

# 저상굴절 궤도차량의 AWS ECU 테스트 플랫폼을 위한 가상 주행환경 개발

## Development of the Virtual Driving Environment for the AWS ECU Test Platform of the Bi-modal Tram

최성훈\*                  박태원\*\*                  이수호\*                  문경호\*\*\*  
Choi, Seong-Hoon      Park, Tea-Won      Lee, Soo-Ho      Moon, Kyung-Ho

---

### ABSTRACT

A bi-modal tram has been developed to offer an advanced transportation service compared with existing vehicles. The All-Wheel-Steering system is applied to the bi-modal tram to satisfy the required steering performance because the bi-modal tram has extended length and articulated mechanism. An ECU for the steering system is essential to steer wheels on 2nd and 3rd axles by the specific AWS algorithm with the prescribed driving condition. The Hardware-In-the-Loop Simulation(HILS) system is planned for the purpose of evaluating the steering system of the bi-modal tram. There are kinematic links with the hydraulic actuator to steer wheels on each 2nd and 3rd axles and also same steering mechanism as the actual vehicle is in the HILS system. Controlling the movement of hydraulic actuator which reflects the lateral steering reaction force on each wheel is the key to realize the HILS system, but the reaction force is continuously changed according to various driving conditions. Therefore, the simulation through the multi-body dynamics model is used to obtain the required forces.

---

### 1. 서 론

기존 운송 수단에 비하여 탑승자의 편의성과 차량의 정시성, 수송 용량에 있어서의 장점을 동시에 갖춘 새로운 도시 교통 시스템의 필요성이 대두됨에 따라 Bi-modal 저상 굴절 궤도 차량이 개발 중에 있다. Bi-modal 차량은 교통 약자를 배려하여 차체 높이가 낮은 특성을 가지고 있으며 이를 위하여 각 차축에는 더블 위시본 형식의 독립현가장치가 사용된다 [1,2]. 또한, Bi-Modal 차량에는 차량의 3개 차축, 총 6개의 전체 차륜을 조향하는 All-Wheel-Steering system(AWS)이 적용되었다. 증가한 차량의 전장 과 축거, 차체 굴절 특성에 의해 요구되는 조향 성능을 충족시키기 위하여 AWS System을 통합 제어하는 알고리즘이 개발되었으며[3], 전 차륜 조향 알고리즘은 각종 센서에 의한 차량의 주행 환경 및 운전자의 조작을 입력받아 각 차륜의 조향각을 제어하게 된다.

실제 차량에서의 조향 알고리즘의 구현을 위해서는 차량에 직접 장착되어 독립적으로 작동할 조향 전용 ECU가 필요함에 따라 조향 제어 ECU가 개발되고 있으며, 추가적으로 개발된 조향 제어 ECU가 탑재된 Bi-Modal 차량의 조향 제어 시스템의 성능을 평가하면서도 실차를 이용한 실험에서의 수고와 비용, 시간을 줄일 수 있는 HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation) 시스템이 구현 중에 있다.

---

\*\* 아주대학교 기계공학부, 정회원

E-mail : park@ajou.ac.kr

TEL : (031)219-2524 FAX : (031)219-1965

\* 아주대학교 기계공학과, 대학원

\*\*\* 한국철도기술연구원

Bi-modal 차량의 2차축과 3차축의 차륜에는 조향을 위하여 유압 액추에이터가 적용된 기구학적 링크 장치가 적용되어 있으며, HILS 시스템에서 또한 동일한 장치가 적용된다. 실차와 동일한 조건의 조향 HILS 시스템 개발을 위해서는 차량 조건 및 주행 조건에 따른 횡방향 조향 반력의 제어가 필수적이다. 이는 타이어에서 발생하는 횡방향 조향 반력이 조향 시스템의 구동부에 작용하여 차량의 조향 응답성에 영향을 주기 때문이다.

본 논문에서는 Bi-modal 차량의 조향 시스템을 평가하기 위한 HILS 시스템을 구성하고, 차량 동역학 모델을 이용하여 주어진 상황에서 발생하는 차량의 횡방향 조향 반력을 도출하며, 이를 HILS 시스템의 동역학 모델에 적용하여 실제 HILS 시스템의 조향 반력 구현 장치에서 필요한 토크를 계산한다.

## 2. 전 차륜 조향 알고리즘

Bi-modal 차량은 수송 용량을 늘리고자 차량의 길이가 기존의 차량에 비해 길어지고 축간 거리 또한 증가하였다. 이러한 차량 제원의 특성으로 인하여 최소 회전 반경이 늘어남에 따라 일반적인 도로, 특히 교차로와 같은 최소한의 일정한 회전 반경이 필요한 구간을 주행하는 데에 어려움이 생길 수 있다. 따라서 차량을 1량과 2량으로 나누어 차체가 굴절되도록 함과 동시에 All-Wheel-Steering system(AWS)을 적용하여 차량의 최소 회전 반경을 줄이게 되었다. 이에 따라 각 차륜이 동일한 가상의 조향 중심점을 갖고 차체가 굴절되는 상태에서 이상적인 선회 조건을 만족시키도록 각 축의 조향각을 제어하기 위한 전 차륜 조향 알고리즘이 개발되었다 [3].

전 차륜 조향 알고리즘은 기본적으로 그림1과 같은 지닌다. 조향모드와 1축 조향각, 굴절각, 차량 속도를 입력 받아 2축과 3축의 조향각을 계산하여 최종적으로 유압 장치를 제어하는 데에 필요한 유압 실린더의 변위를 출력하도록 고안되었다. 전 차륜 조향 알고리즘은 운전자의 조작에 따라 크게 전체 차륜이 같은 방향으로 조향되는 동위상 모드와 각 축별로 별도의 조향각을 갖는 역위상 모드로 나뉜다. 동위상 모드는 고속 주행 시 차선 변경이나 정류소에 정밀 정차 시 사용되며, 역위상 모드는 일반적인 선회 시 사용된다. 역위상 모드에서 운전자에 의하여 발생한 1차축 차륜의 평균 조향각은 2차륜에 1차축 차륜과의 반대 방향으로 일정 비율의 조향각을 발생시키며, 차량의 회전에 의해 1량과 2량 사이에서 발생한 차량의 굴절각으로 인하여 3차축 차륜이 1차축 차륜과 반대방향으로 굴절각에 대하여 일정 비율만큼 조향된다. 또한, 역위상 모드에서는 차량이 설계상에 지정된 속도 이상으로 주행하게 되면 차량의 선회로 인하여 발생하는 차체의 불안정성을 줄이기 위하여 운전자에 의해 조작되는 1차축을 제외한 2차축과 3차축의 조향각을 추가적으로 제어한다. 차량의 속도가 증가함에 따라 2축과 3축 차륜의 조향각은 저속에서의 조향각에 비하여 점차 선형적으로 감소되어 고속 주행 시 일반적인 차량과 마찬가지로 2 Wheel-steering 상태가 된다. 이러한 알고리즘을 적용함으로써 기본적으로 의도한 최소 회전 반경의 감소 외에도 정거장에 대한 정밀 정차나 고속 주행 시의 횡방향 차선 변경 등 주행 상황별로 부가적인 조향 성능을 얻게 되었고 차량의 조향 안정성 또한 증대되었다.

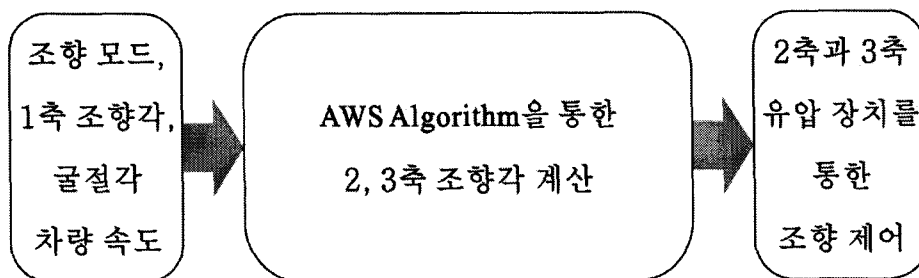


그림1. 전 차륜 조향 알고리즘 개략도

### 3. AWS ECU Test Platform

HILS 시스템을 포함하는 ECU Test Platform의 구축을 위해 그림2와 같은 시스템을 구성하였다. 개발 중인 HILS 시스템에서 2축과 3축의 조향시스템, 조향 제어 ECU, 유압 장치 등은 실차에 적용되는 부품을 사용한다. 실차에 비해서 부족한 데이터에 대해서는 PC에서 실시간으로 가상의 주행상황 시뮬레이션을 통해 필요한 데이터를 산출하여 조향 제어 ECU에 입력하고, 이를 바탕으로 주어진 상황에서 ECU가 차량의 조향 시스템을 적절하게 제어하는 가를 테스트하게 된다. ECU에 입력되도록 요구되는 여러 데이터 중에서 Potentiometer로부터 얻게 되는 2축과 3축 차륜의 조향각과 유압 장치의 압력 센서에서 측정되는 유압 회로 내부 압력, 유압 실린더를 제어하는 비례 솔레노이드 밸브로부터의 LVDT 신호는 실제 시험 장치에서 나오는 신호를 ECU에 입력한다. 그 외, 차량 속도 데이터와 차체간 굴절각 데이터는 차량 주행 시뮬레이션으로부터 얻을 수 있는 데이터를 변환하여 ECU에 입력한다. 특히, 조향각 및 굴절각, 차속 신호는 차량 내부 데이터 네트워크 규격의 하나인 CANopen 메시지 형태로 ECU에 입력되기 때문에 이를 위한 CANopen Interface 장치가 포함된다.

위와 같은 HILS 시스템이 보다 더 실제 차량의 조향 장치가 가지는 거동과 유사해지기 위해서는 타이어에서 발생하여 조향 기구를 통해 전달되는 횡방향 조향 반력이 조향 제어 유압 실린더에 가하는 저항을 고려해야 한다. 따라서 이에 상응하는 반력 생성 장치가 그림2의 가장 우측에서 보이는 바와 같이 추가되어야 하며 적절히 제어되어야 한다. 또한, 실차에서는 좌, 우 양측의 타이로드를 통하여 전달되는 반력을 HILS 시스템에서는 한쪽 타이로드만으로 고정된 반력 생성 장치를 통하여 구현해야 하기 때문에 동역학 해석을 통하여 요구 반력을 만족시키는 토크의 계산이 필요하다.

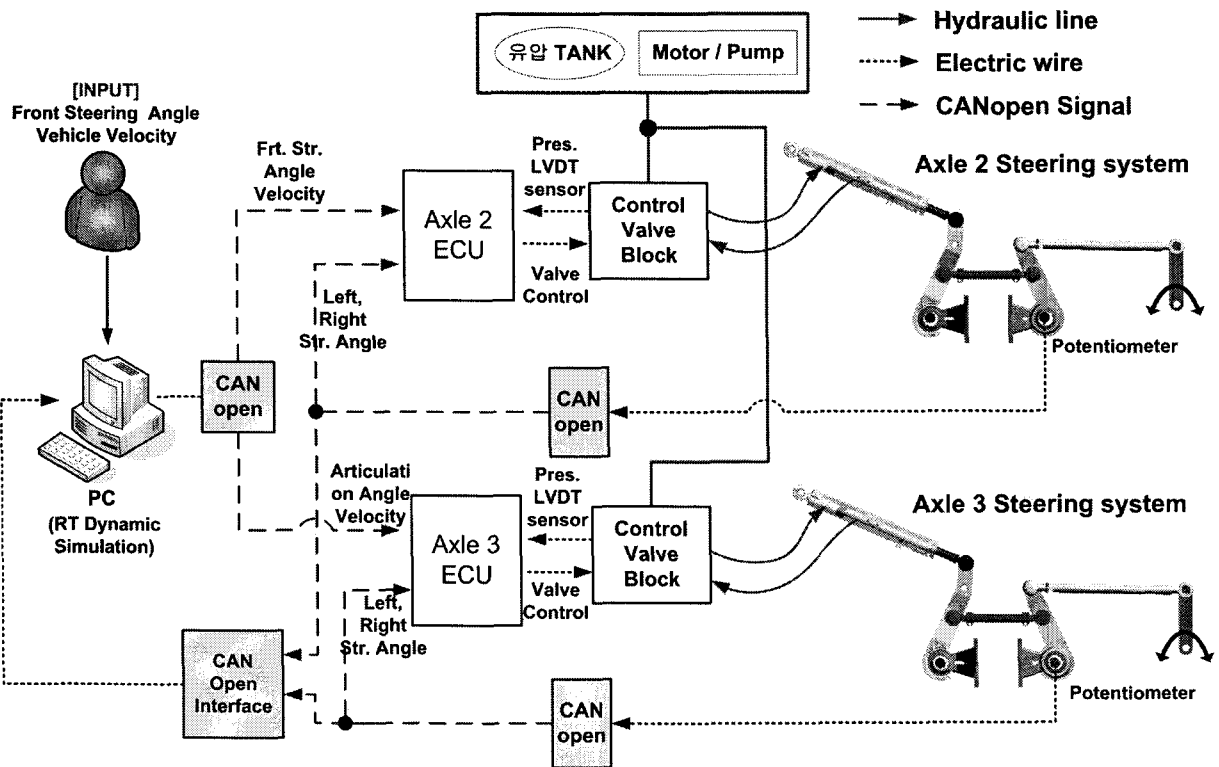


그림2. HILS 시스템 작동 흐름

#### 4. 조향 반력 해석

##### 4.1 횡방향 조향 반력 해석 과정

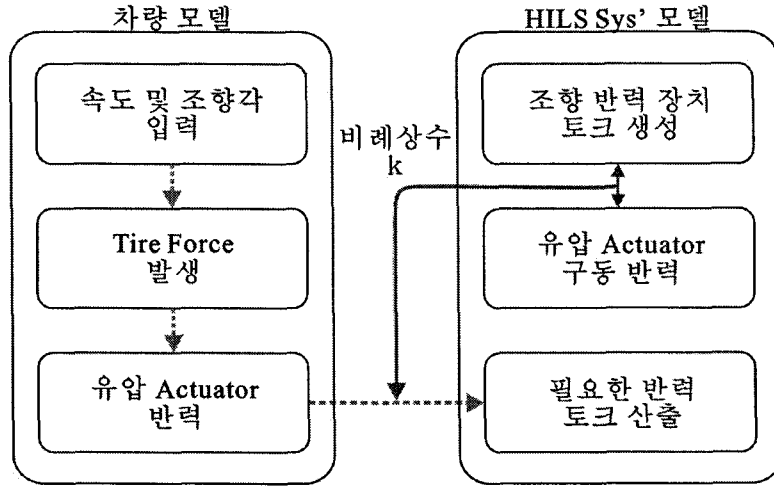


그림3. 조향 반력 해석 과정

HILS 시스템의 횡방향 조향 반력 장치에서 구현하고자하는 토크를 산출하는 과정은 그림3과 같다. 먼저, 차량 모델의 해석을 통하여 일정 속도에서 차량을 조향시켜 타이어에서 횡방향 조향 반력을 발생시킨다. 이는 조향 제어 유압 실린더의 작동에 대하여 반력을 생성하게 된다. 한편으로, HILS 시스템의 동역학 모델을 통해서도 횡방향 조향 반력 구현장치에서 발생하는 토크와 HILS 시스템의 유압 실린더에서 발생하는 구동 반력의 수학적인 관계를 얻는다. HILS 시스템에서 구현해야할 횡방향 조향 반력 생성 토크는 앞서 언급한 두 가지 변수 간의 수학적인 관계와 차량 동역학 모델의 해석을 통해 계산된 유압 실린더에서의 반력을 이용하여 얻을 수 있다.

##### 4.2 횡방향 조향 반력의 이론해

차량의 하중 조건 및 조향 기구 장치의 특성 외에 다양한 차량의 조건에 의하여 타이어와 도로와의 접촉면에서 발생하는 모멘트는 조향 장치에 가해져 차량의 조향 응답에 영향을 미친다. 생성된 모멘트는 타이로드를 통하여 2축과 3축의 조향 시스템을 구성하는 링크 장치를 거쳐 조향 시스템 구동을 위해 장착된 유압 실린더에 전달된다. 2축과 3축 차륜의 킹핀 축에 전달되는 모멘트는 아래의 식과 같이 주어진다 [4].

$$M = M_v + M_L + M_T + M_{AT} \dots\dots\dots (1)$$

$$M_v = -(F_{zl} + F_{zr}) d \sin \lambda \sin \delta + (F_{zl} - F_{zr}) d \sin \nu \sin \delta \dots\dots\dots (2)$$

$$M_L = (F_{yl} + F_{yr}) r \tan \nu \dots\dots\dots (3)$$

$$M_T = (F_{xl} - F_{xr}) d \dots\dots\dots (4)$$

$$M_{AT} = (M_{zl} + M_{zr}) \cos \lambda \cos \nu \dots\dots\dots (5)$$

위의 식에서,

$d$  : 지면에서의 횡방향 옵셋,  $\delta$  : 조향각,  $r$  : 타이어 반지름

$M_v$  : 양측 차륜의 수직력( $F_{zl}, F_{zr}$ ), 횡경사각( $\lambda$ ), 캐스터 각( $\nu$ )에 의한 항

$M_L$  : 횡력( $F_{yl}, F_{yr}$ ), 캐스터 각에 의한 항

$M_T$  : 견인력( $F_{xl}, F_{xr}$ )에 의한 항

$M_{AT}$  : 정렬 토크( $M_v$ )에 의한 항

아와 같은 조향 기구를 통하여 정차 또는 주행 시 운전자의 조향 입력에 대응하는 각 차륜에서의 조향 반력이 조향 제어를 위한 유압 실린더에서 발생하며 이러한 작용 반력은 조향 상태를 유지하기 위해 필요한 조향 모멘트로 작용한다.

#### 4.3 차량 동역학 모델

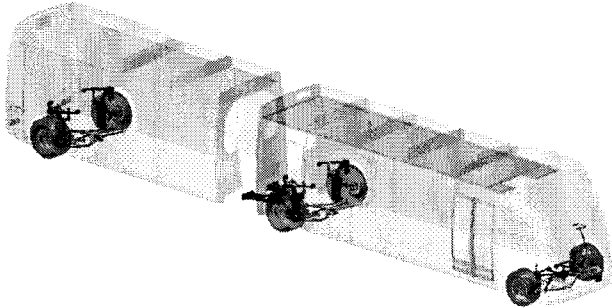
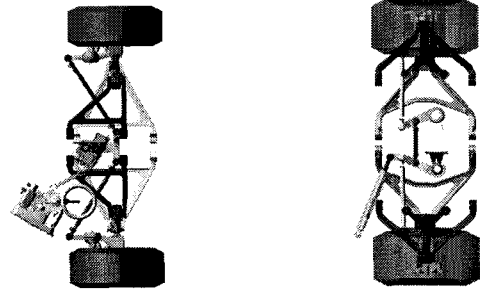


그림4. 차량 동역학 모델



(a) 전륜

(b) 후륜

그림5. 전륜 및 후륜 조향 시스템

주행 중인 상태에서 차량에 임의의 조향각이 입력될 때 차량 조향 시스템의 유압 실린더에 가해지는 반력을 확인하기 위하여 그림4와 같이 차량 동역학 모델을 구성하였다. 차량 동역학 모델을 구성하는데에는 범용 다물체 동역학 해석 프로그램인 ADAMS가 사용되었다. 각 차륜에는 모두 독립 현가장치가 적용되었으며, 각각의 부품들은 조인트를 사용하여 기구학적으로 연결하였다.

각 차축마다 차륜을 독립적으로 제어하기 위한 조향 시스템이 적용되었다. 그림5에서와 같이 1차축 조향 장치와 2축, 3차축의 조향 장치는 서로 다른 조향 방식을 가진다. 1차축 조향 장치는 핸들을 통한 운전자의 직접적인 조향 입력이 유니버설 조인트와 베벨기어를 통해 유압 배력 장치에 전달되어 조향 입력에 따라 피트만 암을 회전시킴으로써 타이로드를 움직여 좌, 우 차륜을 조향한다. 이에 반해 2축과 3축 조향 장치는 대칭 링크식 조향 시스템이 적용되었다. 수평면에 평행인 방향으로 회전 가능한 2개의 피트만 암을 1개의 연결 링크로 서로 연결시키고, 좌우 각 피트만 암의 끝을 좌우 조향 차륜과 연결되는 타이로드에 각각 연결하였다. 피트만 암의 움직임만으로 좌우 양측의 차륜이 조향될 수 있는 상태에서 좌측의 피트만 암을 연장하여 그 끝에 전 차륜 조향 알고리즘에 의하여 제어되는 유압 실린더를 연결하여 차륜의 조향각을 제어한다.

#### 4.4 HILS 시스템 동역학 모델

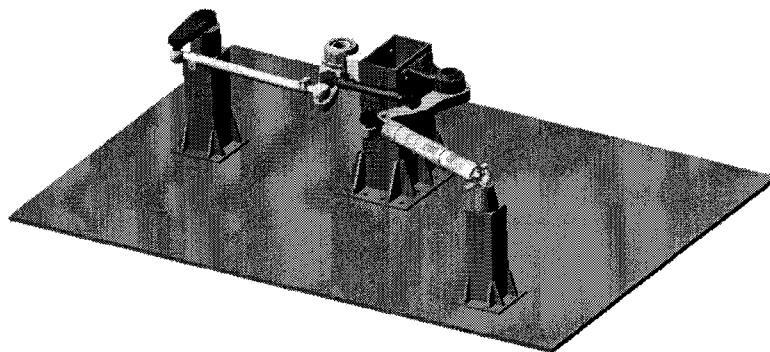


그림6. HILS 시스템 동역학 모델

차량 동역학 모델을 통하여 얻은 자료를 시험 장치에 구현하기 위하여 HILS 시스템의 동역학 모델을 그림6과 같이 구성하였다. 시험 장치의 동역학 모델은 2차축 차륜의 조향 시스템을 참고하여 구성되었으며, 차축을 조향하기 위한 링크 장치가 차량 동역학 모델과 동일한 위치에 동일한 구속 조건으

로 적용되었다. 추가적으로 각 링크 장치를 지지하기 위한 지그 프레임을 구현하였고, 조향 시스템 우측의 타이로드에 조향 반력 발생 장치를 연결시켜, 우측 타이로드에서 조향 링크로 전달되는 힘을 통하여 차량 동역학 모델 조향 시스템의 유압 실린더에서 발생하는 반력을 구현하도록 동역학 모델을 구성하였다.

#### 4.5 해석 조건

차량이 일정한 속도로 진행 중인 상황에서 임의의 각도로 1차축 차륜을 조향하였을 때, 후륜에서 발생하는 횡방향 조향 반력에 의한 조향링크 구동 유압실린더에서의 반력을 측정하였다. 조향 반력의 측정 대상으로는 2차축 차륜의 조향 시스템으로 정하였으며, 추가적으로 일정한 속도로 주행 중인 상황의 경우, 조향 알고리즘의 특성으로 인하여 특정 속도 이상에서는 후륜의 차축들이 조향되지 않으므로 특정 속도 이하에서 차량 모델의 주행 중 조향반력 측정해석을 수행하였다.

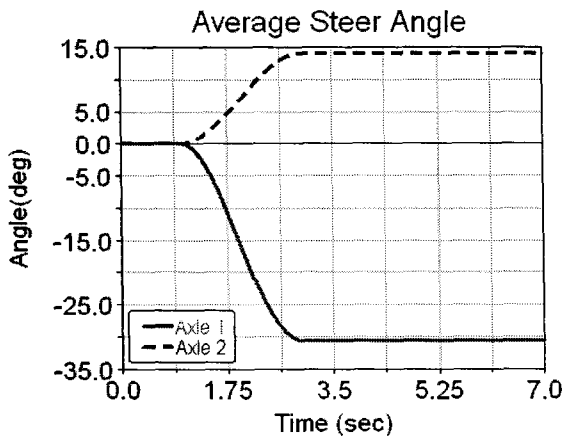


그림7. 1차축과 2차축 조향각

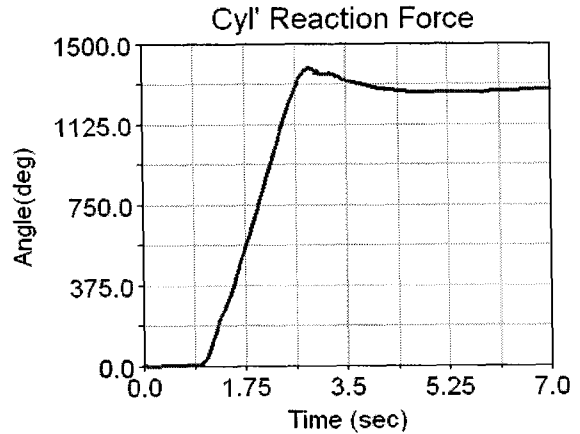


그림8. 유압 실린더 생성 반력

차량 속도 10km/h에서 1차축 차륜에 임의의 조향각을 입력하였을 때, 1차축 차륜에 가한 조향 입력과 2차축 차륜에서 조향 알고리즘에 의하여 제어된 조향각을 그림7에 나타내었다. 그림을 통하여 전차륜 조향 알고리즘에 따른 제어된 2차축 차륜의 조향각을 알 수 있다. 입력된 조향각으로 인하여 2축 조향 시스템에서 유압실린더에 가해진 반력은 그림 8을 통하여 시간에 따른 변화를 볼 수 있다.

#### 4.6 HILS 시스템 동역학 모델 해석

HILS 시스템의 동역학 모델을 통하여 HILS 시스템이 동일한 조향각을 발생시키는 상황에서 임의의 횡방향 조향 반력을 생성하는 토크를 적용하였을 때에, 조향 제어 유압 실린더에서 생성되는 반력을 측정한다. 이를 통하여 조향 링크에 의한 반력 생성 장치에서 필요한 토크와 유압 장치에서 발생하는 반력의 수치적인 관계를 얻을 수 있다. 그림10은 조향 반력 생성 토크와 유압 실린더 반력의 비가 약 4.02:1임을 나타낸다.

이러한 결과를 갖고 앞서 언급한 해석 절차에서와 같이 HILS 시스템의 모델에 대하여 동역학 해석을 수행한다. 임의의 1차축 조향 입력에 대한 2차축 조향 시스템의 유압 실린더의 거동을 조향 알고리즘이 적용된 거동과 동일하게 제어하였다. 동시에 조향 반력 구현 장치에서 토크를 발생시켜 앞서 차량 모델을 통하여 측정한 조향 시스템의 유압실린더에서의 구동 반력을 시험 장치의 동역학 모델에서 동일하게 구현하였다. 모델의 해석을 통하여 조향 반력 장치에서 발생시키는 토크에 의한 유압 실린더의 반력과 실차에서의 유압 실린더 반력을 토크 값 그림11에서 비교하였다.

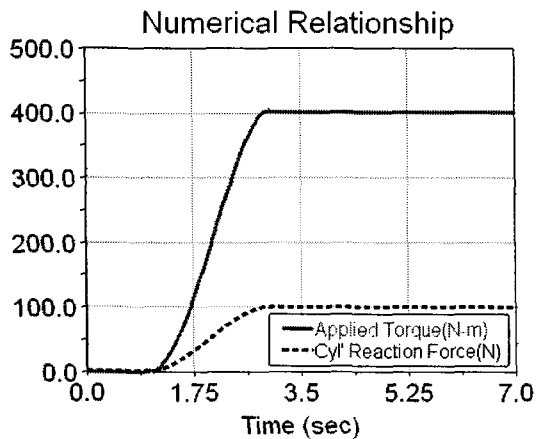


그림10. 조향 반력 장치 생성토크

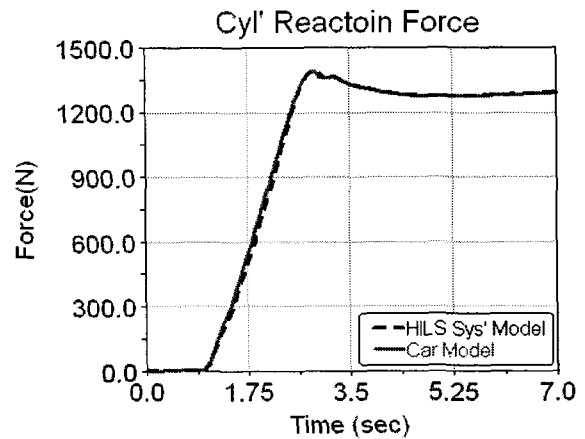


그림11. 2축 조향각에 대한 토크

그림12는 HILS 시스템에서 생성되는 유압 실린더의 반력에 필요한 조향 반력 생성 장치에서의 토크를 나타낸 것이며, 그림 13은 입력되는 조향각에 대한 발생 시켜야 할 토크 값을 나타내었다. 그림13에서 나타나는 2축 조향각에 대한 반력 생성 토크의 경향으로 볼 때, 현재 구현 중인 HILS 시스템의 횡방향 조향 반력 장치를 구성하는 과정에서 선형적인 특성을 지닌 스프링을 사용하는 방안을 고려해 볼 수 있다.

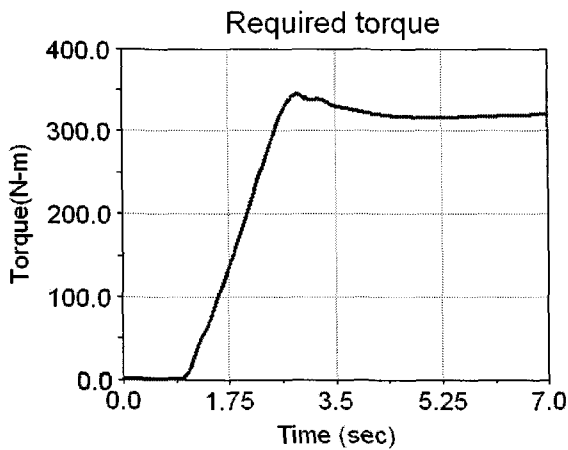


그림12. 조향 반력 장치 생성토크

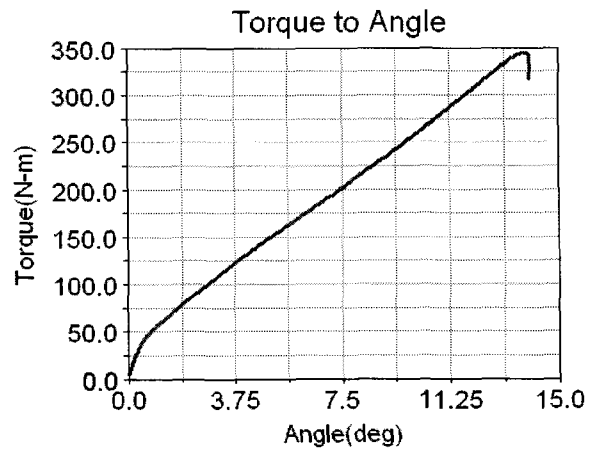


그림13. 2축 조향각에 대한 토크 선도

## 6. 결 론

본 논문에서는 Bi-modal 저상 굴절 차량의 조향 ECU를 평가하기 위한 HILS 시험 장치의 기본적인 구조 및 기능을 제시하였다. HILS 시스템의 운영을 통하여 실차 시험과 동일한 시험 결과를 얻을 수 있도록 타이어의 횡방향 조향 반력을 구현하기 위한 토크 발생 장치의 필요성을 검토하였고, 필요한 토크를 산출하기 위하여 차량 동역학 모델과 시험 장치의 동역학 모델을 사용하였다. 차량 동역학 모델을 통하여 임의의 속도와 임의의 조향 입력을 가했을 경우에 대하여 조향 시스템의 유압 실린더에 가해지는 반력을 구하였으며, 이를 HILS 시스템의 동역학 모델에 적용하여 차량 동역학 모델과 동일한 거동을 나타내는 데에 필요한 반력 장치의 토크를 얻도록 하였다. 현재 Bi-modal 저상 굴절 차량의 개발을 위하여 조향 ECU 평가 장치가 제작 중에 있으며, 동역학 해석을 통하여 계산된 토크 값이 실제 조향 반력 장치를 제어하는 데에 필수 자료로써 사용될 예정이다. 또한, 향후 실시간 해석 프로세서가 적용된 조향 시험 장치 및 실차의 조향 ECU 개발에도 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. 목재균, 임정환, 조세현, “신에너지 Bimodal 저상굴절차량 기술 개발”, 대한기계학회, 기계저널 제45권 제12호, 2005.12, pp.46~49
2. 문경호, 목재균, 장세기, 박우성, “굴절차량의 전 차륜 조향 시스템 적용에 관한 검토”, 한국철도학회 2006년도 춘계학술대회논문집, 2006.5, pp.1~6
3. 이수호, 문경호, 전용호, 박태원, 이정식, 김덕기, “전차륜 조향 장치를 장착한 굴절궤도 차량의 주행특성에 관한 연구”, 한국철도학회 논문집 제10권 제4호, 2007. 8, pp. 444~450
4. Thomas D. Gillespie, "Fundamentals of Vehicle Dynamics", SAE, 199210. ADAMS 2003 User Manual, MSC. Software Corporation, USA, 2003