

제티 구조물 기초 설계용 전문가시스템

김홍석* · 임용택** · 이충동*** · 안희재***

(1997년 12월 6일 접수)

Expert System for Basic Design of Jetty Structure

Hong-Seok Kim, Yong-Taek Im, Choong-Dong Lee and Hee-Jae Ahn

Key Words : Jetty Structure(제티 구조물), Offshore Structure(해양 구조물), Basic Design(기초 설계), Expert System(전문가시스템)

Abstract

Jetty structure, a kind of offshore structure installed in offshores or oceans less than 50 m deep, is used for berthing and mooring of ships to unload the ship's cargo, mainly coal and oil. The major differences compared with structures constructed in land are existing due to the effects of waves, winds, currents and the impact loadings from ships. The basic design of jetty structures has been carried out by the experience-oriented process that heavily depends on the designer's knowledge and decision. In this study, a prototype of expert system for basic design of jetty structures was developed by employing Smart Elements, a commercial expert system shell, on a personal computer environment. The developed system determines the global jetty structure design and each jacket structure design composing the jetty. In order to develop the expert system, examination of pre-designed drawings of jetty structures and construction of databases for fenders, pipes, materials and design factors were carried out. In addition, comparison of designed results obtained from the developed system and pre-designed drawing used for existing construction was made for verification of the developed expert system.

1. 서 론

전문가시스템(expert system)은 인간의 지식을 규칙베이스(rulebase)와 데이터베이스(database)를 통하여 저장하고, 인간의 사고를 모사한 추론(inference)을 이용하여 저장된 지식을 활용함으로써 문제를 해결하는 컴퓨터 프로그램을 의미한다.⁽¹⁾ 1970년대 중반부터 전문가시스템을 이용하여 기존의 방법으로는 해결이 어려웠던 문제들에 대응할

수 있다는 인식이 태동된 이래로 실제 문제들에 대한 적용이 활발하게 이루어지고 있으며, 특히 1990년대에 들어서는 산업 및 공학 분야에 대한 전문가시스템의 적용이 증대되고 있다.⁽²⁻⁴⁾ 본 연구에서는 해양 구조물의 일종인 제티 구조물(jetty structure)의 기초 설계 단계에 전문가시스템 기법을 적용함으로써 경험집약적인 작업에 대한 지식베이스적 접근가능성을 모색하였다.

일반적으로 제티라는 용어는 해안에 설치되는 방파제나 선박의 정박을 위한 부두, 부두에 설치되는 다리 등을 의미하지만, 본 연구에서는 수심 50 m 이하의 연안에 설치되어 정박이나 하역, 하역물의 수송 등에 이용되는 구조물로 정의하였다. 대표적

* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

*** 회원, 현대중공업(주) 중앙연구소

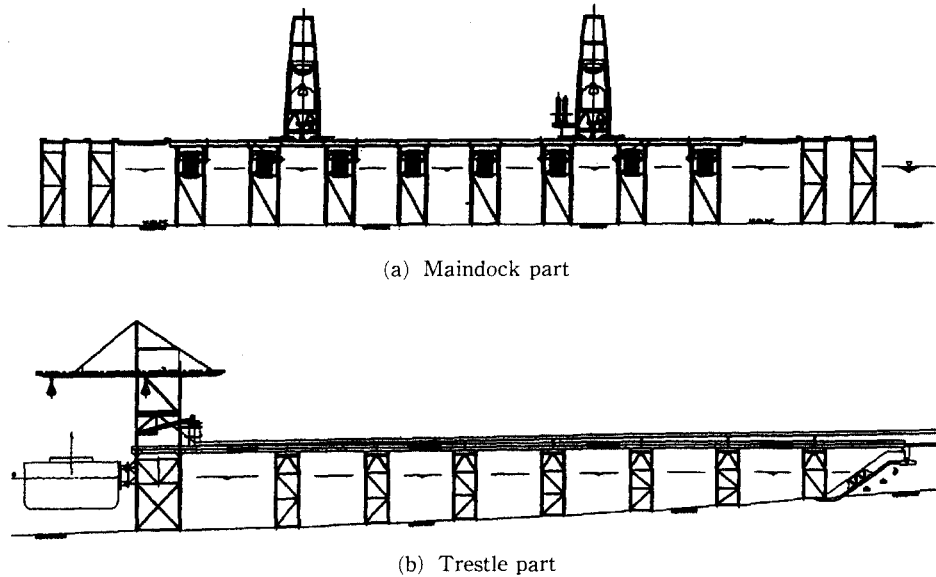


Fig. 1 An example of jetty structure.

인 제티 구조물의 개략도를 Fig. 1에 나타내었는데, 그림에서와 같이 제티 구조물은 선박과 접촉하는 주도크 제티(maindock jetty)와 하역물의 수송으로 사용되는 교량 제티(trestle jetty)의 두 부분으로 나뉜다. 대표적인 해양 구조물로서 수심 300 m이상의 해양에 설치되어 석유나 천연가스의 시추 등에 사용되는 자켓 구조물(jacket structure)⁽⁵⁾은 일반적으로 8개의 다리를 갖는 독립적인 구조물을 의미하는데 반하여 제티 구조물은 4개의 다리를 가지고 있는 여러 개의 자켓 구조물들이 상판으로 연결되기 때문에 교량과 유사한 형상을 갖게 된다. 따라서 제티 구조물은 상판과 이 상판을 지지하는 자켓들로 구성되며, 각 자켓은 4개의 다리와 보강재로 이루어진다. 이러한 제티 구조물의 설계를 위해서는 선박에 의한 정박 하중(berthing loads)과 환경 하중(environmental loads) 등이 고려되며,^(6,7) 제티를 구성하는 각 자켓의 높이와 넓이, 자켓 사이의 거리 및 전체 제티 구조물의 길이 등이 결정되어야 하고, 각 자켓의 다리 및 보강재의 치수도 결정되어야 한다. 일반적으로 제티 구조물은 개념 설계(conceptual design)와 기초 설계(basic design), 그리고 상세 설계(detail design) 단계를 거쳐 설계되는데,⁽⁸⁾ 개념 설계 단계에서는 설치 해역의 환경 특성과 구조물의 작업 특성 등을 고려하여 구조물의 대략적인 형상과 설계 시의 특이 사항들이 결정된다. 이러한 개념 설계의 결과는 발주자의 설계

사양(design specification)으로 설계자에게 제시되며, 기초 설계 단계에서는 설계 사양에 맞추어 전체 구조물의 치수와 자켓들의 형상, 다리 및 보강재의 치수가 결정된다. 일반적으로 기초 설계는 설계자의 직관과 판단에 의하여 수행되므로 상세 설계 단계에서 안전도를 검토받게 되며, 오류가 발견되면 설계 변경을 하게 된다. 그러나 개념 설계는 대부분 발주자의 설계 사양으로 제시되며, 상세 설계는 이미 해석 프로그램이 개발되어 널리 사용되고 있을 뿐만 아니라 계산집약적인 속성을 가지고 있으므로 전문가시스템 기법의 적용이 부적절하다. 이에 비하여 기초 설계 단계는 설계자의 경험과 판단에 크게 의존하는 작업으로 지식베이스적인 접근법이 효과적으로 적용될 수 있는 대상이라 할 수 있다. 제티의 경우에는 구조물을 구성하는 수많은 자켓과 보강재 등의 여러 요소들을 효율적으로 표현할 수 있는 자료 구조(data structure)가 요구되며, 기존의 설계자들이 가지고 있는 인지적인 경험과 판단의 지식베이스화가 요구된다.

일반적으로 최적의 구조물을 설계하기 위해서는 어느 정도의 시행착오가 불가피한데 설계자의 경험과 지식에 따라 이러한 시행착오의 가능성은 줄어들게 된다. 또한 구조요소의 다양한 배치를 통하여 유사한 안전성을 가지는 서로 상이한 구조물의 설계도 가능하다. 이와 같은 구조 설계 과정의 비결정성(non-deterministic nature) 때문에 지식베이스

적인 접근법을 사용하여 구조 설계를 수행하려는 연구가 수행되어 왔다. Kumar 등⁽⁹⁾은 지식베이스적 접근법을 강구조물(steel structure) 설계에 적용하였는데, 개발된 시스템은 흑판(blackboard) 기입법을 통하여 자료 구조와 설계 규칙을 연결시키고 탐색기법(searching technique)을 사용하여 다양한 구조물을 설계하였다. 해양 구조물에 대해서는 Soh^(10,11) 등이 자켓 구조물에 대한 기존의 설계를 데이터베이스화 한 후에 설계 조건을 입력하면 가장 유사한 설계를 검색하여 주는 사례 베이스(case-base)적인 설계시스템을 개발한 바 있다. 그러나 데이터베이스에 저장되어야 하는 기존 설계예의 수집에는 많은 어려움이 따르고, 설계 도면의 데이터베이스화와 검색에 사용되는 설계 인자의 결정에도 많은 제약이 따르게 된다. 따라서 사례에 대한 검색과 더불어 규칙베이스적인 접근법을 사용하여 구조물의 설치 및 작업 조건에 맞는 구조물을 설계하는 것이 요구된다.

본 연구에서는 수집된 기존 도면에 대한 고찰을 통하여 자켓 구조물을 구성하는 핵심적인 설계 요소들을 정의하였으며, 이에 대하여 객체지향성을 갖는 자료 구조를 구성하였다. 그리고 구조물 설계에 사용되는 규칙을 추출하여 구성된 자료와 연결시켰는데, 추출된 설계 규칙들의 불확실성을 고려하여 각 규칙에 대한 핵심적인 설계 인자(design factor)에 대하여 변수 처리를 하였으며, 이를 별도의 데이터베이스로 구축하여 설계 규칙의 수정이 제한적으로나마 가능하도록 하였다. 이러한 설계 인자 데이터베이스 외에 범퍼나 파이프 등에 대한 데이터베이스화를 통하여 제티 설계에 사용되는 설

계 설계값들의 이용이 용이하도록 하였다. 본 논문에서는 이러한 일련의 연구를 통하여 얻어진 방법론을 보이고, 개발된 시스템을 이용하여 얻어진 결과와 기존의 설계 예를 비교하여 개발된 시스템의 성능을 평가한 후에 설계 규칙에 포함된 설계 인자값의 변화를 통한 재설계를 수행함으로써 보다 실제적인 결과를 얻을 수 있음을 보였다.

2. 제티 구조물의 형상 특징과 객체 네트워크의 구성

제티 구조물은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 주도크부와 교량부의 두 부분으로 나눌 수 있다. Fig. 1(a)에 나타낸 주도크 제티는 8개의 주도크 자켓이 상판으로 연결되어 있으며, Fig. 1(b)의 교량 제티는 7개의 자켓이 상판을 지지하고 있다. 주도크 제티는 석탄이나 석유를 운송하는 선박과 직접 접촉하므로 충돌 하중을 완화시키기 위한 펜더(fender)와 화물을 하역하기 위한 크레인(crane)이 설치된다. 교량 제티부에는 하역된 화물의 이송을 위한 컨베이어가 상판 측면부에 설치되며, 중심부에는 트럭 등의 개별 운송 도구를 위한 도로가 설치된다. Fig. 2에는 주도크 자켓의 상세 형상을 나타내었는데, 그림에서와 같이 자켓은 수평 보강재(brace)에 의하여 몇 개의 층으로 나뉘며, 각 층의 전후면과 측면, 상하면에는 보강재가 설치된다. 이 때 수평 보강재에 의하여 나누어지는 층을 자켓 층이라 정의하였는데, Fig. 2에 나타낸 주도크 자켓의 경우에는 2개의 자켓층을 가지고 있다.

본 연구에서는 이상과 같은 특징을 갖는 제티 구

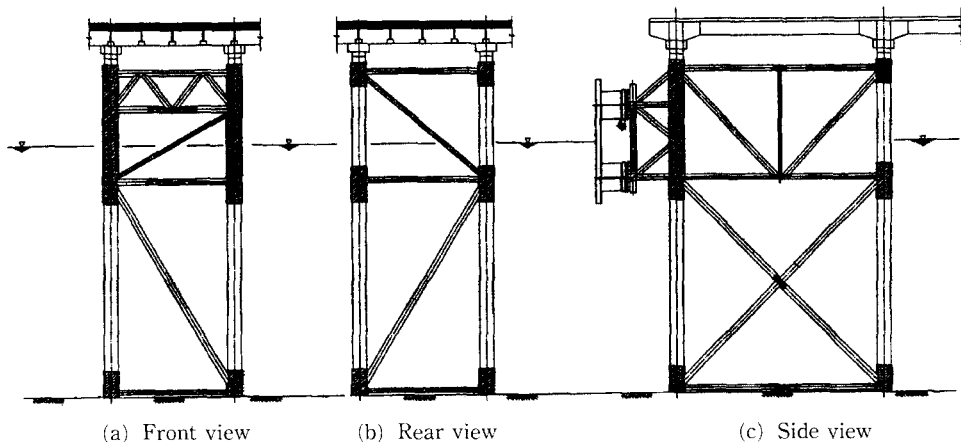


Fig. 2 An example of maindock jacket structure.

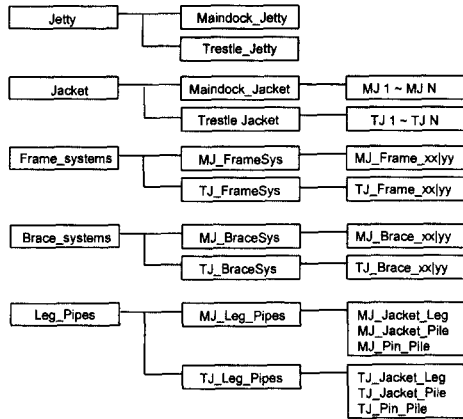


Fig. 3 Data structure for jetty design.

조물의 형상을 효율적으로 표현하기 위하여 객체지향성(object orientation)을 갖는 자료 구조를 구성하였다. 구성된 자료 구조 중에서 제티의 형상 표현을 위한 클래스(class)와 객체(object)의 구성도를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서의 같이 제티와 자켓들의 형상을 표현하기 위하여 Jetty와 Jacket, Frame_Systems, Brace_Systems, Leg_Pipes 5개의 클래스를 구성하였다. Jetty 클래스는 전체 제티 구조물의 길이와 넓이, 높이, 그리고 제티를 구성하는 자켓 구조물의 개수, 자켓 사이의 거리를 속성(property)으로 가지고 있는데, 주도크 제티와 교량 제티의 형상을 표현하기 위하여 속성을 계승받는 Maidock_Jetty와 Trestle_Jetty라는 2개의 객체를 가지게 된다. Jacket 클래스는 제티를 구성하는 자켓들에 대한 형상을 표현하게 되는데, 주도크 제티를 구성하는 자켓과 교량 제티를 구성하는 자켓으로 분류되므로 Maidock_Jacket와 Trestle_Jacket이라는 2개의 하위 클래스(subclass)를 가지며, 각각의 하위 클래스는 설계된 자켓의 개수만큼의 동적 객체(dynamic object)를 생성시키게 된다. 동적 객체란 프로그램의 실행 중에 생성되어 프로그램의 수행이 종료되면 소멸되는 객체를 의미하는데, 자켓의 경우에 주어진 조건에 따라 개수에 변화가 생기므로 동적 객체를 사용함으로써 개수의 변화에 대응할 수 있다는 장점이 있다.

Jacket 클래스는 자켓의 높이와 넓이, 자켓층의 개수를 속성으로 가지고 있으며, 이러한 속성들은 하위 클래스와 객체에 계승된다. 각 자켓층에 대한 높이와 보강재 구조는 Frame_Systems 클래스로 표현되는데 주도크부와 교량부에 따라 MJ_Frame-

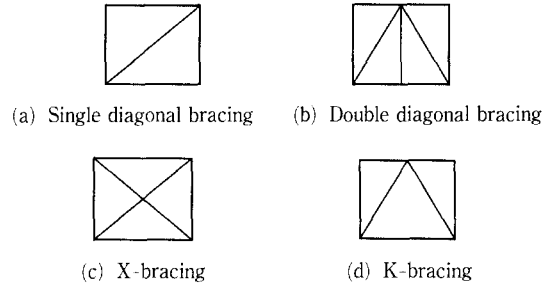


Fig. 4 Bracing types of jetty structure used in developed system.

Sys와 TJ_FrameSys라는 두 개의 하위 클래스를 가지며, 각각의 하위 클래스는 MJ_Frame_xx|yy와 TJ_Frame_xx|yy라는 동적 객체를 생성시킨다. 여기에는 xx|yy는 자켓의 번호와 자켓층의 번호를 의미하는 숫자로서, 예를 들어, 3번째 주도크 자켓의 2번째 자켓층에 대한 정보는 MJ_Frame_302라는 동적 객체에 저장된다. Frame_Systems는 자켓층의 높이와 자켓층 전후면과 측면, 상하 면의 보강재 형태를 속성으로 갖는다. 자켓 구조물에서 보강재의 형태는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 단일 대각형(single diagonal bracing)과 이중 대각형(double diagonal bracing), X형(X bracing), K형(K-bracing)으로 나뉜다. 설계된 보강재의 치수는 Brace_Systems 클래스에 저장되는데 Frame_Systems 클래스와 마찬가지로 하위 클래스 2개와 동적 객체로 구성된다. Leg_Pipes 클래스는 설계된 주도크 자켓과 교량 자켓의 다리 치수가 저장되므로 MJ_Leg_Pipes와 TJ_Leg_Pipes 2개의 하위 클래스를 갖는다. 이 때, 각각의 하위 클래스는 자켓의 다리를 구성하는 3개의 파이프, 즉 Jacket_Leg와 Jacket_Pile, Pin_Pile 3개의 객체를 가지며, 외경과 벽두께를 속성으로 갖는다. 이상과 같은 제티의 형상 표현을 위한 클래스 외에도 사용선박과 크레인, 작용 하중, 환경 조건 등에 대한 클래스와 객체가 구성되었다.

3. 제티 구조물의 설계 규칙과 규칙베이스의 구축

제티 구조물은 해양 구조물의 일종으로 본 연구에서는 개발된 시스템을 기반으로 향후에 설계 대상을 자켓 구조물로 용이하게 확장시킬 수 있도록 해양 구조물의 특징을 기반으로 규칙베이스를 구축

하였다. 지상에 설치되는 일반적인 구조물들과는 달리 해양 구조물에서는 파도나 조류 등의 환경 조건과 선박 및 크레인 등의 작업조건이 중요하게 취급되기 때문에 이들에 대한 자료 구조가 작성되었으며, 일반적인 구조물의 설계에 사용되는 규칙들과 더불어 규칙베이스화되었다. 또한 제티 구조물의 기초 설계는 구조물의 전체 구조를 설계하는 부분과 전체 구조물을 구성하는 개별 구조물의 설계로 나뉘므로 설계 규칙은 (1) 전체 제티 구조물 설계부와 (2) 개별 자켓 설계부로 나뉜다. 또한 제티 구조물은 주도크부와 교량부로 구성되어 있으므로 규칙베이스는 이 두 가지 부분으로 나누어 관리되며, 추론 후의 결과가 자동적으로 통합되어 설계 결과를 이루게 된다. 이 때에 제티의 길이나 넓이 등과 같은 설계 요소 결정에 대한 주도크부와 교량부의 설계 규칙은 서로 유사한 점이 많기 때문에 설계 규칙을 공통적으로 사용할 수 있는 경우가 존재하는데, 이러한 경우에 대해서는 공통 규칙을 사용하여 전체적인 설계 규칙의 개수를 줄일 수 있도록 하였다.

본 연구에서 사용된 규칙들은 기존의 설계 도면의 일반화를 통하여 수집되었다. 그러나 이러한 일반화 과정에서 수집된 일반 규칙과 상충되는 설계 예가 존재하고 있음을 알 수 있었다. 이러한 경우에 설계 담당자와의 면담을 통하여 설계 규칙을 수정하였으며, 상충이 일어날 수 있는 경우에 대해서는 Smart Element 상에서 규칙에 대한 우선권(priority)을 지정하여 상충이 발생하였을 경우에는 보다 높은 우선권을 갖는 설계 규칙만이 적용되도록 하였다. 이러한 상충 해소(conflict resolution)를 통하여 규칙 상충의 가능성을 상당히 줄일 수 있었으나, 규칙 수집에 사용된 도면들은 대부분 설치 해역의 수심이 15~30 m, 최대 사용 선박의 길이가 150~300 m인 경우에 대한 것으로서 이 범위를 벗어나는 경우에 대해서는 규칙의 상충이 발생할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 개발된 시스템에서는 규칙 상충에 의하여 요구되는 설계 사양의 결정이 불가능할 경우에 사용자가 개입하여 설계 사양을 직접 입력하도록 하였다. 그러나 설계를 완전히 벗어난 경우에 대해서는 사용자가 시스템에 개입할 여지가 없게 되며, 이러한 경우에 대해서는 규칙베이스를 보완하여야만 한다.

3.1 전체 제티 구조물의 설계

전체 제티 구조물 설계에서 결정되는 설계 인자는 (1) 주도크 및 교량 제티의 길이와 (2) 각 제티에 설치될 자켓의 개수, (3) 자켓 사이의 거리, (3) 각 자켓의 높이와 (4) 넓이이다. 주도크 제티는 선박의 충돌에 의한 충격을 완화시키고 화물을 하역하는 역할을 하므로 길이는 사용 선박의 크기로 결정되며, 제티에 설치되는 자켓 구조물의 개수는 주도크 제티의 길이에 따라 결정된다. 또한 주도크 자켓의 높이는 선박의 정박 수심과 조수간만에 의한 수심의 상승량에 따라 결정되며, 주도크 자켓의 넓이는 최대 하역 물량에 따라 결정되는 크레인의 바퀴 간격에 의하여 결정된다. 이때 사용 선박의 사양이나 크레인의 크기 등의 작업 조건과 설치 지역의 수심 및 조수간만과 같은 환경 조건은 사용자의 입력을 통하여 제시되며, 설계 시에 요구되는 각종 정보는 데이터베이스나 추론을 통하여 얻어진다.

예를 들어, 주도크 자켓의 길이를 구하기 위한 규칙을 Fig. 5에 나타내었는데, 주어진 설계 규칙은 사용자에게 의해 입력된 사용 선박들의 사양을 비교하여 최대 용량의 선박이 결정된 후에 적용된다. 또한, 주도크 자켓의 길이는 사용된 선박들 중에서 가장 용량이 큰 선박을 기준으로 결정되는데, 본 연구에서 사용된 선박의 유형은 석탄 운반선(coal carrier)과 유조선(oil tanker)으로 나뉘며, 최대 용량의 선박 유형이 석탄 운반선인 경우에는 나타낸 설계 규칙과 같이 선박의 직선부 길이에 일정량만큼의 길이를 더하여 자켓의 길이를 결정한다. 현재 석탄 운반선의 경우에 선박의 직선부 길이에 더해지는 길이는 5.0 m로 선정되어 있으며, 이러한 설계 변수는 설계 인자 데이터베이스에 저장되어 있다. 이러한 설계 규칙은 축적되어 있는 기존의 설계 도면의 일반화를 통하여 얻어졌으며, 설계자와의 면담을 통하여 검증되었다.

```
(@RULE= R_5
(@LHS=
(Yes (Make_Max_Ship_Data))
(Is (max_ship.type) ("coal_carrier"))
)
(@HYPO= Max_Ship_Straight_Length_for_Coal_Carrier)
(@RHS=
(Assign (max_ship.length*(1-max_ship.curved_part_ratio))+weight.MJ_ExtraL
(Maindock_Jetty.total_length))
)
)
```

Fig. 5 Rule for determining total length of maindock jetty.

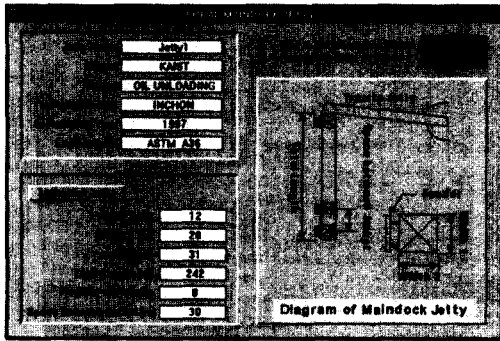


Fig. 6 An example of designed results of global maindock jetty.

Fig. 6에는 개발 시스템의 주도크 제티의 결과 윈도우를 나타내었다. 입력된 선박 사양 중에서 최대 용량을 갖는 선박의 길이는 270 m이었고, 곡선부의 비율은 12 %였는데, Fig. 5에 나타난 설계 규칙에 의하여 제티의 길이는 242 m가 됨을 알 수 있었다. 이때 사용되는 선박의 특성에 따라 화물의 하역을 고려하지 않고 단지 정박 시의 하중을 완화시키는 목적으로 구조물을 설계한다면 주도크 제티에 여유 길이를 별도로 지정하지 않을 수도 있는데, 이 경우에 설계 인자 데이터베이스에 저장되어 있는 제티 여유 길이를 5에서 0으로 수정한다면 제티의 길이는 237 m가 될 것이다. 이상과 같이 본 연구에서는 개발된 시스템의 작동 시에 설계 규칙에 소극적인 수정을 가하여 설계의 결과를 변화시킬 수 있다.

교량 제티는 주도크 제티에서 하역된 화물의 운송로 역할을 하며, 화물의 운송은 컨베이어와 트럭 등에 의해 이루어진다. 따라서 교량 제티의 길이는 육지에서 정박 지점까지의 거리가 되며, 이에 따라 자켓의 개수와 자켓 사이의 거리가 결정된다. 교량 제티의 경우에는 주도크 제티와는 달리 자켓의 높이가 육지에 가까워질수록 감소하며, 폭은 화물 운송량에 따른 컨베이어의 폭과 도로의 차선 수에 따라 결정된다. 이러한 교량부 설계 규칙은 전술한 주도크부의 경우와 같이 규칙베이스화되어 전체 구조물의 설계에 사용되며, 설계된 전체 구조물의 치수는 개별 자켓의 설계에 이용된다.

3.2 주도크 및 교량 자켓 설계

개별 자켓 형상의 설계에서는 (1) 자켓층의 개수와 (2) 각 자켓층의 높이 및 (3) 보강재의 배치 형

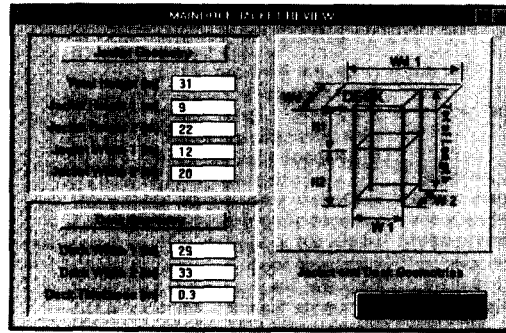


Fig. 7 An example of designed results of maindock jacket.

태, 그리고 (4) 다리의 치수 및 (5) 보강재의 치수가 결정된다. 자켓층이란 수평 보강재로 분리되는 자켓의 구성 단위를 말하며, 자켓의 넓이와 높이의 비로써 결정되는데 전체 제티 구조물의 설계부에서 자켓의 넓이와 높이가 이미 경험적으로 어느 정도의 안정성을 갖도록 설계되기 때문에 자켓의 층수는 2나 3으로 결정된다. 주도크 자켓에서는 웬더가 설치되는 상단 자켓층의 중심이 평균 수면에 오도록 하여 선박의 충돌에 의한 하중을 각 자켓층에 고루 분산시킬 수 있도록 자켓층의 높이를 결정하며, 교량 자켓의 경우에는 최상단의 자켓층이 항상 수면 위에 위치하도록 자켓층의 높이가 결정된다. 개발된 시스템에서 설계된 주도크 자켓의 예를 Fig. 7에 나타내었는데, 그림에서와 같이 각 자켓층의 높이와 넓이, 그리고 상판의 치수가 설계되었음을 알 수 있다.

다리 및 보강재 치수의 결정을 위해서는 자켓에 작용하는 하중에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 사하중(dead loads)과 활하중(live loads), 정박 하중, 그리고 환경 하중이 자켓에 작용하는 하중으로서 고려되었다. 사하중은 콘크리트와 철재빔으로 이루어진 상판의 자중과 크레인에 의한 적하중으로 구성되며, 활하중은 트럭이나 컨베이어 등의 운송 수단에 의해 발생하는 하중을 의미한다. 또한, 정박 하중은 선박의 충돌에 인한 하중을 의미하며, 이때 자켓으로 전달되는 반력은 웬더의 사양에 따라 결정된다. Table 1에는 웬더 사양의 예를 나타내었는데, 선박의 충돌 에너지가 계산되면 데이터베이스에 저장되어 있는 웬더 중에서 충돌 에너지를 흡수할 수 있는 것이 검색되며, 웬더 사양에 따라 자켓에 전달되는 반력이 결정된다. 환경

Table 1 Example of fender specifications from SEIBU polymer chemical Co.

Berthing angle	0°		10°
Temperature (°C)	20	-18.4	20
Energy absorption (tons-m)	371.7	330.0	295.9
Reaction force (tons)	531.9	559.1	458.7
Deflection (%)	57.5	45.0	57.5

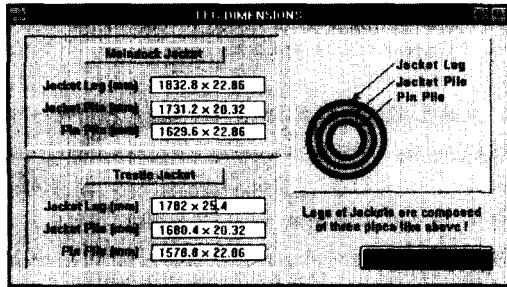


Fig. 8 An example of designed results of leg pipe dimensions.

하중은 파도와 바람, 조류에 의하여 발생하는 하중을 의미하는데, 파력(wave force)은 Airy 파동 이론(wave theory)을 이용하여 계산하였고, 바람과 조류에 의해 발생하는 하중은 유체의 항력(drag force)으로 가정하였다.⁽¹²⁾ 본 연구에서는 이상과 같은 4가지의 하중만이 제티에 작용한다고 가정하였는데, 사하중과 활하중은 다리의 축방향 하중으로 작용되고 정박 하중과 환경 하중은 다리의 수직 방향으로 작용한다. 제티구조물에서 자켓의 다리는 Fig. 8의 설계 예에서와 같이 다리 파일(leg pile)과 핀 파일(pin pile), 그리고 파일들을 보호하기 위한 자켓 다리(jacket leg)로 구성되는데, 각 파일들은 그라우트(grout) 처리되어 동일한 거동을 보이게 된다. 본 연구에서는 보다 보수적인 설계를 위하여 자켓에 작용되는 하중은 모두 다리에서 지탱된다고 가정하였으며, 다리의 치수 결정을 위하여 항복 조건식과 국부 좌굴 조건(local buckling condition), 컬럼 좌굴 조건(column buckling condition)을 사용하였다.⁽¹³⁾

항복 조건 :

$$\sigma_r > \frac{P}{A} + \frac{QL}{I} \frac{D}{2} \quad (1)$$

```
@RULE= R_37
@LHS=
(>= (Weight.Loading_Condition_SF*Leg_Material.Yield_S)
(Force.Vert(<Pipes>.Area)*Force.Horiz*MJ_1.height*
(<Pipes>.Outer_Diameter)/(2*<Pipes>.Moment)))
(> (<Pipes>.Outer_Diameter/<Pipes>.Wall_Thickness)
(Weight.LcBkling_Lower))
(< (<Pipes>.Outer_Diameter/<Pipes>.Wall_Thickness)
(Weight.LcBkling_Upper))
(< (Force.Vert/<Pipes>.Area)
(pi*pi*Leg_Material.Young_M/((MJ_1.height/(1.0*<Pipes>.R_Gyration))
*(MJ_1.height/(1.0*<Pipes>.R_Gyration))))
(CreateObject (MJ_Leg_Dim%)) (IDetermined_Leg_Pipes))
(Assign (MIN(<Possible_Leg_Pipes>.Area)) (MJ_Leg_Dim%.Area))
)
@HYPO= Determine_MJ_Jacket_Leg_Dim
@RHS=
(Assign (<Possible_Leg_Pipes>.Outer_Diameter)
(MJ_Leg_Dim%.Outer_Diameter))
(Assign (<Possible_Leg_Pipes>.Wall_Thickness)
(MJ_Leg_Dim%.Wall_Thickness))
)
```

Fig. 9 Rule for determining dimension of jacket leg.

식 (1)에서 σ_r 는 소재의 항복 응력이며, A 와 I 는 각각 파이프의 단면적과 관성 모멘트를 나타내고, P 는 축 방향 하중, Q 는 수직 방향 하중을 의미한다. 또한 L 은 자켓의 높이이고, D 는 파이프의 외경인데, 식 (1) 우변의 첫 번째 항은 축 방향 하중에 의한 응력식이고 두 번째 항은 축과 수직 방향의 하중에 따른 굽힘 응력식이다.

국부 좌굴 조건 :

$$30 \leq \frac{D}{t} \leq 90 \quad (2)$$

식 (2)에서 D 와 t 는 각각 파이프의 외경과 두께이다.

컬럼 좌굴 조건 :

$$\sigma_e = \frac{\pi^2 E}{(KL/r)^2} > \frac{P}{A} \quad (3)$$

식 (3)에서 σ_e 는 다리의 좌굴 응력이며, E 는 탄성 계수이고, L 은 자켓의 높이, r 은 파이프 단면의 회전 반경이며, K 는 유효 길이 계수인데 자켓의 다리는 해저 면에서 고정되어 있고 상단에서는 상판에 구속되어 수평 방향으로 운동하므로 본 연구에서는 1.0으로 가정하였다.⁽¹²⁾

이상의 세 가지 조건식이 고려된 설계 규칙을 Fig. 9에 나타내었는데, 나타낸 바와 같이 데이터베이스화된 파이프 규격 중에서 주어진 세 가지의 조건을 만족하는 파이프들을 찾아낸 후에 그 중에서 최소의 단면적을 갖는 파이프의 치수를 자켓 다리의 치수로 결정한다. 단, 자켓 다리와 파일의 외

경 사이의 관계는 Fig. 10에 나타난 바와 같으며, 이에 따라 다리를 구성하는 세 가지 파이프의 치수가 결정된다. 그림에서 사각형으로 나타난 점은 설계 지침서⁽⁶⁾에 제안되어 있는 자켓 다리와 파일의 외경으로서 이를 연결하면 그림에 나타난 바와 같은 선형식의 구성이 가능하게 된다.

이상에 나타난 바와 같이 개발된 시스템은 기존의 설계 도면에 대한 일반화를 통하여 규칙을 수집하였으며, 설계 담당자의 검증이나 설계 지침서에 제시되어 있는 제한 조건의 적용을 통하여 최종적인 설계 규칙을 확정하였다. 그러나 설계 규칙의 일반화에 사용된 기존 설계 예들의 대부분은 설치해역의 수심이 15~20 m, 최대 사용 선박의 길이가 150~300 m 정도이며, 구조물 설치 목적은 화물의 하역 부두에 한하고 있다. 따라서 환경 조건이나 작업 조건이 기존 설계 예의 한계를 벗어나는 경우에 대해서는 신뢰성 있는 설계가 불가능하다. 예를 들어, 현재 사용되고 있는 규칙에서 설치가 가능한 최대 자켓층의 개수는 3인데, 만약 제티가 설치되어야 할 해역의 수심이 너무 깊을 경우에는 그 이상의 자켓층이 요구되므로 부적절한 설계가 수행될 수 있다. 또한 본 연구에서는 화물의 하역을 기본 목적으로 상정하고 있기 때문에 크레인이나 컨베이어 등의 설치가 기본적으로 수행되는데, 단순히 정박의 목적을 가지고 있는 구조물이나 방파제의 역할을 하는 구조물의 설계는 불가능하다. 따라서 수집된 설계 규칙의 범위를 초과하는 경우에 대해서는 새로운 규칙의 수집이 요구될 것이다. 그러나 본 연구에서 개발된 제티용 전문가시스템은 심해에 설치되는 자켓 구조물의 기본형으로서 보다 광범위한 설계 규칙이 수집된다면 자료 구조 및 규칙의 전체적인 구조에 대한 큰 수정없이 확장될 수

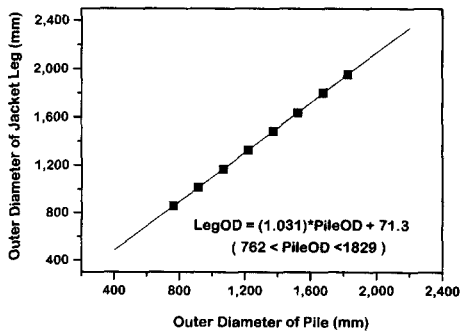


Fig. 10 Relation between outer diameters of jacket leg and pile.

있을 것이다.

4. 제티 구조물 기초 설계용 전문가시스템

본 연구의 시스템 개발에 사용된 Smart Elements는 1980년대 중반에 널리 사용되던 전문가시스템 셸 NEXPERT OBJECT에 GUI 개발 도구인 OPEN INTERFACE를 첨가시킨 것으로 객체지향성이 뛰어나다.⁽¹⁴⁾

Fig. 11에 개발된 전문가시스템의 개략적인 구조를 나타내었는데, 그림에서와 같이 설계 조건을 개발된 GUI를 통하여 입력하면 48개의 생성 규칙 (production rule)으로 구성되어 있는 규칙베이스의 추론을 통하여 제티 구조물의 설계를 수행한다. 이 때 설계 규칙들은 주요 설계 인자에 대한 변수 처리가 되어 있기 때문에 데이터베이스화 되어 있는 설계 인자를 참조하여 설계 규칙을 적용하게 된다. 35개의 설계 인자가 데이터베이스화 되어 있으며, 이 값을 수정함으로써 설계 결과를 바꿀 수 있다. 설계 시에 요구되는 웬더와 파이프의 규격, 소재의 물성치들에 대한 정보는 규칙베이스와는 독립적인 데이터베이스에 저장되어 있으며 시스템의 사용 중에 기존 정보의 삭제나 수정, 새로운 정보의 첨가가 가능하다.

시스템의 입력은 Fig. 12에서와 같이 개발된 입력 GUI를 통하여 수행된다. 입력 정보는 일반 정보와 환경 조건, 작업 조건으로 나뉘는데, 일반 정보는 설계 대상물의 이름이나 위치, 용도 등을 의미하며, 환경 조건은 Fig. 12에 나타난 바와 같이 설치 해역의 수심이나 파고와 같은 자연 조건을 의미한다. 또한 작업 조건은 하역량에 따른 크레인의 사양이나 화물 이송에 따른 활하중 등을 의미한다. 이상과 같이 설계 사양의 입력이 모두 끝나면 제

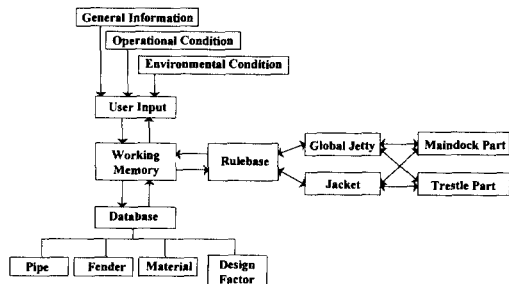


Fig. 11 Structure of the developed expert system.

티 구조물에 대한 설계가 수행되며, 설계의 수행이 완료되면 설계 결과부에서 전체 구조물 및 자켓 구조물, 다리 치수와 계산된 작용하중을 확인할 수 있다.

5. 결과 및 고찰

개발된 시스템의 성능을 평가하기 위하여 기존에 설계된 제티 구조물의 조건과 동일한 입력을 주어 설계를 수행한 후에 결과를 기존 설계 도면과 비교하여 보았다. 비교에 사용된 도면은 현대중공업(주)에서 1993년에 설계, 제작한 한국전력 태안 연료하역부두용 구조물이다.

설계에 필요한 입력 조건의 개요는 다음과 같다. 사용 가능한 최대 선박의 사하중은 150,000 DWT (dead weight tons)이고, 길이는 280 m, 자켓으로의 접근 속도는 0.15 m/sec이다. 주어진 해저지형

상에서 선박 계류 지점의 수심은 25 m이고, 해안까지의 거리는 320 m이다. 설치 해역의 조수간만의 차는 2.5 m이며, 설계 시에 고려되는 최대 풍속은 25 mph, 파고는 7.0 m, 파도주기는 9초이고, 조류의 속도는 파도의 진행 방향으로 151.6 cm/sec이다. 최대 일량을 수행할 수 있는 크레인의 바퀴 간격은 20 m이며, 적하시 바퀴에 작용되는 최대 하중은 각각 444, 557, 165, 183 tons이다.

기존 설계 도면의 결과와 개발된 시스템에 의한 설계 결과를 Table 2에 요약하여 나타내었다. 표의 두 가지 결과를 비교해 보면 전체 제티 구조물과 자켓 형상에 대한 개발 시스템의 설계 결과가 기존 도면의 결과와 유사함을 알 수 있었다. 그러나 다리의 치수를 비교하여 보면 개발된 시스템의 결과가 상당한 오차를 보임을 알 수 있었다. 이는 다리 치수의 결정 과정에서 보강재를 전혀 고려하지 않았기 때문인 것으로 추측되었으며, 보강 형태에 따라서 설계 인자를 적절하게 수정하여 준다면 어느 정도 실제적인 결과도 얻을 수 있으리라 예상되었다.

식 (1)에 나타난 항복 조건식의 안전계수(safety factor)로 표현되는 설계 인자를 1.0에서 1.5로 증가시켜 재설계를 수행하여 보았다. 재설계의 결과 주도크 자켓의 다리 치수는 각각 1278×17.78, 1168×22.86, 1068×12.7(mm×mm)로, 교량 자켓의 다리 치수는 각각 1198×20.32, 1098×25.4, 1258×15.24(mm×mm)로 설계되어 오차를 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 이러한 재설계를 통하여

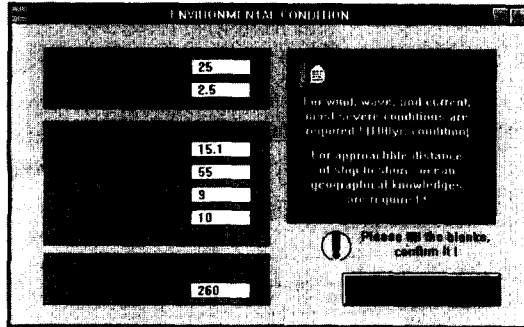


Fig. 12 Input window for environmental conditions.

Table 2 Comparison of designed results obtained from the developed system and the pre-designed drawing for Tae-An power plant.

	Res. 1 ⁺	Res. 2 ⁺⁺		Res. 1 ⁺	Res. 2 ⁺⁺
Maindock Jetty			Trestle Jetty		
Width(m×m)	12×20	12×20	Width(m×m)	10×8.5	10×8.5
Height(m)	31.0	30.5	Height(m)	31.0	30.5
Total length(m)	260	254	Total length(m)	321	321
No. of jackets	8	8	No. of jackets	8	7
Leg Dim.(mm)	1578×17.78	1322×13	Leg Dim.(mm)	1478×20.32	1016×13
	1458×22.82	1219×25		1368×25.4	914×16
	1348×15.24	965×16		1528×15.24	711×25

+ : Obtained by the developed system.
 ++ : Obtained by the pre-designed drawing.

설계 인자의 변화에 따라 설계 결과를 제어할 수 있음을 확인할 수 있었으나, 아직은 설계 인자 선정에 대한 명확한 기준이 마련되지 않은 상태로 설계 인자를 선정하는 작업 자체에 전문가적인 경험과 지식이 필요한 상태이다. 그러나 실제 기초 설계 단계에서도 기본적인 식과 이에 대한 전문가적인 적용을 통하여 설계가 수행되기 때문에 지속적인 연구를 통하여 적절한 설계 인자를 찾아낼 수 있으리라 기대된다.

6. 결 론

본 논문에서는 기존 설계 도면에 대한 고찰을 통하여 제티 구조물의 기초 설계를 위한 객체지향적 자료구조를 구성하였으며, 수집된 설계 지식의 규칙베이스화 및 데이터베이스화를 통하여 기본형의 제티 구조물 기초 설계용 전문가시스템을 개발하였다. 이러한 일련의 개발 과정을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 제티 구조물의 설계 단계 중에서 지식베이스적인 접근이 가장 용이한 설계 단계는 기초 설계 단계임을 알 수 있었으며, 이에 대한 전문가시스템의 개발이 가능함을 알 수 있었다.

(2) 웬더나 생산 파이프의 규격 등에 대한 데이터베이스화를 통하여 보다 실제적인 자료들을 설계 과정에서 효율적으로 이용할 수 있음을 알 수 있었으며, 이에 대한 운용 기능을 개발함으로써 지식 확장의 기반을 마련하였다.

(3) 개발된 시스템의 결과와 기존의 설계 결과에 대한 비교를 통하여 전체 제티 구조물 설계는 양호하게 수행되고 있지만 세부적인 자켓 설계에서는 많은 오차를 보임을 알 수 있었다. 그러나 설계 인자의 변화를 통하여 설계 결과를 제어할 수 있다는 것을 확인할 수 있었고, 이러한 접근법을 통하여 설계 지식의 축적이 가능함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Winston, P. H., 1993, *Artificial Intelligence*, Addison-Wesley, New York.
- (2) 이재규, 주석진, 오상봉, 1995, 전문가시스템의 응용과 사례분석, 법영사, 서울.
- (3) Mizoguchi, R. and Motoda, H., 1995, "Expert Systems Research in Japan," *IEEE Expert*, pp. 13~23.
- (4) Durkin, J. 1996, "Expert Systems: A View of the Field," *IEEE Expert*, pp. 56~63.
- (5) Ocean Eng. Group, 1996, *Design of Fixed Offshore Platforms: A Comprehensive Review*, Univ. Texas Austin.
- (6) Thephanatos, A. and Wickham, A. H. S. 1993, "Modelling of Environmental Loading for Adaptation of API RP 2A-Load and Resistance Factor Design to UK Offshore. Structural Design Practice," *Proc. Instn. Civ. Engrs. Wat., Marit. & Energy*, Vol. 101, pp. 195~204.
- (7) Faulkner, D., Cowling, M. J. and Frieze, P. A., 1981, *Integrity of Offshore Structures*, Applied Science Publishers, LTD., Essex, England.
- (8) 윤정방, 1985, 해저석유개발을 위한 Offshore Platform 설계기술 개발, 토목공학과, 한국과학기술원.
- (9) Kumar, B. and Topping, B. H. V., 1991, "Knowledge-based Processing for Structural Design," *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Vol. 90, pp. 421~446.
- (10) Soh, C. K. and Soh, A. K., 1989, "Coupling Interface of a Microcomputer-based Intelligent Structural Design System," *Computers and Structures*, Vol. 31, No. 6, pp. 1031~1039.
- (11) Soh, C. K. and Soh, A. K., 1994, "The use of Precedent Cases in Computer-Aided Design of Offshore Structures," *Proc. Instn. Civ. Engrs, Wat., Marit. & Energy*, Vol. 106, pp. 25~31.
- (12) Dawson, T. H., 1983, *Offshore Structural Engineering*, Prentice-Hall, New Jersey.
- (13) American Petroleum Institute RP. 2A, 1984, *API Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms*, 15th Ed.
- (14) *Smart Elements Version 2.0 User's Guide*, 1993, Neuron Data, Inc.