

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2014.38.10.1125>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 복합 구조물의 충격 응답 특성을 이용한 취약성 평가 모델 연구<sup>§</sup>

박정원\* · 구만회\*\* · 박준홍\*†

\* 한양대학교 융합기계공학과, \*\* 국방과학연구소

### Vulnerability Assessment for a Complex Structure Using Vibration Response Induced by Impact Load

Jeongwon Park<sup>\*</sup>, Man Hoi Koo<sup>\*\*</sup> and Junhong Park<sup>\*†</sup>

<sup>\*</sup> Dept. of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang Univ.,

<sup>\*\*</sup> Agency for Defense Development

(Received February 25, 2014 ; Revised May 26, 2014 ; Accepted June 3, 2014)

**Key Words:** Impact Load(충격력), Spectral Element Method(스펙트럴요소법), Impact Wave Propagation(충격파 전파), Vulnerability Assessment(취약성 분석)

**초록:** 복합 구조물의 충격 진동 특성을 이용한 취약성 분석 기법을 제안하였다. 프레임 요소로 구성된 구조물의 충격 거동을 파악하기 위해서 스펙트럴요소법을 적용하였다. 티모센코 보함수를 이용해 고속 충돌에 의한 고주파 성분을 포함하는 충격파 전파 특성을 시뮬레이션하였다. 구조물의 결합부분에서는 종방향과 횡방향 파동의 상호 작용을 고려한 파동 전달을 해석하였다. 충격력이 구조물에 작용할 경우 주파수 및 시간 응답을 얻고 전체 구조물에서 충격에너지 전파 특성을 파악하였다. 구조물의 위치별로 계산된 최대가속도 크기와 시스템을 구성하는 주요 부품의 허용 가속도 기준에 의한 취약확률 함수를 정의하고 시스템의 취약 확률을 계산하였다. 제안된 취약성 분석 절차를 이용해 3 차원 전투 차량의 충격 응답을 얻고 충격에 취약한 구조물 위치를 파악하였다.

**Abstract:** This work presents a vulnerability assessment procedure for a complex structure using vibration characteristics. The structural behavior of a three-dimensional framed structure subjected to impact forces was predicted using the spectral element method. The Timoshenko beam function was applied to simulate the impact wave propagations induced by a high-velocity projectile at relatively high frequencies. The interactions at the joints were analyzed for both flexural and longitudinal wave propagations. Simulations of the impact energy transfer through the entire structure were performed using the transient displacement and acceleration responses obtained from the frequency analysis. The kill probabilities of the crucial components for an operating system were calculated as a function of the predicted acceleration amplitudes according to the acceptable vibration levels. Following the proposed vulnerability assessment procedure, the vulnerable positions of a three-dimensional combat vehicle with high possibilities of damage generation of components by impact loading were identified from the estimated vibration responses.

#### 1. 서 론

고속 운동에너지 탄이나 폭발 압력과 같은 외부 충격원은 전투 차량, 함정, 항공기 등에 직접적인

파손을 유발하고 구조적인 손상을 일으킬 수 있다. 뿐만 아니라 피격 부위로부터 구조물을 통해 전달 되는 충격파는 민감한 전자장비, 탑재된 무기시스템의 회로나 각종 센서로 이루어진 주요 시스템에 치명적인 결함을 유발하며, 충격파 전달 시 방사 되는 높은 음압은 승무원의 생존성을 위협하여 전투임무 수행 능력을 저하시키게 된다.

전투 생존성을 향상시키기 위해서 외부 위협에

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회 (2014. 2. 26.-28., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, parkj@hanyang.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

대한 재료의 손상 정도<sup>(1)</sup>를 파악하거나 내충격성이 향상된 복합소재 개발<sup>(2,3)</sup>을 위한 다양한 이론적, 실험적 연구가 진행되어 왔다. 나아가 외부 위협에 대한 전투 생존성 분석 기법과 상용 프로그램이 개발되기도 하였으며 다양한 시스템에 대한 취약성 평가가 이루어져 왔다.<sup>(4,5)</sup> 하지만 구조물 전체로 전달되는 충격에너지를 고려하지 않고 피격 부위에서 국부적인 구조물 관통 정도에 따른 제한적인 취약 확률을 제시하였다.

충격에 대한 전투 차량과 같은 복합구조물의 취약성 평가를 수행하기 위해서는 피격 시 전달되는 충격력에 의한 구조물 전체의 충격 거동을 예측해야 한다. 이를 위해 복잡한 구조물의 충격 해석에 일반적으로 사용되는 유한요소모델<sup>(6)</sup>을 이용할 경우 다양한 피격 상황에 따라 많은 해석 시간이 소요되므로 구조물의 충격 거동을 빠르게 예측할 수 있는 해석 기법이 필요하다. 충격 해석에 스펙트럴요소법(Spectral element method)<sup>(7)</sup>을 적용하게 되면 주파수에 따라 변화하는 동적강성행렬로부터 구조물의 동적 응답을 주파수 및 시간 영역에서 빠르고 정확하게 계산할 수 있다. 이 방법은 유한요소법에 비해 요소 수를 증가시키지 않고도 고주파 영역에서 응답의 정확성을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 충격 응답을 이용한 3차원 복합구조물의 취약성 분석 모델을 제안하였다. 충격 해석 시간을 단축할 수 있도록 스펙트럴요소법을 적용하여 피격 부위로부터 구조물을 통해 전파되는 충격에너지 특성을 파악하였다. 주요시스템으로 전달되는 충격파에 의한 부품의 취약확률 함수를 정의하고 시스템의 취약 확률을 예측하였다. 제안된 취약성 분석 모델을 이용해 피격 조건에 따라 전투차량 모델을 구성하는 주요 시스템의 취약성을 비교하고 충격에 취약한 구조물 위치를 파악하였다.

## 2. 복합 구조물의 충격 응답 해석

3 차원 복합구조물의 충격 응답 해석 및 취약성 분석 절차를 Fig. 1 에 나타내었다. 다양한 복합 구조물로 이루어진 전투시스템 중 해석 대상을 선택한 후 충격과 전파 해석을 수행한다. 복잡한 구조물을 파동해와 스펙트럴요소로 나타내고 충격력을 입력하여 전체 구조물의 주파수 응답과 시간응답을 얻는다. 피격 방향, 위치에 따라 충격 해석을 반복적으로 수행한 후 취약확률 함수를 정의하고 주요 부품 및 작동 시스템의 충격에 대한 취약성을 분석한다.

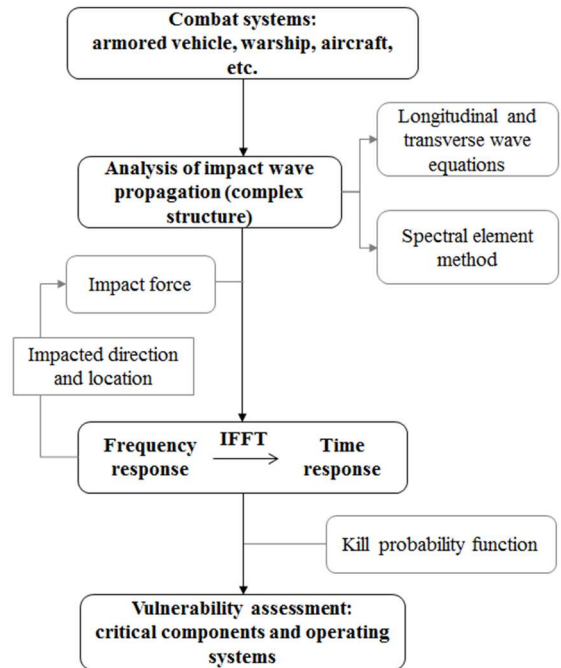


Fig. 1 Procedure of impact wave propagation and vulnerability assessment for combat systems under impact load

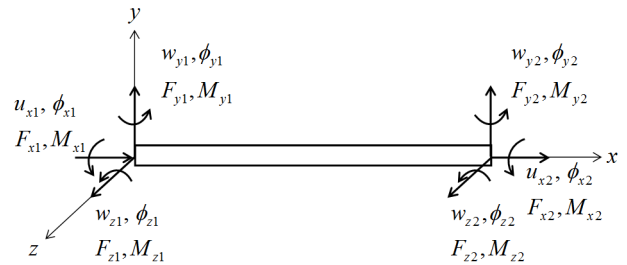


Fig. 2 Three dimensional spectral element and nodal displacements

### 2.1 스펙트럴요소법을 이용한 충격 응답 해석

프레임 형태의 복합구조물의 충격 응답을 예측하기 위해서 Fig. 2 에 나타낸 것과 같이 3 차원 공간상의 스펙트럴요소를 이용하였다. 요소의 절점에서는 종방향, 횡방향 및 비틀림 진동을 모두 고려하였다. 먼저 요소의 종방향 변위 응답을 주파수 성분으로 표현하면 다음과 같다.

$$u_x(x, t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} U_x(x, \omega_n) e^{i\omega_n t} \quad (1)$$

여기서  $N$  은 이산화된 응답의 개수를 나타내며,  $U_x(x) = \hat{A}_1 e^{-i\hat{k}_l x} + \hat{A}_2 e^{i\hat{k}_l x}$  는 종방향 파동의 일반해이고,  $\hat{k}_l = (\rho \omega_n^2 / \hat{E})^{1/2}$  는 파수,  $\rho$  는 밀도,  $\hat{E} = \hat{\sigma}_x / \hat{\epsilon}_x = E(1 + i\eta_E)$  는 복소 영계수이며  $\hat{\sigma}_x$  와  $\hat{\epsilon}_x$  는 각각 푸리에 변환한

응력과 변형률을 나타내고,  $E$ 는 영계수,  $\eta_E$ 는 손실률을 의미한다.<sup>(8)</sup> 여기서  $\wedge$ 은 복소수를 의미한다. 손실률은 구조물의 진동 감쇠와 연관된 인자이기 때문에 주파수 영역에서 파동 전달을 해석하기 위해서 복소영계수가 주로 사용되고 있다. 식 (1)과 동일하게 요소의  $x$  축에 대한 비틀림 진동 응답을 나타내면

$$\phi_x(x, t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \Phi_x(x, \omega_n) e^{i\omega_n t} \quad (2)$$

여기서  $\Phi_x(x) = B_1 e^{-\hat{k}_1 x} + B_2 e^{\hat{k}_1 x}$ 는 비틀림 진동 응답의 해를 나타내고,  $\hat{k}_1 = (\rho J \omega^2 / \hat{G} \gamma)^{1/2}$ 는 파수,  $J$ 는 단면의 극면적모멘트,  $\hat{G}$ 는 복소 전단탄성계수,  $\gamma$ 는 비틀림상수를 각각 의미한다.

고주파 성분을 포함한 충격력에 대해 보다 정확한 충격 응답을 얻기 위해서, Fig. 2에 나타낸 요소의 전단변형과 회전관성을 고려하면 횡방향( $y$ 축)의 굽힘 파동 응답은

$$w_y(x, t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} W_y(x, \omega_n) e^{i\omega_n t}, \quad (3a)$$

$$\phi_z(x, t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \Phi_z(x, \omega_n) e^{i\omega_n t}, \quad (3b)$$

이며, 식 (3)에 나타낸 티모셴코 보함수(Timoshenko beam function)<sup>(9)</sup>는 다음과 같이 주어진다.

$$W_y(x) = \hat{C}_1 \sin \hat{b} \hat{\beta} x + \hat{C}_2 \cos \hat{b} \hat{\beta} x + \hat{C}_3 e^{\hat{b} \hat{\alpha} (x-L)} + \hat{C}_4 e^{-\hat{b} \hat{\alpha} x} \quad (4a)$$

$$\Phi_z(x) = \hat{C}_1 \hat{k}_1 \cos \hat{b} \hat{\beta} x - \hat{C}_2 \hat{k}_1 \sin \hat{b} \hat{\beta} x + \hat{C}_3 \hat{k}_2 e^{\hat{b} \hat{\alpha} (x-L)} - \hat{C}_4 \hat{k}_2 e^{-\hat{b} \hat{\alpha} x} \quad (4b)$$

여기서  $\begin{pmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{\beta} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \mp [r^2 + \hat{s}^2] + [(r^2 - \hat{s}^2) + \frac{4}{\hat{b}^2}]^{1/2} \right]^{1/2}$ ,  $r^2 = I_b / M_b$ ,  $\hat{s}^2 = \hat{D} / \hat{S}$ ,  $\hat{k}_1 = \hat{b} (\hat{\beta}^2 - \hat{s}^2) / \hat{\beta}$ ,  $\hat{k}_2 = \hat{b} (\hat{\alpha}^2 + \hat{s}^2) / \hat{\alpha}$ ,  $\hat{b}^2 = \omega^2 M_b / \hat{D}$ 이며,  $\hat{D}$ 는 굽힘강성,  $\hat{S}$ 는 전단강성,  $M_b$ 와  $I_b$ 는 각각 요소의 단위길이 당 질량과 회전관성 모멘트이고,  $L$ 은 요소의 길이를 나타낸다.

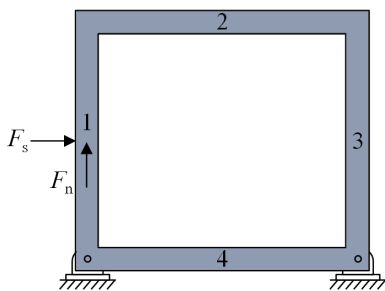


Fig. 3 Frame structure consisted of four spectral elements under longitudinal ( $F_n$ ) and transverse ( $F_s$ ) impact loads

같은 방법으로  $z$ 축 방향 굽힘 진동 응답( $w_z$ ,  $\phi_y$ )을 계산하고 스펙트럴요소 행렬<sup>(7)</sup>과 절점력으로부터 주파수별 절점 변위를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} d_1(\omega) \\ d_2(\omega) \end{Bmatrix} = S^{-1}(\omega) \begin{Bmatrix} F_1(\omega) \\ F_2(\omega) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서  $d_i = [u_{xi} \ w_{yi} \ w_{zi} \ \phi_{xi} \ \phi_{yi} \ \phi_{zi}]^T$ 는 절점 변위 ( $i=1, 2$ ),  $F_i = [F_{xi} \ F_{yi} \ F_{zi} \ M_{xi} \ M_{yi} \ M_{zi}]^T$ 는 절점력을 각각 나타내며,  $S(\omega)$ 는 주파수별로 계산된 스펙트럴요소 행렬(Spectral element matrix)을 의미한다. 식 (5)에서 얻어진 주파수별 절점 변위 응답을 역 이산 푸리에 변환(Inverse discrete Fourier transform)하면 요소의 임의의 위치에서 시간응답을 얻을 수 있다. 3차원 공간에 존재하는 요소의 응답은 방향코사인으로 표현되는 변환행렬(Transformation matrix)<sup>(9)</sup>을 이용해 스펙트럴요소 행렬을 구성하여 계산할 수 있다. 여러 개의 요소가 결합된 복합구조물에서는 변환행렬과 유한요소해석에서 사용되는 요소 결합 방법을 적용하여 충격 해석을 수행할 수 있다.

### 2.2 프레임 구조물의 충격 응답

충격력이 Fig. 3과 같은 프레임 구조물에 작용할 경우 스펙트럴요소법을 이용해 충격 응답을 해석하였다. 프레임은 4개의 요소로 구성하였으며 충격 해석에 적용된 각 요소의 길이는 1 m, 두께와 폭은 동일하게 0.05 m이었다. 해석에 적용한 영계수는 일반적인 탄소강에 해당하는 값으로 200 GPa를 적용하였고 손실률은 결합부분에서 발생하는 감쇠 현상을 반영하기 위해서 0.01로 일반탄소강에 비해 높게 적용하였다. Fig. 4에 나타낸 것과 같이 직경 37 mm, 길이 105 mm 운동에너지탄이 300 m/s 속도로 충돌할 경우에 Autodyn 시뮬레이션

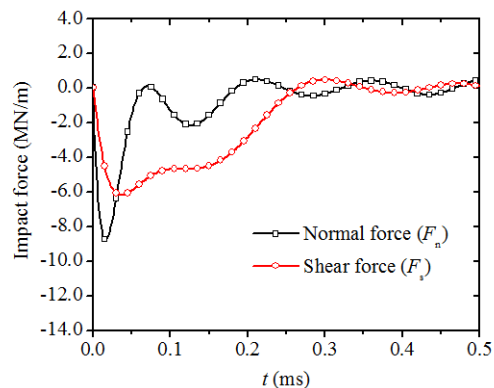
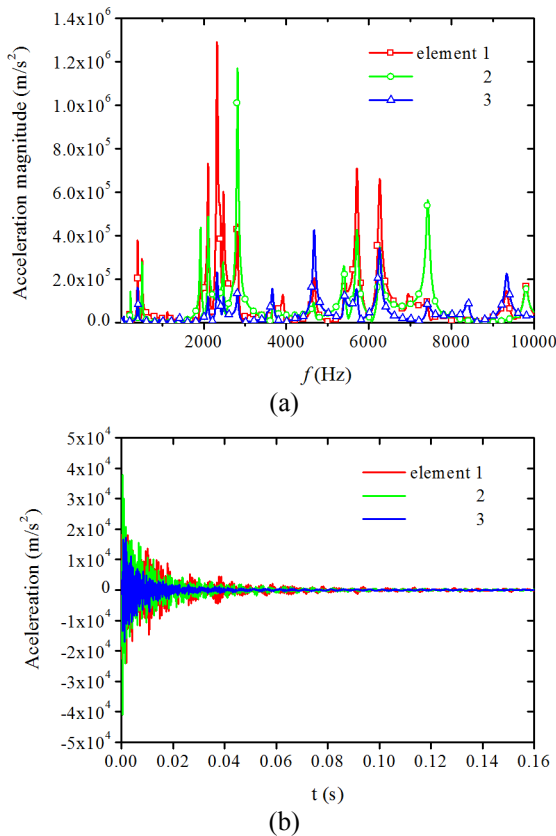


Fig. 4 Normal and shear forces acting on the frame structure for 0.5 milliseconds

으로부터 얻은 시간-충격력 데이터<sup>(10)</sup>를 적용하였고 충격력의 고주파 특성을 고려하기 위해서 10 kHz까지 응답을 계산하였다. 충격력은 Fig. 3에 나타난 것처럼 1번 요소의 중앙에 길이방향 수직력(Normal force,  $F_n$ )과 횡방향 전단력(Shear force,  $F_s$ )을 동시에 적용하였다.

Fig. 5는 Fig. 3에 나타난 프레임 구조물의 하단 4번 요소의 양 끝단 변위를 고정된 상태에서 계산한 1-3번 요소 중앙 지점의 횡방향 가속도 응답을 보여준다. Fig. 5(a)에 나타난 것처럼 충격력이 작용하는 1번 요소의 중앙에서 주파수별로 얻어진 가속도 응답의 크기가 매우 크게 나타났고 6 kHz 이상의 고주파 영역을 포함한 모달 특성을 보였다. 주파수 응답 결과를 역 이산 푸리에 변환하여 Fig. 5(b)에 나타난 것과 같이 시간 응답을 얻을 수 있다. 충격력 작용 지점에서 상대적으로 멀리 위치한 3번 요소의 가속도 응답이 크게 감소하는 것을 쉽게 파악할 수 있다. 이와 같이 구조물을 스펙트럴요소로 구성하면 상당히 높은 주파수 영역까지 구조물 전체 충격 거동을 빠르게 예측할 수 있으며, 충격력 작용 지점에 따라 응답이 크게 발생하는 구조물 위치를 파악할 수 있다.

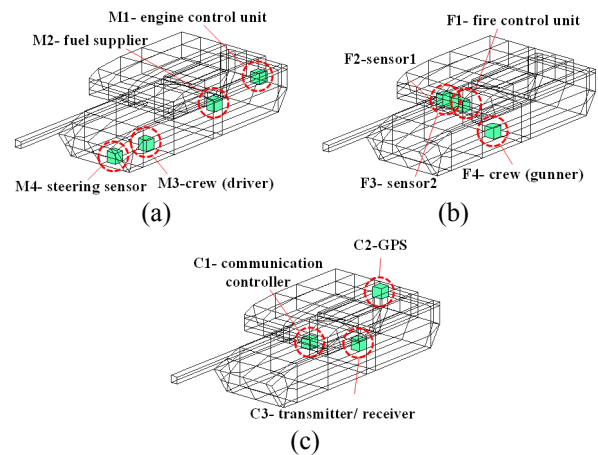


**Fig. 5** Transverse accelerations of the frame structure at the center of the element 1-3 shown in Fig. 3: (a) frequency and (b) time responses

### 3. 충격에 의한 시스템 취약성 분석

#### 3.1 취약성 분석 모델

본 연구에서 취약성 분석에 적용한 복합구조물과 주요 시스템 구성을 Fig. 6에 나타내었다. 충격에 대한 시스템 취약성 분석 절차를 따라서 시뮬레이션이 용이하도록 실제 전투차량과 구성 시스템을 단순화하여 해석 모델을 구성하였다. 3 차원 전투차량 캐드 모델로부터 구조물을 요소 400 개, 절점 198 개로 이루어진 스펙트럴요소로 나타내었다. 각 요소의 길이 범위는 0.1-4.65 m 이며, 두께는 0.05 m, 영계수는 200 GPa, 손실률은 요소 간 결합 부분에서 발생하는 감쇠를 나타내기 위해 0.05 로 적용하였다. 취약성 분석 대상은 전투차량의 주요 기능 중 이동(Mobility), 공격(Firepower), 통신(Communication) 시스템으로 선정하였다. 취약성 분석 과정을 단순화하기 위해서 Fig. 6에 나타난 주요 기능별 구성 부품은 고장계통도 분석이나 고장 유형 분석을 통해 다음과 같이 주어진 것으로 가정하였다. 이동 시스템[Fig. 6(a)]은 엔진제어장치(Engine control unit), 연료공급장치(Fuel supplier), 운전수(Driver), 조향 센서(Steering sensor)로 구성되고 공격시스템[Fig. 6(b)]은 사격통제장치(Fire control unit), 센서 1, 2, 포수(Gunner)로 이루어지며, 통신시스템[Fig. 6(c)]은 통신제어기(Communication controller), GPS, 송수신기(Transmitter/receiver)로 구성되어 있다. 시스템을 구성하는 각 부품은 전투차량 내부에 위치하고 있으며 예비부품에 의한 중복을 고려하지 않고 서로 직렬로 연결된 구조로 부품 중 하나라도 손상이 되면 시스템 기능을 상실하는 것으로 가정하였다.



**Fig. 6** Crucial components for (a) the mobility system, (b) the firepower system and (c) the communication system and their locations in the simplified combat vehicle

3.2 충격에 의한 시스템 취약성 분석 결과

취약성 분석을 위해서 먼저 Fig. 6 에 나타난 전투차량 모델에서 외부 충격원에 의한 충격과 전달을 시뮬레이션 하였다. 앞선 프레임 구조물 해석 (Fig. 5)과 마찬가지로 국부 충격해석에서 얻어진 단순 충격력 데이터를 적용하여 10 kHz 주파수 영역까지 충격 해석을 수행하였다 Fig. 7 는 37 mm 운동에너지탄이 900 m/s 속도로 정면 중앙에 충돌할 경우 전달되는 충격력에 의한 이동시스템 구성 부품에 작용하는 가속도 시간 응답을 보여준다. 피격 부위에 가까운 조향 센서(M4)에 작용하는 가속도 크기가 가장 컸으며 상대적으로 피격 부위에서 멀리 떨어진 엔진제어장치(M1)에 작용하는 가속도 크기는 상당히 감소하였다.

가속도 응답 계산 결과와 시스템을 구성하는 각 부품에 손상을 유발할 수 있는 최소 및 최대 가속도 범위를 이용해 부품의 취약확률을 계산하였다. 본 논문에서는 충격 시  $2 \times 10^3 \text{ m/s}^2$  이하의 가속도가 부품에 작용할 경우 부품 손상은 일어나지 않기 때문에 취약확률은 0 이고  $2 \times 10^4 \text{ m/s}^2$  이상의 가속도가 작용하면 취약확률은 1 로 가정하였다.

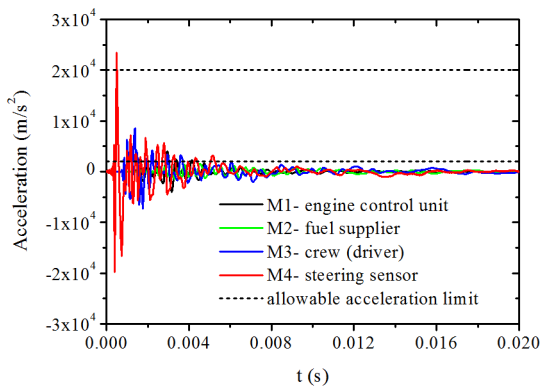


Fig. 7 Transverse acceleration responses of the locations where the mobility system's components are positioned

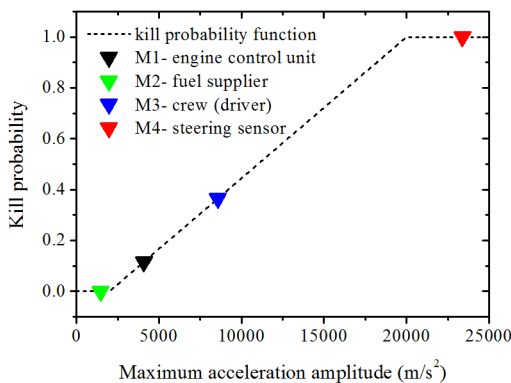


Fig. 8 Kill probabilities of components in the mobility system

부품에 작용하는 가속도 크기가  $2 \times 10^3$  와  $2 \times 10^4 \text{ m/s}^2$  사이인 경우에는 Fig. 8 에 나타난 것과 같이 점선을 따라 일정한 비율로 증가하는 확률함수를 정의하였다. 부품 취약확률 함수는 충격 시험에서 얻어진 데이터를 각 부품별로 변경하여 적용할 수 있다. Fig. 8 은 Fig. 7 에 나타난 가속도 응답의 최대 크기로부터 계산한 이동시스템 각 부품의 취약확률을 보여준다. 정면 중앙 피격 부위와 가까운 조향 센서는 최대 허용 가속도 기준을 초과하여 취약 확률이 1 로 나타났으며, 엔진제어장치, 연료 공급장치, 운전수의 취약확률은 각각 0.11, 0, 0.37 로 계산되었다. 이 결과를 다음 식 (6)에 적용하면 충격에 대한 시스템의 취약확률을 얻을 수 있다

$$p_k = 1 - \prod_{j=1}^{N_c} (1 - p_{k/c_j}) \quad (6)$$

여기서  $p_k$ 는 시스템 취약 확률,  $N_c$ 는 시스템 구성 부품 개수,  $p_{k/c_j}$ 는  $j$  번째 부품의 취약확률을 나타낸다.

Fig. 9 는 37 mm 운동에너지탄이 900 m/s 로 전투차량 정면 중앙에 충격을 가할 경우 각 시스템 구성 부품의 취약확률 분포를 보여준다. 식 (6)으로부터 시스템 취약성을 계산하면, Fig. 9(a)에 나타난 것과 같이 이동시스템은 충격 부위와 가장 근접해 있는 조향 센서 파손으로 인해 취약확률이 1 로 나타났다. 이 결과는 동일한 충격 조건에서 탄의 속도가 300 m/s 인 경우에 이동시스템 취약확률은 0.2, 700 m/s 에서는 0.66 로 비교적 낮아 이동 기능이 작동할 수 있지만 900 m/s 이상의 충격 속도에서는 임무수행을 위한 이동이 불가능할 수 있음을

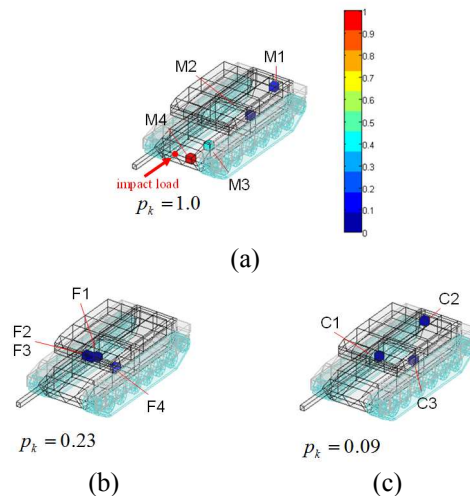


Fig. 9 Vulnerability of (a) the mobility system, (b) firepower system and (c) communication system under frontal impact loading

의미한다. 반면에 화력시스템[Fig. 9(b)]과 통신시스템[Fig. 9(c)]은 파손된 부품 없이 취약확률이 각각 0.23 과 0.09 로 매우 낮게 나타났다. 이를 통해 같은 피격 조건에서 통신시스템의 생존 가능성이 가장 높은 것을 알 수 있다. Fig. 10 은 전투차량 모델의 정면과 후면 방향에 놓인 모든 절점에 충격력을 적용한 후 계산한 이동 시스템의 취약성 분포를 보여준다. 해석 결과로부터 정면 피격에는 하단 구조물 중앙부분, 후면 피격에는 하단 구조물 전체에서 이동시스템의 취약성이 높은 것을 알 수 있다. 동일한 방법으로 화력, 통신 시스템에서도 충격에 의해 시스템의 손상을 유발할 수 있는 구조물의 취약한 위치를 파악할 수 있다.

본 연구에서 제안한 충격에 대한 시스템 취약성 분석 기법을 이용해 피격 방향에 따른 전투 시스템의 취약성을 정량적으로 비교하였다. Fig. 11 에 나타난 것처럼 피격 방향은 전투 차량의 정면(Front side), 좌측면(Left side), 우측면(Right side), 후

면(Rear side)으로 구분하였다. Fig. 10 에 나타난 것과 같이 각 피격 방향에 놓인 모든 절점에 충격력을 적용하여 전체 구조물의 충격응답을 얻고 시스템 취약확률을 계산하였다. 피격 방향별로 취약성을 비교하기 위해서 각 충격 지점에서 얻어진 취약확률의 합을 그 방향의 절점 수로 나눈 피격 방향별 평균 취약성을 계산하여 Fig. 11 에 나타내었다. 이동시스템[Fig. 11(a)]과 통신시스템[Fig. 11(c)]은 후면 피격 시 취약성이 가장 크게 나타났고, 화력시스템[Fig. 11(b)]의 경우 정면 피격 시 취약확률이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이동시스템은 구조물 후면 하단부에 위치한 엔진제어장치와 연료공급장치의 취약확률 증가로 인해 후면 피격에 취약하며 통신시스템은 상부 구조물 후면에 위치한 GPS 손상으로 인해 취약성이 증가하게 된다. 마지막으로 화력시스템은 정면 상부 구조물에 위치한 센서 1, 2 가 정면 피격에 취약하기 때문에 상대적으로 정면부 취약 확률이 증가하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 충격에 대한 시스템 취약성 분석 기법을 제안하고 3 차원 전투차량 모델의 피격 조건에 따른 취약성 평가를 수행하였다. 스펙트럴요소법을 이용해 복합구조물의 충격 파동의 전파, 경계 반사, 충격에너지 감쇠 등을 시뮬레이션하고 취약성 분석에 활용하였다. 시스템을 구성하는 주요부품의 취약확률 함수를 정의하고 구조물 위치별로 계산된 최대 진동 응답 크기를 이용해 전체 시스템의 취약 확률을 계산하였다. 제안된 방법을 이용해 단순 전투차량 모델의 이동, 화력, 통신시스템의 충격에 대한 취약성을 평가하고 충격 속도, 피격 위치 및 방향 등 피격 조건에 따른 시스템의 취약확률을 비교하였다. 제안된 충격해석 및 취약성 분석 절차는 고주파 영역을 포함하는 구조물의 응답 해석 시간을 크게 단축할 수 있는 장점이 있으며, 외부 충격원에 대한 다양한 시스템의 취약성 평가에 활용할 수 있을 것이다.

#### 후 기

이 논문은 국방과학연구소 생존성 기술 특화연구센터의 사업으로 지원받아 연구되었음(계약번호 UD1200190D)

#### 참고문헌 (References)

(1) Børvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O. S. and Malo,

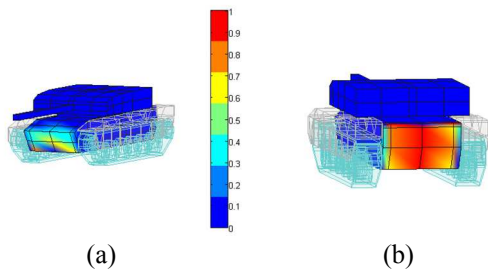


Fig. 10 Vulnerability distribution of the mobility system for (a) the front and (b) rear impacts

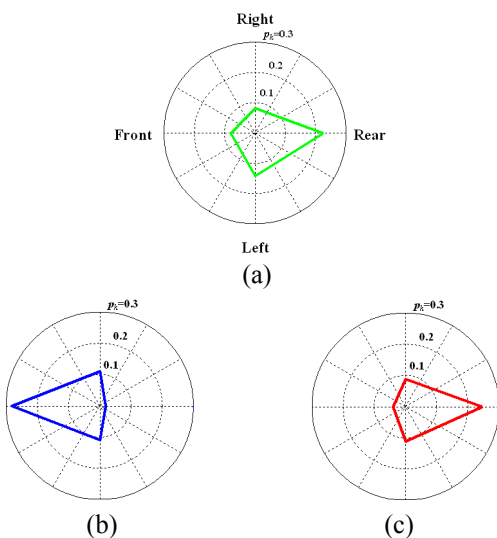


Fig. 11 Estimated vulnerable impact direction with high possibility of damage generation on (a) the mobility, (b) firepower and (c) communication systems

- K. A., 1999, "Ballistic Penetration of Steel Plates," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 22, pp. 855~886.
- (2) Grujicic, M., Pandurangan, B., Koudela, K. L. and Cheeseman, B. A., 2006, "A Computational Analysis of the Ballistic Performance of Light-weight Hybrid Composite Armors," *Applied Surface Science*, Vol. 253, pp. 730~745.
- (3) Shokrieh, M. M. and Javadpour, G. H., 2008, "Penetration Analysis of a Projectile in Ceramic Composite Armor," *Composite Structures*, Vol. 82, pp. 269~276.
- (4) Kim, K. S. and Lee, J. H., 2012, "Vulnerability Assessment Procedure for the Warship Including the Effect of Shotline and Penetration of Fragments," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 49, No. 3, pp. 254~263.
- (5) Ball, R. E., 2003, *The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design*, 2nd Edition, AIAA Education Series, Virginia, pp. 655~696.
- (6) Koo, M. H., Lim, H. S., Gimm, H. I. and Yoo, H. H., 2009, "Study of Impact Energy Propagation Phenomenon and Modal Characteristics of an Armored Vehicle Undergoing High Velocity Impact," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 23, pp. 964~967.
- (7) Lee, U., 2009, *Spectral Element Method in Structural Dynamics*, John Wiley & Sons, Singapore, pp. 41~58.
- (8) Park, J., 2005, "Transfer Function Methods to Measure Dynamic Mechanical Properties of Complex Structures," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 288, pp. 57~79.
- (9) Logan, D. L., 2007, *A First Course in the Finite Element Method*, 4th Edition, Thomson, Canada, pp. 255~260.
- (10) Park, J., Koo, M. H., Kim, H.-S. and Park, J., 2013, "Multiscale Simulations for Impact Load-Induced Vibration: Assessing a Structure's Vulnerability," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 135, pp. 021006-1~7.