

## 이중 기공구조를 갖는 다공질체의 제조

윤중열<sup>†</sup> · 김해두 · 박천홍\*

한국기계연구원 세라믹재료그룹

\*한국기계연구원 공작기계그룹

(2002년 8월 6일 접수; 2002년 9월 26일 승인)

### Fabrication of Double-layered Porous Materials

Jung-Yeul Yun<sup>†</sup>, Hai-Doo Kim and Chun-Hong Park\*

Ceramic Materials Group, Korea Institute of Machinery and Materials, Changwon, Kyungnam 641-010, Korea

\*Machine Tools Group, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea

(Received August 6, 2002; Accepted September 26, 2002)

#### 초 록

표면층과 내부간의 기공구조가 다른 다공질체를 제조하기 위해 입자크기가 다른 두 종류의 분체를 이용하여 다공질 성형체를 제조하였다. 두 층간의 소결 수축율을 동일하게 제어하기 위해 성형밀도 변화에 따른 소결밀도 변화를 예측할 수 있는 Ford's equation을 도입하여 소결 수축율이 동일한 조건을 구하였다. 제조된 다공질체는 미세구조와 통기도를 조사함으로써 기공의 이중 구조화 여부를 평가하였다. SEM 관찰결과 기공크기가 다른 두 층으로 구성되어 있는 것을 확인하였다. 각 층의 통기도는 출발 입자크기와 기공율이 클수록 증가하였으며, 이중 기공구조를 갖는 시편의 통기도는 기공크기가 작은 층의 특성에 의존하였다.

#### ABSTRACT

In order to fabricate double-layered porous materials powders of different particle sizes were pressed stepwise. Ford's equation which predicts the fired density with the change in pressed density was employed in order to adjust the difference in sintering shrinkage of the green body with double-layered porous structure. Double-layered porous materials were characterized by investigating microstructures and permeability. SEM micrographs showed the distinct difference in pore sizes of double-layered porous material. Permeability of single-layered porous material increased by increasing the starting particle sizes and porosity as well. Permeability of the double-layered porous material depends largely on the layer of small pore diameter.

**Key words :** Double-layered porous materials, Permeability, Shrinkage, Pore size

#### 1. 서 론

다공질 재료는 21세기 산업의 핵심 분야인 환경 에너지 산업, 정밀 기계 산업, 자동차 산업, 의료 산업 등에서 핵심 부품에 소요되고 있다. 특히 최근 들어서는 구조재료로서의 특성뿐만 아니라 다공체로서의 특성까지를 활용한 응용분야가 활성화되고 있으며, 그 대표적인 응용으로 다공질 에어베어링 stage를 들 수 있다. 에어베어링 stage는 가공물을 적재한 테이블을 수십마이크론의 미소간극을 유지하도록 공기압으로 부상시킨 상태에서 레일을 따라 이동시키는 장비로서, 공기를 매개체로 사용함으로써

구동시에 마찰력과 열발생이 거의 없어 나노미터급의 위치결정 정밀도를 얻을 수 있는 장점을 지니고 있으며, 이에 따라 0.1  $\mu\text{m}$ 의 회로 선폭을 갖는 반도체 가공용 photo 리소그래피 장비 및 그 가공 선폭을 검사하는 CD inspection장비 등에 활발히 적용되고 있다.

다공질재료를 에어베어링 stage에 적용하는 경우, 미세한 급기공(공기가 베어링안으로 전달되도록 0.3~0.5 mm 직경으로 미세하게 가공된 hole)을 원주돌레에 다수 가공하여 사용하는 일반적인 에어베어링에 비해, 훨씬 많은 급기공을 베어링내에 고르게 분포시킬 수 있으므로 베어링이 받을 수 있는 하중 및 강성을 증가시킬 수 있으며, 베어링내 공기가 외부로 배출될 때의 배기 속도를 감소시킬 수 있어 배기에 따른 미소진동의 크기도 대폭 감소시킬 수 있다는 장점이 있다.

다공질 에어베어링의 개발 초기에는 금속 소결재를 주

<sup>†</sup>Corresponding author : Jung-Yeul Yun

E-mail : yjy1706@kmail.kimm.re.kr

Tel : +82-55-280-3561 Fax : +82-55-280-3399

로 이용하였으나 베어링면으로 사용하기 위해 연삭가공을 하게 되면 금속재료의 연성에 의해 다공질재료의 표면 기공이 막히게 되어 베어링으로써 필요한 유량을 일정하게 제어하기 어려워지므로 양산성이 문제시 되었다.<sup>1)</sup> 이에 대한 해결책으로 1990년대 들어 연삭가공성이 좋은 탄소 소재를 이용한 에어베어링이 실용화되고 있으나, 이 경우 탄소 입자간 낮은 결합강도에 기인하여 기계 가공 후 또는 구동 중에 미세한 입자가 발생할 가능성이 높아 고청정도가 필수인 반도체 제조공정에 오염요인으로 작용할 가능성이 있으며, 또한 재료내 기공율을 증가시켜 강성 및 부하용량을 증가시키기에 따라 Pneumatic Hammer 현상이 발생하는 문제점을 안고 있다.<sup>2)</sup>

Pneumatic Hammer 현상은, 베어링 내에 머무는 공기의 압축성에 기인하여 발생하는 고주파의 자력진동(self-excited vibration)이다. 즉, 임의의 하중을 받아 에어베어링 내 간극이 감소할 경우, 간극이 감소한 부피만큼의 공기량이 외부로 배출되면 힘의 평형이 이루어져 아무 문제가 없으나 실제로 간극내 공기는 점성에 의해 충분히 배출되지 못하며, 남은 공기는 간극과 다공질재료 내에서 압축되어 간극 내 압력을 평형 압력이상으로 증가시키게 된다. 따라서 베어링은 힘의 평형을 이루기 위해 압력이 감소할 수 있도록 간극이 커지는 방향으로 변위하게 된다. 이 때 역시 베어링 간극이 증가한 만큼 공기가 유입되면 힘의 평형은 이루어지나 실제로는 다공질재료의 저항효과와 압축된 공기의 팽창으로 압력은 다시 힘의 평형이하로 감소하게 되며, 이에 따라 압력을 높여 힘의 평형을 이루기 위해 베어링은 간극이 감소하는 방향으로 다시 변위하게 된다. 이러한 현상이 고주파로 반복되는 것이 Pneumatic Hammer이다. 다공질 에어베어링에 있어 이러한 현상을 효과적으로 방지하는 수단으로, 베어링 간극면으로 사용되는 재료표면의 기공을 급격히 감소시켜 역류를 최대한 방지함으로써 간극이 감소해도 다공질재료 내의 공기는 압축되지 않도록 하는 방법이 제안되고 있다.<sup>3)</sup> 표면층의 기공크기가 작고 내부의 기공크기가 큰 이중 기공구조를 갖는 다공질체는 다공질 에어베어링에 있어 소재를 지나 베어링 간극내를 통과하는 공기가 베어링 간극의 dynamic한 변화에 의해 체적이 변화하는 경우, 그에 의한 압축효과가 발생하지 않도록 역류를 방지할 수 있다. 즉 미세기공층을 형성함으로써 베어링 간극에서 밀려난 공기가 대기로 나가지 않고 기공크기가 큰 소재쪽으로 역류하는 것을 방지하는 효과를 갖게 된다. 따라서 기본적으로 에어베어링을 형성하는 소재의 표면층과 내부의 기공크기 및 통기도는 다르게 제작되어야 상대적인 incompressibility를 갖게 되어 Pneumatic Hammer를 방지할 수 있다. 만약에 미세기공만을 갖는 단층으로 소재를 구성하면 에어베어링으로서의 충분한 유량이 얻어지지 않는 단점을 가지고 있다.

따라서 표면층의 기공 크기는 작고 내부의 기공 크기가 큰 이중 기공구조를 갖는 다공질 재료의 개발이 요구되며, 구체적으로는 설계된 베어링 성능이 얻어질 수 있도록 이중 구조의 각 층을 원하는 두께와 기공크기 및 기공율로 제어할 수 있는 성형 및 소결기술이 필요하다.

본 연구에서는 입자 크기가 다른 알루미늄 분말을 사용하여 상기와 같은 이중 기공구조를 갖는 에어베어링용 다공질 재료를 개발하고자 한다. 입자크기가 다른 알루미늄 분말을 이용하여 표면층과 내부의 기공구조가 다른 다공질 재료를 제조할 경우 소결 수축율 차이에 기인해 시편에 변형이 발생한다. 따라서 이러한 이중 기공구조를 갖는 다공질 재료의 개발에서는 소결거동이 다른 두 원료 분말의 수축율이 유사하게 되도록 입자 크기가 큰 분말의 소결수축을 제어하는 것이 주요한 핵심 기술이다. 따라서 본 연구에서는 각 원료분말의 소결 수축거동을 분석하여 동일한 소결 수축거동을 갖는 분말의 조합을 선정하였으며, 다만 프레스법을 사용하여 이중 기공구조를 갖는 다공질 재료를 제조하고자 한다. 입자크기가 큰 분말의 소결 수축율을 입자크기가 작은 분말의 소결수축율과 유사하게 되도록 소결 중 액상을 형성시키는 flux를 첨가하여 제어 하였다. 또한 각 원료분말들의 소결 수축거동을 분석하기 위해 Ford의 parabolic relationship<sup>4,5)</sup>을 사용하여 많은 양의 실험을 직접 수행하지 않고 성형밀도/소결밀도/수축율 관계를 예측하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 소결체의 기공 크기를 제어하기 위해서 평균 입자크기가 다른 알루미늄 분말(AM-27, ALM-44, AM-21, A-21, Sumitomo, Japan)을 원료로 사용하였다. Table 1은 본 연구에서 사용한 알루미늄 분말의 화학조성과 평균 입자 크기를 나타내었다.

표면부위에 작은 기공크기와 내부에 큰 기공크기를 제조하기 위해 표면부위에는 작은 입자크기, 내부에는 큰 입자크기의 알루미늄 분말을 사용하였다. 소결 수축을 mismatch를 제어하기 위해 큰 입자크기의 알루미늄에 flux (Kaoline 67 wt%, Talc 5 wt%, CaCO<sub>3</sub> 28%)를 첨가하였으며, 최적 첨가량을 알기 위해 0, 0.5, 1.0, 3.0, 5.0%를 첨가하였다.

각 원료분말들은 불밀을 사용하여 성형조제[결합제(PVA)와 윤활제(PEG)를 각각 0.5%]와 flux를 혼합하였으며 이 때 불과 분말의 무게비는 2:1로 하였고, 물과 분말의 무게비도 2:1로 하였다.

준비된 각 원료분말들은 68 MPa의 성형압을 가하여 직경 35 mm의 disk 형상으로 성형하였으며, 각 원료분말의 소결수축 거동을 알아보기 위하여 다양한 성형밀

Table 1. Chemical Composition of Alumina Powder\*

Qualitative data	Grade	Fine Particle		Coarse Particle	
		AM-27	ALM-44	AM-21	A-21
Chemical composition	H <sub>2</sub> O (%)	0.11	0.07	0.2	0.03
	L.O.I. (%)	0.20	0.06	0.05	0.04
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0.01	0.01	0.01	0.01
	SiO <sub>2</sub> (%)	0.01	0.05	0.02	0.01
	Na <sub>2</sub> O (%)	0.24	0.02	0.26	0.24
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	99.7	99.9	99.7	99.7

\*Provided by manufacturer

도로 구분하여 성형하였다. 또한 2층의 서로 다른 기공 구조를 갖는 성형체는 동일한 소결수축거동을 갖는 입자크기가 다른 두 종류의 분말 조합으로 먼저 미세분말을 성형하고, 그 후 조대분말을 성형하는 다단 프레스법으로 성형하였다. 준비된 각 성형체는 소결온도 1600°C에서 3시간 소결하였으며, 이때 가열속도는 300°C/h로 실시하였다.

소결된 각 시편은 성형밀도와 소결밀도, 수축율을 조사하여 서로 다른 크기의 원료분말들을 동시소결 하였을 때 동일한 소결수축이 일어나는 조건을 분석하였고, Perm-Porometer(CFP1200AEL, PMI, USA)와 mercury porosimetry (AutoPore 9510, micromeritics, USA)를 이용하여 기공율, 기공크기, 통기도 등을 분석하였다. 또한 SEM(JSM-5800, JEOL, Japan)을 이용하여 기공구조를 고찰하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 입자크기가 다른 각 원료분말의 소결수축 거동 분석

본 연구에서는 입자크기가 다른 두 종류의 분말 조합을 통해 한 재료 내에 기공의 크기가 다른 이중 기공구조를 가지게 하는 것을 목적으로 하고 있다. 그러나 입자크기가 서로 다른 분말의 경우 동일한 소결조건에서 소결수축거동은 서로 다른 양상을 보이기 때문에 각 원료분말의 소결수축 거동을 분석하고 이를 통해 동일한 소결수축 거동을 갖는 분말의 조합을 결정하는 것이 이중 기공구조를 갖는 소재를 개발하는데 있어 중요한 인자이다.

본 연구에서는 최소한의 실험으로 동일한 수축율을 갖는 한 쌍 이상의 원료분말의 조합을 결정하기 위해 Ford's parabolic equation<sup>4)</sup>을 도입하였다.

Ford's parabolic equation은 알루미늄의 초기 성형밀도가 소결 후 소결밀도에 미치는 영향에 대한 관계식으로써 소결 후 밀도증가량( $D_F - D_P$ )을 상대 성형밀도( $D_P/D_T$ )에 대해 나타내었으며, 이 두 변수간의 관계가 parabolic 형태를 유지함을 제안한 식이다.

$$Y = a \cdot X \cdot (1 - X) \quad (1)$$

$$D_F - D_P = a \cdot \frac{D_P}{D_T} \cdot \left(1 - \frac{D_P}{D_T}\right) \quad (2)$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = 1 - \frac{D_P}{D_F} = \frac{m(1-\gamma)}{[1+m(1-\gamma)]} \quad \text{where } m=a/D_T, r=D_P/D_T \quad (3)$$

식(1)은 parabolic equation의 일반식을 표현하고 있으며, (1)의 일반식에 밀도증가량( $D_F - D_P$ )과 상대 성형밀도( $D_P/D_T$ )를 대입하여 나타낸 Ford's equation이 식(2)에 나타나 있다. 또한 식(3)은 성형밀도와 소결밀도의 변화로부터 소결수축거동을 예측할 수 있는 관계식을 나타내고 있다.

식(2)의 parabolic 관계는 Kim 등<sup>5)</sup>에 의해 알루미늄에게 적용하여 밀도 증가량과 상대 성형밀도 사이에 parabolic 관계가 성립함을 실험적으로 증명하였다. 상기 parabolic 관계식 채용의 의미는 임의의 온도에서 한 쌍의 성형밀도/소결밀도 data를 가지고 있다면 전 성형밀도 구간에 걸쳐 parabolic 관계식을 그릴 수 있으며, 따라서 임의의 성형밀도에 대해 소결밀도 및 소결 수축율을 예측할 수 있다는 것이다. 따라서 출발원료가 다른 여러 system의 경우 몇 회의 제한된 실험으로 밀도 증가율 및 소결 수축율이 동일한 원료분말 system을 선택할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 각 원료분말을 동일한 성형조건에서 성형한 후 동일한 소결조건에서 소결을 실시, 각 원료분말의 parabolic equation을 작성하였으며, 이를 통해 동일한 소결수축거동을 갖는 분말의 조합을 결정할 수 있었고, 원하는 소결밀도를 갖는 성형조건을 설정할 수 있었다.

Fig. 1은 평균 입자 크기가 각각 1, 2.5, 4  $\mu\text{m}$ 인 알루미늄 분말을 이용하여 동일한 성형조건(68 MPa)으로 성형 후 소결하여 도시한 parabolic curve를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 평균 입자 크기가 2.5  $\mu\text{m}$ 와 4  $\mu\text{m}$ 인 알루미늄 분말들은 서로 비슷한 소결거동을 보이고 있는 반면 평균 입자 크기가 1  $\mu\text{m}$ 인 알루미늄 분말의 경우 성형

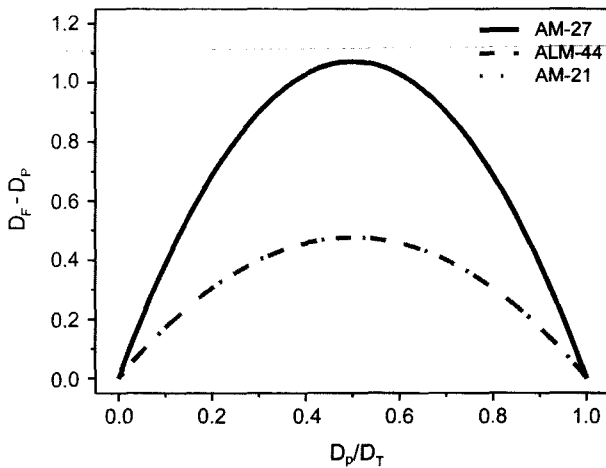


Fig. 1. The variation of the density increase ( $D_F - D_P$ ) with the pressed relative density ( $D_P / D_T$ ) for AM-27, ALM-44, AM-21.

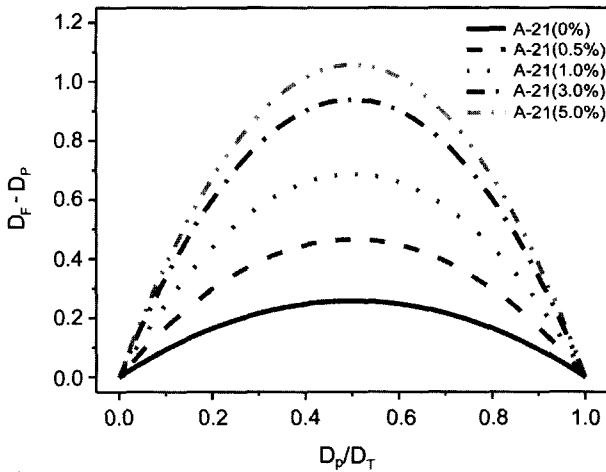


Fig. 2. The variation of the density increase ( $D_F - D_P$ ) with the pressed relative density ( $D_P / D_T$ ) for A-21 with 0-5.0 wt% flux.

밀도변화에 따른 소결밀도의 변화 폭이 비교적 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 입자의 크기가 작을수록 소결수축이 많이 일어난다는 것과 일치한다.

Fig. 2는 평균 입자 크기가 50  $\mu\text{m}$ 인 알루미늄 분말(A-21)에 flux를 0-5.0%를 첨가한 후 동일한 성형조건 (68 Mpa)으로 성형을 실시한 후 소결하여 도시한 parabolic

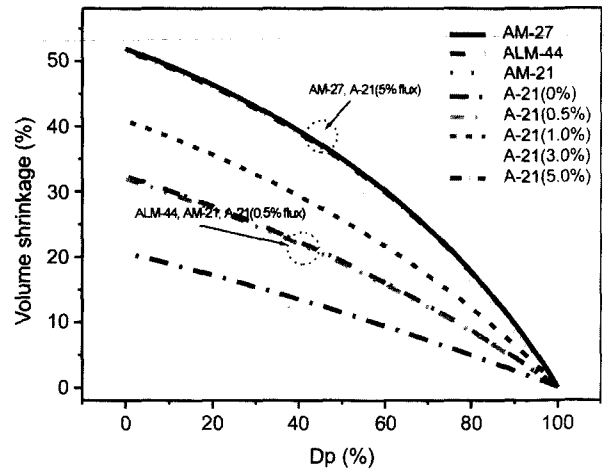


Fig. 3. The variation of the volume shrinkage with the pressed density for AM-27, ALM-44, AM-21 and A-21 with 0-5.0 wt% flux.

curve를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 flux의 첨가량이 증가할수록 성형밀도의 변화에 따른 소결밀도의 변화 폭이 증가하고 있음을 알 수 있으며, 이를 통해 평균 입자의 크기가 큰 알루미늄 분말에 flux의 양을 적정량 첨가함으로써 소결 수축을 제어할 수 있음을 알 수 있다.

Table 2에는 Figs. 1과 2에 나타난 원료분말들의 parabolic curve를 Ford's equation 형태로 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 평균 입자크기가 1  $\mu\text{m}$ 인 AM-27과 5.0%의 flux를 첨가한 평균 입자크기 50  $\mu\text{m}$ 인 A-21의 parabolic equation이 유사한 값을 가지며, 평균 입자크기 각각 2.5  $\mu\text{m}$ , 4  $\mu\text{m}$ 인 ALM-44, AM-21과 0.5%의 flux를 첨가한 평균 입자크기 50  $\mu\text{m}$ 인 A-21의 parabolic equation이 유사한 값을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 3은 상기 각 분말들의 성형밀도의 변화에 따른 소결 수축의 변화에 대해 나타낸 것으로 앞에서 언급하였듯이 AM-27과 A-21(5.0% flux)가 거의 유사한 소결거동을 보이고 있으며, ALM-44, AM-21과 A-21(0.5% flux)가 거의 유사한 소결 수축거동을 보이고 있음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 위와 같은 결과를 바탕으로 이 중의 기공구조를 갖는 시편을 제조하기 위하여 Table 3과 같은 분말 조합을 선정하였으며, 이를 바탕으로 이중 기공구조 시편을 제조하였다.

Table 2. Parabolic Equations for Several Alumina Powders

AM-27	$Y=1.07625X(1-X)$	A-21 (0.5% flux)	$Y=0.46794X(1-X)$
ALM-44	$Y=0.47719X(1-X)$	A-21 (1.0% flux)	$Y=0.68959X(1-X)$
AM-21	$Y=0.47820X(1-X)$	A-21 (3.0% flux)	$Y=0.94366X(1-X)$
A-21 (0% flux)	$Y=0.25884X(1-X)$	A-21 (5.0% flux)	$Y=1.06235X(1-X)$

Table 3. Combination of Fine/Coarse Powders for Double-layered Porous Materials

1	AM-27	1	A-21+5.0%flux	50
2	ALM-44	2.5	A-21+0.5%flux	50
3	AM-21	4	A-21+0.5%flux	50

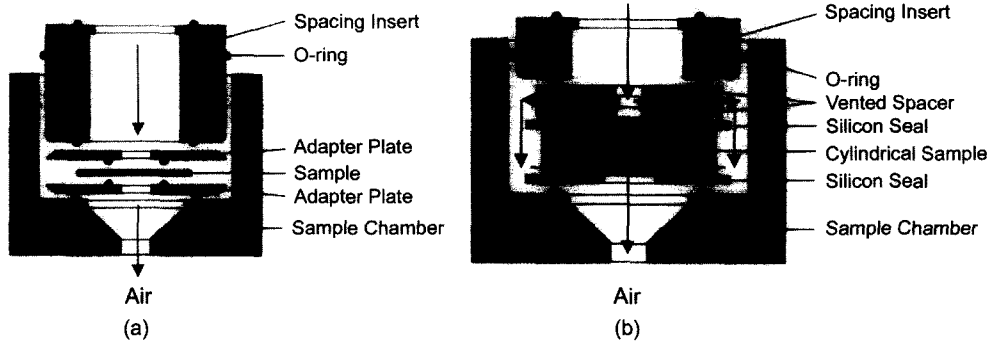


Fig. 4. Schematic diagrams of sample chamber for the measurement of permeability in Z direction (a) and X-Y direction (b).

3.2. 통기도 특성 분석

통기도(Permeability)<sup>6,7)</sup>는 재료에 특정한 압력의 유체를 걸어주었을 때 재료의 반대방향으로 통과되어 나오는 flow rate의 변화를 나타낸 것이다.

다공질 재료의 penetrating pore에 의해 결정되는 통기도는 본 연구에서 개발하고자 하는 반도체 Stepper 장비 X-Y Stage용 다공질 에어베어링에 사용될 다공질 재료의 응용에 있어 매우 중요한 인자이다. 다공질 에어베어링에 적용되는 기체의 유동은 기공이 아주 크지 않고 에어베어링의 상대속도가 아주 커지지 않는한 기본적으로 viscous, laminar flow를 가지게 된다.

일반적으로 다공질 재료를 통과하는 유체의 흐름에 대한 식은 Darcy's equation에 의해 표현되며, 유체가 재료를 통과시 압력차와 flow rate 사이의 관계를 나타내었다.

$$\text{Darcy's equation : } \frac{\Delta P}{e} = \frac{Q\eta}{A\alpha} \quad (4)$$

where  $\Delta P$  : 매질통과시 압력차(N/m<sup>2</sup>),  $e$  : 시편의 두께(m)  
 $Q$  : flow rate(m<sup>3</sup>/s),  $\eta$  : 유체의 점성(N.s/m<sup>2</sup>)  
 $A$  : 시편의 면적(m<sup>2</sup>),  $\alpha$  : permeability 계수(m<sup>2</sup>)

Fig. 4는 본 연구에서 사용한 통기도 측정 장비와 측정 모식도를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 재료의 상단에서 하단으로 유체를 통과시키면서 압력차와 flow rate의 변화를 측정할 수 있는 구조로 되어 있다. 통기도는 다공질 재료의 Z 방향과 X-Y plane 두 방향으로 측정하였으며, 단일 및 이중 기공구조를 갖는 다공질 재료의 Z 방향에 따른 통기도는 Fig. 4(a)에 나타낸 chamber를 사용

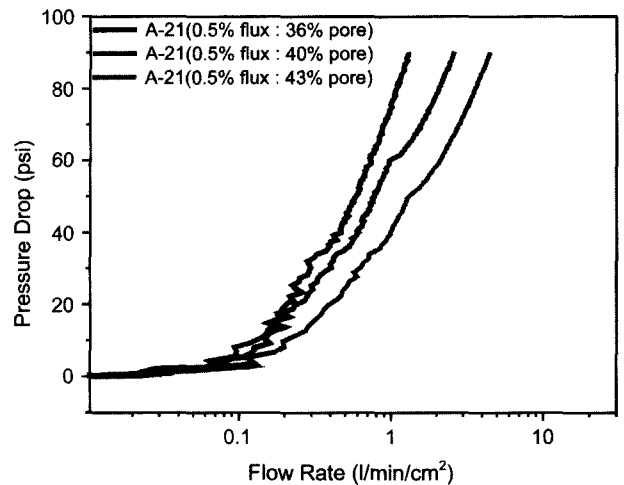


Fig. 5. Variations of pressure drop-flow rate for porosity.

하였고, 이중 기공구조를 갖는 다공질 재료의 X-Y plane의 통기도는 Fig. 4(b)에 나타낸 chamber를 사용하여 측정하였다.

Fig. 5에는 Fig. 4(a)의 sample chamber를 사용하여 0.5% flux를 첨가한 평균 입자 크기 50µm 알루미늄 분말(A-21(0.5% flux))의 Z 방향으로의 기공율의 변화에 따른 통기도 특성을 나타내었다. 그림을 살펴보면 유속이 증가할수록 pressure drop이 증가함을 알 수 있다. 이것은 일반적인 다공질 재료의 통기도 특성을 나타내는 것으로 동일한 재료를 통과하는 유체의 흐름이 클수록 재료의 양단에서의 유체의 압력차가 커진다는 것을 의미한다. 또한 Fig. 5는 A-21(0.5% flux) 시편의 기공율 증가에 따른 통

기도의 변화를 나타낸 것으로, 재료의 기공율이 증가할수록(36→43%) 유속의 증가에 대한 pressure drop의 증가가 적음을 나타내고 있으며, 이는 재료의 기공율이 증가할수록 재료를 통과하는 유속이 동일할 때 재료의 양단에 발생하는 유체의 압력차가 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 6은 유사한 기공율을 가지면서 원료분말의 크기가 다른 재료의 통기도 특성을 나타내었다. 그림을 살펴보면 원료분말의 크기가 증가할수록 일정한 유속에서 재료 양단에서의 pressure drop이 작음을 알 수 있으며, 이는 원료분말의 크기가 증가할수록 통기도 특성이 좋아짐을 의미한다. 이러한 현상은 원료분말의 크기가 클수록 재료 내에 생성되는 기공의 크기 또한 증가하기 때문으로 판단된다.

Fig. 7에는 평균 입자크기가 4 μm인 AM-21과 평균 입자크기가 50 μm인 A-21(0.5% flux)을 사용하여 각 층 두께가 2 mm, 8 mm로 조정된 소결체의 모식도를 나타내었다. 상기 시편처럼 이중 기공구조를 갖는 재료의 통기도는 Fig. 4(a), (b)의 sample chamber를 사용하여 Z(수직)

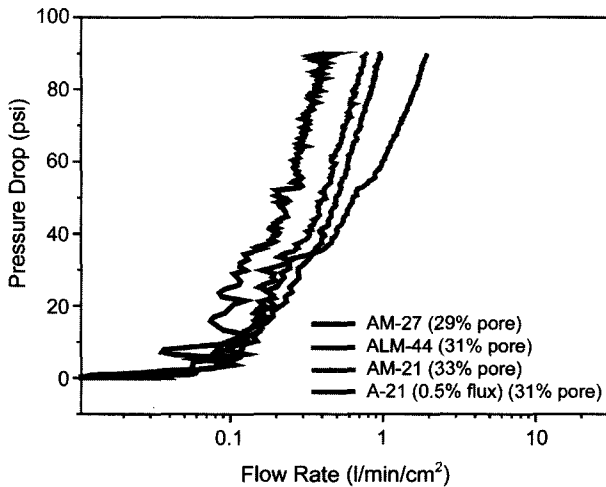


Fig. 6. Variations of pressure drop-flow rate for powder size.

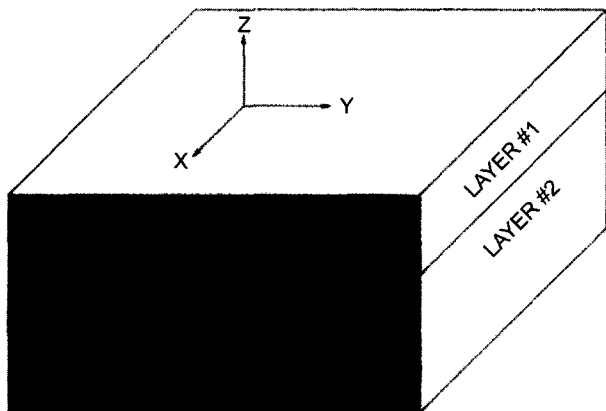


Fig. 7. Schematic diagram for double pore structure.

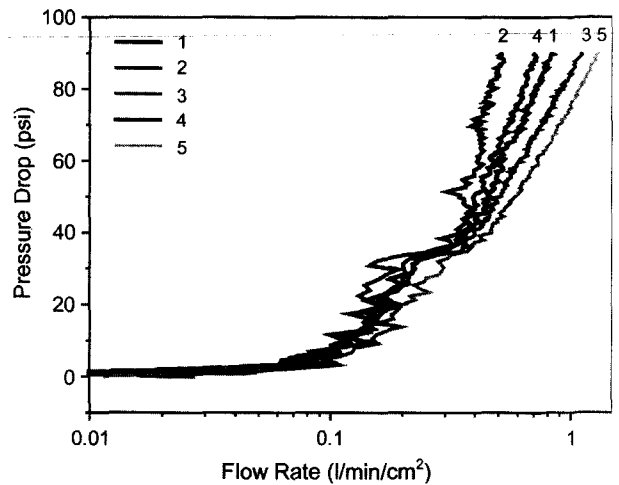


Fig. 8. Variations of pressure drop-flow rate for different directions.

1. Z direction for double layer pore structure.
2. Air flows from X-Y direction to small pore size layer.
3. Air flows from X-Y direction to large pore size layer.
4. Z direction for single layer pore structure(AM-21).
5. Z direction for single layer pore structure(A-21(0.5% flux)).

방향과 X-Y plane으로 각각 측정하였다.

Fig. 8은 이중 기공구조의 각 방향에서의 통기도 측정 결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 유체를 작은 기공 쪽으로 통과시켰을 때보다 큰 기공 쪽으로 통과시켰을 때 통기도가 증가하였으며, 수직방향으로 통과시켰을 때는 입자크기가 작은 분말들로만 제조된 단일 기공구조의 통기도와 입자 크기가 큰 분말들로만 제조한 단일 기공구조의 통기도 값의 중간값을 가지며, 비교적 입자 크기가 작은 분말들로만 제조된 단일 기공구조의 통기도에 근접한 통기도 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 이것은 이중 기공구조 재료의 수직방향으로의 통기도는 작은 기공크기를 갖는 재료에 영향을 많이 받는다는 것을 의미한다.

### 3.3. 기공크기 및 기공분포 특성 분석

본 연구에서 제조한 세라믹 다공질 재료의 기공 크기는 Mercury porosimetry<sup>8)</sup>를 사용하여 측정하였다. Mercury porosimetry는 대부분의 물질에 대해 non-wetting한 수은의 성질을 이용하여 외부에서 압력을 가해 재료내의 기공으로 수은을 관입시켜 그 관입되는 압력 및 관입양을 근거로 총 기공의 부피, 기공의 크기 및 분포, 밀도, 기공율<sup>9)</sup> 등을 측정할 수 있다.

Fig. 9와 Table 4는 mercury porosimetry를 사용하여 측정한 원료분말의 크기가 다른 다공질 재료의 기공분포 및 평균 기공 크기를 나타내었다. 그림을 살펴보면 원료분말

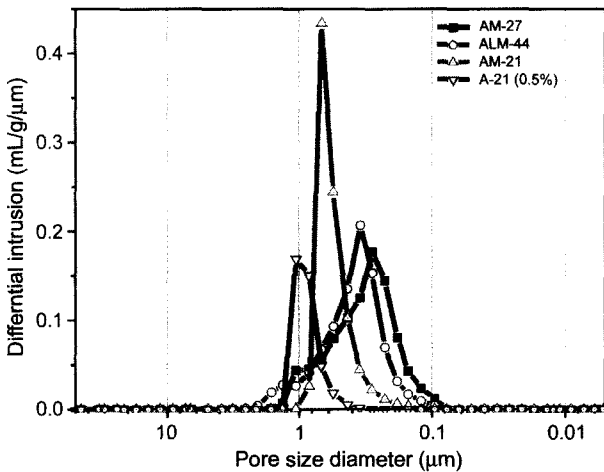


Fig. 9. Pore size distribution of several porous materials.

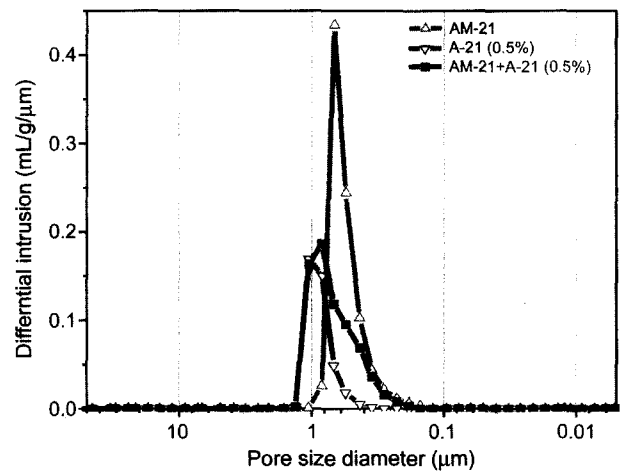


Fig. 11. Pore size distribution of double pore structure materials made by AM-21+A-21 with 0.5% flux.

Table 4. Average Pore Diameter for Single-layered Porous Materials

Average Pore Diameter	0.45 μm	0.55 μm	0.66 μm	1.04 μm
-----------------------	---------	---------	---------	---------

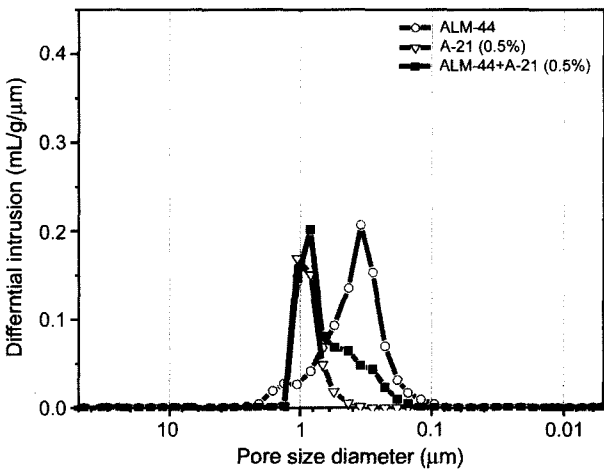


Fig. 10. Pore size distribution of double pore structure materials made by ALM-44+A-21 with 0.5% flux.

의 크기가 1, 2.5, 4, 50 μm으로 증가하면서 평균 기공크기가 0.45, 0.55, 0.66, 1.04 μm으로 증가함을 알 수 있으며, 기공의 분포는 Gaussian 분포를 하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 mercury porosimetry를 사용하여 ALM-44와 A-21(0.5%flux)로 이루어진 이중 기공구조를 갖는 다공질 재료와 ALM-44, A-21(0.5%flux) 단일 기공구조를 갖는 다공질 재료의 기공크기 및 분포를 측정된 결과를 나타내었다. 그림을 살펴보면 이중 기공구조를 갖는 다공질 재료는 단일 기공구조를 갖는 다공질 재료의 기공크기가 혼

합된 양상을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 현상은 AM-21과 A-21(0.5%flux)로 이루어진 이중 기공구조를 갖는 다공질 재료의 경우(Fig. 11)에도 마찬가지로 나타났다. 이상의 결과에서 원료분말의 크기가 다른 두 종류의 분말을 사용하여 이중 기공구조를 갖는 다공질 재료를 제조할 경우 재료의 미세조직을 직접 관찰하지 않고 mercury porosimetry 분석만으로 이중 기공구조를 확인할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 원료분말의 크기가 다른 분말을 사용하여 제조한 단일 기공구조를 갖는 다공질 재료의 거시단면조직이다. 그림을 살펴보면 원료분말의 크기가 증가할수록 재료 내에 생성되는 기공의 크기가 증가하고 있음을 알 수 있고, 재료 전체에 걸쳐 균일한 기공구조를 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 원료분말의 크기가 작은 ALM-44와 원료분말의 크기가 큰 A-21(0.5% flux)를 사용하여 제조한 이중 기공구조를 갖는 다공질 재료의 SEM 단면 조직 사진이다. 그림을 살펴보면 재료의 상층은 기공크기가 작고 하층은 기공크기가 큰 이중 기공구조를 가지고 있음을 알 수 있다. 또한 각 층간의 소결 접합이 잘 이루어져 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

입자크기가 다른 알루미늄 분말(1, 2.5, 4, 50 μm)을 상대성형밀도의 변화에 따른 소결밀도의 변화를 예측하는 Ford's equation을 이용하여 각 원료분말의 소결수축거동을 예측 분석하여, 입자크기가 작은 분말들과 큰 분말의 소결 수축거동이 동일한 분말의 조합을 선정하여 이중 기공구조를 갖는 다공질체를 제조하였다.

단일 및 이중 기공구조를 가지는 다공질 재료의 통기

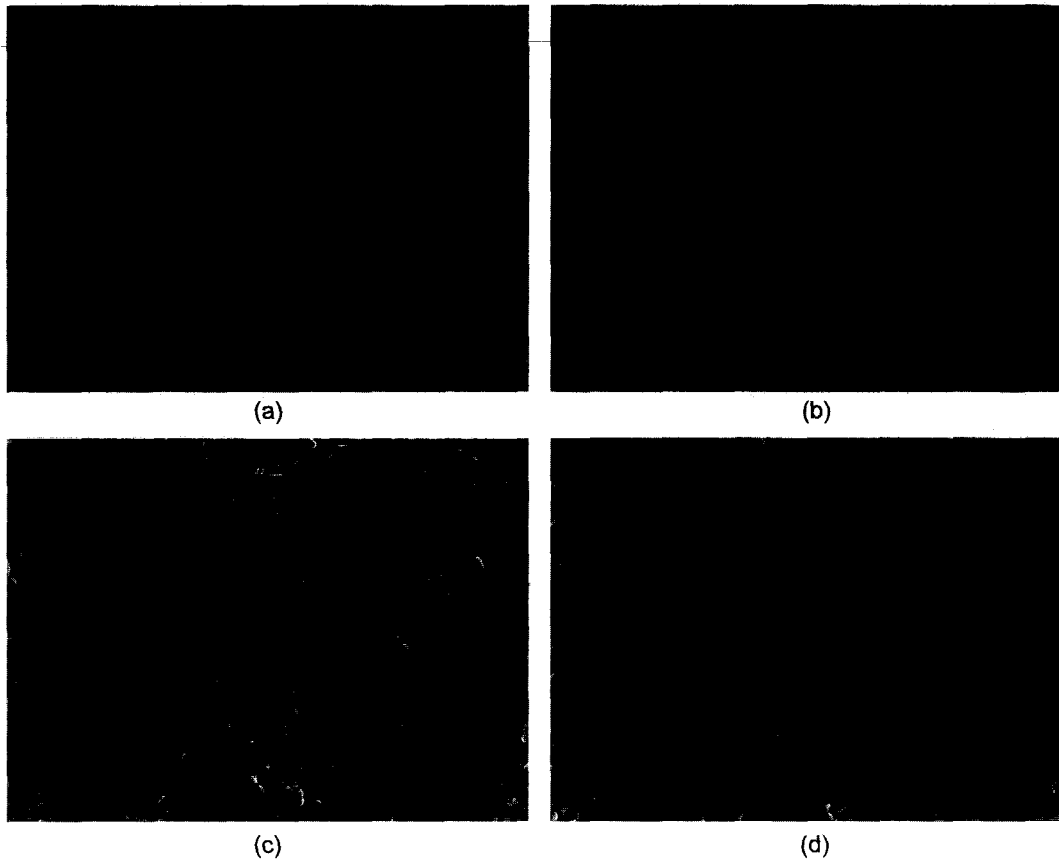


Fig. 12. SEM micrographs for several porous materials having different pore sizes sintered at 1600°C for 3 h. (a) AM-27, (b) ALM-44, (c) AM-21, (d) A-21 with 0.5%flux.

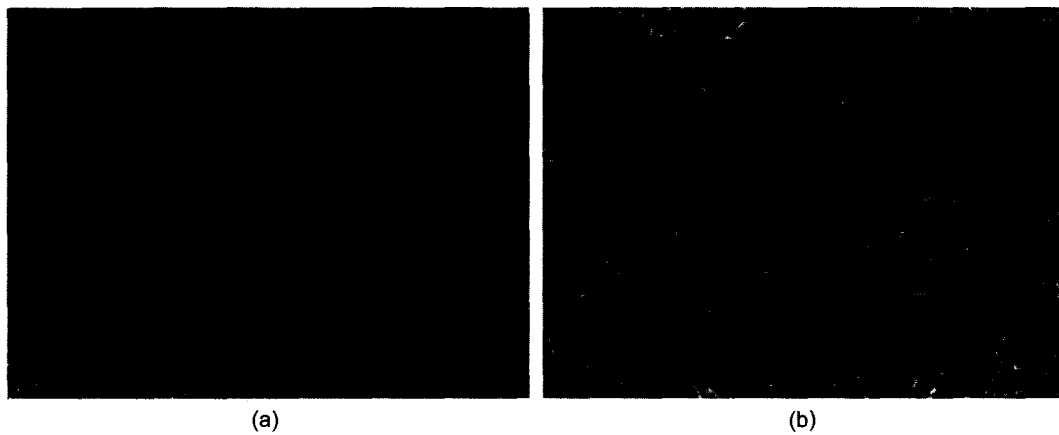


Fig. 13. SEM images for double pore structure materials made by ALM-44+A-21 with 0.5%flux. (a) low, (b) high magnification.

도 특성을 측정 한 결과 원료분말의 크기가 증가할수록, 기공율이 증가할수록 통기도 특성이 향상됨을 알 수 있었다. 또한 이중 기공구조를 갖는 다공질 재료의 경우 통기도 특성은 주로 작은 기공크기를 갖는 층에 영향을 받는 것으로 나타났다.

## REFERENCES

1. S. Togo, M. Okano and Y. Akiyama, "Experimental Study on Externally Pressurized Porous Gas Bearings," *Lubrication*, **17** [6] 360-68 (1972).
2. S. Togo, Guidebook of Air Bearing Design, Kyouritsu Pub.



- Ltd. Co., 2002.
3. T. Iwato and S. Yoshimoto, "Static and Dynamic Characteristics of Circular Aerostatic Porous Thrust Bearings," *J. of JSME*, series C, **62** [593] 276-83 (1996).
  4. W. F. Ford, "The Effect of Initial Density on Fired Density," *Trans. Brit. Ceram. Soc.*, **75**, XV (1976)
  5. H. D. Kim and W. F. Ford, "The Effect of Pressed Density on Fired Density of Alumina Compacts," *J. of the Kor. Ceram. Soc.*, **19** [2] 115 (1982).
  6. N. Gupta, "Determining the Pore Structure of Individual Layers of Multi-layered Ceramic Composites," *Ceram. Industry*, **24** (2001).
  7. International Standard ISO 4003-1977 (E).
  8. A. W. Paul and C. Orr, "Analytical Methods in Fine Particle Technology," pp.155-91, Micromeritics, USA, 1997
  9. International Standard ISO 4022-1977 (E).