

## Delphi/AHP 기반 발사장 주변 및 비행경로의 해상안전 강화를 위한 위협요인 분석

신인태 · 박병문 · 변현수\*<sup>†</sup>

한국항공우주연구원 나로우주센터  
59571 전라남도 고흥군 봉래면 하반로 508  
\*전남대학교 화공생명공학과  
59626 전라남도 여수시 대학로 50

(2022년 10월 30일 접수, 2022년 11월 29일 수정본 접수, 2022년 12월 1일 채택)

## An Analysis of Threat Factors for Strengthen Maritime Safety around Delphi/AHP-Based Launch Site and Flight Paths

Ahn-Tae Shin, Byung-Mun Park and Hun-Soo Byun\*<sup>†</sup>

Department of NARO Space Center, Korea Aerospace Research Institute, 508 Haban-ro, Bongrae-myeon, Go-Heung, Jeonnam, 59571, Korea

\*Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Chonnam National University, 50 Daehak-ro, Yeosu Jeonnam, 59626, Korea

(Received 30 October 2022; Received in revised from 29 November 2022; Accepted 1 December 2022)

### 요 약

본 연구는 Delphi/AHP 기법을 사용하여 발사장 주변 및 비행경로의 해상안전 강화를 위한 위협요인 및 중요도를 분석하였다. 우선 Delphi 기법으로, 발사체/공공안전 전문가 집단을 대상으로 4개 질문(발사안전통제 필요성, 발사 공공안전 확보 최우선 고려사항, 해상안전 확보를 위하여 개선할 사항, 해상안전 위협요인)에 대하여 20개 항목으로 답변을 도출하였다. 이를 기반으로 AHP 기법으로 각 항목의 중요도를 평가하였다. AHP 분석결과 4개 질문에 대한 평균 일관성 비율은 4.8%이고, 각 측정지표의 일관성 비율은 3.9~5.7%로써  $CR \leq 0.1(10\%)$  보다 낮으므로 모두 일관성이 있음을 확인하였다. 중요도와 우선순위를 고려한 결과, 발사안전통제가 필요한 이유로 발사 사고 시 인적, 물적으로 큰 피해가 발생 가능성 때문(0.36)으로, 발사안전통제에서 최우선으로 고려할 사항은 위험구역 내 인원, 장비, 시설의 안전 확보(0.31)로 나타났다. 또한, 발사 해상안전 위협요인으로 가장 우려되는 항목은 통제해역 내 선박의 무단 진입, 통제 불가 상황(0.30)이며, 현재 개선하여야 할 대책으로는 이러한 상황을 법적으로 통제할 수 있는 근거 마련(0.32)이 가장 시급하다고 나타났다. 본 논문은 위협요인을 전문가 의견 수렴을 통하여 도출하고, 중요도 및 우선순위를 객관적으로 평가한 부분에 의미가 있다. 향후 위험성 평가 및 안전통제 계획수립 단계에서 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

**Abstract** – In this study, using the Delphi method, 20 responses to 4 questions (need for launch safety control, top-priority considerations for ensuring public safety during launch, necessary improvements for securing maritime safety, and maritime safety threat factors) regarding launch vehicles and public safety were obtained from experts, and their importance was evaluated to analyze the factors that threaten the reinforcement of maritime safety around launch sites and flight paths when launching. According to the results of an analytic hierarchy process (AHP) analysis, the consistency ratio of the four questions was 4.8%, which is lower than  $CR \leq 0.1(10\%)$ , and the consistency percentage of the lower measurement indicators was 3.9~5.7%. The derived importance and priority of maritime safety threat factors during launching were in the following order: Substantial human and physical damage in case of launch accidents(0.36), Prepare legal bases (e.g., penalty details) regarding maritime control(0.32), Secure the safety of personnel, equipment, and facilities in danger zone(0.31), Unauthorized entry of vessels in maritime control zones and non-compliance to

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.

E-mail: hsbun@jnu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

restrictions(0.30). This article can serve as a reference for strengthening maritime safety in areas around launch sites and flight paths.

Key words: Delphi, AHP(Analytic Hierarchy Process), Launch hazard area, Public safety, Maritime safety

## 1. 서 론

우리나라는 한국형발사체(누리호) 개발 및 발사 성공으로 발사체 기술과 위성 기술을 함께 갖춘 세계 7대 우주 강국이라고 평가되고 있다. 최근에는 달궤도선(다누리호)도 성공적으로 발사된 바 있다. 정부에서는 우주 강국 도약 및 대한민국 우주 시대 개막이라고 선언하고 앞으로 다양한 우주산업을 추진한다고 발표한 바 있다.

지난 우주개발 선진국의 발사체 개발과정을 보면 발사(비행시험) 중 수많은 인적·물적 피해를 동반한 치명적인 사고가 발생하였다. 사고가 발생하면 발사체 및 발사장 시설·장비의 손실은 물론 치명적인 인명피해, 자연환경의 파괴, 국가 공공기술정책의 변경 또는 중단 등으로 이어져 왔다. 올해 초에는 미국 케이프커내버럴 우주군 기지(CCSFS)에서 SpaceX 발사시 유람선(크루즈)이 발사장 주변 해상 통제구역으로 진입하여 발사 직전 막대한 비용 손실을 감수하고 발사가 중단된 사례가 있다. 이러한 치명적인 사고에 대비하여 발사시에는 발사장 주변의 육상, 해상, 공역의 공공안전 확보가 필요하고, 공공안전 확보는 초기 계획수립 단계에서 철저한 위험분석 및 안전조치 대응방안 수립 등이 요구된다. 하지만, 국내의 경우 발사 공공안전 확보에 관한 연구가 미흡하고, 해외의 경우, 우주개발 선진국의 발사 공공안전 관련 기술자료를 비공개로 하고 있어, 국내외적으로 관련 문헌이 제한적인 상황이다.

본 연구에서는 발사장 주변 및 비행경로의 해상안전 강화를 위한 위험요인을 분석하기 위하여 발사안전통제 필요성, 공공안전 확보 최우선 고려사항, 해상안전 확보를 위하여 개선할 사항, 해상안전 위험요인을 도출하고 중요도 및 우선순위를 평가하고자 한다.

이를 위하여 발사 시 해상안전 위험 기준 및 위험요인에 대한 문헌 조사와 사례조사를 하였다. 선행연구 조사에서는 화공 안전분야와 공공안전 분야에서 AHP 기법을 활용한 연구자료를 검토하였고, 해상안전 위험 기준에 대한 문헌 조사를 하였다. 사례조사에서는 국내외 발사장 해상안전통제 사례를 검토하였다. 다음으로 Delphi 기법을 활용하여 발사체/공공안전 전문가 의견수렴을 통하여 발사

공공안전 위험요인을 도출하였고, AHP 기법을 활용 데이터의 일관성을 검증하고, 중요도 및 우선순위를 분석하였다. 분석된 자료는 향후 해상안전 위험요인의 위험성 평가 및 안전통제 계획수립 단계의 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대한다. Fig. 1은 본 연구에서 진행된 연구방법 순서도를 나타내었다.

## 2. 선행연구 및 문헌 조사

### 2-1. 선행연구 조사

정유 및 석유화학 플랜트 중대사고 전조 신호 평가지표 개발에 관한 연구[1]에서는 AHP 기법을 적용하여 중대사고 전조신호 판단 기준과 항목별 가중치가 적용된 평가지표를 개발하고 정유 및 석유화학 플랜트에 적용하여 분석하였다. 모델링 기반 사고대응 절차 수립 방법에 관한 연구[2]에서는 Bow-Tie 기법, 사고 전개 모델, 위험 대응 의사결정 등 위험 관리 기법을 적용하여 사고대응 가이드라인 작성 절차를 제안하고 실제 사용을 위한 Sheet를 개발한 바 있다. AHP를 활용한 안전밸브(PSV) 고장모드의 Cause Factors 우선순위 분석[3] 선행연구에서는 안전밸브(PSV)의 Failure Mode Cause Factor (FMCFs) 관련 주요 평가 요인을 Delphi 조사를 통하여 도출하였고, AHP를 적용하여 우선순위를 계산 한 바 있다. 해상사격장 선박분포 특성 분석을 통한 해상안전 개선방안에 대한 연구[4]에서는 해상사격장 선박분포 조사를 토대로 월별, 계절별, 시간대별, 파고별 특성을 분석하였다. 추진시험설비의 사고피해영향 분석 및 리스크 감소방안[5] 선행연구에서는 발사체 추진체 누설사고 시나리오를 가정하고, TNT당량모델 실험식을 적용하여 폭발과압에 대한 사고피해 영향을 분석하였고, 추진시험설비의 안전성 확보를 위한 리스크 감소방안에 대하여 기술적, 제도적, 관리적 안전대책에 대하여 제시한 바 있다. 우주발사체의 발사에 의한 일반인의 허용위험도 검토[6]에서는 우주발사체의 정상 혹은 비정상 기동에 의해 지상에 위치하는 사람에게 발생할 수 있는 예상 인명피해 관점에서 지상 위험의 허용값에 대해 검토한 바 있다. 발사체 고체추진체의 저장 및 시험 시 안전거리 산정에 관한 연구[7]에서는 고체추진체를 안전하게 사용하기 위한 최소한의 안전거리 산정기준 및 사례를 제시한 바 있다. 모델링 기반 사고대응절차 수립 방법에 관한 연구[8]에서는 사고대응 가이드라인 작성방법을 제시하기 위하여 사고의 진행모형을 수립하고, 이 모델로부터 가이드라인을 수립하는 방법과 실제 사용을 위한 Sheet를 제시하였다. 신뢰도(RAM) 데이터와 AHP 분석을 이용 한 함정(Warship) 분야의 객관적 위험평가 방안[9] 연구에서는 신뢰도 데이터를 이용하여 위험 발생 빈도를 조사하고, AHP 분석을 통해 위험의 심각도를 평가하여 위험등급 평가 매트릭스에 대입해 위험성 평가를 하였다.

### 2-2. 발사시 해상안전 위험기준 문헌 조사

#### 2-2-1. 발사허가 공공안전 허용 위험기준

발사 시 육상, 해상 및 공역 위험구역 설정은 예상 인명피해 기준을 고려하여 산정하고, 발사 전에 일반인에게 공표하며 발사시간 기준 일정 시간 전부터 발사 후까지 위험구역을 통제한다. 미국 FAA에

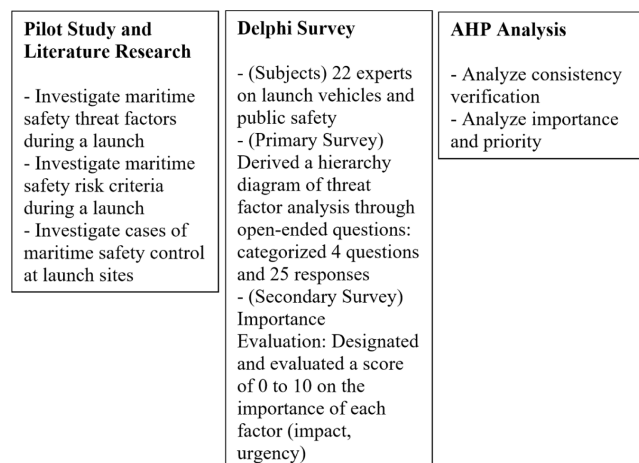


Fig. 1. Research Methodology to Derive Maritime Safety Threat Factors near Launch Stations during Launch.

**Table 1. Current Status of Risk Criteria Tolerated by Public Safety During a Launch**

Undesired Event	General Public	Mission-Essential Personnel
Individual Probability of Casualty	$1E^{-6}$	$10E^{-6}$
Expected Casualties	$100E^{-6}$	$300E^{-6}$
Individual Probability of Fatality	$0.1E^{-6}$	$1E^{-6}$
Expected Fatalities	$30E^{-6}$	$300E^{-6}$

서는 발사허가를 위하여 발사 시 공공안전 허용 위험 기준을 일반 인과 발사참여자자로 구분하여 Table 1과 같이 제시하고 있다[10].

발사허가를 위하여 발사 책임자가 고려하여야 할 일반인에 대한 허용 위험기준을 살펴보면 파편과 폭발과압 1.0 psi에 의한 예상 인명피해 기준으로 검토된다. 발사허가를 위한 예상피해자 수 기준은 일반 대중에 대해  $1E^{-6}$  이하, 발사참여자자에 대해  $10E^{-6}$  이하여야 한다. 발사허가를 위한 예상 치명도는 일반 대중 및 발사참여자자에 대해 각각  $100E^{-6}$  와  $300E^{-6}$ 보다 작아야 한다. 이 기준은 발사체가 이륙하기 전부터 페이로드를 분리하는 순간까지 적용하고 있다.

## 2-2-2. 발사시 해상 안전구역의 산정기준

미국 FAA에 따르면 해상 위험구역의 산정기준은 발사장 주변을 운항하는 가장 큰 선박을 대상으로 선박 충돌 확률이  $10E^{-6}$ ( $1E^{-5}$ ) 이하가 되도록 범위를 산정한다. 또한, 해상 위험구역의 산정기준은 선박에 승선하고 있는 개인에 대한 위험이  $1E^{-6}$ , 집단의 위험이  $100E^{-6}$ 을 초과하며 개별 선박에 대한 재난 위험이 아래의 식 (1)의 기준을 초과하는 영역의 모두 합친 것으로 한다[11]. 이와 함께 발사체 궤적, 속도변화 등을 고려하여 해상 안전구역의 범위는 발사체 임무 설계자가 정한다.

$$P[\geq N] \leq \left( \frac{1 \times 10^{-4}}{N^{1.5}} \right) \quad (1)$$

여기서,  $P[\geq N]$ 은  $N$ 이상의 사상자를 유발 할 수 있는 모든 사고의 누적 확률이고,  $N$ 은 점유자 하중(해당 범위 내에 있는 모든 사람)을 기준으로 한 사상자의 수를 의미한다.  $10^{-4}$ 는 허용 가능한 최대 예상값이다.

## 2-2-3. 발사시 해상사고 피해유형의 임계값

사고피해 영향을 평가할 때 고려되는 항목으로는 파편과 폭발과압, 복사열 및 화학체에 의한 피해가 있다. 이들 중 해상사고 피해는 대상이 무엇인지 어떠한 상태인지에 따라 다양한 결과들로 이어질 수 있다. 발사체 해상사고를 고려할 때 인체와 선박에 직접 피해를 주는 파편과 폭발과압을 대상으로 피해대상 및 상태에 따라 외부에 노출된 인원, 구조물 내부의 인원, 선박 내부의 인원 3가지의 피해유형에 대한 임계값을 검토하였다.

### 2-2-3-1. 외부 노출 인원

파편이 인체를 가격하면 흉부외상을 발생시킬 수 있다. 흉부외상은 둔상과 관통상으로 나눈다. 둔상은 피부의 관통 없이 외부 충격만으로 내부 장기 손상을 일으키는 경우이고, 관통상은 파편이 신체 일부를 뚫고 들어가는 직접관통을 동반하는 외상이다. Table 2는 파편에 의한 부상 임계값을 정리한 것이다[11]. 둔상의 손상으로부터 신체를 보호하기 위한 파편 기준은 14.91 Nm 충격 에너지로써

**Table 2. Injury Thresholds**

Hazard Mechanism	Injury Level	Threshold Value
Blunt trauma	Casualty	14.91 Nm
Blunt trauma	Fatality	33.89 Nm
Chunky penetration	Casualty	234.42 kNm <sup>2</sup>

미국, FAA는 14.91 Nm를 모든 상업적 발사에 대한 임계치 기준으로 적용하고 있다. 사망을 막기 위한 파편 한계 기준은 33.89 Nm 충격 에너지이다. 33.89 Nm 값은 Feinstein이 제시한 신체 부위에 의한 10%, 50%, 90% 치명상 그래프부터 유도한 것이다[12]. 관통상으로부터 보호를 위한 임계치 기준은 운동에너지 대 면적의 비로 234.42 kNm<sup>2</sup> 이다.

폭발과압에 의한 피해 중 충격파의 직접 타격에 의하여 생성된 공기 폭발손상을 1차 부상이라고 한다. 전형적인 1차 부상으로는 고막, 후두, 위(폐)의 손상 등 신체 내부 장기피해가 있다. 폭발물 또는 폭발현장 잔해의 파편에 의한 손상은 2차 부상이라고 한다. 충격파에 의하여 신체를 날려버려 강하고 날카로운 부분에 가해지는 충돌 또는 충격은 3차 부상이라고 한다.

폭발과압에 의한 인체 장기피해 임계기준은 보통 고막과열 압력을 기준으로 하고 있다. 고막 파열 압력 기준은 13.79 kPa에서 34.47 kPa까지 발표된 자료마다 값의 범위가 다양하다. 최근에는 1차 부상의 경우(2차, 3차 부상 제외) 가장 보수적인 13.79 kPa 값을 기준으로 채택하고 있다. Table 3은 다양한 신체 부위에 대한 폭발과압 임계기준을 정리하고 있다[11]. 이 값들은 1%의 확률로 발생할 수 있음을 가정하고 있다.

### 2-2-3-2. 구조물 내부 인원

구조물 내부에 대한 파편 위험 임계치는 구조물의 지붕을 관통할 수 있는 추정값을 기초로 한다. 이 값은 지붕 구조에 따라 최대 10 배 이상 차이가 발생하기 때문에 지붕의 구조가 우선 고려되어야 한다. Table 4는 구조물 지붕에 따른 파편의 관통 임계치를 정리하고 있다[11]. 이 값은 지붕에 충격을 가하는 소형의 불규칙한 모양의 강철 파편의 최소 충격 에너지에 대한 관통 임계치를 보여준다. 강철을 기준으로 하는 이유는 파편 재료 중 가장 밀도가 높기 때문이다.

**Table 3. Body Part Sensitivity to Overpressure**

Organ	Threshold (1%) Overpressure (kPa)
Middle/inner ear	1.38
Eardrum	13.79
Larynx	41.37
Gastro-Intestinal Tract	55.19
Lungs	75.84

**Table 4. Threshold Values for Roof Penetration**

Roof Construction	Penetration Criteria	
	Minimum Weight Fragment (kg)	Minimum Kinetic Energy (Nm)
24 gage corrugated aluminum	0.02	23.05
1.59 cm plywood	0.03	40.67
Composite roof (5 cm rigid gypsum insulation on steel purlins)	0.03	40.67
4.39 cm light-weight concrete on 22 gage corrugated steel decking	0.23	561.31

**Table 5. Criteria for Overpressure for Building Damage and Injury**

Window conditions		Threshold criterion (kPa)
No window	When buildings have no windows	6.89
Window	For yields $\leq 22,680$ kg equivalent Trinitrotoluene (TNT) yield	3.45
	For yields $> 22,680$ kg equivalent TNT yield	1.72

폭발과압에 따른 구조물 손상과 인체 부상에 대한 위험 임계값 기준은 구조물의 창문 유무에 따라 Table 5와 같이 정리하고 있다 [11]. 이 기준은 다양한 시험 데이터에 기초한 심각한 부상의 시작이 일어나는 폭발과압의 보수적인 추정치이다.

### 2-2-3-3. 선박 탑승 인원

선박 탑승 인원의 피해는 건물의 경우보다 더욱 복잡하다. 파편의 충격이 배를 침몰시켜 다수의 사람들에게 직접 영향을 미치기 때문이다. 선박의 경우 파편 피해는 갑판실 지붕 관통에 대한 경우와 선체의 관통에 대한 경우를 고려하여야 한다. 또한 선박의 구조적 등급 분류가 필요하고 일반적으로 선박의 길이를 기준으로 분류한다. Table 6은 갑판실 지붕을 관통한 파편의 위험 기준이고, Table 7은 선체를 관통한 파편의 위험 기준이다[11].

**Table 6. Threshold Values for Ship Cabin and Deckhouse Roof Penetration**

Ship Category		Penetration Criteria	
Generic Class of Ship (m)	Roof Material	Minimum Mass Fragment (kg)	Minimum Kinetic Energy (Nm)
$< 7.62$	No roof is assumed	Use criteria for unsheltered persons	
7.62-15.24	1.27 cm plywood	0.03	31.18
15.24-30.48	1.91 cm plywood	0.06	101.69
30.48-60.96	0.25 cm steel	0.54	1,762
60.96-89.92	0.51 cm steel	1.99	10,575
$> 89.92$	0.79 cm steel	4.54	21,693

**Table 7. Threshold Values for Ship Cabin and Deckhouse Roof Penetration**

Ship Category		Penetration Criteria	
Generic Class of Ship (m)	Deck/hull Material	Minimum Mass Fragment (kg)	Minimum Kinetic Energy (Nm)
$< 7.62$	One plywood layer: 1.90 cm	0.27	33.90
7.62-15.24	Two plywood layers: 1.27 cm and 1.90 cm	0.32	155.92
15.24-30.48	Two plywood layers: 1.90 cm each	0.45	277.94
30.48-60.96	Two steel layers: 0.25 cm and 0.51 cm	15.88	54,232
60.96-89.92	Two steel layers: 0.51 cm and 0.77 cm	52.16	96,263
$> 89.92$	Two steel layers: 0.51 cm and 1.02 cm	2,857.63	1,694,772

## 2-3. 발사장 해상안전통제 사례조사

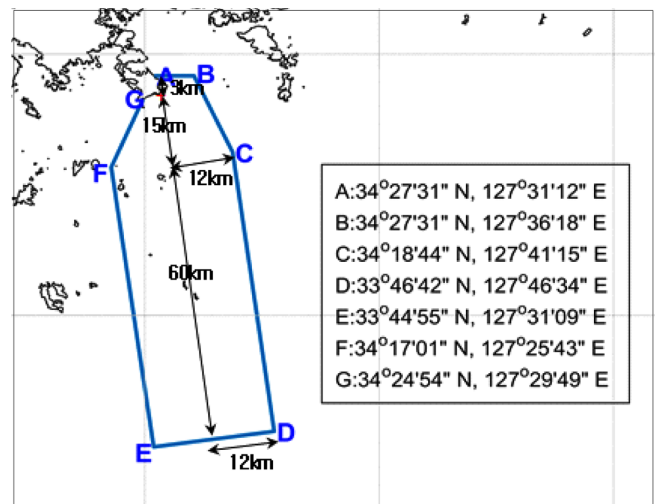
### 2-3-1. 국내사례

나로우주센터는 2009년 준공 이후 나로호(KSLV-1), 시험발사체(TLV), 누리호(KSLV-2)의 성공적인 발사가 이루어진 곳이다. 발사체의 안전한 발사를 위하여 발사장 주변 및 비행궤도에 따른 일정 해역을 위험구역으로 설정하고 인원 및 선박의 안전대책을 시행하고 있다. 발사 해상 공공안전 확보를 위하여 발사안전통제실이 가동되고 각 분야별 유관기관 협력관이 배치된다. 인원 및 선박 등의 해상안전을 위하여 Fig. 2와 같이 일정 범위를 통제구역(누리호의 경우 비행 방향 폭 24 km, 길이 78 km)으로 설정하고 발사 2시간 전부터는 모든 선박의 출입이 통제된다. 통제구역은 미국 및 일본의 해상통제해역 범위를 고려하여 선박 충돌확률 이하가 되는 기준점을 연결하고 여유 거리를 더하여 비행 방향으로 통제해역을 설정한다.

유인도 주민 및 인근 무인 도서에서의 조업, 작업 중인 모든 인원과 선박은 일정 시간 안전구역으로 소개된다. 해상통제 정보는 국내 해운관련 기관·단체·선사 및 영국 수로국(UKHO) 및 일본 해상보안청(JOG)에 항행통보를 사전 배부하고, NAVAREA XI구역 조정국(일본)에 항행경보 등을 전파한다.

해상통제 구역에는 경비정, 어업지도선, 함정을 배치하고 선박 등의 출입을 통제하며 선박모니터링 시스템으로 실시간 감시한다. Fig. 3은 해양수산부의 선박모니터링시스템 표출화면 중 일부로써, 선박의 위치와 선명, 제원, 운항 경로가 표시된다. 추진기관시험시에는 선박 1척이 파편과 맞을 확률이  $1E^{-5}$  이내에 위치 한 선박과 6.89 kPa 이내 구조물 내부 인원은 모두 소개한다.

국방과학연구소 안홍시험장은 유도무기와 총포·탄약에 대한 기술시험 등을 시험하는 곳이다. 이러한 기술시험은 시험대상체가 대부분 해상에 탄착(낙하) 되기 때문에 일정한 구역을 위험구역으로 설정하고 선박과의 충돌 대책을 마련하고 있다. 시험 전 설정된 위험구역 내에 선박의 유무를 먼저 확인하기 위하여 안홍시험장은 해상레이더 2조를 활용하여 통제실에서 해상의 선박을 탐지하고 있다. 유도무기 시험은 위험구역 내 선박을 모두 소개한 후에 시험을 진행하고 있고, 총포·탄약 시험은 위험구역 내 선박이 없을 경우에만 시험을 진행한다. 안홍시험장에서는 자체 해상 통제용 선박 2척

**Fig. 2. Example of Launch Hazard Area (KSLV-2).**



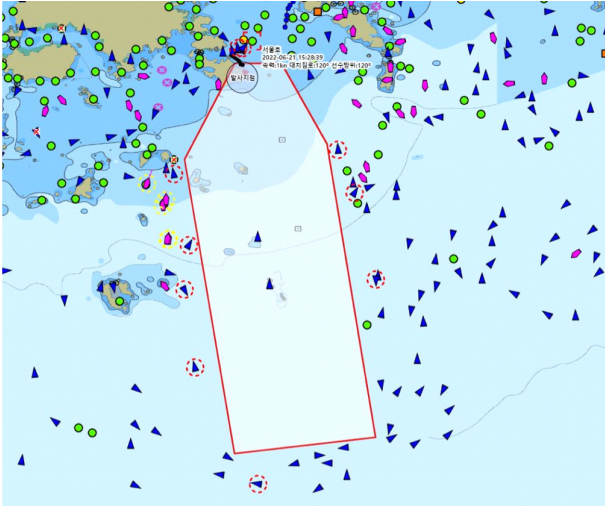


Fig. 3. Videos of a vessel monitoring system of the Launch Hazard area (30 min before launch).

과 용선을 추가로 활용하여 위험구역 내 선박에 대한 해상소개를 실시하고 있다. 이러한 해상소개 시험은 선박통제에 대한 법적 권한이 없어 제한적으로 이루어지고 있는 것으로 확인 된다.

#### 2-3-2. 해외사례

미국 CCSFS의 경우 Falcon 9 발사시 해상통제 범위는 아래 Fig. 4와 같이 설정하고, 발사 2시간 전부터 발사까지 인원 및 선박의 출입을 통제하고 있다. 선박 통제는 Coast guard의 지원을 받아 위험 구역으로 선박 등이 접근하지 못하도록 감시 및 통제하고 있다. 통제 일자, 시간과 범위는 해상교통방송의 무선 주파수 채널로 안내 하고, 홍보안내문, 홈페이지, SNS 및 QR코드 등을 활용하여 홍보 하고 있다. 사전 승인 없이 고지된 위험구역으로 개인 또는 선박이 접근한 경우 CFR 33(Navigation and Navigable waters) 및 USC 70002, 70036에 따라 최고 6년 이하의 구금이나 250,000달러 이하의 벌금을 부과하고 있다.

일본 다네가시마 우주센터에서 발사된 H-IIA의 해상통제 범위는 아래 Fig. 5와 같고 경비정 4대 고속정 8대가 발사 당일 배치되어 선박의 접근을 통제한다. 해상 통제구역 및 예상 낙하 구역이 명시

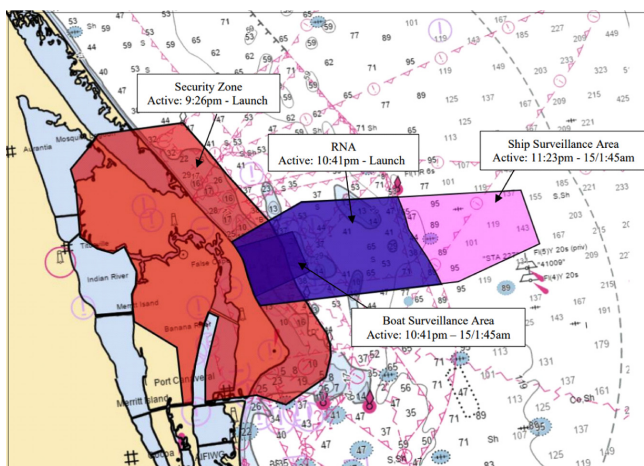


Fig. 4. Example of Launch Hazard Area (Falcon 9).



Fig. 5. Example of Launch Hazard Area (H-IIA).

된 항행통보 발행을 해상보안청에 협조받고 있으며, 무선 항행경보 및 교통통신사의 선박 방송을 통하여 발사 Launch Hazard Area 정보를 알리고 있다.

### 3. Delphi(델파이) 조사

#### 3-1. Delphi 1차 개방형 조사 결과

Delphi는 전문가 그룹을 대상으로 특정 의견을 체계적으로 도출 하고 수렴하기 위하여 미국의 RAND 연구소에서 개발한 기법이다. Anderson (1997)에 의하면 15명 정도의 소규모 전문가의 표본으로도 유용한 설문결과를 얻을 수 있음을 규명한 바 있다[13]. 델파이 기법은 전문가의 의견을 객관화 시키는 것으로써 설문 대상자인 전문가의 선정에 신중을 기할 필요가 있다. 본 연구에서는 국내 발사체 개발 및 시험과 발사에 직접 참여한 정부부처, 연구기관, 산업체의 발사체/ 공공안전 전문가 22명을 대상으로 하였고, 익명성을 보장하였으며 전문가들 간의 대등한 입장에서 의견을 제시하도록 하였다. 조사 기간은 2022년 9월부터 10월까지 진행하였다. 본 연구에 참여한 전문가의 자격 및 경력 특성은 Table 8과 같다.

Delphi 1차 조사는 개방형 질문을 통하여 최대한 많은 의견을 수집하였다. 4개의 문항에 대하여 유사한 개념과 중복 답변은 합친 후 1번~3번 문항은 상위 5개, 4번 문항은 상위 10개 총 25개의 요소로 정리하였다. 먼저, 발사장 주변 및 비행경로의 해상안전 강화를 위한 위협요인을 분석하기 위한 4개 문항은 발사안전통제의 필요성, 공공안전 확보 최우선 고려사항, 해상안전 확보를 위하여 개선할 사항, 해상안전 위협요인으로 구분하여 도출하였다. 발사안전통제가 필요한 이유(발사 사고시 큰 피해, 높은 발사 실패 확률, 선박 진입 등 돌발상황이 많음, 넓은 위험구역 범위, 체계적인 발사 운용 필요성), 공공안전 확보 최우선 고려사항(위험구역 내 안전확보, 위험구역 정보 사전통보, 사고피해영향 분석, 유관기관 협력체계 구축, 안전대책 수립이행), 해상안전 확보를 위한 개선대상(해상통제 법적근거 마련, 대국민 홍보강화, 발사대 주변 통제 강화, 참여 유관기관 지원 강화, 단분리 낙하구역 대책 마련), 해상안전 위협요인(선박 무단 진입, 무선 통신 미보유 소형선박, 항행통보 미확인 선박, 사고발생 선박 피해, 미승인 비행체 해상진입, 갯바위 낚시객 출현, 악기상으로 통제지원 제한, 사고로 해상 기름유출, 유인도 주민소개 불응, 통제해역 다른 해양사고)으로 의견이 수렴되었다. 1차 개방형 조사를 통하여 도출된 항목은 Fig. 6와 같다.

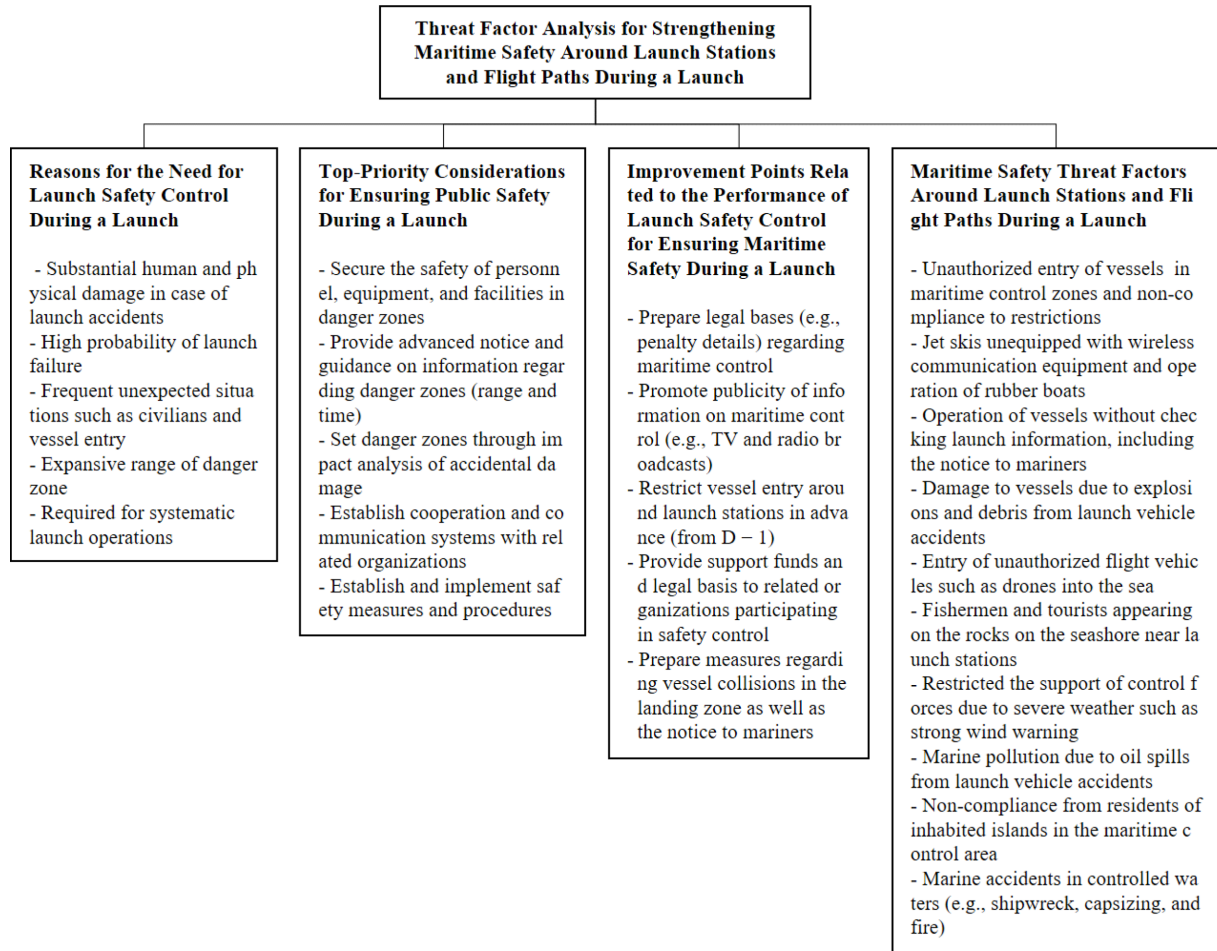


Fig. 6. Hierarchy Diagram of Threat Factor Investigation (Delphi Primary Open-Ended Survey Results).

Table 8. Current Status of Experts Participating in the Survey

Classification	Sub-classification	N. of participants	
Occupation	Government	11	22
	Research institute	8	
	Industry	3	
Related experience	More than 15 years	15	22
	10~15 years	2	
	5~10 years	5	
Professional work	Enforcement of public safety	10	22
	Development of launch vehicle	5	
	Operation of launch site	2	
	Management of process safety	3	

### 3-2. Delphi 2차 폐쇄형 조사 결과

Delphi 2차 폐쇄형 조사는 1차 개방형 조사로 수집한 다른 전문가들의 의견 결과를 참여자들에게 제시하고 폐쇄형 질문을 통하여 각 요소의 중요도를 재평가하였다. 반복적인 설문을 통하여 전문가 집단으로부터 합의된 의견을 도출하기 위함이다. 중요도는 과급력, 긴급성을 고려하여 10점 척도로 응답자 21명을 대상으로 평가하였다. 또한, 1차 조사 결과로 도출된 중간결과를 제시하여 다른 전문가들 의견을 참고하여 본인의 의견을 다시 수정할 수 있도록 하였다. 2차 설문결과 4개의 문항에 대하여 총 20개의 요소로 압축하였

고 평가 결과는 Table 9와 같다. 4번 문항은 10개의 요소에서 중요도가 높은 5개의 요소로 정리하였다. 조사 결과 질문 유형별 중요도 지표에서는 발사안전통제가 필요한 이유(5개) 중 발사 사고 시 큰 피해 발생(9.24), 공공안전 확보 최우선 고려사항(5개) 중 위험 구역 내 안전확보(8.62), 해상안전 확보를 위한 개선대상(5개) 중 해상통제 법적근거 마련(9.24), 해상안전 위협요인(5개) 중 선박의 무단 진입(8.57)이 중요도가 높게 나타났다.

## 4. AHP 분석결과

### 4-1. 일관성 검증

Delphi 2차 조사에 참여한 전문가 21명을 대상으로 AHP 기법을 활용하여 데이터 일관성을 모두 검증하였다. AHP 기법은 가중치를 활용한 선호도의 값을 수학적으로 나타낼 뿐 아니라, 응답 성실 지수도 나타내 신뢰성을 확보할 수 있다. 일관성 지수(Consistency Index: CI)는 설문 응답자가 어느 정도의 일관성을 가지고 설문 응답하였는지를 나타내는 지표다. 일관성 지수는 난수 지수(Random Index: RI)로 나누어 산출한다. 일관성 지수는  $[(\lambda_{max} - n) / (n - 1)]$ 로 측정하며 난수 지수는 1~9까지의 수치를 임의로 설정(Saaty, 1980)하여 역수행렬을 구하고 이 행렬의 평균 일관성 지수를 산출한 값으로 일관성의 허용 한도를 나타낸다. 참여자 응답이 논리적인 모순을 유발하게 되면 CI 값은 증가하게 된다. CR 값이 0이

**Table 9. Evaluation Results of Threat Factor Importance (Delphi Secondary Open-Ended Survey Results)**

Domains of measurement	Measurement Indicators	Evaluation results	
		Mean	Standard deviation
Reasons for the Need for Launch Safety Control During a Launch	Substantial human and physical damage in case of launch accidents	9.24	1.34
	High probability of launch failure	5.33	2.49
	Frequent unexpected situations such as civilians and vessel entry	6.52	2.52
	Expansive range of launch hazard area	6.05	2.03
	Required for systematic launch operations	6.71	2.57
Top-Priority Considerations for Ensuring Public Safety During a Launch	Secure the safety of personnel, equipment, and facilities in danger zone	8.62	1.96
	Provide advanced notice and guidance on information regarding danger zones (range and time)	7.57	1.89
	Set danger zones through consequence analysis	7.29	2.07
	Establish cooperation and communication systems with related organizations	7.05	2.10
Improvement Points Related to the Performance of Launch Safety Control for Ensuring Maritime Safety During a Launch	Establish and implement safety measures and procedures	6.95	2.15
	Prepare legal bases (e.g., penalty details) regarding maritime control	9.24	0.86
	Promote publicity of information on maritime control (e.g., TV and radio broadcasts)	7.48	1.40
	Restrict vessel entry around launch stations in advance (from D-1)	7.00	1.48
	Provide support funds and legal basis to related organizations participating in safety control	7.48	1.65
Maritime Safety Threat Factors Around Launch Stations and Flight Paths During a Launch	Prepare measures regarding vessel collisions in the landing zone as well as the notice to mariners	6.14	2.21
	Unauthorized entry of vessels in maritime control zones and non-compliance to restrictions	8.57	1.40
	Jet skis unequipped with wireless communication equipment and operation of rubber boats	7.71	1.39
	Damage to vessels due to explosions and debris from launch vehicle accidents	6.43	2.19
	Operation of vessels without checking launch information, including the notice to mariners	6.62	1.89
	Entry of unauthorized flight vehicles such as drones into the sea	6.19	2.63

면 완전한 일관성을 가지는 경우이고, 0.1(10%) 이하이면 일관성이 있다고 평가 한다[14].

본 연구에서 행렬계산 및 일관성 지수 계산은 AHP tool (Excel)을 활용하였고, 일관성 비율(CR)이 전체 응답자 중 0.1을 넘지 않는 82% 답변만 결과로 채택하였다. 그 결과, AHP 쌍대비교 일관성 비율은 4.8%로써  $CR \leq 0.1$  (10%) 보다 낮으므로 답변의 일관성이 있다고 판단되고, 각 측정지표의 일관성 비율은 3.9~5.7%다. 일관성 비율 분석결과는 Table 10와 같다.

## 4-2. 중요도 및 우선순위 분석

### 4-2-1. 발사안전통제 필요성

평가지표에서 항목들의 중요도와 우선순위를 평가하기 위하여 쌍대비교(Paired Comparison) 행렬 분석을 하였다. 발사안전통제 필요성을 측정하기 위한 5개 지표의 중요도 및 우선순위를 AHP로 분석한 결과는 Table 11과 같다. 그 결과, 발사 사고시 큰 피해(0.36), 선박 진입 등 돌발상황이 많음(0.18), 높은 발사 실패 확률(0.17), 체계적인 발사 운용 필요성(0.15), 넓은 위험구역 범위(0.14) 순으로 나타났다. 즉, 발사안전통제가 필요한 가장 큰 이유는 발사 사고시 인적, 물적 큰 피해가 발생 가능 때문으로 평가되었다.

**Table 10. Consistency Analysis Result**

Domains of measurement	CR $\leq 0.1$ (10%)
Reasons for the Need for Launch Safety Control During a Launch	4.4%
Top-Priority Considerations for Ensuring Public Safety During a Launch	5.7%
Improvement Points Related to the Performance of Launch Safety Control for Ensuring Maritime Safety During a Launch	5.3%
Maritime Safety Threat Factors Around Launch Stations and Flight Paths During a Launch	3.9%

### 4-2-2. 공공안전 확보 최우선 고려사항

공공안전 확보를 위한 최우선 고려사항을 측정하기 위한 5개 지표의 중요도 및 우선순위를 AHP로 분석한 결과는 Table 12과 같다. 그 결과, 위험구역 내 안전확보(0.31), 위험구역 정보 사전통보(0.25), 사고피해영향 분석(0.16), 유관기관 협력체계 구축(0.15), 안전대책 수립이행(0.13) 순으로 나타났다. 즉, 공공안전 확보를 위한 최우선 고려하여야 할 사항은 위험구역 내 인원, 장비, 시설의 안전 확보로 평가되었다.

### 4-2-3. 해상안전 확보를 위한 개선대상

해상안전 확보를 위한 발사안전통제 임무수행 개선하여야 할 사

**Table 11. Importance and Priority for Each Reason for the Need for Launch Safety Control**

Items	Measurement indicators	Importance	Priority	Graph
A	Substantial human and physical damage in case of launch accidents	0.36	1	
B	High probability of launch failure	0.17	3	
C	Frequent unexpected situations such as civilians and vessel entry	0.18	2	
D	Expansive range of launch hazard area	0.14	5	
E	Required for systematic launch operations	0.15	4	



**Table 12. Importance and Priority for Each Top-priority Consideration for Ensuring Public Safety during a Launch**

Items	Measurement indicators	Importance	Priority	Graph
A	Secure the safety of personnel, equipment, and facilities in danger zone	0.31	1	
B	Provide advanced notice and guidance on information regarding danger zones (range and time)	0.25	2	
C	Set danger zones through consequence analysis	0.16	3	
D	Establish cooperation and communication systems with related organizations	0.15	4	
E	Establish and implement safety measures and procedures	0.13	5	

**Table 13. Importance and Priority for Each Item Subject to Improvement for Strengthening Maritime Safety during a Launch**

Items	Measurement indicators	Importance	Priority	Graph
A	Prepare legal bases (e.g., penalty details) regarding maritime control	0.32	1	
B	Promote publicity of information on maritime control (e.g., TV and radio broadcasts)	0.21	2	
C	Restrict vessel entry around launch stations in advance (from D-1)	0.17	3	
D	Provide support funds and legal basis to related organizations participating in safety control	0.16	4	
E	Prepare measures regarding vessel collisions in the landing zone as well as the notice to mariners	0.13	5	

**Table 14. Importance and Priority for Each Threat Factor on Maritime Safety during a Launch**

Items	Measurement indicators	Importance	Priority	Graph
A	Unauthorized entry of vessels in maritime control zones and non-compliance to restrictions	0.30	1	
B	Jet skis unequipped with wireless communication equipment and operation of rubber boats	0.20	2	
C	Operation of vessels without checking launch information, including the notice to mariners	0.20	3	
D	Damage to vessels due to explosions and debris from launch vehicle accidents	0.16	5	
E	Entry of unauthorized flight vehicles such as drones into the sea	0.16	4	

항을 측정하기 위한 지표의 중요도 및 우선순위를 AHP로 분석한 결과는 Table 13과 같다. 그 결과, 해상통제 법적근거 마련(0.32), 대국민 홍보강화(0.21), 발사대 주변 통제 강화(0.17), 참여 유관기관 지원 강화(0.16), 단분리 낙하구역 대책 마련(0.13) 순으로 나타났다. 즉, 해상안전 확보를 위하여 가장 개선되어야 할 대상으로 해상통제 법적근거(처벌조항 등) 마련이 필요하다고 평가되었다.

#### 4-2-4. 발사시 해상안전 위험요인

발사시 발사장 주변 및 비행경로의 해상안전 위험요인을 측정하기 위한 5개 지표의 중요도 및 우선순위를 AHP로 분석한 결과는 Table 14과 같다. 그 결과, 선박 무단 진입(0.30), 무선 통신 미보유 소형선박(0.20), 항행통보 미확인 선박(0.20), 미승인 비행체 해상진입(0.16), 사고발생 선박 피해(0.16) 순으로 나타났다. 즉, 발사장 주변 및 비행경로의 해상안전에 가장 위협이 되는 요인은 통제해역 내 선박의 무단 진입, 통제 불응인 것으로 평가되었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 발사장 주변 및 비행경로의 해상안전 강화를 위한 위험요인을 분석하기 위하여 발사 시 해상안전 위험기준 및 위험요인에 대한 문헌조사와 사례조사를 하였고, 이러한 내용을 바탕으로

Delphi 기법을 활용하여 발사 공공안전 위험요인을 도출하고, AHP 기법으로 측정지표의 중요도와 우선순위를 분석하였다.

문헌 조사에서는 발사 해상안전 위험기준에 대하여 발사허가 공공안전 허용 위험기준, 해상 안전구역의 선정기준, 해상사고 피해 유형의 임계값을 조사하였다. 임계값은 인체와 선박에 직접 피해를 주는 파편과 폭발과압을 대상으로 외부 노출 인원, 건물 내부인원, 선박 탑승 인원으로 구분하여 검토하였다. 문헌에 제시된 미국 FAA 피해 유형의 임계값은 피해 척도를 판단하기 위한 참고자료로써 절대 기준값은 아니다. 국내의 경우 기술개발 수준과 안정성 그리고 발사장 주변 환경 등을 고려하여 보다 더 보수적으로 접근할 필요가 있다고 판단 된다.

사례조사는 누리호와 나로호가 발사된 발사장의 해상안전통제 사례를 살펴보고, 유도무기 및 총포·탄약 기술시험을 하는 국내 시험장을 대상으로 조사하였다. 미국 CCSFS와 일본 다네가시마 우주센터의 해외사례도 검토하였다. 국내외 모두 다 발사 및 시험시 일정 구역을 해상 통제구역을 설정하고 위험안내 및 선박 진입 등을 통제하는 방식은 유사한 것으로 확인되었다.

Delphi 측정지표 분석결과를 보면 발사안전통제가 필요한 이유는 발사 사고시 인적, 물적 큰 피해가 발생 가능 때문으로 나왔고, 발사안전통제에서 최우선으로 고려하여야 할 사항으로는 위험구역 내 인원, 장비, 시설의 안전확보로 나왔다. 발사 시 해상안전 위험



요인으로 가장 우려되는 항목은 통제해역 내 선박의 무단 진입, 통제 불가 상황이며, 현재 개선하여야 할 대책으로는 이러한 상황을 법적으로 통제할 수 있는 근거마련이 가장 시급하다고 도출되었다.

AHP 분석에서는 각 평가지표에서 항목들의 우선순위를 평가하기 위하여 쌍대비교 분석을 실시 하였고, 측정지표의 일관성이 있음을 확인하였다. AHP 분석결과 측정지표의 중요도와 우선순위는 발사 사고시 인적, 물적 큰 피해가 발생 가능 때문에 발사안전통제가 필요하고, 위험구역 내 인원, 장비, 시설의 안전확보를 발사안전 통제에서 최우선으로 고려하여야 한다는 결과가 나왔다. 통제해역 내 선박의 무단 진입, 통제 불가 상황이 가장 우려되는 해상안전 위협요인 그리고 해상안전 확보를 위하여 가장 시급한 개선사항은 이러한 상황을 법적으로 통제할 수 있는 근거마련으로 분석되었다.

본 연구는 발사장 주변 및 비행경로의 해상안전 강화를 위한 위협요인을 전문가 그룹의 의견을 반영하여 도출하였고, 각 요소를 계층화 분석법으로 중요도 및 우선순위를 객관적으로 평가하였다는 데 의미를 둘 수 있다. 본 논문에서는 위협요인 분석에 초점을 두었으며, 향후 도출된 항목에 대하여 위험성 평가를 통한 안전성 개선방안을 구체적으로 제시할 필요가 있다.

## 감 사

본 논문은 우주센터 2단계사업의 지원을 받아 수행되었습니다(신안태, 박병문). 또한 본 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A2C2006888).

## References

1. Yun, J. Y. and Park, D. J., "A Study on the Development of Assessment Index for Catastrophic Incident Warning Sign at Refinery and Petrochemical Plants," *Korean Chem. Eng. Res.*, **57**(5), 637-651(2019).
2. Seol, J. W., Chae, C. k., Lee, K. J., Moon, M. H. and Ko, J. W., "A Study on Development of Functional Recommendation for Planning Emergency," *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(2), 195-200 (2017).
3. Kim, M. C., Lee, M. J., Lee, D. G. and Baek, J. B., "Priority Analysis of Cause Factors of Safety Valve Failure Mode Using Analytical Hierarchy Process," *Korean Chem. Eng. Res.*, **60**(3), 347-355(2022).
4. Baek, S. H., Lee, A. Y., Park, H. J., Lee, W. S. and Choi, K. S., "Study on the Method to Improve a Maritime Safety by Analysing the Distribution Characteristics of the Ships on Marine Firing Range," *Journal of the Korean Society of Safety.*, **35**(3), 79-85 (2020).
5. Shin, A. T. and Byun, H. S., "Consequence Analysis and Risk Reduction Methods for Propulsion Test Facility," *Korean Chem. Eng. Res.*, **54**(3), 360-366(2016).
6. Sim, H. S., Choi, K. S. and Ko, J. H., "Review of Acceptable Risk to the Public from the Launch of aSpace Launch Vehicle," *Korean Society for Aeronautical and Space Sciences.*, 1,258-1,265(2014).
7. Shin, A. T., Park, B. M. and Byun, H. S., "A Study on the Calculation of Minimum Safety Distance during Storage and Combustion Test of Solid Propellants for Launch Vehicles," *Korean Chem. Eng. Res.*, **59**(2), 180-185(2021).
8. Seol, J. W., Chae, C. K., Lee, K. J., Moon, M. H. and Ko, J. W., "A Study on Development of Functional Recommendation for Planning Emergency Response Using Model-Based Approach," *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(2), 195-200(2017).
9. Ham, Y. H. and Baek, Y. K., "An Objective Method of Risk Evaluation based on RAM (Reliability, MTBF) and AHP Data Analysis for Warship," *Journal of the Kimst*, **21**(5), 714-721(2018).
10. NASA, "Range Flight Safety Requirements," NASA-STD-8719.25, 17-18(2021).
11. Range Commanders Council, "Common Risk Criteria for National Test Ranges," STANDARD 321-20(2020).
12. Feinstein, D., Heugel, W. F., Kardatzke, M. L. and Weinstock, A., "Personnel Casualty Study," IITRI J6067(2020).
13. Anderson, D., "Strand of System, The Philosophy of C, Peirce, West Lafayette," Purdue University Press(1997).
14. Satty, T. L., "Multi-criteria Decision Making," The Analytic Hierarchy Process, AHP series, Vol. 1, RWS Publications(2011).

## Authors

**Ahn-Tae Shin:** Senior Researcher, Department of NARO Space Center, Korea Aerospace Research Institute, Goheung-gun, Jeonnam 59571, Korea; atshin@kari.re.kr.

**Byung-Mun Park:** Principal Engineer, Department of NARO Space Center, Korea Aerospace Research Institute, Goheung-gun, Jeonnam 59571, Korea; pbm0506@kari.re.kr

**Hun-Soo Byun:** Professor, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Chonnam National University, Yeosu, Jeonnam 59626, Korea; hsbyun@jnu.ac.kr