

차륜형장갑차 차체의 지뢰방호구조 설계 연구

The Study on the Mine Protective Structural Design of Wheeled Armored Vehicle Body

박찬영^{1,#}, 이경훈²

Chan Young Park^{1,#} and Kyoung Hoon Lee²

¹ 현대로템 주식회사 시스템연구팀 (Mechanical Research Team, Hyundai Rotem Company)

² 현대로템 주식회사 분석평가팀 (Analysis & Evaluation Team, Hyundai Rotem Company)

Corresponding Author / E-mail: bulpai@hyundai-rotem.co.kr, TEL: +82-31-596-9525

ORCID: 0000-0002-5099-9065

KEYWORDS: Mine protective design (지뢰방호설계), Wheeled armored vehicle (차륜형 장갑차), Conceptual model (개념모델), Vehicle segment (부분구조), Injury assessment reference values (IARVs, 인체 상해치)

In this study, to develop mine protective design technology for wheeled armored vehicles, designing and simulating of test specimens based on the 8×8 military combat vehicle, were executed and mine protection effectiveness was proven, by testing under the two work steps such as 1st step for conceptual model and 2nd step for vehicle segment. Experiments for both test models of each step were performed according to test conditions of NATO standard, STANAG 4569 Level, and simulations were performed by the commercial code, LS-DYNA. On the 1st step, a conceptual model was designed, and its protection effectiveness was verified by simulation before testing and then it was proven by testing. On the 2nd step, the vehicle segment with protection design technology from the 1st step was designed better, to consider dynamic vertical deformation, injury values of a human dummy, and effects of installed components on the bottom of the model. Finally, satisfaction for protection effectiveness and IARVs (Injury Assessment Reference values) of a human dummy were verified by testing, and also the possibility of application for wheeled armored vehicles were confirmed.

Manuscript received: August 29, 2018 / Revised: September 29, 2018 / Accepted: October 4, 2018

1. 서론

일반적으로 군용 장갑차 설계시 고려해야 할 성능으로써 방호 및 생존성, 기동성, 무장체계, 정비성 등이 있으며, 그 중에서도 방호 및 생존성이 가장 중요하다고 알려져 있다.¹ 방호 및 생존성에는 크게 차량 차체 전면, 측면, 후면 등의 철갑탄에 대한 방호와 하부면의 지뢰폭압에 대한 방호 그리고 최근에 이슈가 되고 있는 측면 또는 하부면의 급조 폭발물(IED, Improvised Explosive Device) 방호 등 총 3가지 정도로 분류되고 있다. 최근 중동지역의 테러 및 국지전이 지속적으로 발생하면서 지뢰폭압방호 조건에 대한 규격 또한 강화되고 있다. 이에 따라서 미국을 중심으로 한 선진국에서는 기 개발된 차량의 하부면 지뢰방호성능을 높이는 개발을 진행하고 있으며, 유럽에서는 나토(NATO) 군사규격인 STANAG 4569²의 지뢰방호성능 규격을 높여서 운용하고 있다.

지뢰방호 설계분야 연구로써, Yuen³은 V-hull 구조를 지뢰방호 구조 형상으로 적용하기 위해서 장갑차 축소모델을 대상으로 시험을 수행하였고, 시험결과로부터 하부판 각도, 지상고 및 폭약량 등의 상관관계를 연구하였다. Jiang⁴은 지뢰 기폭시 장갑차 차체의 폭발충격저감을 위한 최적설계방법을 해석적 접근을 통해서 수행하였으며, 장갑차 내부의 특정 위치에서의 충격에너지 저감 설계방법을 제시하였다. 또, Denefeld⁵는 지뢰 기폭시 장갑차 차체 방호와 내부 승무원의 인체 상해치를 동시에 만족할 수 있는 차체 설계를 수행하기 위해서 인체모델을 모델링하여 해석적으로 평가하였다. 또한, 국내의 지뢰방호설계 연구로써, Park⁶은 차륜형 장갑차 차체의 기본설계 단계에서 지뢰방호구조 설계를 위한 주요 설계인자를 선별하기 위해서 차륜형 장갑차 차체를 단순화하여 해석적 및 통계적 분석을 수행하였고, 주요 설계인자를 도출하였다. 이와 같이, 효과적인 지뢰방호 설계를 수행하기 위해서

다양한 방법의 연구가 진행되고 있으며, 따라서, 본 연구에서도 기 개발된 차륜형 장갑차(길이: 7.4 m × 폭: 2.7 m × 높이: 2.6 m)를 대상으로 지뢰방호성능을 향상시키기 위해서 해석적 검증과 시험수행을 통한 설계연구를 수행하였는데, 특히, 신뢰성이 검증된 해석방법 및 시험을 활용하여 방호구조 설계방법의 프로세스를 정립하였고, 정립된 설계 프로세스에 따른 효율적인 방호구조 설계연구를 수행하였다. 지뢰방호설계는 1, 2단계로 나누어 수행하였으며, 1단계에서는 지뢰방호설계의 기초단계로써 개념모델(Conceptual Model)을 설계 및 제작하였고, 성능입증시험 전 해석수행을 통해서 방호성능을 입증한 후, 시험을 통해서 시험용 모델의 방호성능 및 구조적 강건성을 확인하였다.

2단계에서는 1단계에서 확보한 기본 설계기술 적용 및 설계개선을 수행하여 부분구조(Vehicle Segment) 설계에 적용하였다. 부분구조는 완성차 크기 장갑차의 길이 방향의 절반크기 모델로써, 승무원들이 탑승하는 승무원 위치에서의 방호성능과 승무원 안전성을 확인하기 위한 것으로써, 차량 내부는 승무원 바닥판 및 승무원 의자까지 고려해서 설계하였고, 하부는 실제 장착되는 장치류 등을 부착하여 지뢰 기폭시 방호구조 외의 차체 하부에 장착되는 장치류 등의 영향성을 고려할 수 있도록 설계 하였다. 시험규격은 나토 규격인 STANAG 4569에 따라서 지뢰폭발시험을 수행하여 방호성능 확인과 인체더미의 상해지 결과를 통해서 지뢰폭발압력에 방호가 가능한 구조설계기술 개발의 타당성을 확인하였다.

2. 시험용 모델 개념 및 형상

Fig. 1은 시험용 개념모델(Conceptual Model)과 부분구조(Vehicle Segment) 설계형상을 나타낸 것으로써, 기 개발된 8 × 8 차륜형 장갑차 형상을 기초로 하부 및 측면 구조 형상을 설계하였는데, 폭은 기 개발차량과 동일하게 하였고, 길이는 폭발환경을 고려하여 폭발압력조건에 영향을 받는 구간으로 길이를 선정하였다. 여기서, 길이방향의 폭발압력 영향구간은 해석적인 검증방법을 수행하여 폭약 기폭시 하부면 변형이 시작되는 길이를 고려하여 선정하였다.

특히 하부판은 일정한 두께의 장갑판재와 내부 부착형 복합재(Polyethylene 계열)의 2중 적층구조로 제작되었는데, 외부 장갑판재는 폭발압력에 직접 접촉하여 압력과 온도에 저항할 수 있게 하였고, 내부 복합재는 외부 장갑판재와 접합되어 강성을 극대화시키는 역할과 충격을 흡수하는 기능을 동시에 수행 하도록 하였다. 두께 층은 본딩과 볼팅으로 구속하여 하부면에 폭발압력 인가 시 두 층 사이의 층간 분리를 최소화 하도록 설계하였다. 하부판의 각도는 현수장치 장착성을 고려하였고, 지뢰폭발 시 폭발압력이 좌, 우 방향으로 분산이 유리한 구조로 설계 하였다. 또, 하부 센터부에 압력분산용 커버를 부착하여 지뢰폭발시 폭발압력이 하부 센터면에 집중되지 않고 좌, 우 방향으로 분산되도록 하였다.

부분구조는 2단계에서 지뢰폭발 시험시 시험모델 하부면에 부

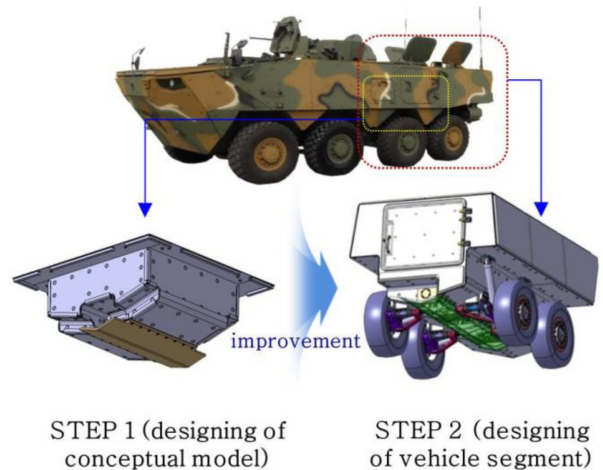


Fig. 1 Design configuration for conceptual and vehicle segment model

착되는 장치들의 영향성 확인과 인체더미를 내부에 장착하여 인체 상해지 측정을 통한 탑승 승무원 안전성을 확인할 수 있도록 하였다. 또한, 부분구조의 하부면 장치들은 실제 부품들을 장착하여, 실제조건과 유사하게 하였고, 폭발압력에 의한 하부 장치류들의 영향성을 확인할 수 있도록 하였다.

3. 수치해석

Fig. 1의 시험용 개념모델과 부분구조는 시험 전 방호성능을 확인하기 위해서 해석적인 검증을 수행 하였으며, 개념모델은 1/2 면대칭 조건으로 모델을 구성하였다. 부분구조는 대칭성이 없으므로 전체 모델로 구성하였고, 비선형 동적 유한요소해석 프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 폭발압력해석을 수행하였다.

3.1 폭발압력해석 방법 및 주요재질의 물성모델

일반적으로 폭발현상을 해석하는 방법으로는 라그랑지 방법인 CONWEP^{7,8} (Conventional Weapons Effects Program)과 유체-구조 연성해석인 ALE^{3,9,10} (Arbitrary Lagrange-Euler) 등의 2가지 방법이 있다. LS-DYNA의 CONWEP은 대표적인 라그랑지 방법으로써, Kingery¹¹는 공기중에서 폭약 폭발시 폭발파에 의해 전달되는 압력을 실험적으로 분석하여 초기압력 및 폭발 지점으로 부터의 거리와 피폭되는 각도에 의해 폭발압력이 구조물에 전달되는 현상을 모사하는 식을 제안하였다. 미육군 연구소(ARL, Army Research Laboratory)에서 개발하여 현재 세계적으로 가장 많이 사용되고 있다. CONWEP에서 사용되는 압력파는 식(1)의 Friedlander식¹²으로 표현할 수 있으며, Fig. 2의 그래프는 식(1)의 시간변화에 따른 압력 프로파일을 나타내고 있다.

ALE 방법은 폭약 폭발시 폭발압력이 공기를 통해서 구조물에 전파되는 현상을 구현하는 유체-구조 연성해석으로써, 폭발압력 영향을 고려하기 위해서 대기 영역까지 포함시켜야 하므로 계산

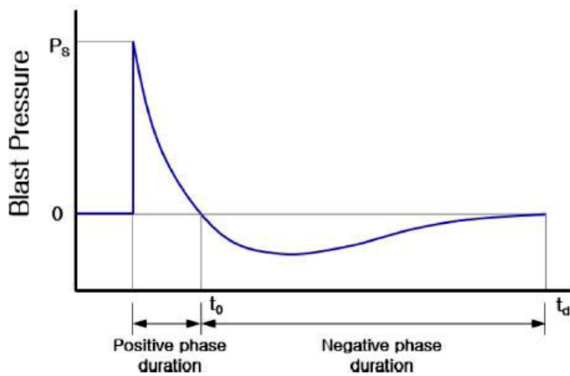


Fig. 2 Pressure-time profile of a blast wave

시간이 많이 소요되지만, 폭발압력 전달과정 및 충격파 거동을 표현할 수 있다.

$$P(t) = P_s e^{-\left(\frac{t}{t_0}\right)} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_0}\right) \quad (1)$$

여기서, P_s : 최대 폭발압력, t_0 : 기폭시 폭발압력의 진행방향 지속 시간을 나타낸다.

본 연구에서는 CONWEP 및 ALE 두 가지 폭발압력해석을 수행하였고, 해석과 시험결과를 비교하였다. 해석에 사용된 주요 재료에 대한 물성 모델은 LS-DYNA에서 제공하는 물성모델인 존슨-쿡 모델¹³(Johnson-Cook Model) 및 컴포지트 데미지 모델(Composite Damage Model)을 사용하였고, 각각 장갑판재와 복합재에 적용하였다. 일반적으로 존슨-쿡 모델은 금속소재를 대상으로 한 폭발해석시 판재의 변형률(Strain Rate), 온도영향 및 점소성(Visco-Plastic) 효과를 고려한 모델로써, 지뢰 폭발시 발생하는 재료연화에 영향을 주는 큰 범위의 변형률 및 온도변화에 의한 요소의 소성소실(Failure of Element)등의 모사가 가능하다. 이 모델의 변형 응력식은 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n)(1 + C \cdot \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}) \quad (2)$$

여기서, σ_y : 유효 응력(Effective Stress), ϵ : 유효 소성변형(Effective Plastic Strain), $\dot{\epsilon}^*$: 표준화된 유효 소성 변형률(Normalized Effective Plastic Strain Rate, $1.0 S^{-1}$), B , n : 변형경화 상수(Strain Hardening Constants), C : 변형률 민감도 상수(Strain Rate Sensitivity Constant), m : 온도연화 상수(Temperature Softening Constant), A : 재료상수이다. 여기서, 온도 성분 T^* 는 식(3)으로 정의할 수 있다.

$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (3)$$

여기서, T : 절대 온도, T_{room} : 상온, T_{melt} : 녹는점이다. 존슨-쿡 모델에서 요소소실은 누적 손상법칙¹⁴에 따라서 발생하며 식(4)로 나타낼 수 있다.

Table 1 Material properties of armor plate

Structural plate	E (GPa)	ν	ρ (kg/m ³)	σ_y (MPa)
300HB (bottom)	206	0.3	7850	850~
500HB (side)	206	0.3	7850	1250~

Table 2 Coefficients and constants of Johnson-Cook model

Structural plate	Strain hardening			Strain rate hardening	
	A (MPa)	B (MPa)	N	C	ϵ_0 (S ⁻¹)
300HB	818	1423	0.987	0.014	1.0
500HB	1470	702	0.199	0.0054	1.0

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon_f} \quad (4)$$

여기서, $\epsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)][1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*][1 + D_5 T^*]$ 로 나타낼 수 있고, $\Delta \epsilon$: 하중 증가 동안의 유효소성변형 증가분, σ^* : 유효응력에 의해 일반화된 평균응력, D_1 , D_2 , D_3 , D_4 , D_5 : 파괴상수이다. 파괴 변형, ϵ_f 과 손상 누적, D 는 평균응력(Mean Stress), 변형률(Strain Rate), 온도 의 함수로 나타낼 수 있는데, 파손된 요소성분들은 폭발발생시 유한요소모델로부터 제거된다. 또, 재료의 압력과 체적, 그리고 내부에너지의 상관관계는 상태 방정식으로 정의할 수 있는데, 본 연구에서는 피탄 및 폭발해석에 적합한 Mie-Gruneisen 상태 방정식^{15,16}이 사용되었으며 압축된 재료의 압력은 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$P = (\gamma + \alpha \mu) E_0 + \frac{\rho_0 C^2 \mu (1 + (1 - \gamma/2) \mu - (\alpha/2) \mu^2)}{[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \mu^2 / (\mu + 1) - S_3 \mu^3 / (1 + \mu)^2]} \quad (5)$$

여기서, E_0 : 단위 체적당 내부에너지, C : 충격 및 입자 속도 그래프의 인터셉트, S_1 , S_2 , S_3 : 충격 및 입자속도 그래프의 기울기 계수, γ : Gruneisen 계수, α : 체적누적 인자이며, 압축인자인 $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ 로 나타낼 수 있다. Table 1, 2는 장갑판재의 주요 정적 및 동적 물성치를 인용하여 나타낸 것이다.^{3,17}

3.2 유한요소모델 및 경계조건

Figs. 3과 4는 개념모델 및 부분구조의 유한요소모델을 나타낸 것이며, 지뢰 기폭시 폭발압력에 의한 변형현상을 모사하기 위해 솔리드 요소를 사용하여 모델을 구성하였다. 수치해석에 사용된 지뢰폭발 환경조건은 STANAG 4569 규격의 대전차 지뢰조건인 Level 2 - 4 범위 의 폭약량 (TNT)을 적용하였다.

4. 지뢰폭발시험

Figs. 5에서 6은 개념모델 및 부분구조의 지뢰폭발시험 개략도와 시험현상을 나타낸 것으로써, 시험조건은 STANAG 4569 기준을 적용하였으며, 해석조건과 동일하게 적용하였다.

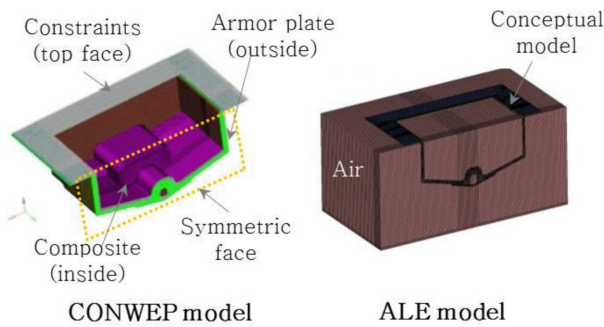


Fig. 3 Finite element model for conceptual model

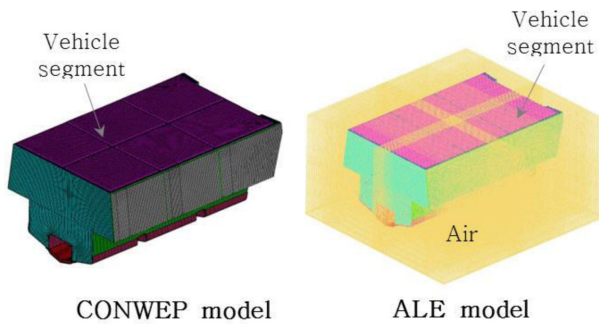
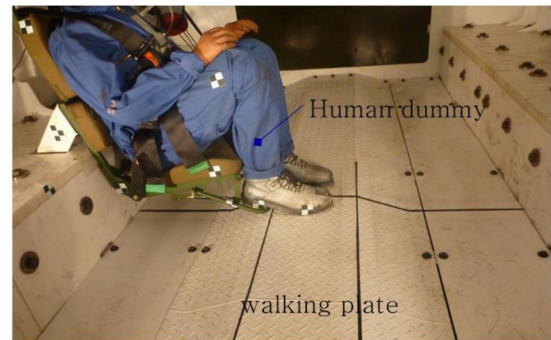


Fig. 4 Finite element model for vehicle segment



(a) Outside configuration of Vehicle segment



(b) Inside configuration of Vehicle segment

Fig. 6 Test configuration for vehicle segment model

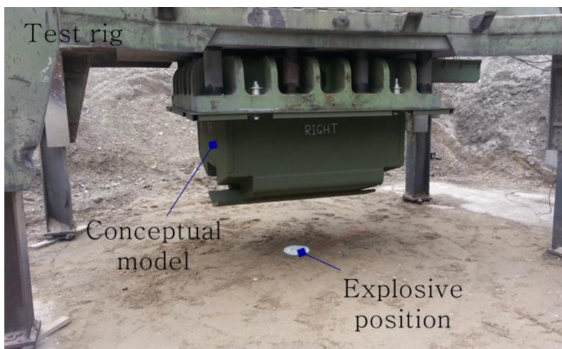


Fig. 5 Test configuration for conceptual models

폭약의 매설 위치는 STANAG 4569 기준에 따라서 설치하였고, 개념모델은 시험지그에 볼트로 고정 하였으며, 시험지그 4개의 기둥은 지면과 분리하여 기폭 시 폭발압력에 의한 수직방향의 글로벌 거동이 가능하도록 하였다. 부분구조는 시험지그 없이 독립형(Stand-Alone) 거치 형태로 설치하였으며, 인체 상해치를 측정하기 위해서 Fig. 6의 차량 내부에 인체터미(50% Male Hybrid III ATD)를 설치하였다.

5. 결과 및 고찰

Fig. 7은 1단계의 개념모델에 대한 지뢰폭발 시험 및 해석결과로써 Fig. 7(a)는 폭약 기폭시 폭발시간변화에 따라서 발생하는 화염과 폭발압력 시험형상을 나타낸 것이고, Fig. 7(b)는 폭약 기

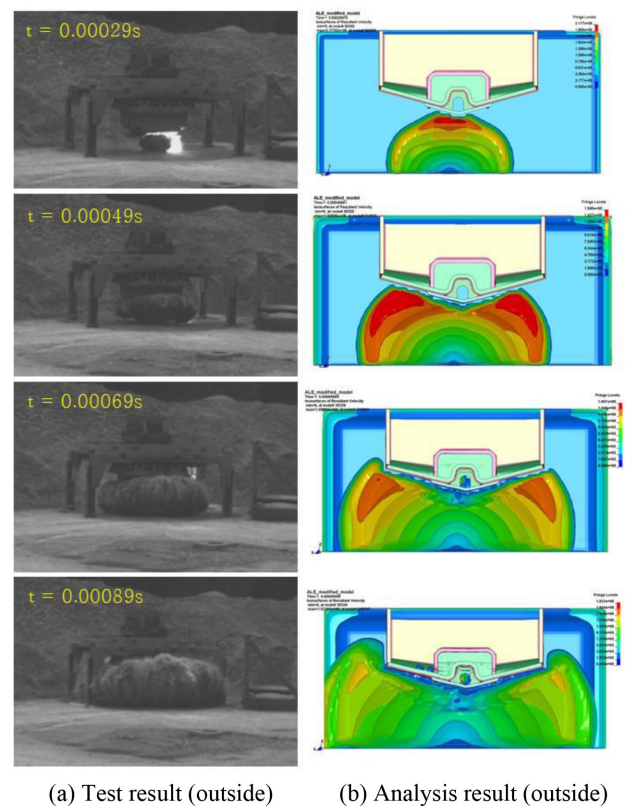


Fig. 7 Proceeding of test and analysis (ALE) for Conceptual model

폭시 폭발시간변화에 따라서 발생하는 동일 조건의 구조-유체 연성해석(ALE) 결과로부터 폭발압력 변화를 나타낸 것이다. 또,

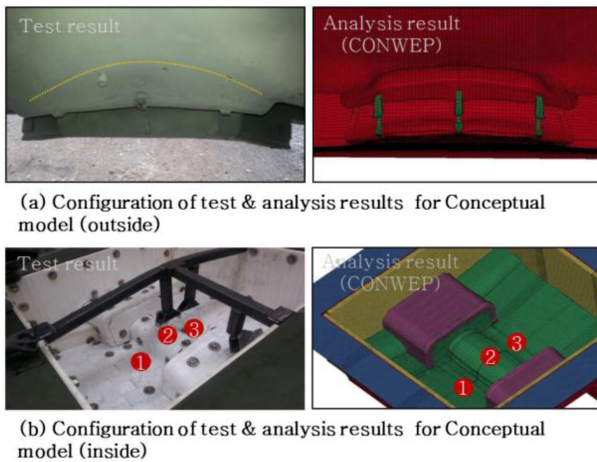


Fig. 8 Deformation results of test and analysis for Conceptual model (inside and outside)

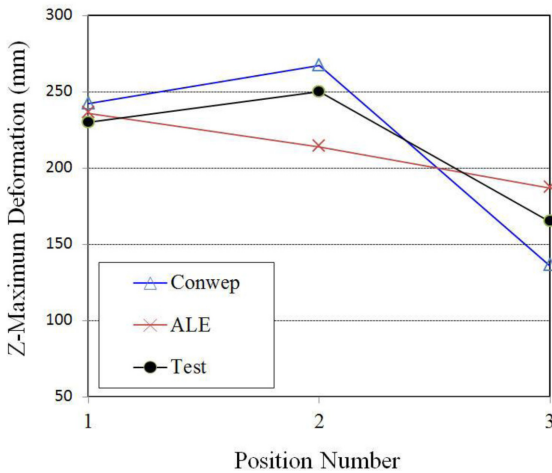


Fig. 9 Graph of maximum vertical deformation of test and analysis at 3 inner position of Conceptual model

Fig. 8은 시험과 해석(CONWEP) 결과의 내·외부 변형형상을 비교한 그림이다.

Fig. 8(a)의 개념모델 외부형상은 부분적으로 용접부 균열이 발생하였지만, 내부형상은 파편유입 흔적 및 장갑판재와 복합재 체결볼트 파손부가 없는 완전방호를 하였다. 또, Fig. 8(b)의 내·외부 변형형상은 시험 및 해석결과로부터 비교적 유사한 경향성을 확인할 수 있었다.

Fig. 9 및 Table 3은 Fig. 8의 개념모델 내부의 각 3개소(1 - 3번) 위치에서의 최대 수직변형 그래프와 최대값을 나타낸 것이며, 3개소의 위치는 폭약 기폭시 폭발압력에 가장 큰 영향을 받는 특정 위치를 선정하였다. Fig. 9의 그래프로 부터 1번 위치에서는 시험결과와 2가지 해석결과가 유사한 값을 나타내고 있으나, 2, 3번 위치의 결과에서는 시험결과 대비 CONWEP결과가 위치별 유사한 경향성을 나타낸 것을 확인할 수 있다. 또, Table 3에서 시험결과 대비 해석결과의 오차범위는 각각 CONWEP은 5.2 - 17.6%, ALE는 2.6 - 14.4%로 최대 18% 내외의 오차를 범위를 나타내고

Table 3 Z-maximum deformation values of 3 inner position for Conceptual model

No.	Analysis (mm)		Test (mm)	Error rate of test & analysis (%)	
	CONWEP	ALE		CONWEP	ALE
1	242	236	230	5.2	2.6
2	267	214	250	6.8	14.4
3	136	187	165	17.6	13.3

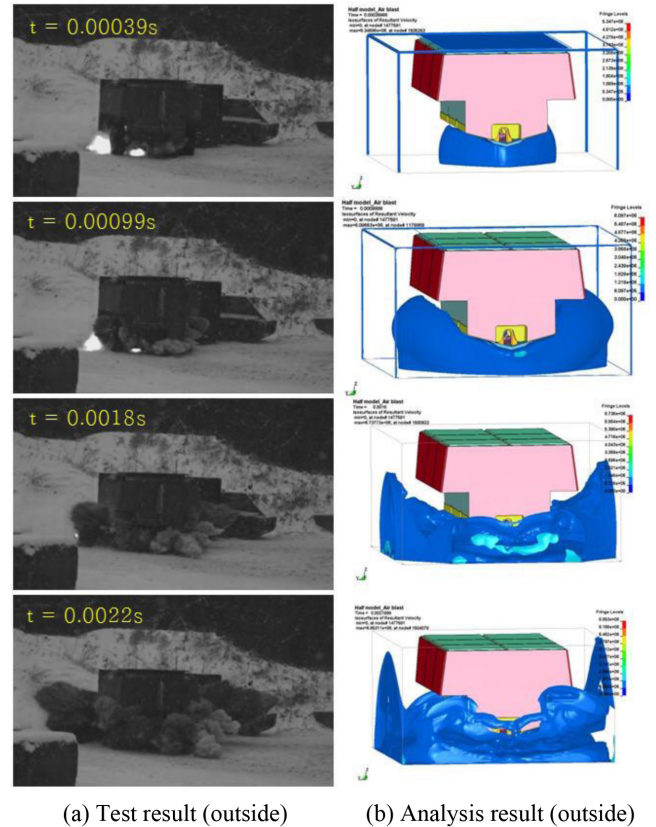


Fig. 10 Proceeding of test and analysis (ALE) for Vehicle segment model

있으며, 위치에 따른 최대 변형에 대한 크기 경향성을 확인할 수 있다. 해석오차 발생 원인으로는 해석모델의 복합재와 장갑판재 접합면의 본딩과 기폭위치의 토양조건이 고려되지 않은 것이 주요 원인이라 판단되어진다.

Fig. 10은 2단계의 부분구조에 대한 지뢰폭발 시험 및 해석결과로써 Fig. 10(a)는 폭약 기폭시 폭발시간변화에 따라서 발생하는 화염과 폭발압력 시험형상을 나타낸 것이고, Fig. 10(b)는 폭약 기폭시 폭발시간변화에 따라서 발생하는 동일 조건의 구조-유체 연성해석 (ALE) 결과로부터 폭발압력 변화를 나타낸 것이다. Fig. 10은 2단계의 부분구조에 대한 시험 및 해석결과로써, 부분구조 해석모델은 경향성과 신뢰성이 확인된 개념모델의 해석모델을 사용하여 해석을 수행하였으므로 시간에 따른 폭발압력의 거동 또한 비교적 유사하게 나타남을 확인할 수 있다. 또, Fig. 11은

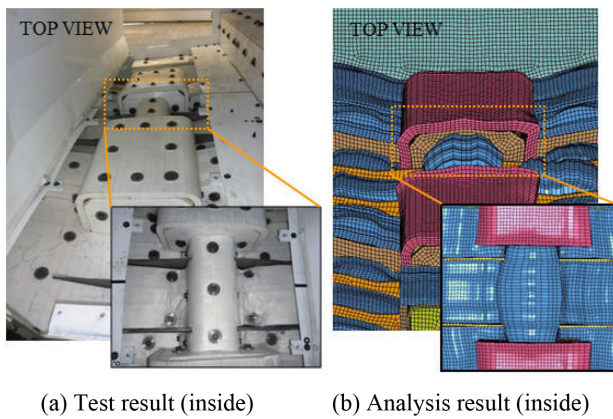


Fig. 11 Deformation results of test and analysis for Vehicle segment model

Table 4 Test results of IARVs

Items	IARVs	STANAG 4569 (criterion)	Test results
Head	HIC15	250	Satisfaction
	Fz-	4.0 kN@0ms 1.1 kN>30ms	Satisfaction
	Fz+	3.3 kN@0ms 2.8 kN@35ms 1.1 kN>45ms	Satisfaction
Neck	Fx+- Fy+-	3.1 kN@0ms 1.5 kN@ 25-35ms 1.1 kN>45ms	Satisfaction
	MOCy+ MOCy-	-96 Nm +190 Nm	Satisfaction
Chest	TCC frontal	30 mm	Satisfaction
	VC frontal	0.70 m/s	Satisfaction
Pressure	CWVP	3.6 m/s	Satisfaction
Spine	DRIZ	17.7	Satisfaction
Femur	Fz-	6.9 kN	Satisfaction

Table 5 Test results of conceptual model and vehicle segment

Model	Protection result	IARVs
Conceptual	Satisfaction	-
Vehicle segment	Satisfaction	Satisfaction (6 items)

시험후 부분구조 내부 형상을 나타낸 것으로써, Fig. 11(a)는 시험 결과 형상이며, Fig. 11(b)는 해석결과(CONWEP) 형상으로써 시험과 해석결과가 비교적 유사한 변형거동을 확인할 수 있다.

Table 4는 부분구조 시험으로부터 인체 상해치 (IARVs) 를 측정된 결과로써, 6항목에 대한 기준값을 만족하는 결과를 얻었다.

Table 5는 개념모델과 부분구조의 지뢰폭발 시험결과를 종합한 것으로써, 시험결과로부터 방호성능 및 인체 상해치 안전성을 확인할 수 있었다.

6. 결론

휠타입의 군용 전투차량에 적용이 가능한 지뢰폭압 방호 설계 기술을 개발하기 위해서 단계별 시험모델의 설계, 제작 및 성능인증 시험과 해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 개념모델 시험 전 해석검증을 수행하였고, 해석결과로부터 주요 위치별 수직 변형 경향성을 예측할 수 있었다.

둘째, 개념모델 해석결과로부터 시험결과 대비 주요 위치별 5.2 - 17.6% (CONWEP), 2.6 - 14.4% (ALE) 오차율이 발생하였으며, 위치별 최대 18% 내외의 수직 변형 경향성 확인을 통해서 해석모델의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

셋째, 부분구조 시험 전 해석검증을 통해서 폭압 기폭시 폭발 압력의 변형거동 및 하부면 지뢰폭압방호 성능을 예측할 수 있었고, 시험결과 비교를 통해서 해석모델의 신뢰성을 확인하였다.

넷째, 부분구조 시험결과로부터 차량의 승무원부 방호성능 확인 및 인체터미의 6가지 인체 상해치에 대한 성능만족을 확인할 수 있었다.

다섯째, 개념모델과 부분구조의 해석검증과 시험을 통해서 차체 방호성능을 입증하였고, 인체 상해치 측정결과로부터 승무원에 대한 안전성을 확인하였고, 최종적으로 차륜형 장갑차 차체 승무원부 위치의 지뢰방호 설계기술을 확보하였다.

REFERENCES

1. Lee, B.-K. and Cho, Y.-K., "Priority Decision Based on Users' Requirements for the Development of Military Vehicles," Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 18, No. 6, pp. 122-129, 2010.
2. Sai Global, "Procedures for Evaluating the Protection Level of Armoured Vehicles," Nato AEP-55, Vol. 2, 2011.
3. Yuen, S. C. K., Langdon, G., Nurick, G., Pickering, E., and Balden, V., "Response of V-Shape Plates to Localised Blast Load: Experiments and Numerical Simulation," International Journal of Impact Engineering, Vol. 46, pp. 97-109, 2012.
4. Jiang, W., Vlahopoulos, N., Castanier, M. P., Thyagarajan, R., and Mohammad, S., "Tuning Material and Component Properties to Reduce Weight and Increase Blastworthiness of a Notional V-Hull Structure," Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 2, pp. 19-28, 2015.
5. Denefeld, V., Heider, N., Holzwarth, A., Sättler, A., and Salk, M., "Reduction of Global Effects on Vehicles After IED Detonations," Defence Technology, Vol. 10, No. 2, pp. 219-225, 2014.
6. Park, C. Y. and Cho, C. D., "Effect of Protection Design Parameters on Mine Blast Impact Characteristics," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 35, No.5, pp. 521-529, 2018.

7. Henchie, T. F., Yuen, S. C. K., Nurick, G., Ranwaha, N., and Balden, V., "The Response of Circular Plates to Repeated Uniform Blast Loads: An Experimental and Numerical Study," International Journal of Impact Engineering, Vol. 74, No. pp. 36-45, 2014.
8. Markose, A. and Rao, C. L., "Failure Analysis of V-Shaped Plates Under Blast Loading," Procedia Engineering, Vol. 173, pp. 519-525, 2017.
9. Mehreganian, N., Louca, L., Langdon, G., Curry, R., and Abdul-Karim, N., "The Response of Mild Steel and Armour Steel Plates to Localised Air-Blast Loading-Comparison of Numerical Modelling Techniques," International Journal of Impact Engineering, Vol. 115, pp. 81-93, 2018.
10. Xiao, W., Andrae, M., Ruediger, L., and Gebbeken, N., "Numerical Prediction of Blast Wall Effectiveness for Structural Protection Against Air Blast," Procedia Engineering, Vol. 199, pp. 2519-2524, 2017.
11. Kingery, C. N., "Air Blast Parameters Versus Distance for Hemispherical TNT Surface Bursts," Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground MD, p. 1344, 1966.
12. Baker, W. E., Explosions in Air, University of Texas Press, 1973.
13. Johnson, G. R. and Cook, W. H., "Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain Rates, Temperatures and Pressures," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, No. 1, pp. 31-48, 1985.
14. Soutis, C., Mohamed, G., and Hodzic, A., "Modelling the Structural Response of Glare Panels to Blast Load," Composite Structures, Vol. 94, No. 1, pp. 267-276, 2011.
15. Espinosa, H. D., Dwivedi, S., Zavattieri, P., and Yuan, G., "A Numerical Investigation of Penetration in Multilayered Material/Structure Systems," International Journal of Solids and Structures, Vol. 35, No. 22, pp. 2975-3002, 1998.
16. Jiang, L., Guan, M., Li, X., and Liao, H., "High Rotating Speed Projectile Penetrating Into Moving Vehicle Door at Different Incident Angle," Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol. 55, No. 2, pp. 113-117, 2011.
17. Kilic, N. and Ekici, B., "Ballistic Resistance of High Hardness Armor Steels Against 7.62 mm Armor Piercing Ammunition," Materials & Design, Vol. 44, pp. 35-48, 2013.

**Chan Young Park**

Ph.D. Principal Research Engineer in Hyundai Rotem. His research interest is the optimal design of military vehicle platform.
E-mail: bulpai@hyundai-rotem.co.kr

**Kyoung Hoon Lee**

Ph.D. Chief Researcher in Hyundai Rotem. His main research interest is Modeling & Simulation(M&S) to design and optimize military vehicle system.
E-mail: marklee@hyundai-rotem.co.kr