

Research Paper

철근 부식으로 인한 콘크리트 균열발생에 산소확산성의 영향에 대한 해석적 연구

A Comprehensive Analysis of the Influence of Oxygen Diffusion on Concrete Cracks Triggered by Reinforcement Corrosion

남민석¹ · 박동천^{2*}

Nam, Min-Seok¹ · Park, Dong-Cheon^{2*}

¹Master's Course, Department of Architecture and Ocean space, Korea Maritime and Ocean University, Youngdo-Gu, Busan, 49112, Korea

²Professor, Department of Architecture and Ocean Space, Korea Maritime and Ocean University, Youngdo-Gu, Busan, 49112, Korea

*Corresponding author

Park, Dong-Cheon
Tel : 82-51-410-4587
E-mail : dcpark@kmou.ac.kr

ABSTRACT

In this study, the analysis of concrete cracks was conducted with a total of three variables: coating thickness, oxygen diffusion rate, and reinforced diameter of reinforced concrete structures. Cracks occurred after about 3, 4, and 6 years at the coating thickness of 30, 40, and 50mm when the coating thickness was used as a variable, and cracks occurred after about 4, 5, and 10 years at oxygen diffusivity of $2e-9$, $2e-11$, and $2e-12(m^2/s)$ when the oxygen diffusion rate was used as a variable. In the case of reinforcing bar diameters, cracks occurred after about 4, 3, and 2 years on the reinforcing bar diameters of D10, D19, and D25.

Keywords : reinforced concrete, durability, oxygen diffusion, corrosion of steel, crack

Received : March 3, 2023

Revised : March 23, 2023

Accepted : April 4, 2023

1. 서론

철근콘크리트 건축물에서 균열은 재료적 원인, 설계상 원인, 시공상 원인 등 다양한 원인으로 발생하며 건축물의 기능 및 내구성을 저하시키고 외관상의 문제를 일으키는 가장 중요한 문제 중 하나이다.

콘크리트의 균열을 유발시키는 원인 중 철근부식에 의한 체적팽창의 경우 일반적인 환경에서는 발생하지 않는데 이는 강 알칼리성을 띠는 콘크리트에 의해 부동태 피막이 형성되어 부식에 대해 보호되어지기 때문이다. 그러나 콘크리트가 알칼리성을 소실하는 중성화 현상이나 콘크리트 중에 각종 유해성분이 혼입되면 철근의 부동태피막이 파괴되어 부식반응을 할 수 있는 활성화상태로 바뀌게 된다. 이러한 활성화상태의 철근은 산소나 염화물 등과 같은 유해물질에 의해 부식되어 약 2.5배 까지 체적이 팽창하게 되는데 이는 콘크리트에 인장응력을 유발시켜 균열을 발생시킨다. 따라서 철근 부식에 의해 콘크리트의 균열을 발생시키는 다양한 요소들에 대한 연구는 매우 중요한 사항이다. 이러한 연구배경 하에 본 연구에서는 철근콘크리트 건축물에서 활성화 상태의 철근에 부식을 촉진시키는 다양한 매개변수를 이용하여 콘크리트의 균열과 철근 부식에 대한 유한요소법을 이용한 해석적 연구를 통해 매개변수 영향의 중요도에 대해 비교 분석하였다.



2. 기존 연구 분석

철근의 부식으로 인한 체적팽창은 콘크리트에 응력을 유발하고 부식 생성물에 의한 팽창압의 증가는 콘크리트의 변형률을 증가시키고 그 변형률이 한계 변형률에 도달하면 콘크리트 내부에서부터 균열이 발생하게 된다. 최근까지도 국내에서는 철근 부식에 대해 부식량과 부착강도의 영향[1-3]에 대한 연구와 철근 부식팽창에 따른 콘크리트의 균열 발생을 예측하는 [4,5] 다양한 연구가 진행되어지고 있으며 콘크리트의 균열을 유발하는 임계부식량에 대한 연구도 진행되어 왔다[6]. 또, 해외의 경우 철근에 선펡창계수를 입력하여 가상의 가열팽창으로 균열발생을 모델링 하였다[7]. 하지만 기존의 연구들에서 철근부식으로 인한 콘크리트 균열발생 시기에 대한 예측이나 콘크리트에 균열을 야기하는 매개변수에 대한 비교를 한 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 기존의 연구들을 기반으로 콘크리트 피복두께, 산소 유입량, 철근직경이라는 세 가지 변수로 콘크리트의 균열시기를 유한요소법을 통해 예측하였다. 콘크리트 피복두께는 KDS 기준을 만족하며 산소유입량은 대기의 농도를 사용하였고 철근직경은 실제 철근콘크리트에 사용하는 철근을 채택하였다.

3. 균열 발생 수치해석

3.1 철근 부식으로 인한 균열발생 지배방정식

본 연구에서 산소를 부식 매개체로 하여 활성화 상태의 철근표면에서 산화반응을 유발시켰으며 이러한 반응을 통해 생성되는 부식 생성물량은 식 (1)과 같다. 부식생성물은 콘크리트에 인장응력을 발생시켜 균열을 유발하고 균열발생에 대한 판정은 최대주응력이론에 기초하여 식 (2)와 Figure 1의 철근 변형률이 식 (3), (4)의 콘크리트의 최대 주응력에서의 변형 값 보다 클 경우 균열이 발생하였다고 판단하였다.

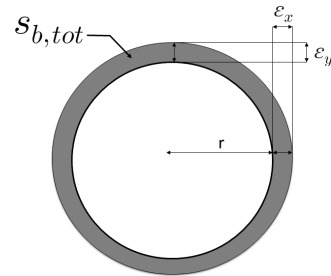


Figure 1. Expansion rate of steel over time

$$N = \frac{v_{Fe,oxid} \times i_{Fe}}{n_{oxid} \times F} \quad (mol/m^2) \quad (1)$$

여기서, $v_{Fe,oxid}$: 산화반응에서 철의 몰계수, i_{Fe} : 철근 산화 전류밀도(A/m^2), n_{oxid} : 산화반응에서 반응 전자수, F : 패러데이 상수(C/mol)

$$\varepsilon_A = \int S_b \quad (2)$$

$$\varepsilon_{eq} = \frac{\sigma_{p1}}{E} \quad (3)$$

$$f = \varepsilon_{eq} - \varepsilon_A \leq 0 \quad (4)$$

여기서, S_b : 철근표면 변위량, ε_{eq} : 최대주응력에서의 변형, σ_{p1} : 최대주응력, E : 콘크리트 탄성계수

3.2 초기조건

본 연구에서 철근과 콘크리트의 요소는 완전부착된 상태로 Table 1과 Table 2에서 해석에 사용된 콘크리트와 철근의 물성을 나타내었다. 콘크리트는 탄산화 노출범주 EC2에 해당하여 최소 내구설계기준 압축강도(KDS 14 20 40)를 만족하고 인장강도는 ACI 363 위원회 보고서에 따라 압축강도의 약 10% 값을 사용하였다. 또한 피복두께도 보와 기둥에 대해 철근콘크리트 최소 피복두께 기준(KDS 14 20 50)을 만족하는 값을 사용하였다.

Table 1. Properties of concrete

Density(kg/m ³)	Compression strength(MPa)	Tensile strength(MPa)	Young modulus(GPa)	Poisson's ratio
2300	24	2	25	0.2

Table 2. Properties of steel

Density(kg/m ³)	Young modulus(GPa)	Poisson's ratio
7850	205	0.28

콘크리트의 함수율은 전자의 이동과 산소확산도에 영향을 미친다. 따라서 Figure 2와 같이 콘크리트 함수율이 증가할수록 전해질전도도는 올라가고 산소확산도는 낮아진다. 전해질전도도가 높을수록 전하 수송에 유리하기 때문에 전해질전도도 값은 전기저항실험을 통해 얻은 전기저항 값의 역수를 사용하였다[8].

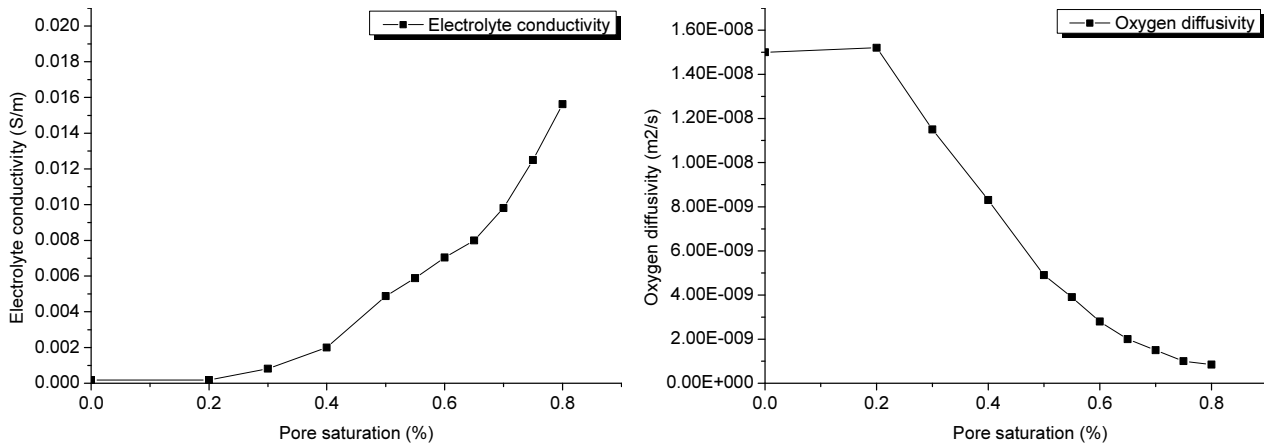


Figure 2. Electrolyte conductivity and oxygen diffusivity with relation to concrete pore saturation

3.3 경계조건

본 연구에서는 콘크리트 산소 유입 면을 제외한 모든 면에서의 산소 공급 및 열의 이동을 차단시켰다. 또, 부식 직후 콘크리트 내부의 용존산소를 우선 소비하고 외부로부터 산소를 공급받기 때문에 Fick의 제 1법칙에 따라 콘크리트 모든 면에서는 식 (5)의 산소농도 값을 만족하며 콘크리트의 전류밀도는 옴의 법칙에 따라 식 (6)을 만족한다.

$$J_{O_2} = -D_{O_2} \nabla C_{O_2} \tag{5}$$

여기서, J_{O_2} : 산소 농도, D_{O_2} : 산소확산도, C_{O_2} : 콘크리트 용존산소

$$I = \sigma \times E \tag{6}$$

여기서, I : 콘크리트 전류밀도, σ : 전해질 전도도, E : 전기장

3.4 지오메트리 및 메시 작성

Figure 3과 같이 150×150mm 콘크리트에 40mm 피복두께로 철근을 배치하였으며 콘크리트의 밑면과 옆면은 롤러로 고정시킨 후 콘크리트의 윗면은 도막처리 하여 한 면에서만 산소가 유입되도록 하였다. 또, 원활한 해석을 위해 콘크리트와 철근은 사각형 메시로 구성하였다.

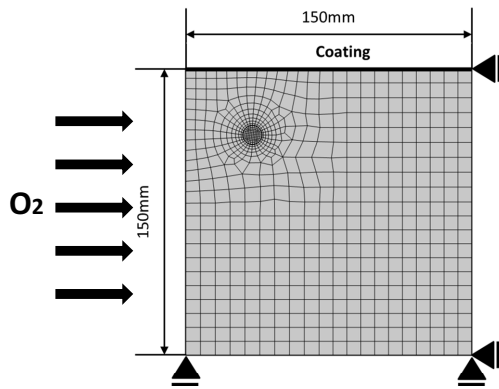


Figure 3. Geometry configuration and mesh

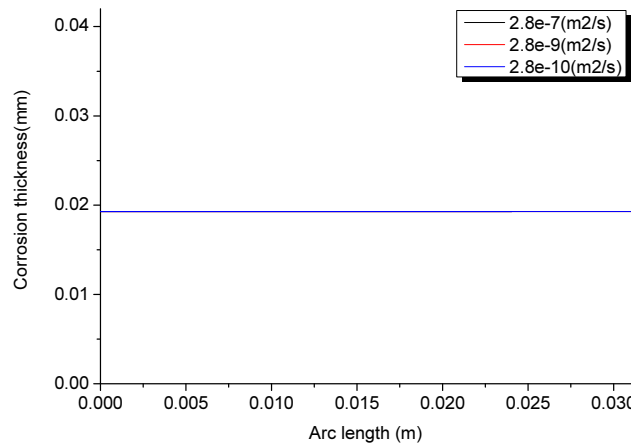


Figure 4. Corrosion thickness with relation to oxygen diffusivity

4. 해석결과

동일 조건에서 Table 3과 같이 콘크리트 피복두께, 산소확산도, 철근 직경을 변수로 하여 20년 동안의 해석을 실시하였다. 산소확산도의 경우 2.8e-9, 2.8e-10, 2.8e-11(m²/s)로 비교하려 하였으나 Figure 4와 같이 2.8e-10(m²/s)의 확산속도를 기준으로 높은 확산도에서 동일한 부식량을 보여 2.8e-9, 2.8e-11, 2.8e-12(m²/s)의 확산속도를 비교하였다. Figure 5의 균열발생 시점 부식두께는 동일한 피복두께와 철근에서 약 0.007mm로 동일하게 나타났다.

Table 3. Analytical variable

Variable	Tensile strength(MPa)	Cover thickness(mm)	Oxygen diffusivity(m ² /s)	Steel diameter
Cover thickness	2	30, 40, 50	2.8e-9	D10
Oxygen diffusivity	2	40	2.8e-9, 2.8e-11, 2.8e-12	D10
Steel diameter	2	40	2.8e-9	D10, D19, D25

4.1 균열 발생에 미치는 피복두께의 영향

피복두께의 영향을 확인하기 위해 Table 4의 조건으로 해석을 진행하였을 경우 Figure 6와 같이 피복두께 30, 40, 50mm에서 약 3년, 4년, 6년 후 균열이 발생하여 두꺼운 피복두께는 균열발생을 억제할 수 있었다.

Table 4. Variables of cover thickness

Variable	Tensile strength(MPa)	Cover thickness(mm)	Oxygen diffusivity(m ² /s)	Steel diameter
Cover thickness	2	30, 40, 50	2.8e-9	D10

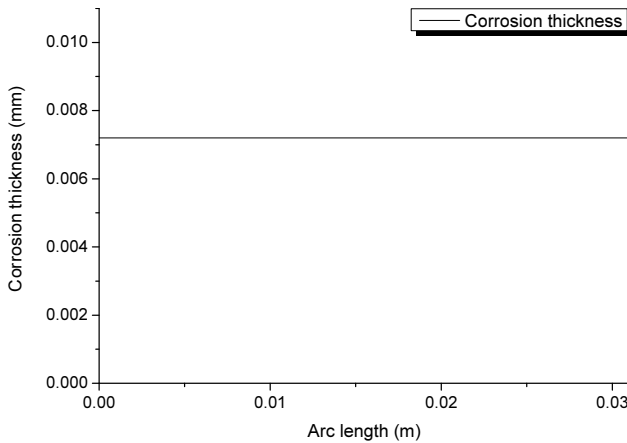


Figure 5. Corrosion thickness at the occurrence of cracks

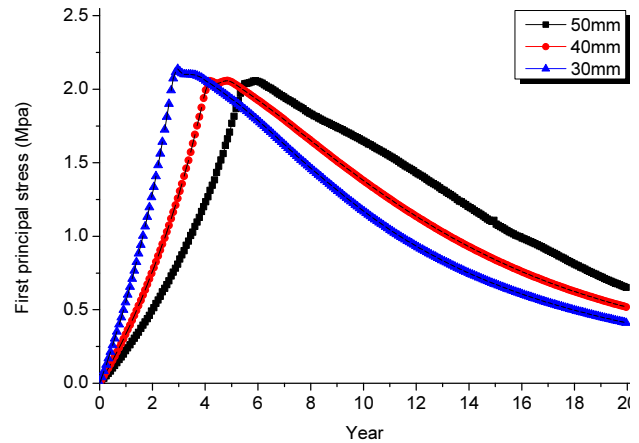


Figure 6. Crack occurrence for cover thickness

4.2 균열 발생에 미치는 산소확산도의 영향

산소확산도의 영향을 확인하기 위해 Table 5의 조건으로 해석을 진행하였을 경우 Figure 7과 같이 산소확산도 2.8e-9, 2.8e-11, 2.8e-12(m²/s)에서 약 4년, 5년, 10년 후 균열이 발생하여 낮은 산소확산속도는 균열발생을 억제할 수 있었다. 이러한 효과는 Figure 9의 콘크리트 표면 산소농도의 영향이라 판단된다. 한쪽 면에서 유입된 산소는 높은 산소확산도로 인해 콘크리트 내부까지 빠르게 확산되는 것으로 나타났다. 기존의 높은 산소확산속도는 철근표면의 반응속도보다 산소 유입속도가 빨라 Figure 8에서와 같이 콘크리트의 용존산소를 모두 소모하지 못하는 것으로 보이며 Figure 10의 산소 2면 확산에 대한 영향도 Figure 9와 같이 기존의 높은 산소확산속도로 인해 콘크리트 표면에서 비슷한 산소농도를 보인다.

Table 5. Variables of oxygen diffusivity

Variable	Tensile strength(MPa)	Cover thickness(mm)	Oxygen diffusivity(m ² /s)	Steel diameter
Oxygen diffusivity	2	40	2.8e-9, 2.e-11, 2.8e-12	D10

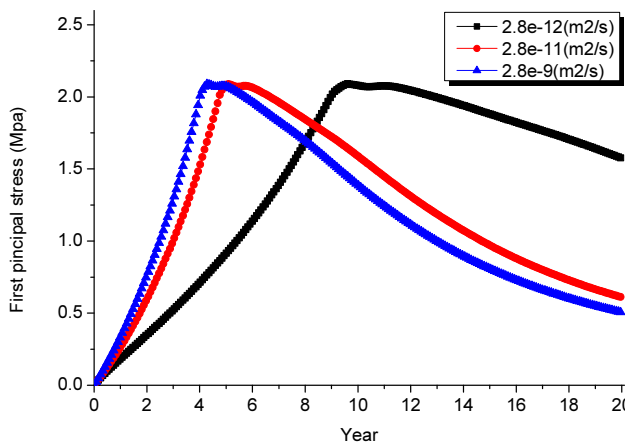


Figure 7. Crack occurrence for oxygen diffusivity

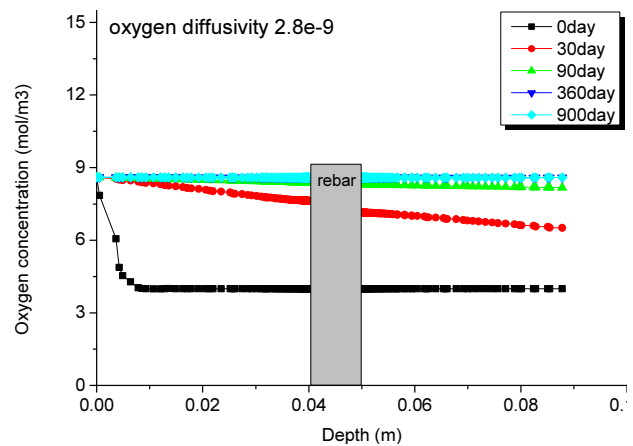


Figure 8. Concrete oxygen concentration for oxygen diffusivity

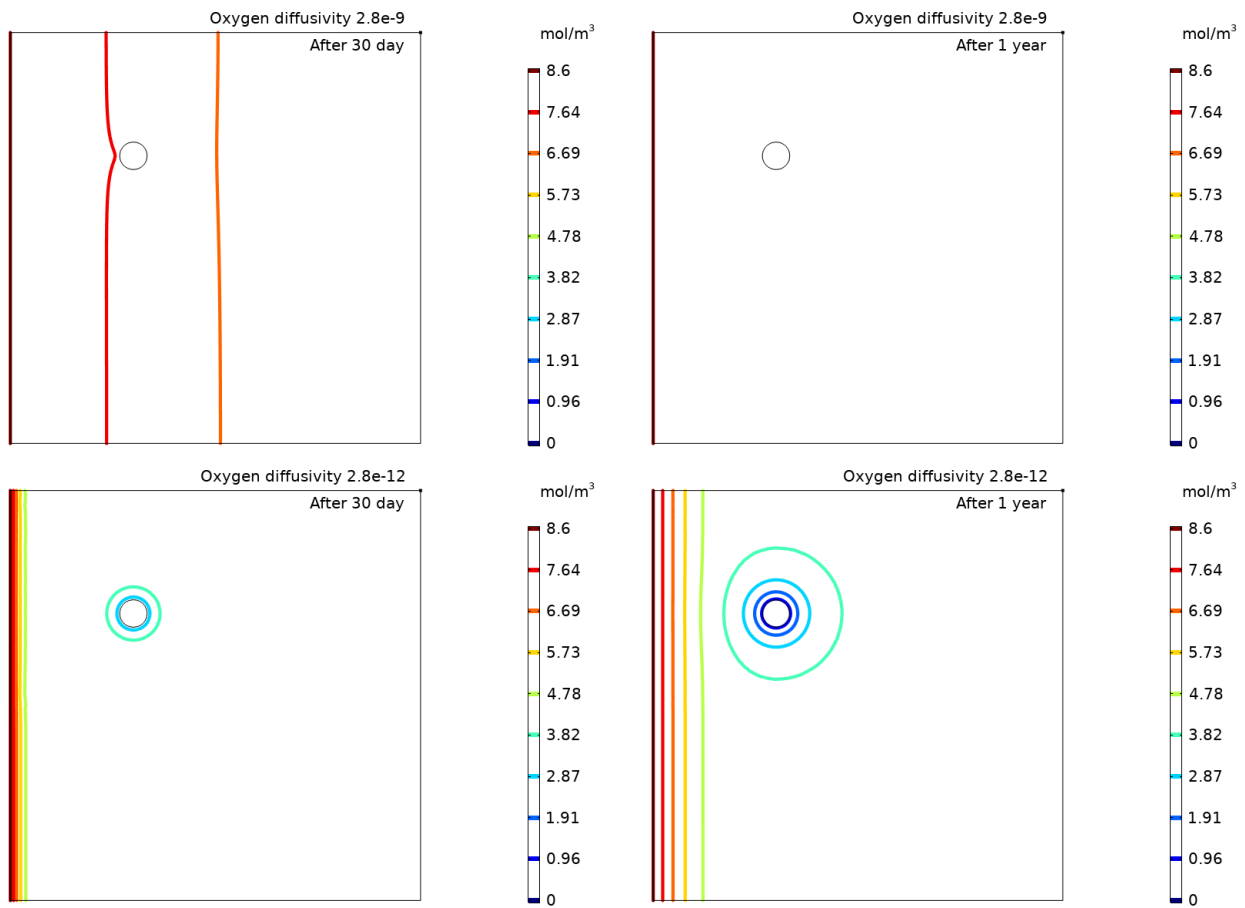


Figure 9. Concrete oxygen concentration for oxygen diffusivity

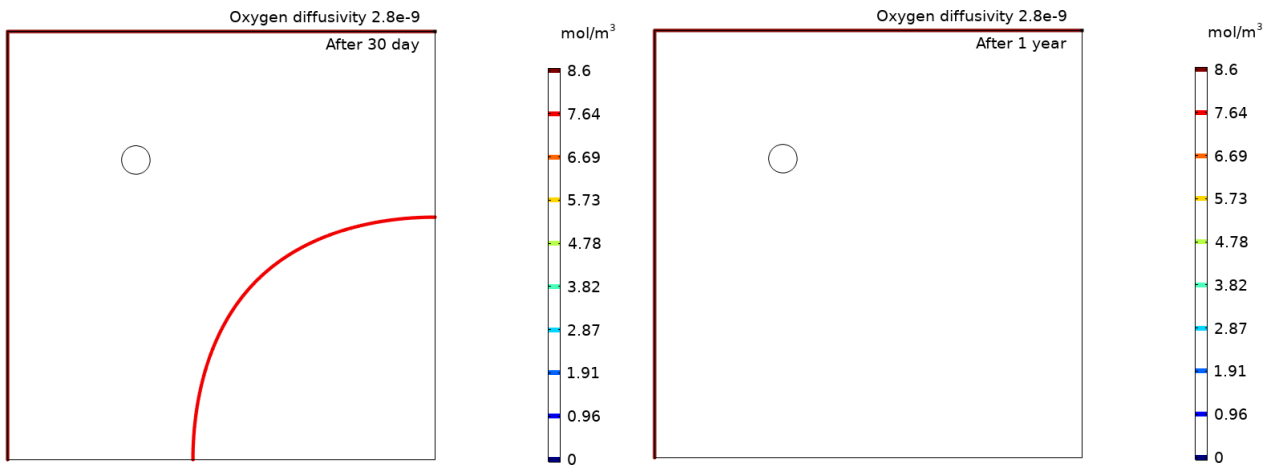


Figure 10. Concrete oxygen concentration for two-side oxygen diffusion

4.3 균열 발생에 미치는 철근직경의 영향

철근직경의 영향을 확인하기 위해 Table 6의 조건을 해석하였을 때 Figure 11과 같이 D10, D19, D25 철근에서 약 4년, 3년, 2년 후 균열이 발생하여 철근직경이 클수록 균열 예측시기가 빨라졌으며 이는 철근직경의 차이에 의한 총 부식량의 차이에 의한 것이라 판단된다. Figure 12에서는 철근표면의 부식두께를 확인하기 위해 가장 큰 철근인 D25 철근표면에 대한 부식두께를 나타내었다. 이러한 결과는 반응 초기 콘크리트 내부의 초기용존산소로 부식이 진행됨에 따라 철근표면에는 모두 균질한 부식이 발생한 후 콘크리트 내부 용존산소의 소모에 따른 콘크리트 내부의 산소농도차이로 인해 철근표면에 다른 부식두께를 나타내어야 하지만 부식두께가 동일한 것으로 보아 높은 산소확산도에 의해 균질부식이 진행되는 것을 확인할 수 있다.

Table 6. Variables of steel diameter

Variable	Tensile strength(MPa)	Cover thickness(mm)	Oxygen diffusivity(m^2/s)	Steel diameter
Steel diameter	2	40	$2.8e-9$	D10, D19, D25

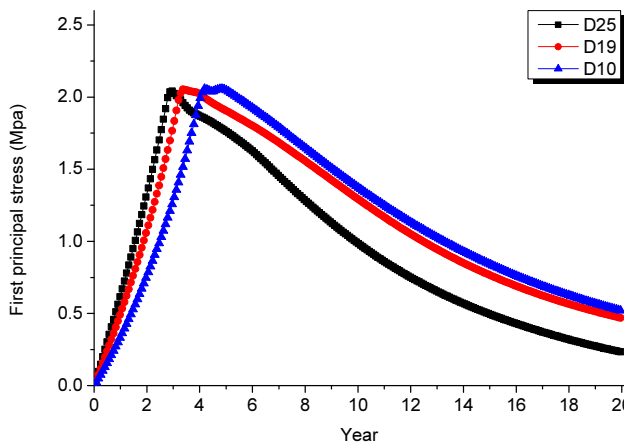


Figure 11. Crack occurrence for steel diameter

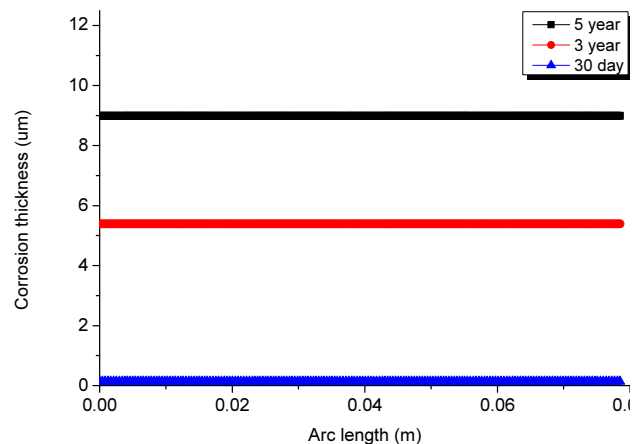


Figure 12. Corrosion thickness to rebar surface

5. 결론

콘크리트의 산소유입에 의한 철근의 산화반응으로 생성된 부식물은 콘크리트에 인장응력을 유발하여 균열을 발생시켰다. 철근의 부식팽창에 의한 콘크리트의 균열을 유한요소해석법을 이용하여 해석하였을 때, 동일한 피복두께와 철근에서 모든 변수의 균열발생 시점 부식량이 동일한 것으로 보아 활성화 상태의 철근에서는 부식 반응 매개체인 산소의 유입을 억제하여 부식량을 낮추는 것이 콘크리트의 균열발생을 억제할 수 있을 것이라 판단된다. 콘크리트 피복두께를 충분히 확보함으로써 균열시기를 늦출 수 있지만 활성화 상태의 철근에 대해서는 콘크리트 내부의 용존산소를 모두 소모한 후 콘크리트를 통해 산소가 운반되기 때문에 피복두께나 철근직경과 같은 변수보다 콘크리트 표면을 도막처리 하거나 더욱 치밀한 콘크리트로 산소의 확산을 억제하는 것이 가장 중요하다고 판단된다.

요약

본 연구에서는 철근콘크리트의 피복두께, 산소확산속도, 철근직경의 총 세 가지 변수로 콘크리트 균열에 대한 해석을 실시하였다. 피복두께를 변수로 하였을 때 30, 40, 50mm의 피복두께에서 약 3년, 4년, 6년경과 후 균열이 발생하였고 산소확산속도를 변수로 하였을 때 $2e-9$, $2e-11$, $2e-12(m^2/s)$ 의 산소확산도에서 약 4년, 5년, 10년경과 후 균열이 발생하였다. 철근직경의 경우 D10, D19, D25의 철근직경에서 약 4년, 3년, 2년경과 후 균열이 발생하였다.

키워드 : 철근콘크리트, 내구성, 산소확산, 강재 부식, 균열


Funding

Not applicable

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korean government (No. 2019R1A2C1088029).

ORCID

Min-Seok Nam,  <http://orcid.org/0009-0006-8536-0313>

Dong-Cheon Park,  <http://orcid.org/0000-0001-7243-5140>

References

1. Kim HU, Jee NY. Effect of the rebar corrosion rate on bond strength in reinforced concrete. Journal of the Korea Concrete Institute. 2005 Mar;21(11):159-66.
2. Kim DI, Cho SH, Han NH, Paik IK, Chung L. Bond characteristics of reinforcing bars corroded before and after concrete casting in the reinforced concrete members. Journal of the Architectural Institute of Korea structure & Construction. 2002

Nov;18(11):55-62.

3. Du RJ, Jang ID, Lee HR, Yi CG. Bond strength between steel and concrete with different diameters in the same corrosion rate. Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference; 2020 Nov 2-4; Daegu, Korea. Seoul (Korea): the Korean Institute of Building Construction Conference; 2020. p. 190-1.
4. Nam JS, Choe GC, Kim GY, Lee SK, Hwang EC, Son MJ. Investigation for corrosion expansion rate to predict corrosion-induced cracking of reinforced concrete. Proceeding of the Korea Institute Conference; 2019 Nov 6-8; Byeonsan, Korea. Seoul (Korea): the korea concrete institute; 2019. p. 353-4.
5. Jang BS. Estimation of concrete cover failure time considering the corrosion rate in reinforced concrete structures. Journal of the Korea Concrete Institute. 2006 Apr; 18(2):233-8. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2006.18.2.233>
6. Oh BH, Kim KH, Jang SY, Jiang YR, Jang BS. Cracking behavior of reinforced concrete structures due to reinforcing steel corrosion. Journal of the Korea Concrete Institute. 2002 Dec;14(6):851-65. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2002.14.6.851>
7. Toda K, Ueno A, Uji K. A Study on the corrosion amount of reinforced concrete in crack occurrence. Journal of the Japan Concrete Institute. 2010 Sep;21(3):31-41.
8. Muehlenkamp EB, Koretsky MD, Westall JC. Effect of the spatial uniformity of cathodic protection of steel in reinforced concrete. The Journal of Science & Engineering. 2005 Jun;61(6):519-33. <https://doi.org/10.5006/1.3278188>