콘크리트 구조물의 철근부식으로 인한 균열발생에 관한 실험적, 해석적 결과의 비교

The comparison between experimental and FEA results for crack initiation due to corrosion of reinforcement

장 상 엽* 김 용 철** 조 용 범**
Jang, Sang Yup Kim, Young Cheul Cho, Yong Bum

ABSTRACT

Corrosion of reinforcement and deterioration of concrete short the lifetime of reinforced concrete structure and affect the safety of the structure. In particular, the corrosion of reinforcement causing the inner pressure of the interface between the concrete and reinforcement is known to significantly contribute to the premature deterioration of concrete structure. Several attempts have been made to predict the cracking time of the concrete structure. However, problems such as the lack of reproducibility of concrete tests and non-uniformity of materials have hampered thess kinds of studies. Thus, the mechanism of the concrete cracking due to reinforcement corrosion is in the way.

This studymeasured the mechanical properties of corrosion products using the nano-indentation test method. Likewise, the critical thickness of corrosion products for the cracking of concrete cover was investigated using the finite element and experimental methods.

1. 서론

콘크리트는 현재 지구상에서 가장 대표적으로 널리 사용되는 토목·건축구조용재료이다. 재료의 특성상 압축하중에 강하고 인장하중에 약한면이 있지만, 복합재료기술의 발전으로 인하여 재료의 한계를 서서히 극복해 나가고 있으며, 특히 철근의 삽입으로 인장하중에 대한 보강조치를 취하여 사용되고 있다. 콘크리트 내에 삽입된 철근은 강알칼리성 분위기에 노출되기 때문에 부식에는 큰 문제가 없는 것으로 인식되고 있으나, 다공성 재료의 특성상 외부에 노출된 환경으로부터 유해물질이 침투하여 철근의 부동태 피막을 파괴하여 부식을 촉진시킴으로써 구조물의 수명을 단축시키는 경우가 종종 발생하고 있다. 일단, 철근의 부식이 진행되면 부식생성물이 체적팽창을 일으키며, 콘크리트와 부식생성물의 계면에서 인장하중이 발생하게 된다.

* 정회원, 한국가스공사 연구개발원 연구원
** 정회원, 한국가스공사 연구개발원 선임연구원

전술한 바와 같이 콘크리트 재료는 인장하중이 약하기 때문에 쉽게 균열이 발생하게 된다. 많은 연구자들이 손상기구를 파악하기 위해 많은 노력을 하고 있지만, 콘크리트 재료의 특성상 실험에서의 재현성이 잘 나타나지 않고 실험적으로 고려해야할 사항들이 많아 정확한 규명을 위해 많은 노력을 기울이고 있다.

본 연구에서는 균열을 발생시키기 위한 철근의 부식에 대한 기초적인 실험결과를 소개하였으며, 유한요소법을 적용하여 계산한 부식생성물층의 두께와 균열발생량의 변화를 비교해 보았다.

2. 실험

2.1 콘크리트 공시체에 포함된 재료의 물성측정

실험실내에서 배합한 콘크리트의 물성을 알아보기 위하여, KS F 2403에 기준하여 길이 200mm, 직경 80mm의 공시체를 제작하여 압축파단 실험을 수행하였다. 제작된 공시체는 50% 의 물시멘트비, 최대 크기가 20㎜인 골재를 사용하였다.

표 1 제작된 콘크리트 공시체의 재료별 각각의 물성

	압축강도	인장강도	Young's modulus	포아송비
콘크리트	28.82MPa	2.8MPa	24.8GPa	0.18
Berko vich diamond			1140GPa	0.017
부식 생성물			6.1GPa	0.24
철근		329.3Mpa	200GPa	0.3

철근의 부식으로 인한 팽창력은 결과적으로 콘크리트 재료에 인장력으로 작용하므로 재료의 특성상 콘크리트는 인장하중에 약하기 때문에 쉽게 균열이 발생할 수 있다. 따라서 언제 균열이 발생하는지를 예측하는데 있어서, 철근과 콘크리트 사이의 계면에서 발생하는 부식생성물의 거동을 평가하는 것은 매우 중요하다. 이전의 연구에서 이미 부식생성물의 거동을 평가한 결과를 소개한 바 있다[1].

강제전류인가법을 이용하여 콘크리트내부의 철근을 강제부식시켜서 커버에 균열을 발생시키는 실험을 수행하였다. 이 실험을 수행하기 이전에 콘크리트의 모사한 $Ca(OH)_2$ 용액내에서 양분극거동을 평가해 보았다. 양분극 거동은 인가한 전류가 어떤 반응을 일으키는가에 대한 예비평가의 차원에서 수행되는 것이며, 그 방법은 철근재료인 탄소강을 느린 속도의 주사속도(0.1㎷/sec)로 시편의 전위를 변화시켜 가면서 시편의 표면에 발생되는 전류밀도를 측정하는 것이다.

그림 1에서 분극거동을 보면, 용액내에서 염분이 존재하지 않는 조건에서는 부동태 피막이 치밀하게 잘 형성되어 있었으나, 염분이 존재함에 따라서 부동태 피막이 손상되어 부식전류밀도가 증가되고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 콘크리트 내 염분이온이 부동태 피막을 손상시키고 있음을 알 수 있다.

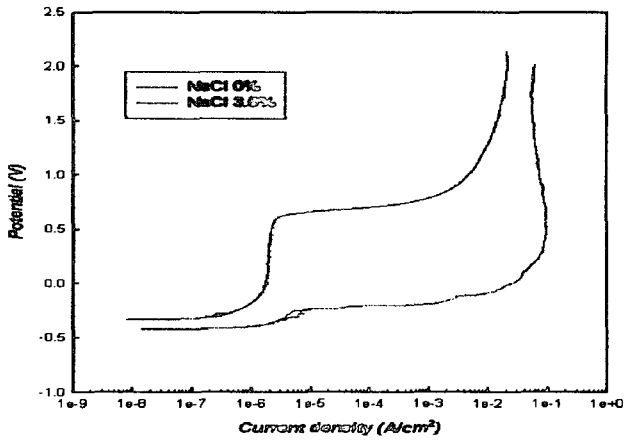

그림 4 콘크리트 모사용액에서 염분함량에 따른 탄소강의 분극거동결과

분극거동에서 염분의 함유량에 따라서 전위는 변화하지 않으나 전류량은 증가하고 있으며 대략 100㎃/㎠에서 급격한 전위상승이 이루어지면 더 이상의 전류값도 증가하지 않았다. 산소발생전위로 shift되면서 더 이상의 전기화학적인 부식반응이 아닌 산소발생반응이 발생한다고 볼 수 있으므로, 그 이상의 전류밀도에서 실험을 하는 것은 의미가 없다. 따라서 본 실험에서는 실험시간을 단축시키고, 부식반응을 촉진시키기 위하여 3.5% NaCl용액을 제조하여 균열발생실험을 수행하였다. 아래 그림 2에 균열발생을 위한 실험장치를 나타내었다.

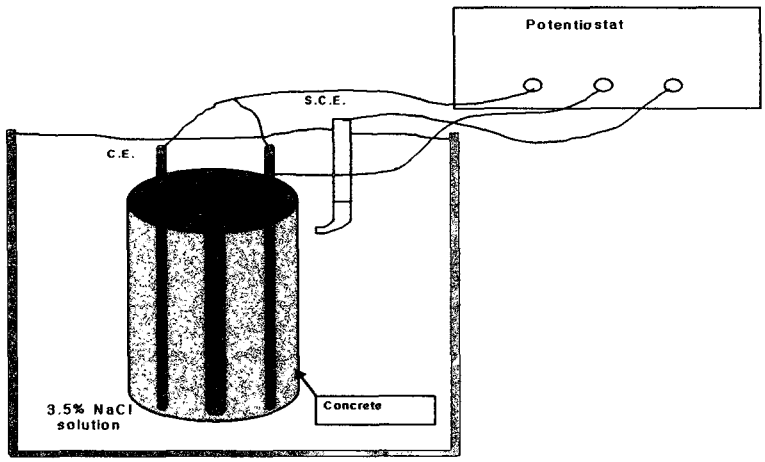

그림 5 공시체의 강제전류인가 시험장치 개략도

공시체의 중앙에 직경 16㎜원형철근을 삽입하였으며 주위에 두께 38㎜의 콘크리트 커버가 둘러싸여 있다. 7일간 수중양생시켜 놓은 후에 실험시에는 수용액 내에 완전히 침지되도록 담그어 놓은 상태에서 potentiostater로써 강제전류를 인가하였다. 본 실험에서는

인가전류량은 염분을 함유한 경우, 0.5, 1, 2㎃/㎠의 전류밀도로 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 전류밀도는 Faraday's 법칙에 의해 부식속도로 환산할 수 있다.

4. 결과

강제전류 인가를 통한 실험에서 균열의 발생과 진전에 대한 형상을 그림 3에 나타내었다. 시험편은 콘크리트 내에서 활발한 부식반응을 일으키므로, 부식생성물이 팽창하여 서서히 공극이 생긴틈으로 빠져나오고 있다. 이러한 부분의 하단에는 거의 대부분 균열의 발생으로 간주할 수 있으며, 확인해본 결과 부식생성물을 제거하면 균열을 발견할 수 있었다.

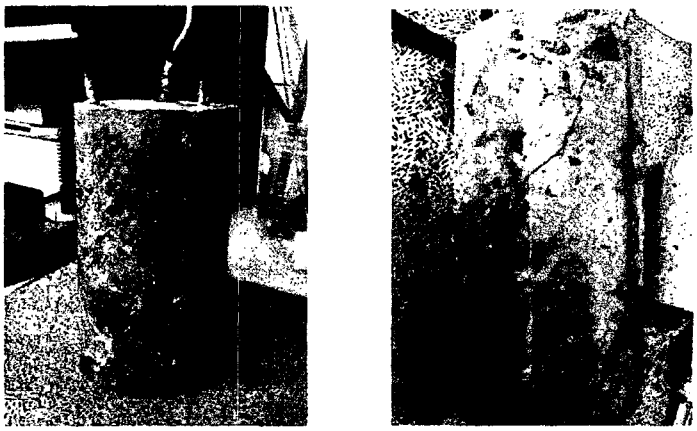

그림. 3 공시체 표면에 균열이 발생하고 진전해 나가는 양상

그림 3에서와 같이 초기균열발생에 대한 데이터의 확보는 상당히 어렵다. 전체적인 실험시간이 길고, 시험편마다의 편차가 커서 상당히 파악하기에 쉽지 않기 때문이다. 따라서 각각의 시편에 따라서 수명비를 환산하여 동시에 그림 5와 같이 1개의 그래프에 나타내 보았다. 각각의 데이터의 경향은 지수함수적으로 증가하는 형태로 균열이 성장하는 것을 볼 수 있다. 따라서 균열의 성장은 아래와 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$v = 5.3e^{5.3t/t_f} \qquad (1)$$

여기서 v 은 균열진전속도 t/t_f 는 수명비이다.

한가지 주목할 만한 사실은 균열이 길이방향으로 관통하는 것을 수명으로 간주하였을 경우, 60~70%정도의 수준에 이르렀을 때 초기균열이 발생하고 있다. 따라서 부식생성물이 돌출되며 균열이 발견되었을 경우, 그 부재는 60~70% 정도의 수명이 경과하였음을 판단할 수 있다. 또한 본 실험에서는 여러논문에서 지적한 바와 같이[2] 콘크리트 포어속으로의 부식생성물의 침투는 발견되지 않았다. 그림 6에 보인 바와 같이 실험이 끝난 후에 공시체를 파단시켜 관찰해 보면, 부식생성물은 균열이 생긴면을 따라서 용출되고 있으나, 다른 부위로의 침투현상은 관찰되지 않았다.

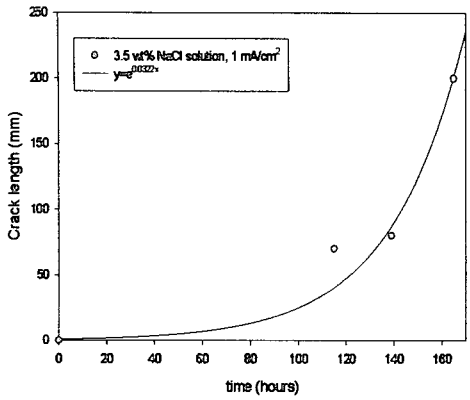

그림 4 시간에 따른 균열성장곡선

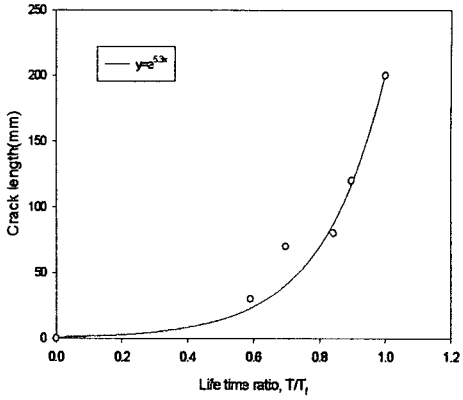

그림 9 수명비 곡선

그림 6 파단된 시편의 내부 형상

전기화학적인 반응으로 인하여 초기 균열이 발생하기 까지의 시간은 전류밀도 1㎃/㎠로 인가하였을 경우에 117시간 부근에서 발생하였다. 이 시간동안 원형철근으로부터 용출된 금속부피는 아래 식으로 계산될 수 있다.

$$corrosion\ rate\ (\frac{\mu m}{year}) = 1.161 \times 10^7 \times i_{corr}\ (\frac{A}{cm^2}) \qquad (2)$$

따라서

$$1\ (\frac{mA}{cm^2}) = 11.6\frac{mm}{year} = 1.325\ (\frac{\mu m}{hour}) \qquad (3)$$

계산된 실험적인 부식층의 두께는 155㎛이며, 이전에 발표된[1] 유한요소해석결과에서는 113㎛로 계산되었다. 두 값에서 약 30% 오차를 보이고 있으며, 향후 좀더 많은 실험결과

들을 바탕으로 검증가능하리라 생각된다.

다양한 커버두께, 철근직경에 따른 성장속도는 향후 진행될 실험결과와 비교할 예정이다.

참고문헌

1. 김광웅 외 4인, "유한요소법을 이용한 콘크리트 벽체균열을 발생시키는 철근의 임계부식량에 대한 연구", 2002, 콘크리트학회 춘계 학술대회, pp 361-366.
2. 오병환 외 4인 "철근부식에 의한 철근 콘크리트 구조물의 균열거동", 한국콘크리트학회 논문집, 2002. 12, Vol. 14, No. 6, pp. 851-863.