

파괴하중의 20% 및 40% 인장조건에서 텐던 부식 진행 및 파괴하중 변화

류화성¹, 안기홍², 황철성³, 권성준^{4*}

Changes in Corrosion Progress and Ultimate load of Tendon Under 20% and 40% of Ultimate Loading Conditions

Hwa-Sung Ryu¹, Gi Hong An², Chul-Sung Hwang³, Seung-Jun Kwon^{4*}

Abstract: PSC (Prestressed Concrete) structures have been used widely for its engineering advantage with using total concrete area as effective compressive section. However tendon inside is exposed to such a high tensile stress that and more attentions should be paid for corrosion control. This work is for changing corrosion current and ultimate strength in tendon with increasing prestressing force in a constant corrosive condition. With increasing prestressing force, corrosion current, corrosion amount, and ultimate load are changed linearly. When prestressing force increases from 20.0 % to 40.0 %, corrosion current increases to 124.4 % and 168.0 % and ultimate load decreases to 87.8 % and 78.4 %, respectively. With inducing constant electrical potential, increasing corrosion current and reduction of strength are evaluated to be linearly related with increasing prestressing load.

Keywords: Corrosion, Tendon, Tensile stress, Corrosion current, Ultimate load, Prestressing force

1. 서 론

콘크리트 구조물은 압축응력에 강하지만 인장응력에 취약하므로 인장영역에서는 철근과 같은 보강재를 사용한 것이 매우 효과적이다. PS(Prestressed Concrete) 콘크리트 구조는 전단면적일 유효하게 압축단면으로 사용할 수 있으며, 자중을 경감시키고 고강도 콘크리트를 사용하므로 일반적인 대형 교량에 많이 사용되고 있다. 콘크리트 인장부의 인장력을 상쇄시키기 위해 고강도 텐던이 사용되고 있으며, 보통 60~65%수준의 높은 인장응력을 항상 받고 있다(Yoon, 2013; Nation Standard of Canada, 2000). 이러한 텐던은 보통 슈스 안에 촌치되며 그라우트를 주입하여 부식을 제어하고 콘크리트와의 일체성을 확보하게 되는데, 그라우트 주입이 불량하거나 슈스 내부의 공기를 제어하지 못할 경우, 산소의 유입이 활성화되고 이로 인해 부식이 발생하게 된다(Yoon, 2013; Nation

Standard of Canada, 2000). 특히 높은 인장응력에 노출되어 있는 텐던의 경우 인장하중 변화에 따라 부식속도가 증가하게 된다. 이는 동일한 매질이라 하더라도 응력이 높은 경우 매질이 느슨하게 되며 같은 조건에서 전하의 이동이 빨라지므로 부식속도가 증가하는 것이다.

국내외의 많은 연구에서 이미 텐던 부식으로 인하여 많은 문제점들이 보고되고 있으며, 이러한 문제점은 교량의 대대적인 보수 및 보강으로 이어지고 있다(Halsall et al., 1996; Woodward and Williams, 1988). 국내외의 시방서에서도 이러한 PS 텐던의 부식가능성을 고려하기 위하여 콘크리트 사용시 혼입 염화물량을 일반 철근보다 낮게 권고하고 있다(JSCE Guidelines for Concrete, 2007; ACI 318-11, 2011; ISO 15630-3, 2010). 부식이 발생한 텐던은 PS 거더의 경우 내력저하 뿐 아니라, 사용 중에 발생하는 균열특성이 바뀌게 되고 사용성의 저하를 야기한다(Yoon, 2013; Kim et al., 2007). 최근 들어 콘크리트에 매립된 텐던의 부식발생을 레이더 기법(Shuxian et al., 2017), AE(Acoustic Emission)(Youn et al., 2005(a); 2006(b)), 적외선 화상평가(IR thermography)와 같은 비파괴 기법으로 감지 및 평가하려는 시도가 지속적으로 수행되고 있다(Clemena et al., 1978; Kwon and Park, 2012). 일반 철근을 사용한 부재에 대해서는 자연전위를 이용하여 프리스트레싱 수준에 따라 부식특성을 수행한 연구는 있으나(Fumin et al., 2011), 부식량이 매우 작은 수준이어서 최종 파단시의 하중 변화를 확인할

¹정회원, (주)한양이엔씨 대표이사, 공학박사

²정회원, 한국건설기술연구원 전임연구원

³정회원, 가천대학교 토목환경공학과, 교수

⁴정회원, 한남대학교 건설시스템 공학과, 부교수, 교신저자

*Corresponding author: jjuni98@hannam.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Hannam University, Daejeon, 34430, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 8월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

수 없었다.

본 연구에서는 실제로 가장 많이 사용되고 있는 15.3 mm 텐던을 이용하여 특수 제작된 지그에 설치하였다. 이후 일반 조건과 파괴하중의 20 및 40%수준을 가력하였으며, 하중인가 상태에서 촉진부식실험(ICM: Impressed Current Method)을 24시간동안 수행하였다.

본 논문에서는 동일한 조건에서 전압을 인가하였으므로 하중을 가하지 않은 조건과 하중 인가수준에 따른 상대적인 부식량 및 파괴하중의 비교가 분석된다.

2. ICM(Impressed Current Method)을 이용한 촉진부식실험

해안환경에서 철근 부식은 염화물 이온의 침투, 수분이동, 산소의 확산을 통하여 발생하는데, 수년 이상의 노출이후 부식이 발생하게 된다(Broomfield, 1997; RILEM, 1994; Kwon et al., 2007). 부식으로 인한 내하력 저하를 평가하기까지의 자연 상태에서의 폭로 실험은 매우 긴 시간을 요구하므로 본 연구에서는 Fig.1과 같이 ICM을 적용하여 촉진부식실험을 수행하였다. ICM을 통한 촉진부식실험방법은 기존연구에서 채택하여 사용되고 있으며, 부식에 의한 재료 및 구조물의 내력변화, 형상변화 연구에 유효한 방법으로 알려져 있다(Kwon and Park, 2012; Sakurada et al., 2008; Beak et al., 2012).

이온 교환에 의해 발생하는 철의 부식은 식 (1)과 같은 Faraday 법칙에 따른 다고 알려져 있다(Kwon and Park, 2012; Sakurada et al., 2008).

$$M = \frac{c}{zF} \int q dt \quad (1)$$

여기서, M 은 부식량(mol), z 는 철의 이온수(= 2), F 는 Faraday의 수(= 96,500), q 는 전류(A), t 는 측정시간 (sec), c 는 실험상수이다.

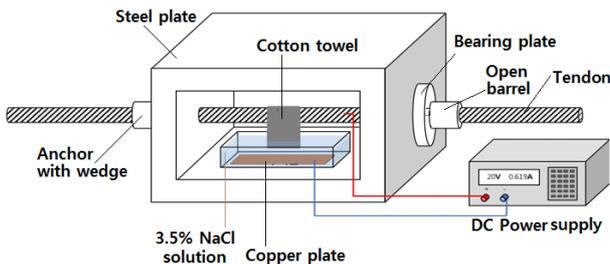


Fig. 1 Schematic diagram for ICM

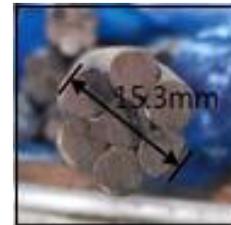
3. 텐던 긴장 및 촉진부식 실험 계획

3.1 고정 프레임 설치 및 재하

텐던에 긴장력을 가하기 위해 특수 강재 프레임을 제작하였으며, 유압잭과 로드셀을 사용하여, 최대인장하중의 20.0 및 40.0%수준의 긴장력을 도입하였다. 전원을 직접 텐던에 연결하게 되므로, 로드셀 및 데이터 로거에 전류가 유도되는 것을 방지하기 위해서 로드셀 접촉부위에는 고무판을 장착하였다. 초기에 하중을 재하한 뒤 헤드 앵커를 정착하였으며, 슬립에 의한 손실은 재가력후 정착 앵커를 밀어 넣어서 소요의 초기 하중수준을 가력하였다. Fig. 2에서는 시험에 사용된 2.0 m의 텐던의 사진과 하중 가력시의 실험 사진을 나타내고 있다.

3.2 촉진 부식 장치 및 부식량 측정

Fig. 2의 강제 프레임 내부의 촉진 부식셀을 Fig. 3에 확대하여 나타내었다. 염화물 수용액에 폭 75 mm의 면 수건을 침지하였으며, 텐던은 Power Supply의 양극에, 구리판은 염화물 수용액 내부에 존치한 뒤 음극에 연결하여 텐던 긴장부의 중앙 부위에 전기화학적 촉진 부식을 진행하였다. 수용액은 실제 해수와 같은 염화물 농도를 고려하기 위해 3.5% 농도의 NaCl 수용액을 사용하였다. 긴장력이 일정하게 유지되는 텐



(a) Photos for tendon section and feature



(b) Test setup for loading

Fig. 2 Test setup for load including for tendon and tendon feature

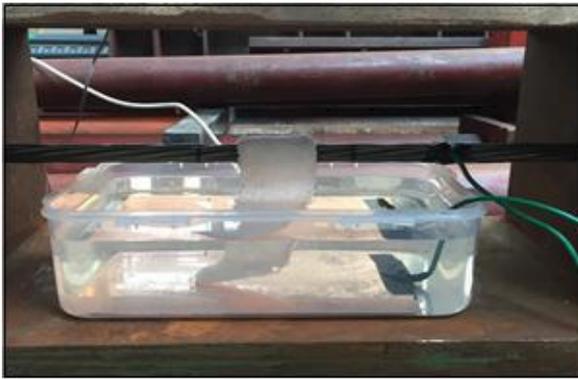


Fig. 3 Test setup for acceleration of corrosion



Fig. 4 Rust removal through citric acid solution

던에 대하여 부식을 유발시켜야 하므로, 텐던 중앙부에 먼 수건을 모세관 현상을 이용하여 충분히 함침시키고 촉진 부식 실험을 수행하였다. 각 인장 수준에 대하여 텐던을 2개를 고려하였으며, 그 평균값을 결과에 사용하였다.

직류 전압계는 M사의 제품을 사용하여 20 V의 전압을 인가하여 24시간동안 부식을 유도하였다. 텐던에 전원을 연결할 때는 납땜을 하여 7개의 스트랜드에 균등하게 전류가 통과하도록 설치하였으며, 국소부식을 유도하기 위해 일정한 폭(75 mm)의 먼수건을 사용하였다. 부식이 가해진 75 mm에 대하여 구연산 수용액에 침지하여 녹을 제거한 이후 부식감량을 측정하였다. Fig. 4는 부식 제거를 위한 구연산용액 침지사진을 나타내고 있다.

4. 부식량 평가 및 인장하중 평가

4.1 촉진 부식실험중 프리스트레싱의 변화

실험 시 15.3 mm 텐던의 최대하중은 27.0 tonf로 평가되었는데, 20 및 40% 수준의 하중을 부식실험 전에 가력하였다. 그러나 촉진부식실험을 수행하면서 점진적으로 하중의 손실이

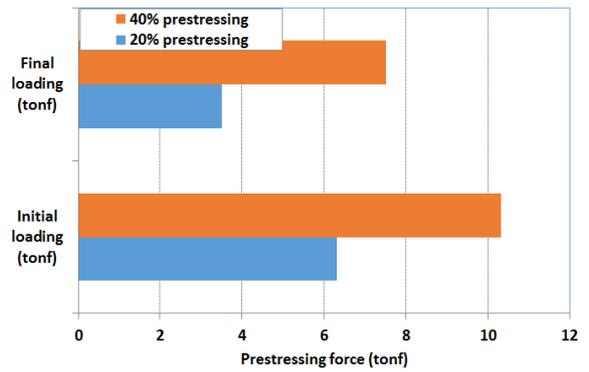


Fig. 5 Changes in Pre-stressing force with different loading level

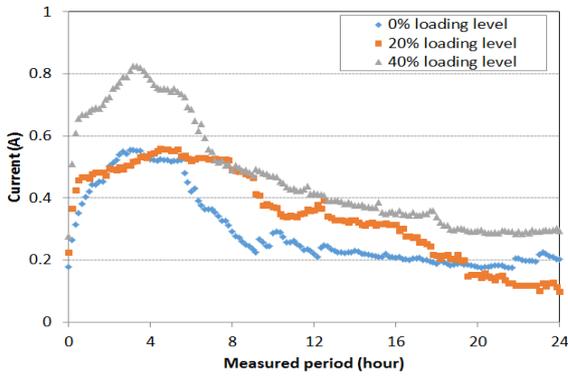
발생하게 되는데, 이는 부식의 증가에 따라 단면이 줄어들고 이에 따라 인장응력이 증가하면서 유효 프리스트레스트력이 감소하기 때문이다. Fig. 5에서는 초기의 재하하중의 평균값과 24시간 촉진실험이후의 측정하중의 평균을 나타내고 있다.

하중을 20% 수준으로 인가하기 위해 6.31 tonf을 인가하였으며, 1시간 이후 하중이 안정화 된 상태에서 촉진 부식실험을 수행하였다. 24시간 촉진실험이후의 측정값은 3.51 tonf로 55.6%의 유효율을 나타내었다. 40%수준의 인장력을 유도하기 위해서 10.32 tonf를 인가하였으며, 촉진실험 24시간 이후의 잔존 프리스트레스트력은 7.52 tonf으로 유효율은 72.8%로 평가되었다. 촉진부식에 의하여 응력손실이 크게 발생하여 24시간동안 크게 유효프리스트레스트가 감소함을 알 수 있다.

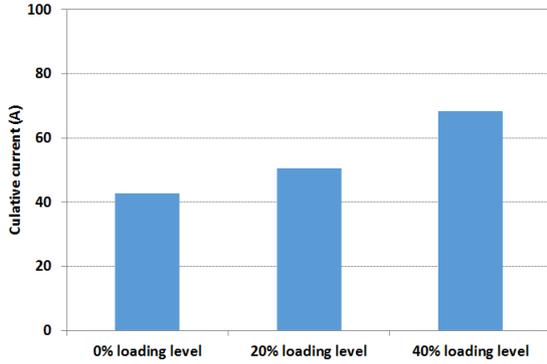
4.2 인장조건에 따른 부식량 평가 및 이론식과의 비교

4.2.1 부식전류의 변화

초기 인장하중이 증가할수록 동일한 전압에서 측정된 전류는 증가하였는데, 이는 다른 문헌에서의 연구와 동일한 경향을 나타낸다(Fumin et al., 2011). 전류 값이 초기에 증가하다가 이후 감소하는데, 몇 가지 원인을 추론할 수 있다. 먼저 재하된 하중이 손실되면서 전류가 감소하고, 국소부식된 부분에 발생한 녹들이 전선과 텐던이 접지된 부분에 영향을 주어 전류가 감소하게 된다. 이러한 경향은 기존의 연구에서도 많이 발생하고 있다. 또한 24 시간 동안의 일교차 역시 부식전류에 영향을 주게 된다. Fig. 6(a)에서는 하중 수준에 따라 20 V의 전압 인가 시 발생하는 부식전류의 변화를 나타내고 있으며, Fig. 6(b)에서는 총 누적 전류량을 하중 수준에 따라 나타내었다. 하중의 증가에 따라 누적전류는 증가하고 있으며, 하중 인가 전을 기준으로 20%인장의 경우 124.4%, 40%인장의 경우 168.0%의 부식전류량 증가율을 나타내었다. 부식전류량의 증가는 부식의 증가를 직접적으로 나타내고 인장강도의 저하를 야기한다.



(a) Current variation during accelerated corrosion test



(b) Cumulated current

Fig. 6 Measured current during accelerated corrosion test

4.2.2 이론과 실험에 따른 부식량 변화

Fig. 7에서는 이론 부식량과 실험에 의해 도출된 부식량의 변화를 나타내고 있다. 실험에 의한 부식값이 더 크게 발생하였는데, 텐던의 표본 길이인 75.0 mm 채취 시 강연선이 꼬여 있어서 정확한 길이 측정이 어려웠으며, 녹의 제거 시 모재의 일부가 같이 제거되어 질량결손이 실제보다 크게 평가되었다. 식 (1)에서 실험상수 c 를 1.6으로 고려하여 실험과 이론식으로 도출된 부식량을 도시하면 Fig. 7과 같다. 프리스트레싱의 도입력과 부식전류, 그리고 부식량 생성에 대한 관계는

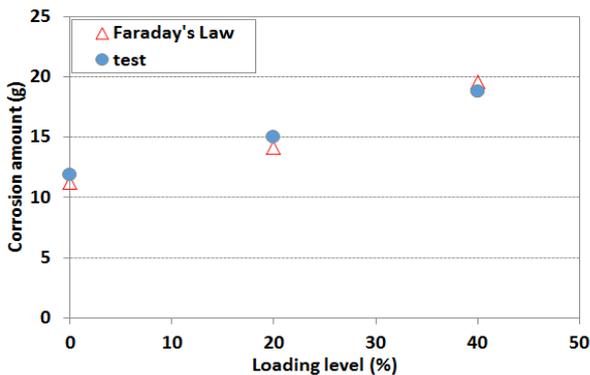


Fig. 7 Comparison with test and theoretical result of corrosion

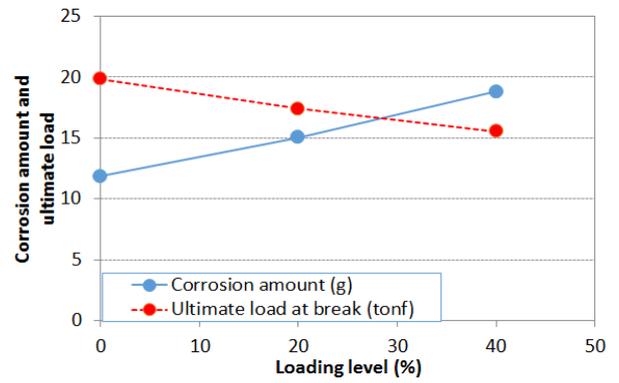


Fig. 8 Corrosion amount and ultimate load with increasing loading level

Table 1 Corrosion amount and ultimate loading with loading levels (Average)

loading level(%)	Corrosion amount(g)	Induced load(tonf)	Residual load(tonf)	Ultimate load at break(tonf)
0	11.86	6.31	3.28	19.83
20	15.04	10.32	7.13	17.42
40	18.80	16.00	9.98	15.54

40%수준까지는 모두 선형적으로 평가되었다.

4.3 프리스트레싱력에 따른 인장하중 평가

초기 긴장력이 증가할수록 부식은 선형적으로 증가하고 이로 인해 부식이 증가하게 된다. 증가된 부식은 단면결손을 야기하고 유효율을 감소시키게 된다. Table 1에서는 하중조건에 따른 부식량의 증가와 파단시의 인장력의 변화를 나타내고 있다. 또한 Fig. 8에서는 초기 도입하중의 증가에 따른 부식량 및 파괴하중의 변화를 나타내고 있다.

동일한 전압조건에서 초기하중이 40%수준으로 증가할 때, 부식량은 158%증가하였으며, 이에 따라 텐던의 최종 파단시의 인장력은 78.4%수준으로 감소하였다. 부식량의 증가 및 인장력의 감소는 선형적인 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 텐던에 0.0%, 20.0%, 40.0%의 초기 하중을 인가한 후 인장력을 받는 상태에서 ICM을 이용하여 촉진부식실험을 수행하였다. 이후 부식량의 변화 및 파괴하중의 변화를 분석하였는데, 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

1) 20% 및 40%수준의 하중을 부식실험 전에 가력하였는데,

- 24 시간 촉진부식실험이후 측정된 하중은 55.6~72.8%의 유효율을 나타내었다. 이는 부식의 증가에 따라 텐던 단면이 감소하고 인장응력이 풀리면서 유효율이 감소하기 때문이다.
- 2) 프리스트레싱 하중이 증가할수록 텐던의 매질이 느슨해지면서 부식전류의 증가가 발생하였다. 하중 인가 전을 기준으로 20%인장의 경우 124.4%, 40%인장의 경우 168.0%의 부식전류량 증가율을 나타내었으며, 이는 직접적인 인장강도의 저하를 야기한다.
 - 3) 프리스트레싱력의 증가에 따라 부식전류, 부식량, 파괴하중의 감소는 선형적으로 평가되었으며, 초기 하중이 40% 수준으로 증가할 때 부식량은 158%증가한 반면, 텐던의 인장력은 78.4%수준으로 감소하였다.

감사의 글

This research was supported by a grant from a Strategic Research Project(Development of smart prestressing system for prestressed concrete bridges) funded by the Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology(KICT).

References

ACI 318-11 (2011), *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, ACI Committee 440.

Andrade, C. (1993), Calculation of Chloride Diffusion Coefficients in Concrete from Ionic Migration Measurement, *Cement and Concrete Research*, 23(3), 724-742.

Baek, S. H., William, X., Maria Q. F., and Kwon S. J. (2012), Nondestructive Corrosion Detection in RC Through Integrated Heat Induction and IR Thermography, *Journal of Nondestructive Evaluation*, 31(2), 181-190.

Broomfield, J. P. (1997), *Corrosion of Steel in Concrete: Understanding, Investigation and Repair*, E&FN, London, 1-15.

Clemena, G. G., McKeel, W. T. (1978), *Detection of Delamination in Bridge Decks with Infrared Thermography*, Transportation Research Record, (664), 25-85.

Fumin, L., Yingshu, Y., and Chun-Qing, L. (2011), Corrosion Propagation of Prestressing Steel Strands in Concrete Subject to Chloride attack, *Construction and Building Materials*, 25(10), 3878-3885.

Gerard, B., Marchand, J. (2000), Influence of Cracking on the Diffusion Properties of Cement-Based Materials Part I: Influence of Continuous Cracks on the Steady-State Regime, *Cement and Concrete Research*, 30(1), 37-43.

Halsall, A. P., Welch, W. E., and Treparier S. M. (1996), Acoustic Monitoring Technology for Post-Tensioned Concrete Structures,

Proceeding of the FIP Symposium 1996 on Post-tensioned Concrete Structures, The Concrete Society, 483-491.

Ishida, T., Maekawa, K. (2001), Modeling of PH Profile in Pore Water Based on Mass Transport and Chemical Equilibrium Theory, *Concrete Library of JSCE*, 37(1), 151-166.

ISO 15630-3 (2010), *Steel for the reinforcement and prestressing of concrete-test methods*, part 3.

Jacobsen, S., Marchand, J., and Boisvert, L. (1996), Effect of Cracking and Healing on Chloride Transport in OPC Concrete, *Cement and Concrete Research*, 26(6), 869-881.

JSCE Guidelines for Concrete (2007), Standard Specification for Concrete Structures-Design, Japan Society of Civil Engineering.

KCI (2012), *Concrete Specification -Durability Part*, Korea Concrete Institute.

Kim, Y. Y., Youn, S. G and Kim, E. K. (2007), Experimental Test for Measuring Prestress in PSC Beam Using Flat-Jack, *Proceedings of the Annual Conference of Korea Concrete Institute*, 19(1), 501-504.

Kwon, S. J., Na, U. J., Park, S. S., and Jung, S.H. (2009), Service Life Prediction of Concrete Wharves with Early-Aged Crack: Probabilistic Approach for Chloride Diffusion, *Structural Safety*, 31(1), 75-83.

Kwon, S. J., Park, S. S., Lee, S. M., and Kim, J. H. (2007), A Study on Durability Improvement for Concrete Structures Using Surface Impregnant, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*, 11(4), 79-88.

Kwon, S.-J., Park, S. S.(2012), Non Destructive Technique for Steel Corrosion Detection Using Heat Induction and IR Thermography, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 16(2), 40-48.

Maekawa, K., Ishida, T., and Kishi, T. (2009), *Multi-Scale Modeling of Structural Performance*, Taylor & Francis, 322-325.

National Standard of Canada (2000), *Canadian highway bridge design code*, CSA International, CAN/CSA-S6-00, Ontario, Canada.

Park, S. S., Kwon, S. J., and Jung, S. H. (2012b), Analysis Technique for Chloride Penetration in Cracked Concrete Using Equivalent Diffusion and Permeation, *Construction and Building Materials*, 29(2), 183-192.

Park, S. S., Kwon, S. J., Jung, S. H., and Lee, S. W.(2012a), Modeling of Water Permeability in Early Aged Concrete with Cracks Based on Micro Pore Structure, *Construction and Building Materials*, 27(1), 597-604.

Park, S. S., Song, H. W., and Byun, K. J. (2001), Model for Chloride Diffusivity and Water Permeability in Cracked Concrete, *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, 22(6), 925-924.

RILEM (1994), *Durability Design of Concrete Structures*, Report of RILEM Technical Committee 130-CSL, E&FN.

Sakurada, S., Irie H., Yoshida Y. (2008), Development of Reinforced Concrete Corrosion Amount Presumption Method by Ultrasonic Method, *17th World Conference on Nondestructive Testing*, Shanghai, China, 1-6.

Shuxian, H., Herbert W., Rosemarie H., Biqin D., Peng D., and Feng, X. (2017), Long-Term Monitoring of Reinforcement Corrosion in Concrete Using Ground Penetrating Radar, *Corrosion Science*, 114, 123-132.

Song, H. W., Cho, H. J., Park, S. S., Byun, K. J. and Maekawa, K.(2001), Early-Age Cracking Resistance Evaluation of Concrete Structure, *Concrete Science Engineering*, 3(1), 62-72.

- Song, H. W., Kim, H. J. Kwon, S. J., Lee, C. H., Byun, K. J., and Park, C.K. (2005b), Prediction of Service Life in Cracked Reinforced Concrete Structures Subjected to Chloride Attack and Carbonation, *6th International Congress Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities*, Dundee, Scotland, Cement Combinations for Durable Concrete, 767-776.
- Song, H. W., Kwon, S. J., Byun, K. J., and Park, C. K. (2005a), A Study on Analytical Technique of Chloride Diffusion Considering Characteristics of Mixture Design for High Performance Concrete Using Mineral Admixture, *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, 25(1A), 213-223.
- Woodward, R. J. and Williams, F. W. (1988), Collapse of ynys-sgwas bridge, *Proceedings of the institute of Civil Engineers*, West Glamorgan, Part 1, 84, 635-669.
- Youn, S. G. (2013), Experimental Evaluation for Ultimate Flexural Behaviors of PSC beams with A Corroded Tendon, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 33(3), 843-854.
- Youn, S. G., Cho, S. K., and Kim, E. K. (2005), Acoustic Emission Technique for Detection of Corrosion-Induced Wire Fracture, *Key Engineering Materials*, Vols. 297-300, pp. 2040-2045.
- Youn, S. G., Lee, C., and Kim, E. K. (2006), Estimation of Velocities of Acoustic Signals and Source Locations in PSC Beam by Acoustic Emission, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 26(5a), 917-925.

Received : 02/01/2017

Revised : 03/15/2017

Accepted : 03/20/2017

요 지 : PSC(Prestressed Concrete)는 전단면을 유효하게 사용할 수 있으므로 교량 및 압거와 같은 구조물에 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 내부의 텐던은 항상 높은 인장하중을 받는 상태에 노출되므로 부식환경에서 더욱 주의를 해야한다. 본 연구는 동일한 부식조건에서 프리스트레싱 하중에 따라 변화하는 부식전류 및 내력저하에 대한 연구이다. 이를 위해 초기 프리스트레싱 하중의 0.0%, 20.0%, 40.0%수준으로 가력한 뒤, ICM(Impressed Current Method)를 이용하여 촉진부식실험을 수행하였다. 초기 하중이 증가할수록 부식전류와 부식량은 증가하였으며 최대하중의 감소가 선형적으로 발생하였다. 초기하중이 20%에서 40%로 증가할 때, 부식전류량은 124.4%와 168.0% 수준으로 증가하였으며, 최종 파괴시의 하중은 87.8% 및 78.4%수준으로 감소하였다. 동일한 전압인가 시 부식속도와 내력저하는 인가한 초기 프리스트레싱 하중에 비례함을 알 수 있다.

핵심용어 : 부식, 텐던, 인장응력, 부식전류, 인장하중, 긴장력
