

* * * † * ** **
, , , , , , ,

Development of a Knowledge-based Information Management System for Plant Maintenance

Hyung-Sang Yim, Young-Jae Park, Sang-Min Lee, Jae-Boong Choi,
Young-Jin Kim, Eun-Chul Roh and Byung-Ine Lee

Key Words : Steel Manufacturing Facility(제철설비), Virtual Reality(가상현실), On-line Monitoring System(실시간 감시 시스템), Enterprise Resource Planning(전사적 자원관리)

Abstract

Recently, the importance of plant maintenance(PM) was highly raised to provide efficient plant operation which highly affects the productivity. For this reason, a number of engineering methodologies, such as risk-based inspection(RBI), fitness for service guidelines(FFS), plant lifecycle management(PLM), have been applied to improve the plant operation efficiency. Also, a network-based business operation system, which is called ERP(Enterprise Resource Planning), has been introduced in the field of plant maintenance. However, there was no attempt to connect engineering methodologies to the ERP PM system.

In this paper, a knowledge-based information system for the plant operation of steel making company has been proposed. This system, which is named as K-VRS(Knowledge-based Virtual Reality System), provides a connection between ERP plant maintenance module and knowledge-based engineering methodologies, and thus, enables network-based highly effective plant maintenance process. The developed system is expected to play a great role for more efficient and safer plant maintenance.

1.

최근 들어 효율적인 공장가동으로 생산성 향상에 영향을 줄 수 있는 설비관리(Plant Maintenance, PM)의 중요성이 부각되고 있다. 이러한 이유로 공장가동효율 향상을 위해 위험도기반검사(Risk-Based Inspection, RBI)⁽¹⁾, 사용적합성평가(Fitness For Service, FFS)⁽²⁾ 그리고 플랜트생애주기관리(plant lifecycle management) 등의 공학적인 기법들을 적용하고 있다. 또한 네트워크 기반의 업무작업 시스템인 전사적자원관리(Enterprise Resource Planning;

ERP)가 설비관리 분야에도 적용되고 있다. 그러나 ERP 설비관리시스템에 공학적인 기법이 적용되진 못하고 있으며, 기존의 플랜트 유지·보수는 대부분 설계 데이터를 기반으로 한 안전규제지침과 도면에만 의존하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 지식기반 정보시스템^(3,4)인 K-VRS(knowledge-based virtual reality system)를 통해 제철설비의 효율적 설비관리 기법과 공학적 데이터 처리기법을 제안하였다.

K-VRS 는 ERP 설비관리와 지식기반의 공학적인 기법들을 연계하여 네트워크 기반의 효율적인 설비관리를 가능하게 한다. K-VRS 에서 제공하는 가상플랜트는 제철설비의 실제 데이터를 이용하여 구축하였으며 수명평가관련 모듈과의 연계를 고려하여 설계하였다. 각 모듈들은 설비관리를 위한 공학적인 지식기반 평가와 판단을 도와주며 웹을 통해 관련 전문가들과의 협업을 가능하게 한다.

† 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : boong33@safe.skku.ac.kr
TEL : (031)290-7458 FAX : (031)290-5276

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

** 회원, POSCO 광양제철소 설비관리팀

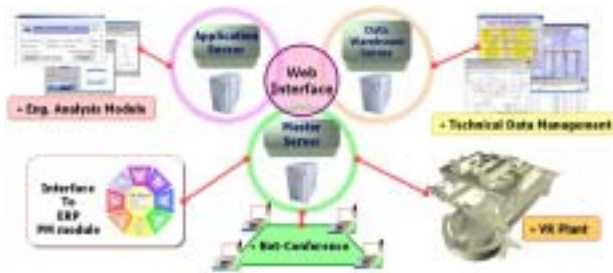


Fig. 1 The structural configuration of K-VRS

또한 3D CAD 데이터와 가상현실모델링언어 (Virtual Reality Modeling Language, VRML)을 사용한 가상현실환경은 설비규모에 따른 접근성, 직관적인 위치정보 인식을 개선한다.

Fig. 1 은 본 논문에서 제안한 K-VRS 의 구성도이며, 웹 인터페이스(web interface)를 통한 공학적 해석 모듈, 기술적 데이터 관리, 가상현실 플랜트, ERP PM 모듈의 연계를 고려하여 구축하였다.

2. 가

2.1

제철설비의 경우 많은 부품과 어셈블리로 구성되어 기존의 2 차원 도면이나 문서정보로는 작업에 필요한 정보를 얻기가 매우 어렵다. 실제로 본 논문의 대상이 된 K 제철소의 경우, ERP 설비관리 모듈인 MAXIMO 를 도입하였으나 설비코드, 부품명을 사용한 비직관적인 접근방식으로 인해, 그 활용성 측면에서는 만족할만한 효과를 거두지 못하는 실정이며, 또한 2 차원 도면파일 및 도면관리에 어려움을 겪고 있다. 따라서 위와 같은 문제점의 해결방안으로서 가상플랜트를 구축하였다.

본 논문에서는 가상현실환경의 시스템 최적화를 고려하여 Fig. 2 와 같이 3 단계의 상세모델로 나누고 상위의 모델에서는 하위모델을 그룹핑(grouping)하여 구성하였다.

2.2 3D CAD

기존의 3D 그래픽 프로그램을 사용하여 구축한 가상현실 모델은 파일 사이즈가 작고 원활한 구동이 가능한 반면⁽⁶⁾, 공학적인 데이터 처리에는 사용이 불가능하여 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)이나 도면생성 등의 작업을 위해서는 별도의 3 차원, 혹은 2 차원 CAD 작업을 요구하게 되었다. 하지만 최근에는 용도별로 새로운 모델을 제작할 필요없이, 3D CAD 데이터 만으로 CAM(computer aided manufacturing), FEA 등의 공학적 활용 뿐 아니라, 가상현실 구축, 도면추출 등의 작업이 가능

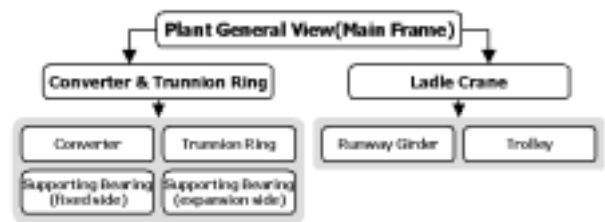


Fig. 2 The structure of virtual reality system

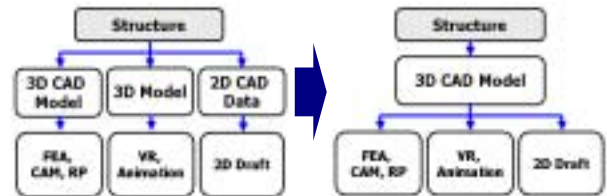


Fig. 3 Transition of CAD data management

하게 되었으며, Fig. 3 은 이에 따른 데이터 흐름의 변화를 도식화한 것이다.

본 논문에서는 가상현실환경 구축을 위한 모델을 3D CAD Modeler(Autodesk INVENTOR 5.3)를 사용⁽⁷⁾하여 약 200 여 개의 부품으로 구성하였다.

2.3 가

각 설비별 구축한 3 차원 요소들을 3D 그래픽 프로그램(Autodesk VIZ 4.0)을 통해⁽⁸⁾ 가상의 공간상에 배치하고, 필요에 따라 조명(lights), 카메라 뷰(camera views), 적절한 재질감의 부여(mapping), 그리고 가상현실환경에서 활용될 이벤트(events)의 삽입을 통해 가상현실 모델을 완성하였다.

카메라 뷰는 가상현실 모델에서 관찰자의 시야를 결정하며 주요 설비로의 이동수단 역할을 수행하게 되는데 본 모델에서는 주요 관심대상이 되는 전로(converter)부, 용선 크레인(ladle crane), 제강공장 외부와 입구 등 총 8 대의 뷰를 설치하였다. 이 중 탐색(navigation)카메라는 프록시 센서(proxy sensor)를 이용한 애니메이션 효과를 주어 미리 설치된 경로(path)를 따라 공장내부 전체를 둘러볼 수 있도록 구성하였다. 각각의 뷰에서 바라본 모습은 Fig. 4 와 같다.

개발된 가상현실환경을 통해 작업자는 공장 내 주요 설비로의 직관적인 이동이 가능하며 또한 가상현실과의 상호작용을 통해 원하는 위치로 이동하여 모델에 연계된 프로그램을 실행하거나 데이터베이스를 검색할 수 있다.

3. 가

3.1

용선 크레인의 피로수명평가에 필요한 응력값은

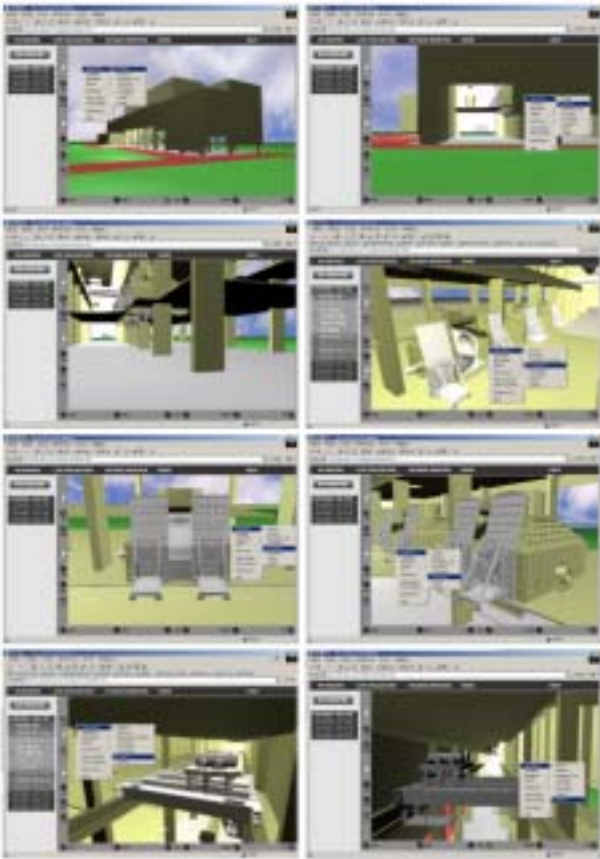


Fig. 4 Camera views of the virtual reality model

변형률(strain)측정 등을 통한 데이터를 사용하게 되는데, 현실적으로 크레인의 모든 부위에 대해 실험을 하는 것이 불가능하고, 실험시 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 용선 크레인의 경우 형상이 복잡하고 다양한 복합 하중이 작용하므로 유한요소해석에 대한 체계적인 해석절차가 확립되지 못한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 용선 크레인에 대한 모델링, 경계조건 설정, 하중 적용법을 개발하여 실제모델과 유사한 응력해석 결과를 얻을 수 있는 최적의 유한요소해석 기법을 개발하였다.

3.1.1

용선 크레인은 두께가 비교적 얇고 긴 박스형태를 갖는 구조물로서, 거더(girder)의 내·외부에 많은 리브(rib)가 보강재로 사용된다. 크레인의 유한요소해석모델은 이러한 크레인의 형상과 요소망(mesh) 생성작업의 편의성, 해석시간의 단축, 리브 추가의 용이성 등을 고려하여 shell element 를 사용하여 구성하였다.

이에 앞서 실 구조물의 형상과 유사한 단순모에 대해, 이론해와 solid element, shell element 사용한 결과를 비교하였다.

유한요소해석결과를 통해 얻은 길이방향 1/4 지



Fig. 5 FE model of ladle crane using shell elements

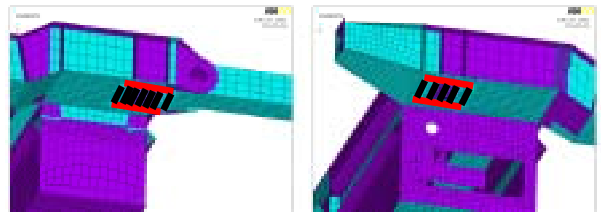


Fig. 6 Displacement constraints of main and aux. girder

점 최상단의 수직응력값과 보의 수직응력 계산식⁽⁹⁾에 의해 구한 이론해를 비교한 결과, solid element 의 경우 16~19%의 오차를 보인 반면, shell element 는 2~7% 정도의 오차를 나타내었다. 따라서 거더와 같은 형상을 갖는 구조물의 유한요소해석에는 shell element 를 사용하는 것이 더 타당함을 확인하였다.

이러한 결과를 바탕으로 구성된 크레인 유한요소해석 모델은 Fig. 5 와 같다.

3.1.2

변위 구속조건은 휠(wheel)에 대한 모델링을 생략하고 생략된 아래부분에 Y 방향구속, 양쪽 가장자리 부분에 레일(rail)에 의한 구속을 모사하기 위한 X, Y 방향구속을 적용하였다. 유한요소모델에 적용한 변위 구속조건을 각각 용선 크레인의 주거더(main girder)와 보조거더(auxiliary girder)에 적용한 그림을 Fig. 6 에 나타내었다.

하중조건은 한국산업규격의 크레인강 구조부분의 계산기준을 참고하였다. 용선 크레인 해석 시 고려해야 할 하중은 다음과 같다.

- (1) 권양 하중
- (2) 자중
- (3) 수평 하중(관성력)

위와 같은 하중 적용 시 Table 1 에 따른 하중 조합을 이용하게 되는데, 이 중 A 인 경우를 사용

Table 1 Combination of load

Case	Loading Conditions
A	M[Ψ (lifting load)+(weight)+(horizontal load)]+(thermal load)
B	M[Ψ (lifting load)+(weight)+(horizontal load)]+(load by wind in service)+(thermal load)
C	(lifting load)+(weight)+(earthquake load or impact load)+(thermal load) or (weight)+(load by wind out of service)+(thermal load)

Table 2 Coefficient of shock ψ and task M

Crane	I	II	III	IV
Ψ	1.1	1.25	1.4	1.6
M	1.0	1.05	1.1	1.2

하였다. 권양작업을 할 때 발생하는 충격하중은 권양속도, 거더휨, 로프의 길이 등에 따라 다르므로 실측해야 하나, 일반적으로 Table 2 에 나타낸 한국산업규격 분류기준에 따라 구하게 된다. 따라서 크레인의 하중조건은 IV 군에 해당하는 충격계수 Ψ와 작업계수 M 을 할증하여 사용하였다.

따라서 일반적인 용선 크레인의 하중조합은 다음 식과 같다.

$$M[\psi(\text{권양하중})+(\text{자중})+(\text{수평하중})]+(\text{열에의한하중})$$

(M:1.2, ψ:1.6) (2)

이 중 수평하중과 열하중에 의한 영향은 권양하중과 자중에 비해 미소하므로 고려대상에서 제외하였다. 해석은 한 사이클(cycle) 내에서 용선 크레인과 트롤리(trolley)의 거동을 고려하여 총 7 가지 하중상태에 대해 수행하였다.

3.1.3

Fig. 7 은 주거더와 보조거더의 최대응력부위를 나타내며 7 가지 해석 케이스 모두 유사하게 새들(saddle)과 거더가 만나는 부위에 응력집중이 발생하였다.

형상이 비교적 단순한 거더 내부 벽면의 한 곳을 선정하고 크레인 가동 1 사이클에 해당하는 7 가지 해석 결과를 Fig. 8 에 도식적으로 나타내었다. 이 해석결과를 통해 트롤리와 용선 크레인의 거동에 따른 응력상태가 일치함을 확인하고, 유한요소해석 결과의 타당성을 입증하였다.

3.2 가

앞서 수행된 유한요소해석 모델의 타당성 검증을 위해 직접 가동중인 용선 크레인 내부에서 변형률을 측정하였다.⁽¹⁰⁾

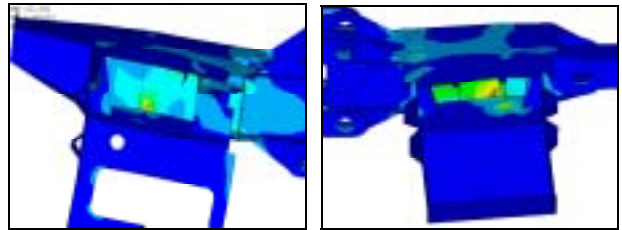


Fig. 7 Stress distribution of main girder and aux. girder

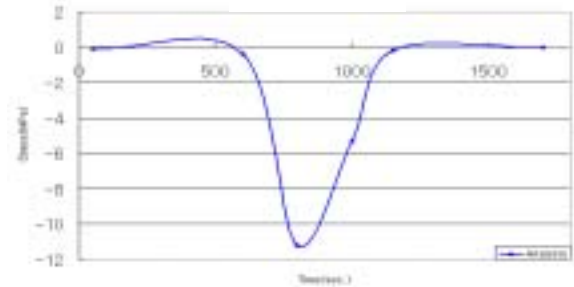


Fig. 8 Stress amplitude at a general point

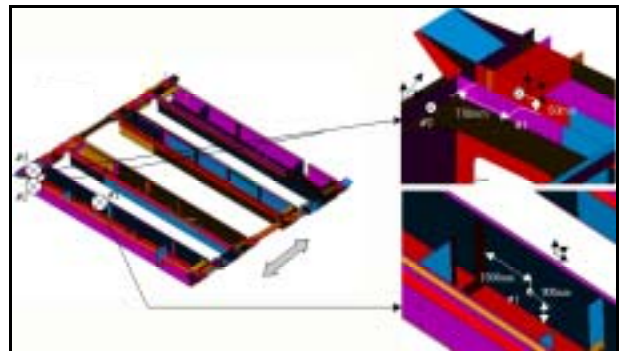


Fig. 9 Strain measurement locations

3.2.1

측정에 사용된 실험장치는 static amplifier, lead line, three-axial strain gage, rosette gage 이며, 측정부위는 유한요소해석을 통한 응력집중 예상부위 2 곳, 해석 결과와의 정확한 비교를 위해 선정한 형상이 단순한 위치 1 곳이며 이를 Fig. 9 에 상세히 나타내었다. Dummy gage 를 사용하여 온도에 의한 영향을 보정하였으며, 측정시 야기될 오차를 고려하여 2 사이클에 대해 측정을 수행하였다.

3.2.2 측정

Figs. 10 ~ 13 은 단순형상 위치와 응력집중 예상부의 변형률에 대한 실험결과와 해석결과를 비교한 것이며, Table 3 에는 각각에 대한 평균변형률(mean strain)과 변형률진폭(strain amplitude)을 정리하였다.

전체적으로 유한요소해석결과가 용선 크레인에 대한 실제 응력 상태를 유사하게 모사하였다. 또한 실험결과와의 비교를 통해 유한요소해석모델의 신뢰성을 확보하고 해석결과값을 이용한 피로수명

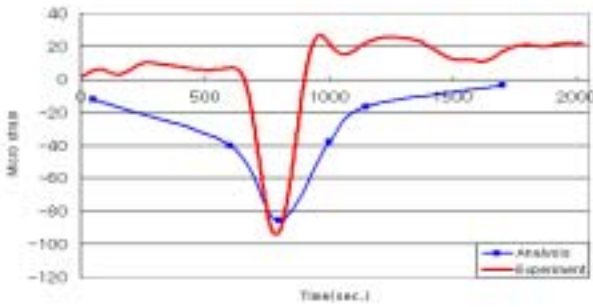


Fig. 10 Comparison between measurement and analysis results(general point)

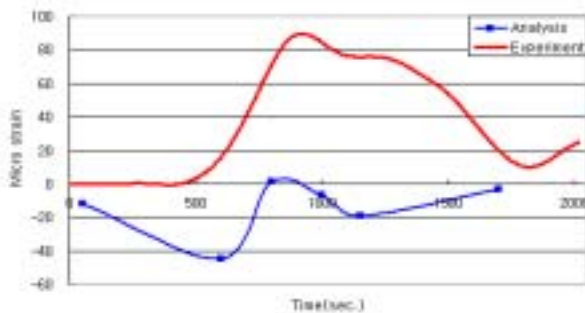


Fig. 11 Comparison between measurement and analysis results(first stress concentration point: horizontal direction)

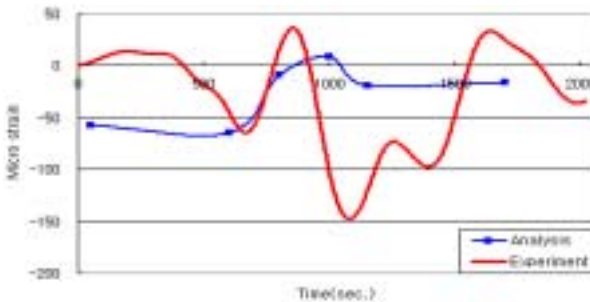


Fig. 12 Comparison between measurement and analysis results(first stress concentration point: vertical direction)

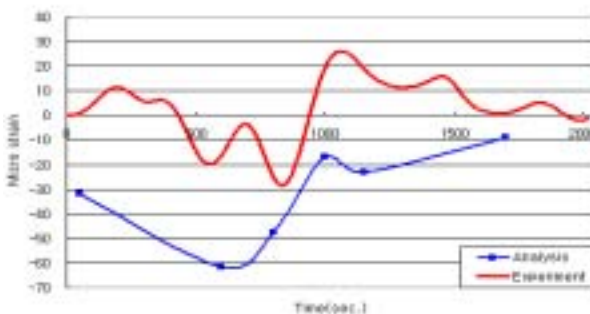


Fig. 13 Comparison between measurement and analysis results(second stress concentration point: vertical direction)

Table 3 Comparisons between measurement and analysis points

Location	Method	Mean Strain	Strain Amplitude
General point	Experiment	-33.8e-6	±60.5e-6
	Analysis	-44.2e-6	±40.7e-6
1 st concentration point(horizontal)	Experiment	44.5e-6	±45.1e-6
	Analysis	-24.1e-6	±20.7e-6
1 st concentration point(vertical)	Experiment	-55.7e-6	±92.1e-6
	Analysis	-27.9e-6	±36.4e-6
2 nd concentration point(vertical)	Experiment	-1.2e-6	±27.2e-6
	Analysis	-35.3e-6	±26.2e-6

Table 4 Analysis results at fatigue life assessment points

	Assessment points	Mean Stress Ratio (σ_m/σ_y)	Stress Amplitude Ratio (σ_a/σ_y)
Main Girder	Node 141614 (vertical)	0.04126	± 0.03194
	Node 135374 (horizontal)	0.02611	± 0.04857
	Node 135374 (vertical)	0.02611	± 0.05554
	Node 129412 (vertical)	0.09029	± 0.04480
Aux. Girder	Node 7966 (horizontal)	0.1038	± 0.02222
	Node 7966 (vertical)	0.1038	± 0.05080
	Node 111511 (horizontal)	0.1037	± 0.02222
	Node 111511 (vertical)	0.1037	± 0.05086
	Node 122468 (horizontal)	0.2745	± 0.02394
	Node 122468 (vertical)	0.2745	± 0.09503

평가의 타당성을 입증하였다.

3.3 가

용선 크레인용 용선은 전로에 부어넣기 위해 주기적인 이동을 하며 반복하중에 의한 피로 파손 발생 가능성이 높으므로, 피로 수명 평가법을 적용하였다.⁽¹¹⁾

앞에서 검증된 유한요소해석 결과를 바탕으로, 주거더와 보조거더 6 곳에 대한 피로 수명 평가를 수행하기 위해, 각각의 평균응력(mean stress)과 응력진폭(stress amplitude)을 재료의 항복응력으로 나눈 무차원값을 Table 4에 정리하고, 용선 크레인의 재료인 SS400에 대한 피로한도와 인장강도를 계산하여 피로 평가 선도를 작성하였다. 본 논문에서는 Goodman line 과 Soderberg line 을 적용하여 피로평가를 수행하였으며 그 결과 Fig. 14에서 보는 바와 같이 모든 측정부위가 무한수명이며 안전

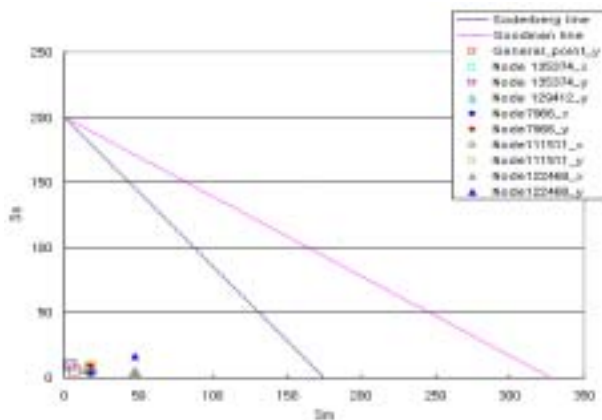


Fig. 14 Assessment results using fatigue diagram(SS400)

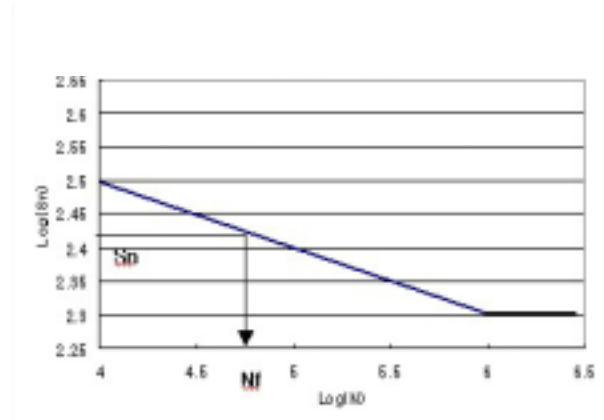


Fig. 16 Remaining fatigue life calculation using S-N curve

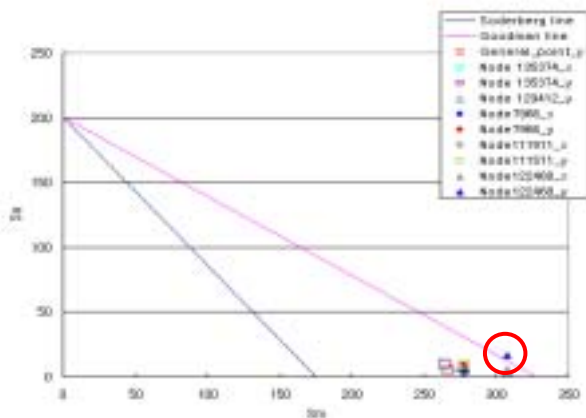


Fig. 15 Assessment results considering residual stress

한 것으로 판단되었다.

용선 크레인 설비는 많은 판재(plate)의 용접을 통해 제작되며 제작과정 중 발생하는 용접부의 잔류응력은 열처리를 통해 감소된다. 하지만 설비 운전에 따른 잔존수명 계산을 위해서는 유한수명을 갖도록 해야하므로 임의의 용접부 잔류응력값을 적용하였다. Fig. 15는 잔류응력값을 260 MPa로 가정하여 피로수명선도에 각각의 노드에 대한 결과값을 도시한 예이며, 이 때 노드 122468이 Goodman line을 벗어나 유한수명을 나타내었다.^(12,13) 이 결과를 통해 구한 S_n 값과 S-N 선도를 이용하여 유한수명값을 산출하는 과정을 Fig. 16에 도시하였다.

3.4 가

앞서 설명한 피로수명평가 시간을 절약하고, 그 절차를 간소화하기 위해, JAVA를 이용한 피로수명평가 프로그램을 모듈화하였다. 피로수명 평가 모듈은 평균응력과 응력진폭, 잔류응력 고려 여부의 입력으로 피로평가선도 상의 무한수명, 유한수명 여부를 판단하며, 유한수명인 경우 가동 사이클수의 입력으로 잔존수명을 계산한다.



Fig. 17 Structure of on-line fatigue life monitoring system

피로수명 평가모듈은 사용자의 입력에 따른 결과를 보여줄 뿐 아니라, Fig. 17과 같이 실 구조물 상에서 실시간으로 얻은 데이터를 통해 자동으로 응력해석을 수행하고 피로수명을 평가할 수 있는 실시간 수명 평가 시스템(on-line fatigue monitoring system)으로 구성하였다.

4. 가

4.1 가

실시간 수명평가를 통해 얻은 주요부위의 응력값과 설비에 대한 검사(inspection)방법, 위치 및 주기 등을 데이터베이스로 구축하였다. 구축된 데이터베이스를 최적의 검사주기와 비용 결정을 위한 데이터로 활용하였다. 사용자가 손쉽게 검사주기와 비용을 산출할 수 있도록 주요기기별 가상플랜트와 웹 인터페이스에 기반한 위험도기반검사 적용 모듈을 구축하였다.

4.2 가

플랜트 가동중검사(In-Service Inspection, ISI)에서 설비에 손상(flaw or damage)이 발견될 경우 사용적합성평가를 통해 수리, 교체 그리고 가동중단에



Fig. 18 Structure of web-based K-VRS

대한 결정을 한다. 플랜트설비에서 발생 가능한 파손은 취성파괴(brittle fracture), 균열(crack), 감육(metal loss), 피팅부식(pitting corrosion), 블리스터(blister), 그리고 크립(creep) 등의 형태로 분류되며 현재 선진 각국에서는 사용적합성 코드(API 579, ASME Section XI)에 대한 기술기준 분석 및 각각의 파손기구에 관한 연구를 수행하여 플랜트 엔지니어링 정보시스템에 적용 중이다.

본 시스템에서는 Life Evaluation 부를 통해 각 주요기기에 대한 실시간 감시 및 잔여수명, 균열성장 평가 모듈을 연결하여 사용적합성평가를 적용할 수 있도록 구성하였다.

5.

5.1

본 논문에서는 제강공장 주요 설비에 대한 가상현실기법, 피로수명 평가기법, 실시간 피로감시기법을 연계하여 웹 인터페이스를 구성하였다.

시스템은 Fig. 18 과 같이 크게 VR Master, Life Evaluation, Fatigue Monitor 모듈부에 부가적으로 문서관리를 위한 Document Master 를 삽입한 구조로 구성하였다. VR Master 에는 앞서 말한 가상현실환경, 3D CAD 데이터를 포함하였으며, Life Evaluation 에는 피로수명 평가 모듈을, Fatigue Monitor 에는 유한요소해석, 실험, 피로해석에 대한 결과 보고서를 각각 연계하였다.

4.2

Fig. 19 에 나타낸 문서관리 시스템(Document Management System)은 PHP 웹 프로그램을 이용한 Linux 기반 MySQL 데이터베이스와 웹 서버 간의 연계를 통해 구축되었으며, 보고서 관리 및 도면 관리에 활용하였다. 설비이력 등의 데이터를 문서화하고 필요한 도면이나 이미지 등은 파일 첨부를 통해 각각의 문서에 포함함으로써 타부서간 협업 수단으로 사용하였다.



Fig. 19 Document management system

또한 문서관리 시스템 상에 링크된 각각의 설비 코드를 통해 PM 모듈과 연계하여, 각 설비의 정보가 VR Master 상의 3 차원 설비모델과 직관적으로 연결된다는 점에서 설비관리 효율성을 제고하였다.

6.

본 논문에서는 제강공장 제철설비에 대한 지식 정보 시스템을 제안하였으며 그 구체적인 내용은 다음과 같다.

- (1) 웹 기반 가상현실기법을 이용한 설비관리 협업체계를 구축하였다.
- (2) 3D CAD 와 웹 데이터베이스 기반의 문서관리 시스템을 개발하였다.
- (3) 피로수명 평가를 수행하고 이 절차를 웹 프로그래밍을 통해 모듈화하였다.
- (4) 기존 ERP 모듈에 On-line Monitoring, RBI, FFS 개념을 도입한 설비관리 및 수명평가 시스템을 제시하였다.

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

- (1) API, 2000, "API 581(RBI)-First Edition", API Publishing Services.
- (2) API, 2000, "API RP 579(FFS)-First Edition", API Publishing Services.
- (3) Suh, M.-W. and Cho, K.-Y., 2001, "Development of VR Monitoring System for Gas Plant", Transactions of the KSME A, pp. 788~796.
- (4) Kim, J.-C., Jeong, M.-J., Choi, J.-B. and Kim, Y.-J., 2001, " Development of an Internet based Virtual Reality Environment and Web Database for the Integrity Evaluation of the Nuclear Power Plant" , Proceedings of the society of CAD/CAM engineers,

- pp. 421~426.
- (5) The VRML Consortium Incorporated, 1997, "The Virtual Reality Modeling Language, International Standard ISO/IEC 14772-1:1997".
- (6) Hernandez, S. and Hernandez, L. A., 1996, "Advanced visualization and computer animation in engineering and architectural design", Proceedings of Second International Conference Application and Architectural Design, pp. 15~30.
- (7) Autodesk Inc., 2002, "Autodesk Inventor 5", Jinoumedia.
- (8) Chung, T.-S. and Song, C.-D., 2001, "3D Studio VIZ for Architecture and Interior Design", Sungandang.
- (9) Gere, J. M. and Timoshenko, S. P., 1998, "Mechanics of materials", Chungmungak.
- (10) Lee, S.-C., 1995, "Instrumentation engineering", Dongmunsa, pp. 188~190.
- (11) Bannantine, J. A., 1989, "Fundamentals of metal fatigue analysis", Prentice Hall. pp. 1~39.
- (12) Han, S.-H., Lee, T.-K. and Shin, B.-C., 2002, "A Quantitative Estimation of Welding Residual Stress Relaxation for Fatigue Strength Analysis", Transactions of the KSME A, pp. 2018~2025.
- (13) Seok, C.-S., Kim, S.-Y. and Park, J.-H., 1999, "Analysis of Residual Stress and Fatigue Crack Growth Behaviors of Weld Zone", Transactions of the KSME A, pp. 1516~1524.