

## 배합변수에 따른 라텍스 개질 콘크리트 내에 정착된 보강철근의 부식개시시기 예측

### Prediction of Corrosion Threshold Reached at Steel Reinforcement Embedded in Latex Modified Concrete with Mix Proportion Factor

박성기\*† · 원종필\*\* · 박찬기\*\*\* · 김종옥\*\*\*

Park, Seung Ki\*† · Won, Jong Pil\*\* · Park, Chan Gi\*\*\* · Kim, Jong Ok\*\*\*

#### Abstract

This study were predicted the corrosion threshold reached at steel reinforcement in latex modified concrete(LMC) which were applied the agricultural hydraulic concrete structures. Accelerated testing was accomplished to the evaluate the diffusion coefficient of LMC mix, and the time dependent constants of diffusion. Also, the average chloride diffusion coefficient was estimated. From the average chloride ion diffusion coefficient, the time which critical chloride contents at depth of reinforcement steel was estimated. Test results indicated that the corrosion threshold reached at reinforcement in LMC were effected on the mix proportion factor including cement contents, latex content, and water-cement ratio. Especially, the average chloride diffusion coefficient, the corrosion threshold reached at reinforcement in LMC were affected by the all mix proportion factor.

*Keywords : Agricultural hydraulic concrete structures, Corrosion, Critical chloride contents, Diffusion coefficient, Latex modified concrete.*

## 1. 서 론

농업기반 콘크리트 구조물은 내구성, 사용성, 안전성을 모두 만족하여야 하며, 이와 같은 조건을 만족하기 위해서는 설계와 시공의 품질이 우수해야 하고,

지속적으로 유지관리가 이루어져야 한다. 특히, 농업기반 수리 구조물은 넓은 지역에 산재된 소형구조물이 많으며, 주로 농한기 단기간에 시공되므로 공사여건이 열악하고, 품질관리 측면에서 일반적인 대형공사에 비하여 불리한 단점을 가지고 있다. 품질관리에 문제가 발생한 농업기반 수리구조물은 사용중에 물과 접하게 되면, 급속한 노후화가 진행되어, 일반 콘크리트 구조물과 비교하여 보수주기가 짧아지고, 관리비용이 증가하게 되며, 목적인 기간 동안 주어진 기능을 성실히 수행하기 어렵게 된다. 농업기반 수리 구조물의 파괴원인을 보면 콘크리트 내로 수분이 침투하여 철근의 부식을 발생시켜, 콘크리트의 탈락 등

\* (주) 승화이앤씨 기술연구소

\*\* 건국대학교 사회환경시스템공학과

\*\*\* 공주대학교 지역건설공학전공

† Corresponding author. Tel.: +82-2-2262-6392

Fax: +82-2-2277-7368

E-mail address: skpark@newsh.co.kr

2008년 9월 18일 투고

2008년 11월 3일 심사완료

2008년 11월 3일 게재확정

이 발생하는 경우가 상당수 많이 존재한다. 이와 같은 이유로 해서 일반적인 농업기반 수리구조물의 내구년한은 평균 25년 정도로 나타나고 있다. 이는 일반 콘크리트 구조물의 60~65년, 교량구조물의 50년, 터널구조물 60년과 비교하여 짧은 내구수명을 나타내는 것이다(농림수산부 등, 2005).

최근 들어 농업기반 수리구조물에 내구성을 향상시키기 위하여 고성능 콘크리트의 적용이 증가하고 있다. 이와 같은 콘크리트에는 폴리머 콘크리트, 섬유보강 콘크리트 등이 있으며, 방조제와 같은 해양구조물의 경우 고로 슬래그, 플라이 애시 등 광물질 혼화제를 사용한 고성능 콘크리트의 적용도 증가하고 있다(원종필 등, 2007a,b,c,d; 민정기 등, 2003; 김영익 등, 2007; 연구석 등, 2006) 본 연구에서는 수리구조물의 투수저항성 향상을 통한 내구성을 향상시키기 위하여 라텍스를 혼합한 라텍스 개질 콘크리트(latex modified concrete: LMC)의 성능을 평가하였다. 특히, 수리구조물에 가장 큰 문제점으로 대두될 수 있는 철근의 부식을 방지 또는 지연시키는 LMC의 효과를 평가하였다. LMC의 경우 일반적으로 콘크리트 교량의 바닥판 콘크리트에 적용된 보강철근 등의 부식을 방지하기 위한 보호공법으로 적용되어 왔다. LMC 공법은 아스팔트 교면포장보다 염화물 침투저항성에 있어 상당히 뛰어난 효과를 발휘하는 것으로 나타나면서 본격적으로 연구가 시작되었다(Kuhlmann, 1981, 1990; Bishara, 1979). 그 이후 LMC 교면포장 공법은 시방규정(AASHTO Section 8 & 28, ACI 548.4-93)이 마련되면서 다양한 교량에 폭넓게 적용되기 시작하였으며, 오늘날 미국의 각 주에서는 주요 교량의 80%이상, 연간 1,000여개 이상의 교량에 LMC 교면포장 공법을 적용하고 있다(Park 등, 2008a, b; Scholz 등, 2007; Lee 등, 2006).

본 연구에서는 농업기반 수리구조물에 LMC를 적용하기 위하여 배합변수에 대한 영향을 평가하였다. 이를 위하여 LMC의 경제성에 가장 큰 영향을 미치는 라텍스 첨가비와 단위 시멘트량 및 물-시멘트를 배합변수로 선정한 후 철근의 부식에 미치는 영향을 평가하기 위하여 염화물 이온 확산과 이를 통한 철근의 부식 개시시기를 평가하였다.

## II. 시험계획

### 1. 사용재료

시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 굵은 골재는 최대치수 13mm의 부순골재를 사용하였고, 잔골재는 비중 2.53의 강모래를 사용하였다. 본 연구에 사용된 골재의 물리적 특성을 Table 1에 나타내었다. 라텍스는 SB 라텍스로 Styrene 모노머와 Butadiene 모노머 및 소포제 등의 첨가제가 혼합된 것을 사용하였다. 시험에 사용된 라텍스의 물리적 특성은 Table 2와 같다.

Table 1 Physical properties of aggregate

Type of aggregate	Maximum size (mm)	Density (SSD)	Absorption (%)	Abrasion (%)	F.M
Coarse agg.	13	2.65	0.35	28.45	6.92
Fine agg.	-	2.53	0.67	-	2.99

Table 2 Physical properties of Latex

Concentration (%)	Specific gravity	pH	Surface tension (dyne/cm)	Particle size (A)	Viscosity (cps)
46.9	1.02	10.55	30.565	1793	44.33

### 2. 배합설계

염화물 이온 확산특성에 따른 부식개시시기를 평가하고자 LMC의 성능 및 경제성에 영향을 미치는 단위 시멘트량(400kg/m<sup>3</sup>, 350kg/m<sup>3</sup> 및 300kg/m<sup>3</sup>), 물-시멘트비(33%, 39% 및 45%) 및 라텍스 첨가비(15%, 10% 및 5%)를 배합인자로 12배합을 선정하였으며, 배합비는 Table 3과 같다.

### 3. 시험방법

#### 가. 압축강도

각 배합인자가 강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 압축강도 시험을 실시하였다. 압축강도 시험은 재령 7일, 28일, 56일 및 91일에 실시하였으며, Ø 100×200mm 원주형 공시체를 이용하였다. 압축강

Table 3 Mix proportions of LMC

Type of mix (W/C-LS/C-unit cement contents)	W/C (%)	LS/C (%)	S/a (%)	(kg/m <sup>3</sup> )				
				C	W	S	G	Latex
33-15-400	33	15	55	400	64	887	760	128
33-10-400		10			87	914	783	85
39-10-400	39	10			111	881	755	85
39-5-400		5			133	908	778	43
45-5-400	45	5			157	874	749	43
33-15-350	33	15		350	56	942	807	112
39-15-350	39	15			77	913	782	112
39-10-350		10			97	937	803	74
45-10-350	45	10			118	908	778	74
39-15-300	39	15		300	66	972	833	96
45-15-300	45	15	84		947	812	96	
45-10-300		10	101		968	829	64	

도 공시체는 폴리머 콘크리트에 대한 양생 방법에 준하여 재령일 까지 기중양생을 실시하였다.

#### 나. 염화물 이온 확산

LMC의 염화물 이온 확산특성을 평가하기 위하여 재령 7일, 28일, 56일 및 91일에서 급속 전기이동에 의한 확산 시험을 실시하였다. 급속 전기이동에 의한 염화물 이온의 확산 평가는 북유럽 시험기준인 NT Build 492에 준하여 실시하였다(NT Build 492, 1999). 급속 전기이동 시험의 결과로 부터 확산계수를 구하는 방법으로 Tang과 Nilsson(1992)의 모델을 이용하였다(Nilsson 등, 1999; Tang 등, 1992). Tang과 Nilsson은 Nernst-Planck 방정식으로부터 물질이동을 농도차에 의한 확산의 항과 전기이동에 따른 항의 합으로만 비정상상태 전기이동시험에 의한 확산계수 산정식을 유도하였다. 또한 전기이동 시험으로부터 얻어진 결과는 염화물의 침투깊이로서 표현되는 확산계수는 겉보기 확산계수와 같은 개념으로 볼 수 있기 때문에 겉보기 확산계수를 산정하여 비정상상태의 영동확산계수를 계산하였다(Tang 등, 1992).

시간에 따른 깊이별 염화물량 산정에 확산계수를 적용하기 위하여 각 배합별로 측정된 확산계수를 바탕으로 배합인자와의 관계식을 이용하여 LMC의 확

산계수를 산정할 수 있는 관계식을 정립할 필요가 있다. 콘크리트 중의 염화물 이온 확산계수가 재령에 따라 변화하기 때문에 평균확산계수 개념을 도입하였다. 본 연구에서는 염화물 이온 확산계수의 시간의존성을 고려할 수 있는 Poulsen의 모델을 이용하였다(Poulsen, 1994).

#### 다. 염화물 이온 확산에 의한 철근부식개시시기 예측

콘크리트의 사용수명을 예측하기 위한 다양한 방법들 중에서 현재 주로 사용되고 있는 방법은 염화물 이온의 침투에 의한 콘크리트의 확산계수를 산정하고, 이로부터 철근의 부식이 시작되는 시점을 예측하여 사용수명을 결정하는 방법이다. Tuutti(1982)는 염화물 이온에 의한 철근부식을 고려한 수학적 모델을 개발하기 위하여 다음 Fig. 1과 같이 부식과정을 휴지기(Initiation period)와 부식 진전기(Propagation period)로 나누어 설명하고 있다. 그의 모델에 따르면 염화물 이온의 확산에 의해 철근의 부식이 활성화되기 이전의 단계, 즉 휴지기는 철근위치까지 염화물 이온이 일정량이상 확산되는 시간을 의미하며, 이러한 염소이온의 확산은 식(1)의 Fick의 제2법칙을 이용하여 염소이온 침투율을 깊이의 함수로 나타내는 방법으로 평가가 가능하다.

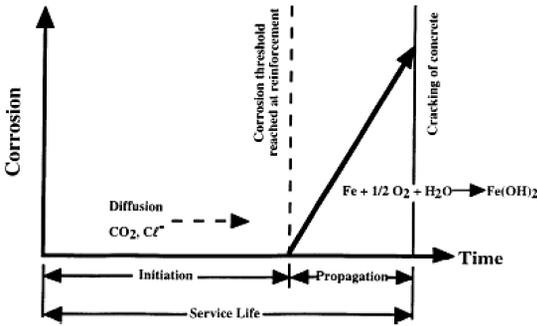


Fig. 1 Corrosion model concept in steel reinforcement (Tuutti, 1982)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (D(t) \frac{\partial C}{\partial x}) \quad (1)$$

여기서, C는 시간 t동안 염분에 노출된 콘크리트의 표면으로부터 거리 x만큼 떨어진 위치에서의 염소이온 농도를 나타내며, D(t)는 시간에 따른 콘크리트 특성변화를 반영한 염소이온의 확산계수이다. Tuutti의 평가모델에서는 부식진전기에서 부식발생률은 음극에서의 산소 확산속도, 공극내 용액의 저항성 등에 의해 영향을 받으며, 산소 확산저항성은 콘크리트 덮개의 포화도와 포화되지 않은 단면의 공극구조와 상대습도 등에 의해 결정된다. 철근부식개시시기 예측모델에 대하여 살펴보면 콘크리트 표면에 도입되는 염화물 이온 농도와 확산계수가 시간에 대해 일정하다고 가정하고 Tuutti의 내구연한 예측모델을 적용하여 부식발생시점을 예측하였다(Crank, 1975). 시간에 따른 염화물 이온의 확산에는 초기 및 경계 조건이 필요하며, 일반적으로 콘크리트 구조물에서는 식(1a, b)을 적용한다.

$$t=0, x>0: C_t = C_i \quad (1a)$$

$$t>0, x=0: C_t = C_0 \quad (1b)$$

여기서, C<sub>0</sub> : 콘크리트 표면의 염소이온 농도, C<sub>i</sub> : 콘크리트 내부의 염소이온 농도, C<sub>t</sub> : 시간 t에서 염소이온 농도, t : 시간(s), x : 거리(m) 이다. 또한, 염소이온의 확산계수를 상수라고 하여 1차원 확산방정식의 일반해는 식 (2)와 같다.

$$C(x,t) = C_i + (C_0 - C_i) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{eff} \cdot t}}\right) \quad (2)$$

여기서, C(x,t) : 시간 t, 거리 x에서의 염소이온 농도, erfc : 오차함수의 역함수이다. 식(2)에 의해 결정되는 염소이온 농도분포는 일반적으로 포물선 형태로 나타난다. Tuutti의 가정에 따르면, 휴지기는 철근위치에서의 염소이온 농도가 임계치, 즉 부식임계농도에 도달할 때 끝나고 이후 부식이 활성화된다. 따라서, 부식발생시간 t<sub>p</sub>는 부식임계농도를 C<sub>cr</sub>, 철근까지의 깊이(피복두께)를 d라 할 때, 염소이온농도 C(d,t) = C<sub>cr</sub>일 때의 시간이 되며 식 (3)으로 표현할 수 있다(Tuutti, 1982).

$$C_{cr} = C_i + (C_0 - C_i) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{d}{2\sqrt{D_{eff} \cdot t_p}}\right) \quad (3)$$

여기서, n = erfc<sup>-1</sup>( $\frac{C_{cr} - C_i}{C_0 - C_i}$ )라 하면, 부식발생시간 t<sub>p</sub>는 식(4)와 같다(Tuutti, 1982).

$$t_p = \frac{d^2}{4 \cdot n D_{eff}} \quad (4)$$

여기서, D<sub>eff</sub>는 유효 확산계수를 의미하며, 본 연구에서는 염화물확산계수를 이용하여 철근의 부식개시 시간을 예측하였다. 예측과정은 콘크리트의 표면염화물량을 상수로 나타내고, 염화물 이온의 확산계수가 시간에 대해 일정하다고 가정한 Browne의 접근방법을 적용하여 식(5)와 같은 일반해를 산정할 수 있다(Browne, 1982; Yuning 등, 2004).

$$C_t = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ave} t}}\right) \right] \quad (5)$$

여기서, D<sub>ave</sub> : 평균 염소이온 확산계수를 의미한다. 또한, 철근부식개시시기를 예측하기 위해서는 콘크리트의 표면 염화물량을 가정하여야 한다. 미국 SHRP (Strategic highway research program) 보고서에서는 염화물 노출로 인한 손상정도를 분류하여 표면 염화물량을 제시하고 있다(Weyers, 1992, 1993). SHRP 보고서에서 제시한 손상정도와 표면 염화물 함량은 각각 Table 4 및 5와 같다. Table 5에 나타난 표면 염화물 함량 값을 사용하여 각 배합에 대하여 시간에 따른 염화물 함량을 철근 피복두께를 5cm로 가정하고 철근부식이 시작되는 시점을 검토

**Table 4 Chloride content categories with salt usage**

Chloride content categories	Salt usage
Low	< 1.4 Ton/lane-km/yr
Moderate	1.4 ~ 2.9 Ton/lane-km/yr
High	2.9 ~ 5.8 Ton/lane-km/yr
Severe	> 5.8 Ton/lane-km/yr

**Table 5 Corrosion environment**

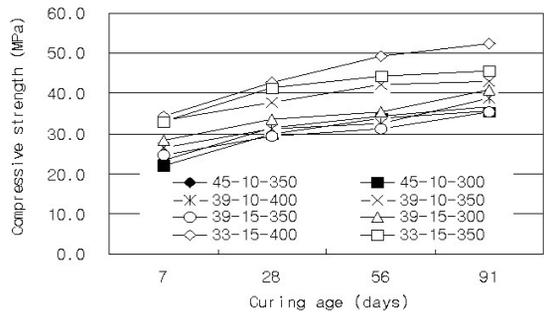
Chloride content categories	Chloride content(kg/m <sup>3</sup> )
Low	0 < C <sub>0</sub> < 2.4; Mean : 1.8
Moderate	2.4 < C <sub>0</sub> < 4.7; Mean : 3.5
High	4.7 < C <sub>0</sub> < 5.9; Mean : 5.3
Severe	5.9 < C <sub>0</sub> < 8.9; Mean : 7.4

하였다. 철근이 부식되는 시점을 산정하기 위해서는 콘크리트의 임계염화물량을 결정해야 하는데, 현재까지 임계염화물량에 대해서는 국내·외적으로도 미정립 되어 있으며, 국가별, 연구자별로 다르게 발표되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구결과를 바탕으로 일반 콘크리트에서의 임계 염화물량으로 0.7kg/m<sup>3</sup>을 사용하였다.

### III. 시험결과 및 고찰

#### 1. 압축강도

압축강도 시험결과는 Fig. 2와 같다. 시험결과 LMC의 압축강도는 물-시멘트비, 단위 시멘트량 및 라텍스 첨가비에 복합적으로 영향을 받았다. 단위 시멘트량 400kg/m<sup>3</sup>인 배합에서 물-시멘트비가 33%인 경우 라텍스 첨가비가 15%인 배합이 10%인 배합보다 압축강도가 약간 크게 나타났고, 물-시멘트비가 39%인 배합에서는 라텍스 첨가비가 작은 배합이 압축강도가 크게 나타났다. 또한 단위 시멘트량이 400kg/m<sup>3</sup>일 때 동일한 라텍스 첨가비에서 압축강도는 물-시멘트비가 증가할수록 감소하였다. 또한 물-시멘트비는 33%에서 35%로 증가하였지만 라텍스 함량이 10%에서 5%로 감소하면 압축강도의 차이가 거의 나지 않았다. 이와 같은 결과는 단위 시멘트량이 350kg/m<sup>3</sup>인 배합 및 300kg/m<sup>3</sup>인 배합에서도 거의 유사하게



**Fig. 2 Compressive strength with unit cement amount**

나타나고 있다. 즉 라텍스 첨가비가 증가할수록 일률적으로 압축강도가 증가하지 않고, 물-시멘트비의 변화에 따라 압축강도의 증가 및 감소가 나타나고 있다. 또한 단위 시멘트량에 따른 압축강도의 영향도 약간 차이가 있었다. 물-시멘트가 33%이고 라텍스 첨가비가 15%인 경우에는 단위 시멘트량 400kg/m<sup>3</sup>인 배합이 350kg/m<sup>3</sup>인 배합보다 압축강도가 크게 나타났지만 물-시멘트비가 39%이고 라텍스 첨가비가 15%인 경우에는 단위 시멘트량이 300kg/m<sup>3</sup>인 배합이 350kg/m<sup>3</sup>인 배합보다 크게 나타났다. 이와 같은 경향은 물-시멘트비가 39% 라텍스 첨가비가 15%일 때와 물-시멘트비가 45%이고 라텍스 첨가비가 15%일 때 역시 시멘트 함량이 작은 배합이 압축강도가 크게 나타나는 결과를 보였다. LMC의 경우 라텍스 첨가비가 동일할지라도 첨가량에 따라 영향을 받는다. 단위 시멘트량의 변화는 첨가비가 일정해도 첨가량은 변화하게 된다. 따라서 강도에는 복합적인 요인에 의해서 영향을 미친다. 단위 시멘트량이 증가하면 라텍스 첨가비도 증가하여 공기량 등의 증가로 인한 강도가 감소할 가능성이 있지만 물-시멘트비가 작기 때문에 라텍스 첨가비가 증가함으로써 유동성이 증가하여 재료의 분산효과가 크기 때문에 단위 시멘트량의 증가가 강도 감소의 가능성을 감소시키는 결과를 나타냈다. 그러나 물-시멘트비가 39%로 증가하면 라텍스 첨가에 따른 유동성 증가로 재료의 분산효과가 라텍스 첨가비가 작을 때와 비교하여 크지 않고, 라텍스 첨가비 증가에 따른 공기량 증가가 크기 때문에 단위 시멘트량의 증가로 인한 강도증가 효과가 크지 않았다. 따라서 단위 시멘트량

이 큰 배합이 강도가 저하되는 결과를 초래하였다. 이와 같은 결과를 볼 때 LMC의 강도는 시멘트량, 물-시멘트비 및 라텍스 첨가비에 따라 일정한 경향을 나타내는 것이 아니라 복합적으로 영향을 받으므로 LMC의 배합설계를 결정할 때 물-시멘트비, 단위 시멘트량 및 라텍스 첨가비를 변수로하여 목표 강도에 맞는 배합을 결정해야 한다(Park 등, 2008b).

## 2. 확산특성

배합변수에 따른 확산계수는 Table 6과 같다. 시험결과 LMC의 확산계수는 라텍스의 첨가량, 단위 시멘트량, 물-시멘트비 및 재령에 따라 다르게 나타나고 있다. 대부분의 배합에서는 단위 시멘트량과 물-시멘트비가 동일한 경우에는 라텍스 첨가비가 증가할수록 확산계수는 감소하고 있으며, 라텍스 첨가비와 물-시멘트비가 동일한 경우에는 단위 시멘트량이 증가할수록 확산계수가 감소하고 있다. 이는 라텍스 첨가비의 증가는 라텍스필름의 형성에 의한 내부구조의 밀실화에 의한 것이고 단위 시멘트량의 증가는 라텍스 첨가비가 단위 시멘트량에 영향을 받기 때문에 단위 시멘트량의 증가 역시 라텍스필름의 형성에 의한 내부구조의 밀실화가 발생하기 때문이다(Park

등, 2008a). 그러나 동일한 단위 시멘트량 및 라텍스 첨가비에서는 물-시멘트비가 증가할수록 확산계수가 증가하는 결과를 보여주었는데, 이는 물-시멘트비의 증가는 LMC의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 라텍스 첨가비에는 영향을 미치지 않으면서 강도저하 등과 함께 콘크리트의 내부구조를 약화시킬 수

**Table 6 Coefficient of diffusion of LMC with mix proportion factor**

Type of mix	Coefficient of diffusions ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ )			
	Curing age (days)			
	7	14	28	91
33-15-400	6.29	3.97	3.26	1.43
33-10-400	6.99	4.06	3.51	1.99
39-10-400	8.51	5.60	5.15	3.45
39-5-400	7.45	5.61	5.12	3.44
45-5-400	11.03	8.20	7.26	5.30
33-15-350	8.91	5.88	5.05	4.30
39-15-350	9.83	6.93	5.65	4.41
39-10-350	9.54	7.21	6.14	4.53
45-10-350	10.50	9.11	7.17	5.73
39-15-300	9.99	8.08	6.29	4.96
45-15-300	10.97	9.71	8.02	6.76
45-10-300	13.86	10.02	8.17	7.24

**Table 7 Time-dependent constants of diffusion with mix type**

Type of mix (w/c - LS/c)	Unit cement contents ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Function of regression analysis	R-square ( $R^2$ )	Time-dependent constants ( $m$ )	Average diffusion coefficient, $\overline{D}_a$ ( $\text{cm}^2/\text{yr}$ )
33-15	400	$y = 18.96 \times x^{-0.50}$	0.824	0.50	0.13
33-10		$y = 17.38 \times x^{-0.44}$	0.917	0.44	0.17
39-10		$y = 16.24 \times x^{-0.31}$	0.924	0.31	0.40
39-5		$y = 13.11 \times x^{-0.26}$	0.870	0.26	0.51
45-5		$y = 18.98 \times x^{-0.26}$	0.927	0.26	0.74
33-15	350	$y = 15.28 \times x^{-0.28}$	0.966	0.28	0.48
39-15		$y = 18.13 \times x^{-0.30}$	0.978	0.30	0.52
39-10		$y = 16.78 \times x^{-0.27}$	0.932	0.27	0.62
45-10		$y = 17.23 \times x^{-0.22}$	0.866	0.22	0.99
39-15	300	$y = 17.50 \times x^{-0.26}$	0.927	0.26	0.73
45-15		$y = 16.29 \times x^{-0.18}$	0.900	0.18	1.28
45-10		$y = 22.89 \times x^{-0.25}$	0.997	0.25	0.83

있는 요인으로 작용하기 때문이다. 또한, 확산계수는 배합변수에 따라 복합적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 물-시멘트비, 단위 시멘트량 및 라텍스 첨가비가 다른 경우에도 거의 비슷한 확산계수의 확보가 가능하다. 재령 28일에서 확산계수를 살펴보면 물-시멘트비, 단위 시멘트량 및 라텍스 첨가비 중 두가지 이상 차이가 나는 배합에서 확산계수는 거의 비슷한 확산계수의 확보가 가능하다. 단위 시멘트량은 동일하지만 물-시멘트비와 라텍스 첨가비가 서로 다른 경우 확산계수가 유사해 질 수 있으며, 세가지 변수가 모두 다를 때도 유사한 배합이 존재한다. 따라서 LMC의 확산계수는 세가지 배합변수를 조절하여 목표로 하는 성능을 충분히 만족하도록 할 수 있다.

본 연구에서는 재령별 확산계수 산정결과로부터 시간의존성 경험상수 ( $m$ )을 산정하기 위해 재령에 따른 확산계수결과가 멱함수의 관계로 표시되는 점을 고려하여 로그함수로 나타내어 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석을 통해 얻어진 재령과 확산계수의 관계분석결과를 나타낸 것은 Table 7과 같다. 각 배합에 대한 시간의존상수는 단위 시멘트량  $400\text{kg/m}^3$  일 경우  $0.26\sim 0.50$  사이로 나타났으며,  $350\text{kg/m}^3$  일 때는  $0.22\sim 0.30$ , 그리고  $300\text{kg/m}^3$  일 때는  $0.18\sim 0.26$ 으로 나타났다. 단위 시멘트량이 높을수록 시간의존상수 값의 변동이 다소 크게 나타났다. 각 배합에 대해 계산된 시간의존상수를 적용하여 각 염화물 이온함량이나 철근부식의 개시시기 예측 등에 적용하기 위한 평균 확산계수를 산정하였다. 평균 확산계수는 단위 시멘트량, 라텍스 첨가비, 물-시멘트비에 영향을 받아  $0.40\sim 4.04\times 10^{-12}\text{m}^2/\text{sec}$ 의 범위를 나타내었다

### 3. 철근부식개시시기 평가

#### 가. 표면염화물 이온량에 따른 철근 부식개시시기

표면 염화물량에 따른 LMC 내부로의 확산을 통한 철근의 부식개시시기 평가 결과는 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)는 동일한 물-시멘트비 및 단위 시멘트량에서 라텍스 첨가비에 따른 부식개시시기이며, Fig. 3(b)는 동일한 라텍스 첨가비 및 단위 시멘트량에서 물-시멘트비의 변화에 따른 부식개시시기이다. Fig.

3(c)는 동일한 라텍스 첨가비 및 물-시멘트비에서 단위 시멘트량의 변화에 따른 부식개시시기이다. 평가결과 라텍스 첨가비가 증가할수록, 물-시멘트비가 작을수록, 단위 시멘트량이 많을수록 모든 표면 염화물량에서 부식개시기는 늦어졌으며, 표면 염화물량이 증가할수록 급격히 부식개시시기는 빨라지는 것을

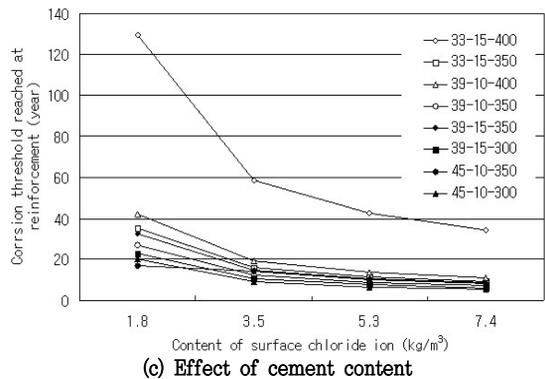
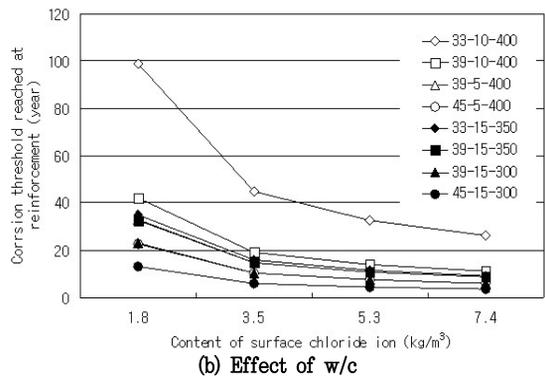
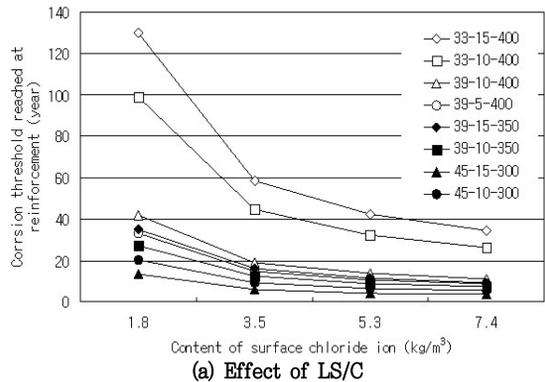


Fig. 3 Corrosion threshold reached at reinforcement with surface chloride ion content

알 수 있다. 각 변수에 따른 부식개시시기는 표면염화물량이 적을 때는 큰 차이를 발생하지만, 표면염화물량이 증가하면 차이가 크게 감소하였다. 단위 시멘트량 400kg/m<sup>3</sup>에서 부식개시시기는 라텍스 첨가비 15%에서 10%로 감소할 때 약 40% 감소하고, 물-시멘트비가 33%에서 39%로 변화할 때 약 51% 감소하는 결과를 나타내고 있다. 그러나 배합변수는 복합적으로 부식개시시기에 영향을 미치고 있다(Table 8). 단위 시멘트량이 많고, 물-시멘트비가 크며, 라텍스 첨가비가 작은 배합과 단위 시멘트량은 적지만, 물-시멘트비가 작고 라텍스 첨가비가 상대적으로 크면 거의 비슷한 부식개시시기를 나타내었다(45-5-400배합과 39-15-300배합의 비교). 물-시멘트비가 동일할 때 단위 시멘트량과 라텍스 첨가비가 다른 배합에서는 라텍스 첨가비와 단위 시멘트량이 모두 클 때 부식개시시기를 증가시킬 수 있지만, 라텍스 첨가비를 작게 하고 단위 시멘트량을 증가시키면 라텍스 첨가비를 증가시킬 때와 동일한 효과를 얻을 수 있다(39-5-400배합과 39-15-300배합의 비교). 따라서 세가지 배합변수는 독립적으로는 일반적인 경향을 나타내지만, LMC 배합에는 전체적으로 세가지 변수가 복합적으로 작용함으로 목표성능에 맞는 배합을 선정할 경우 이를 고려할 필요가 있다. 또한

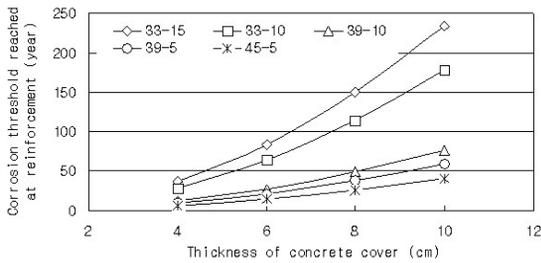
부식개시시기는 물-시멘트비가 33%, 단위 시멘트량이 400kg/m<sup>3</sup>일 때 다른 배합에 비하여 상대적으로 크게 증가되며, 물-시멘트비 증가와 단위 시멘트량 감소는 급격하게 부식개시시기를 단축시키는 것으로 나타났다. 따라서 부식개시시기의 평가를 보면 물-시멘트비 33%, 단위 시멘트량을 400kg/m<sup>3</sup>을 사용하고 라텍스 첨가비는 15% 또는 10%를 사용하면 가장 우수한 효과를 발휘하는 것으로 나타났다. 그러나 이는 현재 교면포장콘크리트에 적용하는 배합과 동일 또는 유사한 배합으로 수리구조물에 적용하기에는 경제성에 문제를 발생시킬 수 있어, 수리구조물의 목표 성능과의 관계를 고려하여 결정할 필요가 있다.

나. 피복두께에 따른 철근부식개시시기 산정

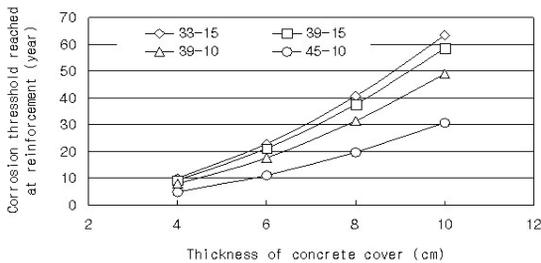
철근피복두께에 따른 철근부식개시시기 평가 결과는 Fig. 4와 같다. 동일한 피복두께에서 배합변수에 따른 부식개시시기는 라텍스 첨가비, 단위 시멘트량이 증가할수록, 물-시멘트비가 작아질수록 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 단위 시멘트량과 물-시멘트비가 작은 경우에는 라텍스 첨가비가 증가하면 오히려 부식개시시기가 증가하는 경향도 나타나고 있다(단위 시멘트량 300kg/m<sup>3</sup>, 물-시멘트비 45%일 때 라텍스 첨가비 15%와 10%일 비교). 이와 같은 결과는 물-시멘트비가 크고 단위 시멘트량이 작은 상태에서 라텍스 첨가비가 증가하면 재료분리가 발생하기 때문이다. 따라서 LMC의 배합을 결정할 경우에는 목표로 하는 성능을 만족하도록 배합변수를 전체적으로 고려할 필요가 있다. 이는 세가지의 배합변수가 복합적으로 LMC의 성능에 영향을 미치기 때문이다. 단위 시멘트량 400kg/m<sup>3</sup>, 물-시멘트비 0.33 및 라텍스 첨가비 15% 및 10%일 때 모든 피복두께에서 다른 배합에 비하여 부식개시시기를 증가시키는 것으로 나타났다. 또한 피복두께가 증가할수록 부식개시시기도 크게 증가함을 알 수 있다. 즉 피복두께가 4cm일 때는 각 배합변수에 따른 부식개시시기가 큰 차이는 발생하지 않았지만, 피복두께가 6cm, 8cm, 10cm로 증가함에 각 변수에 따른 부식개시시기의 차이도 크게 벌어지고 있다. 피복두께에 따른 시험결

Table 8 Corrosion threshold reached at reinforcement with surface chloride ion content

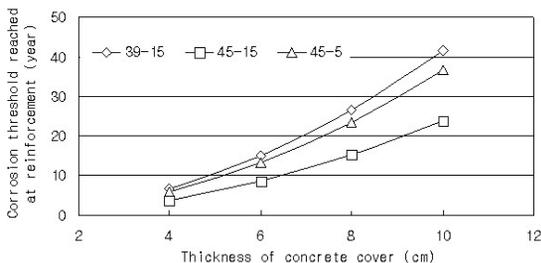
Type of mix	Corrosion threshold reached at reinforcement (year)			
	Content of surface chloride ion (kg/m <sup>3</sup> )			
	1.8	3.5	5.3	7.4
33-15-400	129.7	58.6	42.4	34.4
33-10-400	99.0	44.8	32.4	26.3
39-10-400	42.1	19.0	13.8	11.2
39-5-400	33.0	14.9	10.8	8.8
45-5-400	22.8	10.3	7.5	6.1
33-15-350	35.1	15.9	11.5	9.3
39-15-350	32.4	14.6	10.6	8.6
39-10-350	27.2	12.3	8.9	7.2
45-10-350	17.0	14.1	10.1	8.1
39-15-300	23.1	10.4	7.6	6.1
45-15-300	13.2	5.90	4.3	3.5
45-10-300	20.3	9.20	6.6	5.4



(a) Corrosion threshold reached at reinforcement (C= 400kg/m³)



(b) Corrosion threshold reached at reinforcement (C= 350kg/m³)



(c) Corrosion threshold reached at reinforcement (C= 300kg/m³)

Fig. 4 Corrosion threshold reached at reinforcement with thickness of concrete cover

과를 자세히 살펴보면 단위 시멘트량이 400kg/m³인 배합에서 부식개시시기는 6.58~37.45년으로 나타나 피복두께를 증가시킬수록 부식개시시기가 증가되는 결과를 보여주었는데, 피복두께를 4cm에서 6cm로 증가시키게 되면 부식개시시기는 2배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 또한 8cm로 증가시킬 경우에는 4배, 그리고 10cm로 증가시킬 경우에는 6배 이상의 철근부식개시시기가 지연되는 결과를 나타내었다. 따라서 철근부식개시시기를 50년 이상으로 연장시키기 위해서는 물-시멘트비가 33%인 경우에는 피복두께를 6cm 이상으로 해야 하며, 39%인 경우에는 8cm

이상, 그리고 45%인 경우에는 10cm 이상이 되어야 가능하다. 단위 시멘트량 350kg/m³인 배합은 피복두께가 4cm인 경우에는 4.92~10.15년으로 나타났으며, 피복두께가 2배 증가하면 부식개시시기는 4배 증가하는 결과를 나타내었다.

또한, 부식개시시기가 50년 이상이 되는 배합은 물-시멘트비 33%와 39%에서 라텍스 첨가량이 15% 이상이고 피복두께가 10cm 이상이 되어야 한다는 것을 알 수 있다. 단위 시멘트량 300kg/m³인 배합의 경우에도 동일한 특성을 나타내고 있으며, 피복두께가 2배 증가하게 되면, 철근부식개시시기는 4배정도 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 단위 시멘트량이 300kg/m³이상으로 증가할 경우 철근부식개시시기를 50년 이상 확보하는 것이 불가능한 것으로 나타났다. 이는 만족할 만한 성능을 확보하기 위해서는 라텍스 첨가비와 물-시멘트비가 커야 하기 때문에 재료분리, 강도저하 등이 발생하기 때문이다.

#### 다. 염화물 이온 확산에 의한 구조물 손상 평가

콘크리트의 깊이별 염화물함량을 분석한 결과로부터 염화물 이온의 평균 확산계수를 산정하게 되면, 해당 구조물 콘크리트에서 철근에 도달하여 부식이 발생하는 시기를 예측하여 잔존수명 등을 판단할 수 있다. 이러한 방법을 통해 해당 구조물의 보수 및 보강 시기를 미리 결정할 수 있을 것이다. 확산과 균열에 의한 손상 모델에서는 보수시기의 결정을 염화물 이온 확산으로 발생하는 철근부식개시시기와 부식 진전에 의한 탈락이 발생하는 시기로 구분할 수 있으며 보수개시시기는 부식발생시기와 부식진전에 의한 탈락시기를 포함한 기간으로 해서 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 부식진전에 의한 탈락이 발생하는 시기를 부식발생시기 후 3.5년을 적용하였고, 이 기간은 국외에서 조사된 손상률을 기준으로 가정하였으며, 콘크리트 교량의 총 면적에 대한 손상률이 12%일 때를 기준으로 하였다. Table 9는 염화물 이온 확산에 따른 부식개시기, 탈락 발생시기 및 보수시기 등의 예측결과를 나타낸다. 각 배합변수에 따른 영향을 살펴보면 일반적으로 라텍스 첨가비가 증가할수록, 단위 시멘트량이 증가할수록, 물-시멘트비가

Table 9 Repair threshold time by the chloride ion diffusion

Type of mix	Average coefficient of diffusion ( $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{sec}$ )	Repair threshold time (year)		
		$t=5\text{cm}, C_0=3.5\text{kg/m}^3$		
		Corrosion threshold reached at reinforcement	Spalling threshold reached at concrete	Repair threshold time
33-15-400	0.40	58.6	3.5 (when end of functional service life is 12%, time to spalling)	62.1
33-10-400	0.52	44.8		48.2
39-10-400	1.28	19		22.5
39-5-400	1.16	14.9		18.4
45-5-400	2.35	10.3		13.8
33-15-350	1.54	15.9		19.4
33-15-350	1.65	14.6		18.1
39-10-350	1.97	12.3		15.8
45-10-350	3.14	14.1		17.6
39-15-300	2.31	10.4		13.9
45-15-300	4.04	5.9		9.4
45-10-300	2.62	9.2		12.7

작을수록 보수시기는 증가하는 것으로 나타나고 있다. 그러나 배합변수는 독립적으로 영향을 미치는 것이 아니라 단위 시멘트량, 물-시멘트비 및 라텍스 첨가비가 복합적으로 영향을 미치고 있다. 따라서 LMC를 수리구조물에 적용할 경우 목표로 하는 성능을 만족하도록 재료변수와 경제성을 모두 고려하여 결정하는 것이 필요하다.

#### IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 농업기반 수리구조물에 라텍스 개질 콘크리트의 적용시 보강철근의 부식 특성을 평가하기 위하여 단위 시멘트량, 라텍스 첨가비 및 물-시멘트비를 배합변수로 압축강도와 확산특성 시험을 실시하여 철근부식개시기를 예측하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. LMC의 확산계수는 배합변수를 동시에 고려할 때는 일정한 경향을 나타내지 않고 배합변수에 의해 복합적으로 영향을 받기 때문에 LMC의 배합설계 결정은 목표 성능에 맞도록 고려해야 한다.
2. LMC 배합으로부터 얻어진 확산계수의 시간의존성 상수는 0.50~0.18까지로 나타났으며, 30년까

지 평균 염화물 이온 확산계수를 산정한 결과 0.40~4.04 $\text{m}^2/\text{sec}$ 의 값을 보여주었다.

3. LMC에서 표면염화물량에 따른 철근부식개시기는 표면염화물량이 1.8 $\text{kg/m}^3$ 에서는 약 13.2년~129.7년, 3.5 $\text{kg/m}^3$ , 5.3 $\text{kg/m}^3$  및 7.4 $\text{kg/m}^3$ 에서는 각각 5.90년~58.6년, 4.3년~42.4년, 3.5년~34.4년으로 표면염화물량이 증가함에 따라 감소하였으며 배합변수에 따라 복합적으로 영향을 받았다.

4. LMC의 피복두께에 따른 부식개시시기는 피복두께가 6cm, 8cm, 10cm일 때 각각 3.80년~37.48년, 8.56년~84.3년 및 23.78년~234.2년으로 나타나 피복두께가 증가함에 따라 크게 증가되었으며 배합변수에 의해 복합적으로 영향을 받았다.

5. LMC의 배합변수에 따른 구조물의 보수시기는 구조물의 건설 후 약 9.4년~62.1년으로 물-시멘트비가 작을수록, 라텍스 첨가비가 클수록, 단위 시멘트량이 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 배합변수는 모든 배합에서 보수시기에 독립적으로 영향을 미치지 않고 복합적으로 작용하고 있다. 따라서, LMC의 배합설정에 있어 단위 시멘트량, 라텍스 첨가비 및 물-시멘트비의 결정은 보강철근의 부식개시시기를 억제할 수 있는 밀실한 구조의 배합을 선정하도록 신중한 검토가 요구된다.

## References

1. ACI 548.3R-91, 1991, State of the art polymer modified concrete, Reported by ACI ACI Committee 548, American Concrete Institute, Michigan.
2. Bishara, A.G., 1979, Latex modified concrete bridge deck overlays field performance analysis, Ohio Department of Transportation, Report No. FHWA/ OH/79/004, Ohio, pp. 96.
3. Browne, R., 1982, Design prediction of the life for reinforced concrete in a marine and other chloride environment, Durability of Building Materials, 1(2), pp. 113~125.
4. Crank, J., 1975, The mathematics of diffusion, Clarendon Press, Oxford.
5. Kuhlmann, L.A., 1981, Performance history of latex-modified concrete overlays, ACI Publication SP-69 : Application of Polymer Concrete, American Concrete Institute, Michigan, pp. 205~218.
6. Kim, Y.I., and C.Y. Sung, 2007, Strength and watertightness properties of EVA modified high strength concrete, Journal of KSAE, 49(1), pp. 45~56.(in Korean)
7. Kuhlmann, L.A., 1990, Experiments to evaluate factors effecting the permeability of portland cement mortar and concrete modified with styrene-butadiene Latex, Presented at the Research Session, ACI 1990 Annual Meeting, Toronto, Canada
8. Lee, S.W., S.K. Park, K.H. Kim and H.B. Lee, 2006, Bridge deck pavement using latex modified concrete, Magazine of the KCI, 18(3), pp. 33~37.(in Korean)
9. Korea Rural Community and Agriculture Corporation and KSAE, 2005, Development of concrete-quality-control guide line for durability enhancement of hydraulic structures (II), Ministry of Agriculture and Forestry, pp. 1~7.
10. Min, J.K., K.S. Yeon and C.Y. Sung, 2003, Field application of permeable polymer concrete pipe for drainage, Journal of KSAE, 45(6), pp. 136~143.(in Korean)
11. NT Build 492, 1999, Concrete, mortar and cement based repair materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments, Approved 1999-11, Nordtes.
12. Nilsson, L.O. and J.P. Ollivier, 1999, Fundamentals of transport properties of cement-based materials and general methods to study transport properties, in engineering and transport properties of the interfacial transition zone in cementitious composite, RILEM Report No. 20, RILEM, pp.113~147.
13. Poulsen, E., 1993, On a model of chloride ingress into concrete having time-dependent diffusion coefficient, in nordic miniseminar-chloride transport in concrete, Dept. of Building Materials, Chalmers University of Technology, Goteborg, Publication P-93: 1, Stockholm, Sweden.
14. Park, S.K., J.P. Won and C.G. Park, 2008a, Evaluation of Diffusion Property of Latex Modified Concrete, KSAE, 50(4), pp. 27~37.(in Korean)
15. Park, S.K., J.P. Won and C.G. Park, 2008b, Strength Properties and Determination Method of Mix Proportion Factor of Latex Modified Concrete, KSAE, 50(5), pp. 39~50.(in Korean)
16. Scholz, D.P., J.A. Wallenfelsz, C. Lijeron and C.L.R. Wollman, 2007, Recommendations for the connection between full-depth precast bridge, deck panel systems and precast I-beam, Report No. FHWA/VTRC 07-CR1, In Cooperation with the U.S.A Department of

- Transportation, Federal Highway Administration Charlottesville, Virginia.
17. Tang, L. and L.O. Nilsson, 1992, Chloride diffusivity in high strength concrete, *NOrdic Concrete Research*, 11, pp. 162~170
  18. Tuutti, K., 1982, Corrosion of steel in concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden.
  19. Weyers, R.E., 1993, Concrete bridge protection, repair, and rehabilitation relative to reinforcement corrosion, Report No. SHRP-S-360, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
  20. Weyers, R.E., M.G. Gitch, E.P. Larsen, I.L. Al-Qadi, W.P. Chamberlin and P. C. Hoffman, 1992, Service-life estimates, strategic highway research program, National Research Council, Washington, D.C.
  21. Won, J.P., J.Y. Lee, C.G. Park, S.K. Sung and W.Y. Kim, 2007, Mechanical and durability characteristics of latex modified repair mortar for agricultural underwater concrete structure, *Journal of KSAE*, 49(4), pp. 35~41.(in Korean)
  22. Won, J.P., J.Y. Lee, C.G. Park and S.K. Park, 2007, Optimum mix proportion of latex modified repair mortar for agricultural concrete structures, *Journal of KSAE*, 49(2), pp. 35~41.(in Korean)
  23. Won, J.P., J.Y. Lee, C.G. Park, S.W. Lee and W.Y. Kim, 2007, Optimum mix proportions of latex modified repair mortar for agricultural underwater concrete structures, *Journal of KSAE*, 49(3), pp. 43~50.(in Korean)
  24. Won, J.P., J.Y. Lee, C.G. Park, S.K. Park and W.Y. Kim, 2007, Shrinkage and durability characteristics of latex modified repair mortar for agricultural concrete structures, *Journal of KSAE*, 49(5), pp. 23~30.(in Korean)
  25. Yeon, K.S., M.K. Joo, H.J. Lee, J.X. Kim and C.W. Lee, 2006, Drying shrinkage and strength properties and strength properties of polymer-modified mortars using redispersible polymer powder, *Journal of KSAE*, 48(1), pp. 51~60.(in Korean)
  26. Yunping Xi, Naser Abu-Hejleh, Andi Asiz and A. Suwito, 2004, Performance evaluation of various corrosion protection systems of bridges in colorado, Report No. CDOT-DTD-R-2004-1, Colorado Department of Transportation Research Branch, Colorado Department of Transportation, 4201E. Arkansas Ave, Denver, Colorado.