

## 멀티 에이전트 기반 엔지니어링 프레임워크를 이용한 용접대차를 피로내구해석의 자동화

방제성\*, 한승호\*\*, 이재경\*\*\*, 박성환\*\*\*, 임채환\*\*, 송시엽\*\*\*\*

### Automation of Fatigue Durability Analysis for Welded Bogie Frame Using a Multi-Agent Based Engineering Framework

Je-Sung Bang\*, Seung-Ho Han\*\*, Jai-Kyung Lee\*\*\*, Seong-Whan Park\*\*\*,  
Chac-Whan Rim\*\* and See-Yeob Song\*\*\*\*

#### ABSTRACT

A multi-agent and web based engineering framework concerning the automation of fatigue durability analysis for welded bogie frame of railway vehicles is presented. Mostly, this kind of design or analysis includes complex workflow, huge amounts of information processing, and problem solving. Macro programs of I-DEAS, APDL of ANSYS, and in-house fatigue code are utilized for parametric geometry representation, automatic mesh generation, static stress analysis, fatigue durability analysis, post-processing, and data sorting. The engineering framework is implemented on the JADE. Since every task requires a fairly complex process and specialized knowledge, the multi-agent based framework is very useful to keep the independency among several disciplines or tasks and to use distributed hardware and software resources. All engineering programs are integrated by XML wrapper. Related database of the engineering framework and web based user interfaces are also developed. A parametric study is carried out to take into account the effect of geometrical change of transom support bracket on its cumulative fatigue damage. The developed engineering framework reduced remarkably the time and costs required in designing and solving engineering problems.

**Key words** : Fatigue durability analysis, Welded bogie frame, Process integration, JADE(Java Agent DEvelopment), Multi-agent

## 1. 서 론

최근 정보기술과 동시공학기법들을 이용하여 제품 개발 및 생산 시 요구되는 비용과 시간을 줄이고자 하는 노력이 산업 전반적으로 이루어지고 있다.

첫째, 정보분야와 관련해서는 그 동안 기업 내에 있던 제품개발 및 생산에 필요한 데이터와 프로세스를 정립하여 제품정보관리(product data management) 시스템<sup>[1,2]</sup>, 협업적 제품거래(collaborative product commerce) 시스템<sup>[3,4]</sup> 그리고 인터넷이라는 가상의 공

간에서 원거리에 있는 제품개발자들의 의사결정을 돕는 실시간 원격협업 시스템<sup>[5]</sup> 등을 구축하는 것이 그 예일 것이다. 이를 통해 얻을 수 있는 장점은 협업을 수행하는 기업 간에 시간과 장소에 제약을 받지 않고 제품개발 정보를 공유할 수 있으며, 초기 개념설계단계부터 여러 개발주체가 함께 설계에 참여하게 됨으로써 최종 양산단계에서 겪게 되는 많은 결함과 설계변경을 최소화시킬 수 있다는 점이다.

둘째, 설계분야와 관련해서는 기존에 각각의 분야(discipline)별로 고려하였던 해석 및 설계들을 동시에 고려하고자 하는 다물리학적 해석(multi-physics analysis) 및 다분야간 설계최적화(multidisciplinary design optimization) 기법의 적용<sup>[7-9]</sup>과 웹 기반 엔지니어링 통합 및 자동화 분야<sup>[10-12]</sup>가 있다. 이러한 기법들을 고려하기 위해서는 우선 각각의 단위 해석분야

\*교신저자, 정회원, 한국기계연구원

\*\*한국기계연구원

\*\*\*정회원, 한국기계연구원

\*\*\*\*(주)로템 기술연구소

- 논문투고일: 2006. 03. 27

- 심사완료일: 2007. 07. 20

에서 고려되는 데이터를 분석하고, 분야간 연성(coupling)이 있는지를 검토하는 것이다. 이러한 시스템의 구현에 있어서는 CAD 및 전처리기(pre-processor) 프로그램, 해석프로그램, 각종 최적화기법, 데이터베이스 관리, 큐(queue) 관리, 네트워크 프로그래밍 등과 같은 기존의 전통적 기계분야의 프로그램과 최신 정보기술이 융합되어야 한다.

이러한 설계분야의 상용 통합솔루션으로 IBM/Dassult사의 CATIA<sup>[13]</sup> 제품군이 있으며, 최근 여러 해석분야 프로그램들과 제휴를 맺어 연동을 진행하고 있다. 이는 CAD 프로그램에 CAE 프로그램이나 자사 제품정보관리 시스템을 연동시킴으로써 사용자로 하여금 하나의 솔루션을 사용하는 것 같은 기능을 제공하는 것이다. 이와 더불어 CAD나 각종 CAE 프로그램은 제외하고 단지 통합프레임워크와 최적화기법, 근사기법, 신뢰성공학기법 등을 추가적으로 제공하는 Phoenix사의 ModelCenter<sup>[14]</sup>나 Engincous사의 i-SIGHT<sup>[15]</sup>가 있으며, 국내에서도 EMDIOS<sup>[9]</sup>라는 통합 프레임워크가 최적설계기술연구센터에서 개발되고 있다. 또한 MSC Software에서는 시뮬레이션 데이터의 이력관리와 접근을 제공하는 SimManager<sup>[16]</sup>를 개발하여 자사의 CAE 프로그램들을 연동하고, 해석데이터를 데이터베이스로 관리하고 있다.

이러한 상용 통합솔루션이나 통합프레임워크가 기업에 제대로 구축되기 위해서는 그 기업의 제품개발 업무 프로세스와 데이터를 분석한 뒤, 위의 나열한 상용 제품들이 제공하는 기능들을 이용하여 상당히 많은 자체 개발을 수행하여야 한다. 예를 들어, 항공기나 선박 등과 같은 시스템 수준의 설계문제에 대하여 기존의 상용 통합프레임워크를 사용하면서 각 분야간 연성을 고려한 프로세스를 구성해야 할 경우 많은 경험과 노후가 요구된다.

또한 향후에는 제품개발 과정에서 겪게 되는 기간과 비용의 부담을 줄이고자 지역적으로 떨어진 개발주체들이 모듈단위로 개발하여 전체 시스템을 통합하는 방식을 추구할 것으로 예상된다. 이러한 경우 기존의 방식대로 전체 시스템 설계 및 통합 담당자가 전체 업무를 다 알아서 전체 프로세스를 구성한다는 것은 매우 어려운 일이며, 정보시스템이나 설계시스템 모두 좀 더 동적인 환경에 대처할 수 있는 형태이어야 한다. 이러한 환경 하에서 에이전트 기술은 많은 장점을 보이고 있다<sup>[7]</sup>.

본 논문에서는 그 동안 구축해 온 멀티 에이전트 기반 엔지니어링 프레임워크<sup>[18-20]</sup>를 확장 및 보완하여 Fig. 1과 같이 국내 R사에서 개발하고 있는 전동차용

용접대차를 피로내구해석의 자동화에 적용하였고, 가로빔 지지 브래킷(transom support bracket)의 위치변화가 누적피로손상도(cumulative fatigue damage)에 주는 영향을 알아보기 위한 매개변수 연구(parametric study)를 수행하였다. 형상모델링, 유한요소생성, 정적응력해석, 피로내구해석 등과 같은 각 단위 엔지니어링의 자동화는 해당 엔지니어링 프로그램에서 제공하는 자동화 프로그램을 기반으로 이루어졌으며, 전체 프로세스의 자동화 및 데이터 관리는 멀티 에이전트 기반 엔지니어링 프레임워크를 기반으로 자동화가 수행되었다.

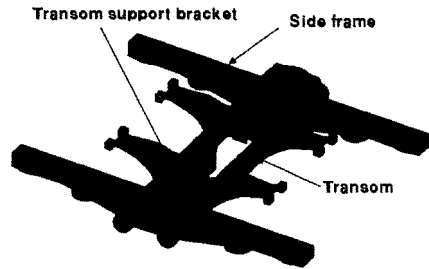


Fig. 1. 철도차량용 용접대차들의 구조.

## 2. 현행업무분석

철도차량용 대차들은 차륜, 차축, 각종 현수장치, 제동 및 동력전달장치가 장착되어 차량을 지지하며 안내하는 기능을 갖는다. 차체 자중 및 승차물에 따른 정적하중, 곡선주행 및 제동 시 발생하는 준정적하중 그리고 불규칙한 선로와 각 구성품 간의 상대운동으로 인한 동하중이 복합적으로 대차들에 반복적으로 작용한다. 철도차량의 안전성 확보를 위해서는 반복되는 피로하중 조건 하에서 각 구성품의 동역학적 거동 분석과 대차들을 구성하는 부재의 피로강도가 충분히 확보되었는가에 대한 피로내구해석이 수행되어야 한다.

본 연구에서는 공칭(nominal) 응력 및 핫스팟(hot-spot) 응력<sup>[21,22]</sup>을 적용한 자체 제작 프로그램인 BFAP(Bogie Fatigue Analysis Program)를 사용하였다. 공칭응력을 대표응력으로 피로수명을 평가하는 경우 용접구조상세별(welding detail)로 실험적으로 구해진 많은 수의 S-N선도가 요구된다. 반면, 용접접합부의 구조적 응력집중계수  $K_t$ 만을 고려한 핫스팟응력을 적용하면 용접 바드(bead) 형상에 무관한 하나의 통일된 S-N선도를 도출할 수 있어 피로수명평가가 보다 효율적으로 수행될 수 있다.

현재 R사에서 수행되고 있는 업무를 분석해보면

Fig. 2와 같이 전체 프로세스는 물론 단위 업무 안에서 자동화가 이루어지지 않아 대부분 해당 실무담당자의 수작업에 의존하고 있다. 따라서 본 연구에서는 자동화를 위하여 각 단위 엔지니어링 업무에서 생성되는 데이터, 설계변수 그리고 프로세스를 새로 정렬함과 동시에 전체 업무를 자동화하기 위한 프로세스도 새로 정렬하였다.

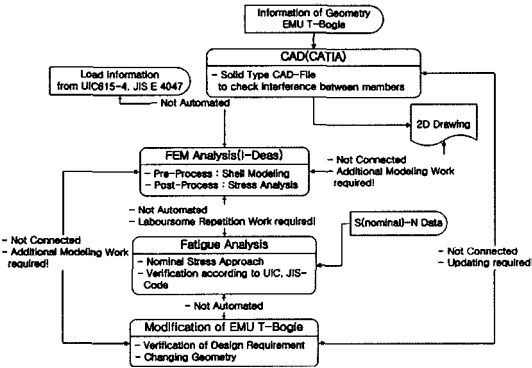


Fig. 2. 현행업무분석.

### 3. 시스템 구현

#### 3.1 데이터 관리 기준

전체 데이터는 Table 1과 같은 단위로 EDM (Engineering Data Management)에서 관리되며, 공칭 용력 기준에 대하여 각 Task에서 사용되는 입출력 데이터와 파일들은 부록A와 같다.

이터와 파일들은 부록A와 같다.

Table 1. 데이터의 관리단위

Project	설계하고자 하는 엔지니어링 분야별로 관리되는 단위이다. 누적피로내구도를 얻기 위해 어떠한 용력을 대표용력으로 선정하는가에 따라 구분된다. - BogieNominal: 공칭용력 - BogieHotSpot: 핫스팟용력
Job	Project가 여러 정보를 넣기 위한 일종의 틀이라면 Job은 실제로 어떠한 정보가 부여되어 실행되는 단위이다. Job 생성 시 고유의 번호가 부여된다. 예) JOB_20051111175155
Task	Job을 수행하기 위한 단위 프로세스이다. BogieNominal은 4개의 Task, BogieHotSpot은 5개의 Task로 구성된다.

#### 3.2 전체 시스템 구성도

Fig. 3은 용접대차틀 피로내구해석을 자동화하기 위해 본 연구에서 사용된 복층계층구조(multi-tiered architecture)의 전체 시스템에 대한 컴포넌트 다이어그램을 보여주고 있다. FIPA(Foundation for Intelligent Physical Agents) 표준규정을 만족하는 JADE (Java Agent DEvelopment) 미들웨어(middleware) 기반으로 개발되었으며, 웹 환경의 사용자 인터페이스를 제공하는 Applet/JSP, HTTP request/response 관리를 위한 Servlet Controller, 인터페이스 에이전트 (Interface Agent), 모니터링 에이전트(Monitoring

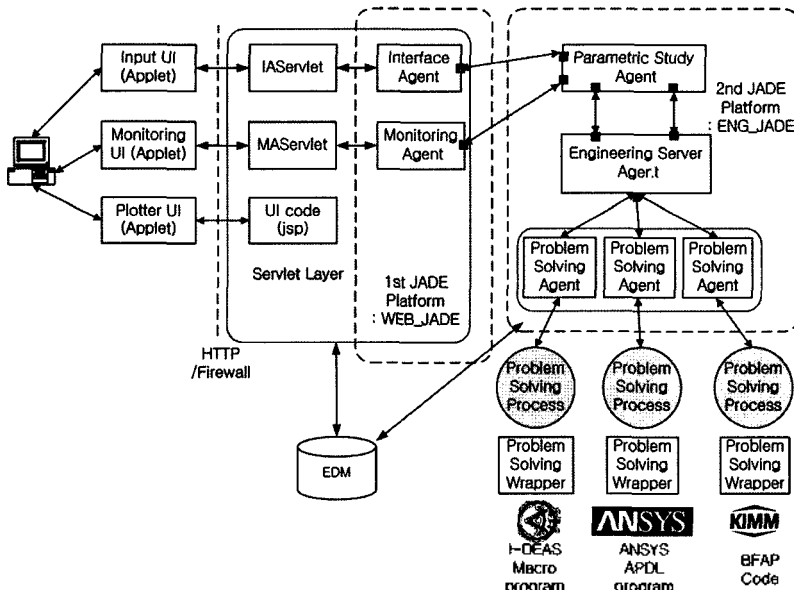


Fig. 3. 전체 시스템에 대한 컴포넌트 다이어그램.

Agent), 매개변수 연구 에이전트(Parametric Study Agent), 엔지니어링 서버 에이전트(Engineering Server Agent), 문제 해결 에이전트(Problem Solving Agent), 문제 해결 래퍼(Problem Solving Wrapper), EDM으로 구성되어 있다. 시스템 실행환경은 Table 2와 같다. 이러한 멀티 에이전트 구조로 되어 있기 때문에 분산 자원의 활용이 용이하고, 원거리에 있는 다양한 엔지니어링 프로그램들과 래퍼(Wrapper)를 이용하여 연동시킬 수 있다.

3.2.1 인터페이스 에이전트

사용자가 웹 환경에서 설계변수를 정의하여 Job을 실행시킬 수 있고, 실행 결과를 조회할 수 있도록 지원한다. 복수 사용자가 여러 가지 엔지니어링 과제를 동시에 수행할 수 있도록 Multi-Job, Multi-User 기능을 제공한다.

3.2.2 모니터링 에이전트

시스템 내 각종 에이전트의 상태와 행동을 모니터링 하기 위해 지원된다. 멀티 에이전트 환경 하에서는 각종 정보가 개개의 독립적인 에이전트들에 의해 조정되어 분산될 수밖에 없기 때문에 필요한 경우 각각의 에이전트들로부터 정보를 모아 관리할 필요가 있다.

3.2.3 매개변수 연구 에이전트

특정 설계변수에 대한 매개변수 연구를 수행하는 경우 여러 번의 해석이 필요하기 때문에 이를 여러 개의 Job으로 나누며, 각각의 작업을 위해 엔지니어링 서버 에이전트를 호출한다.

3.2.4 엔지니어링 서버 에이전트

주어진 Job을 몇 개의 Task들로 분리하며 이를 수행하기 위한 문제 해결 에이전트를 선택하여 해당 Task를 맡긴다. 엔지니어링 서버 에이전트는 각 문제 해결 에이전트 간에 수행되는 전체 흐름(workflow)을 설정하며, 주어진 엔지니어링 문제의 시작과 종료 시점을 조정한다. 또한 각 문제 해결 에이전트들로부터 주어지는 모든 종류의 결과를 EDM에 저장하고 활용한다.

3.2.5 문제 해결 에이전트

엔지니어링 Task를 실제적으로 해결하는 에이전트이다. 관련된 해석, 시뮬레이션 등을 실행하기 위한 문제 해결 프로세스(Problem Solving Process)를 생성한다. EDM으로부터 관련된 설계/해석 지식을 추출하

며, 엔지니어링 프로그램들과 연동하기 위하여 문제 해결 래퍼를 가지고 있다. 문제 해결 래퍼는 설계/해석 과정에서 필요한 입력 데이터를 XML(eXtensible Markup Language) 형태로 제공받아 엔지니어링 프로그램을 구동시키고 다시 그 결과를 XML 형태로 저장한다.

3.2.6 문제 해결 래퍼

Fig. 4와 같이 ParaInput.xml, Wrapper.xml, ParaOutput.xml로 구성되어 있으며, Wrapper.xml은 <Generate>, <Run>, <Parse> 태그(Tag) 구조로 되어 있다. 먼저, EDM으로부터 데이터를 가져와 ParaInput.xml이 생성되며, Wrapper.xml의 <Generate> 태그는 ParaInput.xml의 데이터를 기반으로 엔지니어링 프로그램이 필요로 하는 입력파일을 생성한다. 그러면 <Run> 태그부분에 정의된 일괄 처리(batch process) 기반의 엔지니어링 프로그램이 실행되며, <Parse> 태그는 생성된 결과 파일에서 원하는 데이터를 추출한다. 이후, 추출된 결과데이터를 기반으로 ParaOutput.xml이 생성된 후, 다시 EDM에 데이터가 저장된다.

Table 2. 시스템 실행환경

Operation System	Windows 2000/XP, Redhat Linux 9.0
Development language	JAVA JRE 1.4.2
Agent middleware	JADE 3.3
Web server	Apache 2.0
JSP/Servlet engine	Tomcat 5.0
DBMS	MySQL 4.0
CAD & Pre-processor	I-DEAS 9.0
Stress analysis	ANSYS 9.0
Fatigue analysis	BFAP

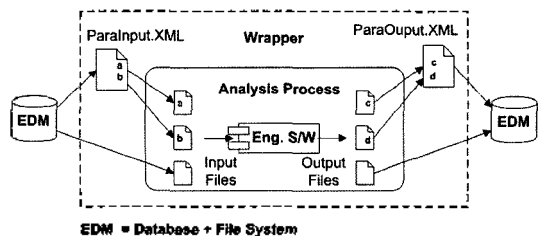


Fig. 4. 문제 해결 래퍼(Problem Solving Wrapper)의 구조.

3.3 에이전트 간 통신 구조

본 연구에서는 단위 에이전트 간 메시지 통신을 위해 JADE 미들웨어가 제공하는 Behaviour<sup>[23]</sup>중에서 AchieveReInitiator/AchieveReResponder, ParallelBe-

haviour, CyclicBehaviour, FSMBehaviour, SequentialBehaviour, ContractNetInitiator, ContractNetResponder를 사용하였다. Fig. 5는 각 에이전트들의 해당 클래스(class)와 메소드(method)를 구현하기 위해 사용된 Behaviour를 나타낸다.

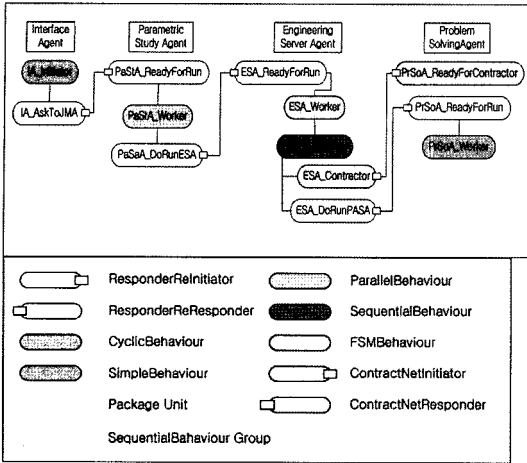


Fig. 5. 에이전트 간 통신 구조 및 사용된 Behaviour.

3.4 웹 기반 사용자 인터페이스

Fig. 6과 같이 웹 브라우저를 통해 로그인을 수행하면 Fig. 7과 같이 Project 리스트가 보여지며, 이 중 하나의 Project를 선택하면 Fig. 8과 같이 진행 중이거나 종료된 Job 리스트가 보여진다. 'New Job' 버튼을 누르면 Fig. 9와 같이 해석을 수행하기 위해 설계 변수를 입력하는 화면으로 이동한다.

본 논문에서는 대차중심으로부터 가로빔 지지 브래킷까지의 거리, 승객중량, 공차중량, 대차중량, 차량 당 대차수, 용접구조상세별 파로강도 등급(핫스팟응력 기준 시 제외), 1차 현수용 스프링의 탄성계수를 사용자가 설계변수로 설정할 수 있도록 하였다. 사용자가 입력한 데이터는 Fig. 9에 보이는 'Run' 버튼 실행과 함께 EDM에 저장되며, 비로소 프로세스가 시작된다.

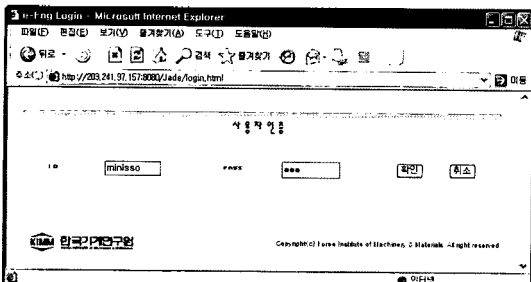


Fig. 6. 사용자 로그인 화면.

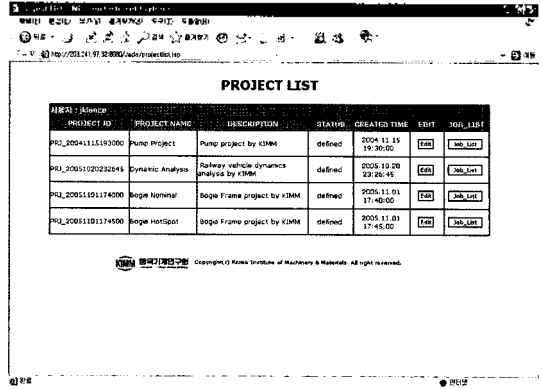


Fig. 7. Project 리스트 화면.

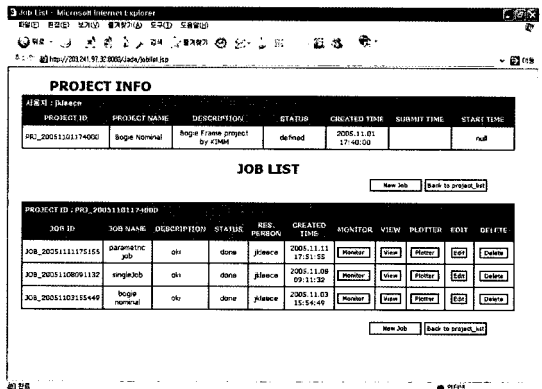


Fig. 8. Job 리스트 화면.

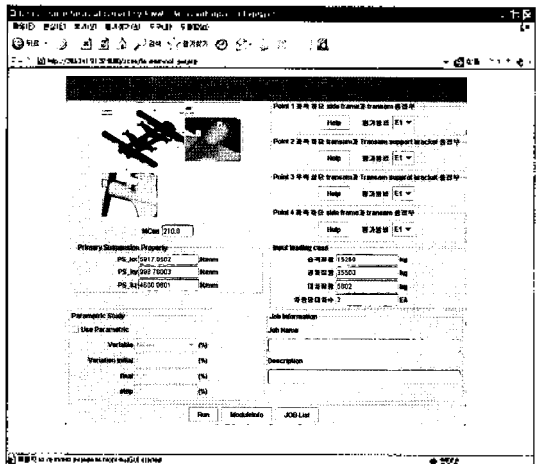


Fig. 9. 공칭응력기준 시 설계변수 입력화면.

3.5 공칭응력기준 피로내구해석을 위한 프로세스  
공칭응력기준 피로내구해석 부분은 NominalIDFAS, NominalANSYS, NominalPost, NominalBFAP와 같이 4개의 Task로 구성된다.

3.5.1 NominalIDEAS Task

Fig. 10과 같이 대차를 기본 모델을 바탕으로 가로빔 지지 브래킷의 위치변경, 추가적인 형상모델링, ANSYS에서 정적응력해석을 수행할 수 있는 유한요소모델 생성, 하중 및 경계조건을 매개변수로 부과하기 위한 그룹핑(grouping)이 수행되며, I-DEAS macro 프로그램을 이용하여 이를 자동화 하였다. 가로빔 지지 브래킷의 위치변화에 따른 형상변화는 Fig. 11과 같다.

ANSYS에서 해석을 수행한 뒤 특정위치에서의 응력 값을 추출할 수 있도록 앵커노드(anchor node)를 생성하였다. 앵커노드로 지정한 부분은 Fig. 12와 같이 4군데로서 가로빔 하단부분과 측면들(side frame)의 용접접합부(위치 1), 가로빔 하단부분과 가로빔 지지 브래킷의 용접접합부(위치 2), 가로빔 상단부분과 가로빔 지지 브래킷의 용접접합부(위치 3) 그리고 가로빔 상단부분과 측면들의 용접접합부(위치 4)이다.

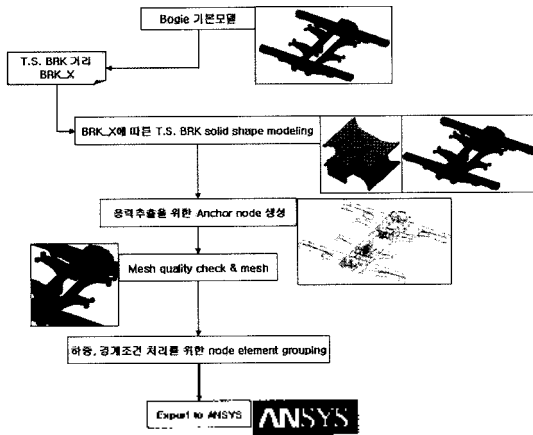


Fig. 10. I-DEAS macro 프로그램에 의한 자동화 과정.



Fig. 11. 가로빔 지지 브래킷의 위치변화에 따른 형상변화.

3.5.2 NominalANSYS Task

Fig. 13과 같이 I-DEAS에서 생성한 유한요소모델을 기반으로 측면들 하단부에 현수용 스프링과 강제 빔 (beam)을 모델링, 노드와 요소에 대한 그룹핑, 하중/경계조건과 물성치 및 셸 요소의 두께 등을 부과하며, 일련의 과정을 APDL(ANSYS Parametric Design Language)을 이용하여 자동화하였다.

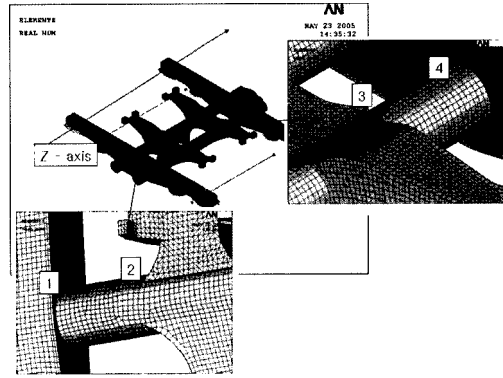


Fig. 12. 공칭응력기준 시 응력 값 추출 위치.

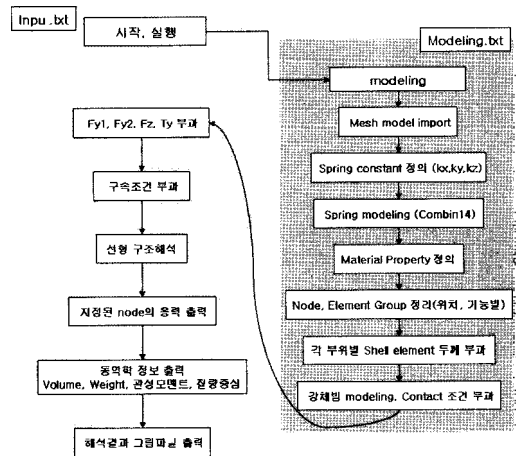


Fig. 13. ANSYS APDL 기반의 해석 자동화 과정.

Table 3. 물성치

Young's modulus ( $E$ )	$210.88 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$
Poisson's ratio ( $\nu$ )	0.29
Density ( $\rho$ )	$7974.2 \times 10^{-9} \text{ Kg/mm}^3$

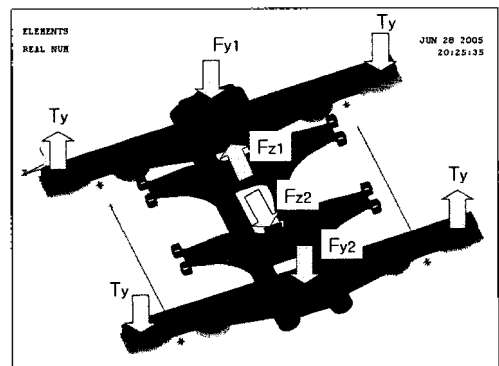


Fig. 14. 하중이 가해지는 위치.

물성치와 관련된 값은 Table 3과 같고, 피로내구해석에서 사용할 용력조건을 얻기 위해 UIC Code 615-4<sup>[24]</sup>에 의거하여 Fig. 14와 같은 위치에 대하여 32가지 하중조건에 대한 정적응력해석을 수행한다. 해석을 수행한 뒤에는 앵커노드로 지정된 위치에서의 최대/최소 주응력(principal stress) 값과 방향코사인(direction cosine) 값을 추출한다.

3.5.3 NominalPost Task

NominalANSYS task에서 생성한 최대/최소 주응력 값과 방향코사인 값을 이용하여 BFAP 프로그램에서 사용할 입력데이터를 생성한다.

3.5.4 NominalBFAP Task

BFAP를 이용하여 위치 1~4 위치에서의 누적피로 손상도를 계산한다.

3.6 핫스팟응력 기준 피로내구해석을 위한 프로세스

핫스팟응력 기준 피로내구해석 부분은 HotSpot-IDEAS, HotSpotANSYS, HotSpotPost, HotSpotSLS-Fitting, HotSpotBFAP와 같이 5개의 Task로 구성되며, 이 중 HotSpotANSYS, HotSpotPost, HotSpotBFAP Task는 공칭응력 기준의 경우와 유사하므로 생략하고, HotSpotIDEAS, HotSpotSLSFitting Task에 대해서만 설명하고자 한다.

3.6.1 HotSpotIDEAS Task

전체적인 프로세스나 응력 값 추출 위치는 Fig. 10, 12와 같이 공칭응력기준의 경우와 동일하나 핫스팟응력 기준의 경우 형상모델링, 유한요소모델 및 앵커노

드를 정하는 방법에 있어 차이가 있다. 핫스팟응력 산정을 위한 절점분할법<sup>[25]</sup>을 측면들과 가로빔의 용접접합부(위치 1, 4)에 대하여 Fig. 15 및 Table 4와 같이 적용하고, 가로빔과 가로빔 지지 브래킷의 용접접합부(위치 2, 3)의 경우 Fig. 16 및 Table 5와 같이 적용한다.

Table 4. 가로빔과 측면들의 용접접합부를 모사하기 위한 절점분할법

(a) 각 절점들의 상대위치

절점	y방향으로의 상대적 위치
N7	$0.5 \pi + tw1$
N6	$0.5 tt$
N1	0
Node	z방향으로의 상대적 위치
N0	$0.5 ts$
N1	0
N2	$-0.5 ts$
N3	$-(0.5ts + tw1)$
N4	$-(0.5ts + 2 tw1)$
N5	$-(0.5ts + 3 tw1)$

(b) 각 요소군들의 두께

요소군	두께
0	$tt + tw1$
1	$tt + tw1$
2	$tt + 0.5 tw1$
3	$tt$
4	$tt$
5	$ts + tw1$
6	$ts + 0.5 tw1$
7	$ts$

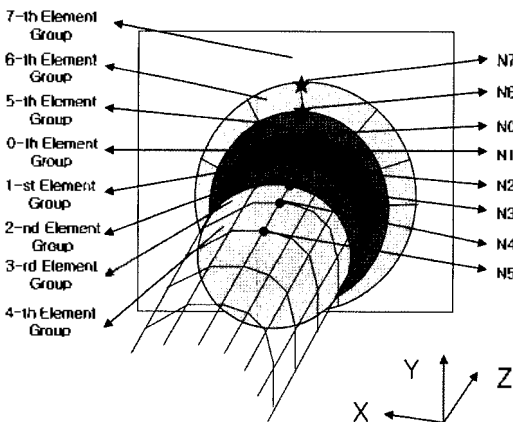


Fig. 15. 가로빔과 측면들의 용접접합부를 모사하기 위한 절점분할법.

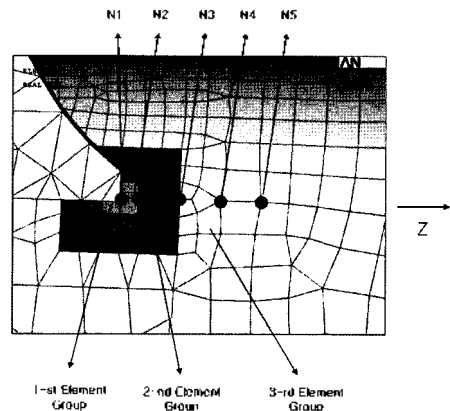


Fig. 16. 가로빔과 가로빔 지지 브래킷의 용접접합부를 모사하기 위한 절점분할법.

**Table 5.** 가로빔과 가로빔 지지 브라켓의 용접접합부를 모사하기 위한 절점분할법

(a) 각 절점들의 상대위치

절점	z방향으로의 상대적 위치
N1	0
N2	0.5 tb
N3	0.5 tb + tw2
N4	0.5 tb + 2 tw2
N5	0.5 tb + 3 tw2

(b) 각 요소군들의 두께

요소군	두께
1	tt + tw2
2	tt + 0.5 tw2
3	tt

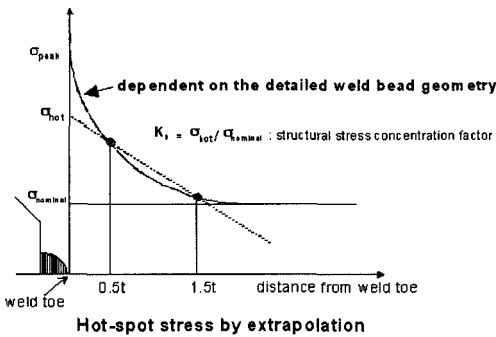
tt : 가로빔의 두께

ts : 측면틀의 두께

tw1 : 용접비드(head)의 레그(leg) 길이 = (tt + ts)/2

3.6.2 HotSpotSLSFitting Task

Fig. 17과 같이 각 응력추출 위치마다 5개의 앵커노드에서 구해진 응력들을 이용하여 curve fitting을 수행한 뒤, 두 특정 위치에서의 응력을 이용한 2점 외삽법(extrapolation)<sup>[21,22]</sup>을 이용하여 최종적으로 핫스팟 응력을 구한다.



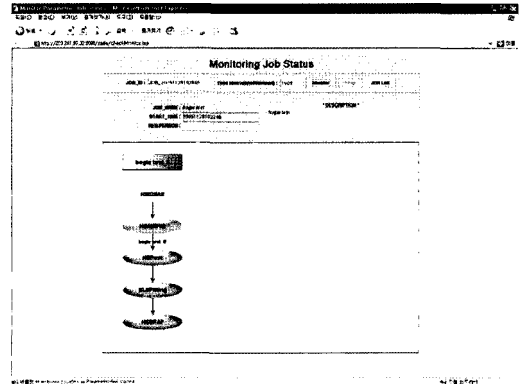
**Fig. 17.** 두 점 외삽법에 의한 핫스팟응력 계산.

3.7 프로그램 진행상태 모니터링 및 결과 조회

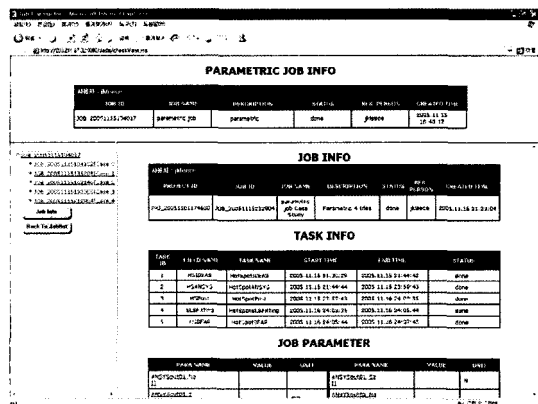
사용자는 Fig. 18과 같이 Job이나 Task의 진행상태를 웹 기반으로 확인할 수 있다. 종료된 Task는 노란색으로, 진행중인 Task는 연두색으로, 아직 시작하지 않은 Task는 회색으로 표시된다. 해당 Task 수행 시 문제가 발생하면 빨간색으로 표시된다.

모든 프로세스가 종료된 뒤 Fig. 19와 같은 결과 화면을 볼 수 있으며, 수행한 Job이 매개변수 연구인 경우 sub-Job들이 나열된다. 프로세스 중에 생성된 배

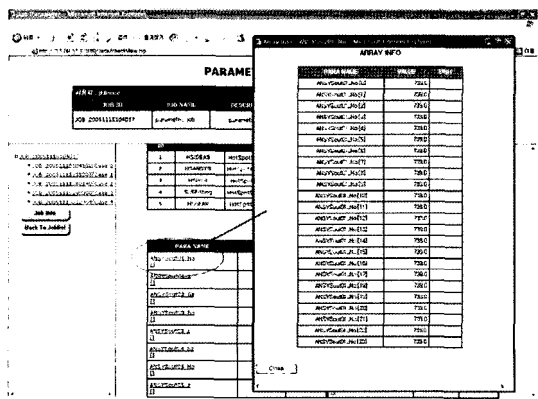
열형 Job 변수의 정보를 위해 Fig. 20과 같은 popup 화면이 제공된다. 또한, Task 수행 중에 생성된 그림 파일들에 대한 정보도 Fig. 21과 같이 제공된다. 매개변수 연구를 수행한 경우 Fig. 22와 같이 매개변수에 대한 추이(change)를 그래프로 알 수 있다.



**Fig. 18.** 프로세스 진행 모니터링.



**Fig. 19.** 수행한 Task와 Job 매개변수 정보.



**Fig. 20.** 배열형 Job 매개변수 조회를 위한 popup 화면.



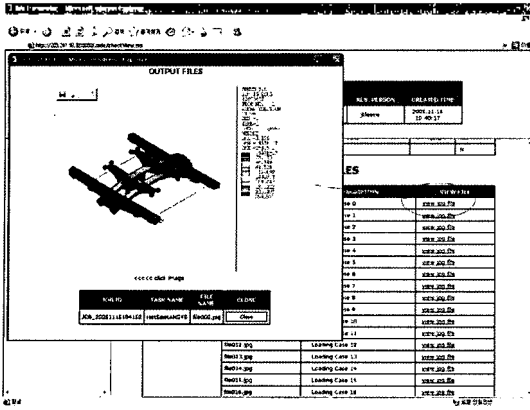


Fig. 21. 프로세스 과정 중에 생성된 출력분포도.

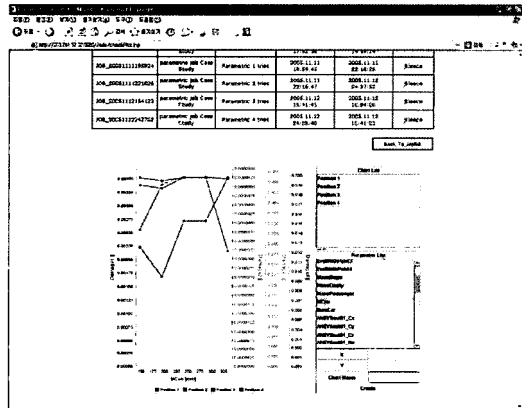


Fig. 22. 매개변수 연구 결과에 대한 plotting.

### 4. 용접대차를 피로내구해석 결과

본 연구에서 고려한 매개변수 연구의 목적은 가로빔 지지 브래킷의 위치변화가 누적피로손상도에 주는 영향을 알아보기 위함이다. 위치 1, 2 및 4에서의 누적피로손상도는 0.08 이하로 매우 낮아 주어진 피로하중조건에서 피로파손의 발생 확률은 매우 낮은 것으로 판단된다. 위치 3에서는 공칭 및 핫스팟 응력 기준의 경우 각각 0.25~0.5 그리고 0.2~0.3 정도로 상대적으로 크게 나타났으나, 피로강도 측면에서 적절히 설계되었다고 판단된다. 한편, 대차중심으로부터 가로빔 지지 브래킷까지의 거리변화가 누적피로손상도에 준 영향을 살펴보면 거리가 커짐에 따라 누적피로손상도는 초기에 일정하다가 이후 감소하는 경향을 보인다. 이는 가로빔 지지 브래킷의 위치가 측면들 쪽으로 접근함에 따라 비틀림 하중성분에 대한 대차들의 비틀림 거동을 가로빔 지지 브래킷이 잡아주기 때

문으로 판단된다. 하지만 가로빔 지지 브래킷의 기능은 가로빔 하단에 장착된 모노 링크 브래킷(mono-link bracket)에 가해지는 전후 방향의 하중을 분담하기 위한 기능도 갖고 있으므로 두 가지 거동을 만족하는 최적의 위치가 추가적으로 결정되어야 할 것이다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 멀티 에이전트 기반 엔지니어링 프레임워크를 기반으로 용접대차를 피로내구해석의 자동화를 수행하였고, 국내 R사의 전동차용 용접대차들의 형상변화를 고려한 매개변수 연구 예제에 적용하여 그 특성을 분석하였다. 이를 통해 설계변경 시 빈번히 발생하는 형상모델링-유한요소생성-정적응력해석-피로내구해석의 반복 작업을 자동화 할 수 있었다. 본 연구에서 개발한 공칭 및 핫스팟 응력기준 피로내구해석의 자동화를 통하여 실무작업 시 형상변경(5회 기준)에 따른 반복적인 정적응력해석과 피로내구해석에 소요되는 시간을 기존 5일에서 15시간으로 줄임으로써 80% 이상 작업시간을 단축하였다. 또한 형상모델링, 유한요소생성, 정적응력해석, 피로내구해석 등 각 분야별로 Task를 분리하여 수행함으로써 잦은 설계변경이 발생하더라도 프로그램의 수정부분을 최소화하도록 하였다. 또한, 빌트 에이전트 기반 엔지니어링 프레임워크의 웹 기반 기술, 래퍼 프로그램을 활용함으로써 원거리에 있는 다양한 엔지니어링 프로그램을 활용할 수 있었다.

향후 연구방향으로는 에이전트 기술의 장점이라고 할 수 있는 동적분산자원할당(dynamic distributed resource allocation) 기능을 이용하여 부하균형(load balancing)이나 고장내성(fault tolerance) 기능을 구현하며, 인지(sensing), 반응(acting), 조정(coordination), 갈등해소(conflict resolution) 등의 기능을 이용하여 설계변경 및 원거리 협업에 효율적인 비중앙집중형 설계방법론(decentralized design methodology) 및 지식 기반의 엔지니어링 프레임워크를 구현하고자 한다.

### 감사의 글

본 논문은 한국기계연구원 기본사업 과제인 “구조강도평가 시뮬레이션 기술개발” 및 과학기술부 특정연구개발사업 과제인 “자동차 모듈 설계용 e-엔지니어링 프레임워크 개발”의 일부임을 밝히는 바이며, 연구수행에 지원해 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 한관희, 박찬우, “제품정보관리 시스템 개발을 위한 기능 분석에 관한 연구”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제7권, 제1호, pp. 42-56, 2002년 3월.
2. 김영호, 주경준, 김동수, 강석호, “설계 프로세스 관리를 위한 웹 기반 워크플로우 시스템”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제5권, 제1호, pp. 61-70, 2000년 3월.
3. 김현, 김형선, 이주행, 정진미, 도남철, 이재열, “기업간 제품정보 공유를 위한 협업적 웹 서비스기반 제품개발 엔지니어링 협업시스템”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제8권, 제4호, pp. 201-211, 2003년 12월.
4. 박홍석, 최홍원, 이규봉, “협업공학 기반의 제품개발 지원 시스템”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제9권, 제4호, pp. 387-396, 2004년 12월.
5. 박지형, 진진완, 김장원, 이재욱, 이규봉, “웹 서비스기반 제품개발 엔지니어링 협업시스템”, 한국CAD/CAM학회 학술발표회 논문집, pp. 214-219, 2005년 1월 27일-29일.
6. 양상욱, 최영, “실시간 원격 협력 설계 시스템 - CoDes”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제5권, 제1호, pp. 42-49, 2000년 3월.
7. 노명익, 이규열, “협동 최적화 접근 방법에 의한 다분야 최적 설계에 관한 연구”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제5권, 제3호, pp. 263-275, 2000년 9월.
8. 홍은지, 이세정, 이재호, 김승민, “다분야통합설계를 위한 데이터 서버 중심의 컴퓨팅 기반구조”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제8권, 제4호, pp. 231-242, 2003년 12월.
9. 주민식, 이세경, 최동훈, “다분야통합최적설계를 지원하는 분산환경 기반의 설계 프레임워크 개발”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제10권, 제2호, pp. 143-150, 2005년 4월.
10. 구분식, 이수홍, “ADE: 공학 에이전트 개발 환경”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제8권, 제1호, pp. 55-63, 2003년 3월.
11. 이창근, 이수홍, 방건동, “웹 기반 통합 설계 환경 구축에 관한 연구”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제7권, 제2호, pp. 110-120, 2002년 6월.
12. 이경호, 이순섭, 이종갑, “인터넷 기반의 원격 협동 선박설계 시스템”, 한국CAD/CAM학회 논문집, 제6권, 제3호, pp. 198-205, 2001년 9월.
13. <http://www-903.ibm.com/kr/solutions/plm/catiav5/>
14. <http://www.phoenix-int.com/>
15. <http://www.engineous.com/>
16. <http://www.mssoftware.com/products>
17. Shen, W., Norrie, D. H. and Barthes, J. P., “Multi-Agent Systems for Concurrent Intelligent Design and Manufacturing”, Taylor and Francis, pp. 37-48, 2001.
18. Park, S. W., Lee, J. K. and Shin, B. C., “Introduction to Development of e-Engineering Framework for the Automotive Module Design”, *CSCWD2005, Coventry, UK*, pp. 146-151, May 24-26, 2005.
19. 이재경, 박성환, 방제성, 이한민, “서비스 지향 구조 개념을 적용한 통합 설계 시스템 개발에 관한 연구”, 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 958-961, 2005년 10월.
20. 이재경, 박성환, 이종원, 한승호, 한형석, “멀티 에이전트 기반의 통합설계 시스템 개발”, 한국정밀공학회 논문집, 제22권, 제1호, pp. 14-18, 2005년 1월.
21. 한승호, 신병천, 한정우, “Hot-spot응력에 의한 용접부의 피로강도평가 및 피로설계기준의 도출”, 대한기계학회논문집, 제22권, 제11호, pp. 2072-2083, 1998.
22. Han, S. H. and Shin, B. C., “The Use of Hot-spot Stress for Estimating the Fatigue Strength of Welded Components”, *Steel Research*, Vol. 71, No. 11, pp. 466-473, 2000.
23. Giovanni, C., *JADE Tutorial: JADE programming for beginners*, TILAB, 2003.
24. UIC Code 615-4, *Motive Power Units-Bogies and Running Gear-Bogie Frame Structure Strength Tests*, International Union of Railways, 1994.
25. Machida, S., Matoba, M., Yoshinara, H. and Nishimura, R., “Definition of Hot Spot Stress in Welded Structure for Fatigue Assessment(3rd Report-FEM)”, *Journal of SNAJ*, Vol. 171, No. 11, pp. 477-484, 1992.

## 부록 A

## A.1 NominalIDEAS Task

ParaInput.xml이 EDM으로부터 추출하는 데이터	MCen	대차중심으로부터 가로빔 지지 브래킷지의 거리
	MassPassenger	승객중량
	MassEmpty	공차중량
	MassBogie	대차중량
	NumCar	차량당 대차수
ParaInput.xml로부터 생성되는 입력파일	kimm_mv2.prg	모델링/유한요소모델 생성을 자동화하는 IDEAS macro 파일
	Load_Inp.dat	MCen, MassPassenger, MassEmpty, MassBogie, NumCar 값을 이용하여 만든 Load_Generator.exe의 입력파일
기존에 존재하여 이용하는 파일	없음	
실행파일	ideas_k.bat	IDEAS를 활성화하여 kimm_mv2.prg를 실행하는 batch 파일
	Load_Generator.exe	위의 정보들을 이용하여 24가지의 하중조건을 산정
실행 후 생성되는 결과파일	Tcar2.dat	kimm_mv2.prg가 생성하여 ANSYS에서 실행할 대차의 유한요소모델 파일
	Load_BC_Step.txt	Load_Generator.exe에서 생성한 24가지의 하중조건을 저장한 파일
ParaOutput.xml이 EDM에 저장하는 데이터	Fy1[24]	좌측 수직하중
	Fy2[24]	우측 수직하중
	Fz1[24]	좌측 수평하중
	Fz2[24]	우측 수평하중
	Ty[24]	비틀림변위

## A.2 NominalANSYS Task

ParaInput.xml이 EDM으로부터 추출하는 데이터	Fy1[24]	좌측 수직하중
	Fy2[24]	우측 수직하중
	Fz1[24]	좌측 수평하중
	Fz2[24]	우측 수평하중
	Ty[24]	비틀림변위
ParaInput.xml로부터 생성되는 입력파일	bog_k_inp.txt	하중값 부과, 경계조건 부과, 구조해석, 최대/최소응력 추출, 동력학 정보 추출, 응력분포 그림 생성
기존에 존재하여 이용하는 파일	bog_k_modeling.txt	각종 물성치 부과, parameterization, grouping 정보 설정
	Tcar2.dat	kimm_mv2.prg가 생성하고 ANSYS에서 실행할 대차의 유한요소모델 파일
실행파일	ansys_k.bat	bog_k_inp.txt, bog_k_modeling.txt, Tcar2.dat을 이용하여 ANSYS를 활성화하여 24가지 하중조건에 대하여 정적구조해석을 수행
	Kimm_post2.exe	필요한 정보만 query하는 파일
실행 후 생성되는 결과파일	file000.jpg~file023.jpg	bog_k_inp.txt에 의해 생성된 각 하중조건에서의 응력분포도
	Kimm_post2.txt	필요한 정보만을 추출한 파일
ParaOutput.xml이 EDM에 저장하는 데이터	ANSYSout01_No[24]-ANSYSout04_No[24]	4가지 하중조건에 대한 위치1~위치4의 절점번호
	ANSYSout01_z[24]~ANSYSout04_z[24]	24가지 하중조건에 대한 위치1~위치4의 z 위치
	ANSYSout01_S1[24]~ANSYSout04_S1[24]	24가지 하중조건에 대한 위치1~위치4의 주응력 크기
	ANSYSout01_Cx[24]~ANSYSout04_Cx[24]	24가지 하중조건에 대한 위치1~위치4의 주응력 방향 코사인인의 x방향 성분

A.2 Continued

	ANSYSout01_Cy[24]~ ANSYSout04_Cy[24]	24가지 하중조건에 대한 위치1~ 위치4의 주응력방향 코사인의 y방향 성분
	ANSYSout01_Cz[24]~ ANSYSout04_Cz[24]	24가지 하중조건에 대한 위치1~ 위치4의 주응력방향 코사인의 z방향 성분

A.3 NominalPost Task

ParaInput.xml이 EDM으로부터 추출하는 데이터	ANSYSout01_No[24]~ ANSYSout04_No[24]	4가지 하중조건에 대한 위치1~ 위치4의 절점번호
	ANSYSout01_z[24]~ ANSYSout04_z[24]	24가지 하중조건에 대한 위치1~ 위치4의 z 위치
	ANSYSout01_S1[24]~ ANSYSout04_S1[24]	24가지 하중조건에 대한 위치1~ 위치4의 주응력 크기
	ANSYSout01_Cx[24]~ ANSYSout04_Cx[24]	24가지 하중조건에 대한 위치1~ 위치4의 주응력방향 코사인의 x방향성분
	ANSYSout01_Cy[24]~ ANSYSout04_Cy[24]	24가지 하중조건에 대한 위치1~ 위치4의 주응력 방향코사인의 y방향성분
	ANSYSout01_Cz[24]~ ANSYSout04_Cz[24]	24가지 하중조건에 대한 위치1~ 위치4의 주응력 방향코사인의 z방향 성분
ParaInput.xml로부터 생성되는 입력파일	Bogie_ANSYS_out01.txt~ Bogie_ANSYS_out04.txt	Load_BC_Reordering.exe와 Bogie_Nominal_DCosine.exe에서 사용할 입력파일
기존에 존재하여 이용하는 파일	Load_BC_ReIndex.txt	인위적인 데이터 재배열을 위해 만든 파일
실행파일	Load_BC_Reordering.exe	재배열 실행파일
	Bogie_Nominal_DCosine.exe	주응력 성분으로 변환하는 파일
실행 후 생성되는 결과파일	Bogie_Nominal_DC_out01.txt~ Bogie_Nominal_DC_out04.txt	위치1~위치4에 대해 BFAP 프로그램에서 사용할 응력값들이 저장된 파일
	Nominalout01_Smax[18]~ Nominalout04_Smax[18]	BFAP프로그램에서 사용할 최대응력값
ParaOutput.xml이 EDM에 저장하는 데이터	Nominalout01_Smin[18]~ Nominalout04_Smin[18]	BFAP프로그램에서 사용할 최소응력값

A.4 NominalBFAP Task

ParaInput.xml이 EDM으로부터 추출하는 데이터	Nominalout01_Smax[18]~ Nominalout04_Smax[18]	BFAP프로그램에서 사용할 최대응력값
	Nominalout01_Smin[18]~ Nominalout04_Smin[18]	BFAP프로그램에서 사용할 최소응력값
	EvalMethPoint1~ EvalMethPoint4	위치1~위치4에서의 피로내구해석 방법
ParaInput.xml로부터 생성되는 입력파일	Stress_Input1.dat~ Stress_Input4.dat	위치1~위치4에서의 피로내구해석을 위한 입력파일
기존에 존재하여 이용하는 파일	Global_Par1.dat~ Global_Par4.dat	위치1~위치4에서의 피로내구해석 방법을 정의한 파일
실행파일	Bogie_BFAP.exe	피로내구해석 프로그램
실행 후 생성되는 결과파일	Damage_Output1.dat~ Damage_Output4.dat	위치1~위치4에서의 피로내구해석 결과파일
ParaOutput.xml이 EDM에 저장하는 데이터	Damage1~ Damage4	위치1~위치4에서의 누적피로손상도



**방재성**

1999년 인하대학교 항공우주공학과 학사  
2002년 서울대학교 기계항공공학부 석사  
2002년~2004년 삼성SDS  
2005년~현재 한국기계연구원 선임연구원  
관심분야: 다분야간 설계최적화, PLM  
(Product Lifecycle Management),  
시스템 통합(System Integration)



**한승호**

1989년 한양대학교 기계설계학과 학사  
1991년 한양대학교 기계설계학과 석사  
1996년 (독)아헨공과대학 박사  
1996년~현재 한국기계연구원 책임연구원  
관심분야: 구조물의 피로내구 해석 및 설  
계, 가상시제 기술



**이재경**

1995년 아주대학교 컴퓨터공학과 학사  
1997년 아주대학교 컴퓨터공학과 석사  
2003년~현재 충남대학교 컴퓨터공학과 박  
사과정  
1997년~현재 한국기계연구원 선임연구원  
관심분야: SOA(Service Oriented Archi-  
tecture), 에이전트 기반 프레임워  
크 및 통합 기술



**박성환**

1983년 서울대학교 조선공학과 학사  
1985년 서울대학교 조선공학과 석사  
1996년 일본 히로시마대학 구조공학전공  
박사  
1985년~현재 한국기계연구원 책임연구원,  
e-엔지니어링연구센터장  
관심분야: 에이전트 기반 프레임워크 및  
통합 기술, 가상현실기술, 대형 해  
양부유구조물 설계



**임채환**

1980년 서울대학교 조선공학과 학사  
1982년 서울대학교 조선공학과 석사  
1993년 University of Michigan 조선공  
학과 박사  
1982년~현재 한국기계연구원 책임연구원  
관심분야: 선박구조물 피로강도 및 안전  
성 평가



**송시엽**

1999년 한양대학교 기계공학과 학사  
2001년 한양대학교 기계공학과 석사  
2001년~2003년 한국철도차량  
2003년~현재 로템 기술연구소  
관심분야: 철도차량 피로내구 해석 및 설계