수중 배터리 추진시스템 효과도 시뮬레이션에 관한 연구

고용석* · 윤원영**

A System Effectiveness Simulation Model for Underwater Battery Propulsion Systems

Yong-Seog Ko · Won-Young Yun

〈Abstract〉

In this paper, a simulation model is proposed to evaluate the system effectiveness of underwater battery propulsion systems which consist of motors, main switchboard, generators and batteries.

The various operating environments such as emergency situations, equiptment's failure and repair, and system performance degradation due to equiptment's failures affect the system effectiveness and the environment elements are considered as the input parameters in the simulation model. Some simulation results with estimated data are studied.

1. 서 론

배터리 추진시스템(Battery Propulsion System)은 전통적인 잠수함의 추진시스템으로 수중에서는 배터리로 추진하고 특정 시간 또는 특정 수준까지 배터리를 방전(Discharge)한 후에는 수면 근처로 부상한 후 디젤발전기(Diesel Generator)로 방전된 배터리량을 충전(Recharge)시키는 시스템이다. 이와같이 배터리의 충전과 방전을 주기적으로 수행하므로써 잠수함은 장기간 임무 수행이 가능하게 된다. 그러나 발전기의 높은 소음은 잠수함의 음향센서 성능을 급격히 떨어뜨려 목표물 탐지를 어렵게 하기 때문에 배터리를 충전시키는 스노클(Snorkel)항해 시간은 가능한 짧아야 한다. 스노클비(Snorkel Ratio)는 잠수함이 특정 속도로 계속 항해할 때 전체 항해시간에 대한 스노클 항해 시간의 비율로서 대표적인 추진시스템의 성능평가 척도로 사용되어져 왔다.[1,2] 그러나 시스템의 고장과 수리, 운용상황에 따른 속도 변경, 해상상태의 변화 등에 따라 추진시스템의 배터리 충·방전 능력은 변하기 때문에 보다 실제적인 성능을 평가하기 위해서는 다양한 운용 환경들을 고려할 수 있는 평가모델이 필요하다.

무기체계 분야에서는 시스템의 전체적인 성능을 평가하는 척도로서 시스템 효과도(System Effectiveness)를 많이 사용하고 있다. 시스템 효과도는 시스템의 목적하는 임무의 달성 정도로서 시스템의 용도 또는 목적에 따라 성능발휘도(Capability), 가용도(Availability), 의존도(Dependability), 신뢰도(Reliability), 정비도(Maintainability), 환경효과(Environmental Effects) 등 다양한 성능요소들을 고려하여 산출되어지고 있는데[3,4], Tillman등[5]은 시스템 효과도 관련 연구동향을 조사분석하고 다양하게 사용되어지고 있는 관련 용어등을 검토 분류하였다. 그러나 현재 추진시스템의 임무 수행 능력을 평가하기 위한 시스템 효과도 분야에 대한 연구는 미흡한 실정이며, 일부 잠수함 교전 시뮬레이션 모델[6]에 추진시스템 모델이 서브루틴으로 포함되어 있으나 교전 시뮬레이션의 목적이 추진성능보다는 교전상황하에서의 잠수함의 전투 성능 평가에 있기 때문에 포함된 추진 시스템 모델에서는 단순화된 충방전 알고리즘을 사용하고 있고 시스템의 고장과 수리 그리고 고장으로 인한 성능저하 효과 등은 고려하지 않고 있다.

* 국방과학 연구소 함정 체계실

** 부산대학교 산업공학과 기계기술연구소

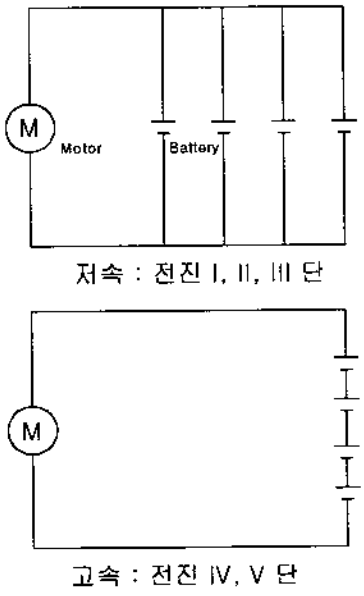
본 논문에서는 추진시스템의 다양한 운용환경을 고려하여 추진시스템의 임무 수행 능력을 평가할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발한다. 이를 위하여 추진시스템을 구성하는 개별 장비들의 고장과 수리, 고장시 발생하는 시스템의 성능 저하 현상, 항해모드 또는 속도의 변화에 따른 배터리 및 발전기의 충 · 방전 특성 등을 자세히 모델링하고, 해상상태, 긴급상황, 상황에 따른 함속변경, 스노를 항해시간 등의 운용환경들을 고려한다.

그리고 개발된 시뮬레이션 모델을 이용하여 운용조건, 장비 고장율 및 발전기 수량의 변화에 따른 추진시스템의 임무 수행 결과를 분석하여 개발된 모델이 추진시스템 운용 개념 정립, 실제 운용 환경을 고려한 개별장비 신뢰도 설계, 시스템을 구성하는 개별장비 설계 성능 평가 등에 사용 가능함을 보인다. 여기서 추진시스템의 임무는 잠수함 임무수행 전 기간 동안 요구하는 함속도의 추진동력을 요구하는 시간동안 지속적으로 공급하는 일이라고 가정한다.

2. 배터리 추진시스템 모델링

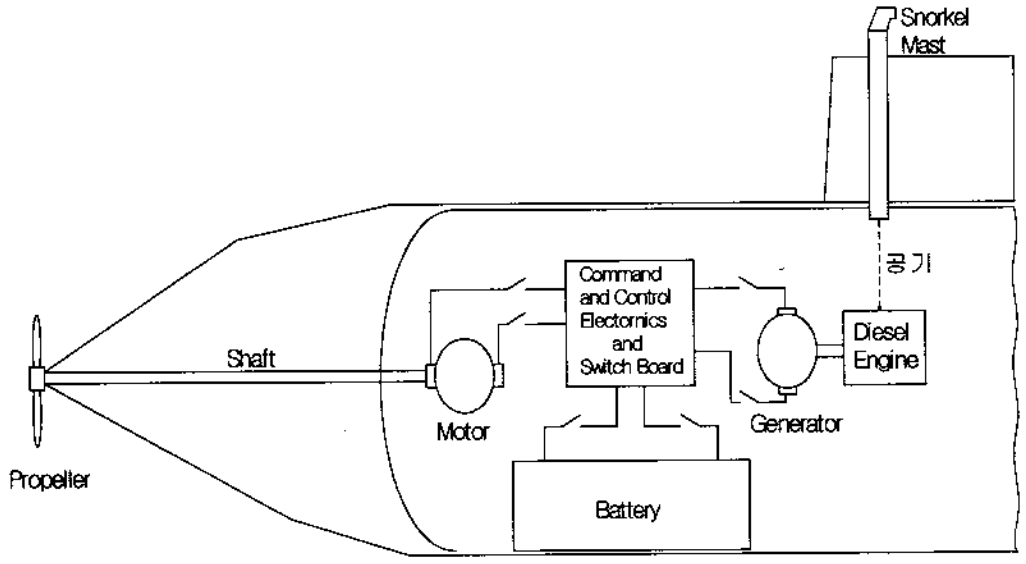
2.1 추진시스템 개요

일반적인 배터리 추진시스템은 〈그림 1〉과 같이 구성된다. 수중에서 추진할 때는 모터(Motor)에서 요구하는 추진전력을 배터리에서 공급하게 되는데 〈그림 2〉와 같이 속도에 따라 배터리 연결구조가 변하게 된다. 배터리 충전시는 〈그림 3〉와 같이 디젤발전기에서 배터리 충전 전력 뿐만 아니라 모터의 추진전력도 동시에 공급하게 된다.

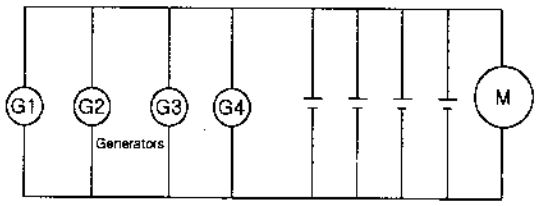


〈그림 2〉 방전 회로

배터리의 용량은 〈표 1〉과 같이 방전전류 또는 방전 전력



〈그림 1〉 수중 배터리 추진 시스템



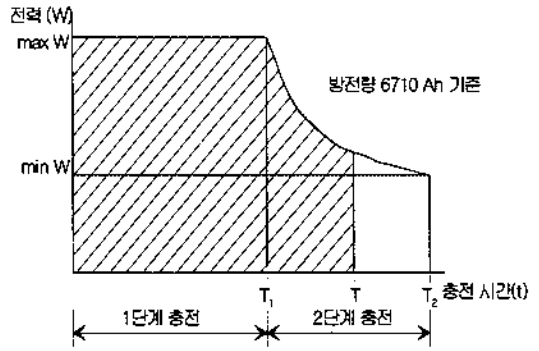
〈그림 3〉 충전 회로

에 따라 크게 다르며 고전류가 될 수록 용량은 감소한다.

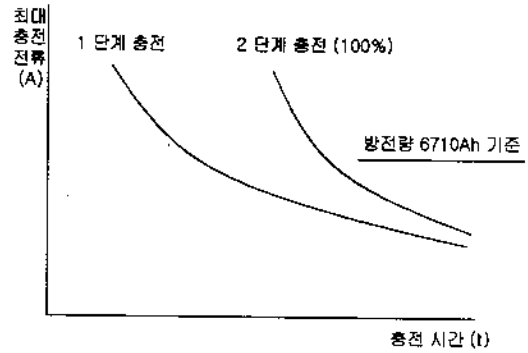
항해시 배터리 충전은 〈그림 4〉와 같이 2단계로 구분하여 수행되어지며 2단계 충전이 완료되면 배터리는 거의 100% 까지 충전되어진다. 또한 1, 2단계의 충전시간은 발전기의 최대 충전전류와 기 방전된 배터리량에 따라 〈그림 5〉, 〈그림 6〉과 같이 변화되어진다.[6,7,8]

〈표 1〉 Type 45PS 13B 배터리 용량

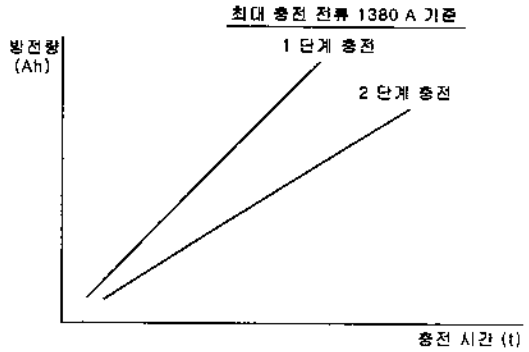
방전율(h)	방전전류(A)	용량(Ah)	방전전력(w)	용량(wh)
1.25	5163	6454	8880	11100
1.5	4457	6685	7800	11700
2	3510	7020	6300	12600
3	2555	7665	4700	14100
5	1672	8360	3160	15800
10	938	9380	1810	18100
20	513	10260	1000	20000
50	220	11000	432	21600
100	114	11400	224	22400
137.5	84	11590	166	22825



〈그림 4〉 배터리 충전 곡선



〈그림 5〉 충전 전류 대 충전시간 곡선



〈그림 6〉 방전량 대 배터리충전시간 곡선

2.2 배터리 방전 모델링

배터리 용량이 방전전류에 따라 변하기 때문에 배터리 방전량은 다음과 같은 절차에 의하여 계산되어진다.

i) 모터 및 함내 소요전력 추정

○ 모터 소요전력

· 수중항해시[9]

EHP

$$= 0.00872 \times C_T \times \left| 5.6 + 0.26 \times \frac{L}{D} \right| \times \nabla^{2/3} \times V^3$$

$$C_T = \frac{0.075}{(\log_{10}(N_R)-2)^2} + \frac{0.000789}{L/D-1.3606} + 0.0008,\ N_R = \frac{VL}{\nu}$$

여기서 EHP : 유효 마력(Effective Horse Power)

C_T : 저항 계수(Resistance Coefficient)

L : 함의 길이, D : 함의 폭

∇ : 배수용적(Volume), V : 함속도

N_R : Reynold Number, ν : 점성(Viscosity)

$$MKW = \frac{EHP}{\eta_S \cdot \eta_M} \times 0.7457$$

여기서 MKW : 모터 소요 전력(Kw)

η_S : 추진 효율(Propulsion Coefficient)

η_M : 모터 효율(Motor Coefficient)

· 스노클 항해시

MKw = 1.5 × MKw(수중 항해시)

○ 함내 소요전력(Ship_Kw)

· 수중항해시 Ship_Kw = 0.5 ×(배수량/15 + 30)

· 스노클 항해시 Ship_Kw = 배수량/15 + 30

ii) 배터리 방전 전류 계산

배터리 고장을 고려한 방전 전류는 아래식과 같이 계산되어 진다.

$$I_T = \frac{\text{모터 소요전력} + \text{함내 소요전력}}{\text{속도별 평균 전압}}$$

$$I_v = \frac{I}{n} \text{ (저속)}, \qquad I_v = I \text{ (고속)}$$

여기서 I_T : v 속도에서의 배터리 총 방전전류

I_v : v 속도에서의 배터리 한 개의 방전전류

n : 현재 고장나지 않은 배터리 댓수

iii) 배터리 방전량 계산

v_1 속도로 Δt_1 시간동안 항해 후 v_2 속도로 변속하여 Δt_2 시간동안 항해를 할 경우 $\Delta t_1 + \Delta t_2$ 시간후의 배터리 방전량은 속도에 따른 배터리 용량 변화 때문에 다음과 같이 3단계의 계산에 의하여 근사화 한다.

1단계 : v_1, v_2 속도에서의 방전전류 I_{v1}, I_{v2}를 구한후 〈표 1〉의 배터리 용량표에서 방전전류에 해당되는 배터리 용량 B_{max1}, B_{max2}를 구한다.

2단계 : $I_{v1} \geq I_{v2}$ 일 때

$$\text{현재량} = \frac{(B_{max_2} - I_{v_1} \times \Delta t_1)}{B_{max_2}} \times 100 \quad (\%)$$

$$\text{잔량} = \text{현재량} - \frac{I_{v_2} \times \Delta t_2}{B_{max_2}} \times 100 \quad (\%)$$

$$\text{방전량} = 100 - \text{잔량} \quad (\%)$$

3단계 : $I_{v_1} < I_{v_2}$ 일 때 2단계에서의 잔량은 실제보다 작게 계산되므로 다음과 같이 근사화한다.

$$\text{현재량1} = \frac{(B_{max_1} - I_{v_1} \times \Delta t_1)}{B_{max_1}} \times 100 \quad (\%)$$

$$\text{현재량2} = \frac{(B_{max_2} - I_{v_1} \times \Delta t_1)}{B_{max_2}} \times 100 \quad (\%)$$

$$\text{현재량} = \frac{(\text{현재량1} + \text{현재량2})}{2} \quad (\%)$$

$$\text{잔량} = \text{현재량} - \frac{I_{v_2} \times \Delta t_2}{B_{max_2}} \times 100 \quad (\%)$$

$$\text{방전량} = 100 - \text{잔량} \quad (\%)$$

2.3 배터리 충전 모델링

배터리 충전은 2단계까지만 고려하며 2단계 충전이 끝나면 방전된 량이 100% 충전되어 진다고 가정한다. T 시간동안 충전된 배터리량은 〈그림 4〉의 충전 곡선 하부 면적과 동일하나 방전량에 따라 1, 2단계 충전시간 T_1, T_2 값이 변하게 되므로 배터리 및 발전기의 고장을 고려한 충전량은 다음과 같이 계산되어 진다.

1단계 : 단위 방전량당 1, 2단계 충전시간 계산

○ 배터리 1대당 최대 충전전력(maxW) 계산

총 충전전력 = 현재 가용 발전기대수 × 발전기 최대 전력 - 모터 소요전력 - 함내 소요전력

$$\max W = \frac{\text{총 충전전력} \times \text{배터리 효율}}{\text{현재 가용 배터리 대수}}$$

○ 〈그림 5〉의 충전전류에 따른 충전시간 곡선으로부터 단위 방전량당 1, 2단계 충전시간을 구함

2단계 : 현재 방전량에 대한 1, 2단계 충전시간 계산

$T_1 = a \times$ 방전량, $\qquad T_2 = b \times$ 방전량

여기서 a : 단위 방전량당 1단계 충전시간

b : 단위 방전량당 2단계 충전시간

3단계 : T_1, T_2를 이용하여 〈그림 4〉와 같은 충전곡선 구함.

4단계 : 충전시간 T 동안의 충전량 계산

$$\text{충전량}=\frac{\max W\times T}{B_{\max}}\times 100 \quad (\%)$$

○ $T \rangle T_1$ 경우

$$\text{충전량} = \text{1단계 충전량}+\frac{\int_{T_1}^{T}(\text{2단계 충전곡선})dt}{B_{\max}}\times 100 \quad (\%)$$

여기서 B_{max} : 충전시 방전전류에 해당되는 배터리 용량

2.4 장비 고장 및 수리 모델링

모터, 배전반(Switch Board), 배터리 및 발전기만의 고장 수리를 고려하고 프로펠러(Propeller)와 축(Shaft) 그리고 스노클 장치는 신뢰성 있는 기계장치이므로 고장을 고려하지 않는다. 각 장비의 고장 및 수리는 독립적으로 발생되며 고장발생 및 수리완료시점은 장비의 고장 및 수리시간 분포에 따라 랜덤하게 결정된다. 고장 및 수리시간 분포는 장비의 특성에 따라 일양(Uniform)분포, 지수(Exponential)분포, 정규(Normal)분포 또는 와이블(Weibull) 분포중 선택이 가능하다.

장비 고장의 형태는 경고장과 치명고장 두 가지 형태로 구분되며 경고장은 수리가 가능하나 치명고장은 수리가 불가능하다. 고장 형태는 장비가 고장났을때 치명 고장 발생 확률에 따라 랜덤하게 결정된다. 수리시 예비품(Spare Part)의 품절은 없는 것으로 가정한다.

발전기의 경우 고장은 작동중(스노클항해시)에만 발생하고 수리는 작동중이나 비작동중(수중항해시) 어느때나 이루어 질 수 있다. 발전기들은 병렬구조로 이루어져 있어 발전기 모두가 고장날 경우 전체 시스템이 고장나며 개별 발전기의 고장은 배터리 충전 성능만을 저하시킨다.

배터리는 속도에 따라 저속에서는 병렬 그리고 고속에서는 직렬 구조로 변하게 된다. 직렬 구조에서의 한 개 배터리의 고장은 전체 시스템 고장을 유발하나 병렬구조에서의 한 개 배터리의 고장은 배터리 성능 저하만을 초래한다. 고장난 배터리는 충·방전을 할 수 없으며 수리후에는 고장 발생 시점의 배터리 수준을 그대로 갖고 있다고 가정한다.

모터와 배전반은 직렬구조이고 경고장시는 수리가 가능하나 치명 고장시는 전체 시스템 고장을 초래한다.

3. 시뮬레이션 모델

3.1 개요

다양한 운용환경에서의 추진시스템 임무 수행과정을 시뮬레이션하기 위하여 사건방식(Event-Driven Method) 시뮬레이션 방법을 사용하였으며 시뮬레이션 시간증가는 사건 증가법(Event Increment Method 또는 Next-Event Time advance Method)를 사용하였다.

수중항해 시작(Battery Event), 스노클항해 시작(Snorkel Event) 및 긴급사건 발생(Emergency Event) 등 운용환경 또는 시스템의 상태가 변하는 시점을 하나의 사건이 발생하는 시점으로 모델링 하였으며 전체적인 시뮬레이션 흐름도는 〈그림 7〉와 같다. 그리고 본 모델은 PC(Personal Computer)에서 범용 C 언어를 사용하여 개발되었다.

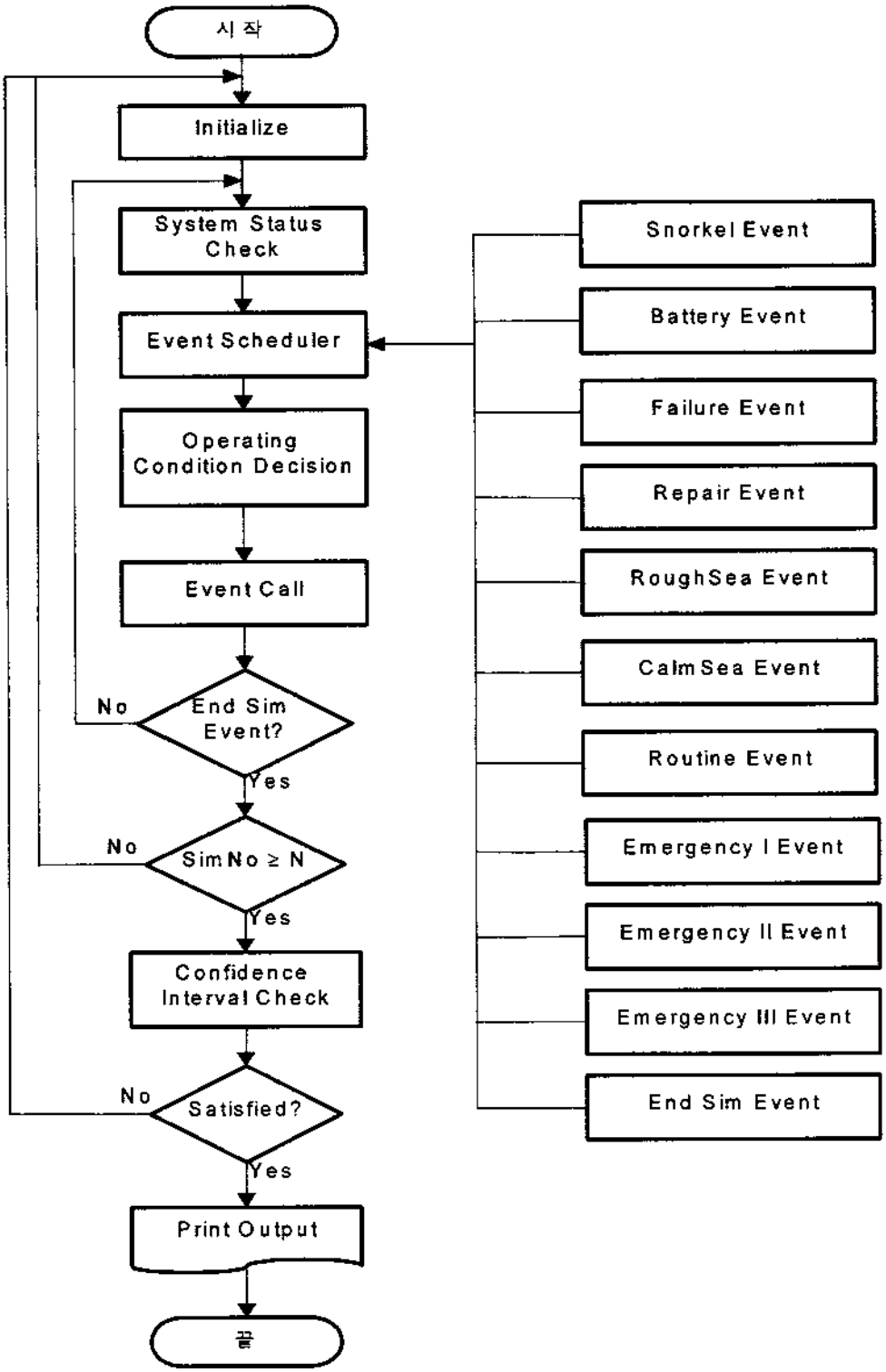
3.2 사건(EVENT)

배터리 추진시스템의 임무 수행과정을 사건 방식으로 시뮬레이션하기 위해서 는 임무 수행 상황을 현실과 유사하게 재현시키기에 충분한 사건의 종류와 수를 결정하고 각 사건들은 어떤 조건에서 발생하는 지를 결정하여야 한다. 그리고 각 사건에는 연관된 다음 사건이 어떤 사건이며 다음 사건의 발생 시점은 언제이고 필요한 조치들은 어떤 것들이 있는지 등이 포함되어져야 한다. 본 논문에서 사용되어지는 사건들과 사건간의 연관성은 〈그림 8〉과 같으며, 사건 관리기(Event Scheduler)는 기록된 미래사건중에서 가장 빠른 사건을 찾아서 그 시간으로 시뮬레이션 시간을 증가 시키는 과정을 반복하면서 시뮬레이션을 진행시킨다.

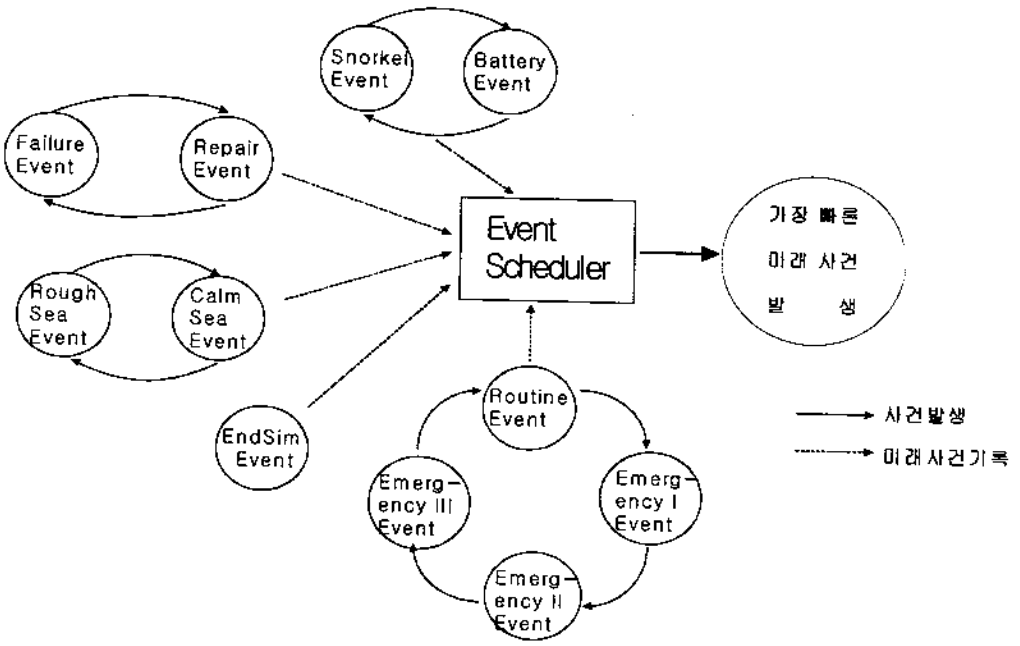
① Snorkel Event : 스노클 항해가 시작되는 시점이며, 스노클 항해가 종료되는 시점을 계산하여 미래의 Battery Event 발생시점을 등록시킨다.

② Battery Event : 수중항해가 시작되는 시점이며, 수중항해가 종료되는 시점을 계산하여 미래의 Snorkel Event 발생시점을 등록시킨다.

③ Failure Event : 현장비가 고장난 시점이며, 치명고장일 경우는 수리 완료 예정시간을 시뮬레이션 시간 이후로 정하고 경고장일 경우는 수리 확률 분포에 따라 수리완료 예정시간을 계산하여 미래의 Repair Event 발생시점을 등록시킨다.



〈그림 7〉 시뮬레이션 흐름도



〈그림 8〉 사건종류와 연관 관계

④ Repair Event : 현 장비가 수리 완료된 시점이며, 고장 확률분포에 따라 고장 발생 예정시간을 계산하여 미래의 Failure Event 발생시점을 등록시킨다. 그리고 치명고장 발생확률에 따라 고장 형태를 결정한다.

⑤ Rough Sea Event : 거친 해상상태로 바뀐 시점이며, 거친 해상상태 지속시간 확률 분포에 따라 현 해상상태가 바뀌는 시점을 계산하여 미래의 Calm Sea Event 발생시점을 등록시킨다.

⑥ Calm Sea Event : 해상 상태가 잔잔한 상태로 바뀐 시점이며, 잔잔한 해상상태 지속시간 확률분포에 따라 현 해상상태가 바뀌는 시점을 계산하여 미래의 Rough Sea Event 발생시점을 등록시킨다.

⑦ Emergency Event Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ : 긴급 상황이 시작되는 시점이며, 긴급 상황 지속시간 확률 분포에 따라 현 상황이 바뀌는 시점을 계산하여 다음 Emergency Event 발생시점을 등록시킨다. Emergency EventⅢ의 경우는 긴급상황3의 지속시간 확률 분포에 따라 현 상황이 바뀌는 시점을 계산하여 미래의 Routine Event 발생시점을 등록시킨다.

⑧ Routine Event : 평시 상황이 시작되는 시점이며, 평시 상황 지속 시간을 계산하여 미래의 Emergency Event Ⅰ 발생시점을 등록시킨다.

⑨ End Simulation Event : 시뮬레이션 결과를 기록하고 시뮬레이션을 종료시킨다.

3.3 운용 환경 모델링

3.3.1 운용 조건(Operating Condition)

운용 조건 결정(Operating Condition Decision) 서브루틴에서는 다음과 같은 다양한 운용 조건의 추가, 삭제 또는 조합이 가능하다.

○ 스노클항해 시작 시간 설정
- 고정 시간 또는 랜덤한 시간

- 특정 상황 발생시(예를들어 평균 배터리 수준이 정해진 수준이하일 때)

○ 배터리 충전시간 설정
- 고정 시간 또는 랜덤한 시간
- 배터리 수준이 정해진 수준 이상이 될 때까지

○ 스노클항해 불가능 조건 설정
- 거친 해상상태일 때, 긴급 상황 발생시

- 특정 함속도일 때(예를들어 속도 0, 속도 12 이상)

○ 함속도 변경
- 스노클항해시 V_1 노트, 수중항해시 V_2 노트
- 긴급 상황 발생시 V_3 노트 , 특정 장비 고장시 V_4 노트

○ 임무 실패 조건 설정
- 특정 상황 또는 특정 사건이 발생할 때
(예를들어 현재 배터리 수준이 정해진 수준이하일 때, 또는 스노클 항해도중 긴급 사건이 발생하면 임무 실패)

3.3.2 해상 상태

해상상태는 스노클항해가 불가능한 거친 해상상태와 스노클이 가능한 잔잔한 해상상태로 구분되며 각 해상상태의 지속시간은 입력된 확률분포에 따라 랜덤하게 결정된다. 해상상태는 랜덤하게 결정된 지속시간이 경과된 매순간마다 입력된 거친 해상상태 발생 확률에 따라 랜덤하게 결정된다.

3.3.3 긴급 상황

잠수함이 목표물을 탐지하여 식별, 추적, 공격 및 회피 작전을 수행하는 경우에 해당되며 입력된 발생횟수 만큼 임무 수행기간 동안 랜덤하게 발생 되어진다. 긴급상황은 3단계 즉 긴급상황 1, 2, 3으로 구분되어 연속적으로 발생되어지며 각 상황이 발생될 때마다 각 상황의 지속시간과 함속도를 변경 할 수 있다.

3.3 시뮬레이션 모델의 타당성 검토

시뮬레이션 모델이 타당성을 조사하는 과정은 일반적으로 처음 의도한 개념적 모델이 컴퓨터 프로그램에 정확히 반영되었는지를 확인하는 검사(Verification)와 그렇게 만들어진 시뮬레이션 모델이 현실문제와 일치하는가를 조사하는 확인(Validation)으로 구성된다.[10]

본 논문에서는 시뮬레이션에서 발생하는 사건들의 흐름도 작성 및 확인, 입출력자료의 인쇄후 결과 비교 등을 통하여 개발된 시뮬레이션 모델이 개념적 모델과 일치함을 확인(Verification)하였고, 입력자료의 일부를 변화시키고 출력을 관찰함으로써 모델이 예상대로 작동하는지를 관찰하는 민감도 분석(Sensitivity Analysis), 실제로 추진시스템에 관련되어 있는 담당자들과의 협의 등과 같은 모델개발의 초기에 가능한 개괄적 타당성 확인(Face Validity)을 수행하여 만족할 만한 결과을 얻었다.

4. 시뮬레이션 결과분석

모터, 배전반, 배터리 4군, 발전기 4대로 구성된 일반적인 배터리추진 잠수함의 추진 시스템을 대상으로 운용 조건의 변화, 장비별 고장시간의 변화 그리고 발전기 수량의 변화에 따른 추진시스템의 임무 수행능력을 시뮬레이션하였다.

4.1 운용 조건에 따른 임무 성공률

운용 조건은 다음과 같이 가정한다.

〈조건 1〉
○ 1일 1회 스노클 항해를 원칙으로 함
○ 스노클 항해는 22시부터 오전 4시 사이에서만 가능
○ 스노클 및 수중항해시 함속은 4노트
○ 배터리 수준이 0% 이하이면 임무 실패

〈조건 2〉 : 조건 1에 다음사항이 추가됨
○ 거친 해상상태에서는 스노클 항해 불가하며 발생 확률은 0.033
○ 긴급 상황은 시뮬레이션 시간중 임의 시간에 1회 발생함
○ 긴급 상황 발생시 평균 지속시간 및 함속
긴급 상황 1 : 1시간, 8노트, 긴급 상황 2 : 2시간, 12노트
긴급 상황 3 : 0.5시간, 20노트

〈조건 3〉 : 조건 2에 다음사항이 추가됨
○ 〈표 2〉와 같이 장비의 고장과 수리를 고려함
○ 모터 또는 배전반 고장 발생시 함속은 0노트
○ 모터 또는 배전반 고장상태에서 긴급 상황이 발생하면 임무 실패
○ 긴급 상황 3인 상태에서 배터리 고장이 발생하면 임무 실패
○ 전체 시스템 고장시 임무 실패

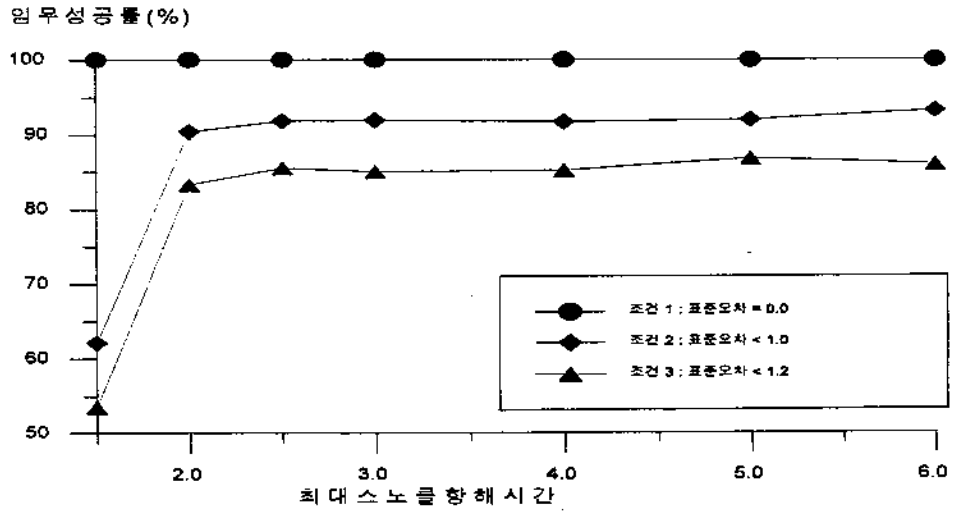
〈그림 9〉, 〈그림 10〉에서 해상상태, 긴급 상황, 장비의 고장 수리를 고려할수록 임무 성공률은 떨어지고 스노클비는 증가하고 있으며 최대 스노클항해 시간이 커질수록 임무 성공률과 스노클비 모두 증가하나 2.5시간 이후는 거의 일정함을 보이고 있다. 〈그림 9〉에서 임무성공률이 100%인 것은 임무실패 가능성이 없다는 것이다. 그러나 배터리 추진 잠수함의 경우

〈표 2〉 장비별 고장 및 수리 분포

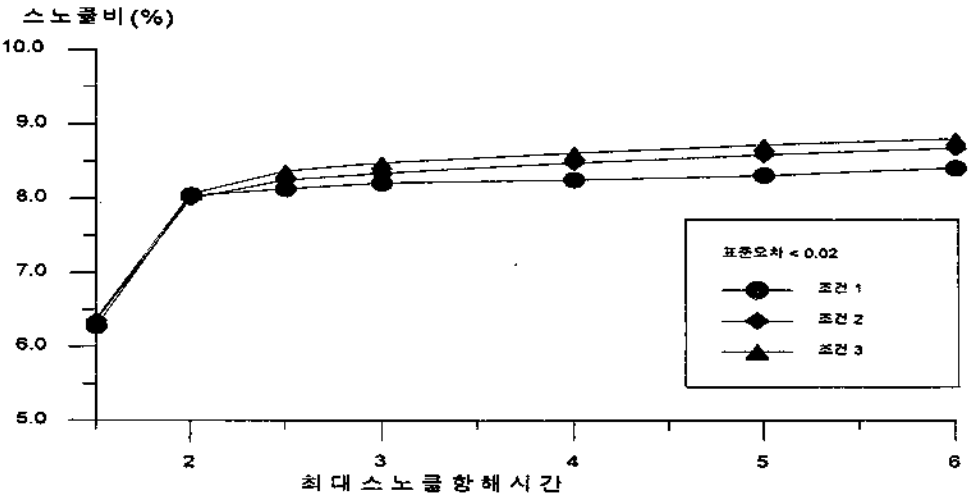
장비명	고장분포	평 균 고장시간	수리분포	평 균 수리시간	표 준 편 차	비 고
모터	지수분포	5000.0	정규분포	2	0.5	
배전반	지수분포	5000.0	정규분포	2	0.5	
배터리	지수분포	5000.0	정규분포	2	0.5	4대 모두동일
발전기	지수분포	500.0	정규분포	2	0.5	〃

스노클 항해중에는 발전기에서 발생되는 높은 소음 등의 영향으로 목표물을 탐지하기가 거의 불가능하기 때문에 임무 성공률에 스노클 항해의 영향을 고려하기 위하여 조건 2와 조건 3에 '스노클 항해중 긴급 사건이 발생할 경우 임무 실패'란 조건(조건 2*, 3*)을 추가하여 시뮬레이션을 수행하면 〈그림 11〉과 같이 임무 성공률이 80% 수준으로 떨어지고 최대 스노클 항해 시간 2시간 이상일 경우는 일정함을 알 수 있다.

임무수행시 불확실성을 고려하여 최대 스노클 항해시간을 정규분포 변수로 가정하였을 경우도 〈표 3〉과 같이 고정시간

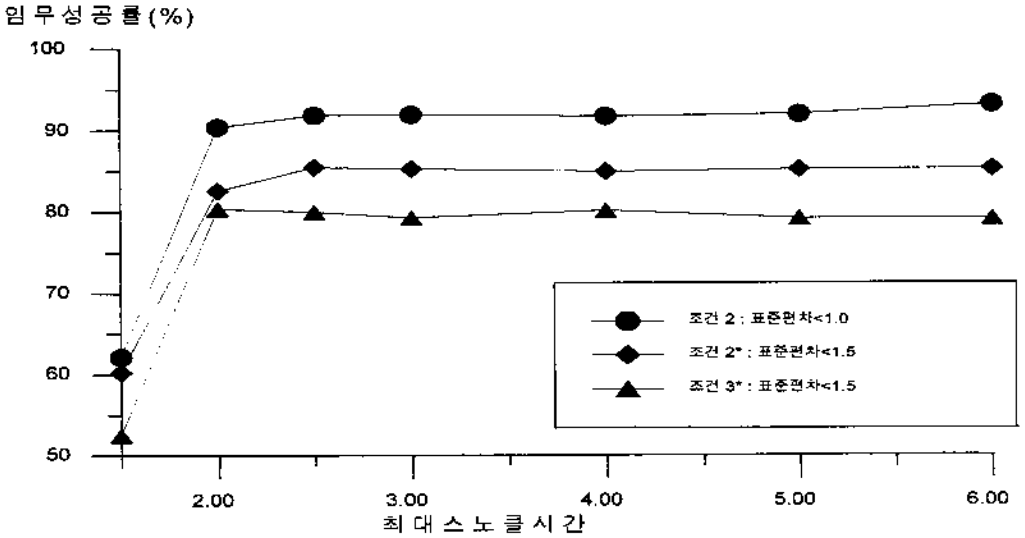


〈그림 9〉 최대 스노클항해 시간에 따른 임무 성공률(조건 1,2,3)



* 최대 스노클 항해시간 : 배터리 수준이 100% 미만일 때 스노클 항해할 수 있는 최대시간을 말하며 실제 스노클 항해시간은 배터리 수준 100% 까지의 충전시간과 최대 스노클 시간중 짧은 시간임

〈그림 10〉 최대 스노클항해 시간에 따른 스노클비(조건 1,2,3)



〈그림 11〉 최대 스노클항해시간에 따른 임무 성공률(조건 2,2,3)

〈표 3〉 정규분포 최대 스노클항해 시간의 경우 시뮬레이션 결과

최 대 스노클시간	임무 성공률	스노클비	실제 평균 스노클시간	비 고
고정시간 2.5 시간	79.9*	8.4	2.016	
확률변수	79.8*	8.3	1.992	최대 스노클시간 ~Normal(2.5, 0.5)

* 표준오차 = 1.27

의 경우와 거의 동일한 결과를 보이고 있다. 따라서 이 추진시스템은 1일 1회 최대 2.5시간 정도를 스노클 항해할 경우 실제 평균 스노클 시간은 2시간 정도이고 해상상태, 긴급상황 및 장비 고장 등을 고려할 때 임무 수행 성공률은 약80% 정도임을 알 수 있다.

그러나 상기 결과는 운용조건의 변화, 예를들면 긴급상황 발생 횟수, 긴급상황 지속시간, 속도변화 등에 민감하게 영향을 받으므로 설질적인 추진시스템 성능예측을 위해서는 정확한 운용환경 조건 정립이 선행되어져야 한다.

4.2 장비 고장율에 따른 임무 성공률

각 장비들의 고장은 독립적으로 발생되어진다고 가정하였고, 또한 각 장비들의 고장이 임무성공률에 미치는 영향을 분석하기 위하여 치명 고장확률이 0.0~0.9 인 경우 그리고 각 장비의 MTBF 가 500, 1000, 5000, 10000, 20000 으로 동일한 경우에 대한 시뮬레이션분석 결과가 〈표 4〉 와 〈그림 12〉에 나타나 있다.

〈그림 12〉의 결과에서 전체적으로 배터리, 모터와 배전반, 발전기 순으로 임무 성공률에 미치는 영향이 크며 평균 고장시간보다도 치명고장 발생확률이 영향이 큼을 알 수 있다. 이와같은 결과는 배터리의 경우 긴급상황 3에서 배터리 4군 모두가 직렬구조로 연결되기 때문이고 발전기의 경우는 스노클 항해시만 작동되어 평균 작동시간이 약 60시간 정도로 전체 임무수행시간 720시간에 비해 짧고 또한 발전기 4대가 항상 병렬 구조를 취하고 있기 때문일 것으로 판단된다. 따라서 각 장비들의 평균 고장시간과 치명 고장 발생 확률이 임무 성공률에 영향을 가능한 적게 미치기 위해서는 〈표 5〉와 같이 설계 안이 추천할 만하다고 판단된다. 여기서의 추천안은 현실적인 제약조건을 고려한 하나의 안이다.

4.3 발전기 수량에 따른 임무 성공률

고장수리를 고려할 경우와 고려하지 않을 경우로 구분하여 시뮬레이션을 수행하였으며 고장수리를 고려한 경우 각 장비의 평균 고장시간과 치명고장 발생 확률은 〈표 5〉를 사용하였다. 〈표 6〉에서 발전기가 2대 이하일 경우는 현실적으로 임무를 수행할 수 없으며 3대일 경우 임무 수행은 가능하나 4대보다는 임무 성공률이 다소 떨어지고 스노클비는 상승함을 알 수 있다. 그러므로 발전기 수량은 잠수함 내부 공간이 허용하는 한 증가시키는 것이 스노클비를 떨어뜨리면서 임무 성

〈표 4〉 장비별 시스템 고장유발회수(총횟수 = 10000)

치명 고장율	평균 고장시간	배터리	모터	배전반	발전기	고장외 사유	소계	임무 성공률
0.0	500	154	92	85	0	1551	1882	0.81
0.0	1000	96	47	39	0	1539	1721	0.83
0.0	5000	13	7	8	0	1578	1606	0.84
0.0	10000	10	11	8	0	1581	1610	0.84
0.0	20000	6	0	1	0	1594	1601	0.84
0.1	500	1916	1190	1081	0	1370	5557	0.44
0.1	1000	1116	640	588	0	1397	3741	0.63
0.1	5000	269	148	157	0	1567	2141	0.79
0.1	10000	138	83	77	0	1561	1859	0.81
0.1	20000	62	46	34	0	1527	1669	0.83
0.3	500	2748	2252	2279	0	1161	8440	0.16
0.3	1000	2229	1424	1433	0	1290	6376	0.36
0.3	5000	727	377	418	0	1439	2961	0.70
0.3	10000	397	196	197	0	1484	2274	0.77
0.3	20000	165	95	88	0	1580	1928	0.81
0.5	500	2580	2878	3005	0	1057	9520	0.05
0.5	1000	2621	2006	2090	0	1234	7951	0.21
0.5	5000	1056	605	614	0	1386	3661	0.63
0.5	10000	571	319	333	0	1513	2736	0.73
0.5	20000	273	154	175	0	1570	2172	0.78
0.7	500	2247	3258	3344	0	958	9807	0.02
0.7	1000	2678	2240	2466	0	1199	8583	0.12
0.7	5000	1373	857	823	0	1421	4474	0.55
0.7	10000	803	401	426	0	1461	3091	0.69
0.7	20000	390	225	222	0	1483	2320	0.77
0.9	500	2025	3535	3503	0	879	9942	0.01
0.9	1000	2652	2705	2834	0	1141	9332	0.07
0.9	5000	1652	919	986	0	1325	4882	0.51
0.9	10000	960	471	523	0	1448	3402	0.66
0.9	20000	532		295	0	1493	2582	0.74

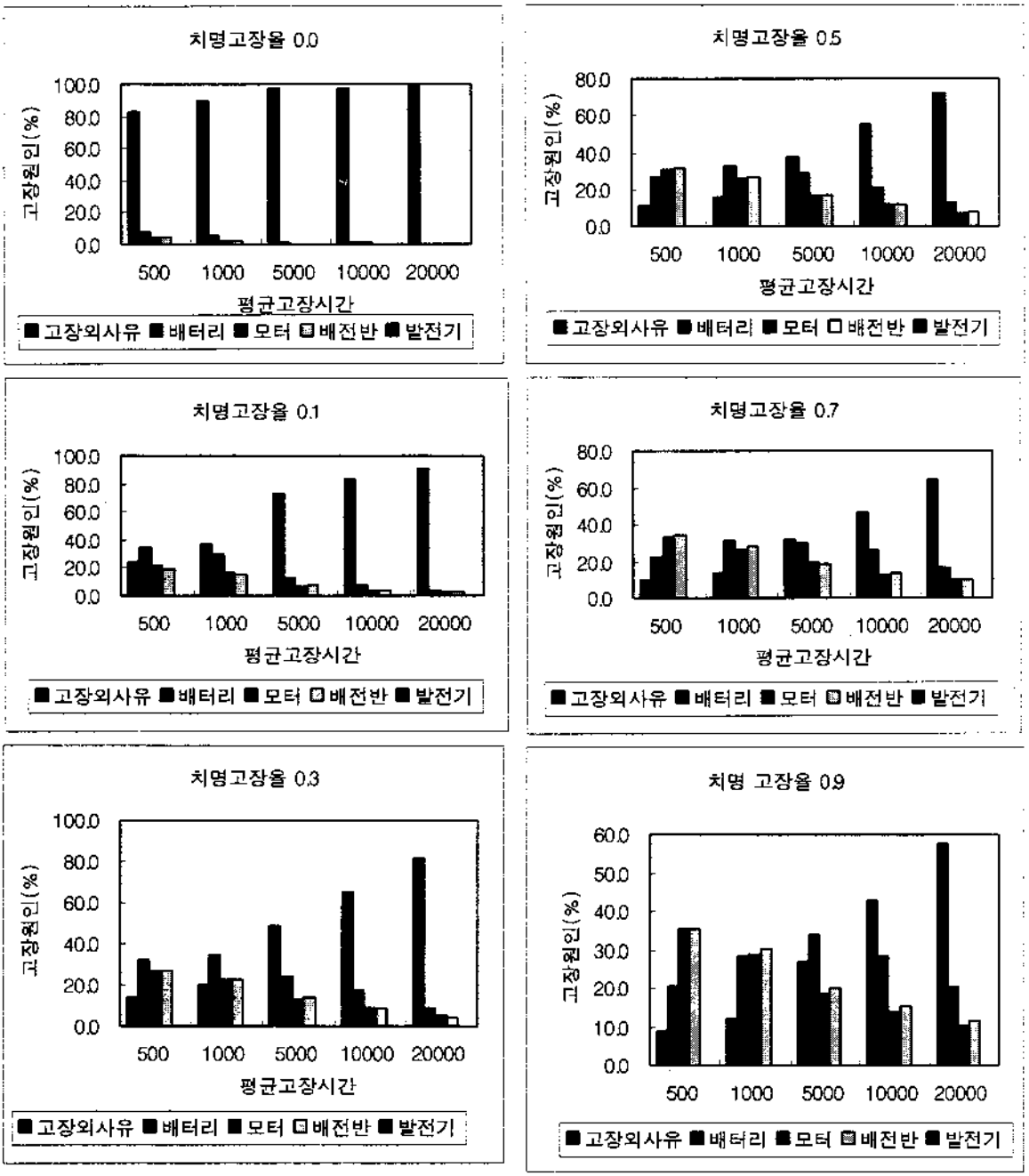
공률을 향상시킨다는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 배터리 추진시스템의 임무 수행시 발생되어질 수 있는 다양한 운용환경의 변화, 추진시스템을 구성하는 개별장비들의 고장수리 및 고장으로 인한 성능저하 효과등을 고려하여 보다 실제적인 추진시스템 성능을 평가할수 있는 수중 추진시스템 효과도분석을 위한 시뮬레이션 모델을 개발하였다.

그리고 실제로 운용조건, 장비고장율 및 발전기 수량의 변화에 따른 추진시스템의 임무수행능력을 시뮬레이션하고 그 결과를 분석하여 개발된 모델이 추진시스템의 운용 개념 정립, 장비 신뢰도 설계 및 시스템 설계 성능평가 등에 사용 가능함을 보였다.

향후 연구과제로는 실제 운용 데이터를 이용한 시뮬레이션 모델의 구체적 확인문제와 최근 연구개발중인 새로운 추진시스템[11]의 성능예측 모델로 확장하는 연구등이 필요할 것으



〈그림 12〉 장비별 시스템 고장 역할

로 사료된다.

〈표 5〉 장비 신뢰도 설계기준(안)

장 비 명	평균 고장 시간	치명고장 발생 확률
모 터	10,000.0 이상	0.1 이하
배 전 반	10,000.0 이상	0.1 이하
배 터 리	10,000.0 이상	0.1 이하
발 전 기	500.0 이상	0.1 이하

〈표 6〉 발전기 수량에 따른 임무 성공률

발전기 수량	모든 장비 고장수리 고려		고장 수리 비고려	
	임무 성공률	스노클비	임무 성공률	스노클비
2	0.0	-	0.0	-
3	74.1	9.63	79.3	9.61
4	81.1	8.23	83.9	8.16

[참 고 문 헌]

[1] Gabler,U., Submarine Design, Bernard & Graefe Verlag, Koblenz, 1986

[2] 김홍열외, 잠수함 일반과정 교수안, 국방과학연구소, 1989

[3] Habayer,A.R., System Effectiveness, Pergamon Press, 1987

[4] Tillman,F.A., C.L. Hwang, and Way Kuo, "System Effectiveness Models : An Annotated Bibliography", IEEE Transactions on Reliability, Vol.R-29, No.4, pp.295-304, 1980

[5] Computer Science Limited, Submarine Effectiveness Model (SUBEM) Technical Manual, 1995, USA

[6] Wilhelm Hagen AG, Main Battery Specification, Germany

[7] 해군 잠수함 교육 훈련대, 잠수함 추진계통, 해군 인쇄창, 1994

[8] 해군 잠수함 교육 훈련대, 잠수함 축전지, 해군 인쇄창, 1994

[9] Jackson,H.A., Submarine Design Notes, Massachusetts Institute of Technology, 1980

[10] 金在連, 컴퓨터 시뮬레이션- 離散型 模擬實驗, 博英社, 1995

[11] Marintime Defence, Submarine Propulsion: Air Independent Propulsion, Marintime Defence, pp.242-245, 1995. 12.

윤원영

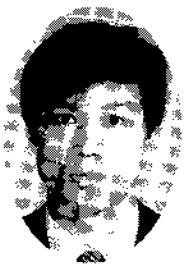
1982년 서울대학교 산업공학학사

1984년 한국과학기술원 산업공학 석사

1988년 한국과학기술원 산업공학 박사

현 재 부산대학교 산업공학과 교수

관심분야 신뢰도, 품질관리, 시뮬레이션 등



고용석

1985년 서울대학교 조선공학학사

1985-88년 해군본부 조함단 해군 감독관

1988-90년 코리아타코마(주) 특수선 설계과

1995-97년 부산 대학교 산업공학석사

1990-현재 국방과학연구소 함정체계실

관심분야 체계 분석, 시뮬레이션 등

97년 2월 최초접수, 97년 11월 최종수정