

STS 304 배관재의 드릴가공시 공구마모에 관한 연구

A Study on Tool Wear in Drilling STS 304 Steel Pipe Material

문 상 돈

S. D. Mun

Key Words : Tool wear(공구마모), Drilling(드릴가공), STS 304 steel pipe(304 스테인리스 파이프), Piping(배관작업)

Abstract : The purpose of this investigation is experimentally to clarify the machinability and tool wear of STS 304 steel pipe material for piping. In order to determine the effects of cutting parameters and tool wear on thrust, torque, AE RMS, drilling is conducted on CNC milling machine. In this experiment, it is measured that thrust, torque, tool wear length, tool wear area and AE RMS during drilling using Hss tool. It has been found that a) During the drilling, the thrust and the torque of the STS 304 pipe are received more the effect of the feed than the spindle speed and the thrust increase with the increase of feed, b) The value of the AE RMS is been larger the effect of the cutting speed than the feed rate, and the value of the AE RMS increase with the increase of spindle speed, c) It has been found that the suitable feed in feed condition of 0.03, 0.05, 0.1, 0.15mm/rev is below 0.05mm/rev, d) The value of the AE RMS was shown a characteristic of the jump value during it was a sudden increase of the tool wear. The increased character of the AE RMS value can be known an effective factor of the tool wear detection, and e) It can be quantitatively evaluated the condition of the tool according to calculate a area of the drill wear image which is obtained by a vision system.

1. 서 론

드릴작업은 각종 설비 및 가공산업에서 수행되는 주요한 작업의 하나이고, 배관설비 시스템에서 항공기 부품에 이르기까지 거의 모든 설비 및 공작물들은 드릴가공된 구멍들이 필요하다. Billau¹⁾의 연구에 의하면 드릴링, 탭핑, 보링 등과 같은 구멍가공 작업들은 가공작업의 25%가 넘는 매우 중요한 부분을 차지한다고 한다. 따라서 현재에도 드릴가공에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. Watson^{2,3)}은 이송, 절삭속도, 여유각 등의 절삭변수가 절삭저항에 미치는 영향을 연구하였고, 전^{4,5)}은 ADI를 중심으로 한 난삭재의 드릴가공성에 대한 광범위한 연구를 수행하였다. Kashimura⁶⁾, Lin⁷⁾은 절삭저항을 이용하여 공구마모와 파손을 검출하였고, 이⁸⁾는 비전시스템에 의하여 공구마모를 직접적으로 검출하였다.

절삭가공 분야에서도 생산성과 정밀도를 향상시

킬 목적으로 시스템의 무인화 자동화를 추진하고 있는 반면 각종 절삭 가공품들은 높은 강도를 유지할 목적으로 난삭재화 되어가고 있다.

STS 304는 여러 종류의 설비, 기계부품, 위생용기 등 다양한 용도로 쓰이고 있고 그 사용량도 점차 증가하는 추세이다. 그러나 가공이 까다로운 난삭재로서 톱니형 칩이 생성되어 절삭력의 변동이 심하고 열전도율이 낮기 때문에 칩보다는 공구쪽으로 열전도가 많아 공구마모와 파손 등으로 인한 공구수명의 단축현상이 쉽게 일어나는 특징을 가지고 있다.⁹⁾ 그러므로 이 재료들이 자동화 생산시스템에서 절삭공정에 이용될 경우 절삭특성의 규명과 공구마모 등의 특성 분석은 매우 중요하다.

한편 각종 배관재들이 산업현장 및 배관설비에서 광범위하게 여러 형태로 가공되고 있는 반면 이들의 기계가공성에 대한 보고는 아직 미진한 편이다. 따라서 본 연구에서는 난삭재의 하나인 배관용 STS 304 파이프의 드릴가공시 발생하는 스톨스트, 토오크, AE 신호 그리고 비전시스템을 이용한 공구

접수일 : 2001년 6월 27일
문상돈 : 전북대학교 공업기술연구소 객원연구원

마모 영상을 이용하여 파이프의 절삭 가공특성을 조사하고 가공특성이 공구마모에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 이론적 배경

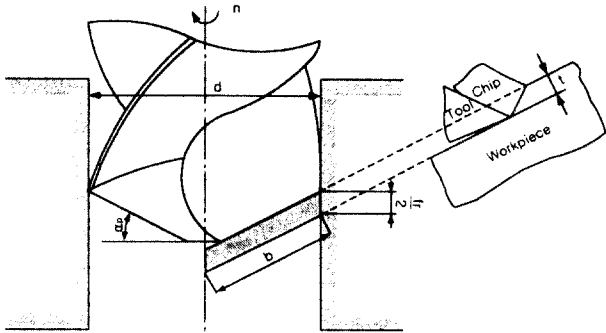


Fig. 1 Metal cutting operation of drill^{10,11)}

Fig. 1 및 Fig. 2 (a)에서 절삭날 중앙에서의 절삭력 $Fp(N)$ 는

$$Fp = ks \cdot b \cdot t = ks \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{fr}{2} \quad (2.1)$$

- ks : 비절삭저항 (N/mm^2),
- b : 절삭폭 (mm), t : 절삭두께 (mm)
- d : 공구지름 (mm), fr : 공구이송 (mm/rev)

토크(torque) $Mz(N-cm)$ 는

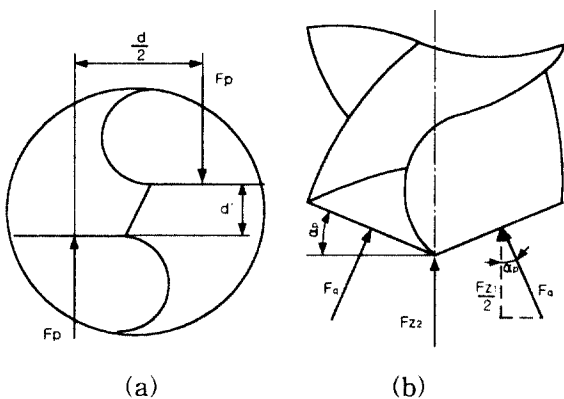


Fig. 2 Calculation of thrust and torque

$$Mz = Fp \cdot \frac{d}{20} = \frac{ks \cdot d^2 \cdot fr}{80} \quad (2.2)$$

Fig. 2 (b)와 같이 스러스트(thrust)의 일부는 절삭력의 분력인 Fq , 다른 일부는 치출포인트(chiesl

point)에 작용하는 스러스트 Fz_2 에 기인한다. 보통 Fq/Fp 는 0.5~1.0 정도 이므로

$$\begin{aligned} \frac{Fz_1}{2} &= Fq \cdot \cos \alpha_p \\ &= (0.5 \sim 1.0) \cdot ks \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{fr}{2} \cdot \cos \alpha_p \\ Fz_1 &= (1.0 \sim 2.0) \cdot ks \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{fr}{2} \cdot \cos \alpha_p \end{aligned} \quad (2.3)$$

Fz_2 는

$$Fz_2 = (0.1 \sim 0.2) \cdot \frac{\pi(d')^2}{4} \cdot H_B \quad (2.4)$$

d' : 웨브(web) 두께, H_B : 재료의 경도

평균 스러스트 Fz_{av} (N)는

$$\therefore Fz_{av} = Fz_1 + Fz_2 \quad (2.5)$$

이다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

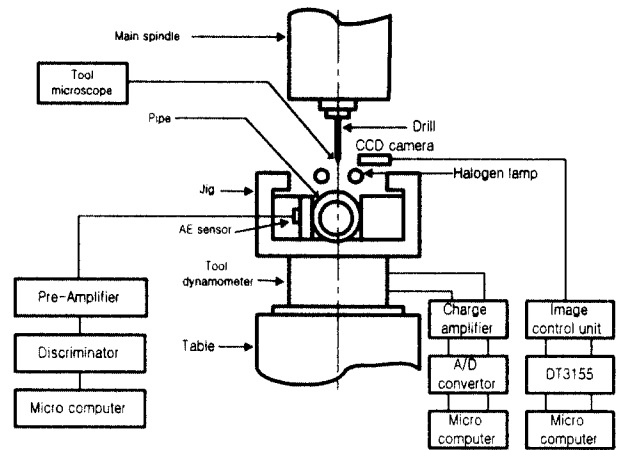


Fig. 3 Experimental apparatus

본 실험은 수직형 CNC 밀링머시인(milling machine)에서 구멍가공을 수행하였으며 공구마모 및 파손을 감지하기 위하여 전 가공동안 신호가 모니터 되었다. Fig. 3은 스테인리스 파이프의 절삭가공 동안 발생하는 절삭력과 AE 신호 그리고 CCD

카메라를 이용한 마모영상을 검출하기 위한 실험장치의 개략도이다.

3.1.1 피삭재 및 공구

Table 1 Chemical compositions of STS 304 pipe

| Chemical compositions(wt.%) | | | | | | |
|-----------------------------|------|------|-------|-------|------|------|
| C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni |
| 0.051 | 0.45 | 1.00 | 0.030 | 0.003 | 18.3 | 8.29 |

Table 2 Mechanical properties of STS 304 pipe

| Mechanical properties | | |
|-----------------------|------------------------|---------------|
| Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation(%) |
| 339.4 | 759.9 | 61.9 |

피삭재는 직경이 32A, 두께 3mm, 길이 6,000mm 인 배관용 STS 304 파이프를 길이 150mm씩 잘라 사용하였으며, 파이프의 화학적 성분은 Table 1에, 기계적 성질은 Table 2에 나타낸 바와 같다.

Table 3 Cutting conditions

| Machine | CNC milling machine (Hha cheon, HiSUPER-4) |
|-------------------|---|
| Tool | Twist drill : Hss Diameter : 10mm Overall length : 130mm Flute length : 95mm Point angle : 118° Helix angle : 30° |
| Cutting Condition | Spindle speed : 400, 500, 800, 1000, 1200 rpm Feed rate : 0.03, 0.05, 0.1, 0.12, 0.15 mm/rev Workpiece : STS 304 steel pipe (32A × Sch20s × 150mm) Dry cutting |

절삭력 및 AE 신호를 분석하기 위하여 사용한 드릴은 지름이 10mm이고 선단각(point angle)이 118° 인 고속도강 트위스트 드릴로서 Table 3은 드릴의 사양과 절삭가공 조건을 나타내고 있다.

3.2 실험방법

본 실험에서는 구멍가공을 수행하기 위하여 CNC

밀링머시인에 콜릿(collet)을 사용하여 드릴을 주축에 고정시켰다. 피삭재는 CNC 밀링머시인의 테이블에 공구동력계를 체결하고 그 위에 지그를 사용하여 고정하였다. 드릴가공중에 발생하는 스러스트와 토오크는 압전형 드릴 전용 공구동력계(KIAG, 9271A)를 사용하여 측정하였다. 공구동력계로부터 얻어진 미세 신호는 Charge amplifier(Kistler, 5017A)를 사용하여 안정적으로 증폭하고 A/D Converter를 거쳐 PC에 저장하였다.

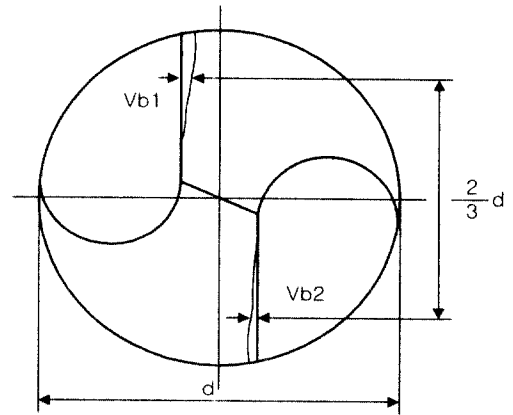


Fig. 4 Drill wear measuring definition

공구마모는 공구현미경(Mitutoyo, TM101)과 비전시스템을 사용하여 가공 3회마다 마모길이 및 마모면적을 측정하였다. 마모길이는 Fig. 4의 드릴 직경 d의 2/3 즉 2d/3 위치에서 측정한 플랭크마모 크기의 평균값인 (Vb1+Vb2)/2를 마모 크기로 하였다. 본 실험에서는 이 평균 플랭크 마모가 0.3mm에 달할 때나 절삭도중 공구파손 등으로 인하여 절삭 날이 더 이상 기능을 제대로 수행하지 못할 때 공구수명을 다한 것으로 판정하였다.

비전시스템을 이용한 공구의 평균 플랭크 마모 면적은 2d/3 이내의 면적을 기준으로 산출하였다. 이 평균 플랭크 마모 면적은 프로그래밍으로 자동적으로 산출되도록 하였다.

가공 과정에서 발생하는 AE 신호는 Pre-amplifier에서 40dB로 증폭 후 20dB을 Discriminator에서 증폭하였다. 이 신호는 컴퓨터에 저장되어 AE RMS(root mean square) 값과 다른 파라미터들의 특징을 분석하는 데이터로 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 이송과 가공속도에 따른 영향

스러스트와 토오크는 드릴가공의 능력 평가 및 공구의 마모와 파손 즉 공구손상의 척도로서 중요

하다.

Fig. 5와 Fig. 6은 이송과 주축의 회전속도 변화에 따른 스러스트와 토크의 변화를 나타낸 것이다.

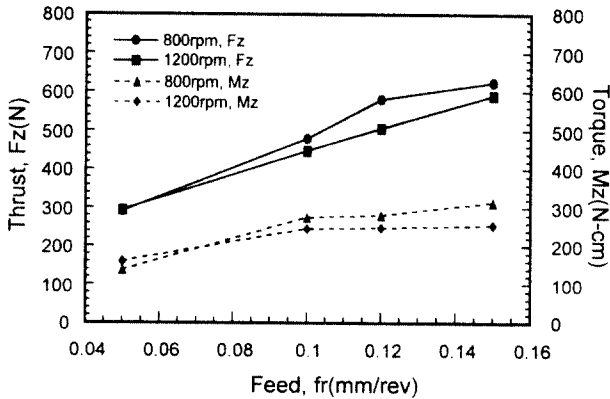


Fig. 5 Thrust and torque vs. feed

Fig. 5는 두께가 3mm인 배관용 STS 304 파이프를 직경이 10mm인 고속도강 트위스트 드릴로 가공하였을 때 이송의 변화에 따른 스러스트와 토크와의 관계를 나타낸 그래프로 이송이 증가할수록 스러스트와 토크의 성분이 거의 직선적으로 증가함을 알 수 있다.

한편 스러스트는 식(2.3)과 식(2.4)와 같이 절삭력의 분력에 기인하는 스러스트와 치즐포인트에 작용하는 스러스트의 합으로 구성되어 있다. 그런데 본 실험조건에서 공구의 지름, 수평면과 공구의 날이 이루는 각, 웨브의 두께, STS 304 파이프의 경도가 일정하므로 스러스트는 이송의 함수임을 알 수가 있다. 그러므로 본 그래프에서 이송의 증가에 따른 스러스트의 증가는 이송 증가에 따른 단면적의 증가가 주 원인인 것으로 판단된다.

Fig. 6은 주축의 속도변화에 따른 스러스트와 토크와의 관계이다.

주축의 회전속도를 500, 800, 1000, 1200rpm으로 변화를 주었을 때 회전속도가 증가함에 따라 스러스트와 토크가 다소 증감하는 경향이 있다. 그러나 전체적으로 볼 때 주축의 회전속도가 스러스트 및 토크 성분에 큰 영향을 미치고 있지 않음을 알 수가 있다. 이와 같은 경향은 식(2.3)에서와 같이 스러스트는 본 실험에서 이송의 함수이므로 주축의 회전수와는 무관하다고 생각된다. 그리고 절삭속도가 증가하면 드릴의 인선이 가공물과 마찰을 일으키는 횡수도 증가하여 인선부의 마찰열이 많이 발생하지만 공구의 마찰계수를 감소시키고 진동도 감소시키므로 이들의 요소들이 서로 작용하여 본 실험과 같은 결과가 나왔다고 사려된다.

Fig. 5와 Fig. 6을 비교하여 볼 때 스러스트는 주축의 회전속도 변화의 영향보다 이송의 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 주축의 회전속도 변화와 이송에 따른 AE RMS와 스러스트와의 관계를 나타낸 그래프이다.

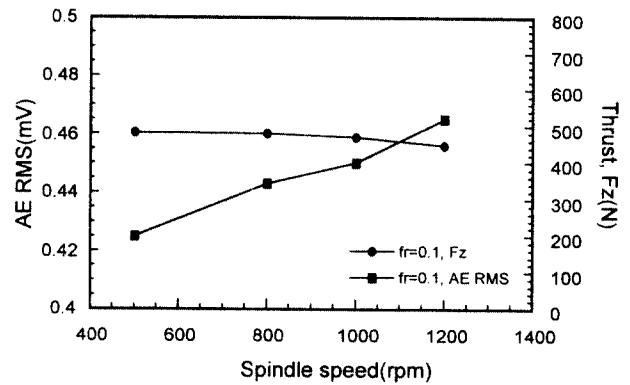


Fig. 7 AE RMS and thrust vs. spindle speed

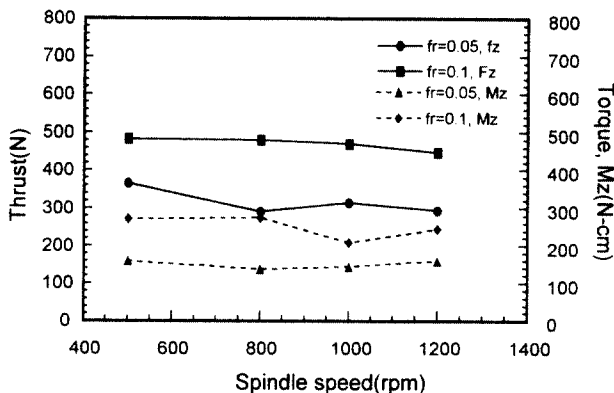


Fig. 6 Thrust and torque vs. spindle speed

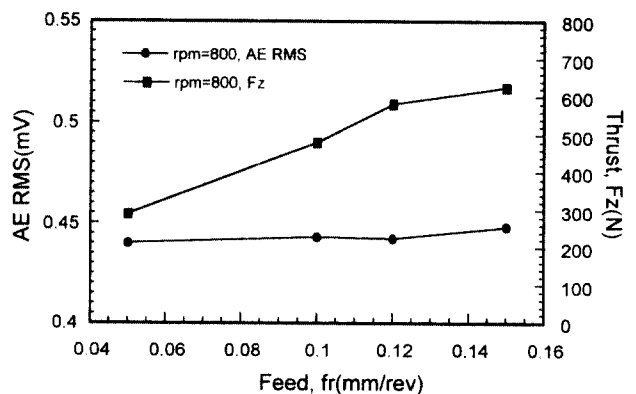


Fig. 8 AE RMS and thrust vs. feed

Fig. 7은 주축의 회전속도 변화에 따른 AE RMS와 스러스트와의 관계를 나타낸 그래프로 주축의 회전속도가 증가함에 따라 AE RMS 값이 증가함을 알 수 있다. 이와 같이 회전속도가 AE RMS 값에 큰 영향을 미치는 원인은 주축의 회전속도에 비례한 공구의 마찰열 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8은 STS 304 파이프에서 이송의 변화에 따른 AE RMS와 스러스트와의 관계를 나타낸 것이다.

AE RMS 값은 이송의 증가에 따라 미소하게 증가하고 있으나 그 값의 변화가 매우 작으므로 이송이 AE RMS 값의 변화에 미치는 영향은 미미한 것으로 생각된다. 그러나 스러스트는 이송이 증가함에 따라 뚜렷한 증가를 보이는 것을 알 수 있다.

4.2 드릴의 마모 특성

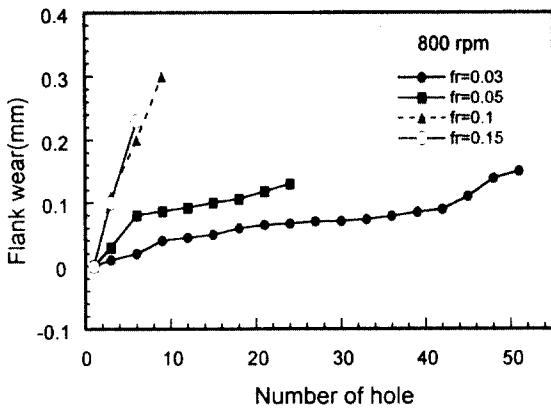


Fig. 9 Flank wear vs. number of hole

Fig. 9는 주축의 회전속도가 800rpm이고 이송이 0.03, 0.05, 0.1, 0.15mm/rev일때 이송의 변화에 따른 공구마모와 가공 구멍수와의 관계이다.

이송이 0.03, 0.05mm/rev인 공구는 마모의 기울기가 완만하지만 이송이 0.1, 0.15mm/rev인 공구의 마모율은 0.03, 0.05mm/rev인 공구보다 상대적으로 매우 빠름을 확인할 수 있으므로 본 조건에서 안정적인 드릴 가공을 위해서는 0.05mm/rev 이하로 이송을 선정하는 것이 유리하다고 생각된다.

공구수명 역시 이송이 0.03mm/rev인 공구의 마모율이 가장 작아 가장 길었다. 그리고 마모율이 가장 큰 0.15mm/rev인 공구는 난삭재를 가공하는 관계로 공구의 온도가 상승하면서 매우 짧은 수명을 보였다.

Fig. 10, Fig. 11은 Fig. 9와 같은 조건에서 스러스트, 토크와 가공 구멍수와의 관계이다.

Fig. 10과 Fig. 11에서 스러스트와 토크는 가공

구멍수의 증가에 따라 매우 민감하게 증가함을 알 수 있다. 그래프에서 이송이 0.03mm/rev 조건의 스러스트 및 토크의 증가율은 가장 작고 안정적으로 변화함을 알 수 있다.

Fig. 12는 주축의 회전속도가 800 rpm이고 이송이 각각 0.03, 0.05mm/rev일 때 가공 구멍수에 따른

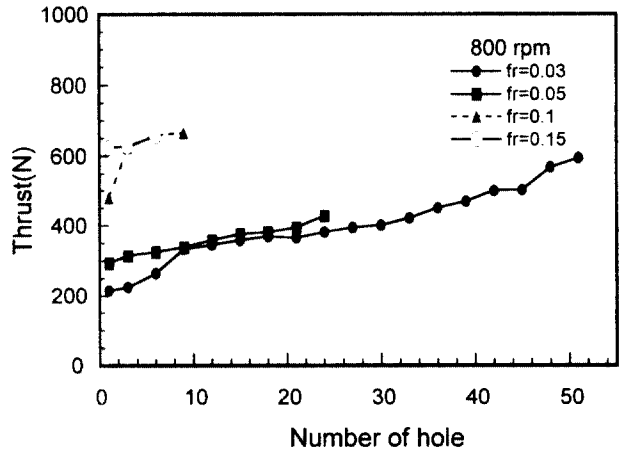


Fig. 10 Thrust vs. number of hole

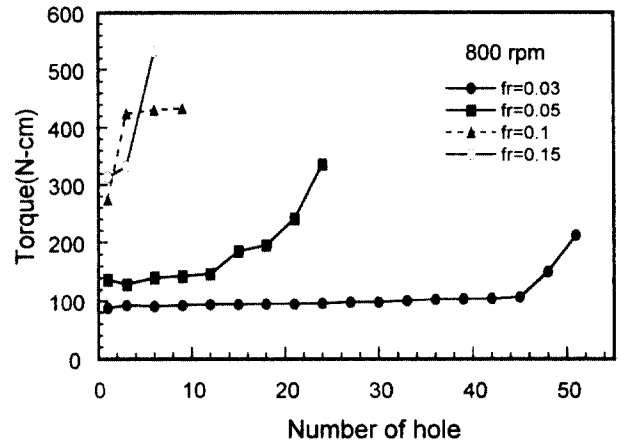


Fig. 11 Torque vs. number of hole

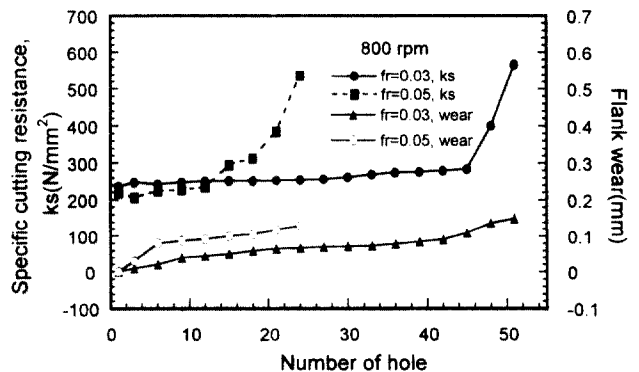


Fig. 12 Specific cutting resistance and flank wear vs. number of hole

공구마모와 비절삭저항과의 관계를 나타낸 그래프이다.

각각의 이송조건에서 공구마모가 진행됨에 따라 비절삭저항이 점차 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 이는 식(2.2)에서와 같이 토크는 드릴의 직경과 이송, 그리고 비절삭저항의 함수이지만 공구의 지름 및 이송이 일정하므로 공구마모가 진행됨에 따라 결국 비절삭저항이 증가하므로 증가한다고 판단된다.

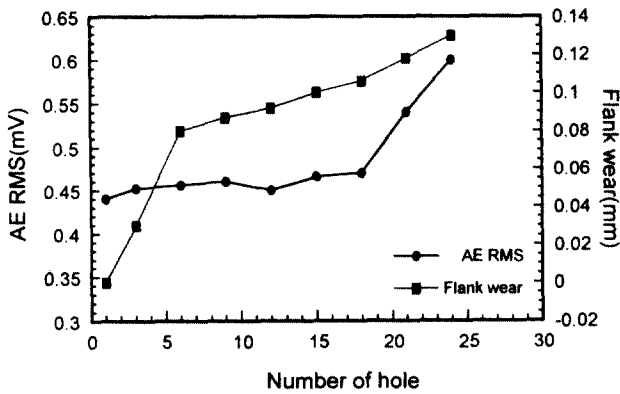
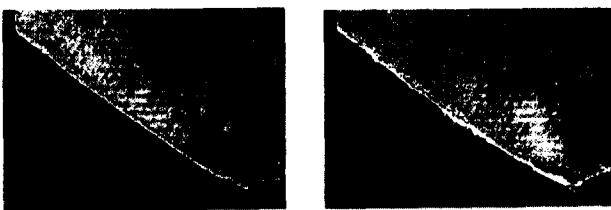


Fig. 13 AE RMS and flank wear vs. number of hole

Fig. 13은 주축의 회전수 800 rpm, 이송 0.05mm/rev의 조건으로 배관용 스테인리스 파이프를 절삭했을 때 가공 구멍수에 따른 AE RMS 값의 특성과 플랭크 마모 거동과의 관계를 나타낸 그래프이다.

공구마모는 초기 마모가 급속히 진행된 것을 알 수가 있다. 그리고 AE 신호는 절삭 초기부터 매우 느린 기울기로 증가하지만 그 값은 미미함을 알 수가 있다. 그러나 플랭크 마모량이 일정 수준 이상이 되면 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 AE RMS값의 특성을 이용하여 공구이상 상태를 간접적으로 쉽게 검출해 낼 수 있었으며 절삭력 센서와 AE 센서를 이용하면 보다 정확히 공구 상태를 검출해 낼 수 있음을 알 수 있다.

4.3 비전시스템에 의한 공구마모의 면적 측정



(a) After 3th drilling (b) After 84th drilling
Fig. 14 Original image of flank wear

Fig. 14는 절삭가공중 발생하는 드릴 공구의 마모양상을 비전시스템을 이용하여 촬영한 원영상이다.

Fig 14(a), (b)는 주축의 회전수 400rpm, 이송 0.05mm/rev의 조건에서 구멍가공 3번째(a)와 84번째(b) 가공 후의 원영상이고 Fig. 15는 Fig. 14(a)의 원영상을 처리하여 이진화된 영상을 얻기까지의 과정을 나타낸 것이다.

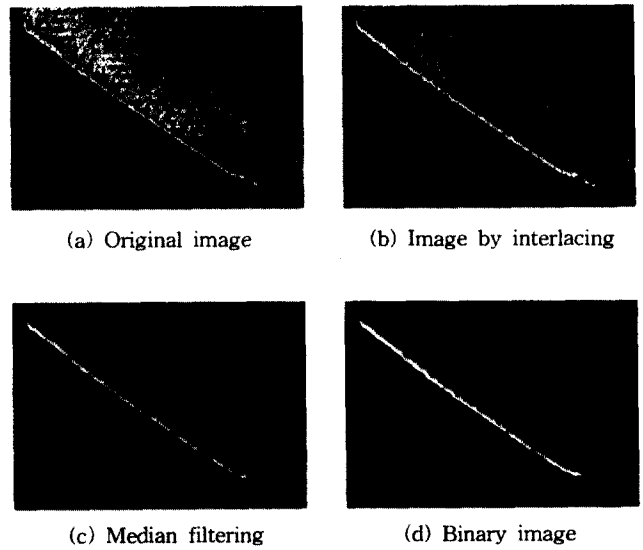


Fig. 15 Processing of original image

Fig. 15(a)의 원영상을 바탕으로 (b)는 원영상의 노이즈를 제거하기 위해 인터레이싱을 한 영상이다. 이 영상은 (c)의 미디안 필터링을 거친 후 (d)와 같이 이진화되었다. 이진화 영상을 바탕으로 마모의 전체 면적과 전체 마모면적의 70%를 플랭크 마모면적으로 규정한 면적을 프로그램에 의하여 자동으로 산출하였다.

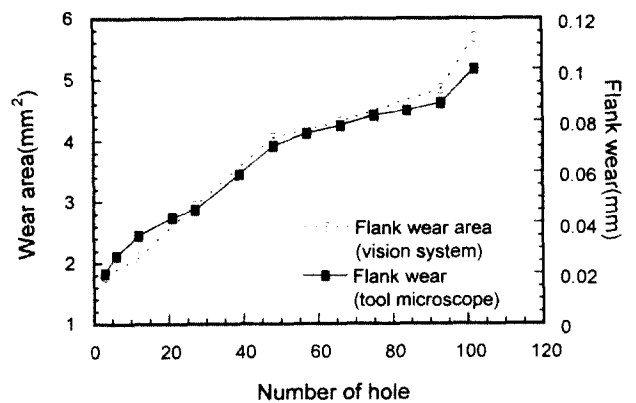


Fig. 16 Wear area and flank wear vs. number of hole

Fig. 16은 주축의 회전속도 400rpm, 이송 0.05mm/rev인 조건에서 구멍가공을 102회 실시했을 때 비전시스템으로 측정된 플랭크 마모면적(70%)의 증가 경향과 공구현미경으로 측정된 플랭크마모 증가 경향을 나타낸 그래프이다.

드릴가공 횟수가 27회 이하인 구역에서는 비전시스템으로 측정된 공구마모 면적의 증가 경향보다 공구현미경으로 측정된 공구마모의 증가 경향이 약간 큼을 알 수 있다. 그리고 97회 이후의 구역에서는 비전시스템으로 측정된 공구마모 면적의 증가 경향이 큼을 알 수 있다. 그러나 전체적으로 볼 때 두 증가곡선의 경향은 비슷한 양상을 보여줌을 알 수 있다. 따라서 비전시스템을 이용한 마모면적의 평가가 마모에 민감한 양상을 보여주므로 비전에 의한 플랭크 마모면적의 산출로도 공구마모 상태를 신뢰성 있게 검출할 수 있다고 판단된다.

5. 결 론

난삭재에 속하는 STS 304 배관재의 드릴가공시 가공변수의 변화에 따른 드릴의 마모특성을 다음과 같이 평가할 수 있었다.

- (1) 난삭재에 속하는 STS 304 배관재의 드릴가공시 스러스트와 토오크는 주축의 회전수보다 이송의 영향을 많이 받았으며 스러스트는 이송이 증가함에 따라 증가하였다. 그리고 AE RMS 값은 이송보다 주축 회전수의 영향이 컸으며 주축 회전수가 증가함에 따라 증가하였다.
- (2) 공구의 이송이 각각 0.03, 0.05, 0.1, 0.15 mm/rev인 조건에서 0.03, 0.05mm/rev인 공구가 상대적으로 작은 스러스트의 증가 및 공구마모율을 가지므로, 안정적인 드릴가공의 측면에서 이송은 0.05mm/rev 이하의 조건이 유리하였다.
- (3) AE RMS 값은 공구마모의 급격한 증가시 급증하는 값의 특징을 보였으며, 이와 같은 AE RMS 값의 증가 특성은 공구마모의 검출에 효과적인 인자임을 알 수 있었다.
- (4) 비전시스템에 의하여 얻은 드릴마모 영상의 면적을 계산함으로써 공구의 상태를 정량적으로 평가할 수 있었다.

참고문헌

1. D. J. Billau, W. B. Heginbotham, "Some Aspects of Drill Performance and Testing", *Advances in Machine Tool Design and Research*, Vol. 74, pp. 1035~1050, 1968

2. A. R. Watson, "Drilling Model for Cutting Lip and Chisel Edge and Comparison of Experimental and Predicted Results I - initial cutting lip model", *International Journal of Machine Tools Design and Research*, Vol. 25, No. 4, pp. 347~365, 1985
3. A. R. Watson, "Drilling Model for Cutting Lip and Chisel Edge and Comparison of Experimental and Predicted Results IV - drilling tests to determine chisel edge contribution to torque and thrust", *International Journal of Machine Tools Design and Research*, Vol. 25, No. 4, pp. 377~392, 1985
4. 전언찬, "드릴가공에 있어서 절삭저항과 그 동적성분에 관한 연구", *충남대학교 대학원*, pp. 1~114, 1987
5. 조규재, 전언찬, "ADI재료의 드릴가공시 가공조건에 따른 절삭특성에 관한 연구", *한국정밀공학회지*, Vol. 13, No. 7, pp. 36~44, 1996
6. Y. Kashimura, "Study on Dection of Drill Wear and Breakage", *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 50, No. 6, pp. 25~29, 1984
7. S. C. Lin, C. J. Ting, "Tool Wear Monitoring in Drilling using Force Signals", *Wear*, Vol. 180, No. 1, pp. 53~60, 1995
8. 이상조, 조창연, 이종항, "화상의 블록처리방법을 이용한 공구마멸 측정기술", *한국정밀공학회지*, Vol. 10, No. 3, pp. 81~86, 1993
9. 狩野勝吉, "난삭재의 절삭가공 기술", *기술정보*, pp. 156~169, 1992
10. 서남섭, "공작기계", *동명사*, pp. 288~291, 1994
11. 서남섭, "금속절삭이론", *동명사*, pp. 344~351, 1997