

潤滑研究



다공질 (porous) 자기윤활 (Self-Lubricating) 베어링의 원리와 재질 및 응용

공군사관학교
교수 강 석 춘

1. 작동원리

소마력 모터용 베어링으로 널리 사용되는 다공질 자기 윤활베어링은 미국의 G.M.이나 Bond Brook Oilless 베어링 회사에서 1920년대 중반부터 독자적으로 개발된 매우 오랜 역사를 가진 평면 베어링의 일종이다.

다공질 베어링이 갖는 큰 장점은 베어링재료의 소결과정에서 생성된 기공 (porosity)이 윤활유를 저장하는 역할을 하는 것이다. 베어링의 구멍에 윤활유가 침투되는 현상에 관한 이론은 어느 정도 정립되어 있으나 아직도 윤활유가 베어링에서 나와 축과 베어링 사이에 윤활 피막형성 과정 및 기공에 다시 스며드는 현상에 관한 연구는 크게 진전되지 않고 있다.

윤활유가 침투된 평면 베어링이 축과 상대운동을 시작하면 마찰이 생기고 온도가 증가하며, 이때 기공속에 있던 윤활유는 금속에 비해 열팽창계수가 크고 베어링과 축 사이의 윤활피막에서 유체 압력의 차이 때문에 기공으로부터 강제적으로 빠져나와 윤활작용을 하게 된다. 회전이 멈추면 베어링의 온도가 떨어지고 윤활유는 삼투압 작용에 의해 다시 기공 속으로 스며들게 된다. 따라서 맑은 자기 윤활 베어링의 경우 베어링 기공에 침투된 윤활유는 베어링의 수명이다 할때까지 기능을 유지한다. 오일의 누설이나 소모가 많은 경우에는 오일을 계속 침투시켜 주는

심지를 베어링 바깥부분에 설치하여 주고 필요에 따라 재공급을 해준다. 그림 1은 일반적인 자기윤활베어링의 형태로서 보통은 실린더 형으로 하우징 (housing)이나 후랜지베어링, 와셔 등에 의해 구속하도록 되어 있거나 하우징 안에 넣어 스스로 위치를 찾도록 하는 베어링들이 있다.

2. 베어링 재료 및 제조 (표 1 참조)

개발 초기부터 사용되었고, 현재 가장 널리 사용되는 베어링 재료는 흑연이 함유되거나 함유되지 않은 90%Cu, 10%Sn의 청동이다 (1번).

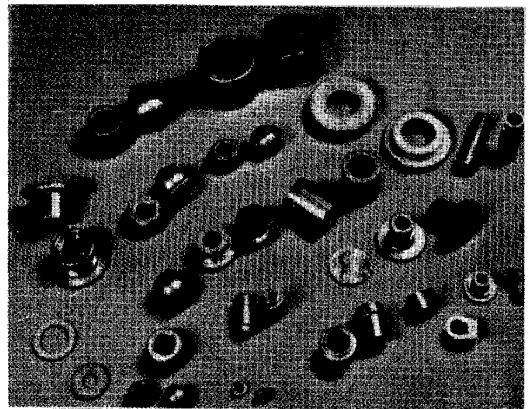


그림 1. 청동자기윤활베어링부품의 실례 (Keystone Carbon Co.)

이것은 강도, 마모저항, 순응성과 제조의 용이함 등 가장 훌륭한 특성을 갖는다. 좀 연한 것은 납을 넣거나(4번) 혹은 주석의 양을 감소시킬 것이다(2번). 흑연은 윤활유가 고갈될 경우 안전도를 증가시키고 건조윤활특성을 부여하지만 강도가 떨어진다(3번). 녹이 스는 것이 문제가 안된다면 싸고 강한 철계합금이 사용될 수 있다. 연한 철(5번)은 오일이 고갈될 경우 축이 연하면 안전도가 크게 낮아진다. 흑연(6번과 10번)은 보다 성능이 향상되지만 소결하는 과정에서 침탄처리되지 않은 경우(11번) 강도가 떨어진다. 구리(7, 8, 9번)는 강도와 안전도를 동시에 증가시켜 주며, 탄소와 혼합시에(12, 13, 14번)는

열처리를 거쳐야 큰 강도를 갖게 된다. 다공질 베어링의 생산과정은 다음과 같은 단계를 거친다.

- ① 분말선정
- ② 혼합
- ③ 몽괘과 모양만들기 (Compacting)
- ④ 소결 (Sintering)
- ⑤ 크기조절
- ⑥ 윤활유 침투

청동베어링의 경우 전해처리하여 원자 크기로 된 가는 구리분말과 원자크기의 주석분말을 천연 흑연가루와 함께 혼합한다. 구리분말의 크기 분포는 일반적으로 150매쉬 (in²당 망의 수)를 전

[표 1] 다공질금속베어링의 표준규격 및 설명

참고번호	조 성	특 기 사 항	규 격 번 호 및 기 공 성
1	89/10/1 Cu/Sn/graphite	<ul style="list-style-type: none"> • 가장 널리 사용되고 있음 • 경화되지 않은 축에는 틈새의 크기에 크게 영향을 받지 않음 	BS 2590/1/A 110* -25%, 111-21½%, 112-18%, 113-7 % BS 1131/5* and BS 4480/1* -25% BMSA 10A* -25%, 10B-20%, 10C-18%, 10D-7 % ASTM B438/1 / I* -25%, / II-18%
2	91/8/1 Cu/Sn/graphite	주석의 양이 줄었고 가격이 싸며 연함	BMSA 11A* -25%, 11B-7 %
3	85/10/5 Cu/Sn/graphite	흑연의 양을 증가, 낮은 하중에서 사용 오일 고갈을 대비하여 틈새 증가할 것	BMSA 13A-27%, 13B-18%
4	86/10/3/1 Cu/Sn/graphite	납을 첨가, 연하고 조립이나 설계의 잘못을 대비하여 틈새를 증가	ASTM B 438/2-18%
5	>99% iron (soft)	연한 철로써 청동보다 값이 싸다. 부식조건에서 사용하지 말 것. 단단한 축에 대해 사용함	BS 2590/1/A201-22%, 200-18%, 202-16%, 203-12% BMSA 51* -30% to 7% (customer specifies) ASTM 439/1-18%
6	97½/2½ Fe/graphite	흑연이 윤활작용을 향상시켜 줌	BMSA 53* -27%, 70-27%
7	98/2 Fe/Cu	구리의 양이 증가될수록 강도가 커지고 값이 비싸짐. 가장 많이 사용되는 철계동베어링으로 단단한 축에 사용됨	BS 2590/1/A 302* and 304* -20%, 300* -18%, 301, 303 and 305-17% BMSA 22A* -25%, 26* -20%, 20, *21, *22B, *23, *24A, *25A* and B* -18%, 22C, 24B and 25C-16% ASTM 439/3* and 4* -18%
8	2 % to 25% Cu in Fe		
9	75/25 Fe/Cu		
10	89/10/2 Fe/Cu/graphite	흑연이 윤활작용을 향상시켜 주고, 틈새의 허용오차를 증가시킴	BMSA 34-22%
11	99/0.4 Fe/C	구리를 첨가안함, 단단한 축에 사용	ASTM 439/2-18%
12	97/2/0.7 Fe/Cu/C	경화성 고강도 다공질 철로써 구리의 양이 증가되면 강도가 커지고 비용이 증가됨	BS 2590/1/A 351-25%, 350 and 352-20% BMSA 30, 31A, 32A and 33-18%, 32B-17%, 31B-16%
13	2 % to 10% Cu in 0.7C/Fe		
14	89/10/0.7 Fe/Cu/C		



부 통과하고 325매쉬를 통과하는 것이 30~65%이며, 주석가루는 전부 325 매쉬를 통과한다. 일반적으로 가루크기는 소결시키는 동안 크기 변화에 영향을 주고 가는 것일수록 크기 증가가 별로 생기지 않는다. 완전히 혼합시키는 것이 소결하는 동안 같은 성분끼리 덩어리가 생기는 현상을 억제하여 결함 생성을 방지해준다. 청동 베어링은 815~895°C 범위의 온도에서 비교적 짧은 시간인 3~8분 이내에 소결되어진다. 이때 일어나는 미세구조적 변화는 매우 복잡하고, 그림 2에서와 같이 기공과 흑연입자가 널리 퍼져 있고 비교적 큰 입자가 α구리 주석으로 된 미세구조를 이룬 것이다. 소결하는 동안 크기변화는 미세구조의 형성과정과 밀접하게 관련되어 있고, 분말입자의 크기분포, 이젠 분말의 초기 밀도, 가열율과 가열시간 및 소결온도에 의해 좌우된다.

철계통의 자기윤활베어링은 1120°C 근처의 온도에서 15~25분 동안에 소결시킨다. 소결되는 동안 크기의 변화는 청동베어링에 비하여 비교적 작다.

자기윤활베어링은 소결시킨 후 크기를 조절하여 규격에 맞게 해준다. 보통 내외경은 각 직경의 인치당 ±0.0005인치의 오차, 길이의 경우에는 인치당 ±0.005인치의 오차 범위에 들게 만든다. 베어링의 크기를 맞춘 후 베어링은 윤활제로서 일반적으로 오일을 스며들게 해준다. 오일의 점도와 부식억제, 필름 강도증가 및 산화방지용 첨가제는 베어링이 사용되는 특수목적에 따라 결정된다. 오일을 침투시키기 위해서는 베

어링을 1mmHg의 압력정도가 되는 진공 상태로 된 통에 넣고 오일을 주입시킨다. 침투를 확실하게 하기 위해 공기나 질소의 압력을 3~4기압(60psi)로 하여 1분간 가해준다.

다공질 베어링 재료가 고체금속의 압축강도보다 작으므로 베어링은 하우징에 강제로 집어넣어 사용한다. 이때 베어링은 원래 직경보다 0.0015인치 정도로 잘게 만든 기음 막대(mandrel)를 사용하여 하우징에 넣는다.

다공성의 정도(다공도 혹은 기공도)나 오일을 침투한량은 아르키메데스원리를 이용하여 측정한다. 즉 A를 공기중에서 오일이 침투되지 않은 상태의 소결베어링의 무게, B를 오일을 침투시킨 후의 무게 C를 물속에서 오일이 침투된 베어링의 무게, S를 오일의 밀도라고 하면 오일의 함유량 혹은 체적에 대한 다공성의 백분율은 다음과 같은 식으로 구해진다.

$$\text{다공성} = \frac{B-A}{(B-C)S} \times 100 (\%)$$

위 방법에 의해 얻은 기공성은 공기중에서 오일이 침투되지 않은 경우의 밀도와 완전 고체형태로 만든 경우의 밀도 비로써 계산 및 비교될 수 있다. 다공질 베어링은 소성변형없이 쉽게 깨지기 때문에 축 방향의 깨어짐 강도를 축방향으로 놓혀놓고 압축시험하여 측정한다. 베어링에 금(Crack)이 생기면 가하는 하중이 떨어지고, 이때를 파괴강도로 한다. 이 하중의 크기를 P라 하고 베어링 두께를 T, 베어링의 길이를 L(in)이라 하면 소위 K인자를 다음의 공식을 이용하여 결정한다.

$$K = \frac{p(D-T)}{LT^2}$$

표 2는 ASTM의 B438, B439와 B612에 분류된 자료를 보여주고, 이것은 SAE나 MPTF의 분류와도 비슷하다. 자기윤활베어링의 하중부담능력은 고체 베어링보다 작고 윤활유로 형성되는 윤활막은 덜 안정된 것으로 알려져 있다. 하중 부담능력의 제한은 ASTM 표준값으로 추천한 것이며, 이것은 축 속도의 함수로써 베어링의 투영면적(직경×길)당 파운드로 주어진다. 이러한 값이 표 3에 있다. 최근에는 적절한 베어링의 하우징 조건에 따라 자기-윤활베어링의 P

V값 (압력 : psi×속도 : ft/min)이 150,000 까지 높은 하중을 받는 것도 있다. 속도의 함수로써 하중의 값의 크기는 분명한 한계를 갖는다. 왜냐하면 베어링의 작동이 만족스러운지의 여부는 작동온도에 의해 좌우되고, 또 온도는 열 발생과 열의 전달의 균형에 의해 결정되기 때문이다. 이때 열 발생은 오일의 점도, 축과 베어링의 마찰계수와 마찰속도의 함수이고, 열 전도는 베어링 설계와 재료에 따라 결정된다.

3. 윤활 관리 방법

일반적으로 베어링 기공속에 들어있는 오일은 1,000시간 사용한 후나 1년마다 새로 넣어주는 것이 바람직하다. 그러나, 그림 3에 있는 자료는 일반적인 경우를 벗어난 경우에 이용하는 방법이다. 다공도가 낮으면 자주 오일을 재공급하여야 하고 오일 속에 잠긴채로 작동되든지 계속 공급이 가능한 경우는 오일을 다시 넣어줄 필요

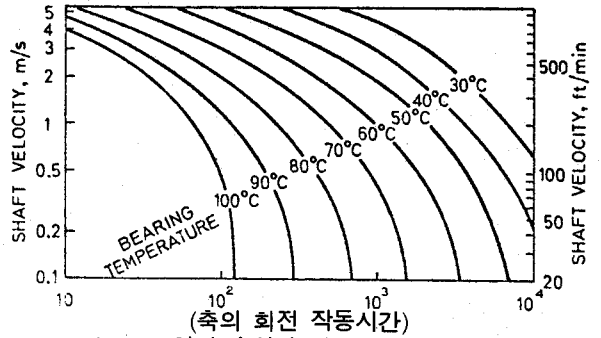


그림 3. 오일의 손실과 열화에 의한 오일교환 시간관계

가 없다. 그림 4는 윤활유를 보충하도록 조립된 일반적인 기공베어링의 구성에 관한 것이다.

4. 윤활유 선정 방법

- 1) 그림 5는 하중과 온도에 따라 오일의 점도를 선정하는 일반적인 도표이다.
- 2) 윤활유는 비교적 높은 산화 안정성을 가

[표 2] 자기-윤활베어링의 화학적 성분과 조성, 오일침투밀도, 최소오일함량 혹은 상호연결된 다공성, 최소K인자

등 급	화 학 성 분	오일침투밀도	최소오일함량	K 인 자
ASTM B 438				
Grade 1	87.5-90.5 Cu	5.8-6.2	27	15,000
	9.5-10.5 Sn up to 1.75% Graphite	6.4-6.8	19	26,500
Grade 2	82.6-88.5 Cu	6.6-6.9	19	26,500
	9.5-10.5 Sn 2.0-4.0 Pb			
ASTM B 439				
Grade 1	100Fe			25,000
Grade 2	0.25-0.6C bal Fe			
Grade 3	7.0-11.0 Cu bal Fe	5.8-6.2	19	40,000
Grade 4	18.0-22.0 Cu			
	bal Fe			
ASTM B 612				
	34-40 Cu			
	3.8-4.4 Sn	6.0-6.4	18	25,000
	bal Fe			45,000

[표 3] 자기-윤활베어링의 허용하중

Bronze Bearings		
축의 속도, ft/min (m/min)	허용하중, psi (MPa)	
	Low density	High density
Slow and intermittent	3200 (22)	4000 (28)
25 (7.6)	2000 (14)	2000 (14)
50-100 (15.2-30.4)	550 (3.9)	500 (3.4)
over 100 to 150 (30.4-45.7)	365 (2.5)	325 (2.2)
over 150 to 2000 (45.7-61)	280 (1.9)	250 (1.7)
over 200 (61)	P in psi=50,000/V in ft/min	
Iron Base Bearings		
Slow and intermittent	Copper free	Copper containing
	3600 (25)	8000 (55)
25 (7.6)	1800 (12)	3000 (20)
50-100 (15.2-30.4)	450 (3.1)	700 (4.8)
100-150 (30.4-45.7)	300 (2.1)	400 (2.8)
150-200 (45.7-61)	225 (1.6)	300 (2.1)
over 200	P in psi=50,000 V in ft/min	
Iron-bronze Base Bearings		
Slow and intermittent	4000 (2.8)	
25 (7.6)	2000 (1.4)	
50-100 (15.2-30.4)	400 (0.35)	
100-150 (30.4-45.7)	300 (0.23)	
150-200 (45.7-61)	200 (0.14)	
over 200	P in psi=40,000/V in ft/min but V should not exceed 400 ft/min	

저야 한다.

3) 특별한 조건이 제시되지 않은 경우, 점도는 SAE 20/30으로 하고 잘 정제된 것으로써 산화억제용 첨가제가 포함된 오일을 침투시켜야 한다.

4) 실험이나 경험적으로 확인되지 않은 경우 고체 윤활제의 첨가나 사용은 하지 말아야 한다.

5) 밀봉 목적으로 빈 공간을 채우는 경우를 제외하고 그리스는 사용하지 말아야 한다.

6) 오일을 교환하거나 다시 넣을 경우, 제조 회사와 상의하는 것이 바람직하다.

5. 설치시의 유의사항

1) 베어링은 먼지가 많은 곳에 보관하지 말

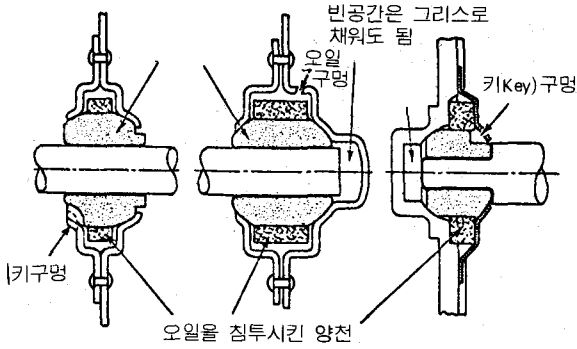
고 사용전에 잘 씻어야 하며, 1년이상 저장한 경우 상태를 점검하여 오일을 다시 넣어야 한다

2) 자기 조절식 베어링 (그림 3 참조)은 자유로운 이동 가능성 여부와 하우징 조립강도 및 정적 하중의 정도를 정밀하게 확인하고 열 확산의 영향을 살펴볼 것.

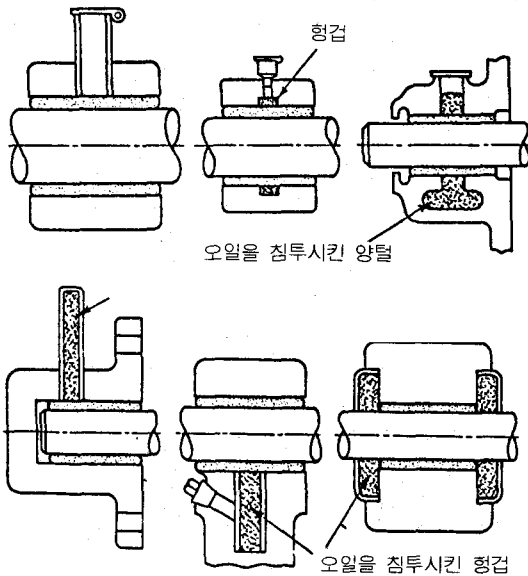
3) 강제 끼움 베어링은 틈새조절을 정확히 해 줄 것. 또 끼우기 작업에서 만드릴 크기를 적당히 하여 손상되지 않게 해 줄 것 (그림 6 참조).

4) 베어링의 열팽창 계수는 동일 금속의 값과 같으므로 열팽창의 영향을 고려하여 틈새와 작동 온도 범위를 결정할 것.

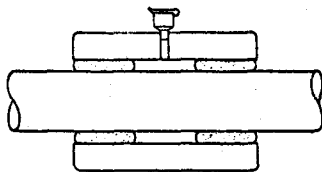
5) 베어링의 설치작업시에는 충격에 의한 베어링의 손상 때문에 망치를 사용하지 말고 천천



(a) 자기-조절방식의 다공질베어링과 오일 공급



(b) 억지 끼움 다공질베어링의 오일공급방법



(c) 단순한 윤활공급방법의 다공질베어링

그림 4. 전형적인 다공질 베어링과 오일 보충방법

히 힘을 가해 주어야 한다.

6) 베어링과 축 사이의 틈새는 그림 7에 있는대로 축 직경의 크기와 회전속도에 따라 결정하여야 한다. 틈새가 크면 균형이 잡히지 않아

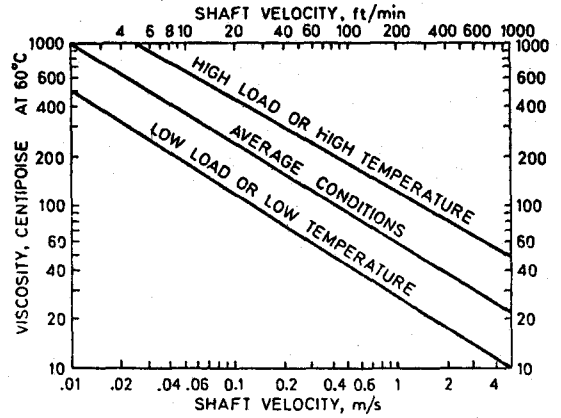


그림 5. 60°C에서 센티포아제로 표시된 오일의 점도 선정기준

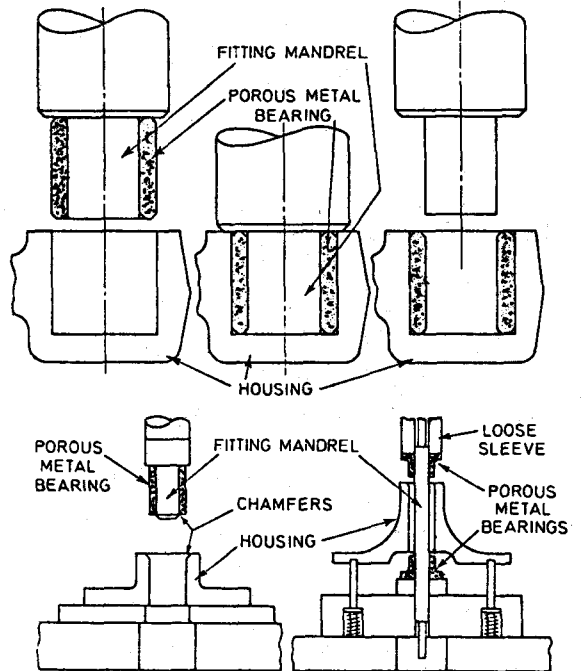
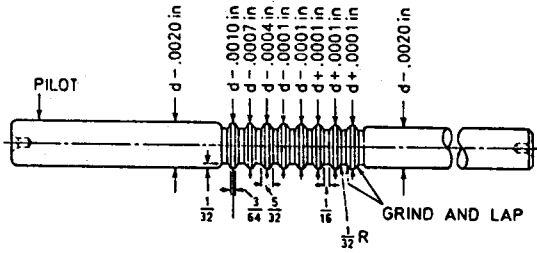


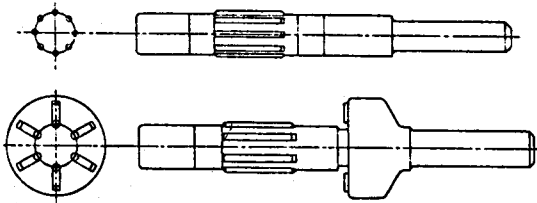
그림 6. 강제(억지) 끼움방법에 의한 다공질 베어링 장착방법과 만드릴 이용

소음을 발생하고, 틈새가 작으면 높은 토크와 온도 증가를 가져온다.

7) 회전축의 표면 거칠기는 $0.8\mu\text{m}$ 정도로 하는 것이 바람직하다. 표면이 매끄러울수록 성능이 향상되고 길들이기 과정에서 마모입자의 생성이 감소된다. 보통 철 계통의 다공질 베어링을 사용할 때는 청동 계통보다 축의 표면이 더 매끄러운 것이 바람직하다.



d = FINISHED DIAMETER OF BEARING
단추형 공구



ROLLER TYPE BURNISHING TOOL
롤러 타입 공구

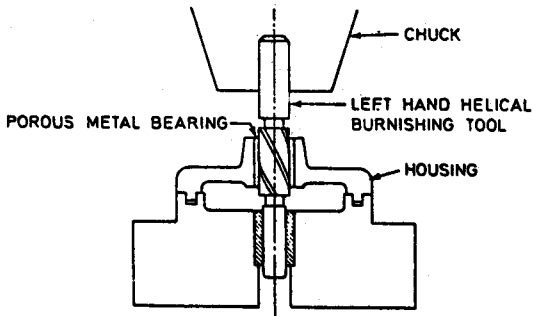


그림 7. 회전축과 틈새의 크기비로 표시된
평균 만드릴 틈새의 선정기준

6. 베어링 직경의 수정

베어링을 장착한 후 구멍의 직경을 증가시킬 필요가 있을 경우, 보통의 절삭공구를 사용해서는 안된다. 왜냐하면 공구의 응력이 크므로 베어

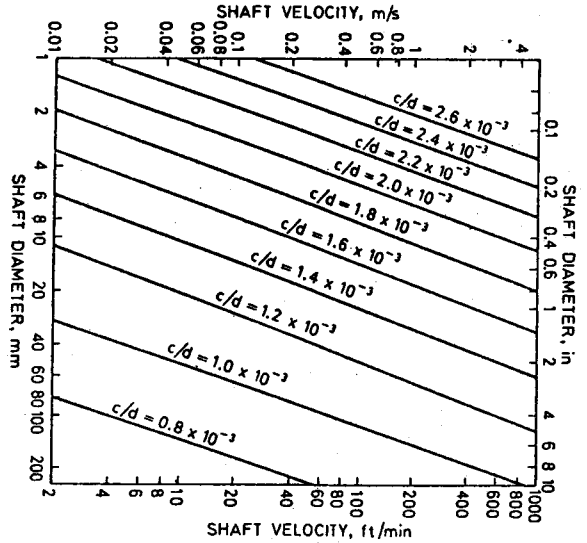


그림 8 장착된 다공질 베어링의 크기를
증가시키는 공구 및 방법

링 표면의 기공이 막혀버리므로써 기공에서 오일이 자유로이 유동할 수 없기 때문이다. 이 경우에 사용되는 공구는 그림 8에 있는 것과 같은 적당한 버니싱 (burnishing) 공구를 사용하여야 표면의 기공을 막아 버리지 않는다.

7. 소결베어링의 용도

자기-윤활 소결 베어링의 주요 용도는 적은 마력의 전기모터에 사용된다. 이들 모터가 사용되는 실례로는 선풍기, 송풍기, 진공청소기, 세탁기, 접시닦는 기계, 건조기, 재봉틀, 전축, 배풍기, 전기 창문, 믹서, 전시기계, 사무용 기계, 냉장고, 에어컨, 섬유기계 등 많은 종류로써 그 용도는 점점 증가되고 있다.