

군용 차량 하부 폭발 위치에 따른 방호판-캐빈-의자 구조의 구조 응답 및 하중 전달 특성 분석

김태훈* · 한장우* · 박우진** · 곽윤기*†

Investigation of Structural Response and Dynamic Load Transfer Characteristics of Blast Protection Plate-Cabin-Chair Structures according to Underbody Blast Location in a Military Vehicle

Tae Hun Kim*, Jang-Woo Han*, Woojin Park**, Yunki Gwak*†

ABSTRACT: Underbody blast loading induced by landmines and improvised explosive devices is one of the most critical threats to military vehicles and occupants. In this study, the effects of blast location on the structural response and dynamic load transfer characteristics of a military tactical vehicle were numerically investigated. A finite element model of the vehicle structure, including the blast protection plate, cabin floor, and seat structure, was developed using Abaqus/Explicit. Two representative blast scenarios were considered: a front-wheel underbody blast and a central underbody blast beneath the cabin. A 6 kg TNT equivalent charge was applied based on the STANAG 4569 Level 2 protection condition, and the blast loading was implemented using the CONWEP model. The time histories of reaction force and acceleration were extracted at the protection plate, cabin floor, and seat locations.

초 록: 지뢰 및 급조폭발물에 의한 차량 하부 폭발은 군용 차량의 구조 안전성과 탑승자 생존성에 직접적인 영향을 미치는 주요 위협 요소이다. 본 연구에서는 군용 전술차량을 대상으로 하부 폭발 위치가 방호판, 캐빈 바닥 및 의자 구조로 전달되는 동적 하중 전달 특성에 미치는 영향을 수치해석적으로 분석하였다. Abaqus/Explicit을 이용하여 방호판, 캐빈 바닥 및 시트 구조를 포함한 차량 유한요소 모델을 구축하였으며, 폭발 조건은 STANAG 4569 Level 2 기준에 해당하는 TNT 6 kg 등가 폭발로 설정하였다. 폭발 하중은 CONWEP 기반 모델을 이용하여 구현하였고, 앞바퀴 하부 폭발 조건과 캐빈 하부 중심 폭발 조건을 비교하였다. 주요 평가 위치는 방호판, 캐빈 바닥 및 의자로 설정하였으며, 각 위치에서의 작용력 및 가속도 시간 이력을 분석하였다.

Key Words: 하부 폭발(Underbody blast), 군용차량(Military vehicle), 구조 응답(Structural response), 하중 전달(Load transfer), CONWEP, STANAG 4569

1. 서 론

1.1 연구배경 및 연구목적

최근 비정규전 및 비대칭 전장 환경에서 지뢰와 급조폭

발물(Improvised Explosive Device, IED)에 의한 하부 폭발 위협은 군용 차량의 생존성 확보에서 핵심적인 설계 문제로 대두되고 있다[1,2]. 차량 하부에서 발생하는 폭발은 짧은 시간 동안 고강도의 충격 하중을 유발하며, 이 하중은 하

Received 24 July 2026, received in revised form 10 August 2026, accepted 19 August 2026

*Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology

**SNT Dynamics

†Corresponding author (E-mail: yunki@kumoh.ac.kr)

부 방호판, 차체 프레임, 캐빈 바닥을 거쳐 탑승자 위치까지 순차적으로 전달된다. 이 과정에서 방호판의 하중 완화 성능뿐만 아니라, 완화되지 않은 잔여 하중이 차체 내부의 어떤 경로를 거쳐 탑승자에게 전달되는지가 실제 인명 피해를 좌우한다. 그러나 기존의 하부 폭발 관련 연구는 주로 방호판, 보강 평판 또는 단순화된 차체 구조를 대상으로 국부 변형, 충격 응답 및 에너지 흡수 성능을 평가하는 데 초점을 두어 왔다[3-5]. 그러나 이러한 접근은 국부적 응답에 초점을 두어, 폭발 위치에 따라 하중 작용 구조와 전달 경로가 달라지는 차량 수준의 특성을 반영하는 데 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 폭발 위치를 주요 변수로 하여, 방호판에서 캐빈을 거쳐 탑승자에 이르는 하중 전달 경로를 차량 수준에서 통합적으로 분석하였다. 폭발 조건은 STANAG 4569 Level 2를 기준으로 설정하였으며, 앞바퀴 하부 폭발 조건(Level 2a)과 차체 하부 중심 폭발 조건(Level 2b)으로 구분하여 폭발 위치에 따른 구조 응답 차이를 비교하였다. 구체적으로는 방호판, 캐빈 바닥 및 의자 위치에서의 작용력과 가속도 시간 이력을 비교함으로써 폭발 위치에 따른 차체 내부 하중 전달 특성을 분석하고자 하였으며, 이를 통해 향후 군용 차량 하부 방호 구조의 설계 및 성능 평가를 위한 기초 자료를 제공하는 데 그 목적이 있다.

2. 수치해석 모델 및 하중 조건

군용 차량의 하부 폭발은 매우 짧은 시간 동안 고강도 충격 하중을 유발하며, 폭발 위치나 구조 형상과 같은 다양한 조건에 따라 구조물의 동적 응답과 하중 전달 특성이 크게 달라진다. 이러한 조건 변화에 따른 구조 응답을 실험만으로 규명하기에는 비용과 안전상의 제약이 크므로, 유한요소법(Finite Element Method, FEM)을 기반으로 한 수치해석 기법이 폭발 하중 조건에서의 구조 응답을 평가하기 위한 효과적인 방법으로 널리 활용되고 있다[6,7]. 따라서 본 연구에서는 폭발 위치에 따른 군용 차량의 구조 응답과 하중 전달 특성을 분석하기 위해, 상용 유한요소 해석 프로그램인 Abaqus/Explicit을 이용하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다.

2.1 차량 및 구조 모델

사용된 유한요소 모델은 120 mm 박격포 탑재를 목적으로 설계된 군용 전술차량 플랫폼을 기반으로 구성하였으며, 차량은 크게 차체, 박격포 장착 구조물 및 120 mm 박격포로 이루어진다. 하부 폭발에 의한 충격 하중은 주로 차체 하부에서 상방으로 전달되므로, 본 연구에서는 이러한 하중 전달 경로에 직접 관여하는 차체 구조를 중심으로 해석 대상을 모델링하였다. 이에 따라 차량 후방에 적재되는 120 mm 박격포는 형상이 복잡하고 하부 폭발의 전달 경로에 직접 관여하지 않으므로 실제 질량과 동일한 등가 하중을 갖는 단순화된 형상으로 치환하였으며, 차량 내부의 엔

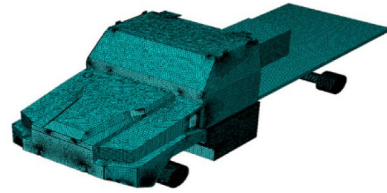


Fig. 1. Finite element model of a military tactical vehicle for underbody blast simulation

진 및 서브프레임 등도 해석 효율성을 위해 세부 형상을 단순화한 등가 모델로 반영하였다. 다만 하중 전달 특성에 직접적인 영향을 미치는 차체 외곽, 방호판, 차체 프레임 등은 그대로 모델에 반영하고 주요 구조물 간에는 접촉(Contact) 조건을 설정하여, 실제 차량에서 하중이 구조물 간 경계를 거쳐 전달되는 경로를 해석 모델에 반영하였다. 이와 같이 구성된 최종 차량 유한요소 모델은 총 2,067,969개의 요소와 1,519,129개의 절점으로 이루어진다. 실제 차량의 하부 폭발 상황을 반영하기 위하여, 각 구조물에 상응하는 질량을 부여하고 이에 의한 자중을 경계조건으로 적용하였다. 이때 차량은 별도의 인위적 구속 없이 자유 상태로 설정하였으며, 병진 및 회전 자유도를 구속하지 않고 실제 차량 중량에 상응하는 자중이 폭발 하중에 저항하도록 하였다. 한편, 타이어는 하부 폭발 하중의 전달 경로에 직접 관여하는 주요 저항 요소가 아니라고 판단하여 본 해석에서는 모델에서 생략하였다. 구성된 차량 유한요소 모델은 Fig. 1과 같다.

2.2 부위별 방폭 재료적용 및 구성 방정식

군용 차량은 부위별로 요구되는 구조적 역할과 방호 성능이 서로 다르므로, 실제 차량에 적용된 방탄강 및 구조용 강재를 구분하여 모델에 반영하였다. 높은 관통 저항과 구조 강성이 요구되는 캐빈에는 방탄강 ARMOX 600T를, 폭발 및 파편 하중으로부터 차량 하부를 직접 보호하는 방호판에는 고경도 방호강 RAMOR 500을 적용하였으며, 외부 차체 및 전방 하우징에는 SPHC를, 하부 방호판을 지지하는 지지 구조물에는 SS275를 적용하였다. 각 재료의 밀도, 탄성계수, 포아송비 및 Johnson-Cook 물성치는 캐빈용 ARMOX 600T와 방호판용 RAMOR 500에 대해서는 해당 재료의 문헌값을 적용하였다[8,9]. 한편, 외부 차체용 SPHC와 지지 구조용 SS275의 경우 고변형률 속도 조건에서의 Johnson-Cook 물성 확보가 제한적이므로, 기계적 특성이 유사한 저탄소 구조용 강재 및 ASTM A36 강재에 대해 문헌에서 제시된 물성치를 각각 준용하였다[10,11].

2.2.1 Johnson-Cook 소성 모델

재료의 거동은 항복 이전에는 선형 등방성 탄성체로, 항복 이후에는 소성체로 가정하였으며, 소성 영역의 항복응력은 폭발과 같은 고속 충격 조건에서의 변형 경화 및 변형

률 속도 효과를 반영할 수 있는 Johnson-Cook 모델로 정의하였다. Johnson-Cook 모델은 변형 경화, 변형률 속도 의존성, 열 연화 효과를 통합적으로 고려하는 경험적 구성 모델로, 폭발과 같이 높은 변형률 속도를 동반하는 고속 충격 조건에서의 금속 재료 유동응력을 기술하는 데 널리 사용된다. 이를 통해 항복 이후의 유동응력을 정의하였으며, 유동응력은 식 (1)과 같이 표현된다[12,13].

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon})(1 - T^m) \quad (1)$$

식 (1)에서 첫 번째 항은 변형 경화, 두 번째 항은 변형률 속도 의존성, 세 번째 항은 열 연화 효과를 나타낸다. 여기서 A 는 기준 항복응력, B 와 n 은 변형 경화 특성을 나타내는 계수이고, C 는 변형률 속도 민감도 계수, m 은 열 연화 지수이다. $\dot{\varepsilon}$ 는 기준 변형률 속도로 정규화된 무차원 변형률 속도이며, T 는 상온과 용융온도를 기준으로 무차원화 된 온도를 의미한다. 한편 하부 폭발에 의한 충격 하중은 지속시간이 매우 짧아 소성 변형에 의한 온도 상승이 국부적으로 발생하는 데 그치며, 구조 전반의 하중 전달 응답에 미치는 영향은 제한적이다. 이에 따라 본 해석에서는 식 (1)의 열 연화 항을 제외하고 변형 경화 및 변형률 속도 효과를 중심으로 재료 거동을 모델링하였다.

2.3 폭발 하중 조건

2.3.1 폭발 과압 하중 모델링

폭발 하중을 수치해석에 반영할 때는 폭발물의 형상이나 폭발 과정을 직접 모사하는 대신, 구조 응답에 지배적인 폭발 압력을 등가 하중으로 적용하는 방법이 널리 사용되며, 이는 폭발물과 주변 유체 영역을 직접 모델링하지 않아 계산 비용을 줄이면서도 표면 압력 하중을 효과적으로 반영할 수 있다. 구조물 표면에 작용하는 폭발 압력의 시간 이력은 입사 과압과 반사 과압의 조합으로 정의되며, 식 (2)와 같이 표현된다.

$$p(t) = p_{ref} \cdot f(\theta) + p_{in} \cdot g(\theta) \quad (2)$$

여기서 p_{in} 은 입사 과압, p_{ref} 는 반사 과압, θ 는 폭발파의 입사각을 의미하고, $f(\theta)$ 와 $g(\theta)$ 는 각각 반사 성분과 입사 성분에 대한 입사각 의존 함수로, 폭발파가 표면에 작용하는 방향에 따른 압력 기여도를 반영한다. 이러한 압력 분포는 폭발 위치와 구조물 형상에 따라 달라지며, 차체 하부와 같이 평면과 곡면이 혼재된 구조에서는 국부적인 반사파 증폭이 발생할 수 있다[14].

2.3.2 STANAG 4569 기반 폭발 하중 및 위치 조건

NATO STANAG 4569는 지뢰 및 급조폭발물에 의한 하부 폭발 위협에 대하여 군용 차량의 방호 성능을 등급화한 규

격으로, Level 2는 TNT 등가 질량 6 kg의 폭발 조건에 해당하며 폭발 위치를 차량 앞바퀴 하부(Level 2a)와 차체 중심 하부(Level 2b)로 구분한다[15]. 이에 따라 본 연구에서는 동일한 6 kg 구형 TNT 장약을 적용하되 폭발 위치만을 달리한 두 시나리오를 설정하여, 폭발 강도의 영향을 배제하고 위치 변화가 구조 응답에 미치는 영향만을 비교하였다. 첫 번째 시나리오는 차량 우측 앞바퀴 하부에서 폭발이 발생하는 조건으로, 폭심이 차체 중심에서 벗어나 있어 충격 하중이 전방 차체 구조를 따라 비대칭적으로 전달되며 국부 변형이 차체 하부 외곽에 집중된다. 두 번째 시나리오는 방호판 중앙 하부에서 폭발이 발생하는 조건으로, 폭심이 방호판과 수직으로 근접하여 충격파가 차체 하부 구조에 비교적 대칭적으로 작용하고 방호판과 캐빈 바닥을 통한 직접적인 하중 전달이 지배적으로 나타난다. 구조 응답의 정량적 비교를 위한 평가 기준점은 하중 전달 경로를 따라 방호판, 캐빈 바닥, 의자 순으로 설정하였으며, 각 기준점에서 작용력과 가속도의 시간 이력을 산출하였다. 이때 각 응답은 전역 좌표계의 수직 방향인 z축 성분을 추출하였는데, 이는 하부 폭발 하중이 차체 하부에서 상방으로 전달되어 수직 성분이 지배적이고, 탑승자에게 전달되는 충격 또한 수직 가속도가 주요 평가 지표가 되기 때문이다.

3. 해석 결과 및 분석

3.1 폭발 위치에 따른 취약 부위 및 응력 분포

폭발 위치에 따른 구조 응답의 차이를 먼저 전체적인 관점에서 파악하기 위해, 두 폭발 조건에서 차체 구조에 발생하는 von Mises 응력 분포와 취약 부위를 비교하였다. Fig. 2는 앞바퀴 하부 폭발 조건과 캐빈 하부 중심 폭발 조건에서의 응력 분포를 나타낸 것으로, 폭발 위치에 따라 응력이 집중되는 부위가 뚜렷하게 달라짐을 확인할 수 있다.

앞바퀴 하부 폭발 조건에서는 Fig. 2(a)와 같이 폭심에 인접한 차량 우측 하부 전면 플레이트에 응력이 집중되는 것으로 나타났다. 이는 폭심이 차체 중심에서 벗어나 있어 충격 하중이 전방 차체 구조를 따라 비대칭적으로 전달되고, 그

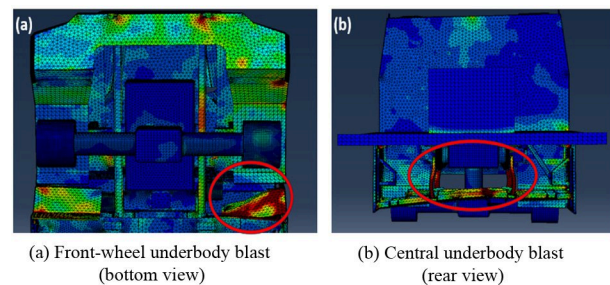


Fig. 2. Comparison of stress distribution and vulnerable regions according to blast location. (a) Front-wheel underbody blast (b) Central underbody blast

결과 국부적인 응력 집중과 변형이 하부 외곽 구조에 편중되기 때문이다. 반면, 캐빈 하부 중심 폭발 조건에서는 Fig. 2(b)와 같이 방호판 플레이트와 이를 지지하는 하부 지지 구조물에 응력이 집중되었다. 이는 폭심이 방호판 중앙 하부와 수직으로 근접하여 폭발 하중이 방호판에 직접 작용하고, 그 하중이 방호판 지지 구조를 통해 전달되면서 해당 부위에 응력이 집중되었기 때문이다. 그 결과 방호판에는 폭압에 의한 국부적인 휨 변형이 크게 발생하였으며, 이를 지지하는 하부 구조물에서는 압축 하중에 의한 좌굴 거동이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 폭발 위치는 차체 구조의 취약 부위와 응력 집중 경로를 결정하는 주요 인자로 작용하였고 이러한 응력 분포 특성이 실제 하중 전달 과정에서 각 구조 부위의 작용력과 가속도 응답으로 어떻게 나타나는지를 정량적으로 분석하였다.

3.2 폭발 조건별 구조 응답 특성

폭발 위치에 따른 하중 전달 양상을 파악하기 위해, 각 폭발 조건에서 방호판, 캐빈 하부, 의자 세 위치의 작용력과 가속도 시간 이력을 함께 비교하였다. 세 위치는 폭발 하중이 차체 하부에서 상부로 전달되는 경로에 순차적으로 위치하므로, 이들의 응답을 함께 살펴봄으로써 각 폭발 조건에서 충격이 어떻게 전달되고 감쇠되는지를 확인할 수 있다.

Fig. 3는 앞바퀴 하부 폭발 조건에서 세 위치의 작용력과 가속도 시간 이력을 나타낸 것으로, 각 그래프에서 빨간색은 방호판, 파란색은 캐빈 하부, 검은색은 의자 위치의 응답을 의미한다. 작용력의 경우, 폭심에 인접한 방호판보다 오히려 캐빈 하부에서 더 큰 힘이 작용하는 특징이 나타났는데 이는 앞바퀴 하부 폭발 시 방호판이 폭발파의 전파 경로상 1차 충격을 완화하기 어려운 위치에 놓여 있어, 완화되지 않은 하중이 캐빈으로 전달되었기 때문이다. 그리고 방호판에 비해 캐빈 구조가 상대적으로 큰 관성하중과 구속 반력을 받기 때문으로 판단된다. 반면, 가속도 응답에서는 방호판이 초기 단계에서 상대적으로 높은 값을 나타냈는데, 이는 방호판을 구속하는 지지 구조물이 적어 폭발 충격에 의해 비교적 쉽게 진동하였기 때문이다. 한편, 의자 위치에서는 폭발 충격이 방호판과 캐빈을 거쳐 전달되므로

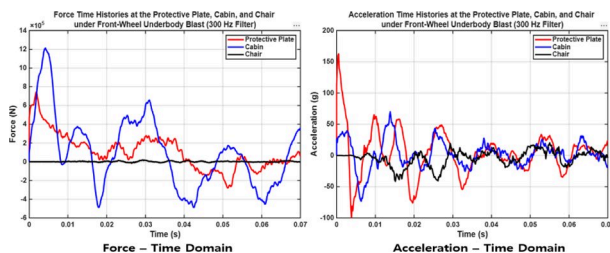


Fig. 3. Time histories of force and acceleration at the protective plate, cabin, and chair under front-wheel underbody blast

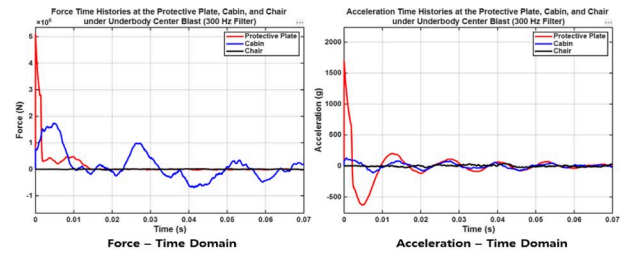


Fig. 4. Time histories of force and acceleration at the protective plate, cabin, and chair under central underbody blast

응답이 지연되어 나타났으며, 작용력과 가속도 모두 다른 두 위치에 비해 매우 작은 수준을 보였다. 또한 가속도 결과를 보면 약 0.04 s 이후에는 초기 폭발파에 의한 충격 성분이 대부분 사라지고, 응답이 차체 전체의 구조 진동 형태로 전환되는 경향을 보였다.

Fig. 4은 캐빈 하부 중심 폭발 조건에서 세 위치의 작용력과 가속도 시간 이력을 보여준다. 작용력의 경우, 폭심과 수직으로 근접한 방호판이 폭발 에너지를 직접 수용하면서 폭발 직후 약 5 MN 이상의 매우 큰 힘이 발생하고, 이후 빠르게 감쇠하는 경향을 보였다. 앞바퀴 조건과 달리 방호판에 하중이 직접 집중되는 것으로, 이는 3.1절의 응력 분포에서 방호판과 지지 구조에 응력이 집중된 결과와도 일치한다. 반면, 캐빈 하부에서의 작용력은 방호판에 비해 상대적으로 작게 나타났는데 이는 방호판이 폭발 하중을 1차적으로 흡수·분산하는 에너지 흡수층으로 작용하여, 상부 구조로 전달되는 하중을 저감하였기 때문이다. 또한 캐빈으로 전달되는 하중은 방호판, 연결부, 하부 프레임을 순차적으로 거치면서 시간적으로 지연되고 공간적으로 분산되었으며, 이 과정에서 연결부와 하부 프레임이 고주파 충격 성분을 그대로 전달하지 않고 완화하는 동적 필터링 효과를 주었다.

가속도 응답에서도 유사한 경향이 확인되었는데 방호판에서는 초기 충격에 의해 매우 큰 가속도가 발생하였으나 이후 진폭이 빠르게 감소하였으며, 이러한 감쇠 과정을 거쳐 캐빈과 의자 위치로 전달되는 가속도 응답은 현저히 작은 수준으로 나타났다. 이는 하부 방호 구조와 차체 프레임이 폭발 에너지를 순차적으로 흡수·분산시켜 탑승 공간으로 전달되는 충격을 저감하는 역할을 수행하였음을 보여준다.

3.3 구조 부위별 하중 전달 특성

앞선 3.2절에서는 각 폭발 조건에서 세 위치의 응답을 조건별로 비교하였다. 그러나 하부 폭발에 대한 방호 성능을 평가하기 위해서는, 폭발 하중이 방호판에서 캐빈을 거쳐 탑승자 위치로 전달되는 과정에서 각 구조 부위가 충격을 어느 정도 완화시키는지 부위별로 분석할 필요가 있다. 이에 본 절에서는 동일한 구조 부위에서 두 폭발 조건의 응답을 직접 비교함으로써, 폭발 위치에 따른 하중 전달 특성

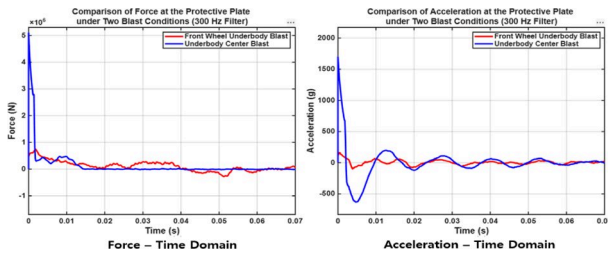


Fig. 5. Comparison of force and acceleration at the protective plate under two blast conditions

의 차이와 하중 전달 경로를 따른 충격의 감쇠 양상을 정량적으로 분석하였다. 각 그래프에서 빨간색은 앞바퀴 하부 폭발 조건, 파란색은 캐빈 하부 중심 폭발 조건의 응답을 의미한다.

Fig. 5은 방호판 위치에서 두 폭발 조건의 작용력과 가속도 시간 이력을 비교한 것이다. 방호판의 최대 작용력은 캐빈 하부 중심 폭발 조건에서 약 5×10^6 N으로, 앞바퀴 하부 폭발 조건의 약 0.6×10^6 N에 비해 약 8.3배 큰 값을 나타냈다. 가속도 또한 중심 폭발 조건에서 약 1700 g의 최대값을 보인 반면 앞바퀴 조건에서는 약 200 g 수준으로, 약 8.5배의 차이를 보였다. 이와 같은 큰 차이는 폭발원과 방호판 사이의 위치 관계에서 비롯된 것으로 캐빈 하부 중심 폭발 조건에서는 폭발원이 방호판 바로 아래에 위치하여 방호판이 순간적으로 큰 압력 하중을 직접 받으므로, 폭발 초기에 매우 큰 작용력과 가속도가 발생하였다. 반면, 앞바퀴 하부 폭발 조건에서는 폭발원이 방호판 중심에서 벗어나 있고, 폭발 에너지가 전방 구동축 및 전방 하부 구조를 거치며 먼저 분산되기 때문에, 방호판에 직접 도달하는 압력과 충격량이 상대적으로 감소한 것으로 분석된다.

Fig. 6은 캐빈 바닥 위치에서 두 폭발 조건의 작용력과 가속도 시간 이력을 비교한 것이다. 캐빈 바닥에서도 캐빈 하부 중심 폭발 조건이 앞바퀴 하부 폭발 조건에 비해 다소 큰 충격을 유발하였으나, 그 차이는 현저히 작게 나타났다. 이는 캐빈 바닥이 폭발 하중을 직접 받는 부위가 아니라, 방호판을 거친 2차 충격을 전달받는 위치이기 때문이다.

캐빈 바닥에 도달하는 충격은 폭발 원점에서 방호판의 국부 변형, 체결부 및 지지부의 변형, 하부 프레임을 통한

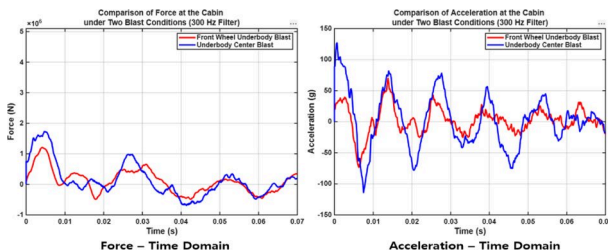


Fig. 6. Comparison of force and acceleration at the cabin floor under two blast conditions

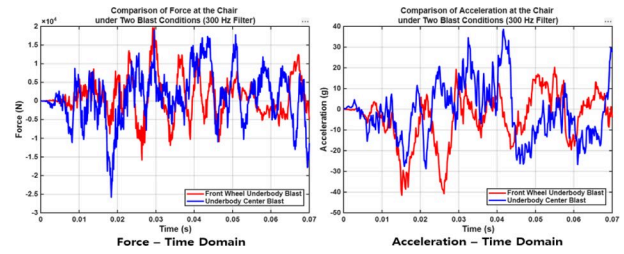


Fig. 7. Comparison of force and acceleration at the chair under two blast conditions

전달을 순차적으로 거쳐 캐빈 바닥의 진동으로 이어지므로 이 과정에서 각 구조 요소가 충격 에너지를 단계적으로 흡수·분산시키므로, 폭발 위치에 따른 초기 하중의 차이가 상당 부분 완화되어 캐빈 바닥에서는 두 조건 간 응답 차이가 줄어든 것으로 보인다. 이러한 결과는 캐빈 바닥의 응답이 방호판 자체의 방호 성능뿐만 아니라, 방호판과 캐빈을 잇는 체결부, 지지부, 하부 프레임, 바닥 보강 구조의 영향을 크게 받음을 보여준다. 따라서 효과적인 하부 방폭 설계를 위해서는 방호판의 두께나 재료 강도만을 고려하는 것에 그치지 않고, 방호판이 캐빈 구조와 어떻게 연결되어 하중을 전달하는지를 함께 고려하는 통합적 접근이 필요하다.

Fig. 7는 탑승자 의자 위치에서 두 폭발 조건의 작용력과 가속도 시간 이력을 비교한 것이다. 방호판이나 캐빈 바닥과 달리, 의자 위치에서는 두 폭발 조건의 작용력과 가속도가 서로 유사한 수준으로 나타났으며, 폭발 위치에 따른 차이가 크지 않았다. 이는 폭발 충격이 방호판과 캐빈을 거쳐 의자에 도달하는 동안 대부분 감쇠되어, 폭발 위치에 따른 초기 하중의 차이가 의자 단계에서는 거의 사라졌기 때문으로 판단된다. 정량적으로도 의자에서 탑승자로 전달되는 작용력은 약 10~20 kN 수준으로, 방호판에 작용하는 힘의 약 1/250에 불과할 정도로 크게 저감되었다. 특히 시트 마운트의 기하학적 구조가 충격 에너지를 소산시키는 데 크게 기여한 것으로 분석된다.

그러나 탑승자의 실제 상해 가능성은 의자에 작용하는 작용력과 최대 가속도만으로 단정하기 어렵다. 실제 하부 폭발 방호 평가에서는 50 백분위 남성 Hybrid III 인체 더미 모델(Anthropomorphic Test Device, ATD)을 이용하여 상해 여부를 분석하고, 골반 가속도로부터 산출되는 수직 방향 동적반응지수(Dynamic Response Index, DRIz)를 척추 상해 지표로 활용하여 상해 기준으로 적용한다[16,17]. 따라서 본 연구에서 얻은 구조 응답 결과를 바탕으로, 향후 시트에 인체 모델을 결합하여 이러한 상해 지표를 정량적으로 평가하는 추가 연구가 필요하다.

또한, 이번 연구는 수치해석을 기반으로 한 것으로, 실제 방폭 실험과의 직접적인 비교 검증은 수행되지 못한 제한이 있다. 따라서 제시한 작용력과 가속도의 절대적인 크기보다는, 폭발 위치에 따른 구조 응답의 상대적 차이와 하중

전달 경로를 따른 감쇠 경향에 그 의미가 있다. 이는 향후 하부 방호 구조의 설계 최적화 및 실험 기반 검증 연구를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 군용 전술차량을 대상으로, 하부 폭발 위치가 차체 구조의 응답과 하중 전달 특성에 미치는 영향을 수치 해석적으로 분석하는 데 중점을 두었다. 기존의 하부 폭발 연구가 주로 방호판 단위의 국부적 응답 평가에 집중되어 온 것과 달리, 본 연구는 방호판에서 캐빈을 거쳐 탑승자 위치에 이르는 하중 전달 경로 전반을 차량 수준에서 통합적으로 분석하였다는 점에 그 의미가 있다.

해석 결과, 폭발 위치는 차체의 취약 부위와 하중 전달 경로, 그리고 각 구조 부위의 동적 응답에 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 폭발 하중을 직접 받는 방호판에서는 폭발 위치에 따른 응답 차이가 크게 나타난 반면, 방호판에서 시트에 이르는 구조가 희생층으로 작용하여 충격을 단계적으로 감쇠시킴에 따라 탑승자 위치에서는 그 차이가 크게 줄어들었다. 이는 하부 방호 성능이 방호판 단품의 성능만으로 결정되는 것이 아니라, 방호판에서 탑승자에 이르는 하중 전달 경로 전반의 설계에 의해 좌우됨을 알 수 있다.

향후 연구에서는 탑승자 보호 성능을 보다 정밀하게 평가하기 위해, 본 연구에서 규명한 하중 전달 특성을 바탕으로 시트에 인체 모델을 결합하여 동적반응지수(DRIZ)나 요추 하중과 같은 인체 상해 지표를 함께 분석하는 연구를 수행하고자 한다.

후 기

이 연구는 국립금오공과대학교 대학 연구과제비로 지원되었음(2024년~2026년).

REFERENCES

1. Ramasamy, A., Hill, A. M., Masouros, S. D., Gordon, F., Clasper, J. C., and Bull, A. M. J., "Evaluating the Effect of Vehicle Modification in Reducing Injuries from Landmine Blasts. an Analysis of 2212 Incidents and Its Application for Humanitarian Purposes," *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 43, No. 5, 2011, pp. 1878-1886.
2. Dybcio, P., and Barnat, W., "Numerical and Experimental Examination of Ballistic System Subjected to IED Explosion," *Solid State Phenomena*, Vol. 224, 2015, pp. 276-285.
3. Trajkovski, J., Perenda, J., and Kunc, R., "Blast Response of Light Armoured Vehicles (LAVs) with Flat and V-hull Floor," *Thin-Walled Structures*, Vol. 131, 2018, pp. 238-244.
4. Goel, M. D., Matsagar, V. A., and Gupta, A. K., "Dynamic Response of Stiffened Plates under Air Blast," *International Journal of Protective Structures*, Vol. 2, No. 1, 2011, pp. 139-155.
5. Liu, Y., Kong, X., Zhou, H., Zheng, C., and Wu, W., "Corrected Method for Scaling the Structural Response Subjected to Blast Load," *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 12, No. 10, 2024, 1767.
6. Kim, Y. H., Choi, C. H., Kumar, S. K. S., Cha, J. H., and Kim, C. G., "Computational Analysis of Heracron Fabric at High-Velocity Impact," *Composites Research*, Vol. 32, No. 2, 2019, pp. 120-126.
7. Ko, H. Y., Shin, K. B., Cho, S. H., and Kim, D. H., "An Evaluation of Structural Integrity and Crashworthiness of Automatic Guideway Transit (AGT) Vehicle Made of Sandwich Composites," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 21, No. 5, 2008, pp. 15-22.
8. Memis, İ., and Karakuzu, R., "High-Velocity Impact Performance of Ramor 500 Armor Steel," *Materials Testing*, Vol. 64, No. 7, 2022, pp. 991-1001.
9. Nilsson, M., "Constitutive Model for Armox 500T and Armox 600T at Low and Medium Strain Rates," Technical Report FOI-R-1068--SE, Swedish Defence Research Agency (FOI), Stockholm, Sweden, 2003.
10. Kunčická, L., Jopek, M., Kocich, R., and Dvořák, K., "Determining Johnson-Cook Constitutive Equation for Low-Carbon Steel via Taylor Anvil Test," *Materials*, Vol. 14, No. 17, 2021, 4821.
11. Gomah, M., and Demiral, M., "An Experimental and Numerical Investigation of an Improved Shearing Process with Different Punch Characteristics," *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 66, No. 6, 2020, pp. 375-384.
12. Johnson, G. R., and Cook, W. H., "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures," *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*, The Hague, The Netherlands, 1983, pp. 541-547.
13. Banerjee, B., "An Evaluation of Plastic Flow Stress Models for the Simulation of High-Temperature and High-Strain-Rate Deformation of Metals," *arXiv preprint*, arXiv:cond-mat/0512466, 2005.
14. Kingery, C. N., and Bulmash, G., "Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst," Technical Report ARBRL-TR-02555, U.S. Army Ballistic Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Maryland, USA, 1984.
15. North Atlantic Treaty Organization, "STANAG 4569 (Edition 2): Protection Levels for Occupants of Armoured Vehicles," NATO Standardization Agency, Brussels, Belgium, 2012.
16. North Atlantic Treaty Organization, "Procedures for Evaluating the Protection Level of Armoured Vehicles - Volume 2: Mine Threat," AEP-55, Vol. 2, NATO, 2011.
17. Iluk, A., "Estimation of Spine Injury Risk as a Function of Bulletproof Vest Mass in Case of Under Body Blast Load," *Proceedings of the 2014 International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Injury*, Berlin, Germany, 2014, pp. 809-820.