

## ADI재료의 드릴가공시 절삭특성이 공구수명에 미치는 영향 The Influence of Machinability on Tool life of the ADI Materials in Drilling

반재삼(조선대학교 기계공학과 대학원), 조 규재(조선대학교 기계공학과),  
전 언찬(동아대학교 기계공학과), 박홍식(동아대학교 기계공학과)

### 1. 서론

최근, 유용한 신소재로 많은 관심을 보이고 있는 오스테퍼 처리 구상축연 주철(Austempered Ductile Cast Iron 이하 ADI라 한다)은 기저조직이 배이나이트와 잔류 오스테나이트로 구성되어 있기 때문에 같은 화학 조성을 갖는 일반 구상축연 주철에 비하여 연성 및 인성의 감소가 없이 2배 정도의 강도를 증가시킬 수 있기 때문에 자동차, 선박 부품 및 각종 기계부품에 적용시키기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100</sup> 그러나, ADI재료는 높은 강도와 잔류 오스테나이트의 비크래스트화에 기인하는 가공 변질층에 의하여 절삭성이 나쁜기 때문에 단조강 등과 같은 타 재료로 대체 가능성이 높음에도 불구하고 그 적용 정도가 아직까지는 미흡한 실정이다.<sup>1</sup> 이에 대한 최근의 연구로서는 Shintani<sup>65</sup>는 ADI재의 절삭특성에 관한 연구를, 또한 北川・小川<sup>78,80</sup> 등은 ADI재의 축연 입자수의 영향에 따른 절삭성에 대한 연구를 활발히 행하고 있으나, ADI 재료의 절삭특성에 미치는 소경드릴의 재층에 의한 정량적인 연구 특히, ADI재료의 드릴가공시 공구마멸이 진행되면 온도, 절삭저항, 칩수, 표면조도, 및 절삭음등이 변하게 되며, 이러한 변화요인중 절삭저항이 공구마멸 상태에 가장 민감하여<sup>10</sup> 절삭저항의 변화에 따른 공구수명을 예측하는 것등, 재반 절삭특성이 소경드릴의 공구수명에 미치는 영향에 관한 연구결과는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 서로 재질의 성분이 다른 고속도강 드릴인 소경드릴을 이용하여 ADI재료를 보통(미관봉) 이송 및 단재이송 절삭가공시 발생하는 공구의 마멸량과 표면조도와 관계, 절삭력의 변화에 따른 공구마멸과 공구수명과의 관계를 실험적으로 규명하여 ADI재료의 보통 및 단재이송절삭시 공구수명에 미치는 재반 절삭특성의 영향에 관해 고찰 하고자 한다.

### 2. 드릴 가공의 절삭 모델

드릴에서의 절삭은 주절삭날과 치층날에서 일어나며 회전과 이송운동에 의해 각 절삭날 상에서 운동 방향이 달라지기 때문에 절삭력의 해석이 복잡하게 된다.

치층날은 이송속도가 회전속도의 20%가 되는 점을 정계로 보조절삭날 영역과 압입영역으로 나누어 Fig.1과 같이 주절삭날 영역, 보조 절삭날 영역, 압입영역의 3부분으로 나누어 모델링 할 수 있다.<sup>10</sup> Fig.2는 트위스트 드릴상에서의 절삭력 분포를 나타낸 그림으로서 드릴에 가해지는 전체 토크 및 스톱스톱은 각각의 모델로부터 구할수 있으며 다음의 식(1),(2)와 같이 전체 토크 및 스톱스톱을 구할수 있다.<sup>11,12</sup>

$$T = T_1 + T_2 = F_t \frac{2}{3} d + F_k C \quad \dots\dots\dots(1)$$

- 여기서,  $T$  : 전체 토크(kgf·mm)
- $T_1$  : 주절삭날에 의해 생기는 토크(kgf·mm)
- $T_2$  : 보조절삭날에 의해 생기는 토크(kgf·mm)
- $d$  : 공구직경(mm)
- $C$  : 치층에지 폭(mm)
- $F_t$  : 주절삭날에 가해지는 절삭속도의 수직 방향의 힘(kgf)
- $F_k$  : 보조 절삭날 영역에서의 드릴축에 수직인 방향분력(kgf)

$$F = 2F_{gr} + 2F_{gc} + F_{ac} \quad \dots\dots\dots(2)$$

- 여기서,  $F$  : 전체 스톱스톱(kgf)
- $2F_{gr}$  : 주절삭날에 의해 생기는 주력 (kgf)
- $2F_{gc}$  : 보조 절삭날에 의해 생기는 주력(kgf)
- $F_{ac}$  : 압입력(kgf)을 나타낸다.

### 3. 실험 방법

#### 3.1 절삭실험

본 연구에서 전삭 실험은 수직형 머시닝 센터 (화천기계, VERTMAC-650)를 이용하여 실험을 수행하였고, 전삭 작업 시 보통이송 전삭과 단계이송 전삭시 발생하는 추력과 토오크는 압진형 공구동력계(kistler, 927A)를 사용하여 측정하였다. 이때 공구 동력계로부터의 미세한 전압을 안정적으로 증폭하기 위하여 차지 앰프리 파이어(kistler, 5011)를 사용하였다. 그리고 데이터를 개인용 컴퓨터에서 해석하기 위하여 증폭된 아날로그 신호를 아날로그-디지털 변환기(DAS-16)를 이용하여 디지털화 하였다. 컴퓨터에 전송된 신호는 전삭력 소프트웨어를 이용하여 분석하였고, Fig.3은 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

시험편의 지지조직 및 공구 표면 형상의 측정은 주사 전자 현미경(JEOL, JSM-840A)으로 관찰하였다. 또한 지지조직 내 베이나이트의 체적분율과 잔류 오스테나이트의 체적분율의 측정은 X-선 회절기(Rigaku geigerflex D/max-B)를 이용하였고, 마르텐사이트의 체적 분율은 전체적 분율에서 베이나이트와 잔류 오스테나이트의 체적분율의 차로써 구하였다. 공구동력계의 측에 피삭재를 고정시켰을 때 편심을 제거하기 위하여 피삭재가  $\phi 60 \times 30\text{mm}$ 이 되도록 외피 및 양단면을 가공한 후 12개의 구멍을 뚫었다. 이때 구멍과 구멍사이의 최소 거리는 먼저 뚫은 구멍의 영향을 받지 않도록 5mm 이상 되도록 하였다. 또한 보통전삭은 구멍 깊이가 15mm가 되도록 하였고 단계이송전삭은 한 단계를 5mm씩으로 하여 3단계로 이송가공 하였다. 특히 본 연구에서는 공구 수명을 예측하기 위한 수단으로 소음계(GA 204)를 이용하였으며 75dB~100dB(무부하 상태 70dB)정도 범위를 정상 가공상태로 하고 105dB 이상이 될때 공구가 마멸 된 것으로 판정하여 공구를 교환하였다.

본 실험에 사용된 드릴은 GÜHRING사의 고속도강과 코발트 고속도강 2종류이며 형상은  $\phi 6 \times 70 \times 102\text{mm}$ 로서 전단각 130° 여유각 11° 비틀림각 38° 이다. 전삭 실험조건은 Table 1과 같다. 드릴을 콜레트 홀더에 체결시킬때 드릴이 정확하게 이송이 되도록 충분히 체결하였다. 드릴의 마멸량 측정은 구멍을 2~5개 가공 한후 공구현미경(Mitutoyo, TM101)을 이용하였다. 또한 정도 측정은 드릴 가공 후 가공재료를 절단하여 마이크로 비커스 경도기(SHIMADZU, NO.3311)를 사용하여 측정 하였다. 토오크의 보정은 인디케이트 플랫폼형 토오크렌저(Kanon, 450K)를 사용하였고, 스러스트 보정은 로트렌과 동적스트레인 메타를 사용하였다.

### 3.2 시험편 제작 및 열처리

시험편은 일반 구상흑연 주철 용탕에 Fe-99.9% Ni, Fe-60% Mo, 및 99% Cu를 첨가하여 용해 한 후 충분한 압

탕력이 있는 생사형주철에 주입하여 환봉 시료를 제작하였다. 구상흑연 주철의 오스테퍼링 처리는 일반적으로 오스테나이트화 하기 위한 가열온도 범위로 850~950°C가 적당하다고 알려져 있다.<sup>13,14</sup> 따라서, 본 연구에서는 오스테나이트 중의 탄소량이 균일하게 될때까지 장시간을 요하는 낮은 오스테나이트화 온도와 오스테나이트 결정립이 조대화 하여 되어 기계적 성질을 저하시키는 높은 오스테나이트화 온도를 피하여 오스테퍼 처리는 900°C로 유지된 유욕에서 1시간 동안 오스테나이트화 한 후 오스테퍼드 온도 (200~450°C)의 변화에 따라 미세한 침상의 하부 베이나이트가 조대화된 침상 및 판상의 상부베이나이트로 성장하는 철이온도 부, 인 375°C에서 2시간동안 항온 열처리 하였다.

피삭재의 화학적 성분은 Table 2과 같고, Table 3은 기계적 성질과 체적분율을 나타냈다.

Fig.4은 GCD600재와 ADI재의 조직 사진이다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 정적전삭 특성

Fig.5의 (a)(b)는 GCD600재와 ADI재료를 전삭할 때 10.3m/min, 이송속도 0.1mm/rev의 조건의 칩 형상과 칩 성분의 토오크와 스러스트를 표시 한 것으로 토오크와 스러스트는 가공구멍 깊이가 깊이짐에 따라 전삭저항이 서서히 가되고 있음을 알수있었다. 이는 토오크와 스러스트 모두는 가공구멍의 깊이가 깊이짐에 따라 드릴의 외주부와 공작물의 내벽과의 마찰이 증가되기 때문이라고 생각된다. 또한 대공에서 발생한 열의 영향과 생성된 칩의 누적때문이라 생각된다. Fig.5의(c)는 ADI재를 전삭속도 6.1m/min 이송속도 0.1mm/rev의 단계 이송전삭시 토오크 및 스러스트의 칩 성분을 나타낸 것이다. 전삭 깊이가 깊어질수록 양 전삭력의 정적 성분 모두가 정상 전삭때 보다 큰 폭으로 증가 하고 있음을 알수있다. 이는 칩 배출과 마찰력에 의한 영향과 ADI재에 있어서는 잔류오스테나이트량의 영향이 큰 것으로 고려된다. 또, GCD600재는 구멍 가공시는 정상적인 연속 원추 나선형의 칩이 그림과 같이 발생되고, ADI재료의 칩의 형상은 구멍가공 초기에는 원추 나선형이 생기며 가공 구멍 깊이가 깊이짐에 따라 드릴의 외주와 공작물의 내면의 구멍을 받아 절단이 된다. 이때에 원추 나선형 칩의 절단 주기가 짧아지게 되어 부채꼴 형상의 칩으로 변화됨을 알수있었다.

### 4.2 공구마멸과 전삭력과 관계

공구의 마멸은 가공면의 표면조도 및 가공정밀도에 영향을 미치며, 심한 경우 공구파손을 초래할 수 있다. 그러므로

드릴마멸은 발생하는 위치에 따라 플랭크 마멸, 크레이터 마멸, 코너 마멸, 치출에지 마멸, 랜드 마멸로 나누며, 일반적으로 플랭크 마멸이 드릴의 수명을 나타내는 기준으로 널리 사용되고 있다.<sup>15)</sup> 본 실험에서는 보통이송절삭과 단계이송절삭시 평균플랭크 마멸에 의한 드릴 수명을 예측하였다.

Fig.6은 절삭 속도를 6.1m/min. 으로 일정하게 하고 이송 속도를 변화 시킬 경우 고속도 공구 강(GÜHRING사)의 가공 홀수에 대한 마멸량과의 관계를 나타냈다. Fig.6에서 이송속도가 증가함에 따라 마멸량도 증가 하고 있음을 알수 있으며 이송속도 0.15mm/rev.에서는 가공 홀수가 25개체 이르면 공구 마멸이 급증하여 가공이 불가능한 상태가 되었다. Fig.7은 피드를 0.05mm/rev.로 일정 하게 하고 절삭 속도를 변화 시켜 고속도 공구강에서 마멸량을 측정된 결과를 나타냈다. Fig.7에서도 절삭속도가 증가 함에 따라 마멸량은 같은 비율로 증가 하나 절삭속도가 10.3m/min.부근에서는 33개체의 가공홀에서 공구 마모가 급증 하였다. 이상과 같이 Fig.6~7에서 공구 마모가 급증하는 이유는 고속도강 공구는 내열성이 나빠기 때문에 고강도인 ADI재료를 가공 할때 단속 칩의 배출이 용이치 못하여 공구의 발열과 재료의 경화 현상으로 인하여 마멸의 전진이 증대되기 때문이라 생각된다. Fig.8은 코발트 합유 고속도강(GÜHRING사)을 이용한 절삭속도 6.1m/min., 이송속도 0.05~0.15mm/rev.범위에서 ADI재와 GCD600재를 구멍 가공을 할 경우 가공홀수에 대한 공구마멸과의 관계를 나타낸것이다.

Fig.8에서 이송속도 0.15mm/rev.을 제외한 어떤 이송 속도에서도 공구마멸량은 ADI재를 구멍 가공한 경우가 GCD600 재를 가공한 경우보다 약 1.8배 정도 큼을 알 수 있었다. 이와 같이 GCD600재에 비하여 ADI재를 가공할 경우 드릴마멸량이 큰 원인은 GCD600재의 구멍 가공에서 보다 원활작용이 원활하지 못해 공구와 피삭재 사이의 마찰력에 의한 응착현상이 증가되기 때문이라 생각된다. 또한, GCD600재에서는 공구 마멸이 완만하게 증가하나 ADI재료에서 이송속도 0.15mm/rev.에서는 34개체의 구멍 가공때 부터 공구 마멸이 급상승함을 알 수 있다. 이와같은 이유는 Fig.6~7에서와 같은 이유 때문이라 생각된다. 그리고 Fig.9 은 절삭속도 6.1m/min., 이송속도 0.1mm/rev.에서 35번째 절삭시의 프랭크 마모량을 전자주사현미경으로 촬영 한 것이다. 프랭크 부근에 공작물과의 상대운동으로 인한 높은 열에의하여 공작물재료가 응착되어 있고 그 응착된 위로 그루브(groove)형태의 마멸이 발생한 것을 볼 수 있다. 따라서 프랭크 면의 마멸은 응착마멸(adhesive wear)에 의하여 발생하는 것이 아니고 연마마멸(abrasive wear)에 의하여 이루어진다는 것을 알 수 있다. 또, Fig.10은 ADI재료와 GCD600재에 대한 절삭

속도 6.1m/min.에서 이송속도에 따른 토크와 스러스트와의 관계를 나타냈다.

Fig.10에서 드릴 코너부가 공작물에 드릴링 하기 시작한 후 일정한 폭의 칩이 유출 되기 시작했을 때를 초기값(start), 절삭 종료 직전의 극대치를 나타내는 부분의 값을 후기값(end)이라 하였다. ADI재의 토크, 스러스트량은 GCD600재보다 크게 나타났으며, 이송속도가 증가 할수록 토크와 스러스트의 성분이 증가 하는데, 이와 같은 현상은 이송속도가 증가함에 따라서 생성되는 칩의 두께가 증가하므로 칩의 단면적이 증가 하기 때문이라 생각된다. 또 절삭 초기값과 후기값을 비교하여 보면 ADI재에서는 이송속도가 작을 때 보다는 클때가 그 폭이 크게 나타났으며, 두 재료 모두 이송속도가 0.1mm/rev.이상이 되면 토크와 스러스트의 증가율이 더욱 커짐을 알 수 있다.

Fig.6~ Fig.8에서와 같이 절삭 시간에 따라 이송속도를 변화시켰을 때 플랭크 마멸이 증가하면 절삭저항 역시 증가하는 경향을 보였다. 이것은 공구의 마멸과 절삭저항이 어떤 관계를 가지고 있음을 말하여준다. 이 관계를 살펴보기 위하여 절삭속도 7.8m/min., 이송속도 0.05mm/rev.의 조건에서 얻어진 공구의 마멸량과 절삭력(스러스트)과의 관계를 Fig.11에 나타냈다. Fig.11로부터 공구 마멸량의 증가에 따라 절삭력 역시 선형적으로 증가함을 알 수 있었는데 이를 최소자승법으로 수식화하여 나타내면  $F_{th} = 925VB + 820$  ( $F_{th}$ : 절삭력 (N), VB: 프랭크 마멸 (mm))과 같은 관계식을 얻을 수 있었다. 또, Fig.12은 절삭속도 7.8m/min. 이송속도 0.05mm/rev.인 조건에서 프랭크 마멸량과 절삭시간을 나타낸 것으로 이를 수식으로 나타내면  $VB = 0.05 t^{0.118}$  (VB: 프랭크 마멸(mm) t:가공시간(sec))의 관계식이 얻어졌다.

Fig.13은 이송속도(6.1m/min)에 따른 가공홀의 거칠기를 알아보기 위해 ADI재와 GCD600재를 가공한 후 구멍내부면의 표면 거칠기를 측정하여 나타냈다. Fig.13에서 두재료 모두 본 실험범위 이내에서는 피드변화에 따라 표면 거칠기 값은 거의 변화가 없었으나 두 재료를 비교해보면 ADI재가 GCD600재보다 표면거칠기 값이 전반적으로 약 20%정도 작음을 알았다. 즉 ADI재가 GCD600재보다 가공후 표면상태가 양호함을 알 수 있었다.

#### 4. 결 론

피삭성이 매우 연약하고, 난삭재에 속하는 ADI재를 구멍 가공 실험을 행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 프랭크면의 마멸량은 절삭 시간의 증가에 따라 대수적으로 증가 됨을 알수 있었다.

2. 본실험 조건하에서 프랭크 마멸량과 절삭력과의 사이에는  $F_{th} = 925VB + 820$  의 관계식이 성립함을 알 수 있었다.
3. 본실험 조건하에서 프랭크 마멸량과 절삭시간의 증가율 사이에는  $VB = 0.05 t^{0.118}$  의 관계식이 성립함을 알 수 있었다.
4. 가공 구멍 내면의 표면 거칠기는 ADI재가 GCD600재보다 약20%정도 작게 나타났다.
5. 프랭크마멸은 칩이 프랭크면에 음착되고 그 위에 그루브가 발생하는 것이 반복되는 형태의 연마마멸에 의하여 일어난다.

**참고문헌**

1. 전 언찬 : “드릴 加工에 있어서 ADI재료의 절삭성에 관한 연구” 동아대학교 대학원 논문집 제 20집 pp305~315, 1995.
2. 박 홍식 : “오스템퍼링한 低合金球狀黑鉛鑄鐵의 부식 마멸 특성 및 그 기구에 관한 연구 ” 대한 기계 학회지 제 17권 제 6호 pp1404~1411, 1993.
6. 新谷一博, 加藤秀治 : “ADI 材 の 切削特性” 鑄物 第 63卷 第6號, pp523-527, 1991
7. 藤田武男, 關谷克彦, 北川亮三, 小池範法, 大城桂作, “ADI のドリル 被削性(第1報), 熱處理および切削條件の影響”, 日本精密工學會秋季學術大會論文集, pp.361~362, 1993.
8. 藤田武男, 關谷克彦, 北川亮三, 小池範法, 大城桂作, “ADI のドリル 被削性(第2報), 黑鉛粒數の影響”, 日本精密工學會秋季學術大會論文集, pp.363~364, 1993.
12. Craig A. Mauch, “Modeling the Drilling process an analytical MODEL to predict Thrust force and Torque” proceeding of the winter annual meeting of the AMSE Vol: 48,pp 59~65, 1990.
13. R. C. Voigt and R. Loper, JR. „Austempered Ductile Iron - Process Control and Quality Assurance” J. Heat Treating, Vol.3, No.4, pp.219~309, 1984.
14. P. A. Blackmore and R. A. Harding, “The Effects of Metallurgical Process variables on the Properties of Austempered Ductile Iron”, J. Heat Treating, Vol.3, No.4, pp.310~325, 1984.
15. P. Bandyopadhyay and S. M. Wu, “Signature Analysis of Drilling Dynamics for On-Line Drill Life Monitoring”, Sensors and Control for Manufacturing, PED-Vol.8, the winter Annual meeting of the ASME, NOV., 1985.

**Table1 Shape and dimensions of drill in used**

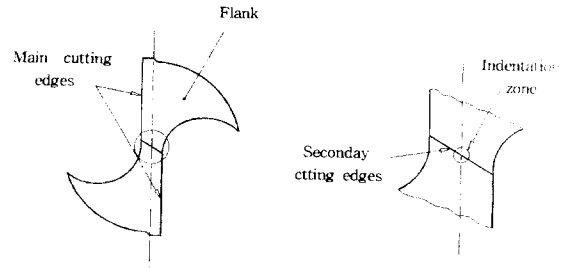
Workpiece	GCD600, ADI
Drill	HSS, HSS-Co
Drill shape	φ6mm×70×102 Twist drill
Cutting speed	6.1, 7.8, 10.3 (m/min)
Feed rate	0.05, 0.08, 0.1, 0.15 (mm/rev)
Depth of cut	15mm
Coolant	dry

**Table 2 Chemical composition of workpiece (Wt. %)**

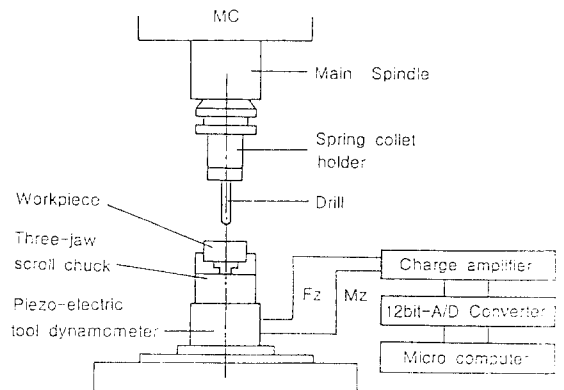
C	Si	Mn	P	S	Cu	Mo	Ni	Mg
3.52	2.77	0.25	0.03	0.02	0.38	0.23	1.39	0.05

**Table 3 Mechanical properties and volume fraction of workpiece(ADI)**

Structure (%)	Holding time(120 min)	Tensile strength(Kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Hardness (Hv)
Martensite (%)	2.4	125	4.9	408
Bainite (%)	78.6			
Retained austenite content (%)	19			



**Fig.1 Shape of drill point**



**Fig.3 Schematic diagram of experiment**

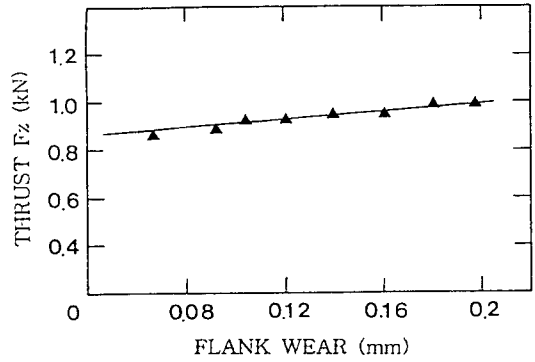
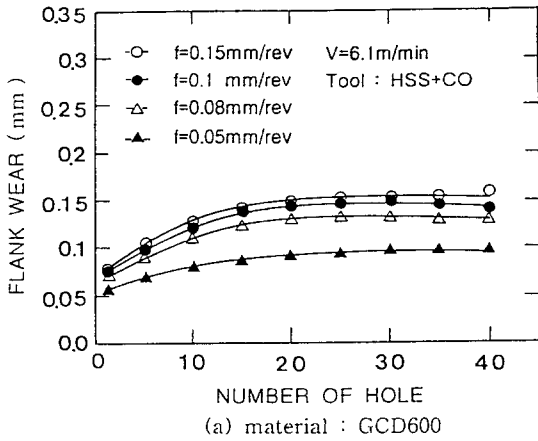


Fig.11 Flank wear versus thrust for HSS-CO  
( $V=7.8\text{m/min}$ ,  $f=0.05\text{mm/rev}$ .)

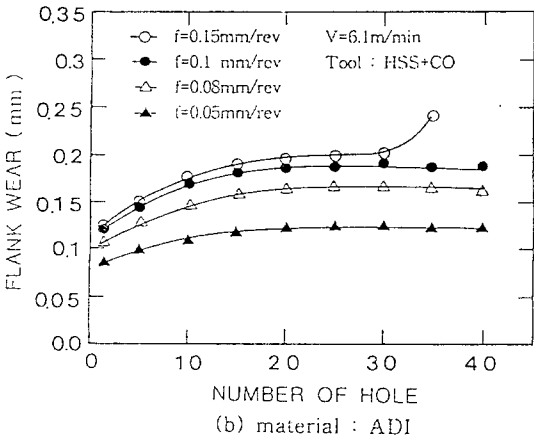


Fig.8 Comparison of tool wear in drilling ADI  
and GCD600 with cobalt contained HSS drill

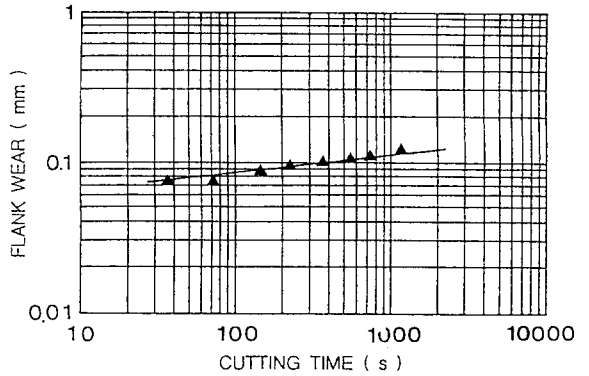


Fig.12 Flank wear versus cutting time for  
HSS+CO ( $V=7.8\text{m/min}$ ,  $f=0.05\text{mm/rev}$ .)

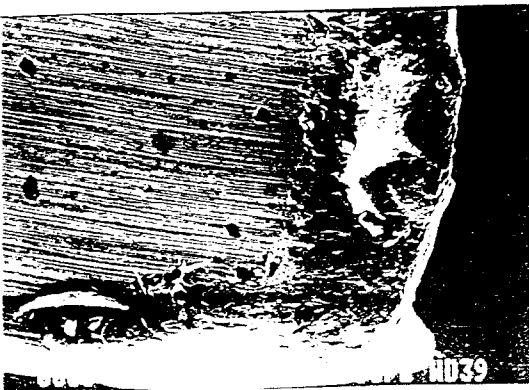


Fig.9 SEM Micrograph Of HSS-CO Tool

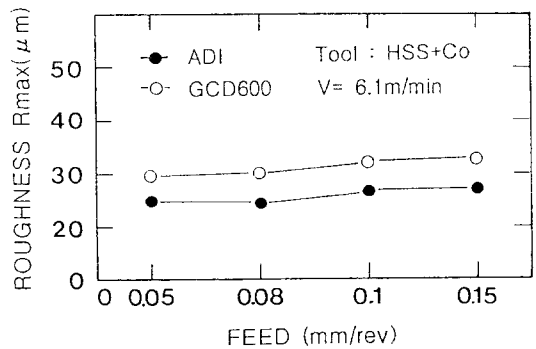


Fig.13 Comparison of the drilling hole surface  
roughness in drilling ADI and GCD600