



프리스트레스트 콘크리트용 강연선을 위한 부식방지 공법의 보호성능 평가

윤인석^{1)*} · 강현구²⁾ · 신형엽³⁾

¹⁾인덕대학교 건설정보공학과 교수 ²⁾서울대학교 건축학과 교수 ³⁾서울대학교 건축학과 박사과정

Evaluation of Corrosion Prevention Systems of Strands for PSC Structures

In-Seok Yoon,^{1)*} Thomas H. K. Kang,²⁾ and Hyeong-Yeop Shin³⁾

¹⁾Professor, Department of Construction Information Engineering, Induk Univesity, Seoul 01878, Rep. of Korea

²⁾Professor, Department of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Rep. of Korea

³⁾Graduate Student, Department of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Rep. of Korea

ABSTRACT Corrosion of prestressing tendons is closely related to the safety and durability of prestressed concrete. Because PSC strands under large tension stress are vulnerable to corrosion, choice of corrosion prevention systems is quite important. The current study investigated electrochemical estimation and metal loss reduction rate so that the most effective system to prevent steel corrosion can be decided. The types of test specimens are as follows: (a) bare strand, (b) standard cementitious grouting, (c) grease, (d) double protection of grease and grouting, (e) double protection of HDPE sheath after coating with grease, and (f) triple protection of HDPE sheath after double protection of standard cementitious grouting and coating with grease. Acceleration experiments were divided into two types: those with only chloride solution, and those with chloride solution with dissolved oxygen. As for the experimental results, the HDPE sheath had an excellent anti-corrosion performance compared to other methods. However, tendon protected by grouting showed a decreasing corrosion current density with elapsed time, while tendon protected by grease showed a rising trend. In particular, the grease showed poor corrosion protective performance under chloride solution and dissolved oxygen. This was in part due to physical damage of the grease coating by oxygen bubbles. Finally, corrosion was initiated at corrosion current density of 0.15 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ under chloride solution, and at 0.17 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ under chloride solution and dissolved oxygen.

Keywords : strand corrosion, grouting, grease, HDPE, corrosion current density

1. 서 론

프리스트레스트 콘크리트는 인장강도 1,860~2,360 MPa의 고장력 강으로 된 강연선, 또는 인장강도 1,000~1,400 MPa의 고장력 강봉이 사용되며, 프리스트레스트 강재는 그 인장 강도의 60~80 %에 해당하는 응력으로 상시 인장 상태에 놓이게 된다. 프리스트레스트 콘크리트 부재는 균열이 발생하지 않으며, 균열이 발생하더라도 하중이 없으면 즉각적으로 아물게 되는 특성이 있으므로, 부식에 대한 염려는 철근 콘크리트 부재보다 덜하다. 그러나 강연선이 부식된 프리스트레스트 구조체는 극한하중에 도달하기 전에 강연선들의 조기 파단에 의해 휨강도가 급격히 감소될 수 있다.

일반적으로 철근콘크리트 구조체는 철근의 부식 유무에 따라 구조물의 수명단계를 철근의 부식이 시작되기 전까지

의 잠복기간과 부식 이후의 진전기 등, 2단계로 나눌 수 있다 (Tuutti 1979). 그러나 프리스트레스트 콘크리트 구조체는 Fig. 1과 같이 응력부식 균열에 의한 강연선의 파괴를 토대로 (i) 균열시작 시기, (ii) 느린 균열 진전기, (iii) 임계상태까지 빠르게 진행되어 갑작스러운 취성파괴에 도달하는 급속 진전기의 3단계로 구분된다(Brown 1968). 이는 조직이 취약해지는 응력 부식(stress corrosion) 현상 및 수소 취화(hydrogen embrittlement)가 주요 원인으로서, 강연선의 강도가 높을수록 더욱 취약하다(Fricker and Vogel 2006; Mathy et al. 1996; Revie and Uhlig 1985). 부식공학에서 응력 부식은 부식환경, 금속의 예민성, 인장응력의 3가지 조건이 만족되었을 때 발생하는 것으로 알려져 있으나, 때로는 구조체의 종류에 따라 시간과 사용조건이 서로 결합하여 예외적 손상을 초래할 수 있다(Jones 1995). 대표적인 예가 프리스트레스트 강연선이다. 강연선 표면의 공식(pit) 선단(tip)은 Fig. 2와 같이 활성화된 양극처럼 분해작용이 발생하는데, 공식 선단의 높은 응력으로 소성변형이 유발한다. 공식 선단은 양극으로 존속되고 분해작용은 빠른 속도로 지속하여 궁극적으로 응력과 빠른

*Corresponding author E-mail : isyoon@induk.ac.kr

Received April 19, 2019, Revised July 31, 2019,

Accepted October 05, 2019

©2019 by Korea Concrete Institute

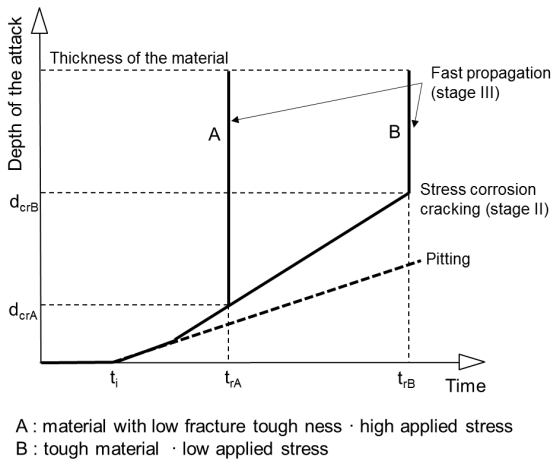


Fig. 1 Process of phenomena that lead to the initiation and propagation of hydrogen-induced cracking and eventual failure of A and B having different fracture toughness (d_{cr} =critical flaw size, t_i =initiation time, t_r =time of failure)

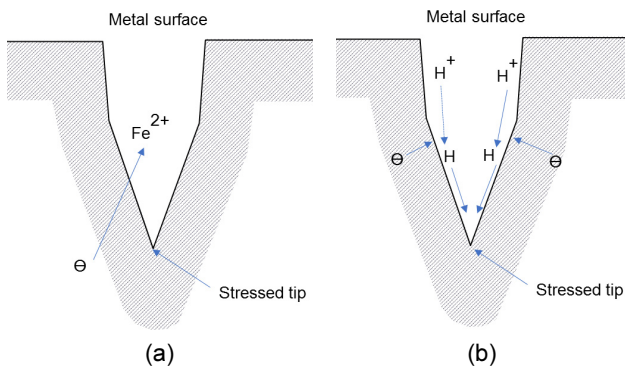


Fig. 2 Schematic description of corrosion process taking place at tip of pit or crack in a stressed strand leading to its embrittlement, (a) stress corrosion cracking, (b) hydrogen embrittlement (Bentur et al. 1997)

부식의 조합이 균열을 유발하고 거시적으로 시각적 경고 없이 구조체의 급작스러운 취성과괴로 연계된다. 이 과정은 Fig. 1의 3번째 단계로서 그림처럼 매우 급속히 진전되기 때문에 철근콘크리트보다 계획 및 설계 단계에서부터 부식에 대한 더욱 세심한 주의가 요구된다.

한편, 구조체 내 강연선은 부착유무에 따라 강연선과 덕트 사이의 공간을 그라우팅으로 채우는 부착계와 그리스나 왁스로 채우는 비부착계 등, 2가지로 대별된다. 부착계 강연선은 고알칼리 환경을 조성하여 강연선 표면에 강력한 내식성 산화피막을 형성하는 방식의 마지막 방호막이지만, 물과 산소에 노출된 그라우팅 내 염소이온 또는 탄산화로 인하여 부식이 시작될 수 있다. 일단, 부식이 시작되면 부식속도는 산소의 유입속도, 수분량, 전기저항성, 그라우팅의 pH, 염소농도 등과 같은 다양한 요인에 의존된다(FHWA 2014). 특히, 강연선을 조기에 부식시키는 주요 요인은 염소이온 또는 황산이온, 미세균열, 불충전된 공극, 산소와 습도 등이다(FHWA

2012; Trejo et al. 2009). 최근, 서울시 정릉천 고가의 경우는, 폴리에틸렌 관 내부 강연선 부식을 방지하기 위해 채워 넣는 그라우팅 충전이 불충분한 상태에서 그라우팅의 물 비율이 높아 블리딩이 발생하였고, 그라우팅 후 에어벤트(공기구멍)가 제대로 밀봉되지 않아 염소이온을 함유한 노면수가 침투하여 부식되었다(Jeon 2016). 최근의 연구는 불충분하게 충전된 그라우팅에서 시멘트 중량대비 0.4%, 충전이 잘된 경우에는 0.6%의 염소농도에서 각각 부식이 시작되며, 그라우팅 충전 품질과 무관하게 0.8%의 염소농도에서 부식진전이 진행되는 것으로 보고된 바 있다(FHWA 2014). 그러나 시멘트 중량대비 0.4%는 일반 철근콘크리트 구조물에서 보편적으로 간주되는 임계 염소이온양으로서, 고인장 응력이 상시 인가되는 강연선은 이보다 더 낮은 염소이온양에도 부식될 것임에 틀림없다(Rafols 2012). 따라서, 프리스트레스트 콘크리트 구조체에서는 강연선의 부식 방지는 내구성 향상의 핵심적인 기술이며, 높은 응력이 인가된 강연선은 더욱 부식에 취약하므로, 효과적인 부식 제어 공법의 선정 및 개발은 대단히 중요하다.

강연선의 부식을 제어할 수 있는 대표적 방법으로 a) 에폭시 도막된 강연선, 갈바나이즈된 강연선, FRP 복합 강연선 등과 같이 내식능력이 향상된 대체재, b) 부식이 안 될 뿐만 아니라 불침투성 환경을 제공하는 고밀도 고분자 계열 덕트의 사용, c) 고성능 시멘트 그라우팅 등으로 쉬스와의 공간을 채우거나, d) 왁스 또는 그리스 등의 유성물질을 도막하여 유해물질을 차단하는 공법 등이 있다(ACI Committee 222 2014). 강연선의 부식을 제어하기 위하여 설계 및 시공단계에서 부착식 그라우팅을 하는 것이 보편적인 방법으로 간주된다. 그러나 부재 전단면에 걸쳐 덕트 내부를 균질하게 그라우팅하는 것이 어려울뿐더러, 그라우팅 자체에 미세균열이라도 존재할 수 있고, 더욱이 강연 심선과 측선 간 사이의 공간에 과다한 블리딩 수가 유입되는 침지효과 및 외부에서 염소이온이나 수분과 같은 유해물질이 강연선간 잔여공간을 따라 강제 전체에 부식을 유발할 수 있다(Perme et al. 2016; Salas et al. 2004).

그래서 본 연구는 강연선의 부식보호를 위한 부착식 및 비부착식 방법 들을 엄선하여 강연선에 대한 방식 효과를 규명하고자 한다. 본 연구는 향후, 프리스트레스트 공법이 적용되는 원전 격납 건물, 교량, 일반 건축물 등 다양한 건설 분야에서 올바른 공법 선정을 위한 기초적 지표로 활용 가능하며, 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 내구성 향상과 품질 향상을 위한 지침의 확립 등에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험개요

2.1 시험편 제작

사용된 시험편은 Fig. 3과 같다. 시험편 종류별로 6개, 총 36개의 시험편을 제작하였으며, 시험편 종류별 3개 시험편은 염소이온에 의한 부식 촉진 실험에, 나머지 3개 시험편은 염소이

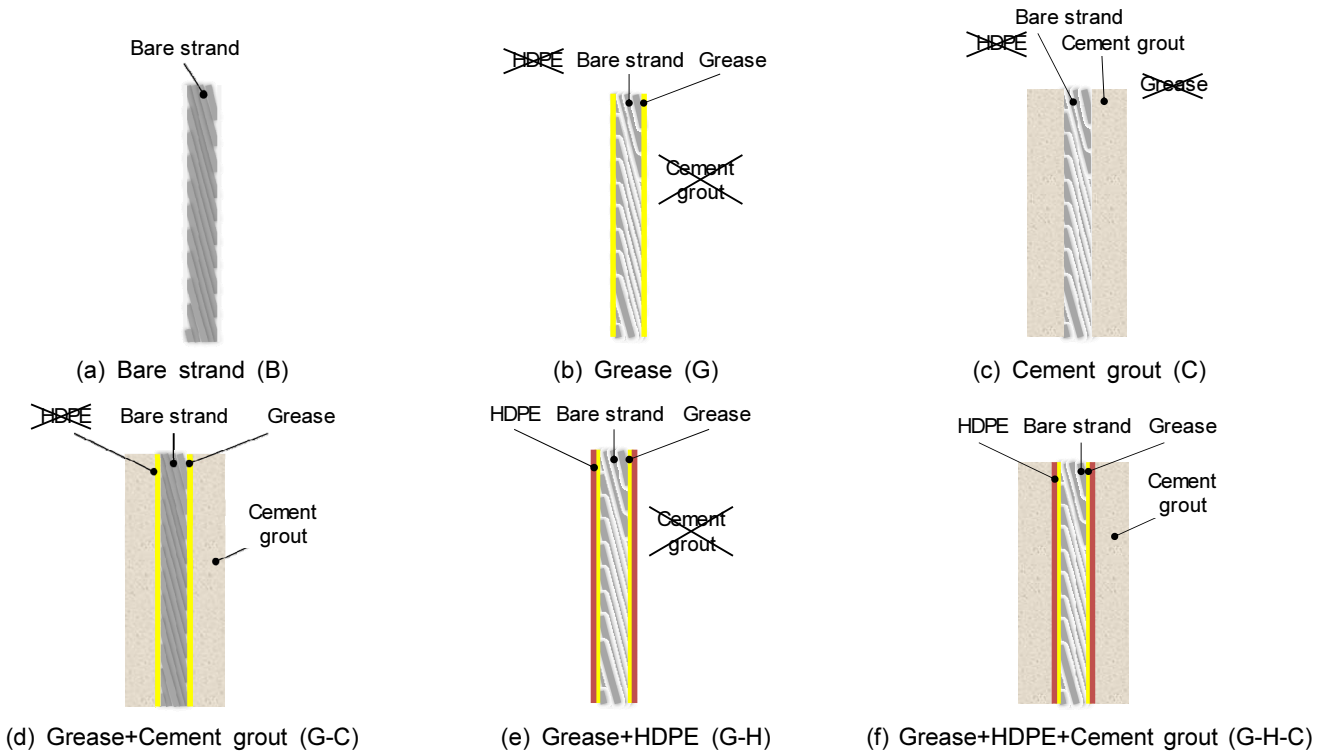


Fig. 3 Specimens for corrosion-prevention system

Table 1 Properties of materials

Seven-wire strands		
Strand properties	Section area (mm ²)	151.4
	Weight (kg/m)	1.192
	Diameter (mm)	15.83
Chemical composition (%)	Fe	98.17
	C	0.82
	Mn	0.73
	Si	0.25
	Cu	0.02
	P	0.01
	S	0.01
Cement grouting		
w/c		0.33
HRWR (%)		3.0
VMA (%)		0.5
Setting retarder (%)		0.5
HDPE plastic sheath		
Density (g/cm ³)		0.992
Thickness (mm)		1.09

온과 용존 산소(dissolved oxygen, DO)에 의한 부식 촉진 실험에 사용하였다(Yoon et al. 2019). Fig. 3(a)는 공칭 직경 15.7 mm 7연선(Grade 270)(ASTM A416 2016)인 강연선 시편(bare strand, B)으로서 보호공법이 전혀 적용되지 않은 시험체이다. 단면적, 중량 및 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Fig. 3(b)는 강연선을 그리스로만 코팅한 것이며, Fig. 3(c)는 시멘트계 표준 그라우팅된 부착식 공법을 적용한 것이다. 원형 실린더형 파이프로 몰드를 만들고 정중앙에 강연선을 거치시킨 후 그라우팅하였다. 이때 피복두께는 15 mm이며 그라우팅의 배합은 Table 1과 같다. 그라우팅은 28일간 기중 양생하였고 이후 부식실험을 개시하였다.

Fig. 3(d)는 강연선의 표면을 그리스(grease)로 코팅하고 시멘트계 표준 그라우팅된 시험편으로서 피복두께는 Fig. 3(c) 시험체와 동일하게 15 mm이다. Fig. 3(e)는 강연선을 그리스로 코팅하고 고밀도 폴리에틸렌 피복재인 HDPE 쉬스로 비부착식 보호공법을 적용한 것으로, HDPE 쉬스의 물성은 Table 1과 같다. Fig. 3(f)는 이상의 보호공법을 모두 적용한 것으로서, PSC 강연선을 그리스로 코팅하고 HDPE 쉬스 적용 후, 15 mm 두께로 표준 그라우팅한 3중 비부착식 보호공법을 적용한 것이다. Fig. 3(a)의 B 시험편을 제외한 모든 시험편은 강연선 단부가 기중 및 부식셀 내 용액에 노출되지 않도록 시험편의 양끝단을 에폭시로 밀봉하였다.

2.2 부식셀의 구성

PTI M55.1-12 Appendix B(PTI 2012)의 가속부식시험법을 참고로 Fig. 4와 같은 실험장치를 구성하였는데, 부식 셀 내에 염소이온 농도는 증류수에 염화나트륨을 혼입하여 5%로 조성하였다. 또한, 실험은 2 시리즈로 나뉘는데 산소의 유입이 있는 것과 없는 것으로 나뉘어 진행되었다. 산소의 유입밸브를 열은 후, 용존 산소 측정기로 용존 산소가 21 ppm이 조성되었음을 확인하였다.

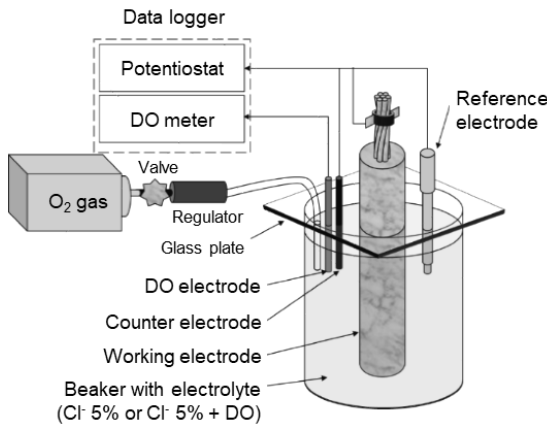


Fig. 4 Accelerated corrosion test set-up

2.3 부식도 평가방법

2.3.1 전기화학적 부식도 평가

다양한 부식보호공법을 적용한 시험편이 부식셀에서의 전기화학적 반응을 살펴보고자, 전기화학적 부식도 평가를 수행하였다. 강연선의 부식을 전기화학적 방법에 의하여 정량적으로 측정하기 위하여 분극저항법을 적용하였다. 분극저항법은 금속의 마이크로 셀과 메크로 셀을 양측 다 측정가능한 방법으로서, 강연선의 분극 저항은 금속이 자유부식전위 E_{cor} 로부터 분극될 때 인가 전압 ΔE 와 전류 변화 Δi 간의 비율로 정의된다(Andrade and González 1978). 식 (1)과 같이 전위-전류의 기울기로부터 분극이 결정되는데, 이때 i 는 전류밀도이다.

$$R_p = \left(\frac{\Delta E}{\Delta i} \right)_{\Delta E \rightarrow 0} \quad (1)$$

본 연구는 분극저항법에 기초한 부식도 측정을 위하여 정전위방법을 구현하였다. 카운터 전극으로는 흑연 막대, 기준 전극으로 카로말 전극을 각각 이용하였고, 작용 전극은 강연선 시험체이다. 조성된 전극들은 정전위장치에 연결하였고, 단기간 전류량이 인가됨에 따라 작용 전극의 전위가 측정된다.

전류-전압 곡선의 선형 범위는 철근의 경우 부식 전위의 20~30 mV이며, 매우 부식속도가 높을 경우에는 100 mV의 범주에서도 선형으로 알려져 있으나(Polder et al. 1993), 강연선에 대해서는 이에 대한 범위를 다룬 연구가 부족하다. 인가 전류의 범위가 지나치게 크면 전류로 인한 부식이 발생하여 실험 결과에 영향을 줄 수 있어, 본 연구에서는 전류로 인한 부식을 무시할 수 있는 수준인 오픈회로 전위 E_{oc} 대비 -10~+10 mV의 전류를 인가시켰다.

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (2)$$

여기서, i_{corr} : 부식전류 밀도($\mu A/cm^2$),

B : Stern-Geary 상수,
 R_p : 분극저항($k \cdot cm^2$)이다.

2.3.2 강연선의 중량감소를

부식실험 전후, 강연선의 무게를 측정하여 중량감소율을 측정하였으며, 이때 측정감도는 0.1 mg 수준이다. 측진 실험 종료 후 시험편 내 강연선을 채취하고, 부식제거 용액을 제조하여 강연선을 침지하고 부식물을 수지성 브러쉬로 제거하였으며 이 과정은 ASTM G1(ASTM G1-90 1999)을 참고하였다. 부식용액은 HCl 1 l에 삼산화안티몬(Sb_2O_3) 20 g, 염화제일주석($SnCl_2$) 50 g을 혼합하였다. 강연선의 중량감소량(ML)은 다음과 같다.

$$ML = W_o - W_c \quad (3)$$

여기서, W_o : 부식실험 전 강연선 무게,

W_c : 실험종료 후 부식물 제거된 강연선 무게이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 강연선의 부식전류밀도

Fig. 5는 재령별 평균적 부식전류밀도를 구한 결과이다. 염수로부터 어떤 보호공법도 적용하지 않은 강연선은 높은 부식전류밀도가 측정되었는데, 측진실험 15일 만에 $80 \mu A/cm^2$ 이상으로 상당한 수치를 보였다. 그러나, 부식방지 공법을 적용한 다른 시험체는 비교적 경미한 부식속도를 보였는데, 그리스 및 시멘트 그라우팅을 각각 적용한 G와 C 시험편은 대체로 거의 대등한 수준의 부식전류밀도를 보였다. 이러한 경향은 30~60일이 경과하면서도 그 추이가 비슷하였다.

염수와 용존 산소에 의한 부식 측진실험에서는 강연선만으로 측정된 B 시험편은 부식전류밀도가 매우 높게 상승하여 측진 2주 만에 $200 \mu A/cm^2$ 내외에 도달하였는데, 이는 Fig. 5의 염소이온으로만 부식된 강연선과 비교하면 3배 규모의 부식속도이다. 따라서, 염수 내 용존 산소가 존재하면 매우 가혹한 부식환경이 조성되어 단기간 내에 효율적인 부식성능 평가에 유효할 것으로 생각된다. 이온과 기체의 확산속도를 비교해보면 약 10,000배 수준으로 산소가 염소이온의 확산속도보다 매우 빠르므로 염수에 존재하는 용존 산소량을 증가시키면 시험편에 침투하여 강연선의 부식을 효과적으로 촉진하는 실험 설계가 가능할 것으로 생각된다(Cussler 2009). 또한, 염수 침지 실험결과와 대비하여 염수와 용존 산소에 의한 실험에서 부식전류밀도가 주목할 만하게 상승한 것은 그리스만으로 도막 처리된 G 시험편이다. 이는 산소가 포가 국부적으로 그리스 도막을 물리적으로 타격 손상시켜서 그리스 본유의 도막보호성능을 저해시켰기 때문으로 생각된다.

한편, 시간에 따른 거동 추이도 관찰하였는데, 이는 시험편별 추이와는 다소 상이하였다. 염수에 의한 강연선의 부식

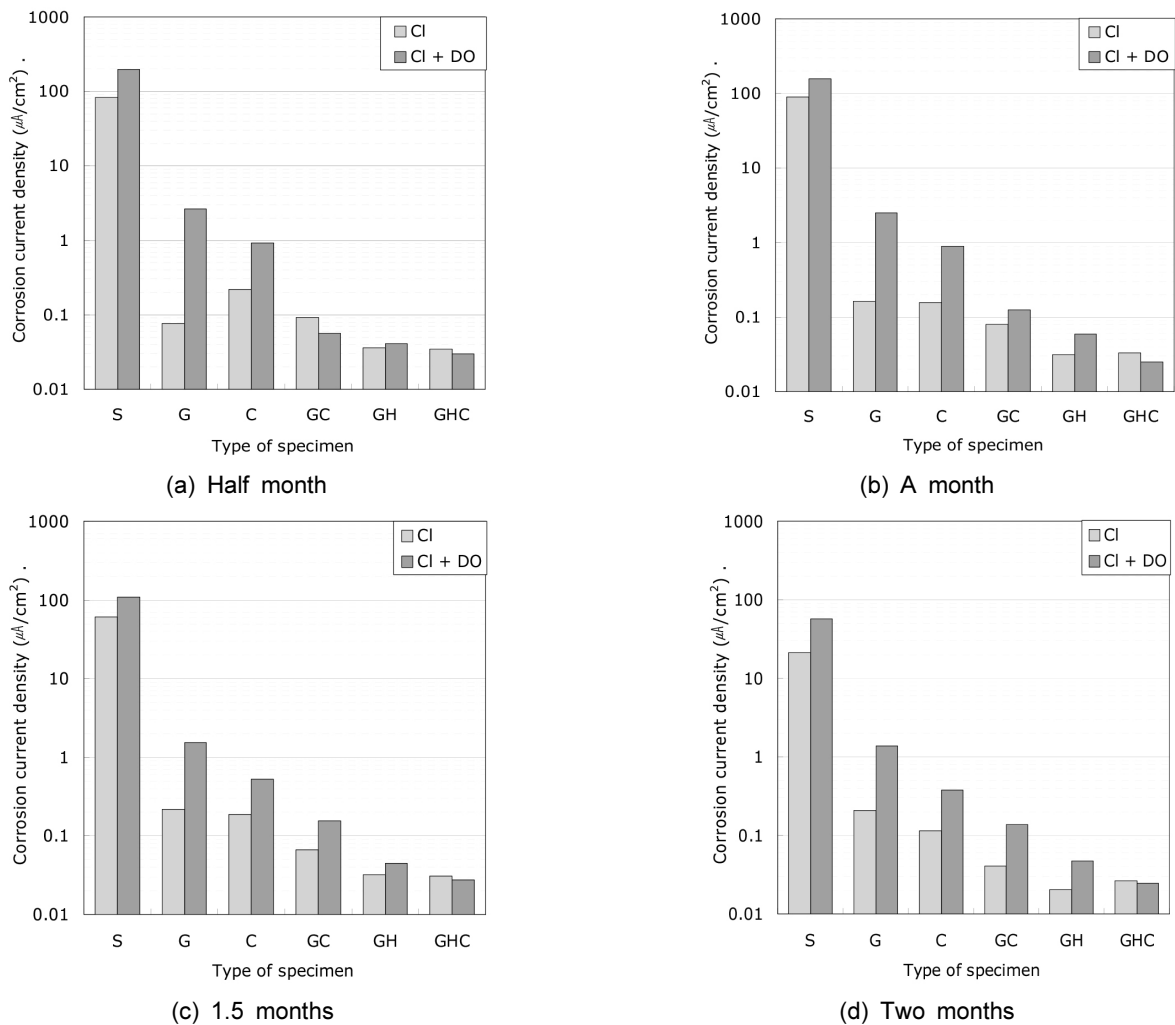


Fig. 5 Corrosion current density of tendon with elapsed time

실험에서는, 그리스로 도막을 형성한 것은 시간이 경과하면서 부식전류밀도가 상승하는 추이를 보인 반면, 시멘트 그라우팅을 적용한 시험편은 시간에 따라 감소하는 경향이 관찰되었다. 이는 그리스가 초기에는 효율적으로 염소 유입을 차단해주지만, 시간이 지나면서 유입을 허용하기 때문으로 추정된다. 그러나, 그리스가 갖는 유해 이온에 대한 차단효과의 지속성은 이온의 농도 및 그리스의 종류와 도막 두께 등에 따라 다를 수 있으므로, 향후 논문에서 이를 지속해서 다룰 예정이다. 한편, 시멘트 그라우팅을 적용한 시험체는 표면에 미세한 균열이 존재하였는데, 이를 실 구조물의 시공성과 동일한 상황으로 간주하여 실험하였다. 부식반응에서 음극과 양극 거동의 차이는 강연선의 표면상태와 관련이 있다. 경화된 그라우팅 표면의 미세균열을 통해 염소이온이 빠르게 침투하여 부식이 진행되었지만, 시간이 경과하면서 강연선 표면의 부식층이 추가적인 염소이온의 유입을 일시적으로 차단하여 부식전류밀도가 다소 감소한 것으로 생각된다. 만일, 현장에서 그라우팅에 미세균열이 존재하지 않도록 우수한 기술을 도입하고 정성 들여 시공한다면 시멘트 그라우팅은 그리스보다 방식효과가 뛰어날 것으로 판단된다. 또한, HDPE 쉬스(고밀도 폴리에틸렌 플라스틱 쉬스)를 이용한

G-H와 G-H-C 시험편은 가장 낮은 부식전류밀도를 보여서 실험 범주 내의 시험체 가운데 가장 우수한 부식 보호능력이 있는 것으로 판단된다.

염수와 용존 산소에 의한 강연선의 부식의 시간적 추이를 관찰한 결과에서도 시험편별 추이와는 다소 상이하였다. G 시험편은 초기에는 부식전류밀도가 높았으나 30일이 경과하면서 다소 감소하는 경향을 보였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 손상을 입은 부위에서 이미 강연선 표면에 부식층이 형성되어 염소 및 산소의 유입에 일시적인 제어효과를 보인 것으로 생각된다. 시멘트 그라우팅 된 C 시험편도 시간 경과에 따라 다소 감소하는 추이를 보였으나, G 시험편의 그리스 보다는 염소 및 산소의 부식에 대하여 강연선을 잘 보호하였다. 이를 병행 적용한 G-C 시험편이 다음 순이었으며 HDPE 쉬스를 이용한 G-H와 G-H-C 시험편은 거의 유사한 수준으로 HDPE는 염소침투 및 산소 유입에 높은 차단성능을 보유하여 매우 우수한 부식 보호능력을 보였다. 그런데, HDPE는 절연성을 갖는 재료이기 때문에 전기화학적 평가를 수행하는데 합리적인 데이터를 기대하기 어려울 것으로 생각되었으나, 실질적으로는 낮은 수준의 부식전류밀도가 측정되었다. 이는 에폭시로 실링한 시험편의 상·하단에서 수용액이

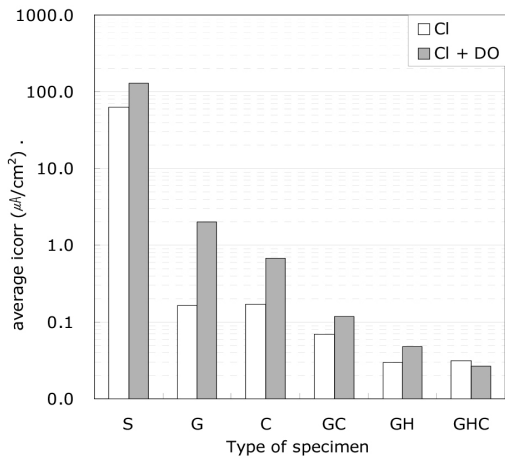


Fig. 6 Average i_{corr} value

침투하여 발생하였기 때문으로 생각된다. 그러나, G-H와 G-H-C 시험편의 결과를 비교해보면 추정할 수 있듯이, 일단 HDPE 쉬스를 사용하면 관외부를 시멘트 그라우팅 처리의 여부와 상관없이 HDPE가 매우 우수한 부식 보호효과를 갖는 것으로 생각된다.

Fig. 5의 그림을 토대로 각 시험편별 평균적인 부식전류밀도를 구한 것이 Fig. 6이다. 평균적인 부식전류밀도가 가장 높은 순으로 정리하면, 그리스 도막한 G 시험편과 시멘트 그라우팅한 C 시험편이 염수에 의한 부식 실험에서는 동일한 수준이지만, 용존 산소와 병행한 실험에서는 그라우팅한 것이 뚜렷하게 더 낮은 부식전류밀도를 보였다. 그리스와 그라우팅을 동시에 적용한 G-C 시험편이 다음 순이었으며, 가장 낮은 평균적인 부식전류밀도는 G-H와 G-H-C 시험편에서 관찰되었다.

3.2 강연선의 중량 감소

Fig. 7은 실험종료 후 강연선 표면의 부식물을 제거하고 측정된 감소된 중량을 정리한 결과이다. 어떤 부식 보호공법도 적용하지 않은 B 시험편은 높은 중량감소율이 측정되었는데, 염소만으로 부식된 것보다 산소와 동반작용시 2배에 상응하는 결과를 보였다. 그러나 HDPE 쉬스를 처리한 G-H와 G-H-C 시험편은 염소 및 산소유입에 따른 차이가 거의 동일한 수준으로서, HDPE 도막이 이온 및 기체의 침투에 매우 효과적임이 입증되었다. 그리스와 그라우팅을 동시에 적용한 G-C 시험편은 염소만에 의한 부식량은 HDPE 쉬스를 사용한 것과 유사한 수준이지만, 산소까지 동반하는 복합적인 열화환경에서는 중량 감소량이 다소 크게 증가하였다. 무엇보다 그리스도 코팅된 G 시험편은 염소이온 침지대비 산소유입된 것이 20배에 달하는 매우 높은 중량 감소를 보였다.

이상의 실험결과를 토대로 강연선의 부식을 제어할 수 있는 효과적인 공법의 순으로, 시멘트 그라우팅 처리와 무관하게 HDPE 쉬스에 강연선에 그리스도 도막처리를 한 것, 그리스 처리된 강연선을 시멘트 그라우팅한 것, 시멘트 그라우팅

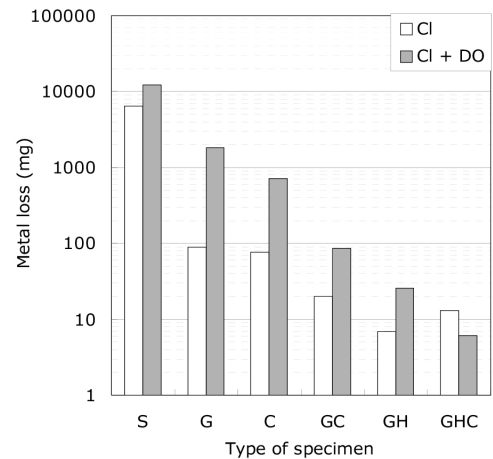


Fig. 7 Metal loss of strands

한 것, 그리스로 도막처리한 것의 순으로 나타났다. 따라서, HDPE 쉬스가 강연선의 내부식성능 향상에 매우 우수한 것으로 귀결된다. HDPE는 열가소성 수지로서, 내충격성 및 화학적 저항성이 높을 뿐만 아니라 내침투성도 우수하다. HDPE의 수분 및 산소투과율은 다른 고분자 수지 보다도 3~50% 이하의 낮은 수준인 148과 63,150 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ 로 각각 알려졌다(PPD 2019). 따라서, HDPE는 매우 우수한 내부식 성능이 기대되지만, 현장시공시 HDPE 쉬스 표면에서 발생할 수 있는 균열, 갈라짐과 같은 파손이 내부식성에 미치는 영향 및 내구성 확보를 위한 HDPE의 적당할 쉬스 두께를 산정하는 연구가 추가로 필요할 것으로 판단된다.

3.3 부식전류밀도 대비 중량감소

부식보호공법이 적용된 시험편이 염소이온 및 산소와 접촉하는 순간부터 즉각적으로 활성화되는 것이 아니라, 초기에는 보호되지만 이후 지속적인 촉진에 의하여 부식이 개시된다. 전기화학 반응에서는 반응경계면으로부터 이동하는 전자의 흐름으로 부식속도가 측정된다. 그래서 전자의 이동은 전류에 의하여 측정되고 전기화학 반응에서 전류와 반응물질량 간의 관계를 이용하여 부식 도래 시의 부식 전류밀도를 추정하였다.

먼저, 강연선의 부식 전류밀도와 중량감소의 상호관계를 패러데이 법칙으로부터 유도하여 부식 시작시기와 임계 부식 전류밀도를 도출하였다. 실험종료 후 중량 감소와 부식속도(CR)의 관계는 다음과 같다.

$$CR (\text{mm}/\text{year}) = k \frac{ML}{\rho \cdot A \cdot t} \quad (4)$$

여기서, ML : 강연선의 감소된 무게(mg),

k : 상수(87.6),

A : 강연선의 표면적(cm^2),

t : 부식 실험기간(hrs),

ρ : 강연선의 밀도(=7.85 g/cm^3).

이때, 패러데이 법칙으로부터 단면결손율과 부식전류밀도의 상관관계는 식 (5)와 같다(Broomfield 1997).

$$\begin{aligned} \text{Corrosion current density } 1.0 \mu\text{A}/\text{cm}^2 \\ = \text{Section loss } 1.1 \times 10^{-2} \text{ mm}/\text{year} \quad (5) \end{aligned}$$

순간적인 측정된 부식전류밀도를 고려하여 전체 실험기간 동안 강연선의 감소된 무게는 식 (6)과 같다.

$$ML = 4.3 \cdot 10^{-2} \rho \cdot A \int_{t_i}^{t_e} i_{corr}(t) dt \quad (6)$$

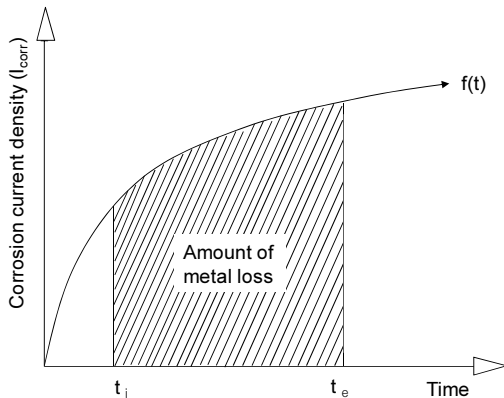


Fig. 8 Schematic concept to define the relationship between corrosion current density and metal loss

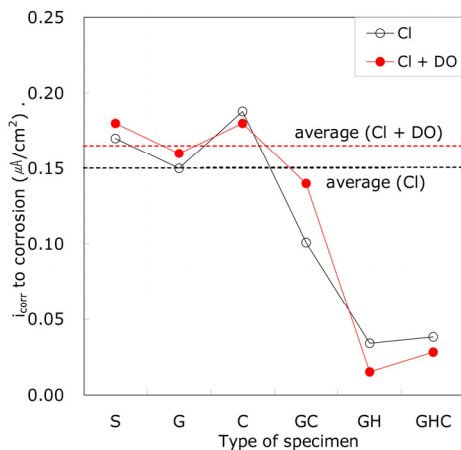


Fig. 9 Critical corrosion current density

Table 2 Corrosion current density vs. metal loss under chloride solution and dissolved oxygen

Specimen	Item	$i_{corr}(t) = at^3 + bt^2 + ct$			t_i (days)	i_{corr} to corrosion ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
		a	b	c		
B		5.8E-3	-5.9E-1	2.1E-1	0.009	0.18
G		0	-2.3E-3	1.5E-1	0.6	0.16
C		3.0E-5	-3.4E-3	1.1E-1	2	0.18
G-C		-1.0E-6	7.0E-5	3.2E-3	33	0.14
G-H		1.0E-6	-1.0E-4	4.6E-3	45	0.02
G-H-C		8.0E-7	-9.0E-5	3.0E-3	42	0.03

여기서, t_i : 부식개시 시간,
 t_e : 실험 종료시간이다.

강연선의 중량감소량과 시간의 함수로 표현된 부식전류밀도와와의 상관성은 Fig. 8과 같이 표현된다. 즉, 강연선의 중량감소량과 시간에 따른 부식전류밀도를 이용하여 부식개시시간 t_i 를 역으로 계산하고 부식이 시작되는 순간적인 부식전류밀도를 역산하여 Table 2에 정리하였고, 텐던부식을 유발하는 임계 부식전류밀도는 Fig. 9와 같다. 여기서, HDPE를 적용한 G-H와 G-H-C 시험편은 시험종료 때까지 부식이 진행되지 않은 것으로 간주하여 두 시험체를 제외하고 평균적인 임계 부식전류밀도를 추정된 결과이다. 염소이온만으로 부식된 것과 산소까지 병행하여 부식된 시험편의 추이는 다소 차이가 있었으나 전체적인 추이는 유사하였다.

Feliu et al.(1996)은 $0.10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이하의 부식전류밀도는 무시할 만하다고 하였는데, Broomfield et al.(1994)도 가드링 장치가 부착된 상태에서 같은 수치 이하가 측정되면 금속은 부동태 상태라고 추정하였다. 반면, Clear(1989)는 가드링 장치 없이 측정 시 $0.20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이하를 부동태 상태로 간주하였다. Bertolini et al.(2013)은 $2.0 \mu\text{m}/\text{year}$ 의 부식속도는 무시할 수 있다고 보고하였는데 이를 부식전류밀도로 환산하면 $0.20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 에 상응한다. 본 연구는 염소이온만으로 부식될 경우 평균적으로 $0.15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 염소이온과 산소의 병행 작용으로 부식된 경우는 $0.17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 의 부식전류밀도에서 부식이 시작되었으며, 이는 기존 연구와 유사하거나 다소 높은 수치이다. 향후 이 임계치는 강연선의 부식전류밀도를 산정하여 부식 여부를 추정할 때 활용될 수 있을 것이다.

4. 결 론

- 1) 염수로부터 어떤 보호공법도 적용하지 않은 강연선은 촉진실험 2주 만에 매우 높은 부식전류밀도를 보였지만, 부식방지 공법을 적용한 시험체는 비교적 경미하였다. 그리스 코팅 시험편은 시간이 경과하면서 부식전류밀도가 상승하였지만, 시멘트 그라우팅된 시험편은 시간에 따라 감소하였다. 그러나, 이는 산소 기포의 물리적 타격에 의한 그리스 도막 손상에 기인한다. 또한, 고밀도 폴리에틸렌 HDPE 쉬스를 이용한 시험편은

가장 우수한 방식능력을 보였다.

- 2) 염수와 용존 산소에 의한 강연선의 부식에서는 그리스만으로 도막 처리된 시험편에서 염수에 침지된 시험편 대비 부식전류밀도가 크게 상승하였다. 시멘트 그라우팅 된 시험편도 시간 경과에 따라 다소 감소하였으나, 그리스보다는 염소 및 산소의 부식에 대하여 잘 보호하였다. HDPE 쉬스를 이용한 것은 이 시험에서도 우수한 내부식 성능을 보였다.
- 3) 부식으로 인하여 감소한 강연선의 중량감소량과 시간의 함수로 표현된 부식전류밀도와의 상관성을 토대로 부식개시 임계 부식전류밀도를 산정한 결과, 염소이온만으로 부식될 경우 평균 $0.15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 염소이온과 산소의 병행작용으로 부식된 경우는 $0.17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 수준이었다.
- 4) 강연선의 부식전류밀도를 평균하여 구한 결과, 그리스 코팅된 시험체는 다른 공법에 비교하여 내부식성능이 다소 낮았던 반면, 가장 우수한 내부식성능을 보인 것은 HDPE 쉬스를 활용한 공법으로, HDPE 쉬스를 사용하면 상위에 시멘트 그라우팅을 하지 않더라도 텐던의 우수한 내부식성을 확보할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단과 한국수력원자력의 연구비 지원으로 수행되었습니다. (2018R1D1A1B07042819, 2015R1A5A1037548)

References

- ACI Committee 222 (2014) *Report on Corrosion of Prestressing Steels (ACI 222.2R-14)*. Farmington Hills, MI; American Concrete Institute (ACI).
- Andrade, C., and González, J. A. (1978) Quantitative Measurements of Corrosion Rate of Reinforcing Steels Embedded in Concrete Using Polarization Resistance Measurements. *Materials and Corrosion* 29(8), 515-519.
- ASTM A416 (2016) *Standard Specification for Low-relaxation, Seven-wire Steel Strand for Prestressed Concrete*. West Conshohocken, PA; ASTM International.
- ASTM G1-90 (1999) *Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens*. West Conshohocken, PA; ASTM International.
- Bentur, A., Diamond, S., and Berke, N. S. (1997) *Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice*. 1st edition. E & FN SPON, 64-65.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pederferri, P., Redaelli, E., and Polder, R. (2013) *Corrosion of Steel in Concrete - Prevention, Diagnosis, Repair*. 2nd edition. Wiley-VCH Publication, 73.
- Broomfield, J. P. (1997) *Corrosion of Steel in Concrete - Understanding, Investigation and Repair*. 1st edition. E & FN SPON, 72.
- Broomfield, J. P., Rodríguez, J., Ortega, L. M., and García, A. M. (1994) Corrosion Rate Measurements in Reinforced Concrete Structure by a Linear Polarization Device. *ACI Special Publication* 151, 163-182.
- Brown, B. F. (1968) The Application of Fracture Mechanics to Stress Corrosion Cracking. *Metallurgical Reviews* 13(1), 171-183.
- Clear, K. C. (1989) *Measuring the Rate of Corrosion of Steel in Field Concrete Structures (Transportation Research Record 1211)*. Washington, D.C.; Transportation Research Board, National Academy of Sciences.
- Cussler, E. L. (2009) *Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems*. 3rd edition. Cambridge, U.K.; Cambridge University Press, 117-130.
- Federal Highway Administration (FHWA) (2012) *Literature Review of Chloride Threshold Values for Grouted Post-Tensioned Tendons (FHWA-HRT-12-067)*. Washington, D. C.; FHWA. 1-16.
- Federal Highway Administration (FHWA) (2014) *An FHWA Special Study: Post-tensioning Tendon Grout Chloride Thresholds (FHWA-HRT-14-039)*. US DOT. McLean, TX; FHWA.
- Feliu, S., Gonzalez, J., and Andrade, C. (1996) *Electrochemical Methods for On-site Determinations of Corrosion Rates of Rebars, Techniques to Assess the Corrosion Activity of Steel Reinforced Concrete Structures (ASTM STP 1276)*. West Conshohocken, PA; ASTM International. 107-118.
- Fricker, S., and Vogel, T. (2006) Site Installation and Testing of a Continuous Acoustic Monitoring. *Construction and Building Materials* 21(3), 501-510.
- Jeon, S. M. (2016) *The Reason for the Defect of Jeongneungcheon Overpass is due to 'Corrosion of Strand'*. Newsis 1, 27 Oct. 2016, http://mediahub.seoul.go.kr/archives/1038585?tr_code=snews. Accessed November 2019.
- Jones, D. A. (1995) *Principles and Prevention of Corrosion*. 2nd edition. Saddle River, NJ; Pearson, 300-301.
- Mathy, B., Demars, P., Roisin, F., and Wouters, M. (1996) Investigation and Strengthening Study of Twenty Damaged Bridges: A Belgium Case History. *Bridge Management 3: Inspection, Maintenance and Repair. Papers Presented at the 3rd International Conference on Bridge Management*, Guildford, UK; 14-17 April 1996, University of Surrey, 658-666.
- Permeh, S., Vigneshwaran, K. K. K., and Lau, K. (2016) *Corrosion of Post-tensioned Tendons with Deficient Grout (Project BDV29-977-04)*. Final Report, Tallahassee, FL; FDOT Research Center.
- Polder, R., Tondi, A., and Cigna (1993) *Concrete Resistivity and Corrosion Rate of Reinforcement (TNO Report 93-BT-r0170)*. Delft, NL; TNO Delft.

- Polymer Properties Database (PPD) (2019) *polymerdatabase.com*. <http://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Permeability.htm>. Accessed November 2019.
- Post-Tensioning Institute (PTI) (2012) *Specification for Grouting of Post-tensioned Structures, Appendix B-standard Test Methods for Evaluation of Corrosion Protection Capability of PT Grouts (PTI M55.1-12)*. 3rd edition. Farmington Hills, MI; PTI.
- Rafols, J. C. (2012) *Corrosion of Post-tensioned Tendons Repaired with Dissimilar Grout*. MSC Thesis. University of North Florida, USA.
- Revie, R. W., and Uhlig, H. H. (1985) *Corrosion and Corrosion Control*. 3rd edition. Hoboken, NJ; John Wiley and Sons, 174.
- Salas, R. M., Schokker, A. J., West, J. S., Breen, J. E., and Kreger, M. E. (2004) *Concussions, Recommendations and Design Guidelines for Corrosion Protection of Post-tensioned Bridges (Research Project 0-1405-9)*. Texas DOT and the US Department of Transportation, McLean, TX; Federal Highway Administration (FHWA).
- Trejo, D., Im, S. B., Pillai, R. G., Hueste, M. B., Gardoni, P., Hurlbaeus, S., and Gamble, M. (2009) *Effect of Voids in Grouted Post-tensioned Concrete Bridge Construction: Inspection and Repair Manual for External Tendons in Segmental, Post-tensioned Bridges*. Austin, TX; Texas Transportation Institute (TTI).
- Tuutti, K. (1979) *Service Life of Concrete Structures - Corrosion Test Methods, in Studies on Concrete Technology*. Stockholm, Sweden; Swedish Cement and Concrete Institute (SCCI).
- Yoon, I. S., Shin, H., and Kang, T. H. K. (2019). Comparative Study on Performance of Corrosion Protective Systems for Post-tensioned Concrete Members. *ACI Structural Journal* 116(3), 273-284.

요 약 프리스트레스트 콘크리트 구조체 내 강재의 부식은 구조체의 안전성 및 내구성과 직결된다. 그래서 높은 인장응력이 가해지는 PSC 강재는 부식에 매우 취약하므로, 올바른 부식 보호공법의 선정 및 개발은 대단히 중요하다. 본 연구에서는 강연선의 부식방지에 효율적인 방식공법을 전기 화학적 기법 및 중량감소율을 측정하여 검토하였다. 시험편의 종류는 (a) 강연선, (b) 시멘트계 표준 그라우팅, (c) 그리스, (d) 그리스와 그라우팅의 병행, (e) 그리스로 도막 후 HDPE 도막의 2중 도막, (f) 그리스로 도막 후 HDPE 도막 및 재차 시멘트 그라우팅의 3중 도막 등, 총 6종류이다. 실험은 염수의 단일 촉진, 염수 및 용존 산소의 복합 촉진 등, 2종류로 나누어 실험하였다. 실험 결과에 의하면 타 공법대비 HDPE 도막 공법이 매우 뛰어난 부식제어효과를 보였다. 다음은 그리스와 그라우팅을 병행 적용한 것이며, 그라우팅과 그리스는 비슷한 수준이었다. 그러나 그라우팅은 시간에 따라 부식전류밀도가 낮아지지만, 그리스는 상승하는 추이를 보였다. 특히, 산소를 유입시켰을 때 이러한 추이가 관찰되었는데, 이는 산소 기포의 물리적 타격에 의한 그리스 도막 손상에 기인한 것으로 판단된다. 또한, 부식전류밀도와 중량감소의 상관관계를 통하여 염소이온만으로 부식될 경우 평균 $0.15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 염소이온과 산소의 병행작용으로 부식된 경우는 $0.17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 수준에서 부식이 시작되었다.

핵심용어 : 강연선 부식, 그라우팅, 그리스, HDPE 도막, 부식 전류밀도