

공학석사 학위논문

수중폭발 충격하중으로부터 승조원을 보호하기
위한 충격 절연장치의 최적설계 연구

**Study on the Optimum Design of Shock Isolator for Protection
of Crews against an Underwater Explosion Shock Loading**

지도교수 박 한 일

2005년 2월

한국해양대학교 대학원

해양시스템공학과

곽 묘 정

목 차

List of tables	III
List of figures	IV
Abstract	VII
1. 서론	1
2. 승조원의 손상 기준과 최적화 문제의 정식화	3
2.1 승조원의 손상 기준	3
2.2 강제질량 인체모델	3
2.2.1 한계 성능 최적화 문제	4
2.2.2 설계파라미터 최적화 문제	5
2.3 국제표준기구 인체모델	6
3. 수중폭발에 의한 충격하중	8
3.1 수중폭발 현상	8
3.2 충격하중	12
3.3 충격파의 전달에서 경계면의 영향	13
3.3.1 수중폭발 충격하중 조건과 해석 방법	14
4. 유전자 알고리즘	19
4.1 유전자 알고리즘의 원리	19
4.1.1 단순 유전자 알고리즘의 적용	20
4.1.2 단순 유전자 알고리즘 결과	21
4.2 개선된 유전자 알고리즘	22
4.2.1 단순 유전자 알고리즘의 한계	22
4.2.2 개선된 유전자 알고리즘의 특징	23

5. 최적화 결과 및 고찰	31
5.1 수치계산 방법	31
5.1.1 한계 성능 최적화 문제	31
5.1.2 설계파라미터 최적화 문제	32
5.1.3 한계 성능 특선 곡선	33
5.2 수중폭발 충격절연 장치의 성능과 결과	34
5.2.1 강제질량 인체모델	34
5.2.2 국제표준기구 인체모델	37
5.3 최적화 결과 비교	43
5.3.1 강제질량 인체모델의 결과 비교	43
5.3.2 국제표준기구 인체모델의 결과 비교	45
5.3.2 강제질량 인체모델과 국제표준기구 인체모델 결과 비교	47
6. 결론	49
참고 문헌	50

List of tables

Table 2.1 Human body parameter	7
Table 3.1 Shock wave parameter	14
Table 4.1 Example of scaling	29
Table 4.2 Improved genetic algorithm results	31
Table 5.1 Analysis cases	35
Table 5.2 Comparison rigid mass-human body with ISO-human body	49

List of figures

Fig. 2.1 Human body tolerance criteria	3
Fig. 2.2 Time-optimal synthesis	4
Fig. 2.3 Design-parameter synthesis	5
Fig. 2.4 Mechanical driving point impedance of the human body	6
Fig. 3.1 Sequence of explosion events	9
Fig. 3.2 Underwater explosion phenomena	10
Fig. 3.3 Pulsation of gas bubble from underwater explosion	11
Fig. 3.4 Free surface phenomena from underwater shock loading	12
Fig. 3.5 Ship shock trial	12
Fig. 3.6 Pressure of shock wave	13
Fig. 3.7 Shock wave pressure profile with free surface cut-off	15
Fig. 3.8 BV043 shock loading condition	16
Fig. 3.9 Taylor plate subjected to plane wave	17
Fig. 3.10 Respond results of shock explosion	19
Fig. 4.1 General structure of genetic algorithm	20
Fig. 4.2 3-D graph-isotropic_view $\mathcal{A}(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2$	21
Fig. 4.3 3-D graph-top_view $\mathcal{A}(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2$	22
Fig. 4.4 Simple genetic algorithm results	23
Fig. 4.5 Generation vs objective function and variables	24
Fig. 4.6 Arithmetic crossover	26
Fig. 4.7 Dynamic mutation	27
Fig. 4.8 Elite strategy	30

Fig. 4.9 Improved genetic algorithm results	31
Fig. 5.1 Piecewise constant approximation for the isolator force	32
Fig. 5.2 Normalized limiting characteristic curve	34
Fig. 5.3 Time-optimal results(Con. 50g)	36
Fig. 5.4 Time-optimal results(Con. 18g)	37
Fig. 5.5 Design-parameter results (Con. 50g)	37
Fig. 5.6 Design-parameter results (Con. 18g)	38
Fig. 5.7 ISO, Human body time-optimal results(standing)	39
Fig 5.8 Respond results of ISO-human body and isolator(standing)	40
Fig. 5.9 Optimum results of ISO-human body(sitting)	41
Fig 5.10 Respond results of ISO-human body and isolator(sitting)	42
Fig. 5.11 Design-parameter results of ISO-human body(standing)	43
Fig. 5.12 Design-parameter results of ISO-human body(sitting)	43
Fig. 5.13 Comparison time-optimal with design-parameter(Con. 18g)	44
Fig. 5.13 Comparison time-optimal with design-parameter(Con. 50g)	45
Fig. 5.14 Comparison time-optimal curve with design-parameter curve	45
Fig. 5.15 Comparison time-optimal with design-parameter(standing)	46
Fig. 5.16 Comparison time-optimum with design-parameter(sitting)	47
Fig. 5.17 Comparison rigid mass human body with ISO-human body	53

Study on the Optimum Design of Shock Isolator for Protection of Crews against an Underwater Explosion Shock Loading

Myo-Jung, Kwak

Division of Ocean Systems Engineering

Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

An underwater shock loading produces two dangerous effects. The first effect is to destroy a battleship so that it can not continue normal function. The second is to injure onboard crews through dynamic structural responses. Underwater shock and its effects on battleship have been an active research field since World War II and some results were introduced. But results of crews survivability against underwater shock loading have not achieved. Recently, there is a growing interest in effects of underwater shock onboard crews.

Underwater shock isolators act to reduce harmful shock loading within tolerance limits of a human body. The problem of optimum design is defined as the selection of isolator parameter that causes the performance index of the system to be optimized.

In this study the limiting performance optimum design problem of a shock isolator using a genetic algorithm with the elitist strategy was formulated for crew safety against an underwater explosion(UNDEX) shock loading. For simplification of the problem, the ship structure-shock isolator-human body coupled system was idealized as one degree-of-freedom system and the

UNDEX shock loading was calculated based on the Talyor's air-backed flat plate theory. Additionally, The mechanical driving point impedance of human body model with shock isolator(ISO,5982-1982) is used to solve the optimum design problem. Through numerical examples, the limiting performance curve of the optimum shock isolator was calculated compared with that of the optimum linear shock isolator composed of a spring and a dashpot. Finally, displayed results of comparison one degree-of-freedom with mechanical driving point impedance of human body model with shock isolator.

제 1 장 서 론

함정의 생존성(survivability) 확보를 위해서 반드시 고려해야 할 사항의 하나인 수중폭발 충격하중에 대한 함정의 내충격 강화(shock hardening)와 관련하여 대부분의 국내외 기술개발은 선체구조 및 탑재장비의 내충격 안전성 확보 관점에서 이루어져 왔다. 그러나 함정 생존성 확보의 궁극적 목적은 함정의 승조원들이 전투임무를 성공적으로 마치고 무사히 귀환할 수 있도록 하는 것이기 때문에, 수중폭발 충격하중에 대한 승조원의 보호 대책도 함정의 설계 및 건조 시 반드시 고려해야 할 중요한 문제라 판단된다. 하지만 수중폭발 충격하중에 대한 승조원 보호관점에서 명시된 해군 규정 및 기준은 독일해군의 함정의 내충격 강화 사양인 문헌[1]을 제외하고는 아직까지 없는 것으로 판단되며, 90년대말 국외에서 수행된 수중폭발에 의한 승조원의 충격응답 특성 및 손상평가에 대한 일부 연구사례[2,3]를 제외하고는 관련 연구실적도 찾아보기가 어렵다.

위의 연구사례 결과들을 보면 함정 선체구조 및 탑재장비에는 전혀 손상을 일으키지 않는 크기의 수중폭발 충격하중에 대해서도 승조원은 심각한 손상을 입을 수 있다는 사실을 알 수 있다. 이러한 충격손상으로부터 승조원을 보호하기 위해서는 충격 절연장치를 사용하여 승조원에 전달되는 충격하중을 승조원의 안전한 범위 이내로 저감하는 방법이외는 현실적인 대안이 없기 때문에, 승조원의 안전 확보를 위해서는 최적의 특성을 갖는 충격절연장치의 설계 및 제작 기술이 절대적으로 요구된다.

수상함에 있어 수중폭발 충격에 의한 응답은 충격파에 의한 인장파(incident wave)와 반사파(reflected wave)에 의해 자유수면 접수 구조표면에서 각각 광역 캐비테이션(bulk cavitation)과 선각 캐비테이션(hull cavitation)이 발생한다. 이중 선각 캐비테이션은 유연성이 있는 선체외판에 큰동적 거동을 유발 시켜 탑재장비 및 승조원등에 심각한 손상을 줄 수 있다. 본 논문은 수중폭발 충격하중에 대해 승조원 보호를 위한 최적의 충격 절연장치의 최적화 기법 확립을 위한 연구수행으로 선각 캐비테이션으로 인해 발생하는 응답을 충격하중 조건으로 고려하였으며, 수중폭발 충격파에 의한 유체-구조 상호작용 해석이론으로서 가장 간단하면서 해석적 해가 존재하는 Taylor의 평판이론 즉, 한쪽면만 접수된 무한평판에 평면 충격파(plane shock wave)가 작용하는 경우에 대한 해석이론 방법을 적용하였다 [4,5].

한편, 충격 절연장치의 최적설계 문제는 크게 2가지로 분류할 수 있으며 즉, 충격 절연장치의 형태를 규정하지 않고 주어진 최적설계 문제 내에서 충격 절연장치의 최적 성능을 구하는 한계성능 최적화 문제(time-optimal synthesis)와 사전에

충격 절연장치의 형태를 규정하고 충격절연 장치의 최적특성 파라미터를 구하는 설계파라미터최적화 문제(design-parameter synthesis)로 분류 할 수 있다[6].

본 논문에서는 수중폭발에 의한 충격손상으로부터 승조원을 보호할 수 있는 충격 절연장치의 최적설계 기술정립을 위한 연구결과를 소개하였고, 수중폭발 충격하중을 받는 ‘선체구조-충격절연 장치-승조원’으로 이루어진 연성계(coupled system)를 1 자유도계의 수학적 모델로 이상화하여 승조원을 강체질량(rigid mass) 인체모델로 설정하였다. 이렇게 이상화된 계에 대해 충격 절연장치의 한계 성능 최적화 문제와 충격 절연장치를 선형 스프링과 감쇠기로 구성된 계로 가정한 설계파라미터 최적화 문제를 정식화하고, 일련의 수치계산을 통하여 2가지의 최적화 문제의 결과를 비교 및 검토하였다. 또한 국제표준기구(International Standard Organization, ISO)에서 제시한 수직방향의 조화 가진력에 대한 인체 응답 해석모델(mechanical driving point impedance of human body)을 승조원이 서 있는 자세(standing posture)와 앉은 자세로 나누어[7~9] 최적파라미터를 도출하였으며, 그 결과를 강체질량 인체모델과 비교하였다.

따라서 수중폭발의 충격하중에 의한 승조원의 내충격 안정성 향상을 위한 수행 연구 과정을 다음과 같이 구성하였다. 제1장 서론에 이어 제2장에서는 승조원의 충격손상 기준과 충격절연 장치의 최적화 문제의 정식화를 소개하였으며, 3장에서는 수중폭발의 개념과 해석이론을 소개하였고, 4장에서는 본 논문의 최적화 문제를 풀기 위한 도구로서 유전자 알고리즘과 본 연구를 수행하기 위해 필요한 기법들(실수 코딩, 엘리트 전략등)[10,11,12]을 설명하였다. 또한 제5장에서는 이러한 최적화 문제의 정식화의 결과와 이의 타당성을 검증하기 위해서 2가지의 최적 절연 장치를 비교하여 그 결과에 대해 검토하였다. 마지막으로 6장은 결론과 앞으로 향후 연구방향에 대해서 기술하였다.

제 2 장 승조원의 손상 기준과 최적화 문제의 정식화

2.1 승조원의 손상 기준

수중폭발 충격 하중으로부터 승조원을 보호하기 위해서는 먼저 승조원의 손상기준이 명확하게 제시되어야 한다. 일반적으로 승조원의 충격 손상은 시간이력에 따라 최대 가속도값이 절대적으로 영향을 끼친다고 보고되고 있다. 아래 그림 Fig. 2.1은 (Eiband, 1959)에 의해 고안된 인체의 손상 실험결과[13]를 나타내고 있다.

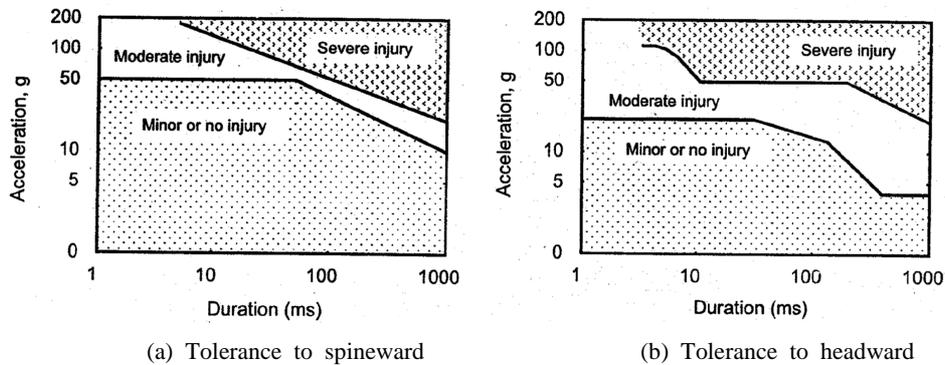


Fig. 2.1 Human body tolerance criteria

수중폭발 충격과에 의한 충격하중의 작용시간은 통상 수십msec 이내이기 때문에 Fig. 2.1에서 보듯이 수중폭발 충격과에 의한 승조원의 손상은 충격가속도의 작용시간에는 무관하게 충격가속도의 최대값에만 지배됨을 알 수 있다. 또한, 인체 부위별로 허용 충격 가속도가 상이하며, 척추(spine)의 경우에는 50g 이하, 머리(head)의 경우에는 18g 이하가 되어야 인체가 안전할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 자료는 충격 절연장치의 최적화 문제의 응답제약 조건의 중요한 자료가 된다.

2.2 강체질량 인체 모델

충격 절연장치의 최적설계 문제는 다음과 같이 크게 2가지로 분류할 수 있다. 즉, 충격 절연장치의 형태를 규정하지 않고 주어진 최적설계 문제 내에서 충격 절연장치의 최적 성능을 구하는 한계성능 최적화 문제와 사전에 충격 절연장치의 형태를 규정하고 충격 절연장치의 최적특성 파라미터를 구하는 설계파라미터 최적화 문제로 분류할 수 있다.

충격 절연 장치의 최적화 문제의 정식화는 수학적 모델로 이상화하여 수중폭발

충격하중을 받는 ‘선체구조-충격 절연장치-승조원’으로 이루어진 연성계를 1자유도계의 수학적 모델로 이상화하여 승조원을 강제질량 인체모델로 설정하여, 한계 성능최적화 문제와 설계 파라미터 최적화 문제로 분류하였다.

2.2.1 한계 성능최적화 문제

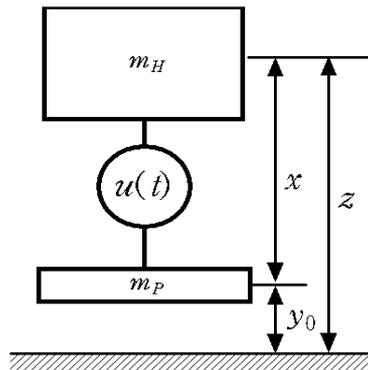


Fig. 2.2 Time-optimal synthesis

Fig. 2.2은 한계 성능 최적화 모델을 나타낸 것이다. 한계 성능최적화 문제는 형태를 규정하지 않고 주어진 조건으로 최적화 문제의 해법으로 가장 최적의 응답 특성을 갖는 충격 절연장치이다. 이것은 Fig. 2.2와 같이 승조원의 질량을 m_H 로 이상화하고, 선체구조의 질량을 m_P 로 이상화한후, 승조원과 선체구조 사이 형태가 규정되지 않은 충격 절연장치의 파라미터(isolator force)를 $u(t)$ 로 정의하고, 이때 두 구조의 상대적 거리(rattle space)를 목적함수로 하여 최소의 응답을 구하는 문제로 정리 할 수 있다.

$$m_H \ddot{z} + u(t) = 0 \quad (2.1)$$

또한 문제의 해를 구하기 위한 기본 가정들은 아래와 같다.

Kinetic condition : $z = x + y_0$

Initial condition : $\dot{z}(0) = \dot{z}(0) = 0$

Performance index : $Min : \Psi = \max_t |x|$

Response constraint : $\max_t |\ddot{z}| \leq A$

Design constraint : $|u(\dot{t})| \leq m_H A$

이때 응답제약 조건에서 A 의 값은 위의 승조원의 충격 손상 기준에서 제시된 것처럼 $18g$ 와 $50g$ 로 설정할 수 있다. 또한 설계 제약조건은 (2.1)을 통해서 정리될 수 있는 구속조건으로 $m_H = 70kg$ 이라 한다면 $|u(\dot{t})| \leq 12600A$ 와 $|u(\dot{t})| \leq 35000A$ 으로 설정됨을 알 수 있다.

2.2.2 설계파라미터 최적화 문제

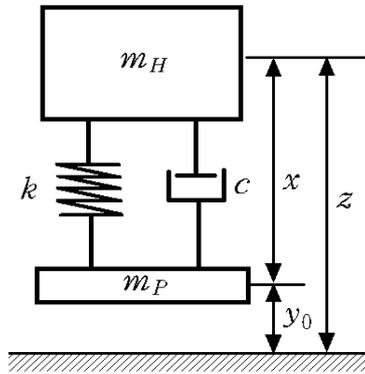


Fig. 2.3 Design-parameter synthesis

설계파라미터 최적화 문제는 충격절연 장치의 형태를 규정하고 주어진 제약 조건에서 최적해를 구하는 문제이다. 충격절연 장치의 형태를 규정하는 방법은 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 충격절연 장치의 형태를 선형 스프링 상수 (k)와 선형 감쇠 상수 (c)로 형태를 정의하여 최적화 문제를 해결하였으며, Fig. 2.3은 선형 설계파라미터의 정식화의 모델을 나타낸 것이다. 따라서 설계파라미터 최적화 문제는 응답 제약조건을 만족하며, 최적의 응답특성을 갖는 k 와 c 를 구하는 문제로 정의 할 수 있다. 따라서 이에 따른 기본 조건은 한계 성능 최적화 문제와 동일하나 운동 방정식과 설계 제약조건이 수정되어야 하며, 상기의 조건의 방정식과 조건은 아래와 같다.

$$m_H \ddot{z} + c \dot{x} + kx = 0 \quad (2.2)$$

Design constraint : $0 < k, 0 < c$

2.3 국제표준기구 인체 모델

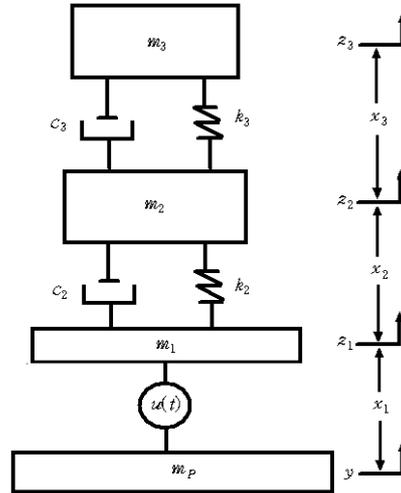


Fig. 2.4 Mechanical driving point impedance of the human body

Fig. 2.4은 국제표준기구에서 제시한 인체 모델(5982-1982)로서 수직 방향 조화가진력에 대한 응답을 해석하도록 제시된 인체 모델이다. 국제표준기구에서 제시된 인체 모델은 강체질량의 인체모델과 달리 파라미터에 따라서 서 있는 자세와 앉은 자세로 나눌 수 있다. 승조원의 자세에 따른 파라미터는 Table 2.1에 나타내었다.

Table. 2.1 Human body parameter

	Standing	Sitting
Mass	$m_2 = 62 \text{ kg}$ $m_3 = 13 \text{ kg}$	$m_2 = 69 \text{ kg}$ $m_3 = 6 \text{ kg}$
Linear Damper	$c_2 = 1460 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ $c_3 = 930 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	$c_2 = 1540 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ $c_3 = 190 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$
Linear Spring	$k_2 = 62 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ $k_3 = 80 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$	$k_2 = 68 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ $k_3 = 24 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$

윗 그림의 관계를 이용하여 아래와 같은 조건을 얻어 낼 수 있다.

Kinetic condition : $z_1 - y = x_1, z_1 = x_1 + y$

$$z_2 - z_1 = x_2, z_2 = x_2 + z_1$$

$$z_3 - z_2 = x_3, z_3 = x_3 + z_2$$

위의 조건을 이용하여 운동 방정식의 행렬식을 세울 수 있으며, 최적화 문제를 강제질량 인체모델과 동일하게 한계 성능 최적화 문제와 설계파라미터 최적화 문제로 정식화 할 수 있다. 그러나 Fig. 2.3과 같이 인체모델과 충격 절연장치를 연결할 수 있는 중간연결 질량(intermediate mass)가 필요하게 되어 m_1 을 설계 변수로 하였으며, 최적화 문제의 제약조건은 아래와 같다.

Design constraint : $m_1 < 0$

$$\text{Respond constraint1} : \max_t |\ddot{z}_2| \leq A_1$$

$$\text{Respond constraint2} : \max_t |\ddot{z}_3| \leq A_2$$

여기서 응답 제약조건들은 승조원의 신체의 특징에 따라 제약 조건이 다르게 설정이 된다는 것을 의미하며, 앞서 제시된 승조원의 충격손상 기준에 따라 m_3 를 머리의 이상화된 질량, 그리고 m_2 을 척추를 포함 신체를 이상화시킨 질량을 나타내므로 $A_1 = 50g$ 이며 $A_2 = 18g$ 로 나타낸다.

또한 설계파라미터 최적화 문제로는 충격절연 장치의 형태를 강제질량 인체 모델과 동일하게 선형 스프링 상수와 선형 감쇠 상수로 정의하여 응답 제약조건과 동일한 제약 조건을 설정하여 최적화 문제의 해를 구하였다.

제 3 장 수중 폭발에 의한 충격하중

3.1 수중폭발 현상

수중 폭발이란 현상은 일반적으로 폭약과 같이 화학적으로 불안정한 물질이 외부 자극에 의해 안정한 상태로 변화되면서 고온 고압의 가스를 분출하는 하나의 현상이라 할 수 있다. 이러한 폭발 현상은 주변 물질에 따라 그 반응 현상에 차이가 있는데 특히 수중에서 이러한 폭발현상은 고온과 고압의 가스구체(gas bubble)의 생성과 급작스런 에너지 방출을 통하여 주위의 물의 교란을 일으킨다. 이러한 과정은 물의 상당한 부피 변화와 압축성 유동을 발생시킨다. 그림 Fig. 3.1은 폭발 현상의 과정을 나타내고 있다.

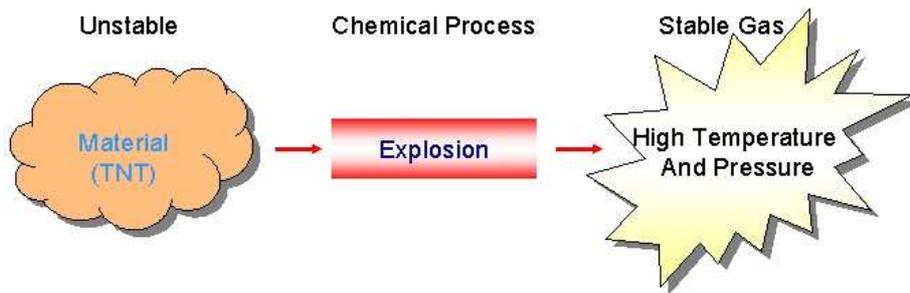


Fig. 3.1 Sequence of explosion events

수중폭발에 의하여 야기된 교란은 폭약 근방에서는 음속($\approx 1500\text{ m/sec}$)의 3~5배 속도로 움직이게 된다. 그러나 어느 정도 거리를 통과하면서부터는 대략 음속으로 구상파(spherical wave)의 형태로 물 속을 전파해 가는데, 이를 충격파(shock wave)라 한다.

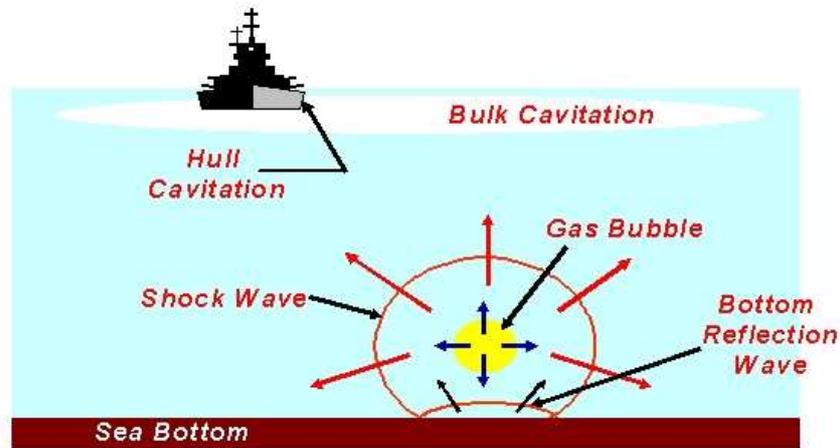


Fig. 3.2 Underwater explosion phenomena

Fig. 3.2는 수중 폭발에 의해 발생하는 물리적 현상을 개략적으로 나타낸 것이다. 이러한 충격파는 백색 스펙트럼(white spectrum)을 갖는 충격하중으로 선체에 작용하여 고차모드의 과도응답(transient response)을 발생시키며, 선체 국부구조 및 승조원과 주요탑재장비에 치명적인 손상을 주게 된다. 충격파가 전파해 가는 동안 폭발 시 생성된 고압의 가스구체는 주위 수압에 대해 주기적인 팽창과수축의 맥동(pulsating)운동과 함께, 일정한 크기를 갖기 때문에 부력에 의해 수직상승(migration)을 한다. 맥동운동의 각 주기마다 가스구체가 최소크기가 되는 시점에서 주위 수압에 의해 붕괴되며, 이 때마다 압력펄스를 방사하는데 이를 가스구체 압력파라 한다. 한편, 가스구체의 수직상승 속도는 주위 유체의 저항력(drag force) 때문에 가스구체가 최소 크기가 되기 바로 직전에 갑자기 커지게 된다. 가스구체 맥동운동의 주기와 함정 선체거더(hull girder)의 저차 상하방향 고유진동 주기가 비슷하기 때문에 가스구체 압력파는 선체거더의 상하방향 보 거동(beam-like behavior) 즉, 휘핑(whipping)을 유발시키며, 심한 경우 과도한 휘핑 굽힘모멘트로 인하여 선체거더는 종강도를 상실할 수 있다.

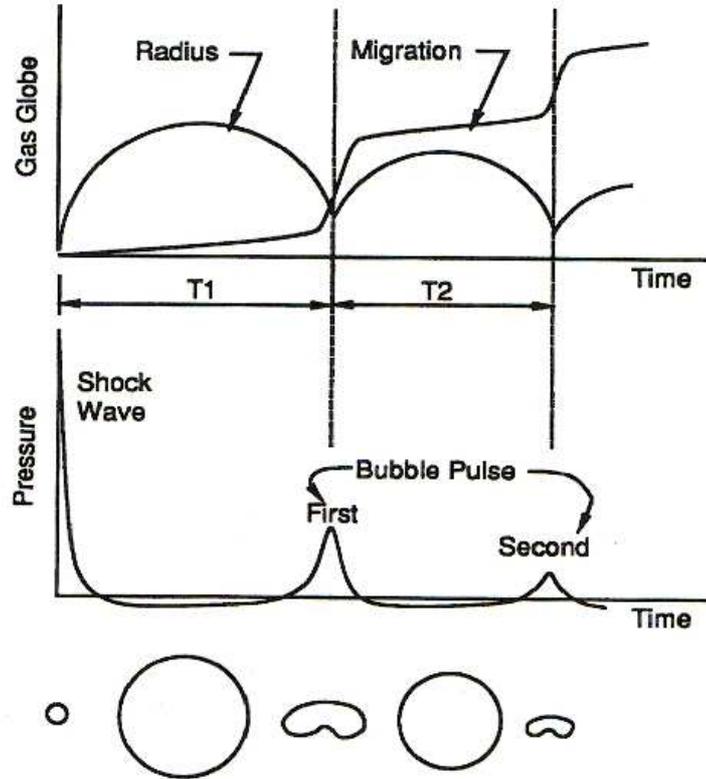


Fig. 3.3 Pulsation of gas bubble from underwater explosion

Fig. 3.3은 수중폭발 현상에서 임의지점에서 유체압력과 폭발시 생성된 가스구체의 변화를 시간이력으로 나타낸 것이다.

또한 수중폭발 직후 발생한 충격파가 자유수면에 도달하면 광역캐비테이션 현상으로 인해 스프레이 돔(spray dome)이 형성되고, 이어서 가스구체 압력파가 자유수면에 도달하면 스프레이 돔을 관통하는 물기둥(plume)이 발생한다.

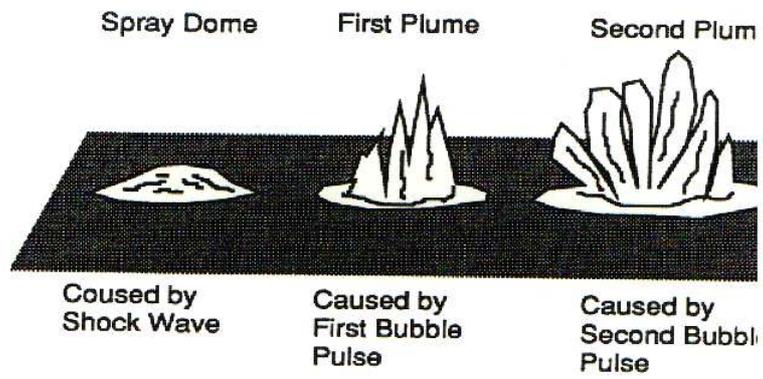


Fig. 3.4 Free surface phenomena from underwater shock loading



Fig. 3.5 Ship shock trial

Fig. 3.4는 수중폭발이 발생했을 때 자유수면에서 일어나는 물리적 현상을 나타내었으며, Fig. 3.5는 실선에서 수중폭발 현상을 나타낸 것이다.

3.2 충격하중

수중폭발이 발생했을 때 무한수역 내의 거리 R 만큼 떨어진 임의의 한 점에서 충격파의 유체 압력의 시간이력에 따른 경향은 Fig. 3.6과 같다.

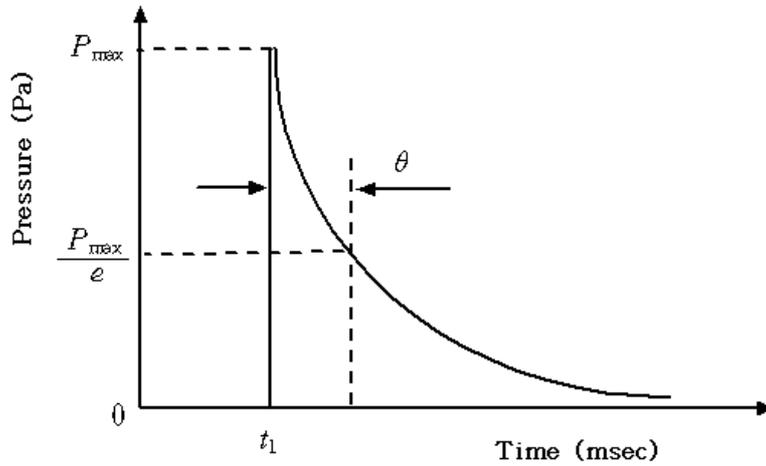


Fig. 3.6 Pressure of shock wave

시간에 따른 유체압력은 변화는 (3.1)로 나타낼 수 있다.

$$P(t) = P_{max} e^{-\frac{(t-t_1)}{\theta}}, \quad t \geq t_1 \quad (3.1)$$

여기서 P_{max} 는 폭발 시의 최대압력, t_1 은 폭발원으로부터 이 지점까지 충격파의 도달시간, θ 는 감쇠상수를 나타낸다. 또한 P_{max} 및 θ 는 폭약의 중량 및 폭발거리의 함수로서 각각 (3.2) 및 (3.3)과 같이 주어진다.

$$P_{max} = K_1 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_1} \quad (MPa) \quad (3.2)$$

$$\theta = K_2 W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{A_2} \quad (msec) \quad (3.3)$$

이때 여기서 K_1, K_2, A_1, A_2 는 폭약의 종류에 따른 값으로 Table 2-1 처럼 폭약의 종류마다 서로 다른 값을 사용한다.

Table 3.1 Shock wave parameter

			TNT	HBX-1	HBX-3	HBX-6	PENTOLITE
Shock Wave	Peak	K1	52.4	56.7	50.3	59.2	56.5
	Pressure	A1	1.13	1.15	1.14	1.19	1.14
	Decay	K2	0.084	0.083	0.091	0.088	0.084
	Constant	A2	-0.23	-0.29	-0.218	-0.28	-0.23

충격파에 의한 물의 유동은 압축성이라 가정하고 폭발이 발생한곳으로부터 일정한 거리를 통과하면서 음속으로 전파해감으로 음향파 이론에 의해 기술될 수 있다. 따라서 압력 $P(\delta)$ 를 갖고 구상파의 형태로 전파에 가는 충격파에 의한 물입자의 속도는(3.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(\delta) = \frac{P(\delta)}{\rho c} + \frac{1}{\rho R} \int_0^{\delta} P(\delta) dt \quad (3.3)$$

이때 ρ 는 물의 밀도 c 는 물 속에서 음속을 나타낸다.

3.3 충격파의 전달에서 경계면의 영향

충격파가 자유수면에 도달하면 물의 임피던스(impedance, =밀도×음속)가 공기의 임피던스에 비해 훨씬 크기 때문에 거의 전반사(total reflection)가 이루어지며, 이 경우 반사파는 양의 압력을 갖는 압축파인 충격파와는 달리 음의 압력을 갖는 인장파이다. 수면 하 임의의 한 점에서의 압력 시간이력을 생각해보면 인장반사파가 도달하는 시점에서 먼저 도착한 입사충격파 압력과 인장반사파 압력이 중첩되어 압력은 급격히 감소하는데 이 현상을 ‘자유수면에 의한 컷오프’(surface cutoff)라 하며, 입사충격파가 도달한 시간부터 인장반사파가 도달할 때까지의 시간을 ‘컷오프 시간’(cut-off time)이라 한다.

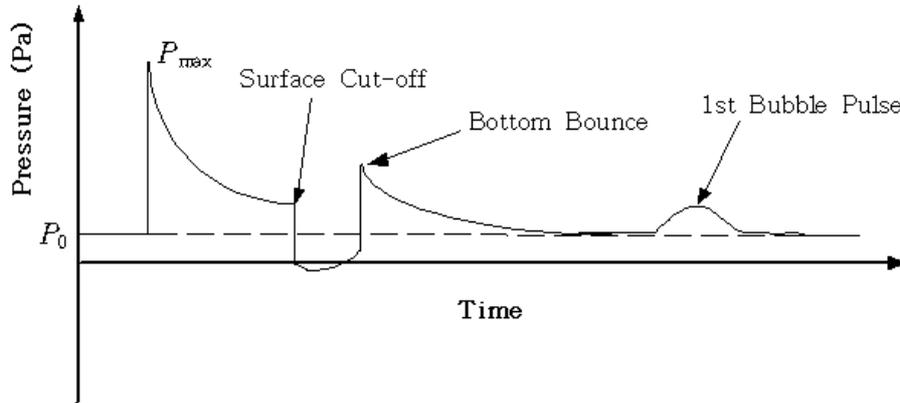


Fig. 3.7 Shock wave pressure profile with free surface cut-off

따라서 수면 하 위치에 따라 절대압력(입사충격파에 의한 압력 + 인장반사파에 의한 압력 + 수압)이 캐비테이션 발생압력 이하로 떨어지게 되어 상당히 넓은 영역에 걸쳐 캐비테이션이 발생하는데 이 현상을 ‘광역 캐비테이션’현상이라 한다. 캐비테이션이 발생하면 캐비테이션 영역 내의 물 입자는 순간적인 수직속도(kick-off velocity)를 갖게 되며, 캐비테이션이 일어나지 않은 물과 분리된다. 이러한 광역캐비테이션은 영역 내의 물 입자들의 운동으로 인해 광역캐비테이션 상경계(upper boundary)와 하경계(lower boundary)가 결국에는 만나게 되어 캐비테이션이 종료되며, 이 때에 폐쇄압력파(closing pulse)가 발생하여 선체에 또 다른 충격하중으로 작용하게 된다.

한편 선체외판에 충격파가 도달하면 이 경우에도 음압을 갖는 인장 반사파가 발생하여 선체외판 주위에 국부적인 선각 캐비테이션을 발생시킬 수 있다. 이러한 캐비테이션이 발생하면 유체와 구조가 순간 분리되어, 캐비테이션이 끝나는 시점에서 폐쇄 압력파가 발생하여 또 다른 충격하중으로 작용할 수 있다.

3.3.1 수중폭발 충격하중 조건과 해석방법

본 연구에서 충격 절연장치의 수중폭발 조건으로서 TNT 폭약 100kg이 10m의 거리에서 폭발하는 경우를 고려하였으며, 선체구조 질량은 1,000kg으로 가정하였다. 이것은 함정 선체에 작용하는 충격파에 의한 충격 하중의 세기를 대략 충격파의 에너지 밀도와 관련된 충격계수(shock factor)로 표현된다[5].

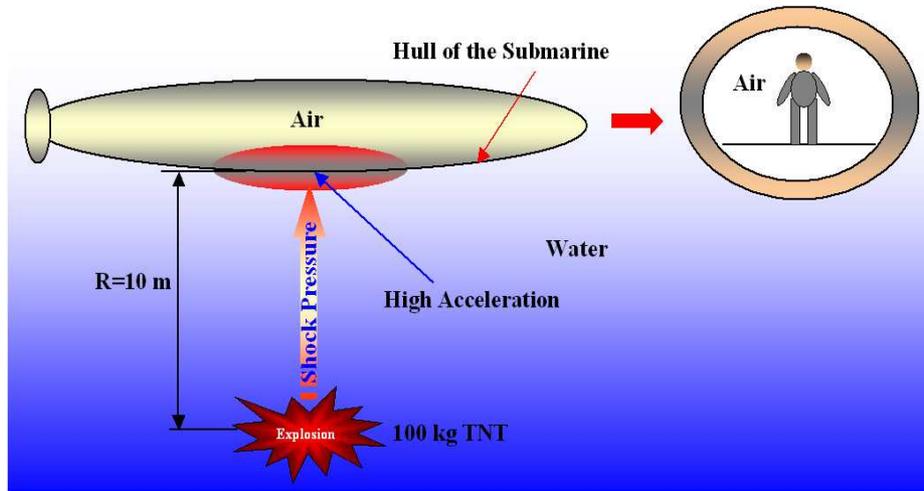


Fig. 3.8 BV043 shock loading condition

Fig. 3.8은 본 논문에서 고려한 수중폭발 충격 조건으로, 고려한 수중폭발 조건은 독일해군의 잠수함 Test Section에 대한 내충격 설계검증을 위해 널리 사용되는 수중폭발 충격시험 조건으로서, 현재 함정의 내충격 강화기준은 하나의 충격계수 값으로 주어지며, 잠수함의 경우 (3.4)처럼 선각충격계수(hull shock factor)로 주어지고 있다[14].

$$Hull\ shock\ factor = \frac{\sqrt{W}}{R} \quad (3.4)$$

여기서 W 는 폭약의 중량이며, R 은 폭약에서 선체 외판까지의 최단거리를 나타낸다. 이러한 충격 조건은 어떠한 경우에도 Test section 구조에 충격손상이 발생하지 않았던 것으로 보고되고 있으며, 선각충격계수가 동일한 경우 동일한 구조물의 경우 비슷한 응답 결과를 나타나는 것으로 보고되고 있다.

이러한 충격파의 응답 해석이론은 Taylor의 평판 이론을 널리 사용하고 있으며, 해석방법의 그림은 Fig. 3.9로 나타내었다.

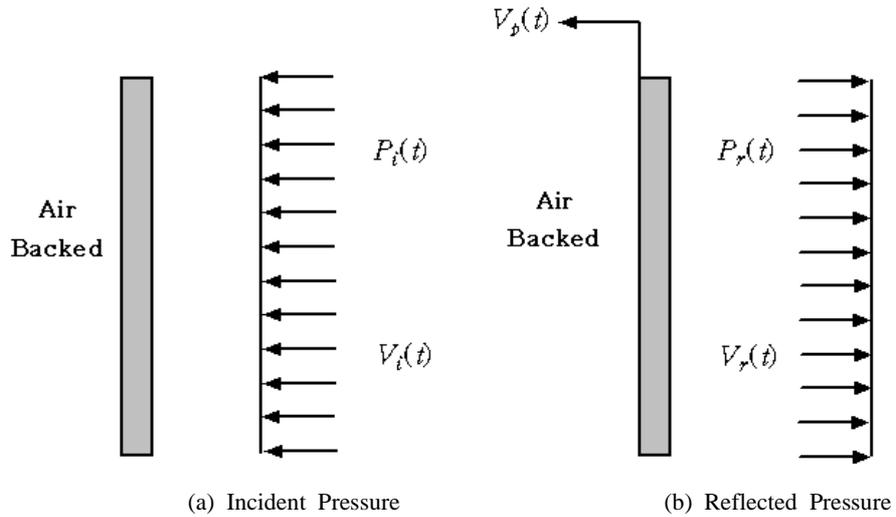


Fig. 3.9 Taylor plate subjected to plane wave

Taylor의 평판 이론은 뉴턴의 제2법칙을 바탕으로 아래 (3.5)처럼 나타낼 수 있다.

$$m_p \times \frac{dV_p}{dt} = (P_i + P_r) \times S_p \quad (3.5)$$

여기서 나타내는 것은 다음과 같다.

m_p : Mass of Plate (1000 kg)

$P_i(t)$: Incident Pressure

$P_r(t)$: Reflected Pressure

$V_p(t)$: Velocity of Mass

S_p : Area of Plate ($4m^2$)

이때 충격파에 의한 평판의 변위를 y ($V_p(t) = \dot{y}$)라 한다면 (3.5)는 아래와 같이 2차 미분 방정식으로 유도될 수 있다.

$$m_p \ddot{y}(t) = S_p (2P_{max} e^{-\frac{t}{\tau}} - \rho c \dot{y}) \quad (3.6)$$

(3.6)은 초기조건이 $y(0) = \dot{y}(0) = 0$ 이라 가정하면 지배 방정식(3.6)의 해를 구하면 응답 변위를 얻을 수 있다.

$$y(t) = \frac{2P_{max} S_p \theta^2}{m(1-\beta)} \left[\frac{1}{\beta} (1 - e^{-\frac{\beta t}{\theta}}) - (1 - e^{-\frac{t}{\theta}}) \right], \quad \beta = \frac{\rho c \theta S_p}{m_p} \quad (3.7)$$

또한 속도와 가속도는 각각 (3.8)과 (3.9)처럼 나타낼 수 있다.

$$\dot{y}(t) = \frac{2P_{max} S_p \theta}{m(1-\beta)} \left[e^{-\frac{\beta t}{\theta}} - e^{-\frac{t}{\theta}} \right], \quad t > 0 \quad (3.8)$$

$$\ddot{y}(t) = \frac{1}{m_p} [2P_{max} e^{-\frac{t}{\theta}} - \rho c \dot{y}] \quad (3.9)$$

여기서 가속도 (3.9)는 다시 풀어쓰면 다음과 같다.

$$\ddot{y}(t) = \frac{2P_{max} S_p}{m(1-\beta)} \left[e^{-\frac{t}{\theta}} - \beta e^{-\frac{\beta t}{\theta}} \right] \quad (3.10)$$

이러한 방정식에서 다시 평판에 작용하는 전체 압력 (P_f)에 대하여 유도하면 (3.11)과 같다.

$$P_f(t) = P_i + P_r = \frac{2P_{max}}{1-\beta} \left[e^{-\frac{t}{\theta}} - \beta e^{-\frac{\beta t}{\theta}} \right] \quad (3.11)$$

상기에 제시한 응답결과를 시간이력에 따라 나타내면 다음과 같다.

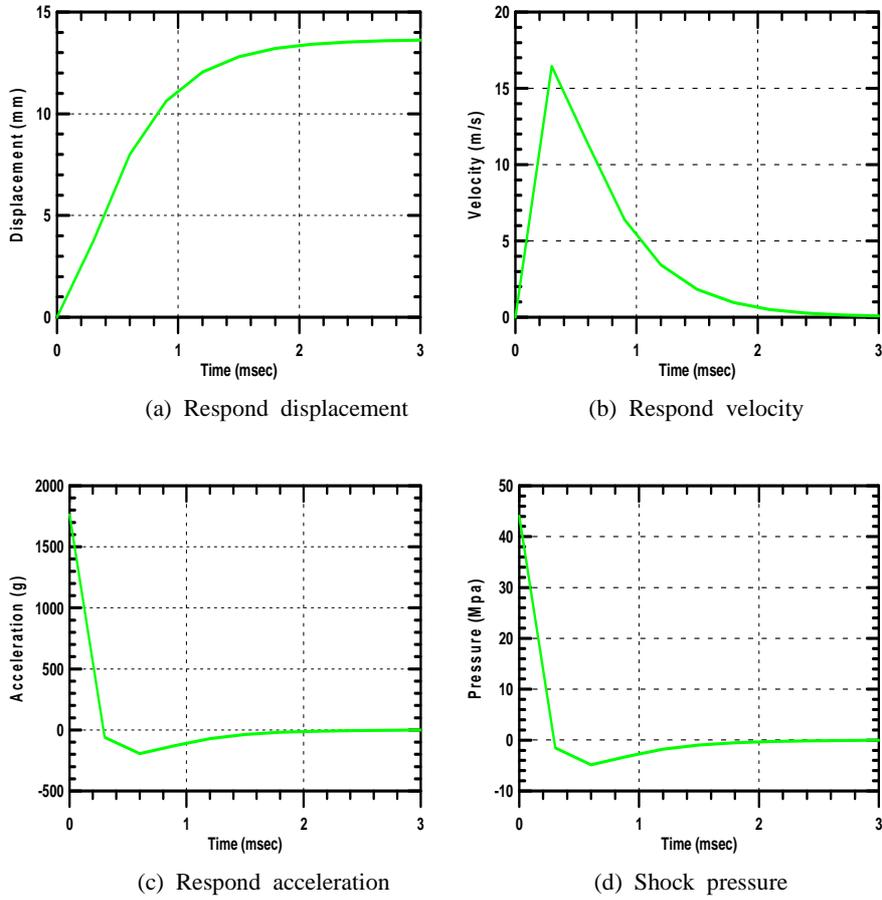


Fig. 3.10 Respond results of shock explosion

Fig. 3.10에 나타낸바와 같이 충격파에 의한 급작스러운 에너지 방출로 인해 선체의 큰 동적 반응을 야기 시키는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 결과는 함정에 탑재되어 있는 주요 장비나 승조원에 큰 손상을 줄 수 있다고 보고되고 있다. 특히 승조원의 경우 손상 기준이 2장에서 나타낸바와 같이 최대 가속도에 지배됨을 고려할 때 승조원을 보호할 수 있는 장치가 없을 경우 최대 1800g의 높은 가속도의 영향을 받으며, 이러한 충격 가속도는 승조원에게 커다란 손상을 줄 수 있다.

제 4 장 유전자 알고리즘

4.1 유전자 알고리즘의 원리

전통적인 최적화 방법들에는 크게 세가지 형태로 분류할 수 있다. 첫째로 도함수를 이용하는 방법, 두 번째는 한정된 공간에서 모든 점들을 목적함수로 한번에 하나씩 탐색하는 방법, 마지막으로 어떤 임의점을 선택하여 탐색을 시작하는 것이다. 그러나 이러한 방법들은 설계변수가 많거나 목적함수가 복잡한 경우 최적해를 찾는 데 어려움이 있으며, 목적함수에 여러개의 국부해(local optimum)이 존재할 때 얻은값이 전역해(global optimum)인지 신뢰하기가 어렵다. 그러나 유전자 알고리즘은 기존의 최적화 방법과 달리 도함수의 정보가 필요로 하지 않으며, 해에 대한 신뢰성이 높아 많은 최적화 문제에 사용되고 있다.

아래그림은 유전자 알고리즘의 일반적인 구조를 나타내고 있는 그림이다.

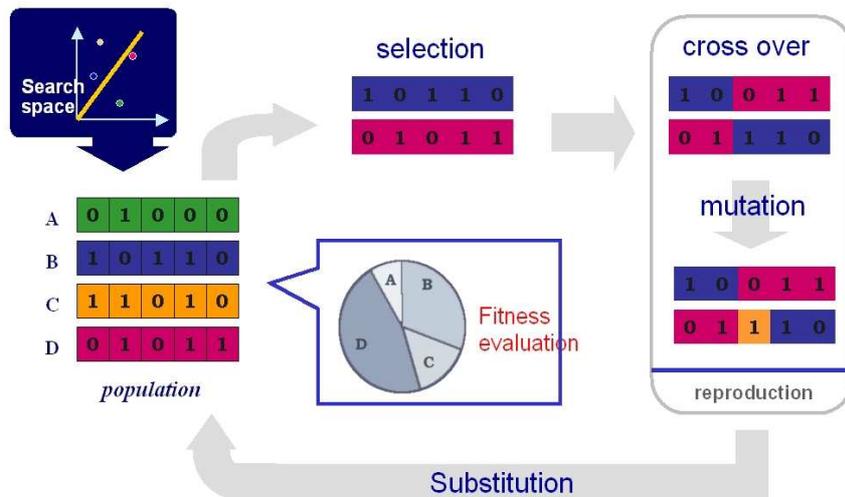


Fig. 4.1 General structure of genetic algorithm

유전자 알고리즘은 두부모의 유전자로부터 그들 자손의 유전자를 형성하는 유성 생식과 자연 환경에서 일어나는 진화원리를 흉내내고 있다. 유전자 알고리즘은 복잡한 문제뿐만 아니라 불연속적인 탐색공간에서도 이용할 수 있다는 장점이 있으며, 확률적인 임의 탐색방법(random search)으로서 전체공간에서 해가 존재할 가능성이 있는 국부적 영역만을 탐색하지 않고 전역적으로 탐색하는 방법이다.

최적화 문제 있어 알고리즘의 효율성을 검증하고 몇가지를 아래와 같이 개선하

였다.

4.1.1 단순 유전자 알고리즘 적용

유전자 알고리즘의 효율성을 알아보기 위해서는 우리가 쉽게 최적해를 짐작할 수 있는 함수를 목적함수로 적용해야 한다. 따라서 목적함수를 $f(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2$ 이고 제약 조건 $-5 \leq x_1, x_2 \leq 5$ 인 함수의 최소값을 찾는 문제의 최적해를 구는 문제를 적용하여 실제 유전자 알고리즘의 유용성을 검증하고자 한다. 목적 함수를 보면 알 수 있듯이 이 함수의 최적해는 제약 조건에서 $x_1 = 0, x_2 = 0$ 일 때 목적함수 값이 최소값이 나온다는 것을 짐작할 수 있다. 그림 Fig. 4.2는 목적함수를 3차원으로 나타내어 등방향에서 나타낸 것이며, Fig. 4.3는 목적함수를 위에서 나타낸 것이다. Fig. 4.2와 Fig. 4.3을 통해서 알 수 있듯이 최적해는 $x_1 = 0, x_2 = 0$ 임을 확인할 수 있다.

$$\text{Minimize : } F(x) = x_1^2 + x_2^2, x = [x_1 \ x_2]^T$$

$$\text{Constraint : } R = [-5 \leq x_1, x_2 \leq 5]$$

$$\text{Global Solution : } f(0, 0) = 0$$

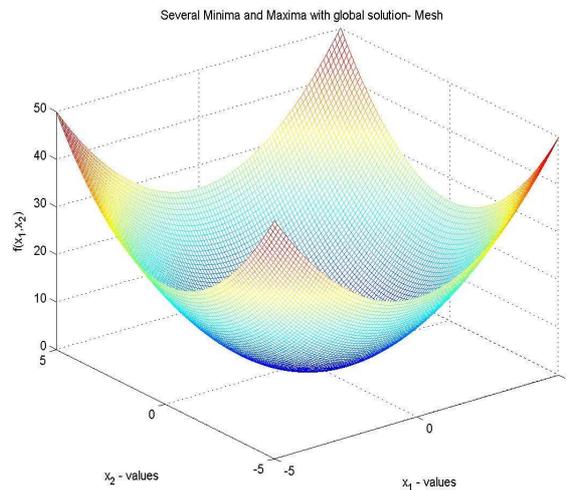


Fig. 4.2 3-D graph-isotropic_view $f(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2$

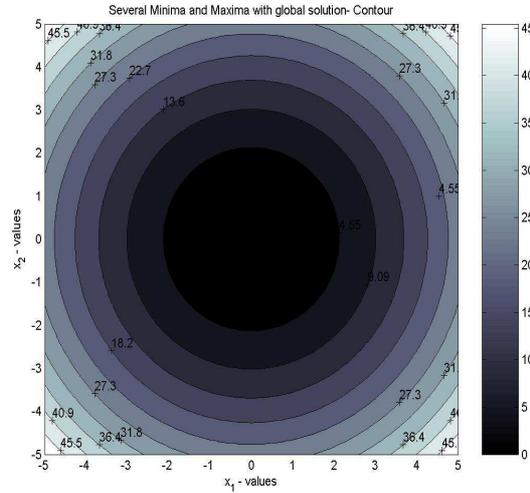


Fig. 4.3 3-D graph-top_view $f(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2$

4.1.2 단순 유전자 알고리즘의 결과

앞의 Test 함수의 최적해를 구하기 위해서 본 유전자 알고리즘에 사용된 연산은 Holland 박사가 제안한 방법을 사용하였다(Sga). 염색체 표현 방법은 2진 코드법을 사용하였으며, 재생산 방법은 룰레휠 선택법을 사용하였다. 또한 기본 연산에서 교배방법은 일점 교배를 돌연변이 방법은 단순 돌연변이법을 적용하였으며, 연산률은 각각 0.8과 0.01을 적용하였다. 스트링의 길이는 정밀도가 소수점 2자리가 요구된다고 가정하여 염색체의 길이인 스트링 길이를 구하면 $l_i \geq \log_2(10 \times 10^2 + 1) = 10$ 이 되므로 최소 $l_1 = l_2 = 10$ 비트가 필요하다. 따라서 염색체 총길이는 $l_i = l_1 + l_2 = 20$ 이 된다. 이러한 방법으로 유전자 알고리즘을 수행한 결과 Fig. 4.4으로 나타내었다.

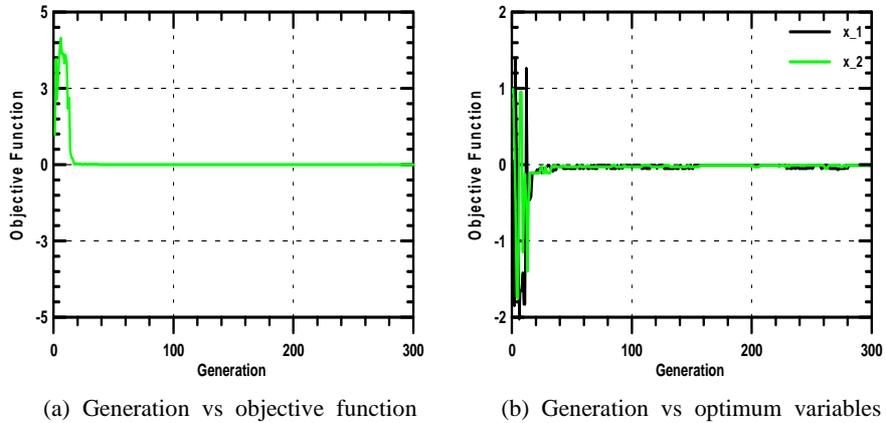


Fig. 4.4 Simple genetic algorithm results

그림 Fig. 4.4를 보면 목적함수의 값이 약 50세대 전에 최적해값이 0으로 수렴해감을 알 수 있다. 또한 세대에 따른 목적함수의 수렴해 가는 경향과 비슷하게 50세대 전에 두변수 역시 ($x_1 = x_2 \approx 0$) 수렴해감을 알 수 있다.

4.2 개선된 유전자 알고리즘

지금까지 설명한 유전자 알고리즘은 단순 유전자 알고리즘으로 초기 Holland 박사가 제안한 알고리즘이다. 유전자 알고리즘은 사용하고자 하는 문제 형식에 맞게 기본적으로 형태에 따라서 사용자가 보다 다양한 방법을 적용해야 한다. 특히 유전자 알고리즘에서 변수가 많거나 함수가 복잡하게 되면 최적해를 찾기가 어려워지므로 이러한 상황을 반영하도록 해야 한다. 본 연구에서 사용하고자 하는 목적함수의 형태는 아주 복잡하고 변수 역시 많기 때문에 위에서 제시한 유전자 알고리즘에서 코딩 형태와 연산방법을 좀더 개선된 방법으로 바꾸었다.

4.2.1 단순 유전자 알고리즘의 한계

본 연구에서 사용된 목적함수는 앞서 단순 유전자 알고리즘에서 제시한 목적함수에 비해 상당히 복잡한 함수 형태를 갖고 있다. 목적함수가 수치해석에 의해 결과를 갖고 있으며, 변수 역시 30개정도 갖는 문제이다. 본 연구에서 사용하고자 하는 목적함수를 위에서 제시한 유전자 알고리즘에서는 최적해를 구하지 못하고 있다. 실제로 단순 알고리즘을 변수가 많은 함수 형태로 성능을 검증하면 다음과 같은 결과가 나온다.

$$Min : F(x) = \sum_{i=1}^{30} (x_i - i)^2 = (x_1 - 1)^2 + (x_2 - 2)^2 \cdots (x_{28} - 29)^2 + (x_{30} - 30)^2$$

$$x = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_{29} \ x_{30}]^T$$

$$Constraint : R = [x_i - 30 \leq x_i \leq 30], \quad i = 30$$

$$Global \ Solution : f(x_i = 0) = 0$$

Fig. 4.5에 나타난바와 같이 변수가 2개였던 위의 함수에서는 50세대가 되기전에도 수렴하는 경향이 나타났지만 변수가 30개로 늘어난 목적함수에서는 1000세대가 지나도 수렴하는 경향이 보이지 않는다. 이러한 원인은 위의 단순 유전자 알고리즘이 2진 코딩을 사용하였고 스트링의 길이가 전체 100개정도 인 것을 감안하고 교배 방식이 일점 교배이기 때문에 변수 30개가 적절하게 변환되지 못하기 때문이다.

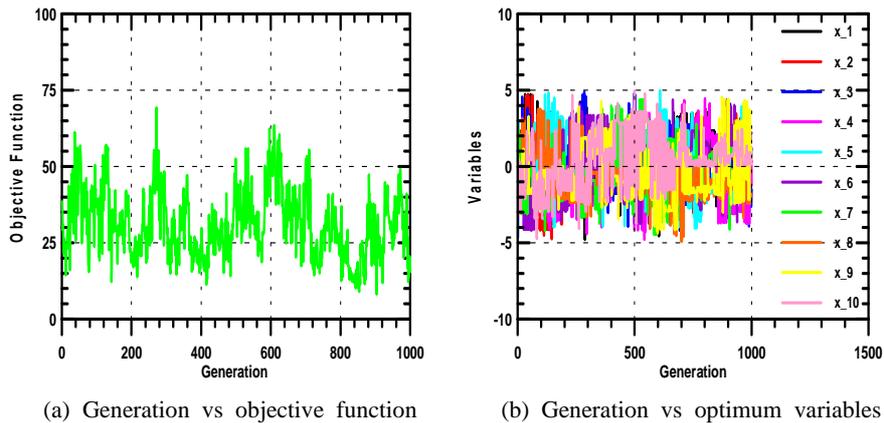


Fig. 4.5 Generation vs objective function and variables

본 연구에서 쓰이는 목적함수 역시 변수가 30개 정도인 함수형태이기 때문에 유전자 알고리즘에 다양한 방법의 변화가 필요하다.

4.2.2 개선된 유전자 알고리즘의 특징

(1) 표현 방법(coding mode)

실수 코딩-흔히 실제세계의 문제들은 고정밀도의 해를 요구하고, 해에 대한 사전 지식이 결여되거나, 복잡한 제약조건이 존재하는 경우가 종종 있다. 이진 코딩을 채용할 때 정밀도를 높이거나 해에 대한 사전지식의 결여로 탐색공간을 확대하게 되면 탐색체 길이가 길어진다. 긴 탐색체는 매우 큰 탐색공간을 만들어 유전알고

리즘이 해를 찾는데 많은 시간을 요구하거나, 경우에 따라서는 실패하는 원인을 제공한다. 예컨대 구간 $-300 \leq x_i \leq 300$ (i 변수 개수)의 경우 해를 찾는 문제를 생각해 보자. 각 변수가 소수점 이하 6자리의 정밀도를 갖게 된다면 $l_i \geq \log[(300+300) \times 10^6 + 1] = 29.2$ 으로부터 탐색체의 총 길이는 $l = i \times 30$ 비트가 된다. 즉 변수 하나가 추가 될 때마다 탐색점이 2^{30} 배의 탐색점이 늘어나게 되어 이진 코딩은 이런 문제를 다루기에 취약하다. 이진 코딩의 이러한 문제점들은 근본적으로 탐색체 표현을 좀 더 해공간에 접근시켜 문제와 관련된 지식을 포함시키는 연산자 설계를 용이하게 하고 제약조건을 다루기 위한 도구를 설계하는 것이 쉽도록 함으로써 해결 할 수 있다. 대표적인 표현법이 실수코딩이다.

실수 코딩은 탐색체는 실수값의 열로 표시된다. 즉 $s = (v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_i \dots v_n)$ 이며 여기서 $v_i \in R^n$ 는 이진표현에서와 마찬가지로 유전자로서의 의미를 가지며, n 은 벡터의 차원을 뜻한다. 실수 코딩법을 채용함으로써 탐색체의 유전자와 벡터 요소는 정확히 일대일 관계가 되므로 탐색체 길이 n 은 벡터의 차원 n 과 같게된다.

(2) 재생산(reproduction)

루울렛휠 선택은 초기 세대에서 초우량 개체가 출현하면 이를 여러번 복제하여 집단의 유전적 다양성을 감소시키고, 확률적으로 최적 개체를 반드시 선택하지 못하는 단점을 가지고 있다. 구배 유사 선택 방법은 이러한 단점을 극복하도록 제안하고 있는데, 이는 기존 연산자와 구별되는 특수한 형태를 가지고 있다.

먼저 g 세대 집단을 $F(g) = (s_1(g) \dots s_N(g))$ 라고 한다면 이러한 개체들은 각각 연산에 의해서 $x_i(g) = [x_{i1}(g) \dots x_{in}(g)]^T \in R (1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq n)$ 로 복호화 되고, 적합도 평가에 의해서 최적의 벡터 $x_b(g)$ 와 적합도 $f_b(g)$ 이 결정된다. 따라서 다음 세대의 새로운 개체는 (4.1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{x_{ij}(g+1)} = x_{ij}(g) + n_i \frac{[f_b(g) - f_i(g)]}{f_b(g)} [x_{bj}(g) - x_{ij}(g)] \quad (4.1)$$

여기서 n_i 의 선택에 따라서 연산자의 선택 영역이 달라지는데, 만약 $0 \leq n_i \leq 1$ 이면 새로운 개체 $\overline{x_{ij}(g+1)}$ 는 $x_b(g)$ 와 $x_{ij}(g)$ 를 잇는 벡터선상에 있게되고, $n_i > 1$ 이면 연장선 위에도 놓이게 된다. 후자의 경우 탐색영역을 확대해주는 효과가 있지만 불안정 문제점 (탐색 영역이 부적합영역으로 감)을 해결하기 위해서 0과 2사이에서 선택할 필요가 있다. 이러한 재생산은 개체들의 복제를 되도록 피하면서 집단을 최적 객체쪽으로 유도하는 것이다.

(3) 교배 (crossover)

개체들간에 정보교환을 가능케 해주는 교배의 역할은 유전자 알고리즘에서 중요하다. 본 알고리즘에서는 객체 표현을 실수 코딩으로 하였기 때문에 실수 코딩을 채용하게 되면 이진 코딩과 새로운 형태 연산 교배 와 돌연변이를 필요로 하게 된다. 실수 코딩과 관련된 교배는 여러 가지가 있겠지만 본 알고리즘에 사용된 산술적 교배(arithmetical crossover)를 설명하겠다.

실수 코딩 단순교배에서 일어나는 교배지점에서의 불연속성을 보완해줄 수 있는 방법으로 아래 그림과 같이 두 부모 염색체를 선형 결합하여 자손을 생성하는 방법이다.

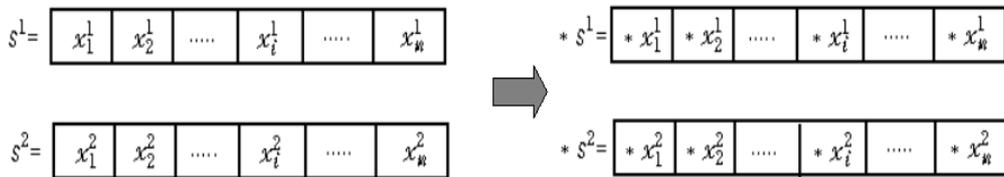


Fig. 4.6 Arithmetic crossover

각 요소 생성법은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} *x_i^1 &= \lambda \cdot x_i^2 + (1-\lambda) \cdot x_i^1 \\ *x_i^2 &= \lambda \cdot x_i^1 + (1-\lambda) \cdot x_i^2 \end{aligned} \right\} (1 \leq i \leq n) \quad (4.2)$$

여기서 λ 는 곱인수로서 고정되거나 아니면 각 요소마다, 염색체마다 독립적으로 결정될 수 있다. 산술적 교배는 λ 의 제약에 따라서 convex crossover와 affine crossover로 구분 될 수 있다. 만약 λ 가 0과1사이 값이라면 convex crossover라 하고, -0.5과 1.5사이라면 affine crossover라 부른다. 아래 예제는 염색체마다 다른 곱인수를 적용한 convex crossover를 나타내고 있다.

Parents:

$$s^1 = (8.3 \ -2.9 \ 0.0 \ 0.7 \ 5.4 \ 6.4)$$

$$s^2 = (-0.7 \ 0.7 \ 3.1 \ 9.1 \ -3.5 \ 4.1)$$

곱인수:

$$\lambda = 0.7$$

$$\lambda = 0.1$$

Sons:

$$*s^1 = (2.00 \quad -0.38 \quad 2.17 \quad 6.58 \quad -0.83 \quad 4.79)$$

$$*s^2 = (0.20 \quad 0.34 \quad 2.79 \quad 8.26 \quad -2.61 \quad 4.33)$$

위에 수식에서도 유추할 수 있듯이 컨벡스 교배(convex crossover)로부터 생성된 자손은 s_1 와 s_2 를 잇는 벡터 선 안쪽에 있게 되므로 항상 적합하지만, 어떤 교배(affine crossover)는 벡터선을 벗어 날수 있으므로 제약 조건을 벗어 날수 있으므로 유전 알고리즘에 탐색법에 별점함수를 도입하여 사용해야 한다.

(4) 돌연변이(mutation)

교배가 두 염색체간에 유전자를 교환하는 이진 연산자(binary operator)라면, 돌연변이는 한 염색체안에서 유전자를 변경하는 단항 연산자 이다. 돌연변이와 관련된 개선 방법도 많은 연구 결과가 있지만 본 알고리즘에 사용된 방법을 설명하겠다.

동적 돌연변이(dynamic mutation)- 이것은 다른 이름으로 불균등 돌연변이라고 불리우며, 이 연산자는 정밀도를 높이기 위하여 미세 조정이 가능하도록 고안된 것이다. 그림 Fig. 4.19 처럼 i 번째 x_i 에서 $*x_i$ 로 돌연변이가 일어나면 $*x_i$ 의 식은 다음과 같이 결정된다.



Fig. 4.7 Dynamic mutation

$$*x_i = \begin{cases} x_i + (x_i'' - x_i) \times r \times (1 - g/mg)^\beta & \tau = 0 \text{ 일때} \\ x_i - (x_i - x_i') \times r \times (1 - g/mg)^\beta & \tau = 1 \text{ 일때} \end{cases} \quad (4.3)$$

여기서 r 은 0과 1사이의 실수 난수이고 τ 는 0또는 1중 하나를 취하는 난수이다. 또한 g 는 세대수를 나타내며, mg 는 최대 세대수를 나타낸다. 또한 지수 β 는 불균등 정도를 나타내는 매개변수로서 사용자에게 의해 결정된다. 일반적으로 많은 경험에 의해서 $\beta=5$ 를 사용하도록 권하고 있으므로 본 알고리즘에서 $\beta=5$ 를 사용하였다.

(5) 적합도(fitness)

개체 집단의 적합도 평가에 응용되는 방법은 특히 유전알고리즘이 작은 집단을 취급하게 될 때 그 성능에 크게 영향을 미친다. 이것은 세대와 밀접한 관계를 가지면서 개체간의 상대적인 적합도 차가 너무 크거나 너무 작음에서 기인된다. 만일 초기 세대의 집단에 상대적인 적합도 차가 큰 개체가 출현하게 되면 기존의 재생산 연산자는 이 개체를 여러번 복제하게 되고 그 결과 이들이 집단을 지배하게 되어 유전적 다양성이 상실하게 되어 지역 최적 점을 급히 수렴하게 된다. 이러한 양상은 진화의 최종 단계에서 수용될 수 있지만 초기 단계에서는 바람직하지 못한 현상이다. 유전자 알고리즘에서 이러한 한계점을 극복하기 위해서 여러 가지 방법이 제시되고 있지만 본 알고리즘에 사용된 적합도법을 설명하기로 한다.

스케일 원도우법은 유전자 알고리즘에서 목적함수의 최대 값을 찾는 경우 g 세대 염색체의 적합도는 아래 수식과 같이 나타낼 수 있다. 만약 최소값을 찾는 문제라면 최대화 문제에 -1 을 곱하여 사상하는 방법으로 얻을 수 있다.

$$f(g) = F(x(g)) - \gamma \quad Max \tag{4.4}$$

$$f(g) = -F(x(g)) - \gamma \quad Min \tag{4.5}$$

여기서 γ 는 적합도값이 $f(g) \geq 0$ 의 관계를 보장하도록 결정되는 상수로서 탐색 효율과 밀접한 관련을 갖는다. 그러나 실제 문제에서 사전 지식이 결여된 상태에서 γ 를 알기 어려우므로 경험을 바탕으로 충분히 아주 작은값을 취하거나 아니면 현재까지의 집단에서 발견되는 목적함수의 최소값을 취하는 것이다. 그러나 γ 값이 초기에 적절하게 선정되었다 하더라도 전체 성능이 개선된 상황에도 이를 계속적으로 고정하게 되면 개체간의 상대적인 적합도 차이가 줄어들어 유전자 알고리즘은 더 나은 해를 찾는데 어려움을 겪게 된다. 이러한 과정의 예를 아래 표에 나타내었다.

Table 4.1 Example of scaling

개체 <i>i</i>	목적 함수 $F(x(g))$	스케일 전 ($\gamma = 0$)		스케일 후 ($\gamma = 50$)	
		$f(g)$	$F(x(g))$	$f(g)$	$F(x(g))$
5	53	53	0.25	3	0.20
2	54	54	0.25	4	0.27
3	58	58	0.27	8	0.53
4	50	50	0.23	0	0.00
합 계		215	1.00	15	1.00

위의 Table 4.1에서도 알 수 있듯이 γ 값을 0으로 설정하였을 때와 후에 50으로 설정하였을 경우 적합도와 선택확률이 확연히 차이가 남을 알 수 있다. 이와 같이 스케일링 문제의 유전자 알고리즘의 흐름과 수렴에 많은 영향을 미치기 때문에 적합한 해를 찾기 위해서는 적절한 스케일이 필요하다. 따라서 적절한 스케일 기법은 전 세대에서 발견되는 목적함수값을 이용하여 γ 값을 매 세대마다 변경해줌으로써 달성될 수 있는데 사용된 집단 수를 스케일 윈도우 (W_s)이라 한다. 이러한 경우 [Grefenstette,1986년]는 W_s 의 크기에 따라 다음 3가지 스케일 방법을 제안하였다.

- $W_s=0$ 일 경우: 첫 세대에서 γ 는 목적함수의 최소값으로 초기화되고, 이후 세대에서는 개체들의 목적함수의 최소값으로 γ 를 변경한다.
- $0 < W_s < 7$ 일 경우: 과거 W_s 세대 집단에서 발견되는 목적함수의 최소값으로 γ 를 변경한다.
- $W_s=7$ 일 경우: 초기의 γ 값을 변경하지 않고 계속 사용된다.

이러한 3가지 스케일 방법을 갖고 광범위한 시뮬레이션과 경험적인 조사 결과에 따르면 $W_s=1$ 이 가장 효과적임을 보고하고 있다[Grefenstette,1986]. 따라서 본 알고리즘에서는 $W_s=1$ 으로 선택하여 사용하였다.

(6) 엘리트 전략(elite strategy)

모의 진화 과정에서 세 유전 연산자 (재생산, 교배 확률, 돌연변이 확률)확률적 속성 때문에 한세대의 최적 개체가 다음 세대에서 살아남지 못하고 소멸되는 경우가 발생할 수 있다. 최적 개체의 소멸은 좋은 특성을 갖는 유전자를 잃게 되어 탐색이 침체되는 원인을 제공 할 수 있다. 엘리트 전략은 집단내에서 가장 우수한 개체가 다음 세대로 변경되지 않고 전달되는 것을 보장하기 위해 고안된 것이다. 보다 정확한 과정을 아래 그림에 알고리즘으로 나열하였다.

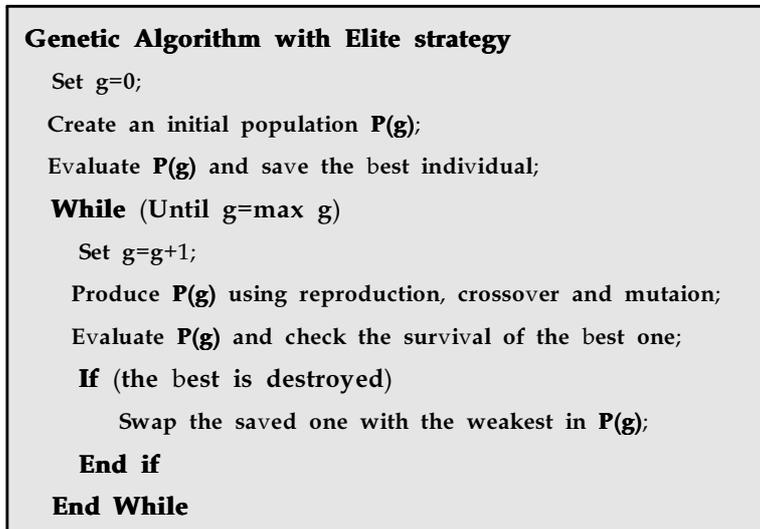


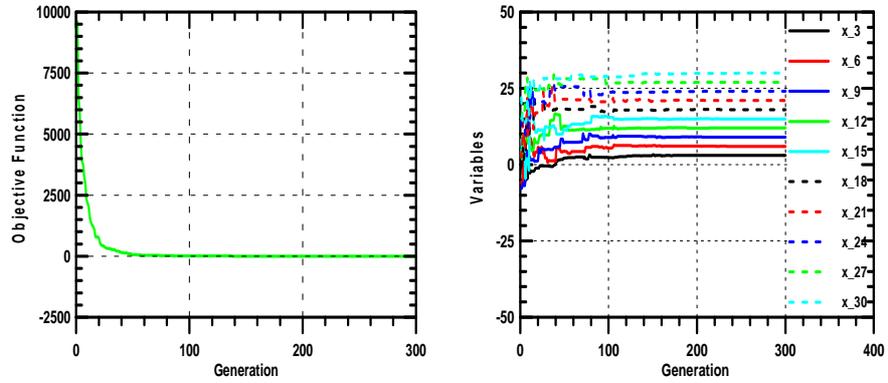
Fig. 4.8 Elite strategy

위의 그림에서도 알 수 있듯이 이전 세대의 최적 객체를 저장하고 있다가 일련의 모의 진화가 수행된 후 현세대에서 소멸된 것이 확인되면, 저장된 개체를 현세대에서 가장 약한 개체와 서로 교환하게 된다.

(7) 개선된 유전자 알고리즘에 적용 결과

이러한 진화된 유전자 알고리즘에 실제 위에서 제시된 변수가 30개인 함수에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

아래 그림 Fig. 4.8은 세대에 따른 목적함수와 변수의 수렴을 나타낸 그래프이다. 그림에서도 알 수 있듯이 단순 목적함수의 값이 유전자 알고리즘에 비하여 수렴의 경향이 0으로 약 50세대이후 나타나고 있다. 변수 30개 역시 모두 최적해의 값으로 수렴하고 있다. 실제 유전자 알고리즘을 통해서 계산된 수치적인 값은 아래 Table 4.2에 나타내었다. 이를 통해서 알 수 있듯이 개선된 알고리즘은 변수가 많은 복잡한 함수에도 최적해를 찾을 수 있는 알고리즘임을 알 수 있다.



(a) Generation vs objective function (b) Generation vs optimum variables

Fig. 4.9 Improved genetic algorithm results

또한 결과값들을 Table 4.2에서도 확인 할 수 있듯이 최적해에 근접하게 답을 찾는 것을 확인 할 수 있다.

Table 4.2 Improved genetic algorithm results

Variables	Exact Solutions	Genetic Algorithm	Variables	Exact Solutions	Genetic Algorithm	Variables	Exact Solutions	Genetic Algorithm
x_1	1	0.992	x_{11}	11	10.999	x_{21}	21	20.997
x_2	2	2.003	x_{12}	12	11.998	x_{22}	22	22.002
x_3	3	3.002	x_{13}	13	13.001	x_{23}	23	23.003
x_4	4	4.003	x_{14}	14	13.999	x_{24}	24	23.999
x_5	5	4.998	x_{15}	15	14.996	x_{25}	25	24.999
x_6	6	5.999	x_{16}	16	15.999	x_{26}	26	25.997
x_7	7	6.997	x_{17}	17	16.999	x_{27}	27	26.999
x_8	8	8.003	x_{18}	18	18.000	x_{28}	28	27.997
x_9	9	9.002	x_{19}	19	18.999	x_{29}	29	28.997
x_{10}	10	10.002	x_{20}	20	19.999	x_{30}	30	29.997
Objective Function 0.00004 ≈ 0								

제 5 장 최적화 결과 및 고찰

5.1 수치계산 방법

앞서 제시한 2장에서 수중폭발 하중으로부터 승조원을 보호하기 위한 충격절연 장치의 최적화 문제에서 목적함수를 응답 변위로 설정하였으며, 제약조건으로 절대가속도를 설정하였다. 본 연구에서는 충격하중에 대한 응답 변위를 구하는 방법으로는 4차 Runge-Kutta법을 적용하였다.

5.1.1 한계 성능 최적화 문제

한계 성능 최적화 문제는 앞서 말한바와 같이 절연계의 종류와 관계없이 응답 가속도를 제약 조건으로 설정하여 최적의 해를 구하는 것이다. 다시 말해 한계 성능 최적화 문제는 절연계의 설계 제약 조건인 $u(t)$ 의 결정에 의해서 최적 응답 변위가 결정이 된다. 이러한 과정은 전체적인 절연계의 절연장치의 종류와 관계없이 외부 환경의 충격하중과 제약조건을 이용하여 최적화 문제를 해결하는 것이다. 또한 초기조건은 $x(0) = \dot{x}(0) = 0$ 이라 한다면, 이러한 최적화 문제에서 제약 조건과 목적함수는 의해서 최적화의 값을 구할 수 있다. 즉 제약 조건이 정의가 된다면, 설계 제약 조건인 $u(t)$ 는 이산화된 함수로 가정할 수 있으며, 최적화 문제에서 각각의 time-step의 u_n 을 Fig. 5.1과 같을 때 변수로 생각할 수 있다. 즉 Δt 만큼 Δt 각 구간별로 나누어 생각 할 수 있다.

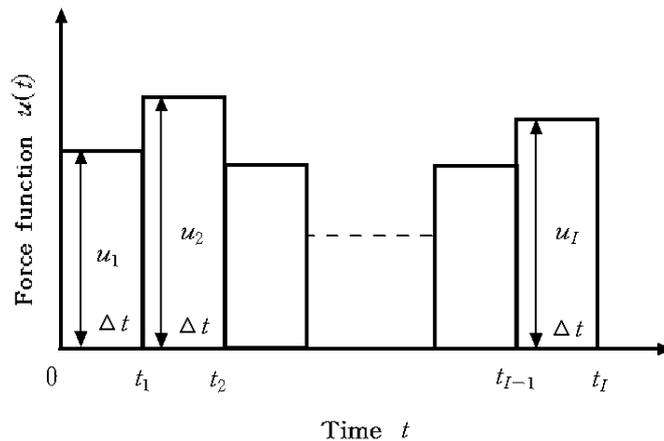


Fig. 5.1 Piecewise constant approximation of the isolator force

그림 Fig. 5.1과 같이 이산화된 시간이력에서 주어진 조건 $\max_i |\ddot{z}_i| \leq A$ 이면 강체 질량 인체모델의 경우 (5.1)의 최종 목적함수의 값과 국제표준기구 인체 모델의 경우인 (5.2)의 목적함수 값을 아래의 형태로 하여 수치 적분하면 응답 변위를 구할 수 있다.

$$\ddot{x} = -\frac{u(\Delta t)}{m_h} - \frac{u(\Delta t)}{m_p} - \ddot{y}_o \quad (5.1)$$

$$\ddot{x} = \frac{c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2}{m_1} - \frac{u(\Delta t)}{m_1} - \frac{u(\Delta t)}{m_p} - \ddot{y}_p \quad (5.2)$$

$$-mA \leq u_1 \leq mA \text{ Constant for } 0 \leq t_1 \text{ Result } x_1$$

$$-mA \leq u_2 \leq mA \text{ Constant for } t_1 \leq t_2 \text{ Result } x_2$$

.

.

.

$$-mA \leq u_i \leq mA \text{ Constant for } t_{i-1} \leq t_i \text{ Result } x_i$$

따라서 $\Psi = \max_i |x_i|$ 이면 Ψ 을 최소화 할 수 있는 * $u_i = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ \dots \ u_{i-1} \ u_i]$ 의 값을 찾는 문제라 볼 수 있다.

이대 목적함수인 변위는 (5.1~5.2)의 수치 적분에 의해서 결과를 얻을 수 있는데 본 논문에서는 각 구간 $h = (t_f - t_0)/n$ 동안 수치 적분법인 4차 Runge-Kutta법을 사용하였다[15].

5.1.2 설계파라미터 최적화 문제

앞서 제시한 한계 성능 최적화 문제는 충격절연 장치의 특성이 규명되지 않는 상태에서 충격 응답 값을 제약조건으로 설정하여 최적해를 구하는 문제였다. 이와는 반대로 충격절연 장치의 특성을 규명하여 최적특성을 갖는 문제를 설계파라미터 최적화 문제임을 앞에서 설명하였다. 이러한 설계파라미터 최적화 문제를 해결하는 방법에는 여러 가지가 있으나 본 연구에서 앞서 나타난 그림 Fig. 3.3처럼 선형 스프링과 선형 감쇠로 이뤄진 충격절연 장치를 설명하고 기본방정식을 제시하였다. 설계파라미터 최적화 문제의 지배 방정식은 (2.1)에서 $u(\Delta t)$ 를 $kx(\Delta t) + c\dot{x}(\Delta t)$

로 치환하여 설계 제약 변수를 A 와 c 로 설정하여 최적화 문제를 구하였다.

5.1.3 한계 성능 특성 곡선

이러한 최적화 문제를 제약조건을 변화시키면서 또 다른 최적해 값을 얻을 것이다. 즉 A 값이 바뀌면 $\psi = D$ 의 값도 다른 결과를 얻는 것이다. 이러한 관계의 각각의 점들을 연결하여 나타낼 수 있는데 이러한 관계를 한계 성능 특성 곡선 (limiting performance characteristic curve) 이라 한다. 이렇게 취득한 (A, D) 값을 각각 정규화 (normalized)로 나타내기 위해서 D/D_f 와 A/A_f 의 관계로 나타낸 것이 그림 Fig. 3.6이다. 여기서 D_f 는 최대 변위를 나타내고 A_f 는 최대 가속도를 나타낸다.

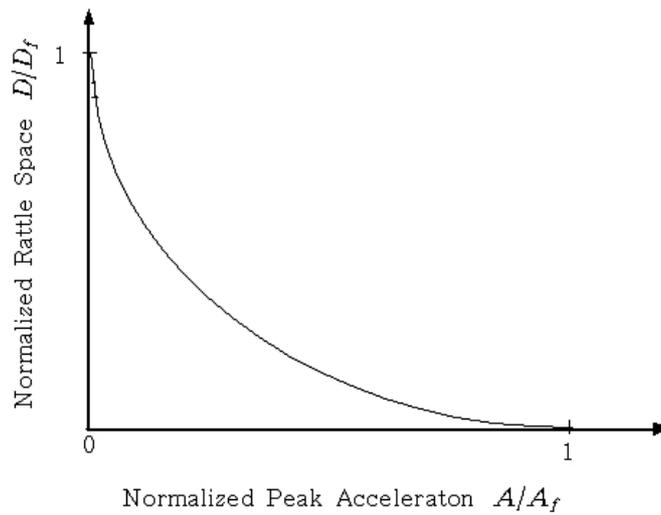


Fig. 5.2 Normalized limiting characteristic curve

(A, D) 의 정규화 된 그림은 제약 조건과 목적함수의 관계를 잘 보여주고 있다. 즉 제약 조건이 0의값에 가까워졌을 때 응답 변위인 목적함수의 값은 최대에 가까워지고 그 반대가 되었을 때 목적함수는 아주 작은 값이 된다. 또한 이러한 정규화된 한계성능 특성 곡선은 설계파라미터 절연계의 최적화 문제의 비교 자료가 된다.

5.2 수중폭발 충격절연 장치의 성능 및 결과

앞서 제시한 2장의 최적화 문제의 정식화에 그에 따른 제약 조건의 따른 최적화 문제의 경우 최종적인 해석의 경우는 아래 Table 5.1로 정리하여 나타내었다. 강체질량 인체 모델의 경우는 제약 조건인 응답 가속도에 따라서 한계 성능 최적화 문제와 설계 파라미터 최적화 문제의 해를 구하였고, 국제표준기구에서 인용한 인체모델의 경우는 승조원의 거주 자세에 따라서 한계 성능최적화 문제와 설계파라미터 최적화 문제의 해를 구하였다.

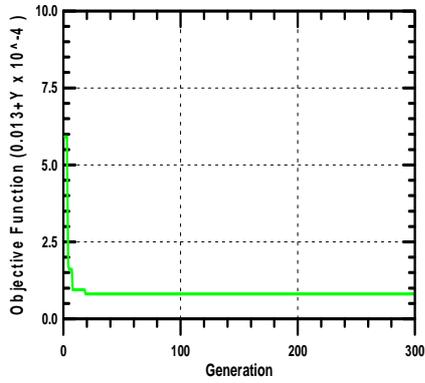
Table 5.1 Analysis cases

Optimum Formulation	Time-Optimal Synthesis		Design-Parameter Synthesis	
Human Model	Rigid Mass-Human Body	ISO-Human Body	Rigid Mass-Human Body	ISO-Human Body
Analysis Case	18g	Standing Posture	18g	Standing Posture
	50g	Sitting Posture	50g	Sitting Posture

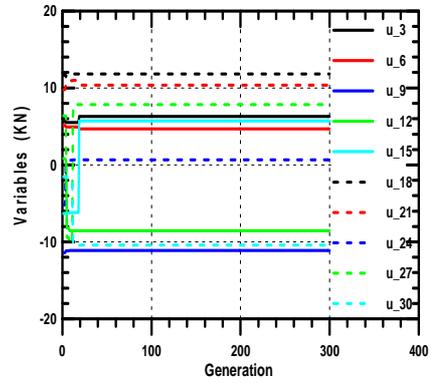
5.2.1 강체 질량 인체모델

먼저 승조원의 강체질량으로 나타낸 최적화 문제는 최적화 문제의 정식화에서 나타낸바와 같이 한계 성능최적화 문제의 경우 제약 조건 18g의 경우 Fig. 5.3에서 나타내고 있다. Fig. 5.3의 (a)그래프에서 나타낸바와 같이 목적함수의 값이 50세대 이전부터 수렴의 결과가 나타나지만 최종 300세대의 값을 결과 값으로 선택하였으며, (b)의 경우는 세대에 따른 변수 [$u_1, u_2, u_3 \dots u_{28}, u_{29}, u_{30}$]의 수렴을 나타내고 있다. 그리고 (c)그래프에서 나타낸바와 같이 제약 조건 18g를 만족하고 있으며, 이러한 특성을 갖는 충격절연장치의 최적화된 응답 변위를 (d)에서 보여주고 있다. 또한 제약조건 50g의 결과의 한계 성능 최적화 문제의 결과 역시 Fig. 5.4에서와 같이 최적화된 결과와 제약조건과 응답 변위를 나타내고 있다.

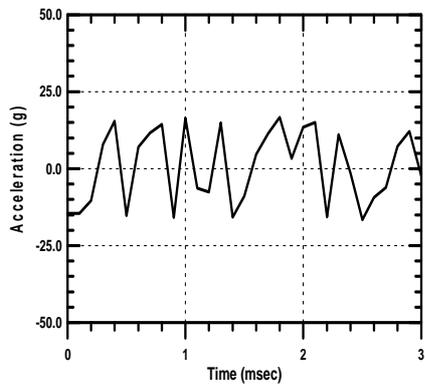
또한 설계 파라미터 최적화 문제에서도 동일한 방법으로 응답 가속도의 제약 조건을 18g와 50g로 나누어 최적화 결과를 도출하였으며 결과는 Fig. 5.5와 Fig. 5.6으로 나타내었다.



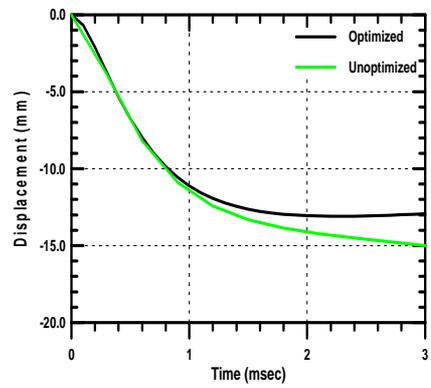
(a) Generation VS Objective function



(b) Generation VS Optimum Forces

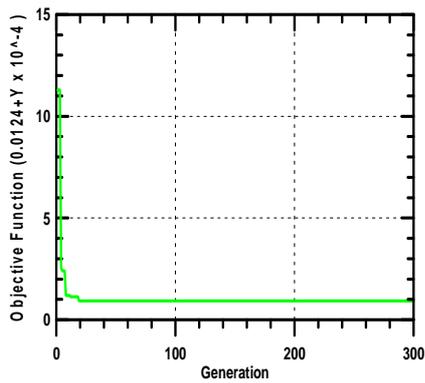


(c) Respond acceleration with isolator

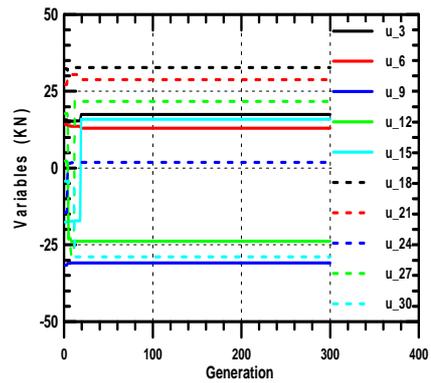


(d) Performance of optimized result

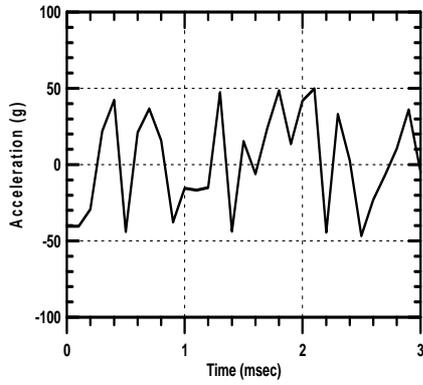
Fig. 5.3 Time-optimal results(Con. 18g)



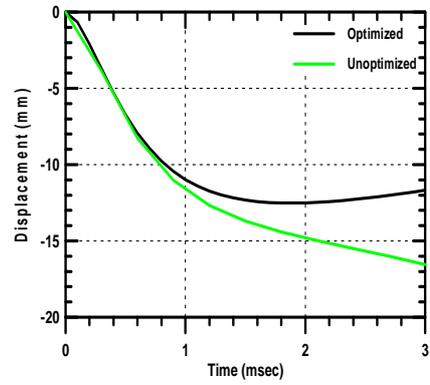
(a) Generation vs objective function



(b) Generation vs optimum forces

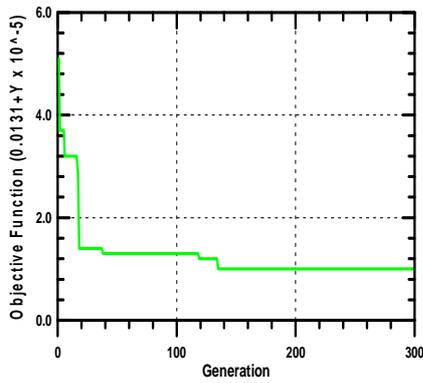


(c) Respond acceleration with isolator

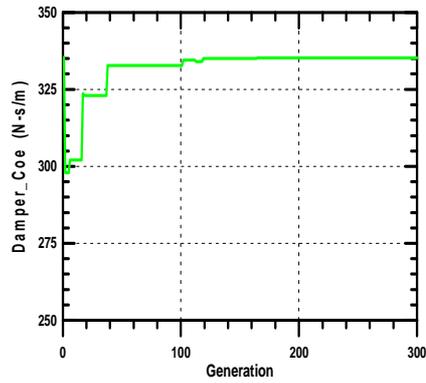


(d) Performance of optimized result

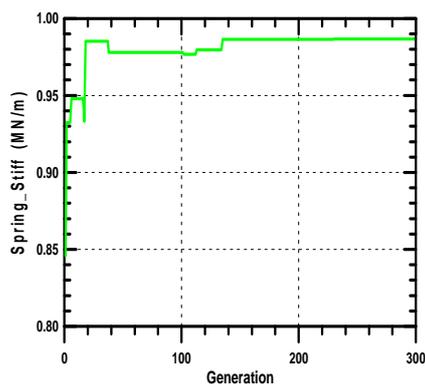
Fig. 5.4 Time-optimal results(Con. 50g)



(a) Generation vs objective function



(b) Generation vs damper parameter



(b) Generation vs spring parameter

Fig. 5.5 Design-parameter results (Con. 18g)

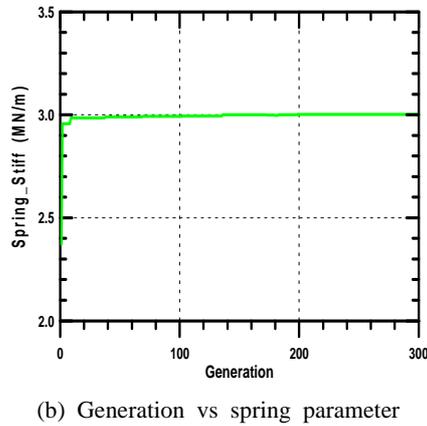
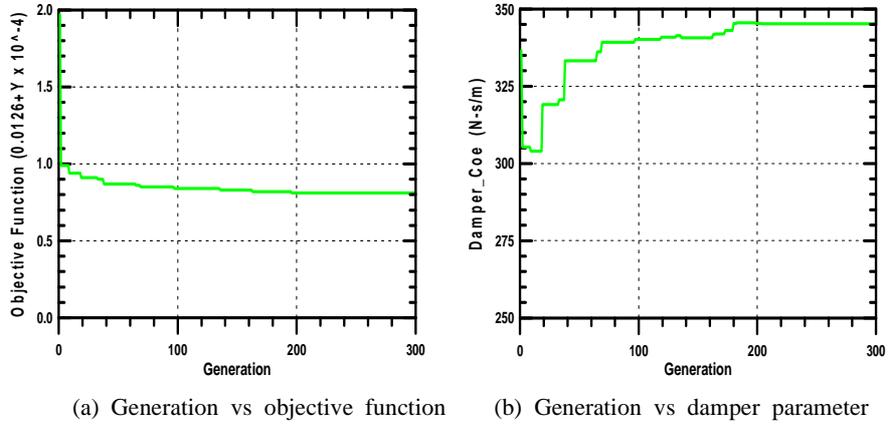


Fig. 5.6 Design-parameter results (Con. 50g)

설계파라미터 최적화 역시 유전자 알고리즘에서 최적화된 값을 300세대의 값을 최종적으로 선택하였다.

5.2.2 국제표준기구의 인체 모델

다음은 승조원의 인체모델은 국제표준기구에서 인용한 충격절연 장치의 최적화 결과이다. 이것은 앞서 제시된 최적설계 문제 정식화에서 2자유도로 이뤄진 모델이다. 승조원의 자세에 따라 서있는 자세와 앉아있는 자세로 나누어 문제의 결과를 도출하였으며, 이 모델 역시 한계 성능 최적화 문제와 설계 파라미터 최적화 문제로 정식화하였다.

앞서 2장에서 설명한바와 같이 m_2 를 승조원 척추를 포함한 신체의 질량, m_3 를 승조원의 머리를 나타내는 질량으로 하였다. 따라서 최적화 결과에서 승조원의 충

격 손상기준을 만족하는지 여부를 알아보는 방법으로 시간이력에 따른 척추의 응답 가속은 m_2 의 절대가속의 결과를 검토하였으며, 머리의 응답 가속은 m_3 의 절대 가속도 결과를 검토하였다. 또한 승조원과 충격절연 장치를 연결해주는 중간질량 m_1 을 설계 제약 조건으로 설정하였기 때문에 강체질량 인체 모델에 비해서 설계변수가 더 추가되었다. 먼저 승조원의 서있는 자세의 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 결과는 Fig. 5.7과 같다. 강체질량 인체 모델에 비해서 목적함수를 계산하는데 복잡하므로 수렴하는 세대가 증가하였다.

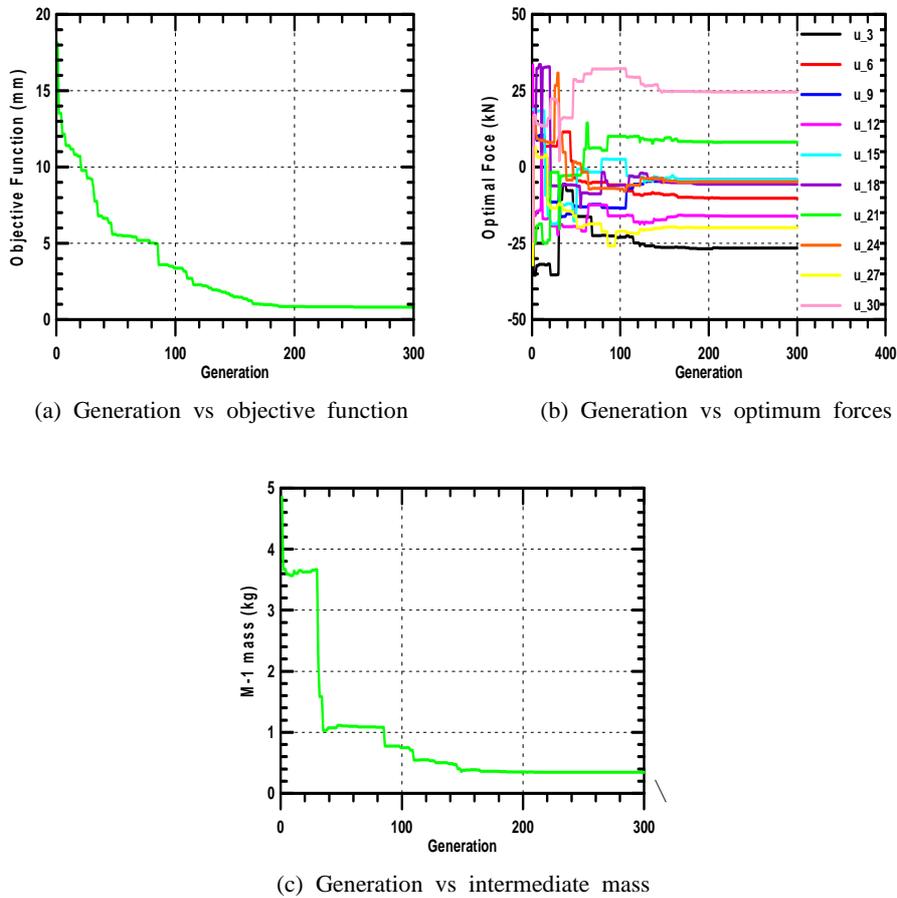
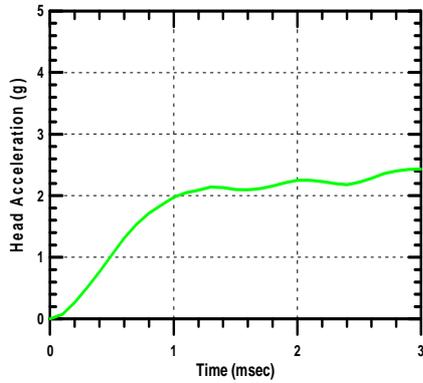
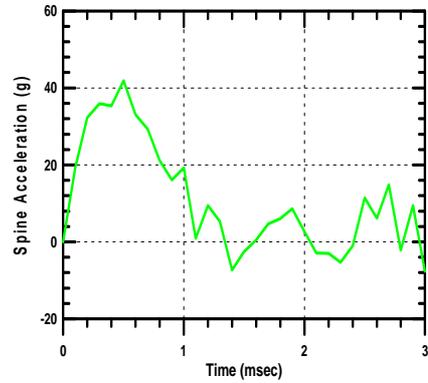


Fig. 5.7 ISO, Human body time-optimal results(standing)

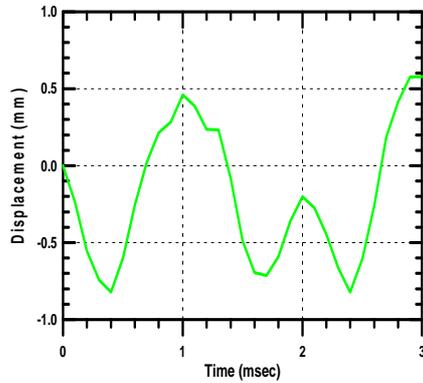
Fig. 5.8은 최적화된 충격절연 장치가 승조원의 충격 손상을 만족하는지 검증하기 위해서 승조원을 이상화시킨 각 질량의 시간 이력에 따른 가속도와 최적화된 충격절연 장치의 응답 변위를 나타낸 것이다.



(a) Respond head acceleration



(b) Respond spine acceleration

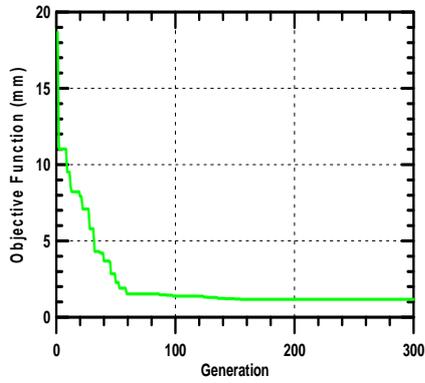


(c) Shock optimum isolator respond displacement

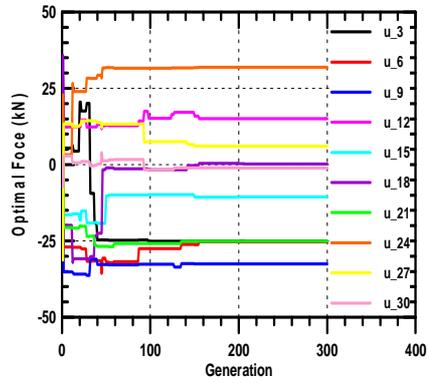
Fig 5.8 Respond results of ISO-human body and isolator(standing)

Fig 5.8을 보면 알 수 있듯이 승조원의 충격 손상 기준인 척추의 $50g$ 이하와 머리의 $18g$ 이하 모두 만족하며, 강체질량 인체 모델에 비해 응답 변위가 상당히 안정적임을 알 수 있다.

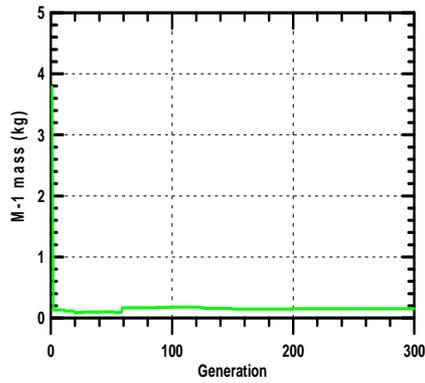
이와 동일한 방법으로 적용한 앉아있는 자세의 경우도 Fig. 5.9와 Fig. 5.10에 나타내었다. 모두 승조원의 충격 손상 기준을 만족하고 있으며, 승조원의 모델 파라미터의 값이 다르므로 서있는 경우의 결과와 약간 다른 경향을 보이고 있다.



(a) Generation vs objective function

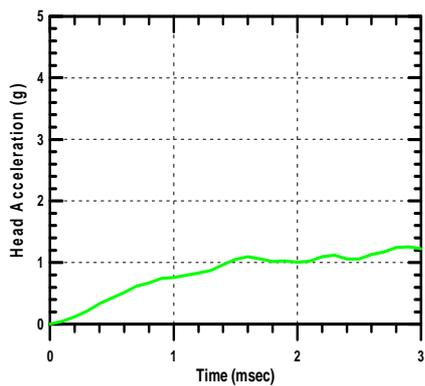


(b) Generation vs optimum forces

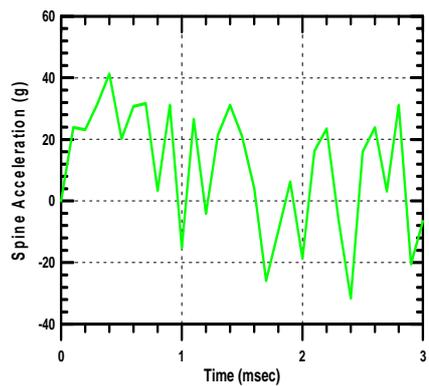


(c) Generation vs intermediate mass

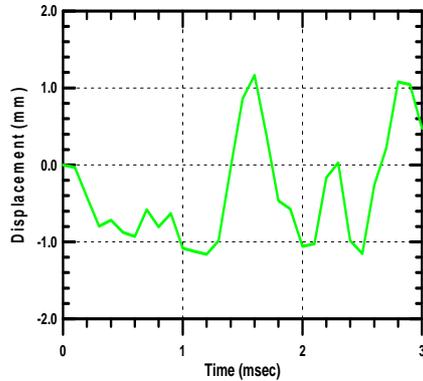
Fig. 5.9 Optimum results of ISO-human body(sitting)



(a) Respond head acceleration



(b) Respond spine acceleration

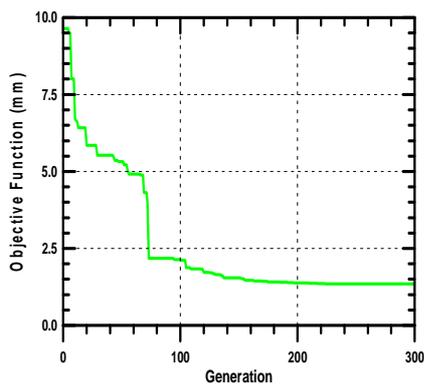


(c) Shock optimum isolator respond displacement

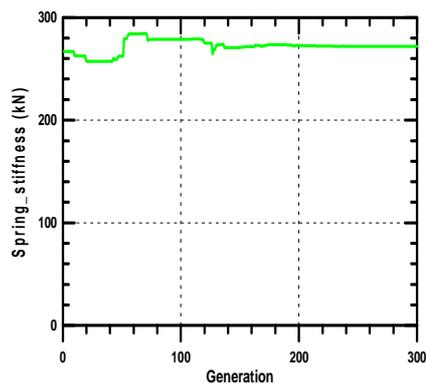
Fig 5.10 Respond results of ISO-human body and isolator(sitting)

Fig. 5.10에서도 알 수 있듯이 서있는 자세와 동일하게 최대 응답 변위가 강체질량 인체 모델에 비해 작음을 알 수 있다.

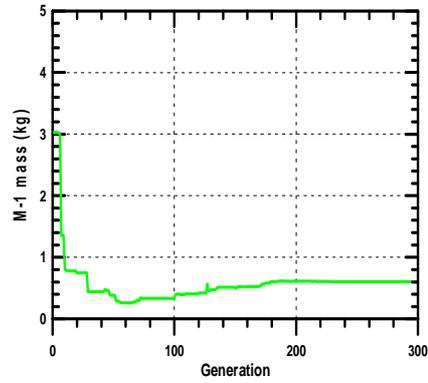
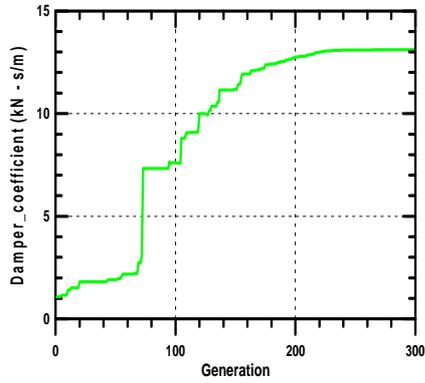
다음은 충격절연 장치의 형태를 규정하여 최적화 문제를 국제표준기구 인체모델에 적용시킨 결과이다. 국제표준기구 인체 모델을 사용한 최적화 문제는 기본적으로 한계 성능 최적화 문제와 동일하게 승조원의 충격손상 기준인 응답가속도의 제약 조건을 만족해야 하며, 본 논문에서 충격절연 장치의 형태를 선형 감쇠상수와 선형 스프링 상수로 치환하였기 때문에 설계변수 스프링 상수와 감쇠 상수, 그리고 한계 성능 최적화 문제와 동일하게 승조원과 충격절연 장치를 연결해주는 중간질량 m_1 의 값들을 구하는 문제이다. 따라서 서있는 자세 Fig. 5.11, 그리고 앉아 있는 자세는 Fig. 5.12로 나타내었다.



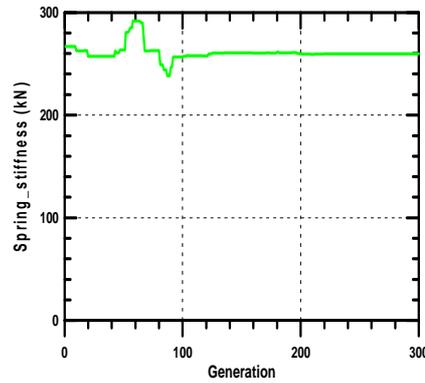
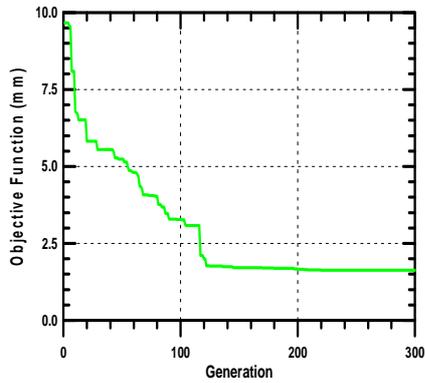
(a) Generation vs objective function



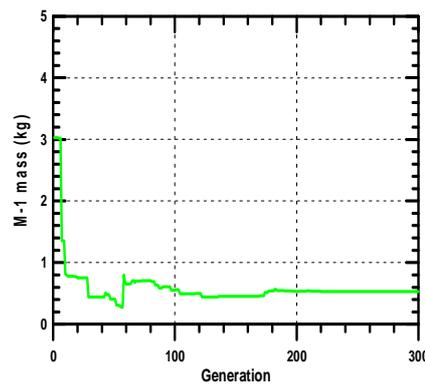
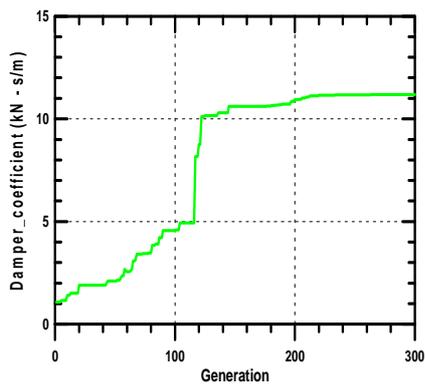
(b) Generation vs spring stiffness



(c) Generation vs damper coefficient (d) Generation vs intermediate mass
 Fig. 5.11 Design-parameter results of ISO-human body(standing)



(a) Generation vs objective function (b) Generation vs spring stiffness



(c) Generation vs damper coefficient (d) Shock optimum isolator added mass
 Fig. 5.12 Design-parameter results of ISO-human body(sitting)

5.3 최적화 결과 비교

앞서 제시된 강체질량의 인체모델의 경우와 국제표준기구에서 제시된 인체모델에 따른 최적화 결과의 타당성을 검증하기 위해서 한계 성능 최적화 문제와 설계 파라미터 최적화 문제의 결과 비교하여 보았다.

5.3.1 강체질량 인체모델의 결과 비교

최적화 문제의 정식화 과정에서 한계 성능 최적화 문제는 충격절연 장치의 형태를 규정하지 않고 오직 주어진 제약조건(응답가속도)에 따라 최적화의 값을 구하는 문제로 모든 충격절연 장치의 가장 이상적인 응답 변위 값을 구할 수 있는 최적화 문제이다. 따라서 이러한 최적화 문제의 정식화를 통해서 얻어진 결과를 검증하기 위해서 비교하였다. 아래 결과인 Fig. 5.13은 제약 조건 $18g$ 의 경우 한계 성능 최적화 결과와 설계파라미터 최적화결과를 통해 얻어진 충격절연 장치의 응답을 비교한 것이다.

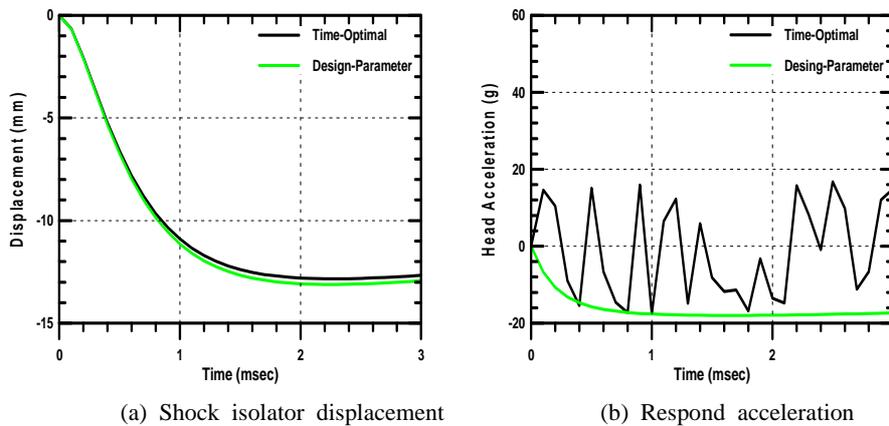


Fig. 5.13 Comparison time-optimal with design-parameter(Con. 18g)

Fig. 5.13의 (a)를 통해서 한계 성능 최적화 결과의 응답 변위가 차이가 아주 적지만 설계파라미터의 최적화 결과를 통해서 얻어진 응답 변위보다 작음을 알 수 있으며, (b)의 그래프를 통해 시간 이력에 따른 응답가속도가 승조원의 손상기준을 두가지 최적화 문제 만족하고 있다. 또한 제약조건 $50g$ 의 결과인 Fig. 5. 14의 경우도 Fig. 5.13과 비슷한 경향을 나타내고 있다.

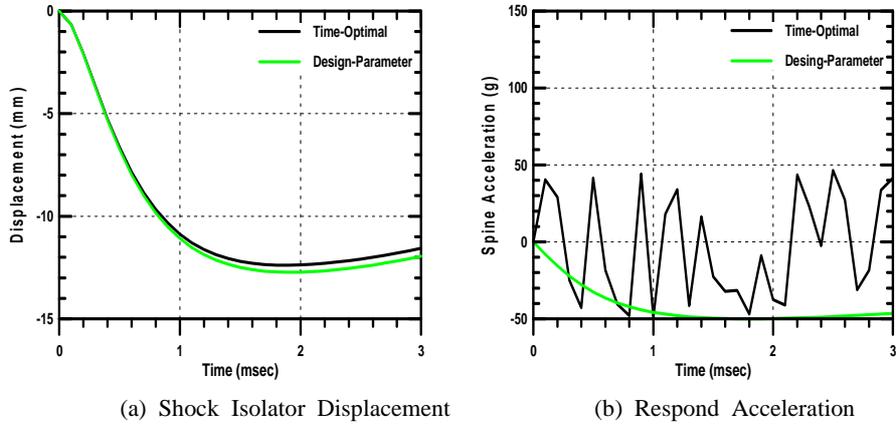


Fig. 5.13 Comparison time-optimal with design-parameter(Con. 50g)

한편 한계 성능 최적화 문제와 설계파라미터의 최적화된 결과의 타당성을 검증하기 위한 다른 방법으로 응답가속도의 제약조건을 $10g \sim 50g$ 까지 설정하여 그 값을 정규화 하여 비교해 보았다.

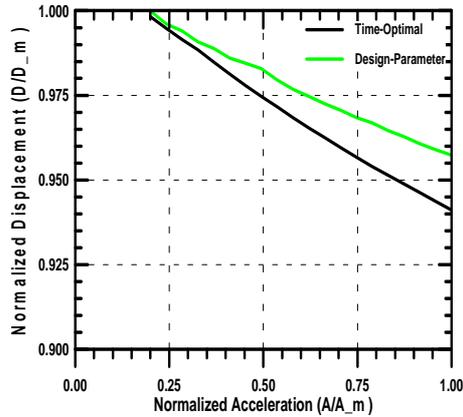


Fig. 5.14 Comparison time-optimal curve with design-parameter curve

Fig. 5.14에서 보듯이 동일한 충격가속도에서 최적의 한계특성을 갖는 충격 절연장치를 사용하면 최적의 특성을 갖는 선형 충격 절연장치를 사용하는 경우보다 충격 절연장치의 변위를 더욱 줄일 수 있으며, 허용 충격가속도가 클수록 개선 폭이 증가함을 알 수 있다.

5.3.2 국제표준기구 인체모델의 결과 비교

또하나의 해석모델인 국제표준기구의 인체모델을 이용한 최적화 결과 역시 한계 성능 최적화 결과와 설계파라미터 최적화 결과를 비교하여 보았다. 인체의 모델이 강제질량 인체모델에 비해 구체적이기 때문에 각각의 모델에 따라서 시간이력에 따른 응답가속도를 척추와 머리의 가속도로 나누어서 비교하였다. 먼저 Fig. 5.15의 경우 승조원이 서있는 경우 시간이력에 따른 응답 비교결과를 나타낸 것이다.

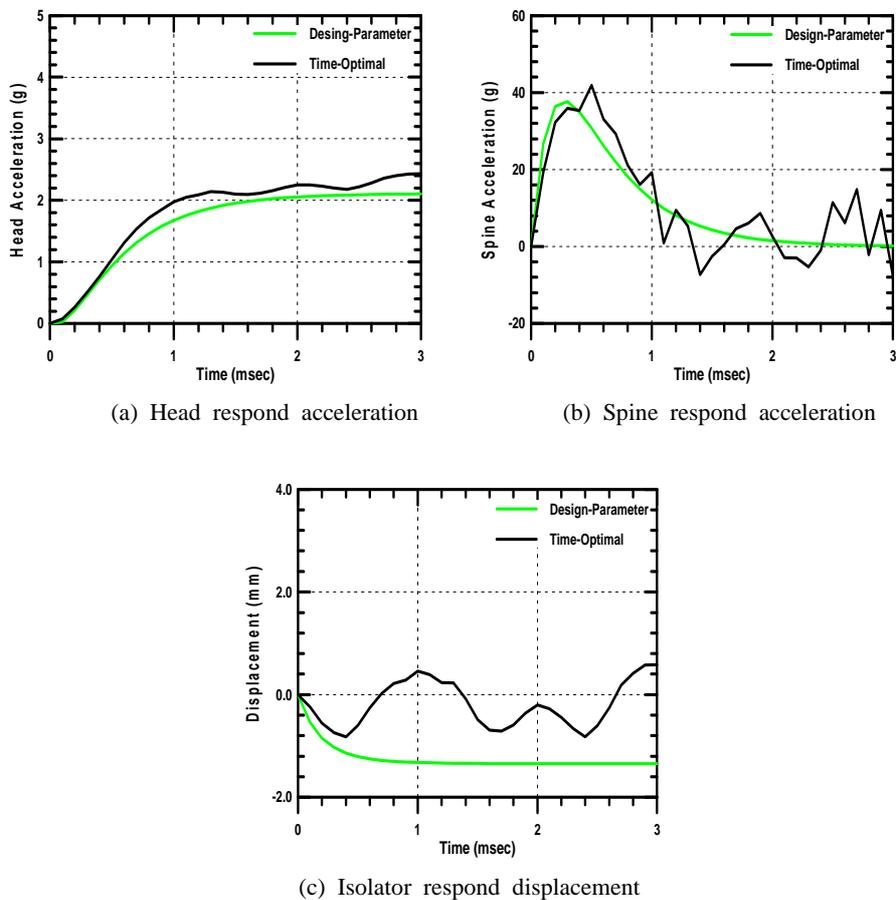
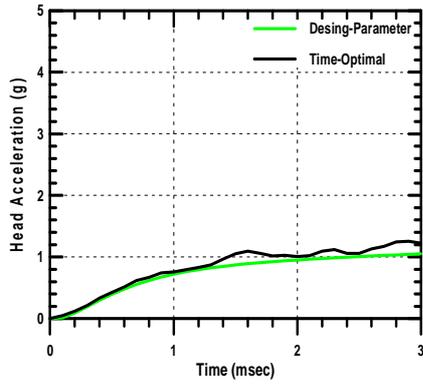


Fig. 5.15 Comparison time-optimal with design-parameter(standing)

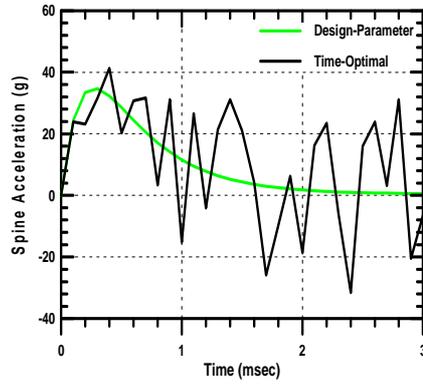
Fig. 5.15를 통해서 알 수 있듯이 각 신체의 손상 기준을 만족하고 있으며, 응답 변위의 최대 절대값은 한계 성능 최적화의 결과가 설계파라미터의 값보다 작음을 확인 할 수 있다.

Fig. 5.16은 승조원의 앉아 있는 자세의 비교 결과를 나타낸 것이며, 아래 결과

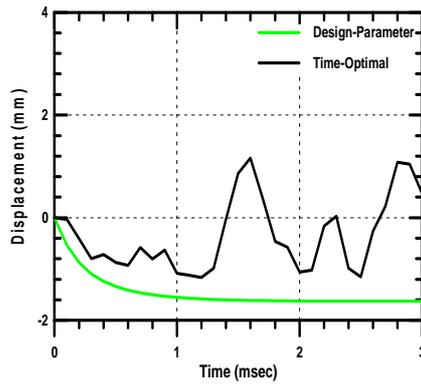
역시 승조원의 충격손상 기준을 만족하고 있으며, 응답 변위 역시 한계 성능 최적화 결과가 설계파라미터 결과 값 보다 작음을 알 수 있다.



(a) Head respond acceleration



(b) Spine respond acceleration

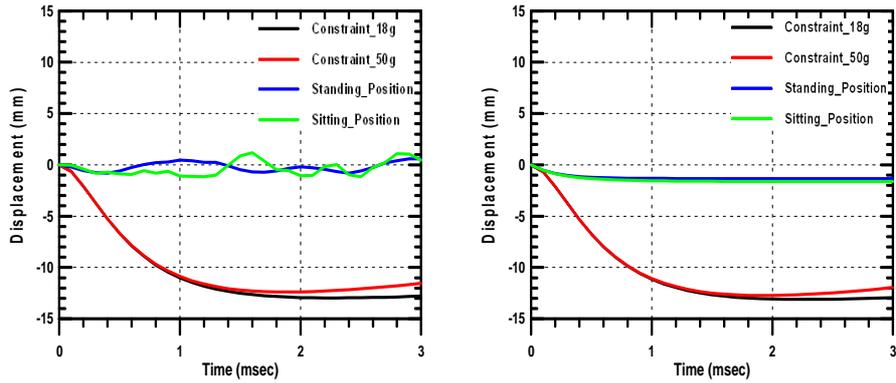


(c) Isolator respond displacement

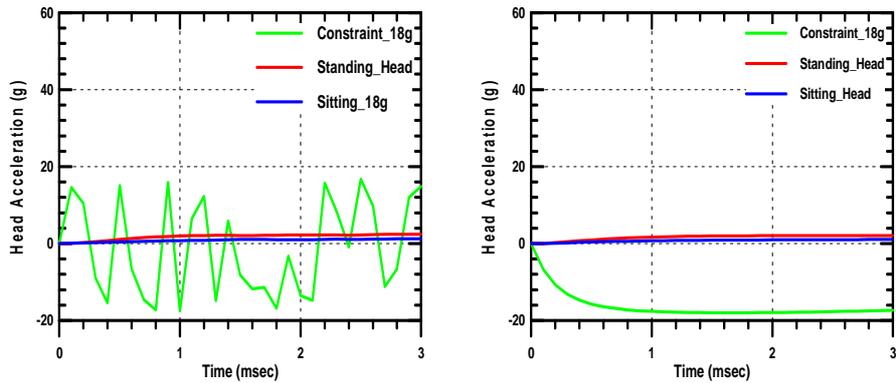
Fig. 5.16 Comparison time-optimum with design-parameter(sitting)

5.3.3 강체 질량과 국제표준기구 인체모델 결과 비교

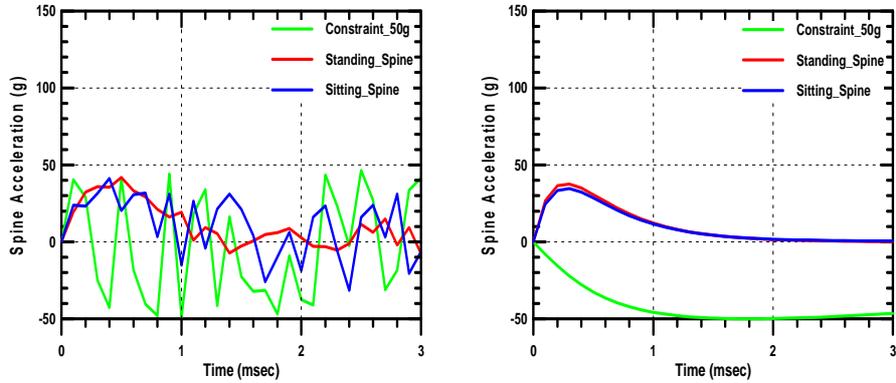
본 논문에서 제시된 강체 질량의 인체모델과 국제표준기구에서 제시된 인체모델의 결과를 비교하였으며, Fig. 5.17로 나타내었다.



(a) Isolator displacement(time-optimal) (b) Isolator displacement(design-parameter)



(c) Human acceleration(time-optimal) (d) Human acceleration(design-parameter)



(e) Human acceleration(time-optimal) (f) Human acceleration(design-parameter)

Fig. 5.17 Comparison rigid mass human body with ISO-human body

비교하는 방법으로는 강체질량의 인체 모델의 경우 승조원을 1자유도로 이상화 하였기 때문에 시간 이력에 따른 응답 가속도의 비교 방법으로는 응답제약조건 $18g$ 를 국제표준기구 인체 모델의 머리부분 가속도와 비교하였고, $50g$ 의 경우 척추 부분 가속도와 비교하였다.

위의 그림의 결과에서도 확인 할 수 있듯이 인체모델의 방법에 따라 아주 상이한 최적화의 결과를 얻을 수 있다는 것을 확인 할 수 있다. Fig 5.16의 결과를 Table 5.2로 정리하여 나타내었다.

Table 5.2 Comparison rigid mass-human body with ISO-human body

Kind of Model	Rigid Mass-Human Body				ISO Human Body			
	$18g$		$50g$		Standing		Sitting	
Analysis Cases	Time-Optimal	Design-Parameter	Time-Optimal	Design-Parameter	Time-Optimal	Design-Parameter	Time-Optimal	Design-Parameter
$Max x(\dot{\theta}) $	13.08 (mm)	13.12 (mm)	12.5 (mm)	12.61 (mm)	0.82 (mm)	1.35 (mm)	1.16 (mm)	1.63 (mm)
k	-	986.69 (kN/m)	-	2865.5 (kN/m)	-	272.08 (kN/m)	-	259.71 (kN/m)
c	-	335.22 (N-s/m)	-	345.3 (N-s/m)	-	13108 (N-s/m)	-	11175 (N-s/m)
m_1	-	-	-	-	0.35 (kg)	0.60 (kg)	0.15 (kg)	0.53 (kg)

제 6 장 결론 및 향후 과제

본 연구에서 수중폭발 충격으로부터 승조원을 보호하기 위한 충격절연 장치의 최적화 연구기법에서 일련의 수치계산을 통해서 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 유전자 알고리즘을 사용하여 수중폭발 충격하중으로부터 승조원을 보호하기 위한 충격절연 장치의 한계성능 및 설계파라미터 최적화 기법을 제시하였다.
- 2) 일련의 수치계산을 통해 2가지 최적설계 방법에 따른 한계성능 특성을 비교·검토하여 한계 성능 특성을 파악하였다.
- 3) 인체 모델을 강체질량 인체 모델과 국제표준기구의 인체모델을 인용하여 최적화 문제에 적용해 봄으로써 인체 모델에 따라 아주 상이한 결과를 얻을 수 있다는 것도 확인하였다.

최적화 문제의 정식화를 위해 실제문제를 매우 단순화 시켰지만, 본 논문에서 제시한 방법은 설계 요구조건을 만족하는 최적성능을 갖는 충격 절연장치의 개념설계에 유용하게 활용될 수 있으리라 판단된다.

그러나 이러한 연구 분야가 초기의 연구분야이므로 보다 향상을 시켜야할 부분도 있으리라 판단된다. 먼저 승조원의 손상기준을 나타내는 방법이 척추와 머리부분만 국한되지 않고 보다 구체적으로 제시되어야 할 필요성이 있으며, 이에 따른 적절한 인체 모델링 방법도 연구가 되어야 한다. 또한 본 논문에서는 수중폭발 충격 하중조건을 Taylor의 무한평판 이론을 사용하여 적용하였지만 보다 현실성을 반영하기 위해서 3차원 수중폭발 전선 충격응답을 통해 계산된 충격하중을 사용하여 보다 구체적이고 체계적인 최적화 기법에 대한 노력이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] BV043, "Shock Resistance-Experimental and Mathematical Proof," Section 0437 (in English), 1985.
- [2] Lie X. X. et al., "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.
- [3] Oglesby, D. B. and Shin, Y.S., "Simulation of Human Male and Female Biodynamic Response to UNDEX Events" Proceedings of the 69th Shock and Vibration Symposium, 1998.
- [4] Scavuzzo, R. J., and Pusey, H.C., Naval Shock Analysis and Design, The Shock and Vibration Information Analysis Center, 2000.
- [5] Leonard D. S., "Fluid Interaction and Cavitation Effects on A Surface Ship Model due to An Underwater Explosion" Naval Postgraduate School MO., CA., 1996.
- [6] Sevin, E. and Pilkey, W. D., Optimum Shock and Vibration Isolation, The Shock and Vibration Information Center, 1971.
- [7] "Mechanical vibration and shock Vol. 2", International Organization for Standard, 1995.
- [8] COERMANN, R. "The Mechanical Impedance of the Human Body in Sitting Standing Position at Low Frequencies," Human Factor, 1962.
- [9] EDWARD, R. G. and LANGE, K. O. "A Mechanical Impedance Investigation of Human Response to Vibration." Wenner-Gren Aero. Res. Lab. Aerosp. Med. Div. AMRL-TR-64-91, Aerospace Mechanical Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, USA., 1964.
- [10] 진 강규, "유전자 알고리즘과 그 응용," 교우사, 2000.
- [11] Godberg, D. E. "Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning," Addison-Wesley Publishing Co. Inc., N. Y., 1989.
- [12] Wright, A. "Genetic Algorithm for Real Parameter Optimization, Fondation of Genetic Algorithm 1, G. J. E. Rawlin(Ed.), Morgan Kaufmann Publisher, San Mateo, CA., 1991.

- [13] Eiband, A.M., "Human Tolerance to Rapidly Applied Acceleration. A Survey of the Literature," NASA Memo No. 5-19-59E, 1959.
- [14] 정 정훈, "내충격 강화 지침서", 한국 기계 연구원, 2003.
- [15] 김 민찬, 윤 도영, "Matlab을 이용한 수치해석 및 그래프" 도서출판 아진, 2000.
- [16] 류 염선, 임 오강, 박 경진, "최적 설계 입문", 반도출판사, 1994.
- [17] 박 노길, 박 성태, 손 권, 이 건명, 이 시복, 정 의봉, 한 상보, "기계 진동학", 피어슨 에듀케이션 코리아, 2002.
- [18] 용 호택, 박 익근, 박 장식, "Matlab 공학 응용", 도서출판 아진, 1999.

감사의 글

지난 시절 여러 교수님들과 선배님들의 가르침 속에서 항상 무언가를 갈구하며 보냈던 시간이었습니다. 아직까지 부족한 것이 많아 더 배우고 더 느껴야 하기에 새로운 위치에서 시작하는 것이 막연하고 두렵게만 느껴지지만 그 동안 배움속에서 느꼈던 것을 바탕으로 새롭게 정진하는 기회를 만들고 싶은 맘이 간절하기도 합니다.

오늘 제가 있기까지 부족한 저를 항상 깊은 관심속에서 모자랐던 부분을 타일러 주시며 지도해주신 이 상갑 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 특히 교수님께서 보여주신 학문에 대한 열정은 훗날 제가 인생을 살아가는데 있어서 커다란 교훈이 되리라 생각합니다.

바쁘신 와중에도 멀리 대전에 계시면서 저에게 가르침을 주시면서 논문에 조언을 아끼지 않으신 한국 기계연구원의 정 정훈 박사님께도 깊은 감사를 드립니다. 또한 이 논문이 나오기까지 바쁘신 일정에 불구하고 논문 심사를 해주신 박 한일 교수님과 조 종래 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고 이 논문을 쓰면서 어려웠던 부분이 생길 때마다 찾아갔을 때 친절하게 설명해 주신 진 강규 교수님께 감사를 드립니다.

더불어 학부시절부터 오늘까지 저에게 개인적으로 관심을 가져주신 학부 교수님들께도 깊은 감사를 드립니다.

짧은 실험실 생활속에서 부족한게 많아서 배울게 너무나 많았던 저를 오늘까지 이끌어준 정일형과 우열이형, 정욱이형, 처음 실험실생활을 했을 때 모든게 낯설고 신기하기만 했던 저에게 친절하고 자상하게 대해준 영진이형, 홍수형, 명근이형에게도 감사의 뜻을 전하고 싶습니다. 그리고 대학원 생활동안 항상 나를 편안하고 때론 친구처럼 대해주며 맘을 같이 했던 정대 선배, 인호 선배, 여훈 선배에게도 감사를 드립니다. 또한 부족한 선배 밑에서 오늘날까지 잘 따라주었던 승영이, 정오에게도 고마움의 뜻을 전하고 싶습니다.

오래 전부터 항상 나와 뜻을 같이 해준 고등학교 친구 귀준이, 그리고 해양시스템 공학부 동기들에게도 고마움을 전하고 싶습니다.

그리고 마지막으로 저를 항상 한결같은 맘으로 키우신 아버지와 어머니, 당신들의 주는 사랑을 배움으로 삼고 살아간다 다짐을 하며, 다시 한번 애써주신 은혜 감사드립니다. 또한 부모님처럼 저를 보살펴준 큰형인 철용이형, 둘째형인 동일이형, 그리고 셋째형인 태영이형, 그리고 두분 형수님, 그리고 귀염둥이 조카들에게도 이 논문을 바치고 싶습니다.