

Surface-to-Surface 접촉 모델을 적용한 콘크리트 쪼갬인장강도 시험 모델링

이상민¹⁾ · 석승욱²⁾ · 최창식^{3)*}

¹⁾한양대학교 대학원 건축공학과 석사과정 ²⁾한양대학교 건축공학부 연구교수 ³⁾한양대학교 건축공학부 교수

Modeling of Concrete Splitting Tensile Test Using a Surface-to-Surface Contact Model

Sangmin Lee,¹⁾ Seungwook Seok,²⁾ and Chang-Sik Choi^{3)*}

¹⁾Graduate Student, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Rep. of Korea

²⁾Research Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Rep. of Korea

³⁾Professor, Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Rep. of Korea

ABSTRACT A numerical study was conducted to assess the suitability of a surface-to-surface contact model for modeling a concrete material test. Three splitting tensile strength tests were simulated using the commercial finite element analysis program ABAQUS, where its surface-to-surface model was applied to the interaction between the loading plate and the concrete cylinder. Initially, flat-flat and flat-circle contact tests were performed in a 3D environment to confirm the functionality of the surface-to-surface contact model. Then, a 3D finite element analysis of a splitting tensile strength test was performed using 2 mm-sized elements. However, reducing the element size led to a significant increase in analysis time. Consequently, subsequent analyses were conducted using a 0.5 mm element size with a 2D finite element model. With this approach, as the element size decreased, the numerical results closely aligned with the experimental splitting strengths, confirming the effectiveness of the proposed modeling approach.

Keywords : finite element analysis, surface-to-surface contact model, splitting tensile strength

1. 서 론

최근 컴퓨터 성능이 크게 향상됨에 따라 유한요소해석(finite element analysis, 이하 FEA)에 소요되는 시간을 획기적으로 단축시킬 수 있게 되었다. 그에 따라 압축파괴와 인장균열을 동반하는 복잡한 비선형적 성질을 갖는 콘크리트에 대한 FEA 연구가 가능하게 되었다. 상용 FEA 프로그램을 사용하여 보(Hamid et al. 2012; Gao et al. 2013) 및 기둥(Cao et al. 2020), 슬래브(Genikomsou and Polak 2014) 등 다양한 철근 콘크리트 부재의 파괴 양상 및 응력을 분석하기 위한 연구가 수행되었으며 실험 결과를 비교적 정확하게 예측하는 것으로 보고하고 있다.

정확한 해석을 위해서는 실제 실험과 동일한 하중 및 구속 조건을 모델링하는 것이 필수적이다. 철근콘크리트 보의 4점 가력실험을 해석한 Zhang et al.(2016)은 모델링을 할 때 가력

판으로 가력이 수행되는 실제 실험과는 달리 해석 모델에서는 가력판 없이 하중을 받는 콘크리트 요소(elements)에 직접적으로 가력하였다. 이와 같은 경우, 가력판과 콘크리트 시편 사이의 경계 조건에서 재료의 파괴가 발생하지 않았기 때문에 가력판을 생략한 모델링이 타당했다고 판단된다. 그러나 쪼갬인장강도 시험의 경우(Fig. 1) 가력판 부근의 응력이 집중된 콘크리트에 압축 및 인장 파괴가 발생하기 때문에 공시체와 가력판 사이의 기계적 접촉 상호작용(mechanical contact

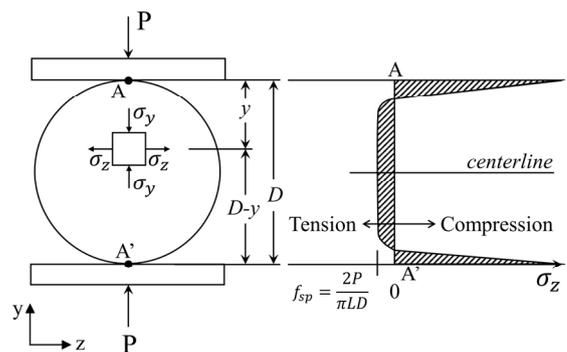


Fig. 1 Stress block of splitting tensile test

*Corresponding author E-mail : ccs5530@hanyang.ac.kr

Received January 06, 2023, Revised January 29, 2023,

Accepted February 03, 2023

©2023 by Korea Concrete Institute

interaction)을 고려하여 정밀하게 모델링 하여야 한다.

Abrishambaf et al.(2015)는 ABAQUS로 쪼갬인장강도 해석을 수행하였다. 그러나 접촉면의 기계적 상호작용을 적절히 고려하지 않아 실험결과 대비 9.2~25.9 % 오차의 부정확한 해석 결과로 이어진 것으로 보고된다. Faisal et al.(2019)는 탄화물리브텐(Mo_2C)과 산화알루미늄(Al_2O_3)으로 이루어진 시편에 대한 쪼갬인장강도 시험 시뮬레이션을 수행하였다. 해당 연구에서는 가력판과 시편의 접촉이 접촉선(contact line)을 따라서 발생한다는 이유로 접촉 부위에 재료들 간의 마찰 계수를 적용하여 surface-to-surface 접촉 모델(surface-to-surface contact model)을 적용하였고, 접촉 모델을 통해 시편에 발생하는 국부 평탄화(local flattening)를 모사하였다. 이러한 결과는 surface-to-surface 접촉 모델이 가력판과 시편 사이의 실제 접촉상호작용을 잘 고려하고 있음을 시사한다.

가력판 부근의 콘크리트 응력 집중으로 인한 비선형 변형을 모사하기 위해서는 적절한 콘크리트 재료 모델의 적용이 필요하다. Denneman et al.(2011)은 응집 영역 모델(cohesive zone model)을 사용하여 쪼갬인장강도 시험을 해석하였으며, 콘크리트 실린더 단면에 접착(adhesive) 역할을 하는 응집 영역(cohesive zone)을 설정하였다. 그러나, 응집 영역 모델은 균열의 시작 및 최대 하중(peak load)과 콘크리트 재료의 연화거동(softening)을 제대로 모사하지 못하는 한계를 보였다. 균열 전파로 인한 연화거동과 같은 콘크리트의 비선형적 변형을 보완하기 위해 본 연구는 재료 모델로 균열과 압축 소성 변형에 의한 손상(damage)을 모사하고 균열 이후의 기계적 거동을 구현할 수 있는 콘크리트 손상 소성 모델(concrete damaged plasticity model, 이하 CDP 모델)을 적용하였다.

본 연구에서는 가력판에 의해 국부적인 콘크리트 압축 및 인장파괴가 발생하는 쪼갬인장강도 시험을 해석적으로 구현하기 위한 모델링 기법을 제안한다. Surface-to-surface 접촉 모델 적용의 적정성을 확인하기 위하여 단순한 모델을 통한 검증을 선행하였다. Bea et al.(2015) 등의 기존의 쪼갬인장강도 시험 관련 문헌을 참고하여 가력판을 포함한 모델을 제작하였다. 그런 후에, 문헌에 기록된 세 종류의 일반강도 콘크리트 쪼갬인장강도 시험 결과를 이용하여 제안된 모델링 기법을 검증하였다.

2. 접촉 테스트

2.1 접촉 테스트 개요

Taylor and Papadopoulos(1991)의 2D 패치 테스트(2D patch test)를 참고하여 접촉 모델의 성능을 검증하기 위해 탄성 재료 모델을 사용하여 평면-평면 접촉 테스트(flat-flat contact test)를 수행하였다. 다음으로 동근 형상의 콘크리트 실린더와 평평한 가력판 사이에서 접촉 모델 적용의 적절성을 확인할 필요가 있기 때문에, 평면-곡면 접촉 테스트(flat-circle contact test)를 수행하였다. 이후 위의 두 접촉 테스트를 통해 접촉 모델의 정확성 및 요소 크기(characteristic length, l_e)에 따

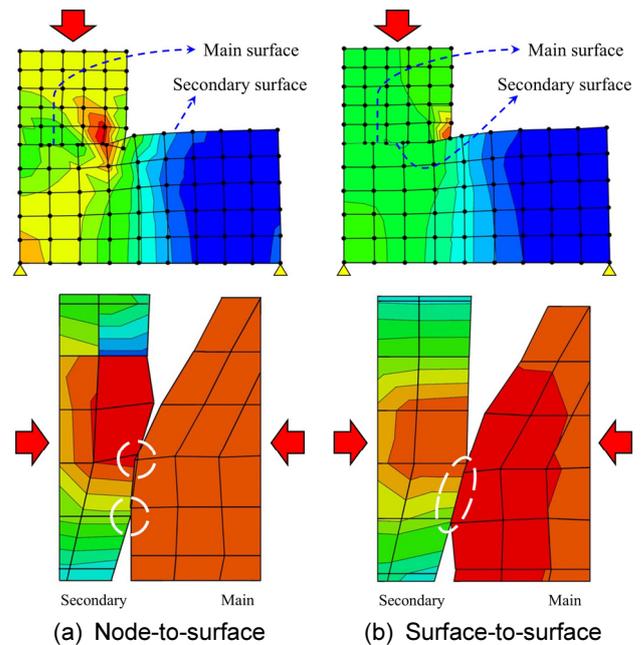


Fig. 2 Node-to-surface and surface-to-surface contact (King and Richards 2013)

른 강도와 접촉이 발생하는 시점 변화를 검토했다.

본 연구에 사용된 surface-to-surface 접촉 모델은 Fig. 2와 같이 접촉쌍(contact pair)으로 구성되며, main surface가 secondary surface의 접촉을 제어하는 역할을 한다. Surface-to-surface 접촉 모델은 Fig. 2처럼 적용부위의 접점을 통제하여 접점이 면내에 침투하는 스내깅(snagging) 현상을 억제하는 이점이 있다. 따라서 해당 모델은 국부 평탄화를 모사할 수 있으며, 이는 node-to-surface 접촉 모델을 적용 시 secondary surface에 위치한 접점이 main surface에 침투하는 현상과 대조된다(King and Richards 2013). 따라서 접촉면 형상이 서로 다르거나 불규칙할 경우 node-to-surface 접촉 모델 보다는 surface-to-surface 접촉 모델이 더 작은 오차를 가지기 때문에 해당 접촉 모델을 선택했다(ABAQUS 6.14 documentation 2014).

평면-평면 접촉 테스트에는 정해에 근접한 해석 결과를 얻기 위해 static solver를 이용해 해석하였다. 궁극적으로는 쪼갬인장강도 해석에 CDP 모델을 적용하여 비선형 해석을 수행해야 하기 때문에 implicit 해석을 추가적으로 수행하였고, 그 결과를 static 해석 결과와 비교하여 implicit 해석의 사용 가능성을 확인하였다.

2.2 평면-평면 접촉 테스트

사용된 연속체 요소(continuum element)는 3차원 연속체 요소 C3D8R이다. 상부 플레이트의 요소는 9,600개, 하부 콘크리트 요소는 13,824개이며, 요소의 크기는 상부는 1 mm이며, 하부는 2.5 mm이다. Fig. 3과 같이 플레이트의 접촉면은 main surface, 콘크리트의 상부 접촉면은 secondary surface로 정의하였다. 콘크리트의 하부는 경계 조건으로 면대칭(symmetry plane)을 사용하여 고정하였으며 플레이트 상부와 접촉면을

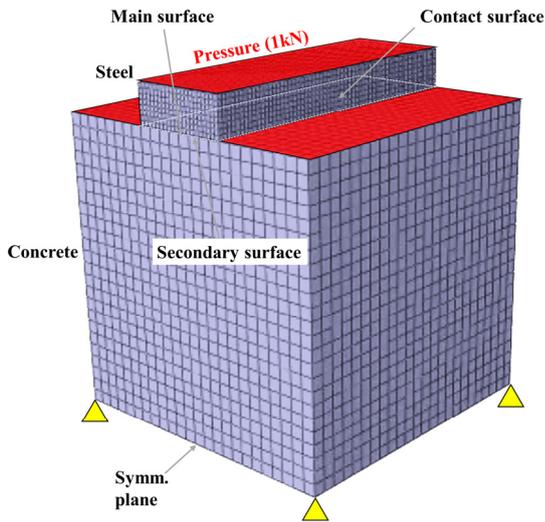


Fig. 3 Flat-flat contact test model set-up

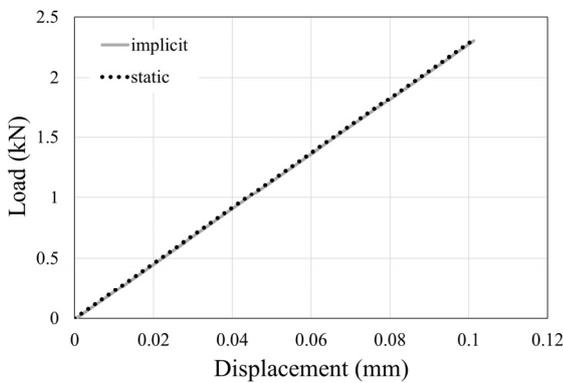


Fig. 4 Load-displacement relationship of flat-flat contact test

제의한 콘크리트 상부에 1초 동안 1 kN의 압력을 가했다. 해석 결과, Fig. 4와 같이 static과 implicit 해석의 결과가 일치함을 확인하였고, 이는 implicit 해석이 정해에 가까운 결과를 도출한다는 뜻이므로 해당 결과를 근거로 평면-곡면 접촉 테스트는 implicit 해석으로 수행하였다.

2.3 평면-곡면 접촉 테스트

평면-곡면 접촉 테스트는 평면-평면 접촉 테스트와 같은 물성치와 유한 요소(finite element, 이하 FE) 타입을 사용하였다. 모델 Fig. 5의 상부는 강재 플레이트, 하부는 곡면 반지름이 100 mm인 콘크리트 실린더의 단면이다. 실린더는 크기가 1 mm인 186,800개의 요소와 198,465개의 노드로 구성되어 있다. 플레이트 하부를 main surface, 실린더의 접촉면을 secondary surface로 정의하였다. 가력부는 해석 결과에 영향을 미치지 않기 때문에 계산량의 감소를 위해 강체(rigid body) 구속 조건을 사용하였다. 실린더의 하부 단면에 경계 조건으로 면대칭을 생성하여 실린더가 하중에 의해 움직이지 않도록 고정하였으며, 플레이트의 중앙에 속도 제어(velocity control)를 통해 2초 동안 총 0.1 mm를 가력하는 집중하중을 하중 조건으로 설정하였다. 이와 같은 하중 조건은 접

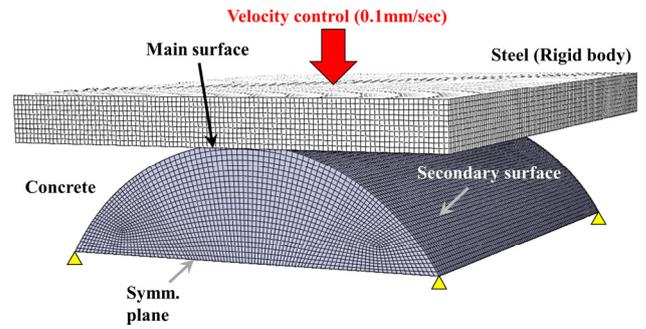


Fig. 5 Flat-circle contact test model set-up

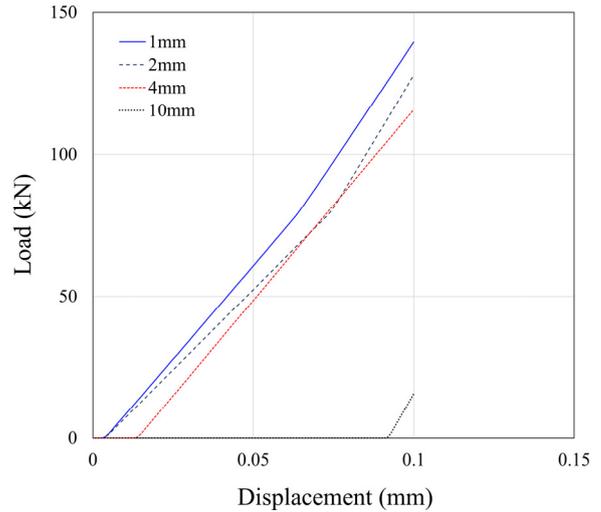


Fig. 6 Flat-circle contact test load-displacement curves for different mesh sizes using an implicit solver

촉의 여부와 정확도를 확인하기에 적합한 해석시간과 변위를 알아내기 위하여 여러 시행착오를 거친 후 채택되었다. 해석 단계를 Establish Contact와 Full Loading으로 각 1초씩 두 단계로 나누어 순차적으로 해석하였다. Establish Contact 단계는 안정적인 접촉을 위하여 접촉 안정화(contact stabilization)를 적용하는 단계이다. Full Loading 단계에서는 접촉 안정화의 적용 후에 0.1 mm 변위제어를 통해 가력하였다.

크기가 1, 2, 4, 10 mm인 요소에 대하여 해석을 수행하였고, 해석 결과 요소가 작을수록 가력 시작 시점이 빨라지는 것을 확인하였다(Fig. 6). 또한, 요소 크기 1 mm와 2 mm의 하중 적용 시작 시간이 거의 동일한 것을 확인하였다. 따라서 평면-곡면 접촉 테스트 시뮬레이션의 경우 l_c/r (r : 곡률 반지름)이 0.02 이하가 되도록 정의하는 것을 권장한다.

섹션 2장의 결과를 바탕으로 surface-to-surface 접촉 모델과 평면-곡면 접촉 테스트 모델링이 적합하다는 것을 확인하였고, 그에 따라 섹션 2.2장과 동일한 모델링 기법을 적용하여 쪼갬인장강도 시험 모델링하였다.

쪼갬인장강도 시험 해석에서는 콘크리트의 손상 정도에 따른 균열 및 연화거동과 최대하중을 모사하기 위해 CDP 모델을 사용하였고, 제안된 모델링 기법의 타당성을 Walker and Bloem(1960)의 연구에 사용된 세 개의 시편을 사용하여 정량적으로 평가하였다.

3. 쪼갬인장강도 해석

3.1 재료 모델

CDP 모델은 압축과 인장 모두에서 재료의 완전한 비탄성 거동과 손상을 예측하고, 물리적 실험 파라미터로 명확하게 해석할 수 있는 이점을 가진 모델이다(Momoh et al. 2022). 본 해석에 적용된 CDP 모델의 Plasticity 입력 파라미터는 Table 1과 같다.

Dilation angle은 팽창각으로 40°로 설정했고(Genikomsou and Polak 2014), eccentricity는 편심률로 ABAQUS 기본값인 0.1로 정의하였다. f_{t0}/f_{c0} 는 콘크리트의 이축압축강도와 일축압축강도의 비율로 일반 콘크리트에서는 1.16의 값을 가진

Table 1 Concrete damage plasticity (CDP) model plasticity parameters

Dilation angle	Eccentricity	f_{t0}/f_{c0}	K	Viscosity parameter
40°	0.1	1.16	0.667	10^{-5}

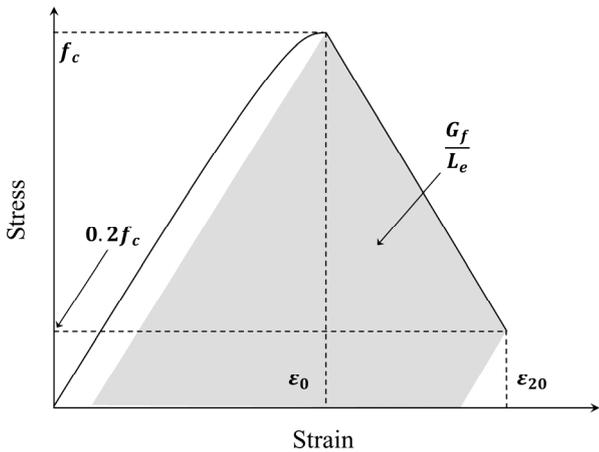


Fig. 7 Concrete analytical model (Yang et al. 2014)

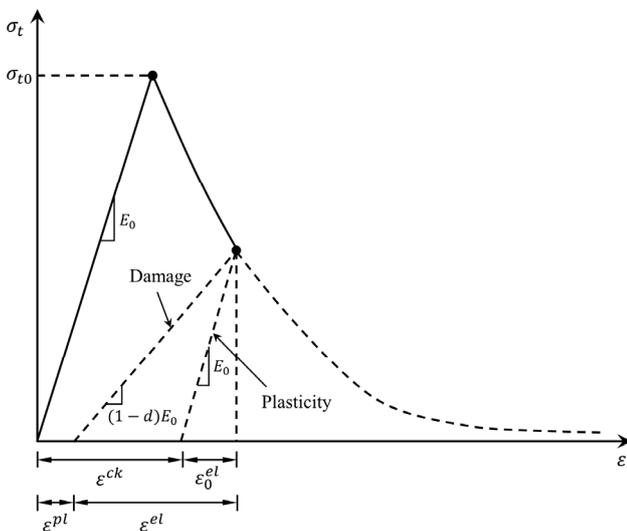


Fig. 8 Definition of damage parameter in tension

다. K는 인장축 자오선(tensile meridian), 압축축 자오선(compressive meridian)의 편차 응력의 2차 불변량(second deviatoric stress invariant)의 비율(Seok et al. 2020)로써 항복면의 볼록함 정도를 결정하는 변수이다. 본 연구에서는 기본값 0.667을 사용하였다. Viscosity parameter는 점소성 시스템(viscoplastic system)의 이완 시간을 의미하므로 콘크리트 균열에 따른 급격한 취성 거동을 제어하는 변수로 본 연구에서는 포괄적인 민감도 분석(sensitivity analysis)을 통해 해석 결과(강도)에 영향을 주지 않도록 충분히 작은 값인 10^{-5} 으로 정의하였다.

많은 실험 데이터를 바탕으로 만들어진 분석 모델(analytical model)(Yang et al. 2014)로 생성한 콘크리트 일축압축강도의 응력 변형을 관계 곡선을 CDP 모델 압축 거동의 입력 값으로 사용하였다(Fig. 7). 인장 거동은 파괴에너지(fracture energy, G_f)를 사용하여 모델링했다. 파괴에너지는 Martin et al.(2007)의 연구에 사용된 식을 통해 산출된 값을 사용하였다. 마지막으로 Fig. 8과 같은 손상정도를 모사하기 위해 선형 손상파라미터 모델을 사용하였다. 식 (1)은 손상파라미터의 관계식이다. 모델에 가해지는 하중이 증가함에 따라서 손상 파라미터 d 가 증가한다($0 < d < 1$). d 가 증가할수록 소성변형률(ϵ^{pl} , plastic strain)이 증가함을 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. D_0^{el} 는 손상이 시작되지 않은 초기탄성계수의 행렬(initial elasticity matrix)이다.

$$\sigma = (1 - d)D_0^{el} : (\epsilon - \epsilon^{pl}) \quad (1)$$

3.2 3D 모델

모델을 검증하기 위하여 기존 쪼갬인장강도 실험 연구(Walker and Bleom 1960)의 시편($\phi 150 \times 300$) 세 개를 제안된 모델링 방법으로 해석하였다. 세 개의 시편은 C4(19.2 MPa), C6(35.1 MPa), C8(39.1 MPa)이다. 분석 모델의 필수 파라미터인 물시멘트비는 순서대로 0.8, 0.5, 0.4이며 골재는 모두 19 mm이다. 3D 모델은 Fig. 9와 같고, $\phi 150 \times 300$ 크기의 콘크리트 실린더를 모델링 하고 실린더의 상부와 하부에 가력판을 모델링 하였다. 상, 하부 가력판에 rigid body 구속 조건을 설정하였다. 콘크리트 실린더는 176,115개의 크기 2 mm 인 요소와 182,910개의 노드로 구성되어 있다. 하부 가력판의 바닥에 면대칭을 적용하여 고정하였다. 상부 가력판은 하중 방향 외의 자유도를 고정하고, 하중 적용 방향으로 1 mm/sec의 변위제어를 설정하였다.

가력판과 실린더 사이에 surface-to-surface 접촉 모델을 적용하였다. 가력판의 접촉면은 main surface이며, 실린더의 접촉면은 secondary surface로 정의하였다.

Fig. 10은 CDP 모델에 입력된 일축압축강도 응력-변형률 관계 곡선으로 세 가지 시편인 C4, C6, C8의 입력값을 도식화한 것이다. Table 2의 인장강도 입력값은 Fig. 11의 음영으로 표시된 범위 내에 위치하는 ‘ACI 318-14(ACI 2014)’(이하 ACI)와 ‘CEB-FIP Model Code(Taerwe and Matthys 2013)’(이하 FIB)을 기반으로 도출하였다. 결과값인 쪼갬인장강도

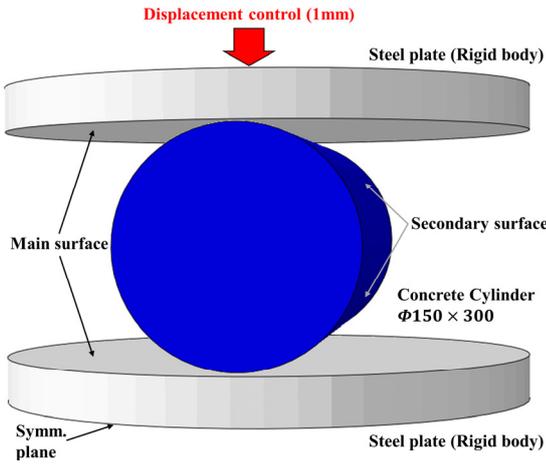


Fig. 9 Geometry model of the 3D splitting tensile test

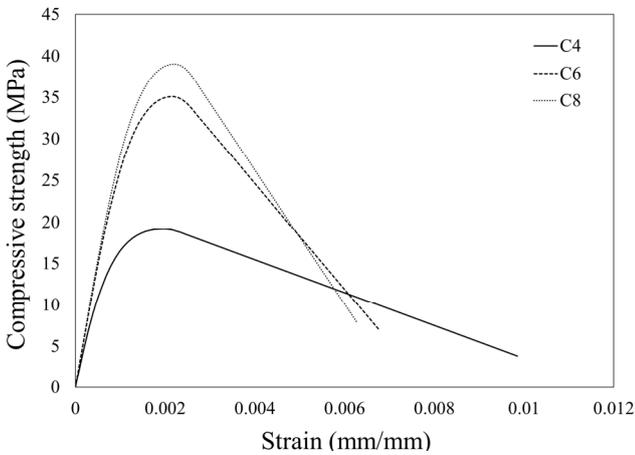


Fig. 10 Concrete damage plasticity model compressive behavior input stress-strain relationship curves

Table 2 Concrete damage plasticity (CDP) model tensile strength

Specimen	CEB-FIP model code, max (MPa)	ACI 318-14 (MPa)
C4	2.79	2.73
C6	4.18	3.69
C8	4.49	3.89

(f_{sp})는 식 (2)로 계산하였다. 여기서 식 (2)의 P 는 가력판에 의한 압력이고, D 는 실린더의 직경을, L 은 실린더의 높이를 의미한다.

$$f_{sp} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (2)$$

FIB Model Code 2010에 따르면 쪼갬인장강도는 일축 인장강도와 동일하게 볼 수 있다. 이에 따라 입력값과 해석 결과를 비교하기 위하여 Fig. 11에 나타내었다. 해석 결과, '3D FEA w/ CEB-FIP'의 결과가 '3D FEA w/ ACI'의 결과보다 실험 결과에 C4는 1%, C6는 5%, C8은 8% 더 근접하였지만,

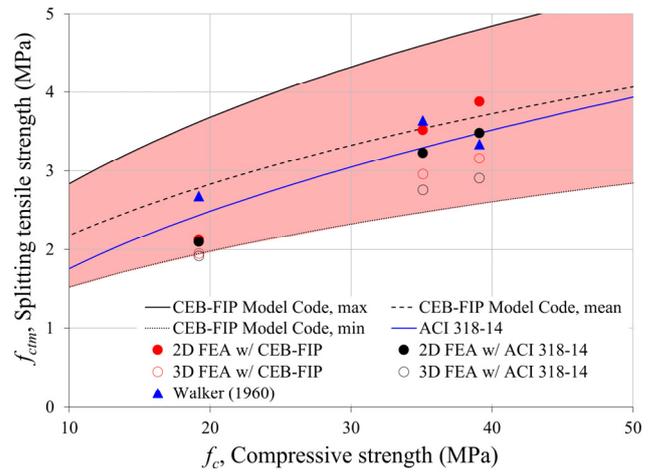


Fig. 11 Splitting tensile strength by ACI318 and CEB-FIP model code and 2D, 3D simulation results

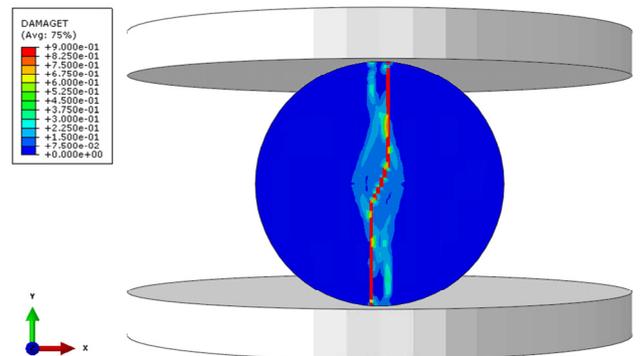


Fig. 12 Damage field of 3D splitting tensile test simulation (C4)

결과적으로 FIB와 ACI 모두 입력한 값보다 작았다. 이러한 결과가 나타난 이유는 요소가 크기 때문이다. 요소가 크면 그만큼의 체적이 사라지고 소실되는 저항력이 크다. 반면에 요소가 작으면 삭제되는 체적이 작아지므로 소실되는 저항력이 상대적으로 작다. 2 mm의 요소가 사라지고 생겨나는 빈 공간과 0.5 mm의 요소가 사라지고 생겨나는 빈 공간의 차이는 힘을 전달하는 메커니즘에 영향을 미친다. 또한, 시편 C4의 손상영역(damage field)인 Fig. 12를 통해 요소 크기가 2 mm이기 때문에 균열의 크기도 2 mm로 구현되어 실제 균열에 비해 큰 것을 확인할 수 있었고, 요소의 크기로 인하여 미세균열을 모사할 수 없었다. 이러한 이유들로 인해 요소의 크기를 축소하여 해석할 필요가 있었다.

요소 크기를 2 mm로 하여 3D 해석 시 1일에서 3일의 해석 시간이 소요되었고, 요소의 크기를 1 mm로 축소하여 해석할 경우 소요시간이 5배 이상 증가하였다. 따라서 이후의 해석 부터는 2D 해석을 통하여 요소의 크기를 줄여 수행하였다.

3.3 2D 모델

2D 시험 모델은 Fig. 13과 같다. 지름 150 mm의 콘크리트 쉘을 만들고, 요소 타입은 평면 변형(plane strain)으로 설정

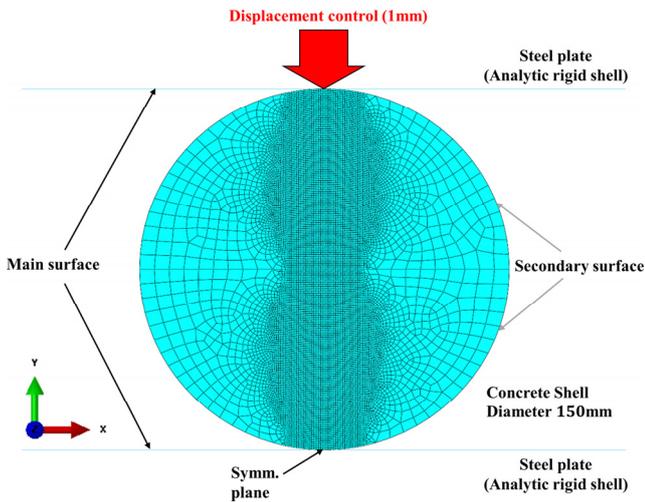


Fig. 13 Geometry model of 2D splitting tensile test

하였으며, 평면 변형 두께(plane strain thickness)는 3D 해석 모델과 동일하게 300 mm로 설정하였다. 쉘의 상, 하부는 2D analytical rigid shell을 통해 강체로 모델링 하였다.

콘크리트 쉘은 12,349개의 크기 0.5 mm인 요소와 12,372 개의 노드로 구성되어 있다. 하부 외이어는 면대칭을 적용하여 모든 자유도를 고정하였으며, 상부는 하중 방향을 제외한 자유도를 고정하고, 1 mm/sec의 변위제어를 설정하였다. 재료 모델은 3D 모델과 동일한 모델을 사용하였다. 3D 모델과 마찬가지로 상, 하부 외이어를 main surface, 쉘의 접촉부를 secondary surface로 지정하여 surface-to-surface 접촉 모델을 적용하였다.

3D 해석과 동일한 값을 CDP 모델에 입력하였고, 요소 크기를 0.5 mm로 축소하여 2D 해석을 수행하였다. 2D, 3D 해석의 결과를 비교한 Fig. 11을 통해 2D 해석 결과가 3D 해석 보다 실험 결과에 더 근접함을 확인하였고, 결과를 Table 3으로 나타내었다.

3D 해석 오차율은 FIB기준 C4, C6, C8 순서로 27 %, 19 %, 5%이고, 2D 해석의 오차율은 21 %, 3 %, 16%이다. ACI 기준 C4, C6, C8 순서로 3D는 28 %, 24 %, 13 %, 2D는 22 %, 11 %, 4 %의 오차를 보였다. 시편 C4과 C6에서 3D 해석보다 2D 해석이 Walker and Bloem(1960)의 실험값과 더욱 일치함을 보였다. 그러나 시편 C8의 실험값은 3D와 2D 해석 결과값 사이에 존재했다. 2D 해석에서 실험값에 대한 오차가 커진 것은 실험값 자체의 오차에서 기인한 것이라 여겨진다. 골재의 분포, 콘크리트 타설 시의 기온 및 습도, 동일하지 않은 배합기에서의 배합 등의 다양한 원인으로 인해 콘크리트의 강도가 영향을 받기 때문에 실험값에 오차가 존재할 수 있기 때문이다.

시편 C4의 인장응력에 의한 손상정도 확인하였을 때 3D 해석 결과(Fig. 12)와 달리 2D 해석 결과에서는 Fig. 14와 같이 정확한 손상 분포를 확인할 수 없고, 균열 부분에 손상이 집중되는 것을 확인할 수 있었다. 요소 크기의 영향으로 C4의 2D 해석 결과는 3D 해석과 달리 FIB와 ACI가 제안한 범위에 포함되었고, C6와 C8의 해석 결과는 2D 해석이 3D 해석 보다 평균에 매우 근접했다. 그러나 2D 해석은 해석에 소

Table 3 Experimental and finite element (FE) splitting tensile strength and percentage of error

Specimen	Walker (MPa)	2D FE (MPa)		3D FE (MPa)	
		FIB	ACI	FIB	ACI
C4	2.68	2.13 (21 %)	2.10 (22 %)	1.95 (27 %)	1.92 (28 %)
C6	3.64	3.52 (3 %)	3.23 (11 %)	2.96 (19 %)	2.76 (24 %)
C8	3.34	3.88 (16 %)	3.48 (4 %)	3.16 (5 %)	2.91 (13 %)

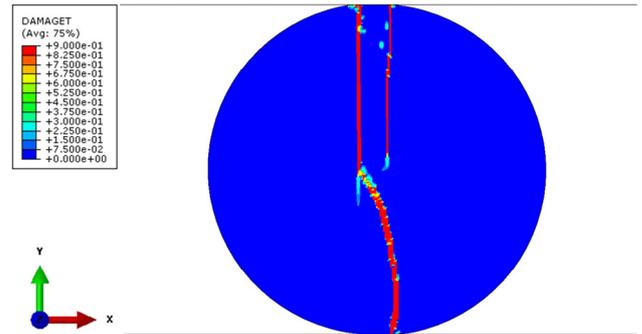


Fig. 14 Damage field of 2D splitting tensile test simulation (C4)

되는 시간을 3D 해석시간에 비해 최소 1/6만큼 획기적으로 단축시킬 수 있다는 장점이 있지만, 3D 해석만큼 실제에 가까운 결과를 보일 수 있는 모델링 환경은 제한적이다. 예를 들어, 콘크리트의 메소스케일(meso-scale) 해석에서 골재의 분포에 따라 변하는 하중 경로, 해석평면 방향과 다른 방향으로의 균열전파는 2D 모델로 해석하기에는 한계가 존재한다. 이에 따라, 최대 강도 등 간단한 결과를 확인하기 위해서는 2D 해석이 유효하지만, 균열의 전파 등 세부적인 부분을 확인하기 위해서는 3D 해석이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 접촉 모델 적용의 타당성을 검증하였고 이러한 모델링 기법을 적용하여 쪼갬인장강도 시험을 시뮬레이션 하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 평면-곡면 접촉 테스트를 통하여 요소의 크기가 접촉 시작 시기에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 요소가 클수록 접촉 시작 시기가 늦어지기 때문에 동일한 변위량 혹은 하중을 제어하더라도 재료의 파괴까지 해석이 진행되지 않거나, 접촉 안정화가 이루어지지 않는 문제가 발생하였다. 따라서 접촉하는 물체의 형상과 해석 조건을 고려한 최적의 요소 크기를 충분히 검토하여야 한다.
- 2) 콘크리트는 철근과 달리 강도의 오차범위가 큰 편이다. 본 연구에서 사용된 Walker and Bloem(1960)의 실험 연구 결과 또한 넓은 오차범위를 가진다. 반면 FEA는 입

력값 하나에 결과값 하나만을 가진다. 따라서 실험 평균값을 입력값으로 하여 범위 내의 결과값을 계산해낸다면 정확성이 있다고 판단할 수 있다. 본 연구의 모델은 입력값 대비 3D의 경우 9~28%, 2D의 경우 1~17%의 오차를 가진 결과값을 보였으므로 이에 합당한 해석을 수행한 것으로 확인된다.

- 3) FIB의 3D 해석과 2D 해석 결과를 비교하였을 때, C4는 2D가 3D보다 6% 더 근접한 결과를 보였고, C6는 2D 해석은 오차율 3%로 3D 해석보다 16% 더 정확한 결과를 보였다. 반면, C8의 경우 3D 해석이 2D 해석보다 11% 더 근접하였다. 3D 해석(요소 크기 2 mm)에 최소 1일에서 최대 3일이 소요되었으나, 요소 크기를 1/4 크기로 줄인 2D 해석(요소 크기 0.5 mm)에는 약 4시간이 소요되어 해석 시간을 대폭 감소시킬 수 있었다.
- 4) 2D, 3D 쪼갬인장강도 시험 해석을 수행한 결과 허용 가능한 오차범위 이내에서 접촉 모델을 적용한 콘크리트 해석 모델이 균열 양상 및 연화 현상 등 실제 콘크리트의 기계적 특성을 잘 반영할 수 있음을 확인하였다. 따라서 실제 거동을 잘 반영하여 해석하기 위해 접촉 모델의 적용을 제안한다.
- 5) 복잡한 형상에서 접촉 모델이 미치는 영향에 대해서는 수행 가능한 해석 모델의 종류가 제한적이기 때문에 큰 규모의 부재 실험에 대한 해석 모델에 surface-to-surface 접촉 모델을 적용할 때는 추가적인 해석을 통한 평가가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2023년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. NRF-2020R1A4A1019074).

References

Abaqus, V. (2014) *6.14 Documentation*. RI, USA: DS SIMULIA Corp. 651(6.2).

Abrishambaf, A., Barros, J. A., and Cunha, V. M. (2015) Tensile Stress-Crack width Law for Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete Obtained from Indirect (Splitting) Tensile Tests. *Cement and Concrete Composites* 57, 153-165.

ACI Committee 318 (2014) *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute (ACI), 518.

Bae, B. I., Choi, H. K., and Choi, C. S. (2015) Correlation between Tensile Strength and Compressive Strength of Ultra High Strength Concrete Reinforced with Steel Fiber. *Journal of the Korea Concrete Institute* 27(3), 235-263. (In Korean)

Cao, X., Wu, L., and Li, Z. (2020) Behaviour of Steel-Reinforced

Concrete Columns under Combined Torsion Based on ABAQUS FEA. *Engineering Structures* 209, 109980.

Denneman, E., Kearsley, E. P., and Visser, A. T. (2011) Splitting Tensile Test for Fibre Reinforced Concrete. *Materials and Structures* 44(8), 1441-1449.

Faisal, N. H., Mann, L., Duncan, C., Dunbar, E., Clayton, M., Frost, M., McConnachie, J., Fardan, A., and Ahmed, R. (2019) Diametral Compression Test Method to Analyse Relative Surface Stresses in Thermally Sprayed Coated and Uncoated Circular Disc Specimens. *Surface and Coatings Technology* 357, 497-514.

Gao, W. Y., Dai, J. G., Teng, J. G., and Chen, G. M. (2013) Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Exposed to Fire. *Engineering Structures* 52, 488-501.

Genikomsou, A. S., and Polak, M. A. (2014) Finite Element Analysis of a Reinforced Concrete Slab-Column Connection Using ABAQUS. In *Structures Congress 2014* (pp. 813-823).

Hamid, S., Mahdi, S., Amir, H. A., Mohammad, A., and Ali, S. (2012) Evaluation of Reinforced Concrete Beam Behaviour Using Finite Element Analysis by ABAQUS. *Scientific Research and Essays* 7(21), 2002-2009.

King, S., and Richards, T. (2013) *Solving Contact Problems with Abaqus*. In *Abaqus Contact Seminar Available Online* <https://swym.3ds.com>, DS UK Ltd., Coventry (pp. 1-325).

Martin, J., Stanton, J., Mitra, N., and Lowes, L. N. (2007) Experimental Testing to Determine Concrete Fracture Energy Using Simple Laboratory Test Setup. *ACI Materials Journal* 104(6), 575.

Momoh, E. O., Osofero, A. I., and Menshykov, O. (2022) Behaviour of Clamp-Enhanced Palm Tendons Reinforced Concrete. *Construction and Building Materials* 341, 127824.

Seok, S., Haikal, G., Ramirez, J. A., Lowes, L. N., and Lim, J. (2020) Finite Element Simulation of Bond-Zone Behavior of Pullout Test of Reinforcement Embedded in Concrete Using Concrete Damage-Plasticity Model 2 (CDPM2). *Engineering Structures* 221, 110984.

Taerwe, L., and Matthys, S. (2013) *Fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Berlin, Germany: Ernst & Sohn, Wiley. doi: 10.1002/9783433604090.

Taylor, R. L., and Papadopoulos, P. (1991) On a Patch Test for Contact Problems in Two Dimensions. *Computational Methods in Nonlinear Mechanics* 690, 702.

Walker, S., and Bloem, D. L. (1960) Effects of Aggregate Size on Properties of Concrete. *Journal Proceedings* 57(9), 283-298.

Yang, K. H., Mun, J. H., Cho, M. S., and Kang, T. H. (2014) Stress-Strain Model for Various Unconfined Concretes in Compression. *ACI Structural Journal* 111(4), 819.

Zhang, D., Wang, Q., and Dong, J. (2016) Simulation Study on CFRP Strengthened Reinforced Concrete Beam under Four-Point Bending. *Computers and Concrete* 17(3), 407-421.

요약 본 연구에서는 콘크리트에 surface-to-surface 접촉 모델(surface-to-surface contact model)의 적용을 검증하기 위한 해석적 연구를 수행하였다. 가력관과 콘크리트 실린더의 접촉 표면에 surface-to-surface 접촉 모델을 적용하여 상용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS로 3개의 쪼갬인장강도 시험을 시뮬레이션하고 3차원 환경에서 평면-평면 접촉 테스트(flat-flat contact test)와 평면-곡면 접촉 테스트(flat-circle contact test)를 수행하였다. 이후 2 mm 크기의 요소로 쪼갬인장강도 시험을 3D 유한요소해석을 수행하였다. 요소의 크기를 줄일 경우 해석 시간이 비약적으로 상승하였다. 따라서 2D 유한요소해석을 이용하여 0.5 mm 크기의 요소로 후속 해석을 수행하였다. 이러한 접근법을 통해, 요소의 크기가 감소함에 따라 해석 결과가 실험 쪼갬인장강도에 더 근접하였으며, 이는 제안된 모델링 기법이 타당함을 의미한다.

핵심용어 : 유한요소해석, surface-to-surface 접촉 모델, 쪼갬인장강도