

동력분산형 고속철도차량의 주행속도별 진동 특성 예측 연구

신지환

한국철도기술연구원 고속철도연구실

A Study on the Prediction of Vibration Characteristics of EMU High-Speed Trains by Speed

Ji Hwan Shin

High-speed Railroad Systems Research Department, Korea Railroad Research Institute

요약 국내에서는 '400km/h 급 고속철도 종합계획'에 따라 현재 운영 중인 KTX 고속철도차량의 내구연한 도래에 맞춰서 차량의 교체 및 속도 향상을 계획하고 있다. 이에 따라 운행속도 350km/h를 초과하는 고속철도차량에 대한 개발이 필요하며, 개발시 승객의 안전 및 승차감에 큰 영향을 주는 진동 특성을 분석하고 개선 방향을 설정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 동력분산형 고속철도차량이 350km/h를 초과하는 주행속도에서 나타날 수 있는 진동 특성 예측 연구를 수행하였다. 이를 위해 동력분산형 고속철도차량 8량 1편성 모델을 SIMPACK 소프트웨어를 통해 작성하였다. 해석 모델 검증에 위해 시운전 시험 진동 데이터와 비교 분석 및 보정을 수행하였다. 검증된 해석 모델을 이용하여 200km/h부터 400km/h까지 주행 속도별 진동 특성을 예측 및 분석하였으며, 속도 증가에 따라 선형적으로 진동이 커지는 것으로 분석되었다. 다만, 400km/h의 속도에서도 진동 특성이 EN 14363에 명시되어 있는 수치보다 훨씬 낮았다. 또한, EN 12299의 Mean comfort 방법을 이용한 승차감 평가에서도 '편안함(Comfortable)'이 달성될 수 있을 것으로 확인되었다.

Abstract An increase in speed of train operation has been planned to prepare for the end of the KTX service life in accordance with the "400-km/h Master Plan." The development of high-speed railway vehicles exceeding 350 km/h is necessary, and it is important to analyze vibration characteristics, which have a significant impact on passenger safety and riding comfort. Also, it is essential to set a direction for improvement. A prediction study was carried out for the vibration characteristics that may occur in electric multiple unit (EMU) high-speed trains at running speeds exceeding 350 km/h. To this end, EMU high-speed trains consisting of two coaches and six locomotives were modeled using SIMPACK software. Measured data during a test run were used to verify this model. Using the verified analysis model, vibration characteristics were predicted and analyzed for each speed from 200 km/h to 400 km/h. Vibration increased linearly with speed, but even at a speed of 400 km/h, the vibration characteristics were much lower than the limit values specified in the EN 14363 standard. In addition, it was confirmed that riding comfort could be achieved using the mean comfort method of EN 12299.

Keywords : Dynamic Performance Assessment, EN 14363, High-Speed Train, Vibration, Ride Characteristic

본 연구는 '370kph 이상 고속운행을 위한 차량 핵심기술 및 기술기준 개정(안) 개발(RS-2022-0014-3396)'의 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Ji Hwan Shin(Korea Railroad Research Institute)

email: jihwan.shin@krri.re.kr

Received October 11, 2023

Revised November 2, 2023

Accepted January 5, 2024

Published January 31, 2024

1. 서론

현재 국내에서는 '400km/h 급 고속철도 종합계획'에 따라 고속열차의 영업운행최고속도를 370km/h 로 높일 계획을 가지고 있다. 이에 따라 운영 중인 KTX 고속철도차량의 내구연한 도래에 맞춰서 차량의 교체 및 속도 향상을 Fig. 1 과 같이 계획하고 있다.

2004년 이후 신규로 건설된 고속철도 운영 구간은 350km/h에서 400km/h의 속도를 만족하게 되어있으나, 여러 가지 운영조건으로 인해 영업운행최고속도는 300km/h에 머물러 있는 현실이다. 앞으로 고속철도 인프라의 내구연한이 24년 이후에 도래하면서 교체 계획까지 있기에, 영업운행최고속도를 향상할 수 있는 환경이 갖추어진다고 할 수 있다[1]. 따라서, 운행최고속도 350km/h를 초과하는 고속철도차량에 대한 개발이 필요한 상황이다.

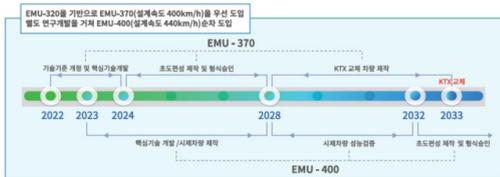


Fig. 1. Plan for the increase in speed of train operation[1]

철도차량 개발 시 다양한 부분들을 고려해야 하며, 특히 승객의 안전 및 승차감에 큰 영향을 주는 진동 특성을 분석하고 개선 방향을 설정하는 것이 중요하다. 이에 따라 국내에서는 동력분산형 고속철도차량 개발에서 진동 저감을 위한 연구가 지속해서 이루어져 오고 있다[2].

본 연구에서는 운행최고속도 350km/h를 초과하는 동력분산형 고속철도차량의 주행속도별 진동 특성 예측 연구를 수행하였다.

2. 본론

2.1 동력분산형 고속철도차량 모델 작성

진동 및 승차감 성능 예측을 위해 SIMPACK S/W[3]를 통해 동력분산형 고속철도차량 모델을 Fig. 2에 보이는 것처럼 작성하였다. 해당 차량은 차세대 고속열차 시제차량(HEMU-430X) 차량이 기반이며, 6량 1편성인 HEMU 차량과 달리 8량 1편성으로 구성된다. 'TC1 -

M1' - M1 - M2' - M2 - M3 - M3' - TC2'의 구성이며, 공차 중량 조건을 가지고 있다. 대차는 TC용 부수대차 4대, 동력차용 구동대차 12대로 구성된다.

동력분산형 고속열차 모델의 현가장치는 차축과 대차를 연결하는 1차 현가장치(링크암 부시, 코일스프링, 수직댐퍼), 그리고 대차와 차체를 연결하는 2차 현가장치(공기스프링, 수평/수직 댐퍼, 요 댐퍼, 피봇 조인트, 안티롤바)로 구성된다. 차량 간 연결을 위해 연결기와 길이방향 댐퍼가 구성되었다.

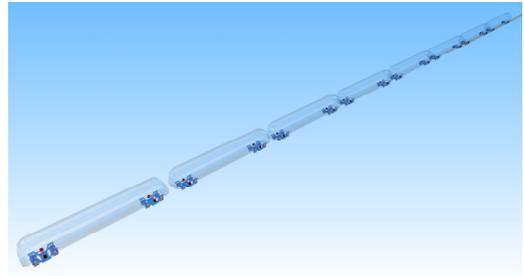


Fig. 2. Analysis model of high-speed EMU train (by SIMPACK S/W)

2.2 해석 모델 검증

2.1절에서 모델링한 동력분산형 고속철도차량의 모델 검증을 위하여 시운전을 통해 측정된 진동 데이터 분석 결과와 비교하였다. 진동 데이터 분석을 통해 실제 차량의 차체 주요 진동 모드를 추출하고, 해석 모델과의 비교 및 수정을 통해 모델의 정확도를 높였다.

Fig. 3는 시운전 데이터 분석 결과의 일부를 보여주며, 차체 앞쪽에서 측정한 횡가속도와 뒤쪽에서 측정한 횡가속도를 FFT 분석하여 진폭과 위상 차이를 나타낸 것이다. 지배적인 주파수로 0.45Hz와 1.35Hz가 확인되었으며, 각 주파수에서 확인된 앞뒤 위상차는 약 5도와 약 180도로 확인되어 차체 스웨이 모드와 요 모드인 것으로 판단되었다.

Fig. 4도 데이터 분석 결과의 일부이며, 차체 앞쪽에서 측정한 수직가속도와 뒤쪽에서 측정한 수직가속도를 FFT 분석하여 진폭과 위상차를 나타낸 결과이다. 지배적인 주파수로 0.72Hz와 2.00Hz가 확인되었으며, 각 주파수에서 확인된 앞뒤 위상차는 약 30도와 약 180도로 확인되어 차체 바운스 모드와 피치 모드인 것으로 판단되었다.

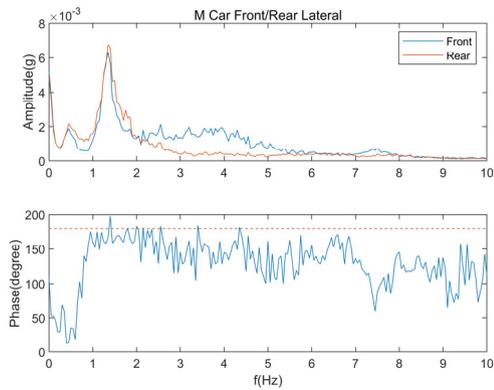


Fig. 3. FFT analysis results for lateral acceleration at front/rear of carbody

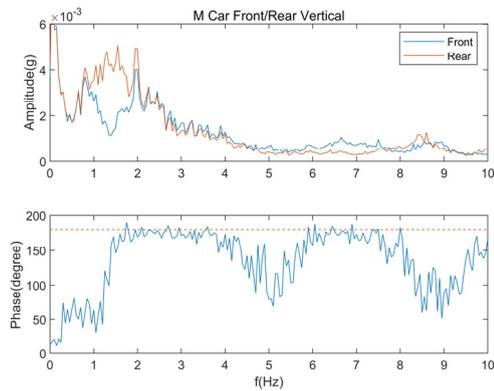
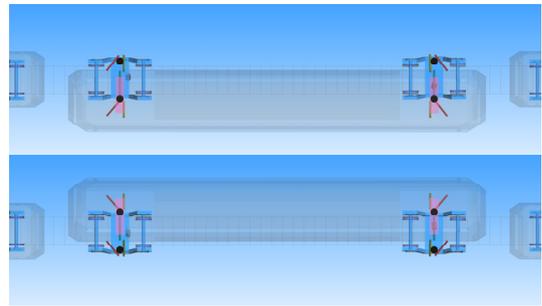


Fig. 4. FFT analysis results for vertical acceleration at front/rear of carbody

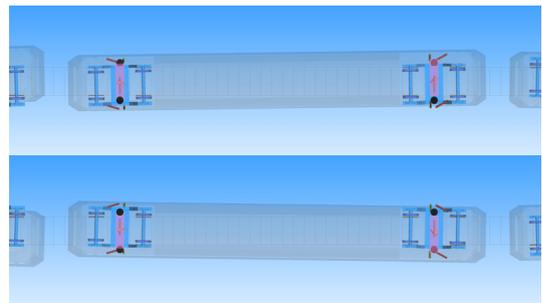
시험을 통한 데이터 측정 방법의 한계점으로 인해 데이터를 분석하여 얻어낼 수 있는 진동 모드 데이터의 정보에는 한계가 존재한다. 더군다나 차량이 여러 대인 편성모델의 경우 다양한 진동 모드가 존재하므로 제한적인 정보를 통해 어느 특정 진동 모드를 명확하게 판단하기에는 한계가 있다. 다만, 시험을 통해 확인된 진동 모드가 해석 모델에 존재하는지 확인하여 그 차이 확인을 통해 모델의 정확도 검증을 수행하였다. 차체 스웨이 모드(Fig. 5a)는 시험과 해석 모델간에 약 2.22%의 오차가 있었으며, 차체 바운스 모드(Fig. 5b)는 12.5%, 차체 피치 모드(Fig. 5c)는 4.0%, 차체 요 모드(Fig. 5d)는 4.44%의 오차를 보였다. 평균적으로 5.79%의 오차를 보여, 실제 차량과 해석 모델간에 90% 이상의 정확도를 보여준다고 할 수 있다.



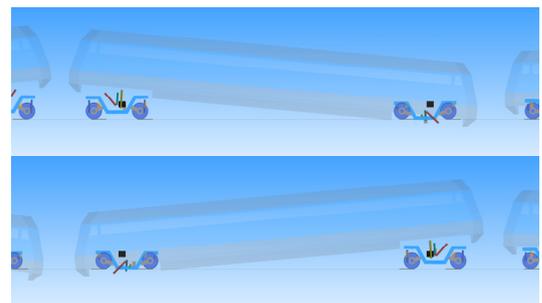
(a) Carbody sway mode(0.46Hz)



(b) Carbody bounce mode(0.81Hz)



(c) Carbody yaw mode(1.29Hz)



(d) Carbody pitch mode(2.08Hz)

Fig. 5. Natural vibration modes of analysis model

2.3 차량 모델 임계속도 해석

2.1, 2절에서 기술한 동력분산형 고속철도차량 해석 모델의 추가적인 타당성 검증을 위해 임계속도를 검토하였다. 직선 선로 초반 약 150m 길이의 궤도 불규칙도

(ERRI Low)[4]가 존재하는 곳을 주행하여, 일정시간 내에 각 차체 후방 대차의 후방 윤축 변위가 안정적으로 수렴하는지 확인하는 방법으로 임계속도 해석을 실시하였다. Fig. 6은 8량 1편성 차량에서 각각의 차체 최후방 차축의 횡변위를 보여준다. 해석 결과 주행속도 400km/h에서도 수렴하는 것으로 보아 해당 속도 이상에서 임계속도가 존재함을 확인하여, 모델이 타당한 것으로 판단하였다.

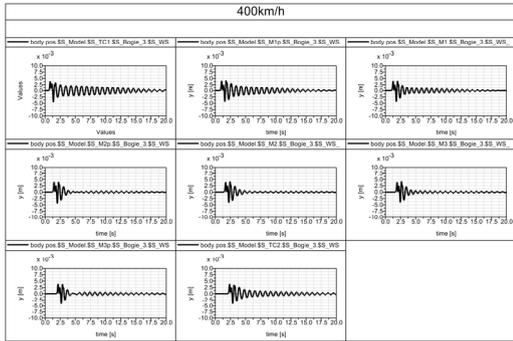


Fig. 6. Critical speed analysis results at 400km/h

2.4 주행속도별 성능 예측

2.4.1 성능 예측 해석 시나리오

2.3절에서 검증한 해석 모델을 이용하여 주행 속도별 진동 및 승차감 예측을 실시하였다. 이를 위해 먼저 해석 시나리오가 필요하며, 궤도 틀림 데이터를 활용하여 구성하였다. 두 가지의 궤도 틀림 데이터를 고려하였으며, 첫 번째로는 호남고속선 오송-모암IEC 구간에서 KP107~KP116 약 9km 구간의 궤도 틀림을 측정된 데이터를 활용하였다. 그리고 두 번째로는 ERRI B176 'Low level'로 정의되는 궤도 틀림 데이터를 활용하였다.

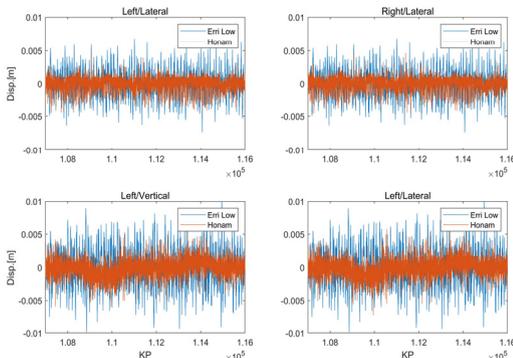


Fig. 7. Rail irregularity data; Honam high-speed line/ERRI 'Low level'

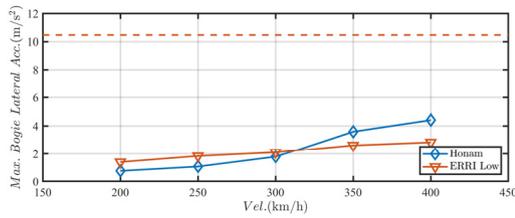
궤도 틀림 데이터는 Fig. 7과 같으며, 왼쪽 및 오른쪽 레일 횡방향 변위와 수직방향 변위로 표현된다. 호남고속선 데이터가 ERRI Low 궤도 틀림 데이터에 비해 비교적 작은 크기를 가지고 있는 것으로 확인되었다.

2.4.2 진동 특성 예측 결과

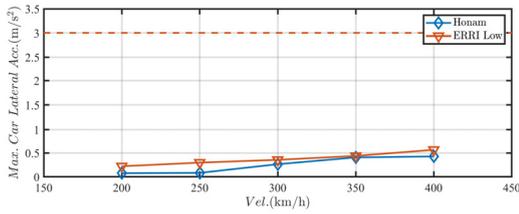
실제 EMU-320 진동 데이터와 비교하여 정확도를 높인 모델을 대상으로 주행 속도별로 진동 및 승차감 예측을 수행하였다. 약 9km 길이의 직선 구간을 주행속도 200km/h부터 50km/h 증가하면서 400km/h까지 변화시키면서 진동 및 승차감 분석을 실시하였다. 해석 수행 후 데이터 분석은 TC 차량과 M1` 차량에서 대차 횡가속도의 경우 각 차체의 후방 대차에서 측정된 값 중 큰 값을, 차체 가속도의 경우 각각의 차체 전방 및 후방 바닥면에서 위치한 가속도 중에서 가장 큰 값을 대푯값으로 선정하였다.

궤도 틀림 데이터를 비교하였을 때 ERRI Low 데이터가 호남고속선 데이터보다 크기가 컸던 것처럼 속도별 진동 예측 해석 결과, 진동 가속도 크기에서도 ERRI Low를 이용하여 수행한 해석 결과에서 더 크게 나오는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 8(a)부터 Fig. 8(c)는 EN 14363[5] 기준에 따라 주행 안전(Running safety) 항목에서의 진동 분석 결과를 보여준다. 전체적으로 선형 증가하는 경향을 보인다. 각각의 그래프에서 빨간 점선은 각 항목에 대한 한계값을 나타내며, 대차 횡가속도는 400km/h에서 한계값 대비 40% 수준, 차체 횡가속도는 18% 수준, 차체 수직가속도는 16% 수준으로, 기준값보다는 크게 밀도는 것으로 나타났다. Fig. 8(d), (e)는 EN 14363 기준에 따라 승차감 특성(Ride characteristic)에 의한 진동 분석 결과를 보여주며, 각 그래프의 빨간 점선은 승차감 특성 참고치를 보여준다. EN 14363에서는 승차감 특성에 대한 한계값을 두고 있지는 않으며, 유럽에서 운행되는 차량의 일반적인 승차감 정도를 조사하여 참고치로만 제시하고 있다.

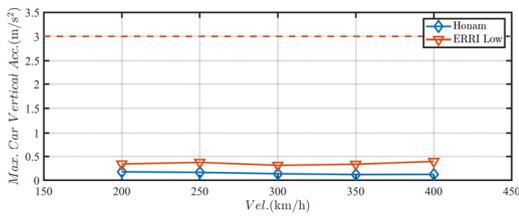
해석 결과에서의 차체 횡가속도는 크기가 증가함에 따라 거의 선형적으로 커지는 것으로 확인되고 수직 가속도는 300km/h 이상부터는 증가폭이 다소 작아지면서 커지는 것으로 확인되었다. 또한, 횡방향 및 수직방향 모두 400km/h에서 참고치 대비 30% 수준으로 확인되어 EN 14363 승차감 특성 항목의 수치보다 크게 밀도는 확인되었다.



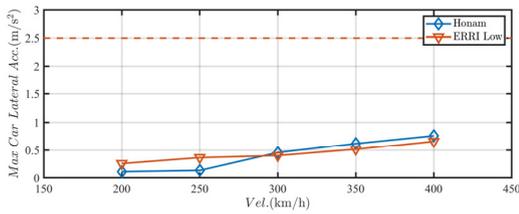
(a) Maximum values of bogie lateral acceleration in accordance with running safety



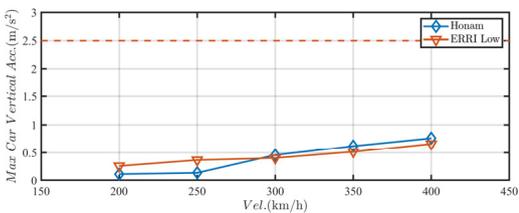
(b) Maximum values of carbody lateral acceleration in accordance with running safety



(c) Maximum values of carbody vertical acceleration in accordance with running safety



(d) Maximum values of carbody lateral acceleration in accordance with ride characteristic



(e) Maximum values of carbody vertical acceleration in accordance with ride characteristic

Fig. 8. Analysis results of vibration characteristics regard to EN 14363

승차감 지수(Mean comfort method, EN 12299[6]) 분석 결과는 Fig. 9와 같으며, ERRI Low 데이터를 이용한 결과에서는 1.89의 값을 나타냈으며, 호남고속선 데이터를 이용한 경우 1.27의 값을 가졌다. 전반적으로 속도 증가함에 따라 커지는 것으로 확인되었다. 320km/h에서 370km/h로 속도가 증가할 경우 ERRI Low 궤도 틀림 조건에서는 약 28.9%의 승차감 지수 증가가 예측되었으며, 호남고속선 궤도 틀림 조건에서는 약 14.5%의 승차감 지수가 예측됨. 평균적인 승차감 지수 증가는 약 21.7% 정도로 예상된다.

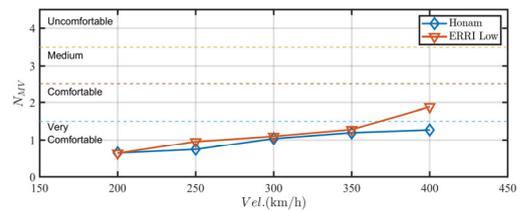


Fig. 9. Comfort index in accordance with EN 12299 Mean comfort method

3. 결론

본 연구에서는 향후 진행될 고속철도차량 속도 향상 계획에 맞춰 350km/h 이상 급의 고속철도차량 개발과 관련하여 주행속도별 진동 및 승차감 성능 예측을 수행하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

- 8량 1편성의 동력분산형 고속철도차량 모델을 작성하였다. 해당 모델의 검증을 위해 임계속도를 검토하고, 시운전시 획득한 진동 데이터를 활용하여 실제 차량의 진동 모드 추출 및 해석 모델과의 비교 보안을 통해 모델의 정확도를 확인하였다.
- 검증된 해석 모델을 이용하여 200km/h부터 400km/h까지 주행속도를 변경하면서 진동 특성 예측을 실시하였으며, 전반적으로 속도 증가에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 확인되었고 EN 14363에 명시되어 있는 기준치보다는 크게 밑도는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 해석 모델의 승차감의 경우 400km/h의 속도에서도 '편안함'을 달성할 수 있는 것으로 예측되었다.

본 연구에서 활용된 동력분산형 고속철도차량 모델의 경우 400km/h까지 증속하여도 직선선로에서의 진동 특성에서는 큰 문제가 없을 것으로 보인다. 다만, 곡선 선

로에서의 안전 및 진동 특성에 대한 검토가 추가로 수행 예정이다. 그리고 본 연구에서 다룬 해석 모델은 실제 차량 및 환경 조건 등에서 차이가 있을 수 있기에 앞으로 추가적인 분석 및 검토를 수행할 예정이다.

References

- [1] Report from Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement. Development of Technology and Evaluation Criteria for High-Speed Trains operated at speeds between 350km/h and 400km/h, 21RDPP-C164438-01, Available From:
http://www.kaia.re.kr/portal/cmm/fms/FileDown.do?attachFileId=FILE_000000000035159&fileSn=1&bbsId=
(accessed Oct. 6, 2023)
- [2] C. S. Jeon, Y. G. Kim, S. W. Kim, S. S. Kim, S. H. Choi, T. W. Park, A Study on Tail Vibration reduction for the Next Generation High Speed EMU. *Journal of the Korean Society for Railway*, Vol. 15, No. 6, pp.543-549, Dec. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.6.543>
- [3] SIMPACK software, Dassault systems,
<https://www.3ds.com/ko/products-services/simulia/products/simpack/>
- [4] B. Bergander, W. Kunnes, ERRI B176/DT 290: B176/3 Benchmark Problem, Results and Assessment. Technical report, European Rail Research Institute, 1993.
- [5] EN 14363:2016. Railway applications – acceptance of running characteristics of railway vehicles-testing of running behaviour and stationary tests.
- [6] EN 12299:2009. Railway applications – Ride comfort for passengers – Measurement and evaluation.

신 지 환(Ji Hwan Shin)

[정회원]



- 2016년 2월 : 동국대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2020년 2월 : 동국대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2020년 4월 ~ 7월 : 고양테크놀러지 연구소
- 2020년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

〈관심분야〉

철도차량 동역학, 구조물 진동제어