

자동차 엔진용 핀부싱 베어링의 SEM/EDX 이용 성분 · 결합분석에 관한 연구

김청균*

홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

SEM/EDX Analysis on the Composition and Surface Defect in a Pin Bushing Bearing for an Automotive Engine

Chung Kyun Kim[†]

Tribology Research Center, Hongik University

Abstracts – This paper presents the friction induced scuffing and wear defects analysis of a pin bushing bearing based on the chemical composition using a scanning microscopy (SEM) and an energy dispersive X-ray analyzer (EDX). The SEM/EDX system, which may provide good information on the surface thermal defects and chemical compositions, provides impurities such as an aluminum, a silicon, a ferrous component and an oxygen, especially. The EDX measured results show that the oxygen may reduce the strength and a hardness of a pin bushing, which may lead to a scuffing and a seizure on the rubbing contact surface. The current technology fabricated by a sintering for a pin bushing bearing should be modified or changed to reduce the oxygen composition and the impurities in pin bushing materials.

Key words – pin bushing, SEM/EDX analysis, surface defect, seizure, automotive engine.

1. 서 론

자동차 엔진에서 피스톤-커넥팅 로드 어셈블리의 원활한 작동은 출력과 연비를 향상시키고 진동과 소음, 특히 마찰접촉 표면의 열적손상을 줄일 수 있다. 엔진에서 직선 왕복운동을 하는 피스톤과 회전 진자운동을 하는 커넥팅 로드 사이에는 Fig. 1에서 보여준 것과 같은 핀부싱(pin bushing)을 장착한다. 이들 두 부품 사이에 위치한 핀부싱은 원활한 회전 운동성을 보장할 수 있도록 오일홈을 통해 공급된 윤활유에 의해 유막이 잘 형성할 수 있도록 규칙적인 운동을 한다. 핀부싱은 저널베어링과 유사한 평면마찰 윤활기능을 갖고 있지만, 상대적으로 유막형성이 어렵기 때문에 경계마찰 또는 부분적으로 건조마찰을 유지하면서 피스톤으로부터 전달되는 폭발하중을 담당한다.

피스톤의 헤드에 가해지는 연소가스 폭발압력은 피스톤의 상단부를 통해 피스톤핀으로 전달되고, 피스톤 핀에 연결된 핀부싱 베어링은 폭발하중을 윤활유막으로 모두 흡수하여 충격하중에 의해 발생하는 핀부싱의 충격손상을 방지하고, 핀부싱을 거친 폭발하중은 커넥팅 로드로 전달되어 최종적으로 크랭크축에 회전동력을 발생하도록 하여 피스톤의 직선운동을 회전운동으로 전환하는 역할을 담당한다.

핀부싱은 커넥팅 로드의 소단부(small end)에 압입하여 베어링 역할을 담당하도록 개발된 회전연결 하중지지 부품이다[1]. 오일홈(oil groove)을 통해 공급된 엔진 오일은 유막을 형성하여 폭발압력을 감당하도록 설계되어 있지만 구조적으로 윤활유 공급이 어렵기 때문에 실제로는 윤활유막 상태에서 작동하기 어렵다. 따라서 혼합윤활(mixed lubrication) 상태에서 운전해도 작동성을 보장받을 수 있도록 제작하였지만 마찰표면은 열적손상에 의한 마멸이 많이 발생한다. 즉, 핀부싱의 마찰접촉

*주저자 · 책임저자 : chungkyunkim@empal.com

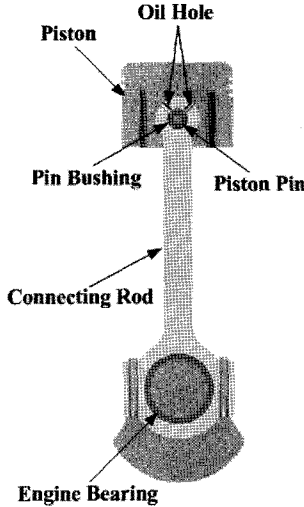


Fig. 1. Pin bushing bearing and a piston assembly.

운동표면의 상단부와 하단부에는 스커핑 또는 시저현상에 의한 열적손상이 발생하면서 고장을 일으키는 경우가 많아진다.

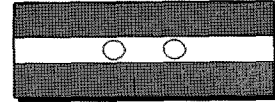
본 연구에서는 소결공법으로 제조한 핀부싱 베어링 합금소재를 SEM/EDX로 산화물질의 혼입정도를 분석하고, 특히 핀부싱의 마찰접촉면에서 발생하는 열적손상에 의한 스커핑이나 시저현상의 진행원인을 분석·고찰하고자 한다. 여기서 사용한 합금소재는 납(Pb) 성분을 포함한 유연소재 핀부싱과 포함하지 않은 무연소재 두 가지에 대해 고찰하였다.

2. 핀부싱의 오일홈 및 합금소재

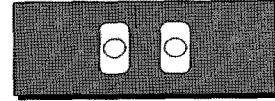
2-1. 오일홈 형상

핀부싱 소재는 청동계열의 비철합금으로 제작되었기 때문에 피스톤으로부터 전달되는 폭발압력을 건조마찰 조건에서 직접적으로 감당하기에는 강도가 많이 부족하다. 따라서 피스톤핀과 부싱 베어링 사이의 간극에는 유막을 형성하여 폭발압력에 의한 충격하중을 충분히 감당하도록 설계되어야 한다. 그러나 실제의 핀부싱에서 담당하는 폭발압력은 부분적으로 혼합윤활 박막에 의해, 그리고 나머지는 건조마찰 접촉하중에 의해 각각 담당하는 것으로 알려져 있다. 따라서 핀부싱 베어링은 항상 고마찰력에 의한 에너지 손실과 열적손상에 의한 스커핑이나 시저현상이 발생하는 것으로 알려져 있다.

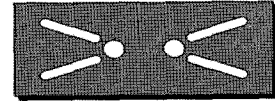
열적손상 문제는 핀부싱에 윤활유 공급이 원활하지



(a) Oil groove in the circumferential direction



(b) Oil groove in the axial direction



(c) Oil groove for a high pressure

Fig. 2. Oil groove for a pin bushing bearing.

못하였기 때문으로, Fig. 2에서 보여준 것처럼 핀부싱의 내면에 안정된 유막을 형성하기 위해 다양한 형상의 오일홈을 가공하여 윤활유 공급을 원활하게 이루어지도록 설계한다. Fig. 2(a)는 무한단폭 핀부싱에 오일홈을 원주방향으로 가공하여 원주방향 오일유동을 원활하게 하고, Fig. 2(b)는 무한장폭 핀부싱의 축방향 윤활을 원활하게 하고, Fig. 2(c)는 디젤엔진용 핀부싱 베어링처럼 고하중을 감당해야 하는 경우에 많이 채택하는 하이브리드 오일홈 형상이다. 여기서 사용한 오일홈은 SAE 5W-30, 10W-30, 10W-40 등과 같은 엔진오일을 사용하는 경우에 적합하나, 향후에 널리 사용될 것으로 예상되는 저점도 엔진오일의 경우는 오일홈의 형상과 크기가 달라지고, 마이크로 가공기술을 적용한 기술개발이 진행될 것으로 예상된다.

2-2. 소재특성

핀부싱 소재로 연청동 계열의 합금을 많이 사용하였으나, 납(Pb)의 유해성으로 인해 유럽에서는 2008년 7월부터 사용을 금지하였다. 친환경 자동차 도입은 세계적인 경향으로 불가피하고, 납이 포함된 유연베어링 사용은 금지될 예정이므로 자동차 생산량의 65% 이상을 수출하는 우리나라는 국제시장의 기술적 변화에 대처해야 한다. 수출차량은 물론 내수용 자동차에도 무연 핀부싱 베어링을 이미 장착하기 시작하였다.

기술된 엔진용 핀부싱 소재의 기본은 구리(Cu)와 주석(Sn)이고, 여기에 유연베어링의 경우는 납(Pb)을, 그리고 무연베어링의 경우는 비스무트(Bi)를 각각 혼합하여 합금소재를 제조한다. 디젤 엔진용으로 개발된 핀

부싱은 강도를 보강하기 위해 납이나 비스무트 대신에 니켈(Ni)을 혼합하여 필요한 기계적 강도와 경도를 확보하고 있다.

이들 청동계열의 비철금속은 마찰저감, 가공성, 내하중성, 윤활성이 우수하여 마찰면에 윤활유 공급이 약간 부족해도 소재자체의 우수한 트라이볼로지 특성[2]으로 인해 일정부분을 커버하고 있다. 핀부싱의 윤활 간극에 공급된 윤활유는 합금소재의 내피로성, 저마멸성, 내부식성 등에 긍정적인 영향을 미치고, 연청동 소재는 열적손상의 대표적인 스키핑 및 시저 현상을 억제하는 트라이볼로지적 효과를 기대할 수 있다.

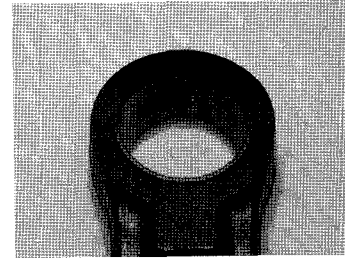
현재까지 개발된 연청동 소재를 제조하는 방법은 소결제조, 원심제조, 주조법, HIP 등이 있고, 이들 제조법은 핀부싱 베어링의 기계적 강도와 제조원가에 의해 결정된다. 현재 대량으로 생산하는 일반 제조법은 소결방법이지만, 나날이 증가하는 고풍력 엔진용 베어링 강도를 맞추기 위해서는 다양한 제조기술이 개발되어야 한다.

이들 비철합금 베어링 소재 자체로는 피스톤에서 전달되는 순간 충격하중을 강도측면에서 감당하기 어렵기 때문에 이들 비철소재를 박막으로 제조하고, 박막의 기계적 강도를 보완하기 위해 백메탈로 사용하는 강재(steel plate)를 복합소재로 제조하여 원형으로 만들어 제작한다. 백메탈 강재는 보통 철판이라고 부르는 냉강압연강판(SPCC)[3]을 일정한 크기로 절단하여 프레스로 압연하여 제작한다.

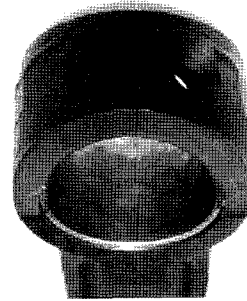
3. 실험결과 및 고찰

자동차 엔진용 핀부싱 베어링 소재는 윤활성과 저마찰성, 제작성이 우수한 유연베어링 합금소재를 사용하였으나, 내년부터 유럽 자동차는 친환경 소재사용 프로그램에 의거 새로운 무연베어링을 사용해야 한다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3에서 제시한 베어링의 손상 사례와 이들 합금소재에 대한 SEM/EDX 성분분석을 통해 소결제조의 트라이볼로지적 문제점을 고찰하고자 한다.

자동차 엔진용 핀부싱은 윤활유가 부족한 상태에서 운전되는 것이 보통이기 때문에 피스톤의 헤드부에 가해지는 폭발압력을 감당하기 어려운 상태이다. 커넥팅로드의 회전전자 운동을 원활하게 작동할 수 있도록 허용하기 위해서는 윤활유막 형성이 필수적인데 실제로는 극단적인 건조마찰이나 혼합마찰 윤활상태가 일



(a) Scuffing of a bushing upper part



(b) Scuffing of a bushing lower part

Fig. 3. Scuffing wear in a pin bushing bearing.

반적이므로 Fig. 3에서 보여준 것과 같은 스키핑 마멸이 흔하게 관찰된다.

Fig. 3은 대표적인 스키핑 손상으로 피스톤의 왕복 운동에 따른 진동을 심화시키고, 유막형성을 어렵게 만들어 결국에는 베어링 파손을 유발하여 엔진의 구동을 못하게 하는 경우가 발생하기도 한다. Fig. 3의 손상 사례는 실제로 사용한 엔진에서 핀부싱 베어링을 분해하여 관찰한 것으로 스키핑 마멸흔적을 상단부와 하단부에서 모두 관찰할 수 있다. 특히 오일홈이 있는 핀부싱의 상단부 마찰접촉 표면에서 큰 스키핑 손상부위를 관찰할 수 있고, 하단부에서는 작은 스키핑 손상부를 다수 발견할 수 있다. 이것은 윤활유 공급이 원활하지 못한 상단부의 열적손상이 하단부에 비해 크게 발생한 것은 윤활유막의 형성이 어렵기 때문이다. 반면에 베어링의 하단부에는 윤활유 공급이 상대적으로 원활하여 혼합윤활 또는 경계윤활 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 여기서 보여준 열적손상은 상단부에서 시저현상으로 진행될 우려가 높은 스키핑 구조를 보여주나, 하단부는 부분적인 윤활유 공급이 지속되면서 스키핑 마멸은 좀 더 진행될 것으로 예상된다.

Figs. 4~7은 실제로 사용되고 있는 가솔린 엔진용 베어링 소결소재에 대한 EDX 분석결과이고, Figs. 8

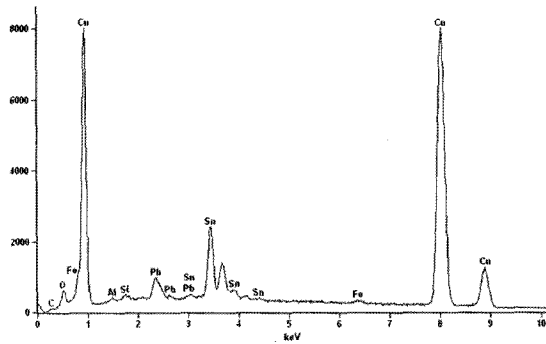


Fig. 4. Chemical composition of a lead based pin bushing bearing for a gasoline engine using a EDX analyzer.

과 9는 디젤 엔진용 소결합금 핀부싱 소재에 관한 것이다. Fig. 4는 현재 가솔린 엔진에서 널리 사용하는 소결법을 이용하여 제조한 핀부싱 합금소재를 EDX로 분석한 결과를 보여준다. Fig. 4의 EDX 측정결과에 의하면, 기본소재로 사용한 구리(Cu)는 72.01 wt%, Sn 11.76 wt%, Pb 3.53 wt%의 합금성분을 구성하고, 여기에 불순물인 Al 0.48 wt%, Si 0.4 wt%, Fe 0.31 wt%가 각각 혼입되어 있다. 특히 산소(O₂)는 7.99 wt%나 다량 포함되어 합금소재의 기계적 강도를 떨어뜨리는 것은 물론, 핀부싱 베어링에 걸리는 폭발압력에 의해 열적마멸이 쉽게 진행될 것으로 예상된다. 핀부싱 베어링 소재에서 측정된 산화물질은 합금소재를 제조하는 소결공정에서 혼입된 것으로 판단된다. 결국 합금소재에 불순물과 산화물질이 많이 포함되었다는 것은 유연베어링의 하중지지와 반복하중에 의한 내구성을 떨어뜨리는 원인으로 작용하기 때문에 이들을

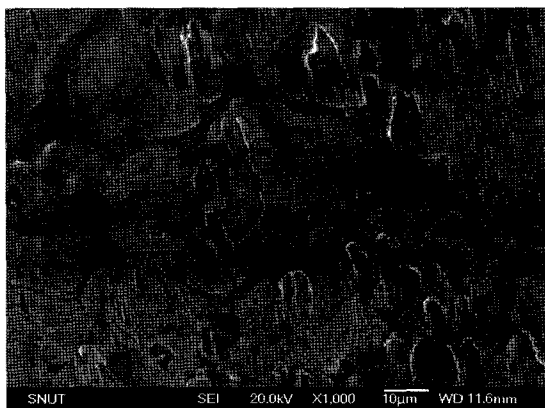


Fig. 5. Surface topography of an lead based pin bushing bearing for a gasoline engine using a SEM.

제거하기 위한 새로운 제조기술이 필요하다.

Fig. 5는 납(Pb)이 혼입된 핀부싱 베어링 소재를 소결로(sintering furnace)에서 제조한 마찰표면 조직도를 보여준다. 합금소재에 납 성분이 함유되어 있기 때문에 구리나 주석 소재에 대한 함침성이 우수하여 긴 형상의 납 성분이 균일하게 소결된 배열을 나타내고 있다.

Fig. 6은 차세대 친환경 자동차에 사용하기 위해 개발한 핀부싱 베어링용 무연 합금소재로 베어링의 윤활성을 확보하고 기계적 강도를 보강하기 위해 납(Pb) 대신에 비스무트(Bi) 소재를 혼입하였다. Fig. 6의 EDX 성분측정 결과에 의하면, 기본소재로 사용된 구리는 81.44 wt%, Sn 11.21 wt%, Bi 3.01 wt%의 성분으로 소결합금이 제조되었다. 여기에 불순물이라 할 수 있는 Al 0.47 wt%, 특히 산화물질이 3.86 wt%나 포함되어 베어링 합금소재의 기계적 강도를 떨어뜨리는 문제점이 제기되었다. 특히 베어링 합금소재에 산화물질이 혼입되면 핀부싱 베어링은 고온의 작동중에 산화현상이 지속적으로 진행되어 유막손상에 의한 내구성을 떨어뜨리고 윤활작용에 부정적인 영향을 미치게 된다.

핀부싱 베어링의 합금소재에 산화물질이 많이 포함되어 있다는 것은 합금을 제조하는 소결과정에 산소가 혼입될 가능성이 대단히 높았다는 것을 의미한다. 본 실험에 사용된 핀부싱 베어링용 합금소재는 소결로에서 제조하였기 때문에 기계적 강도를 높이는 데는 한계가 있음을 보여준 데이터이다. 따라서 베어링을 제조하는 공법으로 널리 사용하는 소결제조는 다른 제조법으로 바꾸어 합금소재 제조과정에 산소가 개입되는 것을 차단할 수 있는 기술개발이 필요하다. 산화물질의 배제는 베어링 소재의 내마멸성을 확보할 수 있고, 특

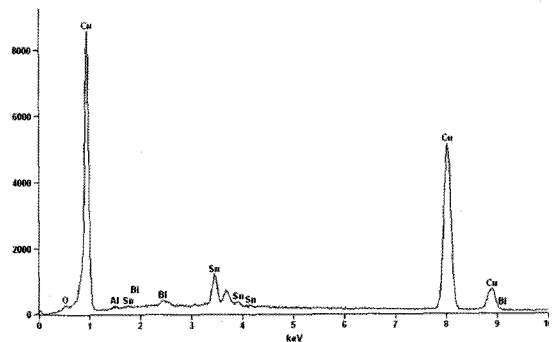


Fig. 6. Chemical composition of an unlead based pin bushing bearing for a gasoline engine using a EDX analyzer.



Fig. 7. Surface topography of an unlead based pin bushing bearing for a gasoline engine using a SEM.

히 소재의 기계적 강도를 높이는 지름길이므로 반드시 해결해야 하는 소재제조 기술이다.

Fig. 7은 비스무트(Bi)가 혼입된 핀부싱 베어링 소재를 소결로에서 제조한 마찰표면 조직도를 보여준다. 합금소재에 비스무트 성분이 함유되어 있기 때문에 기계적 강도는 140 MPa 정도로 120 MPa 정도의 무연베어링에 비해 높고, 비스무트에 의한 무연베어링 소재의 조직은 비교적 둥근 형상으로 균일하게 소결된 배열을 나타내고 있다.

가솔린 엔진용 핀부싱 베어링의 대표적인 소재인 CuPb10Sn10은 납(Pb) 성분이 들어 있는 합금에 강제 백메탈(back metal)을 압접하여 복합소재로 제조한 것으로 최대 하중지지 용량은 120 MPa 정도이다. 그러나 유연소재를 사용한 베어링은 친환경 자동차의 전면 도입으로 더 이상 사용할 수 없고, 이제는 새롭게 개발한 CuSn10Bi3.5의 합금소재에 강제 백메탈을 접합한 것으로 대체하고 있다. 납(Pb) 성분을 비스무트 성분으로 대체한 무연베어링은 고회전 가솔린 엔진용으로 개발한 것으로 하중지지 용량은 140 MPa로 16.7%나 높아져 고회전 엔진용으로 적합하다.

여기에 베어링 합금소재의 내마멸성을 나타내는 비커스 경도는 유연합금 베어링의 경우는 Hv=100이고, 무연베어링 합금소재의 경우는 Hv=120으로 각각 측정되었다. 새롭게 개발된 무연합금 베어링 소재는 납(Pb) 10%를 3.5%의 비스무트로 대체하여 내마멸성을 20% 이상 높여 내구성을 향상시켰고, 유럽의 친환경 자동차 부품 사용정책에 적합하도록 베어링 합금소재를 친환경적으로 개발하여 자동차 부품의 유해성을 제거하였다.

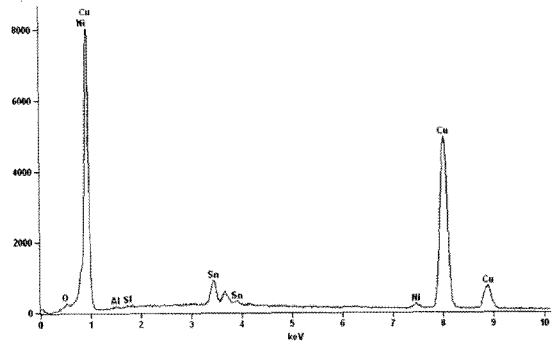


Fig. 8. Chemical composition of a pin bushing bearing for a Diesel engine using a EDX analyzer.

Fig. 8은 2.9 L 용량의 디젤엔진 자동차용 핀부싱 베어링으로 개발된 고강도 핀부싱 합금소재에 대한 분석 결과이다. 디젤엔진의 고회전 강도를 보장하기 위해 구리에 니켈(Ni)을 혼입하는 것이다. Fig. 8의 EDX 측정결과에 의하면, 기본소재로 사용된 구리는 84.94 wt%, Sn 8.81 wt%, Ni 1.05 wt%의 조성으로 제조되었고, 여기에 불순물 성분인 Al 0.39 wt%, Si 0.26 wt% 이외에 산화물질이 4.55 wt%나 많이 포함되어 있다. 베어링 소재를 제조하는 소결합금 공정에 산소가 많이 혼입되면 소재의 기계적 강도 및 경도를 떨어뜨리기 때문에 소결공정에서 산소를 배제할 수 있는 기술적용이 필요하다.

Fig. 9는 니켈을 구리에 혼입된 핀부싱 베어링 소재를 소결로에서 제조한 마찰표면 조직도를 보여준다. 합금소재에 고강도의 니켈 성분이 함유되어 있기 때문에 기계적 강도는 160 MPa 정도로 대단히 높아지고, 소재의 조직도 강제처럼 균일하게 소결된 배열을 나타내



Fig. 9. Surface topography of a pin bushing bearing for a Diesel engine using a SEM.

고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 편부싱용 합금소재로 널리 사용하는 납(Pb) 성분이 혼합된 유연베어링 소결합금과 납 성분을 제거한 무연베어링 소결제에 대한 혼합성분과 조직을 분석하기 위해 EDX/SEM법을 사용하였고, 실제로 사용한 편부싱 베어링을 수거하여 마멸특성을 고찰하였다.

가솔린 엔진용 편부싱 유연베어링 소재로 사용하는 CuPb10Sn10의 합금소재는 Pb 혼입에 따른 베어링 소재의 우수 윤활성과 소결합금 제조성을 확보하였지만 산화물질의 과도한 혼입으로 인해 기계적 강도와 경도를 높이는데 한계점을 드러내고 있다. 따라서 유연베어링 소재의 내구성은 떨어지고 베어링 간극에 윤활유막 형성이 어려운 상황에서 마찰열에 의한 스커핑 마멸이나 시저현상이 많이 발생한다는 사실이다. 반면에 납 성분을 제거하고 비스무트를 혼입하여 소결제조한 CuSn10Bi3.5의 기계적 강도는 유연베어링 합금소재 대비 16.7%나 상승하고, 경도는 20% 이상 증가하는 효

과를 기대할 수 있다. 특히 유럽은 2008년 7월부터 친환경 자동차 판매를 위해 자동차용 부품의 유해성분을 모두 제거토록 규정하고 기술개발을 추진하고 있으므로 편부싱의 무연베어링 소재사용은 불가피한 상황이다.

다만 앞에서 지적한 것처럼 종래의 소결합금 제조공법은 구리, 주석, 니켈, 납, 비스무트 등과 같은 소재를 소결하는 과정에서 불가피하게 산화물이 형성되므로 이것을 최대한 줄일 수 있는 새로운 제조기술을 개발하는 것이 중요하다. 편부싱 합금소재에 산화물질이 혼입되면 기계적 강도와 경도는 물론이고 부싱용 베어링의 내구성과 윤활성을 떨어뜨리는 원인으로 작용하기 때문에 소결과정에서 산소의 개입을 억제해야 한다.

참고 문헌

1. 김청균, “자동차엔진공학(개정판),” 북두출판사, pp. 37-38, 2004.
2. 김청균, “트라이볼로지,” 형설출판사, pp. 434-437, 2006.
3. “냉간압연강판 및 강대 KS D 3512,” 한국표준협회, 2002.