자기부상차량 현가시스템 설계에 대한 고찰

Design Review for suspension system of magnetically levitated vehicle

이남진† 양방섭* 김철근*

Lee, Nam-Jin, Yang, Bang-Sub Kim, Chul-Guen

ABSTRACT

In general Maglev (magnetically levitated vehicle) has about 4 or 5 bogies per one vehicle to improve stability of electromagnetic suspension and 4 air-spring per one bogie are to be equipped to prevent form excessive yawing and pitching motion of bogie. 3 leveling valve per one vehcile will be applied to control the height of carbody. This kind of vehicle is on the design stage, and design review will be carried out before manufacture.

The suspension system of Maglev consists of 16 of air-spring, auxiliray reservoir and orifice, 3 leveling valve, which are different composition comparative to conventional rolling stock. To improve operational reliability of vehicle, additional ventilation valve will be equipped with airspring. This kind of new design concept requires fundamental design review.

In this study, suspension systems of Maglev will be built as mathematical model. Then designed suspension system will be reviewed in view of various points through proposed suspension simulation.

1. 서 론

자기부상차량의 가장 큰 특징은 자기현수장치(electromagnetic suspension)가 적용된다는 점이다. 자기 현가장치는 전자석과 전원공급장치, 그리고 제어기로 구성되며, 각 구성품 간의 상호작용과 차량 궤도와의 관계를 통해 차량의 안전성과 주행성능이 구체화된다. 현재까지 요구 성능을 만족하는 자기부상 차량을 설계하기 위해 다양한 연구가 다각적 측면에서 진행되고 있으며[1~3], 이러한 연구의 결실로 국내에 도시형 자기부상 교통시스템의 실용화가 목전에 있다.

자기 현수장치의 특성을 고려하여 자기부상차량은 량당 4개의 대차가 적용되며, 대차의 요잉, 피칭 운동의 보완을 위해 대차당 4개의 공기스프링과 차량당 3개의 레벨링 밸브가 적용되고, 운행 신뢰성을 향상시키기 위해 추가적인 밴트밸브를 부착하였다. 이러한 구성의 자기부상차량 현가시스템은 기존 철도차량의 그것과 설계 단계에서의 접근 방법에 차이가 있으며, 제작전 세밀한 기술적 검토가 요구된다.

† 책임저자 : 정회원, 현대로템(주), 주행장치개발팀, 주임연구원
E-mail : njlee@hyundai-rotem.net
TEL : (031)460-1222 FAX : (31)460-1788
* 비회원, 현대로템(주), 주행장치개발팀 책임연구원/수석연구원

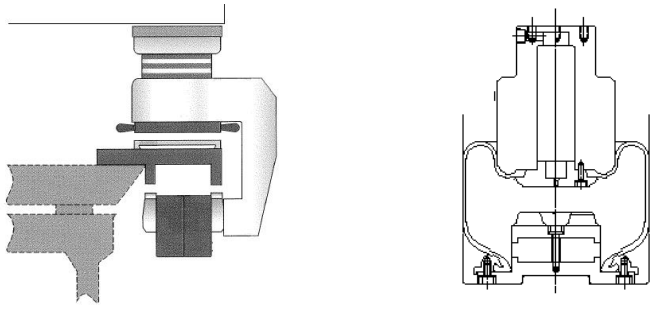
본 논문에서는 공기스프링과 관련 구성품의 수학적 모델을 통해 현 개발중인 자기부상 차량의 현가시스템 설계의 적합성 및 그 성능을 이론적 접근을 통해 설계를 고찰하고자 한다.

2. 자기부상차량 현가시스템

자기부상차량에서 현수시스템은 전자석으로 지지되는 전자기 현수 시스템과 공기스프링의 조합으로 구성된 기계적 현수시스템으로 구분된다. 하지만, 본 검토에서는 공기스프링을 이용한 기계적 현가장치로 제한한다.

2.1 자기부상차량의 현가시스템 구성

자기부상차량의 현가시스템은 공기스프링, 보조공기통, 높이조정밸브, 배기밸브로 구성되며, 현수장치의 구성과 배치는 그림 1과 같다.



(a) 전자기 현수시스템 구성 (b) 공기스프링 외형도

그림1. 자기부상차량내 현수장치 구성

2.2 구성품의 모델링

(1) 공기스프링, 보조공기통, 오리피스 모델링

차량에서 공기스프링은 탄성계수를 낮추기위한 보조공기통과 댐핑효과를 고려한 오리피스의 조합으로 적용된다. 이러한 구성은 공기스프링과 보조공기통, 오리피스의 모델링을 그림2와 같이 단순화하여 아래와 같이 식을 전개한다.[4~5]

$$\Delta m = C_d A_o \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} p_b \rho_b \left[\left(\frac{p_b}{p_r}\right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_b}{p_r}\right)^{1+\frac{1}{\gamma}} \right]} \qquad \text{식(1)}$$

$$T_1 = T_0 + \frac{1}{C_{v0}} \left(\frac{\Delta Q_{cv} + \Delta m \cdot h_0 - W_{cv}}{m_0 + \Delta m} \right) \qquad \text{식(2)}$$

$$\Delta Q_{cv} = A_s (T_0 - T_{env}) / R_{tot} \qquad \text{식(3)}$$

$$P_1 = \frac{(m_0 + \Delta m) R T_1}{V_1} \qquad \text{식(4)}$$

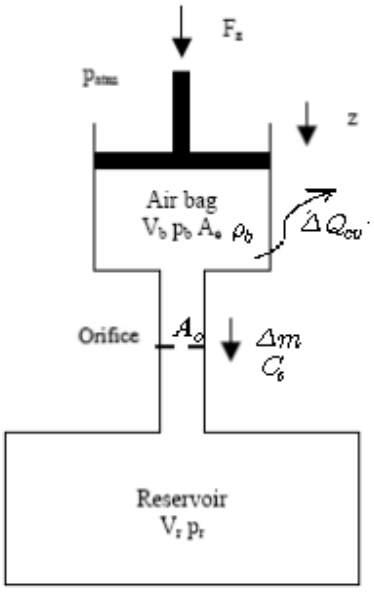


그림2. 공기스프링 개념도

단, Δm은 오리피스를 지나는 기체의 질량이며, Cd는 오리피스의 형상계수, A0는 오리피스의 유효단면적이며, γ는 비열비, ρ는 기체의 밀도이다. 식(2)(3)(4)은 유량이동후 전후 상황을 나타내는 식으로

소첨자 0,1은 유동의 전후를 나타내고, As는 공기스프링의 표면적, T_{env}는 주변 대기온도, R_{tot}는 열전달 저항으로 공기스프링 안팎의 대류와 공기스프링의 전도에 의한 대표값이다. h는 앤탈피, Δm은 식(1)에서의 이동량, C_{v0}는 정적비열을 나타내고, T,V는 각각 온도와 부피, R은 공기의 기체상수이다.

식(1)에 의한 공기스프링과 보조공기통간 공기의 유동은 실린더와 보조공기통내 기체의 특성을 변환시키고, 변환된 특성이 공기스프링의 운동 특성을 나타낸다. 이러한 수식은 열역학 1법칙와 이상기체 방정식을 활용하여 수학적 모델을 작성하였으며, 실제 모델링에서는 오리피스네 임계속도를 추가적으로 고려하였다. 공기스프링과 보조공기통내에서는 공기의 상태가 균일한 균일상태, 균일 유동과정 (uniform-state, uniform-flow precess)로 가정하였다.

(2) 레밸링 밸브의 모델링

레밸링 밸브는 차량의 동적 특성에 민감하게 영향을 미치지 않는 관계로 일반적으로 고려하지 않지만, 본 연구에서는 16개의 공기스프링과 3점지지 방식의 레밸링 밸브의 준정적상태에서의 성능을 확인하고자 레밸링 밸브의 모델링에 포함시킨다.

모델은 그림 3과 같이 실제 성능 그래프를 look-up table화 하여 그 기본적인 거동을 표현하였으며, 밸브를 지나는 기체는 상기절에서와 같이 이상기체로 가정하고, 출력단의 압력이 유량에 영향을 미치는 않는 것으로, 입력단은 8bar의 상온공기가 무한정 공급되는 것으로 하고, 흡기와 배기의 유속은 대칭으로 가정한다.

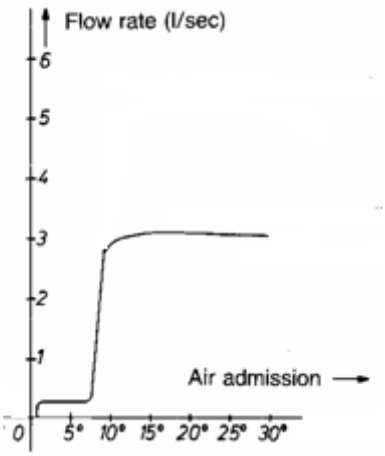


그림 3. 레밸링 특성 곡선

3 차량 시스템

3.1 차량 현수시스템의 구성

1량의 차량은 그림 4와 같은 구성으로 설계되었다. 차량당 8개의 모듈과 모듈당 2개의 공기스프링, 그리고, 3개의 레밸링 밸브의 조합으로 차량의 2차현수 시스템은 구성된다. 전체 16개의 공기스프링은 3개의 레밸링 밸브을 중심으로 3개의 군으로 나눠지며, 이렇게 연결된 각각의 군은 동일한 공기압의 공기가 정상상태에 도달했을때 동일한 반발력을 발생한다.

레밸링 밸브의 위치는 차량과 모듈간 변동이 작고, 각 군의 반발력의 중심에 해당하는 위치로 잡았으며, 그 대략적인 위치는 그림 4와 같이 1위 대차 후방과 3위대차 후방 좌우에 각각 설치한다.

3개의 공기스프링 군은 각각 6개, 5개, 5개로 구성되며, 각각 차량 중량을 3점 지지방식으로, 차량과 모듈간의 일정한 높이를 지탱하게 된다. 자기부상차량에서 3점지지 방식은 차량의 높이 조절이 용이하고, 완화곡선에서 부상력에 미치는 off-load를 최소화하여 부상안정성에 도움을 줄 것으로 판단되지만, 이에 대한 연구는 본 검토에서 포함하지는 않는다.

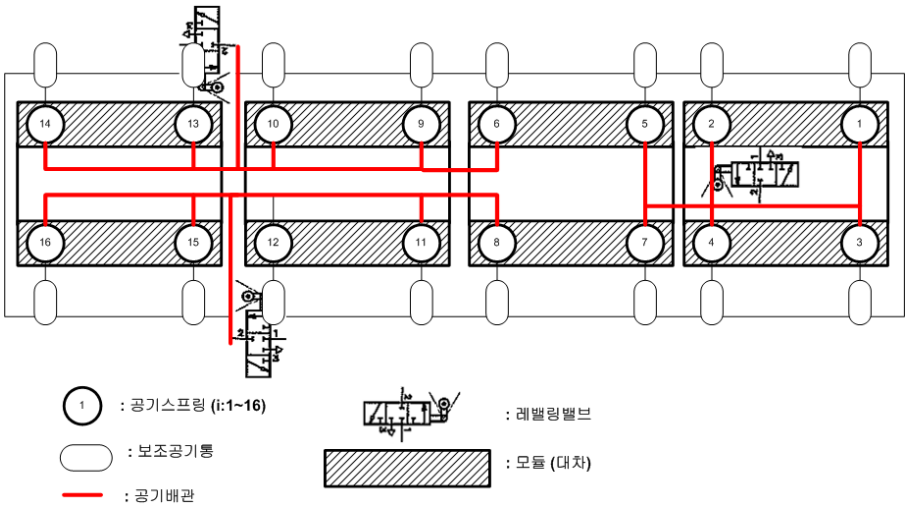


그림 4. 2차 현수장치의 구성

3.2 차량 모델링

차량은 그림5와 같이 1개의 차체 질량과 8개의 모듈 질량으로 단순화 하고, 2.2절에서 제안한 공기스프링/보조공기통 16개를 차체하부에 배치하고, 상기절에서 언급한 레벨링밸브의 배관으로 구성한다. 자기스프링(electromagnetic suspension)은 차량 모델링의 단순화를 위해 모듈당 2개의 유효스프링으로 가정하여 모델링한다. 질점의 자유도는 차체의 거동은 수직, 피치, 롤 3자유도만을 고려하고, 모듈은 수직과 피치의 운동만을 고려하여, 전체 19개의 운동방정식으로 단순화하여 현수장치의 특성을 검토하였다.

$$\sum Fz_c = \sum_{i=1}^{16} F_{z_{ai}} - m_c \cdot g = m_c \cdot \ddot{z}_c \qquad \text{식(5)}$$

$$\sum Mp_c = \sum_{i=1}^{16} F_{z_{ai}} \times dx_i - m_c g \times \Delta y_{off} = Iyy_c \cdot \ddot{p}_c \qquad \text{식(6)}$$

$$\sum Mr_c = \sum_{i=1}^{16} F_{z_{ai}} \times dy_i - m_c g \times \Delta x_{off} = Ixx_c \cdot \ddot{r}_c \qquad \text{식(7)}$$

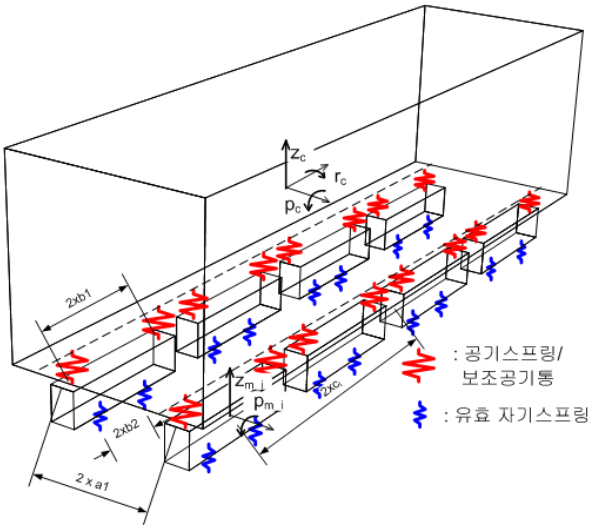


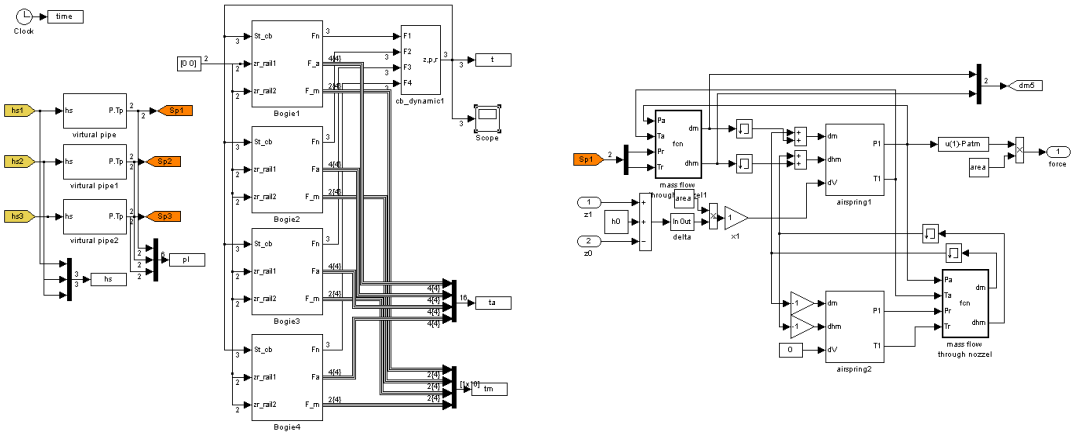
그림 5. 차량 모델링

단, Fz_{ai}는 공기스프링의 수직력이며, 하첨자 i는 그림4에서의 공기스프링 순서이며, dx_i, dy_i는 차량중심에서의 공기스프링 설치위치이다. m_c, Iyy_c, Ixx_c는 차체의 중량과 피치 롤 방향의 2차관성모멘트, g는 중력가속도를 $\Delta x_{off}, \Delta y_{off}$는 차체의 중량 편심을 나타낸다. 차체체의 운동방정식은 식(5~7)로 표현되고, 각각의 모듈은 아래 식 (8~9)로 단순화한다.

$$\sum Fz_{m_j} = F_{z_{mj_f}} + F_{z_{mj_r}} - F_{z_{a(2j-1)}} - F_{z_{a(2j)}} - m_m \cdot g = m_m \cdot \ddot{z}_m \qquad \text{식(8)}$$

$$\sum Mp_{m_j} = (F_{z_{mj_f}} - F_{z_{mj_r}}) \times b2 - (F_{z_{a(2j-1)}} + F_{z_{a(2j)}}) \times b1 \qquad \text{식(9)}$$
$$= Iyy_m \cdot \ddot{p}_{m_j}$$

단, j는 모듈의 순서, m_m, Iyy_m 은 중량과 피치관성모멘트, $Fz_{mj_{f,r}}$ 은 j 번체 모듈의 부상현수장치 반력을 나타내며, 그 소첨자 f, r은 전방과 후방 각각 나타낸다.



(a) 차량 모델링 (b) 공기스프링 모델링

그림 6. 차량 시뮬레이션 모델 (simulink of matlab)

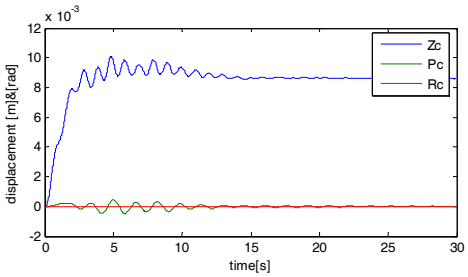
4. 시뮬레이션

상기 절에서 제안한 차량 현수장치 시뮬레이션 모델을 바탕으로 정상상태, 차체 중량의 편심에 대한 영향, 부상제어기 부분적 고장에 대한 분담하중 분포 등을 아래와 같이 검토한다.

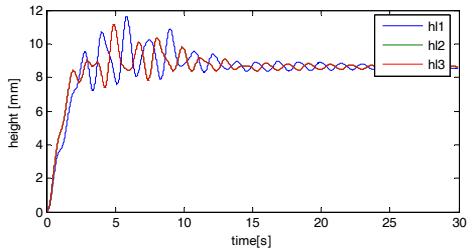
4.1 정상 상태 및 중량 편심의 영향

그림 8은 레밸링시스템 설정높이를 10mm 로 가정한 시뮬레이션 결과이다. 레밸링 밸브의 dead band 구간의 영향으로 최종 10mm에 수렴하지는 하였으나, 15초 이후 안전화 됨을 확인 할 수 있으며, 전체 공기스프링의 추력이 고르게 분포됨을 확인할 수 있다.

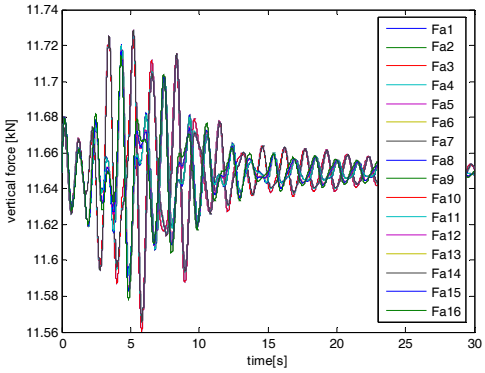
그림 8은 차체의 무게중심이 진행방향 -50mm, 횡방향 -50mm에 대한 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레시션 상에서 자중이 순간 이동하는 것으로 처리되어 초기 진동이 나타나고 있으며 이는 10초 이후 전체적으로 안정화 됨을 확인 할 수 있다. 차체 중량 편심에 의해 공기스프링의 내압과 수직력이 변화하는 9% 수준으로 편차가 발생하고, 부상력의 경우 10%정도의 변동폭이 확인되었다.



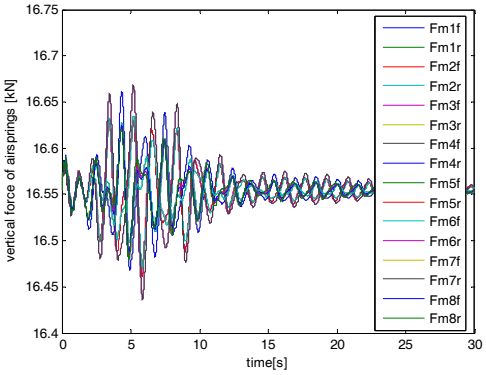
(a) displacement of carbody



(b) control height for leveling

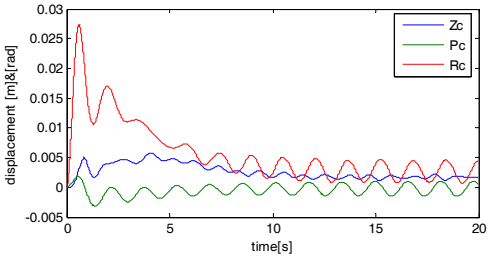


(c) vertical force for airspring

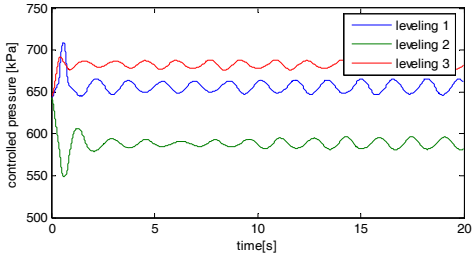


(d) levitation force for two magnets

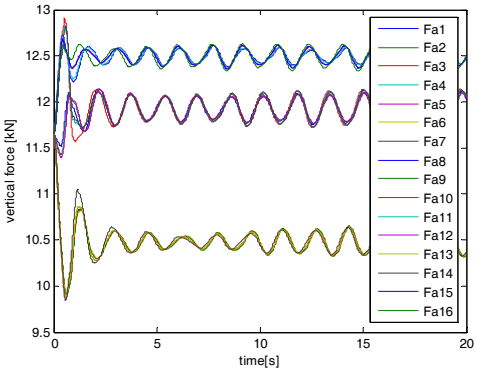
그림 7. 정상상태 차량 시뮬레이션 결과



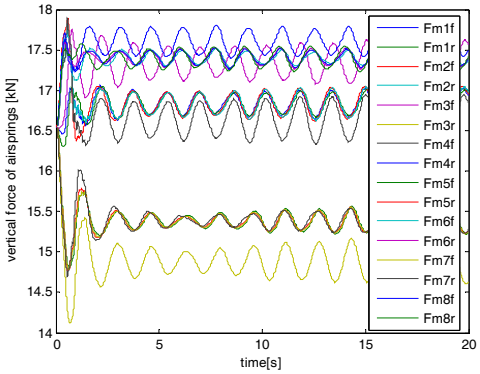
(a) displacement of carbody



(b) inner pressure of air spring



(c) vertical force for airspring



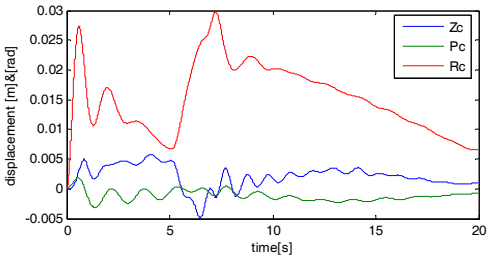
(d) levitation force for two magnets

그림 8. 차체중량 편심에 대한 차량 시뮬레이션 결과

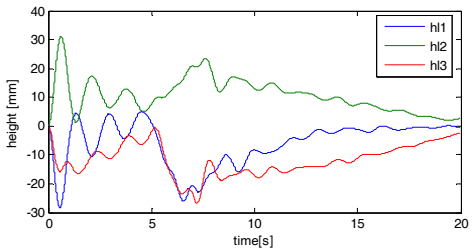
4.2 부상고장에 대한 중량 분포 예측

부상제어기 또는 전원공급장치의 부분적 고장에서 공기스프링의 차량 하중 재분배를 위한 별도의 배기밸브를 설치하고 있으며, 이 기능을 이용하여 차량의 운행 신뢰성을 향상하고자 한다. 본 시뮬레이션 모델에 배기밸브의 모델링은 별도로 하지 않았으며, 공기스프링의 수직력이 고장시점에서 사라지는 것으로 가정하여 그림 9과 같은 시뮬레이션 결과를 도출하였다. 본 시뮬레이션은 5초~7초 사이에 8번 공기스프링이 배기를 통해 수직력이 감소토록 하였으며, 레벨링 밸브를 통해 하중의 재분배를 진행하는 과정을 보인다.

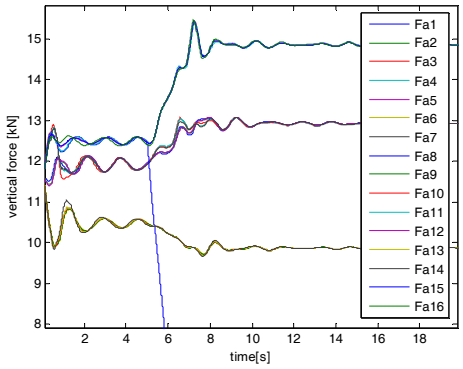
그림 9에서 설정높이를 고장후 15초 부분에서 안정권으로 접어드는 것을 확인하였고, 공기스프링의 수직력은 25% 수준으로 변경되었으며, 전자석에 작용하는 수직력은 28% 수준으로 변동하였으며, 부상안정성에 영향을 주시 않은 수준의 변동폭으로 판단된다.



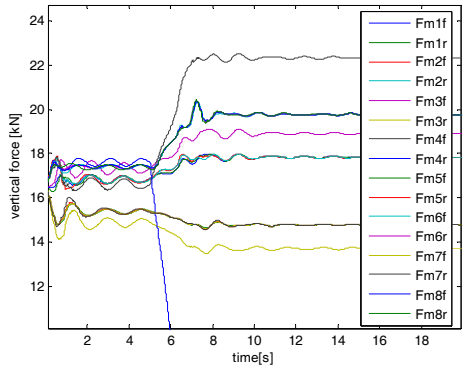
(a) displacement of carbody



(b) control height for leveling



(c) vertical force for airspring



(d) levitation force for two magnets

그림 9. 부상고장에 따른 차체중량 편심에 대한 차량 시뮬레이션 결과

5. 결론

본 연구에서는 공기스프링을 포함한 자기부상차량의 수학적 모델링을 개발하고, 자기부상차량 전체의 단순화 모델을 현수장치의 거동을 분석하였다. 그 결과 16개의 공기스프링와 3 레밸링 밸브의 복합적 거동을 예측할 수 있었고, 차체의 편심과 부상장치 고장시 차량 하중의 재분배 기능을 확인하여, 현재의 설계가 타당함을 간접적으로 확인하였다.

향후 연구계획은 언급된 개념의 자기부상차량이 제작예정이며, 제작된 차량단위 성능시험을 통해 현수시스템 시뮬레이션에서 예측된 결과를 검증하고, 설계 검토에 대한 절차 개선을 계획하고 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 도시형 자기부상열차 실용화 사업에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Liu, Y., Sun, G., and Wei, R.(2006). “The developmental status and future prospects of Maglev technology,” Maglev2006, Proceeding, Vol. I, September, pp.59-64.

2. Takahashi, M., Kwok, G., and Kubota, K.(2006). “Marketing strategy of the HSST system,” Maglev2006, Proceeding, Vol. I, September, pp.53-57.

3. Han, H.S., Kim, Y.J., Shin, B.C., and Kim, B.H.(2006). “Simulation of dynamic interaction between Maglev and guideway using FEM,” Maglev2006, Proceeding, Vol. II, September, pp.599-604.

4. Gordon J. Wan Wylen, Richard E. Sonntag(1973), “Fundamentals of Classical Thermodynamics,” Wiley

5. Malin Presthus, “Derivation of Air Spring Model Parameters for Train Simulation,” MASTER OF SCIENCE PROGRAMME, 2002:059 CIV