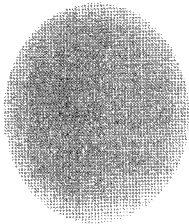
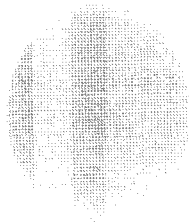


궤도 차량의 기동성능 예측 시뮬레이터 설계기술



김용태
보그워너 TTS
한국지사



이경식
통일중공업(주)



한성현
경남대학교
기계자동화공학부

1. 서론

메카트로닉스 기술의 눈부신 발전과 함께 이를 차량에 적용하려는 시도가 계속되고 있으며 이를 통한 연료 경제성, 동력 성능의 향상, 승차감 및 조종성 개선을 꾀함과 동시에 신뢰성, 보수 유지성, 경제성 향상을 이루어 나가고 있고, 여러 가지 많은 연구들이 수행되고 있다.

하지만, 데이터의 정밀 분석을 통한 보다 더 정확한 설계 데이터를 유추할 수 있는 전문적인 설계 및 분석을 위한 tool의 부족으로 많은 문제점을 내포하고 있다. 따라서, 이러한 문제들을 해결할, 정확한 데이터 유추와 정밀분석 기능을 가진 시뮬레이터 프로그램을 개발하고자 하는 것이다. 본 연구에서 연구될 대상 모델은 X1100계열인 변속기를 사용하는 궤도차량이며, 레이디얼 볼 피스톤, 펌프 및 모터로 이루어진 정유압 시스템의 동적 모델을 수립한 후,

파워 팩 구성요소 중 변속장치에 대한 모델링 및 관련된 전반적인 해석 기법 알고리즘을 개발하여 다양한 주행 조건에 대한 주행 상태를 시뮬레이션을 통한 상태 분석 및 그래프를 통한 실제 주행중의 동적 상태를 PC화면상에서 실제로 검증 및 분석할 수 있는 궤도 차량의 변속기의 특성 분석 및 차량 기동 성능 예측을 하기 위한 시뮬레이터 개발에 대한 연구를 수행하고자 한다. 개발되는 시뮬레이터를 통하여 얻어지는 제반 주행 조건에 대한 성능시험 결과를 실제 시험 주행중에서 자동 변속장치 다이내미를 이용한 실험 결과와 비교 분석하여 그 성능을 검증함으로써 시뮬레이터의 신뢰성을 확인한다.^[1]

시뮬레이터 프로그램의 개발 언어로는 Microsoft 사의 Visual C++ ver 6.0을 사용하였으며, 실리콘 그래픽스사의 그래픽 라이브러리인 OpenGL을 사용하여 3차원 그래픽이 필요한 부분을 보강하였다.

또한, Windows XP의 그래픽 사용자 인터페이스 환경을 이용하여 좀 더 쉬운 사용자와 시뮬레이터 프로그래머의 인터페이스에 대하여 연구하였다.^[2-3,5]

2. 궤도차량 구동계 모델링

궤도 차량의 동력전달계는 축, 기어, 베어링 등과 같은 기계요소들로 주어진 복합시스템으로서 주요한 것은 클러치, 토오크 컨버터 또는 원심클러치, 변속기어, 구동축 등으로 구성된 변속장치이다. 엔진으로부터 변속장치에 입력되는 동력은 정해진 토오크와 속도로 변화하여 구동계 또는 부하계에 전달되어 차량을 진행시킨다.

궤도차량의 구동을 간단히 살펴보면, 엔진은 차량의 구동을 위한 동력원으로서 변속장치의 입력동력을 제공한다. 운전자가 가속페달을 밟아 스로틀 밸브(throttle valve)를 열어 주면 엔진의 동력은 유압공기, 재순환가스, 연료, 점화시기 등에 엔진 출력토오크와 엔진회전수가 결정된다. 엔진은 차량의 정지시에도 연속적인 연소과정이 필요하므로 공회전시에는 엔진의 동력을 차단시키는 클러치가 필요하다. 자동변속장치의 경우에는 토오크 컨버터 또는 원심클러치가 그 역할을 대신하며 수동변속장치의 경우에는 싱크로메쉬 기구와 클러치가 이 역할을 한다.

궤도차량은 원심 클러치가 포함된 변속 장치와 토오크 컨버터가 포함된 변속장치를 각각 장착한 차량으로서 캐터필러에 의해 구동되는 대형차량이다. 캐터필러는 변속 장치의 출력축에 직접 연결된 스프라켓(sprocket)에 의해 구동되므로 변속장치의 특성을 타이어, 구동축 및 현가장치의 영향을 최소화하여 고찰할 수 있다.^[6]

2.1 엔진

본 연구에서 엔진 출력토오크는 연소실내 연료폭발에 의해 발생하는 압력에 의한 힘에 의해 발생되므로 변속시의 과도상태에서도 정상상태를 유지한다고 가정하였다. 그러므로 엔진 토오크는 정착된 엔진의 풀스로틀(full throttle)에서의 성능곡선을 이용하였다. 엔진 토오크 T_E 는 엔진 회전속도 w_e 의 2차 함수로 근사화시켰다. 변속시

운전자가 스로틀 밸브를 닫아주는 딥 스로틀(dip-throttle)을 고려한 엔진 토오크 T_E 는 다음식과 같다.

$$T_E = a\{w_e - b(1 - T_{ec})\}^2 + c - T_d \quad (1)$$

여기서, TD는 딥 스로틀 량이고 a, b, c는 엔진 특성상수이다. 엔진성능곡선을 나타낸다.

2.2 토오크 컨버터

자동변속장치에는 유체 커플링(fluid coupling)또는 토오크 컨버터와 같은 유체 구동 장치가 많이 사용된다. 토오크 컨버터는 펌프(pump), 터어빈(turbine), 스테이터(stator)의 세 부분으로 구성된다. 펌프는 엔진에 연결되어 있고 터어빈은 변속기어에 연결되어 있으며 스테이터는 변속기 하우징에 일방향 클러치(one-way clutch)를 통해 고정되어 있다. 토오크 컨버터에 대한 해석은 세 요소(펌프, 터어빈, 스테이터)의 운동상태와 유체 흐름 상태를 구분하여 수행한다.

운동방정식은 다음의 가정으로 4개의 변수로 표시되는 램프에 대한 각운동량식, 터어빈에 대한 각운동량식, 스테이터에 대한 각운동량식 그리고 토오크 컨버터 전체에 대한 에너지 등가식 등 4개의 식으로 구성되며, 이에 대한 운동방정식은 삼차원의 실제유체는 아래에 나열되는 여러 가지의 식들이 모두 유효한 하나의 적당한 평유선을 따라 흐르고, 토오크 컨버터내의 펌프, 터어빈, 스테이터 각각 요소사이의 간격은 무시한다. 또한, 각 요소의 날개의 두께는 무시하며, 온도의 영향은 고려하지 않으며, 유체는 비압축성이며 어느 순간토오크 컨버터 내의 유량은 언제나 일정하고 펌프축과 터어빈축의 강성은 무시한다는 가정조건하에서 유도된다. Fig. 1은 토오크 컨버터의 단면도이다.

먼저 토오크 컨버터 세 요소에 대한 운동량 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau = & \iint_{cs} (r + \bar{V}) \rho (\bar{V} \cdot d\bar{A}) \\ & + \frac{a}{dt} \iiint_{cv} (r \times \bar{V}) \rho dV + I_{mw} \bar{\omega} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,

τ : 입력 토크(Nm), r : 유체질점까지의 절대거리(m),

\bar{v} : 유체 질점의 절대속도 (m/sec),

dV : 미소체적(m^3), I_m = 기계적 관성(kg/m^2),

ρ = 유체의 밀도(kg/m^3), $\bar{\omega}$ = 축의 각속도(rad/sec),

dA = 미소 단면(m^2)

에너지 평형식을 정리하면, 토크 컨버터의 입력파워(input power)는 출력파워(output power), 파워손실(power loss) 그리고 토크 컨버터의 내부에너지의 증가와 같으므로 다음의 관계식이 정의된다.

$$P_{IN} = P_{OUT} + \frac{dE}{dt} + P_{LOSS} \quad (3)$$

이때 여기서, P_{IN} 은 토크 컨버터의 입력동력, P_{OUT} 는 토크 컨버터의 출력동력, 그리고 P_{LOSS} 는 동력손실을 나타내고, 다음의 식과 같이 정의된다.

$$P_{IN} = T_{pump} \omega_p + T_{stator} \omega_s \quad (4)$$

$$P_{OUT} = T_{turbine} \omega_T \quad (5)$$

2.3 유성기어계

변속기에는 유성기어계가 조합되어 각 단수별 입력축

에 대한 출력축의 회전수 비를 결정하게 된다. 유성기어계는 링기어, 선기어 그리고 유성기어로 구성되어 있으며 행성기어 여러개가 캐리어(carrier)에 의하여 연결되어 있다. 백래쉬와 기어의 강성을 무시한 이상적인 경우의 속도 관계식과 토크 관계식은 다음과 같다.

$$T_s = RT_s \quad (6)$$

$$R\omega_s + \omega_r = (1 + R)\omega_p \quad (7)$$

여기서 R은 선기어와 링기어의 기어비이며 하첨자 r, s, p는 링기어, 선기어, 행성기어를 뜻하며, 이때 행성기어의 자전 관성모멘트는 무시하였다. Fig. 2는 유성기어계의 구성도이다.

2.4 클러치

클러치는 변속기에서 유성기어계를 구속하여 변속비를 결정하게 하는 요소이며 밴드 클러치와 다판 클러치가 주로 사용된다. 밴드 클러치는 좁은 공간에서 큰 정적 용량을 가질 수 있고 밴드가 반발력을 일부 흡수하므로 충격을 줄이는 효과를 가져 지지부와 고정하는 곳에 주로 사용된다. 밴드 클러치에 의해 발생하는 클러치 토크(T_c)는 다음과 같이 정의된다.

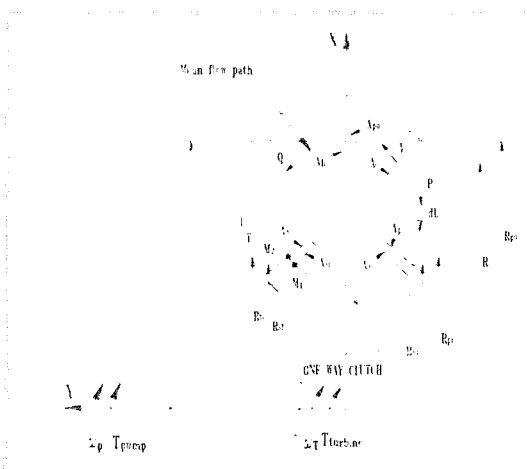


Fig. 1 Sectional view of torque converter

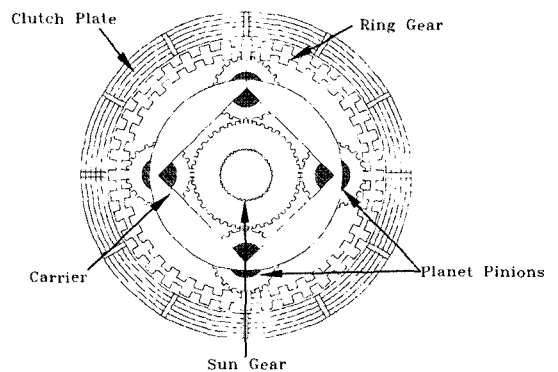


Fig. 2 Construction of planetary gear

$$T_c = F_b R (e^{\nu\theta} - 1) \quad (9)$$

여기서 F_b 는 밴드에 작용하는 힘, R 은 드럼의 직경, μ 는 마찰계수, θ 는 밴드 위 접촉각이다.

다판클러치는 클러치의 용량이 매우 크며 접촉면의 개수를 조정하여 용량의 크기를 조절하기에 매우 용이하다. 또한 회전부분에서도 사용 가능한 특징이 있다. 다만 클러치에서의 클러치 토오크 T_c 는 다음과 같다.

$$T_c = \mu F_n \frac{2}{3} \frac{R_o^3 - R_i^3}{R_o^2 - R_i^2} n \quad (10)$$

여기서 μ 는 마찰계수, F_n 는 클러치 면에 작용하는 힘, n 는 접촉면의 갯수, R_o 는 접촉면의 바깥 지름, R_i 는 접촉면의 안지름이다.

마찰계수 μ 는 정마찰계수(static coefficient of friction) μ_s 와 동마찰계수(dynamic coefficient of friction) μ_k 로 구분되는데, 마찰면 사이의 상대속도가 일정 한도 이상이면 동마찰계수를 적용하며 상대속도가 감소할수록 지수적으로 정마찰계수에 접근하도록 하였다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\mu = (\mu_s - \mu_k) e^{(\Delta v / V_s)} + \mu_k \quad (11)$$

여기서 Δv 는 마찰면에서의 상대속도, V_s 는 동마찰계수로 되는 기준 속도이다.

2.5 차량 및 주행부하

변속장치에서의 출력 토오크가 스프라켓을 돌려 캐터필러를 구동시키면서 차량을 주행시킨다. 그러므로 차량의 질량 M_v 가 스프라켓의 반경 R_v 끝에 위치한 것으로 모델링하여 차량의 등가 관성모멘트를 계산하면 $M_v R_v^2$ 이다.

차량은 주행중에 주행저항을 받게 되는데, 주행저항에는 공기역학적인 저항, 캐터필러 구동저항, 동력전달계의 마찰저항이 가장 크게 작용하며, 공기역학적인 저항의 크기는 차량의 속도의 제곱에 비례하고 나머지는 저속인 경우에는 거의 일정하다. 궤도차량에서는 변속이 발생하는 경우에 차량속도의 변화가 적어 주행저항이 변속 특성에

는 큰 영향을 미치지 않으므로 자세한 모델링을 하지 않고 원심클러치가 포함된 변속장치 장착 차량의 경우에는 일정한 크기의 주행저항 토오크를 주었고 토오크 컨버터가 포함된 변속장치 장착 차량의 경우에는 주행저항곡선을 이용하였다.

3. 시뮬레이터 프로그램

시뮬레이터 프로그램은 Windows XP이 기본적으로 지원하는 그래픽 사용자 인터페이스 환경을 이용하여 사용자가 보다 쉽게 이용할 수 있도록 여러 가지 대화상자 및 마우스 기능, 단축키 기능 등을 추가하였다.^[6] 그리고, 궤도차량의 3차원 모델링은 OpenGL을 이용하여 구성하였다.

OpenGL은 컴퓨터 그래픽에서 유명한 미국의 실리콘 그래픽스(Silicon Graphics)가 워크스테이션에서 사용하던 IRIS GL을 플랫폼이나 운영 체제와 관계없이 사용할 수 있도록 여러 회사들과 컨소시엄을 구성하여 만든 그래픽 라이브러리이다. OpenGL은 우수한 성능과 기능에도 불구하고 PC상에서는 성능이 미약하여 많이 알려지지 않았지만 Windows XP에 포함되어 있고, OpenGL을 지원하는 가속기 등이 속속 발표되고 있어 대중적인 기반을 마련할 뿐만 아니라 3D 그래픽의 표준 API로 자리잡고 있다.^[2-3]

이 라이브러리의 사용으로 보다 빠른 애니메이션이 가능하였고, 고정밀도 애니메이션시 기존의 Windows용 GDI(Graphic Device Interface)에서 존재하던 깜박거림을 없앨 수 있었다.

4. 개발된 시뮬레이터 프로그램의 구성 및 기능

Fig. 3은 개발된 시뮬레이터 프로그램의 구성도이다. 시뮬레이터 프로그램은 설정, 시뮬레이션, 성능평가의 3부분으로 나누어 볼 수 있다. 설정부분에서는 궤도차량의 파라미터 입력, 다양한 시뮬레이션 조건 입력 등을 수행하고, 시뮬레이션 부분에서 Setting 부분에서 입력한 조건

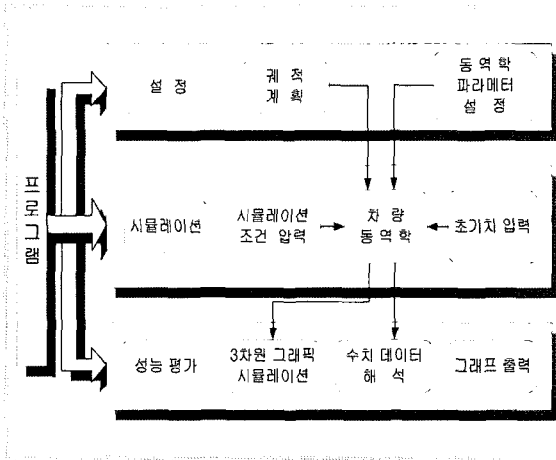


Fig. 3 Structure of Simulator Program

을 가지고 앞에서 유도한 방정식을 이용하여 시뮬레이션을 수행하고, 성능평가 부분에서는 수치 시뮬레이션 데이터를 이용한 3차원 애니메이션과 성능평가를 수행한다.

4.1 시뮬레이터 초기화면

프로그램이 시작하면 Fig. 4과 같은 초기 윈도우가 뜨게 된다.

4.2 시뮬레이터 메뉴 구성

초기 윈도우는 풀다운 방식의 메뉴가 주어지는데, 풀다운 메뉴에서는 기본적인 시뮬레이션 조건 입력, 시뮬레이션 수행, 그래프 출력한다.

Table. 1은 시뮬레이터 프로그램의 메뉴 구성에 대해

Table. 1 Menu Structure of Simulator

File	Edit	Setup
New	Data New	Setting
Open	Data Open	Vehicle Type
Save	Data Edit	
Save As	Data Save	
Exit	Data Save As	
Simulation	Evaluation	Help
Analysis Part	Graph	Help
Simulation	Start	About
	End	

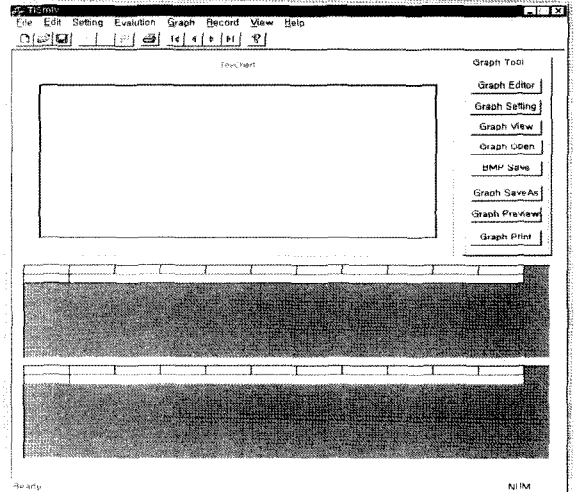


Fig.4 Initial Screen of Simulator

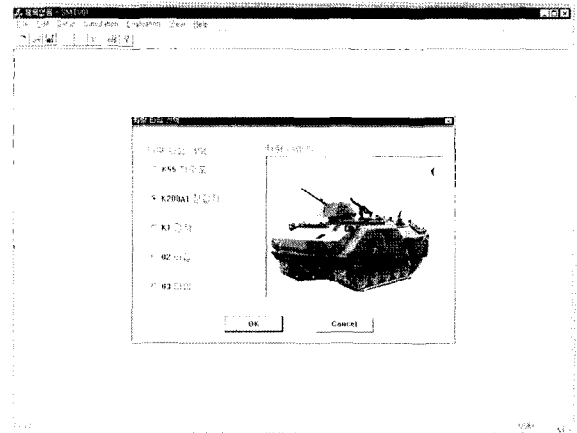


Fig. 5 Select of Vehicle Type

보여준다. 이것에 대해 좀더 자세히 설명하면 다음과 같다. Edit 메뉴에서는 시뮬레이션을 하기 위한 데이터를 입력, 저장, 편집을 하고, Setup 메뉴에서는 시뮬레이션의 상태조건을 입력하고 차량 형태를 설정한다. Simulation 메뉴에서는 해석부분을 선택하고 시뮬레이션을 수행한다. Evaluation 메뉴에서는 시뮬레이션 한 수치 데이터를 가지고 그래프 출력하거나 애니메이션을 수행한다.

4.3 Vehicle Type 설정

시뮬레이션 초기 조건으로 차량 형태를 선택하게 되는데, 이것은 Fig. 5와 같은 대화상자를 통해서 하게 된다.

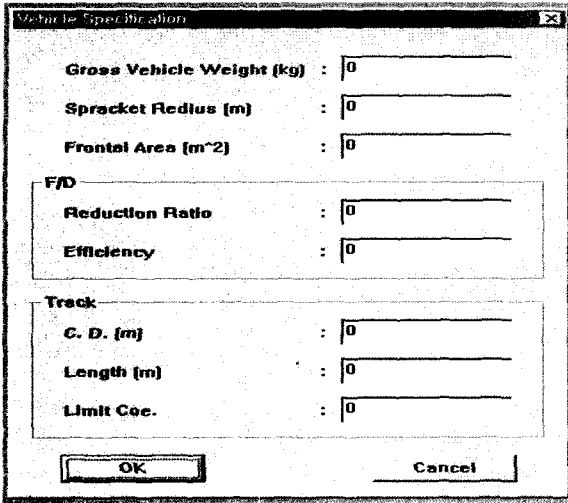


Fig. 6 Dialog Box of Condition Input(I)

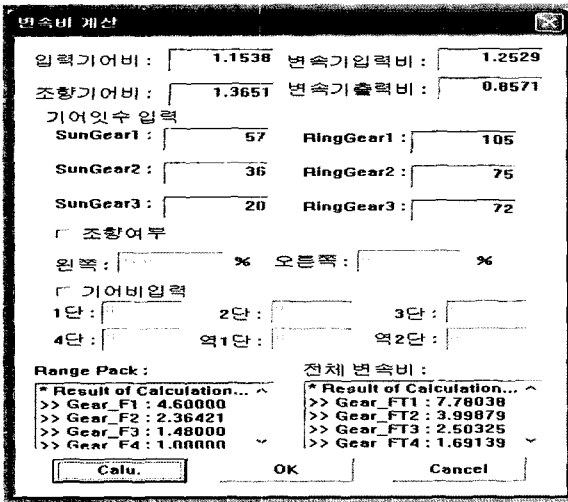


Fig. 7 Dialog Box of Condition Input(II)

이 대화상자는 차량 형태를 선택하면 바로 차량에 대한 이미지를 보이도록 하여 사용자가 차량을 쉽게 선택할 수 있도록 했다.

4.4 조건 입력 Dialog Box

Fig. 6은 시뮬레이션 조건입력 Dialog Box는 보여준다. 여기서는 차량의 중량, 전면적, 스프라켓 직경 그리고 외부조건(구동저항계수, 공기저항계수, 등판저항계수)을 입력한다. 이 Dialog Box는 시뮬레이션 조건에 대한 추

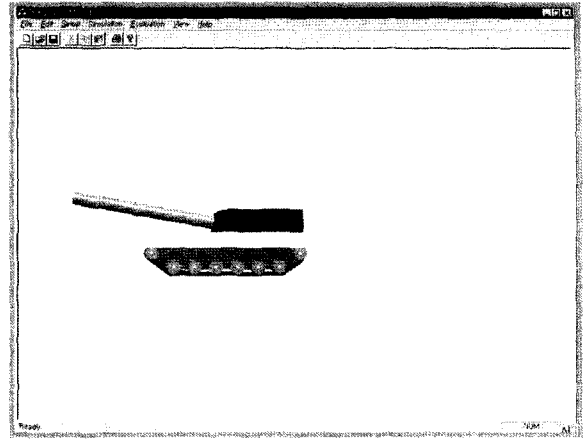


Fig. 8 3D Graphic

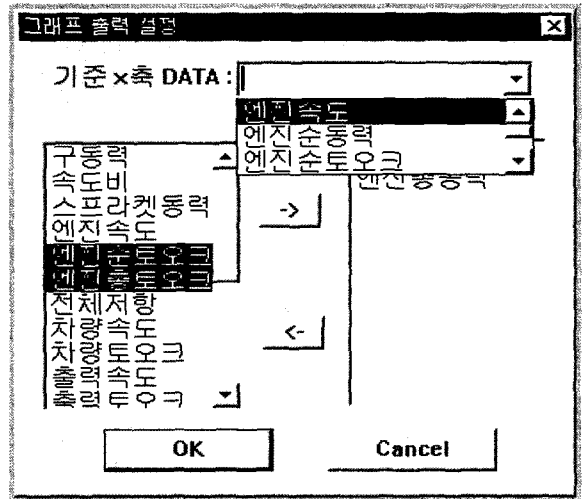


Fig. 9 Select Menu of Output Data for Graph

가를 쉽게 하기 위해 Property Page와 Property Sheet 를 이용하여 구성하였다. Fig. 7은 변속비 계산을 위한 조건입력 Dialog box를 보여준다. 여기서, 입력기어비, 변속기입력비, 조항기어비, 변속기출력비 등의 입력 함수가 있다.

4.5 3차원 그래픽 시뮬레이션

3차원 그래픽 시뮬레이션은 차량 동역학에 의해 시뮬레이션된 결과 데이터를 가지고 수행하게 된다. Fig. 8은 3차원 그래픽을 보여준다.

