

원자로 압력용기의 건전성평가를 위한 인터넷기반 협업시스템의 개발

김종춘[†] · 최재봉^{*} · 김영진^{*} · 최영환^{**}

Development of Internet-based Cooperative System for Integrity Evaluation of Reactor Pressure Vessel

Jong-Choon Kim, Jae-Boong Choi, Young-Jin Kim and Young-Hwan Choi

Key Words : Cooperative System(협업시스템), Virtual Reality Environment(가상현실환경), Web-database(웹 데이터베이스), Virtual Network Computing(가상 네트워크 컴퓨팅), Enterprise Resource Planning (전사적 자원관리), Fitness for Service(적합성평가), Agent Program(에이전트 프로그램)

Abstract

Since early 1950's fracture mechanics has brought significant impact on structural integrity assessment in a wide range of industries such as power, transportation, civil and petrochemical industries, especially in nuclear power plant industries. For the last two decades, significant efforts have been devoted in developing defect assessment procedures, from which various fitness-for-purpose or fitness-for-service codes have been developed. From another aspect, recent advances in IT (Information Technologies) bring rapid changes in various engineering fields. IT enables people to share information through network and thus provides concurrent working environment without limitations of working places. For this reason, a network system based on internet or intranet has been appeared in various fields of business. Evaluating the integrity of structures is one of the most critical issues in nuclear industry. In order to evaluate the integrity of structures, a complicated and collaborative procedure is required including regular in-service inspection, fracture mechanics analysis, etc. And thus, experts in different fields have to cooperate to resolve the integrity problem. In this paper, an internet-based cooperative system for integrity evaluation system which adapts IT into a structural integrity evaluation procedure for reactor pressure vessel is introduced. The proposed system uses Virtual Reality (VR) technique, Virtual Network Computing (VNC) and agent programs. This system is able to support 3-dimensional virtual reality environment and to provide experts to cooperate by accessing related data through internet.

1. 서 론

전세계 최초로 영국 콜더홀(Calder Hall) 원자력

[†] 성균관대학교 대학원기계공학부
E-mail : jochkim@safes.skku.ac.kr
TEL : (031)290-5277 FAX : (031)290-5276

^{*} 성균관대학교 기계공학부

^{**} 한국원자력안전기술원

발전소가 가동을 시작한 이후로 원자력발전은 지난 50년동안 전력의 주요자원이다. 하지만 원자력 발전소에서 발생하는 사고는 막대한 경제적 손실 및 인명 피해를 초래할뿐 아니라 최근에는 사회문제화되는 등 갈수록 그 방지대책의 중요성이 부각되고 있다. 따라서 사고방지를 위한 원자력 발전소 가동중 건전성의 평가 및 유지기술은 원자력 발전소 운영상의 핵심기술로 분류되고 있다[1, 2].

원자력 발전소에 대해서는 주기적인 비파괴 검

사가 수행되어야 하며 만일 결함이 발견되면 ASEM Sec. XI[3]과 같은 엄격한 규제 코드에 따라 평가하게 된다. 이러한 규제 코드는 전문가만이 처리할 수 있는 복잡한 계산 절차를 포함하고 있어 실제로 결함의 건전성평가에 많은 시간과 비용이 요구된다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 소프트웨어가 개발되고 있다[2, 4, 5].

21 세기에는 정보 기술(Information Technology: IT)의 힘이 산업 환경을 빠르게 변화시키고 있으며, 새롭게 개발된 네트워크 기반의 소프트웨어는 전통적인 PC 기반의 소프트웨어를 대체하고 있어 비즈니스의 영역에도 커다란 영향을 미치고 있다. 최근에 대부분의 회사에서는 전사적 자원관리(Enterprise Resource Planning: ERP)시스템을 도입하고 있으며 ERP 시스템을 이용해 모든 비즈니스 관련 정보를 관리하고 있다. 전력회사에서도 원자력 발전소의 관리를 위해 ERP 시스템을 도입하여 운영의 효율성을 높이는데 성공하였다. 그러나 현재의 ERP 시스템은 금융, 인적 관리 등의 비용 관련 정보에만 적용되고 있으며 결함평가 기술과 같은 공학적인 의미의 전문지식은 아직 포함되어 있지 않다. ERP 시스템을 기기의 검사, 수리, 안전 등에 적용하기 위해서는 기존의 정보시스템에 공학지식을 포함시키는 것이 필요하다.

원자력 발전소는 수많은 기기와 배관들로 구성되며 대부분의 주요기기는 격납건물(Containment Building) 내에 위치하고 있다. 예컨대 원자로 압력 용기(Reactor Pressure Vessel: RPV), 가압기(Pressurizer)와 증기 발생기(Steam Generator: S/G) 등과 같은 주요기기는 방사선에 직접 노출되어 있기 때문에 격납건물에 의해 격리되어 있다. 따라서 격납건물 내부에서 사람이 오랫동안 작업을 하는 것은 매우 위험하다. 그러나 격납건물 내부에서 일하는 것은 원자력 발전소의 안전을 위해서는 필요하며 더 많은 전문가가 함께 기기를 조사하는 것이 안전을 위해서는 요구된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 가상 현실 환경을 도입하였다. 또한, 본 시스템은 파괴 역학 분석을 포함한 RPV의 결함평가를 위한 전문가 공학지식을 제공할 것이며 인터넷 상에서 많은 전문가는 가상 현실 기반의 정보를 공유할 수 있으며 원자력 발전소의 건전성 평가 과정을 수행할 수 있는 IT 기반의 협업시스템을 개발하였다.

2. 원자력 발전소 가상현실환경 개발

원자력 발전소 주요기기에 대한 주기적인 가동

중 검사와 안전성평가를 위해서는 위치별 형상에 대한 자료가 필요하다. 지금까지는 숫자상의 위치 정보 또는 2 차원도면에 이를 의존하는 경우가 대부분으로 결함의 위치 파악과 위치에 따른 역학적 상태파악이 매우 어려운 실정이다. 또한 이러한 정보의 저장, 관리와 네트워크를 통한 공유는 불가능한 상황이다. 최근에는 3 차원 모델이 설계와 제조업에 넓게 사용되고 있으며 가상현실(Virtual Reality)기술의 도입으로 가상현실환경(Virtual Reality Environment)이 인터넷기반의 시스템에서 적용되고 있다. 가상 현실은 3 차원 형상과 가시화를 효과적으로 제공할 수 있기 때문에 공학의 여러 가지 분야에서 활발하게 연구되고 있다. Matsubara 등[6]은 원자력발전소에 대한 가상학습 환경(Virtual Learning Environment; VLE)을 기반으로 작업자가 가상현실환경에서 냉각재 손실사고(Loss Of Coolant Accident; LOCA)에 대처하는 훈련을 위한 지능형 학습시스템(Intelligent Tutoring System; ITS)을 개발하였다. Knight 등[7]은 가상 방사능 영역을 개발하여 원자력 발전소의 기계와 운전원에 대한 방사선의 영향을 연구하였다.

본 논문에서는 사용자가 인터넷상에서 원자력발전소에 대한 가상체험을 할 수 있는 가상현실환경을 개발하였다. 개발된 가상현실환경은 설계자료를 기초로 하여 발전소 전체 사이트(site)부터 내부 주요기기까지 탐색하고 상호작용 할 수 있도록 구성하였다. 가상현실환경구성의 기본요소로 사용되는 3 차원 형상의 작성은 MicroStation[8]과 I-DEAS [9]을 사용하였으며 가상현실환경 구성은 Cosmo World[10]을 사용하였다. 개발된 가상현실환경은 원자력발전소 전체 사이트, 주요기기와 파이프 및 각종 장치들이 설치되어 있는 격납건물 그리고 원자로 압력용기나 증기발생기 등의 주요기기에 대해 구성하였다. 또한 건전성평가를 고려하여 주요기기에 대한 상세모델을 구성하였으며 관심부위에 대해서는 상호작용할 수 있도록 구성하였다. Fig. 1은 개발된 원자력발전소의 가상현실환경을 나타낸 것이다. 가상현실환경에서 사용자는 기계시스템에 대한 크기, 형상, 결함 상태 등을 파악할 수 있으며 필 요한 부품을 클릭(Click)함으로써 더 많은 자료들과 연결된다. 이를 위해서 가상현실환경에서 앵커 노드(Anchor node)와 자바스크립트(JavaScript)를 이용하여 사용자와 가상현실이 상호 작용할 수 있도록 개발하였다. 따라서 사용자는 가상현실환경 내에서 데이터베이스와 프로그램에 접속할 수 있다. 또한 개발된 가상현실환경은 웹 브라우저에서 실행되기 때문에 다양한 분



Fig. 1 Virtual Reality Environment for Nuclear Power Plant

야의 많은 전문가의 협업이 필요한 건전성 평가를 위한 공동작업 환경의 기본 플랫폼을 제공한다.

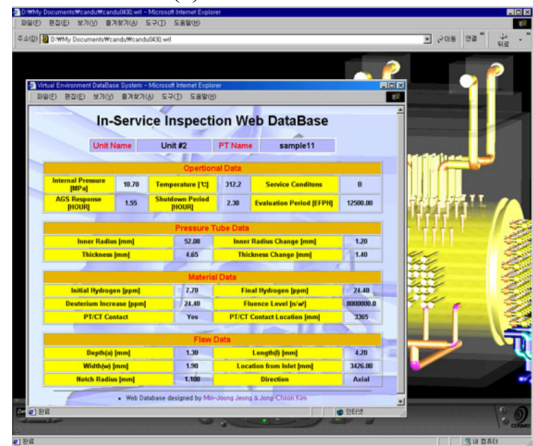
3. 웹 데이터베이스 시스템

웹 데이터베이스는 인터넷 사용자에게 널리 사용되고 있고, 요청받는 정보에 대해 다중 사용자의 동시 접근이 가능하다. 이러한 이유로 웹 데이터베이스는 원자력 산업에도 적용되기 시작하였다. Fujita 등[11]은 원자력발전소의 재료물성치 정보시스템인 Data-Free-Way 를 인터넷기반으로 개발하였다. Data-Free-Way 는 분산형 데이터베이스로 데이터가 서버에 분산 저장되어있으며 인터넷을 통해 쉽게 이용할 수 있다. 국내에서도 허용학 등[12]은 인터넷을 통한 크립물성 데이터베이스 검색시스템을 개발하여 수명평가, 해석시스템 또는 전문가시스템과 접목하는 연구를 수행하고 있다.

본 논문에서는 원자로 압력용기의 건전성평가를 위한 웹 데이터베이스 시스템을 개발하였다. 개발된 웹 데이터베이스는 일반적으로 결함 평가 과정에 필요한 데이터 즉, 가동중 검사 자료, 재료물성치, 기기 형상 데이터와 응력데이터 자료를 포함하고 있다. 웹서버(Web server)는 리눅스(Linux) 환경하에서 구축하였으며 웹 데이터베이스 구축에는 MySQL[13]과 PHP[14]를 사용하였다. 웹 데이터베이스 시스템은 클라이언트/서버 방식으로 구성하였으며 클라이언트와 서버 사이의 통신은 네트워크를 통해 인터넷에서 이루어진다. 기능적인 측면에서 서버는 데이터 처리와 관리, 통합유지/보수 등을 담당하며, 클라이언트인 사용자는 웹브라우저(Web browser)를 이용하여 데이터를 검색할 수



(a) Stress Database



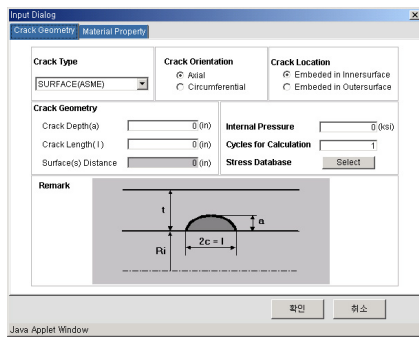
(b) In-Service Inspection Database
Fig. 2 Access to stress and ISI database in virtual reality environment

있다. 개발된 웹 데이터베이스는 사용자가 인터넷이 연결된 컴퓨터를 이용하여 웹 브라우저만으로 쉽고 빠르게 데이터를 검색하거나 입력할 수 있으며, 입력된 데이터는 모든 사용자에게 동시에 공유할 수 있어 전문가 협업작업에 적합하다. Fig. 2 는 가상현실환경과 연결된 웹 데이터베이스 시스템을 나타낸 것이다

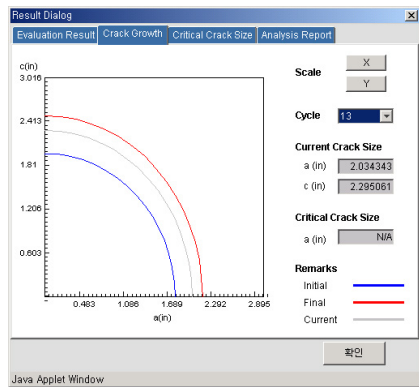
4. 적합성평가 모듈 개발

원자력발전소의 가동중 검사 동안에 균열과 같은 결함이 발견되면 구조적 건전성과 관련하여 결함의 위험성을 결함평가과정에 기초하여 정량적으로 평가하게 된다. 이러한 절차를 적합성평가(Fitness For Service: FFS)라고 한다. 기본적인 평가이외에 원자로 압력용기에 대해서는 시간과 비용이 많이 소요되는 균열 안전성과 균열 성장 해석 등을 포함한다.

본 논문에서는 원자력발전소 주요기기의 적합성 평가를 위해 ASEM Sec. XI 에 기초로 결함에 대한 적합성평가 모듈을 개발하였다. 개발된 모듈은 파



(a) Input Dialog



(b) Output Dialog

Fig. 3 Windows for FFS assessment of an RPV

괴역학분석(Fracture Mechanics Analysis: FMA)을 수행하고 구조물의 건전성과 잔여 수명을 예측할 수 있다. 이러한 정보는 다음 조치의 수행시기나 다음 검사일정시기 등을 결정하는데 유용한 정보로 활용할 수 있다. Fig. 3은 적합성평가 모듈의 입력 창과 결과창을 나타낸 것이다.

5. 구조해석 모듈 개발

적합성평가를 수행하기 위해서는 주어진 운전조건에 대한 응력분포가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 쉽고 빠르게 원자로 압력용기에 대한 구조해석 모듈을 개발하였다. 구조 해석의 입력 데이터는 웹 데이터베이스로부터 확보하거나 사용자가 직접 입력할 수 있다. 입력 데이터에 대한 유한요소해석을 수행하는데 이때에는 상용프로그램을 사용하였으며 구조해석 모듈에 인터페이스를 추가하였다. 해석 후에는 응력데이터는 웹 데이터베이스에 재분배되고 사용자에게 공개된다. 사용자 인터페이스는 JAVA[15]를 사용하였으며 해석프로그램은 독립된 해석 서버에 설치하였다. 웹 서버와 해석 서버 사이의 통신은 FTP(File Transfer Protocol)를 사용하였다. Fig. 4는 원자로 압력용기에 대한

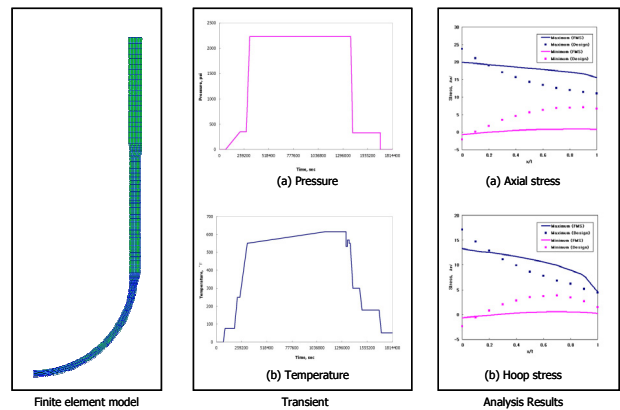


Fig. 4 An example of structural analysis on RPV

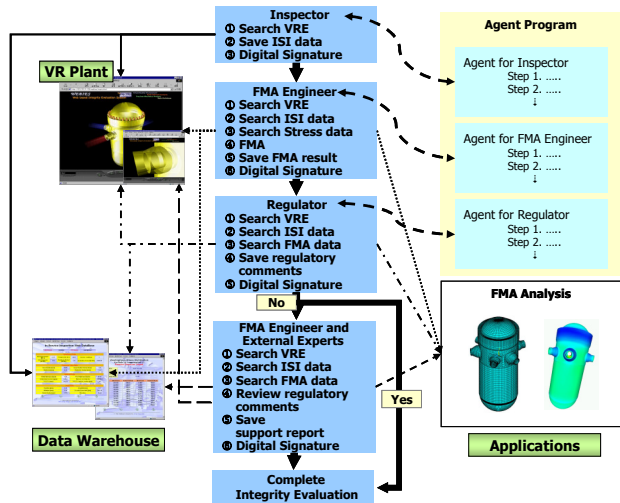


Fig. 5 Integrity assessment procedure using the agent program

구조 해석의 예를 나타낸 것이다.

6. 에이전트를 이용한 인터넷기반 협업 시스템

결함평가과정은 여러 분야의 많은 전문가들의 광범위한 협업이 필요하며 이러한 과정과 개발된 시스템과의 연계과정은 Fig. 5에 나타내었다. 첫번째로 검사자(Inspector)는 가동중 검사를 수행하고 검사문서를 작성한다. 만일 검사동안 결함이 발견되면 결함평가에 전문지식을 가지고 있는 FMA 엔지니어(Engineer)는 건전성 해석을 수행하게 된다. 해석 결과는 일반적으로 결함평가과정의 검증을 위해 규제자(Regulator)에게 보내진다. 전체적인 과정은 복잡한 계산 과정과 협업 등으로 인해 보통 수개월이 소요된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 인터넷 에이전트 기반의 협업시스템을 제안하였다. Yoshimura 등[16]은 대규모 병렬해석 프로그램인 ADVENTURE를 개발하면서 사용자가

복잡한 과정의 해석 과정을 수행하지 않고 에이전트의 도움을 받아 프로그램을 수행할 수 있도록 에이전트 시스템을 구현한 바 있다. 또한 에이전트 시스템은 서로 다른 운영체제에서 실행되는 프로그램간의 문제를 해결하는데 성공적인 역할을 수행하였다. 사용자는 윈도우 PC 에서 원격으로 접속하여 리눅스 PC 의 ADVENTURE 를 실행할 수 있다.

본 논문에서는 에이전트 기반의 원자로 압력용기 건전성평가 시스템(Agent-based Reactor Pressure Vessel Integrity Assessment: ARIAS)를 개발하였다. Fig. 5 에 나타낸 것처럼 검사자, FMA 엔지니어와 규제자는 건전성 평가의 복잡한 과정을 수행하게 된다. 이때 에이전트 프로그램은 필요한 과정을 단계별로 수행할 수 있도록 사용자를 도와준다. 에이전트의 규칙은 Fig. 6 에 나타낸 것처럼 사용자는 필요한 데이터를 입력하면 에이전트가 필요한 작업에 대한 계획을 세우고 작업을 수행하여 사용자에게 안내함으로써 보다 빠르고 정확한 작업을 수행할 수 있다. 에이전트 프로그램은 단계별 과정중에 필요한 데이터베이스와 관련된 프로그램을 호출하고 결과 데이터를 데이터베이스에 저장함으로써 사용자는 새로운 데이터를 제공받게 된다.

사용자는 모든 정보에 접근할 수 있으며 분석 결과와 관련된 논의할 수 있어야 한다. 따라서 사용자는 대상 기기에 대한 그래픽 정보, 가상현실 환경과 같은 그래픽 정보를 포함한 종합적인 결과 자료의 공유가 필요하다. 하지만 모든 인터넷 접속자에게 동시에 같은 그래픽 정보를 제공하는 것은 상당히 어려운 일이다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 ARIAS 에는 가상 네트워크 컴퓨팅(Virtual Network Computation: VNC)[17]기술을 접목하였다. VNC 는 서버에 접속한 모든 사용자에게 동일한 그래픽 정보를 제공해주며 마우스와 키보드의 사용을 통해 상호작용을 제공할 수 있다. Fig. 7 은 정보 공유를 위해 VNC 기술을 사용한 에이전트 프로그램의 구조를 나타낸 것이다.

7. 결론

본 논문에서는 원자로 압력용기의 건전성평가를 위한 인터넷기반 협업시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 에이전트 기반의 원자로 압력용기 건전성 평가 시스템(Agent-based Reactor Pressure Vessel Integrity Assessment: ARIAS)으로 가상현실환경, 웹 데이터베이스 시스템, 적합성평가 모듈, 구

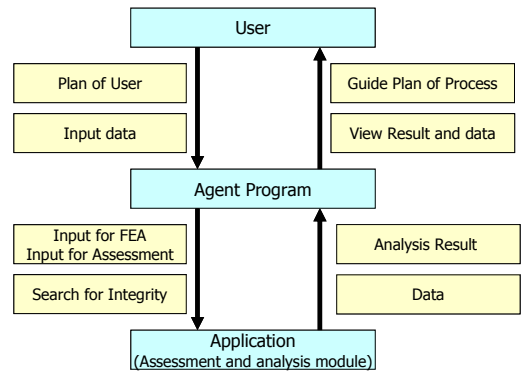


Fig. 6 The role of agent

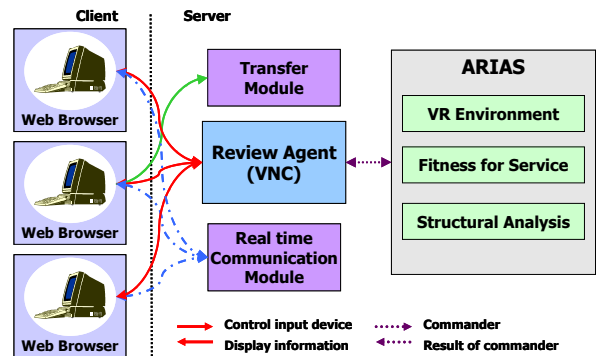


Fig. 7 The structure of ARIAS for reviewer

조해석 모듈과 에이전트 프로그램으로 구성된다. 에이전트 프로그램은 검사자, FMA 엔지니어, 규제자와 검토자에 대한 개별 프로그램이 있으면 개별 에이전트 프로그램은 상응하는 사용자의 건전성평가 과정을 도와주고 건전성 평가과정에 관한 모든 정보는 ARIAS 에 의해 관리된다. 3 차원 그래픽 정보를 기반으로 인터넷에서 실행되는 시스템으로 전통적인 건전성평가 절차를 향상시킬 것으로 기대된다

참고문헌

- (1) Choi, J. B., Kim, Y. J., Pyo, C. R., Kwak, D. O., Park, Y. W., 1999, "Deterministic Fracture Mechanics Analysis on the Integrity Evaluation of RPV Under Pressurized Thermal Shock," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 23, No. 8, pp. 1425~1434.
- (2) Huh, N. S., Kim, Y. J., Park, Y. W., Jun, H. K., Choi, Y. H., 2001, "Development of Nuclear Piping Integrity Expert System (II) - System Development and Case Studies," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 25, No. 6, pp. 1015~1022.
- (3) ASME, 1998, "Rule for in-service inspection of nuclear power plant components," *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI*
- (4) Huh, N. S., Im, C. J., Pyo, C. R., Kim, Y. J., Park, C. Y., 2000, "Development of a Three Dimensional Elastic Plastic Analysis System for the Integrity Evaluation of

- Nuclear Power Plant Components,” *Trans. of KSME (A)*, Vol. 24, No. 8, pp. 2015~2021.
- (5) Kim, Y. J., Suh, M. W., Jun, H. K., Park, Y. W. and Choi, Y. H., 1997, “Development of expert system for nuclear piping integrity,” *Nuclear Engineering and Design*, Volume 174, pp. 69-78
- (6) Matsubara, Y., Toihara, S., Tsukinari, Y., and Nagamachi, M., 1997, “Virtual Learning Environment for Discovery Learning and It's Application on Operator Training,” *IEICE Transactions on Information & Systems*, Vol. E80-D No. 2, pp. 176~188
- (7) Knight, T., Dalton, G., and Tulenko, J., 1997, “Virtual radiation fields-virtual environment tool for radiological analysis and simulation,” *Nuclear Technology*, Vol. 117 No. 2
- (8) MicroStation, 1995, Bentley System, Inc.
- (9) I-DEAS Master Series 9, 2002, SDRC, Inc.
- (10) CosmoWorlds 2.0, 1998, SGI, Inc.
- (11) Fujita, M., and Kinugawa, J., 1999, “Material Information System on Internet,” *Proceedings of an Intelligent Software Systems in Inspection and Life Management of Power and Process Plants*, pp. 127-144
- (12) Huh, Y. H., Lee, W. K., Kim, J. H., Jung, H. G. and Moon, H. G., 1999, “Construction of Web-based Creep Property Database System,” *Proceedings of the KSME 1999 Fall meeting A*, pp. 333~337
- (13) PHP, 2004, <http://www.php.net>, The PHP Group.
- (14) MySQL, 2004, <http://www.mysql.com>, MySQL AB.
- (15) JAVA, 2004, <http://java.sun.com>, Sun Microsystems, Inc.
- (16) Yoshimura, S., et al., 1999, “ADVENTURE, Annual Report of ADVENTURE Project,” Univ. of Tokyo
- (17) Virtual Network Computing, 1997, <http://www.uk.research.att.com/archive/vnc/index.html>, AT&T Laboratories Cambridge.