

工學碩士學位論文

磁性流體를 利用한 알루미늄
세라믹볼 研磨의 研究

이 論文을



提出함

2002年 2月

釜慶大學校 産業大學院

機械設計學科

金 相 植

金相植의 工學碩士 學位論文을 認准함

2001年 12月 15日

主 審 工學博士 李 守 鍾



委 員 工學博士 吳 明 錫



委 員 工學博士 金 亨 資



목 차

Abstract	v
1. 서 론	1
2. 이론적 배경	4
2-1. 두 입자간 자기적 흡인력	4
2-2. 두입자간 작용하는 Vander-Waals인력	5
2-3. 계면활성제 흡착층에 의한 반발력 에너지	5
2-4. 분산모델	6
3. 실험장치 및 실험방법	7
3-1. 실험장치	7
3-2. 실험재료	10
3-3. 실험방법	12
4. 실험결과 및 고찰	17
4-1. 실험결과	17
4-1-1. 연마재 입도에 따른 평균직경, 직경편차 및 연마량 결과	17

4-1-2. 로터 회전수에 따른 연마량 결과	21
4-1-3. 연마재 농도에 따른 평균직경과 연마량 결과	23
4-1-4. 연마시간에 따른 평균직경과 연마량 결과	24
4-2. 고 찰	26
4-2-1. 평균직경 및 직경편차에 따른 고찰	26
4-2-2. 연마재 입도와 연마량과의 고찰	26
4-2-3. 연마재 농도에 따른 연마량의 고찰	27
4-2-4. 연마재 입도에 따른 표면거칠기의 고찰	27
5 결 론	29
6. 참고문헌	30

List of figures

Fig. 1 Dispersion model of magnetic fluid	6
Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus	7
Fig. 3 Photographs of experimental apparatus	8
Fig. 4 Photographs of before grinding alumina ball	11
Fig. 5 Schematic diagram of ball grinding in magnetic fluid	13
Fig. 6 Floatation of abrasive grains in magnetic fluid under magnetic field	14
Fig. 7 View of grinding rotors for alumina ball	16
Fig. 8 Photographs of ball ground for 3 hours	18
Fig. 9 Graphs of average diameter of ball before ground and after	20
Fig. 10 Graphs of deviation of ball before ground and after	21
Fig. 11 Graphs of removal quantity of balls after ground with rotor rpm	22
Fig. 12 Graphs of relationship between removal quantity and concentration of abrasive grains	24
Fig. 13 Graphs of deviation of balls with grinding time	25
Fig. 14 Sphericity of a ball ground	28

List of table

Table 1	Main specification of experimental matrial	10
Table 2	Weight and variation of diameter of alumina ball measured before grinding	11
Table 3	Experimental conditions	12
Table 4	Removal quantity of balls ground for 3 hours(GC #120)	17
Table 5	Removal quantity of balls ground for 3 hours(GC #220)	18
Table 6	Removal quantity of balls ground for 4 hours(GC #320)	19
Table 7	Removal quantity of balls ground for 5 hours(GC #420)	20
Table 8	Removal quantity of balls ground for 3-5 hours with rotor rpm	22
Table 9	Removal quantity of balls ground for 3 hours by 15vol% concentration of abrasive grains	23
Table 10	Removal quantity of balls ground for 3 hours by 20vol% concentration of abrasive grains	23
Table 11	Deviation of balls with grinding time	25

A study on grinding of alumina ceramic balls using magnetic fluid

Sang Sik Kim

Department of Mechanical Design
Graduate School of Industry
Pukyong National University

Abstract

This study is to apply to the theory of Rosensweig, R.E that buoyance is produced when a magnetic field is impressed to the magnetic fluid in the nonmagnetic materials of the magnetic fluid inside. also it is to examine and analyze various characteristics reaching to the grinding of ceramic balls after mixing abrasive grain to the magnetic fluid. as a result of it.

1. As for the grain size of abrasive grain #120, 220, 320, 420, per ball is the removal quantity 3.86, 3.75, 2.73, 2.17 $\mu\text{m}/\text{min}$ increases to #120 but it did not increase any more and it increases about 1.8 times than #420.
2. Decrease of totality average diameter per one lot is ground 0.231, 0.238, 0.239

mm/hour in the concentration of abrasive grain 10, 15, 20vol%, high concentration of abrasive grain of increases to grinding a little bit and the decrease rate of an average diameter is increased exceedingly to 15vol%.

3. Change of removal quantity is exceedingly small in the difference of 1820rpm and 1400rpm rotor rotations.

1. 서 론

최근에 들어서 산업은 비약적인 발전을 하고 있으며 정보통신, 항공우주, 정밀기계, 전기전자 등의 산업분야에 사용되는 부품 및 재료는 극한적인 가혹한 환경에서 기존의 재료보다 뛰어난 성능을 요구하고 있다.

세라믹스는 내식성, 내열성, 저밀도, 내마멸성 등의 우수한 특성을 가지고 있으며, 사용분야로는 경량화, 고온용 구조물, 절연체용 등이며 실례로는 피스톤 링, 베어링, 기어, 노즐, 메카니컬씰(Mechanical seal) 등 기계의 운동 부품에 많이 사용되며 앞으로 세라믹의 사용은 더욱 증가하리라 예상된다¹⁾. 특히 세라믹볼(ceramic ball)은 고성능 공작기계, 가스터빈, 제트엔진, 화학기계등의 주축용 베어링으로 아주 유망시 되고 있으나 높은 경도와 취성으로 인하여 가공이 용이하지 않아 대부분의 경우에 있어서 가공비가 전체 부품 비의 수십 퍼센트를 차지하여 수요와 가공기술의 개발이 미흡한 상태이며, 소결 공정에 따른 비틀림, 굽힘 및 수축 등 다양한 변형뿐만 아니라 고경도와 취성으로 인하여 능률적이고 정도적인 기계적 가공이 반드시 필요하다.

지금까지의 가공은 다이아몬드 휠을 사용한 V홈형 연마방법²⁾이 많이 이용되고 있으나 가공시간과 비용 때문에 효율이 떨어지고, 가격은 일반 강구 보다 수백 배나 비싸 수요와 가공기술의 개발이 미흡한 상태이다.

따라서 앞으로 효율적이고 경제적인 가공법이 절실히 요구되는 상황에서 최근 일본의 동북대학, 미국의 Oklahoma 주립대학과 영국의 리드 대학 등에서 자성유체를 이용하여 연마하는 방법들이 발표되었는데 이것은 물 속에서 세라믹의 마멸율이

100에서 1000배, 증류수하에서는 수 십 배가 증가된다는 보고^{3,5)}에서와 같은 맥락에서 기존의 방법보다 연마효율이 높을 것이다.

자성유체(magnetic fluid)는 마그네타이트(magnetite), 망간페라이트(manganese ferrite), 코발트페라이트(cobalt ferrite)등의 강자성체를 100~200Å 정도의 미세 분말로 만든 뒤 적절한 계면활성제(올레인산, 리롤산)를 피복 하여 물이나 기름의 액체 중에 안정하게 분산시킨 현탁액으로 자장을 인가하여도 액체와 고체의 분리가 일어나지 않고 마치 액체가 자성을 지닌 것처럼 거동하며, 자장에 감응하는 가동유체이고, 자성유체중의 자성미립자에 자기적인 힘이 작용하기 때문에 자장에 의하여 종래의 유체에는 보이지 않는 기묘한 진동을 한다. 자성유체가 외부의 자장에 반응하는 특성을 활용하여 자성유체 밀봉, 댐퍼(Damper), 자기 선별, 표면 연마, 윤활제 및 특수 약물을 투입하는 의료 기술 등과 같이 자성유체는 여러 분야에서 응용되고 있으며, 또한 그 범위가 점차 확대되어 가고 있다.

이와 같은 자성유체에 비자성체의 연마재를 혼합시킬 경우 연마재에 여러 가지 힘을 자장에 의해서 주는 것이 가능하므로 연마가 이루어지게 된다.

Rosensweig, R.E.⁶⁻⁸⁾에 의해서 자성유체의 분산안정성 및 자성유체에 자장을 인가하면 자성유체 속의 비 자성물질은 부력이 작용하는 원리 등이 발견되었고, 일본 동북대학 Shimoizaka⁹⁾ 교수가 화학적으로 100Å 이하의 마그네타이트 초미립자를 대량으로 생산할 수 있는 제조법을 개발하여 다량으로 자성유체를 제조할 수 있게 되었다.

자성유체는 0.01~0.02 μ m 정도의 강자성체 초미립 분말을 액체 중에 다량($10^{16}/\text{cm}^3$)

으로 분산시켜 정지상태에서도 안정된 분산이 되도록 분자간 작용하는 흡인력에 의한 입자의 응집을 막기 위해 입자의 표면에는 입자마다 올레인산($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}$) 등의 계면활성제가 피복 되어 있다. 그리고 중력에 의한 침강은 미세 분말 자신의 브라운 운동에 의해 억제되므로 균일한 분산이 이루어진다. 자성유체의 입자의 사이즈가 보통 $100\sim 200\text{\AA}$ 이기 때문에 액체와의 혼합비율은 $10\sim 15\%$ 정도이고 혼합비율이 너무 높으면 유체로서의 성질이 상실되기 때문에 최대 25% 이내 이다.

자성유체에 자장을 인가하면 입자 하나 하나가 자화(포화되지는 않음)되어 서로 끌어당겨 지는데 자장의 세기를 바꿈으로써 비중이 다른 여러 가지 액체를 만들 수 있다.

지금까지 화학적으로 비중 3 이상인 액체는 만들 수 없었으나 자성유체일 경우 강력한 자석을 사용하면 비중이 20까지 가능하다. 이러한 성질을 이용하여 본 연구에서도 자성유체내의 비 자성 물질은 자성유체에 자장을 인가하면 부력이 발생한다는 Rosensweig, R.E의 이론을 적용하여 자성유체에 연마재를 혼합하여 세라믹볼 특히 구조용 세라믹스로서 필요한 제성질을 어느 정도 지니면서 가격이 싸고, 제조 방법도 확립되어 있는 알루미늄 세라믹볼 연마에 미치는 여러 가지 특성들을 실험 분석하여 그 효용성과 최적의 연마 조건을 수립하는데 목적을 두고 이를 실험을 통하여 밝히고자 한다.

2. 이론적 배경

2-1. 두 입자간 자기적 흡인력

자성유체는 강 자성 초미립자가 액체와 혼합되었을 때 중력이나 강한 자장 하에서도 침강이나 고액분리가 일어나지 않도록 정확한 현상을 파악하여야 한다.

자성유체의 입자간 작용하는 흡인력⁹⁾(Vander-waals인력) 과 자성유체에 자장을 인가하였을 때 입자들 사이의 자기적 인력 및 강 자성 초미립자의 비중이 액체보다 5배 이상 커서 안정된 분산이 일어나지 않는다.

따라서 안정된 분산을 이루기 위하여 입자의 직경을 200Å까지 미세화하며 입자간 브라운 운동이 일어나도록 하여야 하며 Vander-waals인력 및 자기적 인력으로 미립자의 응집을 방지하기 위하여 미립자의 표면에 계면활성제를 흡착시켜 이 계면활성제의 탄성반발력을 이용하여야 한다.

두 개의 단일자구 입자간의 흡입에너지는 두 개의 자기모멘트가 일직선상에 나열되었을 때 최대가 되는데 자기적 흡입 에너지식⁹⁾은 다음과 같다.

$$E_m = -2 \left(\frac{M}{4\pi} \right)^2 \frac{R^2}{R^3} = - \frac{2}{g} \frac{M^2 r^3}{(h+2)^3} \quad (1)$$

여기서 M은 입자의 자화, V는 입자의 체적, R 는 입자의 중심간 거리, r 는 입자의 반경, h는(R/r-2) 로서 두 입자 표면사이의 거리와 입자반경과의 비이다.

그리고 입자가 인접했을 때(h=0) 에는 E_m는 최대가 된다.

2-2. 두 입자간 작용하는Vander-waals인력

두 입자간 작용하는Vander-waals인력⁹⁾은

$$E_{vw} = -\frac{A}{6} \left(\frac{2}{h(h+4)} + \frac{2}{(h+2)^2} + \frac{h(h+4)}{(h+2)^2} \right) \quad (2)$$

여기서 A는 상수이고 10^{-12}erg 로 보고되고 있다.

이 Vander-waals에 의한 힘은 인력이고 그 값이 매우 크며 짧은 거리에 미치는 힘이므로 미립자 표면을 계면활성제로 흡착하여 미립자가 직접 접촉하지 않으면 이 힘에 의한 응집을 방지할 수 있다.

2-3. 계면활성제 흡착 층에 의한 반발력 에너지

Rosensweig는 Macker의 통계역학적 고찰을 기초로 하여 입자들 사이에 작용하는 계면활성제 흡착 층의 반발에너지 E_r 를 다음식^{9),10)}과 같이 도출하였다.

$$E_r = 2\pi r^2 N k T \left[2 - \frac{(h+2)}{\delta/r} \ln \left(\frac{1+\delta/r}{1+h/2} \right) - \frac{h}{\delta/r} \right] \quad (3)$$

여기서 N은 단위 면적당 흡착 분자 수, k는 볼츠만 상수, T는 절대온도, δ 는 계면활성제의 흡착 층의 두께이다.

위 (3) 식으로부터 $R=2(r+\delta)$, 즉 $\delta/r=h/2$ 일 때 $E_r=0$ 로 이것은 흡착분자가 처음으로 접하는 상태에 해당하며 또 $R=2r$, 즉 $h=0$ 일 때 E_r 은 최대치

$E_r = 4\pi r^2 N \left[1 - 1/(\delta/r) \ln(1+\delta/r) \right] kT$ 이다. 이것은 입자표면이 가장 가까운 상태에 해당하며 분산 입자들이 접근할수록 계면활성제의 흡착 층에 의한 반발력은 증가하고 흡착 층의 두께가 두꺼울수록 반발력은 커진다.

2-4. 분산모델

아래 Fig. 1 는 神山新一¹¹⁾ 이 제시한 자성유체의 분산모델로서 고상 및 액상의 균일 혼합상 유체의 모습을 보인다.

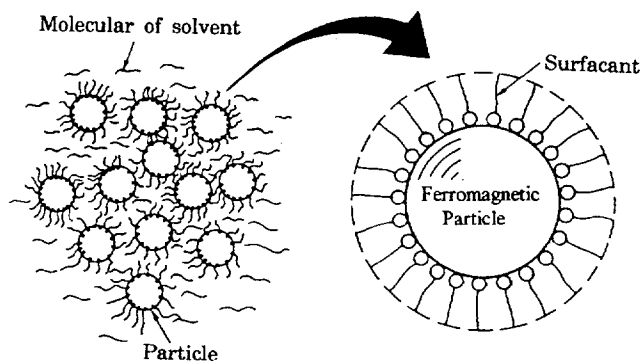


Fig. 1 Dispersion model of magnetic fluid

자성유체가 혼합물로서 여러 가지 요인이 작용하는데도 고액분리가 일어나지 않는 것은 강 자성 초미립자의 크기가 용매분자의 100배 정도로 강 자성 초미립자가 용매분자와 무차별충돌에 의한 브라운 운동과 강 자성 초미립자 표면에 흡착된 계면활성제의 탄성반발력으로 고체의 응집이 일어나지 않고 자장을 인가하면 액체가 자장에 거동하는 것처럼 보인다.

3. 실험장치 및 실험방법

3-1. 실험장치

아래 Fig. 2 는 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

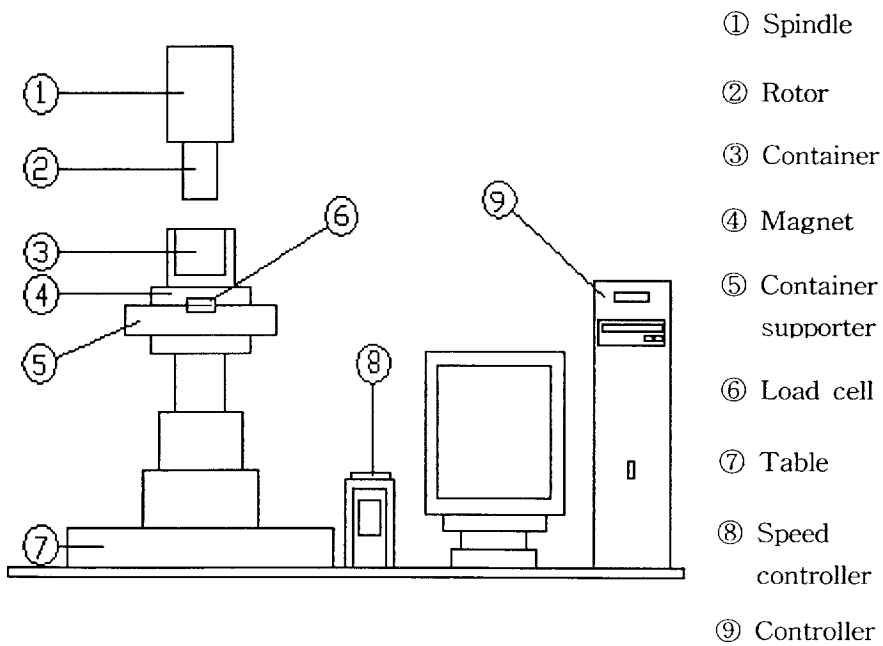


Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus

실험장치중 Fig. 2 의 ① ~ ⑦ 부분은 세라믹볼 연마장치이고, ⑧, ⑨ 부분은 하중과 로터(rotor)의 회전속도를 제어하는 장치로 구성되어 있다.

기계장치는 탁상 드릴링 머신을 사용하여 부가적인 장치를 별도로 제작하였다.

Fig. 3 은 실험장치의 사진을 나타낸 것이다.

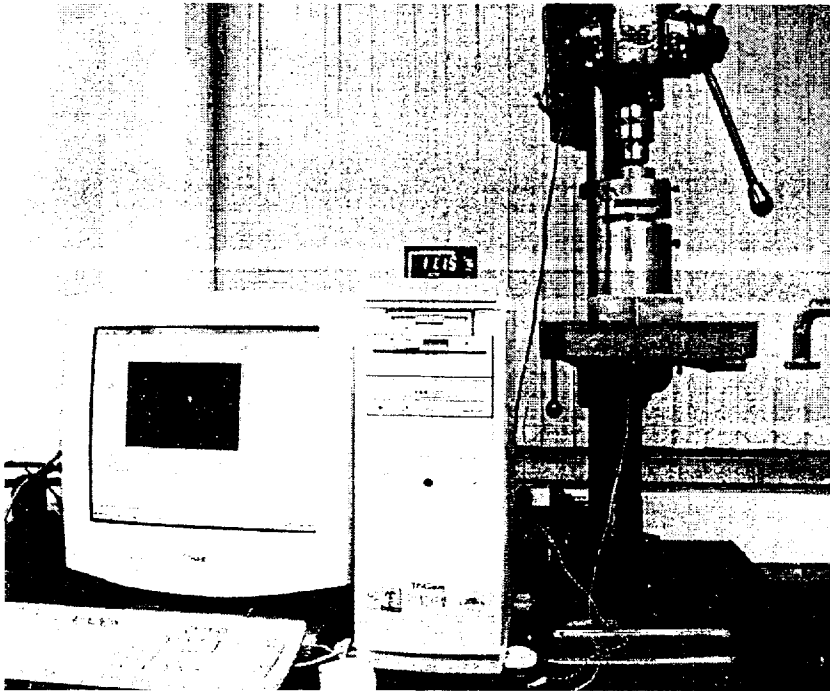


Fig. 3. Photographs of experimental apparatus

로터는 자화로 인하여 자성유체의 미립자가 흡착되지 않도록 비자성체인 스테인레스(SUS 304) 강으로 제작하여 자화로 인하여 자성유체의 미립자가 흡착되지 않도록 하였다. 또한, 볼의 진구를 향상시키기 위하여 볼이 로터 하부 경사면 및 상

부면을 따라 회전하며 연마가 되도록 설계하였다.

컨테이너(container)도 자성유체의 흡착방지 및 자속 밀봉을 위하여 황동을 사용하였으며 내부에는 자성유체의 저항을 줄이고 세라믹볼과 더불어 연마가 되는 것을 방지하기 위하여 두께 2mm의 우레탄 시트(urethane sheet)로 덮었다.

플로우트(float)는 컨테이너 내벽에 삽입될 외형 사이즈에 두께 2mm인 아크릴수지(acrylic resin)제품으로 만들었고, 자석은 Nd-Fe-B계 희토류 자석을 단면이 직사각형으로 절단하여 N극, S극이 교차되도록 결합하였다.

용기 하부에는 로드셀(load cell)을 삽입하여 하중을 일정하게 조정할 수 있는 용기지지대는 알루미늄 재료를 사용하여 축나사를 가공하고 상하로 이동할 수 있도록 하여 자성유체내의 연마재의 위치와 세라믹볼의 위치를 정확하게 조정할수 있도록 구성하였다.

3-2. 실험재료

Table 1. 은 실험재료의 특성을 나타내었다.

Table 1. Main specification of experimental material

Division	Characteristic	Value	Notes
Alumina ball	Sinterring process	PLS	
	Density	3.9g/cm ³	
	Hardness(Hk)	2000kg/mm ²	
Magnetic fluid	Model number	SMF-110	Samhwa Electronic
	Viscosity(27℃)	1000cp	
	Specific gravity	1.30	
	Magnetization(8kOe)	350	
	Solvent	Mineral oil	

다음 Fig. 4 는 실험에 사용한 재료의 형상이며 PLS법으로 제조된 알루미나 세라믹볼을 나타낸 것으로 소결시 생긴 요철부 모양이 직경편차를 많이 발생시킨다.



Fig. 4. Photographs of before grinding alumina ball

Table 2. 는 알루미나 세라믹볼을 가공 전에 평균직경과 편차 및 중량을 나타낸 값이다.

평균직경은 임의의 위치에서 마이크로미터로 10회 측정한 후 평균값을 나타내었으며 직경편차는 평균직경과의 차이이고, 진구도는 약 $490\mu\text{m}$ 였다. 중량은 초음파 세척 30분 후에 정밀 전자 저울로 측정을 하였다.

Table 2. Weight and variation of diameter of alumina ball measured before grinding

Ball number	1	2	3	4	5	6	7	Total average	Total weight
Average diameter(mm)	9.40	9.35	9.46	9.37	9.45	9.48	9.37	9.41	12.2322 g
Deviation(mm)	0.09	0.11	0.10	0.11	0.14	0.12	0.08	0.10	

3-3. 실험방법

실험조건을 선정하기 위하여 연마에 직접적으로 영향을 미치는 자성유체와 연마재는 예비실험으로 결정하였는데 자성유체는 수성 및 유성의 자성유체를 구입하여 실험을 하였으나 수성자성유체의 경우 로터가 1,000rpm이상으로 회전하면 거품이 발생하여¹⁷⁾ 실험을 지속할 수 없어 유성 자성유체로 교체하여 실험을 하였다.

Table 3. 은 실험조건을 나타내었다.

Table 3. Experimental conditions

Grinding Load	6 N	
Revolution	1,820rpm	1,400rpm
Abrasive grains	GC #120	
	GC #220	
	GC #320	
	GC #420	
Grinding time	3, 4, 5 hours(7, 9, 11 hours)	
Mixture ratio	Magnetic fluid : 90, 85, 80vol%	
	Abrasive grains : 10, 15, 20vol%	

실험절차는 콘테이너에 플로터를 용기에 삽입한 뒤 자성유체 90vol%와 탄화규소 분말 10vol%를 혼합하여 넣고, 알루미나 세라믹볼을 용기의 내벽에 Fig. 5 과 같이 원주 상으로 배열시킨 후 로터를 삽입하여 연마 하중 6 N을 로드 셀에 의해

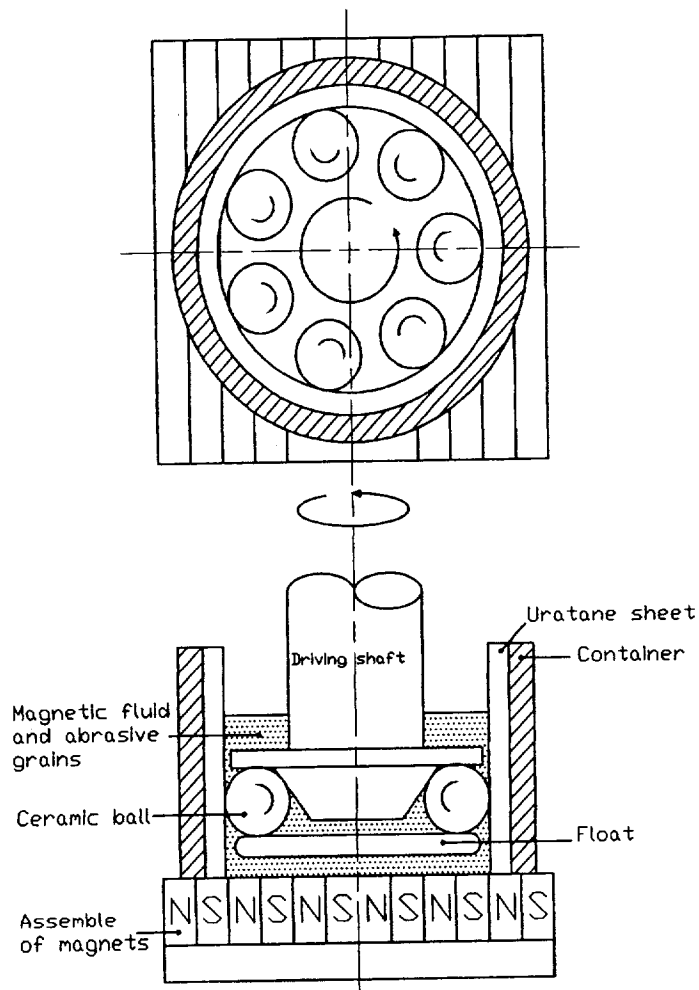


Fig. 5. Schematic diagram of ball grinding in magnetic fluid

설정 후 회전수를 1,820rpm 및 1,400rpm으로 일정하게 유지시키면서 총 3시간 연마를 하였으며 매 시간마다 연마량과 직경편차 및 표면 거칠기, 가공상태를 파악하고 연마량은 가공전후의 직경변화로 계산하였다.

아래 Fig. 6 은 자성유체에 연마재인 탄화규소를 혼합한 뒤 Nd-Fe-B계 희토류 자석을 N, S극이 교차 결합한 영구자석 위에 용기를 올려놓으면 Rosensweig, R. E 의 이론에 의하여 탄화규소 분말은 자성유체의 부력을 받아 침강되지 않고 부력을 받아 위로 떠있는 현상을 나타내고 있다.

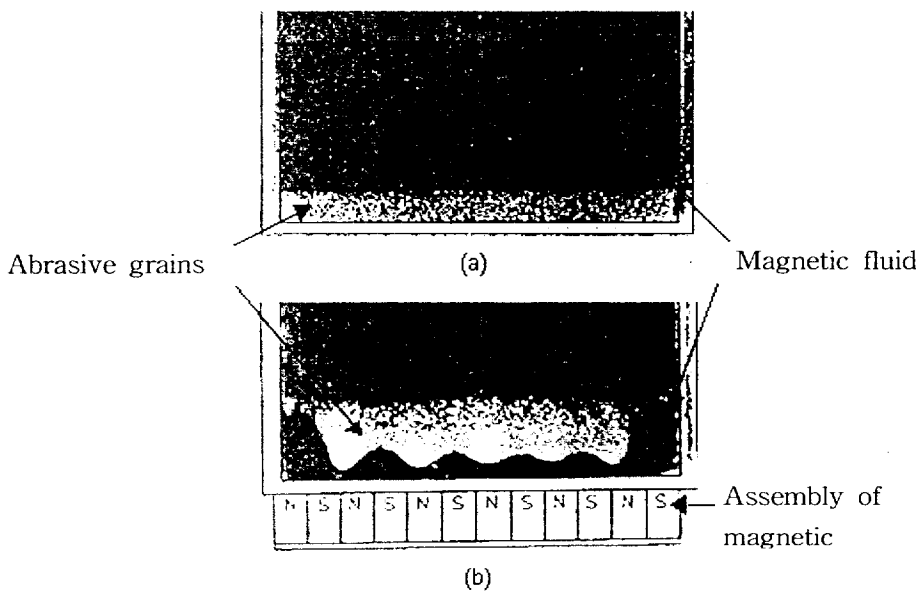


Fig. 6. Flootation of abrasive grains in magnetic fluid under magnetic field

Fig. 6(a)는 자성유체에 연마재를 혼합한 후 자장을 인가하기 전 상태를 나타낸 것으로 연마 재의 비중이 자성유체의 비중보다 커 용기의 바닥에 침강되어 쌓여 있는 상태를 나타내고 있으며 Fig. 6(b)는 자장을 인가한 상태를 나타낸 것으로 자석과 가까울수록 자성유체의 점도는 높아져 연마재의 비중과 자성유체의 부력이 평형을 이루는 위치에 연마재가 부양되어 있음을 보여주고 있다.

이것은 또한 세라믹볼이 가공되는 원리를 나타내고 있으며, 링(ring)모양의 비 자성 플로트를 용기에 삽입하면 연마재와 같이 자성유체의 자기부양력을 받아 연마재와 마찬가지로 용기 속에서 연마재와 같은 위치에 뜨게 되며 이 플로트 위에 세라믹 볼을 넣어 원주방향으로 배열하면 세라믹볼, 플로트, 연마재가 수직방향으로 동일위치에 자리잡게되는데 그 위치에 로터를 삽입하면 세라믹 볼은 지립이 집중되어 있는 위치에서 플로트 및 구동 축에 의하여 용기내벽에 압박 밀착된다.

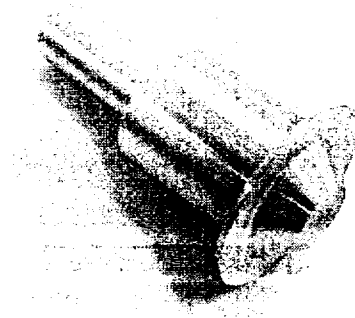
이러한 상태에서 구동 축을 회전시키면 세라믹볼은 용기내벽의 우레탄시트의 면을 따라서 미끄럼 및 회전운동을 하면서 자전과 공전을 반복하면서 연마된다.

여기서 연마하중을 주고 있는 플로트는 자성유체 중에 자기부양을 하기 때문에 세라믹볼 성형 시 불규칙한 형상에 의한 진동은 플로트의 댐퍼(damper)작용에 의하여 억제가 된다.

그리고 연마에 의한 가공 열은 자성유체가 흡수하여 가공물은 항상 냉각상태에서 가공이 이루어지기 때문에 고속회전을 이용할 수가 있다.

또한 세라믹 볼이 부양하고 있는 위치에는 항상 지립도 부양하고 있기 때문에 연속적으로 연마 면에 공급되면서 연마가 진행된다.

Fig. 7 은 로터의 사용 전(a)과 사용 후(b)의 모습을 사진으로 나타내었다. 사진에 나타난 바와 같이, 로터는 자성유체와 연마재의 영향으로 볼의 가공궤적에 따라 원주상으로 마모되는 것을 알 수 있으며, 볼과 접촉하며 볼을 회전시키는 역할을 하는 로터와 자성유체 및 연마재는 1시간마다 교환하며 실험을 하였다.



(a) Before use



(b) After use

Fig. 7. View of grinding rotors for alumina ball

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 실험결과

4-1-1. 연마재 입도에 따른 평균직경, 직경편차 및 연마량 결과

Table 4.는 연마재 GC #120으로 3시간동안 연마한 다음 초음파 세척 후에 평균 직경과 직경편차 및 연마량을 측정하여 나타내었으며, 자성유체와 연마재 및 로터도 불과 같이 연마가 되어 1시간마다 교환하여 실험을 하였으며, 소결시 생긴 요철부 모양은 1시간 연마로 완전히 없어졌다.

Table 4. Removal quantity of balls ground for 3 hours

Ball number	1	2	3	4	5	6	7	Total average	Total weight
Average diameter (mm)	8.7	8.72	8.73	8.74	8.72	8.7	8.71	8.717	10.3585 g
Deviation (mm)	0.02	0.01	0.015	0.021	0.02	0.015	0.017	0.0169	
Removal quantity (mm/3h)	0.7	0.63	0.73	0.63	0.73	0.78	0.66	0.694	

연마량은 가공전의 평균직경과 연마후의 평균직경 변화로 나타내었으며, 연마전의 총 평균 직경이 9.411mm, 연마후의 총 평균 직경은 8.739mm였으며, 총연마량은 $27.0\mu\text{m}/\text{min}$ 이고 볼 개당 평균 직경 연마량은 $3.86\mu\text{m}/\text{min}$ 가 연마되었으며, 중량으로 는 약 15.3%가 감소되었다.

아래 Fig. 8 은 GC #120으로 3시간 연마한 볼의 사진이다.

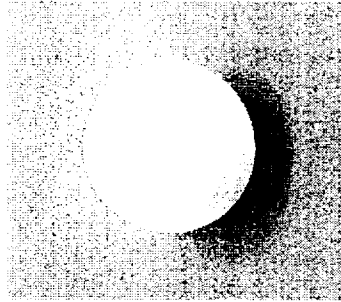


Fig. 8. Photographs of ball ground for 3 hours

아래 Table 5. 는 연마재 GC #220으로 동일한 가공 조건으로 3 시간 정도 연마를 하여 얻을 수 있었고, 평균직경과 직경편차 및 연마량을 측정하여 나타내었다.

총연마량은 $26.22\mu\text{m}/\text{min}$ 이며, 볼 개당 평균 직경 연마량은 $3.75\mu\text{m}/\text{min}$, #120에 비해서 약 $0.78\mu\text{m}/\text{min}$ 정도 연마량이 감소하였다.

Table 5. Removal quantity of balls ground for 3 hours

Ball number	1	2	3	4	5	6	7	Total average
Average diameter (mm)	8.74	8.75	8.74	8.75	8.75	8.74	8.74	8.744
Deviation (mm)	0.015	0.01	0.016	0.02	0.017	0.017	0.015	0.0157
Removal quantity (mm/3h)	0.69	0.62	0.66	0.63	0.67	0.71	0.74	0.674

Table 6. 은 연마재 GC #320으로 동일한 가공 조건으로 연마하였을 때와 같은 직경 편차를 얻는데는 약 4시간 연마를 하여 얻을 수 있었고, 평균직경과 직경편차 및 연마량을 측정하여 나타내었다.

총연마량은 $19.13\mu\text{m}/\text{min}$ 이며 볼 개당 평균직경 연마량은 $2.73\mu\text{m}/\text{min}$ 였으며, 연마량은 #120과 비교하여 $7.87\mu\text{m}/\text{min}$ 이 감소하였다.

Table 6. Removal quantity of balls ground for 4 hours

Ball number	1	2	3	4	5	6	7	Total average
Average diameter (mm)	8.78	8.76	8.75	8.76	8.75	8.76	8.75	8.759
Deviation (mm)	0.017	0.01	0.015	0.02	0.01	0.013	0.015	0.0143
Removal quantity (mm/4h)	0.6	0.64	0.71	0.64	0.63	0.7	0.67	0.656

Table 7. 은 연마재 GC #420으로 동일한 가공 조건으로 연마하였을 때와 같은 직경 편차를 얻는데는 약 5시간 연마를 하여 얻을 수 있었고, 평균직경과 직경편차 및 연마량을 측정하여 나타내었다.

총연마량은 $15.2\mu\text{m}/\text{min}$ 이며 볼 개당 평균직경 연마량은 $2.17\mu\text{m}/\text{min}$ 였으며, 연마량은 #120과 비교하여 $11.8\mu\text{m}/\text{min}$ 이 감소하였다.

Table 7. Removal quantity of balls ground for 5 hours

Ball number	1	2	3	4	5	6	7	Total average
Average diameter (mm)	8.77	8.78	8.76	8.77	8.78	8.76	8.77	8.770
Deviation (mm)	0.015	0.012	0.013	0.015	0.018	0.019	0.013	0.0150
Removal quantity (mm/5h)	0.66	0.7	0.64	0.58	0.67	0.7	0.61	0.651

아래 Fig. 9, 10 은 실험 전, 후의 직경변화 및 편차변화를 나타낸 그림이다.

연마재 GC #120으로 3시간 연마 후 볼의 평균 직경은 8.739mm였으며 각 볼마다 평균 0.694mm가 연마되었으며 직경편차 0.0169mm, GC #220은 평균직경 8.744mm

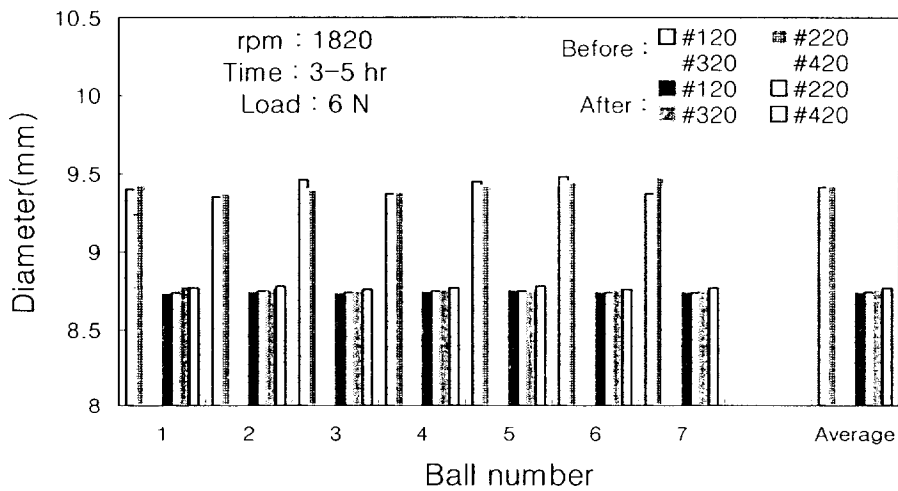


Fig. 9. Graphs of average diameter of ball before ground and after

직경편차 0.0157mm, GC #320은 4시간 연마 후 볼의 평균직경 8.759mm 직경편차

0.0011mm, GC #420은 5시간 연마 후 볼의 평균직경 8.770mm 직경편차 0.0139mm
 었다.

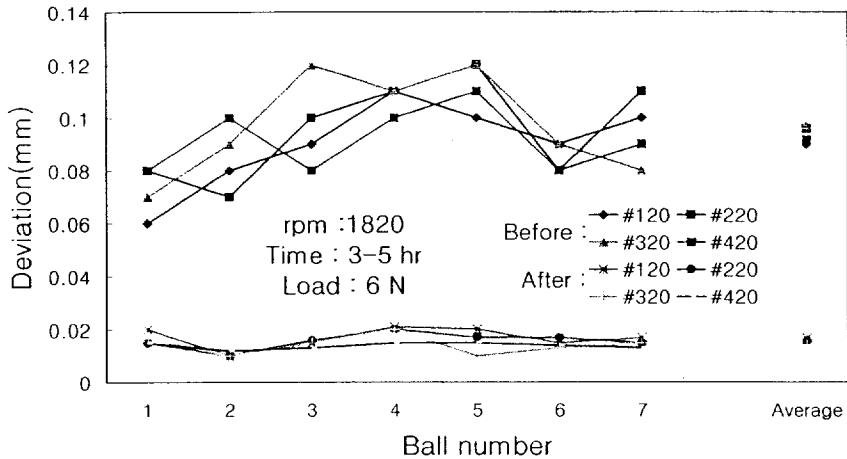


Fig. 10. Graphs of deviation of ball before ground and after

4-1-2. 로터 회전수에 따른 연마량 결과

Table 8. 은 동일한 조건의 연마재 GC #120, #220, #320, #420 으로 로터 회전수를 1820 rpm, 1400 rpm으로 3 - 5 시간 연마한 후 회전수에 따른 연마량을 측정하여 나타내었다.

총연마량은 회전수 1820rpm과 비교하면, 연마재 입도 #120에서 동일 시험 조건에서 회전수 1400rpm 의 경우 $26.33\mu\text{m}/\text{min}$ 으로 $0.67\mu\text{m}/\text{min}$ 감소, #220에서 $26.0\mu\text{m}/\text{min}$ 으로 $1.0\mu\text{m}/\text{min}$ 감소, #320에서 $18.79\mu\text{m}/\text{min}$ 으로 $8.21\mu\text{m}/\text{min}$ 감소, #420에서 15.13

$\mu\text{m}/\text{min}$ 으로 $11.87\mu\text{m}/\text{min}$ 감소하였다.

Table 8. Removal quantity of balls ground for 3-5hours with rotor rpm

Abrasive grains		#120	#220	#320	#420
Rotor rpm					
1820 rpm	Removal quantity ($\mu\text{m}/\text{min}$)	27.00	26.22	19.13	15.20
1400 rpm	Removal quantity ($\mu\text{m}/\text{min}$)	26.33	26.00	18.79	15.13
Grinding time		3 hour	3 hour	4 hour	5 hour

아래 Fig. 11 은 로터 회전수별 실험 후의 연마율 변화를 나타낸 그림이다.

연마재 입도가 작을수록 총연마량이 점차로 감소하는 것을 알수 있다.

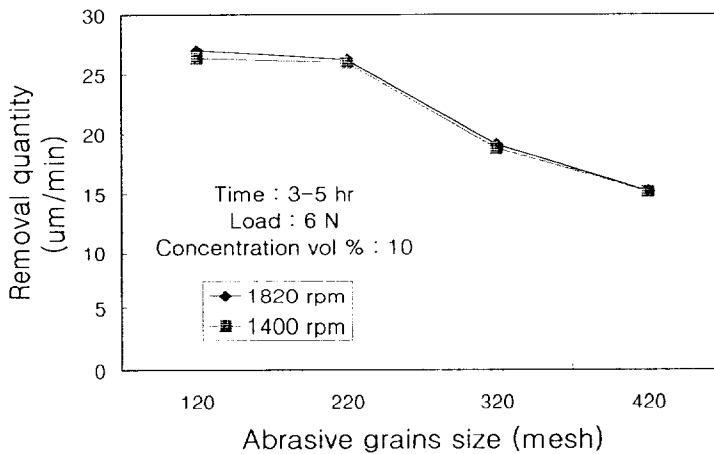


Fig. 11. Graphs of removal quantity of balls after ground with rotor rpm

4-1-3. 연마재 농도에 따른 평균직경과 연마량 결과

표 9 는 동일한 조건에서 연마재 GC #120으로 연마재 농도 15vol%로 3시간 연마한 후 평균직경과 연마량을 측정하여 나타내었다.

Table 9. Removal quantity of balls ground for 3hours by 15vol% concentration of abrasive grains

Ball number	1	2	3	4	5	6	7	Total average
Average Diameter (mm)	8.7	8.72	8.71	8.74	8.72	8.74	8.72	8.721
Removal quantity (mm/3h)	0.7	0.73	0.75	0.74	0.73	0.7	0.65	0.714

총연마량은 $27.78\mu\text{m}/\text{min}$, 볼 개당 평균 연마량은 $3.97\mu\text{m}/\text{min}$ 가 연마되었다.

Table 10. 은 연마재 GC#120으로 연마재 농도 20%로 3시간 연마한 후 평균직경과 연마량을 측정하여 나타내었고, 총연마량은 $27.89\mu\text{m}/\text{min}$ 이고, 볼 개당 평균 직경

Table 10. Removal quantity of balls ground for 3-hours by 20vol% concentration of abrasive grains

Ball number	1	2	3	4	5	6	7	Total average
Average diameter (mm)	8.71	8.7	8.71	8.72	8.7	8.71	8.72	8.710
Removal quantity (mm/3h)	0.73	0.69	0.69	0.76	0.75	0.75	0.65	0.717

연마량은 $3.98\mu\text{m}/\text{min}$ 가 연마되었다.

아래 Fig. 12 는 연마재 농도에 따른 연마량을 나타내는 그래프이다

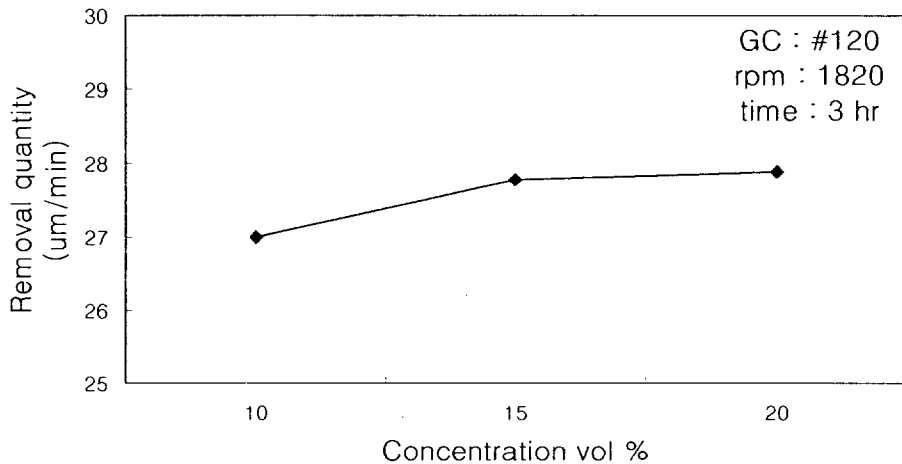


Fig. 12. Graphs of relationship between removal quantity and concentration of abrasive grains

4-1-4. 연마시간에 따른 평균직경과 연마량 결과

Table 11. 은 연마재 GC #420으로 연마재 농도 10vol%로 3, 5, 7, 9, 11시간 연마한 후 평균직경과 연마량을 측정하여 나타내었고, 3시간일 때 직경편차는 $25.68\mu\text{m}$, 5시간일 때 $13.90\mu\text{m}$, 7시간일 때 $11.78\mu\text{m}$, 9시간일 때 $10.98\mu\text{m}/\text{min}$, 11시간일 때 $10.88\mu\text{m}$ 로 연마되었다.

Table 11. Deviation of balls with grinding time

Grinding time(hours)	3	5	7	9	11
Deviation (μm)	25.68	13.9	11.78	10.98	10.88

아래 Fig. 13 은 연마시간에 따른 직경편차를 나타내는 그래프이다

연마시간이 증가함에 따라 직경 편차가 감소하는 것으로 나타났다

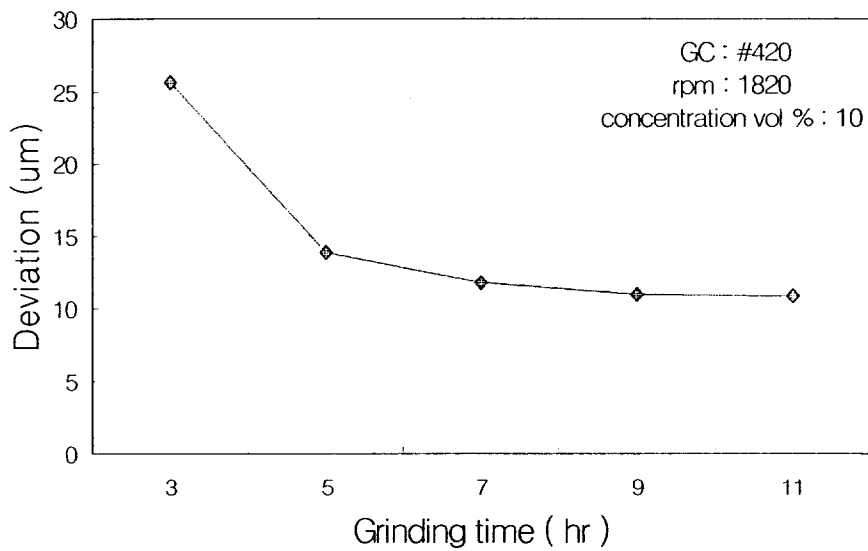


Fig. 13. Graphs of deviation of balls with grinding time

4-2. 고 찰

4-2-1. 평균직경 및 직경편차에 따른 고찰

Table 4, 5, 6, 7에서 연마 전후의 평균직경 및 직경편차를 나타내었다.

소결시 생긴 요철부가 직경 편차를 많이 유발 시켰으나, 1시간 연마 후에는 요철부 모양을 찾아볼 수 없었으며, 철(凸)부는 다른 부위보다 상대적으로 연마재와의 접촉으로 연마가 많이 되는 것으로 판단되며 3시간 연마 후에는 거의 일정한 편차를 갖는 것으로 나타났다.

연마재 GC #120으로 3시간 연마 후 볼의 평균 직경은 8.739mm였으며 각 볼마다 평균 0.694mm가 연마되었으며 직경편차 0.0169mm, GC #220은 평균직경 8.744mm, 직경편차 0.0157mm, GC #320은 4시간 연마 후 볼의 평균직경 8.759mm, 직경편차 0.0011mm, GC #420은 5시간 연마 후 볼의 평균직경 8.770mm, 직경편차 0.0139mm였으며, 이것은 종래의 세라믹 볼 연마보다 월등한 가공효율을 나타낸다.

4-2-2. 연마재 입도와 연마량과의 고찰

연마재 입도의 크기가 미세할수록 일정한 볼을 얻는데 걸리는 시간이 연장되었으며, 연마재 GC #120의 총연마량은 $27.0\mu\text{m}/\text{min}$ 이고 볼 개당 평균 직경 연마량은 $3.86\mu\text{m}/\text{min}$ 가 연마되었고, GC #220은 총연마량 $26.22\mu\text{m}/\text{min}$ 이고 볼 개당 평균 직경 연마량은 $3.75\mu\text{m}/\text{min}$ 가 연마되었고, GC #320은 총연마량 $19.13\mu\text{m}/\text{min}$ 이며 볼 개당 평균직경 연마량은 $2.73\mu\text{m}/\text{min}$ 이었고, GC #420은 총연마량 $15.2\mu\text{m}/\text{min}$ 이고 볼 개당 평균 직경 연마량 $2.17\mu\text{m}/\text{min}$ 가 연마되었고, #120을 사용하였을 때가 #420

을 사용하였을 경우보다 약 1.8배정도 연마율이 증가하였다.

4-2-3. 연마재 농도에 따른 연마량의 고찰

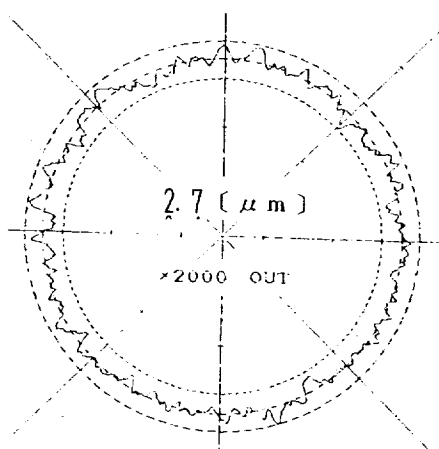
연마재의 농도가 증가하면 연마량도 함께 증가할 것이라는 일반적인 생각과는 달리 15vol%에서 연마량이 가장 증가하였는데, 이것은 연마재에 비하여 자성유체의 비율이 상대적으로 적어 연마재 중 일부는 컨테이너 바닥에 침강되고, 또한 자성유체에 자장을 인가하면 기묘한 진동²²⁾이 적게 발생되어 연마량이 감소한 것으로 판단된다.

4-2-4. 연마재 입도에 따른 표면거칠기의 고찰

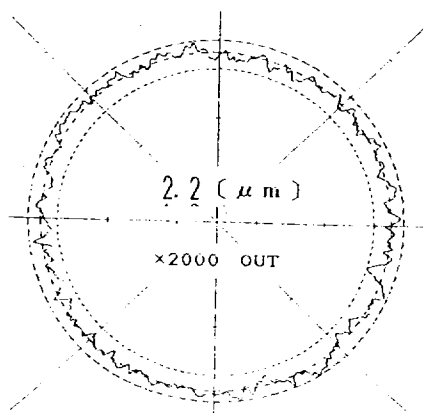
연마재 입도의 크기에 따라 연마량은 약 1.8배정도 증가를 하였으나, 표면거칠기는 거칠어졌다.¹⁸⁾

이것은 연마재의 날카로운 날이 재료표면에 압입되면 소성변형부가 발생하고 이 소성부에 인장 응력이 나타나며 이것에 의하여 재료의 표면에 균열이 발생고 부하가 증대되면 균열은 계속 성장하여 재료의 표면에 반원형인 레이디얼 균열(radial crack)¹⁹⁻²¹⁾이 발생하여 표면이 거칠어지며, 따라서 연마재 입도가 적은 것을 사용하면 재료표면에 균열이 적게 발생하여 표면거칠기가 향상될 것으로 판단된다.

Fig. 15는 연마재 #120과 #220을 사용하였을 때의 진구를 나타내고 있으며 #120을 사용한 진구는 2.7 μm 를 #220을 사용하였을 때는 2.2 μm 를 나타내고 있다.



(a) GC #120



(b) GC #220

Fig. 15. Sphericity of a ball ground

5. 결 론

자성유체내의 비 자성 물질은 자성유체에 자장을 인가하면 부력이 발생한다는 Rosensweig, R.E의 이론을 적용하여 자성유체에 연마재를 혼합하여 세라믹재의 연마에 미치는 여러 가지 특성들을 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 연마재 입도의 크기가 #120, 220, 320, 420의 경우 볼1 개당 연마량이 3.86, 3.75, 2.73, 2.17 $\mu\text{m}/\text{min}$ 으로, #120을 사용시 #420 보다 약 1.8배 증가 하여 입도가 미세할수록 불가공에 걸리는 시간이 연장되었다.

(2) 1 로트(lot) 전체 평균직경 감소는 연마재 농도 10, 15, 20 vol%에서 0.231, 0.238, 0.239 mm/hour로 연마되어 연마재의 농도가 높아도 미세하게 증가하였으나 15vol%일 때 평균직경 감소율이 크게 증가 하였다.

(3) 로터 회전수 1820 rpm과 1400 rpm 정도의 차이에서는 연마량 변화가 극히 적었다

참 고 문 헌

- 1) Johnson, D. R., Schaffhanser, A. C., Tennery, V. T., Long, E. L. and chulz, R. B., "Ceramic Technology for Advanced Heat Engines Project", The American Ceramic Society Bulletin, Vol. 64, No.2, pp.276-281, 1985
- 2) 絲魚川文廣, 中村 隆, 般橋鉀一 V溝ラップを用いた鋼球ラッピングの機構, 日本 機械學會論文集 (C編), 59, 562 (1993)
- 3) Scott, H. G., 1985, "Friction and Wear of Zirconia at Very Low Sliding Speeds," Wear of Materials, pp. 8-12.
- 4) Hannink, R. H. J., Murray, M. J. and Scott, H. J., 1984, "Friction and wear of Partially stabilized Zirconia: Basic Science and Practical Applications," Wear, Vol. 100, pp. 355-366.
- 5) Fischer, T. E. and Tomizawa, H., 1985 "Interaction of Tribochemistry and Microfracture in the Friction and Wear of Silicon Nitride, "wear Materials, pp. 22-32.
- 6) Rosensweig R. E., 1969, U. S. Patent 3843.
- 7) Rosensweig R. E., 1966, " Fluid Magnetic Buoyance," AIAA Journal, Vol. 4, No. 10, pp. 1751~1758.
- 8) Coulombre, R. E., d'Auriol, H., Schnee, L. Rosensweig, R. E. and Kaser, 1967, Rep. No. NAS5-9432, AVSSD-0222-67-CR, Goddard Space Flight Center. Greebelt, Marryland.

- 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 Metallurgy, Vol 22, No. 1, pp. 22~27.
- 10) 張世東：碩士學位請求論文 “濕式法에 의해서 製造된 MAGNETITE 및 KEROSEN 分散媒 磁性流體의 自己的 特性”
- 11) 姜信宇：工學博士學位論文 “高性能 磁性流體의 製造 및 기름 密封應用性에 관한 研究”(1996)
- 12) 張敬五：碩士學位請求論文 “解膠法으로 製造한 磁性流體의 自己的 特性”
- 13) 武富 荒, 近角聯信：磁性流體 - 基礎と應用, 日刊工業新聞社(1989)
- 14) 차동득, 이명재, 소수덕, 성락원, 김영삼, 박세윤, 1989, “鋼의 酸洗廢水를 利用한 Magnetite 磁性잉크 製造에 觀한 研究” 大韓金屬學會誌, 第27卷, 第9號.
- 15) 神山新一：磁性流體 入門, 産業圖書 (1989)
- 16) T.H.C. Chils, S. Mahmood & H.J.Yoon : Proc. of Institution of Mechaical Engineers, 208,B1 (1994)47
- 17) 엄호성, 노병옥, 이수완, 장태석 : 大韓機械學會 論文集 “磁性流體 研磨法을 利用한 세라믹볼 베어링 加工裝置의 開發” (1998)
- 18) N. Umehara and K. Kato, 1990, "Principles of Magnetic Fluid Grinding of Ceramic Balls," Applied. Electromagnetics in Materials 1, Vol.1,pp. 37~43
- 19) 梅原德次, 加藤康司, 水口信一, 中村 茂：精密工學會誌, 61, 11(1994)

- 20) 山本豊壽,梅原徳次,加藤康司,阿高松男,渡辺和夫：日本機械學會論文集（1992）
- 21) 今中治,黒部利次,松島一晃：磁性流體 利用 による砥粒加工
--Field-assisted Fine Finishing(FFF)--に関する研究(1981)
- 22) 梅原徳次, 機能性流体のトライボロジー 磁性流體研磨：トライボロジスト
第41巻 pp.476 ～ 481 (1996)

감사의 글

여러 가지로 부족한 저에게 아낌없는 격려와 용기를 주시고 이 논문이 결실을 맺도록 지도하여 주신 金 亨資 지도교수님께 깊은 감사를 드리며 항상 건강하시고 가정의 행복을 기원합니다.

그리고 논문작성에 충고와 지도를 해주신 李 守鍾 교수님, 吳 明錫 교수님께 감사를 드리며, 대학원 수학기간 동안 높은 학식과 인생의 경험을 통하여 많은 관심과 가르침을 주신 기계설계학과와 여러 교수님께 감사드립니다.

또한 바쁜 가운데서도 늘 용기와 격려를 해주신 대한상공회의소 부산인력개발원 김홍도원장님, 여러 선생님께 진심으로 감사를 드리며, 특히 본 논문을 위해 자신의 일처럼 열과 성을 다하여 도와주신 부산인력개발원 조성현 선생님, 박재기 선생님과 부경대학교 기계설계학과 원생들을 비롯한 모든분께 고마운 마음을 전하고, 후학을 육성하는 교육자로서 항상 배우고 노력하는 계기로 삼아 더욱 정진할 것을 다짐합니다.

끝으로 멀리서 자식의 학업을 대견해 하시던 어머니께 이 작은 결실을 올립니다. 그리고 어려운 여건에서도 언제나 헌신적으로 내조하여 용기를 준 사랑하는 아내와 아들 종광, 쌍둥이 딸 다정, 다은, 그리고 나의 형제 자매들과 이 기쁨과 영광을 함께 하고 싶습니다.

2001년 12월

김 상식 올림