

원전 안전성 향상을 위한 열화 D/B 시스템 개발

조명석, 송영철
전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16
함영승, 임재호
한국전력공사
서울특별시 강남구 삼성동 167

요 약

콘크리트 구조물에 발생하는 경년 열화(Aging) 현상은 매우 복잡하며 단일 요인에 의해서라기 보다는 여러 요인의 복합적인 작용에 의해 나타나므로 그 원인분석 및 평가에 어려움을 주고 있다. 특히 원전 주요구조물은 대부분이 철근 콘크리트 구조물로 이루어져 있어 사용년수가 증가함에 따라 발생 가능한 경년 열화현상에 대해 사전 예방측면의 대책을 강구함은 원전의 안전성 확보 측면에서 중요한 문제라 할 수 있다. 이를 위해서는 무엇보다도 설계·시공 및 운용단계에서의 각종 이력사항의 관리가 기본적인 요소라 할 수 있으며 이에 본 고에서는 현재 원전 구조물의 이력관리에 활용되고 있는 열화 D/B 시스템(Structure Life Management System : SLMS)의 체계 및 운용방법과 향후 개선방향에 대하여 기술하고자 한다.

Abstract

The personal-computer software program named SLMS(Structure Life Management System) was developed for the safety related structure of NPP(Nuclear Power Plant). SLMS is constituted of three part, database system containing various inspection data, operation program for input/output of the inspection data, and application program for efficient operation of database system. Using the SLMS, the field engineers can easily acquire the information about the various inspection data, repair and related histories of NPP structures. SLMS will contribute to the efficient maintenance of NPP structures.

1. 서 론

구조물 수명관리의 기본은 구조물에 발생할 수 있는 각종 열화(Aging) 현상에 대한 이력

(History)관리라 할 수 있으며, 콘크리트 구조물의 경우 재료의 특성상 발생하는 열화현상이 매우 복잡하고 여러 요인의 복합적인 작용에 의해 나타남을 고려할 때 체계적인 D/B 시스템의 확립은 더욱 중요한 요소이다. 이에 본 고에서는 현재 원자력발전소를 구성하고 있는 주요 구조물의 이력관리에 활용되고 있는 열화 D/B 시스템 (Structure Life Management System : SLMS)의 체계 및 운용방법과 향후 개선방향을 기술함으로써 원전의 안전성 향상에 기여코자 한다.

2. 개발배경

원전 구조물의 대부분은 콘크리트 구조물로서 해안가에 위치하고 있어 염해와 장기적으로 발생하기 쉬운 피로, 중성화 등 각종 열화조건에 노출되어 있다. 한편 구조물 수명관리기술은 근본적으로 체계적으로 확립된 절차에 따라 수행되어야 하는 것이 원칙이며 특히 원자력발전소의 경우에는 결함을 사전에 제거함으로써 원자력 안전성에 대한 신뢰도를 높이기 위한 자체기술의 확립이 필요하다. 효율적인 수명관리의 기본이 되는 것은 구조물 사용수명동안 발생할 수 있는 각종 열화현상을 체계적으로 관리할 수 있는 D/B 시스템의 구축으로서 각종 관리항목의 선정 및 점검체계의 확립 등을 병행 수행하여야 하는 종합적인 기술이다. 이러한 필요성에 따라 전력연구원에서는 '93년 부터 "원전 안전성 관련 콘크리트 구조물의 열화에 관한 연구"를 통하여 원전 구조물에 발생하는 각종 열화 현상의 메카니즘을 규명하고 이를 토대로 한 점검체계 및 D/B시스템 개발을 수행하였다. 연구결과 '97년부터 전 가동 중 원전 현장에서 절차서에 따른 각종 점검을 수행하고 이를 D/B(Structure Aging Management System : SAMS)화 하였으며, 현장 적용 결과를 보완한 새로운 시스템인 SLMS를 '99년부터 활용하고 있다.

3. 시스템 특성

본 시스템은 원전 주요구조물의 점검과 유지관리, 각종 이력 등의 제반 사항에 대한 입력 및 검색을 일선실무자들이 손쉽게 할 수 있도록 개인용 컴퓨터로 전산화함으로써 신속한 현황파악 및 수명관리 업무의 효율 극대화를 위하여 개발된 것으로서 점검체계에 따라 획득된 자료를 바탕으로 한 D/B의 구축, 자료의 입출력을 위한 화면구성 프로그래밍 및 효율적인 자료관리를 위한 각종 운용프로그램 개발 등으로 기본방향을 설정하였다.

(1) H/W 및 S/W

본 시스템 운용시 필요한 하드웨어 및 소프트웨어는 <표 1>과 같으며 필수적인 시스템 조건으로서 PC 본체는 펜티엄급 이상으로 하여야 하며 주기억 용량은 32MB 이상 확보되어야 한다. 또한 운영체제는 사용자편의를 위하여 Windows 95를 채택하였다.

(2) 시스템 특성

1) 각 이력사항의 통합입력방식

점검, 보수 및 기타 이력사항을 개별적이 아닌 통합적으로 입출력, 검색할 수 있도록 함으로서 구조물 현상태에 대한 파악이 종합적으로 이루어질 수 있도록 하였다.

2) 열화현상의 좌표 입력방식

콘크리트 구조물에서 발생할 수 있는 균열, 박리, 누수, 백화현상 등을 좌표개념을 도입하여 손쉽게 입력할 수 있도록 구성함으로써 정확한 위치 파악 및 데이터의 소용량화가 가능토록 하였다.

3) 다양한 검색기능 제공

일선실무자들의 신속한 현황 파악을 위하여 일자별, 열화유형별, 추적검사 유무 등 다양한 검색기능이 가능토록 하였다.

4) D/B 구조의 유연성 확보

안전성 관련 콘크리트 구조물 이외의 필요시 터빈 등의 철골구조물이나 기타 관련 구조물도 Source 프로그램의 변경 없이도 관리할 수 있도록 D/B 구조의 유연성을 확보하였다.

<표 1> H/W 및 S/W 조건

구 분	시스템 조건
H/W	· IBM PC 80586(133MHz 이상) · 주기억용량 : 32MB이상 · Scanner : 1200 dpi 이상 · CD ROM : 20배속 이상
S/W	· OS : Windows 95 · Printer 및 Scanner 운용프로그램

4. D/B 관리항목

본 시스템에서 관리하고 있는 주요항목은 각종 점검에서 획득되는 외관 및 정밀검사 자료로서 그 주요내용은 <표 2>와 같다.

<표 2> D/B 관리항목

구 분	주요 내용	
대상 원전	· 가동중 전 원전 및 신규원전	
대상 구조물	· 안전성 관련 구조물 : 격납건물, 보조/제어건물, 디젤발전기 건물, 핵연료건물, 기기냉각수 건물, 필수냉각수 취수구조물 · 터빈 건물 · 구조물 내외부 포함 · 필요시 추가 가능	
관 리 항 목	구조물 정보	· 원자로 형식, 발전용량, 준공일, 콘크리트 설계기준 강도 등
	열화자료	· 균열, 부식, 백태등 콘크리트 및 철골구조물에서 발생할 수 있는 모든 열화현상
	수명관리자료	· 콘크리트 비파괴 강도, 중성화, 염화물량, 철근부식도, 초음파 측정, 부등침하 측정등
	가동중검사자료	· 텐던 인장력 손실량
	기 타	· 보수 및 기타 관련 이력사항

5. 시스템의 구성 및 운용

(1) 암호입력 기능



<그림 1> SLMS Logo 화면 및 암호 입력창

시스템 구동시 보안을 위하여 등록된 사용자와 암호를 사용하도록 설계하였다. 따라서, 정해진 사용자가 정해진 암호를 입력할 경우에만 본 시스템의 초기화면으로 이동할 수 있다.

암호 입력창에서는 각 사용자가 본인의 암호를 변경할 수 있는 암호변경창과 시스템 관리자만이 관리할 수 있는 암호관리 창을 가지고 있다.

(2) 초기화면 주요기능

초기화면에는 좌측에 관리대상 구조물의 개략적인 위치와 호기를 나타낸 그림이 있고, 우측 창에는 각 원전별 호기별 기본정보 및 주요내용을 표시하는 창이 있으며, 우측하단부에는 관리항목별로 이동할 수 있는 이동버튼이 있다.

1) 개략도

개략도는 각 원전별로 호기를 나누었으며, 마우스로 직접 클릭하여 호기를 선택할 수 있으며, 원하는 호기를 두번 클릭하면 해당호기의 평면도 및 기타 관리정보가 있는 창으로 이동할 수 있다.



<그림 2> SLMS 초기 화면

2) 호기별 정보창

각 호기별 기본 정보 즉, 원자로형식, 발전용량, 준공일, 건물별 완공일, 콘크리트의 설계강도 등을 입력하는 창으로 각 현장에서 호기별로 주요 기본정보를 입력할 수 있다.

3) 이동버튼

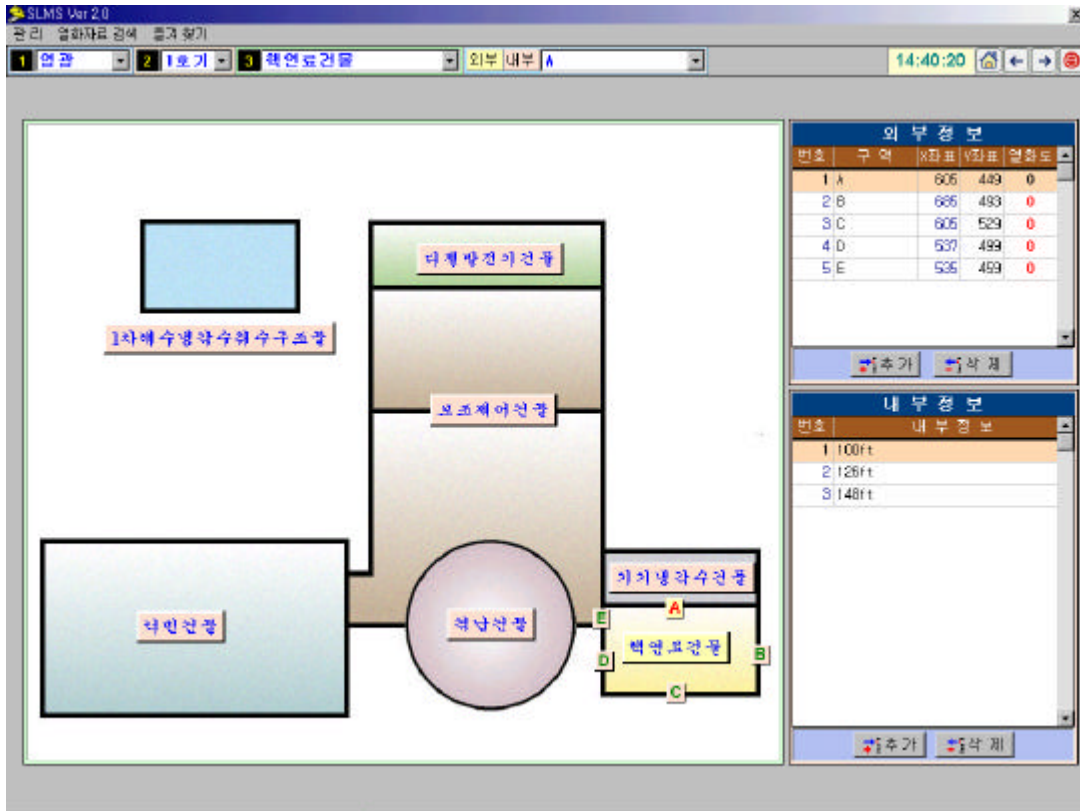
우측하단에 **열화자료** **수명관리** **ISI관리** 3개 항목을 관리하는 창으로 이동할 수 있도록 버튼을 설치하였다. 따라서 원하는 버튼을 클릭하면 관련창으로 이동할 수 있다.

열화자료 : 대상구조물 외부 및 내부의 육안검사에 의한 결과(콘크리트 구조물의 균열 등과 같은 열화현상)를 관리하는 창으로 이동한다.

수명관리 : 각 구조물별로 정밀점검 자료를 관리하며, 중성화 진행상태 및 염화물 함유량, 철근부식 추정, 균열폭의 진행성 평가, 콘크리트의 비파괴강도 추정값, 초음파에 의한 콘크리트 품질평가, 부등침하에 대한 자료를 관리하는 창으로 이동한다.

ISI관리 : 각 원전 호기의 가동중 검사(In Service Inspection)에 대한 결과값을 입력하고 관리할 수 있는 창으로 이동한다.

(3) 열화자료 관리기능



<그림 3> 검사구역 정보화면

검사구역 정보창의 구조물 평면도는 외부에서 스캐너에 의해 입력받을 수 있다. 구조물 및 벽체의 검사구역은 평면도의 각 건물명을 마우스로 클릭할 때마다 해당 벽체 구역번호가 자동으로 A, B, C, D...의 형태로 화면에 나타나며, 화면 오른쪽의 외부 및 내부 검사구역 정보창에도 해당내용이 출력된다.

화면 우측상단의 외부정보창은 선택되어진 구조물에 대해서 구역정보를 간략히 나타내고 있으며, 그 내용은 구역번호, 포인트위치, 열화자료 유무를 나타내는 항이 있다. 이 중 포인트위치는 좌측 평면도상에서 구역번호의 위치를 평면도상의 좌표로 나타낸 것으로 무시하여도 좋으며, 오른쪽에 열화도 유무를 나타내는 항은 열화가 존재할 경우 ○표시를 나타내고, 없는 경우 아무런 표시도 나타나지 않게 설정되어 있다.

이 검사구역 정보창에서는 외부벽체의 구역번호를 A, B, C, D...의 형태로 나타내며, 내부는 층별로 ○Om, ○Oft와 같이 표시하였다.

1) 열화자료의 입력

열화 자료의 입력은 자료 입력창에서 이루어지며 각 항목별 기능은 다음과 같다.

【구역명】 : 정해진 구역(기본 4×4m)으로 구획을 했을 경우 해당 커서가 위치한 행과 열을 나타낸다.

【현재좌표】 : 커서가 위치한 곳의 (X, Y)좌표

【입력횟수】 : 열화자료의 총 입력횟수

【입력순서】 : 현재 선택되어 있는 열화가 입력된 순서를 나타내는 것으로 관리번호와 상관없이 입력순서에 의해 자동으로 부여되는 일련번호이다.

【이름방식】 : 관리번호를 증가시키거나 이전번호와 동일하게 할 것인가를 선택한다.

【관리번호】 : 열화자료를 관리하는 고유번호로서 각 열화현상마다 하나의 관리번호를 부여하며, 동일한 원인에 의해 발생하여 인접해 있는 열화현상에도 동일한 관리번호를 부여할 수 있다. 관리번호는 A1~Z999까지의 문자 25,974종을 사용할 수 있으며, 하나의 관리구역(ex. ○○건물 A면 or ○○건물 내부 ○○ft ○번 벽체)은 최대 1000개의 열화데이터를 입력할 수 있다. 여기서 영문알파벳은 점검의 순서를 나타낼 수 있는 문자이다. 즉, 초기점검에서 얻어진 모든 데이터는 A로 시작되고 이후 정기적으로 계속되는 점검의 결과 등으로 새로이 추가되는 열화현상은 B, C,···로 표기하여 나타낸다.

【열화유형】 : 열화유형은 선택옵션으로서 일반균열, 망상균열, Honeycomb, 모르터보수, 보수, 벽대, 철근노출, 박리 및 기타현상을 선택할 수 있다.

【열화폭】 : 균열의 경우 균열폭을 직접 입력하거나, 혹은 균열폭이 미세한 경우나 불가한 경우는 우측의 **미세** 버튼이나 **불가** 버튼을 클릭하여 폭을 정한다.

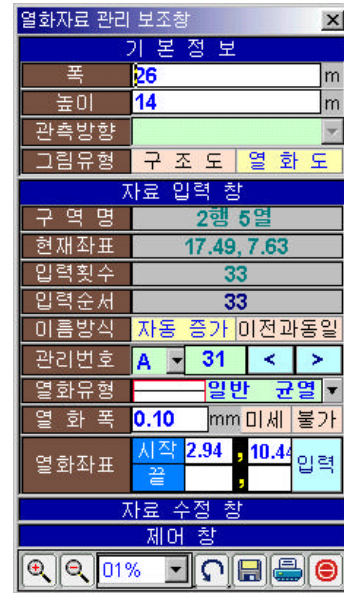
【열화좌표】 : 열화의 시점, 종점을 입력하며, 열화의 길이는 자동으로 계산되어 입력되어 진다.

2) 열화자료의 수정

입력자료의 수정은 열화자료 수정창에서 이루어지며 기존에 입력된 자료를 수정할 수 있는 창으로 수정가능 항목은 관리번호, 열화유형, 열화폭, 열화좌표, 입력일자, 관리유무, 추적점검여부이며, 열화의 길이는 시스템에서 시점과 종점으로 자동적으로 계산되므로 수정할 필요가 없다.

또한 【관리유무】와 【추적점검】은 **X** **O** 버튼으로서 관리가 필요한지의 여부, 추적점검을 하고 있는지의 여부를 각 열화상태별로 기록할 수 있다.

자료의 입력 및 수정에서 모든 자료는 “Enter”키를 누름으로서 이루어진다. 따라서 데이터 입력후 “Enter”키를 누르지 않으면 입력이 취소된다.



<그림 4> 열화자료 입력창



<그림 5> 열화자료 수정창

3) 제어창

입력된 열화자료를 더욱 더 효율적으로 관리하기 위하여 여러가지 특수기능을 가진 키를 제어창에 마련하였다.

삭제 : 구조도 자료나 열화자료를 개별적으로 삭제한다. 삭제를 원하는 열화현상이나 구조도는 화면에서 대상 열화현상의 중심부에 마우스를 위치한 후 마우스의 오른쪽 버튼을 눌러 선택할 수 있다. 혹은, 자료 입력창에 있는 **<** **>** 버튼을 눌러 선택하고자 하는 열화현상의 관리번호까지 이동할 수도 있다

모두삭제 : 구조도나 열화도를 전체적으로 삭제한다.

벽체설명 : 현재 벽체의 열화상태에 대한 전반적인 경향이나 이력을 문자로서 기록할 수 있도록 하였다.

열화설명 : 현재 선택되어 있는 열화상태에 대해서 개별적인 설명을 덧붙일 수 있게 한다. 즉, 각 균열마다 특이한 사항이나 이력을 각각 입력할 수 있다.

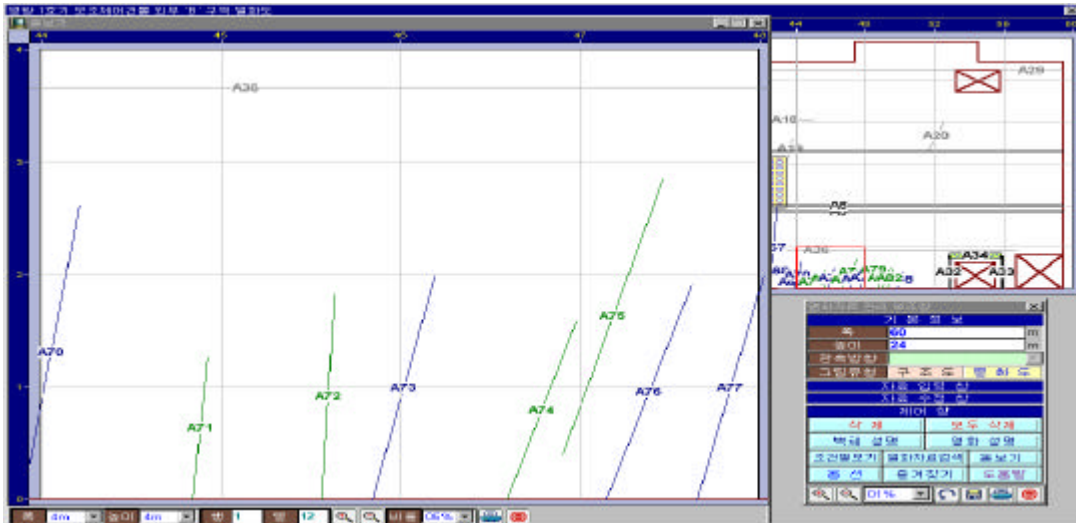
조건별보기 : 입력일을 년도 기준으로 혹은 관리유무, 추적점검유무, 균열의 길이, 폭, 시점의 높이, 종점의 높이로서 현재 화면에 나타나고 있는 열화를 선택적으로 볼 수 있게 하였다. 조건별보기창 내의 **초기화** 버튼은 조건을 모든 열화를 볼 수 있는 상태로 만든다. **X 닫기** 버튼은 조건별보기창을 종료시킨다.

열화자료검색 : 본 시스템은 근본적으로 열화자료를 수치로서 입력하며 보조기능으로 문자를 입력하도록 설계되어 있다. 따라서 열화자료 검색은 시스템에 데이터의 형태로 입력되어 있는 모든 콘크리트 열화자료를 원하는 항목으로 검색하여 나타낼 수 있는 것이다.

돋보기 : 열화자료 관리창에서는 관리의 편의를 위해 발생된 열화위에 관리번호를 출력시킬 수 있다. 그러나, 하단부와 같이 중점점검구역으로서 열화가 수적으로 많은 경우 관리번호를 식별하기 어려우며, 또한 열화상태 자체만으로도 부분적으로 확대를 필요로 할 수 있다. 이를 위해서 돋보기 기능을 추가하였다. **돋보기** 버튼을 선택하면 4×4m로 구획된 돋보기 창이 화면에 나타나며 원하는 지점을 마우스로 클릭하면 그 지점이 돋보기 창에 확대되어 나타난다. 이때 선택되어진 영역은 붉은 사각형으로 표시된다. 또한 이 돋보기 창의 폭과 높이를 1m~8m까지 1m 간격으로 확대할 영역을 설정할 수 있으며, 이 때 설정된 간격을 자동으로 계산하여 현재 확대되고 있는 부분이 이 벽체에서 속하는 행과 열을 나타내어 준다. 돋보기창의 크기는 필요에 의해 확대, 축소할 수 있으며, 확대된 내용을 프린터로 출력할 수도 있다.



<그림 6> 제어창



<그림 7> 열화자료 입력 예

(4) 검색기능

본 시스템은 터빈건물을 제외한 모든 자료를 수치 및 문자 데이터로 기록·관리하므로 각종 항목에 대해서 열화자료를 검색할 수 있다. 검색할 수 있는 항목은 하나의 데이터가 가지고 있는 모든 정보로서 그 내용은 다음과 같다.

항 목	선 택 사 항
발전소	울진, 월성, 영광, 고리
호기	1, 2, 3, 4호기
구조물	격납건물, 보조제어건물, 핵연료건물, 기기냉각수 건물 등
구조물 내·외부	내부 및 외부
열화유형	일반균열, 망상균열, honeycomb, 모르타보수, 보수, 백태, 철근노출, 박리, 기타현상
관리유무	유, 무
추적점검유무	유, 무
열화 길이	제한없음
열화 폭	미세균열=0, 일반균열 0.05 ~9.00mm
열화의 시점 및 종점의 위치	제한없음
열화 입력일	○○년 ○○월 ○○일 ~ ○○년 ○○월 ○○일

이러한 선택항목에 의해서 선택된 사항들은 <그림 8>과 같이 해당되는 자료를 화면에 출력하며, 출력된 항을 마우스로 두번 클릭하면 다시 해당 열화자료 관리창으로 바로 연결되도록 하였다.

열화자료 검색

39 검색조건

발전소 / 호기 구분: 고리, 호기 구분: 모두, 건물 구분: 모두, 외부/내부 / 열화 유형: 모두

관리유무: 모두 관리 x 관리 0, 추적점 검유무: 모두 추적 x 추적 0

열화 길이(m): [] ~ [], 열화 폭(mm): 0.05 ~ 0.3, 시작점 높이(m): [] ~ [], 끝점 높이(m): [] ~ []

열화 발생 일: []년 []월 []일 ~ 1999년 03월 17일

자료 검색(F5) | 자료 삭제(F6) | 자료 출력(F7) | 외일로 출력(F8) | 일회도 출력(F9) | 닫기(ESC)

No	지역	호기	건물명	구역명	관리명	열화유형	시작X	시작Y	끝 X	끝 Y	열화길이	열화폭
1	고리	1호기	핵연료건물	외부 'A' 구역	A9	일반 균열	18.3	0.3	17.2	2.4	2.37	0.2
2	고리	2호기	보조제어건물	외부 'A' 구역	A122	일반 균열	19.16	0	19.02	2.82	2.82	0.1
3	고리	2호기	보조제어건물	외부 'C' 구역	A3	일반 균열	2.25	0	0.48	2.74	3.26	0.15
4					A28	일반 균열	12.8	9.3	12.59	17.91	8.61	0.15
5					A30	일반 균열	19.33	9.3	19.33	20.26	10.96	0.1
6	고리	2호기	보조제어건물	외부 'E' 구역	A1	일반 균열	3.93	0	3.61	1.85	1.88	0.15
7					A24	일반 균열	8.13	15.55	8.2	18.02	2.47	0.2
8	고리	2호기	보조제어건물	외부 'F' 구역	A61	일반 균열	1.86	0.25	0.85	2.07	2.08	0.05
9					A63	일반 균열	13.1	1	12.91	3.13	2.14	0.2
10	고리	2호기	보조제어건물	외부 'G' 구역	A2	일반 균열	2.81	0.36	3.72	1.88	1.77	0.1
11	고리	2호기	보조제어건물	외부 'H' 구역	A80	일반 균열	19.74	0.3	19.76	1.88	1.58	0.1
12					A81	일반 균열	8.05	7.42	8.12	10.17	2.75	0.1
13	고리	2호기	핵연료건물	외부 'A' 구역	A6	일반 균열	25.17	0.8	26.07	2.07	1.56	0.3
14	고리	2호기	디젤발전기건물	외부 'A' 구역	A2	일반 균열	12.01	0.2	11.91	3.22	3.02	0.1
15					A13	일반 균열	18.18	0.2	18.73	2.43	2.3	0.2
16	고리	2호기	디젤발전기건물	외부 'C' 구역	A4	일반 균열	9.77	0.3	9.74	2.64	2.34	0.15
17					A12	일반 균열	17.73	0	18.16	2.24	2.28	0.05

더블클릭 -> 해당 열화도 입력화면으로 이동

<그림 8> 열화자료 검색화면

6. 향후 개선방향

본 시스템은 주로 가동 중 원전 구조물에서 발생할 수 있는 각종 열화현상 및 보수 등의 관련 이력사항을 효율적으로 관리할 수 있도록 개발되었다. 그러나 원전의 수명관리를 운영단계뿐만이 아니라 설계·시공단계에까지 적용되어야 할 포괄적인 개념으로 이해할 때 다음과 같은 사항을 고려한 지속적인 보완작업과 현장적용이 이루어져야 할 것이다.

(1) 설계·시공자료의 관리

원전 구조물의 정확한 건전성 평가를 위해서는 초기상태인 설계 및 시공과정에서의 구조물 상태를 파악하는 것이 기본적인 요소로서 향후 본 시스템은 설계시의 적용 Code 및 가정요건, 재료의 물성 특성, 시공시 발생한 부적합사항 등까지 관리할 수 있는 종합적인 시스템으로 보완해 나갈 예정이다.

(2) 전문가 시스템과의 접목

본 시스템에서 축적되는 각종 데이터를 활용하여 구조물의 현 상태를 평가하고 미래상태를

예측할 수 있는 전문가 시스템과의 결합이 필요하다. 이를 위하여 현재 진행중인 열화요인 및 부재의 가중치를 고려한 구조건전성 평가기법과 촉진시험을 활용한 잔존수명 예측모델과의 접목을 수행해 나갈 예정이다.

(3) 사용자 편의방식의 유지

현장 실무자들의 사용 편리성 및 데이터의 효율적 관리를 위하여 H/W 및 S/W의 발전 추세에 부합하는 시스템으로서의 개선작업을 지속적으로 이루어 나갈 것이다.

7. 결 론

이상에서 현재 원전 구조물의 효율적인 수명관리를 위하여 활용되고 있는 열화 D/B 시스템의 중요 구성내용 및 향후 개선방향에 대하여 기술하였다. 본 시스템은 사용자 편의성 및 현장 실정에 적합한 각종 점검체계를 반영하여 구성되었으며 원전 선진국에서도 아직까지 확립되지 않은 기술이다. 또한 설계·시공 및 건전성 평가기법과의 결합을 통하여 종합적인 수명관리 시스템으로의 개선작업을 지속해 나갈 때 우리 실정에 맞는 체계적인 수명관리 기술의 확립은 물론 원전의 안전성 향상에도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 전력연구원, "원전 안전성 관련 콘크리트 구조물의 열화에 관한 연구" 최종보고서, 1996
- (2) 전력연구원, "SAMS 사용자 Manual", 1996
- (3) 전력연구원, "SLMS 사용자 Manual", 1999
- (4) 전력연구원, "원전 콘크리트 구조물 잔존수명 예측에 관한 연구" 중간보고서, 1998