은 모든 가공작업들의 1/3가량을 차지한다고 하였다.

드릴가공은 제품가공의 마지막 단계에서 주로 하는 가공으로, 드릴의 마멸 및 파손으로 인한 제품손상 및 정지 시간의 증가는 경제적으로 큰 손실을 초래한다. 한편, 절삭공구의 급진적인 마멸과 파손은 고정밀도를 요구하는 가공재료의 표면거칠기를 나쁘게 만들뿐만 아니라 공작기계의 강성에도 나쁜 영향을 주게 된다. 따라서 공구 마멸상태를 관찰하고 신뢰성 있는 시스템의 모니터링 기법으로 마멸 및 파손을 검출하고 제어하는 것이 정밀절삭과

* 전북대학교 정밀기계과 대학원
** 전북대학교 기계산업정보공학부
*** 전북대학교 기계공학부(kimty@moak.chonbuk.ac.kr)

경제적 절삭을 달성할 수 있는 방법이다. 그래서 공구마멸의 정확한 관찰은 가공공정의 무인화, 자동화를 위한 필수적인 기술이며 중요한 인자로서 지금까지 많은 연구⁽²⁻⁵⁾가 수행되어 오고 있다.

Lenz와 Mayer⁽²⁾는 Quartz 배울계를 사용하여 드릴마멸과 반경방향의 힘의 관계를 구하였고, Thangaraj와 Wright⁽³⁾는 드릴파손의 예측을 위해 스티스트의 변화율을 사용하였다. Chandrashekar⁽⁴⁾ 등은 AE 신호의 RMS 값을 사용하여 드릴마멸의 예측을 시도하였으며, Maeda와 Uchida⁽⁵⁾ 등은 공구면에서 얻은 2차원 영상과 공구의 기하학적 해석을 통해 플랭크 마멸을 측정하였다.

그러나 실제 절삭과정은 다양한 절삭기구의 조합으로 이루어지기 때문에 공구의 마멸상태나 공구파손의 감지에는 어려움 점이 있으나 절삭효율의 증대를 위해 공구의 마멸에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 드릴마멸의 특성을 파악하기 위해 AE 신호를 이용하여 절삭조건과 공구마멸에 따른 AE 신호의 특성을 평가하였으며, CCD 카메라를 통해 촬영하여 얻은 플랭크 마멸면적을 공구현미경과 비교함으로써 신뢰성 있는 공구마멸의 감시 방법을 제시하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편 및 사용공구

본 실험에 사용한 실험재료는 인장강도 80kg/mm²급의 고장력 열연강판(A 시험편)과 기존의 자동차 프레임에 사용되고 있는 인장강도 50kg/mm²급의 고장력 열연강판(B 시험편)이며, 그 각각의 화학적 성분 및 기계적인 성질은 Table 1 과 Table 2에 나타내었다. 시험편의 크기는 200×130×7(mm)이며, 실험에 사용한 드릴은 φ6mm와 φ

Table 1 Chemical compositions of workpiece(wt.%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Mo
specimen A	0.10	0.15	2.00	0.02	0.005	○	○	○
specimen B	0.18	0.40	1.60	0.03	0.010	○		

Table 2 Mechanical properties of workpiece

Material	Yield strength (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
specimen A	65	80	14	215
specimen B	37	55	20	171

9mm인 고속도강 드릴이다.

2.2 실험방법

본 실험에 사용한 공작기계는 CNC 밀링머신(HNC-150)이다. 주축에 드릴을 고정시켰으며, 시험편 설치는 테이블에 공구 동력계를 체결하고, 그 위에 시험편을 고정시킨 지그를 부착하여 가공을 하였다. 드릴 가공시 발생하는 절삭저항의 스티스트와 토오크의 측정은 압전형 공구동력계(Kistler, 9271A)를 사용하였으며, 공구 동력계로부터 미소전류를 증폭하기 위하여 charge amplifier(Kistler, 5017A)를 사용하였다. amplifier에서 증폭된 아날로그 신호는 A/D converter를 통해 얻어진 정량화된 데이터의 결과로 변환하여, 컴퓨터에서 분석하였다. Fig. 1에는 CNC 밀링머신과 각 장치의 배치를 나타내었다.

실험은 절삭회전수를 N = 500, 900, 1200, 1600, 2000rpm, 이송량을 f = 0.08, 0.10, 0.15, 0.20mm/rev로 변화하여 가공하였다. 드릴가공은 5회 연속으로 관통가공하였고, 절삭유는 사용하지 않았다. 하나의 시험편에 40개의 구멍을 뚫었으며, 각각의 구멍은 시험편 중심에서 20mm씩 균등 분할하여 그 위치를 정하였다.

드릴 가공시 발생하는 AE 신호를 얻기 위해 AE 시스템을 사용하였고, AE 신호를 증폭기에서 100-300kHz의

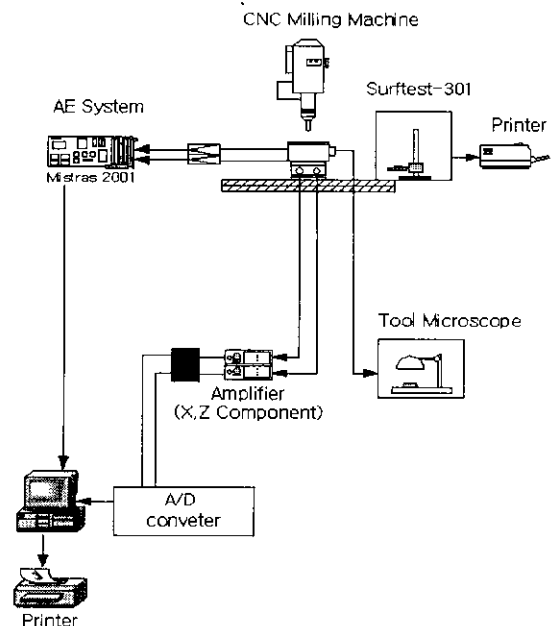


Fig. 1 Block diagram of the data acquisition system

plug-in filter를 사용하여 소음을 제거한 후 40dB로 증폭하여 AE 시스템에서 100-1200kHz의 필터를 통과한 후 시스템의 신호처리를 위해 A/D converter에서 디지털화하여 컴퓨터로 분석하였다. 드릴의 마멸량 측정은 구멍을 5회 가공한 후 드릴작업이 멈추면 공압시스템의 스위치를 작동시켜 실린더에 부착되어 있는 CCD 카메라로 드릴의 플랭크 마멸을 측정하였다. 마멸의 영상은 CCD 카메라를 통해 프레임 그래비(frame grabber)에 의해 256 밝기 등급으로 컴퓨터에 저장되며 이 영상을 컴퓨터에서 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 절삭조건에 따른 절삭저항의 영향

드릴가공에서 절삭력 해석은 절삭조건, 절삭공구의 형상과 재질, 공구의 마멸, 피삭재의 재질과 형태 등이 관계가 되어 복잡하지만 공작기계의 부품, 공구의 마멸 및 파손의 검출을 위해 가장 기본적으로 사용되는 것이 절삭력이다. Fig. 2는 A와 B 시험편을 가공했을 때 발생한 스러스트와 토크 성분을 나타낸 것으로, 직경 $d=9\text{mm}$ 드릴을 사용하여 이송량은 $f=0.12\text{mm/rev}$ 로 고정하고 절삭회전수를 $N=500, 900, 1200, 1500\text{rpm}$ 로 변화시키면서 실험한 결과이다. Fig. 2에서 보듯이 A와 B 시험편은 절삭회전수가 증가함에 따라 스러스트와 토크가 서서히 증가하거나 거의 일정한 양상을 보여준다. 이것은 절삭속도가 증가함에 따라 공구와 공작물 사이의 마찰계수가 감소하므로 이와 같은 결과가 나왔다고 생각한다.

절삭회전수를 $N=500\text{rpm}$ 으로 일정하게 하고 이송량을 $f=0.08, 0.10, 0.15, 0.20\text{mm/rev}$ 로 변화시키면서 실험한 결과는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서는 이송량이

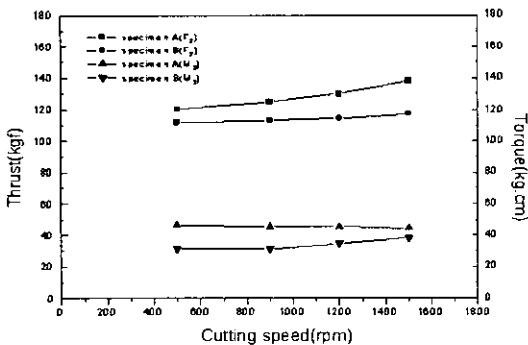


Fig. 2 Relation between cutting speed and cutting resistance ($d=9\text{mm}, f=0.12\text{mm/rev}$)

증가함에 따라 스러스트와 토크 모두 크게 증가하고 있다. Fig. 2와 Fig. 3에서 보듯이 절삭저항은 절삭회전수의 영향보다 이송속도의 영향이 크다는 것을 알 수 있고, 재질에 대해서는 A 시험편의 스러스트와 토크가 B 시험편보다 기계적 성질의 차이에 의해 상대적으로 높다는 것을 알 수 있다.

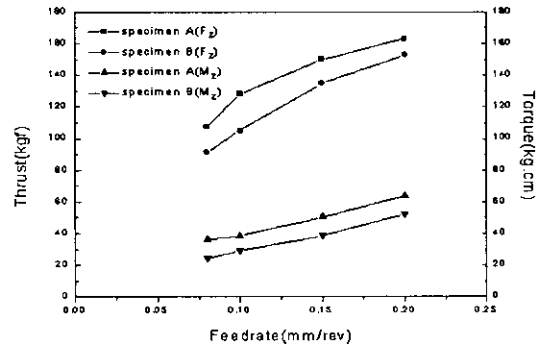


Fig. 3 Relation between feed rate and cutting resistance ($d=9\text{mm}, N=500\text{rpm}$)

3.2 절삭회전수 및 이송량에 따른 AE의 변화

절삭회전수에 따른 절삭저항과 AE 신호의 특성을 비교하기 위해, A와 B 시험편에 대하여 드릴직경 $d=6\text{mm}$ 로 이송량은 $f=0.1\text{mm/rev}$ 로 일정하게 하고 절삭회전수를 $N=900, 1200, 1600, 2000\text{rpm}$ 으로 변화시키면서 실험한 절삭저항과 AE RMS 값을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 절삭저항인 스러스트는 절삭회전수 증가에 따라 A와 B 시험편 모두 서서히 증가하는 것을 알 수 있고, 이는 Fig. 2와 비슷한 경향을 보여준다. AE 신호의 경우는 A와 B 시험편 모두 절삭회전수가 증가함에 따라 AE RMS 값이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 드릴의 절삭회전수가 증가함에 따라 공작물과의 마찰을 일으키는 횟수가 증가하므로 마찰열이 발생하고 마멸이 증가하는데 이것이 AE RMS 값에 큰 영향을 준다고 생각한다. AE 신호도 절삭저항과 같이 A 시험편이 B 시험편 보다 AE RMS 값이 크게 나타난 것으로 보아 재료의 기계적 성질에 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

이송량에 따른 절삭저항과 AE 특성을 비교하기 위해 절삭회전수 $N=1200\text{rpm}$ 으로 일정하게 하고, A와 B 시험편에 대하여 이송량을 $f=0.08, 0.1, 0.12, 0.15\text{mm/rev}$ 로 변화시키면서 실험한 절삭저항과 AE RMS 값의 결과

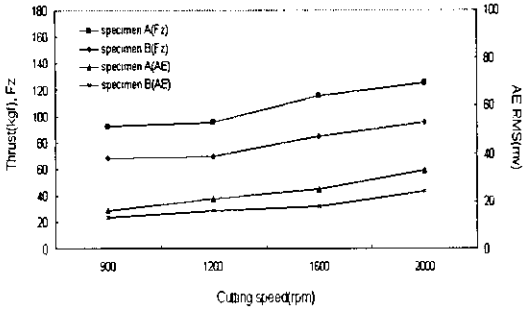


Fig. 4 Relation between cutting speed and cutting resistance (d=6mm, f=0.1mm/rev)

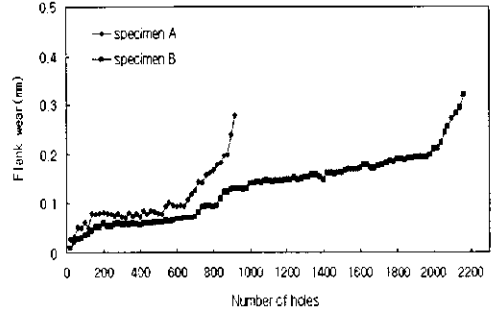


Fig. 6 Variation of flank wear with number of holes on specimen A and B (d=6mm, N=1200rpm, f=0.1mm/rev)

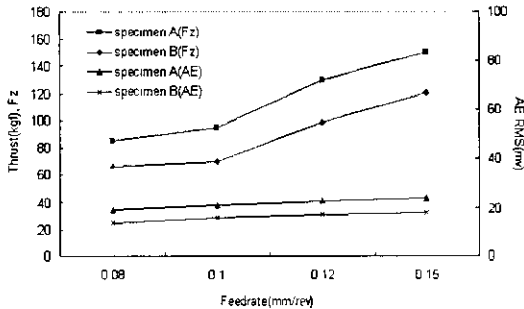


Fig. 5 Relation between feedrate and cutting resistance (d=6mm, N=1200rpm)

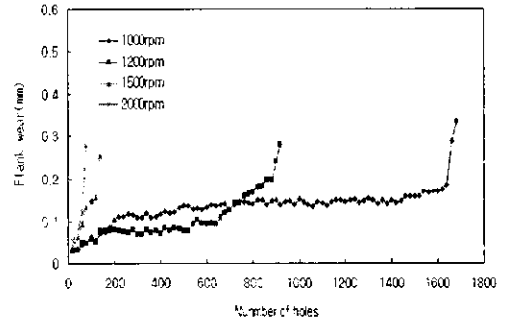


Fig. 7 Variation in flank wear with number of holes on specimen A (d=6mm, f=0.1mm/rev)

를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 경우는 이송량의 증가에 따라 스톱스트가 크게 증가함을 보여준다. 이는 Fig. 3의 경향과 비슷함을 알 수 있다. AE 신호의 경우는 이송량의 증가에 대하여 AE RMS 값이 일정하며, 시험편의 기계적 성질의 차이만을 보여주고 있다. 이와 같은 결과로 보아 AE RMS 값은 이송량의 변화에 미세한 영향을 받고 있음을 알 수가 있다. 이는 앞서 발표된 논문들과 비슷한 결과를 보여준다.^{16,7)}

3.3 구멍 가공수의 증가에 따른 영향

재료의 기계적 성질에 따른 공구 마멸 특성을 조사하기 위하여 A 와 B 시험편을 이용하여 직경 d = 6mm 드릴로 절삭회전수 N = 1200rpm, 이송량 f = 0.1mm/rev의 일정한 절삭조건에서 5회 연속적인 가공에 따른 드릴의 플랭크 마멸량을 측정하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서는 더 이상 가공이 불가능한 상태인 플랭크 마멸 VB = 0.3mm에 도달할 때까지의 구멍가공수가 인장강도 및 경

도가 상대적으로 높은 A 시험편의 경우는 n = 920이고, B 시험편의 경우는 n = 2,160에서 나타남을 알 수 있다. 이와 같이 재료의 기계적 성질이 드릴마멸에 많은 영향을 주는 인자임을 알 수 있다.

이송량에 대한 AE RMS의 변화는 언급한 바와 같이 미세한 영향을 주기 때문에, 절삭회전수의 변화에 따른 플랭크 마멸과 AE RMS 영향을 조사하기 위해 A 시험편을 사용하여 이송량을 f = 0.1mm/rev로 일정하게 하고, 절삭회전수를 N = 1000, 1200, 1500, 2000rpm으로 변화시키면서 가공구멍수의 증가에 대해 실험한 결과를 Fig. 7 와 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7에서는 절삭회전수의 증가에 따라 가공구멍수가 현저히 적어짐을 알 수 있다. 이는 절삭회전수의 증가에 따라 마찰열도 증가하기 때문에 마멸이 빨리 진행되는 것임을 알 수 있다. Fig. 8에서 보듯이 AE RMS 값이 임계지점 이하에서는 상당히 범위가 넓게 분포되어 있어 미소한 마멸을 정확히 검출하는데 어려움이 있으나 전체적으로는 서서히 상승하는 것을 알 수 있

다. 절삭회전수 $N = 1200\text{rpm}$ 의 경우 가공구멍수 $n = 910$ 에서, 절삭회전수 $N = 1000\text{rpm}$ 의 경우는 가공구멍수 $n = 1,670$ 에서부터 AE RMS 값이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 AE RMS 신호는 플랭크 마멸이 일정량 이하인 경우 영향을 크게 받지 않으나, 플랭크 마멸량이 일정 수준 이상이 되면 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서, 이와 같은 AE 신호의 특성에 의해 공구의 마멸 및 파손에 대한 효과적인 관찰이 가능하며, 이를 이용하면 공구의 이상상태를 쉽게 파악하여 공구교환 시기를 적시에 할 수가 있다.

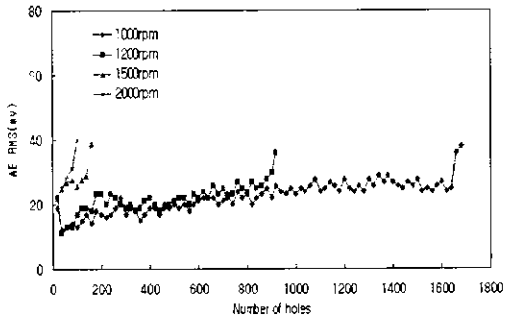


Fig. 8 Relation between AE RMS and number of holes (d=6mm, f=0.1mm/rev)

3.4 컴퓨터 비전을 이용한 공구마멸의 특성파악

CCD 카메라를 사용하여 촬영한 드릴 플랭크 마멸면적은 Fig. 9(a) ~ (d)와 같다. Fig. 9(a)는 구멍가공 10번째 촬영한 것이고, (b)는 500번째이며, (c)는 800번째 (d)는 절삭이 불가능상태인 900번째 가공에서 촬영한 것이다.

Fig. 9의 사진에서 노이즈를 제거하기 위해 먼저 인터레이싱 작업을 하였고, 다음으로 고주파 잡음을 감소시키기 위해 메디안 필터링을 하였다.

이들 과정들을 거친 후 플랭크 마멸의 에지검출을 용이하게 하기 위해서는 이진 영상(binary image)으로 만들어 내는 작업이 절대적으로 필요하다. 이진 영상을 구성하는 데는 쓰레숄딩 값이 필요하게 되는데 각 절삭조건에 따라 가공한 가공 면의 영상에는 각기 다른 정보를 갖고 있으므로 이와 같은 조건에 따른 쓰레숄딩 값 또한 다르게 나타날 것이다. 영상에 적합한 쓰레숄딩 값 180으로 얻은 이진영상을 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 12에서 보듯이, 중간값은 보이지 않고 0(검정)과 1(흰색)으로 완전한 이진 영상을 보여주고 있다.

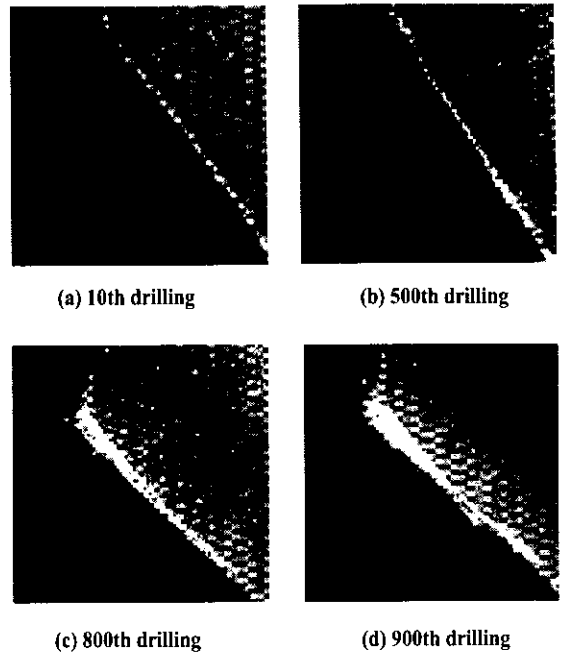
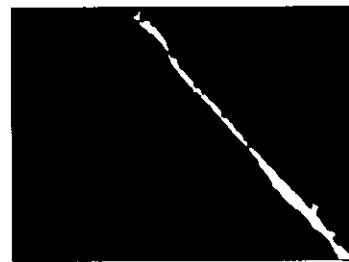
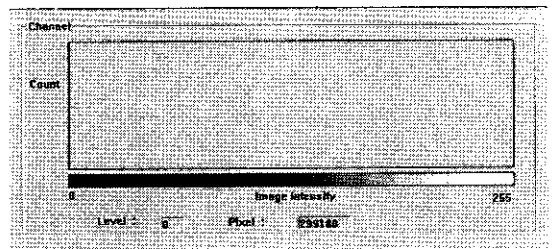


Fig. 9 Original image of drill flank wear



(a) Binary image



(b) Histogram of binary image

Fig. 10 Result image by binary image

여기서 얻은 이진 영상으로부터 마멸의 전체 면적, 전체 면적의 70%를 플랭크 마멸로 규정한 면적과 공구현미경으로 측정된 플랭크 마멸길이를 계산할 수 있도록 하고, 각 절삭조건에 맞도록 알고리즘을 개발하였다. 그 결과창을 Fig. 11에서 보여주고 있다. Fig. 11에서 X와 Y의 값은 영상 크기를 결정하기 위해 수치를 입력해야 하는데 이것은 배율에 따라 초점거리가 틀려지기 때문에 배율에 따른 영상크기를 측정하여 입력해야 한다.

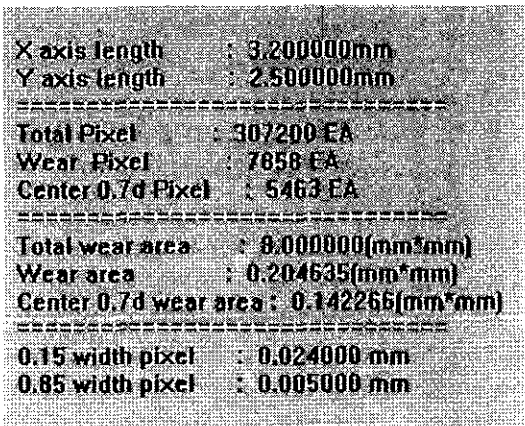


Fig. 11 Windows of calculated binary image

Fig. 12는 절삭회전수 N = 1200rpm, 이송량 f = 0.1mm/rev 가공조건으로 드릴 가공후에 컴퓨터 비전으로 전체 마멸면적과 플랭크 마멸면적(70%) 그리고 플랭크 마멸길이를 비교한 것을 나타내었다. Fig. 12에서는 3가지 모두 가공구멍수의 증가에 따라 비슷하게 증가하는 경향을 보여주고 있다.

Fig 7과 같은 가공조건으로 가공구멍수의 증가에 대해 컴퓨터 비전을 사용하여 촬영한 플랭크 마멸면적과의 결과를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 9와 Fig. 13에서 공구현미경과 컴퓨터 비전으로 측정된 플랭크 마멸과 플랭크 마멸면적(70%)이 가공구멍수의 증가에 대해 각각의 절삭회전수에서 모두 비슷한 경향을 보여주었다. 플랭크 마멸이 서서히 증가하는 곳에서나 급격히 증가하는 곳에서 플랭크 마멸면적 역시 검출이 가능하다는 것을 보여준다. 따라서 컴퓨터 비전을 이용한 마멸면적의 평가가 마멸에 대해 민감한 반응을 보여주므로 공구의 적절한 교환시기를 예측하는데 적합함을 알 수 있었다.

Fig. 9와 Fig. 13에서 가공 구멍수의 증가에 따라 플랭크 마멸과 마멸면적이 증가함을 보여주고 있으며, 이것은 플랭크 마멸과 마멸면적과의 사이에 어떤 상관관계를 가지고 있음을 나타낸다. 이 관계를 알아보기 위하여 Fig. 14에서는 절삭회전수 N = 1000rpm, 이송량 f = 0.1mm/rev 가

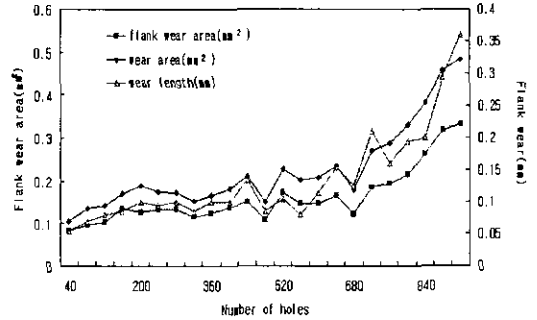


Fig. 12 Comparison of flank wear area, flank wear and wear length on computer vision(d=6mm, N=1200rpm, f=0.1mm/rev)

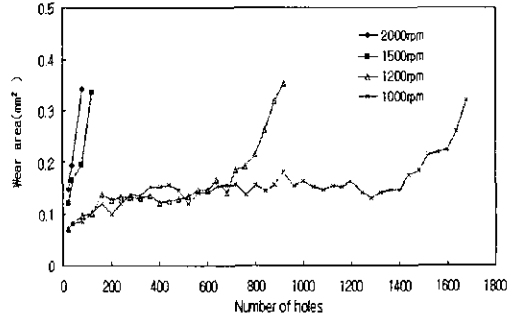


Fig. 13 Variation in flank wear area with number of holes on specimen A(d=6mm, f=0.1mm/rev)

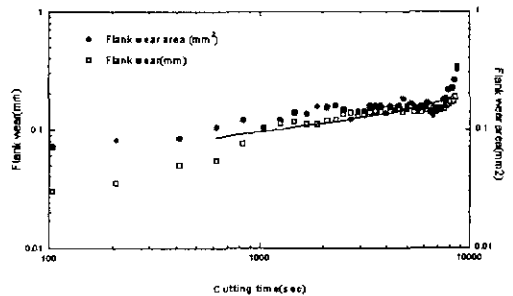


Fig. 14 Comparison of flank wear and flank wear area on the time(N=1000rpm, f=0.1mm/rev)

공조건에서 절삭시간에 대한 플랭크 마멸과 플랭크 마멸 면적과의 관계를 비교하여 보았다. Fig. 14에서 보듯이 절삭시간의 증가에 따라 공구현미경의 플랭크 마멸이나 컴퓨터 비전의 플랭크 마멸면적 모두 증가하는 양상이 거의 같음을 보여주고 있다.

4. 결 론

두 종류의 자동차용 고장력 열연강판 재료를 드릴가공할 때 발생하는 드릴마멸을 관찰하기 위해 절삭저항을 검출하였고, AE 시스템을 이용하여 얻은 AE RMS 값이 드릴마멸에 미치는 영향을 조사하였으며 컴퓨터 비전을 이용하여 얻은 마멸면적이 마멸검출에 적합한 가를 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 절삭저항은 절삭회전수의 영향보다 이송량의 영향을 많이 받으며, AE 신호의 경우는 이송량의 영향보다 절삭회전수의 영향을 많이 받는다. 기계적 성질은 절삭저항, AE RMS 값과 공구마멸에도 많은 영향을 미치는 인자임을 알았다.
- (2) AE 시스템을 통해 얻은 AE RMS 값이 플랭크 마멸의 급격한 증가를 검출함으로써 공구의 마멸과 파손을 검출하는데 적합함을 보였다.
- (3) 본 실험조건에서 절삭시간의 증가에 대한 플랭크 마멸량과 플랭크 마멸면적의 증가 양상이 일정함을 보여주었다.
- (4) 컴퓨터 비전을 통해 촬영한 영상에 인터레이싱을 하고 메디안 필터를 사용한 후 쓰레숄딩을 적용한 영상처리 기법으로 얻은 영상인자가 공구의 이상상태를 파악하는데 신뢰성 있는 방법임을 보여주었다.

후 기

본 연구는 전북대학교자동차신기술연구소 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) D.J. Billau and W. B. Heginbotham, "Some Aspects of Drill Performance and Testing", *Advances in Machine Tool Design and Research*, pp. 1035~1050, 1968.

- (2) Lenz, E. and Mayer, J. E., "Investigation in Drilling", *Annals of the CIRP*, Vol.27, pp 49~53, 1987.
- (3) Thangaraj, A. and Wright, P. K., "Computer-Assisted Prediction of Drill Failure Using In-Process Measurements of Thrust Force", *ASME Journal of Engineering For Industry*, Vol.110, pp. 192~200, 1988.
- (4) Chandrashekhar, S., Osuri, R. H. and Chatterjee, S., "A Preliminary Investigation Into the Prediction of Drill Wear Using Acoustic Emission", In *Fundamental Issues In Machining*, PED Vol.43 ASME. pp. 123~137, 1990.
- (5) Y. Maeda, H. Uchida and A. Yamamoto, "Measurement of the Geometric Features of A Cutting Tool Edge with the A Digital Image Processing Technique," *Precision engineering*, Vol. 11, No. 3, pp. 165~171, 1989.
- (6) 유경근, 전태욱, 박홍식, "ADI재의 드릴가공시 가공조건에 따른 절삭저항 및 AE신호 특성", *한국공작기계학회지*, 제7권, 제6호, pp. 90~96, 1998.
- (7) 원중식, 조종래, 정윤교, "절삭조건과 AE 신호들과의 관계에 관한 실험적 연구", *한국공작기계학회지*, 제7권, 제6호, pp. 64~71, 1998.
- (8) Shaw, M. C. and Oxford, C. J., "On the Drilling of Meter 2 - The Torque & Thrust in Drilling", *Trans, ASME*, pp. 139~148, 1957.
- (9) C. J. Oxford, "On the Drilling of Meter 1 - Basic Mechanics of the Process", *Trans, ASME*, pp. 103~114, 1955.
- (10) 조규재, 전언찬, "ADI재료의 드릴가공시 가공조건에 따른 절삭특성에 관한 연구", *한국정밀 공학회지*, 제13권, 제17호, pp. 36~44, 1996.
- (11) 유경근, 전태욱, 박홍식, "ADI재의 드릴가공시 절삭저항 및 AE신호에 의한 공구마멸상태의 검출", *한국정밀공학회지*, 제15권, 제11호, pp. 32~38, 1998.
- (12) S. Chandrashekhar, R. H. Osuri and S. Chatterjee, "A Preliminary Investigation Into the Prediction of Drill Wear Using Acoustic Emission", In *Fundamental Issues In Machining*, PED Vol. 43 ASME. pp. 123~137, 1990.

- (13) E. Brinksmeier, "Prediction of Tool Fracture in Drilling", *Annals of the CIRP*, Vol. 39, No. 1, pp. 97~100, 1990.
- (14) 김성일, "절삭력 및 Acoustic Emission에 의한 정면 밀링의 공구마모 및 파손 검출에 관한 연구", 전북대학교 정밀기계과 박사학위논문, 1995.
- (15) Jeon, J. U. and Kim, S. W., "Optical Flank Wear Monitoring of Cutting Tools by Image Processing", *Wear*, 127, pp. 207~217, 1988.
- (16) 김성일, "유리섬유 강화 폴리에스터의 드릴가공 특성", *한국공작기계학회지*, 제9권, 제3호, pp. 90~95, 2000.