

## 고능률 연삭용 알루미나 연삭숫돌의 연삭성능 및 마멸에 관한 실험적 연구

조기수\*, 이종찬\*\*

### An Experimental Study on Grinding Performance and Wear of Alumina Grinding Wheels Developed for High Performance Grinding

Kisoo Cho\*, Jongchan Lee\*\*

#### ABSTRACT

A new grinding wheel was developed for the high performance grinding of difficult-to-grinding materials. The grinding performance of the newly developed wheel including grinding forces, grinding ratio, and surface roughness of ground surface was evaluated through experiments. Experimental results show that the performance of the newly developed wheel is superior to the conventional alumina wheel and comparable to the Sol-gel wheel. An experimental investigation on the wear of alumina grinding wheel was also carried out. The experiments consist of the measurements of fracture strength of the abrasive grains, grinding forces, and the area of wear flats of grinding wheels. Microscopic examination of abrasive grains was executed to observe the progress of wheel wear. The results indicate that the 32A grain, which has relatively lower fracture strength, wears out faster than 5SS and 5SG. The wheel wear occurs much faster in wet grinding than in dry grinding. It has also been found that the grinding forces increase logarithmically with increasing wear flats.

**Key Words** : Grinding(연삭), Grinding performance(연삭성능), Alumina grinding wheel(알루미나 연삭숫돌), Wheel wear(연삭숫돌마모), Wear flats(마모면).

#### 1. 서론

연삭가공은 절삭가공에 의해서 성형된 공작물로부터 더 정밀한 치수와 표면을 얻기 위한 다듬질가공으로 많이 이용되어 왔다. 그러나 근래에 와서는 연삭가공에 다듬질가공 기능 뿐만 아니라 성형가공 기능까지 요구가

되면서 작업의 고능률화가 요구되고 있다. 또한 연삭하여야 하는 공작물이 점점 고경도화 되어가면서 이러한 난삭재의 가공에 적합한 연삭숫돌의 개발이 절실히 요구되게 되었다.

이에 CBN과 다이아몬드와 같은 초연마재가 개발되어 일부 연삭에는 이를 활용하고 있으나, 지립자체가 매

\* 금오공과대학교 기계설계공학과 대학원

\*\* 금오공과대학교 기계설계공학과

우 고가이고 숫돌의 트루잉과 드레싱이 매우 어렵다. 또한 이러한 초연마숫돌을 효과적으로 사용하기 위하여는 고정밀도, 높은 강성, 그리고 높은 마력의 전동기를 갖춘 전용 연삭기가 요구된다.

이에따라 기존의 연삭기계로 특별한 드레싱 기술이 없이도 고능률화를 이루면서 비용도 초연마재에 비하여 낮은 새로운 입자의 개발이 필요하였다. 이러한 필요에 의해서 미국 Norton 사에서 Sol-gel 알루미늄 입자를 개발하여 난삭재의 고능률연삭에 활용하고 있다.<sup>(1) (2) (3) (4)</sup>

본 논문에서는 이러한 Sol-gel 알루미늄 숫돌에 필적할 만한 국산 Alumina 연삭숫돌을 개발하여 난삭재의 고능률 연삭을 가능하게 하고자 하였다. 이에 5SS 숫돌(개발된 숫돌의 명칭)을 개발하여 그 연삭성능을 Norton 사의 5SG 숫돌 및 기존 알루미늄계 숫돌중에서 우수한 32A 숫돌과 비교하였다. 그리고 미국 Norton사의 5SG 숫돌, 기존 알루미늄계 32A 숫돌, 개발된 5SS 숫돌의 마멸현상을 규명하기 위하여 이들 입자들의 파쇄강도가 숫돌의 마멸과 연삭저항력에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보고, 건식과 습식연삭하에서 연삭진행에 따른 입자의 마멸 거동을 미시적인 관점에서 관찰하였으며, 숫돌의 마멸면적과 연삭저항력과의 관계를 연구하였다.

## 2. 개발품의 제작

본 연구에서 개발하고자 하는 숫돌의 입자는 SS 입자(가명)를 사용하였다. Fig. 1은 SS 입자, 미국 Norton사의 Sol-gel 입자, 그리고 32A 입자의 현미경 사진과 SEM 사진이다. SS와 Sol-gel 입자는 모서리가 날카로운 반면, 32A 입자는 약간 둥근 형상을 하고 있다. 그리고 결정구조에 있어서는 32A 입자는 하나의 입자가 단결정인데 비하여 SS와 Sol-gel 입자는 하나의 입자에 무수한 결정이 결합되어 있으며, 또한 그 결정형태는 각각 다면체형과 구형임을 알 수 있다.

숫돌의 제작은 입도 #60 메시인 SS 입자와 32A 입자를 각각 50%씩 혼합하고 여기에 기공재료와 결합제를 첨가하였다. 결합제는 Frit과 점토의 비트리파이드를 사용하였다. 위의 혼합비율로 성형하여 약 1,000°C에서 소성하여 I와 J의 결합도로 두가지 휠을 제작하였다.

## 3. 실험장치 및 방법

입자의 파쇄강도를 알아보기 위하여 머시닝 센터의 테

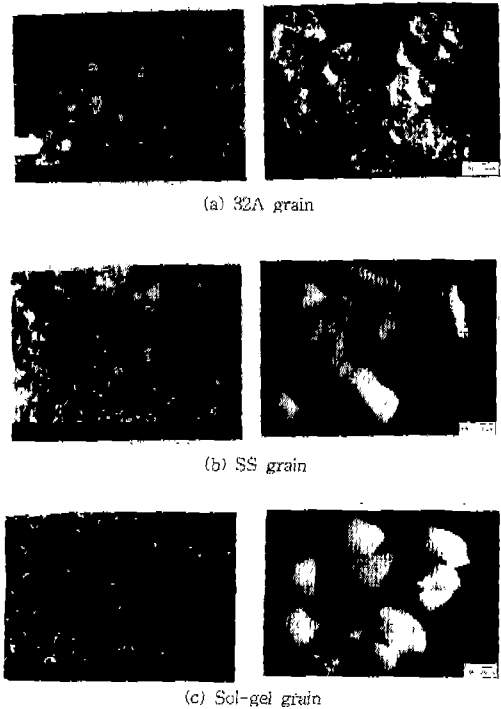


Fig. 1 Photographs and SEM micrographs of abrasives

이블 위에 공구동력계를 고정하고 그 위에 지그를 설치하여 그 지그사이에 각각의 입자를 삽입한 후 머시닝 센터의 Z축을 10 mm/sec의 속도로 이송시켜 입자가 파쇄될 때의 힘을 측정하였다.

연삭실험시 숫돌의 접선방향의 저항력( $F_t$ )과 법선방향의 저항력( $F_n$ )을 측정하기 위하여 압전형 공구동력계(piezo-electric type, Kistler 9257B)를 이용하였다.

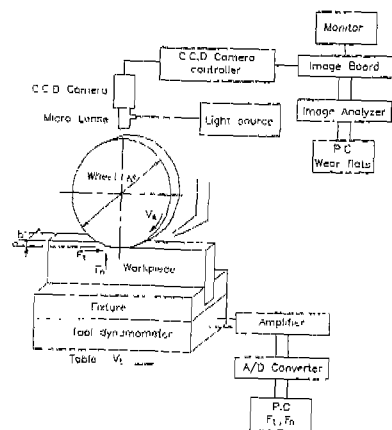


Fig. 2 Experimental system

Fig. 2는 그 개략도로써 공구동력계에서 얻어진 신호는 다채널증폭기(Kistler, 5091A)로 증폭되어 아날로그-디지털 변환기(Metrabyte, DAS-16)를 거쳐 디지털화되어 컴퓨터로 전송되었다. 컴퓨터에서는 Kistler cutting force software를 이용하여 데이터를 분석하였다.

연삭 진행중 입자의 마멸면적 및 입자를 관찰하기 위하여 Fig. 2와 같이 연삭기의 주축대에 C.C.D 카메라와 미시현미경을 부착하고 카메라에서 잡은 이미지를 C.C.D 카메라 콘트롤러에 의해 영상처리 보드를 통하여 모니터와 컴퓨터로 전송하였다. 컴퓨터에서는 소프트웨어를 이용하여 입자의 마멸면적을 백분율로 계산하였다. 평균마멸면적 측정은 스톨전체 표면중 18 곳을 측정하여 평균값으로 하였다. 또한 입자 관찰은 스톨전체 표면중 여섯 곳의 입자를 선택하여 연삭횟수에 따라서 관찰하였다.

실험은 1 $\mu$ m까지 절입이 가능하도록 Z축에 디지털 장치를 부착한 부분유압식 범용횡축 평면연삭기(YGS-50A, 주축동력 1.5 kW)를 사용하여 Table 1에 나타난 조건으로 플린지 연삭방식을 사용하여 건식 및 습식 연삭을 행하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 입자의 파쇄강도

먼저 각 입자의 형상과 결정구조가 입자의 파쇄강도에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보았다. Fig. 3은 이들 입자를 이용하여 파쇄강도를 실험한 사진과 파쇄강도를 보여주고 있다. 32A, 5SS, 그리고 5SG 입자의 파쇄하중은 각각 23 N, 73 N, 85 N으로 나타났다. 그리고 32A 입자는 힘이 23 N까지 증가하다가 갑자기 0 N으로 떨어졌다. 그러나 5SS와 5SG 입자는 32A 입자와는 달리 힘이 증가하다가 어느 순간에 0 N으로 떨어졌다가 다시 증가하고 감소하여 이를 반복하였다.

이러한 차이는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 32A 입자가 단결정으로 이루어졌기 때문에 어느 순간까지 누르는 힘에 견디다가 일시에 파쇄되어 버리고, 5SG와 5SS 입자는 다결정체로서 어느 순간까지 견디다가 결정경계를 따라 파쇄되고 또 다른 결정경계를 따라 파쇄되기 때문이다. 그리고 파쇄형상에 있어서도 32A 입자는 일부 입자가 가루로 되면서 작은 조각으로 부서져 버렸지만 5SS와 5SG 입자는 파쇄되면서 약간 큰 덩어리로 모가 나면서 파쇄된 것을 볼 수 있다.

Table 1 Experimental conditions

Grinding machine	Horizontal type surface grinding machine Model : YGS-50A (1.5 kW, 3440 r.p.m)
Grinding wheels	5SS60(LJ)V, 5SG60(LJ)V, 32A60(LJ)V
Workpiece	SKD-11 (60 R <sub>c</sub> ) 170L × 6W × 50H
Grinding type	wet & dry grinding, plunge grinding
Wheelspeed(v <sub>s</sub> )	1800 m/min, 1729 m/min
Table speed(v <sub>w</sub> )	13.7 m/min
Depth of cut(a <sub>p</sub> )	5 $\mu$ m/pass
Grinding fluid	Syntilo 9954 (Castrol, 40:1)
Dressing	one-point diamond dresser (3/4") depth of cut : 30 $\mu$ m/pass cross-feed : 0.11 mm/rev wet type

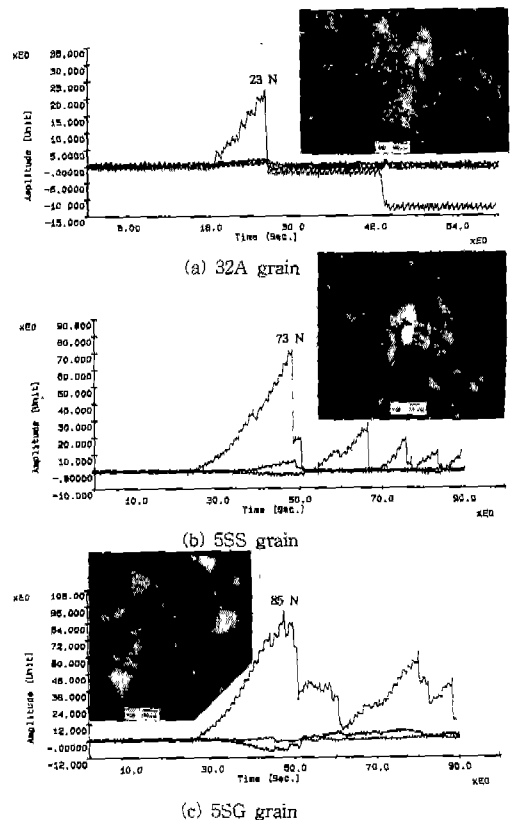


Fig. 3 Fracture strength and shape of fractured grains

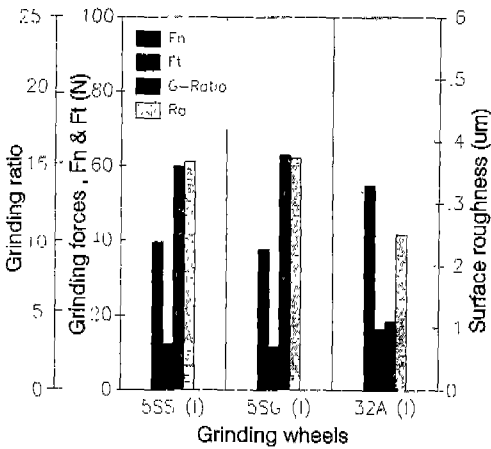


Fig. 4 Grinding forces, grinding ratio, and surface roughness of sample grinding wheels (grade : I, dry grinding) ( $v_s=1800\text{m/min}$ ,  $v_w=13.7\text{m/min}$ ,  $a_p=5\mu\text{m/pass}$ )

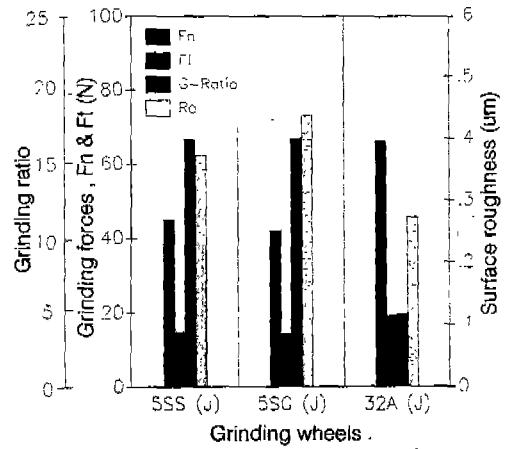


Fig. 5 Grinding forces, grinding ratio, and surface roughness of sample grinding wheels (grade : J, dry grinding) ( $v_s=1800\text{m/min}$ ,  $v_w=13.7\text{m/min}$ ,  $a_p=5\mu\text{m/pass}$ )

#### 4.2 연삭성능 비교

Fig. 4는 이러한 입자를 사용하여 결합도 I인 5SS, 5SG, 그리고 32A 연삭숫돌로 100pass 건식연삭했을 때의 연삭저항력, 연삭비, 그리고 공작물의 표면거칠기를 나타낸 그림이다. 개발품인 5SS 숫돌의 연삭저항력은 기존 알루미늄나 32A 숫돌의 연삭저항력보다 훨씬 낮고, 5SG 숫돌의 연삭저항력과는 비슷하며, 연삭비에 있어서도 5SS 숫돌은 15로 5SG 숫돌의 15.7과 비슷하고, 32A 숫돌보다는 3.5배정도 높게 나타났다. 공작물의 표면거칠기에 있어서는 5SS 와 5SG 숫돌은 비슷하지만 32A 숫돌보다는 높은 수치를 나타냈다.

Fig. 5는 결합도 J번으로 건식연삭했을 때의 그림으로 Fig. 4와 같은 경향으로 5SS 숫돌의 연삭저항력과 연삭비가 5SG 숫돌과 비슷하며 기존 알루미늄나 32A 숫돌보다는 연삭저항력이 훨씬 낮고 연삭비는 3.5배정도 높게 나타났다. 표면거칠기는 5SS 숫돌이 5SG 숫돌보다는 낮고, 32A 숫돌보다는 높은 수치를 나타내고 있다.

Fig. 6은 결합도 I번인 5SS 와 5SG 숫돌로 습식연삭했을 때의 연삭저항력, 연삭비, 그리고 표면거칠기를 나타낸 그림이다. 습식연삭에서도 건식연삭과 마찬가지로 개발품인 5SS 숫돌과 5SG 숫돌이 거의 비슷한 경향을 보이고 있다.

Fig. 7은 결합도 J번인 연삭숫돌로 습식연삭했을 때의 그림으로 5SS 숫돌의 연삭저항력이 5SG 숫돌보다 약간 낮고, 연삭비에 있어서는 5SS 숫돌이 5SG 숫돌보다는 약간 높게 나타났으며 표면거칠기는 비슷하게 나타났다.

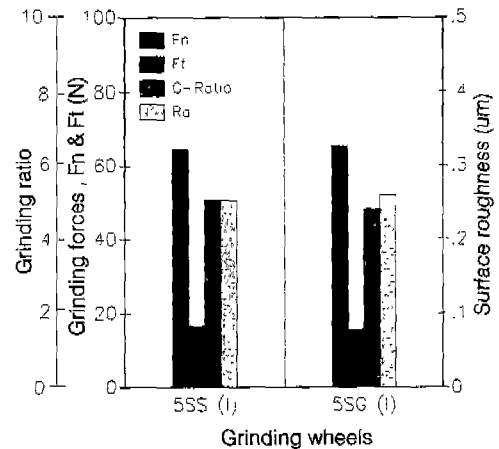


Fig. 6 Grinding forces, grinding ratio, and surface roughness of sample grinding wheels (grade : I, wet grinding) ( $v_s=1800\text{m/min}$ ,  $v_w=13.7\text{m/min}$ ,  $a_p=5\mu\text{m/pass}$ )

Fig. 8은 건식과 습식인 경우에 있어서 각 숫돌의 연삭성능을 보다 쉽게 평가하기 위하여 비연삭에너지와 연삭비를 동시에 한 그래프에 나타내어 상호비교가 쉽도록 하였다. 건식연삭의 경우나 습식연삭의 경우 공히 5SS 숫돌의 비연삭에너지 및 연삭비 데이터가 5SG 숫돌의 값들과 비슷한 위치에 있어 두 숫돌의 연삭성능이 매우 유사

함을 알 수 있다. 이러한 연삭성능은 그림에 나타난 바와 같이 32A 슷들의 연삭성능보다 월등히 우수한 것이다.

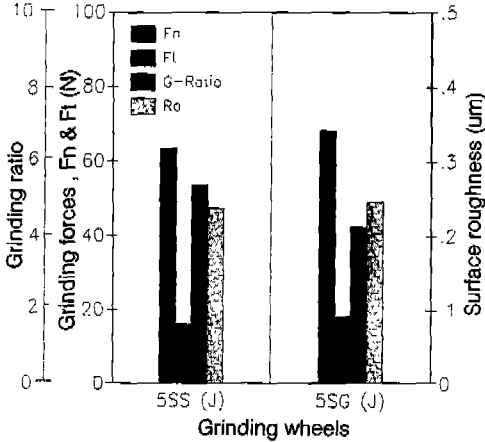


Fig. 7 Grinding forces, grinding ratio, and surface roughness of sample grinding wheels (grade : J, wet grinding) ( $v_s=1800\text{m/min}$ ,  $v_w=13.7\text{m/min}$ ,  $a_p=5\mu\text{m/pass}$ )

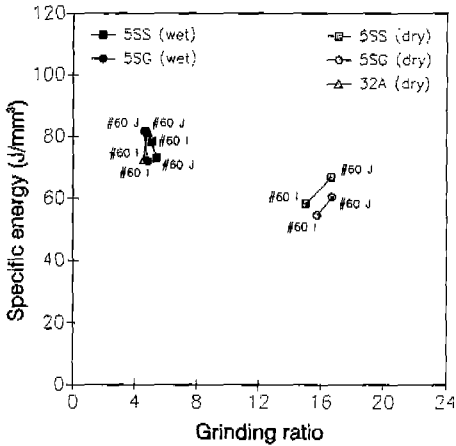


Fig. 8 Specific energy versus grinding ratio (wet & dry grinding) ( $v_s=1800\text{m/min}$ ,  $v_w=13.7\text{m/min}$ ,  $a_p=5\mu\text{m/pass}$ )

### 4.3 연삭초기의 연삭숫들의 마멸

Fig. 9는 이러한 연삭숫들을 사용하여 건식과 습식으로 단시간 연삭했을 때의 연삭횟수의 증가에 따른 연삭저항력의 변화를 나타낸다. 32A 슷들의 연삭저항력이 5SS

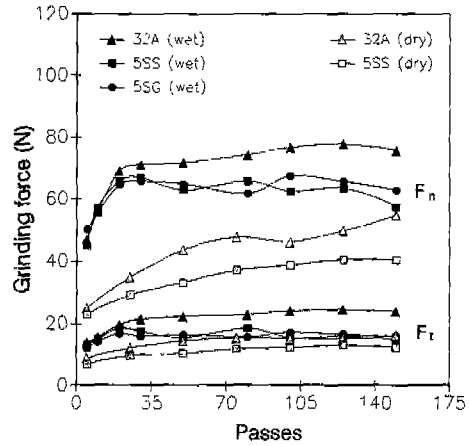


Fig. 9 Grinding forces versus passes for initial stage of grinding (wet & dry grinding) ( $v_s=1729\text{m/min}$ ,  $v_w=13.7\text{m/min}$ ,  $a_p=5\mu\text{m/pass}$ , wheel grade : I)

와 5SG 슷들에 비해 높게 나타나고 있다.

또한 Fig. 10은 이때 연삭횟수의 증가에 따른 마멸면적의 변화를 나타내고 있는데 32A 슷들의 마멸면적율이 5SS 와 5SG 슷들보다 2배 정도 높게 나타나고 있다. 이것은 Fig. 1과 Fig. 3에 보여진 바와 같이 입자의 결정구조와 파쇄강도의 차이에 기인한 것이다. 즉 낮은 파쇄강도를 가진 입자로 구성된 슷들이 마멸이 크게 나타나고 따라서 연삭저항력도 크게 나타나는 것이다.

한편 건식과 습식으로 연삭했을 때의 연삭저항력과 마멸면적을 비교하여 보면 습식연삭에서의 연삭저항력이 건식연삭의 경우보다 1.5 배 정도 크게 나타나고 있으며 마멸면적을 또한 4 배 이상 크게 나타나고 있다. 이러한 습식과 건식연삭에 있어서 연삭저항력과 마멸면적의 차이는 알루미늄 입자에 알루미늄과 철의 반응에 의한 산화물이 용착되는 속도의 차이에서 비롯된다.

Fig. 11은 연삭입자에 산화물이 용착되어 있는 것을 보여준다. 습식연삭의 경우 산화물이 많이 용착되어 있는 반면에 건식연삭의 경우는 산화물 용착이 습식의 경우보다 훨씬 적다. 이것은 습식연삭시 공급되는 연삭유에 포함된 water 성분이 건식연삭시의 공기보다 산화를 더욱 촉진시키기 때문이다.

Fig. 12는 연삭후 연삭입자를 분말로하여 X-RD 시험을 한 결과를 나타낸 그림으로서  $\text{Al}_2\text{O}_3$  는 연삭입자의 성분을 나타내고,  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$  는 연삭입자에 용착된 산화물의 성분을 나타낸다.

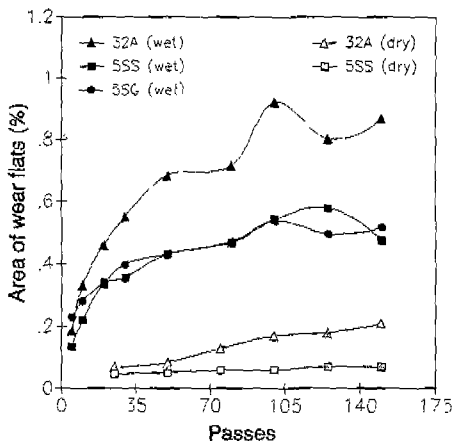


Fig. 10 Area of wear flats versus passes for initial stage of grinding (wet & dry grinding)  
 ( $v_s=1729\text{m/min}$ ,  $v_w=13.7\text{m/min}$ ,  $a_p=5\mu\text{m/pass}$ , wheel grade : I)

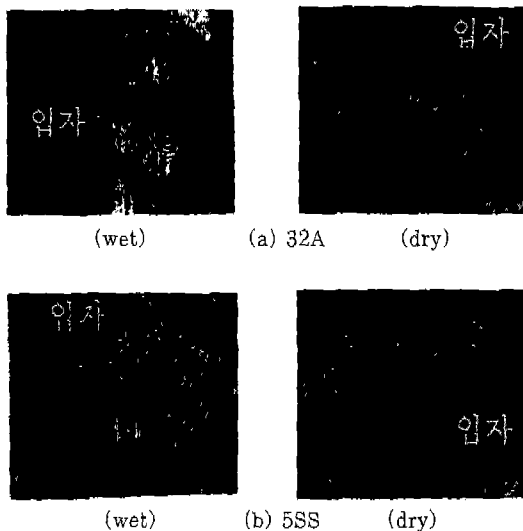


Fig. 11 Micrographs of wear flats showing the difference between wet and dry grinding

Fig. 13은 습식연삭에서 연삭횟수의 진행에 따라 입자가 마멸되어 파쇄와 탈락이 일어나는 것을 관찰하기 위하여 슛돌전체 표면중 한 입자를 선택하여 매 pass마다 슛돌입자를 관찰한 사진이다. 32A 슛돌은 초기의 세 입자가 연삭횟수의 증가에 따라 마멸마모가 진전되다가 50 pass에서 2개의 입자가 탈락하였고, 한 입자는 파쇄되어

있음을 볼 수 있다. 그리고 5SS 입자는 초기부터 150 pass까지 파쇄와 탈락없이 마멸마모만이 진전되고 있다. 이것은 32A 입자는 단결정으로 이루어져 파쇄강도가 낮아 50 pass에서 이미 입자에 작용하는 연삭력이 입자의 파쇄강도를 초과하여 파쇄와 탈락이 일어났으며, 5SS 입자는 다결정으로 이루어져 파쇄강도가 높아 150 pass에서도 입자에 작용하는 연삭력이 입자의 파쇄강도를 초과하지 못하여 마멸마모만이 진전되었음을 나타낸다.

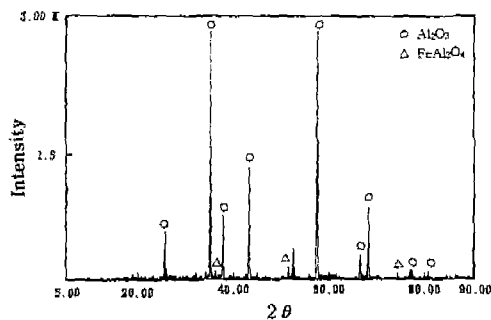


Fig. 12 X-RD analysis of abrasive grain after grinding SKD-11

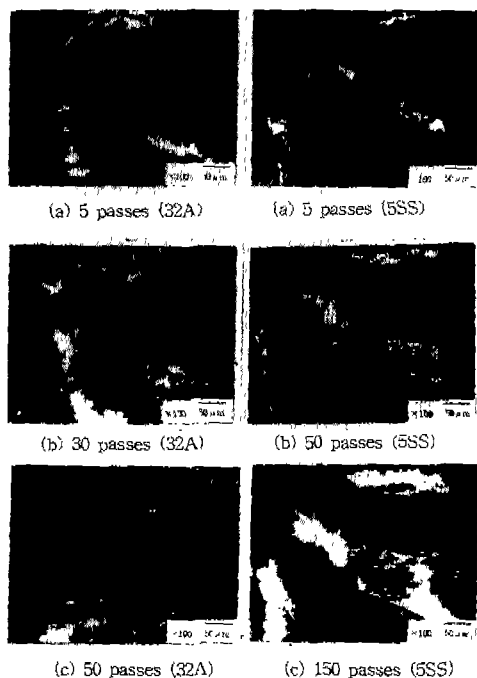


Fig. 13 Photographs of abrasives showing the progress of wear (wet grinding)

4.4 장시간 연삭시의 연삭숫돌의 마멸

Fig. 14와 Fig. 15는 건식연삭에서 장시간 연삭하는 동안 연삭저항력과 평균마멸면적율의 변화를 각각 나타낸 그림이다. Fig. 14에서 32A 입자의 숫돌은 175 pass까지 연삭저항력이 급증하다가 그 이후에 감소하여 각 pass마다 변동을 보이면서 점진적으로 증가하고 있고, 5SS 입자의 숫돌은 400 pass까지 비교적 빠르게 증가하다가 그후 점진적으로 증가하여 550 pass까이에서 32A 입자의 숫돌과 비슷한 값을 나타내고 있다.

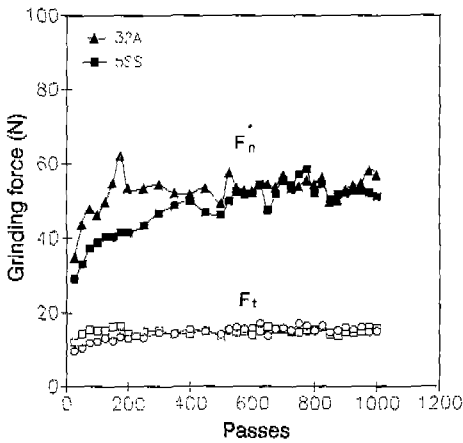


Fig. 14 Grinding forces versus passes for long term grinding (dry grinding)  
 ( $v_s=1729\text{m/min}$ ,  $v_w=13.7\text{m/min}$ ,  $a_p=5\mu\text{m/pass}$ , wheel grade : D)

Fig. 15의 평균마멸면적의 변화에서는 32A 입자의 숫돌은 마멸마모가 빠르게 진전되다가 175 pass에서 상당히 떨어져 그 이후에는 증감이 큰 폭으로 변동하고 있다. 5SS 입자의 숫돌은 시간이 지남에 따라 마멸마모가 점진적으로 증가하다가 650 pass에서 비교적 큰 폭으로 증가하고 그 이후에 감소하여 증감을 반복하는 것을 볼 수 있다. 이러한 마멸면적의 변화는 마멸마모가 심한 입자의 파쇄와 탈락이 일어나고 있는 것을 보여준다. 또한 Fig. 15의 마멸면적이 변동하는 지점이 Fig. 14의 연삭저항력이 변동하는 지점과 일치하는 것을 볼 때 이 지점에서 입자의 파쇄와 탈락이 일어나고 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 16은 이와같이 건식연삭에서 연삭진행중에 입자들이 마멸마모를 시작해서 파쇄, 탈락되는 현상을 관찰하기 위하여 매 pass마다 찍은 사진이다. 32A 입자는 초기

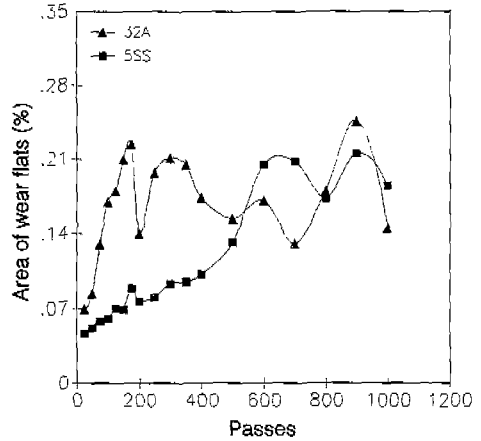


Fig. 15 Area of wear flats versus passes for long term grinding (dry grinding)

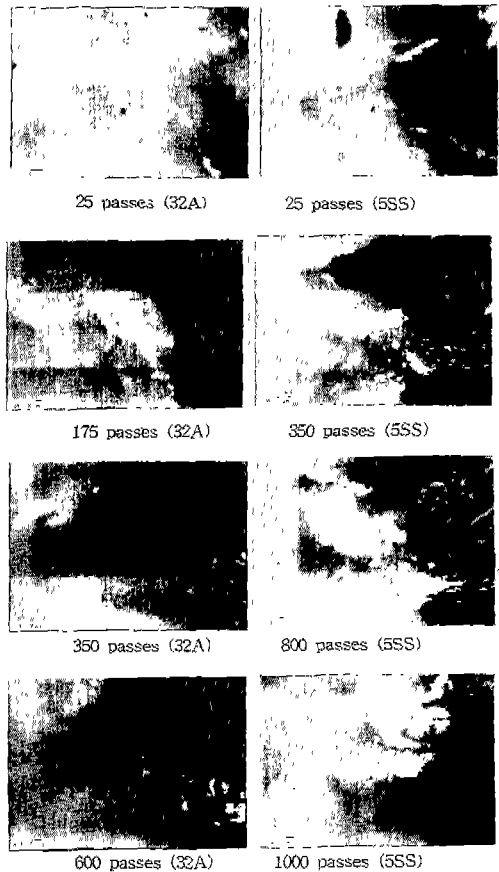


Fig. 16 Photographs of abrasives showing the progress of wear (dry grinding)

마멸마모로부터 마멸이 점진적으로 진전되다가 175 pass에서 입자 하나가 탈락하였고, 350 pass에서 다른 입자의 마멸면적이 더욱 넓어져 탈락하였다. 그리고 나머지 하나의 입자는 파쇄되었다. 600 pass에서는 350 pass에서 파쇄된 입자까지 완전히 떨어져 나가고 새로운 입자가 마멸되기 시작하고 있다. 5SS 입자는 pass의 진행과 함께 마멸마모가 진전되다가 800 pass에서는 그 면적이 비교적 넓어졌고 1000 pass에서 비로소 일부입자가 탈락되었다.

#### 4.5 연삭숫돌의 마멸면적과 연삭저항력

Fig. 17은 습식과 건식연삭에 있어서의 마멸면적과 연삭저항력을 연삭입자의 종류에 관계없이 함께 나타낸 것이다. 이 그래프에서 보면 놀랍게도 모든 데이터가 같은 경향을 나타내는 것을 볼 수 있다. 즉 연삭저항력이 습식연삭, 건식연삭, 연삭입자의 종류에 관계없이 연삭숫돌의 마멸면적에 지수함수적으로 비례하여 증가하는 것이다. 이것은 연삭저항력이 연삭숫돌의 마멸면적에 직선적으로 비례하여 증가한다는 기존의 연구결과<sup>(5) (6)</sup>와 상당한 차이를 나타낸다. 본 연구범위에서의 연삭저항력( $F_n$  &  $F_t$ , Newton)과 마멸면적( $A$ , %)은 다음과 같은 관계를 갖는 것으로 나타났다.

$$F_n = 80 A^{0.30}$$

$$F_t = 25 A^{0.25}$$

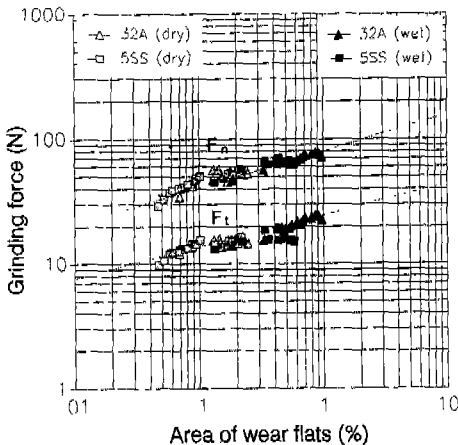


Fig. 17 Grinding forces versus area of wear flats (wet & dry grinding)

#### 5. 결 론

이상의 알루미늄 연삭숫돌의 연삭성능 및 마멸에 관한 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 새로이 개발된 SS 숫돌은 건식 및 습식연삭에서 기존의 고능률연삭용으로 개발된 SG 숫돌과 연삭저항력, 연삭 비, 표면거칠기 등에서 비슷한 성능을 나타내었고 32A 숫돌보다는 월등히 우수한 성능을 나타내었다.

2. 입자의 파쇄강도는 단결정인 32A 입자가 다결정인 5SS와 5SG 입자에 비해 훨씬 낮게 나타났고, 또한 파쇄강도가 낮은 입자를 사용한 숫돌이 파쇄강도가 높은 입자를 사용한 숫돌보다 마멸도 크고 연삭저항력도 높게 나타났다.

3. 습식연삭의 경우가 건식연삭의 경우보다 연삭숫돌의 마멸이 빠르게 일어났으며 연삭저항력도 크게 나타났다. 이것은 습식의 경우가 건식의 경우보다 알루미늄 입자와 철의 반응에 의한 산화작용이 빨리 일어났기 때문이다.

4. 연삭저항력( $F_n$  &  $F_t$ , Newton)은 연삭숫돌의 마멸면적 ( $A$ , %)에 지수함수적으로 비례하여 증가하며, 본 연구의 범위내에서  $F_n = 80 A^{0.30}$ ,  $F_t = 25 A^{0.25}$ 의 관계가 있음을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. Lindsay, R., Ault, W., "The Performance of Seeded Gel Abrasive in Lab and Field Sites", SME, p. 606, 3rd International Conference, Fontana, Wisconsin, 1988.
2. 富田幸男, 盆子原一, 山内勝利, "SGホイールによる高能率研削", 機械と工具, p. 45, 6, 1990.
3. 北村福男, 五反田健二, "SGアルミナ系砥石による鋼の高能率研削", JSPE, vol. 58, no. 4, p. 583.
4. 盆子原一, "SUJ-2 に対するSGホイールの研削特性", ABTEC 90 講演前刷集, 1990.
5. S. Malkin, N. H. Cook, "The Wear of Grinding Wheels, Part 1-Attritious Wear" ASME, p.1120, 11,1971.
6. S. Malkin, N. H. Cook, "The Wear of Grinding Wheels, Part 2-Fracture Wear" ASME, p. 1129, 11,1971.