

잠수함 배치 설계에의 전문가 시스템 적용 방안에 대한 연구

김기수¹·하솔^{2,†}·구남국³·노명일⁴
서울대학교 조선해양공학과 대학원¹
서울대학교 공학연구소²
동덕대학교 조선해양공학과³
서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소⁴

Study on the Application of an Expert System to Arrangement Design of Submarine

Ki-Su Kim¹·Sol Ha^{2,†}·Namkug Ku³·Myung-Il Roh⁴
Seoul National University, Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering¹
Seoul National University, Engineering Research Institute²
Dong-eui University, Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering³
Seoul National University, Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering and Research Institute of Marine Systems Engineering⁴

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.

This paper proposed an application of expert system to submarine arrangement design. Since all components of the submarine should be placed in a restricted place called pressure hull, expert knowledge has great effects on design of submarine arrangement. In this regard, a suitable knowledge-based expert system shell was applied to design of submarine arrangement process. To use expert system on the design of submarine arrangement effectively, a template model for submarine arrangement, which is proper to use in optimum design process, was developed. The proposed system was applied to simplified example of submarine arrangement problem to choose optimal design alternative. From this study, it was verified that expert system could be used in design of submarine arrangement with effect.

Keywords : Design of submarine arrangement(잠수함 배치 설계), Knowledge-based expert system(지식 기반 전문가 시스템), Submarine template model(잠수함 템플릿 모델), Optimization(최적화)

1. 서론

1.1 연구 배경

잠수함은 주어진 운용 조건에 따라 초기 설계 단계에서 필요한 체계가 구성되고 이를 뒷받침 하는 무장과 장비가 결정된다. 각종 체계와 이를 구성하는 주요 장비들은 입력 선체라는 제한된 공간 내에 배치되어야 하기에, 잠수함의 배치 설계 시 이들을 효율적으로 배치하기 위한 최적 설계의 중요성이 지속적으로 증가하고 있다.

한편, 잠수함의 배치 설계 과정에서는 일반적인 선박의 배치 설계 과정과는 달리 잠수함의 작전 운용 조건, 잠수함 운용자 경험에서 기인한 요구 사항을 고려해야 한다. 또한 잠수함 배치 설계의 결과물은 잠수함 설계 전문가의 설계 경험에 따라서도 많은

영향을 받는다. 지금까지의 잠수함 배치 설계는 실적선 자료를 토대로 하되, 작전 운용 조건 변경 사항, 잠수함 운용자 요구 사항 등과 같이 설계선에 특화된 변경 사항을 잠수함 설계 전문가의 경험을 기반으로 진행되었다. 그러나 설계선에서 변경되거나 새롭게 추가되는 항목은 잠수함 운용자나 잠수함 설계 전문가의 지식과 경험에 의존적이었으며, 잠수함의 특수성에 기인한 요구 조건과 설계 경험들을 정량적인 데이터로 표현하여 배치 설계에 반영한 연구 사례는 많지 않다.

최근 연구에서 건물 내 공간 배치를 포함한 다양한 공간 배치 문제에 대해 전문가의 지식과 경험을 정량적인 데이터로 표현하는 전문가 시스템을 활용한 배치 설계 연구 사례가 증가하였다. 따라서 이와 유사하게 잠수함의 공간 배치 문제에 대해서도 잠수함 배치 설계 분야의 지식이나 경험을 정량적인 데이터로 표현할 수 있는 전문가 시스템을 최적 설계와 연계함으로써 기존에 전문

가에게 의존했던 지식이나 경험을 전문가 부재 시에도 최적 설계 문제에 반영할 수 있게 되었다 (Kowalewski, et al., 2004).

1.2 관련 연구 현황

Table 1 Comparison of method for rule descriptions between related works and this study

Research	Application	Rule description		Notes
		Formula	Heuristic	
Bédard & Ravi (1991)	Building layout	O	X	Levels of detail
Lee & Lee (1997)	Ship	O	X	Ship basic calculation
Helvacioğlu & Insel (2005)	Container ship layout	O	O	Modularized rule
Mashood et al. (2007)	Building layout	O	O	Levels of detail
Chung et al. (2011)	Submarine	O	X	Penalty function
Sheen (2012)	Nesting layout	X	O	Heuristic tree
This study	Submarine	O	O	Levels of details, Ship basic calculation

Bédard and Ravi (1991)는 건물 내의 공간 배치 설계를 위해 전문가 시스템을 도입하였다. Bédard and Ravi는 건물 내의 공간 배치를 단순화 하기 위해 층 간 배치나 주요 시설 배치와 같은 큰 단위의 공간 배치 대안을 먼저 결정하고, 이후 보다 세분화된 구획(방, 구조물)을 배치하는 형식으로 건물 내 공간 배치를 수행하였다. 또한 각각의 대안을 평가하기 위해 전문가의 지식을 간략한 수식으로 표현하고 이를 규칙을 활용하여 전문가 시스템을 적용하였다. Lee and Lee (1997)는 선박 구획 배치와 관련되는 전문가의 지식을 수식화된 규칙으로 정의하고 이를 선박 구획 배치에 적용하였다. 배치 설계와 관련되는 지식을 추출하여 지식 베이스를 구축하고 이를 선박 기본 계산 프로그램과 연동하였으며, 그 결과를 선박 구획 배치 설계에 반영하였다. Chung, et al. (2011)은 잠수함의 최적 공간 배치 문제에 규칙 기반 전문가 시스템을 도입하여 전문가의 지식을 공간 배치 최적화 문제에 반영하였다. 최적화 문제의 설계 변수와 규칙 기반 전문가 시스템의 규칙과 지식을 정의하기 위해 공간 배치 문제를 분석하고 이를 기반으로 구획 배치에 대한 ontology를 정의하였다. 그리고 공개 소프트웨어인 'Protege'와 'Jess'를 이용하여 전문가 시스템을 구축하고, 잠수함 설계자와 운용자가 제안한 요구 사항을 수식화한 규칙으로 표현하였다. 도출한 설계 대안의 적합성을 확인하기 위해 규칙 기반 전문가 시스템을 이용하여 규칙에 위배되는 항목을 확인하고 이를 목적 함수에 페널티를 추가하는 방식으로 반영하였다.

Sheen (2012)은 Heuristic 규칙을 이용한 강제 네스팅

(nesting) 시스템을 개발하였다. 네스팅을 위해 Heuristic 규칙에 기반한 탐색 tree를 만들었으며, 이를 이용하여 전문가 시스템에서 추론해 나가면서 네스팅을 위한 강제 배치 대안을 찾아가는 방식을 제안하였다. Helvacioğlu and Insel (2005)은 컨테이너 선박의 배치 설계를 위해 전문가 시스템을 활용하였다. 이들은 컨테이너선 설계 시 일반 배치를 수행하는 모듈, 선원 수를 최소화 하는 모듈, 컨테이너 선의 구성 요소를 배치하는 모듈로 나누어 각각에 대해 적절한 규칙을 도입한 전문가 시스템을 적용하였다. 전문가 시스템을 배치 설계에 도입한 연구 사례를 정리하면 Table 1과 같다.

본 연구에서는 전문가 시스템을 잠수함 최적 배치 설계에 도입하여 전문가가 생각할 수 있는 다양한 규칙을 활용할 수 있는 시스템을 구축하였다.

2. 전문가 시스템을 이용한 잠수함 최적 배치 설계 시스템

Fig. 1은 본 연구에서 제안하는 전문가 시스템을 이용한 잠수함 최적 배치 설계 시스템의 개략적인 구성도이다. 전문가 시스템을 이용한 잠수함 최적 배치 설계 시스템은 크게 규칙 기반 전문가 시스템 모듈(rule-based expert system module)과 공간 배치 최적화 모듈(arrangement optimization module)의 두 부분으로 이루어진다. 각각의 모듈에 대한 상세한 설명은 다음과 같다.

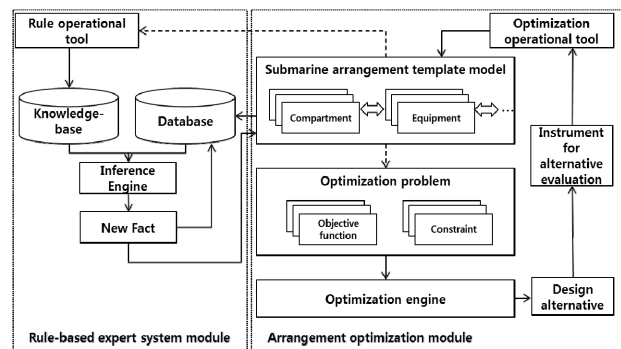


Fig. 1 Configuration of submarine arrangement design system using expert system

2.1 규칙 기반 전문가 시스템 모듈

규칙 기반 전문가 시스템 모듈은 규칙 운용 도구 (rule operation tool), 지식 베이스 (knowledge-base), 추론 엔진 (inference engine), 데이터베이스(database)로 구성된다. 이 모듈에서는 잠수함 공간 배치 템플릿 모델의 속성 중 전문가의 지식과 밀접한 관계를 가지는 속성을 추출하여 규칙 정의를 위한 프레임(frame)을 정의한다. 정의된 프레임을 기반으로 규칙 운용 도구를 이용하여 전문가는 규칙을 정의할 수 있으며, 정의된 규칙은 지식 베이스에 저장된다. 추론 엔진에서는 데이터베이스에 저장된 사실과 지식 베이스에 저장된 규칙을 이용하여 새로운 사

실을 추론하고, 더 이상 새로운 사실이 추론되지 않을 때까지 반복적으로 추론을 진행한다. 추론의 결과값으로 도출된 새로운 지식은 데이터베이스에 저장되며, 이는 잠수함 공간 배치 최적화 문제의 목적 함수와 제약 조건에 반영된다.

2.2 공간 배치 최적화 모듈

공간 배치 최적화 모듈은 잠수함 공간 배치 템플릿 모델(submarine arrangement template model), 최적화 엔진(optimization engine), 최적화 운용 도구(optimization operational tool), 설계 대안 분석 및 평가 도구(instrument for alternative evaluation)로 구성된다. 잠수함 공간 배치 템플릿 모델은 잠수함의 공간 배치 설계의 영역에서 필요로 하는 잠수함의 정보를 기반으로 정의된다. 최적화 운용 도구는 잠수함 공간 배치 템플릿 모델에 정의된 속성 값을 입력하고 수정하는 기능을 지원하며, 주어진 공간 배치 문제에 따라 모델의 속성 값을 정의함으로써 모델 개체를 생성하고 초기화 하는 역할을 담당한다. 생성된 모델 개체는 데이터베이스 내에 저장되며 이는 전문가 시스템의 추론 과정에 사용된다. 최적화 엔진에서는 전문가 시스템에 의해 수정된 목적 함수와 제약 조건을 이용하여 최적화를 수행한 후 최적 설계 대안을 도출한다. 설계 대안 분석 및 평가 도구에서는 최적화 결과로 도출된 설계 대안을 다양한 도구를 이용하여, 도출한 설계 대안이 합리적인지 분석하고 평가한다.

본 연구에서는 전체 시스템을 개발하기에 앞서 잠수함 배치 설계 문제에 전문가 시스템을 도입하여 이를 규칙 기반 전문가 시스템 모듈에서 효율적으로 활용하기 위하여, 그 가능성을 검토하고 배치 설계 문제에 적용하는 것을 그 목적으로 하였다.

3. 전문가 시스템

3.1 전문가 시스템의 개요

전문가 시스템은 전문가가 제시한 지식을 컴퓨터에 입력할 경우 컴퓨터가 특정 분야에서 전문가를 대신해 문제를 해결해야 하며, 만족할 만한 결론을 도출해야 한다. 그리고 어떻게 결론에 이르렀는지 설명할 수 있어야 한다(Negnevitsky, 2009).

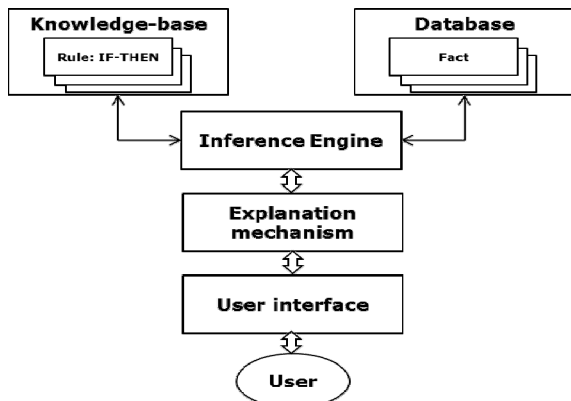


Fig. 2 Configuration of rule-based expert system

널리 사용되는 전문가 시스템으로는 규칙 기반 전문가 시스템(rule-based expert system)이 있으며, 이 시스템은 Fig. 2와 같이 기반 지식(knowledge base), 데이터베이스(database), 추론 엔진(inference engine), 해설 설비(explanation mechanism), 사용자 인터페이스(user interface)로 이루어진다. 각 항목에 대한 설명은 다음과 같다.

기반 지식(지식 베이스, knowledge base)

기반 지식, 또는 지식 베이스는 문제 해결에 필요한 특정 분야의 지식을 포함한다. 규칙 기반 전문가 시스템에서는 지식을 규칙의 집합으로 표현한다. 'IF-THEN' 형식으로 표현한 문장을 생성 규칙 또는 줄여서 규칙이라고 한다. '규칙'은 지식을 표현하는 가장 일반적인 방법으로, IF 부분에 주어진 정보나 사실을 THEN 부분에 기술한 어떤 행동과 연결하는 IF-THEN 구조로 정의한다. 규칙의 조건 부분(IF)을 만족하면 규칙이 '점화'되었다고 하며, 취해야 할 행동 부분(THEN)을 실행한다.

데이터베이스(database)

데이터베이스는 지식 베이스에 저장된 규칙의 조건 부분(IF)과 비교할 때 사용하는 사실(fact)들의 집합을 저장하고 있다. 데이터베이스는 현재 문제에 대해 사전에 입력된 사실 뿐만 아니라 규칙을 이용하여 추론된 사실들도 함께 저장할 수 있다.

추론 엔진(inference engine)

추론 엔진은 전문가 시스템이 해를 구할 수 있도록 추론 역할을 담당하며 지식 베이스에서 주어진 규칙들을 데이터베이스에 있는 사실들과 연결함으로써 새로운 사실을 도출해 낸다.

해설 설비(explanation facilities)

해설 설비는 사용자에게 전문가 시스템이 어떻게 특정 결론에 이르렀는지, 왜 특정 사실이 필요한지 설명한다. 따라서 전문가 시스템은 자신의 추론 과정을 설명하고, 조언, 분석 또는 결론의 타당성을 밝힐 수 있어야 한다.

사용자 인터페이스(user interface)

사용자 인터페이스는 문제의 답을 찾고 싶어 하는 사용자와 전문가 시스템 간의 연결 수단이다. 연결 수단은 가능한 한 의미 있고 사용하기 편리해야 한다.

3.2 프레임

전문가 시스템에서 기반 지식과 데이터베이스는 적용 분야에 따라 정의되는 형식이 달라진다. 따라서 적용 분야나 대상 문제에 대해 먼저 상세히 분석한 후 사실과 규칙 정의에 필요한 변수를 결정해야 한다. 그리고 이를 종합하여 특정 객체나 개념에 관한 지식을 표현하기 위한 데이터 구조체인 프레임(frame)을 정의한다.

프레임이란 특정 객체 또는 개념에 관한 전형적인 지식으로 이루어진 데이터 구조체이다. Fig. 3의 탑승권은 항공 승객에 대한 지식을 담은 프레임의 예를 보여준다. 프레임 두 개에 포함된 구조체는 동일한 구조를 가진다. 각 프레임에는 자신만의 이름과 연관된 속성(또는 슬롯)의 집합을 포함한다. 예를 들면 Fig. 3의 '칸타스 항공 탑승권'에서 '항공사' 속성(슬롯)에는 'QANTAS AIRWAYS'라는 값이 들어간다.

Ticket for Qantas Airways		Ticket for Air New Zealand	
Airline:	QANTAS AIRWAYS	Airline:	AIR NEW ZEALAND
Name:	MR N BLACK	Name:	MRS J WHITE
Flight No.:	QF 612	Flight No.:	NZ 0198
Date:	29DEC	Date:	23NOV
Seat No.:	23A	Seat No.:	27K
Departure:	HOBART	Departure:	MELBOURNE
Arrival:	MELBOURNE	Arrival:	CHRISTCHURCH
Boarding Time:	0620	Boarding Time:	1815
Gate No.:	2	Gate No.:	4

Fig. 3 Frame for an airline ticket

프레임은 지식을 구조화하고 정확하게 표현하는 합리적인 방법을 제공한다. 단일 개체(entity)에서 프레임은 특정 객체 또는 개념에 대한 모든 필수 지식을 결합한다. 프레임은 지식을 표현하는 방법으로 슬롯(slot)을 사용하며, 슬롯을 통해 객체의 다양한 특성과 특징을 기술할 수 있다.

본 연구에서도 전문가 시스템을 짐수함 공간 배치 설계 문제에 적용하기 위해 주어진 문제를 분석하여 배치 설계에 필요한 변수를 결정하고 이를 조합하여 짐수함 배치 설계용 프레임을 정의하였다. 이에 대한 상세한 설명은 다음 장에 기술하였다.

3.3 추론 엔진

추론 엔진은 기반 지식에 저장된 규칙을 데이터베이스의 사실과 비교하여 추론 시술을 생성한다. IF 부분이 사실과 일치하면 규칙을 점화하고, THEN 부분을 수행한다. 점화된 규칙에 따라 도출된 새로운 사실은 데이터베이스에 추가된다.

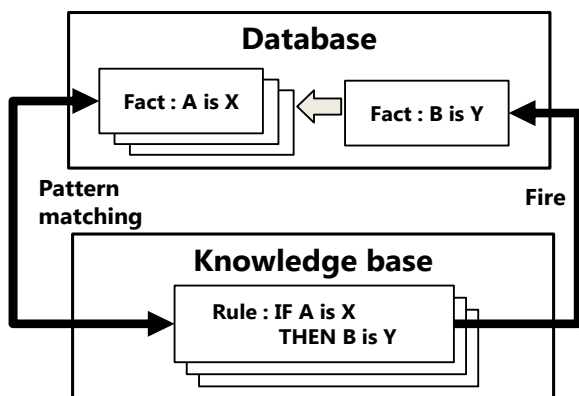


Fig. 4 Sequence of inference using inference chains

예를 들어 Fig. 4와 같이 'A is X'라는 사실이 데이터베이스에 존재한다고 가정하자. 추론 엔진은 기반 지식 내의 규칙의 선행 조건(IF 부분)과 데이터베이스 내의 사실을 비교하여 규칙 'IF A

is X, THEN B is Y'의 선행 조건과 데이터베이스 내의 사실 'A is X'가 일치하는 것을 확인한다. 이후 추론 엔진은 해당 규칙을 점화하여 추론 결과(THEN 부분)에 해당하는 'B is Y'를 새로운 사실로 규정하고 이를 다시 데이터베이스에 추가한다. 동일한 과정을 계속 반복하여 규칙이 점화되지 않을 때까지 진행하는 것이 일련의 추론 과정에 해당한다.

추론 엔진은 설정된 추론 방법에 따라 규칙을 언제 점화해야 하는지도 결정한다. 규칙을 이용하여 새로운 사실을 추론하는 방법에는 데이터 지향 추론에 해당하는 순방향 연결 (forward chaining) 방법과 목표 지향(goal-driven) 추론에 해당하는 역방향 연결 (backward chaining) 방법이 있다. 순방향 연결 방법은 알려진 사실에서 추론을 시작하여 새로운 사실을 도출하고, 이를 다시 활용하여 다른 규칙을 점화시켜 추론하는 방법으로, 정해진 목표와는 관련 없는 많은 규칙도 수행될 수 있다. 반면 역방향 연결은 전문가 시스템이 결과로 도출할 목표를 정하고, 추론 엔진이 이를 증명하기 위해 증거 찾기를 시도하여 목표에 도달하는 사실들을 역으로 추론해 나가는 과정으로, 특정 목표에 도달하기 위해서는 순방향 연결 보다 효율적이다. 순방향 연결과 역방향 연결은 서로 조합하여 사용될 수 있다. 기본적인 추론 방법은 추론의 효율성을 고려하여 역방향 연결을 사용하고, 새로운 사실이 데이터베이스에 입력되었을 경우에는 이를 최대한 활용하기 위해 순방향 연결을 이용하여 새로운 사실들을 추론하여 이를 다시 데이터베이스에 저장하는 과정을 거친다.

3.4 전문가 시스템 셸(Expert system shell)

전문가 시스템 셸은 전문가 시스템 구성을 가능하게 해주는 체계이며 통상적으로 기반 지식, 추론 알고리즘, 해설 설비, 사용자 인터페이스, 지식 편집 기능을 내장하고 있다 (Kaczor, et al., 2010). 이러한 시스템은 특정 영역에 적용되어 지식 공학자(knowledge engineer)에 의해 선정된 형식론(formalism)에 따라 전문가 시스템을 개발하는데 활용된다. 최근까지 많은 전문가 시스템 셸이 상용, 혹은 공용으로 공개되어 있다. 정부, 산업기관, 연구기관에서 주로 사용하는 전문가 시스템 셸의 특징을 요약하면 Table 2와 같다.

Table 2 Comparison of expert system shells

Feature	CLIPS	Jess	Drools
Knowledge modularization	Yes	Partial	Yes
Knowledge visualization	No	No	Yes
Inference strategies	DDI	DDI,GDI	DDI
Inference algorithm	Rete	Rete	Rete
Allows for modeling dynamic processes	No	No	Yes
Compatibility	C,C++,C#	Java	No

여기서, DDI (Data-driven inference)는 순방향 추론, GDI (Goal-driven inference)는 역방향 추론, Rete는 추론을 위한 효율적인 유형 정합(pattern matching) 알고리즘이다. 본 연구에서는 이후 GUI 기반의 사용자 인터페이스를 구현하기 위해 타 언어와의 호환성이 뛰어나고, open source로 공개되어있는 CLIPS(<http://clipsrules.sourceforge.net/>)를 전문가 시스템 셸로 선정하였다.

CLIPS(C language integrated production system)는 Rete 알고리즘을 기반으로 한 전문가 시스템 셸로, 규칙 기반, 절차 또는 객체 지향 프로그래밍을 지원하는 독자적인 프로그래밍 언어를 사용한다 (Giarratano & Riley, 2005). CLIPS는 다양한 프로그래밍 패러다임이 적용되어 지식을 표현하는 방식도 다양하다. 예를 들어, 규칙을 정의할 때 지식을 바로 IF-THEN 규칙으로 적용이 가능하고, 또한 클래스 또는 템플릿을 구성하여 이들의 속성값을 통해 규칙을 정의할 수도 있다 (Choi & Kim, 2009). 따라서, 잠수함 배치 설계에 전문가 시스템을 적용하는데 수식화된 규칙이나 수식으로 표현하기 어려운 일반적인 규칙들도 모두 표현 가능하다는 이점이 있다.

3.5 전문가 시스템의 예시

전문가 시스템 작동 과정의 이해를 돕기 위하여, 자동차 상태 진단을 위한 간단한 전문가 시스템을 구성하였다. 본 예시에서는 자동차의 각 증상에 대해 사용자에게 질의를 통한 답변을 토대로 최종 자동차의 상태 개선에 대한 조언을 제시하는 형태로 구성이 되었다. 이를 간략히 표현하면 Fig. 5와 같다.

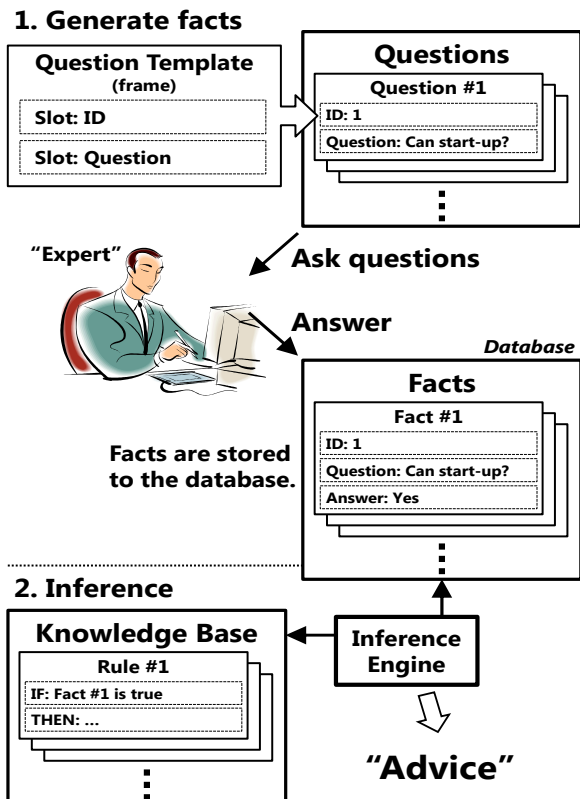


Fig. 5 Expert system for car diagnosis

전문가 시스템을 이용하는 과정은 크게 사실 수집과 추론 과정으로 나누어진다. 사실 수집 단계에서는 주어진 현재의 상황에 따라 사실을 수집하기 위해 사전에 정의된 질의 양식(question template)을 이용하여 질의 목록(questions)을 작성한다. 그리고 질의 목록 내의 질의에 따른 대답을 수집하여 사실을 데이터베이스에 누적한다. 추론 단계에서는 데이터베이스 내에 누적된 사실과 기반 지식 내에 정의된 규칙을 이용하여 추론 과정을 거쳐 새로운 사실을 누적하여 최종 결론(조언)을 얻게 된다.

예를 들어 자동차의 증상 진단을 위해 질의 목록을 다음과 같이 작성할 수 있다.

- 자동차의 시동이 걸립니까?
- 전조등이 켜집니까?
- 솔레노이드는 작동합니까?

이 질의에 대해 사용자(또는 전문가)는 현재 자신의 자동차에 대해 답변을 할 수 있으며, 그 결과는 사실을 저장하는 데이터베이스에 누적된다. 다음은 질의에 대한 답변으로 데이터베이스에 누적된 사실의 예시이다.

- 자동차의 시동이 걸립니까? - 아니오
- 전조등이 켜집니까? - 아니오
- 솔레노이드는 작동합니까? - 아니오

추론 엔진은 데이터베이스의 사실과 기반 지식 내의 규칙을 조합하여 새로운 사실을 추론한다. 만약 다음과 같은 규칙이 기반 지식 내에 정의되어 있다면, 전문가 시스템은 “배터리 교체”라는 추론 결과를 도출할 수 있을 것이다.

- IF 자동차 시동 is false and 전조등 is false and 솔레노이드 is false, THEN 배터리 교체.

4. 잠수함 배치 설계에의 전문가 시스템 적용

잠수함 압력 선체 내부의 구획을 결정하기 위해서는 각 구획의 필요로 하는 부피나 구획의 기하학적 형상, 그리고 구획의 길이, 높이 방향 위치 등을 고려해야 한다 (Burcher & Rydill, 1994). 예를 들어, 추진 기관의 경우 일반적으로 shafting, thrust block, gearing, motor 등의 장비 뒤에 일직선 상으로 위치해야 한다. 또한 선내 구획을 나눌 때에는 기본적으로 압력 선체의 구조 강도를 고려해 overall collapse가 일어나지 않도록 설계해야 한다. 하지만 중 방향 격벽의 경우에 병렬 배치도 고려해야 하기에, 지휘 통제실이나 통신실, 소나실의 분배에 따른 작전 성능도 고려해야 한다. 이 경우 각 구획의 위치에 따른 구조 강도는 수식으로 정식화 할 수 있기에 최적화 과정에서 활용할 수 있다. 그러나 작전

요구 사항의 경우 전문가의 경험에 따른 판단으로 결정되므로 이를 정식화하여 최적화 과정에서 고려하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 예시와 같은 문제를 해결하기 위해 전문가 시스템을 도입하여 잠수함 배치 설계 진행 시 최소한의 주어진 조건으로 만족할 만한 설계 대안을 선정할 수 있는 프로그램을 구축하였다.

전문가 시스템을 잠수함 배치 설계에 적용하기 이전에 공간 배치 정보를 효율적으로 저장하고, 재구성하기 위해서는 이에 적합한 자료 구조의 정의가 필수적이다. 잠수함 공간 배치에 대해 기존의 배치 설계 도면 자료를 체계적으로 분석 후 추출된 형상 정보, 설계 지식 정보와 특징 형상 정보를 재분석하여 배치 설계 순서, 구획과 선체 형상과의 관계, 구획 간의 관계, 구획 및 장비 배치 방법 등의 배치 설계 지식을 정리해야 한다. 그리고 이를 토대로 최소한의 정보의 입력과 관련된 설계 지식으로 잠수함의 공간 배치 정보를 표현할 수 있는 공간 배치 템플릿 모델의 구조와 체계를 정의해야 한다. 본 연구에서는 모든 잠수함의 특성을 포함한 공간 배치 템플릿 모델의 정의 이전에 간략한 템플릿 모델을 설계하여 전문가 시스템과 연동 가능성을 확인했다.

형상 정의를 위한 잠수함 배치 설계 템플릿을 활용한 규칙 기반 전문가 시스템으로 전문가 시스템 셸을 구성한다. 이 과정에서 템플릿의 내부의 속성 값이나 특성 정보들이 데이터베이스의 사실을 구성하고, 이와 관련된 다양한 규칙들이 기반 지식에 들어가게 된다. 그리고 이를 바탕으로 추론 가능한 추론 엔진을 설계한다. 추론된 결과를 토대로 각 구획이나 장비의 특성에 따라

전문가가 부여한 규칙에 따라 특정 배치 대안이 적절인지 평가를 내리고 이에 대한 조언 또는 변경 방안에 대하여 제시한다.

4.1 잠수함 공간 배치 템플릿 모델

본 연구에서는 전문가 시스템 내에서 사실과 규칙을 정의하고 추론을 진행하기 위해, 잠수함 내의 공간 배치 대안에 대한 개략적인 명세를 나타낼 수 있는 간략화된 잠수함 공간 배치 템플릿 모델을 정의하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에서 볼 수 있듯이 본 연구에서는 잠수함 압력 선체 내의 공간을 분할하여 구획을 배치하기에 최상위 노드에는 압력 선체 'Pressure Hull'이 위치하고 있다. 그리고 이를 분할하기 위한 격벽 'Partition'과 격벽에 의해 나누어진 구획 'Compartment'가 존재한다. 격벽은 다시 종류에 따라 'Bulkhead', 'Longi. Girder', 'Deck'로 구분된다. 구획은 다시 가벽 'SubPartition'으로 분할된 단위 구획 'Compartment Unit'의 조합으로 이루어지며, 각각의 단위 구획에는 필요한 중량물 'Load Item'이 분포되어 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 템플릿을 이용하여 잠수함 압력 선체 내의 구획을 분할한 예시이다. 압력 선체는 2개의 수직 격벽(bulkhead)과 2개의 수평 격벽(deck)으로 분할되어 있으며, 이들로 분할된 구획은 'Compartment'에 해당한다. 그리고 구획은 다시 가벽(sub-partition)으로 분할될 수 있으며, 이에 의해 분할된 단위 구획이 'Compartment Unit'에 해당한다.

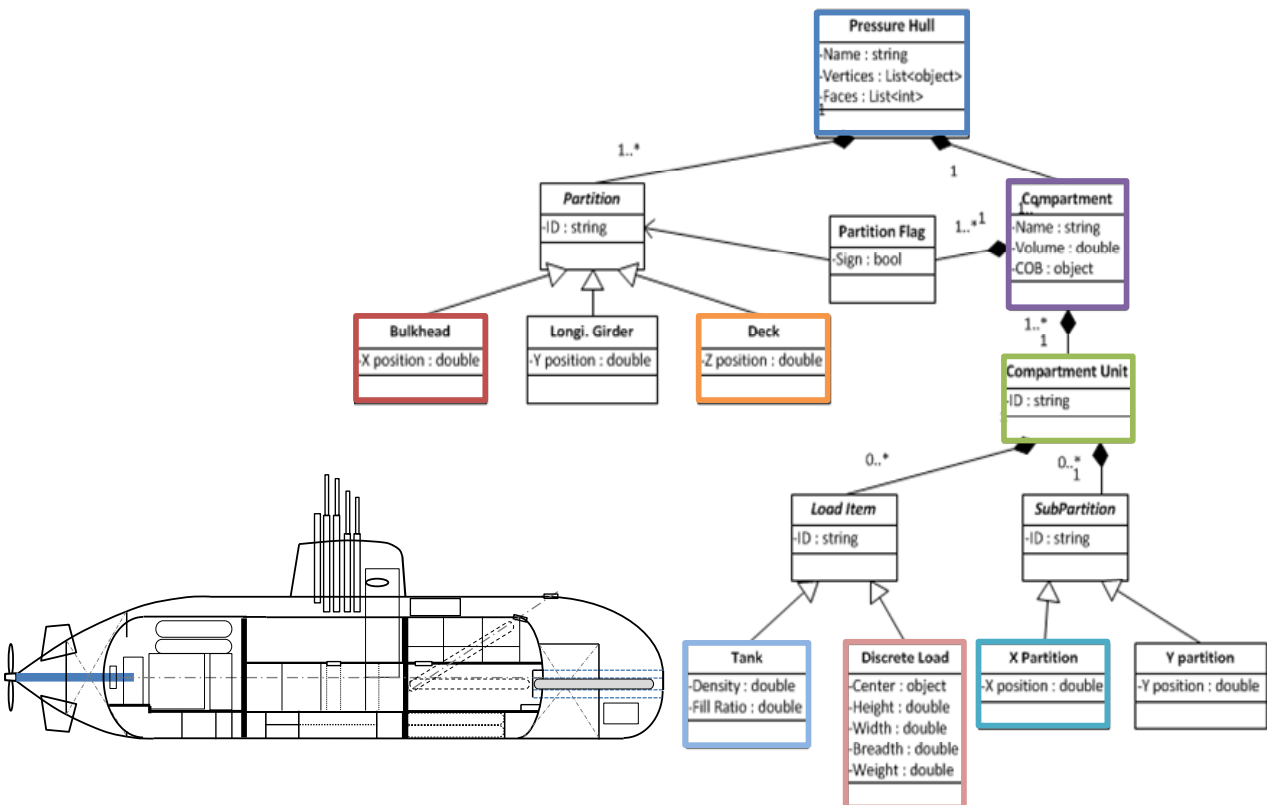


Fig. 6 Simplified template for arrangement design of submarine

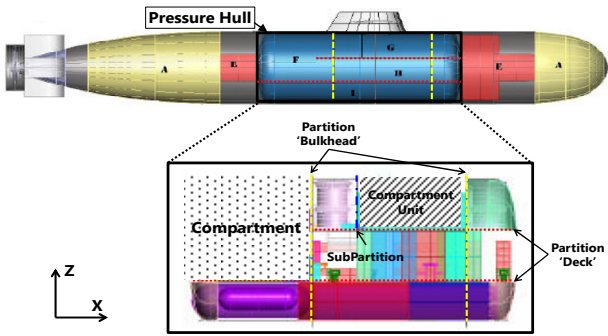


Fig. 7 Example of partitions using simplified template

4.2 전문가 시스템을 활용한 설계 대안의 평가

전문가 시스템을 활용하여 최적의 설계 대안을 도출하는 방법에는 여러 가지가 있다. 본 연구에서는 다수의 설계 대안에 대한 적합도를 평가하는 방식으로 전문가 시스템을 적용하였다.

설계 대안의 적합도를 평가하는 과정은 다음의 과정으로 진행할 수 있다.

1) 잠수함 배치 시 필수 사항에 대한 규칙

설계 요구 사항 내에는 구획 배치 시 필수적으로 만족해야 하는 요구 사항이 있다. 예를 들어 추진과 관련된 장비의 연속적인 배치를 위해 기관실의 위치가 선미에 반드시 위치해야 한다면 이는 필수적으로 만족해야 하는 규칙이다. 필수 사항에 대한 규칙은 적합도를 평가하는 점수로 환산하기 보다는 위배할 경우 설계 대안에서 제외하는 형태로 고려하는 것이 더 적절하다.

2) 적합도 평가를 위한 규칙

적합도를 평가하기 위해 설계 대안을 이용하여 점수를 부여하는 규칙에 해당한다. 주로 잠수함 운용자나 설계자의 경험에 의해 도출되는 규칙에 해당된다. 예를 들어 “선수, 선미 보정 탱크는 선체 중앙부에서 멀수록 좋다”와 같이 판단의 기준이 다소 모호한 규칙들이 이에 해당되며, 이들은 전문가의 경험에 따라 점수로 전환할 수 있는 규칙으로 수립될 수 있다. 각각의 규칙은 중요도가 다를 수 있기에 가중치를 부여함으로써 이를 고려할 수 있다. 각 규칙에 대한 가중치를 산정하는 방법에는 Analytic Hierarchy Process (AHP) 기법 (Shingler, et al., 2005)과 Fuzzy 방법 (Negnevitsky, 2009)을 포함한 다양한 방법이 있다. 본 논문에서는 가중치 산정에 대한 부분은 간소화 하기 위해 Table 3과 같이 5가지의 중요도를 설정하고 이에 대한 가중치를 균등 배분하였다. 그리고 전문가가 각 규칙에 대한 가중치를 전문가의 경험 지식에 따라 선택할 수 있도록 하였다.

Table 3 Weight factor according to importance

Importance	Weight factor
Not important	0.1
Less important	0.3
Normal	0.5
Important	0.7
Very important	0.9

5. 전문가 시스템을 이용한 잠수함 구획 배치 설계 대안 평가 적용 사례

본 연구에서는 전문가 시스템을 이용하여 잠수함 구획 배치 설계 대안에 대한 평가를 수행한 후 대안의 적합도를 평가하는 방식으로 전문가 시스템을 적용하였다. 설계 대안의 적합도를 평가하기 위해서는 설계 요구 사항이나 잠수함 운용자나 설계자의 경험에 따라 대안 평가를 위한 규칙을 먼저 수립해야 한다. 그리고 이들을 설계 대안을 평가하는데 필수 규칙과 점수 평가 규칙으로 나누고 필수 규칙을 만족여부에 따라 적합도 평가 유무를 결정하게 된다. 필수 사항을 위배하는 대안은 제거하고, 나머지 대안에 대해서는 적합도에 상응하는 점수를 부여하여 최선의 대안을 선택하게 된다.

5.1 잠수함 구획 배치 설계 대안 평가를 위한 규칙 정의

잠수함의 구획 배치 설계 대안을 평가하기 위해 3개의 필수 규칙을 다음과 같이 수립하였다.

필수 규칙 1: 기관실의 위치에 따른 대안 제거 규칙

$$\frac{\text{내압선체 후미부터 기관실의 부력중심까지의 } x\text{방향 위치}}{\text{내압선체의 길이}} > 0.5$$

(기관실은 추진 축계와 연결되어 있어야 하기에 선수 방향으로 치우치면 사용할 수 없는 대안이 됨)

필수 규칙 2: 선수 트림 탱크의 위치에 따른 대안 제거 규칙

$$\frac{\text{내압선체 후미부터 선수 트림탱크의 부력중심까지의 } x\text{방향 위치}}{\text{내압선체의 길이}} < 0.5$$

(선수 트림 탱크가 내압선체의 절반이상 후미로 가게 되면 선수 트림 탱크의 기능을 잃게 됨)

필수 규칙 3: 선미 트림 탱크의 위치에 따른 대안 제거 규칙

$$\frac{\text{내압선체 후미부터 선미 트림탱크의 부력중심까지의 } x\text{방향 위치}}{\text{내압선체의 길이}} > 0.5$$

(선미 트림 탱크가 내압선체의 절반이상 선수로 가게 되면 선미 트림 탱크의 기능을 잃게 됨)

그리고 적합도 평가를 위한 점수를 부여하기 위해 12개의 적합도 평가 규칙을 다음과 같이 수립하였다.

1) 탱크의 높이 방향 위치에 대한 규칙 (중요도: Important)

- 선수 트림 탱크

$$\frac{\text{내압선체 하단에서 부터 선수 트림탱크 부력 중심의 } z\text{방향 위치}}{\text{내압선체의 높이}} < 0.2 \rightarrow 90\text{점}$$

$$< 0.4 \rightarrow 40\text{점}$$

$$\geq 0.4 \rightarrow 20\text{점}$$

- (선수 트림 탱크의 높이방향 위치는 선체의 무게중심을 낮추기 위해 아래에 위치할수록 좋음)
- 선미 트림 탱크 (선수 트림탱크와 동일)
- 연료유 탱크 (선수 트림탱크와 동일)
- 보조유 탱크 (선수 트림탱크와 동일)

2) 보정 탱크의 길이 방향 위치에 대한 규칙 (중요도: Important)

- 선수 트림 탱크
- $\frac{\text{내압선체 후미부터 선수 트림탱크의 부력중심의 x방향 위치}}{\text{내압선체의 길이}} > 0.8 \rightarrow 90\text{점}$
- $> 0.6 \rightarrow 40\text{점}$
- $\leq 0.6 \rightarrow 10\text{점}$

(선수 트림 탱크는 선수와 가까울수록 같은 양의 ballast수로 더 큰 모멘트를 발생시킬 수 있기에 선수에 가까울수록 좋음)

- 선미 트림 탱크
- $\frac{\text{내압선체 후미부터 선미 트림탱크의 부력중심의 x방향 위치}}{\text{내압선체의 길이}} < 0.2 \rightarrow 90\text{점}$
- $< 0.4 \rightarrow 40\text{점}$
- $\geq 0.4 \rightarrow 10\text{점}$

(선미 트림 탱크는 선미와 가까울수록 같은 양의 ballast수로 더 큰 모멘트를 발생시킬 수 있기에 선미에 가까울수록 좋음)

3) 기관실과 거주구의 거리에 대한 규칙 (중요도: Less Important)

- 기관실과 선원 거주구
- $\frac{\text{기관실 부력중심과 선원 거주구 부력중심간의 거리}}{\text{내압선체의 길이}} > 0.5 \rightarrow 80\text{점}$
- $> 0.3 \rightarrow 40\text{점}$
- $\leq 30 \rightarrow 10\text{점}$

(기관실의 소음문제로 인해 거주구와 멀수록 좋음)

- 기관실과 작전 요원 거주구(위와 동일)

4) 작전 요원 거주구와 잠수실의 거리에 대한 규칙 (중요도: Very Important)

- $\frac{\text{작전 요원 거주구의 부력중심과 잠수실의 부력중심간의 거리}}{\text{내압선체의 길이}} < 0.25 \rightarrow 90\text{점}$
- $< 0.3 \rightarrow 50\text{점}$
- $\geq 0.3 \rightarrow 20\text{점}$

(작전 성능의 극대화를 위해 작전 요원 거주구는 잠수실과 가까울수록 좋음)

5) 선원 거주구와 지휘 통제실의 거리에 대한 규칙 (중요도: Very Important)

- $\frac{\text{선원 거주구의 부력중심과 지휘 통제실의 부력중심간의 거리}}{\text{내압선체의 길이}} < 0.2 \rightarrow 90\text{점}$
- $< 0.3 \rightarrow 60\text{점}$
- $\geq 0.3 \rightarrow 40\text{점}$

(작전 성능의 극대화를 위해 선원 거주구와 지휘 통제실은 가까울수록 좋음)

6) 기관실과 연료유 탱크와의 거리에 대한 규칙 (중요도: Normal)

$$\frac{\text{기관실 부력중심과 연료유 탱크 부력중심간의 거리}}{\text{내압선체의 높이}} < 0.3 \rightarrow 90\text{점}$$

$$< 0.5 \rightarrow 60\text{점}$$

$$\geq 0.5 \rightarrow 30\text{점}$$

(배관을 줄이기 위해 기관실과 연료유 탱크와의 거리는 가까울수록 좋음)

7) 기관실의 길이 방향 위치에 대한 규칙 (중요도: Very Important)

$$\frac{\text{내압선체 후미로부터 기관실의 부력중심까지의 x방향 위치}}{\text{내압선체의 길이}} < 0.2 \rightarrow 90\text{점}$$

$$< 0.4 \rightarrow 40\text{점}$$

$$\geq 40 \rightarrow 10\text{점}$$

(추진 축계를 경량화 하기 위해 기관실은 선체 후미에 있을수록 좋음)

각 규칙에 대한 가중치는 Table 3에 따라 부여하였다. 예를 들어 ‘기관실의 길이 방향 위치에 대한 규칙’의 경우 ‘매우 중요 (very important)’로 설정하였으며, Table 3에 따라 가중치가 0.9로 설정되게 된다. 본 연구에서 제시한 잠수함 설계 대안 평가를 위한 규칙들은 전문가 시스템의 활용 가능성을 확인하기 위한 예시이며, 실제 활용 시 전문가가 직접 규칙들을 설정하거나 규칙 내에 부여된 기준, 점수, 중요도를 변경하여 활용할 수 있다.

5.2 예시 모델 및 적용 규칙

본 연구에서는 전문가 시스템의 활용성을 확인하기 위해 Fig. 8과 같이 개략적인 잠수함 압력 선체 모델에 대해 제한한 방법을 적용하였다. 주어진 잠수함의 압력 선체 형상은 직육면체로 가정하여 단순화 하였으며, 구획을 나누는 격벽의 수와 위치도 고정하였다. 그리고 나누어진 구획의 용도를 변경하면서 다양한 배치 설계 대안을 선정하고, 전문가 시스템을 활용하여 각 대안의 적합도를 평가하는 방식으로 전문가 시스템의 활용성을 검증하였다.

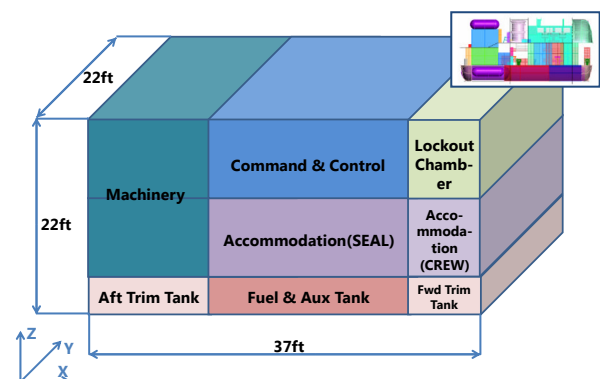


Fig. 8 Simplified arrangement design of submarine

Fig. 9은 본 연구에서 개발한 전문가 시스템 기반의 잠수함 공간 배치 검토용 프로그램의 예시이다. 개발한 프로그램에서는 각 설계 대안에 대한 값을 전문가 시스템 상에서 질의 형식으로 응답하면, 추론 과정을 통해 설계 대안의 적합도를 평가하여 점수로 환산된 결과를 도출한다.

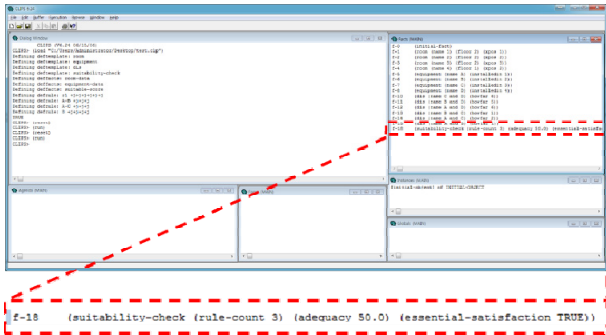


Fig. 9 Developed program for choosing proper design alternative of submarine arrangement using CLIPS

설계 대안은 Fig. 8과 같이 미리 정의된 8개의 각 구획에 용도를 임의로 배분하는 과정을 통해 총 40,320(= 8!)개의 대안을 생성할 수 있다. Fig. 10은 이들 중 예시로서 선정한 9개의 설계 대안에 대해 4.1절에서 설명한 필수 규칙과 적합도 평가 규칙을 이용하여 적합도를 평가한 결과를 보여준다. 7~9의 설계 대안의 경우 다음과 같이 5.1절에서 설명한 필수 규칙 3가지 중 만족하지 않는 것이 존재하여 적합도 평가에서 제외되었다.

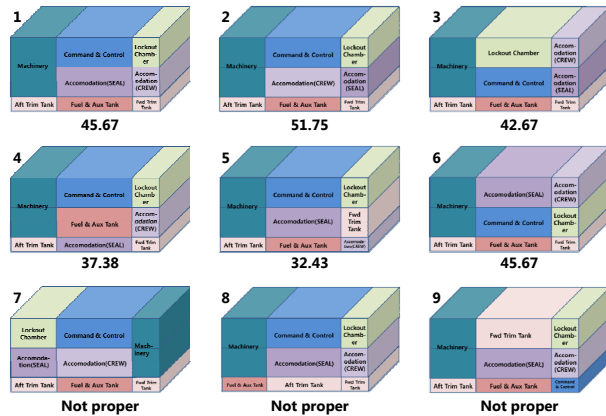


Fig. 10 Example of scoring an appropriateness for design alternatives of submarine arrangement using expert system

- 대안 7: 필수 규칙 1 위배
- 대안 8: 필수 규칙 3 위배
- 대안 9: 필수 규칙 2 위배

나머지 1~6의 6가지 설계 대안은 12가지 적합도 평가 규칙에 따라 전문가 시스템을 이용한 추론 과정을 통해 적합도 평가 점수로 환산하였다. 2번 설계대안에 대한 계산 과정은 다음과 같다.

1) 탱크의 높이 방향 위치에 대한 규칙

- 선수 트림 탱크 $\left(\frac{3.74}{22} = 0.17\right)$
 $90 \times 0.7 = 63$ 점
- 선미 트림 탱크(선수 트림탱크와 동일)
- 연료유 탱크(선수 트림탱크와 동일)
- 보조유 탱크(선수 트림탱크와 동일)

2) 보정 탱크의 길이 방향 위치에 대한 규칙

- 선수 트림 탱크 $\left(\frac{35.15}{37} = 0.95\right)$
 $90 \times 0.7 = 63$ 점
- 선미 트림 탱크 $\left(\frac{6.75}{37} = 0.18\right)$
 $90 \times 0.7 = 63$ 점

3) 기관실과 거주구의 거리에 대한 규칙

- 기관실과 선원 거주구 $\left(\frac{17.10}{37} = 0.46\right)$
 $40 \times 0.3 = 12$ 점
- 기관실과 작전 요원 거주구 $\left(\frac{28.67}{37} = 0.77\right)$
 $80 \times 0.3 = 24$ 점

4) 작전 요원 거주구와 잠수실의 거리에 대한 규칙

$\left(\frac{7.76}{37} = 0.21\right) 90 \times 0.9 = 81$ 점

5) 선원 거주구와 지휘 통제실의 거리에 대한 규칙

$\left(\frac{7.76}{37} = 0.21\right) 60 \times 0.5 = 30$ 점

6) 기관실과 연료유 탱크와의 거리에 대한 규칙

$\left(\frac{19.447}{37} = 0.53\right) 30 \times 0.5 = 15$ 점

7) 기관실의 길이 방향 위치에 대한 규칙

$\left(\frac{6.75}{37} = 0.18\right) 90 \times 0.9 = 81$ 점

위의 12가지 규칙에 대한 점수를 도출하여 정규화한 결과 2번 설계 대안의 적합도 점수가 최고 점수인 51.75 점으로 도출되었으며, 전문가 시스템 내의 기반 지식에 설정한 설계 규칙에 가장 적합한 설계 대안으로 선정되었다. 규칙의 설정이나 예시 선정, 그리고 대안의 선정 과정에서 다소 간략화 한 문제로 검증을 진행하였으나, 추후 보다 복잡한 규칙을 설정하거나 사전에 정의한 잠수함 공간 배치용 템플릿 모델을 이용하여 좀 더 실제에 맞는 프레임워크를 설계한다면 보다 정확한 대안 평가가 가능할 것으로 예상된다.

6. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 전문가 시스템 구동의 확인을 위해 매우 간단한 예시 모델과 규칙을 적용하여 직관적으로도 최적의 배치 안을 확인할 수 있었다. 하지만 실제 잠수함 배치에서는 2차원이 아닌 3차원 배치가 필요하고 또한 각 구획의 위치 격벽의 위치 그리고 구획 내에서도 장비의 위치가 모두 다르고 또한 적용 규칙도 수십, 수백 가지에 이르기 때문에 이를 비전문가뿐만 아니라 전문가도 직관적으로 배치 안이 어느 정도 적합한지 확인하기 힘들다. 따라서 본 연구에서 제시한 전문가 시스템을 적용하여 잠수함 배치 설계에 활용한다면 좀 더 쉽고 빠르게 배치 안에 대한 평가를 내릴 수 있을 것이라 판단한다.

추후의 연구에서는 본 연구에서도 논한 바와 같이 전문가 시스템 모듈과 최적화 모듈에서 활용하여 실제 잠수함 배치 설계에 활용 가능할 정도의 정밀한 템플릿 모델의 작성이 필요하다. 그리고 이를 활용한 전문가 시스템을 위해 잠수함 배치 설계에 관한 전문 지식과 관련 규정을 조사하여, 다양하고 현실적인 규칙을 지식 베이스에 추가해야 한다. 그리고 평가를 위한 대안의 생성과 필수적인 선박 계산을 위한 최적화 모듈의 추가가 필요하다. 위의 과정을 사용자가 사용하기 쉽도록 GUI 기반의 인터페이스로 구현하여 규칙과 배치 모델을 설정하고, 변환할 수 있는 시스템 또한 필요하다.

위와 같이 추가적인 연구가 본 연구 이후에 지속적으로 이루어진다면 본 연구의 결과와 함께 활용되어 좀 더 현실성 있고, 실제 전문가가 설계한 배치 안과 유사한 배치 안을 손쉽게 도출해 낼 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 (a) 국방과학연구소, (b) 지식경제부 산업원천기술개발사업(10035331, 시뮬레이션 기반의 선박 및 해양플랜트 생산기술 개발), (c) 한국연구재단 기초연구사업(NRF-2013R1A6A3A01065496), (d) BK21+ 해양플랜트창의인재양성사업단, (e) 서울대학교 공학연구소, (f) 서울대학교 해양시스템공학연구소의 지원을 받아 연구되었음을 밝히며, 이에 감사 드립니다.

References

- Bédard, C. & Ravi, M., 1991. Knowledge-Based Approach to Overall Configuration of Multistory Office Buildings. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 5(4), pp.336-353.
- Choi, S.K. & Kim, J.S., 2009. Fuzzy Inference Engine

- for Ontology-based Expert Systems. *Journal of the Korea Contents Association*, 9(6), pp.45-52.
- Chung, B.Y. Kim, S.Y. Shin, S.C. Koo, Y.H. & Kraus, A., 2011. Optimization of Compartments Arrangement of Submarine Pressure Hull with Knowledge based System. *International Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 3(4), pp.254-262.
- Giarratano, J.C. & Riley, G.D., 2005. *Expert systems: Principles and Programming*. 3rd Edition. PWS Pub. Co.: Boston.
- Helvacioğlu, S. & Insel, M., 2005. A Reasoning Method for a Ship Design Expert System. *Expert systems*, 22(2), pp.72-77.
- Kaczor, K. Bobek, S. & Nalepa, G.J., 2010. Rule modularization and inference solution – a synthetic overview. *International Workshop on Design, Evaluation and Refinement of Intelligent Systems*, Ilmenau, Germany, 13-16 September 2010, p.25.
- Kowalewski, T. Podsiadlo, A. & Tarelko, W., 2004. Development of advisory expert system aiding maintenance of ship power plant. *Engineering Design in Integrated Product Development*, Zielona Gora, Poland, 7-9 October 2004, pp.207-214.
- Lee, K.H. & Lee, K.Y., 1997. Knowledge-Based Nonmonotonic Reasoning Process in Ship Compartment Design System. *Expert Systems with Applications*, 13(2), pp.145-154.
- Negnevitsky, M., 2009. *Artificial Intelligence*. 2nd Edition. Addison-Wesley: New York.
- Sheen, D.M., 2012. Nesting Expert System using Heuristic Search. *Journal of the Korean Society of Ocean Engineers*, 26(4), pp.8-14.
- Shingler, K. Goff, D. & Shrewsbury, D., 2005. *Design report littoral warfare submarine (SSLW), Report of Advanced Tactics Littoral Alternative Submarine Ocean Engineering Design Project AOE4065/4066*, Virginia Tech: Virginia.



김기수

하솔

구남국

노명일