

연결기용 완충기의 시뮬레이션 모델 비교

장 현 목^{*1)} · 김 남 옥²⁾ · 박 영 일³⁾

서울산업대학교 철도전문대학원¹⁾ · 서울대학교 기계항공공학부²⁾ · 서울산업대학교 기계설계자동화공학부³⁾

Comparison of Simulation Models for Train Buffer Couplings

Hyeon-mog Jang^{*1)} · Namwook Kim²⁾ · Yeong-il Park³⁾

¹⁾Graduate School of Railroad, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

²⁾School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

³⁾School of Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received 14 October 2009 / Accepted 10 March 2010)

Abstract : Coupling systems for trains need more complicated buffer equipments than existing systems because the recent tendency of the regulations enforces trains to be safe for collisions even when the driving speed is higher than before. Using hydraulic buffer is an effective way to satisfy the requirement while it causes the increase of the cost for the coupling system. In this study, we introduce the methodology to build a simulation model for the hydraulic buffer, which could be installed into the coupling systems. In the simulation model of the hydraulic buffer, the reacting force is determined by both buffer stroke and speed whereas the elastic buffer model is designed by using only the buffer stroke in other studies. The simulation results with the advanced hydraulic buffer model shows that the simulating results can be close the real experimental results around 10%, and, if we considers friction forces, the simulation calculates the maximum force within 10% comparing to the experimental.

Key words : Buffer couplers(완충기), Train(열차), Collision experiment(충돌시험), Dynamic simulation(역학 시뮬레이션)

1. 서론

철도 차량의 충돌 요건이 강화됨에 따라 철도 차량을 연결하는 완충 시스템의 성능 요건이 높아지게 되었다. 한편, 완충 시스템의 성능 요건을 평가하기 위한 방법으로 충돌 실험의 경우 막대한 비용이 소모되고 국내에 관련 시설 및 장비가 부족한 관계로 지속적으로 변경, 개발되는 완충 시스템의 성능을 실험만으로 평가한다는 것은 무리가 있다. 따라서, 완충 시스템의 구동 성능을 신뢰할 수 있는 수준에서 평가할 수 있는 충돌 시뮬레이션의 수행이 가능하다면 앞서 언급한 막대한 실험 비용을 절감

하고 완충기의 개발 기간도 단축할 수 있는 효과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 기존의 고무 완충기와 더불어 유압 완충 장치가 포함된 완충 시스템의 충돌을 해석할 수 있는 시뮬레이션을 보여주고, 이 때 적용될 수 있는 완충 시스템 모델을 비교함으로써 완충 시스템의 시뮬레이션에 적합한 요소 모델을 구성하는 방법에 관해 논하였다. 완충기의 모델 구성을 위해 실험적으로 얻어진 고무 완충기와 유압 완충기의 성능 곡선을 이용하였고, 결과적으로 시뮬레이션의 수행에 있어 이들의 성능 곡선이 어떠한 형태로 적용되는 것이 적절인가에 대한 논의를 진행하였다.

*Corresponding author, E-mail: hmjang@seoul.go.kr

2. 연결기용 완충 시스템

철도 차량의 연결기용 완충 시스템은 차량의 충격 에너지를 흡수하는 역할을 위해 설계되었으며, 이를 위해 기본적으로 고무 완충기(elastic buffer)를 포함하고 있다. 또한, 더 큰 충격으로 발생하는 에너지를 흡수할 수 있도록 유압 완충기(hydraulic buffer)를 포함한 완충 시스템이 고안되었다. 일반적으로 이러한 완충 시스템은 충돌 초기에 발생하는 작은 충격의 대부분은 고무 완충기가 흡수하고, 고무 완충기의 한계 성능을 넘어서는 큰 충격이 가해지면 추가적인 에너지를 유압 완충기가 흡수하는 것을 목적으로 고안되었다. 완충 시스템의 구성은 Fig. 1에 나타나 있으며 가운데 부분에 유압 완충기가 자리하고 있다.

Fig. 1의 완충 시스템의 하단부는 고무 완충기를 통해 각 열차에 연결되어 있는데, 이는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 커플링 시스템의 말단부를 객차의 기저부와 고무로 연결하여 충격을 완화할 수 있도록 구성한 것이다. 고무 완충기의 경우 고무의 특성에 의해 압축, 인장에 따라 비선형적인 특성을 가지고 있다. 한편, 고무의 특성 상 흡수할 수 있는 에너지의 양에 한계가 있어, 완충 시스템에 추가적인 충격을 효과적으로 흡수하도록 유압 완충기가 도입되었다.

Fig. 3에 나타난 유압 완충기 역시 비선형적인 특성을 가지게 되는데 일반적으로 작은 힘이 작용할 경우 마찰력에 의해 작동하고 있지 않다가 특정한 힘 이상이 작용할 때 변형이 발생하여 충격 에너지를

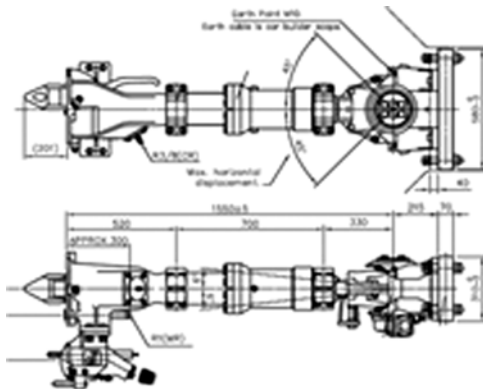


Fig. 1 Coupling system with hydraulic buffer

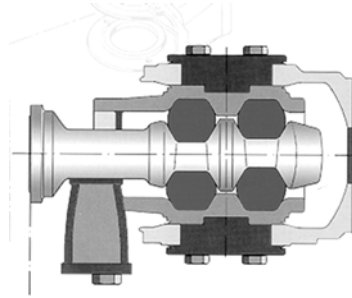


Fig. 2 Elastic buffer

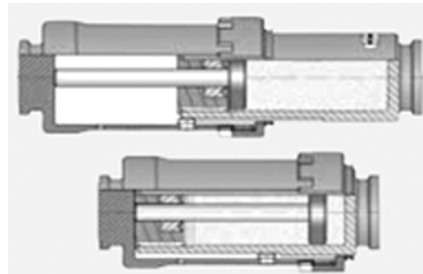


Fig. 3 A schematic of hydraulic buffer

를 흡수하는 역할을 한다. 본 논문에서는 실험을 통해 얻어진 고무 완충기 및 유압 완충기의 특성 곡선을 바탕으로 열차의 충돌을 모사하는 두 종류의 시뮬레이션 모델을 제시하고 이를 비교한 결과를 보여주고자 한다.

3. 완충 시스템의 충돌 실험

완충기의 성능을 측정하기 위한 실험은 단일 객차에 장착된 고무 완충 시스템과 지면에 지지된 완충 시스템이 일정한 간격을 두고 특정한 속도로 충돌할 때 발생하는 현상을 측정함으로써 진행되었다.¹⁾

3.1 실험 조건

실험 수행을 위해, 40톤의 객차 전두부에는 기준의 객차에 장착되던 것과 마찬가지로 고무 완충기만을 포함한 커플링 시스템이, 고정된 벽면에는 유압 완충기와 고무 완충기를 모두 포함하여 Fig. 1과 같은 커플링 시스템이 장착되었다.²⁾

충돌 실험을 위해 객차의 속도는 2.7km/h, 3.6km/h, 3.4km/h, 6.0km/h, 7.6km/h, 10km/h, 10.75km/h의 순서

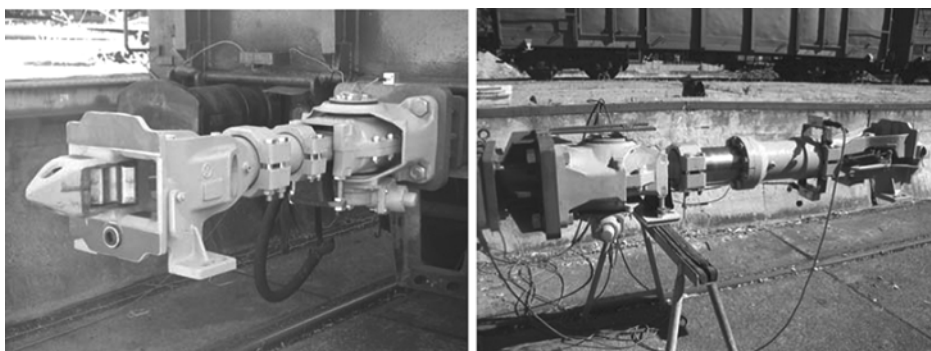


Fig. 4 photo of coupling system installed

로 제어하여 7번에 걸쳐 수행되었으며 완충기의 보존을 위해 처음 두 번을 제외하고는 충돌 시 커플러를 작동시키지 않고 충돌만을 수행하였다. 또한 완충기의 재현성을 확보하기 위해 각 충돌 실험 후에 일정한 휴식을 통해 완충기의 초기 온도를 일치시켰다.³⁾

3.2 실험 해석 결과

본 실험을 통해 고정단에 연결되어 있는 유압 완충기의 압축 및 인장 속도, 그리고 고정단의 고무 완충기의 압축 및 인장 속도와 작용력 관한 해석 결과를 얻었다. 충돌 실험에서 압축력은 커플링 시스템과 고정단 사이에서 측정되었다. 해석을 위해 커플링 시스템에 작용하는 관성력을 무시하고 유압 완충기와 고무 완충기에 작용하는 힘은 동일하다고 가정하였다.

충돌 시 각 부위의 압축 변위는 Fig. 5에 나타나 있

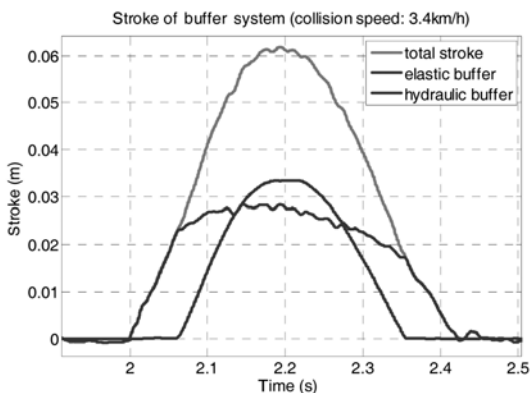


Fig. 5 Stroke of the coupling system when the speed of the train is 3.4 km/h

다. 위의 경우는 충돌 속도가 3.4 km/h일 경우를 나타내고 있으며 다른 속도의 경우에도 경향은 위의 경우와 유사하게 충돌 초기 압축은 고무 완충기에서만 일어나다가 커플링 시스템에 더 큰 힘이 작용하게 되면 유압 완충기가 작용하고 최대 압축력에도달하며 이후 유압 완충기가 초기 상태로 먼저 돌아오기 시작하면서 고무 완충기도 인장되어 최종적으로 충돌이 종료된다.

3.3 유압 완충기 해석 결과

다양한 속도에서 이루어진 충돌 실험에서 유압 완충기와 고무 완충기의 결과를 분리하여 해석하였는데, 유압 완충기는 다음 Fig. 6, Fig. 7과 같은 특성 곡선을 보여주었다.

해석을 통해 유압 완충기의 압축력을 결정하는 요인을 찾는 것이 목적인데, 유압 완충기의 압축 변위가 클수록 그리고 압축되는 속도가 빠를수록 압

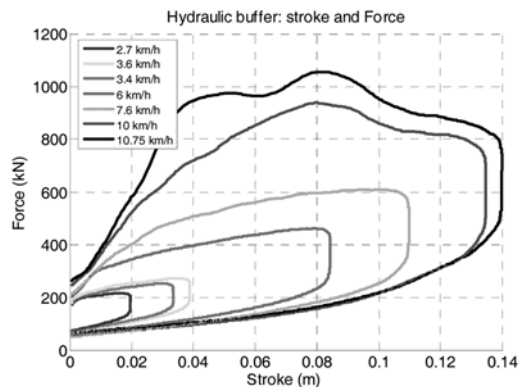


Fig. 6 Force of the hydraulic buffer along the stroke

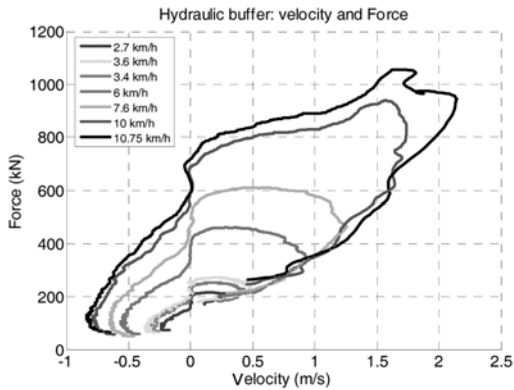


Fig. 7 Force of hydraulic buffer vs. velocity of hydraulic buffer

축력이 크게 된다는 것을 알 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7은 이러한 특성을 나타내고 있으며 가능한 실험적 특성을 시뮬레이션에 반영할 수 있도록 변위, 속도를 압축력의 결정 인자로 사용하였다. 참고로 Fig. 6에서 충돌 초기에 힘이 급격하게 상승하는 구간은 Fig. 7에서 속도가 증가하는 구간과 일치한다. 이를 바탕으로 압축되는 속도가 증가할 때 추가적으로 유압 완충기에 댐핑과 유사한 비선형적인 요소가 작용하는 것으로 추정할 수 있다.⁴⁾

3.4 고무 완충기의 해석 결과

고무 완충기의 경우 변위에 따라 압축하는 경우와 인장되는 경우의 힘이 달라지며 다음 Fig. 8과 같은 특성 곡선을 보여주었다.

기존의 연구는 이러한 고무 완충기의 충돌 해석

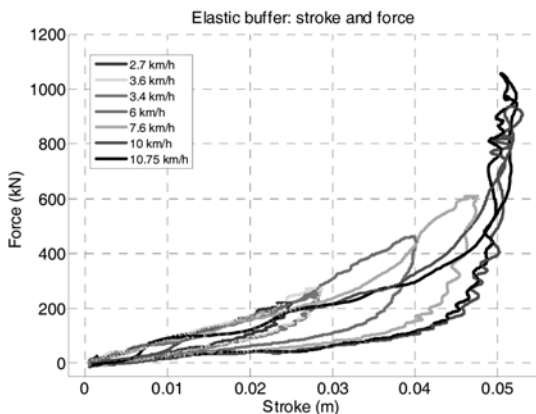


Fig. 8 Force of elastic buffer

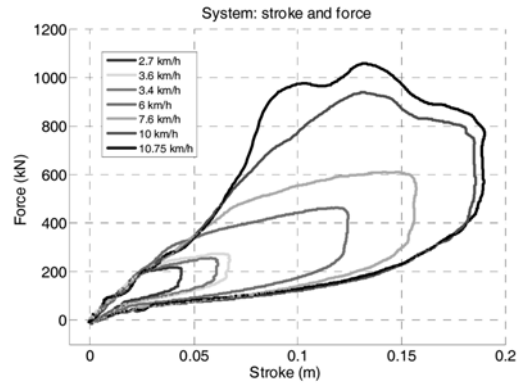


Fig. 9 Force of the coupling system vs. total stroke

을 위해 속도와는 무관한 변위에 따른 압축 곡선이 적용되고는 했는데, 본 충돌 실험의 결과를 통해 변위가 압축력을 결정하는 주요 인자임을 보여주고 있다. 완충기의 해석에 있어 완충기가 흡수하게 되는 최대 압축력을 주요 설계 목적 인자로 가정하면, 일반적으로 가장 큰 충격을 흡수하게 되는 충돌 직후에서 최대 압축이 일어나는 첫 충돌의 압축 과정의 특성 곡선이 중요하게 인식되는데 본 실험의 결과로 압축 과정에서 변위에 의해 압축력이 표현되는 것을 알 수 있다. 다만, 압축되는 속도가 빠를 경우 단일 특성 곡선을 잘 따르지 않을 수도 있으며, 그래프에 잘 표현되지 않았으나 실험적으로 속도가 빠를수록 같은 변위에서 복원력이 감소하는 현상을 나타내고 있다. 본 연구에서는 기존의 연구와 동일하게 압축 시의 고무 완충기의 응답력은 변위에 의존하고 있다고 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 9에 유압 완충기와 고무 완충기의 특성이 포함되어 나타나는 커플링 시스템 전체의 변위와 힘의 관계를 충돌 속도 조건에 따라 나타내었다. 변위가 힘의 관계를 고려하면, 상대적으로 큰 충돌의 경우 대부분의 에너지가 유압 완충기에서 흡수되는 것으로 이해할 수 있는데 이 때의 유압 완충기의 거동을 적절하게 해석하는 모델을 수립하는 것이 향후 완충 시스템의 설계 기준을 마련하는데 큰 도움이 될 것으로 생각된다.

4. 완충기 모델 시뮬레이션

서론에서 언급한 바와 같이, 완충기를 장착한 차

량의 충돌 시뮬레이션이 적절하게 실험 결과를 모사할 경우 충돌 실험에 필요한 막대한 비용과 시간을 줄일 수 있을 뿐 아니라 모델을 확장하여 다수의 객차가 충돌할 경우 발생하는 충격에 대한 예측을 수행할 수가 있다. 본 논문에서는 이러한 완충 시스템의 두 가지 모델을 비교함으로써 충돌 시뮬레이션에 적합한 완충 시스템의 물리적인 모델을 찾고자 한다.

4.1 완충 시스템 모델 1

첫 번째로 수행할 해석 모델은 변위에 의존하는 특성 곡선을 가진 고무 완충기 모델과, 마찬가지로 변위에 의존하는 특성 곡선을 가진 유압 완충기 모델을 시뮬레이션에 적용했을 경우 나타나는 충돌 해석 결과이다. 이러한 모델은 철도 차량의 충돌 실험을 수행하는 독일의 'Schaku'사에서 충돌을 해석하기 위해 적용하는 모델로, Fig. 5에서 유압 완충기의 작동이 실제로 고무 완충기가 최대 압축력에 도달하는 동안 거의 작동하지 않는다는 것에서 착안하여 완충기가 우선적으로 충격을 흡수한 후에 유압 완충기가 작동하는 모델을 구성하였다. 본 모델에 사용된 고무 완충기의 성능 곡선은 다음 Fig. 11과 같다.

Fig. 11의 고무 성능 특성 곡선은 Fig. 8의 충돌 실험 결과를 바탕으로 이에 적합한 특성 곡선으로 표현한 것이다. 해당 모델 1의 특징은 저속으로 충돌하는 차량에서 완충 시스템에 전달하는 압축력의 크기가 작은 경우, 유압 완충기의 변형은 무시한다는데 있다. 시스템 모델링을 위해 충격 실험 결과를

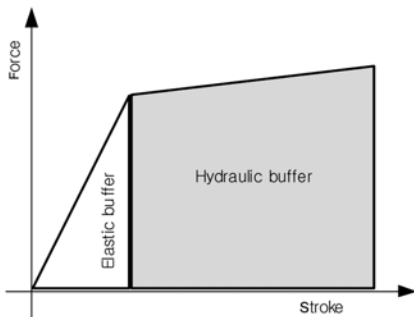


Fig. 10 A model of a buffer system, which has different operations for each buffer

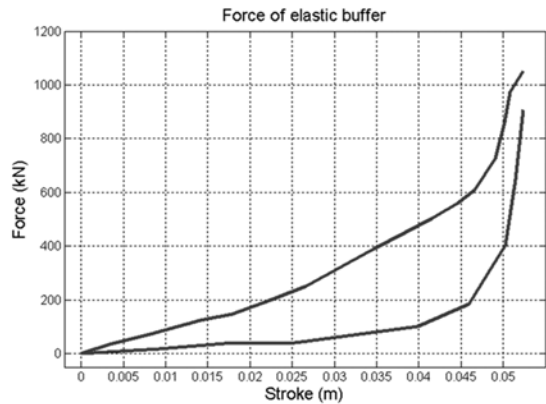


Fig. 11 Force of the coupling system vs. total stroke

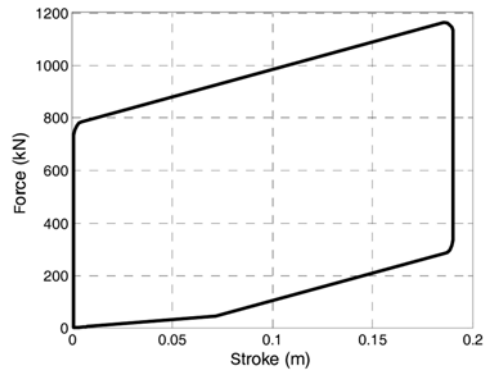


Fig. 12 Force of the hydraulic buffer according to the displacement

바탕으로 유압 완충기의 특성 곡선을 구성하였는데 유압 완충기의 성능 곡선 역시 변위에 관한 함수로 표현하여 다음 Fig. 12와 같이 나타내었다.

이러한 모델을 바탕으로 단일 객차의 충돌 시뮬레이션을 구성하여 실험 조건과 동일한 객차와 완충 시스템의 충돌 해석을 수행하였으나 Fig. 13에서 보여주는 유압 완충기의 거동은 실제 실험에서 나타나는 거동과는 상당한 차이가 있다. 실제 Fig. 9에서 나타나는 완충 시스템의 거동의 경우 고무 완충기가 최대 압축력까지 압축이 되기 전에 유압 완충기가 작동하기 시작하여 충돌 시의 충격을 흡수하기 시작하는데, 적용된 모델 1의 경우 이러한 현상을 반영하지 못하고 있어 고무 완충기와 유압 완충기의 거동이 실험 결과와 상이하게 나타난다.

독일의 'Schaku'사에서 제시한 시뮬레이션 모델과 같이, 고무 완충기와 유압 완충기가 직렬로 장착

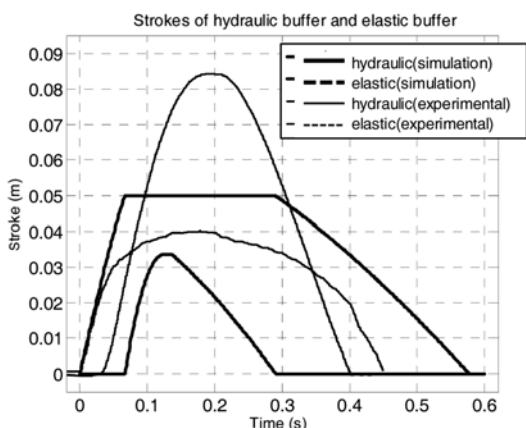


Fig. 13 Comparison of strokes between simulation and experimental with model 1 when train speed is 6.0 km/h

된 하이브리드형 완충 시스템의 경우 고무 완충기의 응답 속도가 유압 완충기의 응답 속도보다 상대적으로 빠르고 유압 완충기가 자동하는데 특정 이상의 응답력이 필요함을 고려하여 모델 1과 같이 시스템을 구성하였으나 Fig. 13을 통해 이러한 시뮬레이션이 실제 거동과는 다소 상이한 결과를 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 추가적인 종속 변수인 속도에 따른 응답력을 나타내는 유압 완충기 모델을 고려할 필요가 있다.

4.2 완충 시스템 모델 2

먼저 소개된 완충 시스템 모델 1의 경우, 유압 완충기가 변위에만 의존하지 않는 특성을 보이는 Fig. 6의 결과를 잘 반영한다고 볼 수 없다.

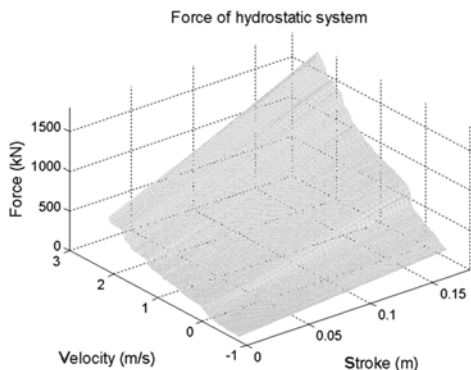


Fig. 14 Force response of hydraulic system according to speed and stroke

Fig. 8에 나타난 고무 완충기의 경우 작용하는 압축력이 변위에 비례한다는 기본 가정을 적용하여도 해석이 가능할 수 있으나 유압 완충기의 경우 응답력이 변위에만 의존하는 함수로 표현하기에는 다소 어렵다는 것에 착안하여 속도와 변위의 함수로 표현되는 유압 완충기 모델을 적용하였다. 유압 완충기의 경우 Fig. 14와 같이 속도와 변위에 관한 함수로 그 응답력을 표현할 경우 충돌 실험의 결과를 잘 표현할 수가 있다.

다만 변위에만 의존하는 고무 완충기와 변위 및 속도에 의존하는 유압 완충기를 직렬로 연결하기 위해 고무 완충기와 유압 완충기의 순간적인 변위가 결정될 수 있도록 해석을 위한 자유도가 추가되어야 한다. 이를 위해 다음 Fig. 15와 같이 커플러의 질량을 반으로 나누어 각각의 고무 완충기와 유압 완충기의 연결부에 위치시켰다. 모델 1과 같이 6 km/h로 충돌하는 차량을 해석한 결과가 Fig. 16에 나타나 있다.

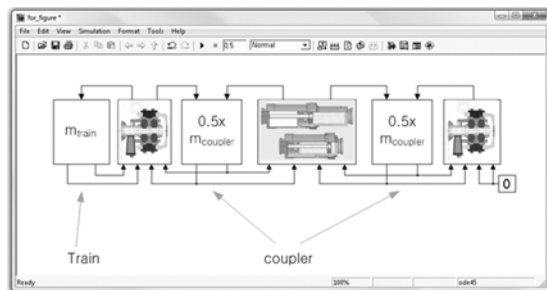


Fig. 15 Train collision model with buffer system model 2

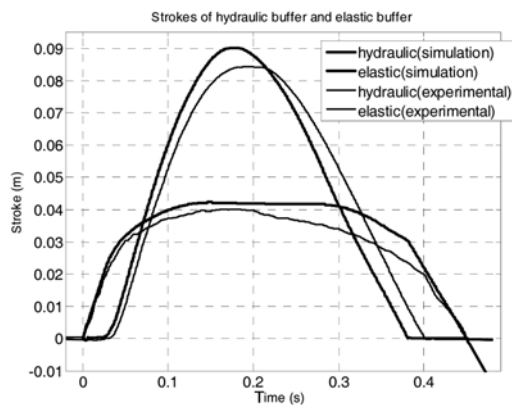


Fig. 16 Comparison of strokes between simulation and experimental with model 2 when train speed is 6.0 km/h

Fig. 16의 결과를 보면 시뮬레이션을 통해 얻은 유압 완충기와 고무 완충기의 변위가 실제 실험을 통해 얻은 결과와 상당히 유사한 거동을 나타냄을 알 수 있다. 모델 2의 경우, 차량의 마찰 등에 의한 저항은 고려되지 않았는데, 마찰에 의한 운동 에너지의 손실이 고려될 경우 최대 압축 변위가 감소할 것으로 예상된다.

4.3 해석 결과 비교

충돌 실험의 가장 큰 목적 중 하나는 충돌 시 발생하는 최대 압축력을 예측하여 이를 견딜 수 있는 완충 시스템을 개발하는데 있다. 따라서 최대 압축력을 비교함으로써 모델의 타당성을 검증할 수 있다.

Table 1의 해석 결과를 고찰하면 모델 1의 경우 최대 압축력을 모사하는데 적절하지 않은 시뮬레이션 모델이라는 결론을 도출할 수 있다. 기존의 시뮬레이션의 경우 고무 완충기를 변위에 의존하는 함수로만 표현하여 충돌을 해석할 때, 실제의 충돌 결과와 상당히 근접한 결과를 보여줄 수 있을지라도 유압 완충기의 경우, 단순히 변위에 의존하는 함수만으로 표현하기에는 부족하다. 이는 유압 완충기의 경우, 그 물리적 현상이 댐퍼의 역할을 하기 때문에 이를 적절하게 표현할 수 있는 모델이 필요한 것으로 생각해 볼 수 있다. 단적으로 모델 1의 경우 저속 충돌에서는 유압 완충기가 작동하지 않고, 고무 완충기만으로 모든 충격을 흡수하는 것으로 구성되어 있으나 실제 충돌 실험에서는 작은 속도의 충돌에서도 유압 완충기가 작용한 것으로 나타나고 있다. 한편, 속도에 관한 변수를 적용한 유압 완충기 모델을 적용한 모델 2의 경우에도 일반적으로 충돌 실험 결과에 비해 상대적으로 큰 압축력이 해석되는 결

Table 1 The maximum forces for the collision according to the speed of moving trains

Speed (km/h)	Force (kN)		
	Experimental	Model 1	Model 2
2.7	218	382(+75%)	232(+6%)
3.4	254	502(+97%)	282(+11%)
3.6	273	541(+98%)	298(+9%)
6	462	816(+76%)	511(+10%)
7.6	610	837(+37%)	690(13%)
10	937	875(-7%)	1043(11%)

과를 얻을 수 있다. 이러한 시뮬레이션 상의 오차를 보상할 수 있는 추가적인 고려가 필요할 것으로 생각된다.

4.4 마찰력의 고려

일반적으로 철도에 작용하는 마찰력은 차량의 자중에 의한 구름 저항, 등판 저항, 공기 저항으로 구분할 수 있으나 충돌 실험의 상황을 고려할 때, 등판 저항과 공기 저항은 상대적으로 미약하므로 자중에 의한 구름 저항을 추가적인 저항으로 시뮬레이션에 적용해 볼 수 있다.

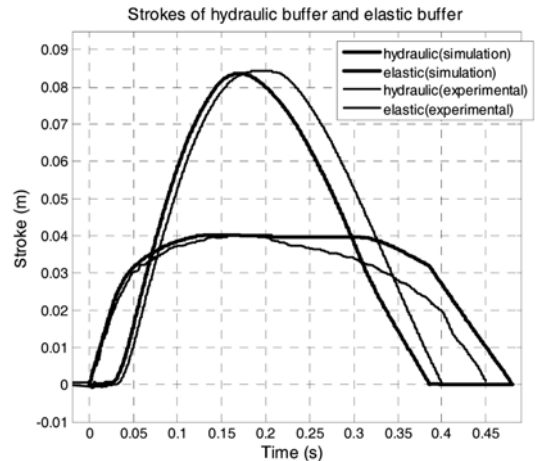


Fig. 17 Strokes of buffer system when considering friction resistance

Fig. 17은 모델 2를 사용했을 경우, 마찰을 고려한 차량의 충돌 해석 결과이다. Fig. 17의 압축 변위는 기존의 모델 2에 비해 실험 결과에 보다 근접한 결과를 나타내고 있다.

Table 2 The maximum forces for the collision according to the speed of moving trains when friction resistance is considered

Speed (km/h)	Force(kN)		
	Experimental	Model 2 with friction	error(%)
2.7	218	215	-1.4
3.4	254	256	0.8
3.6	273	271	-0.7
6	462	478	3.5
7.6	610	649	6.3
10	937	1014	8.2

그러나, 해석에 수행된 마찰 계수는 실험 결과로부터 얻어낸 마찰 계수가 아닌, 시뮬레이션 결과를 실제 결과와 근사시킬 수 있는 0.1을 사용하였는데, 이 값은 일반적으로 철도 차량에 적용되는 0.0002~0.001의 마찰 계수보다는 상대적으로 매우 큰 범위에 있는 값이며 이렇게 추정된 시뮬레이션은 범용성을 보장하지 못한다. 시뮬레이션의 정확성을 높이기 위해 고려될 수 있는 것으로, 시뮬레이션에서 실제 실험의 충돌보다 주기가 짧은 충돌 거동을 보이는데 이로 인해 차량의 운동 에너지를 흡수하는 시간이 짧아지고 최대 응답력이 다소 높게 나온 것으로 해석된다. 이렇게 해석되는 이유로 각 완충기의 강성이 다소 작게 설계되었을 수 있는데 특히, Fig. 8의 고무 완충기의 특성 곡선을 Fig. 11로 나타낼 때, 고속 충돌의 경우 실제 특성보다 작은 기울기를 가져 그 강성을 적절하게 표현하고 있지 않다고 볼 수 있다. 즉, 상대적으로 빨리 압축될 때, 고무의 강성이 줄어드는 경향이 있는데 이로 인해 같은 변위에 도달할지라도 고무가 흡수할 수 있는 에너지가 감소하고 결과적으로 전반적으로 전달되는 응답력에 있어 시뮬레이션 결과가 상대적으로 높게 나오는 현상을 보이는 것으로 생각된다. 이를 보완하기 본 논문에서 해석한 동일한 완충 시스템을 해석할 때, 과도한 구름 저항을 등가 적용하여 Table 2와 같이 실제 충돌과 유사한 결과를 얻을 수 있는 가능성이 있지만 근본적으로 시뮬레이션이 실제 충돌을 반영하기 위해 수정된 모델이 필요할 것이다. 일반적으로 충돌 실험이 10km/h 미만의 저속에서 수행되는 것을 감안하여 실험 시, 속도의 감소 등을 정밀하게 측정하여 보다 정확한 마찰 모델을 시뮬레이션에 적용하고 다양한 조건에서 각 완충기의 압축 속도 및 변위에 따른 응답력 특성을 좀 더 정밀하게 얻는다면 정교한 시뮬레이션이 가능할 것으로 생각된다.

5. 결론 및 향후 과제

본 논문에서 철도 차량의 충돌 시, 그 충격을 흡수

하는 완충기 시뮬레이션 모델을 구성하는 두 가지 방안에 대한 비교를 수행하였다. 기존의 저속 충돌 조건에서 사용되었던 고무 완충기의 경우 변위만의 함수로 그 응답력을 구현하는 방법이 사용되었던 반면, 이러한 방법을 유압 완충 장치로 그대로 확장할 경우 그 해석 결과가 실제 실험 결과가 큰 차이를 보일 수 있음을 보이고, 개선된 유압 완충기 모델링 기법을 제시하였다. 결론으로 유압 완충기의 경우 변위 및 속도에 의존하는 함수로 그 응답력을 표현할 경우 실제 충돌 시의 거동과 10% 내외로 근접한 해석 결과를 보여줄 수 있으며, 철도 차량의 마찰 모델을 적용하여 실험 값과 보다 근접한 결과를 도출할 수 있음을 보여주었다. 향후 정밀한 마찰 모델과 완충 특성 곡선을 적용하면 보다 실제에 근접한 해석 결과를 얻을 수 있고, 다량의 객차 충돌 해석에도 활용할 수 있을 것으로 생각한다. 이를 바탕으로 막대한 비용이 소요되는 충돌 실험 대신 시뮬레이션 해석으로 완충 시스템의 성능 해석 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각한다.

References

- 1) K. N. Kim, T. H. Ko and Y. I. Park, "System Design of Buffer Coupling of Tilting Train for Improving the Crash Energy Absorbing Capacity," Proceeding of KSME Conference, pp.545-550, 2006.
- 2) Y. H. Kim, K. N. Kim, H. M. Jang and Y. I. Park, "Modeling of Coupling Device for Crash Analysis of an Electric Vehicle," Proceeding of the KSR Conference, pp.640-645, 2004.
- 3) H. M. Jang, N. W. Kim, S. W. Yang, K. N. Kim and Y. I. Park, "Crash Simulation of Train Buffer Coupling," Proceeding of KSAE Conference, pp.2008-2014, 2007.
- 4) Schaku Co., Incheon Airport EFG2 with Rubber 40-3538.07-8 Revised Simulation, 2003.