

<기술논문>

## 페라이트의 연삭성에 관한 연구

김 성 청\* · 이 재 우\*\*

(1997년 2월 13일 접수)

### Study on Grindability of Ferrite

Sung-Chung Kim and Jae-Woo Lee

**Key Words :** Ferrite(페라이트), Grindability(연삭성), Surface Grinding(평면연삭), Grinding Condition(연삭조건), Bending Strength(굽힘강도), Wheel Wear(숫돌마멸)

#### Abstract

This paper aims to clarify the effects of grinding conditions on bending strength in surface grinding of various ferrites with the resin bond diamond wheel. The main conclusions obtained were as follows. At a constant material removal rate, the strength improves with increased wheel depth of cut and decreased workpiece speed. It is desirable to grind at higher peripheral wheel speed and under the critical workpiece speed presented in this paper. Grinding the ferrite of higher brittleness, the wheel depth of cut limited to hold 50% of their inherent strength becomes lower. The effect of various grinding conditions on bending strength becomes more larger in the order of Sr, Mn-Zn and Cu-Ni-Zn. When using the diamond grain of the lower toughness, the bending strength becomes higher, and the wheel wear occurs faster. Considering both bending strength and wheel wear rate, the best concentration of wheel is 100. The ground surfaces exhibit that the fracture process during grinding becomes more brittle in the order of Sr, Mn-Zn and Cu-Ni-Zn.

#### 1. 서 론

우수한 자기(magnetic) 성질을 가지고 있는 페라이트는 모터 및 자기드럼 등의 핵심부품으로 널리 사용되고 있으며, 그 용도 개발이 활발히 이루어지고 있다. 페라이트는 성형·소결에 의해 제조되는데, 소결시는 수축이 동반될 뿐 아니라 성형시의 밀도를 균일하게 하는 것이 곤란하므로, 특히 제품의 형상이 복잡한 경우는 소결만에 의해 형상·치수를 충족시키는 것이 일반적으로 가능하지 않다.

따라서 소결후는 기계가공이 필수 불가결하게 되

는데, 페라이트의 높은 경취성때문에 가공방법으로써 연삭 등과 같이 다이아몬드숫돌입자를 사용한 지립가공이 주체가 되어 있다. 그러나 다이아몬드숫돌에 의한 페라이트의 연삭가공은 가공능률이 매우 낮고, 가공시의 표면부 손상에 따른 강도 및 내마멸성 저하가 큰 문제로 되어 있으며,<sup>(1~6)</sup> 연삭시의 피삭재 파괴현상과 부적절한 연삭에 따른 자성 등의 페라이트 고유특성의 저하도 해결되어야 할 과제로 되어 있다. 우리나라에서도 페라이트의 생산량이 급속히 증가되고 있으나, 페라이트의 연삭 기술이 부족하여 생산량의 50% 이상이 연삭 불량 때문에 폐기되는 경우가 많이 나타남에 따라 막대한 경제적 손실이 발생하여 페라이트의 연삭에 관한 연구가 시급히 요구되어 왔다. 이러한 연삭 불

\*회원, 충북대학교 정밀기계공학과

\*\*회원, 두원공업전문대학 기계과

Table 1 Mechanical and physical properties of various ferrites

Property \ Composition		Mn-Zn	Cu-Ni-Zn	Sr
Density	g/cm <sup>3</sup>	5.3	6.3	4.9
Hardness	HRA	68	59	72
Bending strength (Lapped, 4-point bending)	MPa	380	670	320
Fracture toughness, K <sub>IC</sub>	MPa · m <sup>1/2</sup>	5.1	6.8	4.8
Young's modulus	GPa	200	170	210
Thermal conductivity	W/m · K	29	6.0	28
Thermal expansion coefficient	10 <sup>-6</sup> /K	5.3	8.6	4.1
Sintering		Cold pressed		

량중에서 요구강도의 부족현상이 가장 큰 부분을 차지하며, 일반적으로 랩핑가공한 고유굽힘강도의 50% 이하로 되는 경우에 불량으로 간주되는 경우가 많다. 페라이트의 원료 분말입자의 화학성분, 입자크기 및 형상, 결합제의 종류 및 함량, 성형압력 등의 성형조건, 소결온도 및 소결시간 등의 각 조건을 임의로 변화시킬 수 있다면 연삭 불량은 감소될 것이나, 이러한 조건의 변화는 페라이트의 자기(magnetic) 성질의 저하를 필연적으로 동반하게 되므로 현재의 페라이트 소결체에 대하여 가장 적절한 가공조건을 찾는 것이 필요하다.

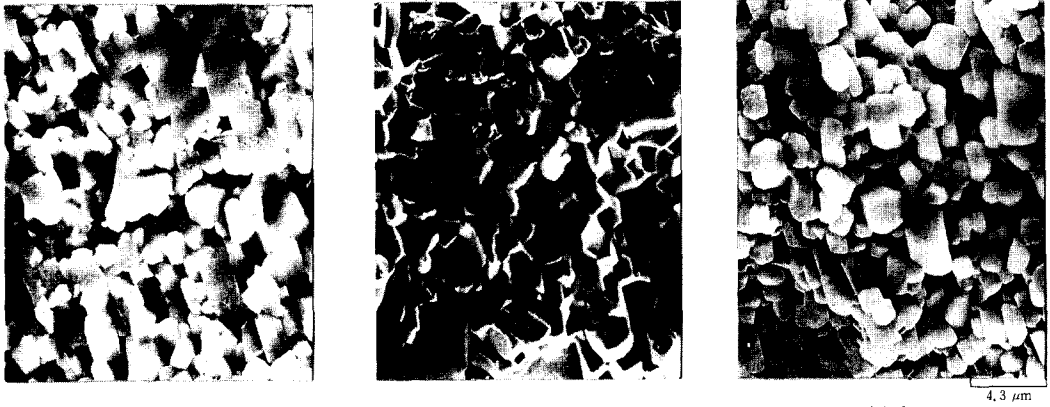
그러나, 통상의 엔지니어링 세라믹 연삭에 관한 연구는 국내외에서 상당수 보고<sup>(7,8)</sup>되어 왔으나, 엔지니어링 세라믹과는 연삭기구 및 재료의 성질이 매우 상이한, 다결정 페라이트의 연삭에 대한 연구 보고가 그다지 없는<sup>(1~6)</sup> 관계로, 페라이트 연삭시의 연삭기구 및 강도에 미치는 연삭조건의 영향이 분명히 밝혀져 있지 않아, 페라이트 연삭가공의 문제 해결에 큰 어려움이 있었다.

따라서 본 연구에서는 다이아몬드숫돌을 사용하여, 상호간에 현저히 다른 기계적 성질을 가지는 Mn-Zn, Cu-Ni-Zn, Sr 다결정 페라이트를 평면 연삭하였을 때의 굽힘강도에 미치는 원주속도, 연삭깊이, 이송속도 및 다이아몬드숫돌조건의 영향을 고찰하고, 강도 향상을 위한 대책을 제시하였다.

## 2. 실험방법

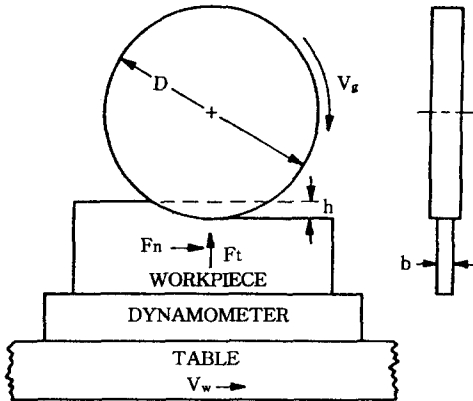
실험에 사용한 피삭재는 Mn-Zn, Cu-Ni-Zn 및 Sr 다결정 페라이트로서, 물리적 및 기계적 성질은 Table 1에서 보여주는 바와 같다. Sr 페라이트의 경취성이 가장 크고, Cu-Ni-Zn 페라이트의 인성이 가장 크며, Mn-Zn 페라이트는 Sr 페라이트에 비해 경도가 약간 낮으나 굽힘강도 및 파괴인성은 다소 높다. Table 1의 굽힘강도는 입도 #200의 레진 본드 다이아몬드숫돌을 사용하여, 숫돌원주속도 1800 m/min, 연삭깊이 5  $\mu$ m, 공작물이송속도 9 m/min에서 시험편의 길이방향으로 평면연삭하여 4.1×5×40 mm 크기의 시험편을 30개 만들고, 다이아몬드 랩핑 머시인에서 시험편의 표면을 약 100  $\mu$ m 제거하여 Table 4에 나타낸 바와 같이 시험편의 치수를 4×5×40로 맞추고, 랩핑한 면을 인장축에 두어 4점 굽힘시험을 행하여 평균값을 구한 것이며, 이하 이 굽힘강도값을 고유굽힘강도(inherent bending strength)라 한다.

Fig. 1은 Mn-Zn, Cu-Ni-Zn 및 Sr 페라이트의 SEM 사진을 보여준다. 결정입자의 크기는 모든 페라이트가 거의 유사한 정도이며, Mn-Zn 페라이트는 결정입자간에 다소 결합이 행해진 상태로 되어 있고, Cu-Ni-Zn 페라이트는 결정입자간의 결합이 완전히 행해진 상태에 있어 입내파괴가 현저함을 알 수 있으며, Sr 페라이트는 결정입자간에 결합이 전혀되어 있지않고 완전한 입계파괴로 되어



(a) Mn-Zn (b) Cu-Ni-Zn (c) Sr

Fig. 1 SEM photographs of fractured surfaces of various ferrites



$V_g$ =peripheral wheel speed  
 $V_w$ =workpiece speed  
 $h$ =depth of cut,  $b$ =width of workpiece  
 $D$ =grinding wheel diameter  
 $F_n$ =normal force component  
 $F_t$ =tangential force component

Fig. 2 Illustration of plunge surface grinding

있다.

연삭실험에 사용된 피삭재는, 원료합성으로부터 소결단계까지의 모든 공정에서 결함이 생성되지 않도록 신중한 조건하에서 채취하였으며, 연삭실험은 고강성, 횡축 정밀연삭기에 의해 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 상향 플런지연삭을 행하였다.

Table 2는 사용 슛돌 및 연삭조건을 보여 준다. 슛돌입자의 인성에 따른 영향을 조사하기 위하여 파쇄성이 다른 3종류의 다이아몬드스�돌입자를 사용하였으며, 슛돌입자의 파쇄성은 입자크기를 균일하게 한 후 진동밀장치에 4분간 넣어둔 후의 중량 %를 측정된 것으로서 A, B, C 입자의 순으로 파쇄성

이 낮다. 슛돌입자의 인성에 따른 영향을 조사하기 위한 실험 이외에는 중간정도의 파쇄성을 가지는 B 입자의 다이아몬드스�돌을 사용하였다. 또한 슛돌 집중도의 영향을 조사하기 위하여 집중도를 3종류로 변화시켰으며, 집중도의 영향을 조사하기 위한 실험 이외에는 슛돌의 집중도를 100으로 일정하게 하였다. 또한 원주속도, 연삭깊이 및 이송속도의 영향을 조사하기 위하여, 각 조건을 변화시켜 연삭하였다.

한편, 모든 연삭은 습식으로 행하였으며, 연삭유는 KS W2종의 2% 희석액을 사용하고 유량은 8 l/min로 일정하게 유지하였으며, 연삭유 노즐의 분사 및 설치조건은 모든 실험에서 동일하게 하였다.

다이아몬드스�돌은 일정시간 연삭후, 2단 레프리 카법을 사용하여 다이아몬드입자의 마멸상태를 SEM으로 관찰하였으며, 상세 방법은 다음과 같다. 아세틸셀룰로즈필름에 아세테이트용액을 떨어트리고 증발하기 전에 슛돌에 붙었다가 분리시켜 두개의 유리사이에 넣고 가볍게 종이클립으로 고정된 상태에서 80°C로 가열된 공기건조로에서 30분간 건조시킨다. 그리고 생성된 표면을 위로하여 유리에 올려두고 필름의 4모서리를 셀로판 테이프로 고정하여 진공중착장치안에 넣고 적절한 각도로 경사시켜 탄소를 증착시킨다. 그 후 가열된 다른 유리에 파라핀을 바르고 파라핀이 용융상태에 있는 동안에 상기의 진공중착된 필름표면을 유리의 파라핀에 접촉시킨다. 이것에 의해 보호필름이 형성되며, 보호필름이 형성된 레프리카필름을 비이크에 담겨 있는 상온의 메틸아세테이트용액에 담그고 3~5분

Table 2 Grinding conditions

Grinding method	Wet surface grinding, Up cut			
Grinding wheel	SD120R (75, 100, 125) B Dimension : $200^p \times 10^t \times 50.8^H$			
	Diamond grain	A	B	C
	Bulk specific gravity	1.86	1.66	1.79
	Friability (wt% :4min)	17.8	27.6	39.8
Peripheral wheel speed, $V_g$	1800 m/min			
workpiece speed, $V_w$	1.5~18 m/min			
Wheel depth of cut, h	20~200 $\mu\text{m}$			
Grinding width, b	5 mm			
Grinding fluid	Soluble type KS W2 2% dilution, 8 l/min			
Workpiece size for grinding force and wheel wear test	$100^{\text{(length)}} \times 5^{\text{(width)}} \times 25^{\text{(height)}}$			
Dressing	Vitrified silicon carbide(#180), Rotary wheel			

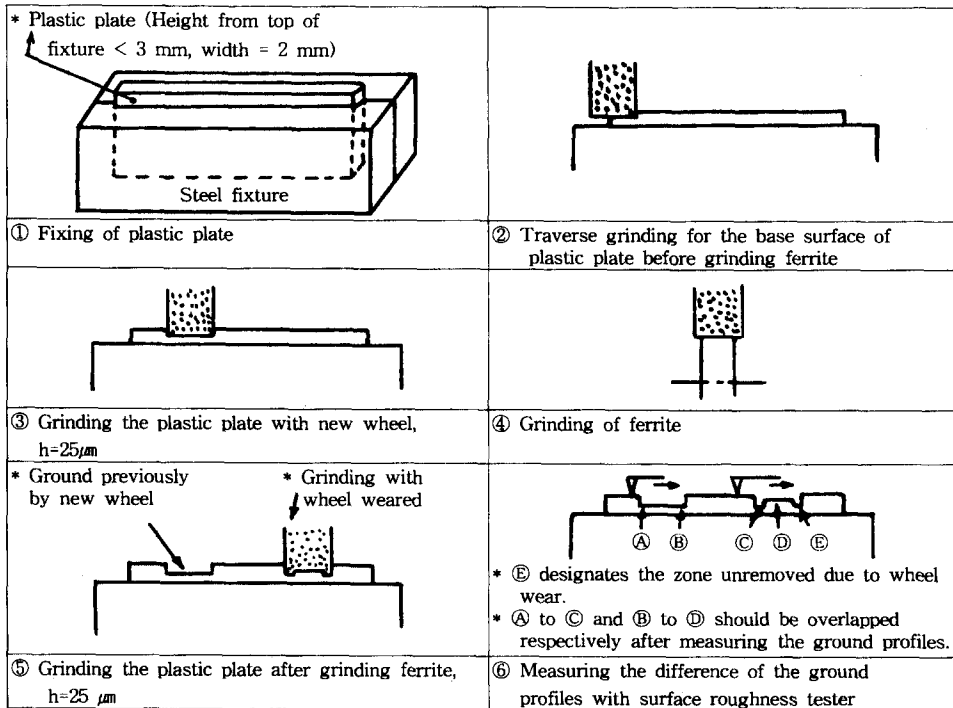


Fig. 3 Illustration of measuring radial wheel wear

후에 50°C로 이미 유지되어 있는 공기건조로에 비이크에 들어있는 상태로 넣는다. 메틸아세테이트용액의 온도가 약 40°C에 달하였을 때부터 보호필름

의 파라핀이 분해되기 시작하고 증착된 레프리카 필름이 유리판에서 떨어져 용액중에서 뜨게 되며, 그것을 같은 온도로 미리 준비해 둔 새로운 메탈아

Table 3 Specification of testing instruments

Universal testing instrument		Tool dynamometer	
Model No.	Instron 4467	Model No.	Kistler 9257A
Capacity	30 kN	Range ( $F_x, F_y, F_z$ )	-5~5 kN
Force rating	30 kN up to 500 mm/min	Calibrated partial range	0~500 N ( $F_x, F_y$ ) 0~1000 N ( $F_z$ )
Load weighting accuracy	$\pm 0.01\%$	Overload	-7.5~7.5 kN
Crosshead speed accuracy	$\pm 0.1\%$	Threshold	<0.01 N
Speed range	0.001~500 mm/min	Sensitivity	-7.5 pC/N ( $F_x, F_y$ ) -3.7 pC/N ( $F_z$ )
Tension-compression cell	Capacity 1000 kg	Linearity	$\leq \pm 1\%$
	Capacity 500 kg	Hysteresis	$\leq 0.5\%$
	Linearity $\pm 0.25\%$	Cross talk	$\leq \pm 2\%$
	Repeatability $\pm 0.25\%$	Rigidity ( $C_x, C_y$ ) ( $C_z$ )	>1 kN/ $\mu$ m >2 kN/ $\mu$ m
	Hysteresis 0.2%	Natural frequency	3.5 kHz
	Output sensitivity 2 mV/V	3 channel charge amplifier	Kistler 5019A
Data treatment	Data acquisition by computer		

세테이트용액에 두번 이동시켜 깨끗하게 세정한다. 세정이 끝난 레프리카필름을 SEM으로 관찰할 수 있도록 동(銅)재료에 2단 레프리카필름을 올려두고 진공증착장치에서 금증착을 행하여 SEM으로 슛돌의 마멸을 관찰한다.

또한 슛돌 마멸량은 Fig. 3과 같은 전사(轉寫)법으로 측정하였으며, 상세 방법은 다음과 같다. 우선 Fig. 3의 ①과 같이 플라스틱판을 강제 고정구로 고정한다. 그 후 ②와 같이 페라이트의 연삭실험 전에 플라스틱판을 트레이스 연삭하여 기초평면을 만들고, ③과 같이 25  $\mu$ m의 연삭깊이로 페라이트 연삭전의 슛돌형상을 전사(轉寫)시킨다. 그리고 ④와 같이 페라이트의 플린지연삭을 행하며, 이때 슛돌 폭의 외곽부는 마멸되지 상태로 된다. 페라이트의 연삭실험 후에 ⑤와 같이 기초평면으로부터 25  $\mu$ m의 연삭깊이로 연삭하여 마멸된 슛돌의 형상을 전사시킨 후, ⑥과 같이 축침식 표면거칠기

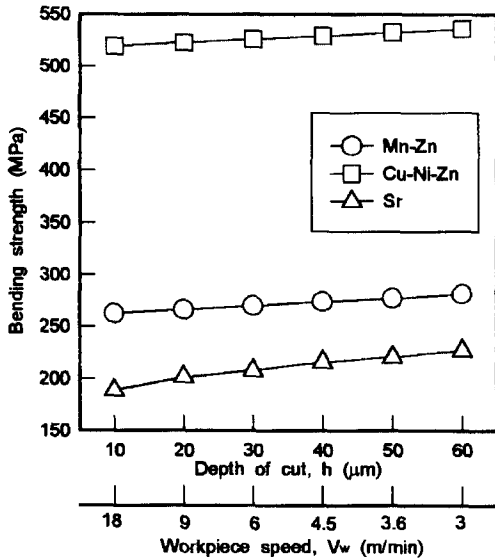
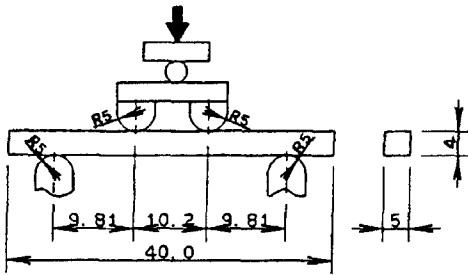
시험기(Form Talysurf Plus)로 형상을 측정한다. 페라이트 연삭 전후의 플라스틱가공부의 측정형상에서 ㉠와 ㉡부 및 ㉢와 ㉣부를 각각 중합시키고 슛돌 마멸에 의해 연삭되지 않은 ㉤부를 측정하는 것에 의해 슛돌 마멸량을 구하였다.

배분력과 접선력 측정을 위한 연삭동력계(KISTLER 9257A) 및 굽힘강도시험을 위한 만능시험기(INSTRON 4467)의 사양을 Table 3에 보여준다. 굽힘강도시험의 방법은 Table 4에서 보여주는 바와 같으며, 압출방향이 시험편의 길이방향이 되도록 절단하고, 절단에 따른 영향을 제거하기 위해 강도에 영향을 미치는 시험편의 4면에 대해, 다이아몬드스툴 SD200R100B, 슛돌원주속도 1800 m/min, 연삭깊이 10  $\mu$ m, 공작물이송속도 6 m/min에서, 최소 200  $\mu$ m 깊이를 길이방향으로 연삭·제거하여 4.5 $\times$ 5 $\times$ 40 mm 크기로 만든 후, 두께 0.5 mm를 시험연삭조건으로 상향 플린지 연삭하였다.

연삭면을 굽힘시험시의 인장축에 두었으며 각 연삭 조건당의 시험편은 30개로 하고 평균값을 취하였다.

Table 4 Conditions for bending test

Test method	4-points bending test
Servo system	Electron hydraulics
Atmosphere	In atmospheric air
Cross head speed	0.1 mm/min
Support	φ5 mm Round bar (Steel)



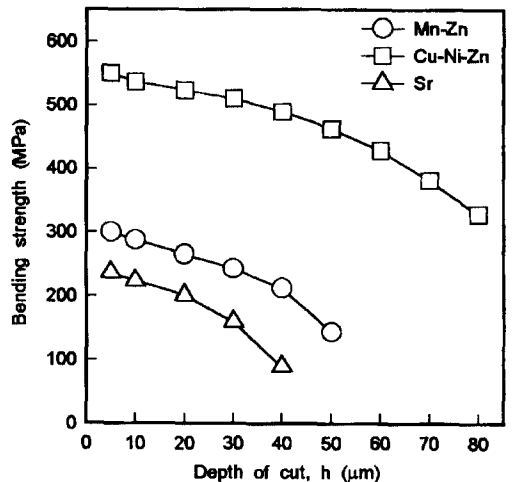
Wheel : SD120R100B, V<sub>g</sub>=1800 m/min  
Stock removal rate=180 mm<sup>3</sup>/mm<sup>3</sup> · s

Fig. 4 Effect of depth of cut and workpiece speed on bending strength after grinding in constant stock removal rate

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 굽힘강도에 미치는 연삭조건외 영향

Fig. 4는 재료제거속도(stock removal rate)를 180 mm<sup>3</sup>/mm<sup>3</sup> · s로 일정하게 유지할 때 연삭깊이 및 공작물이송속도를 변화시킨 경우의 굽힘강도의 변화를 보여준다. 모든 페라이트의 연삭에서 재료 제거속도가 일정하더라도 이송속도를 작게 하고 연삭깊이를 크게 한 경우가 굽힘강도가 높아진다. 동일한 재료제거속도에서 연삭깊이가 커짐에 따라 굽힘강도가 향상되는 것은, 동일한 재료제거속도에서는 연삭깊이가 커짐에 따라 슷돌입자당 연삭깊이가 작아져서 슷돌의 강제절입시에 균열생성 및 파괴의 규모가 작아지기 때문으로 생각된다. 또한 일정한 재료제거속도에서 절삭깊이가 60~10 m/min로 감소됨과 동시에 이송속도가 3~36 m/min로 증가됨에 따른 각 페라이트의 굽힘강도의 감소량을 Table 1의 고유굽힘강도에 대한 백분율로 나타내면, Mn-Zn이 5%, Cu-Ni-Zn은 2.5%, Sr은 12%로 되어, 취성이 큰 페라이트일수록 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 취성이 큰 페라이트일수록 고유 굽힘강도에 대한 감소율이 커지는 것은 슷돌입자당 연삭깊이가 증가되는 경우에, 취성이 큰 재료일수록 균열생성, 파괴규모 및 표면결함의 증가율이 커지기 때문으로 생각된다.



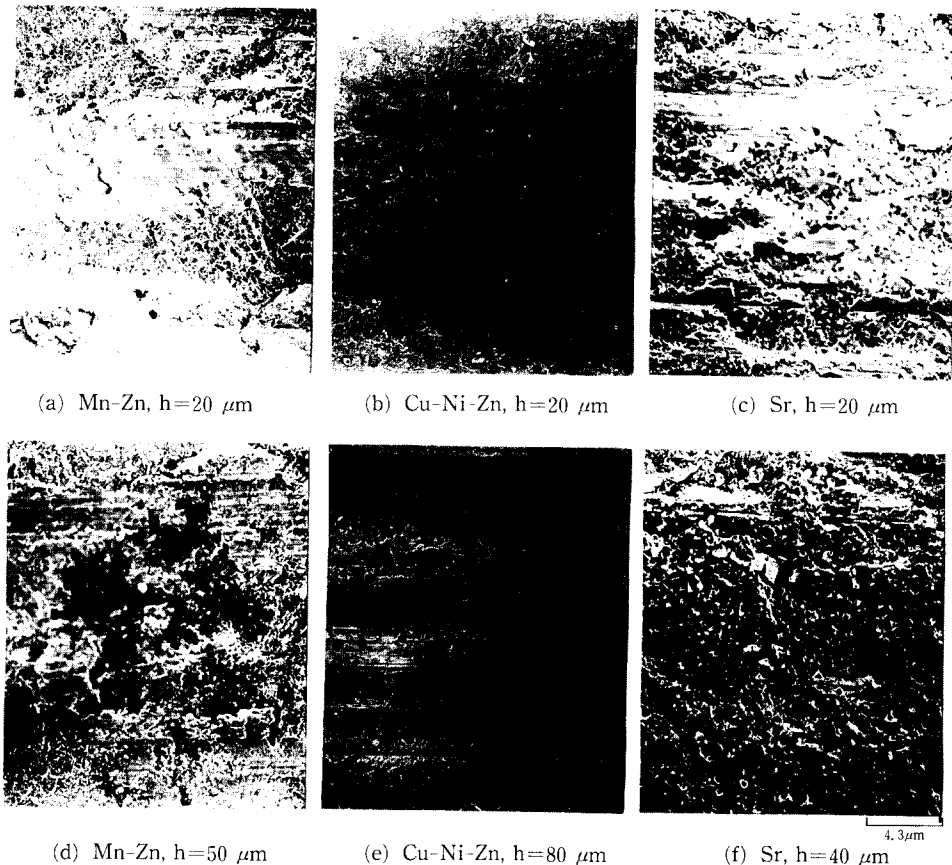
Wheel : SD120R100B, V<sub>g</sub>=1800 m/min  
V<sub>w</sub>=9 m/min

Fig. 5 Effect of depth of cut on bending strength of various ferrites after grinding

Fig. 5는 슷돌원주속도 및 공작물이송속도를 일정하게 하고 연삭깊이를 변화시킨 경우의 굽힘강도의 변화를 보여준다. 연삭깊이가 증가됨에 따라 각 페라이트의 굽힘강도는 저하되고 있으며, 그 감소율은 취성이 클수록 크게 나타난다. 일반적으로 페라이트의 연삭 후의 굽힘강도가 고유굽힘강도의 50% 이하로 되는 경우에 불량으로 처리하는 경우가 많은데, 고유굽힘강도의 50% 이하로 되는 연삭깊이는 Mn-Zn이 50  $\mu\text{m}$ (제거속도=450  $\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ ), Cu-Ni-Zn이 80  $\mu\text{m}$ (제거속도=720  $\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ ) 및 Sr이 40  $\mu\text{m}$ (제거속도=360  $\text{mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$ )로 되어 페라이트의 취성이 클수록 불량률을 억제하기 위한 연삭깊이가 작아지게 된다.

Fig. 6은 각 페라이트를 동일한 절삭깊이 20  $\mu\text{m}$ 로 연삭한 것과, 각 페라이트의 연삭 후의 굽힘강도가 Fig. 5에서 보여준 고유굽힘강도의 50% 이하로 되는 연삭깊이에서 연삭한 경우의 연삭면의

SEM 사진을 보여준다. 연삭깊이 20  $\mu\text{m}$ 에서 연삭한 경우의 연삭면을 보면, Mn-Zn 페라이트는 소성유동형과 취성파괴형의 면적률이 거의 동일하게 되며, Cu-Ni-Zn 페라이트는 대부분이 소성유동형으로 되고 평탄하며, Sr 페라이트는 소성유동의 흔적이 다소 존재하고 취성파괴형이 현저히 많이 나타난다. 그러나 굽힘강도가 고유굽힘강도의 50% 이하로 되는 연삭깊이에서 연삭한 경우는 Fig. 6(d), (e), (f)와 같이, Mn-Zn 페라이트는 소성유동형이 일부 존재하고 취성파괴형이 많으며, 심한 손상을 가지는 연삭면을 보여주며, Cu-Ni-Zn 페라이트는 연삭깊이 20  $\mu\text{m}$ 에 비해 취성파괴형이 상당히 증가되었으며, Sr 페라이트는 소성유동형이 거의 존재하지 않는 완전한 취성파괴형으로 되어 있으며 연삭면의 손상이 극히 현저함을 알 수 있다. 따라서 연삭깊이가 작은 경우, 페라이트의 동일 연삭깊이에서의 연삭면은 경도에 비해 인성이



Wheel : SD120R100B,  $V_w=1800$  m/min,  $V_g=9$  m/min  
**Fig. 6** SEM photographs of ground surface of various ferrites

높을수록 소성유동형으로 되고, 인성에 비해 경도가 높을수록 취성과파괴형으로 되는 것으로부터 페라이트의 취성이 높을수록 연삭면의 손상이 증가하기 때문에 Fig. 5와 같이 동일 연삭깊이에서 페라이트의 취성이 클수록 고유굽힘강도에 대한 굽힘강도의 감소율이 큰 것으로 판단된다. 또한 연삭깊이가 증가할 수록 각 페라이트의 연삭면은 소성유동형이 적어짐과 동시에 취성과파괴형이 많아지고, 표면부의 결함이 많아지며, 페라이트의 취성이 클수록 연삭깊이의 증가에 따른 표면손상의 증가율이 증가하므로, Fig. 5에서 나타난 바와 같이 취성이 큰 페라이트 일수록 연삭깊이가 커짐에 따른 굽힘강도의 감소율이 높아지는 것으로 사료된다.

Fig. 7은 연삭깊이 40  $\mu\text{m}$ , 스톨원주속도 1800 m/min로 일정하게 유지한 경우에 페라이트의 굽힘강도에 미치는 공작물이송속도 및 스톨원주속도의 영향을 보여준다. 이 경우에도 모든 원주속도에서 페라이트의 취성이 클수록 공작물이송속도가 증가됨에 따른 굽힘강도의 감소율이 커지게 된다. 또한 굽힘강도가 급격히 저하되는 이송속도가 존재하는데 이것을 임계이송속도라 정의하면, 이러한 임계이송속도는 Mn-Zn이 9 m/min(제거속도 = 360  $\text{mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$ ), Cu-Ni-Zn이 15 m/min(제거속도 = 600  $\text{mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$ ) 및 Sr이 6 m/min(제거속도 = 240  $\text{mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$ )로서 페라이트의 취성이 클수록 낮아지고, 또한 스톨원주속도의 감소에 따라 임계이송속도가 낮아진다. 이러한 임계이송속도 이상의 조건에서 연삭한 경우의 연삭면에는 미세한 표면균열이 관찰되는 경우가 많았다. 이송속도가 증

가하면 스톨입자당 연삭깊이가 커지고, 재료제거속도(stock removal rate)가 증가되므로 연삭표면에 미세균열 등의 손상이 생성되기 쉽게 되며, 임계이송속도 이상에서의 연삭면에 이러한 표면손상이 용이하게 생성되어 강도가 급격히 저하된 것으로 생각된다. 한편 스톨의 원주속도가 증가될수록 굽힘강도는 향상되며, 이러한 원주속도의 영향은 특히 이송속도가 클수록, 또한 페라이트의 취성이 클수록 크게 나타난다. 스톨의 원주속도가 증가될수록 굽힘강도가 커지는 것은 스톨의 원주속도가 증가됨에 따라 스톨의 입자당 연삭깊이가 작아지기 때문

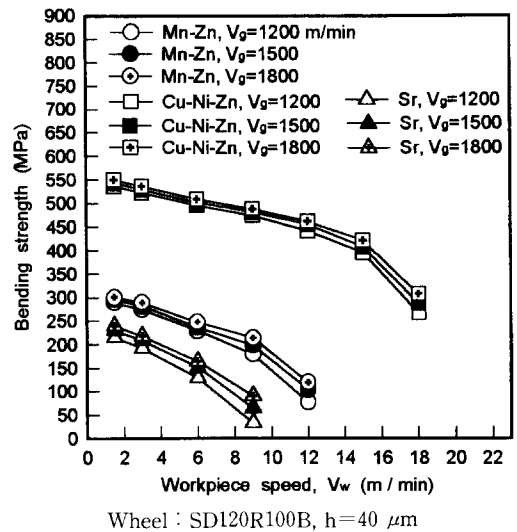


Fig. 7 Effect of workpiece speed and peripheral wheel speed on bending strength after grinding



(a) A grain



(b) C grain

Fig. 8 SEM photographs of diamond grains with different toughness



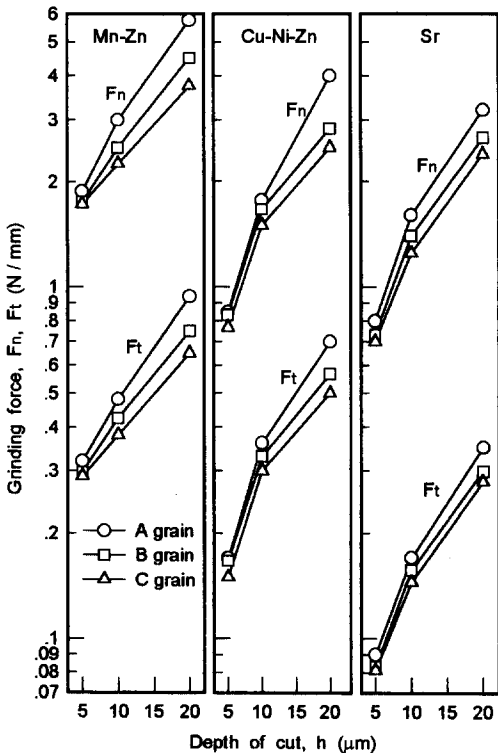
에 슛돌입자의 강제절입에 따른 균열생성의 규모가 작아지고 다소 미시적 파괴로 되어 표면손상이 적어진 때문으로 생각된다. 또한 취성이 큰 페라이트 일수록 이송속도 및 슛돌의 원주속도 변화에 따른 균열 및 파괴규모의 변화가 심하기 때문에 이러한 연삭조건에 따른 굽힘강도의 차가 크게 나타나는 것으로 사료된다. 따라서 불량률을 감소시키기 위해서는 슛돌의 원주속도를 높게 하고, 임계 이송속도 이하에서 연삭하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

3.2 슛돌입자 인성 및 슛돌 집중도의 영향

Fig. 8은 슛돌입자 인성의 영향을 조사하기 위하여 사용된 다이아몬드입자 A 및 C의 주사현미경사진을 보여준다. 다이아몬드입자 B의 외관형태는 C와 동일하기 때문에 생략하였다. 다이아몬드입자의 입도는 #120으로서 동일하며, A 입자의 외관형태는 다면체 형상(약 6%) 과 불규칙적인 형상(약 94%)

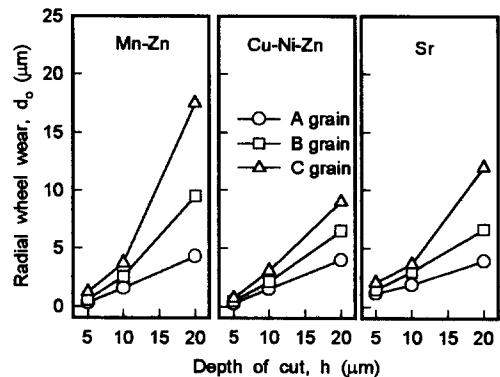
이 공존하나 인성은 동일한 값을 나타내었으며, B 및 C 입자는 전부가 불규칙적 형상으로 구성되어 있으며, A, B, C의 순서로 다이아몬드입자의 인성이 현저히 높다.

다이아몬드입자를 달리한 경우의 연삭깊이와 연삭저항과의 관계를 Fig. 9에, 연삭깊이와 슛돌 반경감소량과의 관계를 Fig. 10에 보여준다. 여기서 모든 피삭재의 배분력 및 접선력은 A, B, C 입자의 순으로 크다는 것을 알 수 있다. 또한 연삭스�돌의 마멸에 따른 반경감소량은 모든 피삭재에서 A, B, C 입자의 순으로 작다. Mn-Zn 페라이트를 연삭한 경우에는, 모든 다이아몬드입자가 연삭깊이의 증가에 따라 편대수 그래프상에서 연삭저항이 직선적으로 높아짐을 보여준다. 한편 슛돌의 반경감소량은 A 입자의 경우는 슛돌 반경감소량이 연삭깊이의 증가에 따라 직선적으로 커지지만, B 및 C 입자를 사용한 경우는 연삭깊이가 증가됨에 따라 슛돌 반경감소량의 증가율이 상당히 높아지며, 특히 연삭깊이 20  $\mu\text{m}$ 에서는 C 입자의 반경감소량은 A 입자의 약 4배가 된다. 따라서 Mn-Zn 페라이트의 연삭에는 입자 C는 적합하지 않다고 할 수 있다. 또한 입자 B는 연삭저항과 슛돌 반경감소량이 입자 A와 C의 중간 값을 나타내고 있다. Cu-Ni-Zn 페라이트를 연삭한 때는, B 및 C 입자는 연삭깊이 5~10  $\mu\text{m}$  비해 10~20  $\mu\text{m}$ 에서의 배분력의 증가율이 현저히 낮으나, A 입자의 배분력 증가율은 그다지 저하되지 않으므로 20  $\mu\text{m}$ 에서의 A 입자의 배분력은 B 및 C 입자의 경우에 비해 현저히 높다. 한편 Cu-Ni-Zn 페라이트에서는 슛돌의 반경감



Wheel : SD120R100B,  $V_g=1800$  m/min  
 $V_w=9$  m/min

Fig. 9 Effect of depth of cut and diamond grain toughness on grinding force in grinding of various ferrites



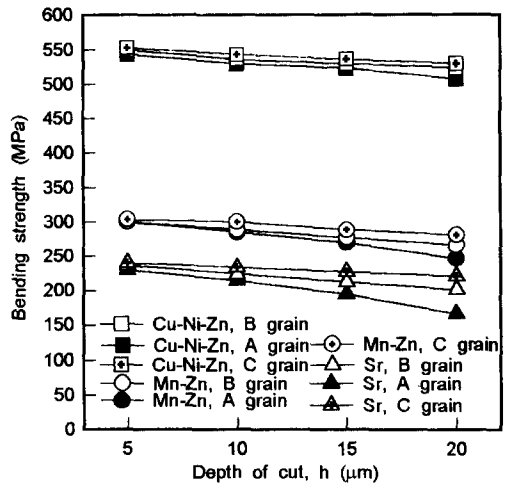
Wheel : SD120R100B,  $V_g=1800$  m/min  
 $V_w=9$  m/min, Grinding length : 400m

Fig. 10 Effect of depth of cut and diamond grain toughness on radial wheel wear

소량이 모든 입자에서 연삭깊이의 증가에 따라 직선적으로 커지고, 슛돌입자의 변화에 따른 영향이 다른 페라이트에 비해 가장 작게 나타난다. 이것은 모든 연삭깊이에서 다이아몬드입자 인성의 변화에 따른 다이아몬드 마멸기구의 변화가 3종류의 페라이트 중에서 가장 작다는 것을 의미한다. 한편 Sr 페라이트 연삭시의 연삭저항은 모든 연삭깊이에서 다이아몬드입자의 인성변화에 따른 영향이 가장 작게 나타나며, 슛돌의 반경감소량에 미치는 다이아몬드입자 인성의 영향은 Mn-Zn과 Cu-Ni-Zn의 중간 규모로 작용한다. 따라서 Sr은 페라이트 구성입자의 경도가 높기 때문에 다이아몬드입자의 인성에 따른 반경감소량의 변화는 크지만, Sr의 인성이 낮아 전술한 바와 같이 연삭칩의 생성기구는 주로 취성파괴형으로 되기 때문에 다이아몬드입자의 인성변화에 따라 절삭날의 마멸상태 및 입자형상이 변화하더라도 연삭저항에 미치는 영향이 작게 나타나는 것으로 생각된다.

Fig. 11은 다이아몬드입자를 달리한 경우의 연삭깊이와 굽힘강도와와의 관계를 보여준다. 슛돌 입자의 인성이 높을수록 페라이트의 굽힘강도는 낮아지게 되며, 이러한 슛돌입자 인성의 영향은 연삭깊이가 증가될수록 커지게 된다. 또한 페라이트의 취성이 클수록 슛돌입자 인성의 영향이 크게 나타난다. Sr 페라이트는 슛돌입자 인성의 변화에 따른 연삭시의 파괴기구의 변화가 작기 때문에, Fig. 9와 같이 연삭저항에 미치는 슛돌입자 인성의 영향은 가장 작게 나타났었다. 그러나 페라이트의 취성이 클수록 굽힘강도에 미치는 슛돌입자 인성의 영향이 크게 되는 것은, 취성이 큰 페라이트 연삭시의 파괴기구의 변화는 작지만 슛돌입자의 인성에 따른 균열생성 및 파괴규모의 변화는 현저하게 나타나기 때문으로 생각된다. 한편 슛돌입자의 인성이 높을수록 페라이트의 굽힘강도가 저하되는 것은 인성이 높을수록 슛돌입자의 절입시에 큰 표면손상을 일으키고, 슛돌입자에서 새로운 절삭날이 생성되기 어렵기 때문이며, 이것에 의한 영향은 연삭깊이가 증가할수록 크게 되므로 연삭깊이가 증가됨에 따라 슛돌입자 인성에 따른 굽힘강도의 변화가 커지는 것으로 사료된다. 따라서 페라이트의 연삭에서 굽힘강도는 슛돌입자의 인성이 낮을수록 유리하지만 Fig. 10에서 나타난 바와 같이 슛돌입자의 인성이 낮을수록 슛돌 마멸량이 현저히 커지므로 제품의 요구조건에 따라 슛돌입자를 선정함이 바람직하다.

Fig. 12는 40  $\mu\text{m}$ 의 연삭깊이에서, B 입자를 사용하여 각 페라이트를 연삭한 경우에 다이아몬드 입자의 마멸형태를 보여준다. Cu-Ni-Zn 페라이트를 연삭한 경우의 다이아몬드입자는 연삭시에 새로운 절삭날의 생성이 적고, 입자의 표면은 어브레시브마멸에 의해 매끈하게 되어 있다. Sr 페라이트를 연삭한 경우의 다이아몬드입자는 미세칩핑이 많이 생성되어 있으며 또한 연삭시의 다이아몬드입자의 적절한 파괴에 의해 많은 예리한 절삭날이 생성되어 있음을 알 수 있다. 한편 Mn-Zn 페라이트 연삭시의 다이아몬드입자는 대·소규모의 많은 칩핑 및 손상을 보여주고 있다. Cu-Ni-Zn의 연삭에서는 피삭재의 인성이 높는데 비해 경도가 매우 낮아 피삭재와 다이아몬드입자간의 충격이 비교적 약하기 때문에 다이아몬드입자의 칩핑 및 파손이 일어나기 어려워 어브레시브 마멸이 주 마멸기구로 되는 것으로 생각된다. Mn-Zn 페라이트의 연삭시는 피삭재의 강도 및 경도가 높기 때문에 피삭재와 다이아몬드입자간의 충격이 커서 다이아몬드입자의 대·소규모 칩핑 및 파손이 발생하기 쉽기 때문에 B 및 C 입자에서 슛돌의 반경감소량이 다른 페라이트 연삭시 보다 현저히 크게 나타나는 것으로 생각된다. 한편 Sr 페라이트는 경도는 높으나 인성이 매우 낮아 연삭시의 크랙생성이 용이하므로 연삭시의 피삭재와 다이아몬드입자간의 충격은 Mn-Zn에



Wheel : SD120R100B,  $V_g=1800$  m/min  
 $V_w=9$  m/min

Fig. 11 Effect of depth of cut and diamond grain toughness on bending strength of various ferrites after grinding



(a) Workpiece : Mn-Zn



(b) Workpiece : Cu-Ni-Zn



(c) Workpiece : Sr

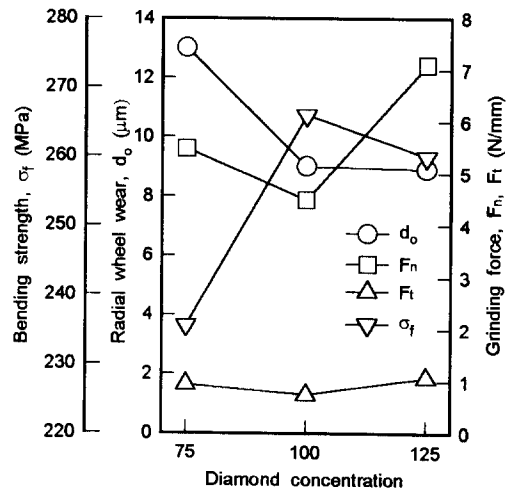
Wheel : SD120R100B,  $V_g=1800$  m/min  
 $V_w=9$  m/min,  $h=40\mu\text{m}$   
 Stock removal= $8000$  mm<sup>3</sup>/mm,  
 Diamond grain type : B

Fig. 12 Wear patterns of diamond grain after grinding various ferrites

비해 작으나, Sr 페라이트 구성입자의 경도는 높기 때문에, 소규모 칩핑 및 소규모 파손이 많은 마멸 형태를 보여주는 것으로 생각된다.

이러한 다이아몬드입자의 마멸기구로부터, Fig. 9에서 Cu-Ni-Zn 페라이트를 숫돌입자 A, 연삭깊이  $20\mu\text{m}$ 으로 연삭한 때에 배분력이 현저히 커지는 것은, 숫돌입자 A는 입자강도가 크고, 인성도 크기때문에 숫돌의 반경감소량은 작지만 절삭날의 선단부 마멸이 진행되어도 새로운 절삭날의 생성이 곤란하기 때문에  $20\mu\text{m}$ 에서의 연삭저항이 현저히 증대되는 것으로 생각된다. 숫돌입자 B 및 C는 연삭깊이  $20\mu\text{m}$ 에서 숫돌입자의 인성이 낮기 때문에 마멸에 따른 새로운 절삭날이 A 입자에 비해서는 다소 용이하게 생성되어 A 입자에 비해 연삭저항이 낮아진다.

한편 숫돌입자, 결합도 및 결합제를 일정하게 하고, 숫돌 집중도만을 75, 120, 125로 변화시킨 숫돌을 이용하여 Mn-Zn 페라이트를 연삭한 경우의 굽힘강도, 숫돌 반경감소량 및 연삭저항에 미치는 숫돌 집중도의 영향을 Fig. 13에 보여준다. 집중도가 75에서 100으로 증가됨에 따라 숫돌 마멸은 저하되고 있으나, 숫돌 집중도가 125로 더욱 증가될 때 숫돌 마멸은 집중도 100의 경우와 거의 동일한 값을 보여주고 있다. 연삭저항의 경우는 숫돌 집중도 100을 정점으로 하여 가장 낮은 값을 보여주고 있



Wheel : SD120R (75, 100, 125) B  
 $V_g=1800$  m/min,  $V_w=9$  m/min,  $h=20\mu\text{m}$ ,  
 Grinding length= $400$  m

Fig. 13 Effect of diamond concentration on bending strength, wheel wear and grinding force in grinding of Mn-Zn

으며, 집중도가 더욱 낮거나 높아지는 경우에 연삭 저항은 높아지게 된다. 슛돌 집중도가 75의 경우는 절삭날이 적기 때문에 슛돌입자의 마멸이 커지고 연삭저항이 높아지며, 슛돌 집중도가 125의 경우는 칩 포켓이 적기 때문에 눈막힘이 일어나서 연삭저항이 높아지고 연삭성능이 악화되어 슛돌 집중도가 100을 정점으로 집중도가 더욱 높아지더라도 슛돌 마멸량의 감소를 피할 수 없는 것으로 생각되어진다. 또한 굽힘강도에 미치는 슛돌 집중도의 영향은, 슛돌 집중도 100에서 가장 높은 굽힘강도를 보여주며, 집중도가 더욱 낮거나 높아지는 경우에 굽힘강도는 저하된다. 집중도가 낮은 경우는 절삭날이 적고 슛돌입자당 연삭깊이가 커지게 되므로 연삭시에 균열생성과 파괴규모가 커지게 되어 표면손상이 더욱 많아진 때문이라 생각되며, 슛돌의 집중도가 125로 증가되는 경우에는 슛돌에 눈막힘이 용이하게 일어나고, 슛돌입자의 적절한 절입이 어렵고, 연삭칩의 배출성도 나빠지게 되어 슛돌 집중도 100에 비해 굽힘강도가 다소 저하되는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

Mn-Zn, Cu-Ni-Zn, Sr 페라이트의 연삭불량 발생률을 줄이기 위해 굽힘강도에 미치는 연삭조건의 영향을 검토한 결과, 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

(1) 동일한 재료제거속도에서는 공작물이송속도를 작게(36~3 m/min)하고 연삭깊이를 증가(10~60  $\mu\text{m}$ )시킴에 의해 각 페라이트의 굽힘강도는 고유굽힘강도의 2.5~12% 향상되며, 이 영향은 페라이트의 취성이 높을수록 크다.

(2) 슛돌원주속도 및 공작물이송속도를 일정하게 하고 연삭깊이를 변화시킨 경우, 연삭 후의 굽힘강도가 고유굽힘강도의 50% 이상이 되는 연삭깊이(h)는 Mn-Zn이  $h \geq 40 \mu\text{m}$ (제거속도=360 mm<sup>3</sup>/mm·s), Cu-Ni-Zn이  $h \geq 70 \mu\text{m}$ (제거속도=630) 및 Sr이  $h \geq 30 \mu\text{m}$ (제거속도=270)로 되어 취성이 클수록 불량률을 억제하기 위한 연삭깊이가 작아진다.

(3) 연삭깊이가 일정한 경우에 굽힘강도가 급격히 저하되는 이송속도가 존재하는데 이러한 임계이송속도는 페라이트의 취성이 클수록 또한 슛돌원주속도가 감소될수록 낮아진다. 한편 페라이트의 취성이 클수록 공작물이송속도의 증가 및 슛돌원주속

도의 감소에 따른 굽힘강도의 감소율이 크다.

(4) 슛돌의 원주속도가 증가될수록 굽힘강도는 향상되며 이러한 원주속도의 영향은 특히 이송속도가 클수록, 또한 페라이트의 취성이 높을수록 크다. 따라서 불량률을 감소시키기 위해서는 슛돌의 원주속도를 높게 하고, 임계이송속도 이하에서 연삭하는 것이 바람직하다.

(5) 슛돌입자의 인성이 낮을수록 페라이트의 굽힘강도 및 슛돌마멸이 커지며, 이러한 슛돌입자 인성의 영향은 연삭깊이가 증가될수록 커진다. 또한 페라이트의 취성이 높을수록 굽힘강도에 미치는 슛돌입자 인성의 영향이 크다.

(6) 슛돌 집중도 100에서 가장 높은 굽힘강도를 보여주며, 집중도가 더욱 낮거나 높아지는 경우에 굽힘강도는 감소된다. 또한 슛돌 마멸량은 집중도가 증대되면 감소하나 집중도 100을 정점으로 하여 더 이상 집중도가 높아져도 슛돌 마멸량은 감소되지 않는다.

(7) 동일 연삭조건에서의 연삭면은, 페라이트의 취성이 클수록 취성파괴형으로 되기 쉽고 인성이 클수록 소성유동형으로 되기 쉬우며, 재료제거속도가 증가할수록 취성파괴형의 면적률이 높아진다.

#### 참고문헌

- (1) Chandrasekar, S., Show, M. C. and Bhushan, B., 1987, "Comparison of Grinding and Lapping of Ferrite and Metals," *Trans, ASME, Ser. B*, Vol. 109, pp. 76~82.
- (2) Chandrasekar, S., Show, M. C. and Bhushan, B., 1987, "Morphology of Ground and Lapped Surfaces of Ferrite and Metal," *Trans, ASME, Ser. B*, Vol. 109, pp. 83~86.
- (3) Ohbuchi, Y. and Matsuo, T., 1995, "Chipping in High-Precision Slot Grinding of Mn-Zn Ferrite," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, No. 1, pp. 273~277.
- (4) Miyake, S., Watanabe, J., Ueno, Y. and Tsuruta, K., 1977, "Ferrites Precision Grinding (1st Report)," *Journal of JSPE*, Vol. 43, No. 12, pp. 1415~1420.
- (5) Miyake, S., Tsuruta, K., Watanabe, J. and Ueno, Y., 1977, "Ferrites Precision Grinding (2nd Report)," *Journal of JSPE*, Vol. 44, No. 9, pp.

- 1050~1056.
- (6) Makino, M., Nakata, K. and Omura, T., 1987, "Precision Machining in the manufacture of Magnetic Heads," *Proc. of 6th ICPE*, pp. 323~328.
- (7) 허성중, 김원일, 1993, "WC-Co의 고능률적 연삭가공조건에 관한 연구," 대한기계학회논문집, Vol. 17, No. 3, pp. 721~730.
- (8) Li, K. and Liao, W. , 1996, "Surface/Subsurface Damage and the Fracture Strength of Ground Ceramics," *J. Materials Processing Technology*, Vol. 57, pp. 207~220.