

열팽창계수차에 기인된 잔류응력을 이용한 세라믹 캠 팔로우어의 크라우닝 제어

최영민 · 이재도 · 노광수*

한국화학연구소 화학소재연구부

*한국과학기술원 재료공학과

Control of Crowning Using Residual Stress induced by the Difference of Thermal Expansion Between Ceramic and Carbon Steel in Ceramic Cam Follower

Youngmin Choi, Jaedo Lee and Kwangsoo No*

Korea Research Institute of Chemical Technology, Taejeon, 305-600 Korea

*Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejeon, 305-701 Korea

(2000년 7월 20일 받음, 2000년 8월 28일 최종수정본 받음)

초 록 최근 상용차용 디젤 엔진의 성능 향상을 목적으로 엔진 설계가 급격히 변화되면서 캠 팔로우어(cam follower)와 캠(cam) 사이에 작용하는 접동면 하중의 증가로 접동면에서의 마모가 중요한 문제가 되고 있다. 본 연구에서는 기존의 주철계 및 소결합금 캠 팔로우어에 비해 내마모성이 우수한 세라믹 캠 팔로우어를 개발하였다. 잔류응력을 완화시켜주는 중간층을 사용하지 않고 질화규소(Si₃N₄) 팁과 중탄소강을 활성납재를 사용하여 직접 접합함으로써 접합후 냉각시키는 과정에서 두 소재의 열팽창계수차에 의한 크라우닝(crowning, R)이 형성되도록 하였다.

접합에 사용한 중탄소강은 열팽창시 이력(hysteresis) 거동을 나타내었으며 A_{c1} 변태점인 723°C 이하에서 접합할 경우 원하는 크라우닝이 형성되었다. 접합온도가 723°C 이상이 되면 크라우닝(R) 값이 온도에 따라 지수함수적으로 증가하였으며 이는 중탄소강의 상변태에 의한 열팽창·수축의 이력 특성으로 설명되어질 수 있었다. 규격에 맞는 크라우닝이 형성되는 최적 접합 온도는 700~720°C의 범위였다. 질화규소와 중탄소강의 직접 접합방법으로 접합과 동시에 크라우닝을 형성시키고 제어함으로써 난가공재인 세라믹을 폭넓게 가공하지 않고도 적당한 곡률을 갖는 저가의 세라믹 캠 팔로우어를 제조할 수 있었다.

Abstract As the engine design changes to get high efficiency and performance of commercial diesel engine, surface wear of the cam follower becomes an important issue as applied load increasing at the contact face between cam follower and cam.

We developed the ceramic cam follower made of silicon nitride ceramic which was more wear resistant than the cast iron or sintered metal cam follower. Ceramic cam follower was made by direct brazing of thin ceramic disk to steel body using an active brazing alloy without the interlayer. In-situ crowning(R), resulted from the difference of thermal expansion coefficient between ceramic and carbon steel after direct brazing without any stress-relieving interlayer, could be controlled.

When a carbon steel was heated above A_{c1} point and then cooled, the expansion curve represented a hysteresis. Appropriate crowning was achieved below the A_{c1} point(about 723°C) and crowning increased with brazing temperature exponentially above the A_{c1} point. Optimum brazing temperature range was from 700 to 720°C.

We developed successfully the ceramic cam follower having appropriate crowning and being inexpensive. Also we could successfully control the crowning of ceramic cam follower by hysteresis behavior of thermal expansion of carbon steel during direct brazing process.

Key words : Si₃N₄, joining, ceramic cam follower, In-situ crowning, hysteresis behavior of thermal expansion

1. 서 론

최근 일본 등의 자동차 선진국에서는 세라믹스의 우수한 내마모성, 경량성, 내열성 등의 고유한 특성을 유지하면서 자동차용 부품에 효과적으로 응용하기 위하여 세라믹스/금속 접합 기술을 널리 응용하고 있으며 이미 일부는 상용화되고 있다.¹⁾ 특히 상용차용 대형 디젤엔진의 경우 내마모성이 중요시되는 기계적 마찰부위에 세라믹접합 부품을 적용

하려는 시도가 많이 이루어지고 있다.^{2~10)} 이 같은 추세는 상용차용 디젤엔진의 배기가스 및 소음에 대한 규제가 엄격해지는 동시에, 출력·연비·신뢰성 등에 대한 요구도 점점 더 증가하고 있기 때문이다. 이러한 규제 및 요구를 동시에 충족시키기 위해서 흡·배기효율 향상을 목적으로 한 high valve lift화, 밸브 개폐의 최적화, 다밸브화 등으로 엔진 설계가 급격히 변화되고 있다.¹¹⁾ 따라서 최근 디젤 엔진의 캠 팔로우어 및 캠 사이에 작용하는 접동면 하중이 더욱 증

가하고 발생 열량도 기존에 비해 약 80% 상승되기 때문에 접동면의 마모가 크게 증가하여 불완전 연소 유발, 출력저하 등의 문제가 야기된다.¹¹⁾

기존의 주철제 및 고침탄 처리한 캠 팔로우어는¹²⁾ 최근의 가혹해지는 환경에서의 마모를 방지하기에는 한계가 있다. 이에 따라 고온 안정성, 고내마모성, 고경도인 질화규소 세라믹스를 금속에 접합한 캠 팔로우어가 고안되었으며 현재 일본의 경우는 질화규소를 접합한 캠 팔로우어를 양산하고 있는 단계에 있다.^{13~17)} 국내 자동차 산업에서도 날로 엄격해지는 배기가스 규제 및 고효율화를 만족시키기 위해서는 독자적인 세라믹 접합 캠 팔로우어 제조 기술 확보가 시급한 실정이다.

일반적으로 세라믹 접합 캠 팔로우어는 다른 기계 구조용 부품에 비해 요구되어지는 접합강도가 상대적으로 작은 반면 접동면의 표면거칠기, 경도 및 캠의 원활한 마찰을 위한 크라우닝(R)이 상대적으로 중요하다. 그러나 기계가공에 의해 난가공재인 질화규소 세라믹스를 일정한 곡률을 갖도록 크라우닝 가공하기 위해서는 생산비용이 대폭 상승한다. 따라서 세라믹을 기계 가공하지 않고 접합후 냉각하는 과정에서 세라믹과 금속의 열팽창계수 차이에 기인되는 잔류응력에 의하여 곡면을 형성시킴으로써 크라우닝을 제어하는 기술이 활용되고 있다. 본 연구팀에서는 열팽창계수차이에서 기인되는 잔류응력을 완화시키기 위한 중간층을 사용하지 않음으로써 크라우닝을 형성시킴과 동시에 접합강도를 최소 요구조건 이상으로 유지시키는 기초연구를 수행한 바 있다.¹⁸⁾

본 연구에서는 상용 디젤 엔진용 세라믹 접합 캠 팔로우어 개발 연구의 일환으로 중탄소강과 세라믹의 접합시 세라믹과 중탄소강의 열팽창계수의 차이를 이용하여 접합과 동시에 규격에 적합한 곡면을 형성시키는 in-situ 크라우닝 제어기술을 연구하였으며 잔류응력을 이용하여 크라우닝을 형성시킨 세라믹 캠 팔로우어에 대하여 디젤엔진에의 적용시 필요한 기계적 물성을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 접합

접합 실험에 사용한 질화규소(Si_3N_4) 팁은* 직경×두께가 각각 $27.5 \times 1.5\text{mm}$, $34.5 \times 2.0\text{mm}$ 인 것을 사용하였으며 캠과의 마찰면이 되는 표면은 $Ra=0.03\mu\text{m}$ 의 거칠기가 되도록 연마하여 사용하였다. 질화규소와 접합시킬 금속은 SNCM630을** 사용하였으며 질화규소와 금속의 접합을 위하여 두께가 $50\mu\text{m}$ 인 TKC591 활성 납재를*** 사용하였다.

질화규소 팁, SNCM630 및 활성납재는 오일 등의 오염물을 제거하기 위하여 trichloroethylene, acetone, iso-

propyl alcohol의 순서로 용매에 담가 5분간씩 초음파 세척기로 표면을 세척한 후 건조하여 사용하였다.

모재의 어긋남을 방지하고 접합시 $\sim 3\text{kPa}$ 의 압력이 가해지도록 BN 재질의 지그를 사용하여 각각의 접합모재를 장치하고 10^{-5}torr 의 진공에서 온도가 600°C 가 될 때까지는 $15^\circ\text{C}/\text{min}$ 으로 승온시킨 후 600°C 에서 30분간 유지시켜 온도를 안정화시키고 이후 접합온도까지는 $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 로 승온시켜 접합온도에서 30분간 접합한 후 로냉하였다. 접합온도에 따른 크라우닝 값의 변화를 관찰하기 위하여 납재의 용융온도 이상의 여러 온도에서 접합하여 크라우닝 값을 조사하였다.

2.2 분석 및 측정

2.2.1 열팽창계수 측정

접합모재의 열팽창계수를 측정하기 위하여 질화규소와 SNCM630의 직육면체($10 \times 10 \times 5\text{mm}$) 시편에 대하여 high temperature dilatometer (DIL 402C, Netzsch, Germany)를 사용하여 $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 의 속도로 790°C 의 온도까지 승온시켰다가 냉각시키면서 길이 변화를 측정하였다.

2.2.2 접합강도 측정

캠 팔로우어는 실제 작동 조건에서 캠과의 마찰에 의해 발생하는 전단응력과 벨브스프링에 의한 압축응력을 받게 된다. 따라서 본 연구에서 제조한 세라믹 캠 팔로우어의 접합면의 기계적 특성은 실제 부품 상태에서의 전단강도와 압

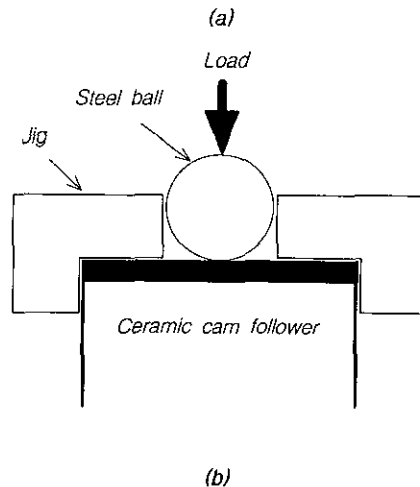
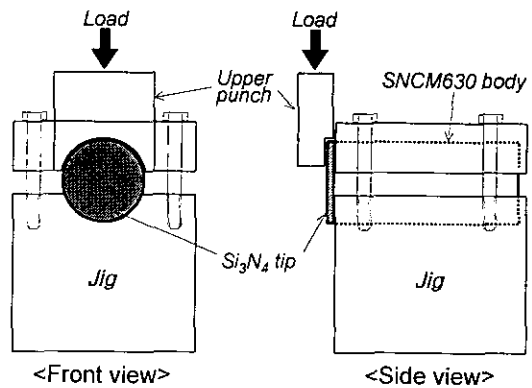


Fig. 1. Schematic drawing of test apparatus for (a) shear and (b) compressive strength.

* ASIQ(88~92 $\text{Si}_3\text{N}_4/8\sim 12\text{Y}_2\text{O}_3, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{AlN}$ in wt%) Korea Tungsten Co., Korea

** JIS G 4105-1979

*** TKC591(72.5Ag-19.5Cu-5Ti-3In, melting point: $\sim 650^\circ\text{C}$), Tanaka Kikinzoku International K.K., Japan

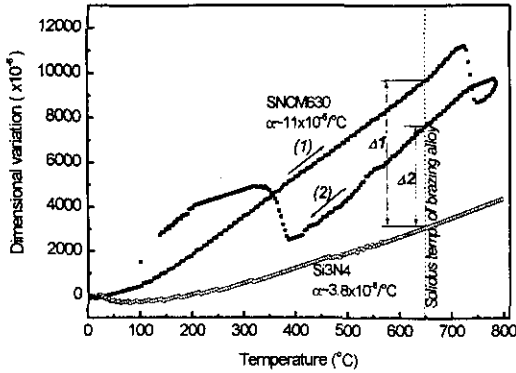


Fig. 2. Dimensional variation of silicon nitride and carbon steel with temperature.

축강도를 측정하여 평가하였다. 접합면의 전단강도는 그림 1(a)에 나타난 바와 같이 금속부를 지그에 고정시키고 세라믹 팁의 지름방향과 평행한 방향으로 힘이 가해지도록 하였다. 이때 팁에 힘을 가하는 펀치(punch)는 세라믹 팁의 원주면에 정확하게 밀착되도록 하여 국부적으로 응력이 집중되는 것을 방지하였다. 파괴시 인가된 최대 하중을 캠 팔로우어의 접합면적으로 나누어 전단강도 값을 계산하였다. 압축강도는 그림 1(b)와 같이 직경 8mm인 강철구를 지그를 사용하여 중심에 위치시키고 강철구에 힘을 가하여 측정하였으며 파괴시 최대하중으로 표시하였다. 각각의 강도시험은 cross head speed를 0.5mm/min으로 하였다.

2.2.3 크라우닝 측정

접합체의 크라우닝은 프로파일 게이지(profile gauge)를 써서 직경 방향은 10배, 두께 방향은 200배로 확대하여 표면의 제적을 관찰하고 이로부터 중심부의 높이(h)를 측정하여 식(1)을 이용하여 곡률반경(R) 값을 계산하였다.

$$R = \frac{r^2 + h^2}{2h} \tag{1}$$

- R = crowning (mm)
- r = radius (mm)
- h = height (mm)

3. 결과 및 고찰

3.1 접합모재의 열팽창 거동

접합모재의 열팽창계수 측정 결과는 그림 2에 나타난 바와 같다. 질화규소의 경우 온도가 증가하면 직선적으로 길이가 증가하고 이때 열팽창계수는 대략 $3.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 이었다. 냉각시에는 팽창시와 동일하게 수축하며 이력 특성은 나타나지 않았다. 반면 중탄소강의 경우는 열팽창계수가 $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 온도가 증가함에 따라 직선적으로 팽창하다가 중탄소강의 상변태점(A_c)인 약 723°C 에서 급격한 수축이 일어났다가 730°C 이상이 되면 다시 팽창하게 된다. 냉각시에는 팽창시와 거의 비슷한 기울기를 가지고 직선적으로 수축하다가 냉각시 상변태점(A_c)인 약 400°C 에서 급격한 팽창이 일어난 후 400°C 이하가 되면 다시 수축하

게 된다. 중탄소강의 이와 같은 열팽창 이력(hysteresis) 특성으로 세라믹/중탄소강 접합체의 잔류응력을 제어할 수 있게 된다. 접합에 사용한 납재의 고상점($\sim 650^{\circ}\text{C}$) 이상의 온도에서는 액상 납재의 점성유동에 의하여 응력완화가 용이하게 일어나므로 열팽창계수 차로 인한 잔류응력은 발생하지 않는다. 즉 접합체에 발생하는 잔류응력은 납재의 고상점 이하의 온도부터 열팽창 계수차이에 의한 질화규소와 중탄소강의 길이변화 차에 해당하는 만큼 발생하게 된다. 예를 들어 납재의 고상점(650°C) 이상부터 A_c 이하의 온도에서 접합한 후 냉각하면 중탄소강은 상변태를 거치지 않기 때문에 승온시와 동일한 직선(1)을 따라 수축되며 납재의 고상온도에서부터 잔류응력이 발생하기 시작하여 최종적으로는 질화규소와의 열팽창차이 $\Delta 1$ 에 비례하는 잔류응력이 남게된다. 반면 A_c 이상의 온도에서 접합할 경우에는 중탄소강은 상변태를 수반하고 냉각시 아랫쪽 냉각곡선(2)을 따라 수축하게 된다. 따라서 접합체에는 질화규소와의 열팽창차이에 해당되는 $\Delta 2$ 에 비례하는 잔류응력이 남게된다. 따라서 접합온도를 조절하면 중탄소강의 열팽창 거동을 조절할 수 있으며 질화규소와 중탄소강 사이의 잔류응력의 크기도 제어할 수 있다. 이와 같이 잔류응력의 크기를 조절하면 형성되는 크라우닝 값도 변화시킬 수 있다. 중탄소강의 열처리에 따른 상변태 특성은 합금원소, 냉각속도 등에 따라 달라지므로¹⁹⁾ 중탄소강의 열팽창 거동의 제어는 접합온도 이외에 이들 조건을 변화시켜도 가능하나 본 연구에서는 금속부 배어링면의 열처리경화 등의 제약 조건으로 중탄소강의 조성 및 냉각속도 등은 변화시키지 않았으며 접합온도에 따른 최적의 크라우닝 형성 조건을 연구하였다.

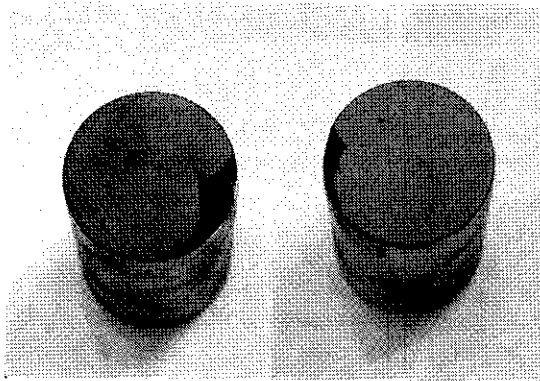
3.2 접합강도

질화규소와 중탄소강의 접합은 활성납재 성분 중 세라믹에 활성을 가지는 Ti성분이 접합공정시 질화규소/활성납재 계면으로 확산되어 질화규소의 Si 및 N과 반응하여 각각 TiSi_2 및 TiN 을 형성함으로써 접합이 이루어지게 된다.¹⁸⁾ 이때 규격에 적합한 크라우닝을 갖도록 제작된 캠 팔로우어에는 크라우닝 형성을 위하여 잔류응력이 존재하기 때문에 접합강도의 저하가 예상되며 실제 부품으로의 응용시 중요한 물성이 된다. 이를 확인하기 위하여 실제 부품 상태의 전단강도 및 압축강도를 측정한 결과는 표 1에 주어져 있다. 규격에 맞는 크라우닝 값을 갖는 캠 팔로우어의 평균 전단강도는 $38.4\text{MPa} (\pm 13)$ 이었다. 이와 같이 전단강도의 평균값의 크기에 비하여 오차범위가 큰 것은 그림 1(a)에서와 같은 방법으로 전단강도를 측정할 때 수반되는 필연적인 실험오차라 할 수 있다. 즉, 질화규소에 가해지는 압축

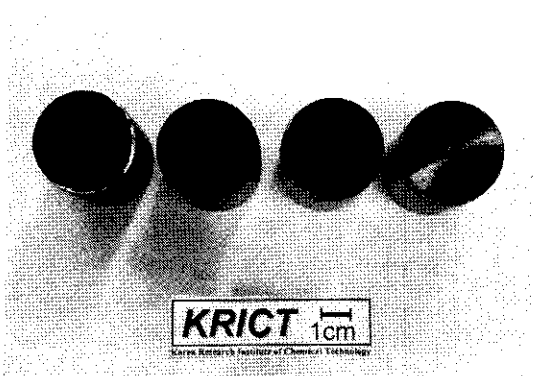
Table 1. Shear and compressive strength of ceramic cam follower.

Strength	Average	St. dev.
Shear (MPa)	33.5	13
Compressive (ton)*	3.6	0.4

*Maximum load at fracture



(a)



(b)

Fig. 3. Photographs of prototype specimen after (a) shear and (b) compressive strength test.

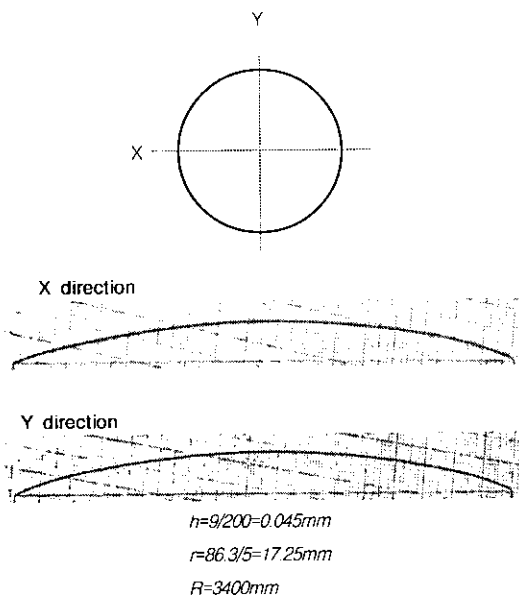


Fig. 4. Profile of surface for prototype ceramic cam follower.

응력이 질화규소 디스크의 원주 방향에 균일하게 전달된다면 질화규소의 압축강도가 질화규소/활성납재 사이의 접합

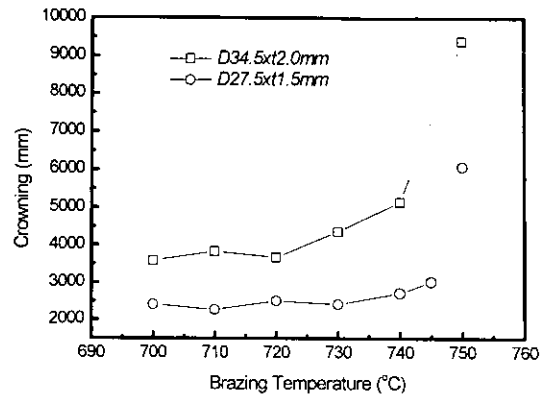


Fig. 5. Crowning curvature of ceramic cam follower prepared at various brazing temperature.

면 전단 강도보다는 훨씬 크기 때문에 질화규소/활성납재의 계면에서 파괴가 일어나야 할 것이다. 그러나 강도시험을 한 후 파괴된 시편을 보면(그림 3(a)) 접합면이 파괴되어 분리되는 것이 아니라 질화규소 팁의 모서리에서 파괴가 일어나 세라믹이 떨어져 나가는 것으로 관찰할 수 있었다. 두께가 2.0mm 이하인 질화규소 디스크와 이를 눌러주는 강도시험용 펀치 사이에 존재하는 공차에 의해서 펀치와 질화규소 디스크의 외경면이 정확하게 일치하지 않게 된다. 이러한 공차는 질화규소 디스크의 두께가 얇기 때문에 강도시험시 국부적인 응력집중으로 나타나 취성파괴 거동을 보이는 질화규소 디스크가 먼저 깨지는 현상으로 생각되며 이러한 요인에 의해서 오차범위도 $\pm 13\text{MPa}$ 로 크게 나타났다. 전반적으로 전단강도 값이 작은 이유는 크라우닝을 형성시키기 위하여 열팽창계수 차이에 의한 잔류응력을 이용하였기 때문이다. 냉각시 발생하는 잔류응력을 계산하기 위하여 (1) 두께가 얇은 납재의 소성변형에 의한 응력완화는 무시할 수 있으며, (2) 납재의 고상온도 (650°C) 이하에서부터는 질화규소 팁에 압축잔류응력이, 중탄소강에는 인장잔류응력이 발생하고, (3) 질화규소의 영률(Young's modulus)을 320GPa 이라 가정하면 질화규소(열팽창계수, $\alpha \sim 3.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)와 중탄소강($\alpha \sim 11 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)을 접합한 후 상온으로 냉각시킬 때 길이방향 수축만 고려한다면 $\Delta L/L = 4.68 \times 10^{-3}$ 정도의 열팽창 차이가 발생되며 이를 응력으로 환산하면 약 1500MPa 정도의 값이 된다. 그러나 납재의 소성변형과 질화규소의 크라우닝 형성등으로 응력이 완화되어 실제로는 이보다 작은 값을 갖는다고 할 수 있으며 전단강도 측정시 이 잔류응력의 영향으로 낮은 전단강도 값을 나타나는 것이라고 생각된다. 그러나 캠 팔로우어의 실제 작동조건에서는 윤활유를 사용하고 캠 팔로우어 표면이 경면이기 때문에 캠과의 마찰에 의한 전단응력은 무시할 정도로 작아 문제가 되지 않는다.

반면 압축시험 결과는 파괴시 하중이 3.6ton의 값을 나타내는데 이 정도의 압축강도는 실제 캠 팔로우어의 작동조건에서 밸브 스프링에 의해 발생하는 접동면의 하중의 3배 이상되는 값으로 향후 디젤엔진의 고성능화에 따른 접동면 하중이 증가하더라도 충분한 값이다.

3.3 Crowning

본 연구에서는 열팽창계수가 질화규소와 중탄소강의 사이를 갖는 중간층을 사용하지 않고 접합하였기 때문에 접합온도에서 냉각되면서 잔류응력에 의한 크라우닝(R)이 형성된다. 즉 열팽창계수가 큰 중탄소강이 질화규소 보다 더 많이 수축하게 되어 질화규소에 압축응력이 작용하고 질화규소 팁에 곡면이 형성되며, 이때 형성되는 곡률은 잔류응력에 비례하게 된다. 제작된 세라믹 캠 팔로우어 시작품의 표면을 프로파일 게이지를 이용하여 분석한 결과 그림 4와 같이 x, y 방향으로 모두 균일한 곡면이 형성되었음을 확인할 수 있었다. 접합온도에 따른 크라우닝 값은 그림 5에 주어져 있다. 접합온도가 730℃까지는 접합온도를 변화시켜도 크라우닝 값은 변하지 않고 거의 일정하였으며 단지 질화규소 팁의 두께가 1.5mm일 때보다 2.0mm로 두꺼워짐에 따라 더 큰 크라우닝 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 두께가 두꺼울수록 잔류응력에 의한 변형이 어려워지기 때문에 곡면형성이 어렵다는 것을 의미한다. 그러나 접합온도가 730℃ 이상이 되면 크라우닝 값이 증가한다. 이와 같은 이유는 3.1절에서 설명한 중탄소강의 열팽창이력거동에 기인되는 것이다. 상변태점(A_{c1}) 이상의 온도로부터 냉각시 열팽창 차이는 최대 Δ2에 비례하는 잔류응력 값이 작용하게 되는데 이 값은 상변태점 이하의 온도로부터 냉각시 발생하는 잔류응력(Δ1에 비해)에 비해 작기 때문에 질화규소 팁에 더 작은 압축잔류응력이 작용하게 되어 크라우닝 값이 증가하게 된다. 또한 중탄소강의 상변태에 따른 부피변화가 상변태점에서 매우 급격하게 발생되기 때문에 형성되는 곡률반경의 변화도 730℃ 부근에서 증가하기 시작하여 750℃부터 급격하게 증가된다.

직경이 27.5와 34.5mm인 경우 부품으로 적용하기 위한 적절한 크라우닝 값은 각각 2100~2500μm와 3000~4000μm인 점을 감안할 때 최적의 크라우닝 형성을 위한 접합온도는 상변태점(A_{c1}) 이하 영역인 700~720℃이었다.

4. 결 론

상용차용 대형 디젤엔진의 흡·배기효율 향상을 위한 세라믹 캠 팔로우어 개발 연구의 일환으로 활성납재를 사용하는 직접 브레이징법으로 질화규소와 중탄소강을 접합하고 열팽창계수차에 따른 크라우닝 제어 등에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

활성납재(TKC591)를 사용하여 질화규소(Si₃N₄)와 중탄소강(SNCM630)을 접합하여 전단강도 및 압축강도가 실제 엔진부품으로 응용하기에 충분한 값을 갖는 세라믹 캠 팔로우어를 제조할 수 있었다. 중탄소강의 열팽창 이력(hysteresis) 특성을 이용하여 접합과 동시에 캠 팔로우어 표면에 곡면을 형성시키는 in-situ 크라우닝 형성공정을 개발하고 접합온도에 따른 중탄소강의 열팽창거동을 이용하여 잔류응력의 크기를 조절함으로써 크라우닝 값을 제어할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 특정연구개발사업 중 “엔진용 고성능 질화규소 소재 개발” 사업의 하나로 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. “Designing Interfaces for Technological Applications : Ceramic-Ceramic, Ceramic-Metal Joining,” Ed. by S.D. Peteves, Elsevier Applied Science, London and New York, England (1989).
2. Kanzaki, Shuzo; Tabata, Hideyo, “Diffusion joining of silicon nitride ceramics,” *Yogyo Kyokaishi*, **91** [11] 520-2 (1983).
3. Peteves, Stathis S. and Nicholas, Michael G., “Evaluation of brazed silicon nitride joints: microstructure and mechanical properties,” *Journal of the American Ceramic Society*, **79**[6] 1553-62 (1996).
4. Loehman, Ronald E., Tomsia, Antoni P., and Pask, Joseph A., “Bonding mechanisms in silicon nitride brazing,” *Journal of the American Ceramic Society*, **73**[3] 552-8 (1990).
5. Saganuma Katsuaki, Okamoto Taira, and Koizumi Mitsue, “Joining of silicon nitride to silicon nitride and to Invar alloy using an aluminum interlayer,” *Journal of Materials Science*, **22**[4] 1359-64 (1987).
6. Schuster, J.C., Weitzer F., and Bauer J., “Joining of silicon nitride ceramics to metals-the phase diagram base,” *Materials Science and Engineering, A*, **105-6**[1-2] 201-6 (1988).
7. Bates Carl H., Foley Michael R., and Rossi Guilio A., “Joining of nonoxide ceramics for high-temperature applications,” *American Ceramic Society Bulletin*, **69**[3] 350-6 (1990).
8. Ito Masaya and Ishida Noboru, “Development of brazing technology for ceramic turbocharger rotors,” SAE 880704 (P-207), pp55-63 (1988).
9. Hisao Takeuchi and Akira Yamakawa, “Joining of Si₃N₄ Turbine Rotor and Metal Shaft,” SAE 940203, pp69-74 (1994).
10. “セラミックスは エンジンに使えるか,” *Nikkei New Materials*, Vol. 4 No. 20 (1992).
11. Stoshi Matsumoto, Satoshi Maeda, Katsuo Kimura, and Masato Taniguchi, “Development of Ceramic cam follower,” *自動車技術*, vol. 47, No. 5, pp11-16 (1993).
12. M. Wada, et al., “Development of Sintered Metallic Cam Follower for Excessively High Load Applica-

- tion," SAE Paper, No.912544, 789-795 (1991).
13. Masato Taniguchi, et al., "エンジン用タペットの製造方法," JP4287807A, 日本特殊陶業(株) (1991).
 14. Osamu Suzuki, Masato Taniguchi, and Masaya Ito, "Tappet with ceramic seat plate," US5168841, NGK Spark Plug Co., Ltd., Nagoya, Japan (1991).
 15. Todd R. Downing and Robert C. Behnke, "Tappet with Ceramic camface," UK2093554A, Standyne Inc., Connecticut, USA, (1982).
 16. Satoshi Kadokawa, Kanagawa, "Cam Follower Device for Valve Driving Mechanism in Engine," US5054440, Nippon Seiko Kabushiki Kaisha, Tokyo, Japan (1990).
 17. Masato Taniguchi, Masaya Ito, "Method of Forming Tappet of the Kind Having Ceramic Seat Plate," US5253418, NGK Spark Plug Co., Ltd., Nogoya, Japan (1993).
 18. Y.M. Choi, B.H. Chun, and J.D. Lee, "Joining of Silicon Nitride to Carbon Steel using an Active Metal Alloys," Kor. J. of Mater Res., Vol. 9, No. 2, p199 (1999).
 19. G. Krauss, "Principles of Heat Treatment of Steels," American Society of Metals, Metals Park, Ohio, (1980).