

## 드릴 공정시 절삭 토크 제어

### 제 2 편 : 주축 모터 전류를 이용한 드릴링 토크의 제어와 드릴 플랭크 마모에 대한 영향

오영탁\*, 김기대\*\*, 주종남\*\*\*

## Cutting Torque Control in Drilling

### Part 2 : Drilling Torque Control Using Spindle Motor Current and Its Effect on Drill Flank Wear

Young Tak Oh\*, Gi Dae Kim\*\* and Chong Nam Chu\*\*\*

#### ABSTRACT

Drilling torque was measured indirectly using the spindle motor current and controlled in real time through feedrate manipulation in a machining center. The PID controller designed in the previous paper was applied to drilling torque control. A series of cutting experiments were performed for various cutting conditions. Experimental results showed that the drilling torque was well regulated at a given reference level by feedrate manipulation in all cutting conditions. The increase in the cutting torque and temperature according to the increase in machining depth was suppressed and the risk of the drill failure and the drill flank wear were reduced remarkably through cutting torque control. Moreover, the suggested cutting torque control system doesn't disturb the cutting process and is practical for industrial environment. Therefore, the proposed cutting torque control system will contribute to productivity improvement in drilling process.

**Key Words** : Drill flank wear (드릴 플랭크 마모), Drilling torque (드릴 절삭 토크), Feedrate manipulation (이송 속도 조절), Spindle motor current (주축 모터 전류)

#### 1. 서론

표준 트위스트 고속도강 드릴은 깊이가 직경의 5 배 이하인 구멍 가공 공정에 적합한 것으로 알려져 있다<sup>(1)</sup>. 또한 구멍 가공 깊이가 직경의 3 배 이상인 경우 칩 배출을 원활히 하고 공구를 냉각시키기 위하여 펍 드릴링(peck drilling)을 실시하도록 권장되고 있다<sup>(2)</sup>. 그러나 펍 드릴링을 수행하

더라도 가공 깊이 증가에 따른 절삭 토크의 상승을 효과적으로 억제할 수 없으며 과도한 절삭 토크 및 높은 절삭 온도로 인하여 공구 마모가 촉진되고 공구 파손의 위험이 상존한다. 따라서 드릴 가공 중 이송 속도의 조절을 통해 가공 깊이 증가에 따른 절삭 토크와 가공 온도의 상승을 억제할 수 있다면 공구 마모와 드릴 파손의 위험을 줄일 수 있으며 생산성의 향상을 기대할 수 있다. 드릴

2001 년 3 월 8 일 접수

\* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소

\*\* 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부

\*\*\* 서울대학교 기계항공공학부

공정 시 공구 마모 및 공구 파손의 감소를 위한 기존의 연구 결과들은 다음과 같다.

Fujishima 등<sup>(3)</sup>은 드릴 마모의 검출, 절삭 추력의 제어, 그리고 폐깅 시점의 결정 기능을 가진 지능화 된 공작 기계의 개발을 시도하였다. 그러나 구멍 가공 도중 절삭 추력의 상승을 실시간으로 검출하고 억제하는 방법을 제시하지는 못하였다. Ke 등<sup>(4)</sup>은 주축 유도 모터 전류와 엔코더 신호를 측정하고 퍼지 논리(fuzzy logic)에 기초한 관측기(observer)를 이용하여 드릴링 토크를 측정하고 제어하고자 하였다. 그러나 실제 절삭 토크의 제어에는 이르지 못하였다. Furness 등<sup>(5)</sup>은 형상 드릴링(form tool drilling) 공정에서 주축 모터 동력과 주축 회전 속도를 측정하여 절삭 토크를 추정하고 비례-적분 제어 및 극배치 기법을 적용하여 절삭 토크를 제어하였다. 그러나 제어되는 절삭 토크는 기준 절삭 토크와 큰 편차를 보였다. Lin 등<sup>(6)</sup>은 Klim 등<sup>(7)</sup>의 연구 결과를 드릴 공정에 적용하여 드릴링 중 이송 속도를 정현파의 형태로 변화시킴으로써 출구 버(exit burr)와 드릴 마모를 개선하는 연구를 수행하였다. 그러나 가공 깊이가 깊어질 경우에는 적용하기 곤란한 단점이 있으며 이송 속도의 변화 형태를 정현파로 설정한 근거를 제시하지 않았다.

공작 기계의 주축 모터 전류는 신뢰성과 실용성, 그리고 경제성의 측면에서 절삭 공정의 상태 감시에 매우 유용한 인자이다<sup>(8)</sup>. 본 연구에서는 드릴 직경, 절삭유의 공급 여부, 공작물의 종류 등과 같은 다양한 절삭 조건에 대하여 주축 모터 전류를 이용하여 절삭 토크를 간접 측정하고 본 논문의 제 1 편에서 설계된 PID 제어기를 이용하여 이송 속도의 조절을 통해 절삭 토크를 실시간으로 제어하였다. 제시된 절삭 토크 제어 방법으로 깊이가 드릴 직경의 5 배 이상인 구멍을 가공할 경우 기존의 폐깅 공정에 비하여 공구 파손의 위험을 줄이고 드릴 플랭크 마모를 획기적으로 감소시킬 수 있음을 보임으로써 본 연구에서 제시한 절삭 토크 제어 시스템이 드릴 공정의 생산성 향상에 기여할 수 있음을 제시하였다.

## 2. 실험 장치 및 실험 조건

실험에 사용된 공작 기계는 FANUC 3 상 교류 유도 모터를 주축 모터로 채택한 수평형 머시닝센

터(대우중공업 ACE-H40)이다. 주축 모터의 U 상 및 V 상 전류의 측정을 위해 공작기계 제어판의 주축 모터 전원 공급선에 홀센서(hall sensor)를 장착하였다. 측정된 주축 전류 신호의 잡음을 제거하기 위하여 300 Hz 의 차단 주파수를 가진 아날로그 필터를 사용하였다. 절삭 토크의 제어 여부를 확인하기 위해 회전 공구 동력계(Kistler 9123B type)를 사용하여 절삭 토크를 측정하였으며 다채널 신호 조정기(multi-channel signal conditioner, Kistler 5223A type)를 사용하여 절삭 토크에 의한 전기적 신호를 조정하였다. 측정된 신호들은 A/D 보드를 거쳐 실험용 컴퓨터에 전달된다. 이송 속도의 조절을 위한 제어기의 출력은 A/D 보드의 DIO 포트와 인터페이스 보드를 거쳐 공작 기계로 전달된다. 공작 기계가 외부 이송 속도 오버라이드(override) 신호를 받아들일 수 있도록 공작 기계의 PMC 프로그램을 변경하였다. 실험에 사용된 공작 기계의 이송 속도 오버라이드 비트(bit)는 4 비트이나 서보 파라미터의 변경을 통해 8 비트로 확장함으로써 NC 코드에 입력된 이송 속도의 0%에서 255%까지 조절이 가능하였다. 실험 장치의 개략도를 Fig. 1 에 나타내었다.

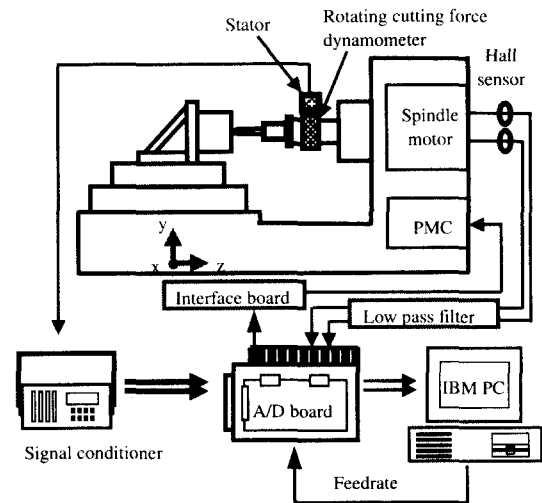


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set up

다양한 절삭 조건에 대한 절삭 토크 제어 실험을 수행하였다. 자세한 실험 조건을 table 1 에 나타내었다.

Table 1 Experimental condition

Drill dia. [mm]	Work-piece	Spindle speed [rpm]	Feedrate [mm/min]	Hole Depth [mm]	Coolant
6	SCM4	1300	130	42	No
8	KP4M	600	54	48	No
10	SM45C	900	150	80	Yes

### 3. 주축 모터 전류의 특성

민감도(sensitivity)란 입력량의 변화에 대한 출력량 변화의 비로 정의되며 입력에 대한 출력의 동적 응답 특성을 나타낸다<sup>9)</sup>. 드릴 공정은 연속 절삭 공정으로서 주 절삭날이 공작물에 완전히 진입한 이후 절삭 토크는 칩의 영향으로 인해 미소한 요동을 보이지만 그 평균값은 일정한 레벨을 유지한다. 본 연구의 목적은 드릴 1 회전당 평균 절삭 토크를 일정하게 제어하는 것이므로 평균 절삭 토크가 주축 모터 전류에 반영되는 척도인 정적 민감도\*가 중요하다. 드릴의 직경이나 공작물의 종류에 따라 절삭 시 권장되는 주축 회전수가 달라진다. 따라서 주축 회전수에 따른 주축 전류의 절삭 토크에 대한 정적 민감도는 주축 전류의 신뢰성을 결정하는 중요한 요소이다. 절삭 토크에 대한 주축 전류의 정적 민감도는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$Static\ sensitivity = \frac{1}{rev} \sum_{i=1}^{rev} \frac{I_{avg}(i)}{T_{avg}(i)} \quad (1)$$

주축 전류의 정적 민감도 파악을 위해 주축 회전수를 300 rpm 에서 1800 rpm 까지 300 rpm 단위로 변화시키며 직경 10 mm 드릴로써 SM45C 를 절삭하였다. 회전 당 이송은 0.167 mm/rev 으로 일정하게 하였으며 주 절삭날이 공작물에 완전히 진입한 이후의 절삭 토크와 주축 전류를 측정하여 드릴 1 회전 당 평균 절삭 토크와 주축 전류를 알아내었다. 주축 회전수 변화에 따른 주축 전류의 민감도 파악 실험 결과를 Fig. 2 에 나타내었다. 주축 모터 전류의 정적 민감도는 주축 회전수가 600 rpm 일때 가장 높았으며 이후 주축 회전 속도가 증가할수록 저하되어 1800 rpm 에서는 300 rpm 을

기준으로 약 1.5 dB 정도의 민감도 저하를 보였다. 간접 측정 시스템에서 허용하는 민감도 저하는 3 dB 이내이므로<sup>9)</sup> 주축 모터 전류는 높은 주축 회전수에서도 평균 절삭 토크를 잘 반영할 수 있다.

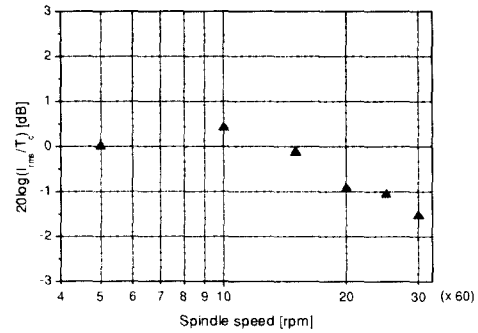


Fig. 2 Static sensitivity of the spindle motor current to the cutting torque

그런데 주축 전류로 절삭 토크를 추정하기 위해서는 절삭 중 측정된 주축 전류에서 모터 운전 에 필요한 무부하 운전 전류량을 빼주어야 한다. 주축 모터의 무부하 운전 전류량은 Fig. 3 과 같이 주축 회전 속도에 따라 달라진다. 본 연구에서는 실제 절삭 시 모터 회전 시작 후 10 회전 동안의 주축 전류를 실시간으로 측정하고 그 값을 평균함으로써 주축 모터의 무부하 운전 전류량을 알아내었다.

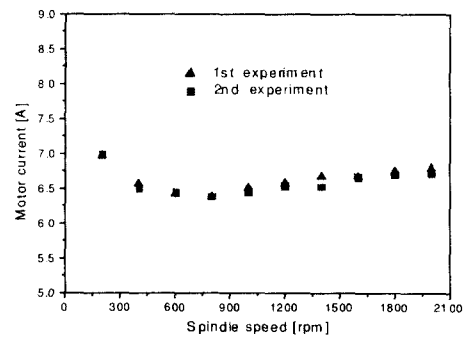


Fig. 3 Tare current variation of the spindle motor according to the spindle speed

### 4. 절삭 토크 제어 실험 결과

**4.1 플랜트 이득과 제어기 동조 이득의 결정**

플랜트 이득은 절삭 이득과 주축 전류 이득의 곱과 같다. 그런데 절삭 이득은 이송에 대한 절삭 토크의 비로 정의되었으며 주축 전류 이득은 절삭 토크에 대한 주축 전류의 비로 정의되었으므로 결국 플랜트 이득은 이송에 대한 주축 전류의 비와 같다. 공작물이나 드릴의 직경이 변할 경우 1 회의 시험 절삭을 통해 주축 전류를 측정하고 식 (2) 와 같이 전체 주축 전류의 평균에서 무부하 전류를 뺀 후 이를 회전 당 이송으로 나누어 줌으로써 플랜트 이득을 결정할 수 있다.

$$K_{plant} = \frac{I_{avg} - I_{tare}}{feed \text{ per rev.}} \quad (2)$$

식 (2)와 본 논문의 제 1 편에서 제시된 단순화된 제어기 동조 이득 결정 방법으로부터 얻어진 플랜트 이득과 제어기 동조 이득을 table 2 와 Fig. 4 에 나타내었다.

Table 2 Plant gain and tuned controller gain

Drill diameter [mm]	Workpiece	Plant gain	Controller gain
6	SCM4	8.968	0.087
8	KP4M	22.848	0.034
10	SM45C	26.935	0.029

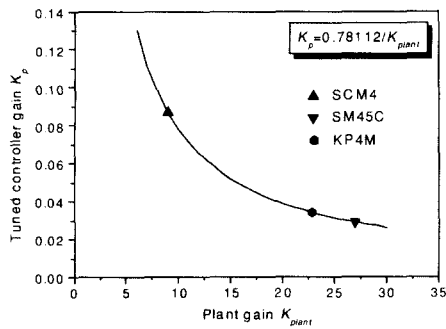


Fig. 4 Plant gain vs. tuned controller gain

**4.2 제어 결과**

Table 1 에 제시된 절삭 조건에 대하여 구멍을 한번에 가공한 경우, 패킹 공정을 적용하여 가공한 경우, 그리고 절삭 토크를 제어하며 가공한 경우의 절삭 토크와 주축 모터 전류, 그리고 제어시의 이송 속도 변화를 파악하였다. 패킹 조건은 다음과 같다. 가공 깊이가 구멍 직경의 4 배인 지점에 이르렀을 때 급속 이송으로 드릴을 공작물 표면까지 후진시킨 후 이전 가공 지점의 1 mm 전까지 다시 전진시켰다. 이후 절삭 시의 이송 속도로 전진하면서 구멍을 가공하고 드릴 직경의 1.5 배를 이송한 후 다시 표면까지 후진한다. 이 과정을 최종 가공 깊이까지 반복하였다. 절삭 토크 제어를 위해 기준 절삭 토크에 상응하는 주축 전류 레벨을 설정하여 절삭 중 주축 전류를 실시간으로 측정하고 기준 주축 전류를 추종하도록 이송 속도를 조절함으로써 절삭 토크를 일정하게 제어하였다. 드릴이 공작물에 진입시 공작물 표면에서 치질이 미끌어지는 스키딩(skidding) 현상이 일어난다. 따라서 이송 속도가 높으면 좌굴에 의한 파손이 발생할 수 있다. 좌굴은 절삭 추력과 밀접한 관련을 가지며 본 논문의 목적은 절삭 중 절삭 토크를 제어하는 것이므로 드릴이 공작물에 진입시 일정한 절삭 토크에 도달하기 전까지는 NC 코드의 이송 속도로 이송되도록 하였다.

Figure 5(a)에서 Fig. 5(d)까지는 SCM4 공작물에 직경 6 mm 드릴로 구멍을 건식 절삭한 경우 각 가공 방법에 따른 절삭 토크와 주축 전류, 그리고 이송 속도의 변화를 보여주고 있다.

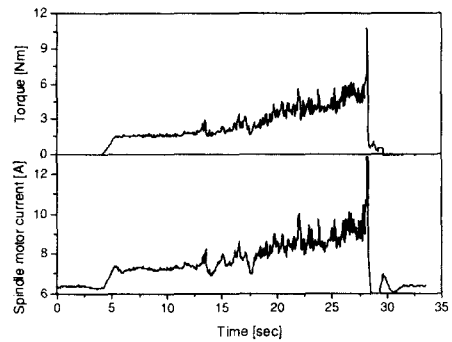


Fig. 5(a) Cutting torque and the spindle motor current variations in standard drilling (SCM4, 6 mm diameter drill, 42 mm hole depth, dry cutting)

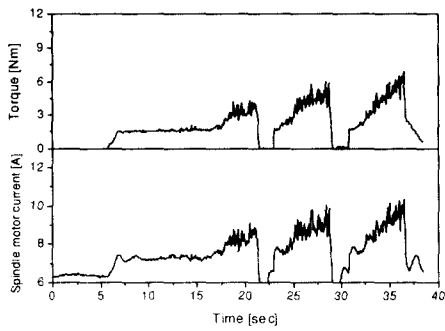


Fig. 5(b) Cutting torque and the spindle motor current variations in peck drilling (SCM4, 6 mm diameter drill, 42 mm hole depth, dry cutting)

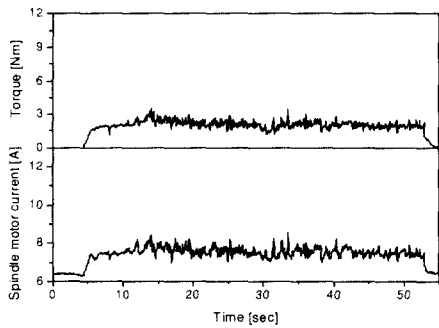


Fig. 5(c) Cutting torque and the spindle motor current variations in controlled drilling (SCM4, 6 mm diameter drill, 42 mm hole depth, dry cutting)

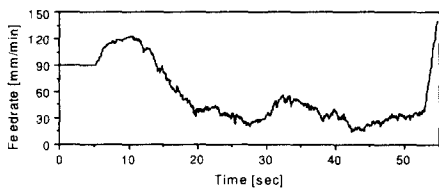


Fig. 5(d) Feedrate variation in controlled drilling (SCM4, 6 mm diameter drill, 42 mm hole depth, dry cutting)

한번에 구멍을 가공한 경우 가공 깊이가 증가함에 따라 절삭 토크의 크기와 진폭이 증가함을 확인할 수 있다. 특히 가공 깊이가 직경의 약 3 배 이상인 지점부터 절삭 토크의 증가율과 진폭이 상

승한다. 최종 가공 깊이에서의 절삭 토크는 초기 절삭 토크의 6 배 이상 증가하였다. 페킹 공정을 적용하여 구멍을 가공하더라도 가공 깊이에 따른 절삭 토크의 상승을 억제할 수 없다. 페킹 공정 시 최종 가공 깊이에서의 절삭 토크는 초기 절삭 토크의 4 배 이상 증가하였다. 따라서 기존의 방법으로 깊은 구멍을 가공할 경우 절삭 토크의 상승에 의한 드릴 파손의 위험이 커진다. 절삭 토크 제어 시 제어 기준이 되는 주축 전류는 7.6 Ampere 이며 이에 상응하는 절삭 토크는 약 2 Nm 이다. 절삭 토크를 제어하며 가공할 경우 가공 깊이가 증가하더라도 절삭 토크는 일정한 레벨을 유지할 수 있으므로 공구 파손의 위험이 감소한다. 드릴이 공작물에 진입하면서 기준 절삭 토크를 유지하기 위하여 제어기는 이송 속도를 증가시킨다. 이후 가공 깊이가 깊어지면서 절삭 토크의 상승을 억제하기 위해 이송 속도는 점진적으로 감소된다. 칩 배출의 상태에 따라 이송 속도의 증감이 반복되면서 최종 가공 깊이까지 제어되는 절삭 토크는 기준 절삭 토크를 추종한다. 제어된 절삭 토크에 나타나는 미소한 진동 성분은 칩의 영향이다.

KP4M 을 건식 절삭한 경우의 절삭 토크와 주축 전류, 그리고 제어시의 이송 속도를 Fig. 6(a)에서 Fig. 6(d)까지 나타내었다. 한번에 구멍을 가공한 경우와 페킹 공정을 적용한 경우 절삭 토크의 급격한 증가로 인해 드릴이 파손되었다. 그러나 절삭 토크를 제어한 경우 가공 깊이가 증가하더라도 절삭 토크는 일정하게 유지되었으며 공구 파손의 발생없이 안정적인 절삭이 가능하였다.

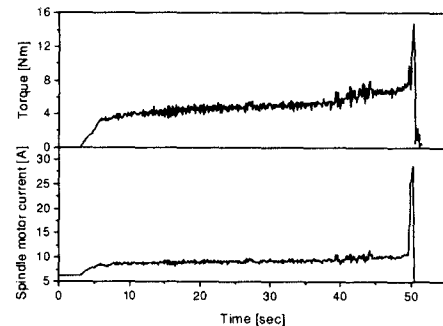


Fig. 6(a) Cutting torque and the spindle motor current variations in standard drilling (KP4M, 8 mm diameter drill, 48 mm hole depth, dry cutting)

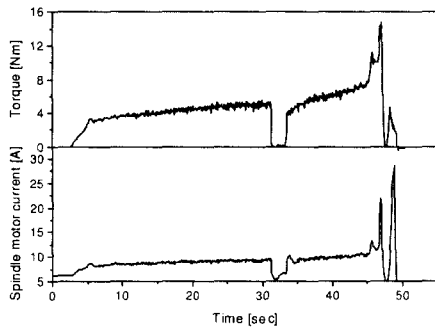


Fig. 6(b) Cutting torque and the spindle motor current variations in peck drilling (KP4M, 8 mm diameter drill, 48 mm hole depth, dry cutting)

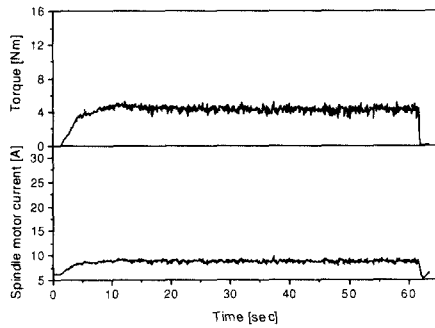


Fig. 6(c) Cutting torque and the spindle motor current variations in controlled drilling (KP4M, 8 mm diameter drill, 48 mm hole depth, dry cutting)

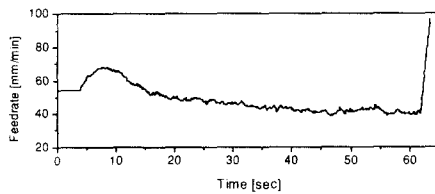


Fig. 6(d) Feedrate variation in controlled drilling (KP4M, 8 mm diameter drill, 48 mm hole depth, dry cutting)

절삭유를 공급하면서 SM45C 를 절삭한 경우를 Fig. 7(a)에서 Fig. 7(d)까지 나타내었다. 절삭유의 공급으로 인해 회전 공구 동력계를 이용한 절삭 토크의 측정이 불가능하였다. 따라서 주축 전류로부터 추정된 절삭 토크를 나타내었다.

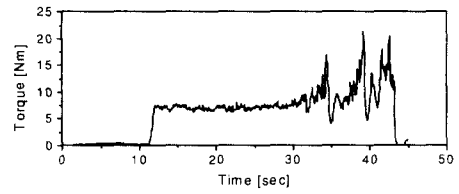


Fig. 7(a) Cutting torque variation in standard drilling (SM45C, 10 mm diameter drill, 80 mm hole depth, wet cutting)

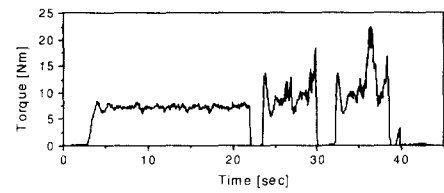


Fig. 7(b) Cutting torque variation in peck drilling (SM45C, 10 mm diameter drill, 80 mm hole depth, wet cutting)

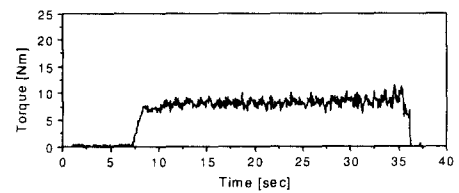


Fig. 7(c) Cutting torque variation in controlled drilling (SM45C, 10 mm diameter drill, 80 mm hole depth, wet cutting)

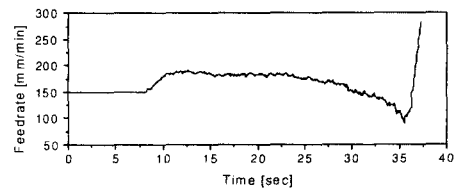


Fig. 7(d) Feedrate variation in controlled drilling (SM45C, 10 mm diameter drill, 80 mm hole depth, wet cutting)

절삭유에 의한 절삭성 향상 효과는 가공 깊이가 증가함에 따라 감소된다. 구멍을 한번에 가공

한 경우 절삭 토크가 증가하는 가공 깊이는 구멍 직경의 약 4.5 배인 지점으로서 건식 절삭에 비해 다소 깊어졌으나 절삭 토크의 급격한 상승은 건식 절삭과 동일한 형태를 보인다. 깊은 가공 위치에서의 절삭 토크 증감은 칩 배출의 영향 때문이다. 패키징 공정에서도 가공 깊이 증가에 따른 절삭 토크 레벨 및 진폭의 급격한 증가는 한번에 구멍을 가공한 경우와 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서 가공 깊이가 깊어질 경우 절삭유의 절삭성 향상 및 냉각 효과, 그리고 패키징에 의한 칩 배출의 효과가 크지 않음을 알 수 있다. 습식 절삭에서 절삭 토크를 제어할 경우 증가된 이송 속도로 절삭하는 시간이 건식 절삭에 비해 길어지는데 이는 절삭유의 영향에 의해 일정 깊이까지는 절삭성이 향상되었기 때문이다. 그러나 이러한 절삭유의 절삭성 향상 효과는 한계가 있으므로 가공 깊이가 깊어지면서 이송 속도는 점차 감소하였다. 제어되는 절삭 토크는 최종 가공 깊이까지 기준 절삭 토크를 잘 추종하였다.

이상의 실험 결과들로부터 본 연구에서 제시한 절삭 토크 제어 방법으로 구멍을 가공할 경우 공작물의 종류와 드릴 직경, 그리고 절삭유의 공급 여부에 무관하게 가공 깊이 상승에 따른 절삭 토크의 증가를 억제할 수 있으며 기존의 가공 방법에 비해 공구 파손의 위험을 줄일 수 있음을 확인하였다.

##### 5. 드릴 플랭크 마모에 대한 절삭 토크 제어의 영향

드릴을 이용한 구멍 가공 시 공구에 작용하는 절삭 부하가 커질 경우 공구와 공작물 사이의 마찰이 증가하며 가공 깊이가 깊어질수록 절삭 온도가 상승하여 공구의 경도가 저하되며 공구 마모가 촉진되고 심한 경우 주 절삭날의 소성 변형이나 파손이 발생하기도 한다<sup>(6)</sup>. 따라서 이송 속도를 연속적으로 변화시켜 절삭 토크를 일정하게 제어할 경우 가공 깊이 증가에 따른 절삭 토크와 절삭 온도의 상승이 억제되어 공구 마모가 줄어들 수 있으며 가변 이송에 의한 공구 마모 감소 효과<sup>(7)</sup>를 기대할 수 있다. 드릴의 플랭크 마모는 Fig. 8 과 같이 드릴의 중심으로부터 바깥쪽으로 갈수록 그 양이 증가하는데 이는 드릴의 바깥쪽으로 갈수록 절삭 속도가 증가하기 때문이다. 특히 플랭크

마모 중 드릴 외주 부분에서의 마모가 드릴 파손과 밀접한 연관이 있는 것으로 알려져 있으며 이 부분의 마모를 코너 마모(corner wear)로 칭하기도 한다<sup>(1)</sup>. 그러나 코너 마모의 측정을 위한 드릴 코너부 영역과 코너 마모 폭에 대한 기준이 확립되어 있지 않으므로 코너 마모를 정량적으로 제시할 수 있는 기준 또한 명확하지 않다.

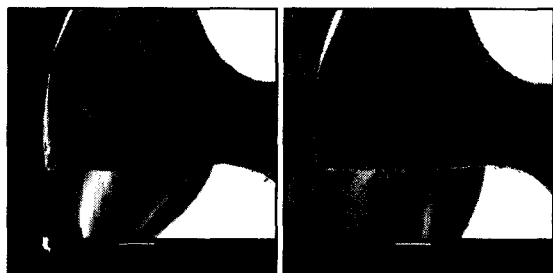


Fig. 8 Typical flank wear of drill point

본 연구에서는 드릴 플랭크에 형성된 마모 영역의 면적을 주 절삭날 길이로 나눈 값을 드릴 마모량을 나타내는 지수(index)로 선택하였다. 이 지수는 드릴 플랭크의 평균 마모폭을 의미한다. 직경 6 mm 와 8 mm 드릴을 이용하여 SM45C 공작물을 건식 및 습식 절삭하였다. 동일한 절삭조건(주축 회전수, 이송속도, 가공 깊이)으로 같은 개수의 구멍을 한번에 가공한 경우, 패키징 공정을 적용하여 가공한 경우, 그리고 절삭 토크를 제어하며 가공한 경우에 대해 드릴의 평균 플랭크 마모폭을 비교하였다. 가공 중 파손이 발생한 경우에는 구멍 가공을 중단하였다.

Figure 9 는 1300 rpm 의 주축 회전수에서 직경 6 mm 드릴로 42 mm 깊이의 구멍을 130 mm/min 의 이송속도로 30 개씩 건식 절삭한 이후 생성된 플랭크 마모의 SEM 사진이다. 패키징의 경우 가공 깊이가 24 mm 와 36 mm 에 이르렀을 때 드릴을 공작물 표면까지 후진시킨 후 다시 공작물에 진입시켜 가공을 진행하였다. 직경 6 mm 드릴의 주 절삭날의 길이는 약 2.6 mm 이다. 패키징 공정에 사용된 드릴의 플랭크 마모 영역은 드릴 중심으로부터의 거리에 비례하여 증가하고 있으며 코너 쪽에서 그 면적이 급격히 증가하였다. SEM 사진의 척도를 이용하여 계산된 평균 플랭크 마모 폭은 약 146  $\mu$ m

이다. 절삭 토크 제어를 사용된 드릴의 플랭크 마모 영역은 페킹 공정에 사용된 드릴의 경우에 비하여 매우 작다. 계산된 평균 플랭크 마모 폭은 약  $46\ \mu\text{m}$  로서 페킹 시 마모량의 약 32%에 불과하다. 한번에 구멍을 가공한 경우에는 9 번째 구멍 가공 중 드릴의 파손이 발생하였다.

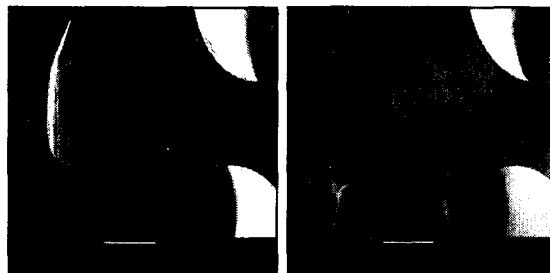


(a) Pecking (b) Control

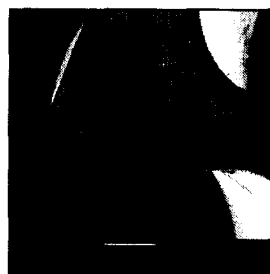
Fig. 9 Comparison of drill flank wear (6 mm diameter drill, dry cutting)

Figure 10 은 900 rpm 의 주축 회전수에서 직경 8 mm 드릴로 깊이 64 mm 의 구멍을 120 mm/min 의 이송속도로 30 개씩 습식 절삭한 후 촬영된 드릴 플랭크 마모의 SEM 사진이다. 페킹 공정 시 가공 깊이가 32 mm 와 48 mm 에 이르렀을 때 드릴을 공작물 표면까지 후진시킨 후 다시 공작물에 진입시켜 가공을 진행하였다. 직경 8 mm 드릴의 주 절삭날의 길이는 약 3.5 mm 이다. 습식 절삭에서는 드릴의 파손이 발생하지는 않았다. 그러나 건식 절삭에서와 마찬가지로 한번에 구멍을 가공하는 경우와 페킹 공정을 적용한 경우의 플랭크 마모 영역이 절삭 토크를 제어한 경우의 마모 영역에 비해 매우 컸다. 이는 구멍의 가공 깊이가 깊어지면 절삭유의 냉각 효과가 저하되며 페킹 공정을 적용하여 구멍을 가공하더라도 공구 마모의 축진을 억제할 수 없음을 의미한다. 그러나 절삭 토크를 제어하며 가공한 경우 드릴의 플랭크 마모는 기존의 가공 방법에 비해 매우 작음을 확인할 수 있다. 건식 및 습식 절삭에서 가공 방법에 따른 평균 플랭크 마모 폭을 Fig. 11(a)와 Fig. 11(b)에 나타내었다. 건식 절삭에서 드릴이 파손된 경우 드릴 마모 측정의 불가능으로 인해 마모량이 그래프에 표시되지 않았다.

드릴 마모량의 관찰을 통해 절삭 토크를 제어하며 구멍을 가공할 경우 건식 및 습식 절삭의 경우 모두 기존 가공 방법에 비해 공구 파손의 위험과 공구 마모를 현저히 감소시킬 수 있으므로 공구 수명에 매우 유리함을 확인하였다.



(a) Standard (b) Pecking



(c) Control

Fig. 10 Comparison of drill flank wear (8 mm diameter drill, wet cutting)

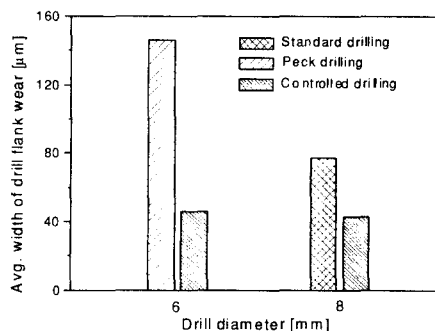


Fig. 11(a) Average width of drill flank wear in dry cutting



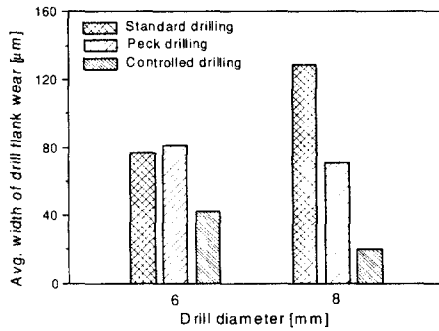


Fig. 11(b) Average width of drill flank wear in wet cutting

### 6. 결론

드릴 공정 중 공구 파손의 위험과 공구 마모의 감소를 위한 절삭 토크 제어 시스템을 제시하였다. 주축 모터 전류를 이용하여 절삭 토크를 실시간으로 추정하고 이송 속도를 조절하여 절삭 토크를 일정하게 제어하였다. 주축 전류로부터 추정된 절삭 토크는 실제 절삭 토크와 잘 일치하였다. 본 논문의 제 1 편에서 설계된 제어기에 의해 제어된 절삭 토크는 공작물의 종류, 드릴의 직경, 그리고 절삭유의 공급 여부에 무관하게 기준 절삭 토크를 잘 추종하였다. 절삭 토크를 제어하며 구멍을 가공할 경우 건식 및 습식 절삭의 경우 모두 기존의 가공 방법에 비하여 공구 파손의 위험과 드릴 플랭크 마모를 획기적으로 줄일 수 있음을 확인하였다. 제시된 절삭 토크 제어 시스템은 절삭 공정에 아무런 방해를 주지 않으므로 실제 깊은 구멍 가공을 위한 드릴 공정에 적용될 수 있으며 생산성의 향상을 기대할 수 있다.

### 참고문헌

1. G. Boothroyd, W. A. Knight, "Fundamentals of Machining and Machine Tools," Marcel Dekker, 1989.
2. ASM International Handbook Committee, "Metals Handbook-Ninth Edition," ASM International, Vol. 16, Machining, 1989.
3. M. Fujishima, I. Nishiura, Y. Kakino, A. Matsubara, "Integration of Adaptive Control Functions for

Drilling in Intelligent Machine Tools," Proceedings of the Sixth International Conference on Automation Technology, Vol. 1, pp. 531-535, 2000.

4. S. J. Ke, S. M. Yang, "Observer-Based Cutting Force Control for Induction Spindle Motor Drive," Proceedings of the Sixth International Conference on Automation Technology, Vol. 1, pp. 525-529, 2000.
5. R. J. Furness, T. C. Tsao, J. S. Rankin, II, M. J. Muth, K. W. Manes, "Torque Control for a Form Tool Drilling Operation," IEEE Trans. on Control Systems Technology, Vol. 7, pp. 22-30, 1999.
6. T. R. Lin, R. F. Shyu, "Improvement of Tool Life and Exit Burr using Variable Feeds when Drilling Stainless Steel with Coated Drills," Int. J. of Adv. Manufact. Tech., Vol. 16, pp. 308-313, 2000.
7. Z. Klim, E. Ennajimi, M. Balazinski, C. Fortin, "Cutting Tool Reliability Analysis for Variable Feed Milling of 17-4PH Stainless Steel," Wear, Vol. 195, pp. 206-213, 1996.
8. 김기대, 권원태, 주종남, "주축 모터 전류를 통한 절삭력의 간접 측정 및 절삭력 추종 제어," 한국정밀공학회지, 제 14 권, 제 10 호, pp. 15-27, 1997.
9. A. J. Wheeler, A. R. Ganji, "Introduction to Engineering Experimentation," Prentice Hall, 1996.
10. D. A. Stephenson, J. S. Agapiou, "Metal Cutting Theory and Practice," Marcel Dekker, 1997.
11. H. S. Liu, B. Y. Lee, Y. S. Tarn, "In-process Prediction of Corner Wear in Drilling Operations," J. of Materials Processing Technology, Vol. 101, pp. 152-158, 2000.