

프로세스 통합 환경 기반의 철도차량 동역학 해석시스템 구축

On the System Development for the railway vehicle dynamic analysis based on integrated process environments

허영철* 한형석** 이재경** 김병현**
Huh, Young-Cheol Han, Hyung-Suk Lee, Jae-Kyung Kim, Byung-Hyun

ABSTRACT

The dynamic performances of railway vehicles, such as ride comfort, stability and safety, have the opposite characteristics of response each other according to design changes of suspensions. For this reasons, it is necessary that multidisciplinary engineers join in design processes of the suspensions so as to satisfy the requirements of dynamic performance with design constraints. Sometimes iterative dynamic analyses are required so many times during the design processes.

In this paper, the development of integrated process environments and the dynamic analyses of railway vehicles based on the environments are presented. Using agent and wrapping technologies, process managements about the work process and design parameters were set up under the distributed computing environments. Also, dynamic analyses on the sample railway vehicle were carried out and the efficiency and improvement in future work were discussed as results.

1. 서론

철도차량의 동적 성능을 이루는 승차감, 주행안정성 및 주행안전성은 현가요소의 변화에 대해 이율배반적인 응답 특성을 갖는다. 이런 특성 때문에 현가요소 설계에서 동적 성능과 설계 제한조건을 동시에 만족시키기 위해 다분야 기술자의 참여와 함께 많은 회수의 반복적인 동역학 해석이 요구된다. 동역학 해석을 위한 모델은 기본적으로 차량을 구성하는 거의 모든 장치들의 특성 값이 포함되어야 하고 주행 조건에 따라 레일의 불규칙도를 포함한 다양한 해석 조건이 고려되어야 한다. 이와 함께 다양한 기준에 의한 성능 평가가 필요하다. 따라서 완성된 차량모델에 대해 동역학 해석 및 평가의 반복적인 과정이 미리 계획된 프로세스에 의해 자동으로 처리될 수 있다면 현가요소의 설계가 좀 더 수월하게 진행될 수 있을 것이다.

본 논문에서는 철도차량의 동역학 해석 및 평가를 효율적으로 수행하기 위한 프로세스 통합 환경의 구축 사례를 소개한다. 기본적인 에이전트 기술과 래핑 기술을 이용하여 구축된 환경 하에서 동역학 해석을 위한 일괄 프로세스 및 설계 자료의 관리를 시도하였다. 개발된 통합 환경은 서로 원격에 위치한 한대의 주 플랫폼과 두 대의 보조 플랫폼으로 구성되며, 주 플랫폼은 프로젝트의 생

* 책임저자 : 한국기계연구원, 비회원

** 한국기계연구원, 정회원

성 및 관리, 사용자 관리, 해석업무 흐름의 처리, 공학 데이터의 관리 및 해석 소프트웨어와의 연동 기능 등을 담당한다. 두 대의 보조 플랫폼에는 각각 AGEM 프로그램과 MSC.ADAMS/Rail 프로그램이 설치되어, 주 플랫폼의 작업 요청에 따라 두 단계의 동역학 해석 프로세스를 진행한다. 1단계인 AGEM 프로그램에서 설계 민감도와 함께 적절한 현가요소의 특성 값들이 결정되면 2단계인 ADAMS/Rail 프로그램에서 설계 변수로 선정한 현가요소의 특성 값들을 순차적으로 변화시키면서 동적 성능을 상세하게 평가하고 허용 기준을 만족하는 특성 값을 최종적으로 출력한다.

개발한 통합 환경의 프로세스 검증에 위해 영국의 ERRI 차량에 대한 예제 계산을 수행하여 보았다. 모든 설계 특성 값들은 ADAMS/Rail에서 제공되는 공차 상태의 값들을 이용하였다. 대상 차량에 대한 동적 성능은 우선 직선 주행에 의한 승차감과 곡선 주행에 의한 탈선계수의 평가만을 시도하였고, 각각의 성능에 민감한 영향을 주는 설계 변수에 대해 정해진 횟수만큼 반복 계산을 하였다. 2단계에서 사용된 승차감 및 탈선계수의 평가는 각각 UIC 기준에 의한 Nmv 지수와 빈도누적 확률에 의한 동적 탈선계수 평가 방법을 적용하였다.

예제 계산 결과 1단계와 2단계 간의 상호 데이터 연동 및 주 플랫폼과의 의사소통 등의 전체적인 프로세스가 원활하게 진행하고 있음을 확인할 수 있었다. 아울러, 임의로 설정된 초기 설계 값에서 출발하여 동적 성능의 허용 한도를 만족시키는 현가요소의 특성 값들이 적절하게 출력됨을 보였다. 현재는 프로세스 개발 단계이므로 최적 현가요소의 특성 값을 산정하는 최적화 과정이 포함되어 있지 않으나, 실 차량의 설계 시 많은 회수의 반복적인 해석 및 평가가 필요할 경우 일련의 반복 과정을 일괄로 처리해 줌으로써 시행착오에 의한 경비를 줄일 수 있는 장점이 있을 것으로 판단한다. 또한, 향후 다분야 설계자의 공동 참여에 의한 설계 프로세스가 명확하게 정의되고 충분한 검증이 이루어진다면 통합 환경 하에서 다분야 해석에 의한 협업 설계의 유용한 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 프로세스 통합 환경의 구축

통합 환경을 위한 시스템은 제품 개발 시 다분야의 설계 전문가팀이 동시에 참여한다는 가정 하에 각 설계 전문가팀을 독립된 해석을 수행하는 단위 에이전트로 정의하고 이러한 단위 에이전트에 의해 수행되는 업무의 흐름을 통합 관리하는 멀티에이전트 시스템으로 구축되었다. 각 전문가팀은 CAD, 구조해석, 동역학 해석 및 피로해석 전문가팀 등으로 구성될 수 있는데 본 논문에서는 동역학 해석에 국한하여 설명하고자 한다.

2.1 멀티 에이전트의 시스템 아키텍처

프로세스 통합 환경은 미리 정의된 하나의 업무를 처리하는 단위 에이전트들의 집합으로 구성되며 주 플랫폼에는 ES(Engineering Server) 에이전트, EDM(Engineering Data Management) 에이전트, Job 에이전트, DF(Directory Facilitator) 에이전트, 모니터링 에이전트 및 Interface 에이전트가 있다. 해석 업무를 담당하게 되는 보조 플랫폼은 PS(Problem Solving) 에이전트와 PS 에이전트의 지시에 따라 직접 해석을 담당하게 되는 동역학 해석 프로그램으로 구성된다. 그림 1은 구성된 에이전트간의 상호작용과 의사소통을 보여주는 시스템의 구성도이다. 각 에이전트들의 주요 기능은 다음과 같다.

- ES 에이전트

인터페이스 에이전트와 연동하여 프로젝트의 생성/관리를 담당하며 사용자 요청에 따라 Job 에이전트를 생성하고 시스템의 전체적인 조정 및 관리를 수행한다. 또한 EDM 에이전트를 통하여 프로젝트 및 작업정보에 관한 자료 등을 관리한다.

- EDM 에이전트

DB와 파일 시스템에 저장된 설계 자료, 시스템 자료 및 프로젝트 자료 등을 관리하며 다른 에이전트로부터의 자료 요청을 처리한다.

- Job 에이전트

ES 에이전트에 의해 생성되며 해석 모듈 별로 존재하는 PS 에이전트를 탐색하여 프로젝트의 업무흐름에 따라 할당된 작업을 수행시킨다. DF 에이전트에 등록된 정보를 이용하여 PS 에이전트를 탐색하게 되는데 동일한 해석 기능을 가진 복수의 PS 에이전트가 등록되어 있다면 현재 업무부하가 상대적으로 적은 PS 에이전트를 선택할 수 있다.

- DF 에이전트

모든 에이전트들에 대한 등록정보와 상태정보를 관리하며 에이전트에 대한 디렉토리 서비스 기능을 제공한다.

- PS 에이전트

설계자가 사전에 정의한 논리에 따라 해석을 수행시키는 에이전트이며 기존의 해석 프로그램과의 연동을 담당하는 래퍼를 통하여 작업을 수행한다.

- 모니터링 에이전트

사용자에게 시스템의 현 상태와 각 에이전트 상태 및 프로젝트 진행 정보 등을 제공한다.

- Interface 에이전트

웹 기반 사용자 인터페이스를 제공하며 사용자의 작업 요청을 ES 에이전트에 전달하고 모니터링 에이전트와의 통신을 통하여 사용자에게 프로젝트 진행 정보 및 시스템 상태 정보를 제공한다.

2.2 동역학 해석 PS 에이전트

PS 에이전트는 Job 에이전트의 작업 요청을 받아 직접 해당 해석 업무를 진행하게 된다. 해석 업무의 실행은 래핑 기법을 이용하여 구현되는데 자체 개발한 PSJade라는 프로그램에 의하여 이루어진다. 해석에 필요한 입출력 자료 및 래퍼는 XML 문서로 작성되며 그림 2에 일련의 과정을 예시하였다. 래퍼는 기본적으로 입력 파일의 생성부, 해석기의 실행 및 평가부, 결과 추출부 그리고 반복계산 결정부 등으로 구성되는데 실제 해석은 해석기인 AGEM, ADAMS/Rail에서 수행한다. 본 논문에서는 그림 2와 같은 래핑을 이용하여 철도차량 동역학 해석을 위한 PS 에이전트를 구축하였다.

2.3 동역학 해석 프로세스

2.2에서 개발한 동역학 해석 PS 에이전트를 이용하여 해석 프로세스를 자동화하였다. 본 논문에서는 동역학 해석 프로세스를 크게 두 단계인 Phase I과 Phase II로 구분하였다. Phase I의 목적은 다수의 설계변수에 대한 민감도 해석과 현가요소에 대한 초기 설계를 수행하는 기능을 갖는다. Phase I 단계인 AGEM은 모델링 과정이 비교적 단순하고 계산 시간이 짧기 때문에 초기 설계에 적합하다. 일단, Phase I에서 초기 설계가 완료되면 Phase II에서 ADAMS/Rail을 이용한 상세해석 및 평가가 이루어진다.

Phase I에서 최초로 설정된 설계 변수를 이용하여 민감도 해석이 이루어지면 승차감, 안정성, 안전성에 민감한 설계 변수 X_0 를 택하고 반복 해석을 통해서 개선된 설계 변수 X_I 가 도출된다. Phase II에서는 전달받은 X_I 를 초기 입력 값으로 가정하고 순차적인 반복 계산과 성능의 평가를 거쳐 X_{II} 를 출력하고 종료한다. Phase II에서는 MatLab 언어로 구성한 별도의 평가 프로그램을 이용했는데, 승차감의 경우 ISO2631에서 제안된 filter를 사용하여 UIC513 기준에 의한 가속도의 지수 평가를 하고 동적 탈선계수의 경우 30 Hz 4-pole filter로 여과된 결과의 빈도누적 확률을 계산하여 탈선 여부를 평가하게 된다. 이와 같은 Phase I, Phase II의 프로세스가 PS 에이전트를 이용하여 일괄 처리됨으로써 반복 계산 및 결과의 평가가 자동으로 이루어지게 된다. 한편, 실 설계 시 동적 성능의 평가 항목은 임계속도, 동적 탈선계수, 동적 윤중감소율, 차륜 횡압 및 승차감을 들 수 있는데 본 논문에서는 편의상 임계속도, 승차감 및 동적 탈선계수만을 평가한다.

3. 통합 프로세스를 적용한 차량 동역학 해석 예

2장에서 소개한 방법의 유용성을 확인하기 위하여 설계 자료가 공개된 차량에 적용하였다. 본 논문에서는 프로세스 통합에 따른 유용성 검증에 중점을 두었기 때문에 엄밀한 자료나 해석 결과 및 판단 기준은 간략히 소개하기로 한다. 예제로 사용된 차량은 ADAMS/Rail에서 제공하는 영국의 ERRI차량이다.

3.1 통합 프로세스에 의한 결과

그림 3과 같은 웹 브라우저를 통한 사용자 인터페이스를 제공한다. 입력 GUI 창에 차량의 설계 자료와 변수의 변화량을 입력한 후 프로세스를 실행시킨다. 대상 차량은 이미 설계가 잘 이루어진 차량이므로 전체 프로세스의 검증을 목적으로 현가요소 원 값의 4~6배 정도 큰 수치를 초기 입력 값으로 설정하였다. Phase I의 경우 각각 11회, 13회의 반복 계산 후에 설계 변수 X_I 가 도출되었고, Phase II의 경우 반복 계산의 수행 없이 최종 설계 변수 X_{II} 가 도출되었다. 계산의 진행 상황 및 그 결과는 그림 4.5와 같이 웹 브라우저를 통해 사용자가 직접 확인할 수 있으며 중요 결과는 파일과 함께 EDM에 저장된다.

3.2 Phase I : AGEM에 의한 결과

본 차량을 구성하는 현가 요소 특성 값에 대한 민감도 해석 및 설계가 그림 2와 같이 PS 에이전트 : Phase I에 의하여 수행된다. 승차감 평가는 주파수응답 해석에 의해 이루어지며, 궤도 불규칙도는 FRA의 Class 3을 적용했다. 안정성 평가는 속도 증가에 따른 감쇠비가 음으로 변화하는 속도로 평가하였고, 안전성은 일정한 곡선반경(300m)에서의 탈선계수로 평가하였다. 민감도 해석 결과 승차감은 1차 현가요소의 수직강성, 2차 현가요소의 수직강성 및 수직감쇠가, 안정성 및 안전성은 1차 현가요소의 종강성 및 횡강성이 민감한 변수임을 알 수 있었다. 이 5개의 변수 중 설계 변경이 수월한 1,2차 현가요소의 수직강성과 1차 현가요소의 종, 횡강성을 설계 변수로 선정하고 이를 이용하여 개선된 설계 변수 X_I 를 도출하였다. 여기서, 해석조건은 3.3절에서 설명한다. 민감도 해석에는 승차감, 안정성, 안전성 해석을 각각 20회 수행하였다. 승차감 개선을 위하여 11회, 안전성 및 안정성 해석에 13회의 반복 계산이 수행되었다. 물론 이러한 횟수는 평가 기준 및 설계 변수의 수에 따라 다르게 나타나기 때문에 의미를 부여할 수는 없겠으나 일반적으로 다수의 반복 해석이 요구되는 경우에 해석 및 평가 프로세스를 자동화했다는 것이 장점이라 본다.

3.3 Phase II : Adams/Rail에 의한 결과

승차감 평가를 위해 직선트랙을 80km/h의 속도로 45초 정도 주행하는 것으로 가정하였고, 동적 탈선계수 평가를 위해서 반경 300m의 곡선트랙을 90km/h의 속도로 주행하는 것으로 가정하였다. 레일에 적용된 불규칙도는 160km/h track의 불규칙도 데이터이고, 캔트는 76mm이다. 승차감의 허용 기준은 Nmv 지수 2.5이하, 동적 탈선계수의 빈도누적 확률 허용 기준은 0.8~1.1에서 각각 1.0, 0.001을 각각 적용하였다.

Phase I의 평가 결과로써 전달받은 설계 변수 X_I 가 입력 값으로 설정되어 순차적인 반복 계산 및 평가 프로세스에 따라 X_{II} 가 도출되었다. Phase II에 의한 승차감 및 안전성의 상세 평가 시 반복 계산의 수행 없이 계산이 종료되었으며, 그 결과를 간단히 그림 6에 보였다. 본 예제 계산을 통해 해석 및 평가 프로세스가 원활하게 진행되었음을 확인할 수 있었고 도출된 설계 변수는 허용 기준을 잘 만족하고 있음을 보였다.

5. 결론

이상과 같이 프로세스 통합 기술을 적용한 현가요소의 설계 과정을 소개하였다. 현가요소의 설계는 다양한 동적 성능을 만족하는 설계 변수를 결정하기 위하여 반복적인 해석 및 평가 프로세

스가 요구된다. 그러한 과정을 통합 프로세스 환경 및 PS 에이전트 기술을 이용하여 해결할 수 있는 방법을 소개하였다. 소개된 방법을 예제 차량에 적용한 결과 반복 해석에 소요되는 노력을 절감할 수 있었다. 이러한 프로세스 자동화 기술은 향후 개선된 최적화 알고리즘이 보완되고 다분야 해석을 연동시킨다면 해석 기반의 다분야 최적 설계에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 지원 하에 기본사업으로 수행 중인 “진동 성능평가 시뮬레이션 기술개발” 과제의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. 이재경, 박성환, 이종원, 한승호, 한형석(2005), “멀티 에이전트 기반의 통합설계 시스템 개발”, 한국정밀공학회지 제 22권 제 1호, pp.14-18.
2. 이재경, 박성환, 방제성, 이한민(2005), “서비스 지향 구조 개념을 적용한 통합 설계시스템 개발에 관한 연구”, 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집
3. 최영근, 정계동(2002) 역, “XML How to Program”, 피어슨 에듀케이션 코리아.
4. Fortin C.(1984), “Dynamic Curving Simulation of Forced-Steering Rail Vehicles”, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Queen's University, Kingston, Canada.
5. Anderson R.J.(1989), “A’GEM-Automatic Generation of Equations-of-Motion:Version 2.0 User's Manual”, Department of Mechanical Engineering, Queen's University, Kingston, Canada.
6. 양희주 외(2004), “서울시 지하철 2호선 전동차 : 동특성 해석 보고서”, 주식회사 로템
7. 최경록, 이정환, 조연호(2005), “ADAMS/Rail을 이용한 철도 차량의 동역학 해석 위탁 보고서”, MSC Software Korea.

도표 1. 통합 프로세스 해석에 의한 주요 설계 변수의 도출 결과

주요 설계 변수	초기 설정 값, X_0	Phase I 결과, X_I	Phase II 결과, X_{II}
1차 현가요소 수직강성	원 값의 6배	원 값의 2.7배	원 값의 2.7배
2차 현가요소 수직강성	원 값의 6배	원 값의 2.7배	원 값의 2.7배
1차 현가요소 종강성	원 값의 4배	원 값의 1.4배	원 값의 1.4배
1차 현가요소 횡강성	원 값의 4배	원 값의 1.4배	원 값의 1.4배

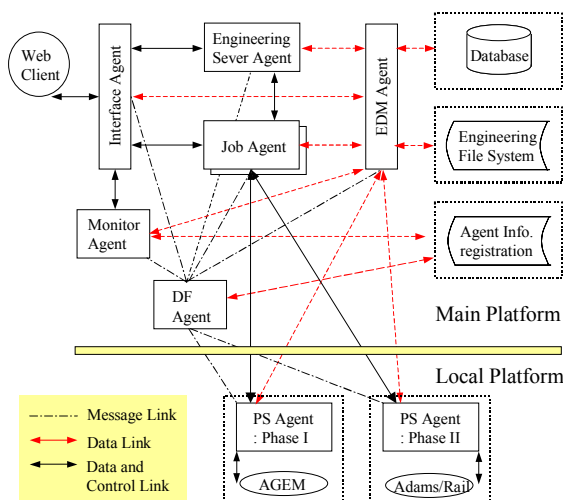


그림 1. System architecture

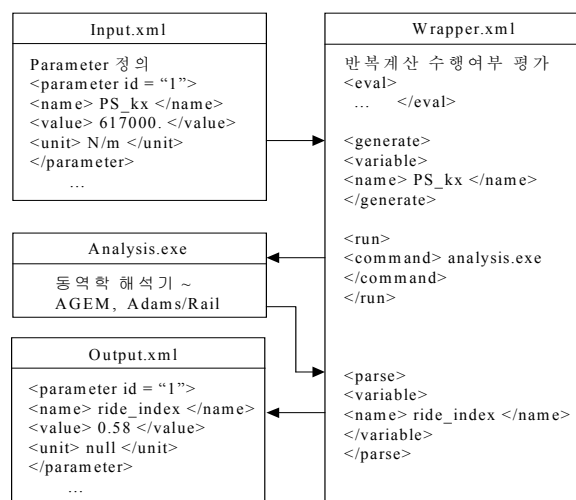
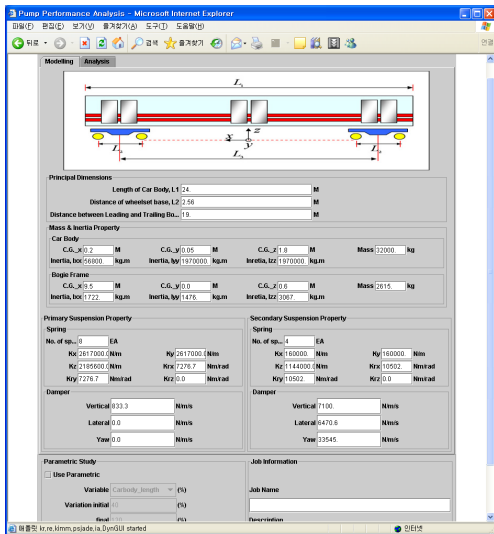
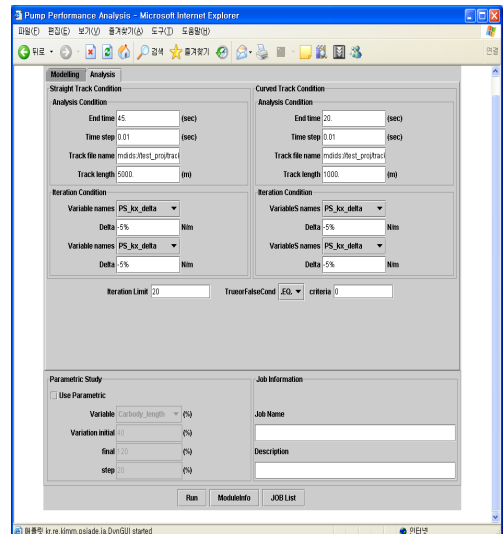


그림 2. PSJade에 의한 래핑 예



(a) 차량 모델링



(b) 해석 조건

그림 3. 사용자 인터페이스를 위한 GUI

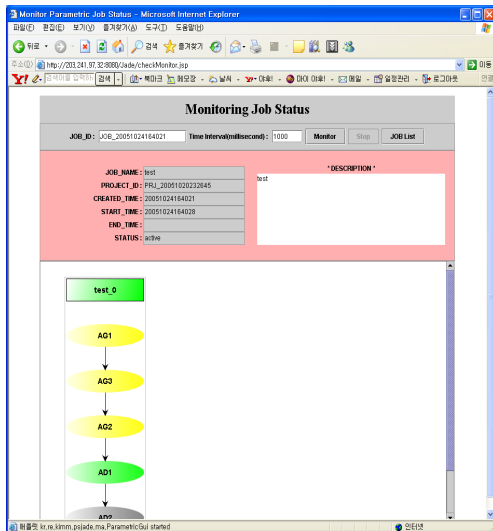


그림 4. 프로세스 진행 상황 모니터링의 예

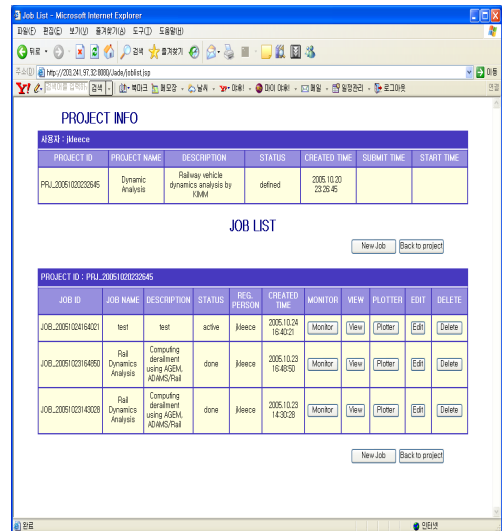
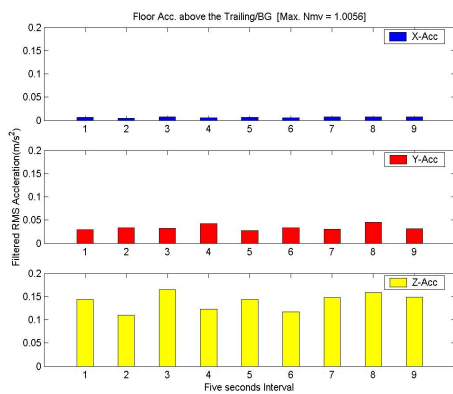
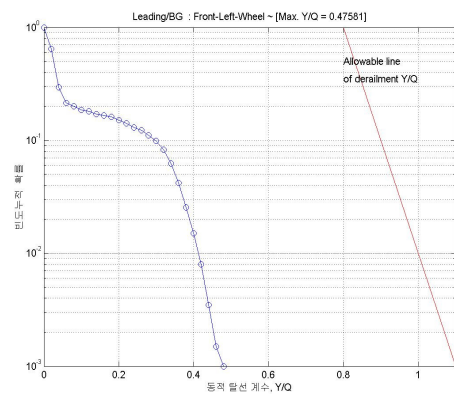


그림 5. 계산 결과 및 최종 설계 변수의 저장



(a) 승차감 지수 평가 결과



(b) 동적 탈선계수 평가 결과

그림 6. Phase II : ADAMS/Rail에 의한 예제 차량의 동적 성능 평가 결과