틸팅열차의 틸팅구동장치에 작용하는 부하특성 진단을 위한 유압식 틸팅 액츄에이터의 실험적 평가

An Experimental Evaluation of a Hydraulic Tilting Actuator for a Diagnosis of Load Characteristics Acting on the Tilting Actuator of the Tilting Train

이 준 호*, 김 호 연, 이 병 송, 이 형 우, 박 찬 배, 강 철 구
(Jun-Ho Lee¹, Ho-Yeon Kim², Byeong-Song Lee¹, Hyung-Woo Lee¹, Chan-Bae Park¹, Chul-Goo Kang³)

¹Korea Railroad Research Institute

²Shalom Engineering Co. Ltd.

³Konkuk University

Abstract: In this paper we deal with a hydraulic tilting actuator to make a diagnosis of load characteristic acting on the tilting actuator of the tilting train. Tilting actuator in the tilting train plays a role of making tilt of the train when the train runs a curve section to make the train run without deceleration. However in the process of tilt the tilting actuator is affected by the load acting on the actuator, which has a possibility to make bogie vibration. In order to figure out the effect of the load on the tilting actuator a hydraulic tilting devices that are capable of tilting the train is proposed. The proposed devices are installed in the front bogie and in the rear bogie to make tilting of the train. The devices are consist of sensors that measure the load capacity of the actuator and displacement of the hydraulic cylinder stroke, control blocks to make synchronization of the two actuators, user interface block to monitor the status of the actuators. The effectiveness of the proposed hydraulic tilting actuators is presented by the experimental evaluation using actual tilting train.

Keywords: tilting train, tilting actuator, hydraulic power, synchronization

I. 서론

1899년 9월 노량진 ~ 제물포 구간의 27 km 가 처음 개통된 이래로 한국철도는 신규노선 확장, 그에 따른 운전시간 단축을 위한 철도차량의 개발에 지속적인 연구개발 투자를 수행해왔으며, 마침내 2004년 4월 최초로 최고속도 시속 300 km를 넘는 경부고속철도의 개통을 달성하였다[1]. 그후 지속적인 연구개발 투자를 통하여 최고속도 시속 430 km 시제열차의 출고를 2012년 달성하였으며 이는 프랑스(570 km/h), 중국(480 km/h), 일본(450 km/h)에 이어 세계 4위의 고속열차 및 관련기술을 보유하는 것으로 평가되어지고 있다. 또한 철도의 고속화에 따른 제2차 국가교통망구축계획에 따라 2020년까지 전국을 90분대로 연결하는 사업을 추진 중에 있다. 일반철도의 경우는 고속열차와 달리 노량진 ~ 제물포 구간의 개통이후 100 km/h ~ 150 km/h의 속도 대역에서 지금까지 중속도 영역의 운행이 이루어지고 있다. 일반철도에서 속도의 고속화가 어려운 이유는 차량의

성능 향상 보다는 궤도, 노반 등의 철도 인프라가 차량의 고속화와 함께 성능향상이 달성되어야 하지만 철도 인프라의 성능 향상에는 막대한 투자비를 요구하기 때문이다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위해서 영국, 이탈리아, 독일, 프랑스, 미국 등 해외 선진국에서는 1970년대 초반부터 기존의 철도인프라를 활용하면서 열차의 속도 증속이 가능한 틸팅열차를 투입하여 160 km/h ~ 220 km/h의 운행속도를 달성하고 있다[2-4]. 이에 따라 국내에서는 2012년 한국철도기술연구원의 신소재 틸팅열차 시스템 연구단에서 기존 차량에 비해 승차감의 저하 없이 곡선부를 더욱 빠르게 주행할 수 있는 한국형 틸팅 차량인 한빛 200을 개발하였으며, 중앙선에서 180 km/h, 경부선에서 220 km/h의 속도 향상을 달성하였다. 현재는 시제차량의 시운전을 완료하고 실용화를 위한 사업을 추진하고 있다.

틸팅열차가 곡선부를 속도 저감 없이 운행할 수 있는 원인은 틸팅열차에 내장되어 있는 틸팅기구장치가 곡선부 주행시 곡선 반경에 맞추어서 열차를 틸트 시킴으로서 원심력의 영향을 저감하여 열차가 속도 저감 없이 운행하는 것을 가능하도록 하기 때문이다. 이러한 틸팅 메커니즘에 대한 연구도 국내/외적으로 활발히 진행되고 있다[5,6,7]. 횡방향의 능동 현가 장치를 이용한 틸팅 메커니즘에 대한 연구 및 틸팅 링크를 이용한 틸팅 메커니즘을 설계하고 차량의 동적 모델링을 포함 하는 시뮬레이션 모델을 통하여 동적

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 7. 24., 수정: 2012. 9. 13., 채택확정: 2012. 9. 24.

이준호, 이병송, 이형우, 박찬배: 한국철도기술연구원

(jhlee77@krii.re.kr/bslee@krii.re.kr/krhwlee@krii.re.kr/cbpark@krii.re.kr)

김호연: 샬롬 엔지니어링(khy9936@konkuk.ac.kr)

강철구: 건국대학교 기계공학부(cgkang@konkuk.ac.kr)

※ 본 논문은 국토해양부 틸팅열차 운행유지보수 효율화 SE 연구 사업에 의하여 연구하였음.

특성을 분석하고 있다. 또한 서보모터와 실린더, 유압시스템을 이용한 전기식 유압 액추에이터 시스템에 대한 연구도 함께 진행되고 있다[8-12].

본 논문에서는 틸팅 메카니즘의 운동특성을 평가하기 위한 유압식 틸팅액추에이터의 설계 및 구성에 대해서 다룬다. 기존의 전기식 액추에이터 방식의 틸팅액추에이터는 차체틸팅시 틸팅액추에이터에서 필요로 하는 전류만을 측정하는 것이 가능하였으며 이러한 방식은 틸팅 구동시 틸팅액추에이터에서 필요로 하는 힘을 측정하는 것이 불가능하였다[6,8]. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 유압 액추에이터를 활용하여 틸팅액추에이터에 작용하는 부하를 직접 측정하는 것이 가능하도록 하는 유압식 틸팅메카니즘 부하특성 평가 장치를 제안한다. 제안하는 시스템은 유압을 발생하고 유압실린더를 구동시키는 유압 시스템, 유압실린더의 구동상태에 따른 상태 계측을 위한 센서부, 센서로부터 되먹임(feedback) 되는 신호를 이용하여 제어출력을 발생하는 제어부와 상태 모니터링을 위한 UI(User Interface)부로 구성된다.

본 논문에서 제안하는 유압식 틸팅메카니즘 부하특성 평가 장치는 틸팅 구동시 틸팅메카니즘의 부하특성 파악을 용이하게 하고 틸팅메카니즘의 부하와 운동변위에 영향을 주는 인터페이스의 특성 평가를 가능하게 한다. 또한 전기식 틸팅 액추에이터에서는 직접 측정이 불가능한 틸팅 액추에이터에 작용하는 부하용량 측정을 가능하게 하고 그외 다양한 데이터를 수집하는 것을 가능하게 한다.

II. 전기식 틸팅 액추에이터

본 논문에서 제안하는 시스템을 다루기 이전에 전기식 틸팅 액추에이터에 대해서 간단히 살펴본다. 그림 1은 기존의 전기식 틸팅 액추에이터의 신호 흐름도를 보여준다. 그림에서 보듯이 전두부와 후미부의 대차 프레임에 설치된 대차검지기(BS: Bogie Sensor)는 바퀴 축 방향의 횡가속도를 측정한다. 측정된 횡가속도 신호는 사전틸팅제어장치(TTP)에 의해 필터링되고 평가되며, 차체틸팅구동장치(CA: Carbody Actuator)의 틸팅 명령신호로 사용된다. 각 차체틸팅

그림 1. 전기식 틸팅 액추에이터 신호 흐름도.

Fig. 1. Flow of electromechanical tilting actuator.

구동장치(CA)는 명령된 위치로 차체를 기울이며, 실제 동작된 위치는 차체틸팅전자장치(CTE: Carbody Tilting Electronic)로 전송되며 측정된 실제 위치 값과 명령된 틸팅각의 차이는 모터제어기에 의해 분석되어 동적으로 보상된다.

위에서 언급한 것과 같이 전기식 틸팅 액추에이터 방식에 의한 틸팅 구동 장치는 대차 검지기(bogie sensor)의 입력각과 틸팅구동에 의해서 발생하는 차체의 실제 이동 위치 값의 비교에 의해서 발생된 오차 값을 전기식 모터의 구동으로 보상하는 방식을 채용하고 있다. 이와 같은 방식은 틸팅구동시 차체의 이동에 따른 위치값 만을 측정하는 것이 가능하고 차체의 이동에 따라서 발생하는 틸팅구동 장치 및 주변 장치에 미치는 부하의 영향을 직접 측정 분석하기는 어렵다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서 본 논문에서는 유압시스템을 활용하여 틸팅 액추에이터에 작용하는 부하특성 분석을 가능하게 하는 유압식 틸팅메카니즘 부하특성 평가 장치를 제안한다. 이러한 장치는 지금까지 제작된 적이 없으며, 장치에 대한 개념적인 구성을 다음 장에서 보인다.

III. 시스템 구성

1. 기본 시스템 구성

본 논문에서 제안하는 유압식 틸팅메카니즘 부하특성 평가 장치의 구성을 그림 2에 보인다. 그림에서 보는 것과 같이 유압식 틸팅메카니즘 부하특성 평가 장치는 전두부 및 후미부의 대차에 마련되어 있는 틸팅기구장치에 장착되는 두 개의 유압실린더, 전두부 및 후미부의 대차에서 궤환(feedback)되어지는 각종의 센서 신호(각, 변위, 부하 등) 검출부, 검출된 신호를 통하여 상태를 모니터링하고 새로운 제어 신호를 생성하는 제어기로 구성된다.

특히 제안하는 시스템은 각각의 대차에 유압실린더가 개별적으로 장착되므로 차량의 틸팅구동시 두 대차간의 동특성에 대해서 동기화가 반드시 만족해야 하는 특징을 갖고 있다. 만약 동기화 조건이 만족되어지지 않는다면 틸팅구동을 위해서 두 대차에 작용하는 구동력의 작용 시점은 시간적으로 비동기화 되어지고 이로 인해서 차량에는 비틀림 현상이 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 극복하기위해서 그림 3에 보이는 것과 같이 동기화 조건을 만족 시키는 델타(Delta) 제어기를 채용한다. 델타 제어기는 Delta Computer System, Inc. 사에 의해서 유압시스템 전용 제어기로 개발

그림 2. 전체 시스템 구성.

Fig. 2. Diagram of full system.

그림 3. 유압실린더를 이용한 동기화 시험 장치.

Fig. 3. Device for synchronize using hydraulic cylinder.

되었다. 0.5 ~ 4 ms의 샘플링이 가능하고 사용자의 제어기 설계를 용이하게 하기 위한 여러 가지 기능(function library)을 내장하고 있으며, CPU, motion control, analog I/O, digital I/O 모듈들로 구성된다. Delta 제어기로 구현되는 동기화 제어 알고리즘은 다음 절에서 다루기로 한다.

2. 로드경 설계

본 논문에서 제안 하는 유압 틸팅 시스템에서 사용되는 유압 액추에이터의 로드경 설계를 위해서 아래 식 (1)을 이용 하였다. 식 (1)에서 F_1 은 실린더 부하, S 는 안전율, σ 는 항장력(항장응력; tensile strength)을 나타낸다. 본 시스템의 실린더의 부하는 F_1 로 나타내고 현재 전기식 틸팅 액추에이터 시스템의 한계부하를 기준으로 하였다. 그 값은 아래 표 1과 같다. 하지만 실제 시스템에서는 인장압축 피로강도를 고려 하여야 좀 더 안전한 시스템을 구현 할 수 있다. 그러므로 항장력을 21로 변경하여 실제 로드경은 64.7로 결정하였다[10].

$$d_1 = 1.2 \times \sqrt{4 \times F_1 \times \frac{S}{\sigma}} \quad (1)$$

3. 실린더 보아경 설계

결정된 로드경 값을 기반으로 보아경을 설계하기 위해서는 아래 식 (2), (3), (4)를 이용 하여야 한다. 식 (2)에서 A_1 는 로드단면적, 식 (3)에서는 A_2 는 유효면적, P_r 는 사용압력, 식 (4)에서는 D_1 은 보아경을 나타낸다. 아래의 식에서 볼 수 있는 것과 같이 보아경을 구하기 위해서는 로드의 단면적과 유효면적을 순차적으로 계산하여야 한다[10].

$$A_1 = \frac{\pi \times d_1^2}{4} \times 0.1 \quad (2)$$

표 1. 로드경 계산 파라미터.

Table 1. Parameter of calculate for rod diameter.

기호	내용	값
σ	항장력(kg/mm ²)	95 → 21
F_1	실린더부하(kg)	16000
S	안전율	3
d_1	로드경(mm)	30.4 → 64.7

표 2. 보아경 계산 파라미터.

Table 2. Parameter of calculate for inner cylinder diameter.

기호	내용	값
D_1	보아경(mm)	139.5
d_1	로드경(mm)	70
A_1	로드단면적(cm ²)	38.48
F_1	실린더부하(kg)	16000
P_r	사용압력(kg/cm ²)	140
A_2	유효면적(cm ²)	114.3

$$A_2 = \frac{F_1}{P_r} \quad (3)$$

$$D_1 = \sqrt{4 \times \frac{(A_1 + A_2)}{\pi}} \times 10 \quad (4)$$

IV. 동기화 제어

앞 절에서 언급한 것과 같이 본 논문에서 다루는 유압식 틸팅메커니즘 부하특성 평가 장치는 두 개의 유압실린더로 열차의 틸팅구동을 수행하므로 두 유압실린더의 동작에 따른 동기화 조건이 만족 되어야만 열차의 비틀림 현상을 방지할 수 있다. 그림 4는 두 유압실린더의 동기화 조건을 만족하기 위한 flow chart를 나타낸다. 두 유압실린더의 동기화 조건은 각각의 유압실린더에 장착되어 있는 변위센서의 전류 신호를 거리로 환산하고 두 유압실린더의 행정거리 차(stroke 차)를 구한다. 두 유압실린더의 행정 거리 차이가 일정 조건 (본 논문에서 제안하는 조건은 ± 4.5 mm)을 만족하면 동기화 조건이 만족되는 것으로 판단한다. ± 4.5 mm의 행정 거리 차는 각도로 환산했을 때 약 0.25°에 해당하며 이는 두 유압실린더에 의해서 틸팅구동이 수행될 때 차량에 구조적 결함 및 차량 비틀림 현상을 일으키지 않는 최대 틸팅 오차 각도로 고려된다. 또한 틸팅 구동시 두 유압실린더 간의 행정오차가 ± 2 mm 이상인 경우 틸팅구동에 따른 오차가 커지는 것으로 간주하고 각각의 유압실린더의 구동 스트로크를 줄이는 방향으로 제어를 수행한다. 틸팅대차에 가해질 수 있는 최대 틸팅 각은 $\pm 8^\circ$ (± 160 mm)이며 틸팅구동 시작 및 종료 20 %지점에서 유압실린더의 구동 속도를 가변하는 3단계 속도제어를 수행한다. 이와같은 속도 제어방식을 채용하는 이유는 틸팅구동시 시작 20 % 지점까지 천천히 속도를 증가 시키므로서 틸팅 대차에 가해지는 충격을 완화시키기 위함이고, 또한 종료 20 %지점에서 서부터 서서히 속도를 줄임으로써 갑작스런 속도 감속으로부터 대차를 보호하기 위함이다.

V. 실험 장치 구성

본 논문에서 제안하는 유압식 틸팅메커니즘 부하특성 평가를 위한 실험장치의 설치위치를 그림 5에 보인다. 그림에서 보이는 것과 같이 유압식 틸팅메커니즘 부하특성 평가 장치는 열차 1량에 대해서 전두부 대차(front bogie)와 후미부 대차(rear bogie)에 각각 설치된다. 시험에 활용된 틸팅 시제열차는 6량 1편성으로 구성되어 있으며 실험은 3호차를 대상으로 수행되었다.

그림 4. 동기화 제어 알고리즘.

Fig. 4. Algorithm for synchronize control.

그림 5. HPS의 설치 위치.

Fig. 5. Install position of HPS.

그림 6. 유압실린더.

Fig. 6. Hydraulic cylinder.

그림 6은 틸팅열차에 장착되어서 틸팅구동을 수행하는 유압실린더를 보여주며 그림 7은 실제 틸팅열차에 장착된 유압실린더의 모습을 보여 준다. 이들 유압 실린더는 그림 8에 보이는 유압 시스템과 유압용 연결호스에 의해서 인터 페이스 되고 델타 제어기에 의해서 유압실린더의 직선운동을 제어함으로써 틸팅열차의 틸팅각을 제어한다. 델타 제어기를 위한 궤환 신호는 유압 실린더에 장착되어있는 변위센서와 로드셀(Load cell)에 의해서 생성된다. 변위센서는 유압 실린더의 행정거리(stroke)를 측정하고 델타 제어기에서 각도로 환산된다. 로드셀은 틸팅열차의 틸팅구동시 틸팅구동장치인 유압실린더에 작용하는 부하를 측정한다. 그림 9는 본 논문에서 제안하는 유압식 틸팅 메커니즘 부하특성 평가 장치의 현장 시험 모습으로서 두 개의 유압시스템을 이용하여 틸팅열차의 틸팅구동을 수행하는 모습을 보여준다.

그림 7. 틸팅열차에 장착된 유압 실린더.

Fig. 7. Hydraulic cylinder installed tilting train.

그림 8. 유압시스템.

Fig. 8. Hydraulic system.

그림 9. 현장시험.

Fig. 9. Field test.

VI. 시험결과

그림 10~12는 제안된 유압용 틸팅 메커니즘 부하특성 평가 장치의 현장 시험 전에 실험실 레벨의 무부하 성능시험 결과를 보여준다. 그림 10과 11은 두 유압실린더의 이동거리(± 160 mm) 및 틸팅각($\pm 8^\circ$)에 대한 시험 결과로서 시작 시점부터 종료 시점까지의 증속 및 감속에 따른 속도 변화를 보여준다. 그림 10에서 보듯이 시작 후 일정 시점 까지, 또한 일정 시점에서 종료시점 까지 일정 속도로 증속과 감속을 수행하고, 이들 사이 구간에서는 등 속도로 이동한다. 실험결과에서 보듯이 유압실린더는 본 논문에서 제안하는 구간별 속도제어 특성을 잘 보여주고 있다. 그림 12는 두 유압실린더사이의 행정 거리 오차를 나타내고 있으며 설정

그림 10. 유압실린더의 행정 거리(무부하).

Fig. 10. Distance of hydraulic cylinder(no-load).

그림 11. 유압실린더의 작용 각도(무부하).

Fig. 11. Angle of hydraulic cylinder(no-load).

그림 12. 두 실린더의 행정 거리차(무부하).

Fig. 12. Difference distance of cylinders(no-load).

그림 13. 유압실린더의 행정 거리(부하).

Fig. 13. Distance of hydraulic cylinder(load).

그림 14. 유압실린더의 작용 각도(부하).

Fig. 14. Angle of hydraulic cylinder(load).

그림 15. 두 실린더의 행정 거리차(부하).

Fig. 15. Difference distance of cylinders(load).

그림 16. Load cell 출력(부하).

Fig. 16. Output of load cell(load).

된 ± 4.5 mm의 오차범위 내에 있는 것을 알 수 있다. 이것은 두 유압실린더가 오차범위 내에서 동기화가 이루어진 상태로 동작하는 것을 의미한다.

그림 13~16은 유압식 틸팅메커니즘 부하특성 평가 장치를 한국철도기술연구원이 개발한 시제열차에 장착한 후 틸팅구동 시험을 통해 얻은 현장 시험 결과를 보여준다. 그림 13~14는 틸팅열차를 다양한 각도 ($\pm 4^\circ$, $\pm 7^\circ$)에 대해서 제안된 유압실린더를 이용하여 틸팅구동시켰을 때 유압실린더의 행정거리 변화(전두부)와 그에 따른 틸팅각도로 환산한 결과를 보여준다. 그림에서 보듯이 3단계 속도 변화를 보여주고 있으며 이는 무부하 시험에서 얻은 결과와 매우 유사하다. 또한 그림 15는 각각의 틸팅구동 각에 따른 동기화 조건에 대한 것으로서 모든 시험 결과가 동기화 조건을 만족시키기는 ± 4.5 mm 이내에 위치하는 것을 보여주고 있으며, 이는 실제 틸팅열차를 이용한 부하시험시 동기화조건을 만족시키므로 안전하게 부하특성시험을 수행할 수 있음을 의미한다. 그림 16은 $\pm 4^\circ$, $\pm 7^\circ$ 에 대한 틸팅구동시 유압실린더에 작용하는 force를 load cell을 이용하여 측정한 결과이다. 그림에서 보듯이 $\pm 4^\circ$ 의 경우는 $\pm 7^\circ$ 에 비해서 유압실린더의 운동 행정 길이가 짧기 때문에 $\pm 7^\circ$ 의 경우보다 빨리 틸팅구동을 멈춘다. 또한 두 경우 모두 base force (차량의 틸팅구동 없이 정적 상태에서 틸팅구동장치에 작용하는 힘)는 약 82 kN으로 일정하며, 전두부와 후미부의 틸팅구동장치에 작용하는 힘이 대칭적으로 일정함을 알 수 있다. 만약 전두부와 후미부에 작용하는 힘이 대칭적으로 일정하지 않고 틸팅각도에 따른 base force에 변화가 있다면 틸팅구동장치에 작용하는 힘이 다르다는 것을 의미하며 이와같은 경우에는 힘의 균형을 위한 추가적인 질량의 추가가 필요하다. 그림 16에서는 특히 로드에 대한 시스템의 일관성을 확인하기 위하여 가장 저속 구동 상태(구동속도: 10 mm/sec; 이동거리- $7^\circ \sim 7^\circ$)에서의 로드 프로파일과 고속 구동 상태(구동속도: 50mm/sec; 이동거리- $4^\circ \sim 4^\circ$)에서의 로드 프로파일을 비교 하였다. 고속 구동 상태에서는 많은 진동이 발생하는 것을 확인할 수 있지만 두 경우 모두 base force는 일치 하는 것을 알 수 있다.

VII. 결론

본 논문에서는 틸팅열차의 틸팅구동시 틸팅구동장치에 작용하는 부하특성을 진단하기 위한 유압식 틸팅메커니즘 부하특성 평가 장치를 제안하였다. 제안하는 유압식 틸팅메커니즘 부하특성 평가 장치는 유압시스템 및 유압실린더, 두 개의 유압실린더의 동기화 제어를 위한 델타 제어기, 틸팅메커니즘의 상태를 모니터링하고 델타 제어기에 cue환 하기 위한 정보를 센싱하는 각종 센서로 구성된다. 6량 1편성으로 구성되는 한국형 틸팅시제열차의 3호차를 이용하여 현장시험을 수행하였으며 다양한 틸팅각도에 따른 틸팅구동시험을 통하여 제안된 시스템의 효용을 입증하였다.

본 논문에서 제안하는 유압식 틸팅메커니즘 부하특성 평가 평가장치는 틸팅구동시 틸팅구동장치에 작용하는 부하용량을 직접 측정하는 것을 가능하게 하며 이를 통하여 틸팅메커니즘의 부하특성의 보다 면밀한 해석에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Korea Railroad Research Institute, ISSN 2005-4521, "Statistics of the Korea Railroad 2011," 2012.
- [2] W. H. You, S. H. Han, N. P. Kim G. D. Kim, and K. B. Park, "The study for system design of tilting car for conventional railroad," *Proc. Korea Society For Railway Spring Annual Meeting (in Korean)*, pp. 317-329, May 2002.
- [3] Y.-G. Park, S.-Y. Choi, Y.-T. Kim, and J.-Y. Choi, "Analysis of occurrence tendency of rail force according to running the hanvit 200 train on transition curve track," *Journal of the Korean Society for Railway (in Korean)*, vol. 12, no. 5, pp. 678-686, Oct. 2009.
- [4] K. Sasaki, "A lateral semi-active suspension of tilting train," *QR of RTRI*, vol. 41, no. 1, pp. 11-15, Mar. 2000.
- [5] A. C. Zolotas, "Advanced control strategies for tilting trains," *Doctor of Philosophy of Loughborough University*, 2002.
- [6] M. Enomoto, S. Kamoshita, M. Kamiyama, K. Sasaki, T. Hamada, and A. Kazato, "Development of tilt control system using electro-hydraulic actuators," *QR of RTRI*, vol. 46, no. 4, pp. 219-224, Nov. 2005.
- [7] C.-G. Kang, H.-Y. Kim, N.-J. Lee, M.-S. Kim and B.-C. Goo, "Creepage Model Analysis for a Tilting Train," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15 no. 2 pp. 232-240, Feb. 2009.
- [8] J.-H. Lee, H.-Y. Kim, S.-H. Han, "A conceptual design of the performance evaluation device for the tilting mechanism of the tilting train," *Korea Society for Noise and Vibration Engineering (in Korean)*, pp. 494-497, Oct. 2011.
- [9] B.-I. Seo and B.-H. Lee, "A study on the quasi-static overturing and derailment safety of tilting train," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering (in Korean)*, vol. 20, no. 6, pp. 537-545, Jun. 2010.
- [10] J.-S. Kim and N.-P. Kim, "Characterization of the tilting link mechanism for the tilting train," *Journal of the Korean Society for Railway (in Korean)*, vol. 8, no. 1, pp. 34-40, Feb. 2005.
- [11] W. H. You, S. H. Han, N. P. Kim G. D. Kim, and K. B. Park "Design of hydraulic cylinder for kinetic performance test of tilting mechanism," *Proc. Korea Society For Railway Spring Annual Meeting (in Korean)*, pp. 1124-1127, May 2011.
- [12] S.-H. Kim, J.-U. Seo, Y.-W. Yoon and M.-K. Park "Motion Synchronization of Control for Multi Electro-Hydraulic Actuators," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17 no. 9 pp. 863-868, Sep. 2011.

이 준 호

1983년 광주대학교 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 석사. 1993년 동 대학 박사 수료. 1998년 일본 Kanazawa 국립대학교 Ph.D.. 2005년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원. 관심분야는 자기부상차량, 에너지저장시스템, 기계시스템제어.

김 호 연

2005년 대전대학교 전자공학과 학사. 2008년 건국대학교 기계공학과 석사. 현재 건국대학교 기계공학과 박사과정 살롬엔지니어링(주) 연구원. 관심분야는 철도차량, 메카트로닉스, 로봇틱스, 제어등.

이 병 송

1991년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~1997년 한국고속철도건설공단 철도차량 R&D 센터 선임연구원. 1998년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원.

이 형 우

2000년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 미국 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업(공학박사). 2004년 미국 Cornell Univ. 이론응용역학과 객원 연구원. 2005년 한양대학교 BK사업단 계약교수. 2006년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원.

박 찬 배

2003년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2009년~현재 한양대 대학원 전기공학과 박사과정 재학 중. 2003년~2006년 삼성전자 DA연구소 선임연구원. 2007년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원.

강 철 구

1981년 서울대학교 기계설계학과 학사. 1985년 서울대학교 기계설계학과 석사. 1989년 Univ. of California, Berkeley, Ph.D.. 현재 건국대학교 기계공학부 교수. 관심분야는 운동제어, 힘제어, 힘센서, 지능로봇, 철도차량제동시스템, 메카트로닉스 등.