

◆특집◆ 자동차부품 및 정밀부품의 성능과 내구성 향상

PVD/PACVD 코팅의 종류와 특성

김종성\*, 정용태\*\*

Characteristics and Properties of the PVD/PACVD Coating

Jongseong Gim\*, Yongtae Jeong\*\*

Key Words : PVD (물리기상증착), PACVD (플라즈마 화학기상증착), Hard coating (하드코팅), BALINIT coatings, Tribology (트라이볼로지)

1. BALINIT® 코팅

1.1 WC/C 코팅

1.1.1 WC/C의 특성

WC/C 코팅은 비정질의 텅스텐카바이드와 탄소 재질(WC/C)이 다층구조를 이루는 코팅의 한 종류이다. 통상 4 μm이하의 두께로 코팅되며 건조 상태에서 0.1~0.2의 마찰계수를 갖는 장점이 있다.



Fig. 1 Coating structure of WC/C

1.1.2 WC/C의 장점

WC/C 코팅은 낮은 마찰계수 덕분에 윤활유가 공급되지 않는 건조상태에서도 높은 하중을 견디

주어, 피로와 마찰을 저감시켜준다. WC/C 1,000HK는 작용압력은 높으나, 비교적 마찰 조건이 양호하고 슬라이딩 속도가 낮은 경우에 적용된다. 특히 건조상태에서 마찰계수가 낮기 때문에 코팅되지 않은 상대재료를 보호해 주고, 만약 상대재료에도 코팅을 한 경우에는 마찰계수를 더욱 줄여준다. 슬라이딩 속도가 높은 경우에 사용되는 WC/C 1,500HK는 높은 경도를 갖고 있어, 연속마찰 조건에서 우수한 초기 길들이기 성능과 표면상태를 보여준다.

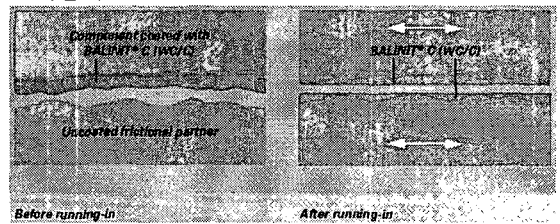


Fig. 2 Burnishing and material transfer with WC/C coating

1.1.3 WC/C의 적용

WC/C는 신뢰성을 향상시키고 공구 수명을 연장해 주기 때문에, 자동차 산업과 기계 제조 산업의 정밀 부품의 성능을 향상시키는데 적용된다. 이 코팅은 윤활제를 사용할 수 없는 극저온, 진공, 청정, 식음료 공정에 적용되어 신뢰성을 향상시켜 준다. WC/C의 사용온도는 200℃ 이하이기 때문에

\*울리콘발저스코팅코리아(유) 대표이사/공학박사

Tel. 031-680-9991, Fax. 031-683-9905

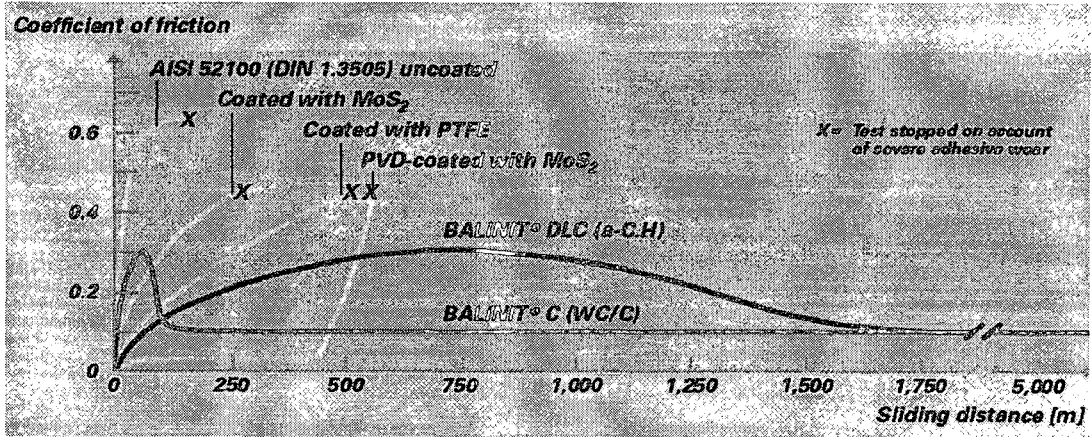
Email jongseong.gim@oerlikon.com

\*\*울리콘발저스코팅코리아(유) 이사/공학석사

Tel. 031-680-9981, Fax. 031-683-8896

Email yongtae.jeong@oerlikon.com

Table 1 Dry-running behavior of friction-reducing materials



볼베어링, 플러베어링 및 외장재의 경도향상에 특히 적합하다.

1.2 DLC 코팅

1.2.1 DLC 코팅의 특성

DLC는 탄소와 수소로 이루어진 비정질의 코팅이다. 코팅의 구조가 plasma polymer 형태인 Diamond 구조와 흡사하기 때문에 매우 견고하고 안정적이다. DLC 코팅은 건조상태에서 마찰계수가 0.1~0.2 이고, 표면경도는 2,000HK 이상을 갖는 우수한 코팅이다. 높은 잔류응력을 해결하기 위해 특수 개발된 밀착력 증대기술을 적용하여 과도한 하중에서도 우수한 밀착력을 가진다. 통상 3 μm 두께까지 코팅 가능하다.

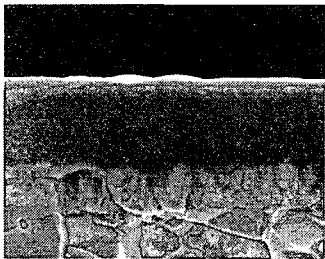


Fig. 3 Coating structure of DLC

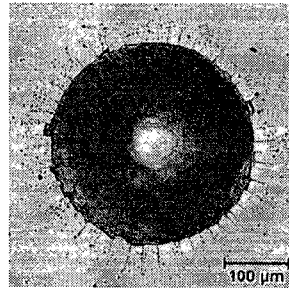


Fig. 4 Rockwell indentation in a DLC coating

해준다. 또한 내부식성을 향상시켜준다. DLC 코팅은 제품에 균일하게 분포되기 때문에, 코팅 후처리를 최소화하여 최소의 공차로 설계토록 해준다. 사용 온도조건이 250℃ 이하이기 때문에 저온 열처리 강이라도 조직의 변화 없이 코팅이 가능하다.

1.2.2 DLC 코팅의 장점

비교적 슬라이딩 속도가 높은 조건에서 사용할 수 있는 DLC 코팅은 표면경도가 높고 마찰계수가 낮기 때문에 열악한 마모조건에서 부품간의 마모와 윤착을 방지해 주고, 마찰 손실을 최소화

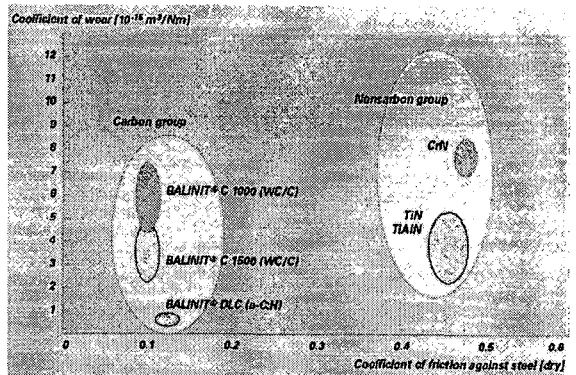


Fig. 5 Coefficient of friction and wear

### 1.2.3 DLC 의 적용

DLC 코팅은 자동차, 직물 기기, 일반 기기, 펌프, Seal 및 Valve 와 같은 내마모성과 표면 품질을 요구하는 정밀부품에 사용된다. 한 예로 고압이 작용하는 디젤엔진의 Valve train system 에 코팅이 적용되고 있다.

## 1.3 CrN 저온코팅

### 1.3.1 CrN 저온코팅의 특성

CrN 저온코팅은 코팅 후 표면조도의 증가가 0.02  $\mu\text{m}$  이하이고, 코팅강도는 1,750HK 를 갖는다

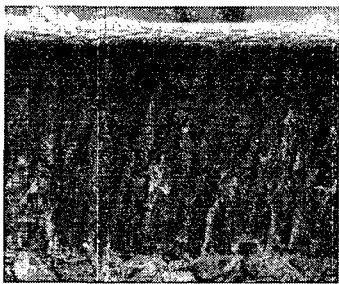


Fig. 6 Coating structure of CrN low temperature coating

### 1.3.2 CrN 저온코팅의 장점

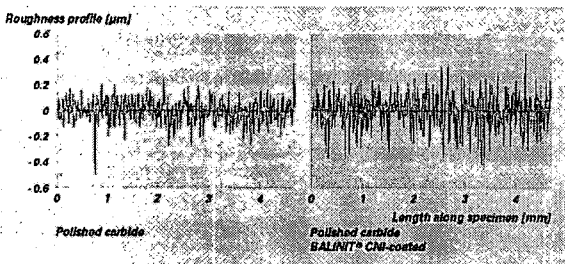


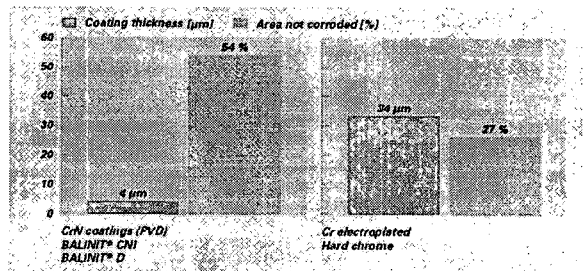
Fig. 7 Surface roughness

윤활이 불충분하고 기계적 부하가 높은 조건에서 CrN 저온코팅은 우수한 내마모성과 마찰특성을 보여준다. 또한 수용성 전해질 시스템에서 내부식성이 크게 향상된다. 250 $^{\circ}\text{C}$  이하에서 코팅하기 때문에 다양한 종류의 모재에 적용할 수 있다. CrN 저온코팅은 모재의 형상을 보존해 주고, 기존의 CrN 코팅에 비해 오염이나 잔류물을 생성하지 않으므로 후처리 작업이 필요없이 부품가공 공정의 마지막 단계에 적용할 수 있다.

### 1.3.3 CrN 저온코팅의 적용

CrN 저온코팅은 일반기계류, 유압기기의 피스톤, 자동차의 valve train 부품, 피스톤 링 및 항공산업에까지 폭넓게 사용된다. CrN 저온코팅은 FDA 의 승인을 받은 코팅으로 식품과 직접적으로 접촉되는 부품에도 적용될 수 있다. CrN 저온코팅은 전기 전도성과 화학적 안정성이 우수하기 때문에 일부 전통적인 전기도금 방식의 크롬 및 니켈 도금을 대체할 수 있다.

Table 2 Corrosion test



## 1.4 CrN 코팅

### 1.4.1 CrN 코팅의 특성

CrN(chromium nitride) 코팅은 일종으로 반응성 이온플레이팅 방식 plating 방식 또는 아크 증착 방식으로 500 $^{\circ}\text{C}$  이하의 온도에서 코팅된다

### 1.4.2 CrN 코팅의 장점

CrN 코팅은 마모성, 내부식성 및 내산화성 측면에서 우수하다. 이 코팅은 경도 1,750 HK 이고 우수한 코팅 밀착력을 갖는다. 동일 조건에서 크롬 대비 동등한 내부식성을 갖고, 크롬보다 더 우수한 내마모성을 갖는다

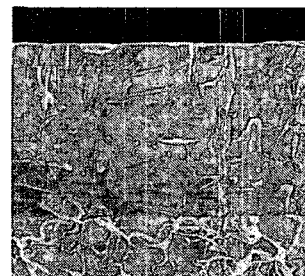


Fig. 8 Coating structure of CrN coating

### 1.4.3 CrN 코팅의 적용

CrN 코팅은 온도에 민감하지 않은 외장재와 shafts 같은 큰 부품의 기계류, 자동차와 항공산업

에 이용된다. 코팅 적용이 가능한 소재에는 티타늄, 구상흑연주철과 고온 템퍼링 강이다.

## 1.5 TiN 코팅

### 1.5.1 TiN 코팅의 특성

TiN(titanium nitride) 코팅은 일종으로 이온플레이팅 또는 아크 증착 방식으로 코팅한다. CrN 과 비교하여 이 코팅은 chromium 대신 titanium 를 사용한다. 정밀 공구류의 내마모성을 높이기 위하여 개발된 최초의 코팅 공법이고 1980 년부터 사용되고 있다

### 1.5.2 TiN 코팅의 장점

TiN 코팅은 마찰계수가 0.4 이며 2,300HK 의 높은 경도를 갖고 고온 환경에서 사용된다

### 1.5.3 TiN 코팅의 적용

고온 템퍼링 강과 몇 종의 저온 템퍼링 강에 TiN 코팅이 적용될 수 있다. 이 코팅은 높은 내마모성이 요구되는 경우에 사용되며, 때로는 외장의 데코레이션을 목적으로 사용되기도 한다.

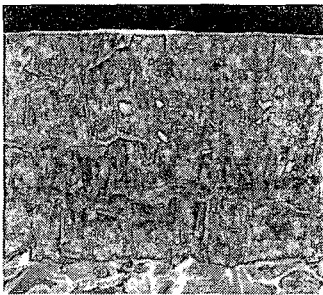


Fig. 9 Coating structure of TiN coating

## 1.6 PVD/PACVD 코팅의 장점

PVD/PACVD 코팅은 실용적인 측면에서 많은 이점이 있으므로 광범위한 조건에 적용될 수 있다.

- 신뢰성과 수명 향상: 모든 부품은 중요한 기능을 하고 있어서 미세한 마모에 의해서도 불량을 발생시킬 수 있다. 따라서 중요 부품에 PVD/PACVD 코팅을 적용함으로써 높은 신뢰성과 향상된 수명을 보증한다.

- 건조운환에서의 보호: PVD/PACVD 코팅의 낮은 마찰 계수는 예상치 못한 윤활유 손실에서도 최소한의 운전능을 가능하게 한다. 또한 냉동기기와 진공장비, 식품산업, 크린룸 및 항공기와 같은 윤

활유를 사용할 수 없는 조건에서 시스템이 정상 운전할 수 있도록 해준다

- 고가의 소재의 대체: 적절한 강도의 소재를 선택하면 PVD/PACVD 코팅은 우수한 표면경도와 마찰계수를 갖는다. 따라서 초경, 세라믹 및 청동과 같은 고가의 소재를 비교적 저렴한 소재로 대체함으로써 비용 절감을 가능하게 한다.

- 출력 향상과 중량 감소: PVD/PACVD 코팅은 열악한 마찰조건과 하중이 높은 환경조건에서도 출력을 향상시켜준다. 예를 들어 WC/C 코팅을 gear wheel 에 적용할 경우 경량화 할 수 있는 동시에 높은 하중을 견딜 수 있게 해준다.

- 윤활제 및 유지보수의 필요성 경감: 지속적인 윤활상태의 유지보수는 작업 비용을 증가시킨다. 그리고 기기가 운전하는 도중 완벽한 윤활상태를 유지하지 못하는 경우도 발생할 수 있다. 이러한 경우 PVD/PACVD 코팅을 윤활유의 보조로 사용하여 보수 주기를 획기적으로 증가시킬 수 있다.

- 부식 감소: PVD/PACVD 코팅의 우수한 내부식성은 과도한 하중과 운전환경에서도 부품의 신뢰성을 확보해 준다.

- 환경 친화성: 윤활제와 첨가제는 오염을 유발할 수 있기 때문에, 유압기기의 윤활유를 대체하기 위하여 코팅의 사용이 증가하고 있다. 또한 오존층을 파괴하지 않는 대체냉매의 사용이 증가하고 있는데, 대체냉매 사용으로 마모가 문제되는 경우 PVD/PACVD 코팅을 적용하여 신뢰성을 확보할 수 있다.

- 후공정의 제거: 적절한 온도조건에서 적절한 두께로 코팅된 PVD/PACVD 코팅은 부품의 치수변경이나 조도의 증가를 가져오지 않는다. 균일한 두께의 코팅을 제공하기 때문에 제조 공차 1 μm 이내의 정밀 부품 제조 프로세스의 최종 단계로 코팅이 가능하다.

## 1.7 PVD/PACVD 코팅의 한계

PVD/PACVD 코팅을 사용 하는데 있어서 다음과 같은 경우에는 일부 제한이 있다.

- 내부식성 steel 의 대체: 코팅된 부품의 내부식 성능은 코팅종류, 소재, 운전 환경 및 표면 조도에 의해 좌우된다. PVD/PACVD 코팅으로 내부식성이 향상되지만, 코팅면에 부식을 일으키는 함유물이 포함되어 코팅 표면의 결함이 국부적인 부

식을 일으킬 수 있는데, 이러한 경우 내부식 steel 을 교체 할 수 없다.

- 건조상태에서의 연속운전: PVD/PACVD 코팅은 모든 마찰 상태에서 정밀 부품의 수명을 연장 시켜준다. 또한 비상시 윤활유가 공급되지 않는 건조상태에서 운전을 가능케 해준다. 하지만 윤활유가 공급되는 조건에 비해 마찰계수가 높기 때문에 과도한 운전하중에서 장기간 동안 윤활제를 대체할 수는 없다.

- 마지막 열처리를 저온에서 하는 소재: 부품의 최종 열처리 온도는 코팅의 선택을 제한할 수 있다. 즉 최종 열처리 공정의 온도가 코팅 온도보다 높아야 경도 손실을 피할 수 있다. PVD/PACVD 코팅은 주로 코팅종류 그리고 부품의 중량과 치수에 따라서, 250℃ 이하, 또는 500℃ 이하의 온도에서 코팅된다.

- 작동 온도: PVD/PACVD 코팅은 열응력과 고온 가스에 의한 부식으로부터 정밀 부품을 보호한다. 하지만 만약 운전온도가 허용 온도를 넘어서는 경우, 부품의 경도가 저하되고 코팅층이 파괴되어 내마모성이 감소될 것이다. 이러한 이유로, PVD/PACVD 코팅은 열 절연체를 대체하여 장기간 사용될 수 없다.

- 불리한 구조: 코팅 공정의 물리적이고 기술적인 이유로, 깊고 좁은 기공과 슬롯과 같은 형상이 있을 경우 코팅이 제한된다.

## 2. 제품에 코팅적용 시 고려사항

마모를 예방하고 싶다면 설계자는 설계 초기 단계부터 코팅적용을 검토해야 한다. 적절한 코팅이 설계초기에 반영될 때 부품 형태, 제조법, 소재 선택 및 열처리 등이 최적화되어 더욱 강력한 시스템을 구축할 수 있게 된다.

### 2.1 적절한 소재의 선택

기본적으로 PVD/PACVD 코팅을 강에 적용하는 것에는 크게 제약이 없지만 코팅이 제조의 마지막 단계이기 때문에 코팅 온도는 마지막 열처리 온도보다 낮아야 한다. 코팅을 하기 위해서 적합한 소재 선택법, 부품 설계법, 전처리법 및 보존법은 다음과 같다.

### 2.2 소재 및 코팅 가능성

#### 2.2.1 강철(Steel)

- 베어링강, 표면강화강 및 특수목적 공구강 등은 정밀부품에 사용되는 소재이다. 정밀부품에 사용되는 강과 템퍼링 온도가 낮은 강은 200℃ 이하에서 코팅할 수 있다. 대표적으로 AISI 52100 (DIN 1.3505), AISI 5114 (DIN 1.7131)가 있다.

- AISI M2(DIN 1.3343)나 HSS 와 같은 열처리강과 고온에서 템퍼링한 공구강은 코팅하는데 문제가 없지만 이보다 경도가 낮은 정밀부품에서는 코팅 적용이 쉽지 않다.

- 질화강은 화합물층(white layer)의 기공을 제거하기 위해 코팅하기 전에 표면을 재연마하거나 마이크로블라스팅과 같은 전처리를 해야한다. 가장 보편적인 질화 공정에는 가스상질화, 염욕질화 및 플라즈마질화 등이 있다. 특히 PVD/PACVD 와 같은 플라즈마 공정은 화합물층의 형성을 억제시킨다.

- 오스테나이트 강에는 모든 종류의 PVD/PACVD 코팅이 가능하다. 또한 강도가 낮은 강일지라도 부식이 일어나는 열악한 환경에서는 선택적으로 코팅을 적용한다.

- 일반적으로 기계강은 모든 종류의 PVD/PACVD 코팅이 가능하지만 강도가 낮은 기계강은 코팅을 적용해도 정밀 부품으로 흔히 사용되지는 않는다.

#### 2.2.2 주철(Cast iron)

- 주철은 온도 특성상 코팅 적용이 적합하다. 다만 코팅을 함으로써 마모 특성은 향상되지만 모재의 그라파이트가 코팅의 구조에 영향을 미친다.

#### 2.2.3 비철금속 (Nonferrous metals)

- 니켈과 티타늄 합금은 쉽게 코팅할 수 있으며 내부식이 우수하고 가벼운 제품을 위한 목적으로 사용된다.

- 구리, 마그네슘 및 알루미늄 합금은 특수한 경우에 코팅한다. 합금 선택에 있어서 시효경화(age-hardening) 조건은 중요한 요소이다. 가능한 고온에서의 시효경화가 적합하다. 비철 합금의 사용은 소재가 감당할 수 있는 부하에 따라 제한적으로 사용된다. 알루미늄 합금과 황동의 경우는 화학니켈도금을 한 이후에 코팅 적용이 가능하다.

- 크롬도금이나 니켈도금을 한 금속은 코팅이 가능하다. 전해도금막은 밀착력이 좋지 않지만 전

해도금과 PVD/PACVD 로 이중 코팅을 한 경우는 기계적인 부하가 과중하지 않은 경우에 부식과 마모 조건이 결합된 조건으로 가장 적합한 상태가 된다.

합금은 코발트 반응 억제제가 함유된 냉각 윤활제로 가공해야 한다. 기공(open pores)이 있는 초경합금은 소결 과정에서 발생하는 잔류물 때문에 코팅할 수 없다.

2.2.4 소결 소재

· 초경합금은 대체로 쉽게 코팅을 적용할 수 있지만 연마 같은 전처리 작업이 필요하다. 초경

2.2.5 기타 소재

· 전도성이 있는 세라믹이나 금속화된 세라믹스는 코팅이 가능하나 그 외에는 코팅할 수 없다.

Table 3 Coatable materials

Materials	BALINIT® C WC/C	BALINIT® DLC a-C:H	BALINIT® CNI CrN	BALINIT® D CrN	BALINIT® A TiN
<b>Steels with heat-treatment temperatures &gt; 500 °C</b>					
Heat-treatable steels	+	+	+	+	+
Cold-working steels	+	+	+	+	+
Hot-working steels	+	+	+	+	+
High-speed steels	+	+	+	+	+
Austenitic steels	+	+	+	+	+
Age-hardend steels	+	+	+	+	+
<b>Steels with heat-treatment temperatures around 200 °C</b>					
Ball- and roller-bearing steels	+	+	+	-	□
Case-hardening steels	+	+	+	-	□
Hardenable chrome steels	+	+	+	-	□
Low tempering temperature tool steels	+	+	+	-	□
<b>Other materials</b>					
General engineering steels	+	+	+	+	+
Nitrided steels (after pretreatment)	+	+	+	+	+
Cast iron	□	□	□	□	□
Chrome-plated metals	□	□	□	□	□
Nickel-plated metals	□	□	□	□	□
Nickel alloys	+	+	+	+	+
Titanium alloys	+	+	+	+	+
Copper alloys	□	□	□	□	□
Aluminium alloys	□	□	□	-	□
Cemented carbides	+	+	+	+	+
Sintered metals with open pores	-	-	-	-	-
Ceramics	□	□	□	□	□
Plastics	-	-	-	-	-

+ coatable  
 - not coatable  
 □ conditionally coatable (Inquire)



- 플라스틱은 전도성이 부족하며, 고온인 코팅 작업 조건 때문에 PVD/PACVD 코팅을 할 수가 없다.

### 2.3 소재의 경도 및 강도

하중에 대한 대응력을 소재가 갖는 것이 매우 중요한 역할을 한다. 즉 단단한 모재는 코팅을 적절히 지지해 주고, 파손을 막아준다. 그러므로 코팅을 적용하기 위해서는 부품에 가해지는 하중이 높을수록 소재의 경도도 높아야 한다. 연강의 플라즈마 질화나 표면경화는 코팅을 지지할 경계 영역(boundary zone)이 생길 수 있다. 또한 원소재의 경도 저하를 막으려면 템퍼링 온도가 코팅 온도보다 높아야 한다.

### 2.4 부품 표면 품질

부품의 내구성과 표면 상태는 코팅의 성능을 좌우한다. 우수한 품질의 코팅을 얻기 위해서는 부품이 잘 연마된 후 세척 및 운반되어야 한다.

#### 2.4.1 유의사항

- 제품은 금속 특유의 광택이 나야 한다. 광택이 없거나 부식되어 변색된 제품은 코팅할 수 없다.
- 연마된 표면에 크랙, 산화층 및 연마로 인한 버닝이 있으면 안된다.
- 연마에 사용된 냉각제에는 보론, 요오드의 화합물, 및 실리콘종류의 소포제(antiforming agent)가 함유되어 있으면 안된다.
- 연마, 광택, 폴리싱 및 래핑과 같은 후처리를 한 표면은 후처리한 후에 남아있는 잔류물이나 연마제가 제거되어야 한다.

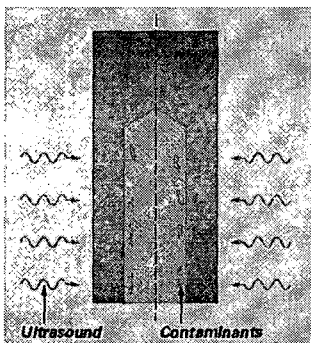


Fig. 10 Cleaning of blind holes

- 용접이나 납땀한 제품에는 용매제와 카드뮴 등이 남아 있으면 안된다.

- 깊은 홈이나 암나사에 잔류오염물질이 남아있으면 안된다. (Fig. 10)

- 제품을 깎아내고 남은 부스러기, 왁스, 접착 테이프, 페인트, 연마중 발생하는 먼지, 세척제 잔류물, 지문, 및 그 외 비금속 오염물질 등은 다 제거되어야 한다.

- 부품에 잔류 자력이 없어야 한다.

더 자세한 내용은 DIN(German Institution for Standard) guideline 4476 에 명기 되어 있으며 표면 형태에 따라 코팅할 수 있는 부품에 대해서 자세히 제시하고 있다.

- 코팅할 제품의 기능면은 평균 표면조도 Rz 로 평가된다. Rz 는 코팅두께와 비슷한 수준이어야 코팅표면의 접촉면적과의 비율이 허용 가능한 수준으로 된다. 만약 표면조도가 높다면 표면의 산이 뜯기거나 국부적인 표면하중의 증가로 부서질 수 있다.

- $R_{pk}$ (Reduced Peak Height)는 코팅표면의 접촉면적의 비율을 높이기 위해서 가능한 적어야 한다.

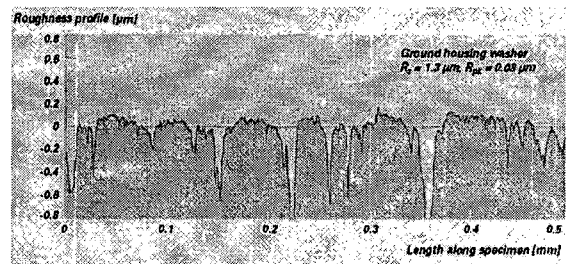


Fig. 11 Ground housing washer AISI 52100(DIN 1.3505), WC/C-coated

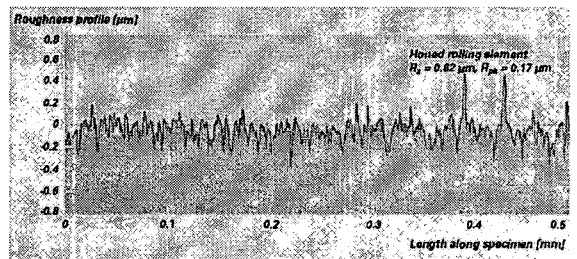


Fig. 12 Honed rolling element AISI 52100 (DIN 1.3505), WC/C-coated

## 2.5 코팅을 위한 부품의 디자인

부품의 상태와 형태가 준비, 세척, 치구 등과 조화를 이루어야 최고 품질의 코팅을 얻을 수 있다.

### 2.5.1 부품 조건

- 부품은 코팅을 위해 치구 작업이 필요하다. 치구되는 부분은 코팅이 되지 않기 때문에 사전에 확인이 되어야 한다.

- 코팅 되지 않아야 하는 표면은 기구적인 마스킹을 한다. 질화의 경우처럼 페이스트 사용을 할 수 없기 때문에, 부품 설계에서 마스킹이 허용될 수 있도록 설계해야 한다

- 나사, 접합, 프레스 합체 등의 가체결된 부품은 코팅할 수 없다. 결합이 된 표면은 세척하기 힘들고, 진공 상태에서 가스를 배출한다. 용접된 부품은 코팅 전에 잔류응력을 제거하는 풀림 처리를 해야 한다.

- 블라인드 홀은 코팅할 수는 있지만 블라이드 홀의 직경이 깊이보다 커야 한다.

### 2.5.2 외형, 치수, 중량

조건과 더불어 외형과 중량도 반드시 고려되어야 할 사항이다. 코팅의 종류에 따라 다르겠지만 중량은 3,000kg, 직경은 700 mm, 길이는 1,500 mm 까지 코팅이 가능하다.

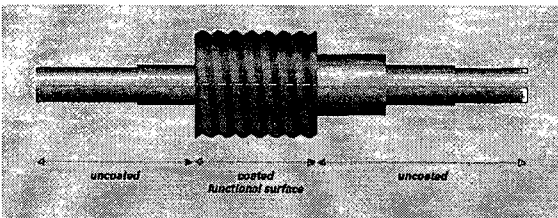


Fig. 13 A component not designed for coating

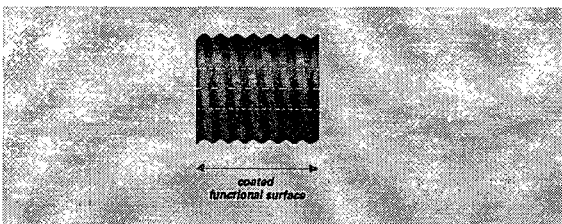


Fig. 14 A component designed for coating

운송 중에 부식이 생기는 것을 방지하기 위해서 물에 세척이 잘 되는 방청유를 사용하는 것이 좋다. 알카리 세척 공정은 오일을 깨끗이 제거할 수 있다. 하지만 칼슘 sulfonate, 보론과 요오드 합성물 및 methacrylate 계열 접착제 등이 포함되지 않아야 한다.

제조 공정에서 액상 윤활제를 사용하는 경우, 발송 전에 부품을 깨끗이 세척해야 한다. 그렇지 않으면 수분으로 경화되는 조건에서는 석회종류가 남을 수도 있다. 이러한 석회류는 화학적인 방법으로 제거될 수 없어 표면에 영구히 남는 이물질이 형성하게 된다. 외부로부터 손상을 입히지 않기 위해 적절한 포장이 필수적이다.

## 2.6 포장 및 보관