

강재-콘크리트 샌드위치 패널의 수치해석적 폭발 저항성능 평가

박주현¹ · 황주영^{2*}

¹박사과정, 부산대학교, 사회환경시스템공학과, ²조교수, 동의대학교, 토목공학과

Evaluation of Blast Resistance for Steel-Concrete Sandwich Panel using a Numerical Approach

Park, JuHeon¹, Hwang, Ju-young^{2*}

¹Ph.D Candidate, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

²Assistant Professor, Dept. of Civi Engineering, Dong-Eui University, Busan, 47340, Korea

Abstract – Effective protective structures are essential to mitigate blast hazards. This study evaluates the blast resistance of steel-concrete sandwich panels under blast loads using a numerical approach that accounts for strain rate effects on material properties. Reliable models for the blast load, steel plates, and reinforced concrete (RC) were validated with experimental data. The structural response of the steel-concrete sandwich panel was compared against a reference RC slab. Results show that the sandwich panel significantly reduces maximum displacement and enhances energy dissipation, proving its superiority as a protective structural member.

Keywords – Blast load, Steel-concrete composite structure, Sandwich panel, Blast resistance, Strain rate effect

1. 서론

폭발하중으로 인한 구조물의 손상은 테러, 전쟁, 산업 시설에서의 사고 등 다양한 상황에서 발생할 수 있으며, 사회기반시설의 기능 저하와 인명 피해를 초래할 수 있다. 특히 보조배터리, 전기차 등으로 인해 일상생활에서 사용되는 에너지원의 규모가 커지고 종류가 다양해지면서, 폭발하중에 대한 구조물 및 부재의 저항성 확보와 효과적인 보강기술의 적용이 요구되고 있다. 폭발하중은 매우 짧은 시간 동안 큰 압력을 발생시키는 극한 동적하중으로서, 일반적인 정적하중과 달리 휨, 전단 등 복잡한 파괴 메커니즘을 유발하며, 국부적 손상에서 시작하여 구조물 전체 붕괴로 이어질 수 있다. 폭발 하중에 따른 구조 거동을 파악하기 위한 실험 연

구가 수행되고는 있으나^[1], 하중의 위험성과 규모의 문제로 인해 다른 정적 구조 실험에 비해서 제약이 많고, 불확실성이 높은 편이다. 이러한 문제를 극복하기 위해 수치해석적 접근 또한 활발하게 시도되고 있다^{[2],[3]}.

샌드위치 패널은 일반적으로 두 개의 강판과 그 사이의 코어 재료로 구성되는 복합 구조 시스템으로, 휨 강성, 에너지 흡수 성능 및 국부 손상 저항성 측면에서 장점을 갖는다. 강재가 외부 면판으로 작용하여 인장 및 압축 저항을 담당하고, 내부 콘크리트가 전단 전달과 단면 강성 확보에 기여함으로써, 단일 RC 슬래브에 비해 우수한 구조 성능을 나타낸다^[15]. Lin *et al.*^[1]과 Zhao *et al.*^[2]은 강재-콘크리트 샌드위치 패널의 폭발 거동을 실험 및 수치해석적으로 분석하였다. 그러나 폭발하중 하에서 샌드위치 패널의 구조응답은 재료모델, 변형률 속도 효과 고려, 하중 입력 방식 및 해석 조건에 따라 민감하게 달라질 수 있는데, 앞서 언급한 두 연구의 경우 부재의 좁은 면에 압력이 강하게 집중되는 근거리 폭발(close-in blast)에 대해서만 다루고 있다. 따라서, 폭발이 구면 또는 평면으로 작용하는 중장거리 폭발에 대해서는 거동에 대한 추가적인 검증이 필요하다. 반면, 콘크리트 충전형 강합성 방폭벽에 대한 수치해석적으로

Note.-Discussion open until October 31, 2026. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 29, 2026; revised on April 8, 2026; approved on April 9, 2026. Copyright © 2026 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-890-1612 Fax. +82-50-2600-9287

E-mail. agree.hwang@deu.ac.kr

모사한 Shim *et al.*^[3]의 연구에서는 폭발 하중을 정하중 형태로 치환하여 정적해석을 수행하여 폭발에 따른 동적거동을 간접적으로 분석하였다.

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 활용하여 중거리 폭발(mid-range blast)에 대한 강재-콘크리트 샌드위치 패널의 수치 모델을 구축하고, 합성구조 모델의 타당성을 확보하기 위해 외부 강판과 내부 RC 슬래브로 구분하여 각각에 대해 단계적으로 실험 결과와 비교하였다. 먼저 강판을 대상으로 수행된 실험 결과를 이용하여 샌드위치 패널 외부에 적용되는 강재 수치모델의 고율 변형 시 거동과 응답특성을 확인하였다. 이후 RC 슬래브에 대한 폭발 실험 연구를 참고하여 샌드위치 패널 내부 코어 콘크리트의 거동을 합리적으로 모사할 수 있는 RC 수치 모델을 구축한 뒤, 실험과 해석 간 오차를 최소화함으로써 해석모델의 신뢰성을 확보하였다. 이후 검증된 강재 모델과 RC 모델을 적용하여 양면 강판과 내부 RC 슬래브로 구성된 강재-콘크리트 샌드위치 패널 수치 모델을 통해 부재의 폭발 저항 성능을 평가하였다.

2. 폭발 하중에 대한 수치 모델

2.1 변형률 속도 효과

폭발하중과 같은 극한 동적하중이 작용할 경우, 재료에는 매우 짧은 시간 동안 큰 변형이 집중된다. 이때 재료는 정적하중 조건과 달리 강도가 증대하는 거동을 보이며, 이를 변형률 속도 효과(strain rate effect)라 한다. Fig. 1은 하중 조건에 따른 변형률 속도 범위를 개략적으로 나타낸 것으로, 폭발하중이 매우 높은 변형률 속도 영역에 해당함을 보여준다.

일반적으로 변형률 속도가 낮은 정적 조건에서는 재료가 기준 강도 수준에서 거동하지만, 폭발하중과 같이 높은 변형률 속도에 해당하는 하중이 작용할 경우에는 강재의 항복강도 및 극한강도가 증가하는 경향이 나타난다. 따라서 폭발하중을 받는 구조부재를 해석할 때에는 이러한 강도 증가 효과를 적절히 반영할 필요가 있으며, 이를 고려하지 않을 경우 구조응답과 손상 정도를 정확히 예측하기 어렵다. 변형률 속도 효과를 반영하는 대표적인 방법으로는 동적 증가계수(Dynamic

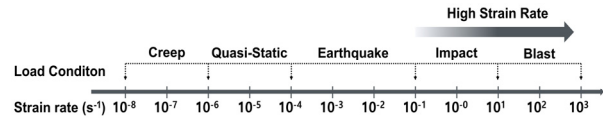


Fig. 1. Classification of load conditions by strain rate

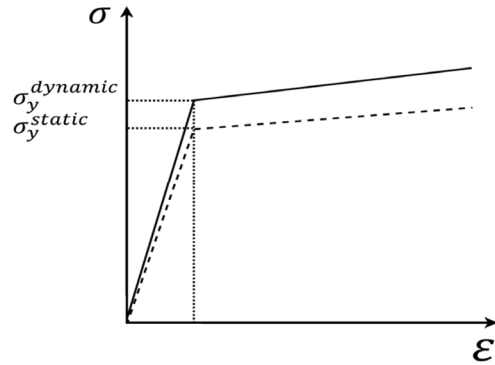


Fig. 2. Adjusted stress-strain relationship of steel accounting for strain rate effect

Increase Factor, DIF)를 재료모델에 반영하는 방법을 주로 사용하고 있으며, DIF는 동적 강도와 정적 강도의 비로 정의된다. 또한 재료 종류, 응력 상태, 변형률 속도 범위 및 실험 조건에 따라 상이한 증가 양상을 나타내므로, 재료별로 다양한 제안식이 제시되어 있다^{[4],[5]}. 본 연구에서 반영되는 강재의 변형률 속도 효과 반영식은 Cowper-Symonds 모델^[4]을 적용하였고, 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$SDIF = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{1/P} \quad (1)$$

여기서 $SDIF$ 는 강재의 동적 증가계수, $\dot{\epsilon}$ 는 변형률 속도, C 와 P 는 Cowper-Symonds 상수이다. Fig. 2에 나타낸 것과 같이 식 (1)을 강재의 응력-변형률 관계에 반영하면 동적 상태의 강성 및 항복강도가 정적 조건에 비해 증가하게 된다.

한편 콘크리트의 경우 압축 및 인장 영역에 대해 변형률 속도 효과의 증가 양상이 상이하므로, 서로 다른 DIF를 적용해야 하는데, 본 연구에서는 압축 측에는 CEB-FIP 1990 모델을, 인장 측은 Malvar의 제안식을 반영하였으며, 세부 수식은 참고문헌을 통해 확인할 수 있다^[6].

2.2 수치 재료 모델

강판과 철근의 거동을 모사하기 위한 강재 재료모델로는 Plastic Kinematic 모델과 Piecewise Linear Plasticity 모델이 대표적으로 사용된다. 두 모델 모두 변형률 속도 효과를 고려할 수 있으나, 본 연구에서는 적용이 비교적 단순하고 계산 효율성이 우수한 Plastic Kinematic 모델을 채택하였다. 해당 모델은 탄성 및 소성구간을 bilinear 응력-변형률 관계로 이상화하여 강재의 거동을 모사할 수 있으며, 이에 따른 응력-변형률 거동을 Fig. 3에 개념적으로 나타내었다^{[7],[8]}.

Plastic kinematic 모델에서 항복 이후 강재 거동은 유효소성변형률에 따른 항복응력의 변화로 정의되며, 항복강도와 극한강도에 SDIF가 고려된 동적 항복 강도 및 극한 강도는 식 (2), 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다^{[7],[8]}.

$$\begin{aligned} \sigma_y^{dynamic} &= \sigma_y \times SDIF \\ &= (\sigma_y + \beta \cdot \frac{E_t \cdot E_y}{E_y - E_t} \cdot \epsilon_{eff}^p) \times SDIF \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &= (\sigma_y + \beta \cdot \frac{E_t \cdot E_y}{E_y - E_t} \cdot \epsilon_{eff}^p) \times [1 + (\frac{\epsilon}{C})^{1/P}] \\ \sigma_u^{dynamic} &= \sigma_u^{dynamic} + E_t \cdot \epsilon_{eff}^p \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 σ_y 는 초기 정적 항복 강도, $\sigma_y^{dynamic}$ 는 동적 항복 강도, E_t 는 접선계수, E_y 는 탄성계수, ϵ_{eff}^p 는 유효소성

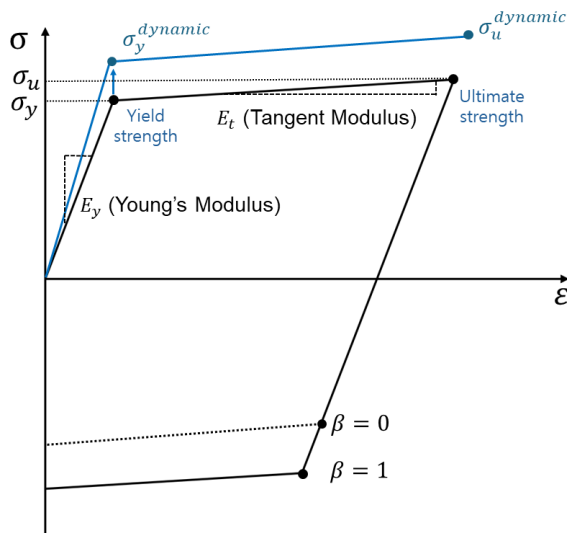


Fig. 3. Stress-strain relationship of plastic kinematic model

변형률, β 는 경화계수이고, $\sigma_u^{dynamic}$ 는 동적 극한강도를 의미한다.

콘크리트 모델 또한 폭발 하중 하에서 나타나는 비선형 동적 응답과 압축, 인장, 균열 등 복합적으로 발생하는 파괴 모드를 합리적으로 재현할 수 있어야 한다. 이처럼 변형률 속도를 고려한 수치해석에 적용되는 대표적인 콘크리트 모델로는 Winfrith, Continuous Surface Cap Model (CSCM), Karagozian & Case (K&C) 모델 등을 들 수 있으며, 본 연구에서는 콘크리트의 균열 등의 국부적인 파괴변형 보다는 전반적인 구조거동을 확인하는데 우선적인 목적을 가지고 있으므로 변형률 속도 효과를 직접적으로 반영할 수 있고, 소성 영역 이후의 거동을 정밀하게 모사할 수 있는 K&C 모델을 채택하였다. 해당 모델의 세부 이론 및 관련 수식은 참고문헌을 통해 확인할 수 있다^{[7],[14]}.

2.3 CONWEP 하중 모델

폭발 하중을 수치적으로 재현하기 위해 폭발-시간 이력을 이상화하여 나타내는 Friedlander 방정식에 기반하여 미 국방부에서 제시한 CONWEP 모델^[9]을 사용하였다. CONWEP 모델은 경험식을 기반으로 등가 TNT 무게와 이격거리만을 이용하여 구조물에 작용하는 입사압 및 반사압을 산정할 수 있는 하중모델이다^{[10],[11]}. 폭발하중은 Fig. 4에 보여지는 것과 같이 최대 압력 도달 이후 시간이 지남에 따라 압력이 급격히 감소하는 양압(positive phase) 구간이 먼저 나타나고, 이후 반동 효과에 의해 대기압 이하로 감소하는 부압(negative phase) 구간이 뒤따르게 된다. 이 중 일반적으

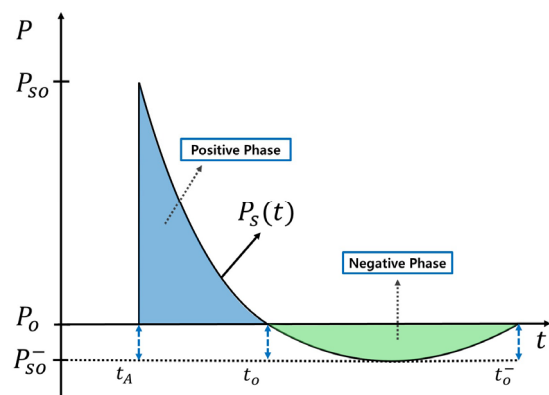


Fig. 4. Friedlander equation

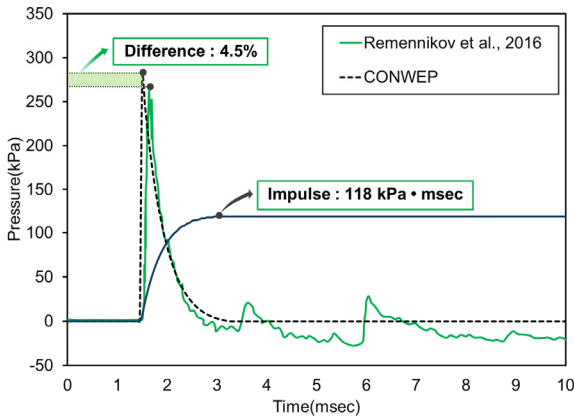


Fig. 5. Comparison of incident pressure between CONWEP and experiment data

로 폭발에 따른 부재의 주요 손상과 변형을 유발하는 것은 부재에 직접적인 폭압이 전달되는 양압 구간이다.

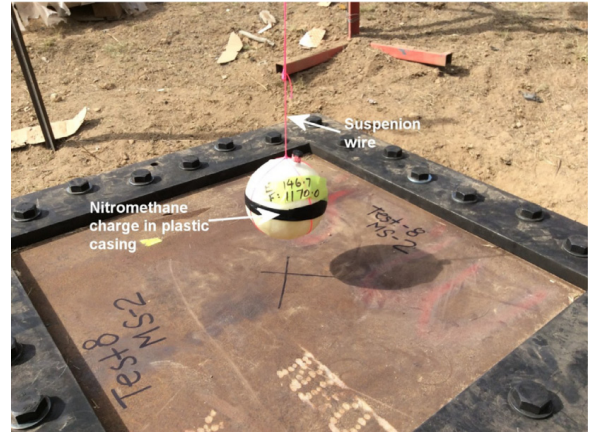
CONWEP 모델의 적정성을 검토하기 위하여, 선행 연구^[12]에서 수행된 강판 폭발 실험의 입사압 계측 결과와 CONWEP 모델 계측값을 비교하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이, 실험에서 측정된 최대 폭압은 266.3 kPa이며, 동일 조건에서 CONWEP 모델이 예측한 최대 폭압은 279.5 kPa로 나타났다. 두 결과의 차이는 약 4.5% 수준으로 평가되었으며, 최대 폭압뿐 아니라 초기 압력 상승과 감쇠 거동 또한 실험 결과와 유사한 경향을 보였다. 따라서 CONWEP 모델은 폭압 특성을 합리적인 범위 내에서 재현할 수 있는 것으로 판단되며, 폭발하중 모델로 적용하기에 적절한 것으로 확인하였다. 이후 수행된 강판 및 RC 슬래브 수치 모델에서는 각 실험 조건에 명시된 등가 TNT 무게와 이격거리를 동일하게 반영하여 산정한 입사압 및 반사압을 산정하고, 이를 부재에 적용함으로써 하중 이력을 구현하였다.

3. 유한요소 수치해석

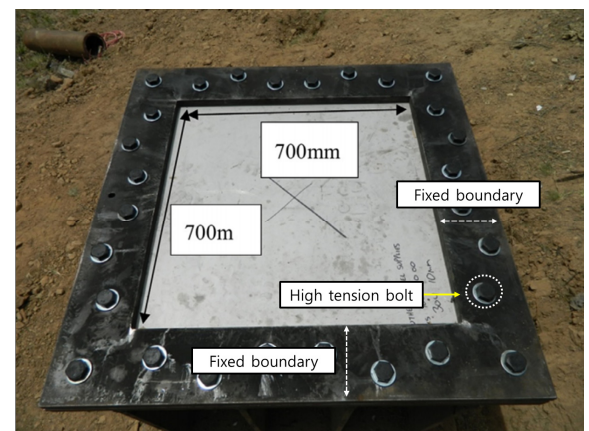
3.1 강재 재료모델 검증

본 연구에서 구축한 수치 재료 모델을 검증하기 위해 단계적으로 실험과 비교하였다. 우선 강도별 강판에 대한 폭발 저항 성능을 실험적으로 비교·평가한 Remennikov *et al.*의 선행 연구를 통해 강재의 재료 모델을 검증하였다^[12].

Fig. 6는 강판 폭발 실험에 사용된 시험체 및 폭약



(a) Blast test setup



(b) Specimen details

Fig. 6. Experiment setup^[12]

Table 1. Steel plate material properties^[12]

Steel properties (unit)	Values
ρ (kg/m^3)	7,850
E_y (MPa)	$1.99e^5$
f_y (MPa)	356
E_t (MPa)	1,000
C (1/msec)	3.2
P	5

설치 조건을 보여준다. Fig. 6(a)에서는 니트로메탄 폭약이 강판 중앙 상부에 와이어로 매달려 배치된 모습을 확인할 수 있으며, Fig. 6(b)는 실험체의 형상과 경계조건을 나타낸 것이다. 실강판은 1,000 mm×1,000 mm×10 mm ($B \times H \times t$) 정방형으로 제작되었고, 실제 폭압을 받는 유효 면적은 외곽 폭 각각 300 mm를 제외한 700 mm×700 mm ($B_{eff} \times H_{eff}$)이다. 강판에 적용되는 물성, Cowper-Symonds 상수, 등가 TNT 무게, 이격거리는 논문에 명시된 수치를 그대로 반영하였으며, 그

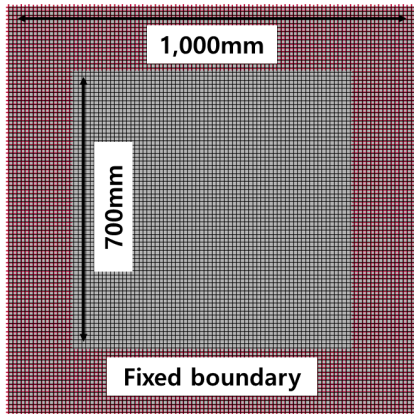


Fig. 7. Finite element model for steel plate

Table 2. Comparison of MS-1 Test result and element types result

Unit (mm)	MS-1	2D SHELL	3D TSHELL	3D SOLID
Max_disp	104	105.5	105.2	104.8

외에 재료 모델에 적용시켜야 할 물성은 일반 구조용 강재의 특성을 기반으로 설정하였다(see Table 1).

Fig. 7은 강판에 대한 유한요소모델을 나타낸 것으로, 실험에서 고장력 볼트로 체결된 외곽부의 구속 조건을 fixed boundary로 이상화하여 반영하였다. 적용 요소 종류에 따른 해석 결과의 타당성을 살펴보기 위해 2D SHELL, 3D TSHELL 및 3D SOLID의 세가지 요소를 이용해 각각 모델링하였다. 이때 사용된 모든 요소의 크기는 수렴성 및 해석 효율성 등을 고려하여 10 mm로 동일하게 설정하였다.

실험 결과와 수치 해석 결과는 최대 변위 및 잔류 변위에 대해 비교하였다. 실험에서 보고된 최대 변위는 104 mm이며 이는 강판의 영구변형을 계측한 값이다. Table 2에서 확인 할 수 있는 것과 같이 적용 요소의 종류에 따른 비교 결과, 2D SHELL 요소는 105.5 mm, 3D TSHELL 요소는 105.2 mm, 3D SOLID 요소는 104.8 mm의 최대 변위가 기록되었고, 실험값에 대한 각 오차는 각각 1.4 %, 1.2 %, 0.8 %였다.

또한 Fig. 8에서 확인할 수 있듯이, 세 가지 요소 종류 모두 초기 응답 이후 진동하면서 수렴하는 변위 이력을 나타내었으며, 잔류변위를 포함한 전반적인 거동 경향 역시 실험 결과와 유사하게 재현되었다. 특히 3D SOLID 요소는 최대 변위와 전체 응답 이력 모두에서 실험 결과와 가장 근접한 거동을 보였으므로, 강판 모델 재현에 적합한 요소 형식으로 판단하였다.

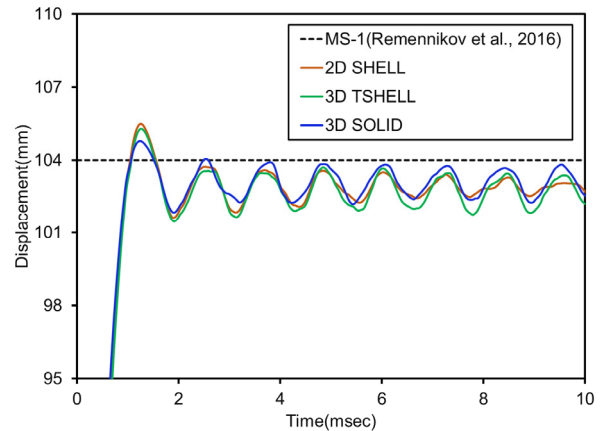


Fig. 8. Comparison of displacement-time histories for steel plate

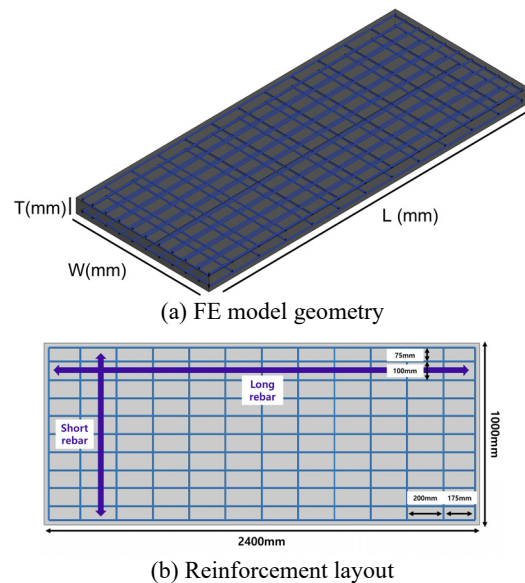


Fig. 9. Details of RC slab^[13]

3.2 RC 슬래브 모델 검증

RC 슬래브 모델 검증에는 Su *et al.*이 수행한 선행 연구 중 일반강도 콘크리트 시편을 활용하였다^[13]. Fig. 9(a)는 시편의 3차원 형상을, Fig. 9(b)는 RC 슬래브의 평면 배근도를 나타내었다. 콘크리트 압축강도는 30.4 MPa, 철근의 항복강도는 480 MPa이며, 그 외의 재료 세부 물성 및 시험 절차에 관한 상세 내용은 참고문헌에 제시되어 있다^[13].

수치모델 구성 시 콘크리트는 3D SOLID 요소로 모델링하였고, 철근의 경우에는 1D BEAM 요소(CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID, CBIS)와 3D SOLID 요소(CONST

Table 3. Comparison of NSC2 test result and numerical results

Unit (mm)	Su <i>et al.</i> ^[13]	NSC2_CBIS	NSC2_CSIS
Max_disp	43.5	38.9	37.3
Resi_disp	15.5	14.4	13.4

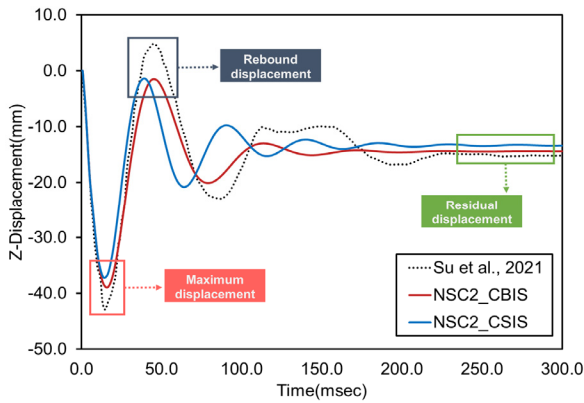


Fig. 10. Comparison of displacement-time histories for RC slab

RAINED_SOLID_IN_SOLID, CSIS)의 두 가지 다른 방식으로 각각 모델링하여 결과를 비교하였다.

해석결과는 중앙부 처짐 응답을 기준으로 실험 결과와 비교하였다. Table 3 및 Fig. 10에 나타난 바와 같이, 실험에서 측정된 최대 변위와 잔류 변위는 각각 43.5 mm 및 15.5 mm로 나타났으며, CBIS 모델의 해석 결과는 최대 변위 38.9 mm, 잔류 변위 14.4 mm로 산정되었다. 이에 따른 오차는 최대 변위에서 약 10.5%, 잔류 변위에서 약 7.2 % 수준으로 평가되었다. 반면 CSIS 모델은 최대 변위 37.3 mm, 잔류 변위 13.4 mm를 나타내어 CBIS 결과와 비교했을 때, 실험값과의 차이가 상대적으로 더 크게 나타났다. 또한 변위 이력 측면에서도 CBIS 모델은 최대 응답 발생 이후 감쇠를 거쳐 잔류 변위에 도달하는 전반적인 경향을 실험 결과와 유사하게 재현하였으며, CSIS 모델에 비해 실험값과 더 근접한 경향을 보였다. 해석 결과 최대변위가 실험값에 비해 다소 작게 나타난 것은 경계조건 및 부착 거동의 이상화 등에 기인한 것으로 판단되나, 전체적인 응답 경향과 잔류 변위 수준을 고려할 때 CBIS 모델은 폭발하중에 대한 구조응답을 합리적인 수준에서 재현한 것으로 판단할 수 있다.

3.3 강재-콘크리트 샌드위치 패널 수치해석

앞에서 검증된 강판 모델과 RC 슬래브 모델을 기반

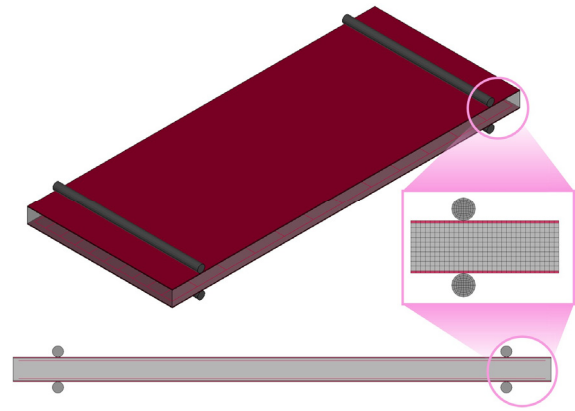


Fig. 11. Steel-Concrete sandwich panel

으로, 기존 RC 슬래브의 상·하면에 5 mm 두께의 강판을 추가하여 강재-콘크리트 샌드위치 패널 수치 모델을 구성하였다. Fig. 11에 나타난 것과 같이 RC 슬래브로 이루어진 코어 양면에 강판을 부착하여 합성 단면을 구성했다. 해석모델의 수렴성을 고려하여, 강판에는 평면 방향으로는 10 mm, 두께 방향으로는 5 mm의 크기를 갖는 3D SOLID 요소를 적용하였으며, 이 때 강판과 콘크리트 사이의 접합은 계면에서 각 요소의 절점을 공유하도록 모델링하여 강재와 RC의 완전 합성 거동을 모사하고자 하였다. 이후 동일한 폭발하중 조건에서 기존 RC 슬래브 모델(CBIS)과 강재-콘크리트 샌드위치 패널 모델의 중앙부 변위 응답을 비교하였다.

Fig. 12 및 Table 4에 RC 슬래브에 대한 실험 결과 및 CBIS 모델 수치해석 결과와 강재-콘크리트 샌드위치 패널 모델(NSC2_SCP)의 수치해석 결과를 비교하여 나타내었다. 중앙부 처짐 응답을 비교한 결과, 샌드위치 패널 모델은 CBIS보다 최대 변위 자체가 크게 감소하였을 뿐만 아니라, 반복적인 반발 진동을 거치며 시간이 지남에 따라 잔류 변위가 거의 0 mm에 수렴하는 거동을 나타내었다. Table 4에 따르면, 샌드위치 패널 모델의 최대 변위와 잔류 변위는 각각 10.4 mm 및 0.2 mm로 나타났으며, 이는 CBIS 모델의 38.9 mm 및 14.4 mm에 비해 각각 약 73.3 % 및 98.6 % 감소한 값이다. 또한 실험값과 비교하면 저항 성능의 증가 폭은 더 커져, 최대 변위는 약 76.1 %, 잔류 변위는 약 98.7 % 감소한 것으로 나타났다. 이러한 결과는 강재-콘크리트 샌드위치 패널에서 RC 슬래브의 양면에 부착한 강판이 폭발하중에 대한 초기 충격을 효과적으로 분산시키고, 콘크리트 코어와의 합성 작용을 통해 단면 강성과

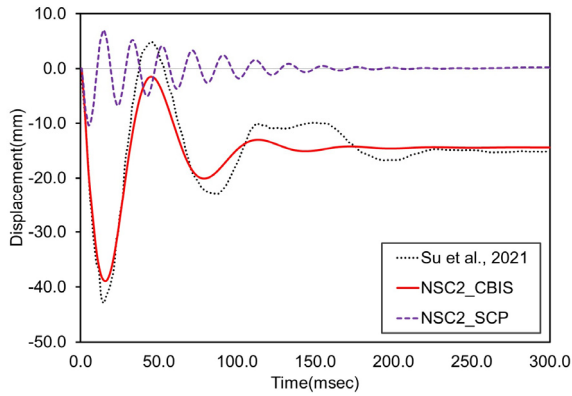


Fig. 12. Numerical results of steel-concrete sandwich panel comparing to RC slab

Table 4. Comparison of NSC2 test, NSC2_CBIS and NSC2_SCP

Unit (mm)	Su et al. ^[13]	NSC2_CBIS	NSC2_SCP
Max_disp	43.48	38.9	10.4
Resi_disp	15.51	14.4	0.2

복원 성능을 크게 향상시켰기 때문으로 판단된다. 특히, 샌드위치 패널에서는 잔류변위가 거의 발생하지 않았는데, 이는 폭발하중에 의한 소성변형이 없어 폭발 이후에도 폭발 이전과 비슷한 구조 형태의 유지가 가능하다는 것을 의미한다. 강판 모델의 경우 두께의 10배가 넘는 소성변형이 발생하였고, RC 슬래브의 경우에도 15 mm 정도의 소성변형이 발생하였는데, 구조체 내부의 부재라면 폭발 이후 정적하중 상태에서도 이러한 소성변형에 따른 추가적인 응력이 상당히 크게 발생할 것으로 예상된다. 이에 반해 소성변형이 거의 없는 강재-콘크리트 샌드위치 패널 부재의 경우에는 폭발하중 경험 후에도 전체 구조물의 안전성이 비교 부재들에 비해 크게 증가할 것이다. 다만, 본 연구에서는 강재와 콘크리트 계면에서의 관계를 폭발 하중을 경험하는 전 과정에서 완전 부착으로 가정하였는데, 이로 인해 샌드위치 패널의 합성구조 거동이 극대화되어 저항성능 또한 굉장히 이상적으로 증가했을 것으로 판단된다. 실제 샌드위치 패널의 경우 전단연결재 등 내부 구성요소에 따라 부착성능에 차이가 있으며, 폭발하중을 경험하면서 발생하는 부착성능의 변화로 인해 부재의 저항성능에 추가적인 영향 또한 있을 것으로 보여진다. 따라서 강재-콘크리트 계면에서의 부착을 고려한다면 본 연구에서 제안한 수치모델에 비해 실제 거동에 가까운 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 폭발 실험을 바탕으로 수행한 강재 및 RC 슬래브 해석 모델을 단계적으로 검증한 후, 이를 기반으로 강재-콘크리트 샌드위치 패널에 대한 폭발 저항 성능을 평가하였으며, 아래와 같이 결론을 도출하였다.

- (1) 폭발하중에 따른 강재와 콘크리트의 거동을 수치적으로 모사하기 위해서는 변형률 속도 효과 (strain-rate effect)를 효율적으로 고려할 수 있는 재료모델의 적용이 필수적이다.
- (2) 검증된 하중 모델(CONWEP)을 바탕으로 강판 수치 모델은 2D SHELL, 3D TSHELL, 3D SOLID의 세 가지 요소 종류를 각각 적용한 결과, 세 모델 모두 실험 결과와 유사한 응답을 재현하였다. 이 중 3D SOLID 요소가 최대 변위 및 변위 이력 측면에서 가장 높은 재현성을 나타내었다.
- (3) RC 슬래브의 경우, 콘크리트는 3D SOLID로 모델링하고, 내부 철근의 요소를 1D BEAM과 3D SOLID로 각각 모델링 하여 실험 결과와 함께 비교한 결과, 전반적인 경향성과 변위 오차를 고려할 때 1D BEAM요소를 적용한 CBIS모델이 적절한 것으로 판단되었다.
- (4) 강판과 RC 슬래브에서 검증된 각각의 수치모델을 완전 부착 형태로 결합하여 강재-콘크리트 샌드위치 패널에 대한 수치모델을 구성하고, RC 슬래브에 대한 실험 결과 및 수치해석 결과와 비교했을 때, 최대 변위와 잔류 변위가 현저히 감소하는 것으로 나타났다. 이를 통해 강재-콘크리트 샌드위치 패널이 폭발하중에 대해 뛰어난 저항 성능을 보여주어, 손상 저감에도 효과적일 수 있는 구조 형식임을 확인하였다.

본 연구에서 구성하고 검증한 강재-콘크리트 샌드위치 패널에 대한 수치모델을 활용한다면, 추후 변수해석을 통해 중거리 폭발에 노출된 샌드위치 패널의 거동에 영향을 미치는 다양한 요인을 파악할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 본 연구에서는 강재와 콘크리트의 합성거동을 위해 계면에서 완전 부착 조건을 가정하여 해

석을 수행하였으므로, 실제 부착-슬립이 발생하는 합성 구조 계면에서의 거동을 충분히 반영하지 못한 한계가 있다. 따라서 후속 연구에서는 강판-콘크리트 계면의 부착 조건을 세분화하고, 폭발에 따른 부착성능 변화 등을 반영하여 보다 더 정교한 수치 모델을 구성하고자 한다.

참고문헌(References)

- [1] Lin, Q., Li, Y., Dong, Q., Wang, Y., and Hui, Q. (2026) Blast Resistance of Steel-High-Performance Concrete Composite Slabs Part I: Contact Blast Experiment, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, Vol.219, No.Part B, 114291.
- [2] Zhao, C., He, K., Zhi, L., Lu, X., Pan, R., Gautam, A., Wang, J., and Li, X. (2021) Blast Behavior of Steel-Concrete-Steel Sandwich Panel: Experiment and Numerical Simulation, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.246, 112998.
- [3] Shim, K.B., Kim, B.J., and Koo, H. (2020) Optimized Design of Grid Type Explosion-Proof Door Using Load Distribution Method, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.6, pp.397-404 (in Korean).
- [4] Gyliene, V., and Ostasevicius, V. (2011) Cowper-Symonds Material Deformation Law Application in Material Cutting Process Using LS-DYNA FE Code: Turning and Milling, *Proceedings of 8th European LS-DYNA Users' Conference*, France, pp. 1-12.
- [5] Malvar, L.J., and Crawford, J.E. (1998) Dynamic Increase Factors for Steel Reinforcing Bars, *Proceedings of the Twenty-Eighth DoD Explosives Safety Seminar*, USA.
- [6] Li, X.Q., Chen, Q.J., Chen, J.F., Liao, J.Z., and Lu, Y. (2022) Dynamic Increase Factor (DIF) for Concrete in Compression and Tension in FE Modelling with a Local Concrete Model, *International Journal of Impact Engineering*, Elsevier, Vol.163, 104079.
- [7] Livermore Software Technology (LST), an Ansys company. (2022) *LS-DYNA Keyword User's Manual, Volume II: Material Models*, LS-DYNA R13, r:14717, USA.
- [8] Škrlec, A., and Klemenc, J. (2016) Estimating the Strain-Rate-Dependent Parameters of the Cowper-Symonds and Johnson-Cook Material Models using Taguchi Arrays, *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, Vol.62, No.4, pp.220-230.
- [9] Departments of the Army, the Navy, and the Air Force. (1990) *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*, TM 5-1300/NAVFAC P-397/AFR 88-22, USA.
- [10] Slavik, T.P. (2012) *Blast Loading in LS-DYNA*, Livermore Software Technology Corporation, University of California-San Diego, USA.
- [11] Lee, K., and Shin, Y. (2023) Evaluation of Global and Local Response of Steel Moment Frame Under Blast Load, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.6, pp.377-384.
- [12] Remennikov, A., Ngo, T., Mohotti, D., Uy, B., and Netherton, M. (2017) Experimental Investigation and Simplified Modeling of Response of Steel Plates Subjected to Close-in Blast Loading from Spherical Liquid Explosive Charges, *International Journal of Impact Engineering*, Elsevier, Vol.101, pp.78-89.
- [13] Su, Q., Wu, H., Sun, H.S., and Fang, Q. (2021) Experimental and Numerical Studies on Dynamic Behavior of Reinforced UHPC Panel under Medium-Range Explosions, *International Journal of Impact Engineering*, Elsevier, Vol.148, 103761.
- [14] Wu, Y., and Crawford, J. E. (2015) Numerical Modeling of Concrete Using a Partially Associative Plasticity Model, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.141, No.12, 04015051.
- [15] Jeong, M.H., Lee, C.H., and Park, M.J. (2025) Structural Fire Design Method of Steel-Plate Composite Walls under Standard Fire Based on Temperature Distributions, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.37, No.5, pp.251-259 (in Korean).

요약: 폭발 하중으로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 효과적인 방호 구조물의 도입이 필수적이다. 본 연구에서는 재료의 변형률 속도 효과(strain rate effect)를 고려한 수치해석적 기법을 이용하여 폭발 하중을 받는 강재-콘크리트 샌드위치 패널의 저항 성능을 평가하였다. 강재 및 철근콘크리트(RC)에 대한 신뢰성 있는 해석 모델을 구축하고, 실험결과와의 단계적 비교를 통해 강판 및 RC 슬래브에 대한 수치모델을 검증하였다. 이후 폭발하중에 따른 강재-콘크리트 샌드위치 패널의 구조적 거동을 기존 RC 슬래브와 비교 분석하였다. 해석 결과, 강재-콘크리트 샌드위치 패널은 최대 변위를 현저히 감소시키고 에너지 소산 능력을 향상시키는 것으로 나타났으며, 이를 통해 방호 구조 부재로서의 우수성을 입증하였다.

핵심용어: 폭발 하중, 강재-콘크리트 합성 구조, 샌드위치 패널, 폭발 저항 성능, 변형률 속도 효과