

자기부상열차 현수장치용 공기스프링의 설계와 성능 시험

The design and performance estimation of air springs for the suspension of Maglev

이재익 * 우이환 * 김국진 ** 김영구 ***
Lee, Jae-ik Woo, Yi-wan Kim, Kuk-jin Kim, Young-gu

ABSTRACT

The performance of secondary suspension is one of the most important characteristics of railway vehicles in the regard of vibration and riding comfort. For this reason, the suspension shall be designed to absorb vibration energy effectively and to avoid the resonance which would be occurred by the vibration of the bogies in driving. The main factor of characteristics of suspension is spring coefficient of air spring, and this paper shows how to achieve the desired coefficient and the results of the tests of new air springs.

1. 서론

자기부상열차의 2차 현수장치에 적용되는 공기스프링은 차체 하부 플로트 하면과 대차 프레임 상면사이에 설치되어, 차체와 대차 사이의 수직 및 횡방향 (Lateral) 탄성 및 우수한 횡적 롤링 특성으로 승차감을 향상시키고, 각종 및 차체에 의해 작용하는 하중을 지지하고 견인력과 제동력을 전달함과 동시에 차량 주행의 안정을 유지한다.

공기 현수장치는 공기압을 발생하는 압축기, 공기의 공급을 원활하게 하기위한 공기통, 공기 스프링의 스프링 상수 제어를 위한 보조 공기통, 하중의 증감을 감지하고 Air spring 내압을 조정하는 Levelling valve 및 각종 밸브로 구성된다.

현수장치에 Air Spring의 적용함으로 기존의 코일 스프링에 비해 초기 장착 및 유지 보수 비용이 상대적으로 크지만, 스프링의 유연함으로 인해 우수한 승차감을 제공할 수 있으며, 공기 스프링의 제적을 변화 시켜 스프링 상수를 제어할 수 있고, 또한 하중변화에 대응한 공기압 제어를 통해 일정한 고유진동수를 유지할 수 있으며, 차고 제어에 의해 차량의 높이를 일정하게 유지할 수 있다. 또한 대차와 차체간에 직접적인 금속의 접촉이 없으므로, 구조 전달 소음과 진동이 상당히 절연되는 등 다양한 이점 등으로 인하여 철도차량에 공기 현가계의 적용이 일반화되어 있다.

본 연구는 산자부 중기기결과제로 수행중인 자기부상열차 실용화 모델 개발의 세부 과제중의 하나인 2차 현수장치용 공기스프링의 설계 및 시험에 관한 내용이다. 이 연구를 통하여 공기스프링의 설계 및 시험 기술을 배양하고 제작 기술을 향상시켜, 지금까지 해외에 의존하던 공기스프링의 공급을 국산화하여 국내 산업 발전에 기여하고자 한다.

* (주)로템 선임연구원, 비회원

** (주)로템 수석연구원, 정회원

*** (주)유일엔시스 선임연구원, 비회원

2. 공기스프링의 강성 계산식

2.1 수직 강성

그림 1은 1단 벨로우즈의 종단면을 나타내었다. 이 벨로우즈가 축방향으로 x 가 되는 변위를 가진 경우를 고려한 것이다.

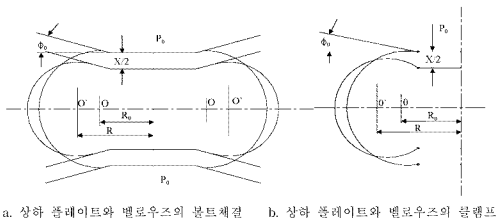


그림 1. 1단 벨로우즈의 축 방향변형

고무막은 전단 방향의 힘을 수용하지 못하기 때문에 변형 전의 유효 직경은 팽창의 정점을 연결하는 원의 직경, 즉 직선 $\overline{OO'}$ 와 같다. 변형진후에 있어서 자오선 단면에 경우 고무막의 길이는 변화하지 않는 것이라고 가정한다면 변형후의 유효 직경은 직선 $\overline{O'O''}$ 로 된다. 기하학적인 계산을 행하면 변형후의 유효 직경은 상하 플레이트와 고무막과의 체결 방법이 볼트 형식이는 Clamp식의 경우에서도 다음식으로 주어진다.

$$D = D_0 + \frac{(\frac{\pi}{2} + \phi_0) \cos \phi_0 - \sin \phi_0}{(\frac{\pi}{2} + \phi_0) \sin \phi_0 + \cos \phi_0} x \quad (2.1)$$

ϕ_0 가 작을 때에는 근사적으로

$$D = D_0 + \frac{\frac{\pi}{2}}{1 + \frac{\pi}{2} \phi_0} x \quad (2.2)$$

따라서 스프링의 유효단면적은 근사적으로

$$A = A_0 + \frac{D_0}{2} \frac{\frac{\pi^2}{2}}{1 + \frac{\pi}{2} \phi_0} x = A_0 \left(1 + \frac{\pi}{1 + \frac{\pi}{2} \phi_0} \cdot \frac{x}{D_0} \right) \quad (2.3)$$

일반적으로 Air Spring의 하중 P 는 다음식으로 주어진다.

$$P = (p - p_a) A \quad (2.4)$$

식 중에 p 는 절대 내압, P_a 는 대기압을 나타낸다.

내압과 내용적과의 사이에는

$$pV^\gamma = p_0V_0^\gamma \quad (2.5)$$

로 되는 관계가 있다. 단 γ 는 Polytopic 지수로 정적 변화 즉 등온변화 일 때는 1.0, 동적변화 즉 단열변화 일 때는 1.4의 값을 취한다.

또 변위 x 에 의한 내용적 V 의 변화는 x 가 작은 곳에서는 근사적으로

$$V = V_0 - A_0x \quad (2.6)$$

따라서 식 (2.4)로부터

$$P = \left\{ p_0 \frac{1}{\left(1 - \frac{A_0}{V_0}x\right)^\gamma} - p_a \right\} A \quad (2.7)$$

벨로우즈가 n 단의 경우에도 (2.7) 식은 성립한다. n 단 벨로우즈 적용시 (2.3) 식은 x/n 로 되기 때문에 하중과 변위 관계식은

$$P = \left\{ \frac{p_0}{\left(1 - \frac{A_0}{V_0}x\right)^\gamma} - p_a \right\} A_0 \left(1 + \frac{\pi}{n} \frac{1}{1 + \frac{\pi}{2}\phi_0} \frac{x}{D_0}\right) \quad (2.8)$$

(2.8) 식을 x 에 대하여 미분 한다면 정수가 구하여 진다. x 가 작은 범위에서는 계산에 의해

$$k = \gamma \frac{p_0}{V_0} A_0^2 + \frac{\pi (p_0 - p_a) A_0}{n \left(1 + \frac{\pi}{2}\phi_0\right) D_0} \quad (2.9)$$

위 식 중 V_0 는 표준 높이에 있어서 벨로우즈 내용적 V_s 와 보조 탱크의 내용적 V_t 의 합이므로 V_t 를 크게 하는 것에 의해 k 를 작게 할 수 있다. 또한 n 및 ϕ_0 를 크게 하면 k 를 작게 할 수 있는데 어느 것이든 횡방향으로 탄성적 불안정을 발생할 원인이 되기 때문에 너무 크게 만들기는 어렵다.

2.2 수평 강성

1단 벨로우즈의 전단 스프링 정수를 구하기 위해서는 고무막에 코드가 들어가 있기 때문에 이빙상의 막을 고려하고 이것에 의해 구성된 원형상의 전단 변형에 관한 탄성역학의 문제를 해결한다. 이것을 풀기 위한 가정은 다음과 같다.

1) 전단 변형할 때 변형 전후에 있어서 축 방향의 높이 및 내부 재적은 변하지 않는다.
2) 축에 적각인 단면은 변형시 축의 직각을 유지하여 수평으로 이동하고 또한 변형 후에도 전과 동일한 직경의 원을 유지한다.

3) 코드의 Bias 각은 고무막 위에 어떠한 곳에 있어서도 횡선에 대하여 같은 각에 있다.

4) 횡선 단면에 경우 코드의 총수는 고무막 위의 어떠한 장소에서도 일정하다.

이들의 가정하에 이것을 풀면 스프링 정수는 내압에 관계되는 항과 주로 코드의 탄성에 관한 항의 합으로 되는 것을 알 수 있다. 이렇게 하여 전단 스프링 정수는 앞의 그림 1에 나타낸 것과 같은 Air Spring 에 대하여 근사적으로 다음과 같이 주어진다.

$$k_s = n_c \frac{R_0 + \rho_0}{\rho_0} aE \frac{1}{4} \sin^2 2\Psi \frac{1}{1 + \frac{2\phi_0}{\pi}} \quad (2.10)$$

식 중 n 는 적도선 부근에 있어서 코드에 직각 방향 단위폭당 코드의 수(Cord End수)와 코드 플라이수의 곱, R_0 는 공기스프링의 유효반경, p_0 는 벨로우즈의 곡률, θ 은 적도선에 대한 코드의 각도(Bias 각), αE 는 코드 1개당의 단면적과 영률의 곱(코드의 강도)을 나타낸다.

(2.10)식은 주어진 변위가 미소한 부분에서의 스프링 정수, 즉 하중-변위특성의 상승 부분에 정사를 준 것이다. 변위가 크게 되면 Bias로 부착된 코드의 한쪽, 최초부터 받고 있는 내압에 의한 장력에 더욱더 장력을 받고, 코드의 다른 한쪽은 내압에 의한 장력이 벨로우즈의 변형에 따라 점차로 감소하여 끝부분에서는 장력 0에 달한다. 이렇게 되면 코드는 압축력을 유지할 수가 없기 때문에 느슨해지기 시작하고 그 결과 고무막 표면에 주름이 발생하게 된다. 또한 실제 코드의 하중변위 특성은 코드의 재료에 의해 비선형을 나타내고(레이온, 나일론), 또한 히스테리시스를 그리며, 이러한 비선형성이 조합되어서 실제의 1단 벨로우즈의 적단 방향의 하중-변위 특성도 직선으로 되지 않고 일반적으로 변위에 따라 스프링 정수가 내려가는 경향을 나타내고, 또한 히스테리시스를 갖는다. 따라서 식(2.10)은 변위가 커질수록 오차가 커지게 된다.

3. 시제품의 형상 및 사양

자기부상열차에 적용되는 공기스프링은 그림 2와 같이 벨로우즈 형식이 대부분 적용되고 있고, 본 개발에서는 벨로우즈 형식을 선정하였으며, 주요 제원은 표 1과 같다.

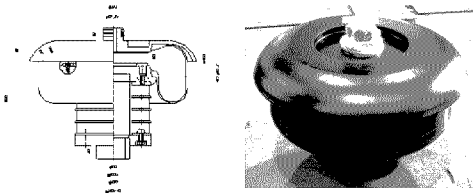


그림 2. 공기스프링의 형상

표 1. 공기스프링 사양 (목록치)

항목		값
공기스프링 높이 (정상 상태)		300 mm
Bellows 유효경 (정상 상태)		356 mm
유효 단면적		99,538 mm ²
하중 조건	Tare	14,700 N
	Full	31,000 N
	Crushed	46,500 N
내압	Tare	1.8 bar
	Full	3.1 bar
	Crushed	4.7 bar
스프링상수, 수직	Tare	60 kN/m
	Full	92 kN/m
	Crushed	125 kN/m
스프링상수, 수평	Tare	74 kN/m
	Full	70 kN/m
	Crushed	63 kN/m
공기스프링 체적 (부가체적 포함)		77,000 cm ³

4. 강성 시험 및 결과

4.1 수직 강성

공기스프링의 강성은 표준 높이 상태에서 각 공기압을 삽입 후 밀봉한 상태에서 수직 방향으로 하중-변위를 측정하였다. 그림3은 본 시험의 결과를 나타낸다.

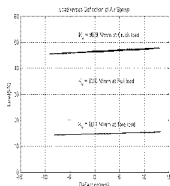


그림 3. 수직 강성 시험 결과

설계상의 목표치와 시험을 통해 얻어진 실측치를 비교하면 다음 표 2 와 같다.

표 2. 공기스프링 수직 강성

수직 강성	Tare load	Full load	Crush load
목표치	60 kN/m	92 kN/m	125 kN/m
실측치	60.1 kN/m	83.6 kN/m	96.9 kN/m

시험결과에서 알 수 있듯이 공차하중(Tare load) 에서는 설계치와 유사한 스프링상수가 나왔으며, 하중이 커질수록 오차가 커짐을 알 수 있다. 다만 실제 차량 주행시에는 만차중량(Full load) 보다 작은 하중이 가해지게 되므로, 본 공기스프링을 실제 차량에 적용하기엔 부리가 없을 것으로 판단된다.

4.2 수평(횡방향) 강성

공기스프링의 강성은 표준 높이 상태에서 각 공기압을 삽입 후 밀봉한 상태에서 수평방향으로 하중-변위를 측정하였다. 그림 4는 시험의 결과를 나타내고 있다.

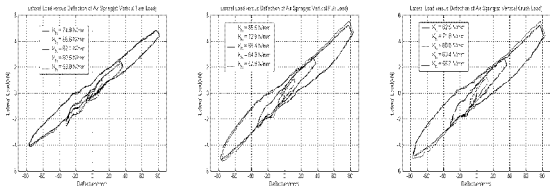


그림 4. 수평 강성 시험 결과

설계상의 목표치와 시험을 통해 얻어진 실측치를 비교하면 다음 표 3과 같다.

표 3. 공기스프링의 수평 강성

수평 강성	Tare load	Full load	Crush load
목표치	74 kN/m	70 kN/m	63 kN/m
실측치	74.8 kN/m	85.5 kN/m	82.5 kN/m

시험 결과에서 나타난 바와 같이 수평강성의 경우 수직강성과는 달리 하중과의 상관관계가 일정하지 않음을 알 수 있다. 이는 수직강성이 주로 공기의 압력에 의해 얻어지는데 비해 수평 강성의 경우 고무 및 내부의 코드의 탄성으로부터 얻어지므로, 비선형 거동의 요인이 많음에 그 원인을 찾을 수 있다. 다만 수직 강성 검토시와 마찬가지로 실제 차량에서 가해지는 하중 영역에서는 필요한 수평 강성과 유사한 성능을 가지므로 차량에의 적용에는 무리가 없을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구를 통하여 자기부상열차에 적용될 공기스프링에 대한 이론적인 접근을 통해 공기스프링의 특성을 이해하고 설계 기술을 습득할 수 있었다. 그리고 시제품의 제작 및 시험을 통하여 제작된 공기스프링의 성능을 확인하고 적용 가능 여부를 판단하였다. 본 공기스프링의 수직 및 수평 강성 시험 결과를 검토하였을 때 본 공기스프링은 설계치와 유사한 성능을 가진 것으로 확인되어 실제 차량에 무난히 적용할 수 있는 성능을 가진 것으로 판단되었다.

또한 향후 계속되는 연구를 통하여 공기스프링의 여러 가지 성능, 즉 주행중 진동특성, 최대 변위, 수명 및 신뢰도 등을 향상시키고 검증할 수 있는 기술을 습득하여, 국내 공기스프링 제작 기술을 향상시켜 산업 발전에 기여하도록 한다.

참고 문헌

1. 김완부 외 (2002), "철도차량 현가장치 방진고무 부품의 신뢰성 평가 연구", 한국기계연구원
2. 일본 방진고무연구회 (1975), "신판 방진고무", 일본철도차량공업회
3. ContiTech (1995), "Test Report of air spring system"
4. (주)유일엔시스 (1999) "Air Spring, LRB, Flexible Connector 기술자료"