

웹기반 원전 동력구동밸브 안전성 평가 시스템 개발

배진효* · 이광남* · 김원민* · 박성근** · 이도환** · 김재천** · 홍진수***

(A Development of Web-based Safety Evaluation System of Motor-Operated-Valve in Nuclear Power Plant)

J.H. Bae, K.N. Lee, W.M. Kim, S.K. Park, D.H. Lee, J.C. Kim and J.S. Hong

Key Words : Motor-Operated-Valve(모터구동밸브), MOVIDIK(Motor-Operated -Valve Integrated Database Information of KEPCO), Web(웹), JAVA(자바)

Abstract

A web-based client/server program, MOVIDIK(Motor-Operated-Valve Integrated Database Information of KEPCO) has been developed to perform a design basis safety evaluation for a motor-operated-valve(MOV) in the nuclear power plant. The MOVIDIK consists of seven analysis modules and one administrative module. The analysis module calculates a differential pressure on the valve disk, thrust/torque acting at a valve stem, maximum allowable stress, thermal-overload-relay selection, voltage degradation, actuator output and margin. In addition, the administrative module manages user information, approval system and code information.

MOVIDIK controls a huge amount of evaluation data and piles up the safety information of safety-related MOV. The MOVIDIK will improve the efficiency of safety evaluation work and standardize the analysis process for the MOV.

1. 서 론

과학기술부 규제권고사항⁽¹⁾에 따라 한전은 1999년부터 원전 안전관련 모터구동밸브에 대한 안전성 평가를 수행 중에 있다. 모터구동밸브 안전성 평가는 모터구동밸브 및 관련계통에 대한 설계기준조건을 분석한 후, 설계기준 조건에서 진단시험을 병행하여 밸브의 구조적 건전성과 운전여유도를 평가하는 역무이다.

모터구동밸브에 대한 안전성 평가가 진행됨에 따라 효율적으로 안전성 평가업무를 수행하고, 체계적으로 평가자료를 관리할 필요성이 대두되었다. 특히 모터구동밸브 안전성 평가는 국내 전 발전소에서 많은 인력이 투입되어 동시다발적으로 수행되므로, 국내 전 발전소를 포괄할 수 있는 모터구

동밸브 분석용 전산시스템의 구축이 필요하였다. 한전에서는 1999~2000년에 동력 구동밸브 안전성 평가에 대한 기술기준을 확립하였으며⁽²⁾, 이를 효과적으로 전산화하여 업무의 효율성을 극대화하고자 하였다. 이를 위하여 한전에서는 모터구동밸브 안전성 평가 시스템인 MOVIDIK(Motor-Operated-Valve Integrated Database Information of KEPCO)을 개발하였다.

MOVIDIK은 Web기반에서 프로그래밍 되었기 때문에 설계기준 분석업무의 시간적, 공간적제약을 해결하였다. 또한 객체 지향 언어인 JAVA를 사용하여 소프트웨어의 재사용성을 증대 시키고, 시스템 운영 및 유지보수의 편의성을 도모하였다. 모터구동밸브 설계기준 분석 시에는 많은 엔지니어링 관련 지식들을 해석하여야 하며 이러한 연산기능은 JAVA 코드에 의하여 해결하였다. 사용자 인터페이스는 JSP(Java Server Page)를 사용하여 동적 웹 페이지를 구현하였다.

본 연구에서는 모터구동밸브 안전성 평가업무 중 설계기준분석 업무를 전산화함으로써 설계기준

* (주)한국전력기술 전력기술개발 연구소

** 한국전력 전력연구원

*** ㈜아이윙

분석시 효율성과 신뢰성을 향상시키고 평가절차의 표준화를 도모하며 평가자료의 활용성을 제고하였다.

2. 설계기준분석

설계기준이란 모터구동밸브가 전 수명기간 동안 다양한 운전 조건하에서 그 고유기능을 수행할 수 있도록 설계되어야 하는 기준이다. 설계기준 분석에서는 설계기준 조건에서 해당 모터구동밸브의 구조적 건전성과 여유도를 이론적으로 평가한다.

원전 안전관련 모터구동밸브의 유형은 크게 게이트 밸브, 글로브 밸브 그리고 버티플라이 밸브로 분류된다. 설계기준분석은 상기한 세가지 유형의 밸브에 대하여 모두 수행되어지며, 계통 분석, 쓰러스트/토크 분석, 취약부 분석, 전기제어 분석, 열동계전기 분석, 구동기 성능 분석 및 여유도 분석⁽⁴⁾ 등 총 7가지 분석을 수행한다. 아래에는 각 분석 분야에 대하여 기술하였다.

2.1 계통 설계기준 분석

계통설계기준 분석에서는 밸브 운전모드 중 최대 차압이 작용하는 운전모드를 결정하여 설계기준 운전상태를 결정한다. 이때 밸브도면, 최종 안전성 분석 보고서, 운전절차서, 배관 및 계측도면, 계통설명서, 밸브 설계자료 및 계통 운전상태 자료 등을 참조하여 밸브가 설치된 계통을 단순화하고 밸브의 운전상태별 유량과 차압을 선정한다.

밸브가 단순배관에서 운전될 경우에는 단순 베르누이 방정식을 적용하여 밸브 전 후단의 차압을 계산한다. 이러한 차압계산방식을 표준차압계산 방식이라 칭한다. 밸브가 복합배관에서 운전되거나 밸브유형이 버티플라이 밸브인 경우에는 EPRI SFM⁽⁵⁾ 혹은 상세차압계산 방법을 사용하여 밸브 전후단의 차압 및 유량을 결정한다.

2.2 쓰러스트/토크 분석

게이트밸브와 글로브 밸브에서는 패킹마찰력, 밸브 전후단의 차압에 의한 힘 그리고 피스톤 효과에 의한 힘을 조합하여 닫힘 및 열림운전에 요구되는 최소요구 쓰러스트, T_{hr} 을 계산한다. 패킹 마찰력은 일반적인 경우 스템직경에 비례하며, 피스톤 효과는 밸브 스템에 작용하는 압력과 스템직경에 비례한다. 또한 게이트 밸브에서 차압에 의한 힘은 디스크 전단 및 후단에 작용하는 압력차이, 디스크-시트면의 마찰계수와 오리피스 면적에 비례한다. 글로브 밸브에서 차압에 의한 힘은 밸브 전

후단의 차압과 디스크 단면적에 비례한다.

버티플라이 밸브에서 씨팅토크와 언씨팅 토크는 디스크가 씨트면에 조임에 의하여 나타나는 씨팅 토크, 베어링 마찰에 의한 베어링 토크 그리고 닫힘상태에서 밸브 전후단의 수위차이에 의해 나타나는 정수력토크를 고려하여 계산한다. 버티플라이 밸브에서는 행정중에 디스크 후단압력이 급격히 감압되어 동수력학적 힘이 증가하므로 동수력 토크를 반드시 고려하여야 한다. 동수력토크는 밸브 크기가 증가할수록 중요한 인자로 작용한다. 동적 토크는 동수력 토크, 허브마찰토크, 패킹토크와 베어링토크를 고려하여 밸브행정별로 계산한다. 버티플라이 밸브에서는 씨팅토크, 언씨팅 토크 그리고 전술한 동적 토크를 비교하여 닫힘/열림행정에 대한 최대치를 최소 요구 토크, T_{qr} 로 선정한다.

2.3 취약부 분석

취약부 분석에서는 각 밸브 부품에 대하여 주어진 하중조건에서 견딜 수 있는 구조적 한계 하중을 결정한다. 게이트 밸브의 주요 분석부위는 스템, 스템 너트, 요크다리, 요크볼트-플랜지, 구동기 볼트-플랜지, 요크 클램프, 스템과 디스크 연결부(T-Head 연결부), 보닛 넥 및 보닛 볼트이다. 버티플라이 밸브의 분석부위는 브라켓, 구동기 볼트, 샤프트, 전단 핀 및 스템 키이다. 상기한 각 부위에 대하여 아래에 기술한 적절한 응력들을 조합하여 허용응력을 계산한다.

- 토크에 의한 굽힘 응력
- 토크에 의한 전단 응력
- 쓰러스트에 의한 수직 응력
- 지진에 의한 굽힘 응력
- 지진에 의한 수직 응력
- 지진에 의한 전단 응력
- 좌굴응력

게이트 밸브와 글로브 밸브에 대해서는 각 부품의 허용 쓰러스트 중 최소값을 최대허용 쓰러스트, F_{wla} 로 결정하며, 버티플라이 밸브에서는 각 부품의 허용토크 중 최소값을 최대허용 토크, T_{qWLA} 로 결정한다.

2.4 전기제어 분석

전기제어 분석은 계통전압과 분석대상 MOV의 전압을 평가하는 작업을 의미한다. 이를 위하여 Load Flow 계산서를 활용하여 발전소 전력계통 상세 모델링하여 다음과 같은 사항을 고려하여 모터

구동밸브에 입력되는 최소전압, V_{min} 을 계산한다.

- 동시 기동, 운전, 대기 모터 조사
- 기동대상 모터 기동전류 및 기동역률 반영
- 분석대상 MOV 전압평가
- 케이ابل 저항, 규격, 길이, 배치, 및 온도 보정
- Thermal Overload Relay 저항 평가

2.5 열동 계전기 선정

원자력 발전소에 설치된 모터구동밸브의 열동계전기(Thermal-overload-relay)가 적절하게 선정되었는지 확인하여야 한다. 모터구동밸브의 운전성이 확보되어야 할 시기에 열동 계전기의 트립에 의한 모터구동밸브의 트립이 발생하지 않는지를 확인할 필요가 있다. 모터구동밸브의 운전성이 보장되지 않을 경우 열동 계전기는 재선정한다. 열동 계전기 평가 및 재선정은 IEEE 741-Standard Criteria for the Protection of Class 1E Power Systems and Equipment in Nuclear Power Generating Stations 를 참조하여 수행한다.

2.6 구동기 출력 분석

구동기 출력은 크게 모터 출력토크, 모터 입력 전압 구동기 효율 그리고 모터-스텸간의 기어비에 의하여 비례한다. 그외 인자로는 구동기가 설치된 환경온도등도 구동기 출력에 약간의 영향을 미친다. 위와같은 인자들을 고려하여 구동기 출력토크, $AOTQ_{DBC}$ 를 계산한다. 이때 구동기에 공급되는 전압은 2.4 절에 기술한 전기제어분석을 수행하여 계산한다. 현재 국내 발전소에는 Limitorque 제품의 구동기가 주종을 이루고 있으며 그외에 Rotork, Joucmatic 등의 구동기도 존재한다. MOVIDIK에서는 Limitorque 구동기에 대한 출력토크를 자동으로 계산할 수 있으며, 그외의 구동기에 대해서는 자료 구동기 설계정보의 관리를 위하여 사용할 수 있다.

스텸팩터는 구동기 출력 토크와 출력 쓰러스트의 관계를 묘사하는 팩터로서 스텸형상(스텸지름, 스텸 피치, 스텸리드와 스텸의 나사산 형태)과 스텸-스텸너트 사이의 마찰계수에 의해 결정된다. 구동기 쓰러스트, $AOTH_{DBC}$ 는 구동기 출력토크를 스텸팩터로 나누어 구한다.

2.7 여유도 분석

여유도란 설계기준 조건에서 MOV가 운전되기 위해 필요한 힘과 실제 제공 가능한 힘의 차이이다. 여유도는 각종 불확실성을 포함하여 계산한다. 구동기의 출력과 요구 쓰러스트는 불확실성을 보

이는데 이러한 불확실성에는 불규칙적 불확실성(Random Uncertainty)과 규칙적 불확실성이 있다. 불규칙적 불확실성에는 진단 장비와 센서 불확실성, 토크 스위치 반복성과 같이 임의적으로 나타나는 불확실성이며, 규칙적 불확실성(Biased Uncertainty)은 부하율(ROL: Rate of Loading), 스프링 팩 풀림(SPR: Spring Pack Relaxation)과 스텸 윤활 저하(SLD: Stem Lubrication Degradation)같은 종속적인 불확실성(DE: Dependent Errors)이다.

여유도는 열림행정과 닫힘행정에 대하여 각각 계산하며, 게이트/글로브 밸브에서는 쓰러스트에 대한 여유도, M_{Th} 를 버터플라이 밸브에서는 토크에 대한 여유도, M_{Tq} 를 결정한다.

$$Th_A = \text{Min}[AOTH_{DBC}, F_{spring}, F_{WLA}] \quad (1)$$

$$Tq_A = \text{Min}[AOTQ_{DBC}, Tq_{spring}, Tq_{WLA}] \quad (2)$$

$$M_{Th} = \frac{Th_A / AF_{A,Th} - Th_R \times AF_{R,Th}}{Th_R \times AF_{R,Th}} \quad (3)$$

$$M_{Tq} = \frac{Tq_A / AF_{A,Tq} - Tq_R \times AF_{R,Tq}}{Tq_R \times AF_{R,Tq}} \quad (4)$$

여기서 Th_A , Th_R , Tq_A , Tq_R , $AF_{A,Th}$, $AF_{R,Th}$, $AF_{A,Tq}$ 및 $AF_{R,Tq}$ 는 각각 최대유용 쓰러스트, 최소요구 쓰러스트, 최대유용 토크, 최소요구 토크, 최대유용 쓰러스트 조정계수, 최소요구 쓰러스트 조정계수, 최대유용 토크 조정계수 및 최소요구 토크 조정계수를 의미한다. 또한 F_{spring} 과 Tq_{spring} 은 스프링팩 설정치로서 제작사 제공값을 사용한다.

3. 시스템 설계

2장에서 기술한 모터구동밸브 설계기준분석절차를 전산화하기 위하여 MOVIDIK을 설계하였다. 설계기준분석 절차 및 자료분석을 통해 모터구동밸브 안전성 평가 중 설계기준분석에 사용되는 주요 엔터티 및 속성을 추출하였다.^(5,6) 추출된 엔터티 및 속성을 기초로 하여 DFD(Data Flow Diagram)를 작성하였으며 Fig. 1에는 DFD의 배경도를 나타내고 있다. 각종 설계기준분석 자료 및 절차서 분석을 통해 추출된 엔터티 및 속성과 업무흐름에 따른 자료 흐름도를 더욱 세분화한 뒤 물리적인 데이터베이스 구조와 가장 가까운 ERD(Entity Relationship Diagram)를 Fig. 2와 같이 작성하였다. 작성된 DFD와 ERD를 기초로 하여 입출력 화면을 작성하였으며, 계통 설계기준 분석에 대한 예제

입력화면을 Fig.3 에 나타내었다.

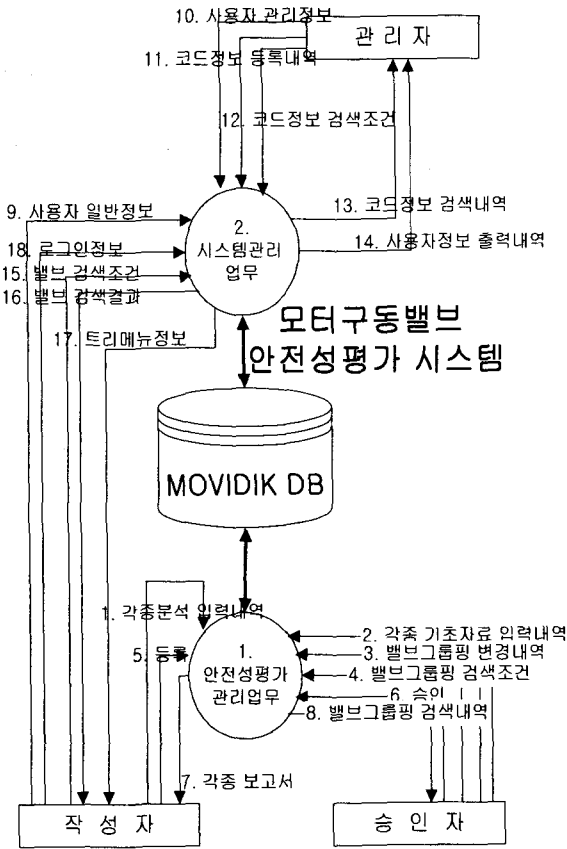


Fig. 1 Data flow diagram of MOVIDIK

프로그램 설계시 MOVIDIK 프로그램을 크게 설계기준 분석모듈과 시스템 모듈로 구분하였다. 설계기준 분석모듈에서는 Table 1에 나타낸 바와 같이 2장에서 기술한 분석업무를 수행하고, 웹상에서 해석이 불가능한 일부 업무에 대하여는 결과값을 입력하도록 설계하였다.

Table 2에는 MOVIDIK의 설계기준 분석모듈과 시스템 모듈을 나타내었다. 설계기준 분석모듈에는 2장에서 기술한 설계기준 분석업무 외에도 유사밸브에 대한 분석결과를 공유할 수 있도록 그룹핑 개념을 도입하였으며, 웹상에서 직접 설계기준 분석 결과를 보고서로 출력할 수 있는 보고서 출력 모듈을 탑재하였다. 시스템 관련모듈은 사용자 관리 모듈, 코드정보 관리 모듈 및 결재관련 모듈로 구성하였다. 결재모듈에서는 기 승인된 문서에 대하여 사용자가 임의로 삭제 및 변경을 가할 수 없도록 구현하여 데이터의 일관성을 유지하였다.

Table 1 Capability of MOVIDIK

분야	분석가능(연산)	입력가능
계통설계분석	표준차압 분석가능	YES
쓰러스트분석	YES	YES
취약부분석	YES	YES
전기제어분석	ELMS 코드에 의한 계산	YES
열동계전기분석	수작업	YES
구동기 분석	Limitoroque 구동기 분석가능	YES
여유도 분석	YES	YES

Table 2 Detail of MOVIDIK module

설계기준 분석 모듈	시스템 모듈
밸브등록 및 그룹핑 모듈	사용자 관리모듈
보고서 출력 모듈	코드정보 관리모듈
계통설계기준 분석 모듈	결재처리모듈
쓰러스트/토크 분석 모듈	
취약부 분석 모듈	
전기제어 분석 모듈	
열동계전기 분석 모듈	
구동기 성능 분석 모듈	
여유도 분석 모듈	

4. 시스템 환경

MOVIDIK은 Web 기반에서 프로그래밍이 되었으므로 안전성 평가업무의 시간적, 공간적 문제점을 해결하였다. 또한 객체 지향 언어인 JAVA를 사용하여 소프트웨어의 재사용성을 증대하고, 시스템 운영 및 유지보수의 편의성을 도모하였다. MOVIDIK 상세제원은 다음과 같다.

- OS : MS Windows 2000 Server
- DBMS : RDBMS (Oracle 8i)
- Web Server : RESIN 1.2.5
- 개발언어 : JAVA 1.3/ JSP 1.2
- 개발방식 : Web
- 통신방식 : TCP/IP & HTTP
- 웹브라우저 : Internet Explorer 5.0 이상

MOVIDIK의 네트워크 구성을 Fig. 4에 나타내었다. MOVIDIK 서버는 전력연구원 내에 위치하고

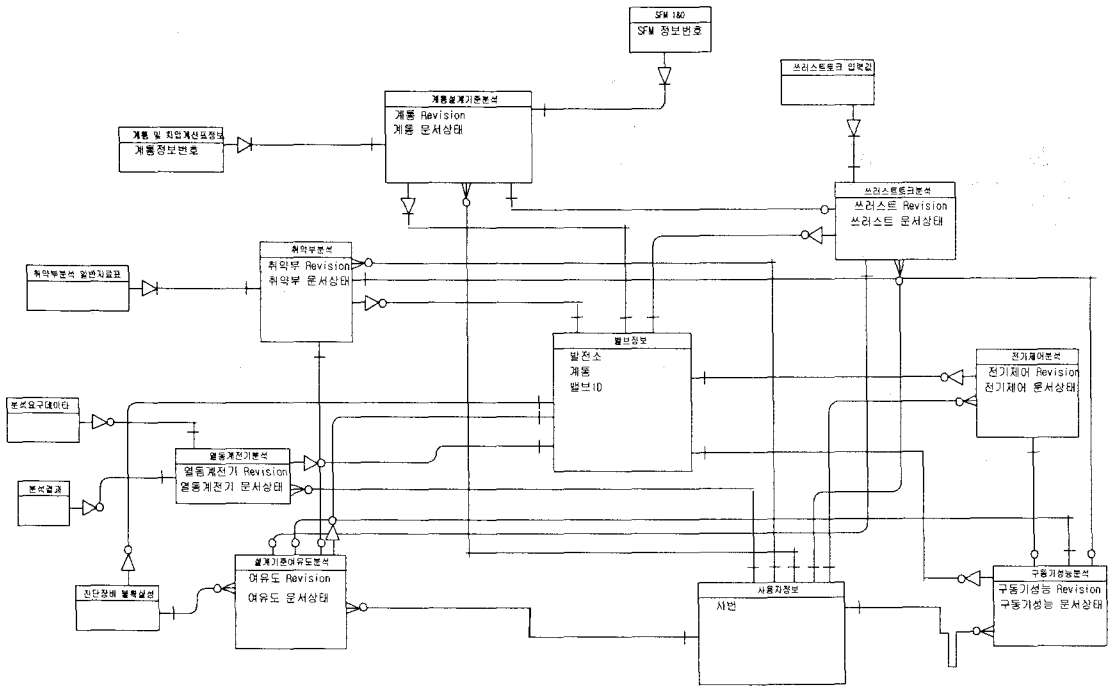


Fig. 2 Entity relationship diagram of Movidik

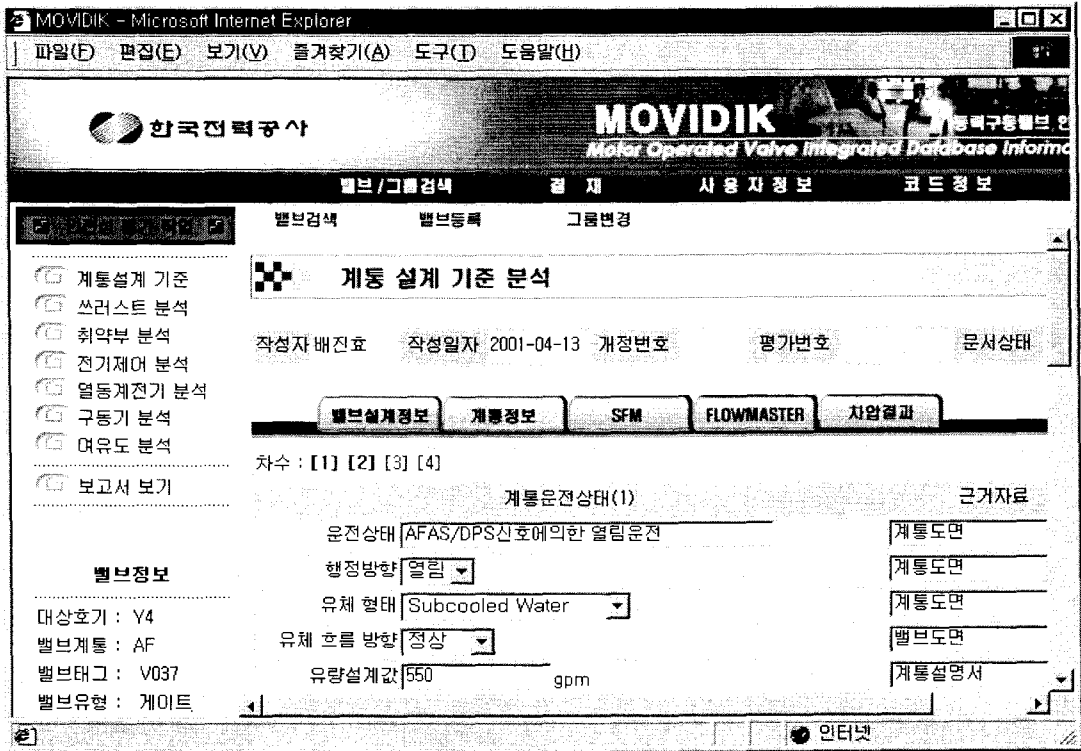


Fig. 3 Input menu of system analysis

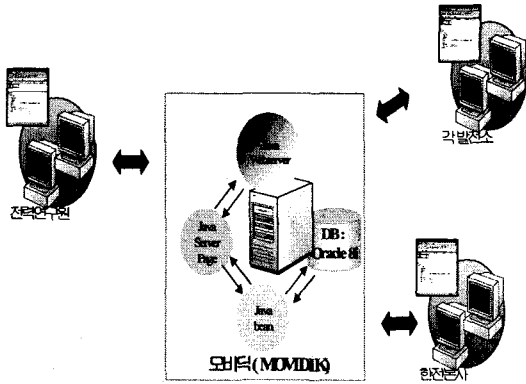


Fig. 4 Configuration of MOVIDIK network

있으며 각 발전소에서는 약간의 환경설정 만으로 쉽게 MOVIDIK 서버에 접근할 수 있다. MOVIDIK 은 Fig. 4 에 보는 바와 같이 정보를 저장하는 데이터 베이스와 이를 관리하는 웹 응용프로그램으로 구성되어 있다.

5. 적용 결과 및 고찰

한전에서는 상기한 MOVIDIK 프로그램을 활용하여 동력구동밸브 안전성 평가업무를 수행하였다. 2001년 4월 현재 고리 2호기, 영광 4호기 및 울진 2호기에서 각각 30대, 38대 및 59대의 밸브에 대하여 설계기준 분석을 수행하였으며, 각 대상호기에서 수행한 밸브들에 대한 상세정보를 Table 3에 요약하였다. 대상밸브는 게이트 밸브, 글로브 밸브 및 버터플라이 밸브를 모두 포함하고 있으며, 구동기 제작사도 다양하였다.

Table 3 List of design basis analysis with MOVIDIK

대상호기: 고리 2호기	
그룹 수	10
밸브 수	30 대
밸브유형	게이트(25) 글로브(3) 버터플라이(2)
밸브 제작사	Velan (2)/W.H.(18)/Posi-Seal(2)/Anchor-Darling(8)
구동기 제작사	Limitorque
대상호기: 울진 2호기	
그룹 수	9
밸브 수	38 대
밸브유형	게이트(38)
밸브 제작사	Vannes Darling(4) Velan Rateau(34)
구동기 제작사	Joucmatic(38)

대상호기: 영광 4호기	
그룹 수	24
밸브 수	59 대
밸브유형	게이트(28) 글로브(21) 버터플라이(10)
밸브 제작사	Velan(59)
구동기 제작사	Limitorque(53) Rotork(6)

6. 결론

본 연구에서는 모터구동밸브 안전성 평가 업무 중 설계기준분석 업무를 수행할 수 있는 MOVIDIK (Motor Operated Valve Integrated Database Information of KEPSCO)을 개발하였다. MOVIDIK 은 Web 기반에서 프로그래밍이 되었으므로 안전성 평가의 시간적, 공간적 문제점을 해결하였다. 또한 객체 지향언어인 JAVA 로 프로그래밍 되어 소프트웨어의 재사용성을 증대하고, 시스템운영 및 유지보수시의 편의성을 도모하였다. 모터구동밸브 설계기준 분석에는 많은 관련 수식들을 해석하여야 하며 연산기능은 JAVA 코드에 의하여 해결하였다. MOVIDIK 을 이용하여 원전 안전관련 모터구동 밸브에 대한 총괄적인 데이터베이스의 구축이 가능하고, 설계기준 분석을 일관성 있게 수행할 수 있게 되었다. 이로부터 원전 안전 관련 주요기기의 하나인 모터구동밸브의 신뢰성을 제고할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) 과학기술부 규제권고사항, 1997, 원검 71233-205.
- (2) 김범년 외, 1999, "시범원전 동력구동밸브 안전성 평가 및 진단기술 개발", KEPRI TR.99NP01.C1999.777.
- (3) EPRI, 1994, System Flow Model Description Report, TR-103225.
- (4) W. Grant, R. Keating, 1990, "Application guide for motor-operated valves in nuclear power plants", EPRI NP-6660-D Research Project 2814-6.
- (5) Candace C. Fleming, Barbara von Halle, 1989, "Handbook of Relational Database Design", Addison-Wesley Publishing Company.
- (6) 이주현, 1993, "실용 소프트웨어 공학론 -구조적 객체지향기법의 응용사례 중심으로", 법영사.