

요소결합을 통한 파워트레인 시뮬레이션 소프트웨어 (II): 시스템 자동결합 모듈 개발

이승중 #, 서정민 *

Powerflow Simulation Software of the Automotive Powertrain through the Combination of the Components (II): Development of the Automatic System Generation Module

Seung-Jong Yi # and Jungmin Seo *

ABSTRACT

In this paper, the automatic system generation algorithm based on the element combination algorithm discussed in the first part of this paper for designing an arbitrary type of the automatic transmissions is proposed. The powertrain design software using these algorithms is developed. This automotive powertrain design software with user-friendly graphic user interface has two main modules. The first module, the automatic power flow generation module, is already discussed in the previous paper. The second module dealing with the automatic system generation algorithm is discussed in this paper. The power-flow simulation software for the arbitrary type of powertrain is then developed. The simulation and experimental results of the vehicle equipped with two planetary gear type automatic transmission are compared to validate the proposed algorithms and developed software. The simulation results demonstrate the good agreement with the experimental results.

Key Words : powerflow simulation (동력흐름 시뮬레이션), powertrain (파워트레인), combination of the components (요소결합), automatic system generation (시스템 자동생성), planetary gear (유성기어)

1. 서론

기존의 차량의 파워트레인 시뮬레이션 소프트웨어들은 사용자가 다양한 변속기를 시스템에 적용하는데 있어서 많은 한계를 가지고 있었다. 대부분의 프로그램에서 변속기의 내부 시스템은 고정되어 있어서 단지 기어의 잇수나 관성값 등을 조정할 수 있는 수준이었다. 따라서 새로운 파워트레인을 설계하거나, 기존의 파워트레인의 성능

을 향상시키기 위해서 동력흐름을 바꿀 때 기존의 소프트웨어를 사용하여 성능을 평가할 수 없었다.

본 연구는 이러한 점에 착안하여 임의의 변속기시스템을 설계 및 해석할 수 있는 소프트웨어 개발에 그 목적을 두었다. 이를 위해서 변속기시스템을 하나의 전체시스템으로 설정하지 않고, 다수의 기본시스템의 결합체로 봄으로써 전체운동특성을 정의된 기본요소들의 운동특성의 조합으로 유도할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 즉, 변속

접수일: 2003년 7월 28일; 게재승인일: 2003년 11월 14일

교신저자, 한양대학교 자동차공학과
Email sjyi@hanyang.ac.kr Tel. (02) 2290-0454

* 현대자동차

기시스템을 전체시스템으로 설정하는 것이 아니라 정의된 기본요소의 결합체로 정의하여, 각 요소들의 운동특성을 행렬식으로 정의하고, 각 요소간의 결합에 의해 이러한 요소행렬들을 시스템의 전체행렬로 조합하였다 (1 부 참조). 본 논문에서는 이 알고리즘을 적용한 파워트레인 시뮬레이션 소프트웨어를 개발하기 위해서 아래와 같은 내용들을 수행하여 시스템 자동결합 모듈을 개발하였다.

정의된 변속기의 기본요소들을 연결하고, 각 단에 대한 클러치 및 브레이크의 작동방식을 결정해줌으로써 그 동안 사람의 손으로 장시간에 걸쳐 유도되었던 각 단의 변속비 및 관성값을 프로그램 상에서 유도하였다. 이와 같이 유도된 각 단별 정상상태 및 과도상태의 운동특성데이터를 이용하여 차량의 정속주행시뮬레이션, 발진가속시뮬레이션 및 도시모드시뮬레이션을 수행할 수 있도록 해석 모드 외에 시뮬레이션모드를 추가하였다.

소프트웨어를 개발함에 있어서 사용자의 편의를 위하여 시각적으로 파워트레인을 설계 및 해석할 수 있도록 윈도우 기반의 GUI(Graphic User Interface)를 채용하였다. 프로그램 사용자는 실차실험 이전에 다양한 엔진 및 변속기 조합을 구성하여 보다 적은 시간과 비용으로 설계 및 해석을 수행할 수 있다. 또한 이러한 조합을 적용한 차량의 동적성능을 미리 예측할 수 있어서, 실차 실험에서 발생할 수 있는 판단착오 및 실수를 미연에 방지할 수 있게 되어 시간과 비용적인 측면에서 보다 효율적일 수 있게 되었다.

2. 시스템 자동결합 알고리즘

본 절에서는 1 부에서 발표한 변속기시스템의 기본요소를 적용해서 전체시스템을 구성하는 방법 및 각 단별 운동방정식을 구하는 알고리즘을 설명한다. 이를 위하여 Fig. 1 과 같은 2 개의 단순유성기어세트를 장착한 변속기시스템을 하나의 예로 이용하였다. 여기서 B 는 브레이크, I 는 관성, C 는 클러치를 나타내며 r, s, c 는 각각 링기어, 선기어 및 캐리어의 노드를 나타낸다.

연결된 각각의 기어는 각속도가 동일하므로 기본요소 중 축요소를 이용하여 결합하였다. 각 단에 따른 클러치와 브레이크의 작동여부에 의해 시스템 전체의 운동방정식이 결정된다. 각 단의 운동방정식은 아래와 같이 5 단계를 거쳐서 유도

하였다 [1,2,3,4].

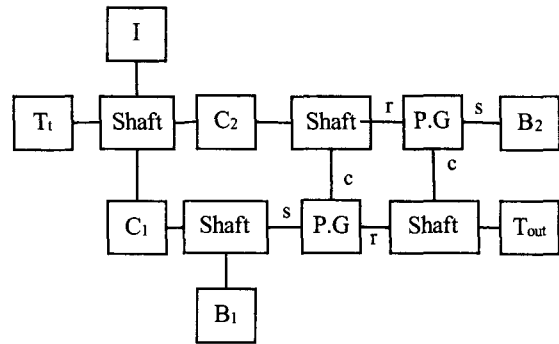


Fig. 1 Block diagram of the two simple planetary gear transmission

Step 1: 브레이크 및 클러치에 관한 선행처리

각 단에 따라 브레이크와 클러치의 상태가 변하기 때문에, 요소별 상태를 적용하여 시스템을 재구성하였다. 브레이크요소는 각속도를 통제하는 요소이고 이러한 브레이크의 각속도 제한은 노드를 통해 연결된 다른 요소로 전달된다. 이렇게 순차적으로 전달되는 브레이크의 특성은 0 정선을 만날 때까지 진행된다. 작동하지 않는 브레이크요소는 시스템에 아무런 영향을 주지 못하므로 단지 행렬식을 구성하는 노드로서만 의미를 갖는다. 클러치는 작동할 때 노드간의 각속도 및 토크가 직결되게 되며, 작동하지 않는 경우는 완전히 차단된다. Fig. 2 는 이와 같은 브레이크와 클러치 특성을 반영한 정상상태 1 단을 나타낸다.

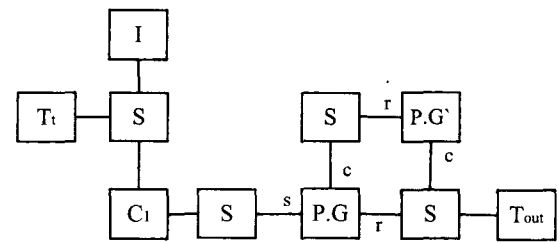


Fig. 2 Reconstructed system for the first shift

과도상태의 경우 각 클러치는 정상상태와 달리 노드간의 직접연결로 처리하지 않고 입력토크와 클러치용량과의 관계에 의해 처리하였다. 브레

이크요소는 과도상태 중 작동할 경우 토크에 대한 동력원으로 작용한다. 이러한 특성을 적용한 1 단에서 2 단으로의 변속과정을 Fig. 3에 나타내었다.

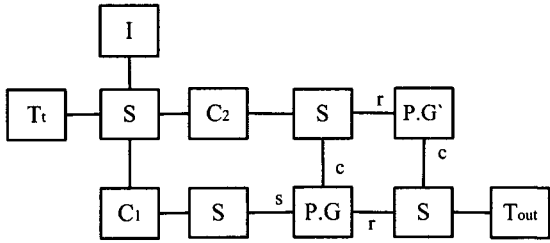


Fig. 3 Reconstructed system for the 1->2 shift

Step 2: 회전속도행렬 구성의 시작노드 설정

각속도행렬을 구성하기 위해서는 기준노드가 필요하다. 각속도행렬식을 구하는 목적은 각 노드의 입력속도에 대한 각속도비를 구하는 것이기 때문에, 동력원인 T_t 를 기준으로 하였다. 변속기시스템을 구성하는 요소 중 각속도를 제한할 수 있는 요소는 동력원, 클러치 및 브레이크요소이다. 정상상태의 경우 클러치와 브레이크요소는 Step 1의 과정을 통해서 선행처리 되기 때문에, 재구성된 시스템상에서 각속도를 제한할 수 있는 요소는 동력원뿐이다.

과도상태의 경우 클러치와 브레이크 등의 작동상태에 의해서 시스템의 자유도가 변화하기 때문에 이들의 영향을 고려하여 가상적인 각속도성분을 설정하여 그에 대한 시작노드를 추가하였다. 추가되는 시작노드는 변속과정에서 작동하기 시작하는 클러치를 기준으로 하였다 (Fig. 4 참조).

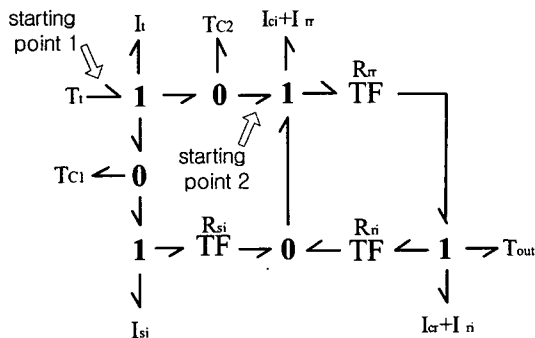


Fig. 4 Flow starting points during 1->2 shift

이와 같이 설정된 시작노드에 대하여 행렬식을 구성하는 순서는 Fig. 5와 같다. 여기서 첫째와 둘째 진행방향은 Fig. 4의 시작점 1에 대한 것이다. 시작점 1에 대한 각속도성분은 각각 0 정선을 만났으므로 더 이상 전달되지 않으며 시작점 2에 의해 전체 노드의 행렬식을 구성한다.

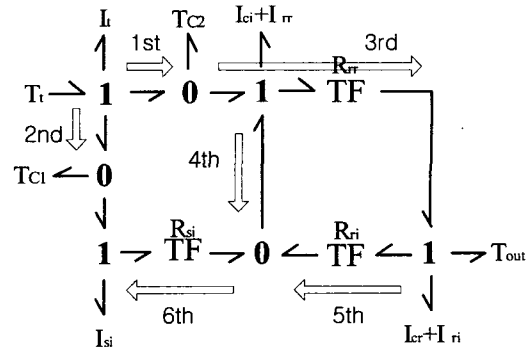


Fig. 5 Analysis procedure during 1->2 shift

Step 3: 각속도행렬식 구성

Step 2에서 결정된 시작노드에 대하여 각 요소의 부분행렬식을 적용하여 전체시스템의 행렬식을 구성하였다. 정상상태의 경우 자유도가 1인 시스템이므로 동력원의 각속도 ω_t 에 관한 노드를 기준으로 행렬식을 구성하였다.

각속도행렬식 구성에서 관건은 0 정선에서의 각속도행렬식 처리에 있다. 다른 모든 요소는 하나의 각속도성분이 결정되면 연결된 다른 노드의 각속도성분이 결정되나 0 정선은 3개의 노드 중 2개가 결정되어야 남은 하나의 성분이 결정된다.

하나의 입력성분에 대해 0 정선에서 발생할 수 있는 경우는, 입력된 하나의 각속도성분이 0 정선의 3개의 노드 중 2개의 노드를 결정하는 경우와, 0 정선에 연결되어 있는 3개의 노드 중 2개의 노드가 순환되어 서로에게 적용되는 경우이며 하나의 입력에 대해 위의 두 경우를 제외한 경우는 추가적인 각속도입력이 없으면 풀 수 없다. 그 외에 발생할 수 있는 경우는 위의 두 가지 경우의 조합이며, 이 경우 앞에서 논한 알고리즘을 순차적으로 적용함으로써 해결할 수 있다.

정상상태 및 과도상태의 행렬식 구성 알고리즘은 동일하나, 최종행렬식의 구성은 각속도성분

개수에 의해서 차이가 발생한다.

3 개 이상 다수의 노드가 연결되어 있는 0 정선은 3 개의 노드를 갖는 다수의 0 정선으로 연결하여 동일한 알고리즘을 적용하였다.

Step 4: 토크행렬식 구성의 시작노드 설정

토크행렬식을 구성하기 전에 각속도행렬식과 동일하게 시작노드점을 결정하여야 한다. 각속도행렬식에서 각속도성분을 제한할 수 있는 요소는 클러치와 브레이크로 한정되어 있고 Step 1의 과정을 통해서 정상상태의 경우 브레이크의 영향은 선행처리 하였다. 따라서 실제로 행렬식을 구성할 경우 클러치요소만 고려하였다.

토크행렬식에 있어서 추가적으로 관성요소를 고려하여야 한다. 관성요소는 직접적으로 토크를 공급하는 요소는 아니지만, 관성요소의 각속도 변화에 따라 토크값이 변한다. 이러한 특성은 시스템에 간접적으로 토크를 공급하는 것과 같은 효과를 나타낸다. 따라서 이러한 관성요소의 특성을 고려하여 토크행렬식의 시작노드로 추가하였다.

시작노드가 많을 경우 개별적으로 프로그램상에서 처리하는 것은 예상치 못한 상황에 대한 오류 등을 발생시켜 효율적이지 못하기 때문에 시작노드로서 해결이 가능한 경우만을 고려하여 시작노드로 설정하였다. Fig. 6 을 예로 관성요소를 시작노드로 결정하는 상황을 판단하는 알고리즘은 다음과 같다.

모든 관성요소는 1 정선과 연결된다. 각각의 관성요소는 토크행렬식의 경우 각속도에 대한 함수인 입력토크로 처리하였다. 3 개의 노드가 연결된 1 정선과 직접 연결되어 있는 관성요소 역시 시작노드로 처리할 수 있다. 이와 같이 Fig. 6 에서 설정한 시작점에 대해 시스템의 행렬식 구성과정을 도시하면 Fig. 7 과 같다.

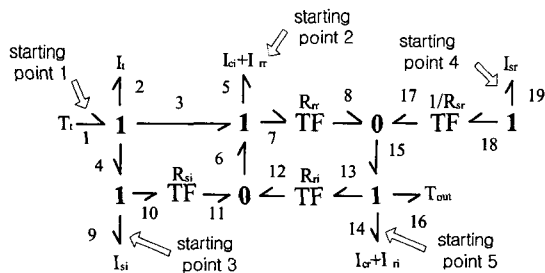


Fig. 6 Torque starting points at the 3rd shift

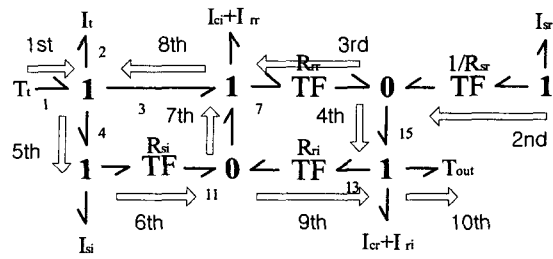


Fig. 7 Analysis procedure at the 3rd shift

과도상태의 경우 브레이크 및 클러치 역시 토크입력요소이므로 시작점으로 고려하였다. 따라서 과도상태의 경우 동력원과 브레이크, 클러치, 관성요소를 시작노드로 설정하였다. 관성요소에 대한 알고리즘은 정상상태와 동일하다.

Step 5: 토크행렬식 구성

토크행렬식 구성의 핵심은 1 정선에 연결되는 각 노드간의 관계 처리 방법이다. Step 3 에서와 같이 하나의 입력토크에 대해 1 정선에서 발생 가능한 경우에 대한 해석 알고리즘은 다음과 같다.

1 정선은 3 개의 노드가 연결된 경우로 한정하였다. Fig. 8 은 단일 입력토크에 대해 해석 가능한 가장 기본적인 경우이다. 입력된 T_{in} 은 0 정선의 노드 2 에 도달하고, 0 정선에 연결된 노드 3 과 4 는 노드 2 와 동일한 토크값을 갖는다. 노드 3, 4 로 전달된 동력흐름은 1 정선의 노드 5, 6 에 전달되고 3 개의 노드로 구성된 1 정선에 2 개의 노드가 결정되므로 노드 7 의 토크, 즉 T_{out} 에 관한 행렬식이 구성된다.

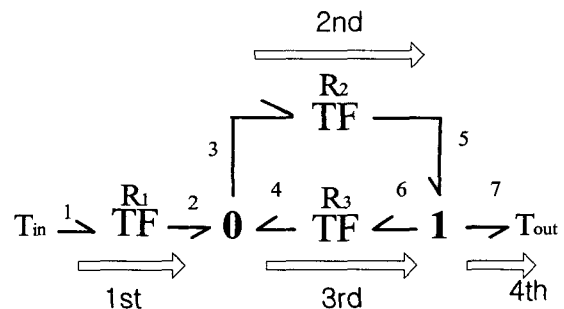


Fig. 8 Case study 1 for 1 junction

다음은 1 정선에서 입력토크가 연결된 노드를 제외한 두 노드 중 한 쪽 노드로 가상의 동력흐름이 진행했을 때, 전달된 동력흐름이 남은 노드로 연결됨으로써 행렬식을 구성할 수 있는 경우이다. Fig. 9 와 같이 입력토크 T_{in} 은 1 정선의 노드 2 로 전달되나, 남은 노드 3 과 4 는 현 상태에서 추가적인 관계를 얻을 수 없다. 이 경우 두 노드 중 노드 3 으로 가상의 동력흐름을 전달했을 때, 노드 3 의 동력은 노드 5 로 전달된다. 노드 5 는 0 정선과 연결되어 있으므로 노드 6 과 7 은 노드 5 와 동일한 동력을 갖는다. 노드 6 으로 전달된 동력은 다시 노드 4 로 전달되고, 이러한 과정을 통해 1 정선의 각 노드 관계가 행렬식으로 완성된다.

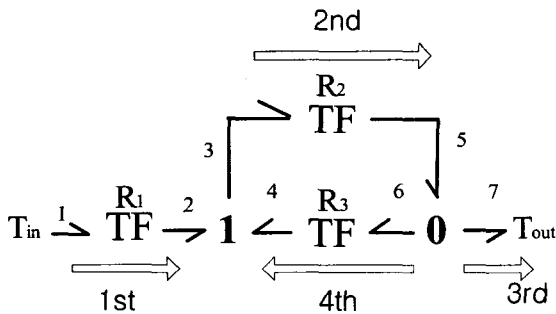


Fig. 9 Case study 2 for 1 junction

Step 3 의 0 정선과 동일하게 하나의 입력에 대해 해석이 가능한 1 정선의 경우는 위의 2 경우 뿐이다. 그 외의 다른 경우는 1 개 이상의 입력토크가 존재해야 해석이 가능한 경우이거나, 위의 2 경우의 조합에 의한 경우이다.

또한 Step 3 에서 4 개 이상의 노드로 연결된 0 정선의 경우와 동일하게 4 개 이상의 노드가 연결된 1 정선은 3 개의 노드가 연결된 다수의 1 정선의 결합으로 표현할 수 있다.

그러나 Fig. 10 과 같이 첫번째 0 정선에서 토크의 진행방향을 어떻게 결정하나에 따라 T_{out} 의 값이 달라지는 경우가 있다. 이러한 오류를 막기 위해 각속도행렬과 토크행렬식의 결과를 서로 비교하여 값이 다를 경우 알고리즘 진행을 정지하도록 하였다. 1 정선에 대한 경우도 동일하게 적용하였다.

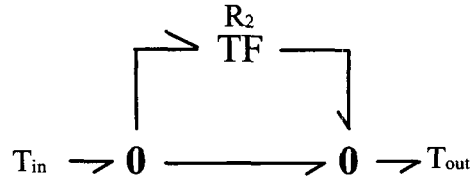


Fig. 10 Extra case for the algorithm error

3. 파워트레인 시뮬레이션 소프트웨어

본 절에서는 앞에서 설명한 알고리즘들을 이용하여 파워트레인 시뮬레이션 소프트웨어를 개발하였다. Fig. 11 은 소프트웨어의 초기화면이다. 프로그램메뉴는 크게 모델링메뉴와 해석 및 시뮬레이션메뉴로 구성하였다. 모델링메뉴는 변속기를 구성하는 기본요소를 화면상에 불러온다.

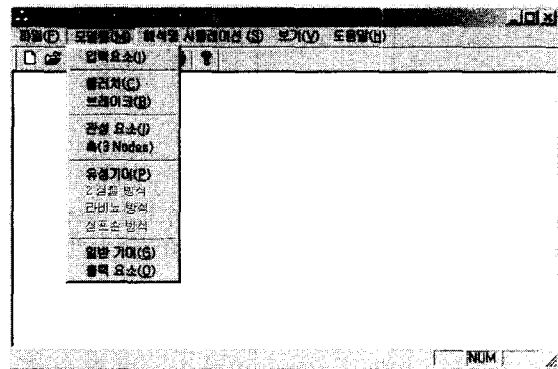


Fig. 11 VPS main screen

전체시스템을 설계하기 위해 기본요소블록을 메인화면으로 불러온다. 블록이 추가될 때마다 각 블록은 요소번호가 부여되고, 프로그램 상에서는 그러한 요소번호로 각 블록을 구별한다. 각 블록은 기본적으로 노드의 갯수가 정해져 있고, 각 노드와 연결되는 블록의 노드위치를 입력함으로써 각각의 블록은 연결된다. 또한 요소의 종류에 따라 노드연결데이터 외에 추가적인 정보를 필요로 하나, 기본적으로 입력되어야 하는 데이터는 노드 연결정보, 블록의 위치정보, 블록의 이름과 노드의 이름에 관한 정보이다.

자동변속기는 각단에 따라 브레이크 및 클러

치의 체결상태에 따라 변속비가 결정된다. 따라서 각 블록의 노드연결데이터 외에 클러치와 브레이크의 작동에 관한 데이터를 입력해야만 정상상태 및 과도상태에 대해 해석할 수 있다 [5,6,7,8]. 전체변속단은 기본적으로 6 단을 한계로 하였다. 이와 같은 방법으로 2 개의 단순유성기어를 장착한 차량의 파워트레인 설계화면은 Fig. 12 와 같다.

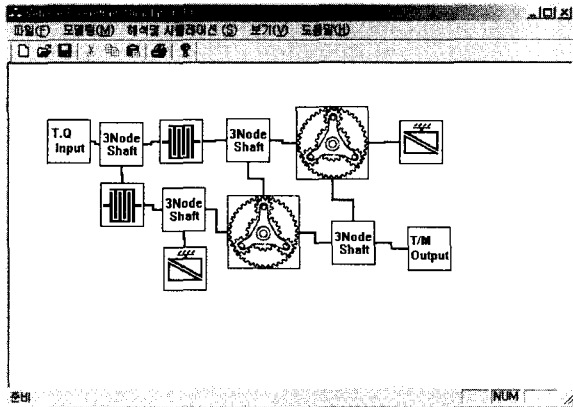


Fig. 12 Screen for designing the powertrain

4. 주행 시뮬레이션

주행성능 시뮬레이션은 정속주행시뮬레이션, 발진가속시뮬레이션, 도시모드시뮬레이션으로 구분하였다 [9]. 정속주행시뮬레이션 및 도시모드시뮬레이션은 주어진 조건에 대한 연비값을 실차시험과 비교하여 그 결과를 확인하였다. 발진가속시뮬레이션은 엔진회전수 및 토크컨버터의 터빈회전수 변화, 차량의 속도 및 가속도 변화, 100km/h 에 도달하는데 걸리는 시간 등의 결과를 실차시험과 비교하여 그 결과를 확인하였다.

4.1 정속주행 시뮬레이션

정속주행시 연비는 엔진의 연료소비율곡선에 따라 계산된 연료소비값을 시간에 대해 적분하여 전체진행거리로 나누어 구하였다. 정속주행시 연비소비시험 규정에 따라 속도는 10km/h 의 정수배로 설정하였다. 60km/h 에 대한 정속주행시뮬레이션 결과창은 Fig. 13 과 같다.

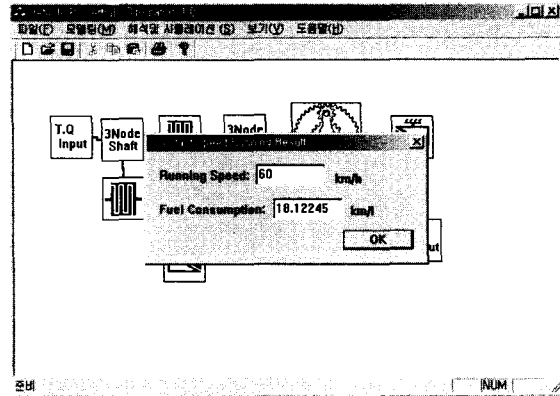


Fig. 13 Constant running simulation result

4.2 발진가속주행 시뮬레이션

발진가속주행은 스톱상태에서 플스로틀 상태로 가속한다. 시뮬레이션은 30 초간 진행하였으며, 적분간격은 1ms 로 하였다. Fig. 14 는 엔진 rpm 및 토크컨버터의 터빈 rpm 의 변화에 관한 결과이다. 토크컨버터의 회전수 변화에서 보듯이 30 초간 2 차례 변속이 진행되었다. 변속직전까지 터빈 회전수는 엔진회전수를 따라 6500rpm 까지 상승하였다. 실차시험에서도 변속은 6500rpm 지점에서 변속이 진행되었다.

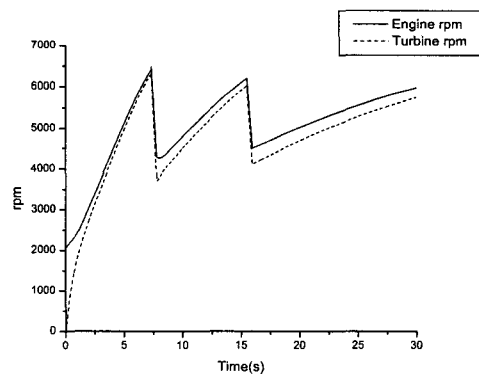


Fig. 14 Engine and turbine rpms under the standing start running

변속구간을 과도상태 및 관성상태를 구분하여 해석하였다. 과도상태동안 토크컨버터의 터빈과 연결되었던 클러치의 체결상태가 변화됨에 따라,

터빈의 회전수가 점점 감소하고, 그에 따라 엔진의 회전수 역시 감소하였다. Fig. 15 는 엔진 및 터빈의 회전수 변화에 따른 터빈토크에 대한 그래프이다.

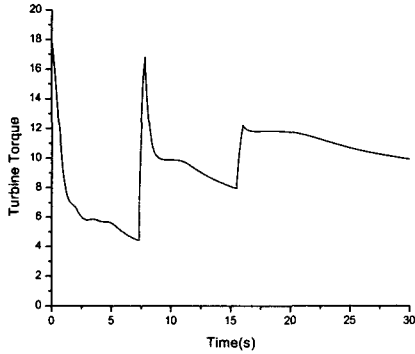


Fig. 15 Turbine torque under the standing start running

터빈토크는 엔진과 터빈의 회전수 차에 의해 변화하며, 변속구간에서 과도상태 및 관성상태시 변속제어에 의해 다른 결과를 나타낸다. Fig. 16 은 이러한 터빈토크에 의해 전달된 차량의 가속도 변화 그래프이다. 차량의 가속력은 터빈토크에 의해 결정된다. 그러나 변속과정 중 변속에 관련된 클러치 및 브레이크요소를 제어하는 방법에 따라 차량의 구동력변화는 달라지게 된다. 따라서 이러한 변속시 심한 가속도의 변화는 승차감 저해에 가장 큰 요인이 된다.

1 단에서 2 단의 변속시에 더 큰 가속도 변화를 나타내었다. 이는 기어비의 차가 고단에 비해 저단일 경우 보다 크기 때문이다. 본 연구에서는 변속시 일정 수준의 제어가 가능하도록 프로그램을 설계하였기 때문에 이를 이용하여 2 단에서 3 단의 변화에 대해 보다 적은 가속도 변화를 나타내도록 제어하였다. 그러나 1 단에서 2 단으로의 변속에 대해서는 적절한 제어를 설정하지 못하였다. 보다 적절한 변속제어를 한다면 가속도 변화가 적은 변속이 가능할 것이다.

구동력에 의한 차량의 속도변화 그래프는 Fig. 17 과 같다. 엔진 및 변속기 등의 관성변화에 비해 차량의 관성이 크므로 변속과정 중에 차량의 속도변화는 크지 않았다.

발전가속시뮬레이션 및 실차시험 결과를 비교

하면 Table 1 과 같으며, 시뮬레이션 결과가 실험 결과를 잘 따르고 있음을 보여주고 있다 .

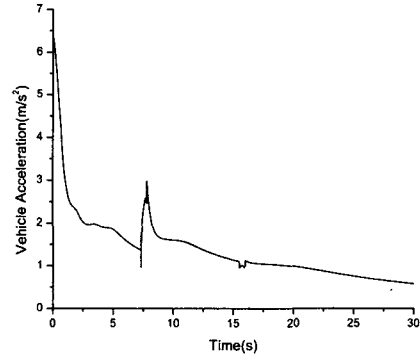


Fig. 16 Vehicle acceleration under the standing start running

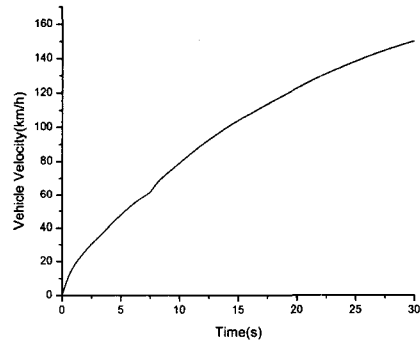


Fig. 17 Vehicle velocity under the standing start running

Table 1 Simulation and experimental results under the standing start running

	Simulation	Experiment
0→ 100km/h	14.04 s	14.6 s
200 m	12.43 s	12.9 s
400 m	19.29 s	19.8 s

4.3 도시주행모드시뮬레이션

도시주행모드시뮬레이션 역시 정속주행시뮬레이션과 동일하게 연비에 대한 결과로서 나타내었다. Fig. 18 은 도시주행모드에 대한 결과 다이어그램이다.

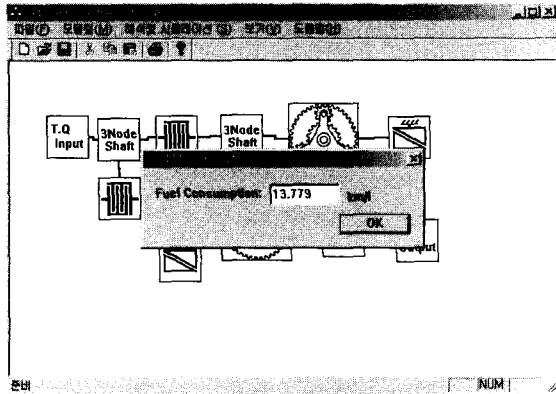


Fig. 18 LA-4 mode result

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구는 변속기의 변속단별 상대방정식을 사람의 손이 아닌 컴퓨터를 이용하여 유도할 수 있는 알고리즘 개발 및 이를 적용한 소프트웨어를 이용하여 설계된 파워트레인에 주행성능시물레이션을 추가한 파워트레인 설계 및 시물레이션 소프트웨어 개발에 목표를 두었다.

이를 위해서 변속기시스템을 보다 세분화한 기본요소의 결합시스템으로 정의하였고, 각 기본요소의 운동행렬식을 유한요소법의 개념을 도입하여 전체운동행렬로 결합할 수 있는 알고리즘들을 개발하였다. 이렇게 개발된 알고리즘들을 이용하여 파워트레인을 설계할 수 있는 소프트웨어를 개발하였고 여기에 파워트레인의 성능을 해석할 수 있는 정속주행, 발전가속주행 및 도시모드 시물레이션 모듈을 첨가하여 파워트레인 설계 및 해석 소프트웨어를 개발하였다.

개발된 알고리즘들과 소프트웨어의 신뢰성을 확보하기 위해서 실차실험 결과와 비교하였다. 이때 발생한 오차는 알고리즘에 기인하기보다는 모델링에 의한 해석방법에 의한 것으로 볼 수 있으며 허용범위 안에서 정확성을 보였지만, 보다 다양한 변속시스템을 적용하여 그 결과를 확인하여야만 해석 알고리즘의 신뢰성을 확보할 수 있을 것이다. 또한 개발된 소프트웨어는 사용자의 편의를 위하여 풀다운메뉴들을 사용하였다.

참고문헌

1. Tian, Lai and Lu, Li-qiao, "Matrix System for the Analysis of Planetary Transmissions," ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 119, No. 3, pp. 333-337, 1997
2. Hedman, A., "Transmission Analysis-Automatic Derivation of Relationships," ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 115, No. 4, pp. 1031-1037, 1993
3. Karnopp, D. C. and Rosenberg, R. C., "System Dynamics," 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2000
4. Kim, J.S. and Park, J.S. "Dynamic performance analysis for secondary suspension of maglev control systems with a combined lift and guidance," J. of KSPE, Vol. 9, No. 1, pp. 53- 65, 1992.
5. Kotwicki, A. J. Dynamic Models for Torque Converter Equipped Vehicles. SAE, 820393, 1982
6. Design Practices: Passenger Car Automatic Transmissions 3rd edition. SAE, 1994
7. Wong, J.Y. Theory of Ground Vehicles 2nd edition. John Wiley & Sons INC, 1993
8. Yoon, A. and Khargonekar P. Design of Computer Experiments for Open-loop Control and Robustness Analysis of Clutch-to-Clutch Shifts in Automatic Transmissions. Proceedings of the American Control Conference, 1997, 3359-3364
9. Kim, I. and Yi, S-J The Development of the Software for the Powertrain Design using Graphical User Interface. KSAE 96370133, 1996, pp. 205-215