

철근콘크리트 구조물의 유지관리를 위한 전문가시스템 개발

Development of Expert System for Maintenance of Reinforced Concrete Structures

심 종 성* 배 인 환**
Sim. Jong Sung Bae, In Hoan

요 약

콘크리트 구조물에 발생하는 열화로 인한 진단과 보수, 보강에 이르는 유지관리 기술은 아직 체계화되어 있지 않은 실정이다. 본 연구에서는 구조물의 유지관리 기술과 관련된 국내, 외 자료 및 그 분야 전문가의 지식과 경험을 수집하여, 이를 바탕으로 전문가적인 판단이나 추천기능을 수행할 수 있는 철근콘크리트 구조물의 유지관리를 위한 전문가시스템을 개발하였다. 개발된 전문가시스템을 이용하여 얻은 결과는 보수사례와 비교해 봄으로써 신뢰성을 검증하였는데, 그 결과는 비교적 만족스러웠다.

Abstract

The maintenance techniques of reinforced concrete structures, which include diagnosis, repair and rehabilitation, are not systematically established. This study develops an expert system for maintenance of reinforced concrete structures based on the related documents and knowledge and experience of experts who work in these field. The analytical results using the developed expert system were compared to the real repair cases in field and they were generally satisfactory.

1. 서론

철근콘크리트 구조물은 시공이 간편하고 그 수명이 반 영구적이므로 건설분야에서 상당한 비중을 차지하고 있으나 시공전, 후에 발생하는 내, 외적 요인으로 인한 열화현상, 즉 균열, 박리 및 표면붕괴 등이 발생하여 보수, 보강해야 하는 사례가 늘고 있다. 이들 열화원인은 크게 11가지로 분류될 수 있으나 일반적으로 콘크리트에

발생하는 결함은 두 가지 이상의 복합요인에 의해 발생하므로 열화원인을 찾아내는 작업은 용이하지 않다. 또한 진단 및 보수, 보강은 진단의 주체자에 의해 그 방법이 각각 다르게 제시되고 있어 콘크리트 구조물의 내구성에 관한 진단방법 및 보수, 보강방법 선정 등에 관한 연구가 시급한 실정이다[8,9].

한편, 컴퓨터 이용기술의 급속한 발달을 배경으로 최근에는 인공지능을 이용하는 기법을 적용하려는 시도가 각 분야에서 이루어지고 있으며[2,3,4,10] 건설분야에서도 이미 재료선정문제, 구조해석문제, 구조시스템 설계 및

* 정회원, 한양대학교 토목공학과, 조교수
** 한양대학교 대학원 토목공학과, 석사과정

토목구조물의 예비설계 등의 분야에 적용되고 있다[4, 10]. 따라서 본 연구에서는 구조물의 유지관리기술을 정립하기 위해 국내, 외 관련자료를 수집하고, 구조물의 진단 분야 전문가의 경험을 면담을 통해 정리하여, 이를 바탕으로 전문가적인 판단이나 추론기능을 수행할 수 있는 철근콘크리트 구조물의 유지관리를 위한 전문가시스템을 개발하였다. 철근콘크리트 구조물의 유지관리를 위한 전문가시스템 개발은 먼저 철근콘크리트 구조물에 발생하는 열화현상에 의한 열화원인과 진단 방법 그리고 그에 따른 보수, 보강방법을 체계화시키는 작업이 선행되어야 하며, 이 자료를 전문가시스템 구축도구를 이용하여 완성된다.

본 연구에서는 열화된 철근콘크리트 구조물을 진단하는 과정에서 일반적으로 행하여지는 1차 조사(육안에 의한 조사) 및 2차 조사(물리적 또는 화학적 조사) 과정에서 도출되는 각종 data를 이용하여 열화원인을 분석하고, 열화현상의 정도에 따라 적절한 보수, 보강방법을 제시하는 전문가시스템을 개발하였으며 개발된 전문가시스템은 실제현장에서 적용되었던 보수, 보강사례와 비교함으로써 그의 신뢰성을 검증하였다. 또한 본 시스템에서 입, 출력되는 모든 자료는 한글을 사용함으로써, 실무에서 종사하는 비전문가라도 요구되는 입력자료를 개발된 전문가시스템에 입력하여 전문가적인 판단을 얻을 수 있도록 개발되었다.

2. 전문가시스템 개발

철근콘크리트 구조물에 발생하는 열화현상들은 많은 요인에 의해 발생되고 따라서 보수공법은 열화현상 및 열화원인에 따라 다르게 선정되어야 한다. 현재 실시되고 있는 철근콘크리트 구조물의 보수공법은 진단주체자에 의해 다르게 나타나므로 철근콘크리트 구조물의 유지관리를 위한 전문가시스템을 개발하기 위해서는 국내, 외 관련 문헌과 전문회사의 제품사양서 및 전문가의 경험에 의존하는 전문지식 등을 종합적으로 수집하여 체계화함으로써 모든 영향인자가 합리적으로 고려된 지식 베이스 구축이 필수적이다[1,2]. 본 시스템을 개발하는 과정에서는 기존의 유지관리관련 문헌과 면담을 통하여 획득된 그 분야 전문가의 전문지식 및 경험 등이 이용되었다. Fig 1은 본 연구에서 진행된 전문가시스템(E/S) 개발과정을 개략적으로 나타낸 것이다[10].

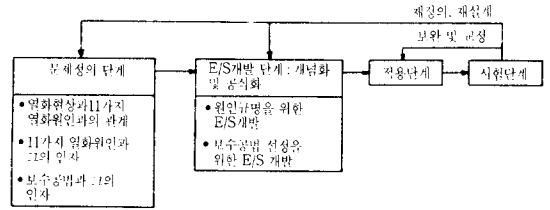


Fig 1. Development Process of Expert System

2.1 전문가시스템 구축 도구 선정

현재 시중에서 구할 수 있는 전문가시스템 shell은 Table 1과 같다[3,10]. 본 연구에서는 GURU를 사용하고 있다. 정적지식의 표현방식인 A-V(Attribute-Value) pairs를 사용하고 있는 GURU는 C언어로 개발된 도구로서 기본적인 구조는 기억공간, 규칙 그리고 추론기관(전진추론과 후진추론)으로 구성된다. 기억공간은 단순한 심볼리스트로 표현된 알려진 사실이 보관되며, 규칙은 이러한 사실에 따라 조건이 합당하면 적용할 수 있도록 If-Then Rule로서 표현된다. 추론기관은 현재의 사실과 규칙을 바탕으로 하여 적용가능한 규칙을 고르고, 선택된 규칙을 적용시키는데, 본 연구에서는 후진추론전략을 이용하고 있다. 또한 외부 프로그램이나 C language library 함수를 이용할 수 있고 이를 C program내에서 부터 GURU의 data table과 dBase II & III에 연결하여 사용할 수 있고 fuzzy 변수와 표현이 완벽하게 지원되므로 uncertainty

Table 1. Expert System Shells

Name	Knowledge representation, inference, and control	Implementation
EMYCIN (MYCIN)	O-A-V triplets if-then rules backward chaining certainty factors	INTERLISP DEC PDP-10
EXPERT (CASNET)	A-V pairs if-then rules forward chaining confidence factors	fortran various computer
KAS (PRO-SPECTOR)	O-A-V triplets if-then rules forward and backward chaining certainty factors	INTERLISP Xerox 1100
GURU	A-V pairs if-then rules forward and backward chaining certainty factors	C IBM PC DEC VAX-11 MicroVax II VaxMate System

를 처리할 수 있다. 또한 본 시스템에서 입, 출력되는 모든 자료는 ram 상주 프로그램인 "DKBY" file을 사용하여 한글화하였다.

2.2 문제정의

전문가시스템의 규칙모임(rule sets)을 만들기 전에 문제를 구성하는 인자를 먼저 정의해야 한다. 본 연구에서는 크게 열화원인규명과 보수공법선정문제로 나누어 각각 필요한 인자를 정의하였다.

지금까지 알려진 콘크리트구조물에서의 열화원인은 Table 2에 나타난 바와 같이 11가지 원인으로 분류되며, 열화현상은 균열, 박리 및 표면봉괴의 형태로 나타나고 있다. 이들의 상호 관계는 Table 2와 같다[5,7,8].

본 연구에서 정의한 11가지 열화원인을 규명하기 위한 주요 인자는 구조물의 진단과정에서 일반적으로 행하여지

는 1차 및 2차 조사 항목에 근거를 두어 다음과 같이 결정하였다.

시공시 발생사고에 대한 주요인자는 초기 균열의 발생, 부등침하의 발생여부 등이며 긴조수축은 단위 수량(단위시멘트량)의 크기에 관련되고, 온도변화와 관련된 인자는 온도의 변화폭(massive 구조물)이다. 수분흡수에 대한 주요인자는 부풀림의 발생여부이며, 철근부식은 주로 해양구조물에서 발생되며, 이는 철근의 전위값을 조사한 결과로서 관찰할 수 있고, 화학작용에 대해서는 pH 값, 1% 레놀프탈레인 용액 시험 후 변색여부, 실리카 겐의 생성여부, 산의 침해여부 등이다. 동결융해는 내구성 저수로서 판단될 수 있으며, 충격과에 대해서는 사고발생 여부에 의하여 결정하였고 마모는 수리구조물에서 발생하는 것으로 가정하였다. 요각부의 상세설계, 갑작스런 단면의 변화, 부적당한 배수, 불충분한 절연감각 등에 대한 문제는 설계세목의 불이행으로 취급되었으며, 구조계산의 잘못 등은 설계상의 오류로서 취급되었다. 이상을 요약하면 Table 3과 같다[5,6].

열화현상과 원인에 따라 보수공법을 선정하기 위한 입력변수(인자)는 균열 폭, 철근의 노출정도, 열화의 원인이 물리적인가 또는 화학적인가에 대한 판정, 박리된 물타르나 케이스트의 두께 등이다. Table 4는 보수공법과 그의 인자와의 관계를 나타낸 것이다.

이상과 같은 관계를 전문가시스템에 적용하기 위하여 열화원인과 그의 인자, 보수공법과 그의 인자와의 상호관계를 도식화(tree 구조화)하면 Fig 2 및 3과 같다[10].

Table 2. Relationship between the 11 Causes and Deterioration

NO.	기 분 원 인	열 화 원 상		
		균열	박리	표면봉괴
1	시 공 시 발 생 사 고	×		
2	긴 조 수 축	×		
3	온 도 변 화	×	×	
4	수 분 흡 수	×		
5	철 근 부 식	×	×	
6	화 학 작 용	×	×	×
7	동 결 융 해		×	×
8	충 격 과	×	×	
9	마 모			×
10	불 량 한 설 계 세 목	×	×	
11	설 계 상 잘 못	×	×	

× : 관련료

2.3 개념화(conceptualization) 및 공식화(formalization)

개념화 및 공식화의 과정에서는 문제에 대한 개념과

Table 3. The 11 Causes of Deterioration and Their Parameters

NO.	열 화 원 인	인 사 (입력변수)
1	시 공 시 발 생 사 고	initial crack, settlements
2	긴 조 수 축	high unit water
3	온 도 변 화	temperature change width, massive structures
4	수 분 흡 수	swelling prevention
5	철 근 부 식	marine exposure, rebar voltage
6	화 학 작 용	ph, color changes, silica gel, acid atmosphere
7	동 결 융 해	durability
8	충 격 과	accidents
9	마 모	hydroic structures
10	불 량 한 설 계 세 목	reentrant corners, abrupt changes, inadequate drainage, inadequate rebar detail
11	설 계 상 잘 못	miscaulation

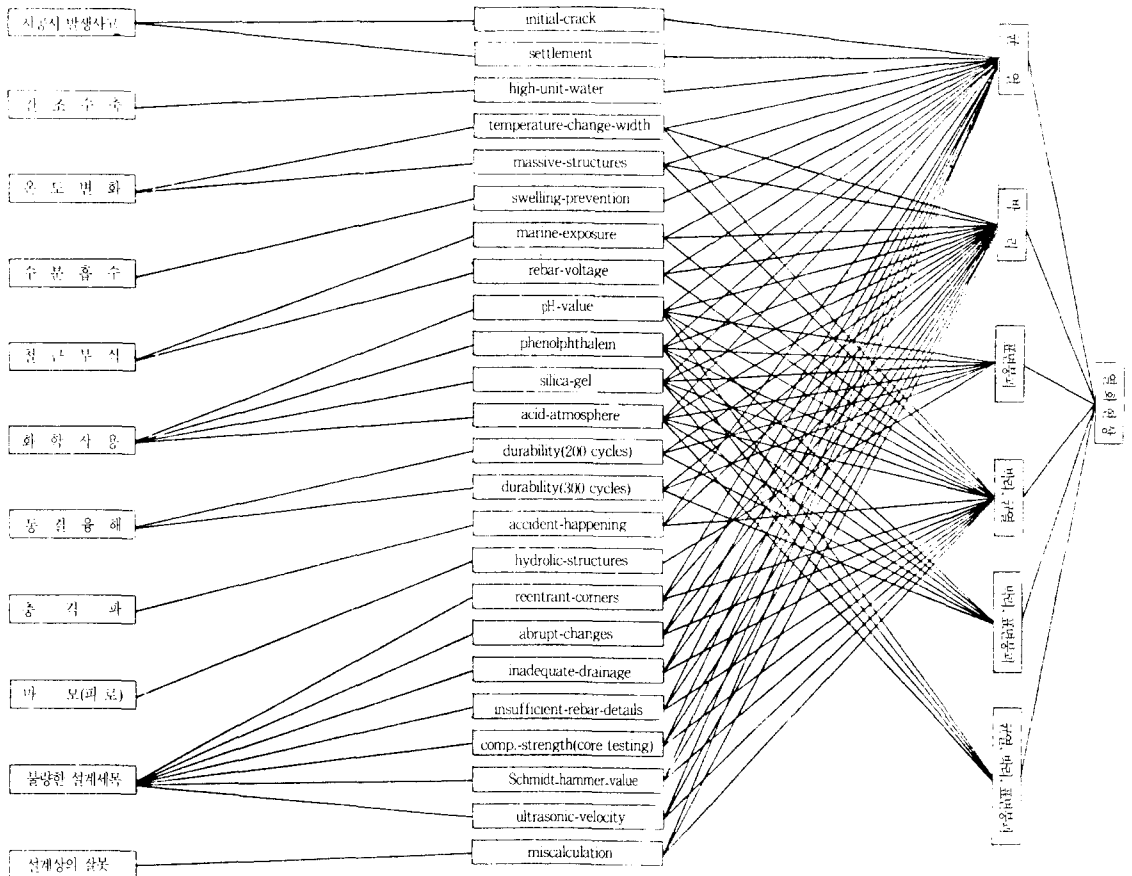


Fig 2. Tree-type Strategy for Finding The Causes of Deterioration.

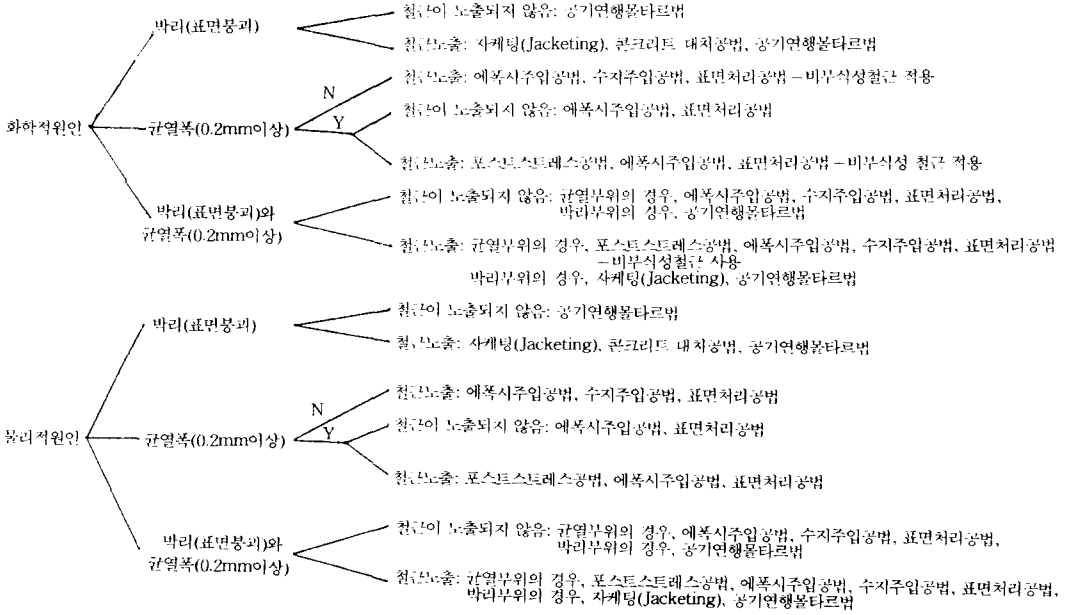


Fig 3. Tree-type Strategy for Recommendation of Repair Method

Table 4. The Repair Methods and Their Parameters

열화현상	보수공법	인자 (입력변수)
• 균열	<ul style="list-style-type: none"> • 표면처리공법(blanket method on the whole surface) • 에폭시주입공법(epoxy injection method) • 충전공법(routing and sealing method) • 포스트스트레스에 의한 공법(stitching and external stressing method) 	<ul style="list-style-type: none"> • crack width • rebar exposure • physical type • chemical type
• 박리 및 표면붕괴	<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트대치공법(replacement of concrete) • 프리캐스트공법(prepacked concrete method) • jacketing 공법 • 공기인행몰타르법(pneumatically applied mortar method) 	<ul style="list-style-type: none"> • spalled mortar or paste thickness

필요한 제어기능이 어떤 것인지를 결정한다. 즉, 전문가시스템이 문제를 해결하는 과정에서의 문제풀이 전략(problem solving strategy)이 문제의 특성에 맞게 선정되어야 하는데 본 연구에서는 후진추론(backward chaining) 기법을 사용하였다.

Active한 지식의 모든 표현은 If(premise)–Then (conclusion)구조에 기초하여 수행되는 rule based system으로서 일련의 규칙의 모임(rule set)을 사용하였다. 이러한 규칙의 모임은 한정된 분야의 문제를 어떻게 해결하는지에 대한 전문추론지식(expert reasoning knowledge)으로 구성되며 GURU의 build command나 text 문에서 만들어진다. 이들 규칙의 모임은 추론기관(inference engine)에 의해 탐색된다. 예를들어, 열화의 원인(cause)을 찾는 rule R29을 보면 다음과 같다.

```
If : crack and
    pH<7.0 or
    not red or /*1% 페놀프탈레인 용액 시험*/
    silica gel >=30
```

Then : causes="화학작용"

Reason : 만일 열화현상이 균열이고 pH값이 7.0 이하이거나 1% 페놀프탈레인 용액 시험결과 붉은색으로 변색되지 않았거나 실리카겔의 지수가 30이상이면, 열화의 원인은 화학작용이다.

위의 rule의 설명은 다음과 같다. 열화현상이 균열이고, pH 값이 7.0 이하이거나 1% 페놀프탈레인 용액 시험결과가 붉은색으로 변하지 않거나, 실리카겔의 지수가 30이상이면, 열화의 원인은 화학작용이다. Rule상에서 reason은 전문가시스템을 사용하는 동안에 어떻게 해서 그 결론(conclusion)에 도달하게 되었는지를 필요한 경우 사용자에게 제공한다.

이상과 같은 결론을 얻기위해 몇가지 초기조건이 필요

하고, 상기에에서 보인 단위 rule이 사용된다. 이와같은 단위 rule을 종합하면 전체 구성이 파악될 수 있다. 개발된 전문가시스템에서의 판정오류 또는 보충사항은 해당되는 rule만을 수정, 보완함으로 완성될 수 있다.

2.4 적용(implementation) 및 시험(test)

본 연구에서는 철근콘크리트 구조물에 열화를 발생시키는 요인을 11가지로 분류하였고 이 11가지 원인과 열화현상, 즉 균열, 박리 및 표면붕괴와의 관계를 규명하였으며 각종 시험을 통하여 11가지 열화원인을 결정하기 위하여 일반적으로 행하여지는 콘크리트 구조물에의 1차 조사 및 2차 조사결과에서 얻어지는 각종 정보를 주요인자로서 설정하여 이들을 입력변수로 사용하였다. 그리고 각 열화현상과 열화원인에 따라 보수공법을 제시해 낼 수 있도록 계획하였으며, 보수공법 선정시 열화원인은 물리적 형태 혹은 화학적 형태로 구분하였고 각각에 대해 균열 폭, 철근의 노출상황, 박리된 몰타르나 페이스트의 두께 등의 인자를 입력변수로 사용하였다. 본 연구에서는 실제로 나타나는 Fig 2에 도시한 6가지의 열화현상을 module로 하여 각 module에 따라 연관된 인자들만을 찾아 열화원인을 찾고 보수공법을 선정하도록 계획하였다.

위와 같은 내용을 수행하는 rule sets으로 구성된 철근콘크리트 구조물의 유지관리를 위하여 개발된 전문가시스템의 시험은 크게 두 가지로 나누어 실행하였다. 즉 우선 완성된 전문가시스템을 이용하여 가상 데이터를 입력하였을 경우 예상되는 판정결과가 도출되는지를 시험하였고, 그 다음에는 실제 현장에서 이루어진 철근콘크리트 구조물에 대한 유지관리사항을 본 전문가시스템에 적용하여 비교함으로써 그의 실제 현장에서의 응용가능성을 확인하였다.

Table 5. Diagnosis and Repair Case of Deteriorated Structure

열화현상	실험 데이터	열화원인	보수방법
균열 박리	<ul style="list-style-type: none"> 강도 : 205~240kg/cm² 1% 케놀프탈레인 용액실험 : 10cm까지 색이 변하지 않았음. pH: 7.0~10.0 철근 노출 초음파속도(km/sec) : 3.5~4.1 반발치 : 25~50 	중산화	<ul style="list-style-type: none"> 균열 : 에폭시주입공법 표면처리공법 철근부식방지세제로포 박리 : 내산 epoxy나 타프로 미장 자케팅공법

3. 적용 예

본 절에서는 국내에서 실시된 어느 특정 화학공장의 열화된 철근콘크리트구조물의 보수실험과 전문가시스템 적용결과를 비교하고자 한다. 이 조사에서는 비파괴시험 방법으로써 Ultrasonic test와 Schmidt hammer법을 병용한 복합추정법으로 콘크리트의 강도를 추정하였고 표면의 중화도 테스트, pH value test 및 외관에 의한 상태조사 등을 통하여 현구조물의 산화 및 부식정도를 파악한 후 이에 대한 적절한 보수방법을 적용하였다. 위의 진단방법에 의한 열화원인 및 보수방법선정결과는 Table 5와 같이 요약될 수 있다.

실제 현장조사에서 얻어진 각종 자료 및 실험데이터를 입력한 전문가시스템에서의 열화원인에 대한 추론과정및 결과는 다음과 같다.

```

*****
**                                  **
**      열화원인 규명을 위한 전문가시스템      **
**                                  **
*****
    
```

**** 콘크리트에 발생한 열화현상 ****

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. 균열 2. 박리 3. 표면붕괴 4. 균열, 박리 5. 박리, 표면붕괴 6. 균열, 박리, 표면붕괴 |
|--|

열화현상의 형태를 입력하십시오(1-6) : 4

**** 1차 시험 결과 입력 ****

구조물이 염해에 노출되었는가? N

- 구조물의 온도변화 폭을 입력하십시오?(°C) 10
- 구조물이 massive 한가?(y/n) N
- 구조물에 부등침하가 발생하였는가?(Y/N) N
- 구조물 타설시 사용된 물-시멘트비를 입력하십시오(%) 45
- 구조물에 발생한 부풀림이 방지되었는가?(Y/N) N
- 구조물은 산의 영향을 받는가?(y/n) Y
- 구조물에 사고(충격)가 발생하였는가?(y/n) N
- 구조물내에 요각 코너가 있는가?(y/n) N
- 구조물내에 갑작스런 단면의 변화가 있는가?(y/n) N
- 구조물내에 배수시설이 부적당한가?(y/n) N
- 구조물내에 철근의 간격이 불충분한가?(y/n) N
- 구조계산서에 잘못이 발견되었는가?(y/n) N

**** 2차 시험 결과 입력 ****

- 철근전위시험의 결과값을 입력하십시오 (실험하지 않았으면 0을 입력) 0
- pH value 시험 결과 값을 입력하십시오 7
- 1% 케놀프탈레인 용액시험결과 열화부위가 붉은 색으로 변화하였는가?(Y/N) N
- 실리카 겔 시험결과 값을 입력하십시오 10
- Core boring 시험에 의한 콘크리트 압축강도의 값을 입력하십시오(kg/cm²) 220
- Schmidt hammer 시험에 의한 결과 값(보정된 값)을 입력하십시오 35.0
- 초음파시험의 결과 값을 입력하십시오(km/sec) 3.8

```

*****
**                                  **
**      주어진 정보들에 의하면,      **
**      해당구조물에 발생한 열화의 원인은      **
**      화학작용이다.      **
**                                  **
*****
    
```

보수공법을 선정하기 위한 전문가시스템과의 interactive run의 결과는 다음과 같다.

 ***** 보수공법 추천을 위한 전문가시스템 *****

철근콘크리트 구조물의 보수공법선정을 위한 입력자료

발생된 균열이 물리적 원인에 의해 발생되었는가? (Y/N) N
 구조물 표면에 박리나 표면붕괴가 발생하였는가? (Y/N) Y
 구조물내의 철근이 노출되었는가? (Y/N) Y
 구조물에 발생한 최대 균열 폭을 입력하십시오(mm) 0.3

 주어진 정보들에 의하면,
 균열부위의 경우, 포스트스트레스 공법,
 에폭시(epoxy) 주입공법,
 또는 표면처리공법이 적용가능하다.
 박리부위의 경우, 자케팅(jacketing),
 공기연행 몰타르법이 적용가능하다

이상과 같이 전문가시스템을 사용하여 얻은 추천결과로서 열화원인은 화학작용이고 보수방법은 균열부위의 경우, 포스트스트레스 공법, 에폭시(epoxy) 주입공법, 또는 표면처리공법이 적용되며, 박리부위의 경우, 자케팅(jacketing), 공기연행몰타르법이 적용될 수 있는 것으로 추천되었다. 본 전문가시스템과 consultation하는 동안에 입력된 값중에서 실험데이터 이외의 값들은 일반적인 값으로 가정하여 처리하였다.

4. 결론

콘크리트구조물의 종합적인 유지관리체계란 열화정도를 측정하고 각종 시험을 통한 열화원인 분석결과를 토대로 보수가 필요한 경우 적절한 보수공법 및 보수재료를 선정하는 과정을 통틀어서 일컫는다.

본 연구의 목적은 철근콘크리트 구조물의 합리적인 유지관리체계를 확립하기 위하여 현장에서 사용 가능한 철근콘크리트 구조물의 유지관리를 위한 전문가시스템을 개발함으로써 인공지능을 이용한 철근콘크리트 구조물의 체계적인 유지관리방법을 제시하는데 있다. 본 연구에서 개발된 전문가시스템은 가상데이터를 적용하여 시스템을 검증하였고, 개발된 전문가시스템에 실제 보수공사에서

사용된 입력변수를 입력시켜 도출한 결과와 실제 시공예를 비교함으로써 비교적 만족스러운 결과를 얻었다. 본 연구를 통한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 철근콘크리트 구조물의 유지관리를 위한 전문가시스템을 구축하기 위하여 철근콘크리트 구조물의 유지관리와 관련된 경험적인 지식과 전문지식을 체계화하여 지식베이스를 구축하였다.
2. 철근콘크리트 구조물에 발생하는 열화현상에 대한 원인을 11가지로 분류하였고 이들 11가지 열화원인과 열화현상과의 관계를 규명하였으며 열화원인과 현상에 따른 보수공법의 선정방법을 제시할 수 있는 전문시스템을 구축하였다.
3. 본 연구에서 사용한 보수공법 및 보수재료의 선정방법의 문제는 제한된 참고서적 및 경험지식에 근거를 두고 있으므로, 보다 높은 신뢰성을 얻기 위하여 보다 많은 자료와 그 분야전문가의 전문지식과 경험을 수집하여 계속적으로 보완될 것이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 1990년도 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 수행하게 되었음을 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Donald A. Waterman, "A Guide to Expert System", Addison-Wesley Publishing Co., 1988.
2. John Wiley & Sons, "Artificial Intelligence; A Handbook of Professionalism", Ellis Horwood Lit., 1988 Horwood Lit., 1987.
3. KAIST 토목공학과, "인공지능을 이용한 고도의 구조 해석/설계용 전문가 시스템의 개발(II)", 과학기술처, 1989.5.
4. Michel D. Rychener, "Expert System for Engineering Design", Ellis Howood Lit., 1988.
5. Sidney, M. J., "Deterioration, Maintenance, and Repair of Structures", Mcgraw-Hill Book Co., 1965.
6. Sim, Jongsung and Kim, Jonho, "Building Diagnosis, Repair and Maintenance", ACI Korea Chapter, 추계학술발표회 논문집, 1988, pp.57~69.

7. 심종성, 배인환, “콘크리트 구조물의 유지관리에 관한 체계적 연구”, 한국콘크리트학회 추계발표회 논문집 제1권 제1호, 1989. 11.11.
8. 심종성, “콘크리트구조물의 유지관리를 위한 최근연구 동향”, 건설안전, 6, 7월호, 1990.
9. 심종성, 배인환, 김정호, “국내 철근콘크리트 구조물의 유지관리 동향”, 한국콘크리트학회 추계학술발표회 논문집, 제2권 제2호, 1990, pp.179~184.
10. 심종성, 배인환, “철근콘크리트 구조물의 유지관리를 위한 전문가시스템 개발”, '90자유공모과제 한국학술진흥재단, 연구결과보고서, 1991.8.

(접수일자 : 1991. 9. 27)