

자성유체 연마법을 이용한 세라믹볼 베어링 가공장치의 개발

엄호성* · 노병옥* · 이수완** · 장태석**

(1997년 4월 11일 접수)

Development of Machining Apparatus for Ceramic Ball Bearing

Ho-Sung Aum, Byung-Ok Roh, Soo-Wohn Lee and Tae-Suk Jang

Key Words : Ceramic Ball Bearing(세라믹볼 베어링), Magnetic Fluid Grinding(자성유체 연마법), Machinability(가공성)

Abstract

Recently a new process known as the magnetic fluid grinding has been developed, which can remove material from the surface of ceramic balls by fifty to one hundred times more rapidly than the conventional lapping process. In this study, the ceramic balls with various compositions are made and ground by using the magnatic fluid grinding technique with various machining parameters. In order to make well-round shaped balls by using the magnetic fluid grinding technique, the fundamemtal research to find out the machining factors has been carried out. Developing an equipment with higher efficiency and reliability in the machining could certainly lead to the higher productivity with excellent quality of ceramic balls.

1. 서 론

하인 세라믹스(fine ceramics)를 소재로 한 세라믹 ball, 세라믹 roller 등은 비중이 적고 내열, 내산화, 내마모성 등이 우수하여 일반적 용도는 물론, 극한 상황에서 운용되는 기계들에 사용될 수 있는 중요 소재 부품으로서 많은 기대를 받고 있다. 그러나 세라믹 특유의 과도한 경도와 취성에 의한 가공상의 어려움 때문에 실질적으로 그 수요의 폭이 넓지 못한 편이며, 필요에 따라 주문 생산 및 공급이 이루어지고 있다. 이러한 세라믹 부품의 가공에는 종래의 금속 부품 제조가공에 사용되어 오던 성형, 절단, 연마방법 등은 사용될 수 없다. 일반적으로 다이아몬드 wheel을 사용한 연마방법이 폭넓게 이용되고 있으나, 장시간의 가공이 필요

함은 물론 비용이 많이 들고, 수율이 낮다. 따라서 좀 더 효율적이고 경제적인 세라믹 제품 가공 방법의 개발이 시급한 실정이다.

한편 1965년 미국 NASA에서 최초로 개발된 자성유체(magnetic fluid)는 현재 Magnetic fluid seal,⁽¹⁾ Magneto-hydrostatic separation,⁽²⁾ Damper, Actuator⁽³⁾ 등의 기계적 장치들이나 각종 Sensor, Magnetic tape 검색용 등으로 다양하게 이용되고 있으나 제조공법에 응용된 예는 없었는데, 최근 일본의 한 연구팀에 의해서 자성유체와 연마제를 혼합하여 세라믹볼의 가공에 이용하는 흥미로운 방법이 소개되었다. 이것은 자성유체에 자장이 가해지면 자성유체 내의 비자성 물질에 대해 부력이 작용한다는 Rosensweig, R. E.의 이론⁽⁴⁾에 근거한 것으로서, 비자성인 연마제와 자성유체를 혼합하여 자장을 가하고 Float을 장치한 후 세라믹볼을 가공하면, 볼의 가공도가 증가함은 물론 표면조도도 우수한 볼을 얻을 수 있다.⁽⁵⁾ 이러한 방법으로 세라믹볼을

*회원, 선문대학교 기계 및 시스템공학부

**선문대학교 재료금속공학부

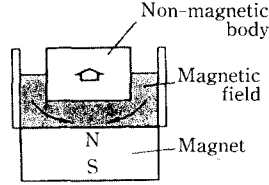


Fig. 1 Buoyant force acting on a nonmagnetic body in magnetic fluid under magnetic field.

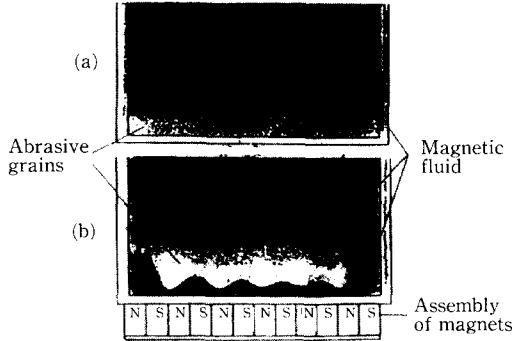


Fig. 2 Flotation of abrasive grains in magnetic fluid under magnetic field.

가공하게 되면 종래의 기계적연마법이 지닌 가공의 난이점, 가공시간이 길게됨에 따른 양산의 문제점 등을 해결할 수 있으리라 여긴다. 그러나 자성유체를 이용하여 세라믹 볼을 가공하기 위한 가공장치 및 가공조건이 확립되지 않는다면 공업적인 실용성이 없을 수 있겠다. 따라서, 일명 자성유체 연마법 (magnetic fluid grinding)이라 불리우는 이 가공방법이 본격적으로 연구개발되어 실용화되면 우수한 특성을 갖는 세라믹볼을 경제적으로 대량 생산할 수 있음은 물론 다른 형태의 세라믹 부품 가공에도 널리 이용될 수 있으리라 생각된다. 그러나 이 방법을 세라믹 제품의 가공에 응용하는 것에 대한 연구는 현재 영국과 일본의 극소수 연구진에 의해서 진행 중일 뿐이며, 국내에서는 이 분야에 대한 연구가 전무한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 우선 세라믹볼의 가공에 자성유체 연마법을 적용하여 그 효용성 여부를 타진하며, 나아가 여러가지 가공 변수들의 상관관계를 규명하고 이들이 세라믹볼의 가공성에 미치는 영향을 실험 분석하여 최적의 가공조건을 수립하고자 한다. 이러한 연구의 일환으로 세라믹볼을 자성유체 연마법으로 가공하기 위한 가공장치의 개발에 중점을 두어 연구를 수행한 결과 양질의 세라믹볼 베어링 가공장치를 개발 할 수

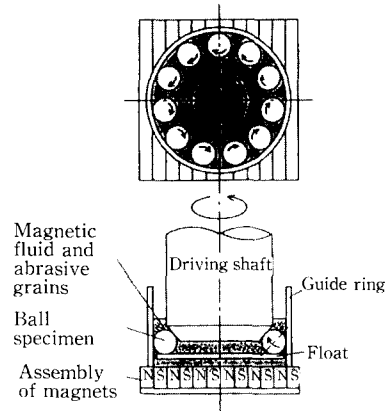


Fig. 3(a) Schematic representation of ball grinding in magnetic fluid.

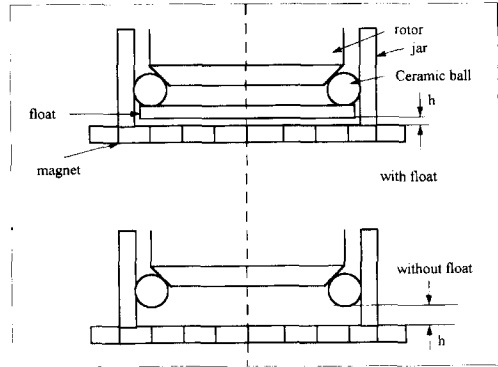


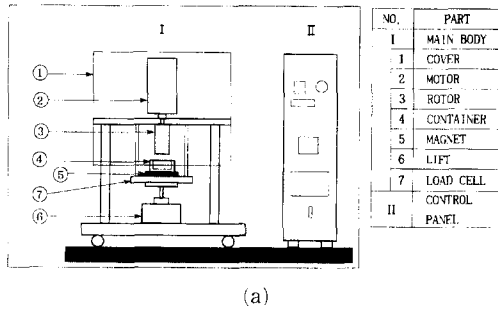
Fig. 3(b) Schematic diagram of jar with float and without float.

있었다.

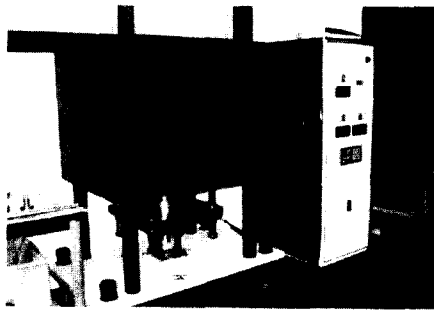
2. 자성유체 연마원리 및 장치

자성유체 연마법은 Fig. 1과 같이 자성유체와 세라믹과 같은 비자성 물질이 혼합되어 있을 때, 자성유체에 자장이 가해지면 비자성 물질에 부력이 작용한다는 Rosenweig, R. E.의 이론⁽⁴⁾에 착안한 것이다. 자장의 패턴에 따라 배열되는 자성유체중의 초미립 Magnetite 입자들에 의해 발생하는 이와 같은 부력은, 막대 자석의 자장에 따라 철 분말이 배열되는 것과 관련지어 생각하면 쉽게 이해할 수 있다.

따라서 Fig. 2에서와 같이 비자성인 연마제를 자성유체와 혼합한 후(a) 적절히 배열된 영구 자석에 의해 자장을 가하면, 연마제가 침하되지 않고



(a)



(b)

Fig. 4 Schematic diagram of an apparatus for magnetic fluid grinding.

부상된 상태에서 분산되게 된다(b). 이때 세라믹볼을 자성유체에 넣으면 비자성체인 볼 역시 부력에 의해 부상하게 되며, 볼을 회전시키면 자유로이 부상되어 있는 연마제들에 의해 볼의 표면이 연마되게 된다.

이와 같이 자장과 자성유체를 이용한 세라믹볼의 가공에 대한 개념도를 Fig. 3(a)에 나타내었다. 이때 볼이 원활히 연마되기 위해서는 고속으로 볼을 회전시키는 것이 필수적이며, 가공도를 높이고 치수 제어를 용이하게 하기 위하여 비자성 물질로 된 부유판(float)을 볼의 하부에 설치할 수도 있다. 부유판(float)의 설치에 대한 개념을 Fig. 3(b)에 나타내었다.

Fig. 4는 세라믹볼을 자성유체 연마법으로 가공하기 위하여 고안된 가공장치를 개략적으로 나타낸 것이다. Fig에서와 같이 볼 가공장치는 크게 두부분 I과 II로 구성되어 있는데, I 부분은 실제 가공을 위한 기계장치이고, II 부분은 기계장치의 제어부로서 전원스위치 및 회전속도의 제어를 위한 계기들이 부착되어 있다. 기계장치 부분 I에서 2는 최대 12,000 rpm으로 회전할 수 있는 Toshiba사의 0.75 Kw급 모터(모델 IK-75)를 나타내며, 3은

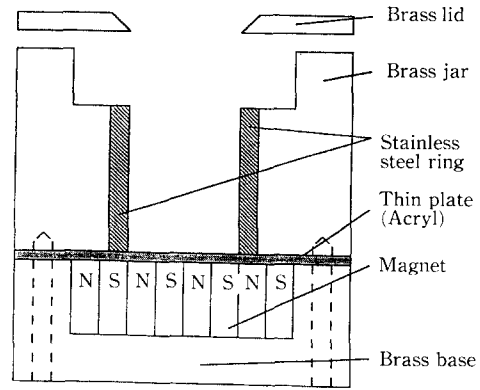
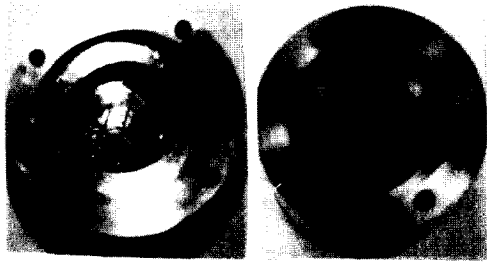


Fig. 5 Cross-section of a ball grinding jar.

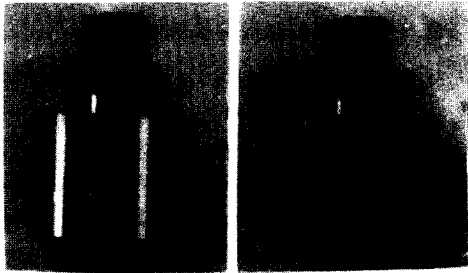
모터 샤프트(shaft) 및 볼을 고속으로 회전시키기 위해 샤프트와 연결된 로터(rotor)를 나타낸다. 4와 5는 볼이 가공되는 부분인 Grinding jar(container로 명기) 및 Jar 지지대, 자장을 가하기 위한 영구자석 배열판을 나타내며, 가공시 볼과 함께 자성유체, 연마제, 부유판 등이 Jar에 들어가게 된다. 또한 연마 하중을 측정하기 위한 Load cell이 이 부분의 하부에 장치되어 있으며, Torque를 측정하기 위한 센서가 Jar에 부착되어 있다. 1은 반투명의 보호 커버를 나타내며, 6은 볼의 가공 및 가공 전후 처리를 위해 상기의 4, 5부분을 상하로 이동시키기 위한 유압식 리프트로서, 로터와 볼의 접촉은 물론 볼과 Jar 바닥 사이, 또는 부유판과 Jar 바닥 사이의 간격(clearance)을 조절할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 자성유체 연마법을 이용해 세라믹볼의 가공가능여부를 실험한 것으로써 가압력의 제어 및 간격조정은 로드셀에 작용되는 가압력을 일정유지되도록 유압자기를 이용하여 모두 수작업에 의해 수행하였다.

Fig. 5에는 Grinding jar의 단면을 개략적으로 나타내었다. 자장의 영향을 최소화하기 위하여 Jar와 Jar 밑부분에 설치된 자석 배열판은 황동으로 제작하였으며, 자성유체에 미치는 자장의 영향을 극대화함과 동시에 가공 후 자성유체와 자석의 분리를 용이하게 하기 위하여 Jar와 자석 배열판 사이에 아크릴 박판을 삽입하여 두 부분을 분리시켰다. 자석은 표면자속밀도 4.5 kG 이상인 Nd-Fe-B계 희토류 자석을 사용하였는데, Pulse magnetizer로 착자 후 서로 상이한 극이 이웃하도록 배열하였다. 볼 가공시 세라믹 볼과 Jar 내부의 접촉에 의해서 Jar의 벽면도 마모되므로, Jar의 내부에 stainless



(a) Without guide ring (b) With guide ring

Fig. 6 Real view of grinding jar.



(a) Before use (b) After use

Fig. 7 View of grinding rotors for bearing balls.

steel(SUS 304)로 제작된 탈착식 링을 삽입하여 필요에 따라 교환할 수 있도록 하였다.

이와 같은 Jar의 실제 모습을 Fig.6의 (a)와 (b)에 나타내었다. (a), (b) 모두 뚜껑을 제거한 상태의 내부 모습을 나타낸 것으로서, (a)는 Stainless steel링이 제거된 상태를, (b)는 링이 장착된 상태를 보여주며, 미처 제거되지 않은 자성유체가 (a)의 Jar 내부에 잔류하는 것을 볼 수 있다.

한편 볼과 접촉하여 볼을 회전시키며 볼의 연마를 주도하는 로터도 역시 Stainless steel로 제작하였으며 Fig.7에 실제 형태를 나타내었다. 여기에서 (a)는 사용 전의 모습을, (b)는 사용 후의 모습을 나타낸다. 사진에 나타난 바와 같이, 사용 후에는 자성유체와 연마제의 영향으로 로터의 측면이 거칠어짐은 물론, 볼의 가공케적에 따라 로터의 경사면이 타원형으로 마모되는 것을 알 수 있다. 이러한 로터들은 가공중 이탈되지 않도록 샤프트의 회전방향과 반대방향으로 회전시켜 장착하도록 설계하였고, 로터와 Jar의 링 사이에 약간의 간격을 두었으며, 볼의 진구도를 증진시키기 위하여 볼이 로터 하부의 경사면을 따라 회전하며 연마되도록 하였다.

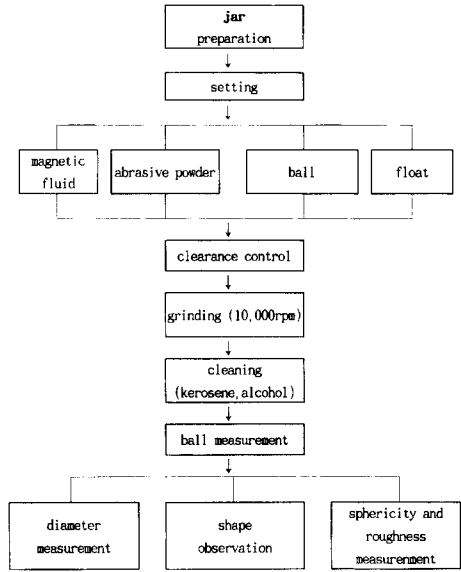


Fig. 8 Schematic procedure of ball grinding with magnetic fluid.

3. 자성유체 연마법에 의한 세라믹볼 가공 결과

앞에서 언급한 가공장치와 자성유체를 이용하여 베어링볼을 가공하는 실험 절차를 Fig.8에 나타내었다.

가공 대상인 세라믹볼은 성형시 생긴 밴드를 제거하지 않은 상태에서 사용하였으며, 상대적으로 경도가 높은 질화규소볼(Si₃N₄, 경도 15~20 GPa)을 주대상으로 하여 가공실험을 하였고, 알루미늄(Al₂O₃, 경도 10~13GPa), ZTA(Zirconia-Toughened Alumina, 경도 15 GPa)볼에 대한 가공도 시도하였다. 1회에 가공되는 볼의 수는 10~11개였다. 예비실험을 통하여 수성 자성유체는 계면활성제의 영향으로 가공도중 거품이 심하게 일어나 사용에 문제점이 있는 것을 발견하고, 이후 kerosene을 혼합한 유성 자성유체(40 vol%)를 사용하였다. 가공도를 증진시키기 위하여 연마제로는 SiC 대신 Fig.9에 보이는 것처럼 입도가 20~30 m인 다각형의 Diamond powder를 주로 사용하였는데, 가공전에 10 vol%를 자성유체에 첨가하였다.

가공시 가압력은 가공장치에 설치한 로드셀에서 가압력을 검출하면서 유압식자키를 이용하여 가공 Jar를 상승시켜 가압력이 0.3 kgf로 유지하였으며, 로터의 회전수는 10,000 rpm으로 일정하게 하였

Table 1 Variation of diameter of silicon-nitride balls measured before grinding.

Spec. no.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Total
Average (mm)*	8.478	8.465	8.490	8.490	8.454	8.548	8.512	7.981	8.490	8.541	8.458	8.452
Deviation (mm)	0.305	0.204	0.113	0.310	0.253	0.284	0.288	0.311	0.325	0.208	0.532	0.285

*Average of ten measurements.



Fig. 9 Polygonal shape of diamond powders with the size of 20~30 μm.

고, 가공시간을 변화시켜 가공시간에 따른 볼의 가공정도를 측정하였다. 또한, 가공 후 로터의 연마 상태를 검사하여 수시로 교체하였다. 아크릴 부유판은 두께 1.2~1.4 mm의 원판으로 가공하였고, 볼과 Jar 바닥 또는 부유판과 Jar 바닥 사이의 여유 공간(clearance)은 6~10 mm 내외에서 조정하였다. 가공이 완료된 후에는 볼 한개당 직경을 마이크로미터를 사용하여 임의로 10회 측정, 지름의 편차를 구하였다. 또한 가공된 볼의 형상을 임체 현미경이나 Macro lens를 사용하여 관찰하였으며, 볼의 진구도 및 표면조도를 조사하였다.

Table 1은 가공 전의 질화규소볼 11개를 무작위로 선택한 후 각각 10회씩 임의의 방향으로 직경을 측정하여, 각 볼의 평균 크기 및 최대 직경과 최소 직경 간의 편차를 구한 것이다. 가공 전의 볼의 크기는 대체로 8.0~8.5 mm 정도로서 불균일한 분포를 보이고 있는 것을 알 수 있고, 그 편차도 상당히 큰 것을 알 수 있다. 이러한 불균일성은 소결시의 수축도가 서로 달라서 발생하는 것으로 추정된다.

우선 부유판의 유무가 볼의 가공도에 미치는 효과를 알아보기 위하여 부유판없이 1시간 동안 가공한 후 볼의 직경 편차를 측정된 결과 약 0.012

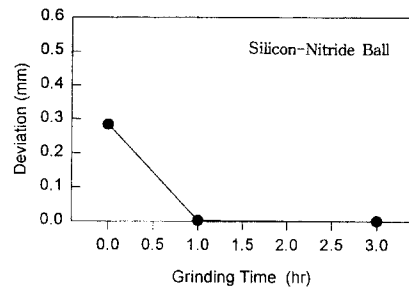


Fig. 10 Diameter deviation vs. grinding time.

mm였고, 부유판을 설치하고 1시간 동안 가공한 후의 직경 편차는 약 0.003 mm였다. 종래의 래핑 가공법으로는 2~3주정도 가공해야 진구도를 얻을 수 있었으나 자성유체 연마법을 이용할 경우 가공시간 3시간정도가 소요되었으며, 이와 같은 단시간내에 보다 완벽한 구형의 볼을 가공하는 데에는 부유판을 설치하는 것이 훨씬 효과적임을 알 수 있었고, 이후의 가공은 모두 부유판을 설치한 상태에서 실시하였다.

Fig. 10는 앞에서 언급한 가공조건으로 볼을 가공하였을 때 가공시간의 변화에 따른 볼의 직경 편차의 변화를 나타낸 것으로, 1시간 가공 후의 편차는 3.18×10^{-3} mm, 3시간 가공 후의 편차는 0.9×10^{-3} mm였다. 즉 Fig에 나타난 바와 같이 3시간 가공 후에는 외면상 직경 편차가 거의 없는 볼을 얻을 수 있었다.

Fig. 11은 1시간 및 3시간 가공 후의 볼의 크기 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 1시간 가공 후에도 볼의 크기는 거의 일정하였으며, 이때 볼의 크기는 약 8.06 mm로서 연마에 의해 0.4 mm 정도 제거된 것을 알 수 있다. 그러나 3시간 가공 후에는 더욱 균일해져서 각각의 볼의 편차가 미미함은 물론, 크기도 7.74 mm로 일정하여 약 0.7 mm 정도 연마되었음을 알 수 있다. 한편 8~16 μm의 입도를 갖는 Diamond powder나

1 μm 이하의 Diamond powder를 사용하여 동일한 가공조건 하에서 가공했을 때에도 적경 편차가 거의 없는 볼을 가공할 수 있었다. 다만 이들의 경우엔 각각 5시간, 6시간 가공한 후에 Fig. 11의 3시간 가공 결과와 같은 결과를 얻을 수 있어서 연마제의 입도가 미세할수록 일정한 조건의 볼을 얻는데 걸리는 시간이 연장됨을 알 수 있었다. 그러나 미세한 입자의 연마제가 볼의 표면조도를 향상시키는 데에는 도움이 되었다.

Fig. 12은 가공 전후의 대표적인 질화규소볼의 형상을 나타낸다. (a)는 가공 전의 볼로서 성형시 생긴 밴드가 선명히 들어나고 있다. (b)는 1시간, (c)는 3시간 가공 후의 볼의 형상으로 밴드의 제거는 물론 완벽한 구의 형상을 보여주고 있으나, 표

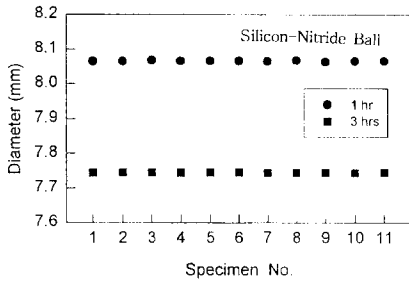
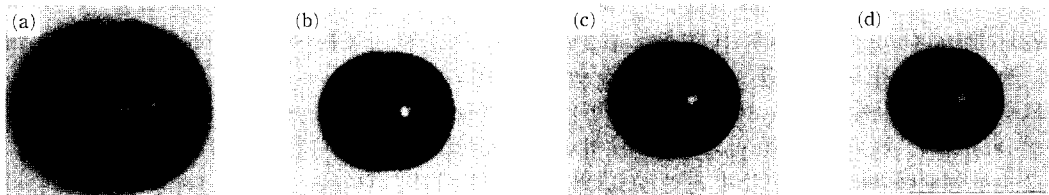


Fig. 11 Size change according to grinding time.

면 조도는 약간 감소한 것을 알 수 있다. (d)는 1 μm 이하의 diamond powder를 사용하여 5시간 동안 가공한 볼의 형상으로 전자들에 비하여 표면조도가 훨씬 향상된 것을 알 수 있다.

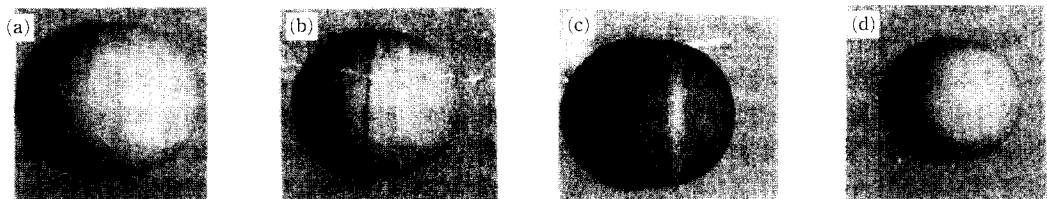
한편 질화규소 외에 알루미늄과 ZTA볼에 대한 가공도 실시하였는데, 그 결과가 Fig. 13에 나타나 있다. (a)와 (b)는 가공 전의 알루미늄과 ZTA 볼의 형상을 보여주는 것으로서 밴드 부분의 직경이 밴드가 없는 부분에 비해 오히려 작은 것을 알 수 있다. (c)는 1시간 가공 후의 알루미늄의 형상으로서 완벽한 구의 형태를 갖추지 못한 것을 알 수 있으며, 볼의 표면에 고리형태의 흰부분과 얼룩이 많은 것으로 보아 볼의 밀도가 균일하지 않고 기공이 많이 존재하는 것으로 보인다. (d)는 3시간 가공 후의 ZTA볼의 형상을 보여주는 것으로서 완벽한 구의 형태를 갖추고 있으나 표면 조도는 좋지 않은 것을 알 수 있다.

위와 같이 가공된 볼들의 진구 여부를 확인하기 위하여 진구도를 측정할 결과를 Figs. 14~17에 나타내었다. Fig. 14는 앞에서 언급한 가공조건 (40% 자성유체, 20~30 μm 의 Diamond powder 10%, 10,000 rpm, float)에서 1시간 동안 가공한 질화규소볼의 진구도이고, Fig. 15은 3시간 동안 가공한 질화규소볼의 진구도이며, Fig. 16과 17는 동일한



(a) Before grinding, (b) Ground, 1 hr. : diamanda powder (20~30 μm) 10 vol%, Magnetic fluid 40%, (c) Ground, 3 hr. : diamanda powder (20~30 μm) 10 vol%, Magnetic fluid 40%, (d) Ground, 5 hr. : diamanda powder (1< μm) 10 vol%, Magnetic fluid 40%.

Fig. 12 Shapes of silicon-nitride balls.



(a) Alumina, before grinding, (b) ZTA, before grinding, (c) Alumina, ground for 1 hr. : under the same condition as Fig. 17(b), (d) ZTA, ground for 3 hrs. : under the same condition as Fig. 17(b).

Fig. 13 Shapes of alumina and ZTA balls.

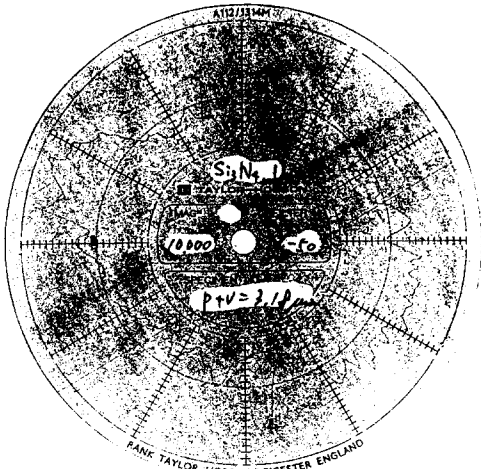


Fig. 14 Sphericity of a silicon-nitride ball ground for one hour under the condition specified in Fig. 12.

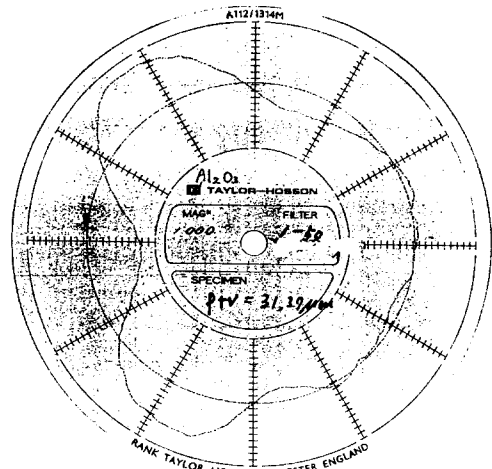


Fig. 16 Sphericity of an alumina ball ground for one hour under the condition specified in Fig. 13.

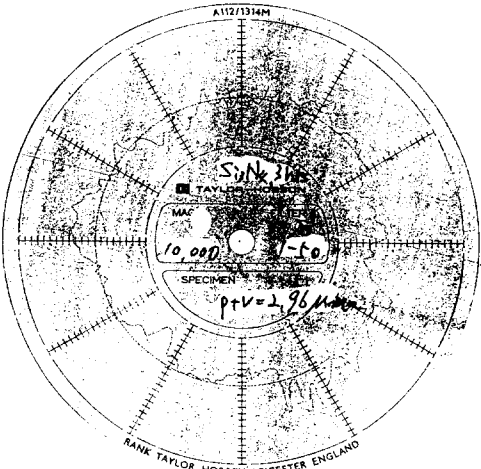


Fig. 15 Sphericity of a silicon-nitride ball ground for three hour under the condition specified in Fig. 12.

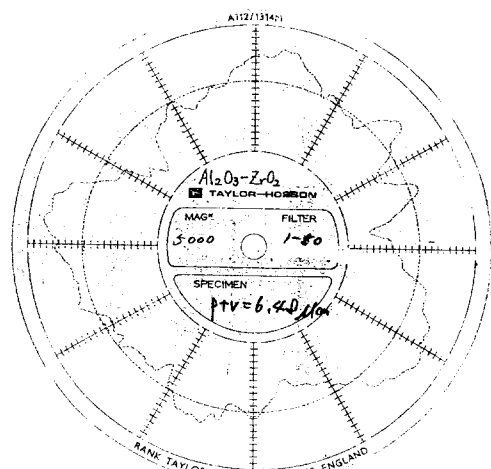


Fig. 17 Sphericity of a ZTA ball ground for three hours under the condition specified in Fig. 13.

가공조건에서 각각 1시간과 3시간 가공한 알루미늄볼과 ZTA볼의 진구도이다. 질화규소볼의 경우 1시간 동안 가공한 것보다는 3시간 가공한 것이 훨씬 진구에 가까움을 알 수 있으며, 동시에 표면거칠기도 상당히 감소한 것을 알 수 있어서 적경 편차의 변화에 대한 조사결과와도 잘 일치하고 있다. 그러나 여전히 예리한 Peak이나 Valley들이 존재하는데 이는 연마제의 입도가 크고 경도가 높아서 발생한 것으로 보인다. 이것은 연마제의 입도 크기

를 조절하거나 Diamond powder보다 경도가 낮은 SiC를 사용하면 어느 정도 해소할 수 있을 것으로 본다.

알루미늄볼의 경우 진구에서 상당히 벗어난 형태임을 알 수 있는데, 이는 Fig. 13(c)의 표면상태로 미루어 보아 볼의 밀도가 불균일한 것에 가장 큰 원인이 있는 것으로 보인다. 그러나 15%의 ZrO₂를 첨가하여 기계적 특성을 향상시킨 ZTA볼의 경우, Fig. 17에 나타난 것처럼 알루미늄볼보다 훨씬

진구에 가까우며, 표면거칠기도 알루미늄볼의 경우에는 $5.55 \mu\text{m}$ 였으나 ZTA볼의 거칠기는 $2.61 \mu\text{m}$ 로서 현저히 감소된 것을 알 수 있다. 이들 값은 그러나 질화규소볼의 경우보다 훨씬 큰 값들이다. 실제로 알루미늄계의 볼들은 그 경도를 고려할 때 Diamond powder보다 SiC가 더 적절한 연마제라고 생각되나, 이번 연구에서는 구형의 볼을 자성유체 연마법으로 단시간내에 가공할 수 있는지의 여부와 이에 대한 가공장치를 개발하는 것이 주요 목적이 있었으므로 질화규소볼의 가공조건과 동일한 조건에서 가공을 실시하였다. 따라서 표면조도는 적절한 연마제의 선택과 함께 다단계 가공, 미세 후가공처리 등 가공방법의 개선을 통하여 충분히 향상시킬 수 있다고 보며, 3시간 내에 진구에 가까운 볼을 완성시킬 수 있는 현재의 결과로 보아 다단계 가공을 하더라도 기존 방법에 의한 가공보다 훨씬 빠른 시간내에 세라믹볼의 가공을 완료할 수 있을 것으로 예상된다.

한편 보다 완벽한 진구형태의 볼로 가공하기 위해서는 가공전 볼의 밀도와 경도의 균일한 분포가 대단히 중요하다고 생각된다. 즉 볼이 고속으로 회전되면서 가공되는 점을 고려할 때 볼의 밀도가 균일하여야만 전 표면에서 균일하게 연마가 진행되어 진구를 이룰 수 있으며, 동시에 표면조도도 향상될 수 있을 것이다. 따라서 가공조건 개선에 앞서 균일한 품질의 볼을 제조하는 것이 선결조건이라 여긴다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 자성유체 연마법이 질화규소볼 비롯한 세라믹볼의 가공에 대단히 유용한 방법임을 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

(1) 질화규소볼의 경우 40% 자성유체에 20~30 μm 의 diamond powder 10%를 첨가하여 10,000 rpm에서 3시간 정도 가공하면 크기가 일정한 베어링용 볼이 완성되었는데, 이것은 기존의 기계적 연마법에 의한 가공속도와 비교할 때 월등히 빠른 가공 속도이다.

(2) 알루미늄과 ZTA볼 역시 이 방법에 의해 단 시간내에 가공이 가능함을 확인하였다.

(3) 아직 가공된 볼의 표면조도를 향상시키는 문제가 남아 있으나, 이는 적절한 연마제의 선택과

함께 다단계가공, 후가공처리 등 가공방법의 개선을 통하여 충분히 해결할 수 있다고 여겨진다.

(4) 향후에는 진구도를 향상시키기 위한 노력과 함께 이에 관한 연구가 구체적으로 진행될 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 1995년도 목적기초연구비에 의해 수행된 연구결과이며, 관계해 주신 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Moskowitz, R., 1984, "Magnetic Fluid Grinding for Ceramic Balls," *ASLE Trans.*, Vol. 18, No. 2, pp. 135.
- (2) Rosensweig, R. E., 1969, U. S. Patent 3843.
- (3) Coulombre, R. E., d'Auriol, H., Schnee, L., Rosensweig, R. E. and Kaser, R., 1967, Rep. No. NAS5-9432, AVSSD-0222-67-CR, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.
- (4) Rosensweig, R. E., 1966, "Fluid Magnetic Buoyance," *AIAA Journal*, Vol. 4, No. 10, pp. 1751~1758.
- (5) Umehara, N. and Kato, K., 1990, "Principles of Magnetic Fluid Grinding of Ceramic Balls," *Applied. Electromagnetics in Materials 1*, Vol. 1, pp. 37~43.
- (6) Umehara, N., Kato, K. and Nakano, H., 1992, *Magnetic Fluid Grinding of Ceramic Rollers*, Electromagnetic Forces and Appl., pp. 139~142.
- (7) Umehara, N., Kato, K. and Kanagawa, I., 1992, "Magnetic Fluid Grinding of Ceramic Flat Surfaces," *Electromagnetic Forces and Appl.*, pp. 145~146.
- (8) 차동득, 이명재, 소수덕, 성락원, 김영삼, 박세윤, 1989, "강의 산세페수를 이용한 Magnetite 자성잉크 제조에 관한연구," 대한금속학회지, 제27권, 제9호, pp. 800~807.
- (9) Shimoizaka, J., Nakatsuka, K., Chubachi, R. and Sato, Y., 1975, "On the Preparation of Magnetic Fluid and Its Behavior," *J. Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, Vol. 22, No. 1, pp. 22~27.

- (10) Belkowitz, A. E., Lahut, J. A. and Vanburen, C. E., 1980, *IEEE Trans. on Magnetics*, MAG-16, 184.
- (11) Kaiser, R. and Miskolczy, G., 1970, *J. Appl. Phys.*, 1064.
- (12) Cundill, R. T., 1991, "High Precision Silicon Nitride Balls for Bearings. In Commercial Applications of Precision Manufacturing at the Submicron Level (Ed. L. R. Baker)," *SPIE Proceedings (SPIE) Series*, Vol. 1573, pp. 77~86.
- (13) Childs, T. H. C., Jones, D. A., Mahmood, S., Kato, K., Zhang, B. and Umehara, N., 1994, "Magnetic Fluid Grinding Mechanics," *to be Published in Wear*.
- (14) Childs, T. H. C. and Yoon, H. J., 1992, "Magnetic Fluid Grinding Cell Design. Ann," *CIPR*, 41 (1), 343~346.
- (15) Kawata, K. and Tani, Y., 1993, "Development of High-Concentration Lapping Discs with Low Bonding Strength and Their Application to Mirror Finishing of Brittle Materials," *JSME Int. Journal, Series C*, 36, 2, 263~270.
- (16) Whittleton, E. P., Ives, L. K. and Peterson, M. B., 1993, *Surface Damage and Mechanics of Fretting Wear in Ceramics, in Friction and Wear of Ceramics* (Ed. S. Jahanmir), Marcel Dekker, Inc. New York.
- (17) Xu, H. K. K. and Jahanmir, S. 1994, "Simple Technique for Observing Subsurface Damage in Machining Ceramics," *J. Amer. Cer. Soc.*, 77[5], 1388~1390.
- (18) Horton, S. A., 1991, "Hybrid Silicon Nitride bearings," *Third European Symposium on Engineering Ceramics* (Ed. F. L. Riley), pp. 35~50 (Elsevier, London)
- (19) Tsunai, Y. and Enomoto, Y., 1988, "Tribology of Alcohol Silicon-hased Ceramics," *Proc. 32nd JSLE Conf., Japanese Society of Lubrication Engineers*, Tokyo, Japan, pp. 29~32.
- (20) Suvramanian, K. and Ramanath, S., 1992, "Mechanisms of Material Removal in the Grinding of Ceramics," *Proc. of the Symposium in Precision Machining, ASME Publication PED-58*.
- (21) Umehara, N. and KATO, K., 1988, "A Study on Magnetic Fluid Grinding-Part 1," *Trans. JSME (C)*, 54, 1599~604.
- (22) Raghunandan, M., Umehara, N., Noori-khajavi, N. and Komanduri, R., 1994, "Magnetic Float Polishing of Advanced Ceramics," Paper to be Submitted for Publication.
- (23) Umehara, N., 1988, "Study on Magnetic Fluid Grinding," Ph. D. Thesis, Tohoku University, Sendai, Japan (in Japanese)