설계자를 위한 GUI 환경기반 알루미늄 압출재 철도차량 차체구조물의 자동화 설계 및 구조해석 지원 프로그램 개발

A Development of Automated Design and Structural Analysis Aided-Program based on GUI environment for Aluminum Extrusion Carbody Structures of Railway Vehicle for Design Engineers

김준환 · 강승구 · 신광복* · 이용주

Jun-Hwan Kim · Seung-Gu Kang · Kwang-Bok Shin · Young-Ju Lee

Abstract The purpose of this study is to develop automated structural design and analysis aided-program of aluminum extrusion carbody structures for railway vehicle. This developed program is called "AUTO-RAP" and could perform simultaneously structural design and verification for railway carbody structures made of aluminum extrusion independent of expertise and experience of design engineers. Design engineers are able to conduct the knowledge-based design by providing database of existing aluminum extrusion or user-defined function. The design verification is automatically programmed to evaluate its structural integrity according to Korean Railway Safety Law or Urban Transit Safety Law. In addition, this program could automatically generate an executable file of various commercial finite element programs such as ANSYS and ABAQUS and CAD files such as .stp and .iges by GUI environment applications using MFC(Microsoft Foundation Classes). In conclusion, it is expected to contribute to reduce product design cost and time of carbody structures aluminum extrusions in railway industry.

Keywords : Aluminum extrusion, Automated program, Graphical User Interface, Railway vehicle, Structural analysis

초 록 본 연구의 목적은 설계자 전용 알루미늄 압출재 철도차량 차체 구조물의 자동화 구조해석 지원프로그램을 개발하는 것이다. 본 연구에서 개발된 프로그램 명칭은 "AUTO-RAP"이며, 알루미늄 압출재 철도차량 설계 및 구조해석에 대해 전문적인 지식과 경험이 없는 엔지니어도 설계와 검증이 동시에 가능하도록 하였다. 설계자는 기존의 알루미늄 압출재의 데이터베이스를 활용하거나 사용자 정의에 의한 지식기반설계가 가능하도록 하였으며, 설계검증은 철도안전법과 도시철도차량 안전기준에 관한 규칙에 의거하여 철도차량 차체 구조 안전성을 자동으로 평가하도록 프로그래밍 하였다. 또한, 본 프로그램은 MFC(Microsoft Foundation Classes)를 사용하여 GUI 환경을 구축하였으며, ANSYS와 ABAQUS 같은 다양한 상용 유한요소해석 프로그램 및 CAD 프로그램과의 호환성을 위해 .stp, .iges 등의 파일 생성을 지원한다. 결론적으로, 본 프로그램을 통하여 알루미늄 압출재 철도차량 차체 구조물의 제품 설계 비용과 시간 단축에 기여할 것으로 판단된다.

주요어 : 알루미늄 압출재, 자동화 프로그램, 그래픽 유저 인터페이스, 철도차량, 구조해석

1. 서 론

최근 급속한 환경 오염으로 인해 환경 친화적 운송수단에 대한 관심이 증대됨에 따라 철도분야의 시장확대와 기술 개발이 요구되고 있다. 철도는 타 운송수단에 비해 높은 단위 수송량, 에너지 효율의 이점과 비교적 낮은 탄소를 배출하는 친환경 지상운송수단으로 알려져 있으며, 특히 차체 경량화를 통해 환경친화적 이점을 극대화시킬 수 있는 장점을 지니고 있다[1].

철도차량의 경량화를 위해 차체, 대차, 내장품 및 전장품 등 종합적인 연구가 수행되고 있으며, 그 중 철도차량의 가장 높은 무게 비중을 차지하는 차체의 경량화 연구가 가장 활발히 이루어지고 있다. 차량 제작의 주재료는 과거 1세대 연강재료, 2세대 스테인리스 재질을 사용하였으며, 현재 3세대 알루미늄 재질을 주로 사용하고 있다[2]. 알루미늄 차량은 스테인리스 철도차량에 비해 비중이 약 1/3 수준이며, 제작공정이 단순하다는 장점을 갖고 있어 해외에서는 프랑스의 TGV-NG, 일본의 신칸센, 독일의 ICE-3 등에 오래 전부터 사용되어 왔다. 또한 국내에서는 한국형 표준전동차(K-EMU) 개발을 시작으로 광주 지하철, 인천 신공항 철도, 대전지하철, 경의선 그리고 경춘선에 알루미늄 압출재를 적용하여 차체개발이 이루어졌다. 이러한, 알루미늄 철도차량의 적용 추세는 더욱 더 늘어날 전망이다[3].

*Corresponding author

Tel.: +82-42-821-1156, E-mail : shin955@hanbat.ac.kr

©The Korean Society for Railway 2012

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.4.323>

국내에서 개발되는 모든 철도차량은 철도안전법[4] 또는 도시철도차량 안전 기준에 관한 규칙[5]에 명시된 평가기준에 의거하여 해석적 평가 및 시험적 평가를 강제 규정하고 있으며, 이를 만족시키지 못할 경우에는 설계보완을 실시하여 요구조건을 만족시켜야 한다. 이때, 개발 차량의 안전성을 확보하기 위해 수행되는 해석적 검증과정은 상용 유한요소 해석 프로그램을 통해 수행되고 있다. 상용 유한요소 해석 프로그램은 공학문제의 해결을 위해 산업전반에 널리 사용되고 있으나 프로그램의 전문적인 지식이나 경험이 없는 설계자의 경우에는 철도차량의 해석과 설계보완단계에서 외부 전문인력에 의지하여 많은 시간과 추가적인 비용이 발생하는 단점을 지니고 있다. 따라서, 설계자 입장에서 상용 유한요소 해석프로그램이 갖는 단점을 극복하기 위해 조선, 자동차, 항공 분야 등 많은 산업분야에서는 GUI 환경 기반의 전문 자동화 설계 및 구조해석 프로그램 개발의 필요성이 늘어나고 있는 추세이다. 이러한, 전문 유한요소 해석 지원 프로그램은 GUI 환경을 통해 사용자의 편의성을 높이고 전문적인 지식 없이 해석적 검증이 가능하도록 하고 있다. 국내 사례로는 김태우[6] 등이 에어포일 공력 성능 해석을 위한 GUI 환경 프로그램을 개발하였으며, 정희택[7] 등은 선박용 배관 시스템의 수력학적 설계 및 해석 프로그램을 개발하였다. 또한, 한종규[8] 등은 차량동역학 해석 및 설계 전용 프로그램을 개발하여 사용 중에 있다. 국외 사례로는 Kun-Hur Chen[9] 등이 기계적 부품에 대한 설계를 지원하는 GUI 환경의 프로그램을 개발하였다. 그러나, 철도차량에 대한 자동화 설계 및 해석프로그램 개발사례는 국내외적으로 전무한 상태이다.

따라서, 본 논문에서는 알루미늄 압출재 적용 철도차량 구조해석에 대한 전문적인 지식이나 경험이 없는 설계 엔지니어도 실제 제품설계 시 활용할 수 있는 GUI 환경 기반의 알루미늄 압출재 철도차량 차체 구조물의 자동화 설계 및 구조해석 지원 프로그램을 개발하는 것을 목표로 삼고 있다. 이를 위해 다양한 프로그램 코드 분석을 통해 상용 유한요소 해석 프로그램의 자동실행이 가능하도록 하였다. 또한, 이를 MFC(Microsoft Foundation Classes)와 연동을 통해 GUI(Graphical User Interface) 환경의 프로그램을 구현함으로써 설계자의 편의를 고려하여 프로그램을 개발하였다.

2. 철도차량 자동화 설계 및 해석 지원 프로그램 개발 환경과 범위

2.1 AUTO-RAP의 GUI 환경 구축

본 연구에서 개발한 프로그램 명칭은 알루미늄 압출재 철도차량 차체구조물의 자동화 설계 및 해석이 가능하도록 하여 AUTO-RAP(Automated Railway Vehicle Analysis Program)이라 명하였다. 개발 프로그램의 주요 특징은 설계자가 알루미늄 압출재 철도차량 설계 시 유한요소해석을 통해 설계차량에 대한 구조 검증 및 평가를 자동으로 수행할 수 있도록 지원하고 있으며, GUI 환경을 통해 사용자가 손쉽게 프로그램에 접근할 수 있도록 하였다.

Fig. 1 The configuration of AUTO-RAP with GUI environment

본 연구에서 개발한 AUTO-RAP은 MFC를 사용하여 상용 유한요소해석 프로그램과 연동을 통해 GUI 환경의 설계 및 해석 지원 기능을 구현하였다. MFC 프로그래밍 기법은 Visual C++언어를 기반으로 윈도우 응용프로그램 개발을 위한 C++클래스 라이브러리 집합이다[10].

AUTO-RAP의 구성은 크게 설계단계와 해석단계로 구분된다. AUTO-RAP의 설계단계에서는 차량의 기본사양선정 및 차체를 구성하는 각 압출재 프레임 설계를 수행하며, 각 프레임의 설계가 완료되면 이를 조합하여 차체의 설계가 완성되도록 구성하였다. AUTO-RAP의 해석단계에서는 차량 해석에 필요한 모든 전처리(pre-processing)와 후처리(post-processing) 과정을 수치적 입력과 선택만으로 해석이 가능하도록 구성하였다. Fig. 1은 GUI 환경의 AUTO-RAP의 구성을 보여준다.

2.2 AUTO-RAP을 이용한 철도차량 설계

AUTO-RAP에서의 알루미늄 압출재 철도차량 단면 설계는 기존에 개발된 압출재 단면 데이터베이스(database)를 활용하는 방식과 사용자 요구조건에 따라 다양한 형상의 단면을 지정할 수 있는 사용자 정의 모델(user-defined model) 방식 모두 가능하도록 하여 철도차량의 상세 모델링에 중점을 두었다.

알루미늄 압출재 철도차량의 경우 몇 가지 형태의 일반화된 압출재 단면형상으로 구성된다. 이에, AUTO-RAP에서는 철도차량의 원활한 설계와 설계 오류를 줄이기 위해 국내에서 운행되는 철도차량의 알루미늄 압출재 차체 단면 형상을 분석하여 단면 데이터베이스를 구축하였다. 구축된 압출단면의 데이터베이스는 프로그램상의 콤보 상자(combo box) 형태로 제공함으로써 사용자가 원하는 항목을 선택하여 차량설계에 반영할 수 있도록 하였다. 또한, Fig. 2와 같이 MFC와 유한요소해석 코드의 연동을 통해 GUI 환경에서 변수 입력 시, 각 변수에 해당하는 프로그램 내부의 스크립트(script)가 변경되어 모델링이 수행된다. 데이터베이스에서 제공하지 않는 알루미늄 압출재 단면 형상을 설계할 경우에는 사용자 정의 모델을 통해 설계를 할 수 있다. 이는, 압출재

단면을 구성하는 각 키 포인트 좌표와 키 포인트를 연결하는 정보를 입력 받아 사용자가 원하는 형상의 모델이 생성 되도록 구성하였다. 또한, 데이터베이스 활용 방식과 호환 가능하게 하여 설계의 유연성을 향상시켰다.

데이터베이스 활용 방식과 사용자 정의 모델 방식으로 수

Fig. 2 The input window and program script for CAD modeling process

Fig. 3 The main design parameters in AUTO-RAP

Fig. 4 Design procedures in AUTO-RAP

행된 압출재 모듈은 조합과정을 통하여 완성된 차체 조립도가 완성된다. 이후, 철도차량의 출입문, 창문, 볼스터 등의 위치와 크기를 지정하여 차량의 외관설계를 수행한다. Fig. 3은 AUTO-RAP에 적용된 알루미늄 압출재 철도차량 차체 구조물의 주요 설계변수를 나타내며, Fig. 4는 AUTO-RAP에서의 철도차량 모델링 과정을 보여준다.

사용자가 변수 입력을 통해 수행된 알루미늄 압출재 철도차량 모델링은 사용자가 지정한 상용 유한요소해석 프로그램의 코드로 변환되어 로그파일(log file)로 자동 저장되도록 하였으며, 설계된 차량의 형상 및 도면을 확인할 수 있도록 .stp와 .iges 확장자 형태의 CAD 파일 역시 생성되도록 하였다.

2.3 AUTO-RAP을 이용한 철도차량 구조해석

AUTO-RAP을 이용한 철도차량의 구조해석은 전처리, 해석 그리고 후처리 단계로 구분된다. 전처리 과정은 설계단계에서 수행된 차체 구조물의 형상을 바탕으로 재료물성 정의, 유한요소 모델링 그리고 하중조건 정의를 수행할 수 있도록 구성하였다. 재료의 물성은 알루미늄 압출재 철도차량에 범용적으로 사용되는 A6005A를 기본적으로 제공하며, 재료의 변경에 따라 설계자가 물성을 입력할 수 있도록 하였다. 유한요소 모델링 단계에서 요소생성은 자동생성방식을 사용하며, 이때 요소크기 설정은 차량의 크기에 따라 사용자가 자율적으로 선정할 수 있도록 하였다. 추가적으로 해석에 대한 지식과 경험이 부족한 설계자를 위하여 요소크기에 대한 추천값을 제공하고 있다. 하중조건은 국내 철도차량 안전규정인 철도안전법 또는 도시철도차량 안전기준에 관한 규격에 의거하여 사용자가 원하는 하중조건 및 경계조건이 자동으로 부과되도록 하였다.

전처리 단계에서 입력된 데이터는 사용자가 선택한 상용

Fig. 5 Structural analysis algorithm of AUTO-RAP

유한요소해석 프로그램 코드로 작성된 로그파일로 생성되며, 각 단계에서 생성된 로그파일의 재배치를 통하여 일괄 처리 파일(batch file)이 생성된다. Fig. 5는 AUTO-RAP의 구조해석 알고리즘을 나타낸다.

AUTO-RAP의 후처리 단계는 결과분석이 용이하도록 철도차량 구조물에 발생하는 응력과 처짐 결과 등의 사용자가 원하는 결과를 선택하여 시각화하여 보여지도록 구성하였다.

3. 철도차량 자동화 설계 및 해석 지원 프로그램 검증

3.1 AUTO-RAP의 설계 및 유한요소 모델링 검증

AUTO-RAP의 신뢰성 검증을 위해 기존 구조해석 방법과 AUTO-RAP을 통한 설계 및 구조해석 결과를 비교하였다. 이때, 사용된 비교대상 모델은 대전지하철 1호선의 차체 구조물을 선정하였다. 기존 구조해석 방법은 상용 CAD 프로그램을 이용하여 알루미늄 압출재 철도차량 3차원 모델에 대하여 중립면(mid-surface) 모델링 작업을 수행하였으며, 이후 Hypermesh와 같은 유한요소 모델링 전용 프로그램을 사용하여 유한요소모델을 생성하였다.

AUTO-RAP에서의 철도차량 모델링은 프로그램에서 제공하는 압출재 단면 데이터베이스와 사용자 정의 모델을 병행하여 철도차량 차체 모델링을 상세히 하였으며, 유한요소모

Fig. 6 The comparison of CAD and FE modeling procedures between traditional approach and AUTO-RAP

델은 기존 모델링 방법에 적용한 요소크기와 동일한 크기로 생성하였다. 이때, 두 가지 방법으로 생성된 철도차량 모델링 결과는 동일하였으나, 기존 모델링 방법은 CAD 프로그램 및 유한요소모델링 프로그램을 거치기 때문에 작업시간이 오래 걸렸으며, 설계자의 숙련도에 따라 많은 차이가 발생하였다. 또한, 이러한 방법은 설계보완에 따른 모델 수정에 어려움이 발생하는 단점이 있다. 그러나, AUTO-RAP을 활용하여 모델링을 수행할 경우, 변수 입력을 통해 모델링이 수행되므로 모델링 작업시간을 줄일 수 있었다. Fig. 6은 기존 모델링 방법과 AUTO-RAP을 이용한 모델링 과정을 비교하여 나타낸 것이다.

3.2 AUTO-RAP을 이용한 구조해석 검증

기존의 설계방법과 AUTO-RAP을 이용한 철도차량 모델에 대한 해석적 검증을 통해 AUTO-RAP 프로그램의 설계 시스템의 신뢰성 검증을 수행하였다. AUTO-RAP에서는 ANSYS와 ABAQUS 같은 대표적인 상용 유한요소해석 프로그램을 지원하며, 사용자가 수행하고자 하는 유한요소해석 프로그램 선택 시 해당 프로그램 코드로 작성된 일괄 처리 파일이 생성된다. 생성된 일괄 처리 파일은 Fig. 7과 같이 Visual C++로 작성된 스크립트를 통해 사용자가 선택한 상용 유한요소해석 프로그램으로 전달되어 자동으로 구조해석이 수행된다.

본 구조해석 검증에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 사용하였으며, 하중조건은 도시철도 안전 기준에 관한 규칙에 의거하여 수직, 수평압축, 비틀림 그리고 3점 지지 하중에 대하여 수행하였다. 이때, 기존 해석프로세스 모델과 AUTO-RAP을 이용하여 생성된 모델은 동일한 요소 타입과 해석조건을 적용하였다. Table 1은 기존 해석방법과 AUTO-RAP을 활용한 철도차량의 구조해석 결과를 나타낸다. 이때, 수평압축 하중조건에서 최대 4.1%의 차이를 보여 비교적 잘 일치함을 확인하였다. Von-Mises stress 및 처짐 결과 차이가 발생한 원인은 기존 모델링 방법에서는 브라켓 및 보강재 등의 상세한 모델링이 가능한 반면, AUTO-RAP을 활용한 모델링은 프로그램에서 지원하지 않는 상세한 부분에 대한 모델링에 어려움이 발생하여 결과차이가 발생한 것으로 판단된다. 하지만, 발생한 Von-Mises stress 및 처짐 결과 차이는 해석적 허용오차 범위로 간주할 수 있을 것으

Fig. 7 The input window and program script for solving process

Table 1 The comparison of structural analysis results between traditional approach and AUTO-RAP

Load condition	Traditional approach		AUTO-RAP		Maximum difference (%)
	Von-Mises stress (MPa)	Deflection of solebar (mm)	Von-Mises stress (MPa)	Deflection of solebar (mm)	
Vertical	134	10.82	131	11.12	3.8
Compressive	72	3.33	69	3.41	4.1
Twisting	25	2.54	24	2.57	4.0
3 point support	79	10.73	77	10.79	2.5

Fig. 8 The structural analysis results between two methods under vertical loading condition

로 판단된다.

Fig. 8은 수직하중 및 고유진동수에 대한 해석결과를 비교하여 나타낸 것으로 차체의 중앙 부분에서 최대 처짐이 발생하였으며, Von-Mises stress의 경우 동일한 위치인 출입문 하부 부분에서 최대응력이 발생함을 확인하였다. 또한, 고유진동수 해석결과 1차 굽힘 모드인 경우, 기존 철도차량 모델링 방법으로 수행한 모델이 17.18Hz, AUTO-RAP을 이용하여 해석한 모델은 17.38Hz가 발생하여 약 1.2%의 차이로 잘 일치함을 확인하였다.

따라서, 본 연구를 통해 개발된 AUTO-RAP 프로그램은 기존의 복잡한 설계 및 설계검증 프로세스를 단순화함으로써, 철도차량 차체구조물의 설계 비용과 시간을 단축할 수 있다. 또한, 기존의 설계검증 프로세스와 AUTO-RAP 프로그램의 구조해석 결과를 비교하여 프로그램의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

3. 결 론

본 연구를 통해 알루미늄 압출재 철도차량 차체 구조물의 자동화 설계 및 해석 지원 프로그램인 AUTO-RAP을 개발하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Visual C++ 기반의 MFC를 사용하여 GUI 환경의 프로그램을 구현하였으며, 상용 유한요소해석 프로그램과 연동하여 알루미늄 압출재 철도차량 차체 구조물의 자동화 설계 및 해석 지원 프로그램을 개발하였다.

(2) AUTO-RAP에서의 알루미늄 압출재 철도차량의 설계는 기존에 개발된 압출재 단면을 활용하는 데이터베이스 활용 방식과 사용자 요구조건에 따라 다양한 형상의 단면을 지정할 수 있는 사용자 정의 모델 방식을 지원한다. 이러한 방법으로 설계한 철도차량 모델링은 ANSYS와 ABAQUS 같은 다양한 상용 유한요소해석 프로그램 코드로 변환되어 로 그파일로 저장되며, .stp와 .iges 확장자 형태의 파일생성을 지원하여 다양한 상용 CAD 프로그램에서 활용가능 하도록 하였다.

(3) AUTO-RAP의 신뢰성 검증을 위해 기존 철도차량 구조해석 프로세스 방식과 구조해석 비교를 통하여 약 4.1% 이내의 해석결과 차이로 비교적 잘 일치하였으며, 추후 브라켓 및 보강재 모델링 기능 등을 추가하여 기존의 구조해석 프로세스 방식과의 해석결과 차이를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

(4) GUI 환경기반의 알루미늄 압출재 철도차량 차체 구조물의 자동화 설계 및 구조해석 지원 프로그램 개발을 통해 철도차량 차체구조물의 제품 설계 비용과 시간단축에 기여할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 교육과학기술부와 지식경제부의 산학협력중심 대학육성사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] K.B. Shin, D.H. Koo, S.H. Han, K.J. Park (2004) A Study on Material Selection of the Carbody Structure of Korean Tilting Train eXpress(TTX) through the Verification of Design Requirements, *Journal of the Korean Society for Railway*, 7(2), pp. 77-84.

- [2] K.B. Shin, B.J. Ryu, J.Y. Lee, S.J. Lee (2006) A Study on Manufacturing Technology and Evaluation of the Structural Integrity of a Sandwich Composite Train Roof Structure, *Journal of the Korean Society for Railway*, 9(1), pp. 43-49.
- [3] H.W. Hwang, J.Y. Lee, D.C. Yang, T.S. Kwon, H.S. Jung (2005) Knowledge Based Configuration Design of a Train Vehicle Body using CATIA, *Fall Conference of the Korean Society for Railway*, pp.70-77.
- [4] MOCT Ordinance 455 (2007): Regulations on the Railway Safety Criterion of Rolling Stock.
- [5] MOCT Ordinance 413 (2004): Regulations on the Railway Safety Criterion of Urban Rolling Stock.
- [6] T.W. Kim, K.J. Yee, J.W. Lee, S.H. Chae, S.J. Oh (2007) Development of GUI Program for Automated Generation of Airfoil Performance Table, *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 35(8), pp. 685-692.
- [7] H.T. Chung, Y.B. Jung, J.W. Cho, J.S. Bae (2001) A Development of Computing System for Hydraulic Design and Analysis of Ship-building Piping System, *Journal of the Korea Society For Power System Engineering*, 5(1), pp. 57-63.
- [8] J.G. Han, D.H. Kim, S.S. Kim, W.S. Yoo, S.S. Kim (2000) Development of Vehicle Dynamics Program AutoDyn7(II) – Pre-Processor and Post-Processor, *Journal of the Korean Society for Automotive Engineers*, 8(3), pp. 190-197.
- [9] K.H. Chen, C.L. Lin, S.W. Changchien (1998) An Integrated Graphical User Interface(GUI) for Concurrent Engineering

Design of Mechanical Parts, Computer integrated Manufacturing System, 11(1-2), pp. 91-112.

- [10] Microsoft Company (2001) MSDN Library Visual Studio.

접수일(2012년 5월 22일), 수정일(2012년 6월 6일),
게재확정일(2012년 6월 19일)

Jun-Hwan Kim : joonhwan1004@hotmail.co.kr
Graduate School of Mechanical Design Engineering,
Hanbat National University, 125, Dongseo-daero, Yuseong-gu,
Daejeon, 305-719, Korea

Seung-Gu Kang : kseunggu@naver.com
Department of Mechanical Design Engineering,
Hanbat National University, 125, Dongseo-daero, Yuseong-gu,
Daejeon, 305-719, Korea

Kwang-Bok Shin : shin955@hanbat.ac.kr
Department of Mechanical Engineering, Hanbat National
University, 125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon,
305-719, Korea

Young-Ju Lee : yjlee@ialu.co.kr
Dongyang Gangchul, 31, Daehwa-ro 119beon-gil, Daedeok-gu,
Daejeon, 306-801, Korea