

좌표계 연성에 의한 동력전달계 포함 차량 운동 시뮬레이션 연구

정일호*, 양홍익#, 윤지원**, 박태원**, 한형석***

The study of a Vehicle Dynamic Simulation Including Powertrain About the Coordinate System Connectivity

Il Ho Jung*, Hong Ik Yang#, Ji Won Yoon**, Tae Won Park** and Hyung Suk Han***

ABSTRACT

Recently, the importance of CAE research is growing with the advances of the automotive and computer industry. In addition, multi-body dynamics and powertrain analysis are the most important factors in improving the vehicle design.

Since engine torque with curve-data was used for analyzing full car simulation in the multi-body dynamics system for many years, it is impossible to assess the concurrent analysis of the engine and powertrain element included in a real full car system. In powertrain, since vehicle are usually modeled as a simple mass and a inertia, they can not be seen as real cars. Moreover, it is hard to obtain additional dynamics data other than the longitudinal velocity value in movement.

Because of the reason that was previously discussed, it is necessary to consolidate the two parts as one routine program for design and development through the coordinate system connectivity, and presented here is a program named O-DYN. Using an object-oriented language C++, this program has a good structure with the valuable characteristics of objectivity, inheritance, and reusability. The reliability of this multi-body dynamics program is examined by DADS, which is the general dynamics program, using DAE solver and PECE integral function with the common coordinator separation method.

As a result, we can obtain a better solution and total dynamics data in either area through this process. This program will be useful for analyzing full car simulation with powertrain.

Key Words : Multi-body dynamics(다물체동역학), Powertrain(동력전달계), O-DYN(다물체동역학프로그램), DAE(미분대수방정식), PECE(수치적분기)

접수일: 2004년 6월 17일; 게재승인일: 2005년 3월 11일

* 아주대학교 대학원

교신저자: 아주대학교 대학원

E-mail : ajuhongik@hotmail.com Tel. (031) 219-2952

** 아주대학교

*** 한국기계연구원

1. 서론

최근의 자동차 산업의 발달과 컴퓨터 산업의 발전으로 인해 컴퓨터를 이용한 연구개발이 중요시되고 있다. 때문에 CAE (Computer Aided Engineering) 분야는 설계의 비용과 손실을 줄이고 좀 더 경쟁력 있는 제품을 생산하기 위한 방편으로 자리 잡고 있다.

다물체 동역학 해석 분야는 기존의 실험으로는 해석하기 어려웠던 복잡한 자동차의 거동 해석을 가능하게 함으로써 설계에 있어 좋은 방향을 제시하고 있다. 즉 실제 차량을 질량과 힘, 구속 그리고 제어 등의 모듈을 이용한 3차원 모델링으로 실제 거동을 해석할 수 있고 동력전달계는 엔진에서 발생하는 토크가 클러치와 변속기를 거쳐 구동축에 전달되고 구동 토크가 타이어에 이르기까지의 현상을 각각의 수학적 모델로 만들어진 요소를 통하여 차량의 성능비와 손실을 위주로 차량 파워트레인의 동적 성능 해석을 할 수 있다.

기존의 다물체 동역학을 이용한 차량 운동 시뮬레이션은 고도화되어 차량거동 예측, 동하중 해석에 의한 설계 평가 및 가상시험에 적용되고 있다. 그러나 대부분 전체 차량 동역학 해석에 있어서 구동력 즉, 동력전달계에 대한 정의는 단순화시켜온 것이 일반적이다. 한편 동력전달 성능 해석 분야에서는 동력전달계에 대한 상세모델이 이용되나 차량모델은 단순한 질량이나 관성으로 정의되어 주행 방향 응답에만 중점을 두어왔다¹. 따라서 다양한 주행 조건에서의 동적 특성을 해석하기 위해서는 동력전달계 상세모델과 전체 차량 모델의 통합이 요구된다. 그러면 신개념의 동력전달계를 고려한 전체차량 동역학 해석이 가능하기 때문에 변속 시나리오, 주행 시나리오에 따른 전체차량 거동 예측과 동력 전달 성능 예측이 가능하게 된다.

국내에서는 다물체계와 동력전달계를 연성시켜 해석을 수행한 공개사례는 아직까지 미흡한 것이 사실이다. 위의 두 가지 연구 분야는 독자적으로 상당히 우수한 연구 성과를 이룩해오고 있지만, 양 측면 모두 단점을 아직 해결하지 못한 상태이다. 즉 위와 같은 두

분야의 단점을 보완하여 통합 해석하는 기법이 필요하다. 이러한 연구방향은 기존의 두 분야의 프로그램인 DADS², ADAMS³, Matlab-Simulink⁴나 EASY5⁵를 이용하여 상당히 복잡한 방법으로 연계하도록 되어 있다.

본 논문에서는 기존의 절대좌표계 기반의 다물체 동역학을 이용한 전체차량 모델과 상대좌표계 기반의 동력전달계 상세 모델을 연성시켜 전체 차량의 운동해석의 고도화기법을 제안하였고 연성된 운동방정식을 유도하였다. 유도한 방정식에 기초한 해석 프로그램을 상속성, 다형성의 장점을 가지고 있는 객체지향 소프트웨어 C++개발 방법을 적용하여 개발하였다. 이를 통해 개발된 프로그램을 이용하여 CVT(Continuously Variable Transmission) 동력전달계를 장착한 전체 차량에 대한 운동해석이 이루어질 수 있었다. 본 프로그램으로서 전차량 시뮬레이션을 수행하는데 좀 더 실제에 가까운 결과를 얻을 것으로 기대된다.

2. 운동 방정식

2.1 절대 좌표계

해석하고자 하는 기계계가 n 개의 강체로 구성되어 있다면 이 기계계에 대한 일반좌표 $q=[q_1, q_2, \dots, q_n]^T$ 를 정의할 수 있다. 그리고 기계계의 상대적인 운동을 정의하는 조인트 즉, 구속방정식이 m 개라면 구속방정식을 식(1)과 같이 정의한다.

$$\Phi(q, t) = [\Phi_1(q, t), \Phi_2(q, t), \dots, \Phi_m(q, t)]^T = 0 \quad (1)$$

구속방정식은 일반적으로 비선형 대수방정식이다. 구속 조건은 일반좌표의 속도와 가속도도 만족시켜야 하므로 식(2)와 식(3)처럼 쓸 수 있다.

$$\dot{\Phi}(q, t) = \Phi_q \dot{q} + \Phi_t = 0 \quad (2)$$

$$\ddot{\Phi}(q, t) = \Phi_q \ddot{q} + (\Phi_{qq})_q \dot{q} + 2\Phi_{qt} \dot{q} + \Phi_{tt} = 0 \quad (3)$$

식(2), 식(3)은 아래와 같이 식(4), 식(5)로 변환할 수 있다.

$$\Phi_q \dot{q} = -\Phi_r = \nu \quad (4)$$

$$\Phi_q \ddot{q} = -(\Phi_q \dot{q})_q \dot{q} - 2\Phi_{q\dot{q}} \dot{q} - \Phi_{qq} = \gamma \quad (5)$$

기계계에 대한 운동방정식을 Lagrange multiplier를 이용하여 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$M \ddot{q} + \Phi_q^T \lambda = Q \quad (6)$$

여기서,

- M : mass matrix
- Φ_q : jacobian matrix
- λ : lagrange multiplier
- Q : applied force

식(6)에서 일반좌표 q 의 가속도는 식(5)도 만족시켜야 하기 때문에 식(2)와 식(3)을 동시에 해석해야 하며 이를 식(7)과 같이 행렬형태로 표시할 수 있다⁶.

$$\begin{bmatrix} M_q & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (7)$$

2.2 상대좌표계

다물체계와 같은 방법으로 일반 좌표와 시스템의 변수들을 설정하여 상대좌표를 이용한 운동방정식을 구성할 수 있다. 식(8)은 동력전달계를 만족하는 운동방정식이다⁷.

$$\begin{bmatrix} I & \Psi_s^T \\ \Psi_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z} \\ \lambda_{pt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(z, t, u, x, q, \dot{q}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,

z : system states

x : system node

Ψ_s : states rate Jacobian

λ_{pt} : states rate Lagrange multiplier

상태변수 z 는 상대좌표계를 나타내는 변수로 절대좌표계의 일반좌표 q 와 연성되어 다음절의 통합운동방정식을 유도하였다.

2.3 좌표계 연성

다물체 동역학계와 동력전달계의 통합을 위해서는 실제 서로 사용되는 변수들의 정의와 독립적으로 운영되어야 하는 변수, 그리고 서로 공유하여야 하는 변수들의 정의가 필요하다. 두 분야 모두 시간에 종속되기 때문에 각각의 상태에 따른 변수 값을 올바르게 공유하기 위한 방법이 필요하며, 실제로 그러한 프로그램을 구성하였다. 다물체 동역학과 동력전달계를 통합하기 위해서는 먼저 두 프로그램을 동시에 풀 수 있어야 한다. 식(9)은 두 분야를 동시에 풀 수 있는 행렬을 보여주고 있다.

$$\begin{bmatrix} M & \Phi_q^T & 0 & 0 \\ \Phi_q & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & \Psi_s^T \\ 0 & 0 & \Psi_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \\ \dot{z} \\ \lambda_{pt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g(t, q, \dot{q}) + g_{pt}(t, z, u, x, q, \dot{q}) \\ \gamma \\ f(z, t, u, x, q, \dot{q}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.4 수치해석

우선 두 분야를 동시에 해석하기 위해서 통합된 변수에 다물체의 속도와 가속도, 그리고 동력전달계의 변수값을 저장하고 그 값을 적분하게 된다. 이렇게 해석하면 두 분야를 선형적으로 해석하게 된다. 동력전달계의 힘 부분이 영향을 미치지 않는다면 서로 독립적이기 때문에 영향을 끼치지 않도록 설계되어 있고, 통합하기 위해서 Fig. 1과 같은 해석 과정을 거치게 된다.

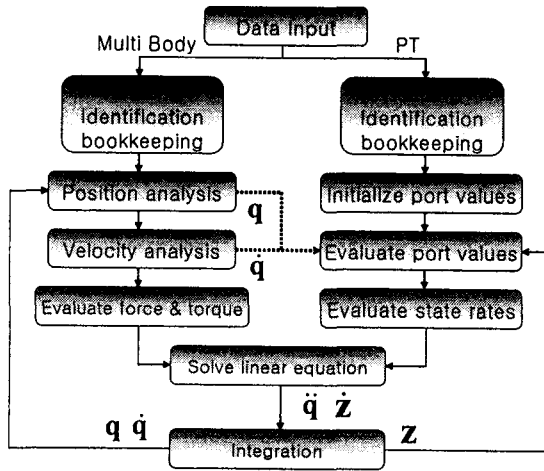


Fig. 1 Analysis flow of united O-DYN

다물체 동역학과 동력전달계는 기본적으로 독립적으로 풀 수 있게 설계되었다. 다음에 설명될 Fig. 2의 ReadObject()라고 명칭된 함수에서는 각 객체의 개수를 측정하게 되는데, Body의 개수가 0을 초과하게 되면 다물체와 동력전달계를 동시에 풀 수 있는 루틴을 적용하고, 그렇지 않고 Body의 개수가 0이면 동력전달계만을 해석하는 루틴으로 적용하게 된다. 동력전달계에는 Body라는 객체가 없고 다물체계에서는 반드시 Body라는 객체가 필요하기 때문이다. 동력전달계는 다물체계에 비하여 위치해석이나 속도해석이 필요 없고 1차 적분만을 필요하기 때문에 효율성을 위하여 두 분야의 해석방법을 나누어 설계하였다. 또한 다물체 동역학과 동력전달계의 통합을 위해서는 두 분야의 위의 해석 과정을 살펴보아야 한다. 어느 해석 과정에서 공유할 변수를 넘겨줄 것인가가 중요하기 때문이다. 즉, 다물체계에서 변위와 속도를 동력전달계에 전달하고 동력전달계에서는 받은 변수를 이용하여 힘 등 해석에 필요한 변수들을 다물체계에 넘겨주며 적분기에서는 다물체계의 가속도와 속도를 동력전달계 변수값의 속도를 적분하여 각각의 속도와 변위를 계산하게 된다. 따라서 계산된 변수들은 다시 시간을 증가시켜 각각의 해석과정을 수행하게 된다.

3. 프로그램 개발

3.1 객체지향 개념

객체지향 기법에서는 실세계의 사물을 소프트웨어영역으로 사상시킨 객체를 중심으로 구현된다⁸. 객체는 독립적이면서 타 객체와는 메시지를 통하여 인터페이스를 하게 된다. 많은 객체들의 상호 동일하거나 유사한 데이터 구조와 기능을 가지는데 같은 데이터 구조와 기능을 갖는 객체들의 집합을 클래스라고 한다. 앞에서 소개한 다물체 동역학과 동력전달계 이론을 바탕으로 객체지향 언어인 C++를 이용하여 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 O-DYN (Object-oriented Dynamics Program)이라고 명명한다. O-DYN의 객체 부분은 최상위 클래스와 3개의 주 클래스, 그리고 다수의 일반적인 클래스로 구성되어 있다. 최상위 클래스는 PObject라고 명칭하며 이를 이용하여 BODY, CONSTRAINT, FORCE와 같은 주 클래스를 파생시킨다. 클래스의 파생에는 객체지향의 특징인 상속성, 다형성이 이용되어 쉽게 새로운 클래스를 정의할 수 있게 되어 있어 유지 보수 및 확장성과 재사용성면의 장점을 가지고 있다.

3.2 프로그램 구조

O-DYN의 해석과정은 데이터 입력부분과 해석부분으로 나눌 수 있다. Fig. 2는 입력부분의 과정을 시작으로 O-DYN의 해석과정을 보여준다. 먼저 데이터 입력 파일의 이름을 검색하여 일치하는 출력 파일을 생성한다. 입력 데이터를 통하여 각 객체에 대한 데이터를 입력받고 그 데이터를 통하여 해석에 필요한 각 객체의 변수의 초기화를 한다.

Fig. 2의 Index_initialize()는 입력된 객체의 개수와 동역학 해석에 필요한 변수의 개수들 및 색인을 하기 위한 초기화를 수행한다. ReadModelFile()은 객체의 데이터를 입력받는 함수인 ReadObject()와 동적 배열을 사용하기 때문에 해석에 필요한 변수들의 배열크기를 초기화하는 Matrix Initialize()와 객체 사이의 변수값을 주고받을 수 있도록 통로를 열어주는 역할을 하는 Resolve_Ref()와 객체변수를 초기화하는 Initialize() 함수로 구성되어 있다. Resolve_Ref()와 Initialize()는 각 객체마다 설정되어 있는 것이 다르므로 각 객체에서 실행하게 된다.

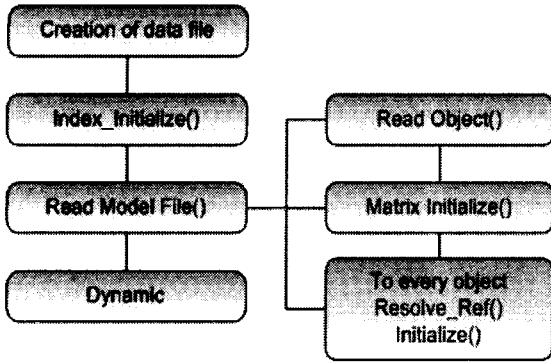


Fig. 2 Data input procedure

4. 적용

본 논문에서는 객체지향 모델링 기법을 이용하여 개발한 O-DYN을 이용하여 14자유도의 전차량 모델을 구성하였다. 이에 따라 동력전달계 모델을 각각 독립하여 해석한 결과와 두 분야를 연성시켜 전체차량 거동과 동력전달 성능 해석을 수행하였다.

개발된 프로그램의 예제로서 CVT 엔진을 장착한 14자유도 전차량 모델을 구성하여 CVT 엔진을 해석한 동력전달계의 결과와 비교하였다. 또한 동력전달계에서는 전차량의 관성력과 힘을 다물체 동역학계에 전달하고 다물체 동역학계에서는 전차량의 속도를 넘겨주는 시스템으로 구성하였다.

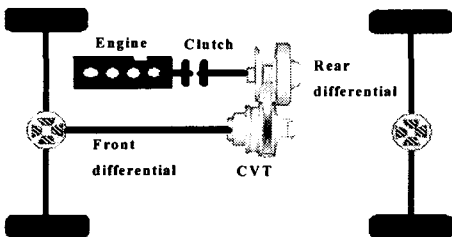


Fig. 3 CVT structure figure

Table 1 Data of dynamic vehicle model

Vehicle specification	
Wheel base	2570(mm)
Tread	1460(mm)
Tire_rolling radius	320(mm)
Road friction	0.85

Vehicle specification	
Wheel base	2570(mm)
Tread	1460(mm)
Tire_rolling radius	320(mm)
Road friction	0.85

	mass(kg)	$I_{xx}(kg.m^2)$	$I_{yy}(kg.m^2)$	$I_{zz}(kg.m^2)$
chassis	1310.84	331.06	1396.4	1638.7
fr_wheel	19.2	0.517	0.91	0.517
fl_wheel	19.2	0.517	0.91	0.517
rr_wheel	19.2	0.517	0.91	0.517
rl_wheel	19.2	0.517	0.91	0.517

Revolute Joint		
joint name	body I	body J
rev_fr_low	fr_low_conarm	chassis
rev_fr_up	fr_up_conarm	chassis
rev_fr_wheel	fr_wheel	fr_spindle
rev_fl_low	fl_low_conarm	chassis
rev_fl_up	fl_up_conarm	chassis
rev_fl_wheel	fl_wheel	fl_spindle
rev_rl_wheel	rl_wheel	chassis
rev_rr_wheel	rr_wheel	chassis

Cylindrical Joint		
joint name	body I	body J
cylin_fr_spindle	fr_spindle	fr_low_conarm
cylin_fl_spindle	fl_spindle	fl_low_conarm

Spherical Joint		
joint name	body I	body J
spher_fr	fr_spindle	fr_up_conarm
spher_fl	fl_spindle	fl_up_conarm

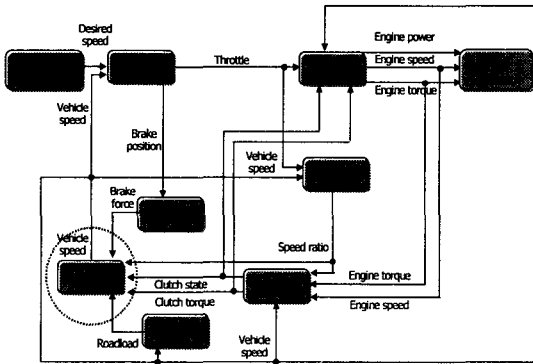


Fig. 4 Block diagram of CVT

Table 2 Data of CVT model

Vehicle parameter	
Vehicle mass	1310.84 kg
Drag coefficient	0.36
Ambient air density	1.166 kg/m ³
Gravitational constant	9.80665 m/s ²
Vehicle frontal area	1.8 m ²
Rolling resistance constant	0.01144053
Gear ratio of differential	3.611
Tire radius	0.286 m
Engine parameter	
Engine inertia	0.0984 kgm ²
Gasoline density	730 g/l
CVT parameter	
Maximum CVT ratio	2.455
Minimum CVT ratio	0.442
Clutch parameter	
Outer radius	0.0838 m
Inner radius	0.06345 m
Friction coefficient	0.073
Number of clutch plate	6
Maximum pressure	8.e5 Pa
Area for clutch actuator	$\pi \cdot (R_o \cdot R_o - R_i \cdot R_i)$ m ²
Time constant	
tau_T	0.1
tau_th	0.15
tau_i	0.8
tau_b	0.2

Fig. 3 은 본 연구에서 사용된 CVT 차량구조

도이다. Table 1 은 CVT 차량에 사용된 실제 모델의 다물체 모델로서 각 body 와 joint요소, 차량 데이터를 보여주고 있다. Fig. 4는 시뮬레이션을 위한 CVT Block diagram이고, Table 2 는 Fig.4의 9개의 성분으로 구성된 CVT 차량의 모델링 데이터이다.

두 모델을 연계시키기 위해서 CVT 차량에 사용되는 차량 클래스부분을 새로운 클래스인 다물체 클래스로 대체하였다. 14자유도 전차량에 관한 동역학 모델링이다. 다물체 클래스는 CVT 엔진의 질량을 갖도록 하고, 클러치 슬립에 의하여 생기는 관성력 부분을 질량으로 고려하여 total mass라는 변수를 만들었고, 다물체 차량의 샤시 부분의 질량행렬에 더해주었으며, 차량에 가해지는 모든 힘을 고려하여 total force라는 변수를 만들어서 구동하게 될 휠 부분의 직진방향의 힘 향에 더해주었다. 결과적으로 CVT에서 생긴 질량과 직진방향의 구동력을 다물체 차량에 적용하여 다물체 차량의 서스펜션과 로드조건에 의해 생기는 속도를 얻어서 CVT의 각 요소에 넘겨주는 과정을 거치게 된다.

개발된 통합 O-DYN 해석 프로그램을 이용하여 CVT 통합모델을 해석한 결과와 해석 결과의 검증을 위하여 HILS system¹³ 즉, Hardware in the Loop Simulation system에서 구한 CVT 모델해석과 비교하였다. HILS system은 Hardware와 시뮬레이션을 동시에 사용하여 실시간 시뮬레이션이 가능하도록 만든 장치로서 실제와 더 가까운 결과를 나타내는 것으로 알려졌다. 즉, 다물체 차량과 동력전달계를 연계해서 해석한 결과와 동력전달계만으로 해석하여 비교한 그래프를 보여주고 있다.

Fig. 5 는 구동토크 값을 비교한 그래프이고, Fig. 6 는 CVT 차량의 속도를 비교한 그래프인데 신뢰성 있는 결과를 나타내고 있다.

이로 인해 차량 모델 해석시에 실제 차량의 데이터를 이용하므로 다물체 클래스를 통하여 더 현실적인 모델의 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 또한 동력전달계에서는 측정할 수 없는 데이터를 얻을 수 있는 장점이 있다. 예를 들어 Fig. 7 과 Fig. 8 은 차량의 진행방향에 따른 가속도 변화와 변위의 변화 결과 그래프이다.

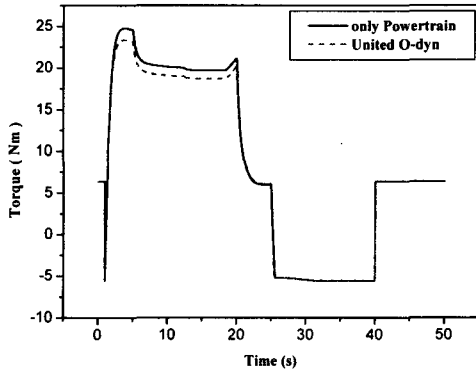


Fig. 5 Comparison of engine torque

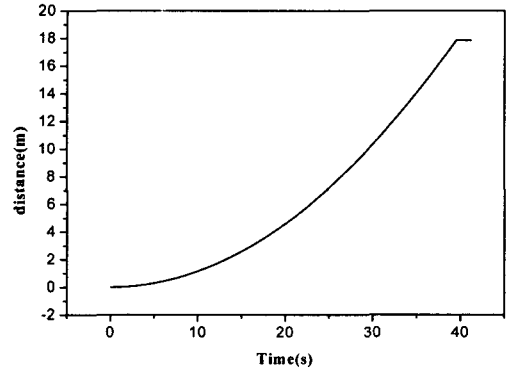


Fig. 8 Longitudinal displacement of vehicle

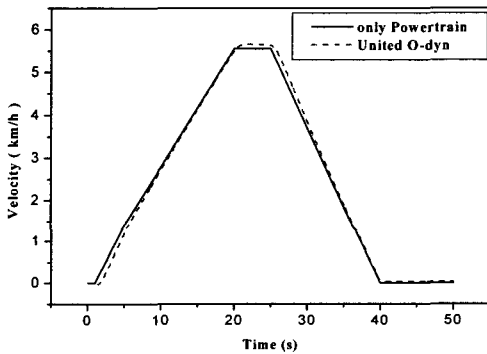


Fig. 6 Comparison of vehicle velocity

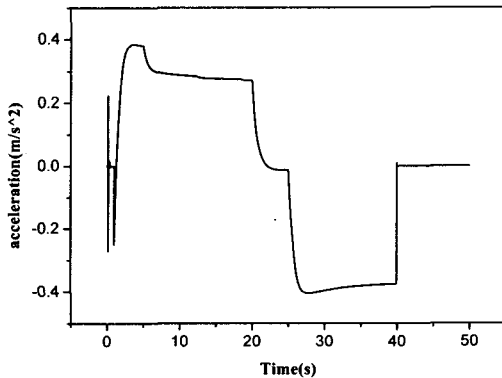


Fig. 7 Longitudinal acceleration of vehicle

5. 결론

본 연구에서는 다물체 동역학 해석 프로그램을 개발하기 위한 기본적인 절대좌표 이론 및 해석과정을 소개하였다. 그리고 동력전달계의 상대좌표 이론 및 CVT엔진 차량 해석을 위한 이론을 소개하고 전 차량 구성에 있어서 11 성분으로 구성된 CVT 엔진 차량의 모델을 이용하였다. 또한 다물체 동역학계와 동력전달계를 연계해서 해석할 수 있는 방법을 소개하고 서로 공유해야 하는 변수를 정의하였다. 14자유도 전 차량에 CVT엔진을 장착한 모델을 예제로 사용함으로써 좌표계를 연성시켜 해석을 수행하였고 그 결과와 동력전달계를 이용한 해석결과를 분석하였으며 아직까지 수행되지 않았던 더 실제적인 데이터를 통한 연구를 수행할 수 있었다.

본 연구를 통하여 각각의 분야에서 기존에 가지고 있던 부족한 점을 보완할 수 있었으며, 독립되어 수행되는 두 분야의 프로그램을 유저루틴을 이용하여 복잡하게 해석하던 기법을 하나의 프로그램을 통해 해결함으로써 효율성과 용이함에 있어 상당한 장점을 갖게 되었다.

본 연구로 인해 전 차량 시뮬레이션에 엔진의 효율과 구동축의 손실 등을 고려함으로써 보다 많은 종류의 데이터를 한 번의 해석으로 얻을 수 있으므로 전 차량 CAE 연구에 큰 진전을 가져올 것으로 예상된다. 앞으로 해석 프로그램과 실제 실험과의 비교가 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 주력산업의 고부가가치화 사업 “웹기반 범용 동력전달계 성능해석 시스템 개발”과제의 연구비로 수행되었음을 밝히며 본 연구의 지원에 대하여 감사드립니다.

참고문헌

1. <http://www.lmsintl.com>
2. <http://www.adams.com>
3. <http://www.mathworks.com>
4. <http://www.tsne.co.kr>
5. Haug, E.J., “Computer-Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical System,” Vol. 1: Basic Methods, Allyn and Bacon, MA, pp.223-224, 1989.
6. Moskwa, J.J , Munns, S.A. , "The Development of Vehicular Powertrain System Modeling Methodologies : Philosophy & Implementation," SAE Paper 971089, 1997
7. Han, Hyung Suk, Lee, Jai Kyung, Seo, Jong Whi, Song Hyun Seok, Park, Tae Won, "Development of a Multi-body Dynamics Analysis System Using the Object-Oriented Concept," Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol.20, No.8, August 2003, pp115.
8. Han, Hyung Suk, “ Development of dynamic analysis and design methods for mechanical systems,” Theses of Ajou Univ., pp.116-118, 1997
9. Joseph, G. McManus , "Powertrain Design and Simulation," 1st Ricardo International Conference, 22, June 2000.
- 10.R. Wade Allen, “Vehicle and Tire modeling for Dynamic Analysis and Real-Time Simulation,” SAE International , 2000
- 11.Sim, Taehyun, “An Analytical Tire Model for Vehicle Simulation in Normal Driving Conditions,” SAE International , 2000
- 12.www.katech.re.kr/TIC/upload/PDF/hilssystem.pdf