

해양수색구조 의사결정지원을 위한 익수자 생존시간 고찰

정해상* · † 정다운 · 윤종휘** · 김충기***

*,**한국환경연구원 초빙연구원, ***,† 한국환경연구원 연구위원, **한국해양대학교 명예교수

A Study on the Survival Time of a Person in Water for Search and Rescue Decision Support

Hae-Sang Jeong* · † Dawoon Jung · Jong-Hwui Yun** · Choong-Ki Kim***

*,**Invited Research Fellow, Korea Environment Institute, Sejong 30147, Korea

***,† Senior Research Fellow, Korea Environment Institute, Sejong 30147, Korea

**Professor Emeritus, Korea Environment Institute, Busan 49112, Korea

요 약 : 해양수색구조에서 조난자의 생존시간 예측은 중요한 관심사 중 하나이다. 해양선진국에서 생존모델에 관한 연구가 많이 있었지만 영국, 미국, 캐나다 사고 데이터를 이용해 개발되었기 때문에 우리나라 해역에서 한국인 체형에 그대로 적용하는 데에 어려움이 따른다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 해양경찰 해상수색구조사례, 언론보도자료, 기상청 자료, 해양경찰 해양특수구조단 전문가 면담 및 설문조사를 통해 익수자 생존시간에 관한 자료를 수집하였다. 이 자료를 이용해 추세분석 및 회귀분석을 수행하여 익수자 최대 생존시간(한국형) 산정 식을 개발하였다. 이 산식과 해외 생존모델과 비교하여 우리나라 해양조난사고에 적용가능성을 검토하였다. 최대 생존시간(한국형), 국내 해양수색구조 익수자 구조 사례, 해외 생존모델을 종합적으로 활용하여 조난자 생존시간과 집중·추천 수색시간 지침을 제안하였다. 이를 통해 수색자원의 투입 등 의사결정에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 추가로 해양수색구조의 종료·축소를 결정하고 조난자 가족 및 국민 대상으로 정책결정 내용을 설명하는데 도움이 될 수 있다.

핵심용어 : 해양조난사고, 해양수색구조, 생존시간, 익수자, 집중 수색 시간, 추천 수색 시간

Abstract : Predicting the survival time of a person in water (PIW) in maritime search and rescue (SAR) operations is an important concern. Although there have been many studies on survival models in marine-developed countries, it is difficult to apply them to Koreans in Korea's oceans because they were developed using marine distress data from the United Kingdom, United States, and Canada. Data on the survival time of a PIW were collected through interviews and surveys with a special rescue team from the Korea Coast Guard, SAR cases, press releases, and Korea Meteorological Administration data to address these issues. The maximum survival time (Korean) equation was developed by performing a regression analysis of this data, and the applicability to actual marine distress was reviewed and compared to the overseas survival model. By comprehensively using the maximum survival time (Korean), domestic SAR cases, and overseas survival models, guidelines for survival time and intensive and recommended search time were suggested. The study findings can contribute to decision-making, such as the input for search and rescue units. The findings can also help to determine the end of or reductions in SAR operations and explain policy decisions to the public and families of a PIW.

Key words : marine distress, maritime search and rescue, survival time, person in water, intensive search time, recommended search time

1. 서 론

국내에서 최근 5년간(2018~2022년) 낚시어선 이용객 수가 428만 명에서 518만 명으로 21% 증가하였고, 레저선박 등록척수가 28천 척에서 36천 척으로 29% 증가하여 바다낚시, 해양레저 등 국민의 해양 이용이 지속적으로 증가하고 있다(MOF, 2023). 동시에 세월호 사고 등 대형사고·재난발생으로 안전에 대한 국민의 관심이 증대되었고 국가 책무 강화요

구가 커지고 있다(MOF, 2023).

해양수산부와 해양경찰(이하 “해경”)에서 해양사고 예방 대책을 수립하여 시행하고 있지만 Fig. 1에서 보이는 것과 같이 최근 5년간(2017년~2021년) 연평균 우리나라 인명사고 발생 인원은 19,808 명이고, 증가율은 4.1 %이다. 그리고 사망·실종과 같은 인명손실은 매년 감소추세이나 연평균 84 명에 이르고 있다.(KCG, 2022).

† Corresponding author : 정희원, dwjung@kei.re.kr 044)415-7404

* 정희원, hsjeong@kei.re.kr 044)415-7669

(주) 이 논문은 “국내 해양환경에 적합한 익수자 생존시간 산정에 관한 연구”란 제목으로 “2023년도 한국항해항만학회 추계학술대회”에 발표되었음.

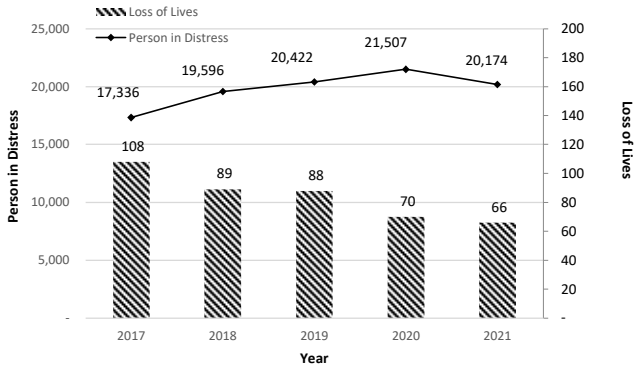


Fig. 1 Person in distress and loss of lives in the last 5 years (2017~2021) (KCG, 2022)

해양사고가 일어났을 때 기온, 풍속, 수온 등 주위 환경에 따라 익수자가 어느 정도 생존할 수 있는지를 추정하는 것은 매우 중요하다. 익수자의 생존 가능 시간에 따라 인력과 자원의 투입과 배분 관련 의사결정이 달라질 수 있다. 그렇기에 사고 시나리오 가중치 선정 및 집중 수색 시간 선정 등 해양수색구조 의사결정 지원을 위해 과학적인 익수자 생존 가능 시간 지침이 필요하지만 익수자 생존율 자료의 부족으로 우리나라에서는 아직 정교한 모델 시스템이 개발되지 못하는 상황이다. 반면 미국, 캐나다 등 해양 선진국에서는 1805년부터 기록된 익수자 자료를 이용해 기존 수색자료와 생물물리학적 이론에 기반하여 다양한 변수에 따른 생존시간을 추정하는 모델을 개발하고, 이를 근거로 수색/구조를 진행하고 있다(Keefe and Tikuisis, 2008, Xu et al., 2014, G. W. Molnar, 1946, Tipton et al., 2022).

반면 우리나라의 생존모델 연구 사례는 1건(KIM et al., 2016)이 있다. 구멍 뚫목과 구멍동이의 단열성능 측정에 초점이 맞춰져 있으며 혈관대류 효과를 고려하지 않고 대퇴부 온도만 고려하는 등 간이화된 모델로 실제 인체 조건과 크게 차이를 날 수 있는 한계가 있다. 그 외 대부분의 국내 해양수색구조 관련 연구는 기술개발 및 법제도 개선에 대한 것이 다수를 이루고 있으며(Lee et al., 2010, Lee et al., 1999) 익수자에 대한 생존시간 자료와 연구가 거의 없는 실정이다. 최근 해양수색구조 통계시스템 개선 연구에서 빅데이터를 기반으로 한 첨단 수색구조 통계 플랫폼의 신규 개발 방안을 제안한 바 있어 국내 생존모델 구축에 필요한 신뢰성 있는 데이터를 확보할 수 있을 것으로 기대된다(Lee et al., 2023).

해경 수색구조 실무 매뉴얼에 해수온도에 따른 익수자 생존시간이 없는데 우리나라 해역과 한국인 체형에 적합한 익수자 생존시간에 관한 연구 사례와 자료가 거의 없고 해외 사례를 우리나라에 적용 가능한지도 입증된 바가 없기 때문이라고 사료된다.

본 연구에서는 국내·외 사례 검토, 국내 사고이력 및 해양수색구조 대원의 경험자료를 통해 익수자 생존 가능 시간을 고찰하였다. 본 연구는 생존자의 구조 확률을 높이기 위해 해양환경에 따른 익수자의 생존시간을 이용하여 생존률을 높일 수 있는 시간에 수색자원을 집중 투입할 수 있는 과학적 근거

를 제시하고자 한다. 그리고 인력과 수색자원이 집중적으로 투입되어야 하는 집중수색시간과 익수자가 최대로 생존할 수 있는 가능성을 고려한 수색 유지 시간을 설정함으로써 해양수색구조 의사결정을 지원하고자 한다.

2. 해외 생존모델

해외에서는 수십 년의 해양 사고 사례를 기반으로 해양사고 수, 유형, 생존자 수, 생존 기간, 생존자 및 사망자의 신체적 환경적 특성 등에 대한 데이터가 구축되어 있다(Tipton et al., 2022). 예를 들어 영국의 Maritime and Coast Guard Agency가 관리하는 National Immersion Incident Survey(이하 “UKNIIS”)는 익수 기간, 해수/담수 여부, 수온, 해역, 수색 방식, 성별, 연령, 익수자의 체격, 구명조끼 착용 여부, 발견 시 상태(사망, 혼수상태, 기면, 기타, 이상 없음) 등이 포함되어 있어서 익수자의 생존에 영향을 줄 수 있는 다수의 요인들을 확인할 수 있다.

이러한 국가들의 사고 데이터를 바탕으로 영국, 미국, 캐나다 등에서는 Probability of Survival Decision Aid(이하 “PSDA”), Cold Exposure Survival Model(이하 “CESM”), Maximum Observed Immersed [victim] Search Time(이하 “MOIST”) Guideline 등 해양환경에 맞는 생존시간 추정 모델을 구축하여 해양조난사고에서 활용하고 있다. 이들 해외 모델의 공통점은 방대한 양의 데이터를 바탕으로 익수자의 생존시간에 대한 합의점(consensus)을 도출하였다는 것이다. 국가별로 수온, 기온, 풍속 등 다양한 환경데이터를 분석하고 이를 바탕으로 생존모델을 개발함과 동시에, 각 국가의 상황에서 가장 중요한 환경 인자를 도출하고 모델의 예측력을 높여왔다.

2.1 PSDA

U.S Army Research Institute of Environment Medicine(USARIEM)의 기존 Cold Thermoregulatory Model(CTM)을 기반으로 차가운 공기와 물에서 장시간 열 손실에 관한 Six Cylinder Thermoregulatory Model(SCTM)을 도출하였다(Xu et al., 2008). PSDA는 익수자의 저체온증을 생존의 가장 중요한 변수로 설정하였고, 익수자와 생존정에 탑승하고 있는 조난자의 경우 탈수를 생존의 또 하나의 주요 요인으로 고려해 생존 확률을 제공한다. PSDA는 신체를 머리, 몸통, 다리(상/하), 팔(상/하) 6개의 실린더로 나눈다(Fig. 2 참조). 각 실린더는 코어, 근육, 지방, 피부와 함께 혈액과 의복 층으로 세분화되어 있다. 체형은 실린더의 크기와 층을 추정하는데 사용된다(Xu et al., 2008, 2014). PSDA는 캐나다의 CESM에 비해 온난 지역에서 활용성을 높인 모델이다.

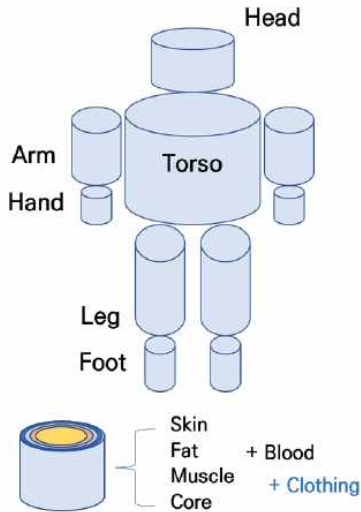


Fig. 2 Six Cylinder Thermoregulatory Model (SCTM)

2.2 CESM

캐나다의 낮은 수온 조건에 적합하며, 종속변수 인지 기능이 상실되는 시간 생존가능 시간을 출력한다. 수색구조 의사 결정지원을 위해 개발되었다. 모델의 독립변수는 신체적 특징(몸무게, 키, 연령), 노출 조건(몰입된 정도), 의복, 수온, 기온, 풍속, 습도, 해상상태, 익수자의 피로도가 있다. 대부분의 조난 사고는 이런 세부사항을 모두 알 수 없기 때문에 신체적 특징 범위를 기반으로 생존 시간을 확률적으로 예측하는 알고리즘이 있다. 그리고 조난자가 구명정에 스스로 탑승에 성공할 확률을 계산하는 알고리즘도 있다(Keefe and Tikuisis, 2008).

2.3 MOIST Guideline

USCG Research & Development Center(이하 “USCG R&DC”)에서 USCG Marine Information for the Safety and Law Enforcement(이하 “MISLE”) 데이터베이스에 UKNIIS 데이터를 추가하여 2254 건의 방대한 데이터를 기반으로 새로운 생존 시간 수식을 구축하였다. MISLE은 USCG의 남부 구역과 양쪽(Atlantic/Pacific) 구역의 자료만 추출하여 분석했기 때문에 차가운 수온에서 관측된 UKNIIS 자료를 보완하였다. 또한 MOIST는 수온이 15°C 이상에서 PSDA를 보완할 수 있다(USCG R&DC, 2009).

USCG R&DC는 MOIST Guideline 개발을 위해 Fig. 3과 같이 2°C ~ 27.8°C (35.6°F ~ 82°F) 범위의 수온에서 최대로 생존한 13개 중 2개의 이상치(Rob Hewitt & South Carolina stranding case)를 제외한 11개를 선택하였다. 11건의 생존자는 일정 기간 더 오래 생존할 수 있었기 때문에 12건(Rob Hewitt 사례 1건 추가)의 95% 신뢰구간에 기초한 안전 마진이 추가되었다. MOIST의 함수는 식 (1)과 같다(Tipton et al., 2022).

$$MOIST = 5.75 \times e^{0.1 \cdot SST} \quad (1)$$

여기서, SST : 바다의 표면 온도(°C)

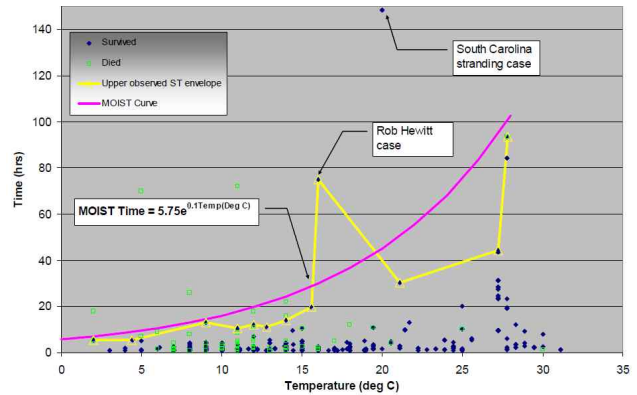


Fig. 3 MOIST guideline function and the final extreme survival cases(USCG R&DC, 2009)

IAMSAR 매뉴얼은 일반적인 의복을 입은 익수자의 수온에 따른 최대 생존시간을 Fig. 4과 같이 MOIST Guideline을 활용하여 제시하고 있다. 단, 수색 시간을 결정할 때 고려해야 할 요소가 많으므로 권장 수색 시간을 제시하지 않는다는 점이 명시되어 있다(ICAO and IMO, 2019).

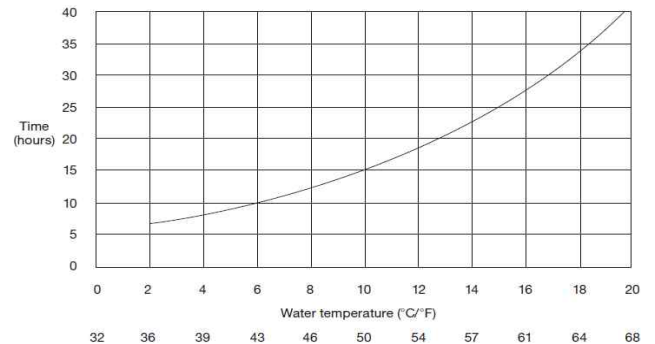


Fig. 4 Realistic upper limit of survival time for people in the water wearing normal clothing, from time of entry into the water(ICAO and IMO, 2019)

2.4 기타 생존시간에 관한 연구

앞서 소개한 주요 해외생존모델 외 익수자 관측 사례(Molnar, 1946; Xu and Giesbrecht, 2018), 실험실 또는 현장 실험 자료를 통한 추론(Hayward et al., 1975; Hayward and Eckerson, 1984; Golden and Tipton, 2002), 인간 체온조절 시스템의 수학적 모델을 이용한 체온저하와 생존시간을 추정된 연구사례(Wissler, 2003; Xu and Tikuisis, 2014)가 있다. 이 연구 결과 생존시간 산식 (2)(Hayward et al., 1975)와 생존시간 산식 (3)(Xu and Giesbrecht, 2018)) 등이 개발되었다.

$$ST(hrs) = 0.25 + 0.12 \div (0.0785 - 0.0034) \times T_w \quad (2)$$

$$ST(hrs) = 0.0547 \times T_w^2 + 0.5048 \times T_w + 1.3604 \quad (3)$$

여기서, ST : 생존시간
 T_w : 해수 온도(°C)

수많은 개인차(나이, 성별, 지방, 의복, 구명동의 등)가 있고 해양 환경(기온, 수온, 풍속, 습도 등)이 다양해서 각 생존시간 추정 모델은 장단점이 다르다. 익수자 생존시간에 대한 여러 연구결과(Allan 1983; Golden 1973; Golden and Tipton, 2002. Hayward et al., 1975; Keatinge 1969; Lee and Lee, 1989; Molnar 1946; Nunnely and Wissler, 1980; Tikuisis 1997)를 종합한 결과는 Table 1과 같다. 차가운 수온에서 개인의 생리학적 요인이 수온에 압도되므로 각 모델별 생존시간 추정값이 비슷하지만, 수온이 상승할수록 개인차가 생존시간 변동요인으로 작용하여 모델별 추정시간이 크게 달라진다(Tipton et al, 2022).

개인차와 해양환경이 다양하기 때문에 추정된 생존시간을 기반으로 추천 수색시간을 결정하는 것은 어렵다. 그래서 해양수색구조를 담당하는 기관은 수색시간을 누구나 합리적으로 예상할 수 있는 생존시간 이상으로 연장한다. 다소 주관적이지만 일반적으로 추천 수색시간을 추정되는 50% 생존시간의 최소 3~6배로 간주한다. 예외적으로 체격이 건장한 사람은 추정되는 50% 생존시간의 최대 10배만큼을 추천 수색시간으로 고려할 수 있다(Golden and Tipton, 2002).

Table 1 Range of estimated survival times for lightly clad males and recommended search times for a range of water temperatures(Allan 1983; Golden 1973; Golden and Tipton, 2002. Hayward et al., 1975; Keatinge 1969; Lee and Lee, 1989; Molnar 1946; Nunnely and Wissler, 1980; Tikuisis 1997)

Water Temp.(°C)	50% Survival Time(hrs)	Immersion time resulting in a "likely death"(hrs)	Recommended search time (hrs)
5	1.0~2.2	0.9~2.3	6
10	2.0~3.6	2.5~4.0	12
15	4.8~7.7	3.0~9.0	18

2.5 해외 주요 생존모델 비교

Table 2에서 해외 주요 생존 모델별로 수학적 개발 근거, 입력값(독립변수), 최대 생존시간을 비교하였다.

Table 2 Comparison of Model Characteristics and Functionality (USCG R&DC, 2009)

Model	PSDA	CESM	MOIST
Mathematical Bases	Energy balance equation	Heat transfer between body and environment	Regress analysis of a subset of 12 long term survival cases
Inputs	Clothing, height/weight, fat, immersion level, temperature(air, water), humidity, wind speed	Gender, age, height/weight, fat, fatigue, immersion level, temperature(air, water), humidity, wind speed, sea state, garments	Water temperature
Max. Search Time (hrs)	120	36	N/A

3. 국내 익수자 생존시간 자료조사

이 논문에서 해경에서 최근 3년간(2019년~2021년) 조사한 해양수색구조 사례, 해양조난사고 시 인명구조를 담당하는 해양경찰 해양특수구조단 대상 전문가 면담 및 설문조사, 언론 보도자료 및 기상청 자료를 분석하였다.

3.1 해경 해양수색구조 사례 · 언론보도 자료 · 기상청 자료 조사

해경에서 최근 3년간(2019년~2021년) 조사한 해양수색구조 사례, 언론 보도자료, 기상청 자료, 해경 구조대원 57명이 관측한 자료를 이용해 익수자 구조 당시 생존/사망 여부, 수색(경과)시간, 수온을 분석하였다. 수색시간 120시간 이내에 구조된 익수자는 사망 131명, 생존 74명이다. 이 중 전북선박 위에서 구조되어 해수에 의한 체온 손실이 적은 생존사례 2명을 제외하였다. Fig. 6은 우리나라에서 발생한 조난사고에서 관측된 자료 203건(사망 131명, 생존 72명)에 대해 구조 당시 사고 수색(경과)시간 및 수온에 따른 익수자 생존/사망 여부를 나타낸 것이다.

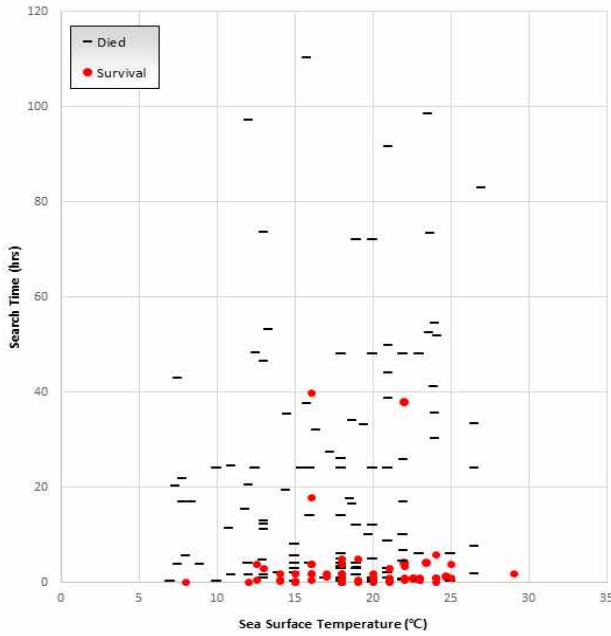


Fig. 5 Immersed victim data observed in Korea

3.2 해경 해양특수구조단 대상 전문가 면담 및 설문조사

해경에서 최근 3년간(2019년~2021년) 조사한 해양수색구조 사례의 익수자 생존시간 자료가 부족하여 해경 해양특수구조단 대상 전문가 면담 및 설문조사, 언론 보도자료, 기상청 자료를 추가 조사하였다.

해경 수색구조 대원의 생존자 구조(사체 회수 포함) 경험을 조사하기 위해 해양특수구조단 57명을 대상으로 전문가 면담 및 설문조사를 수행하였다. 전문가 면담에 사용된 설문 문항은 근무경력, 경험 및 인식 기반 구조 당시 생존 여부와 수온에 따른 50% 생존시간 및 최대생존시간, 구명동의 착용 여부 및 기상 악조건 따른 생존시간 변화율, 생존율에 영향을 미치는 요인으로 구성되었다. 설문 응답자들은 모두 해양조난사고의 인명구조 현장 경험이 있으며 근무연수는 평균 9.1년이다. 익수자가 구명동의를 착용하고 있거나 부유물을 잡고 있을 때 수온별로 50% 확률로 생존해(중앙 생존시간) 있을 것으로 예상되는 시간 범위와 최대 생존가능 시간 범위를 구조대원의 경험과 인식에 기반하여 응답한 것을 사분위 수로 분석하였다 (Table 3와 Fig. 5).

수온별(0°C~30°C 사이 5°C간격) 생존가능 시간은 시간범위로 설문하였기 때문에 시간범위의 중간값을 적용했다. 설문의 온도별 생존시간 범위를 0~5°C에서 1시간 단위, 5~10°C에서 1.5시간 단위, 10~15°C에서 2.5시간 단위, 15~20°C에서 4시간 단위, 20~25°C에서 7시간 단위, 25°C이상에서 10시간 단위로 12개 구간을 설문하였다. 이처럼 수온이 높을수록 설문한 시간 범위가 넓으므로 사분위 범위 수(Inter Quartile Range, IQR)도 크다.

사분위 수 중 중앙값(Q2)이나 산술평균(Mean)은 단순히 값의 50번째 백분위수나 집중경향 값을 나타내므로 안전 마진을

고려하여 3 사분위 수(Q3)를 생존시간 분석에 사용하였다. 50% 생존시간은 수온 0~5°C에서 1.5시간, 5~10°C 2.25시간, 10~15°C 3.75시간, 15~20°C 10시간, 20~25 24.5시간나, 25°C 이상 45시간으로 나타났다. 최대 생존시간은 수온 0~5°C에서 2.5시간, 5~10°C 5.25시간, 10~15°C 8.75시간, 15~20°C 22시간, 20~25 42시간, 25°C 이상 65시간으로 나타났다(Table 5과 Fig. 5).

그리고 3 사분위 수(Q3)에서 50% 생존시간 보다 최대 생존시간이 약 1.8배 높게 나타났다(Table 5과 Fig. 5). 이는 50% 생존시간이 지나면 생존확률이 빠르게 낮아진다고 해석할 수 있다.

Table 3 50% & maximum survival time based on experience and perception

Sea Surface Temp. (°C)	50% Survival Time (hrs)					
	Q1	Q2	Q3	IQR*	M±SD**	Min-Max
0~5 (n=51)	0.50	0.50	1.50	1.00	1.1±1.1	0.5-5.5
5~10 (n=51)	0.75	2.25	2.25	1.50	2.1±2.0	0.75-18.75
10~15 (n=55)	1.25	3.75	6.25	5.00	4.4±3.8	1.25-18.75
15~20 (n=54)	6.00	6.00	10.00	4.00	9.7±8.2	2.0-38.0
20~25 (n=53)	10.50	17.50	24.50	14.00	20.1±14.9	3.5-73.5
Over 25 (n=52)	15.00	30.00	45.00	30.00	34.6±24.8	5.-115.0
Sea Surface Temp. (°C)	Maximum Survival Time (hrs)					
	Q1	Q2	Q3	IQR	M±SD	Min-Max
0~5 (n=53)	0.50	1.50	2.50	2.00	1.9±1.5	0.5-7.5
5~10 (n=53)	2.25	2.25	5.25	3.00	3.5±2.6	0.75-12.75
10~15 (n=54)	3.75	6.25	8.75	5.00	7.6±5.4	1.25-23.75
15~20 (n=54)	10.00	10.00	22.00	12.00	15.2±10.0	2.0-42.0
20~25 (n=55)	17.50	24.50	42.00	24.50	31.8±20.4	3.5-87.5
Over 25 (n=54)	25.00	45.00	65.00	40.00	49.5±31.1	5.0-120.0

*IQR: Inter Quartile Range

**M±SD: Mean ± Standard Deviation

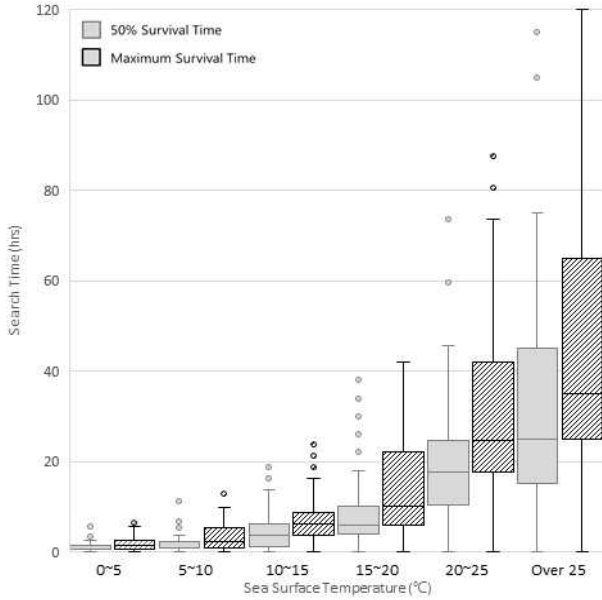


Fig. 6 50% and maximum survival time based on experience and perception of special rescue team

수온이 낮은 환경에서 생존시간은 순 열손실에 의해 결정되지만, 수온이 따뜻한 환경에서 익수자의 신진대사에 의해 생성되는 열에너지와 공기 및 해수에 의한 열손실과 평형을 이룰 수 있다. 탈진 시작에 영향을 미치는 요인은 생리학 관련 학계에서 그 원인을 명확히 알지 못하기 때문에 생존시간은 120시간 이하로 제한되었다(USCG, 2022). 최대 생존시간(120시간)은 PSDA 개발자가 관측된 익수자 최대 생존시간(90시간)에 33%의 여유를 추가한 것이다(USCG, 2022). 국내 익수자 생존시간 분석에 최대 생존시간 120시간을 적용하였다.

4. 국내 익수자 생존시간 지침 개발 및 제언

4.1 국내 익수자 생존시간 지침 개발

이 논문에서는 15~25°C 수온 범위에서 3명의 장기 생존자와 해경 구조대원이 경험하여 인식하고 있는 익수자 최대 생존시간 3사분위 수(Q3) 6개 자료에 초점을 맞추어 분석하였다. Fig. 7에서 익수자의 최대 생존시간을 나타내기 위해 9개의 자료를 주관적으로 선택하여 실선으로 연결하였다.

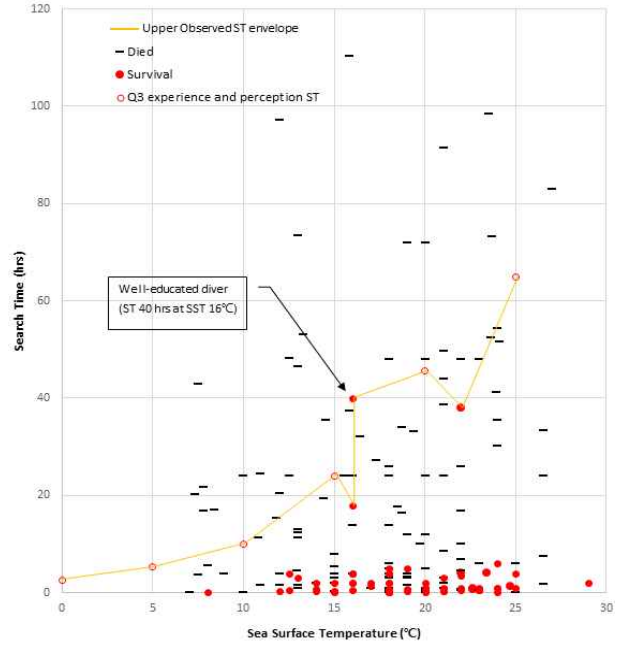


Fig. 7 Immersed victim data observed in Korea & The upper quartile (Q3) of data set of maximum survival time based on Korea rescue unit's experience and perception

이 자료의 형태는 1건(수색시간 40시간, 해수 표면온도 16°C)을 제외하면 거의 로그 선형으로 나타난다. 예외 1건은 생존 기술을 교육받은 잠수사가 보온이 잘 되는 전신 잠수복을 입고 강한 삶의 의지를 가지고 생존(수색시간 40시간, 해수 표면온도 16°C)한 것이다. 예외 1건을 제외한 8개 자료를 이용해 지수함수 추세 분석을 수행했다. 추세 분석 결과는 식 (4)와 같다.

$$ST = 2.61 \times e^{0.13 \cdot SST} \quad (4)$$

여기서, ST : 최대 생존시간

SST : 해수 표면 온도

익수자가 생존하여 구조된 경우 일정 시간동안 더 오래 생존할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 잠재적인 추가 생존시간을 적용하기 위해 지수함수 추세 분석에 사용된 8개 자료에 예외 1건을 추가하여 9개의 자료의 상위 95% 신뢰구간을 안전 여유 범위로 추가하였다. 예외 1건은 익수자의 안전 여유 범위를 증가시키는 효과가 있다. 상위 95% 신뢰구간을 안전 여유 범위로 추가하고 최소 제곱법을 이용해 곡선 맞춤(Curve Fitting)을 하였다(Fig. 8).

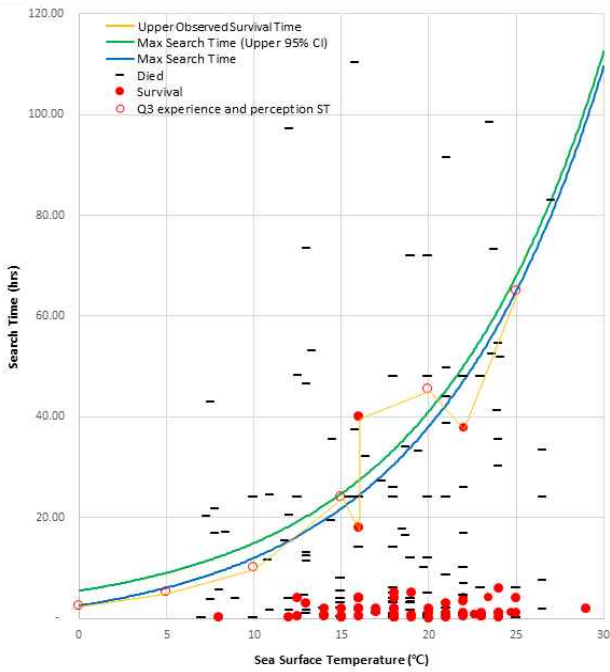


Fig. 8 Fig. 7 with the exponential regression and associated 95% confidence intervals

한국에서 관측된 익수자 생존시간 자료 중 수온별로 최대로 생존한 사례를 이용해 회귀분석을 수행하였고 안전 여유 범위를 추가해 수온에 따른 한국형 최대 생존시간 지수함수 식 (5)와 같이 도출하였다.

$$ST_{korea} = 5.46 \times e^{0.1 \cdot SST} \quad (5)$$

여기서, ST_{korea} : 최대 생존시간(한국형)

SST : 해수 표면 온도

ST_{korea} 그래프(Fig. 9 참조)는 우리나라 해역에서 한국인 체형의 익수자가 수온별로 얼마만큼의 시간 동안 극단적으로 생존할 수 있는지를 나타낸다. 해경 현장 임무 조정관이 익수자가 생존정 탐승여부 등 익수자에 대한 상세정보를 알 수 없을 때 이 산식과 과거 관측 사례를 이용해 익수자 생존 가능성을 추정할 수 있다. 이 산식에 의한 그래프는 생존할 수 있는 시간 상한선으로 간주할 수 있다. Fig. 9와 같이 대부분의 익수자는 ST_{korea} 식에 의한 생존시간보다 짧은 시간에 사망하였다.

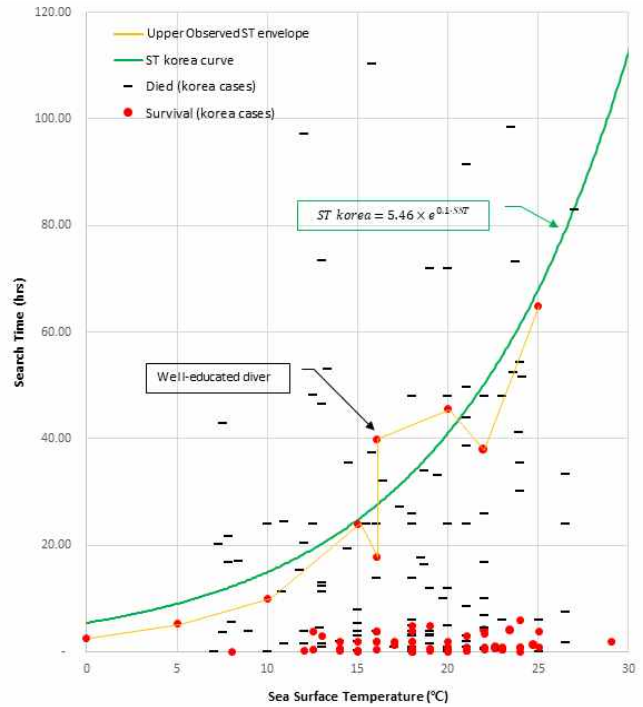


Fig. 9 A linear representation of Fig. 7 showing the ST korea equation with the observed nine extreme survival time and other survival and died data

Fig. 10과 Table 4은 MOIST Curve와 ST Korea의 최대 생존시간을 비교한 것이다. ST_{korea} 가 MOIST의 최대 생존 시간보다 0.3~2.8 시간 (5~2%) 낮게 나타났다. MOIST는 우리나라보다 체격(키, 몸무게 등)이 더 좋은 영국인, 미국인 등(Rodriguez-Martinez, Andrea, et al, 2020)을 대상으로 도출했기 때문에 ST_{korea} 의 최대 생존시간보다 높게 나타난 것이라고 판단된다.

Table 4 Comparison between MOIST and ST Korea

Sea Surface Temp. (°C)	Ⓐ MOIST (hr)	Ⓑ ST korea (hr)	Difference (hr) (Ⓐ-Ⓑ)	Ratio(%) (Ⓑ/Ⓐ*100)
0~5	5.8~9.5	5.5~9.0	0.3~0.5	95
5~10	9.5~15.6	9.0~15.0	0.5~0.6	96
10~15	15.6~25.8	15.0~24.8	0.6~1.0	96
15~20	25.8~42.5	24.8~41.0	1.0~1.5	96
20~25	42.5~70.0	41.0~68.0	1.5~2.0	97
Over 25	Over 70.0	68.0~Max. 120	2.0~2.8	98

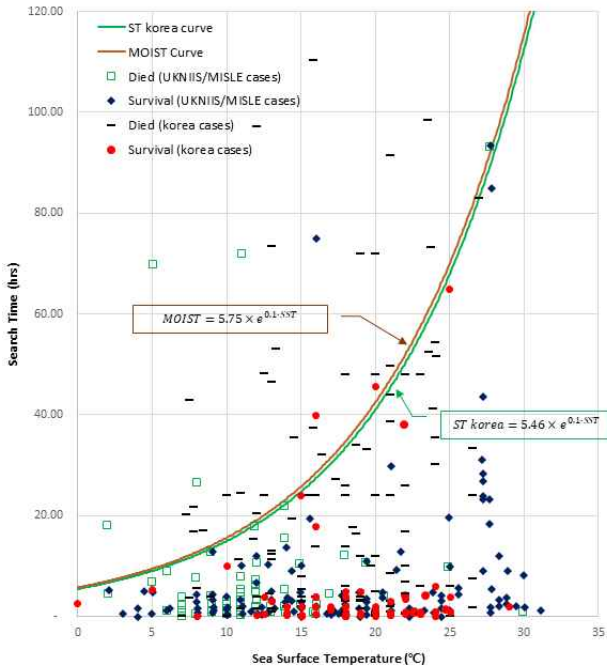


Fig. 10 Comparison between MOIST and ST Korea equation with the observed survival and died data

4.2 해양수색구조 의사결정을 위한 수색시간 지침 제언

본 연구에서 도출한 ST_{korea} 식을 이용해 Table 5과 같이 최대 생존 가능 최대시간을 도출하였다. 0~15°C의 50% 생존 가능시간은 해외 생존모델을 이용해 제시한 Table 1을 인용하였다. 15°C 이상에서 50% 생존시간은 해경 수색구조 대원의 경험 및 인식 기반 자료에서 안전 마진이 고려된 3사분위수(Q3)를 이용했다.

대부분의 익수자는 ST_{korea} 에서 제시하는 최대 생존시간보다 짧은 시간 내에 사망하였고 이 최대 생존시간보다 오래 생존한 사례(교육을 잘 받은 дайвер 사례 제외)는 관측되지 않았다. 수색구조 작전을 유지해야하는 추천 수색기간을 제시할 때 최대 생존시간을 적용했다.

Fig.11에서 확인할 수 있듯이, 익수자의 생존확률이 약 80%에서 일정시간동안 지속되다가 특정 시점에서 생존확률이 80%에서 40%로 급격히 낮아지며, 이는 50% 생존 시간 전에 익수자의 생존 확률이 높기 때문에 수색자원을 집중 투입하여 신속하게 구조해야 함을 의미한다. 구조된 익수자의 생존확률을 극대화하기 위해 수색자원을 집중적으로 투입해야 하는 집중 수색시간을 50% 생존시간을 참고하여 제시하였다.

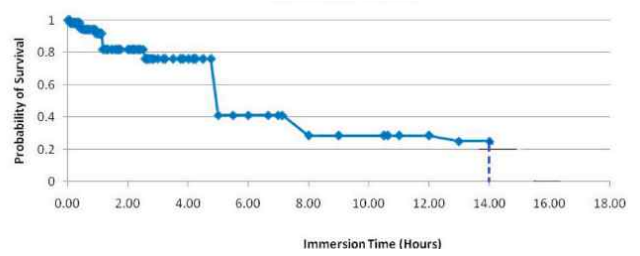


Fig. 11 Probability of survival after a given immersion (Turnbull (1974); Ayer et al. (1955))

생존에 치명적인 영향을 미치는 인체의 중심(Core) 부분의 온도를 PSDA에서 25°C(Xu, et al., 2008, 2014), CESM에서 28°C(Keefe and Tikuisis, 2008)로 설정하였다. PSDA와 CESM에 의하면 25°C~28°C 이상에서 생존가능성은 무한대가 되고, 익수자 생존시간은 탈수가 주요 영향 요소로 작용할 수 있다. 그러나 PSDA에서 설정한 최대 탈수 영향율은 20%로 큰 영향을 미치지 않으며, 익수자가 90시간 이상 생존한 사례가 없었다(Xu, et al., 2008, 2014). 우리나라 수색시간 지침표의 최대 생존시간은 PSDA 개발 시 고려한 최대 생존시간 120시간(90시간+33% 안전마진)을 준용하였다.

Table 5 Survival time and search time in sea water

Water Temp (°C)	50% survival time	Max. Survival Time(hrs)	Intensive Search Time(hrs)	Recommended Search Time(hrs)
0~5	1.0-2.2	9.03	3	10
5~10	2.0-3.6	14.96	4	15
10~15	4.8-7.7	24.78	8	25
15~20	10.0	41.04	10	42
20~25	24.5	67.96	25	68
Over 25	45.0	120.0	45	120

5. 결 론

과학적인 해양수색구조 의사결정 지원을 위해 본 연구에서는 국내 사고 이력 자료와 해외 생존모델을 참고하여 우리나라 익수자의 수온에 따른 최대 생존시간 산식과 수색시간 지침을 개발하였다.

수색구조 작전은 생존자를 구조할 가능성이 있는 한 종료할 수 없으므로(MOGL, 2021) 익수자가 최대한으로 생존할 가능성이 있는 시간을 참고하여 추천 수색시간 동안 수색이 진행되어야 한다. 그리고 구조된 익수자의 생존확률을 극대화하기 위해 수색자원을 집중적으로 투입해야하는 집중 수색시간을 제시하였다.

이 논문에서 제시하는 수색시간 지침은 해양 조난사고 발생 시 생존정 탐승여부 등 익수자에 대한 상세한 정보를 알

수 없을 때 다양한 시나리오를 수립할 수 있는데 이때 어느 시나리오에 수색자원을 집중 투입해야 할지 가치를를 선정할 때도 참고할 수 있다. 또한 조난자 가족과 국민 대상으로 수색 구조 의사결정 내용을 설명하는 데 도움이 될 것이다.

미국, 캐나다 등 해양 선진국에서는 1805년부터 기록된 방대한 익수자 자료를 이용해 기존 수색자료와 생물물리학적 이론에 기반하여 다양한 변수에 따른 정확한 생존시간을 추정하는 모델을 개발하였지만 우리나라의 경우 해양 환경과 개인차에 대해 상세히 기록되어 있지 않아 정확한 생존시간을 추정하는데 한계가 있었다. 이 연구는 이러한 한계를 극복하고 우리나라에서 활용이 가능한 대안을 제시하였다는 데 그 의미가 있다.

향후 우리나라 해역에서 한국인 체형에 적합한 ST korea 식을 개선하고 다양한 해양 환경과 개인차에 따른 생존시간을 정확하게 추정하기 위해 지금부터라도 익수자 생존시간에 대한 상세한 관측 자료(수온, 해역, 연령, 성별, 착용 의복/구명동의, 체격조건 등)를 수집하고 추가 연구하는 것이 필요하다.

후 기

이 논문은 2023년도 정부(해양경찰청)의 재원으로 해양수산과학기술진흥원-지능형 해양사고 대응 플랫폼 구축사업 지원을 받아 수행된 연구임(KIMST-20220463).

본 논문은 해양경찰청의 지능형 해양사고 대응 플랫폼 구축사업(과제번호: 20220463)의 지원을 받아 한국환경연구원이 수행한 “AI 기반 해양수색구조 의사결정 지원시스템 개발(2023-009(R))” 과제의 연구결과로 작성되었습니다.

References

- [1] Allan, J. R.(1983), “Survival after helicopter ditching: a technical guide for policy makers”, International Journal of Aviation Safety, Vol. 1, pp. 291-296.
- [2] Ayer, M., Brunk, H. D., Ewing, G. M., Reid, W. T. and Silverman, E.(1955), “An empirical distribution function for sampling with incomplete information“, The Annals of Mathematical Statistics, pp. 641-647.
- [3] Golden, F.(1973), “Recognition and treatment of immersion hypothermia”, In Proc Royal Soc Med, Vol. 66, pp. 1058-1061.
- [4] Golden, F. and Tipton, M.(2002), “Essentials of sea survival. Human Kinetics”.
- [5] Hayward, J. S., Eckerson, J. D. and Collis, M. L.(1975), “Thermal balance and survival time prediction of man in cold water”, Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, Vol. 53, No. 1, pp. 21-32.
- [6] Hayward, J. S. and Eckerson, J. D.(1984), “Physiological responses and survival time prediction for humans in ice-water”. Aviation, Space, and Environmental Medicine, Vol. 55, No. 3, pp. 206-211.
- [7] ICAO and IMO(2019), “International Aeronautical and Maritime Search and Rescue (IAMSAR) Manual”, Vol. II, pp. N-19.
- [8] KCG(2022), “Statistical Yearbook of Marine Distress”, p. 10.
- [9] Keatinge, W. R.(1969), “Survival in cold water: The physiology and treatment of immersion hypothermia and of drowning”.
- [10] Keefe, A. A. and Tikuisis, P.(2008), “A guide to making stochastic and single point predictions using the Cold Exposure Survival Model (CESM)”, Defence R&D Canada, p. 2, p. 8, p. 22.
- [11] Kim, S. C., Lee, K. H., Hwang, S. Y., Jang, H. S. Lee, J. H.(2016), “Comparative Studies of Thermal Insulation Performance of Life Vests by Numerical Analysis and Experiment”, Journal of Navigation and Port Research, Vol. 40, No. 1, pp. 7-14.
- [12] Lee, E. C. B. and Lee, K.(1989), “Safety and Survival at Sea”.
- [13] Lee, E. B. and Han, D. S.(2023), “A Study on the Improvement of Maritime Search and Rescue Statistical System”, Korean Association of Maritime Police Science, Vol. 13, No. 3, pp. 21-39.
- [14] Lee, M. J., Gong, I. Y. and Kang, C. G.(1999), “Tracking Model of Drifted Ships for Search and Rescue”, Journal of the Korean Society for Marine Environment Engineering, Vol. 2, No. 2, pp. 77-85.
- [15] Lee, S. Y. and Lee, C. M.(2010), “A legal Consideration of Public-Private-Partnership by Maritime Accident - Focusing on SAR and Ship Salvage -”, Korean Association of Public Safety and Criminal Justice, Vol. 19, No. 4, pp. 339-371.
- [16] MOF(2023), “Maritime Safety Implementation Plan”, p. 8.
- [17] MOGL(2021), “Act on the Search and Rescue in Waters”.
- [18] Molnar, G. W.(1946), “Survival of hypothermia by men immersed in the ocean. Journal of the American Medical Association, Vol. 131, No. 13, pp. 1046-1050.
- [19] Nunnely, S. A. and Wissler, W. H.(1980), “Prediction of hypothermia in men wearing anti-exposure suits and/or using life rafts”, The Advisory Group for Aerospace Research and Development (AGARD) -Control Panel(CP)-286, pp. A1-A1-A1-8.
- [20] Rodriguez-Martinez, A., Zhou, B., Sophiea, M. K., Bentham, J., Paciorek, C. J., Iurilli, M. L. and Boggia,

- J. G.(2020), "Height and body-mass index trajectories of school-aged children and adolescents from 1985 to 2019 in 200 countries and territories: a pooled analysis of 2181 population-based studies with 65 million participants", *The Lancet*, Vol. 396, Issue, 10261, pp. 1511-1524.
- [21] Tikuisis, P.(1995), "Predicting survival time for cold exposure", *International journal of biometeorology*, Vol. 39, No. 2, pp. 94-102.
- [22] Tikuisis, P.(1997), "Prediction of survival time at sea based on observed body cooling rates", *Aviation, space, and environmental medicine*, Vol. 68, No. 5, pp. 441-448.
- [23] Tipton, M., McCormack, E., Elliott, G., Cisternelli, M., Allen, A. and Turner, A. C.(2022), "Survival time and search time in water: Past, present and future", *Journal of Thermal Biology*, Vol. 110, 103349.
- [24] Turnbull, B. W.(1974), "Nonparametric estimation of a survivorship function with doubly censored data", *Journal of the American statistical association*, Vol. 69, No. 345, pp. 169-173.
- [25] USCG R&DC(2009), "Recommendations for the U.S. Coast Guard Survival Prediction Tool", pp. 8-11.
- [26] USCG(2022), "US Coast Guard Addendum to the United States National Search and Rescue Supplement (NSS) to the International Aeronautical and Maritime Search and Rescue Manual (IAMSAR)", pp. 3-88.
- [27] Wissler, E. H.(2003), "Probability of survival during accidental immersion in cold water", *Aviation, space, and environmental medicine*, Vol. 74, No. 1, pp. 47-55.
- [29] Xiaojiang Xu, Arthur Allen, Timothy Rioux et al.(2014), "Refinement of probability of survival decision aid (PSDA)", *U.S. Army Research Institute of Environmental Medicine*, p. 15.
- [30] Xu, X., Amin, M. and Santee, W. R.(2008), "Probability of survival decision aid (PSDA)", pp. 3-5, p. 21.
- [31] Xu, X. and Giesbrecht, G. G.(2018), "A new look at survival times during cold water immersion", *Journal of thermal biology*, Vol. 78, pp. 100-105.
- [32] Xu, X. and Tikuisis, P.(2014), "Thermoregulatory modeling for cold stress", *Compr Physiol*, Vol. 4, No. 3, pp. 1057-1081.

Received 13 November 2023

Revised 21 November 2023

Accepted 06 December 2023