

퍼지 AHP를 이용한 수중터널의 재해위험도 분석

한상훈^{1*}

¹한국해양과학기술원 연안개발·에너지연구부

Risk Assessment of Submerged Floating Tunnels based on Fuzzy AHP

Sang-Hun Han^{1*}

¹Division of coastal development & ocean energy research, KIOST

요 약 대형 해양구조물의 건설과 운영에서 중요한 항목 중의 하나가 재해위험도를 분석하고 평가하는 것이다. 이에 본 연구에서는 수중터널의 건설과 운영 시에 발생할 수 있는 재해 위험요소를 도출하고 퍼지 AHP(Analytic Hierarchy Process) 방법으로 이러한 위험요소의 수준을 파악하고자 하였다. 재해 위험도로는 자연재해 위험도와 인적재해 위험도로 구분하고 이러한 위험도 항목들이 수중터널에 미치는 영향을 전문가 설문문을 통하여 조사하였다. 조사된 전문가 설문결과와 데이터를 퍼지 AHP 기법으로 분석하여 재해위험도를 각 위험요소별로 정량화하였다. 또한, 수중터널과 교량, 해저터널, 침매터널의 재해위험도 수준을 분석하여 수중터널이 가지고 있는 고유의 재해위험도 수준을 평가하였다. 재해위험도에서는 쓰나미와 지진이 가장 위험도 인식수준이 높았고, 인적재해 위험도는 화재와 폭발의 위험도 인식이 높은 수준이었다. 또한, 수중터널은 침매터널에 비해서는 1.4배, 교량에 비해서는 3.2배 위험도 인식수준이 높은 것으로 조사되었다.

Abstract In the construction and operation of large marine structure, hazard risk analysis is one of important factors. Therefore, this paper investigates the hazard risk indexes and evaluates the risk level in the construction and operation of SFT on the basis of expert survey and Fuzzy analytic hierarchy process. Hazard risk is divided into natural hazard risk (earthquake, typhoon, tsunami, and ice collision) and human factor hazard risk (fire, explosion, traffic accident, ship or submarine collision). Also, the influence of hazard risk indexes on SFT was evaluated in tunnel tube, supporting system, ventilation tower, foundation, and connection part. As the hazard risk level of SFT is compared with those of bridge, underwater tunnel, and immersed tunnel, the intrinsic risk level of SFT was evaluated. Tsunami and earthquake had higher risk level in natural hazard risk, and the risk levels of fire and explosion were higher in human factor hazard risk. Hazard risk level of SFT was 1.4 times higher than immersed tunnel, and 3.2 times higher than bridge.

Key Words : Submerged floating tunnel, Hazard risk, AHP, Quantification

1. 서론

수중터널은 부력에 의해 물속에 부유하거나 지지보가 자중을 부담하여 수중에 건설하는 연결 구조물이다. 수중

터널은 지하연결망과 바로 연결이 가능해 연결구간의 길이가 타 터널 형식 대비 최소가 되어 낮은 경사구배 실현이 가능하다. 또한, 교량에 비해 해상교통 방해가 작고 해상기상에 따른 영향이 적다. 현장 시공 시 필요공기와 필

본 논문은 한국해양과학기술원의 '해중터널 실용화를 위한 핵심기술 개발' 및 국토해양부의 '항만시설물 점검용 장비 기술개발' 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Sang-Hun Han

Tel: +82-10-2716-3654 email: shhan@kiost.ac

접수일 12년 03월 30일 수정일 (1차 12년 05월 08일, 2차 12년 06월 08일, 3차 12년 06월 21일) 게재확정일 12년 07월 12일

요공간 최소화가 가능하고 재사용 가능성이 높다. 따라서, 자연환경파괴와 경관훼손을 최소화할 수 있는 친환경적인 공법이다 [1].

수중터널에 대한 개념이 처음 제시된 것은 100년 전이지만, 본격적인 연구는 1980년대 이후에 노르웨이, 이탈리아, 일본, 중국을 중심으로 진행되어왔다. 노르웨이도 로국은 1980년대와 90년대에 Hogsford에 수중터널을 건설하기 위한 많은 연구를 수행하였다. 길이 1400 m, 수심 150 m인 피요르에 내부지름 9.5 m의 수중터널을 수면 25 m 아래에 건설하는 것을 계획하였으나 실현되지 못 하였다 [2]. 이탈리아는 수중터널을 메시나 횡단 교통인프라로 적용하기 위한 연구를 진행하였다. 길이 3000 m, 최대 수심 350 m의 구간을 콘크리트 터널 튜브로 연결하는 프로젝트를 진행하였지만, 열악한 외부환경과 경제적인 문제로 중단되었다 [3]. 일본은 2000년대에 활발한 연구를 진행하였고 여러 장소에 대한 적용 가능성을 검토하였다. 홋카이도에 길이 30 km, 최대수심 90 m의 Funka(噴火)만을 가로지르는 수중터널에 대한 적용 사례 연구를 실시하고, 23 m의 지름을 가진 텐션레그 형태의 터널 튜브를 수심 30 m 아래에 건설하는 것을 제안하였고, Kaikoku 섬 연결로, Oinaoshi 인공섬 진입로 등에 수중터널의 적용 가능성을 검토하였다 [4-5]. 최근에 가장 활발하게 연구를 진행하는 국가인 중국은 이탈리아와 수중터널 연구를 위한 공동연구그룹(Sino-Italian Joint Lab.)을 만들어 기술을 급격히 발전시키고 있다. 최근에 길이 100 m의 세계 최초의 수중터널 프로토타입을 Qiandao 호수에 건설하려고 계획하고 있다 [6].

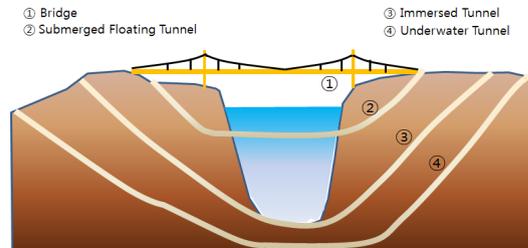
현재까지 많은 수중터널 프로젝트가 진행되었지만, 다양한 이유로 실제 시공으로 연결되지 못 하였다. 그 이유를 살펴보면, 수중터널은 익숙하지 않은 구조물로 시공경험이 전혀 없다는 점, 수중을 관통해서 지나간다는 점, 부유식 구조형태라는 점, 비용이 타 구조물에 비해 비싸다는 점 등이다. 이러한 이유들의 성질을 살펴보면, 알려지지 않았다는 특성(unknown), 정확히 예측할 수 없다는 특성(unpredictable), 원하지 않은 결과가 있을 수 있다는 특성(undesirable) 등으로 이것은 위험도(risk) 평가와 대응 방안 마련의 필요성과 일치한다. 즉, 수중터널에 대한 리스크 관리 분야가 수중터널 실용화에 가장 중요한 부분일 수 있다. [7-8].

본 연구에서는 이러한 리스크 항목 중에서 가장 피해 수준이 높을 것으로 예상되는 재해위험요소들을 도출하고, 퍼지 AHP(Analytic Hierarchy Process) 방법으로 이러한 위험요소의 수준을 파악하고자 하였다.

2. 수중터널 리스크 항목

2.1 구조형식 리스크

수중터널의 대체 형식으로 고려될 수 있는 것은 Fig. 1과 같이 교량, 침매터널, 해저터널이 있다. 교량은 가장 대표적인 횡단 방식으로 10 km 미만의 횡단거리와 100 m 미만의 수심을 가진 지형에 적용되고 있다. 침매터널은 최근 거가대교에 국내 최초로 시공되어 좀 더 익숙해진 연결 형식이다. 지반을 굴삭하고, 함체를 제작/운반/침설한 후에 되메우기를 하여 완성하는 공법이다. 연장에는 제한이 없으며 수심은 50 m 미만이 적당한 것으로 보고되고 있다. 해저터널은 현재까지 장기간의 횡단에 가장 널리 쓰이는 공법으로 최대 50 km 이상 기간, 수심 200 m에도 시공실적이 있다. 이에 반해 수중터널은 횡단거리와 수심이 제약이 없지만 아직 시공실적이 없다. 따라서, 각 형식별로 리스크 가능성에 대한 설문조사 분석을 수행하면 수중터널에 대해서 전문가들이 인식하고 있는 위험도를 평가할 수 있으며, 향후 연구개발을 통한 위험도 감소 목표 수준을 정량적으로 추론해 볼 수 있다.

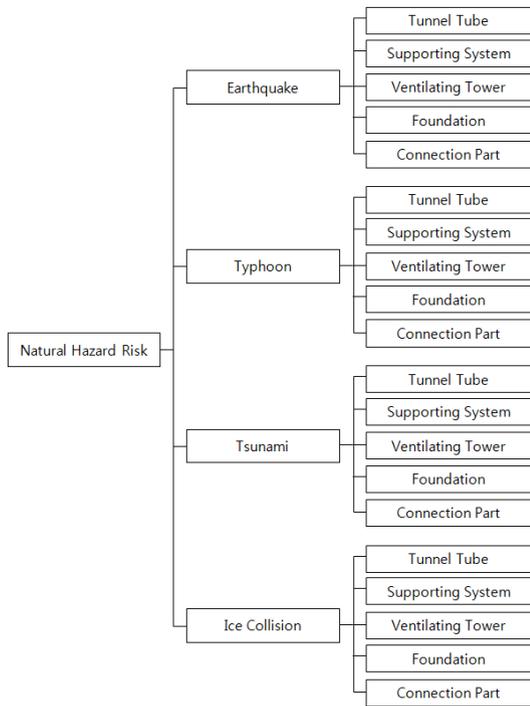


[그림 1] 구조형식
[Fig. 1] Structure type

2.2 재해 리스크

일반적인 사회간접자본에 대한 위험은 기본계획, 설계, 시공, 운영 및 유지관리의 각 단계에서 발생하게 된다. 예를 들어, 계획수립단계에서는 비용산출 위험, 시장예측 위험, 재정확보 위험 등이 있을 수 있고, 설계단계에서는 설계기준 위험, 구조계산 위험, 재료선정 위험 등이 있을 수 있다. 본 연구에서는 다양한 위험 중 재해에 관련된 위험만을 분석대상으로 하고 항목들은 기존 문헌 [7-8]과 브레인스토밍 과정을 통해 도출하였다.

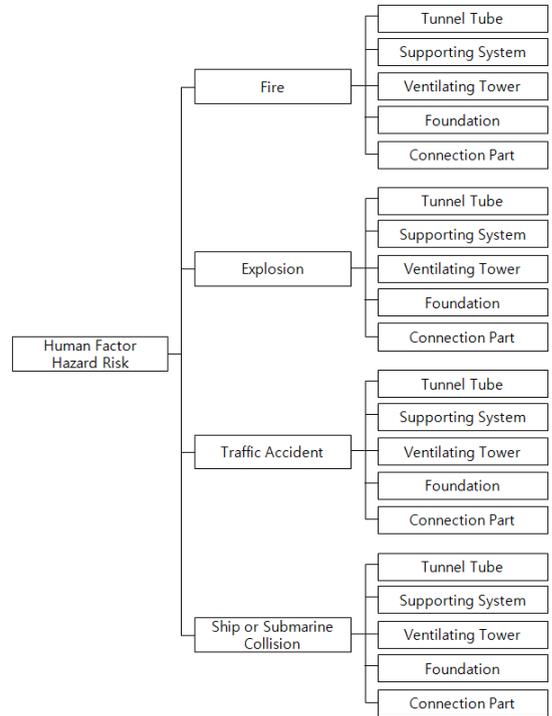
재해에는 크게 자연재해와 인적재해(비자연재해)로 나눌 수 있으며, 자연재해에는 지진, 태풍, 쓰나미, 유빙충돌 등이 있다. (Fig. 2 참조).



[그림 2] 자연재해 리스크 항목
[Fig. 2] Natural hazard risk index

- 지진 : 수중터널은 구조특성상 수평방향 지진에 대해서는 상당히 안정된 구조물이다. 그러나, 연결부나 케이블의 형상과 거동에 따라 상당히 위험한 과다변위가 발생할 가능성도 배제할 수 없다. 또한, 지점이 긴 수중터널의 경우에는 다점 지진 해석을 수행해야 하며 이에 따라 지점 간 상당히 큰 상대변위가 발생할 가능성이 있다.
- 태풍 : 수중터널 본체는 수심 10 m 이상에 위치하므로 태풍에 의한 직접적인 영향은 거의 없다. 즉, 태풍에 의해 증대된 파랑은 수심에 따라 급격히 감소할 것이므로 터널본체에 대한 영향은 크지 않다. 그러나, 태풍에 의해 육지쪽 연결부분에서의 산사태나 환기탑 영역에서의 하중증가는 위험요인으로 고려해야 한다.
- 쓰나미 : 쓰나미로 인한 이상조위 및 수평류 하중이 위험요인이다. 해일로 인해 과도한 수평유속이 발생하면 천해영역에서는 상당히 큰 하중이 발생할 수 있다. 또한, 이상조위로 수위변동이 발생하게 되어 부력이 증감되면 텐션레그에 과도한 하중이나 터널 튜브의 과다변위가 발생 가능성이 있다.
- 유빙충돌 : 얼음이 충돌로 압괴(壓壞)되면 하중이 발생하여 이에 대한 위험도 분석이 필요하다.

인적재해로는 화재, 내부폭발, 선박 또는 잠수함 충돌, 대규모 교통사고 등이 있으며 자세한 사항은 다음과 같다(Fig. 3 참조).



[그림 3] 인적 재해 리스크 항목
[Fig. 3] Human factor hazard risk index

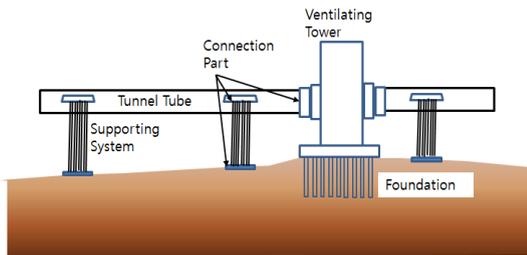
- 화재 : 장대 연결 터널에서의 화재는 재앙적인 상황으로 발전할 수 있는 주요 재해 항목이다. 화재 발생시의 유독가스의 제어 및 방출과 인원의 피난은 수중터널 실용화에서 반드시 검토해야 할 항목이다. 화재의 진화 시에는 소화를 위한 물의 확보뿐만 아니라 소화된 물의 배수시스템도 고려가 되어야 한다. 소화를 위해 사용된 물이 배수가 되지 않으면 구조시스템의 안정성에 문제가 발생할 수 있다.
- 내부폭발 : 내부폭발이 발생하면 폭압에 의해 구조부재에 대한 손상이 일차로 발생하고 2차적인 현상으로 진동에 의한 구조전체의 동적거동이 일어난다. 일정수준이하의 폭압에서는 구조보유내력에 의해서 누수 발생가능성이 적다. 그러나, 폭압이 구조보유내력을 초과했을 시에도 터널튜브의 구간 격벽 등의 설계를 통해 수중터널 전체시스템의 수몰을 방지하는 2중의 안전설계가 필요하다.
- 선박/잠수함 충돌 : 선박이나 잠수함의 충돌에서는

충돌에너지를 산정하고 이를 수중터널 구조시스템의 흡수가능한 변형에너지와 비교하여 충돌 안전성을 평가할 수 있다. 수중터널 전체시스템의 강성이 큰 경우에는 충돌 시에 큰 하중이 발생하게 되므로 수중터널의 구조 형식에 따라 충돌안전성 검토의 경중을 고려할 필요가 있다.

- 대규모 교통사고 : 열차의 탈선이나 자동차의 연쇄충돌로 인한 대규모 교통사고도 터널 구조에 손상을 가할 수 있으며, 인명구조 시스템의 확보가 필요하다는 점에서 재해의 한 요소로 고려할 수 있다.

2.3 수중터널 구조시스템

수중터널 구조시스템은 크게 터널본체, 지지구조, 환기탑, 기초, 연결부로 나눌 수 있다(Fig. 4 참조). 각 재해요인이 수중터널 구조시스템에 미치는 영향을 파악하면 대응방법의 수립과 이를 개선하기 위한 연구방향 설정에 활용할 수 있다.



[그림 4] 수중터널 구조시스템
[Fig. 4] Structural system of SFT

- 터널본체 : 터널본체에는 유체압, 레그장력, 환기탑 전달하중 등이 작용하며 이에 적합한 설계가 이루어져야 한다. 텐션레그, 환기탑, 기초 등의 설계가 이루어지면 다시 터널본체에 대한 변위와 하중 검토를 수행하고 적합조건을 만족시키지 못 하면 본체에 대한 재설계가 필요하다. 즉, 터널본체, 텐션레그, 환기탑, 기초에 대한 반복적인 설계검토가 필요하다.
- 지지구조 : 수중터널의 지지구조는 여러 가지 형태가 있지만, 크게 4분류하면 텐션레그, 잔교식 구조, 폰툰식 구조, 무지지 구조로 나눌 수 있다. 장대 연결구간의 경우는 텐션레그 방식이 일반적인 형태로 터널의 진동모드와 주기, 허용변위와 가속도, 유체력의 크기 등에 따라 텐션레그의 개수, 방향, 간격 등이 설계되어야 한다.
- 환기탑 : 환기탑에는 환기시설 뿐만 아니라 방재시설, 배수시설, 전력시설, 유지관리시설 등이 추가적

으로 설치된다. 따라서, 기능성, 안정성, 경제성을 고려하여 이러한 시설들을 배치해야 한다. 환기탑의 구조형식으로는 중력식, 말뚝식, 부유식이 있으며 주위 환경조건에 적합한 구조형식을 선정해야 한다.

- 기초 : 기초의 주목적은 터널본체를 안전하게 지지하는 것으로 기초가 붕괴하거나 과다변형이 발생하면 본체에 심대한 영향을 주게 되므로 기초는 안전성을 충분히 고려하여 설계해야한다. 기초형식은 중력식, 말뚝식, 그라운드 앵커식 등으로 나눌 수 있고 외력조건, 해저지형 및 지질조건 등을 고려하여 형식을 선정한다.
- 연결부 : 수중터널의 연결부는 리스크에 가장 취약한 부분 중의 하나로 구조시스템 리스크 검토에서 세밀한 주의가 필요하다. 주요 연결부로는 터널본체 모듈 사이의 연결부, 터널본체와 텐션레그 연결부, 텐션레그와 기초의 연결부, 터널본체와 환기탑 연결부, 터널본체와 끝단 육상구조와의 연결부 등이 있다.

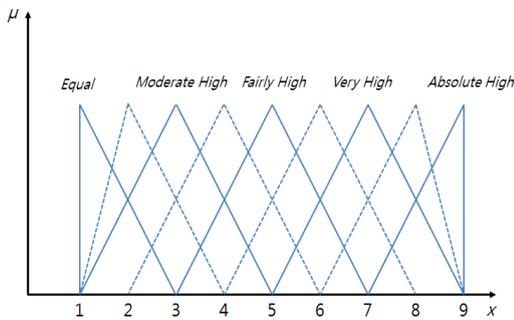
3. 수중터널 리스크 해석

3.1 퍼지 AHP

AHP 기법은 1977년 Saaty가 최초로 제시한 의사결정 기법으로 R & D 기술기획, 정책적 대안 분석 및 선정, 자원할당, 성과분석, 경제성 분석 등 다양한 분야에서 활용되고 있다 [9]. 그러나, 인간은 인지와 의사결정 시에 애매함과 모호함이 존재하게 되는데, 이러한 문제를 해결하고자 도입한 것이 퍼지 AHP 방법이다. 즉, AHP 기법은 계층구조를 통해 문제를 간략화할 수 있으며, 퍼지 AHP 기법을 적용하면 대안에 대한 상대적 가치에 대한 범위를 산출하여 설문자가 인식하는 개인적 선호에 대해 보다 현실적이며 정량적인 수치를 반영할 수 있다 [10-12]. Chang이 제안한 퍼지 AHP의 과정은 다음과 같다 [13].

1단계 : 세부 구성요소들의 쌍대비교 실시

설문조사를 통해 계층적 의사결정 구성요소들에 대한 상호 쌍대비교를 수행한다. 언어적도에 따른 비퍼지수는 Table 1과 같다(Fig. 5 참조). 본 연구에서는 개념적으로 접근하기 쉬운 삼각퍼지수를 사용하였으며, 축적된 정보의 양이 적은 분야에 대한 설문을 감안하여 퍼지영역의 범위를 일반적인 경우인 1단위보다 큰 2단위로 설정하였다.



[그림 5] 상대 위험도와 퍼지 항목
[Fig. 5] Relative risk possibility and fuzzy index

[표 1] 상대 위험도와 퍼지수
[Table 1] Relative risk possibility and fuzzy number

Relative Risk Possibility	Preference	Fuzzy numbers
Absolute low	1/9	(1/9,1/9,1/7)
Very low	1/7	(1/8,1/7,1/5)
Fairly low	1/5	(1/7,1/5,1/3)
Moderate low	1/3	(1/5,1/3,1)
Equal	1	(1,1,3)
Moderate high	3	(1,3,5)
Fairly high	5	(3,5,7)
Very high	7	(5,7,9)
Absolute high	9	(7,9,9)

$$A = [a_{ij}] = [(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})] \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

여기서, $i = j$ 에서 $a_{ij} = (1, 1, 1)$, $l_{ij} = 1/l_{ji}$, $m_{ij} = 1/m_{ji}$, $n_{ij} = 1/n_{ji}$

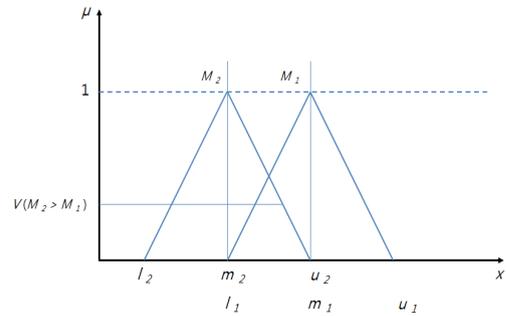
2단계 : 퍼지 synthetic extent (E_i) 계산

$$E_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \otimes \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} \right)^{-1} \quad (2)$$

3단계 : 각 퍼지수들의 확률 수준 (degree of possibility) 계산(Fig. 6 참조)

$$V(M_2 \geq M_1) = hgt(M_2 \cap M_1) = \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1, & \text{if } m_2 \geq m_1 \\ 0, & \text{if } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, d 는 μ_{M_1} 과 μ_{M_2} 의 교차점의 x 좌표값



[그림 6] 발생 확률 다이어그램
[Fig. 6] Diagram for degree of possibility

4단계 : 임의의 k 퍼지수보다 클 확률수준 계산

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \text{ and } (M \geq M_2) \text{ and } \dots \text{ and } (M \geq M_k)] = \min V(M \geq M_i), \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (4)$$

5단계 : 가중치 벡터 계산

$$W' = (w'_1, w'_2, \dots, w'_n)^T \quad (5)$$

여기서, $w'_i = \min V(M \geq M_i)$.

3.2 리스크 해석 결과

설문조사는 수중터널 연구에 참여하여 수중터널에 대한 자세한 정보를 획득하고 있는 10인의 연구자들을 대상으로 하였다. 설문은 크게 4가지 항목에 대해서 이루어졌다. 구조형식 리스크, 자연재해리스크, 인적재해리스크, 자연재해와 인적재해리스크의 상호비교가 각 항목들이다. 이러한 항목들에 대한 설문조사를 수행하고 그 결과를 기하평균하였으며, 그 결과는 Table 3, 4, 5에 제시하였다. 또한, 이러한 결과를 식 (1)에서 (5)를 이용하여 분석하였다.

우선 각 설문결과의 유효성을 판단하기 위해서 각 설문자들의 항목들에 대한 일관성 지수를 검토하였다. Table 2에 나타난 바와 같이 모든 연구자들의 일관성지수 값이 0.1 미만임을 알 수 있다. 1차 조사에서는 5인의 연구자들의 일관성지수가 한 가지 이상의 항목에서 0.1을 초과하고 0.2미만이었는데, 이러한 항목에 대해서는 재조사를 실시하였다. 2차조사에서는 모든 항목에서 일관성 지수가 0.1보다 작았다. Table 2는 2차 조사의 결과를 나타내고 있다.

구조형식 리스크의 설문결과는 Table 3에 제시되어 있다. 수중터널이 가장 위험도가 높게 인식되었고, 교량의

[표 2] 일관성 지수

[Table 2] Consistency Index

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Structure Type Risk	0.06	0.09	0.00	0.00	0.09	0.04	0.02	0.02	0.04	0.05
Natural Hazard Risk	0.06	0.07	0.01	0.02	0.00	0.08	0.03	0.01	0.01	0.09
Human Factor Hazard Risk	0.01	0.09	0.03	0.04	0.03	0.01	0.04	0.03	0.08	0.07

위험도가 상대적으로 가장 작게 평가되었다. 또한, 침매터널이 해저터널보다 위험도가 조금 높게 측정되었다. 이러한 결과는 식 (1)에서 (4)를 이용한 가중벡터를 구함으로써 더 확실하게 알 수 있다. 수중터널, 교량, 침매터널, 해저터널 각각의 가중벡터는 다음과 같다.

$$W = (w_{SFT}, w_{bridge}, w_{i.tunnel}, w_{u.tunnel}) = (0.39, 0.12, 0.27, 0.23)$$

수중터널의 위험도 수준은 침매터널의 1.4배, 해저터널의 1.7배정도로 인식되었고, 교량에 비해서는 3.2배 정도 위험도가 크게 인식되었다. 수중터널의 위험도 인식수준이 타 구조형식에 비해서 높기 때문에 수중터널의 실용화를 위해서는 이에 대한 충분한 고려가 필요하다. 위험도 인식수준을 낮추기 위해서는 해석 모델의 정확성 증진, 실내외 검증 실험 수행, 설계기준의 강화 등이 필요하다.

수중터널에서의 자연재해 위험도에 대한 설문결과는 Table 4에 제시되었다. 쓰나미에 대한 위험도 평가가 크게 나타났는데, 이것은 후쿠시마 지진에 의한 영향이 일부 포함된 것으로 판단된다. 지진, 태풍, 쓰나미, 유빙충돌에 대한 가중벡터는 다음과 같다.

$$W = (w_{earthquake}, w_{typhoon}, w_{tsunami}, w_{ice}) = (0.30, 0.22, 0.33, 0.14)$$

쓰나미와 지진의 위험도 인식이 높았고 그 다음으로 태풍에 대한 위험도 인식이 높았다. 그러나, 유빙충돌에 대한 위험도 인식수준은 쓰나미나 지진의 1/2 수준이 것으로 조사되었다.

Table 5는 인적재해에 대한 위험도 인식 조사결과를 나타내고 있다. 화재나 폭발의 위험도 인식이 가장 크고, 교통사고의 위험도 인식이 상대적으로 작은 것으로 판단된다. 이러한 경향은 다음의 가중벡터에서도 확인할 수 있다.

$$W = (w_{fire}, w_{explosion}, w_{collision}, w_{traffic}) = (0.35, 0.34, 0.21, 0.09)$$

화재나 폭발의 가중벡터는 거의 유사하고 교통사고에 대한 위험도 수준은 화재 위험도의 26%수준이다. 선박이나 잠수함 충돌에 대한 위험도 수준은 화재 위험도의 60% 수준으로 상대적으로 높기 때문에 설계나 운용 시에 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

[표 3] 구조형식 리스크 설문 결과

[Table 3] Structure type risk survey average

	SFT	Bridge	Immersed Tunnel	Underwater Tunnel
SFT		6.5	3.10	3.50
Bridge			0.30	0.40
Immersed Tunnel				1.20
Underwater Tunnel				

[표 4] 자연재해 리스크 설문 결과

[Table 4] Natural hazard risk survey average

	Earth-quake	Typhoon	Tsunami	Ice collision
Earthquake		2.50	0.80	3.40
Typhoon			0.30	2.10
Tsunami				4.40
Ice collision				

[표 5] 인적재해 리스크 설문 결과

[Table 5] Human factor hazard risk survey average

	Fire	Explosion	Ship or submarine Collision	Traffic Accident
Fire		1.00	3.60	5.60
Explosion			3.20	5.60
Ship or submarine Collision				2.70
Traffic Accident				

마지막으로, 자연재해와 인적재해의 위험도 인식수준을 조사하였다. 상대비교 결과는 2.3정도 수준으로 가중벡터로 환산하면 자연재해와 인적재해가 각각 0.70과 0.30에 해당된다. 앞에서 쓰나미와 화재의 위험도수준이 각각 0.33과 0.35로 비슷하게 조사되었지만, 자연재해와 인적재해의 상대 위험도수준의 차이에 의해 쓰나미의 위험도 수준이 화재의 위험도 수준보다 2.3배 높게 인식된다는 것을 추론할 수 있다. 또한, 자연재해에서 위험도 인식수준이 가장 낮은 유빙충돌도 2.3배의 계수를 고려하면, 그 위험도 수준이 화재나 폭발과 유사하다고 평가할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 수중터널의 건설과 운영 시에 발생할 수 있는 재해 위험요소를 도출하고 전문가들에 의한 설문결과와 퍼지 AHP(Analytic Hierarchy Process) 방법으로 이러한 위험요소의 수준을 정량화하고자 하였다. 구조형식으로는 수중터널, 교량, 침매터널, 해저터널을 상호 비교하였다. 자연재해로는 지진, 태풍, 쓰나미, 유빙충돌을, 인적재해로는 화재, 폭발, 선박 또는 잠수함 충돌, 교통사고를 비교하였다.

수중터널은 타 형식 구조물에 비해서 위험도 수준이 높게 인식되는 것으로 조사되었으며, 침매터널에 비해서는 1.4배, 교량에 비해서는 3.2배 위험도 인식수준이 높은 것으로 조사되었다. 따라서, 수중터널을 실용화하기 위해서는 타 구조형식 대비 높은 위험도 인식수준을 낮출 필요가 있으며, 이것은 해석 정밀도의 향상과 설계기준 강화 등을 통해 달성할 수 있을 것으로 판단된다.

수중터널의 자연재해 위험도는 쓰나미와 지진이 큰 것으로 조사되었으며, 유빙충돌은 상대적으로 작은 위험도 수준을 나타내었다. 태풍에 의한 위험도도 설계 시에 반드시 고려해야할 수준으로 파악되었다. 또한, 인적재해 위험도는 화재와 폭발이 큰 것으로 인식되었으며, 선박이나 잠수함에 의한 충돌도 반드시 고려해야할 것으로 파악되었다. 같은 재해 위험도 수준이라고 해도 자연재해 위험도가 인적재해 위험도보다 2.3배 큰 것으로 인식되었다. 즉, 쓰나미와 화재의 위험도수준이 비슷하게 조사되었지만, 자연재해와 인적재해의 상대 위험도수준의 차이에 의해 쓰나미의 위험도 수준이 화재 수준보다 2.3배 높게 인식된다는 것을 추론할 수 있다.

References

- [1] H. Ostlid, "When is SFT competitive", *Procedia Engineering*, 4, pp. 3-11, 2010.
- [2] L. Skorpa, "Developing New Methods to cross Wide and Deep Norwegian fjords", *Procedia Engineering*, 4, pp. 81-89, 2010.
- [3] Forum of European National Highway Research Laboratories, Analysis of the Submerged Floating Tunnel Concept. FEHRL REPORT No. 1996/2a, 1996.
- [4] S. Kanie, "Feasibility Studies on various SFT in Japan and their Technological Evaluation", *Procedia Engineering*, 4, pp. 13-20, 2010.
- [5] Japan SFT research committee, SFT II Case Study, 1995.
- [6] F. M. Mazzolani, et al, "Design Aspects of the AB prototype in the Qiandao Lake", *Procedia Engineering*, 4, pp. 21-33, 2010.
- [7] Y. Xiang, et al, "Risk Analysis and Management of Submerged Floating Tunnel and its Application". *Procedia Engineering*, 4, pp. 107-116, 2010.
- [8] Y. Xiang, et al, "Risk Analysis and Assessment of Public Safety of Submerged Floating Tunnel". *Procedia Engineering*, 4, pp. 117-125, 2010.
- [9] T. L. Saaty, "Multicriteria Decision Making : The Analytic Hierarchy Process", RWS Publications, 1996.
- [10] C. G. Park, et al, "The Consideration of Evaluator's Confidence and Risk Attitude in Fuzzy AHP", *Journal of The Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 30(1), pp. 89-95, 2007..
- [11] K. K. Lee, et al, "Comparison of Fuzzy AHP Decision Making Approaches for Selection among Information Security Systems", *Korea Association of Information Systems Journal*, 19(3), pp. 59-73, 2010.
- [12] Y. Ha, et al, "The Fuzzy AHP Approach to Prioritize the Future Energy Technology Development", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, 19(5), pp. 453-459. 2008.
- [13] D. Y. Chang, "Applications of the Extent Analysis Method on Fuzzy AHP", *European Journal of Operation Research*, 95(3), pp. 649-655, 1996.

한 상 훈(Sang-Hun Han)

[정회원]



- 1996년 2월 : 한국과학기술원 (KAIST) 토목공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 한국과학기술원 (KAIST) 토목공학과 (공학박사)
- 2006년 7월 ~ 2007년 6월 : 일본도쿄대학교 초빙연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원

<관심분야>

해양구조물, 해양 신재생에너지, 위험도 해석