공학석사 학위논문

수중폭발 충격하중에 대한 승조원의 상해 평가 및 기준에 관한 연구

A Study on Injury Estimation and Criteria of Crew subjected to UNDEX Loadings

지도교수 이 상 갑

*2007*년 *2*월

한국해양대학교 대학원

해양시스템공학과

이 승 영

본 논문을 이 승영의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 : 공학박사 정 정훈 (인)

위 원 : 공학박사 박 석주 (인)

위 원 : 공학박사 이 상갑 (인)

*2007*년 *2*월

한국해양대학교 대학원

해양시스템공학과 이 승영

목 차

목 차 ····· i
List of Tables ····· ii
List of Figures ····· iii

Abstract ····· v

1. 서 론 ····· 1

2. 승조원 상해 평가를 위한 수학적 인체 모델 정립 ····· 3
2.1 비선형 다자유도 인체모델 ····· 3
2.2 등가 다자유도 유한요소 인체모델 ····· 7

3. 충격하중에 대한 승조원 상해 평가 기준 ····· 11
3.1 인체 각 부위에 대한 기준 ····· 11
3.2 승조원 거주구역 바닥에서의 충격응답 크기에 대한 기준 ····· 12

4. MIL-S-901D 중 중량 충격시험 수치 시뮬레이션 ····· 15
4.1 수치 시뮬레이션 시나리오 ····· 15
4.2 인체모델 충격응답 해석 결과 및 상관성 검토 ····· 17

5. BV043/85 내충격 강화 기준 충격하중에 대한 충격응답 해석 ····· 26
5.1 응답해석의 시나리오 ····· 27
5.2 인체모델 충격응답 해석 결과 및 상관성 검토 ····· 29

6. 결 론 ····· 40

참고 문헌 ····· 42

List of Tables

Table 2.1 Parameters of standing postured mode ····· 5
Table 2.2 Parameters of sitting postured model ····· 5
Table 3.1 Tolerance levels for axial loading of human body ····· 12
Table 4.1 Comparison of tolerance levels for each component of standing postured body(MIL-S-901D) ····· 22
Table 4.2 Comparison of tolerance levels for each component of sitting postured body(MIL-S-901D) ····· 22
Table 4.3 Max vertical velocity ,time and average acceleration at base of SFSP ····· 24
Table 5.1 Required shock response spectrum in BV043/85 ····· 27
Table 5.2 Comparison of tolerance levels for each component of human body (BV043/85 standing posture) ····· 37
Table 5.3 Comparison of tolerance levels for each component of human body (BV043/85 sitting posture) ····· 37

List of figures

Fig. 2.1 Standing postured nonlinear biodynamic models ····· 4
Fig. 2.2 Standing postured nonlinear biodynamic models ····· 4
Fig. 2.3 Nonlinear biodynamic Finite Element models ····· 7
Fig. 2.4 Time history of base shock motion ····· 8
Fig. 2.5 Comparison of displacements of standing postured biodynamic model ····· 9
Fig. 2.6 Comparison of displacements of sitting postured biodynamic model ····· 10
Fig. 3.1 Injury limit diagram of deck motion ····· 12
Fig. 3.2 Relation between max velocity and average acceleration ····· 13
Fig. 3.3 Example of protection measure of crew against UNDEX loadings ····· 14
Fig. 4.1 Shot geometry of MIL-S-901D heavy weight shock test ····· 16
Fig. 4.2 Finite element model of biodynamic model, SFSP and surrounding water ····· 17
Fig. 4.3 Vertical acceleration of biodynamic standing postured model ····· 19
Fig. 4.4 Relative vertical displacement of biodynamic standing postured model ····· 20
Fig. 4.5 Vertical acceleration of biodynamic sitting postured model ····· 20
Fig. 4.6 Relative vertical displacement of biodynamic sitting postured model ····· 21
Fig. 4.7 Data acquisition locations at base of SFSP ····· 23
Fig. 4.8 Comparison of response results with injury limit of a deck motion (MIL-S-901D) ····· 25
Fig. 5.1 Mounted Location of onboard equipment (surface ship) ····· 26
Fig. 5.2 Conversion of frequency domain data into time domain one using shock response spectrum in BV043/85 ····· 28
Fig. 5.3 Vertical acceleration of biodynamic standing postured model (surface ship > 2000t) ····· 30

Fig. 5.4 Relative vertical displacement of biodynamic standing postured model (surface ship > 2000t) ····· 31
Fig. 5.5 Vertical acceleration of biodynamic standing postured model (surface ship < 1000t) ····· 32
Fig. 5.6 Relative vertical displacement of biodynamic standing postured model (surface ship < 1000t) ····· 33
Fig. 5.7 Vertical acceleration of biodynamic sitting postured model (surface ship > 2000t) ····· 34
Fig. 5.8 Relative vertical displacement of biodynamic sitting postured model (surface ship > 2000t) ····· 35
Fig. 5.9 Vertical acceleration of biodynamic sitting postured model (surface ship < 1000t) ····· 35
Fig. 5.10 Relative vertical displacement of biodynamic sitting postured model (surface ship < 1000t) ····· 36
Fig. 5.11 Comparison of response results with injury limit of a deck motion (BV043/85) ····· 38

A Study on Injury Estimation and Criteria of Crew subjected to UNDEX Loadings

Lee, Seung-Young

Division of Ocean Systems Engineering

Graduate School, Korea Maritime University

Abstract

Since the fulfillment of combat mission and safety return of the naval ship's crew is the ultimate purpose for the security of its survivability, it is very important to secure his safety in its shock hardening. In spite of such an importance, however, the researches on the crew survivability to underwater shock are insufficient compared to those on the ship structures and onboard equipments under UNDEX(UNDerwater EXplosion), and the systematic protection regulations and/or criteria related to the crew have not yet been provided.

At present, there are two kinds of injury criteria for crew against UNDEX loadings, such as tolerance level criteria for each component of human body and injury limit of a ship's deck motion specified in Germanishcher Lloyd's rule. The objective of this study is to establish injury estimation and criteria for crew subjected to UNDEX loadings through the examination of a correlation between two criteria by the numerical biodynamic response analyses of standing and sitting postured humans on MIL-S-901D SFSP(Standard Floating Shock Platform) and against BV043/85 shock response spectrum subjected to UNDEX and by the comparison of shock response results with two criteria. From this study, it could be confirmed that there is a strong correlation between two criteria.

1. 서 론

함정의 생존성 확보를 위해 반드시 고려해야 할 사항 중의 하나인 수중폭발 충격하중에 대한 함정의 내충격 강화(shock hardening)와 관련하여 현재까지의 국내외 기술개발의 대부분은 선체구조 및 탑재장비의 내충격 안전성 확보 관점에서 수행되어 왔다. 그러나 함정 생존성 확보의 궁극적 목적은 함정 승조원들이 전투임무를 성공적으로 마치고 무사히 귀환할 수 있도록 하는 것이기 때문에, 수중폭발 충격하중에 대한 승조원의 보호대책마련도 함정 설계 및 건조 시 고려해야 할 중요한 사항이다.

하지만, 수중폭발 충격하중에 대한 승조원 보호 관점에서 명시된 해군 규정 및 기준은 독일해군의 함정 내충격 강화 사양인 BV043/85[1]을 제외하고는 현재까지 없는 것으로 판단되며, 90년대 말 국외에서 수행된 수중폭발에 의한 승조원의 충격응답 특성 및 손상평가에 대한 일부 연구사례[2, 3]을 제외하고는 관련 연구 실적도 매우 미약한 실정이다. 상기 연구사례 결과들을 살펴보면 함정 선체구조나 탑재장비에는 전혀 손상을 일으키지 않는 크기의 수중폭발 충격하중에 대해서도 승조원은 심각한 손상을 입을 수 있다는 사실을 확인할 수 있다. 이러한 상해로부터 함정 승조원을 보호하기 위해 승조원의 안전성에 관한 연구가 많이 이루어져야 하며, 특히 수중폭발 충격하중에 대한 승조원의 상해 평가 및 기준을 명확히 정립하여야 할 것이다.

본 논문에서는 충격하중에 대한 승조원의 손상 평가 및 기준을 정립하기 위해 충격하중에 대한 함정 승조원의 상해 평가 기준들을 제시하고, 제시된 기준들을 평가하기 위해 인체의 동적특성을 현실적으로 나타낼 수 있는 최적화된 비선형 다자유도 인체모델과 이를 이용한 적용방법을 제시하고, MIL-S-901D[4] 중중량 충격시험 수치 시뮬레이션과 BV043/85에서 규정하는 내충격 강화 기준 충격하중에 대한 응답해석을 수행하여 제시된 두 평가기준에 따른 인체의 상해정도를 평가하여 두 평가기준의 상관관계를 검토하여 보았다.

본 연구에서는 뼈의 인장 테스트를 거쳐 물성치를 계산한 비선형 다자유도 모델[3]의 앉아있는 자세(sitting posture)와 서 있는 자세(standing posture)에 대한 인체 모델을 이용하여 수치 시뮬레이션에 적용할 수 있도록 유한요소 모델로 구성하여 이를 검증하였다. 또한 인체에 대해 명확 한 상해 평가를 수행하고자 Zong and Lam[5]가 기존의 연구결과를 정리한 인체 각 부위에 대한 상해 평가기준과 독일해군의 함정 내충격 강화 사양인 BV043/85에서 규정하고 독일선급(Germanischer Lloyd)[6]에서 이를 준용한 승조원 거주구역 바닥에서의 충격응답

크기에 대한 기준을 준용하였다. MIL-S-901D 중 중량 충격시험 수치시뮬레이션을 위해서 상용 수중폭발 해석코드인 LS-DYNA/USA(Underwater Shock Analysis)[7~9]와 hydrocode LS-DYNA3D[10]을 사용하였으며, BV043/85에서 규정하는 내충격 강화 기준 충격하중에 대한 응답해석에서도 LS-DYNA3D를 사용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 1장에서는 승조원 보호대책에 대한 현재 동향과 본 연구의 필요성, 목적 및 연구내용을 기술하였다. 2장에서는 승조원의 상해평가를 위한 인체에 대한 모델을 제시하였고, 3장에서는 승조원 상해 평가 기준을 제시하고 이를 상세히 소개하였다. 4장과 5장에서는 각각 미 해군의 수중충격시험인 MIL-S-901D 중중량 충격시험 수치 시뮬레이션과 독일해군의 함정 내충격 강화 사양인 BV043/85에서 규정하는 충격응답 스펙트럼에 대한 수치 시뮬레이션을 수행하여 승조원 상해 평가 기준에 적용하고 기준들 간에 상관성이 존재하는지 파악해 보았다. 마지막으로 6장에서는 결론과 앞으로 향후 연구방향에 대해서 기술하였다.

2. 비선형 다자유도 인체모델

본 장에서는 MIL-S-901D[4] 중중량 충격시험 수치 시뮬레이션과 BV043/85에서 규정하는 내충격 강화 기준 충격하중에 대한 응답해석을 수행하기 위하여 Liu 등[3]이 뼈의 인장 테스트를 거쳐 물성치를 계산하여 제시한 수학적 비선형 다자유도 인체모델의 앉아있는 자세와 서 있는 자세에 대하여, 수치 시뮬레이션에 적용할 수 있도록 등가(equivalent) 유한요소 모델로 구성하여 이를 검증하였다.

2.1 수학적 비선형 다자유도 인체모델

본 연구에 사용된 인체모델은 앉아있는 자세와 서있는 자세의 비선형 다자유도계 시스템으로 실제 인체의 뼈를 대상으로 수행한 동특성 실험을 통해 각 부위의 질량, 강성 및 감쇠 특성치를 규명하였다. 서 있는 자세에 대한 인체모델은 Fig. 2.1과 같이 7개의 질량체, 스프링 그리고 댐퍼로 구성되어 있다. 여기서 발목 뼈(Tarsal bones)를 M_1으로 나타내었고, 정강이 뼈(Tibia bones)를 M_2, 대퇴부 뼈(Thigh bones)를 M_3, 골반(Pelvis)을 M_4, 몸통(Torso)을 M_5, 내장(Viscera)을 M_6, 머리(Head)를 M_7로 나타내었다. 앉아 있는 자세에 대한 인체모델은 Fig. 2.2와 같이 골반(M_1), 상부몸통(Upper torso, M_2), 내장(M_3), 머리(M_4)로 구성되어 있다. 그리고 비선형 스프링과 댐퍼를 사용하여 각각의 질량체를 그림과 같이 연결하였으며 각 부위의 질량, 강성 및 감쇠 특성치를 각각 Table 2.1과 Table 2.2에 요약하였다. 여기에서 내장, 머리를 제외한 나머지 인체 부위의 강성 및 감쇠 특성치는 인체 부위 사이의 상대 변위의 비선형 함수로 주어짐을 알 수 있다.

서 있는 자세의 인체모델에 대한 운동 방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{Y}\}+[K]\{Y\}+[C]\{\dot{Y}\}=\{R\} \tag{2.1}$$

여기서 $[M]$, $[K]$, $[C]$은 질량, 강성 및 감쇠 행렬을, $\{Y\}, \{\dot{Y}\}, \{\ddot{Y}\}$는 변위, 속도 및 가속도 벡터를, 그리고 $\{R\}$는 하중을 나타낸다. 각각의 행렬과 벡터는 다음과 같다.

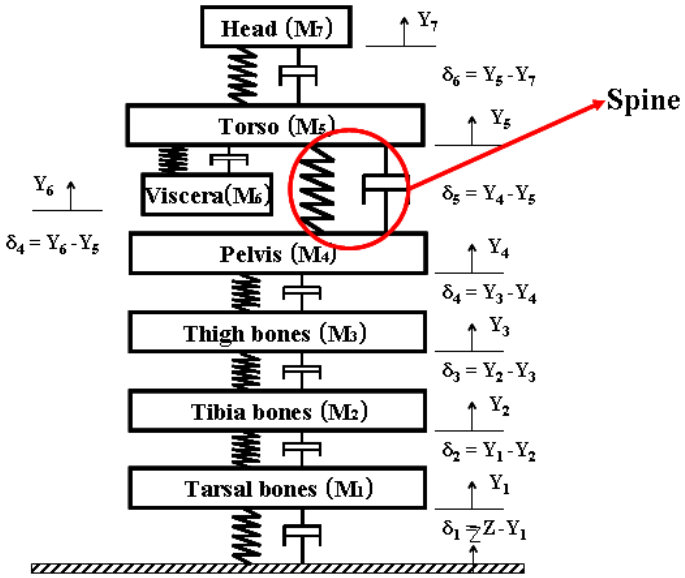


Fig. 2.1 Standing postured nonlinear biodynamic models

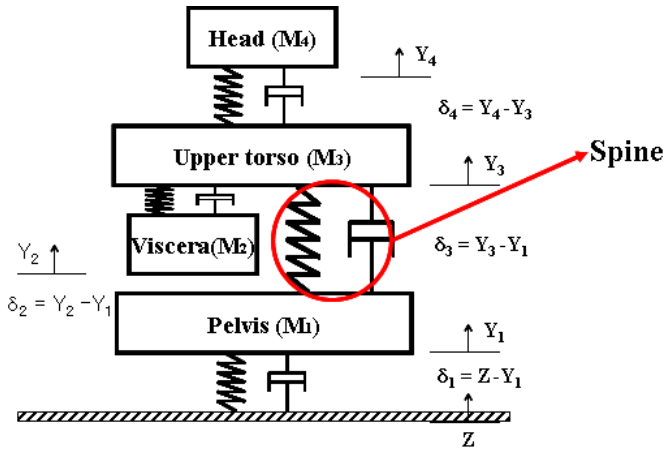


Fig. 2.2 Standing postured nonlinear biodynamic models

$$[M] = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & M_7 \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

Table 2.1 Parameters of standing postured model

Parts	Stiffness K_i(N/m)		Mass M_i(kg)	Damping ratio C_i
Tarsal bones	632,800 0	$\delta_1 \geq 0$ $\delta_1 < 0$	1.25	0.4
Tibia bones	$0.841\times10^6+4.065\times10^9\delta_2-0.740\times10^{12}\delta_2^2$ 0	$\delta_2 \geq 0.0004$ $\delta_2 < 0.0004$	3.32	0.3
Thigh bones	$2.308\times106+0.071\times10^9\delta_3-0.175\times10^{12}\delta_3^2$ 0	$\delta_3 \geq 0.004$ $\delta_3 < 0.004$	4.18	0.3
Pelvis	$16.215\times10^7\delta_4^2$		26.25	0.3
Spine	$3.781\times10^3+10.9\times10^6\delta_5-2.687\times10^7\delta_5^2$		21.8	0.22
Viscera	2,831.8		6.8	0.8
Head	202,286.1		5.5	0.2

Table 2.2 Parameters of sitting postured model

Parts	Stiffness K_i(N/m)		Mass M_i(kg)	Damping ratio C_i
Pelvis	$8.1075\times10^7\delta_1^2$ 0	$\delta_1 \geq 0$ $\delta_1 < 0$	29	0.5
Spine	$3.781\times10^3+10.9\times10^6\delta_2-2.687\times10^7\delta_2^2$ 77,043.56	$\delta_2 \geq 0.036576$ $\delta_2 \geq 0.036576$	21.8	0.22
Viscera	2,831.8		6.8	1.0
Head	202,286.1		5.5	0.2

$$[K] = \begin{bmatrix} (K_1+K_2) & -K_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_2 & (K_2+K_3) & -K_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -K_3 & (K_3+K_4) & -K_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_4 & (K_4+K_5) & -K_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -K_5 & (K_5+K_6+K_7) & -K_6 & -K_7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -K_6 & K_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -K_7 & 0 & K_7 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} (C_1+C_2) & -C_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C_2 & (C_2+C_3) & -C_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C_3 & (C_3+C_4) & -C_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -C_4 & (C_4+C_5) & -C_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C_5 & (C_5+C_6+C_7) & -C_6 & -C_7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C_6 & C_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -C_7 & 0 & C_7 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\{R\}=\begin{Bmatrix} K_1Z+C_1\dot{Z} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{2.5}$$

$$\{Y\}=\begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \\ Y_7 \end{Bmatrix} \tag{2.6}$$

여기서 감쇠상수 C는 식 (2.7)과 같이 나타낸다.

$$C_i(\delta_j)=\overline{C_i}\ \sqrt{M_iK_i(\delta_j)} \tag{2.7}$$

앉아 있는 자세의 인체모델에 대한 운동 방정식은 식 (2.1)과 같고, 각각의 행렬과 벡터는 다음과 같다.

$$[M]=\begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_4 \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

$$[K]=\begin{bmatrix} (K_1+K_3) & 0 & -K_3 & 0 \\ 0 & K_2 & -K_2 & 0 \\ -K_3 & -K_2 & (K_2+K_3+K_4) & -K_4 \\ 0 & 0 & -K_4 & K_4 \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

$$[C]=\begin{bmatrix} (C_1+C_3) & 0 & -C_3 & 0 \\ 0 & C_2 & -C_2 & 0 \\ -C_3 & -C_2 & (C_2+C_3+C_4) & -C_4 \\ 0 & 0 & -C_4 & C_4 \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

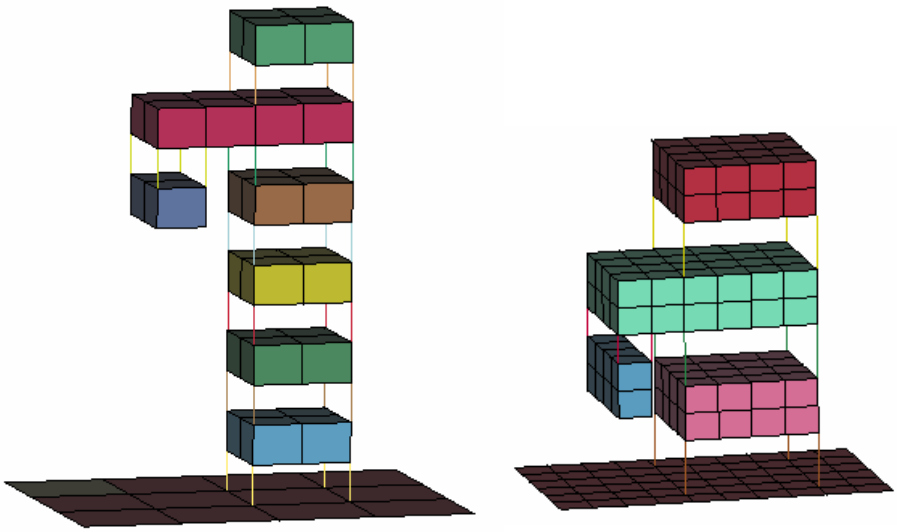
$$\{R\}=\begin{Bmatrix} K_1 Z + C_1 \dot{Z} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \qquad (2.11)$$

$$\{Y\}=\begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{Bmatrix} \qquad (2.12)$$

서있는 자세일 경우는 식(2.2)~(2.6)을, 앉아있는 자세일 경우에는 식(2.8)~(2.12)를 인체 모델의 운동방정식 (2.1)에 대입하면 비선형 운동방정식이 된다. 이를 이용하여 4차 Runge-Kutta수치 적분법에 의해서 $\{Y\}, \{\dot{Y}\}, \{\ddot{Y}\}$을 구할 수 있다.

2.2 등가 다자유도 유한요소 인체모델

본 연구에서 제시한 수학적 비선형 다자유도 인체모델을 이용하여 MIL-S-901D[4] 중중량 충격시험 수치 시뮬레이션과 BV043/85에서 규정하는 내충격 강화 기준 충격하중에 대한 응답해석을 수행하기 위해서는 각 부위의 질량, 강성 및 감쇠 특성치를 등가 유한요소 모델로 치환시킬 필요가 있다. Fig. 2.3(a) 및 (b)는 앞절에서 언급한 수학적 비선형 다자유도 인체모델을 등가인 유한요소 인체모델로 치환한 서있는 자세와 앉아있는 자세의 모델을 각각 보여주고 있다.



(a) standing posture (b) sitting posture

Fig. 2.3 Nonlinear biodynamic Finite Element models

수치 시뮬레이션을 위해서는 수학적 비선형 다자유도 인체모델의 등가

LS-DYNA3D 유한요소 모델에 대한 정확도 검증이 선행되어야 한다. 이를 위해 Fig. 2.4와 같이 0.02초 동안 55g크기의 사각형 가속도 펄스가 지지부(base)에 작용하는 경우에 대해 비선형 다자유도 인체모델과 이 모델의 특성치를 치환하여 구성한 등가 LS-DYNA3D 유한요소 모델 각각에 대해 충격응답 해석을 수행하여 비교, 검토 하였다. 이 때 비선형 다자유도 인체모델은 수치 해석적인 방법으로 계산하였고, 등가 LS-DYNA3D 유한요소 모델은 LS-DYNA3D를 사용하여 충격응답 해석하고 서있는 자세와 앉아있는 자세의 인체 부위별 수직변위에 대해 각각 Figs. 2.5와 2.6에 도시하였다.

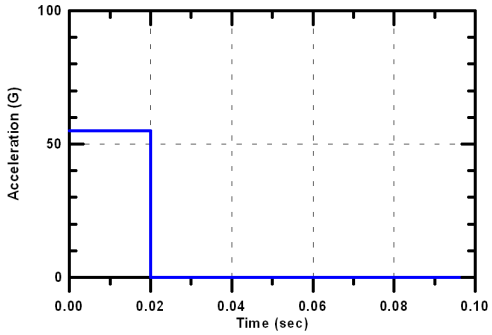
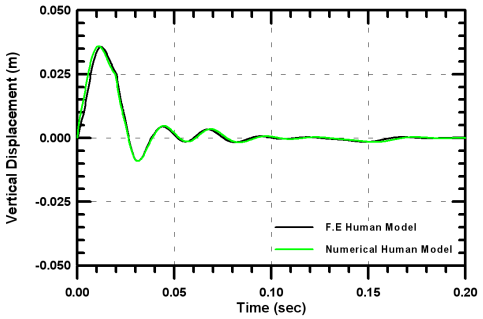
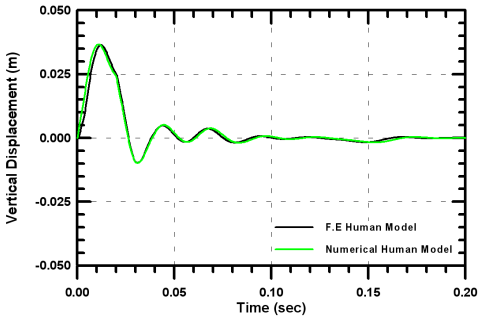


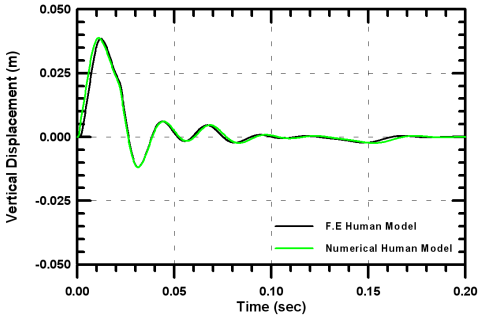
Fig. 2.4 Time history of base shock motion



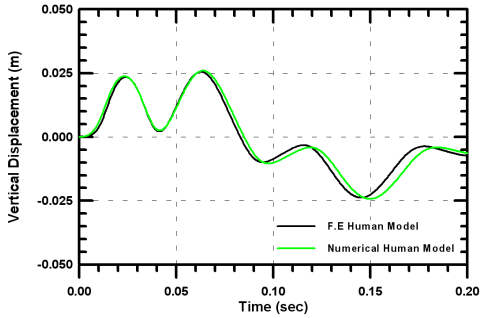
(a) body 1 (Tarsal bones)



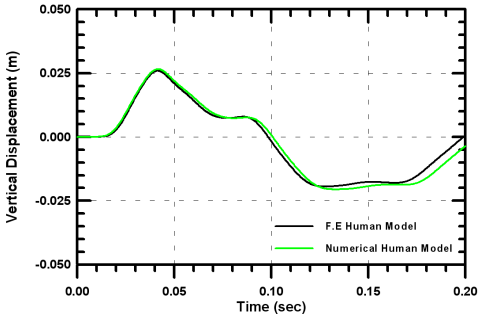
(b) body 2 (Tibia bones)



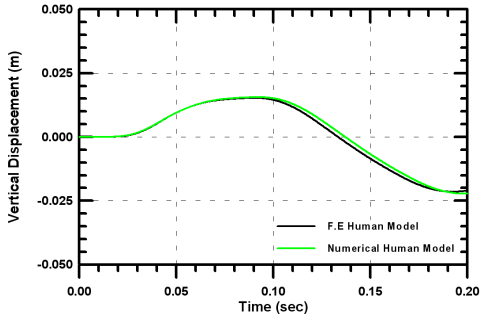
(c) body 3 (Thigh bones)



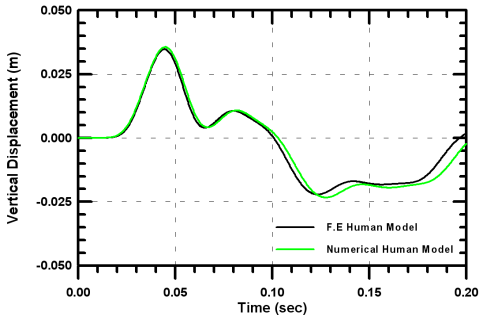
(d) body 4 (Pelvis)



(e) body 5 (Spine)

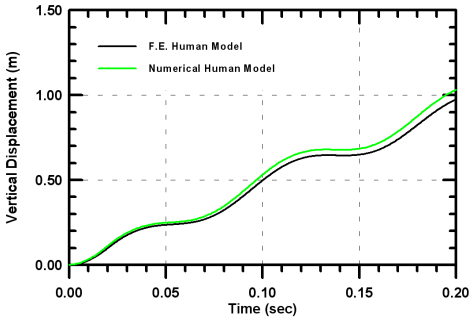


(f) body 6 (Viscera)

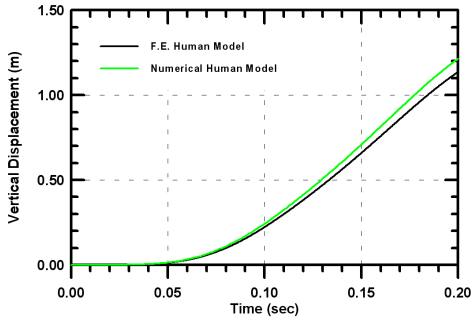


(g) body 7 (Head)

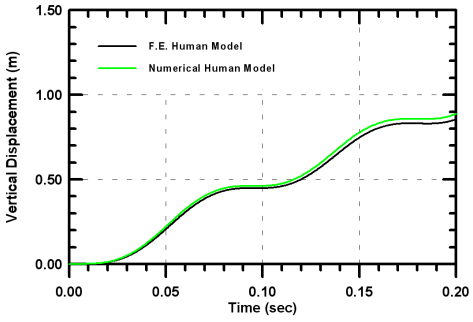
Fig. 2.5 Comparison of displacements of standing postured biodynamic model



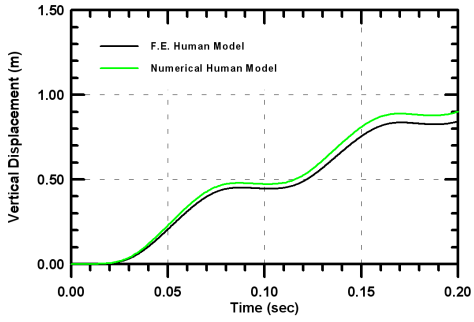
(a) body 1 (pelvis)



(b) body 2 (viscera)



(c) body 3 (upper torso)



(b) body 4 (head)

Fig. 2.6 Comparison of displacements of sitting postured biodynamic model

이상의 결과에서 알 수 있듯이 서있는 자세와 앉아있는 자세 모두 인체 각 부위에 대한 충격응답 계산 결과가 두 가지 종류의 모델에서 거의 일치함을 보인다는 것을 알 수 있다.

3. 승조원 상해 평가 기준

수중폭발 충격하중에 대한 함정 선체구조 및 탑재장비의 내충격에 대한 평가 기준은 상당부분 제시되어 있고 이에 대한 안전 대책 또한 국내외적으로 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 수중폭발 충격하중에 대한 승조원 보호관점에서 명시된 해군 규정 및 기준은 많이 부족한 실정이다. 본 장에서는 기존의 관련 자료를 조사, 분석하여 수중폭발 충격하중에 대한 승조원의 상해 발생여부를 판단할 수 있는 방법 및 기준을 정립하였다.

본 연구에서 제시하는 충격하중에 대한 함정 승조원의 상해 평가 기준은 크게 2가지인데, 인체 각 부위에 대한 기준과 함정 내 승조원 거주구역 바닥에서의 충격응답 크기에 대한 기준으로 분류할 수 있다.

3.1 인체 각 부위에 대한 기준

인체 각 부위에 대한 기준은 연구자들에 따라 매우 상이한 기준을 제시하고 있는데, 본 연구에서는 Zong 등[5]가 기존의 연구결과를 토대로 정리한 상해 평가 기준이 함정 수중폭발 충격하중에 대한 기준으로 적합하다고 판단하여 이를 준용하였다. 여기서 정리된 기존의 연구결과는 주로 자동차 충돌시험으로부터 얻은 결과를 정리한 것이다. Table 3.1에는 Zong 등이 정리한 인체 각 부위에 대한 상해 평가 기준을 정리하였다. 2장에서 제시된 비선형 다자유도 인체모델을 기준으로 정리된 것이며, 서있는 자세와 앉아 있는 자세 모두 동일한 기준을 사용하였다. 기준 허용치는 머리를 제외한 부분은 인체가 받는 힘에 대한 기준이고, 머리 부분은 머리의 무게 중심의 가속도 값을 토대로 계산하는 HIC(Head Injury Criteria)값을 기준으로 삼고 있다. HIC의 계산식은 식 (3.1)과 같다.

$$HIC = \left\{ \frac{[\dot{Y}(t_2) - \dot{Y}(t_1)]^{2.5}}{(t_2 - t_1)^{1.5}} \right\} g^{-2.5} \tag{3.1}$$

여기서 t_1과 t_2는 가장 큰 두 값을 가지는 가속도를 가질 때 시간을 나타내며 이때 비상상적으로 높은 HIC값이 계산되는 것을 방지하기 위해 t_1과 t_2의 시간차 15ms를 넘지 않아야 한다.

Table 3.1 Tolerance levels for axial loading of human body

Parts		Threshold Force
Tarsal bones		$11.362T^{-0.152}$ kN
Tibia bones		$45.115T^{-0.257}$ kN
Thigh bones		$43.323T^{-0.315}$ kN
Pelvis		7.6 kN
Spine	Compression	6.0 kN
	Tension	1.45 kN
Viscera		2.6 kN
Head		1,000

* T : Shock Loading Duration (msec)

3.2 승조원 거주구역 바닥에서의 충격응답 크기에 대한 기준

함정 내 승조원 거주구역 바닥에서의 충격응답 크기에 대한 기준은 독일해군의 함정 내충격 강화 사양인 BV043/85[1]에서 규정하고, 독일선급[6]에서 이를 준용하였다. Fig. 3.1에는 거주구역 바닥에서의 충격응답 크기에 대한 기준을 적용 할 수 있는 상해한계선도(injury limit diagram)를 나타내었다. Fig. 3.1에서 볼 수 있듯이 상해한계선도는 수중폭발 충격하중에 의해 승조원 거주구역 바닥에 발생하는 최대속도와 평균가속도의 함수로 주어진다. Fig. 3.2에는 최대속도와 평균가속도의 관계를 도시하였다.

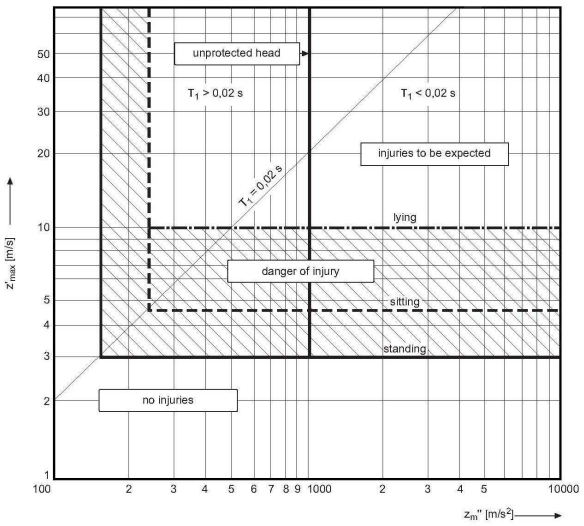


Fig. 3.1 Injury limit diagram of deck motion[6]

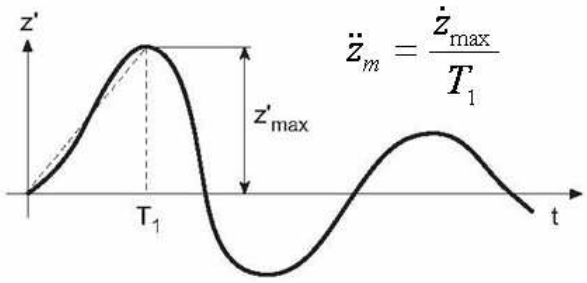


Fig. 3.2 Relation between max velocity and average acceleration[1]

Fig. 3.1에서 보듯이 상해를 입지 않는 경우(no injuries), 상해 위험이 있는 경우(danger of injuries) 및 상해를 입는 경우(injuries)의 3개의 영역으로 구분되어 있다. 또한, 승조원의 자세 즉, 서 있는 자세, 앉아 있는 자세와 누워 있는 자세에 따라 각각 다른 기준을 규정하고 있으며, 직관적으로 알 수 있듯이 누워 있는 자세, 앉아 있는 자세, 서 있는 자세 순으로 더 큰 속도 값을 허용하고 있다. 최대속도 도달시간(T_1)이 짧을수록 최대속도 값이, T_1이 길수록 평균가속도 값이 지배적인 상해 요인으로 작용함을 알 수 있다. 또한, 보호 장비를 착용하지 않은 머리의 상해 발생 기준값(threshold value)으로서 1,000 m/sec^2(약 100g)의 가속도를 명시하고 있다. BV043/85에서는 본 상해한계선도의 적용대상 승조원의 거주구역을 다음과 같이 명시하고 있다.

- Combat Information Center (CIC)
- Navigation Control Rooms
- Combat Control Rooms
- Technical Control Rooms (TCC)
- Accommodation, Galley

한편, 본 상해한계선도에 따른 승조원의 수중폭발 충격하중으로부터의 보호대책의 예를 Fig. 3.3에 도시하였다[11]. 예시에서 볼 수 있듯이 서 있는 자세일 때 승조원 거주구역 바닥에서의 최대속도가 3m/s 이상이면 상해 가능성이 있기 때문에 독일해군의 214급 잠수함의 CIC와 TCC 구역에 대해서는 탄성마운트에 의해 지지된 플랫폼을 설치하여 최대속도가 2.8m/s 이하가 되도록 하였다고 보고되고 있다. 그러나 탄성지지 플랫폼이 없는 경우에는 서 있는 승조원을 보호하기 위해서는 하중이 증가함에 때라 변위가 줄어드는(degressive) 하중-변위 특성을 갖는 탄성마운트를 사용하여 3~10Hz 범위의 1차 고유진동수를 갖는 'Resilient Footing'을 사용할 것을 권고하고 있다. 또한, 앉아 있는 승조원을 보호하기 위해

서는 의자와 갑판 등의 선체구조 사이에 3~10Hz 범위의 1차 고유 진동수를 갖는 완충기(shock absorbers)를 사용하도록 권고하고 있다.

The resiliently mounted platforms in the TCC and CIC of a class 214 submarine reduce the maximal velocity to ≦ 2.8 m/s, see chapter B.1.6. Therefore standing and all the more seated personnel is protected against injuries.

In cases without elastically mounted platforms protective devices can be used::

For standing personnel:

Resilient footing (decks) with the following design features:

- First natural frequency between 3 and 10 Hz
- Resilient mounts with degressive force - deflection characteristic

For sitting personnel:

Shock absorbers with a first natural frequency between 3 and 10 Hz between the seat of the chair and its fixture to the deck, floor or substructure. The following absorbers may be used:

- Steel springs with oil or air dampers
- Leaf springs embedded in plastic damper material
- Devices absorbing the shock energy by plastic deformation (shear pins, yielding elements)

Fig. 3.3 Example of protection measure of crew against UNDEX loadings[11]

4. MIL-S-901D 중중량 충격시험 수치 시뮬레이션

중중량 충격시험은 시험 대상 장비의 중량이 60,000lb까지는 표준 중중량 충격시험기(Standard Floating Shock Platform, SFSP)를 이용하고 400,000lb까지는 대형 중중량 충격시험기(Large Floating Shock Platform, LFSP)을 사용하여 실제 수중폭발 시험을 실시한다. 다음에는 본 연구에서 고려한 SFSP에 대해서 간략히 소개한다. SFSP는 1959년에 미국 NSRDC(Naval Ship Research and Development Center)의 UERD(Underwater Explosions Research Department)에 의해 처음 만들어졌으며 최대 시험 중량은 30,000lb로 설계되었으나 현재의 MIL-S-901D에서는 60,000lb의 탑재장비까지 시험을 할 수 있도록 규정하고 있다. 초기 모델은 길이 22ft에 폭 16ft였으나 현재는 길이 방향만 6ft가 더 늘어난 28ft에 폭 16ft의 SFSP를 사용하고 있다.

SFSP 구조는 선체에 탑재된 장비가 선체로부터 받는 하중조건과 유사하게 만들기 위해 3ft 깊이의 이중저 구조로 되어 있으며 SFSP를 둘러싼 외판은 대부분 1.0in 두께의 고장력강(HY-80)으로 되어있다. 시험 대상 장비가 설치되는 내저판의 선측은 높이 3ft, 폭 0.5ft의 이중 선체이며, 이로 인해 실제 시험 대상 장비의 설치 면적은 길이 26ft에 폭 14ft이다. 높이방향으로는 충격시험 중에 장비 구성품이 이탈하여 물속에 빠지지 않게 하고 각종 기후 조건으로 인한 영향을 줄이기 위하여 캔버스(canvas) 등을 이용하여 반원통형 구조(canopy)로 상부를 막고 있다.

4.1 수치 시뮬레이션 시나리오

MIL-S-901D 중중량 충격시험 수치 시뮬레이션을 통한 상해 평가 기준 사이의 상관성 검토를 위해 2.2절의 등가 유한요소 인체모델이 SFSP의 설치면 중앙에 위치한 경우를 고려하였다. 수치 시뮬레이션을 위한 수중폭발 조건으로 Fig. 4.1에 보인 바와 같이 4가지 경우를 고려하였다. Shot 2, Shot 3 및 Shot 4로 명명된 폭발조건(60lb HBX-1 폭약 사용)은 SFSP를 사용하는 중중량 충격시험을 위해 MIL-S-901D에서 규정하는 조건이며, Shot 5로 명명된 폭발조건은 보다 가혹한 조건을 고려하기 위해 Shot 4의 경우와 폭발 거리는 같고 폭약 중량이 2배가 되도록 임의로 선택하였다.

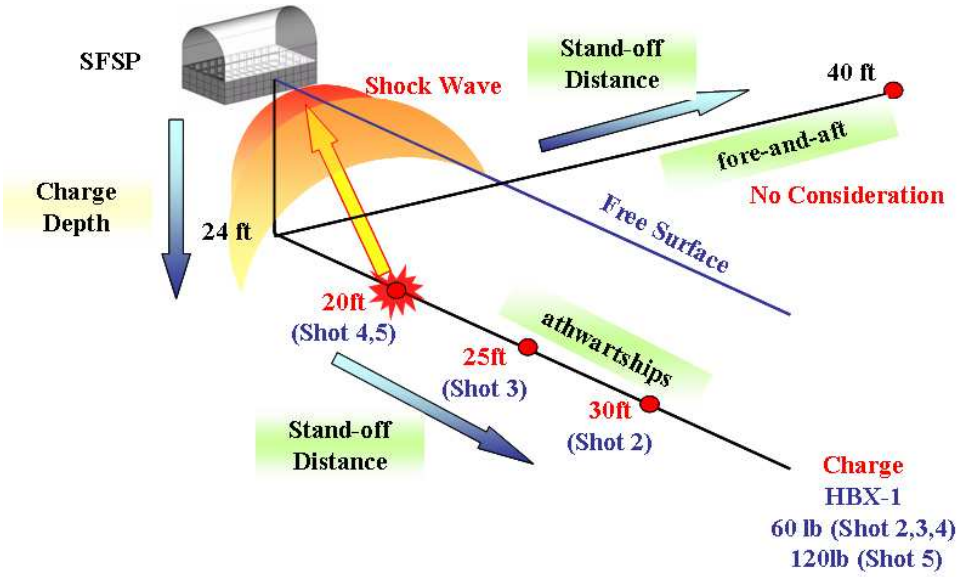


Fig. 4.1 Shot geometry of MIL-S-901D heavy weight shock test

Fig. 4.2에는 LS-DYNA/USA를 이용하여 수치 시뮬레이션을 수행하기 위해 구성한 전체 유한요소 모델을 도시하였다. SFSP와 같은 부유구조물의 수중폭발 충격응답 해석에 있어서는 충격파 전파 시 자유수면과 접수구조표면에 의해 발생하는 인장반사파(rarefaction wave)로 인한 광역캐비테이션(bulk cavitation)과 선각캐비테이션(hull cavitation)의 영향을 반드시 고려하여야 한다[8]. 이를 위해 본 연구에서는 Fig. 4.2에 보인 바와 같이 SFSP 뿐만 아니라 주변 유체를 포함하여 3차원 유한요소 모델링을 하였다. SFSP와 주변 유체의 3차원 유한요소 모델은 총 70,413개의 절점을 이용하여, SFSP 모델링을 위한 판 요소 10,784개, 주변유체 모델링을 위해 음향체적요소(acoustic volume element) 57,844개, 그리고 유체 모델링에서 제외된 기타 유체영역의 영향을 고려하기 위한 DAA 경계요소(doubly asymptotic approximation boundary element) 5,696개로 구성하였다.

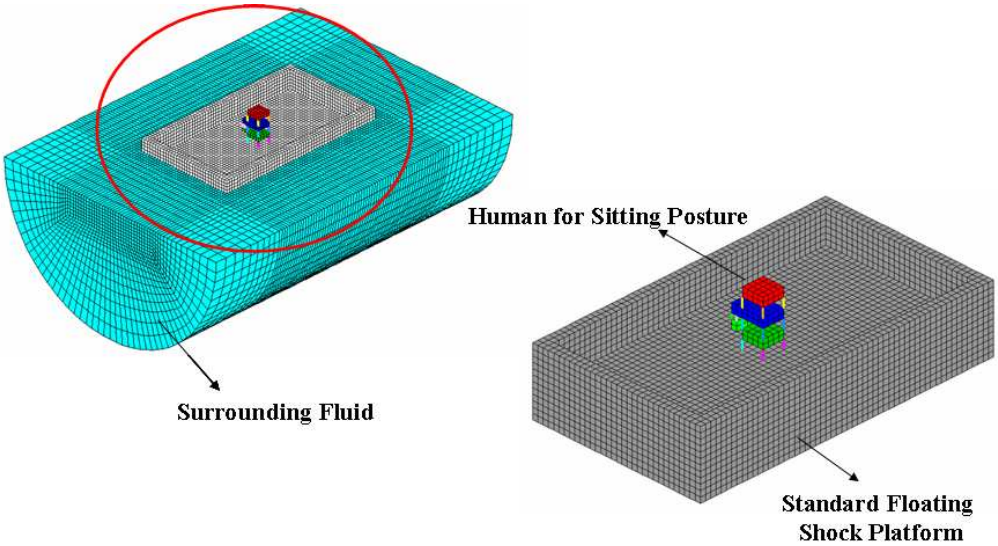
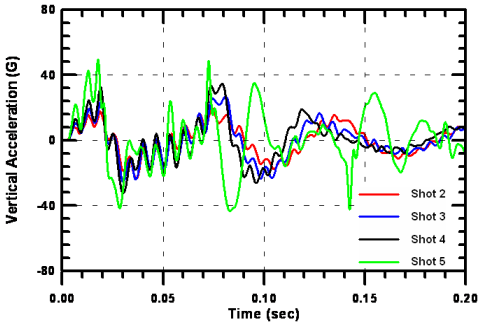


Fig. 4.2 Finite element model of biodynamic model, SFSP and surrounding water

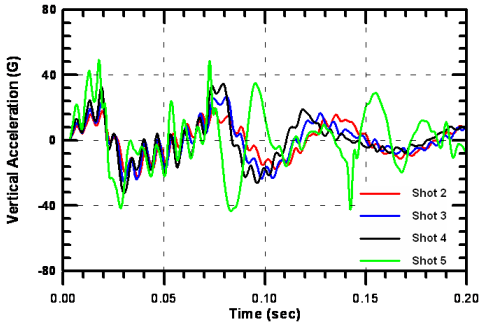
4.2 인체모델 충격응답 해석 결과 및 상관성 검토

Figs. 4.3 및 4.4는 서 있는 자세에 대한 각각 수직방향 가속도와 인체 각 부위의 상대변위를, Figs. 4.5 및 4.6은 앉아 있는 자세에 대한 각각 가속도와 상대변위를 보여주고 있다. 결과 그래프에서 볼 수 있듯이 인체 각 부위별로 다른 응답을 보여주고 있다. 하지만 모든 인체 부위에서 가장 가혹한 폭발조건인 Shot 5의 응답이 다른 폭발조건의 응답에 비해 크다는 것을 알 수 있다.

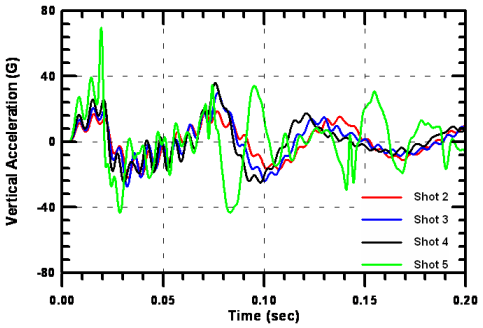
Table 4.1 및 Table 4.2에는 각각 서 있는 자세와 앉아 있는 자세에 대해 인체모델 각 부위에 작용하는 충격응답 계산치를 보여주고 있다 상해 평가를 위해 Table 3.1의 인체 각 부위에 대한 허용치(threshold)를 같이 나타내었다. 이들 표에서 보듯이 서 있는 자세일 때에는 모든 수중폭발 조건에서 척추 부위에 손상, Shot 5의 수중 폭발 조건에서 골반 부위에 손상이 발생하며, 앉아 있는 자세의 경우에는 Shot 5의 수중폭발 조건에서 척추 부위에 상해가 발생함을 알 수 있다.



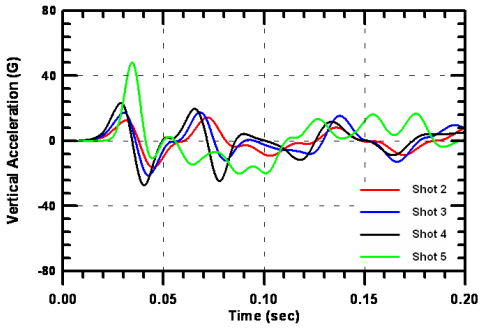
(a) body 1 (Tarsal bones)



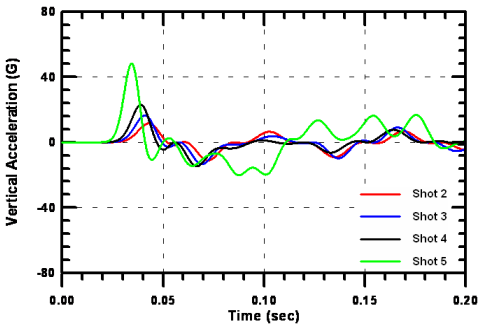
(b) body 2 (Tibia bones)



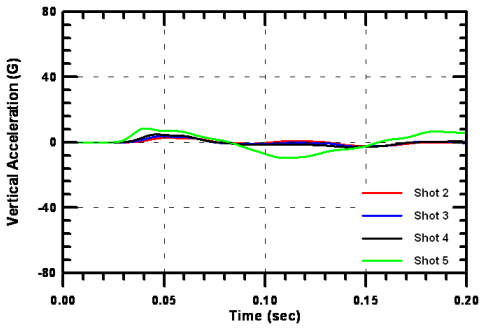
(c) body 3 (Thigh bones)



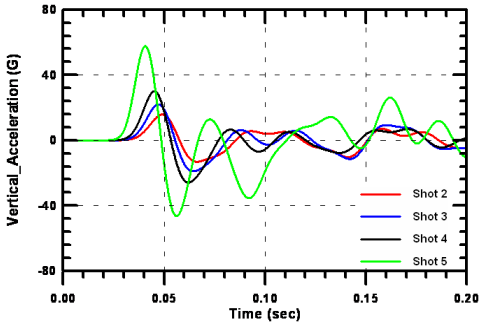
(d) body 4 (Pelvis)



(e) body 5 (Spine)

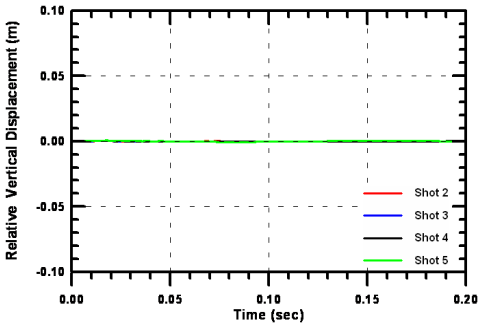


(f) body 6 (Viscera)

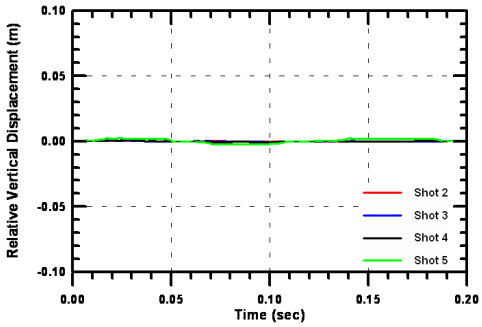


(g) body 7 (Head)

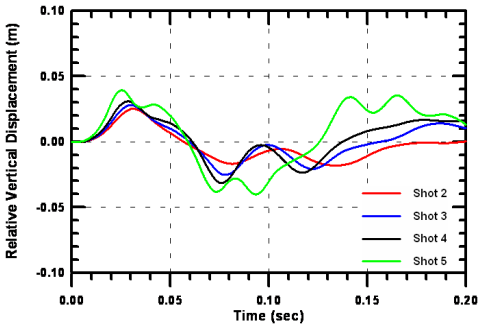
Fig. 4.3 Vertical acceleration of biodynamic standing postured model



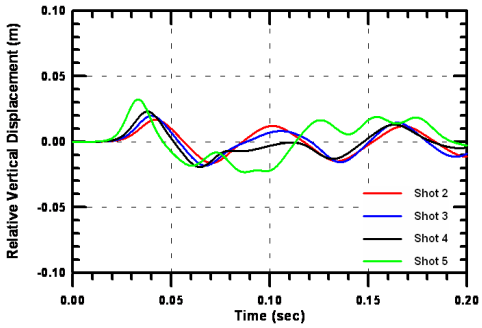
(a) δ2 (Tarsal bones - Tibia bones)



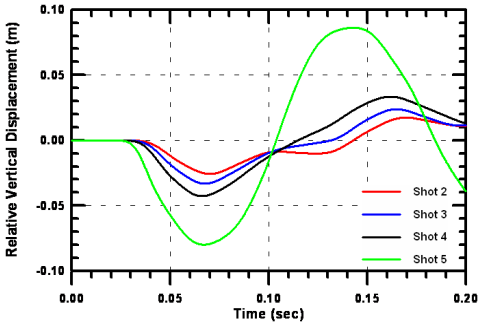
(b) δ3 (Tibia bones - Thigh bones)



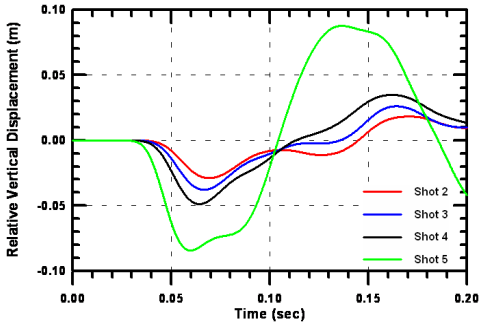
(c) δ4 (Thigh bones - Pelvis)



(d) δ5 (Pelvis - Spine)

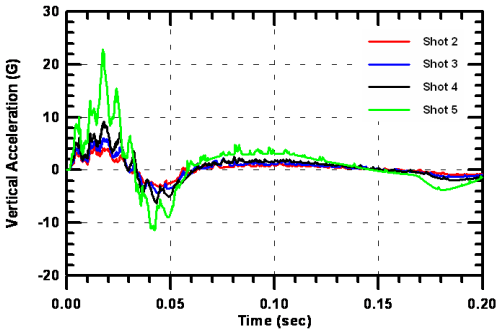


(e) δ6 (Spine - Viscera)

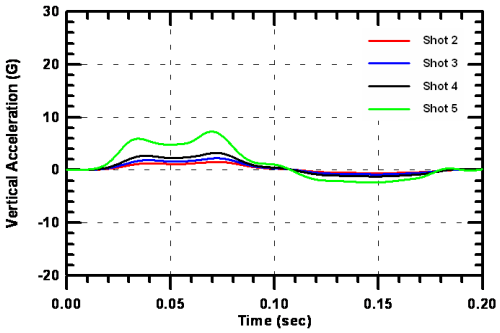


(f) δ7 (Spine - Head)

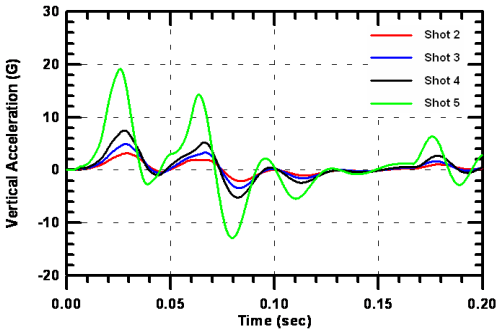
Fig. 4.4 Relative vertical displacement of biodynamic standing postured model



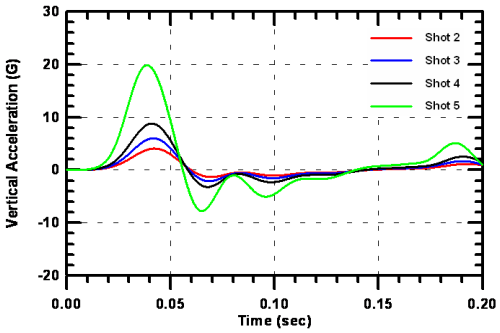
(a) body 1 (pelvis)



(b) body 2 (viscera)

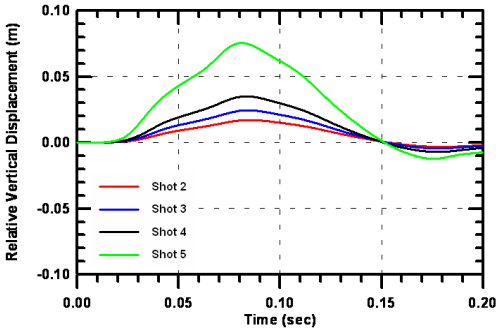


(c) body 3 (upper torso)

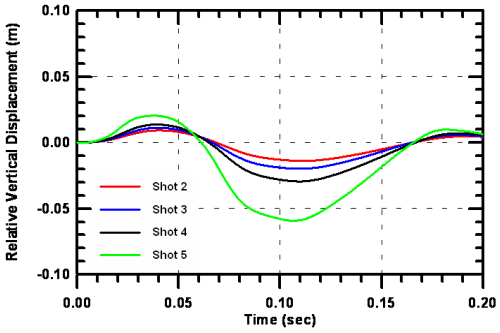


(b) body 4 (head)

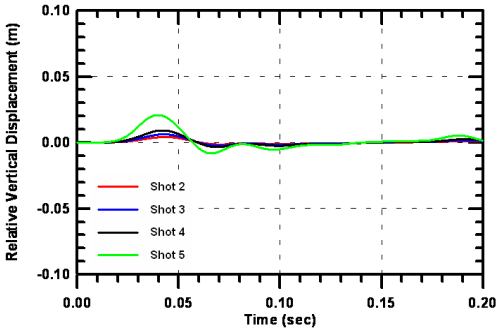
Fig. 4.5 Vertical acceleration of biodynamic sitting postured model



(a) δ2 (Upper torso - Viscera)



(b) δ3 (Pelvis-Upper torso)



(c) δ4 (Upper torso-Head)

Fig. 4.6 Relative vertical displacement of biodynamic sitting postured model

Table 4.1 Comparison of tolerance levels for each component of standing postured body(MIL-S-901D)

Parts			Shot2	Shot3	Shot4	Shot5
Tarsal bones (kN)		Threshold	6.25	6.18	6.04	5.74
		Calculation	0.58	0.68	0.90	1.35
Tibia bones (kN)		Threshold	16.42	16.11	15.49	14.23
		Calculation	1.46	1.74	2.25	3.22
Thigh bones (kN)		Threshold	11.56	12.26	11.69	10.54
		Calculation	1.82	2.45	2.94	5.73
Pelvis (kN)		Threshold	7.60			
		Calculation	2.85	3.73	4.82	9.04
Spine	Compression (kN)	Threshold	6			
		Calculation	2.47	3.52	4.91	10.31
	Tension (kN)	Threshold	1.45			
		Calculation	2.36	2.87	3.13	4.28
Viscera (kN)		Threshold	2.6			
		Calculation	0.18	0.25	0.32	0.57
Head (HIC)		Threshold	1000			
		Calculation	6.46	15.66	21.44	133.23

Table 4.2 Comparison of tolerance levels for each component of sitting postured body(MIL-S-901D)

Parts			Shot2	Shot3	Shot4	Shot5
Pelvis (kN)		Threshold	7.60			
		Calculation	1.25	1.71	2.62	6.51
Spine	Compression (kN)	Threshold	6			
		Calculation	0.68	1.05	1.61	4.09
	Tension (kN)	Threshold	1.45			
		Calculation	0.45	0.73	1.12	2.76
Viscera (kN)		Threshold	2.6			
		Calculation	0.22	0.15	0.22	1.07
Head (HIC)		Threshold	1000			
		Calculation	0.32	0.87	2.37	19.94

한편, BV043/85의 상해한계선도를 이용하여 손상발생 여부를 검토하기 위해 Fig. 4.7에서 보인 바와 같이 SFSP 설치면 상의 9개 위치에서 계산된 최대속도 및 최대속도에 도달하는 시간을 평균하여 각각의 수중폭발 조건에 대한 최대속도, 최대속도에 도달하는 시간 및 평균가속도를 Table 4.3처럼 계산하였다. 이렇게 계산된 각각의 수중폭발 조건에 대한 최대속도, 최대속도에 도달하는 시간 및 평균가속도 값을 Fig. 4.8에 보인 바와 같이 BV043/85의 상해한계선도 상에 표시(marking)하였다. Fig. 4.8에서 보듯이 서 있는 자세일 때에는 Shot 2의 수중폭발 조건을 제외한 모든 경우에 상해 가능성이 있고, 앉아 있는 자세의 경우에는 Shot 5의 수중폭발 조건에서 상해 가능성이 있음을 알 수 있었다.

이상에서 알 수 있는 바와 같이 MIL-S-901D 중중량 충격시험 수치 시뮬레이션을 통하여 3장의 2가지 상해 평가 기준 사이에는 매우 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다.

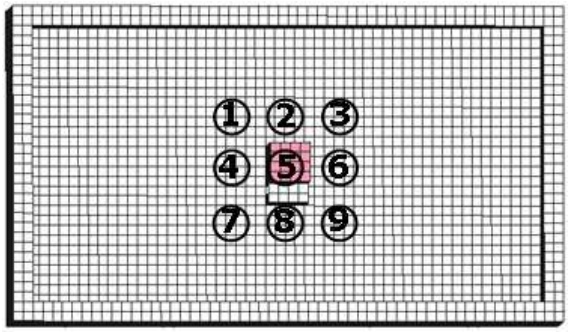


Fig. 4.7 Data acquisition locations at base of SFSP

Table 4.3 Max vertical velocity ,time and average acceleration at base of SFSP

		Shot2	Shot3	Shot4	Shot5
Location 1	Z'_{max} (m/s)	1.96	2.33	2.79	4.18
	T_1(sec)	0.0082	0.0081	0.008	0.0081
Location 2	Z'_{max} (m/s)	2.24	2.71	3.32	5.14
	T_1(sec)	0.0083	0.0082	0.0081	0.0081
Location 3	Z'_{max} (m/s)	1.96	2.33	2.79	4.18
	T_1(sec)	0.0082	0.0081	0.008	0.0081
Location 4	Z'_{max} (m/s)	2.50	2.92	3.47	5.11
	T_1(sec)	0.0045	0.0044	0.0044	0.0044
Location 5	Z'_{max} (m/s)	2.60	2.99	3.47	5.18
	T_1(sec)	0.0046	0.0046	0.0046	0.0047
Location 6	Z'_{max} (m/s)	2.84	3.28	3.73	5.62
	T_1(sec)	0.0045	0.0045	0.0043	0.0047
Location 7	Z'_{max} (m/s)	2.69	2.99	3.47	5.18
	T_1(sec)	0.0044	0.0046	0.0044	0.0047
Location 8	Z'_{max} (m/s)	2.50	3.15	3.79	5.47
	T_1(sec)	0.0045	0.0044	0.0046	0.0043
Location 9	Z'_{max} (m/s)	2.60	2.92	3.47	5.11
	T_1(sec)	0.0046	0.0044	0.0046	0.0044
Average	Z'_{max} (m/s)	2.43	2.85	3.37	5.02
	T_1(sec)	0.0058	0.0057	0.0057	0.0057
	Z''_{max} (m/s^2)	422.66	499.35	594.41	877.40

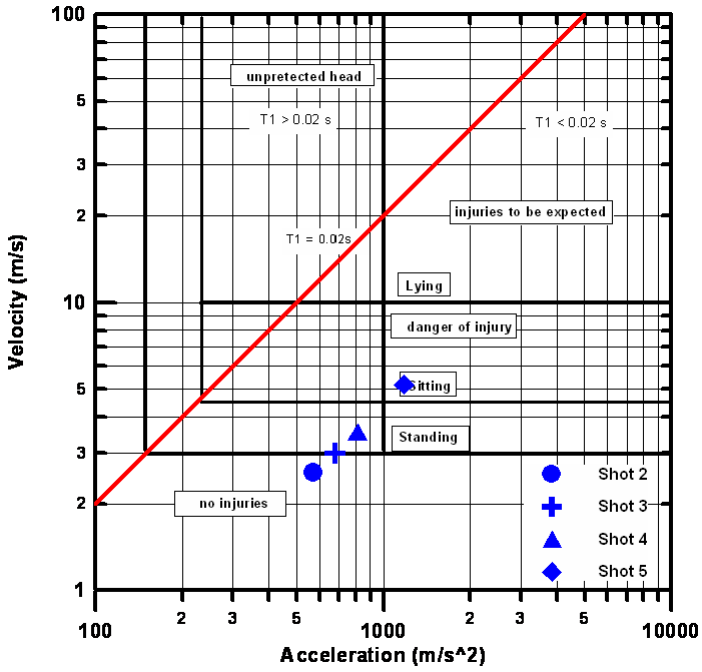


Fig. 4.8 Comparison of response results with injury limit of a deck motion (MIL-S-901D)

5. *BV043/85* 내충격 강화기준 충격하중에 대한 충격응답 해석

독일해군의 탑재장비 및 받침대에 대한 내충격 강화 사양인 BV043/85에서는 함정의 종류, 배수량, 장비의 설치 위치와 충격하중 방향에 따라서 서로 다른 내충격 설계 기준 충격응답 스펙트럼 값을 규정하고 있다. 함정의 종류는 크게 수상함과 잠수함으로 구분되어 있고, 배수량은 1,000톤 이하, 2,000톤 이상인 경우, 그리고 이 사이의 배수량을 갖는 경우 함정에 대해서는 선형 삽간법(interpolation)을 사용하여 해당 충격응답 스펙트럼 값을 결정한다. 여기서 배수량 값으로 수상함의 경우는 전투 배수량, 잠수함의 경우에는 설계 배수량을 사용한다.

장비 및 받침대의 함정 내 설치위치(mounting location)는 수상함은 Ⅰ, Ⅱ 및 Ⅲ으로, 잠수함은 외부(exterior) 및 내부(interior) 위치로 구분하고 있다. Fig. 5.1에서 보듯이 수상함의 설치위치 Ⅰ은 미국해군의 선체설치(hull mounted)에, Ⅱ 및 Ⅲ은 미국해군의 갑판설치(deck mounted)에 해당되며, 잠수함은 압력선체 외부 또는 내부에 설치되는가에 따라 구분된다. 충격하중 방향은 수상함은 상하 및 횡 방향으로, 잠수함은 상하, 횡 및 종 방향으로 구분하고 있다.

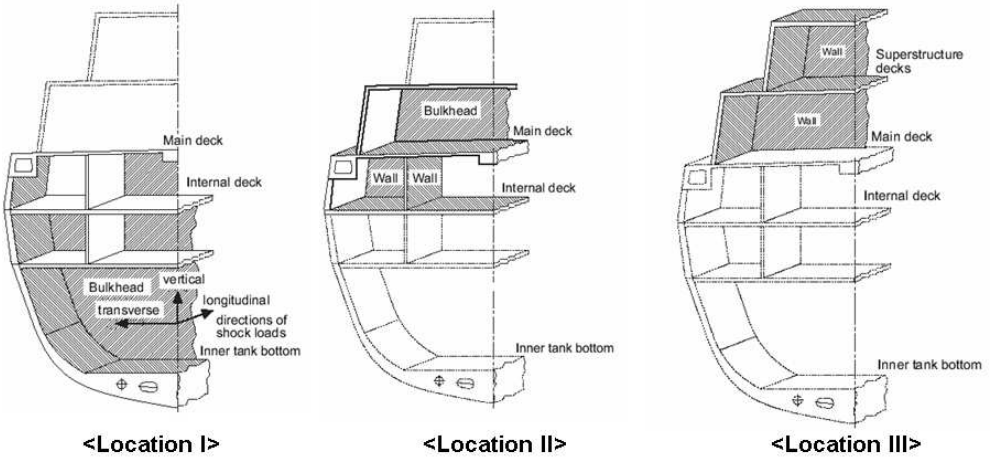


Fig. 5.1 Mounted Location of onboard equipment (surface ship)

5.1 응답해석의 시나리오

독일해군도 미국해군과 마찬가지로 시험이 가능한 경우에는 원칙적으로 충격시험을 통해서 대상 장비의 내충격 성능을 검증할 것을 요구하고 있으며, 시험이 불가능한 경우(장비의 중량이나 제원이 충격시험기의 용량을 초과하는 경우)에는 해석적인 방법으로 이를 검증할 것을 요구하고 있다. 독일해군의 경우에는 시험과 해석을 위한 내충격 설계 기준 충격응답 스펙트럼 값이 동일하며, 대상 장비의 중량이 5톤 이상이면 Table 5.1에 나타나있는 수상함 탑재장비에 대한 내충격 설계 기준 충격응답 스펙트럼 값보다는 작은 값을 사용하도록 이에 대한 보정식(equation of correction)을 아래와 같이 제시하고 있다.

- 가속도 보정계수 : $(\frac{M_t}{M_0})^{-.537}$
- 속도 보정계수 : $(\frac{M_t}{M_0})^{-.402}$
- 변위 보정계수 : $(\frac{M_t}{M_0})^{-.231}$

여기서 M_t : 대상 장비의 중량, M_0 = 5 ton

Table 5.1 Required shock response spectrum in BV043/85

Diagram	Type of Ship	Direction of Shock	Mounting Location	d_{srs} [mm]	v_{srs} [m/s]	a_{srs} [m/s^2]
1	Surface Ship >2,000t	Vertical	I II III	45 45 55	7.00 6.00 5.00	2,820 1,400 850
2	Surface Ship >2,000t	Transverse	I II III	30 20 50	6.00 3.00 5.00	2,500 850 500
3	Minesweeper	Vertical	I and II III	45 35	7.00 3.90	2,820 1,300
4	Minesweeper	Transverse	I II III	45 45 45	6.00 5.00 4.00	2,500 1,700 850
5	Surface Ship <1,000t Auxiliary	Vertical	I II and III	35 35	3.90 3.90	1,830 850
6	Surface Ship <1,000t Auxiliary	Transverse	I II	15 25	3.00 1.75	1,400 500

상기 방법에 따라 대상 장비의 내충격 설계 기준 충격응답스펙트럼이 결정되면, 이들 값을 이용하여 Fig. 5.2와 같이 대상 장비에 작용하는 충격가속도의 시간이력(time history)을 이중 삼각형 펄스(double triangular pulse) 또는 이중 반정현 펄스(double half-sine pulse)로 변환하여 이에 대한 시간영역에서의 충격응답 해석을 수행하도록 규정하고 있다. 식 5.1~5.5는 내충격 설계 기준 충격응답스펙트럼 값을 이용하여 이중 반정현 가속도 펄스로 변환하는 식을 나타낸 것이다.

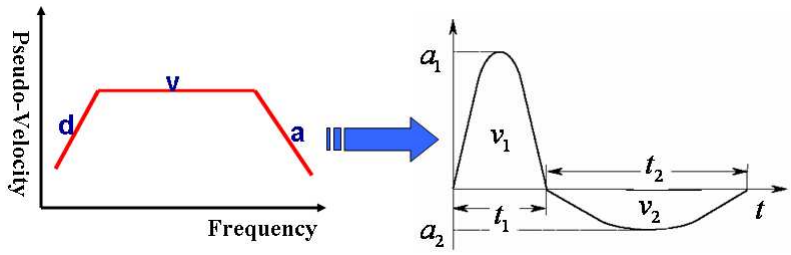


Fig. 5.2 Conversion of frequency domain data into time domain one using shock response spectrum in BV043/85

$$a_1 = \frac{a}{2} \tag{5.1}$$

$$t_1 = \frac{-\pi v_1}{2a_1} \tag{5.2}$$

$$v_1 = \frac{2v}{3} = v_2 \tag{5.3}$$

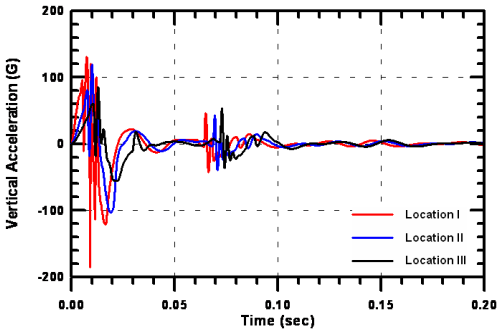
$$a_2 = \frac{-\pi v_1}{2t_2} \tag{5.4}$$

$$t_2 = \frac{2d}{v_1} - t_1 \tag{5.5}$$

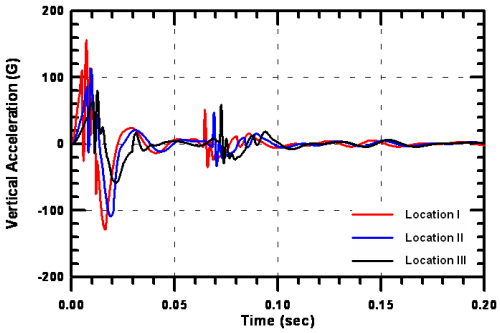
충격응답 해석을 위한 수중폭발 조건으로 Table 5.1에 나타나있는 조건 중, 수상함의 배수량 1,000톤 이하와 2,000톤 이상일 경우에서의 수직 충격하중의 5가지 경우에 대해서 LS-DYNA3D를 사용하여 서 있는 자세와 앉아있는 자세의 인체모델의 충격응답 해석을 수행하였다.

5.2 인체모델 충격응답 해석 결과 및 상관성 검토

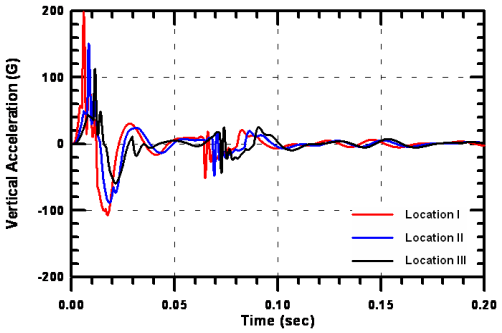
Figs. 5.3 및 5.4는 배수량 2,000톤 이상(Diagram 1의 Location Ⅰ, Ⅱ 및 Ⅲ)에서의 서 있는 자세에 대한 각각 수직방향 가속도와 인체 각 부위의 상대변위를, Figs. 5.5 및 5.6은 배수량 1,000톤 이하(Diagram 5의 Location Ⅰ 및 Ⅱ and Ⅲ)에서의 서 있는 자세에 대한 각각 수직방향 가속도와 인체 각 부위의 상대변위를 보여주고 있다. 그리고 Figs. 5.7 및 5.8은 배수량 2,000톤 이상에서의 앉아있는 자세에 대한 각각 수직방향 가속도와 인체 각 부위의 상대변위를, Figs. 5.9 및 5.10은 배수량 1,000톤 이하에서의 앉아있는 자세에 대한 각각 수직방향 가속도와 인체 각 부위의 상대변위를 보여주고 있다. 결과 그래프에서 볼 수 있듯이 인체 각 부위별로 다른 응답을 보여주고 있는데, 수상함의 배수량 2,000톤 이상일 때의 응답이 크다는 것을 확인 할 수 있다.



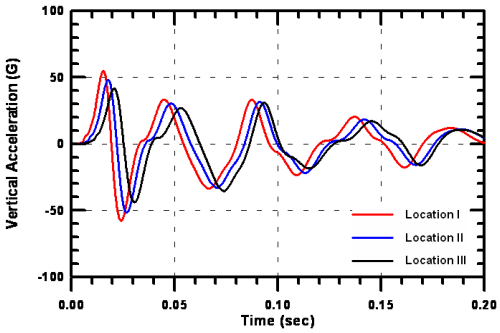
(a) body 1 (Tarsal bones)



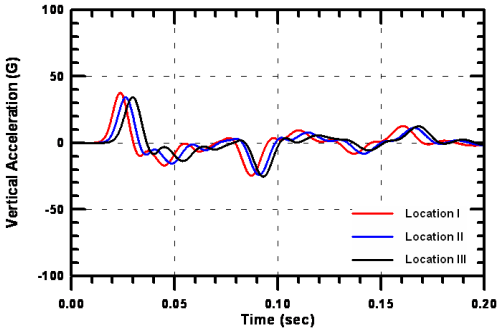
(b) body 2 (Tibia bones)



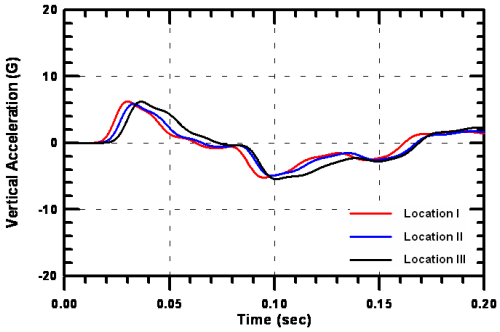
(c) body 3 (Thigh bones)



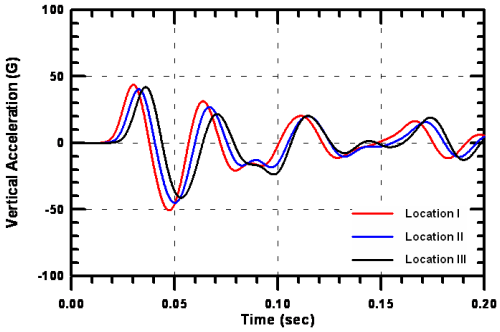
(d) body 4 (Pelvis)



(e) body 5 (Spine)

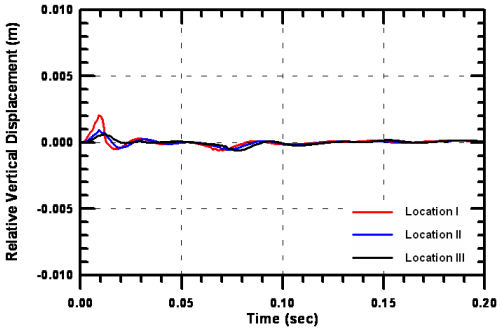


(f) body 6 (Viscera)

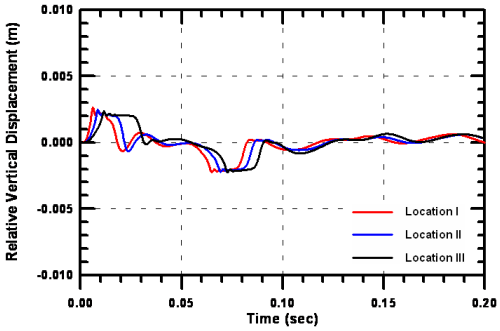


(g) body 7 (Head)

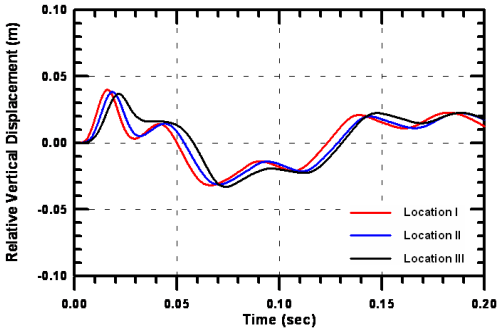
Fig. 5.3 Vertical acceleration of biodynamic standing postured model (surface ship > 2,000t)



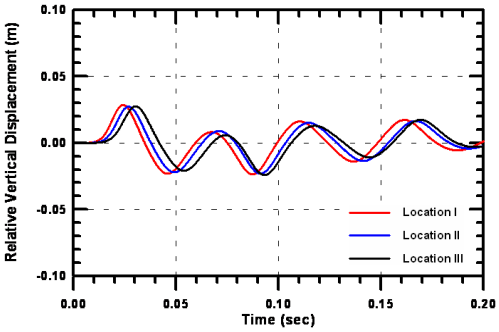
(a) δ2 (Tarsal bones - Tibia bones)



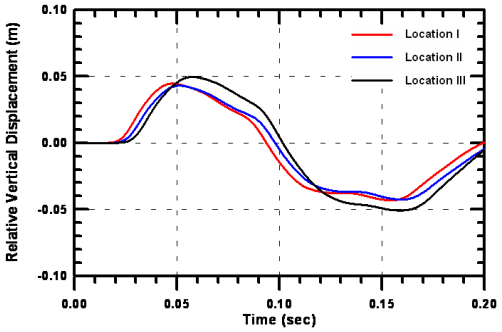
(b) δ3 (Tibia bones - Thigh bones)



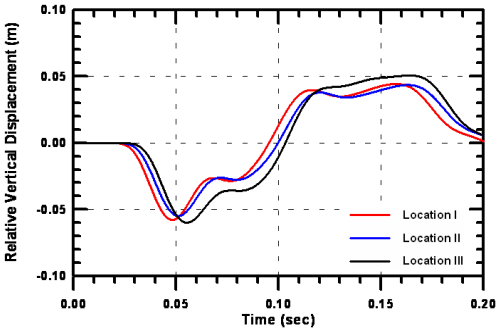
(c) δ4 (Thigh bones - Pelvis)



(d) δ5 (Pelvis - Spine)

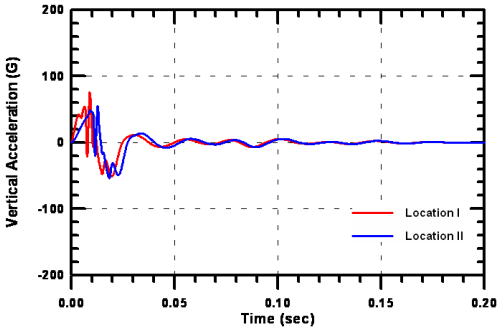


(e) δ6 (Spine - Viscera)

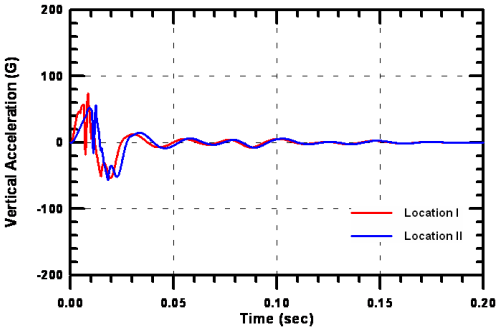


(f) δ7 (Spine - Head)

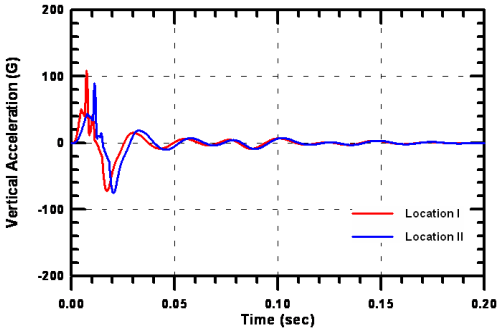
Fig. 5.4 Relative vertical displacement of biodynamic standing postured model (surface ship > 2,000t)



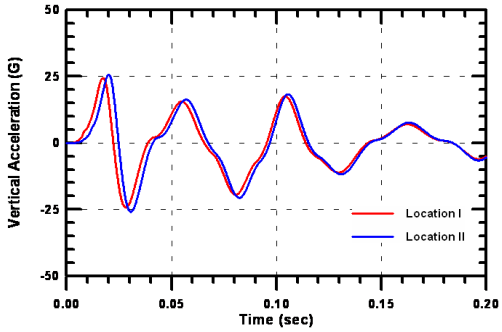
(a) body 1 (Tarsal bones)



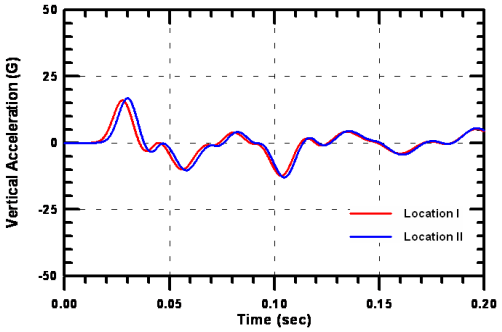
(b) body 2 (Tibia bones)



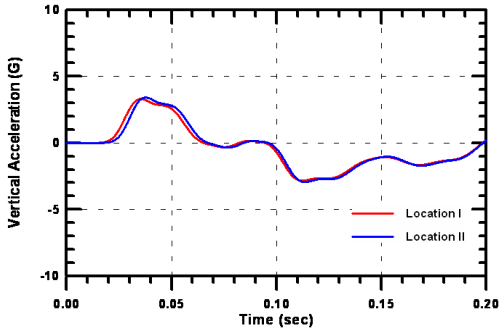
(c) body 3 (Thigh bones)



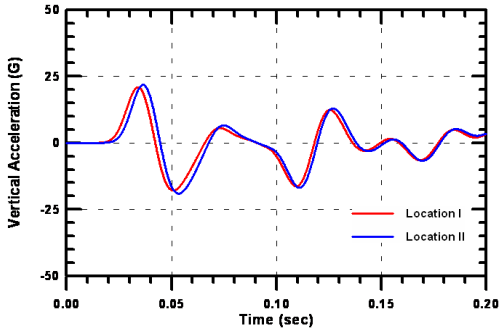
(d) body 4 (Pelvis)



(e) body 5 (Spine)

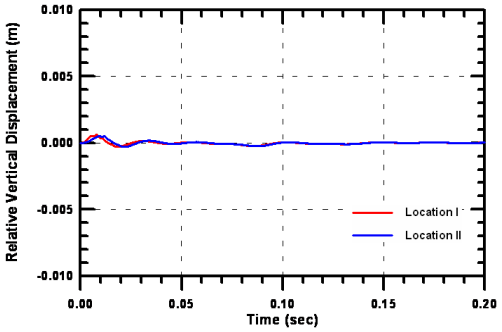


(f) body 6 (Viscera)

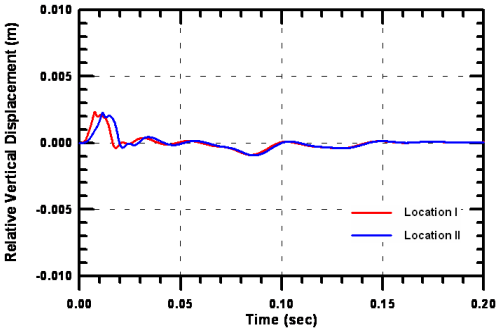


(g) body 7 (Head)

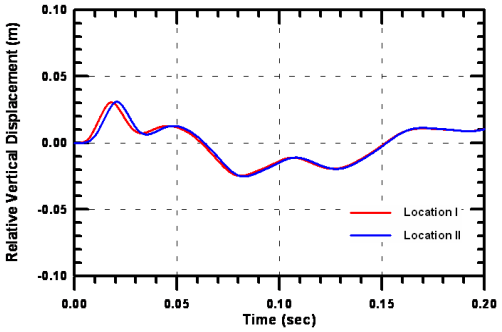
Fig. 5.5 Vertical acceleration of biodynamic standing postured model (surface ship < 1,000t)



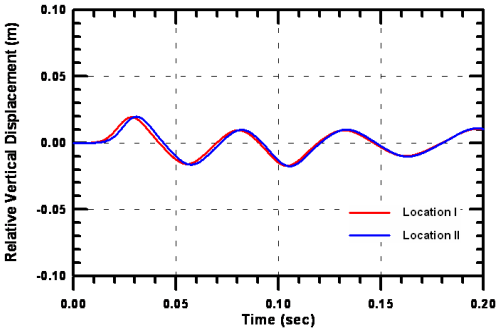
(a) δ2 (Tarsal bones - Tibia bones)



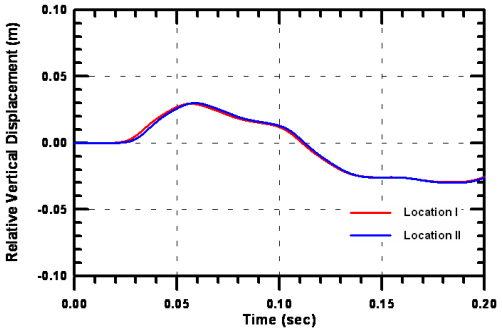
(b) δ3 (Tibia bones - Thigh bones)



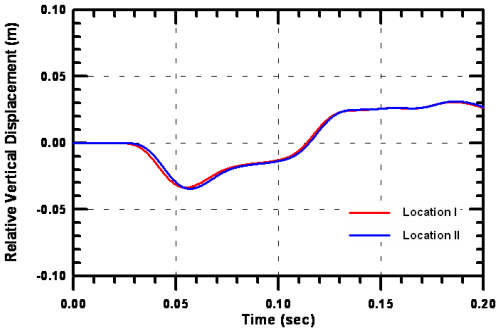
(c) δ4 (Thigh bones - Pelvis)



(d) δ5 (Pelvis - Spine)

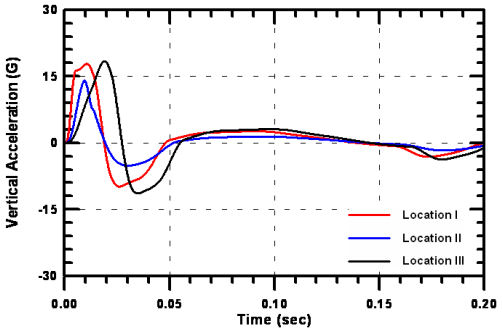


(e) δ6 (Spine - Viscera)

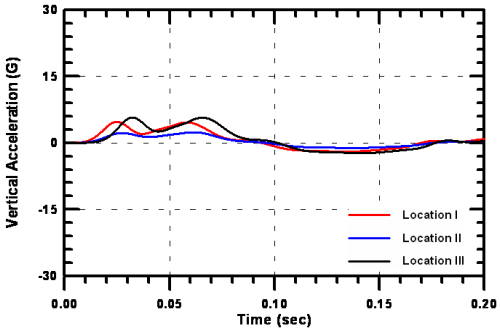


(f) δ7 (Spine - Head)

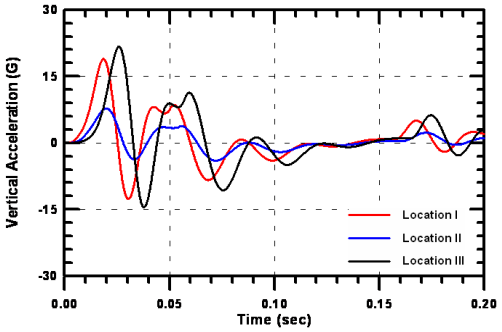
Fig. 5.6 Relative vertical displacement of biodynamic standing postured model (surface ship < 1,000t)



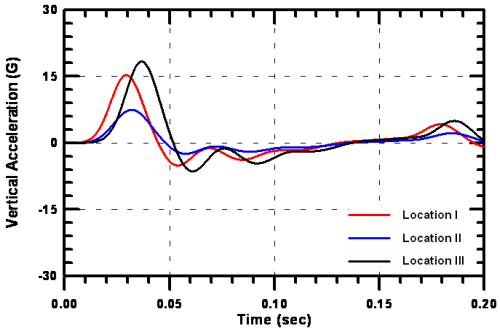
(a) body 1 (pelvis)



(b) body 2 (viscera)

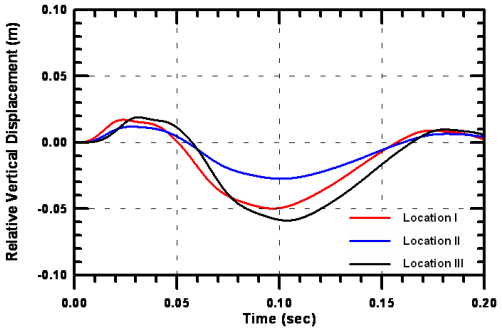


(c) body 3 (upper torso)

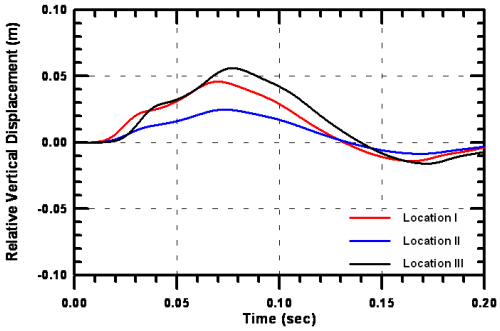


(b) body 4 (head)

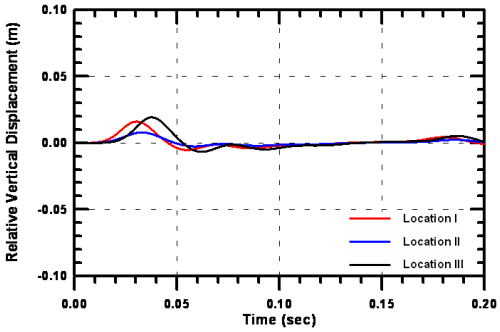
Fig. 5.7 Vertical acceleration of biodynamic sitting postured model (surface ship > 2,000t)



(a) δ2 (Upper torso - Viscera)

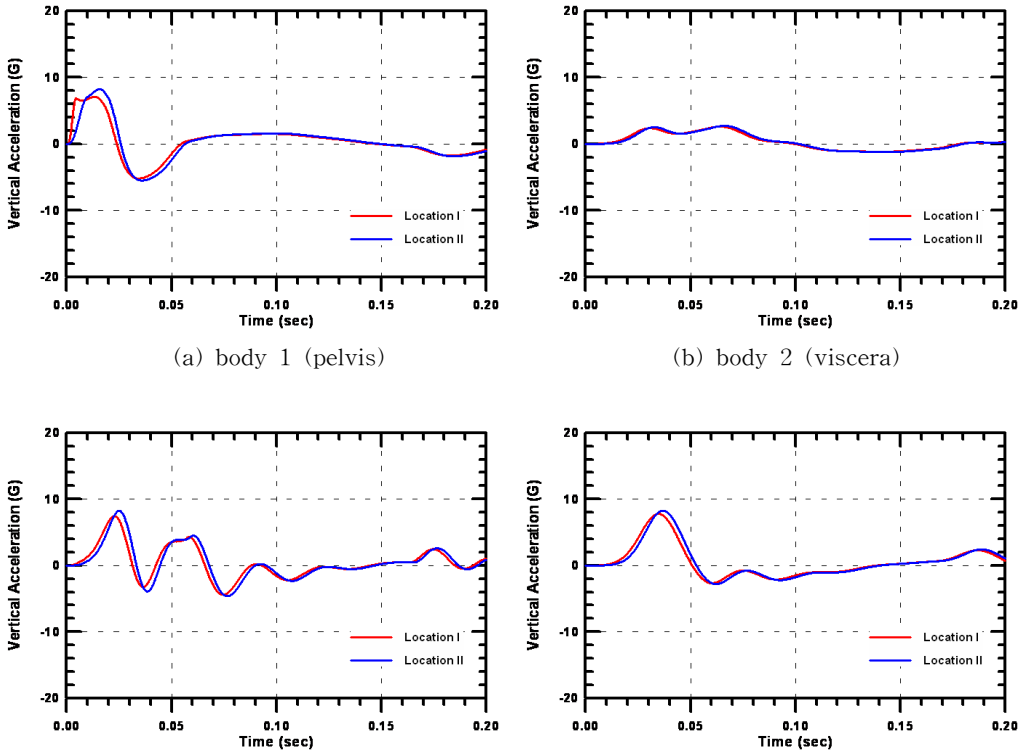


(b) δ3 (Pelvis-Upper torso)



(c) δ4 (Upper torso-Head)

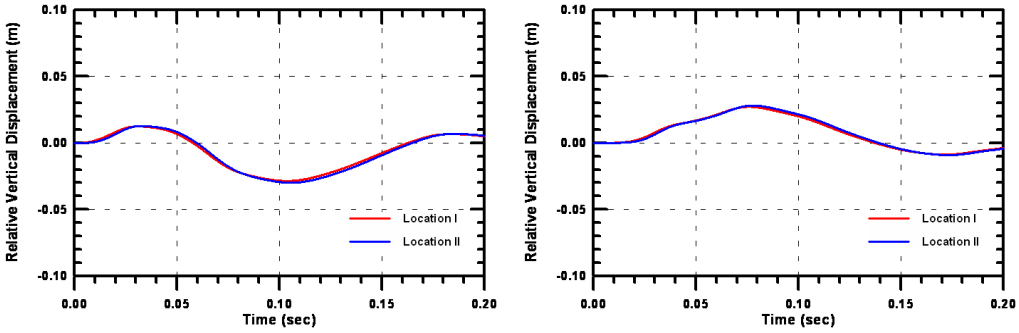
Fig. 5.8 Relative vertical displacement of biodynamic sitting postured model (surface ship > 2,000t)



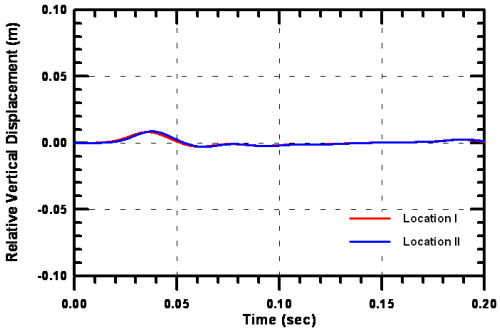
(a) body 1 (pelvis) (b) body 2 (viscera)

(c) body 3 (upper torso) (b) body 4 (head)

Fig. 5.9 Vertical acceleration of biodynamic sitting postured model (surface ship < 1,000t)



(a) δ2 (Upper torso - Viscera)　　(b) δ3 (Pelvis-Upper torso)



(c) δ4 (Upper torso-Head)

Fig. 5.10 Relative vertical displacement of biodynamic sitting postured model (surface ship < 1,000t)

충격응답 해석 결과를 인체 상해 평가 기준에 적용하기 위해 Fig. 5.2와 식 (5.1)~(5.5)에 제시된 방법에 따라 계산된 이중 반정현 가속도 펄스를 지지부에 충격가속도로 가하여 각각 서 있는 자세와 앉아 있는 자세의 인체모델 각 부위에 작용하는 충격응답 계산치를 Table 5.2 및 Table 5.3에 정리하였다. 상해 평가를 위해 Table 3.1의 인체 각 부위에 대한 허용치(threshold)를 같이 나타내었다. 이들 표에서 보듯이 서 있는 경우에는 배수량 2,000톤 이상 함정의 탑재장비 설치위치 Ⅰ 및 Ⅱ의 내충격 강화 기준 충격하중에 대해서는 골반 부위에 손상이, 배수량 2,000톤 이상 함정의 모든 탑재장비 설치위치의 내충격 강화 기준에 대해서는 척추 부위에 손상이 발생함을 알 수 있고, 앉아 있는 자세의 경우에는 상해 발생 가능성이 없음을 알 수 있었다.

Table 5.2 Comparison of tolerance levels for each component of human body (BV043/85 standing posture)

Parts			Surface Ship > 2,000t			Surface Ship < 1,000t	
			Lo. Ⅰ	Lo. Ⅱ	Lo. Ⅲ	Lo. Ⅰ	Lo. Ⅱ
Tarsal bones (kN)		Threshold	7.25	7.08	6.68	6.89	6.89
		Calculation	2.70	2.71	1.85	1.53	1.10
Tibia bones (kN)		Threshold	21.09	20.27	18.37	19.35	19.35
		Calculation	10.43	7.21	4.93	4.47	3.30
Thigh bones (kN)		Threshold	17.06	16.25	14.40	15.35	15.35
		Calculation	15.84	11.62	8.29	8.20	6.37
Pelvis (kN)		Threshold	7.60				
		Calculation	9.79	8.69	7.41	4.29	4.56
Spine	Compression (kN)	Threshold	6.00				
		Calculation	8.14	7.49	7.51	4.29	4.56
	Tension (kN)	Threshold	1.45				
		Calculation	2.77	2.51	2.30	0.98	1.06
Viscera (kN)		Threshold	0.96				
		Calculation	0.42	0.39	0.41	0.22	0.23
Head (HIC)		Threshold	1000				
		Calculation	75.14	88.08	84.43	12.15	13.24

Table 5.3 Comparison of tolerance levels for each component of human body (BV043/85 sitting posture)

Parts			Surface Ship > 2,000t			Surface Ship < 1,000t	
			Lo. Ⅰ	Lo. Ⅱ	Lo. Ⅲ	Lo. Ⅰ	Lo. Ⅱ
Pelvis (kN)		Threshold	7.60				
		Calculation	7.37	6.96	6.99	3.04	3.40
Spine	Compression (kN)	Threshold	6.00				
		Calculation	3.49	3.43	4.65	1.67	1.75
	Tension (kN)	Threshold	1.45				
		Calculation	0.33	0.31	0.55	0.21	0.23
Viscera (kN)		Threshold	2.60				
		Calculation	0.27	0.27	0.35	0.17	0.16
Head (HIC)		Threshold	1000				
		Calculation	9.50	9.20	27.43	2.25	3.51

한편, BV043/85의 상해한계선도를 이용하여 손상발생 여부를 검토하기 위해 다음과 같이 식 (5.6)~(5.8)의 계산식을 적용하여 승조원 거주구역 바닥에서의 최대속도, 최대속도에 도달하는 시간 및 평균가속도 값을 구하여 Fig. 5.11에 보인 바와 같이 BV043/85의 상해한계선도 상에 표시(marking)하였다.

$$z'_{\max} = 2\frac{v_{srs}}{3} \qquad (5.6)$$

$$z''_{m} = \frac{a_{srs}}{2} \qquad (5.7)$$

$$T_1 = 4\frac{v_{srs}}{3a_{srs}} \qquad (5.8)$$

$z'_{\max}$ = maximum vertical velocity of deck [m/s]

z''_{m} = average vertical acceleration of deck [m/s^2] = $z'_{\max}/T_1$

v_{srs} = "pseudo-velocity" according to shock response spectrum (SRS)

a_{srs} = acceleration according to shock response spectrum (SRS)

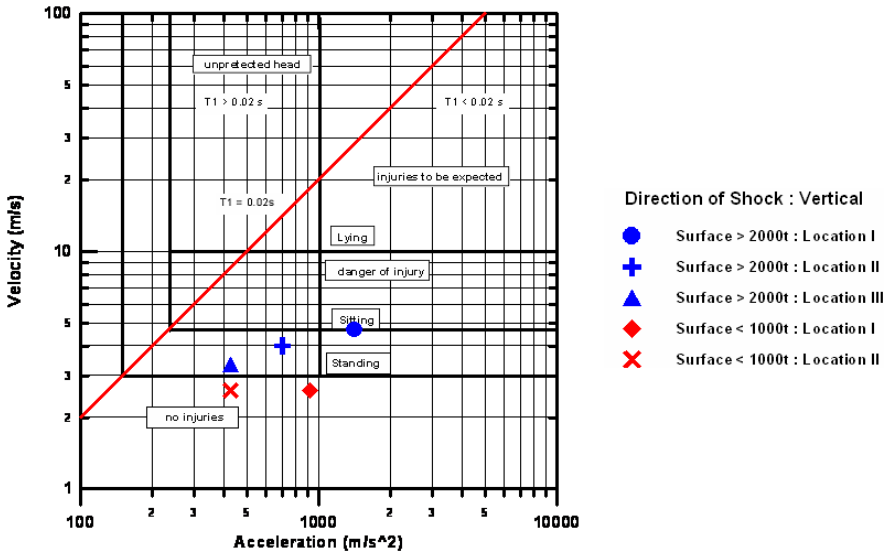


Fig. 5.11 Comparison of response results with injury limit of a deck motion (BV043/85)

Fig. 5.11에서와 같이 서 있는 자세일 때는 수상함의 배수량 2,000톤 이상일 때 모든 탑재위치가 부상의 위험이 있음을 알 수 있고, 앉아 있는 자세일 때에는 상해발생 가능성이 없음을 알 수 있었다. 이 경우에도 BV043/85 내충격 강화기준 충격하중에 대한 충격응답 해석을 통하여 3장의 2가지 상해 평가 기준 사이에 매우 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 수중폭발 충격하중에 대한 승조원의 상해 평가 기준의 정립을 위해 일련의 수치해석과 시뮬레이션을 수행하여 충격하중에 대한 함정 승조원의 상해 평가 기준인 인체모델의 각 부위에 대한 기준과 승조원 거주구역 바닥의 충격응답 크기에 대한 기준의 상관관계를 알아보고 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 수중폭발 충격하중에 대한 승조원의 상해 평가 기준 정립을 위하여 Liu 등 [3]이 제시한 수학적 비선형 다자유도 인체모델의 앉아있는 자세와 서 있는 자세에 대하여, 수치 시뮬레이션에 적용할 수 있도록 등가 유한요소 모델로 구성하여 이를 검증하였다.

(2) 비선형 다자유도 인체모델을 이용하여 MIL-S-901D 중중량 충격시험 수치 시뮬레이션과 BV043/85에서 규정하는 내충격 강화 기준 충격하중에 대한 충격응답 해석을 통하여 본 연구에서 준용한 수중폭발 충격하중에 대한 두 가지 승조원의 상해 평가 기준 사이에는 매우 밀접한 상관관계가 있음을 확인하였다.

(3) 주로 함정의 탑재장비를 대상으로 실시하는 MIL-S-901D 중중량 충격시험 및 BV043/85에서 규정하는 내충격 강화 기준 충격하중에 대한 응답해석을 승조원을 대상으로 실시하여도 적절하다고 확인할 수 있었다.

(4) 함정 건조사양서에 수중폭발 충격하중에 대해 승조원 보호규정을 마련하려 한다면 인체 각 부위에 대한 상해 평가 기준 보다는 함정 내 승조원 주요 거주구역 바닥의 충격 응답 크기에 대한 기준을 마련하는 것이 설계 및 평가 관점에서 보다 적절하다고 판단된다. 그러나 이 분야에 대한 국내의 연구가 거의 전무함을 감안할 때 현재로서는 독일해군의 함정 내충격 강화사양인 BV043/85에서 명시하고 있는 상해한계선도를 준용하는 것 이외에는 대안이 없다고 판단된다.

승조원의 생존성 향상을 위해 도출한 위의 결과들은 향후 한국해군의 독자적인 승조원 관련 상해 평가 기준 정립에 일조할 수 있으리라 판단된다. 또한 실제 함정에서의 승조원 안전성과 관련하여 승조원 상해 평가 기준을 도입하는 등의 많은 활용이 기대된다.

참 고 문 헌

[1] BV043/85, "Building Specifications for Ships of the Federal Armed Forces : Shock Resistance," Building Specifications for Ships of the Federal Armed Forces, 1985.

[2] Oglesby, D.B. and Shin, Y.S., "Simulation of Human Male and Female Biodynamic Responses to UNDEX Events," Proceedings of the 69th Shock and Vibration Symposium, 1998.

[3] Liu, X.X., Shi, J., Li, G.H., Le, X.H, Zhao, B.L., Bai, G.R. and Ke, W.Q., "Biodynamic Response and Injury Estimation of Ship Personnel to Ship Shock Motion Induced by Underwater Explosion," Proceedings of the 69th Shock and Vibration Symposium, 1998.

[4] MIL-S-901D, "Shock Tests H. I. (High-Impact) Shipboard Machinery, Equipment and Systems, Requirements for," Military Specification, 1989.

[5] Zong, Z. and Lam, K.Y., "Biodynamic Response of Shipboard sitting subject to Ship Shock Motion," Journal of Biomechanics Vol. 35, pp. 35-43, 2001.

[6] Germanischer Lloyd, Rules & Guidelines, 2004.

[7] 정정훈, 허영철, 김병현, 2000, "LS-DYNA/USA를 이용한 부유구조물의 수중폭발 충격응답 해석," 대한조선학회 2000년 추계학술대회 논문집, pp. 341-344, 2000.

[8] 이상갑, 권정일, 정정훈, "캐비테이션을 고려한 부유구조물의 3차원 수중폭발 충격응답 해석," 대한조선학회논문집 제40권 제6호, pp.1-11, 2003.

[9] Shin, Y.S. and DeRunts, J.A., USA/LS- DYNA3D Software Training Course, Vol. V, 1996.

[10] LS/DYNA3D User's Manual (Version 970), Livermore Soft Technology Corporation, 2003.

[11] HDW, "Anti-Shock Design," Lecture Note, 2001.

감사의 글

학교에 다시 들어왔을 때 그 생경함이 이제는 익숙함으로 모습을 탈 바꾸어 버리듯 시간이 흘렀습니다. 이제 대학원 생활을 마무리하고 사회인이 되고자 하려니 새로운 위치에서 다시 시작해야 한다는 것이 막연하고 두렵게 느껴집니다. 하지만 2년이란 짧지 않은 기간 동안 배웠던 가르침을 바탕으로 새롭게 사회에 나가는 것이 기대되기도 합니다.

제가 대학원을 처음 시작하였을 때부터 지금까지 한결같은 모습으로 부족한 저를 항상 깊은 관심 속에서 이끌어주신 이 상갑 교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 교수님의 학문에 대한 변함없는 열정은 저에게 인생의 본보기가 될 것이라 확신합니다.

먼 거리에 계시지만 저에게 연구의 성취감을 느낄 수 있도록 가르침을 주시고 논문에 대한 조언을 아끼지 않으셨던 한국기계연구원의 정 정훈 박사님께도 깊은 감사를 드립니다. 그리고 끝까지 세심한 심사와 조언을 아끼지 않으신 박 석주 교수님께도 감사드리며, 또한 학부 및 대학원 생활동안 가르침과 조언을 아끼지 않으셨던 해양시스템 공학부 교수님들께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고 지금은 떠나고 없지만 힘들고 기나긴 실험실 생활동안 학문적으로나 정신적으로 도움을 주신 정일이형과 우열이형에게 감사를 드립니다. 그리고 학부 때부터 선배지만 같은 대학원 동기로써 동고동락하면서 고생했던 정대형, 인호형, 여훈이형에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그리고 묵묵히 자기자리를 지키면서 열심히 하는 후배 정오와 새롭게 학문을 배우겠다고 이제 대학원을 시작할 언주누나에게도 고마움을 전합니다.

저의 대학원 생활동안 항상 아낌없는 격려와 걱정을 해주는 현수, 윤화, 영민, 민기, 영용, 진우와 해양시스템공학부 선후배 그리고 동기들에게 감사드리고, 나의 소중한 친구들 성문, 동우, 시영, 건욱, 균, 상우, 경배한테도 고마움을 전하고 지면이 부족하여 싣지 못하는 동아리 선후배들에게도 감사의 인사를 전합니다. 그리고 삭막한 대학원 생활에 활기를 불어넣게 해준 'Swing Life' 여러분들에게도 고마움을 전합니다.

마지막으로 언제나 묵묵히 저를 믿어 주시고 항상 격려와 사랑으로 보살펴 주시는 부모님께 감사드립니다.