

Fusion Bonded Epoxy와 철근 콘크리트의 부착 응력에 있어서 Fe_2O_3 와 Fumed Silica가 미치는 영향

박 재 홍 · 신 영 조[†]

부산대학교 고분자공학과

(1996년 8월 26일 접수)

Effect of Fe_2O_3 and Fumed Silica in Bond Strength between Fusion Bonded Epoxy and Reinforcing Steel Bar Concrete

Jae-Hong Park and Young-Jo Shin[†]

Department of Polymer Science and Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Received August 26, 1996)

요 약: 철근 콘크리트 구조물에 철근의 방청을 위한 한 방법으로 fusion bonded epoxy coating (ASTM A775M)을 하므로써 철근 콘크리트 구조물의 부식 방지를 하여 수명을 향상시키는 방법이 세계적으로 사용되고 있는데 이 방법은 방청성, 내약품성, 기계적 물성 등은 우수하나 매끄러운 에폭시 도막으로 인하여 콘크리트와의 부착성능이 맨 철근에 비해 80~88% (에폭시 도막 두께 180~300 μm) 정도로 떨어지므로 Fe_2O_3 와 fumed silica를 에폭시 도료에 도입하여 부착성능 실험을 하였을 시에 부착성능이 크게 향상되었다.

ABSTRACT: Fusion bonded epoxy powder coating (ASTM A775M) is widely used in protection of reinforcing steel bar embedded in concrete to improve durability of concrete structures. Epoxy coating for rebar has excellent corrosion-resistance, chemical-resistance and mechanical properties but the bond strength between cured epoxy film and concrete decrease severely with increasing film thickness. Fe_2O_3 , fumed silica, that are, cement components, were introduced in formula of epoxy coating and bond strength behaviors were investigated. The result is bond strength between cured epoxy film and concrete is increased dramatically upto 99% specially in fumed silica.

Keywords: epoxy, fumed silica, Fe_2O_3 , bond strength.

서 론

대형 건축 구조물에 철근 콘크리트가 일반적으로 사용되고 있는데 철근 콘크리트 구조물의 주성분인 세멘트는 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 로 이루어져 있으며 수화 반응에 의해 세멘트 양의 약 1/3이 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 되며 이 때문에 콘크리트가 pH 12~13 정도의 강알칼리성을 나타낸다.

콘크리트 내부에 묻혀 있는 철근은 강알칼리성 때

문에 부식으로부터 보호되다가 콘크리트가 계속적으로 공기에 노출되면 공기 중 수분과 CO_2 의 침투로 인해 CaCO_3 가 생성되면서 콘크리트의 pH가 8.5~10 정도로 떨어지는데 이것을 중성화 (탄산화)라 한다. 중성화됨에 따라 미세한 균열이 발생하는데 이로 인해 철근의 부식이 시작되고 철근의 부식이 진행됨에 따라 철근과 콘크리트 계면 사이에서 균열이 일어나고 철근의 부식속도는 촉진되어 콘크리트의 균열이 커져서 붕괴의 위험에 이르게 된다.⁴⁻⁷

철근 콘크리트 구조물에 철근의 과도한 부식 진행을 방지하는 방법으로서 현재로는 시공 작업조건에서 편의성, 내구성, 가격과 성능면에서 에폭시 수지 분체 도료를 철근에 도장하여 부식 억제하는 방법이 가장 주목을 받고 있다.¹⁻³

미국과 캐나다 등에서는 에폭시 도막 철근의 성능을 인정받아 ASTM A775M에 규격이 1981년에 제정되어 널리 사용되고 있으며 점차적으로 중동, 일본, 유럽 등지에도 확산되고 한국에서도 이미 도입되어 서해대교, 영종대교 등에 사용되기 시작했다.

그러나 에폭시 코팅 철근은 방청성, 내 약품성, 내 충격성 등 콘크리트에 매설시 기본적인 물성은 만족하나 도막 두께에 따라서 맨 철근에 비해 콘크리트와의 부착성이 저하되는 결점이 있다.

본 연구는 에폭시 코팅 철근의 결점인 콘크리트와의 부착성을 향상시키기 위해 우선 일반적으로 사용되는 포틀랜드 세멘트의 성분을 조사하였다. 포틀랜드 세멘트는 세멘트 종류별로 약간의 성분 조성의 차이는 있으나 주성분은 CaO 가 59~67%, SiO_2 가 16~26%, Al_2O_3 가 4~8%, Fe_2O_3 가 2~5%로 구성되어 있는데 이 성분들을 원료 mill에서 분쇄하여 혼합하고 이를 소성 회전로(약 1400~1500 °C)에서 소성함으로써 세멘트의 반제품인 clinker를 제조하고 여기에 3~4% 석고를 첨가하여 세멘트가 제조된다.⁷

세멘트의 성분 중 도료용 원료로서 많이 사용되고 있는 Fe_2O_3 와 fumed SiO_2 를 각각 에폭시 도료에 첨가하여 도료를 제조한 뒤 철근에 도장하고 콘크리트에 매설하여 양생시킨 뒤 맨 철근에 비해 콘크리트와의 부착 거동의 차이를 고찰하고자 한다.

실 험

시 료. 에폭시 수지는 당량이 1700~1900인 국도 화학 YD017을 사용하였고 백색안료로서는 DuPont의 TiO_2 R960 grade, 녹색안료는 Bayer chrome oxide Green GX grade를 사용하였다.

개질제로서는 독일 Bayer사의 Fe_2O_3 130M, 독일 Degussa의 fumed silica인 Aerosil R972를 사용하였고 경화제와 촉진제는 스위스 CiBA-Geigy의 substituted dicyandiamide인 HT2844 (substituted DICY), 독일 BASF의 2-methylimidazole(2-MIDZ)

Table 1. Formula of Powder Coating Based on Epoxy Resin

epoxy coatings components	A	B	C	D	E	F	G
epoxy resin	80.7	80.7	80.7	79.1	80.7	80.7	80.7
substituted dicy (경화제)	9.1	9.1	9.1	8.8	9.1	9.1	9.1
2-MIDZ (촉진제)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
$BaSO_4$	3.1	6.1	3.1	-	2.1	1.1	0.1
Fe_2O_3	-	2	5	10	-	-	-
fumed silica	-	-	-	-	1	2	3
TiO_2	3	-	-	-	3	3	3
chrome oxide green	2	-	-	-	2	2	2
flow additive	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
	100	100	100	100	100	100	100

을 각각 사용하였다.

에폭시 수지 분체 도료의 제조. 19 mm 철근에 코팅하기 위한 에폭시 분체 도료의 배합비를 Table 1에 나타내었다. Table 1의 조성에서 보면 A는 개질제를 전혀 함유하지 않았으며 B, C, D는 개질제가 Fe_2O_3 로서 각각 2%, 5%, 10%를 함유하고 있으며, E, F, G는 개질제가 fumed silica로서 매우 fluffy한 물질이라 1%, 2%, 3%까지는 첨가할 수 있었으나 그 이상은 extruder에 투입하기가 거의 불가능하였다.

각 배합비의 원료들을 고속 혼합기에서 약 5분 정도로 균일하게 혼합한 후에 extruder에 일정한 속도로 투입하는데 이때의 extruder의 가공 온도는 100~110 °C이고 screw 속도는 300 rpm 정도이다. Extruder를 통과한 용융 물질은 squeeze roller에서 편상으로 만들어진 후 냉각 벨트위에서 급속히 냉각되고 chip 두께가 2 mm 이하, 크기가 10 mm 이하 정도로 조분쇄된 뒤 미분쇄기에서 평균 입자 크기가 63~65 μm 가 되도록 제조되었다.

상기와 같이 제조된 분체도료를 가지고 Gema사의 정전 도장 건을 이용하여 19 mm 철근에 shot blast로써 표면 조도가 50~100 μm 가 되도록 처리하고 철근의 표면 온도를 200 °C까지 예열하여 도장한 뒤 3분간 예열된 철근의 잠열로 경화시키고 물로 급냉시켰으며 이때 경화된 에폭시의 도막 두께는 220~260 μm 이었다.

콘크리트와의 부착성 확인. 콘크리트와의 부착성을 확인하기 위해서는 KSD 3629와 JIS 기준을 토대로

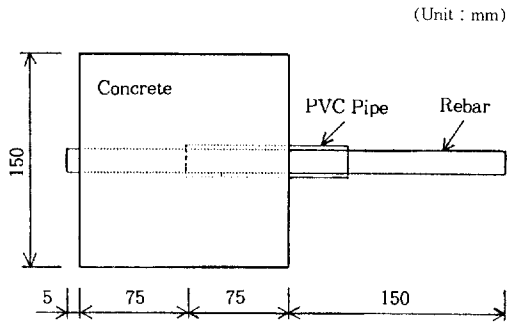


Figure 1. Dimension of concrete prism.

한 것으로서 D19 철근을 사용하였으며 그 길이는 인장 시험기의 grip 및 보조 프레임 조건을 고려하여 32 cm로 절단하여 사용하였다.

본 실험에서는 $15 \times 15 \times 15$ cm의 입방형 공시체를 1시험당 3개를 제작하였으며 자유단측의 돌출길이는 5 mm로 하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 내경 22 mm의 PVC pipe를 10 cm로 절단하여 공시체의 부하단측 쪽에 설치하여 실제 콘크리트와 철근과의 부착길이를 75 mm로 하였다. 형틀은 금속체 형틀을 사용하였으며 콘크리트 타설 전에 형틀에 윤활유를 얇게 도포하였으며 철근의 장착시 철근에 윤활유가 묻지 않도록 주의해야 한다.

19 mm 에폭시 코팅 철근을 압축강도 280 ± 30 kg/cm²의 콘크리트 속에 매설한 뒤 2일째 형틀을 제거하고 그 후 28일 동안 20 ± 3 °C의 수중에서 양생하였다.

인장시험 방법은 MTS 만능시험기 (Fig. 2)를 이용하였으며 인장속도는 1.0 mm/min으로 하였다. 다이얼 게이지는 0.001 mm 눈금의 전기식 다이얼 게이지를 사용하였고 눈금은 5초 간격으로 측정을 하였으며 slip이 0.04 mm가 되었을 때의 하중을 측정한다.

결과 및 고찰

개질제의 종류 및 양에 따른 물성 변화. Maag & Schenk gel time 측정기를 이용하여 DIN 55990 시험 방법에 따라 180 °C에서 gel time을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 3에 도시하였다.

Fig. 3과 같이 개질제의 양이 증가할수록 반응 속도는 늦어지고 특히 fumed silica는 적은 양에서도

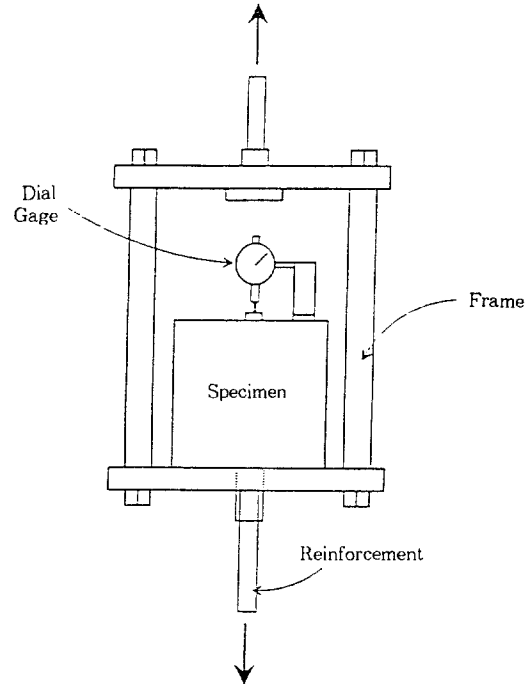


Figure 2. MTS tensile strength tester.

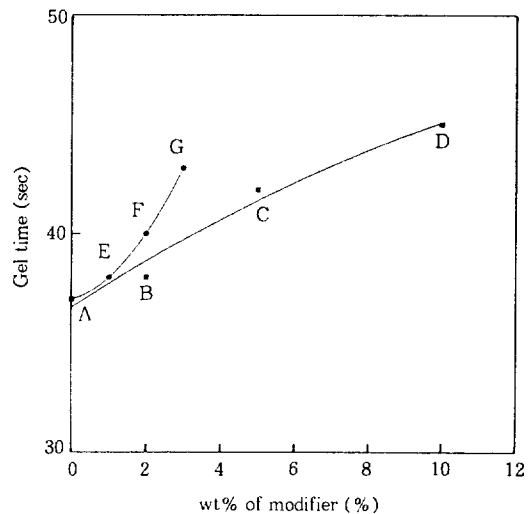


Figure 3. Plot of effects of gel time according to quantities and kinds of modifier.

반응 속도가 늦어지는데 이것은 부피분율이 커지기 때문에 상대적으로 수지의 부피분율이 작아져서 반응 속도가 늦어지는 것으로 판단된다. 내충격성은 DIN

Table 2. Impact Test According to Quantities and Kinds of Modifier

epoxy coatings	impact test(kg·cm)
A	280
B	250
C	240
D	210
E	280
F	270
G	250

55669와 ASTM D294에 의해 독일 BYK사의 충격 시험기를 사용하였으며 Table 2와 같은 결과를 얻었다. Table 2에서 충격강도의 크기는 $A=E>F>G=B>C>D$ 의 순으로 나타났으며 Fig. 4와 Fig. 5를 이용해서 toughness 면적의 크기를 보면 $E>G>F \geq A>B \geq C>D$ 와 같은 순으로 실제 S-S curve와 BYK사 충격시험기에 의한 충격 시험결과가 거의 유사하였다. 이 결과에서 보면 개질제를 첨가하지 않은 에폭시와 fumed silica로서 1% 첨가한 도막의 충격성이 280 kg·cm로서 최대의 값을 나타내고 개질제의 첨가량이 증가할수록 도막의 packing density의 증가로 인해 충격성은 떨어지는데 Fe_2O_3 의 충격성이 fumed silica보다 떨어지는 것은 Fe_2O_3 자체의 딱딱한 금속성질 때문인 것으로 여겨진다.

개질제의 양에 따른 인장강도의 실험결과를 Fig. 4에 나타내었는데 fumed silica는 소량을 첨가하더라도 Fe_2O_3 에 비해 인장강도가 크게 증가하는데 그 이유는 fumed silica는 첨가량이 적어도 진비중 (2.2)이 Fe_2O_3 에 비해 훨씬 적으므로 에폭시 도막내에서 균일하게 분산되어서 충전제의 파괴분율이 증가하게 된다. 따라서 에폭시 도막내에서 packing density가 커져서 인장강도가 증가하는 것으로 보이며 Fe_2O_3 의 경우는 첨가량에 따라서 인장강도가 증가하지만 기울기가 완만한 것은 진비중 (5.2)이 커서 에폭시 도막내에 Fe_2O_3 의 파괴분율의 증가가 작으므로 인해서 packing density의 증가가 적기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 5에 나타난 파단신율을 보면 개질제의 첨가량에 따라서 파단신율이 저하되는데 이것은 역시 도막내에 골고루 분산되어 있는 개질제의 packing density에 영향을 받은 것으로 보이며 Fe_2O_3 가 fumed

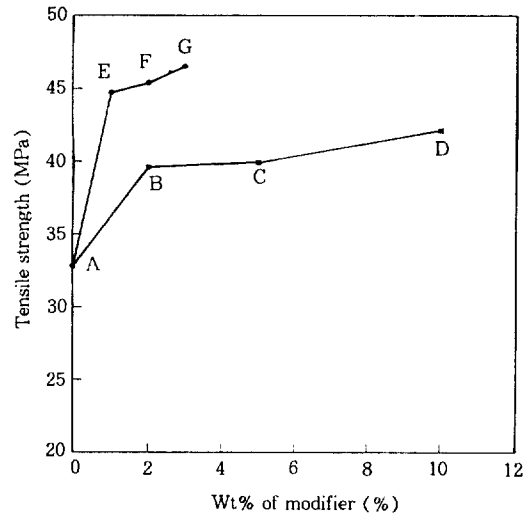


Figure 4. Tensile strength according to quantities and kinds of modifier.

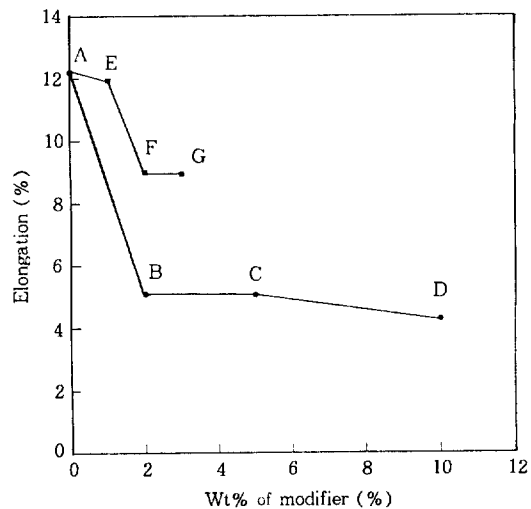


Figure 5. Elongation at break according to quantities and kinds of modifier.

silica보다 파단 신율이 낮은 것은 packing density의 영향외에 Fe_2O_3 자체의 딱딱한 금속성질 때문인 것으로 생각된다. 내 약품성 실험결과를 Table 3에 나타내었는데 내산성은 5% COOH , 내알칼리성은 5% NaOH 에 각각 360시간 동안 침적한 뒤 꺼내어서 실온에서 건조시킨 뒤 도막의 박리 또는 blister의 여부를 육안으로 관찰하였다. Table 3과 같이 A, B, C,

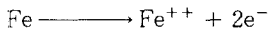
Table 3. Chemical Resistance Tests According to Quantities and Kinds of Modifiers

chemicals	epoxy coatings	A	B	C	D	E	F	G
5% CH ₃ COOH, 360 hrs, 25 °C		unchanged	unchanged	unchanged	unchanged	unchanged	unchanged	unchanged
5% NaOH, 360 hrs, 25 °C		"	"	"	"	"	"	"

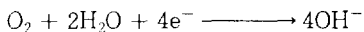
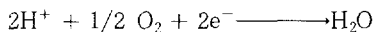
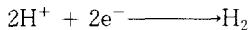
D, E, F, G 시편이 모두 내산성, 내알칼리성이 침해를 받지 않은 것으로 확인되어 개질제의 종류 및 첨가량에 따른 영향은 없었다.

부식촉진실험은 시편의 도막위에 0.6 mm 구멍을 소지 표면이 약간 파이도록 만든 후에 온도 65 ± 2 °C, 3% NaCl 용액에, 1.5 V 전위차, 48시간 동안 침적한 뒤 실온에 1시간 방치한 후 칼로써 도막 일부분을 박리시켰을 때 박리되는 부위의 크기를 조사하여 Fig. 6에 나타내었다. 철의 부식은 전기화학적으로 발생하며 용액상에서의 철의 부식 mechanism은 아래와 같다.

○ 양극



○ 음극



전해질, 산소, 물이 부식인자로서 존재한 가운데 양극에서 발생한 Fe^{++} 와 음극에서 발생하는 OH^{-} 가 결합하여 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 로 되어 철의 양극표면에 침강하게 된다. 여기에 사용된 fumed silica는 소수성이므로 물과 친화력이 없기 때문에 소량 첨가해도 방청성이 증가하고, 첨가량이 증가할수록 방청성이 저하하는 이유는 소지와와 부착성능이 저하되기 때문이다.

Fe_2O_3 는 철의 표면에 산화철의 얇은 막이 형성된 역할과 동일한 역할을 하여 철을 부동태화 시켜 주기 때문에 방청성이 증가된다. Fe_2O_3 첨가량이 10%에 이르면 미첨가 에폭시와 거의 동일한 수준에 이르게 되는데 이것은 Fe_2O_3 의 양이 에폭시 도막내에 많아지면 양극(0.6 mm 구멍부분)에서 산소와 반응하여 부식이 촉진되어지기 때문이다.

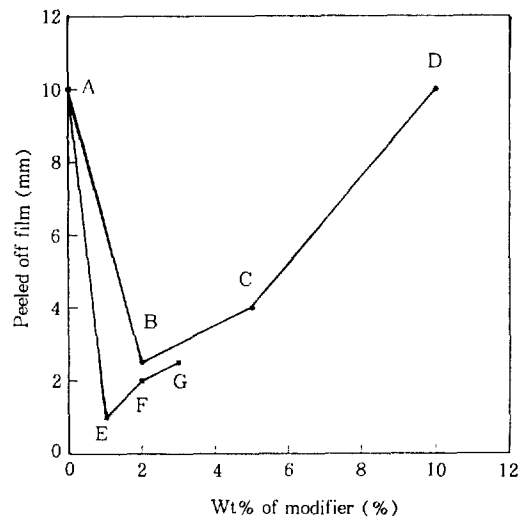


Figure 6. Anti-corrosion test according to quantities and kinds of modifier.

Fig. 7에서는 DSC로서 개질제의 종류 및 첨가량에 따른 경화된 에폭시 도막의 T_g 를 관찰하였다. Fumed silica는 첨가량이 2%까지는 도막내에서 packing density가 소량 증가하더라도 수지와 경화제의 양이 적어짐에 따라 가교밀도가 낮아져 T_g 가 조금 감소하다가 첨가량이 3%일 때에는 에폭시 도막내에서 packing density가 커져서 T_g 가 상승하는 것을 볼 수가 있다. 그러나 Fe_2O_3 의 경우는 비중이 커서 도막내 packing density의 소량증가가 있더라도 이것이 T_g 에 미치는 영향보다 수지와 경화제의 가교밀도저하에 따른 T_g 의 감소의 영향이 더 크기 때문에 T_g 가 감소하는 것으로 판단된다.

콘크리트와의 부착성. Table 4와 같이 이론치가 280 kg/cm^2 인 압축강도의 콘크리트를 배합해서 28일 양생 후의 압축 강도 시험결과를 압축강도 280 kg/m^2 를 약간 상회하는 평균압축강도 342 kg/m^2

Fusion Bonded Epoxy와 철근 콘크리트의 부착 용력에 있어서 Fe_2O_3 와 Fumed Silica가 미치는 영향

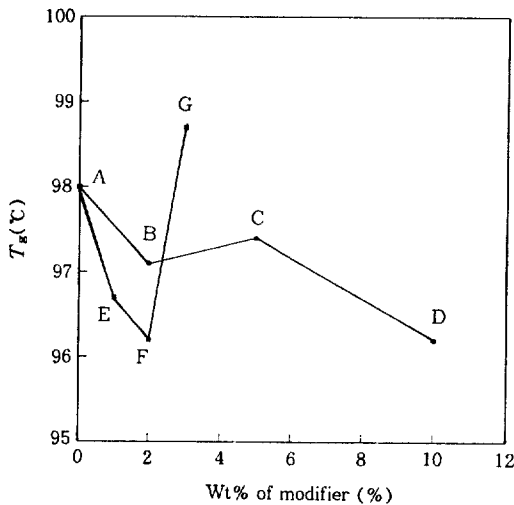


Figure 7. T_g of cured epoxy film according to quantities and kinds of modifier.

Table 4. Formula of 280 kg/cm^2 Compressive Strength Concrete

compressive strength	water/cement	coarse aggregate (kg/m ³)	fine aggregate (kg/m ³)	cement (kg/m ³)	admixture (kg/m ³)
280	0.41	986.7	763.1	451	4.51

로 나타났다. 부착용력의 계산은 KSD 3629에 따라 다음과 같은 방법으로 계산하였다.

$$\tau = 0.222 \times \alpha \times P$$

여기서, τ : 부착 용력 (kg/m^2)

P : 인장하중

α : 콘크리트 압축강도에 대한 보정계수 $\alpha = \frac{300}{\sigma_0}$

σ_0 : 동시에 제작된 원형 공시체의 양생 28 일 후 압축강도

KSD 3629에 따르면 에폭시 도막 두께를 $130 \sim 230 \mu\text{m}$ 로 제안하고 있고 ASTM A775에는 도막 두께를 $180 \sim 300 \mu\text{m}$ 으로 규정하고 있는데 실험에 사용된 에폭시 도막 두께는 $220 \sim 260 \mu\text{m}$ 이며 도막 두께 편차가 적어서 도막 두께에 따른 부착 용력의 편차를 극소화할 수 있었다. Table 5에 부착 용력의 측

Table 5. Bond Strength According to Quantities and Kinds of Modifier

specimen	max. load (kg)	bond strength (kg/cm ²)	average bond strength	bond strength ratio (%) (coated bar/uncoated bar)
uncoated bar	12978	211.9		
	11154	182.1	193.7	100
	11453	187		
	10057.1	165		
A	10221.9	167.7	169.6	87.6
	10730	176		
	9970	162.8		
	10098	164.8	159.8	83.4
B	9301	151.8		
	11364	185.5		
	11555	188.6	184.2	95.1
	10941	178.6		
D	9389.5	182.5		
	8307.6	161.5	172	88.8
	10848.2	178		
	11198.4	183.7	175.6	90.7
E	10063.9	165.1		
	9190.4	178.6		
	8504.5	165.3	178.6	92.2
	9866.3	191.8		
F	12076	187.1		
	10080	164.5	191.7	99
	11404	186.2		

정치를 기록하였으며 기록된 측정결과를 알기 쉽게 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 보면 fumed silica로서 개질한 도막은 콘크리트와의 부착 용력이 개질제의 첨가량에 따라서 부착 용력이 증가하고 특히 3%의 첨가량에서는 부착용력이 거의 맨 철근의 부착 용력에 도달하는 값을 보인다. 이것은 Table 6에서 보듯이 개질제의 양과 종류에 따른 에폭시 도막조도는 차이가 없고 약 $1.3 \mu\text{m}$ 로 너무 작기 때문에 콘크리트와의 부착용력에 영향을 미치지 못하고 fumed silica가 비중이 2.2정도로 작기 때문에 에폭시 도막 내에서 packing density를 증가시켜서 콘크리트와 fumed silica와의 접촉 면적을 증가시키고 또한 콘크리트와 유사 성분이라서 친화력 때문에 부착이 증대되는 것으로 생각된다.

Fe_2O_3 는 비중이 5.2정도로 크고 extruder내에서 가공될 때 분산이 잘 되므로 에폭시 도막에 균일하게

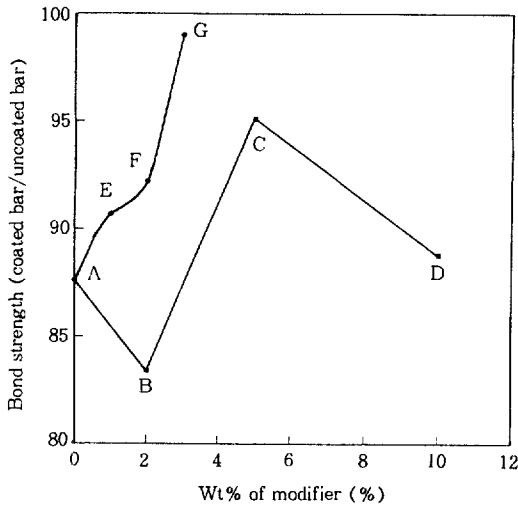


Figure 8. Bond strength between epoxy film and concrete according to quantities and kinds of modifier.

Table 6. Surface Profile of Epoxy Film According to Quantities and Kinds of Modifier

specimen	A	B	C	D	E	F	G
surface profile of epoxy film (μm)	1.2	1.3	1.2	1.3	1.3	1.3	1.4

분산되어 있어 packing density의 소량 증가가 있으며 또한 콘크리트와 유사 성분이라 부착응력이 증가하지만 fumed silica에 비해서 에폭시 도막내의 packing density가 떨어진다. 약 3% 부근에서부터 미첨가 에폭시 도막보다 부착응력의 증가를 나타내다가 개질제의 첨가량이 5% 부근에서 최대의 부착응력을 보인다. 첨가량이 더욱 증가시에는 부착응력이 감소하면서 첨가량이 10% 될 때의 부착응력은 개질제 미첨가 에폭시와 거의 유사한 수준인 약 90%에 이르게 된다. 이것은 Fe_2O_3 의 첨가량이 5% 이상 증가하더라도 extruder 내에서 분산이 잘되고 도료 조성비에서 BaSO_4 (채질 안료)가 첨가되지 못하기 때문에 도막의 packing density가 점점 줄어서 Fe_2O_3 와 콘크리트와의 접촉면적이 줄어들기 때문인 것으로 판단된다.

결론

1. Fumed silica를 에폭시 도료에 소량 혼합해서

사용하면 에폭시 도막과 콘크리트와의 부착증대를 피할 수 있으며 Fe_2O_3 의 경우는 첨가량이 4~10%에서 부착증대를 피할 수 있다.

2. Fe_2O_3 , fumed silica 둘다 첨가량의 증가에 따라 인장강도는 증가하나 충격강도와 신율은 저하한다. Fumed silica는 Fe_2O_3 에 비해 인장강도의 증가는 크면서 신율의 저하가 적기 때문에 도료에 응용하기에 더 적합하다.

3. Fumed silica는 fluffy한 물질이어서 3% 이상 첨가하여 가공하기가 어렵고 또한 그 이상 첨가시에 기계적 물성에 저하를 가져오므로 2~3% 첨가하는 것이 가장 적합하다고 판단된다.

4. Fe_2O_3 를 첨가시에 철근과의 부착성과 방청성을 크게 증가시켜 주는데 2% 첨가시에 최대의 방청 효과를 얻을 수 있었으며 fumed silica를 첨가시에는 소수성 때문에 방청성을 증가시키지만 첨가량을 증가할수록 부착성이 저하되기 때문에 방청성이 떨어지게 된다.

5. Fe_2O_3 로 개질할 때는 약 3~4% 정도의 Fe_2O_3 와 3~5%의 충전제를 병행사용하면 기계적 물성의 저하를 줄이면서 콘크리트와의 부착성 증대를 피할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Elfrench, *Polymer Paint Colour Journal*, **11**, 25 (1987).
2. A. Fletcher, *Polymer Paint Colour Journal*, **11**, 12 (1986).
3. Debasis Bagchi, *Journal of Protective Coating & Linings*, march (1991).
4. D. M. Thompson, *Polymer Paint Colour Journal*, **25**, 11 (1987).
5. Keith Mcleod, *Polymer Paint Colour Journal*, **29**, 11 (1989).
6. Chico Fujishima and Dr. B. Chalkley, *Polymer Paint Colour Journal*, **25**, 11 (1989).
7. J. D. Jeong, *The Concrete Society of Korea*, **4**, 1 (1992).