

2004 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## PHWR 원자로심 운전 및 정비용 3차원 CAD 시스템 개발

### Development of a 3-D CAD System for PHWR Operation and Maintenance

전지수, 정종엽, 조문성, 조창근, 구대서, 박광준, 석호천

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

박상철, 하병윤, 오영민, 이청구

한수원(주)  
월성원자력본부

윤상혁, 김원준, 서균렬

서울대학교  
서울시 관악구 신림동

#### 요 약

본 연구에서는 중수로 노심의 운전 및 정비용 3차원 CAD 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 "PHWR 노심 3차원 형상 프로그램"과 "GFP/DN 시스템 데이터베이스 관리 프로그램"의 두 부분으로 구성되어 있다. 전자는 중수로 노심의 각 부분을 3차원 그래픽 툴을 이용하여 구현한 가상 시뮬레이션 프로그램이고, 후자는 발전소의 정상운전 중 발생하는 중수로 노심의 운전 자료를 데이터베이스로 기록하고 이를 3-D 형상관리 프로그램과 연동하여 운용될 수 있도록 개발되었다. 이러한 중수로 노심의 운전 및 정비용 3차원 CAD 시스템은 중수로 노심의 각 구성부품들을 시각적인 형상으로 제공하기 때문에 발전소 내 운전원 훈련 시 효율적인 교육 자료로 이용될 수 있을 뿐만 아니라, 실제 원전 운전 자료들을 데이터베이스로 저장하기 때문에 비상운전상태 시, 신속한 원전 운전 후속조치의 자료 및 분석 결과 등을 용이하게 제공할 것이다.

#### Abstract

In this study, a 3-D CAD system for PHWR operation and maintenance has been developed. The developed system consists of "3-D CAD program of PHWR" and "Database for GFP/DN system". The former is a virtual reality simulation program for PHWR developed by using the 3-D computer graphic tool. The latter is a database program that records the operation data of PHWR

during normal operating and is linked with the 3-D CAD program. The developed system could provide visual information and operating history of each component of PHWR so that it might be used as a training material to the operator and provide basic data and results for the emergency state of PHWR.

## 1. 서 론

본 연구에서 개발한 중수로 노심의 운전 및 정비용 3차원 CAD 시스템은 중수로심 본체의 전체적인 형상과 기능의 표현은 물론이고 원자로 내부의 기기구조물과 각각의 채널 (channel), 헤더 (header) 그리고 피더 (feeder) 등의 각 부품에 대한 형상과 기능에 대해서도 3차원 CAD 기법을 이용하여 시각적인 정보를 제공해주며 아울러 원자로 내외 구성품에 대한 설계도면, 운전용 자료 및 이력, 기타 제반 문서 등의 데이터베이스와 연계하여 사용자의 요구 시 관련자료의 신속한 접근과 정확한 상황판단으로 원자로 운전 업무처리에 효율성을 높일 수 있도록 개발된 시스템이다.

이러한 중수로 노심 3차원 CAD 시스템은 크게 “PHWR 노심 3차원 형상 프로그램”과 “GFP/DN 시스템 데이터베이스 관리 프로그램”의 두 부분으로 구성되어 있으며 이 두 부분이 상호 연계되어 작동하도록 개발되었다. 우선 “PHWR 노심 3차원 형상 프로그램”은 중수로심을 3차원 그래픽 툴을 이용하여 구현한 가상 원전 시뮬레이션 프로그램으로써 실제의 중수로심 각 부분을 1:1 실척으로 구현하였고 이를 이용하여 사용자가 가상공간에서 중수로 원전[1]을 시뮬레이션할 수 있도록 하였다. 표 1은 프로그램에서 구현된 중수로심의 각 부분을 나타내고 있고, 이들 각 부분에 대하여 기기 명칭 및 도면, 설계정보, 배관도면, 운영정보 등의 사항들이 모두 기록되어있다. 또한 노심의 핵연료다발 교체를 형상화한 영상자료 등이 포함되어 있어 직접 해당 위치에서 해당 작업에 대한 결과를 시연해 볼 수도 있다. 한편 “GFP/DN 시스템 데이터베이스 관리 프로그램”은 발전소의 정상운전 중 발생하는 중수로심의 운전자료를 데이터베이스로 기록하고 이를 3차원 형상관리 프로그램과 연동하여 운영할 수 있도록 개발되었다. 이때 데이터베이스에 계속적으로 축적되는 운영자료는 결함연료 탐지계통의 주간 점검 380개 연료관별 분석자료, 핵연료다발의 출력, 연소도 등과 같은 중수로심 관리 프로그램 (RFSP 코드)[2]의 해석 자료, 그리고 채널유량, 급수관 측정자료, 압력관 크립 등과 같은 열수력 해석 프로그램 (NUCIRC 코드)[3]의 계산결과 등이며, 이러한 운전정보를 3차원 형상 프로그램과 연계하여 시각적으로 표현해 줌으로써 좀 더 용이하고 정확하게 원전 운전 업무를 수행 할 수 있도록 한다.

본 연구에서 개발된 중수로 노심의 운전 및 정비용 3차원 CAD 시스템은 구성부품들을 시각적인 형상으로 제공하기 때문에 발전소 내 운전원 훈련 시 효율적인 교육자료로 이용 될 수 있을 뿐만 아니라, 실제 원전 운전자료들을 데이터베이스로 저장하기 때문에 비상운전상태 시, 신속한 원전 운전 후속조치의 자료 및 분석 결과 등을 용이하게 제공할 것이다.

## 2. 중수로 노심 3차원 CAD 시스템 개발 절차

본 연구에서 개발된 중수로 노심의 운전 및 정비용 3차원 CAD 시스템은 월성 발전소에서 보유하고 있는 원자로심 각 부품들의 설계도면을 근거로 3차원 형상 모델링이 수행되었고, 또한 결함연료 위치 탐지 계통<sup>1)</sup> 및 기체 핵분열 생성물 감시계통<sup>2)</sup>의 설계지침서와 운전지침서, 그

리고 운영지침서 등에 근거하여 데이터베이스 및 연계 프로그램이 구성되었다. 이러한 자료들의 수집과 각각의 모듈 개발, 그리고 하나의 시스템으로 연결하는 일련의 과정을 그림 1에 나타내었다.

## 2.1 3-D 형상모델링 및 데이터베이스 구축위한 자료 수집

3-D CAD 작업에 필요한 중수로 노심의 관련도면을 검색하여 필요한 도면을 월성원전으로부터 제공받아 형상모델링을 수행하였다. 이때 각 부품의 기본도면뿐만 아니라 참고도면으로 연결된 GA (general arrangement)와 세부도면 (detail drawing)도 함께 근거자료로 활용하였다. 데이터베이스 구축에 필요한 각 계통의 설계, 운전 및 운영지침서와 디자인 매뉴얼도 역시 발전소로부터 제공받아 활용하였다.

## 2.2 시스템 모듈화 작업 및 3-D CAD 마스터 제작

각각의 구성품별로 도면을 분류하고 구성품 별 세부 부품을 파악한 후, 3-D CAD로 구현했을 때 시스템에 가장 큰 영향을 주는 일차 열수송 계통 (primary heat transport system) 등을 3-DS MAX 작업으로 따로 구분하여 형상화 하였다. 그리고 핵연료 부분에서는 Calandria Shell, Fuel Channel, 노심부분에서는 Reactivity Control Unit Mechanism Deck, Primary Heat Transport System, Header, Feeder, 기타 핵심 요소로는 Horizontal Flux Detector, Vertical Flux Detector, Ion Chamber, Zone Control Unit, Shutoff Unit 등에 대해 3-D CAD Master Set을 제작하여 각각의 3차원 형상 모델에 대한 정보를 저장하고 관리하도록 하였다.

## 2.3 Web-Based VR 시스템 구축 및 3-D 모델의 VR 시스템 이식

VR (virtual reality)은 컴퓨터를 중심으로 한 시스템에서 현실과 상상의 경계를 자유롭게 초월하여 컴퓨터 그래픽으로 표시된 3차원 물체를 휴먼 인터페이스를 사용하여 현실에 가까운 감각처럼 느낄 수 있도록 구현하는 것으로, Calandria Shell, Primary Heat Transport System 등의 주요 구성 부품을 VR용 3-D 모델로 제작하였다. 그리고 간단한 마우스 조작만으로도 각 오브젝트의 이동이나 네비게이션 등이 가능한 VR 화면을 main으로 하는 VR 인터페이스를 제작하여 Web-Based VR 시스템<sup>3)</sup>을 구축하였다. 이러한 VR 시스템 디자인은 EON Studio<sup>4)</sup>를 이용하여 구현되었고, 각각 모델링 자료의 위치를 선정하고 각 부품별로 구분이 쉽도록 표면질감과 색상을 달리 설정하여 표현하였다.

- 
- 1) **결함연료 위치탐지계통** : 지발 중성자 감시계통 (Delayed Neutron Monitoring System)으로도 불리며, 380개 연료관 냉각재 시료의 I-137, Br-87로부터 나오는 지발중성자 계수율을 측정하여 결함이 발생한 연료관을 판별하는 계통.
  - 2) **기체 핵분열 생성물 감시계통** : 냉각재 계통 방사능 감시 계통으로도 불리며, 냉각재 계통내의 핵분열 생성물 중 결함 연료의 발생을 감지할 수 있는 I-131, Xe-133, Xe-135, Kr-88의 방사능 농도 및 전 감마선 방사능의 변화를 감지하여 노심 내 핵연료의 결함 유무 및 결함발생 루프를 판별하는 계통.
  - 3) **Web-Based 시스템** : 컴퓨터 그래픽이나 CAD로 구현된 3-D 모델링 결과물을 별도의 구동 프로그램을 이용하지 않고 Web 상에서 직접 3-D를 구현하고 추가적인 정보를 또한 Web으로 제공하는 시스템.
  - 4) **EON Studio** : 사용자가 3차원, interactive, 실시간 시뮬레이션 등을 직접 제작할 수 있도록 해주는 PC 기반 소프트웨어로 VR 응용분야에서 많이 이용됨. EON Reality, Inc.에서 개발.

## 2.4 데이터베이스 (DB) 시스템 개발 및 VR 시스템과의 연동

앞서 언급한 바와 같이 ① 핵연료관별 유량, 출력분포, 이상유동 변화 이력관리 및 관련 운전인자, ② GFP/DN 시스템, ③ 중수로 노심관리 프로그램 (RFSP 코드) 운영자료, ④ 열수력학 코드 (NUCIRC 코드) 계산 결과 등의 자료에 대해 데이터베이스를 구축하였고, 이들 자료들을 GUI (Graphic User Interface)를 이용하여 표현함으로써 시각적으로 용이하게 판별할 수 있도록 하였다. 또한 구축된 데이터베이스와 VR 시스템을 연동하여 Web 상에서 노심 각 부분과 계통에 대해 새로운 자료를 입력하고, 계산을 수행하며 그 결과를 출력할 수 있도록 시스템을 구현하였다.

## 3. 중수로 노심 운전 및 정비용 3차원 CAD 시스템 성능

### 3.1 PHWR 노심 3차원 형상 프로그램

PHWR 노심 3차원 형상 프로그램은 앞서 언급했듯이 가상 원전 시뮬레이션 프로그램으로써, 정교하게 구현된 원자력 발전소 노심을 3차원 객체로 제작하여 사용자가 원할 경우 직접 가상공간에서 노심을 시뮬레이션 해 볼 수 있도록 개발된 프로그램이다. 서버와의 연결을 통하여 MS Internet Explorer 상에서 구현되며, 각 클라이언트는 개인 PC에서 로그인을 통하여 이용할 수 있다. 또한 노심의 연료교체에 대해 개발된 영상자료를 포함하고 있으므로 직접 해당 위치에서 결과를 시연해 볼 수도 있다.

PHWR 노심 3차원 형상 프로그램은 그림 2에 나타낸 바와 같이 총 3개의 주요 프레임으로 구성되어 있다. 화면의 가장 왼쪽에 있는 프레임은 중수로 노심을 구성하고 있는 중요 부분 (assembly)들의 목록을 나타내고 있다. 각 assembly의 이름을 선택하면 중앙에 위치한 navigation 창에서 해당 assembly의 3차원 형상을 나타내준다. 또한 이 navigation 창에서는 각 부품에 대한 간단한 정보를 알아볼 수 있으며 원하는 각도로 회전 또는 이동시켜 볼 수도 있다. 오른쪽에 위치한 프레임은 해당 assembly에 대한 간단한 도면정보 및 위치정보를 데이터베이스와 연결하여 탐색하고 결과를 나타내는 기능을 수행한다. 탐색창은 상위에 위치한 "Drawing"과 "Position"의 두 버튼으로 각각 연결되어 있다.

그림 3 ~ 그림 6은 PHWR 노심 3차원 형상 프로그램이 갖고 있는 다양한 기능 중 일부를 소개하고 있다. 그림 3은 전체적으로 표시된 중수로 노심에서 원하는 부품의 도면을 검색하고자 할 경우, 우측 프레임에서 부품을 선택하는 화면을 보여주고 있으며, 그림 4는 선택된 부품에 대한 설계도면 검색 결과를 보여주고 있다. 이때 도면 검색을 원하는 부품은 도면번호 또는 부품명 등의 여러 가지 옵션을 이용하여 선택할 수 있으며 설계도면 뿐 아니라 3차원 형상도 나타낼 수 있다.

그림 5는 좌측 assembly 목록에서 Calandria 내부를 선택했을 때 이 부분의 위치정보와 함께 3차원 형상으로 표시한 결과 화면이며, 그림 6은 이 중 내부의 특정 component를 선택했을 때의 2-D Map 결과 화면이다.

이외에도 PHWR 노심 3차원 형상 프로그램은 표 1에 나열한 다양한 중수로 노심 부품에 대하여 3-D 형상정보와 설계도면 그리고 design manual 등을 제공하며, 간단한 조작을 통해 형상정보의 줌 인, 줌 아웃, 회전, 이동, 투명화 작업, 위치정보 검색 등의 기능을 제공한다.

### 3.2 GFP/DN 시스템 DB 관리 프로그램

GFP/DN 시스템 DB 관리 프로그램은 기본적으로 웹 서비스와 DB 서비스를 제공하는 서버와 이에 접속하여 정보를 얻는 클라이언트로 이루어진다. 웹 서버로는 Microsoft 서버계열의 기본 서버인 IIS (Internet Information Service)를 이용하고, DB 서버로는 MS SQL 2000을 이용하며, 본 프로그램의 데이터베이스는 “COSMOS”라는 데이터베이스 아래에 총 8개의 테이블로 구성되어 있다.

Internet Explorer를 이용하여 데이터베이스 프로그램에 접속한 후 로그인하면 원하는 데이터베이스에 raw data를 자동 및 수동으로 입력할 수 있고 입력한 데이터에 근거하여 계산된 결과도 바로 확인 할 수 있다. 그림 7은 GFP/DN 데이터베이스에 입력한 데이터에 근거하여 계산된 각 채널 별 GFP/DN 계산 결과이며, 그림 8은 이런 결과를 채널별 2-D map 보기로 검색하여 표시한 결과이다.

이외에도 GFP/DN 시스템 DB 관리 프로그램은 날짜별, 채널별, 계측기별 등의 여러 옵션을 이용하여 데이터베이스 결과를 검색할 수 있으며, 각각의 결과를 Excel 파일로 변환하여 저장할 수도 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 중수로 노심의 운전 및 정비용 3차원 CAD 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 중수로심 본체의 전체적인 형상과 기능의 표현은 물론이고 원자로 내부의 기기구조물과 각각의 채널 (channel), 헤더 (header) 그리고 피더 (feeder) 등의 각 부품에 대한 형상과 기능에 대해서도 3차원 CAD 기법을 이용하여 시각적인 정보를 제공해주며 아울러 원자로 내외 구성품에 대한 설계도면, 운전용 자료 및 이력, 기타 제반 문서 등의 데이터베이스와 연계하여 사용자의 요구 시 관련자료의 신속한 접근과 정확한 상황판단으로 원자로 운전 업무처리에 효율성을 높일 수 있도록 하였다. 개발된 중수로 노심 3차원 CAD 시스템은 크게 “PHWR 노심 3차원 형상 프로그램”과 “GFP/DN 시스템 데이터베이스 관리 프로그램”의 두 부분으로 구성되어 있으며 이 두 부분이 상호 연계되어 작동하도록 개발되었다. 한편, 본 시스템은 중수로 노심의 구성부품들을 시각적인 형상으로 제공하기 때문에 발전소 내 운전원 훈련 시 효율적인 교육자료로 이용 될 수 있을 뿐만 아니라, 실제 원전 운전자료들을 데이터베이스로 저장하기 때문에 비상운전상태 시, 신속한 원전 운전 후속조치의 자료 및 분석 결과 등을 용이하게 제공할 것이다.

## 후 기

본 논문은 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

## 참 고 문 헌

- [1] “월성원자력 2,3,4 호기 최종안전성 분석보고서”, 한국전력공사, 1996.

- [2] D. Jenkins and M. Gold, "Reactor Fuelling Simulations Program-RFSP part 1- Program Description", AECL internal report TDAI-229 (1980).
- [3] "NUCIRC-MOD1.505, User's Manual", TTR-516, Dec. 1993

표 1 중수로 노심 3차원 형상 프로그램에서 구현된 노심 부품

구분	품목	분야
1	원자로 본체 (Calandria Shell)	기계
2	원자로 내부 기기 구조물	기계
3	Reactivity Control Unit (Vertical 73 set, 제어장치 포함)	기계, 계측, 노심
4	Reactivity Control Unit (Horizontal 13 set)	기계, 계측, 노심
5	Radiation Monitor (Ion Chamber 6 set)	기계, 계측, 노심
6	Reactivity Mechanism Deck 본체	기계
7	Reactivity Mechanism Deck 계기 (73 set) 및 계장 Line	계장
8	Fuel Channel (A, C Side 각 380 set = 760 set)	기계
9	Lower Feeder Pipe (A, C Side 각 380 set = 760 set)	배관
10	Upper Feeder Pipe (A, C Side 각 380 set = 760 set)	배관
11	Feeder Header (A, C Side 각 2 set = 4 set)	기계
12	원자로 노심 구성품 및 운전자료 연계 프로그램 일체	노심
13	기타	노심

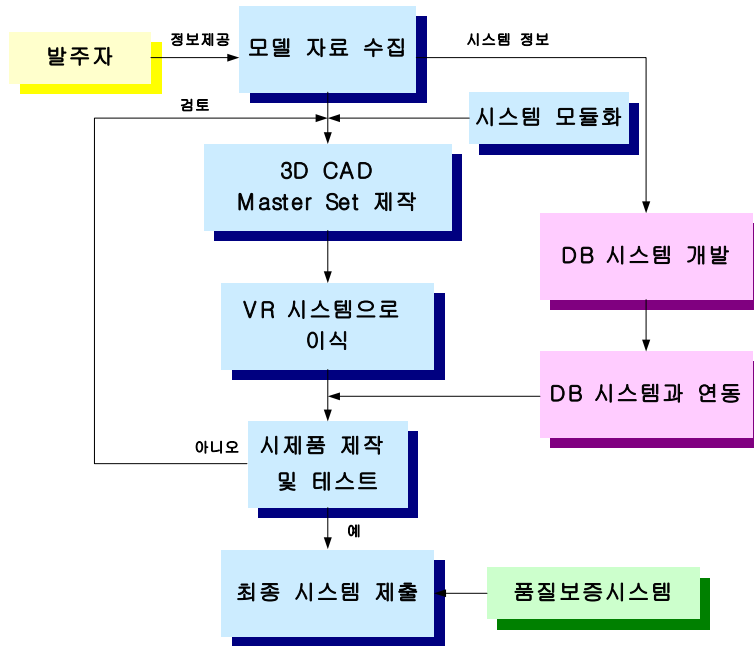


그림 1 중수로 노심 3차원 형상 프로그램의 개발 절차



그림 2 중수로 노심 3차원 형상 프로그램의 개발 절차

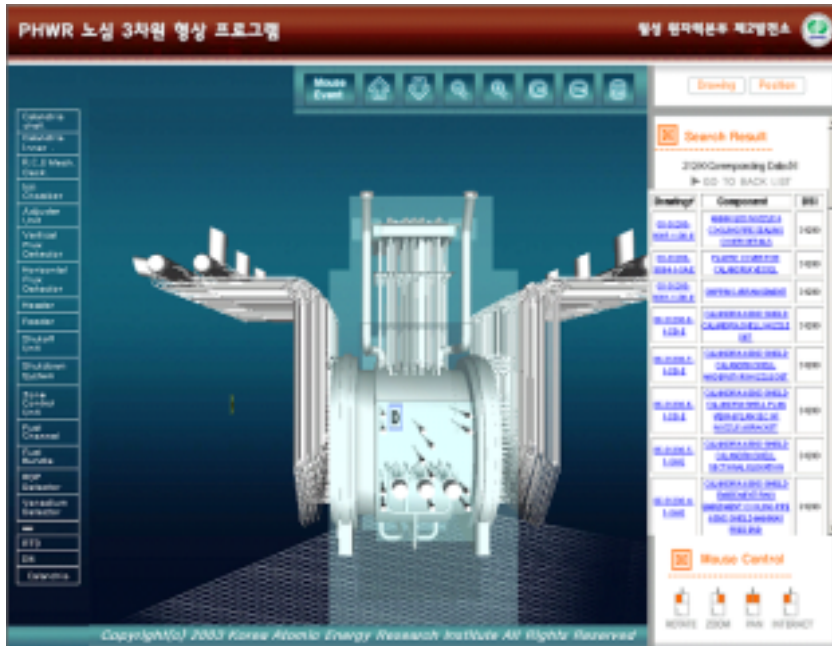


그림 3 설계도면 선택 화면



그림 4 선택된 부품의 설계도면





그림 5 Calandria 내부의 형상 및 세부 위치 정보 검색 화면

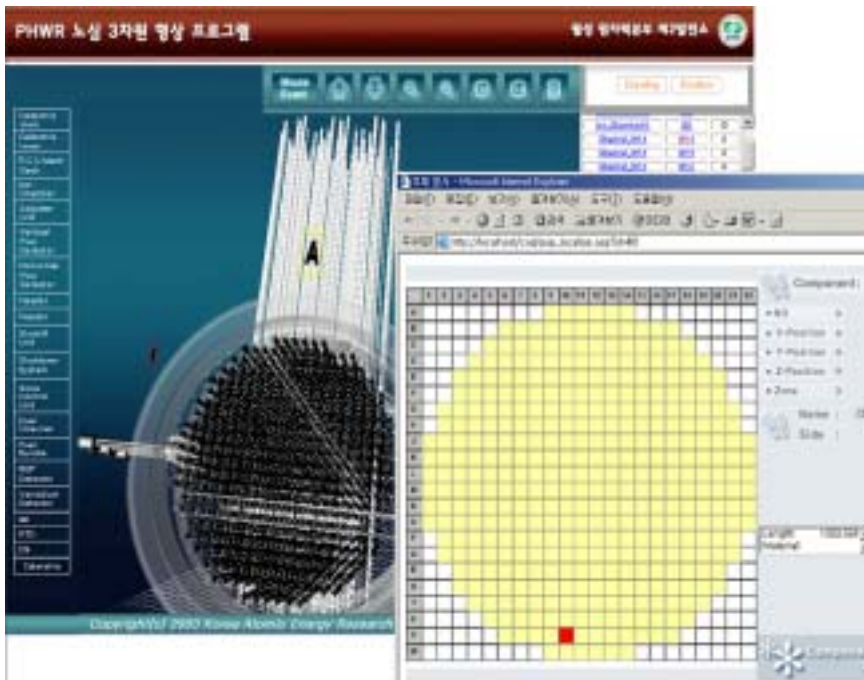


그림 6 Calandria 내부 설계 부품의 2-D Map 검색 결과 화면

Stat	용어	Loop 1	Loop 2
Scan Date	2002-11-14	Pr. Power	100%
Scan Time	03 sec.	Avg. Count	1045.15
Full Ch. #	0	PRD	1

GFP	F-132	Se-138	Se-135	Er-60	Se-137Po-210	Δ-137	136L-210
0	0	0	0	1	0		

Count	CPS	PER	DFR	DDFrac	LDR	PDR	HDR
1000	200.40	1.0	1.00	1.49	1.52	1.21	

Channel	Position	Count	CPS	PER	DDFrac	LDR	PDR	HDR	Remark
J00	1	3870	81.44	0.88	0.94	0.77	0.96	0.94	
T12	2	8727	114.58	0.88	0.98	0.87	0.97	0.98	
M13	3	5732	89.24	0.88	0.95	0.81	0.77	1.01	
J20	4	6774	126.88	1.14	1.08	1.00	0.97	0.96	
K21	5	8741	126.88	1.08	1.08	0.97	0.97	1.02	
G18	6	7467	146.92	1.28	1.19	1.11	1.1	0.82	
M15	7	1888	121.32	1.18	1.1	1.08	1.01	0.98	
T15	8	6755	123.18	1.01	0.98	0.94	0.91	0.98	
E18	9	6227	124.54	1.08	0.98	0.96	0.89	0.78	
U12	10	5488	109.78	0.92	0.97	0.94	0.74	0.96	
C16	11	1685	171.3	1.02	0.97	0.90	0.97	0.81	
D21	12	1829	126.5	0.88	0.93	0.88	0.8	0.88	
F19	13	7467	146.94	1.28	1.19	1.14	1.12	1	
S01	14	1789	271.18	0.23	0.22	0.21	0	1.21	+
O19	15	7584	144.58	1.21	1.15	1.1	1.08	0.95	
B18	16	6877	125.42	1.01	0.96	0.97	0.86	0.94	

그림 7 GFP/DN 입력자료로부터 계산된 결과 화면

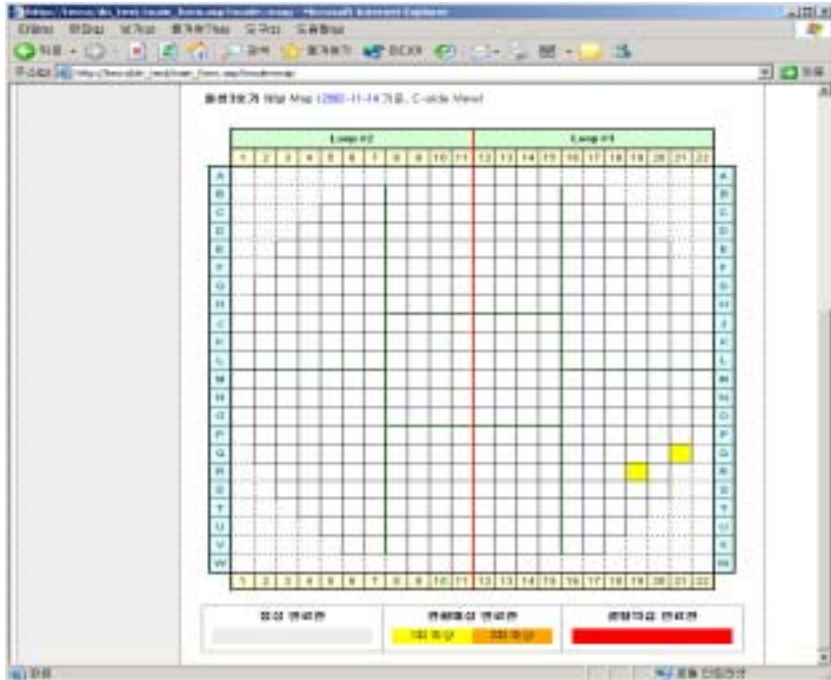


그림 8 GFP/DN 결과의 채널 Map 보기 검색 화면