

## Magni 565 코팅 볼트의 내식성 및 토오크 특성에 대한 연구

김상수\* · 김무길 · 정병호\*\*

\*광림 C & T, \*\*부경대학교 신소재공학부 금속시스템공학과

### A Study of Corrosion Resistance and Torque in Bolt Coated with Magni 565

Sang-Soo Kim\*, Moo-Gil Kim, Byong-Ho Jung\*\*

\*Kwang Rim C & T Co.

\*\*Dept. of Metal System Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

**Abstract** Corrosion resistance and torque of M10 bolt coated with Magni 565 were investigated. Corrosion protection mechanism were also studied with the microstructure of coating film. The bolts with the optimum conditions showed around 10  $\mu\text{m}$  layer thickness, a great corrosion resistance in salt spray test and a proper torque in torque/tension test. But torque coefficient k increased with the number of bolting and clamping force of M10 bolt showed significantly lower than that of specified value 28.3kN. It was thought that the repeated bolting made the coating film peel off and powdery. The sample coated with optimum coating conditions showed more higher polarization resistance and corrosion potential than the specimens of top and base coat only. The base coating film was composed of lamellar zinc flakes, which provides a large sacrificial cathodic protection. Meanwhile, the top coating film was composed of organic aluminium pigments layer, which provides barrier protection to the corrosion circumstances.

(Received June 12, 2007; accepted July 5, 2007)

**Key words:** Corrosion resistance, Torque, Magni 565, Corrosion protection mechanism, Coating film, Optimum coating conditions, Polarization resistance, Cathodic protection. Barrier protection

## 1. 서 론

강 소지에 대한 음극방식(Cathodic protection)을 기본으로 하는 가장 경제적이고 상용화된 Zn 및 그 합금의 전기도금과 용융아연도금은 수소취성, 강도, 내식성 및 코팅 두께 문제 때문에 나사가 있는 고 강도 볼트, 너트 등에는 그 사용이 제한되는 경우가 많다. 이러한 문제점들 때문에 Zinc chromate 피막의 Dacromet 코팅[1]이 세계적으로 많이 사용되어 왔으나 최근 국제적인 환경 문제가 대두되어 EU(유럽 연합)에서는 2007년 7월부터 6% Cr 사용을 전면 금지한다고 결정 한바 있다[2]. 이에 따라 최근 수출용 국내 자동차 부품이나 웨스너(Fastener) 제품에는 Cr-free 코팅을 적용하고 있으나 기술적 수준은 초기 단계라 볼 수 있다. 10  $\mu\text{m}$  정도의 박막인 Non-chrome 코팅들 중 무기 Zinc flake를 주로 사

용하는 코팅 법들은 Geomet[3], Magni[4] 및 Delta-protekt[5] 코팅의 3가지로 크게 나눌 수 있다. 이러한 코팅 법들은 모두 Cr-free이고 매우 우수한 내식성과 사용성능을 나타내지만, 코팅 종류에 따라 코팅제의 성분이 각각 다르고 사용성능 및 코팅 층의 구조와 방식 방법도 다소 차이가 있다[6]. 이 중에서 Magni 565 코팅은 볼트, 너트 등의 웨스너 제품에 대해서는 내식성 및 사용성능이 다른 2가지 코팅보다 더 우수하여 그 사용량이 세계적으로 급증하고 있다. 또한 이 코팅은 Non-chrome의 2중 웨스너 코팅 시스템으로, 사용성능에 있어서도 높은 내식성 뿐 아니라 Topcoat에 마찰 조정제가 포함되어 있어 코팅 후 추가로 Sealing 및 윤활 처리가 필요 없고 적합한 마찰계수를 가지는 것으로 설명되고 있다[4]. 특히 GM 등 미국 자동차 3사들과 관련된 수출용 웨스너 제품 및 자동차 부품들의 코팅은 Magni

†E-mail : kss13@krct.com

565 코팅으로 지정되는 경우가 대부분이라 이와 관련된 제품이나 국내 GM 자동차의 부품 코팅에 성능이 유사한 다른 코팅으로 대체할 수는 없다. 따라서 국내에서 볼트 등의 웨스너 제품에 Magni 565 코팅하여 사용할 경우, 열처리 후의 소지 표면에 대한 적합한 전처리 및 코팅조건으로 코팅되어 코팅부에 결함이 없고 요구 규정에 적합한 사용성능을 발휘해야함은 물론이며, 특히 코팅 층 두께에 따른 내식성 및 체결시 적절한 토오크(Torque)를 나타내는 것이 실제 중요하다. 그러나 최근 국내에 도입된 Magni 코팅은 기술적인 Know-how로 인하여 코팅 층의 미세조직과 관련된 방식기구의 해석 뿐 아니라 열처리된 볼트 등의 웨스너 제품에 대한 내식성과 토오크 특성에 미치는 코팅조건 등은 국내외적으로 거의 보고되지 않고 있어 이에 대한 연구가 현실적으로 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 이전에 보고[7]된 강 판재의 Magni 565 코팅조건 중, 내식성에 미치는 영향이 큰 Base 코팅제의 점도와 Curing(건조) 온도 등의 코팅조건을 중심으로 웨스너 제품에 사용되는 M10 볼트(Bolt)에 이 코팅을 실시하여 내식성에 미치는 코팅조건과 그 영향, 그리고 코팅 층의 미세조직에 따른 방식기구를 조사하고자 하였으며, 또 토오크 값 변화에 미치는 코팅 조건의 영향과 반복 체결에 따른 토오크 계수 변화 등 Magni 565 코팅 볼트의 내식 특성 및 토오크 특성에 대한 기초적인 연구를 실시하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 사용 재료 및 코팅 전처리

코팅용 재료는 탄소(C)량이 약 0.34%의 보통 탄소강인 M10 볼트와 극연강 판재의 2 종류를 사용하였으며, 특히 토오크 시험에는 미국 Wilson-Garner사의 M10 육각볼트와 너트(Nut) 및 와셔(Washer)를 조립하여 사용하였다. 그리고 탄소 함량이 적은 극연강 판재를 사용한 이유는 Base 코팅 피막의 내식성에 미치는 탄소의 영향을 일부 가정하였기 때문이다. 한편, Magni 565의 Base 코팅제는 B06J, Top 코팅제는 B18, 그리고 점도 조정용 희석제는 방향족 나프타 솔벤트와 PMA를 각각 사용하였다. 코팅용 볼트는 무산화분위기 로에서 860°C로 1시간 유지 후 유

냉하고 350°C에서 1.5시간 템퍼링 열처리를 실시하였으며, 열처리 후의 탈지는 TCE를 사용하여 4단계 탈지 공정을 거친 후 쇼트 블라스팅(Shot Blasting)의 전처리를 실시하였다. 이 때 Steel Ball의 크기는 0.3 mm, 임펠라(Impeller)의 rpm은 2500~2600 그리고 쇼트 시간은 약 10분으로 하였다.

### 2.2 코팅 공정 및 코팅조건

전처리를 완료한 코팅용 재료들의 코팅은 첫째, Base 및 Top 코팅에 사용하는 각 코팅제의 교반과 희석에 따른 점도(Viscosity) 조정, 둘째, Dip/Spin, 그리고 Curing의 3단계 공정 순서에 따라 실시하였다. 점도는 잔 컵(Zahn-type dip cup) 간이 점도 측정기를 사용, 상온에서 Base 코팅제 B06J는 약 30분 그리고 Top 코팅제 B18은 약 15분간 교반 후 각각의 희석제를 사용하여 변화 시켰다. 코팅은 STC Auto Coater #4060을 사용하였으며, M10 볼트 및 판재 시험편에 적용한 코팅 조건은 Table 1과 같다.

### 2.3 코팅 볼트의 내식성 및 토오크 시험

코팅 볼트의 피막 두께 측정은 X-Ray 두께 측정 장치를 이용하였으며, 또 내식성 평가를 위한 염수분무 시험은 KSD 9502 규정[8]에 따라 실시하고 초기 발청 시간을 측정하였는데, 볼트의 코팅은 코팅 조건 중 Top 코팅제의 점도를 55초, Dip/Spin의 rpm 및 시간을 Table 1과 같이 일정하게 하고 Base 코팅제의 점도 및 Curing 온도 등 코팅 층의 내식성에 영향을 가장 크게 주는 조건[7]에 대해서만 적용하였다. 또 볼트의 토오크 값도 역시 Base 코팅제의 점도 및 Curing 온도만 변화시켜 측정하였으며, 시험 장치는 Fastener 전용 M960을 사용하였다. 이 때 M10 볼트에 대한 기준 축력은 GM

Table 1. Coating conditions

Coating parameter	Coating agents	
	B06J	B18
Viscosity (sec)	30, 45, 60, 75	55
Dip/Spin rpm	260	290
Dip/Spin time (sec)	15	15
Curing temperature (°C)	210, 250, 270	205, 220, 230
Curing time (min.)	25	25

9064P 규정[9]에 따라 28.3kN을 적용하였다. 또 이러한 기준 축력을 적용, 일정 코팅조건에서 코팅한 M10 볼트재 셀을 1~5회까지 반복 체결 시험을 실시하여 토오크 계수  $k$  값도 계산하였다. 특히 토오크 값 변화에 대한 원인을 알아보기 위해 부착력 시험을 실시하였는데, 부착력 시험은 표면조도를 각기 달리한 판재(탈지와 쇼트 블라스팅을 실시하지 않고 코팅 전에 미리 #100, #600, #1000의 에머리지로 일정 량 연마 후 초음파 세척함)를 이용하여 Delphi사의 Tape 부착력 시험법(Delphi D×900161)에 따라 측정하였다[10]. 이 때 표면조도는 Hommel tester T4000로 측정하였고, 중심선 표면 거칠기  $R_a$ 로 비교하였다. 한편 코팅 층의 내식성에 미치는 기초적 시험으로 코팅 판재 표면에 0.5 mm의 스크래치(Scratch)를 낸 후 96시간 염수분무 시험을 실시하여 발청 유무를 관찰하는 GMW 3359의 음극방식 인증 시험[11]을 실시하였으며, 또 코팅 형태에 따른 내식 특성을 비교해보기 위해 30°C, 3.5% NaCl의 전해질 용액에서 전기화학적 분극시험을 실시하여 부식전위( $E_{corr}$ ), 부식전류밀도( $I_{corr}$ ) 및 타펠(Tafel) 법[12]에 의한 분극저항(Polarization resistance,  $R_p$ ) 값을 측정하여 비교하였다. 이때 분극시험은 EG & G사의 273A Potentiostat/Galvanostat을 이용하였는데 상대전극은 고밀도 탄소봉, 기준전극은 감홍전극(SCE)을 사용하였으며 0.5 mV/sec의 일정 주사속도로 전위를 계속 상승시키는 동전위 분극시험을 실시하였다.

#### 2.4 코팅 단면 층 조직 및 방식기구 관찰

최적 점도의 Base 및 Top 코팅제를 이용하여 자체 제작한 다소 두꺼운 코팅 피막 층을 강제 파단하여 SEM-EDX로 단면 층의 미세조직과 구성 성분을 관찰 한 후 코팅 피막의 단면 층 모식도를 제작하였으며, 이를 근거로 Magni 565 코팅의 방식기구를 해석하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 내식성에 미치는 코팅제의 점도와 Curing 온도

Fig. 1은 Top 코팅제의 점도 55초, Base/Top 코

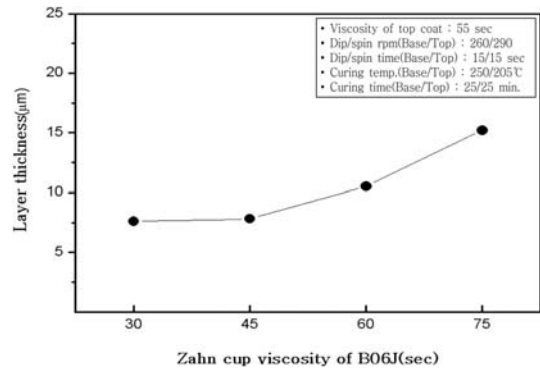


Fig. 1. Variation of layer thickness with the viscosity of coating agent B06J.

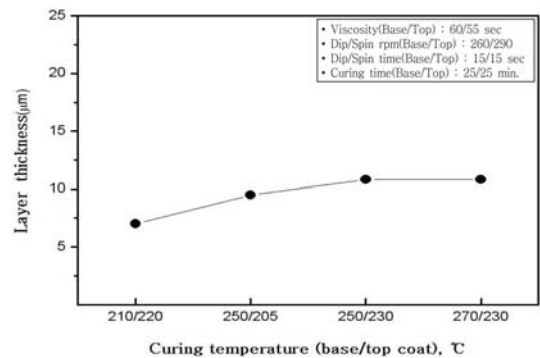


Fig. 2. Variation of layer thickness with the curing temperature of base and top coat.

팅에서 Curing 온도가 250/205°C 그리고 Dip/Spin rpm과 시간이 일정할 때, Base 코팅제의 점도에 따른 M10 볼트의 코팅 층 두께를 측정하는 것이다. Fig. 1에서와 같이 점도 증가에 따라 코팅 층의 두께는 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 45초 이하의 점도에서는 층 두께가 약 8 µm로 규정의 10~12 µm 보다 작은 부적합한 두께를 나타내고 있어 약 10 µm 근방의 적합한 두께를 나타내는 Base 코팅제의 점도는 경제성 고려시 60초가 가장 적합하였다. Fig. 2는 Base/Top 코팅에서 Curing 온도 조합에 따른 코팅 층 두께를 측정하는 것이다. 210/220°C의 온도 조합에서는 약 7 µm 이하로 매우 부적합한 두께를 나타내고 있어 10 µm 근방의 적합한 두께를 나타내는 경제성 있는 Base/Top 코팅의 Curing 온도는 250/205°C가 가장 적합하였다.

Fig. 3은 Base 코팅제의 점도에 따른 M10 볼트의 염수분무 시험에 의한 초기 발청 시간을 측정하는

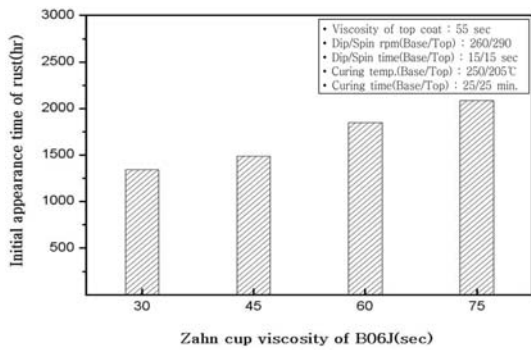


Fig. 3. Initial appearance time of rust with the viscosity of coating agent B06J.

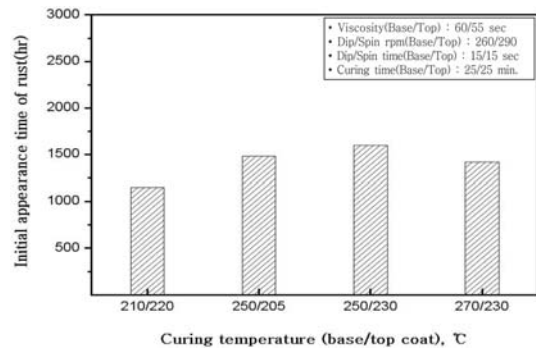


Fig. 5. Initial appearance time of rust with the curing temperature of base and top coat.



Fig. 4. Feature of initial red rust (with white rust) occurred in M10 bolts after salt spray test (SST; 1500 hour).

것이다. Base 코팅제의 점도가 증가함에 따라 초기 발청 시간은 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 초기 발청 시간은 모두 1000시간 이상으로 규정에 만족하는 우수한 내식성을 보이고 있으나 1500시간 이상의 장시간을 나타내는 Base 코팅제의 점도는 경제성 고려시 역시 60초가 가장 적합함을 알 수 있다. Fig. 4는 염수분무 시험 후 약 1500시간에서 초기 발청이 발생한 볼트를 대표적으로 나타내었다. 백청(White rust)을 포함한 적청(Red rust)이 같이 나타나 있으며 평활한 머리부에 비해 각진 나사부에 발청이 더 많이 발생되었음을 알 수 있다. 특히 백청[13]은 부식 도중에 Zinc flake가 Zn(OH)<sub>2</sub>로 변환된 부식 생성물로 ISO 9227에 의하면 염수분무 시험에서 144시간 시험 후 5% 이상의 백청이 없어

야 한다고 하였는데[11], 본 시험에서 이러한 현상은 관찰되지 않음이 확인되었다.

Fig. 5는 Base/Top 코팅에서 다른 코팅조건이 일정할 때 Curing 온도에 따른 초기 발청 시간을 나타낸 것이다. Base/Top 코팅의 Curing 온도가 210/220°C인 경우가 초기 발청 시간이 가장 짧은 1000시간 근방이고 그 외는 모두 1500시간 이상으로 비슷함을 알 수 있어 경제성 있는 Curing 온도는 250/205°C가 가장 적합함이 확인 되었다. 따라서 이상의 결과를 볼 때 염수분무 시험으로 측정된 초기 발청 시간이 1500시간 근방의 장시간이면서 경제적인 최적 코팅 조건은 Base/Top 코팅에서 Dip/Spin rpm과 시간이 260/290 및 15/15초로 각각 일정할 때, 코팅제의 점도는 60/55초, Curing 온도와 시간은 250/205°C, 25/25분임을 알 수 있으며, 염수분무 시험에 의한 내식성은 피막 층의 두께와 직접 관련되어 층 두께가 증가할수록 초기 발청 시간이 증가되어 내식성이 더 우수하게 되는 현상을 나타내었다.

### 3.2 코팅 형태에 미치는 전기화학적 내식 특성 및 방식기구

Fig. 6은 코팅 안한 강 모재의 경우(a)와 최적 코팅 조건으로 코팅한 경우(b)와의 분극곡선을 대표적으로 비교하여 나타낸 것이며, 또 Fig. 7은 코팅제의 점도 및 Curing 온도 등 코팅조건을 최적으로 하여 코팅할 경우, Top 코팅만 실시 한 경우, Base 코팅만 실시 한 경우 및 Base + Top 코팅을 실시 한 3가지 경우의 코팅 형태를 코팅 안한 경우와 더불어 각각 분극곡선을 측정하여 부식전위와 분극저항

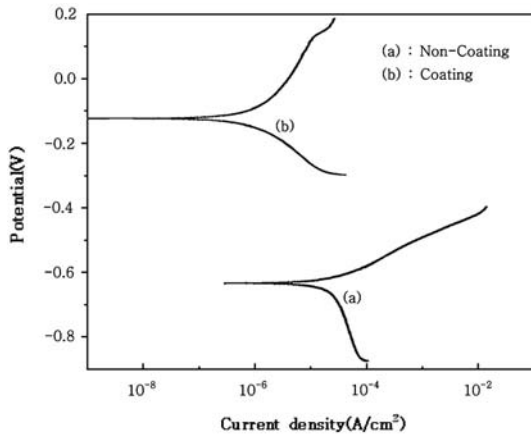


Fig. 6. Typical polarization curves for non-coated base metal specimen(a) and the specimen coated with optimal conditions (b).

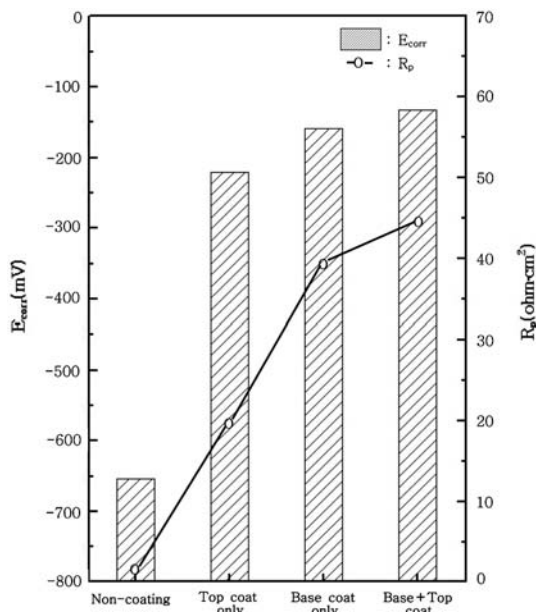
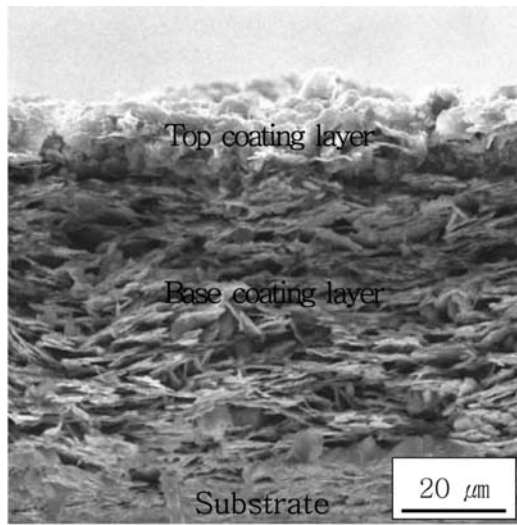


Fig. 7. Comparison of  $E_{corr}$  and  $R_p$ .

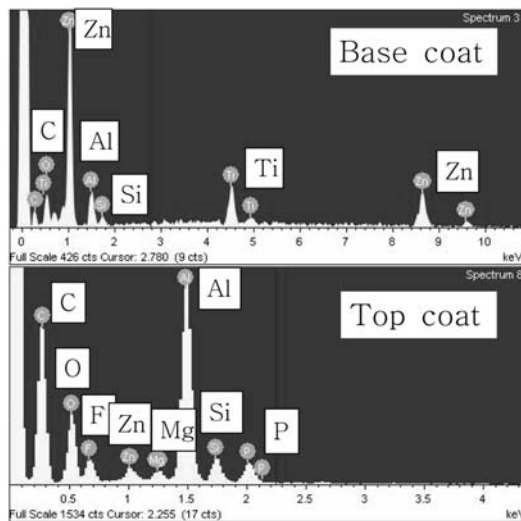
$R_p$ 를 나타낸 것이다. Fig. 6의 분극곡선들은 활성, 부동태로의 천이점이나 부식전류밀도가 일정한 부동태 구간이 없는 전형적인 형태를 잘 나타내고 있으며, 부식전위는 코팅 안한 모체에 비해 코팅한 경우의 시험편이 훨씬 귀(Noble)하고 부식전류밀도도 낮아 내식성이 훨씬 더 우수함을 보여주고 있다. 한편 Fig. 7의 코팅 형태의 변화에 따른 부식전위와 분극저항은 Base + Top 코팅한 시험편의 경우가 코팅

안한 Non-coating의 모재 시험편에 비해 부식전위가 약 5배 정도 귀한 값을 보여주고 있어 코팅에 의한 갈바닉(Galvanic) 방식의 음극방식 효과가 매우 크다고 볼 수 있다. 이와 유사하게 Top 코팅 없이 Base 코팅만 실시한 경우에도 코팅 안한 모체에 비해 부식전위가 약 4배 정도 귀한 값을 보여주고 있어 Base 층 피막 성분의 주가 되는 무기 Zinc flake의 희생적 보호에 의한 갈바닉 방식 효과가 전체 코팅 층의 방식 성능에 큰 영향을 끼친다고 볼 수 있다. 그러나 Top 코팅만 실시한 경우는 부식전위의 귀 방향으로의 상승 정도가 코팅 안한 경우에 비해 다소 적어 갈바닉 방식 효과가 3가지 코팅 형태 중 가장 작다고 볼 수 있는데, 이것은 Top 코팅 피막 성분에 Zinc flake가 없고 대신 Al 안료 등과 유기 바인더(Binder) 물질들이 많이 포함되어 있기 때문으로 생각된다[14]. 한편 코팅 형태에 따른 분극저항  $R_p$  값을 비교해보면 Base + Top 코팅을 실시한 경우가  $R_p$  값이 높아 3가지 코팅 형태 중 부식속도가 가장 낮은 것을 추정할 수 있고, 또 Base 코팅 없이 Top 코팅만 실시한 경우는  $R_p$  값이 가장 낮아 Base + Top 코팅을 실시한 경우에 비해 약 2배 정도 부식속도가 크다고 추정할 수 있다. 그러나 Base 코팅만 실시한 경우는 Top 코팅만 실시한 경우보다  $R_p$  값이 Base + Top 코팅을 실시한 경우에 더 근접하고 있어 Base 코팅이 Top 코팅보다 전체적인 방식에 더 크게 기여한다고 볼 수 있다.

Fig. 8은 강제 파단 시킨 코팅 층의 단면 조직(a)과 각 층의 구성 성분들을 EDX 분석(b)하여 나타낸 것이다. Base 층은 주로 Zinc Flake(Al Flake 일부 포함)들이 소지 표면과 평행하고 층상으로 배열된 겹층(Overlapped layer)구조[15]를 보이고 있으며, 또 소지와와의 접촉 면적이 커서 코팅체에 포함된 바인더와도 잘 결합할 수 있는 형태를 보여주고 있다. 그리고 Base 층의 금속 Flake들이 불규칙 판상 모양이라 도전성에 문제가 있는 것처럼 보이지만 겹층의 조밀 배열 구조이기 때문에 접촉 면적이 오히려 커서 도전성은 충분하다고 생각되며 또 층과 층 사이의 계면도 서로 잘 부착되어 있음을 알 수 있다. 한편, 두께가 얇은 Top 층은 Base 층의 Zn이나 Al flake들보다 크기가 훨씬 작은 구상의 Al 안료 및 기타 무기물의 입자들이 에폭시(Epoxy)계의



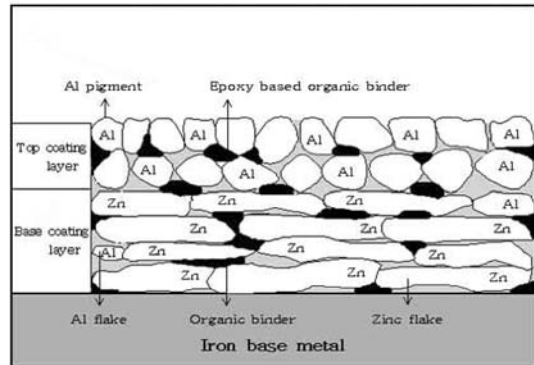
(a)



(b)

**Fig. 8** Cross section micrograph of coating film(a) and EDX results (b).

바인더[14]로 강하게 결합되어 있는 형태인데, 전형적인 층상은 아니지만 전체적으로 조밀 배열의 구조임을 알 수 있다. Fig. 9는 Fig. 8의 단면 층 관찰과 분석에 근거하여 나타낸 코팅 단면 층의 모식도이며, 이를 기초로 Magni 565 코팅의 방식기구를 설명하면 다음과 같다. 즉, 코팅 층의 대부분을 차지하는 Base 층의 Zn 및 Al flake들이 Fe 소지의 모체에 대해 희생양극(Sacrificial anode)으로 작용하



**Fig. 9.** Schematic cross section morphology showing the corrosion protective system of Magni 565 coating film.

여 음극방식을 주로 제공(음극방식은 GMW 3359의 인증 시험으로 확인하였음)하고 또 층상 배열 구조에 의한 장벽효과를 동시에 겸비한 방식 구조라 할 수 있으며, Top 코팅 층은 Al 안료 등이 바인더로 강하게 결합되어 주로 외부의 부식 환경(물/이온 및 자외선 등)에 대한 저항이 큰 장벽방식(Barrier protection) 효과를 제공하는 2중 코팅 시스템으로 설명할 수 있다.

### 3.3 토오크에 미치는 코팅제의 점도와 Curing 온도

Fig. 10의 a 및 b는 다른 코팅 조건이 최적으로 일정할 때 Base 코팅제의 점도 및 Curing 온도에 따른 M10 볼트제의 토오크를 측정하여 각각 나타낸 것이다. Fig. 10의 a에서와 같이 Base 코팅제의 점도 증가로 토오크는 증가하는 경향으로, 점도 30초에서는 약 43.9~46.3로 다소 낮은 값을 보여주고 있다. 그리고 최적 점도인 60초에서는 약 47~52.6으로 M10 코팅 볼트제의 설정 목표 48(GM 규정 [9]에서 Magni 565 코팅한 M10 볼트제의 토오크 값 기준 범위는  $48 \pm 8$ 이며 목표는 48)에 가장 유사하여 토오크가 가장 안정됨을 알 수 있다. 그러나 점도가 75초로 증가한 경우는 토오크 값이 60 이상이 되어 그 값이 기준 범위보다 높을 뿐 아니라 또 설정 축력 28.3 kN에 미치지 못하고 15 kN의 축력에서 토오크가 측정되는 현상이 나타났다. 이러한 이유는 코팅제의 점도 증가로 피막 두께가 증가되어 토오크 시험에서 피막 층 일부가 탈락되거나 분말화

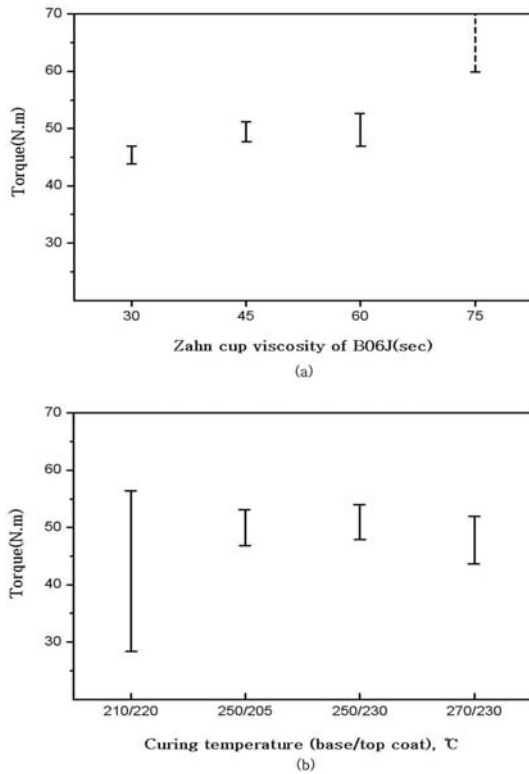


Fig. 10. Torque values of M10 bolts coated with the viscosity of B06J (a) and curing temperature (b).

되었기 때문으로 생각된다. 즉 코팅제의 점도가 높아 층 두께가 증가되면 내식성 상승에는 크게 기여할 수 있지만 피막을 구성하는 물질의 특성에 의해 피막의 탈락이나 분말화가 발생하여 볼트의 축력을 감소시킬 가능성이 있는 것으로 생각된다. 한편, Fig. 10의 b)에서와 같이 Base/Top 코팅의 Curing 온도 조합에 따른 토오크는 250/205°C일 때 약 47~53으로 설정 목표에 가장 유사하여 최적의 Curing 조건이 됨을 알 수 있다. 그러나 Base/Top 코팅의 Curing 온도 조합이 210/220°C인 경우는 토오크 값이 약 28.4~56.3으로 편차가 커서 기준 범위에서 많이 벗어남을 알 수 있다. 이러한 이유는 Base 코팅시의 Curing 온도가 210°C로 상당히 낮아 가교밀도(Cross linking density)[16]가 낮은 부적합한 코팅 피막이 형성되고 이에 따라 피막의 탈락이나 분말화 현상이 더 증가하기 때문으로 생각된다. 따라서 이러한 현상이 코팅의 부착력과 관계되는 것으로 생각되어 모재 표면조도에 따른 부착력을 측정하여 보

았다. 그림으로 나타내지는 않았지만 쇼트 블라스팅 한 상태 그대로(As shot)를 포함하여 표면조도 Ra가 각기 다른 판재 시험편에 최적 코팅 조건으로 코팅한 후 부착력 시험을 실시하여 부착력 등급을 조사한 결과, Ra는 0.13~0.21로 표면이 가장 평활한 경우에만 부착력이 약간 저하된 C 등급이 나타났으며, 그 외는 Ra 값의 범위(1.49~0.22)에 크게 관계없이 피막의 박리가 약 1% 미만인 A 및 B 등급(합격; A~D, 불합격; E~F 등급)으로, 평균 B 이상의 우수한 부착력을 나타내어 토오크 값을 낮추는 확실한 이유로 볼 수 없음이 확인되었다. 즉, 토오크 시험시 쉽게 나타나는 피막의 탈락이나 분말화 현상은 Magni 565 코팅 피막의 성분 자체가 보유한 특성으로 추정되었는데, 이에 대한 연구는 추후 상세히 연구되어야 할 것으로 생각된다.

### 3.4 토오크 계수에 미치는 체결 횟수의 영향

DIN 946 규정에 의한 Magni 565 코팅 피막의 마찰계수( $\mu$ )는 0.14~0.18인데[5], 이 값을 M10 볼트의 토오크 계수  $k$ 로 환산하면 약 0.15~0.19로,  $\mu$ 와  $k$ 는 서로 정성적인 비교가 가능하다. 볼트의  $k$  값은  $k = T/(d \times N)$  식[17]으로 구하는데, 여기서  $T$ 는 토오크(N.m)로 너트를 체결하기 위한 모우먼트,  $N$ 은 볼트의 축력(kg) 그리고  $d$ 는 볼트나사 외경의 기준 치수(mm)이다. 볼트의 조임 축력은 너트를 조임 할 때의 토오크, 즉 회전 모우먼트에 의해 결정되므로  $k$ 는 볼트 체결(Bolting)에서 소정의 축력 확보를 위한 중요한 요소이다. Table 2는 1~5회 반복 체결 시험한 코팅된 M10 볼트의 토오크 계수  $k$ 를 실제 측정된 축력으로 계산한 것이다.

Table 2)에서와 같이 토오크 값은 기준 범위에 대부분 속하나 계산된 토오크 계수  $k$ 는 약 0.25~0.34 범위로 그 값이 상당히 높음을 알 수 있다. 이것은 토오크 값 측정 시 설정 축력 28.3 kN에 훨씬 못 미치는 15 kN으로 측정되었기 때문이다. 이러한 문제는 볼트의 체결을 반복할 경우에 마찰계수가 증가되어 적정 범위를 벗어나는 문제로 이어질 수 있다. 즉, 볼트의 체결 반복에 의해 코팅 피막의 일부가 탈락되어 피막 가루(Powder)와 칩(Chip) 등이 생기고 이것이 체결 공간에 잔존, 접합면을 슬립(Slip)시켜 그 다음의 체결에서 마찰계수를 증가시키

**Table 2.** Torque coefficient k, calculated

Repeat no. of bolting	Torque(N.m)	k
1	49.2	0.328
2	37.1	0.247
3	47.7	0.318
4	50.2	0.334
5	51.0	0.340

게 된다. 특히 이러한 축력의 부족 현상은 볼트와 너트 사이의 유극(Clearance) 현상에 의해 부재간의 접합강도를 약하게 하여 접합면이 전단되는 현상이 발생할 수 있으므로 주의가 필요하다고 생각된다.

#### 4. 결 론

Magni 565 코팅한 M10 볼트의 내식성과 토오크 특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 코팅 층 두께가 10  $\mu\text{m}$  근방이며 초기 발청 시간이 1500시간 근방의 최적 코팅 조건은 Base/Top 코팅에서 Zahn cup 점도로 각각 60/55초 이었고, Dip/spin rpm 및 시간은 각각 260/290와 15/15초 그리고 Curing 온도와 시간은 각각 250/205°C, 25/25분 이었다.

2. 최적 코팅조건에서 볼트의 토오크는 기준 범위에 적합한 값을 나타내었다. 그러나 반복 체결의 횟수가 증가함에 따라 토오크 계수 k는 증가되었으며 축력은 규정치 28.3 kN의 값에 크게 미달되었다. 이것은 반복 체결에 의한 코팅 피막의 탈락과 분말화 현상 때문이었다.

3. 3.5% NaCl에서의 양극분극시험 결과, 최적 조건으로 코팅한 Base + Top 코팅 시험편의 분극저항 및 부식전위는 Top 또는 Base 코팅만 한 시험편의 경우보다 더 높게 나타났다.

4. 코팅 층은 주로 무기 Zinc flake들이 층상으로 배열된 Base 층과 외부 부식인자에 대한 장벽방식 역할을 하는 유기 Al 안료의 Top 층으로 구성된 2중 코팅 시스템이었으며, Base 층의 희생적 음극방식 효과는 매우 컸다.

#### 참고문헌

1. 한국 다크로 공업회 : 다크로(Dacro) 처리 핸드 북, 아연말 화성피막처리 1월 (1996).
2. Michael Wyrostek and Paul Wynn : Driving away from hex chrome coatings, Metal Finishing, April (2006) 1-3.
3. Metal coatings international, Inc. : Geomet coating, A completely chromium-free coating, Chardon, Ohio USA.
4. The Magni Group, Inc. : Magni 500 series, High-performance fastener/hose clamp coatings, Magni 565.
5. Knut Westphal, Hermann Köhler; Chromatfreie Korrosionsschutzsysteme für Verbindungselemente, Korrosionsschutz am Automobil, 29/30, Sept. (2003).
6. Anochrome Ltd. : Design guide, Surface finishing technology, May (2001) 1-19.
7. S. S. Kim, M. G. Kim, B. H. Jung and M. J. Moon : J. Kor. Soc. Heat Treatment, **19** (2006) 203-204.
8. 한국 공업 표준 협회 : KS 핸드북, 86-87, 철강 (1986) 192.
9. General Motors Engineering Standard : GM 9064P, Torque tension test, Octo. (1989).
10. Magni applicator : Tape adhesion test guider, Delphi D×900161
11. GM : Non-electrolytically applied zinc rich coating, GMW 3359, Octo. (2004) 2.
12. Denny A. Jones : Principles and prevention of corrosion, MacMillian Pub., (1996) 143-145.
13. GalvInfoNote. 7 : Protecting galvanized steel sheet products from storage stain, Aug. (2003) 2.
14. Magni Industries, Inc. : Material safety data sheet of B06J and B18 (2004).
15. Michel Lonca, Dacral SA. : Corrosion protection, Dacratizing-an effective protection against corrosion, Sept. (1990) 35.
16. S. J. Park, J. S. Kim and C. W. Nah : Elastomer, **35** (2000) 98-105.
17. Ford Motor Company : Worldwide fastener standard WZ 101, Steel metric threaded fastener torque/clamping force performance (2002) 2.