

철도차량용 공기스프링의 특성 예측 및 평가

Prediction and Evaluation of Characteristics of Air Spring for Railroad Vehicle

김완두*, 허신*, 김석원**, 김영구**
Kim, Wan-Doo* Hur, Shin* Kim, Suk-Won** Kim, Young-Gu**

ABSTRACT

An air spring which is a part of the railroad vehicle suspension system is used to reduce and absorb the vibration and the noise. Main components of the air spring are a cord reinforced rubber bellows, a upper plate, a lower plate and a stopper rubber spring. The characteristics of the air spring which are the load capacity, the vertical and the horizontal stiffness are depended on the configuration of rubber bellows, the angle of cord and the mechanical properties of cord. The computer simulation using commercial finite element analysis codes are executed to predict and evaluate the load capacity and the stiffness. The appropriate shape and cord angle of the air spring are selected to adjust the required performance of the air spring. Several samples of the air spring are manufactured and experimented. It is shown that the results by computer simulation are in close agreement with the test results.

1. 서론

철도 차량 2차 현가장치 부품 중의 하나인 공기스프링은 차량 운동에 수반되는 제반 진동·소음 및 전달 하중 등을 완화시켜 주며, 차량의 주행 안정성 및 승차감 향상에 중요한 역할을 수행하는 부품이다. 공기스프링은 외부 하중 변화에 따라 레벨링 밸브를 통해서 압력이 조정됨으로써 하중에 관계없이 자동 높이 제어가 이루어지며 지지 하중에 관계없이 모든 조건에서 동일한 승차감을 느낄 수 있는 특징을 가지고 있다^[1]. 공기스프링은 코드로 강화된 고무벨로우즈에 채워진 공기 압력을 이용하여 하중을 지지하고 진동을 감쇠시켜 준다. 주요 세부 구성부품은 상판, 고무벨로우즈, 하판, 보조 고무스프링(Stopper)등이다. 고무벨로우즈의 내부에는 고무보다 탄성계수가 훨씬 큰 보강코드가 삽입되어 있는 복합재료 형태를 띠고 있으며, 고무 층과 보강코드로 인하여 이방성과 비선형성을 갖게 된다. 공기스프링은 내부 압력 변화에 따른 수직지지하중과 수직 및 수평방향의 강성 등이 주요 설계 변수로서, 고무벨로우즈의 형상, 코드의 각도, 고정 부위인 상·하판의 모양에 따라 특성이 바뀌게 된다^[2,3].

본 논문에서는 비선형 유한요소해석 프로그램인 MARC^[4]와 ABAQUS^[5]를 이용하여 고무벨로우즈의 형상과 코드각도 변화에 따른 수직지지하중, 수직 및 수평방향 정·동적 강성특성을 예측하였으며, 실제 시제품 제작과 시험을 통하여 여러 가지 설계 변수 변화에 따른 특성을 비교·평가하여, 최종적으로 설계 요구조건에 맞는 공기스프링의 주요 설계 변수를 결정하였다.

* 한국기계연구원, 정회원

** 유일산업(주)

2. 공기스프링의 구조 및 설계 변수

공기스프링은 일반적으로 컨볼루션(Convolution)형, 슬리브(Sleeve)형, 롤링로브(Rolling Lobe)형, 다이어프램(Diaphragm)형, 벨로우즈(Bellows)형 등으로 나눌 수 있다^[1].

본 논문에서는 Fig. 1에서와 같은 형상을 지닌 전동차에 흔히 사용되는 벨로우즈형 공기스프링을 연구 대상으로 하였으며, 주요 특성은 수직지지하중, 수직 및 수평방향 강성 등이다. 여러 가지 해석 및 시험 등을 통하여 설계 변수의 영향을 규명하고 최종적으로 요구되는 특성을 맞추어 내게 된다. 공기스프링의 특성에 영향을 주는 주요 변수는 아래와 같으며 본 연구에서 이들의 영향을 유한요소 해석과 실제 시험을 통하여 검토하였다.

- ① 고무의 비선형 특성
- ② 고무 벨로우즈의 코드 각도 및 코드의 기계적 특성치
- ③ 고무 벨로우즈의 기하학적 형상 (단면 길이)

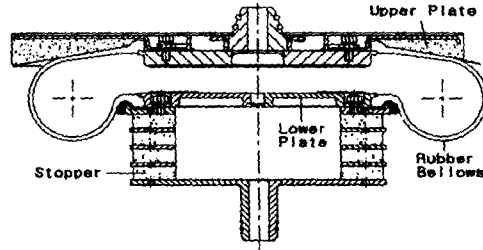


Fig. 1 벨로우즈형 공기스프링의 형상

3. 공기스프링의 유한요소해석

3.1 고무 벨로우즈의 모델링

고무벨로우즈의 내층과 외층은 NR과 CR이 혼합된 고무 층이며, 중간에는 나일론 보강코드 4점 (4 ply)이 접착되어 있다. 고무 벨로우즈는 해석시간 단축 및 해석의 용이를 위하여 수직방향 변형 해석 시에는 2차원 축대칭 요소로 모델링하였으며, 요소 형태는 full-Herrmann formulation quad 82(node 4)을 사용하였다. 보강코드는 축대칭 rebar 요소(axisymmetric rebar element)로 모델링하였으며 요소 수는 570개, 절점수는 530개이다. 수평방향 변형 해석은 2차원 축대칭 요소의 사용이 불가능하여 3차원 쉘 요소를 이용하여 모델링하였다. Fig. 2와 3은 축대칭 유한요소모델과 3차원 모델을 보여준다. 공기스프링의 강성과 댐핑에 영향을 주는 보조 공기통도 모델링에 포함시켰으며, 용량은 45 l이다. 공기스프링의 상판과 하판은 rigid body로 모델링하였다.

벨로우즈의 비선형 재료상수는 인장, 압축 및 전단 시험을 통하여 구한 응력-변형률 선도를 커브피팅하여 결정하였으며, 3항 Ogden 상수를 이용하였다^[2]. 보강코드의 재료는 나일론 수지로서 탄성계수는 186 kg/mm^2 이며 포와송의 비는 0.3의 값을 사용하였다. 벨로우즈의 보강코드 각도는 중심축을 기준으로 10° 에서 30° 까지 변화시켰으며, 상판과 하판에 장착되는 bead wire 부위는 일반적인 철강재료로 모델링하였다.

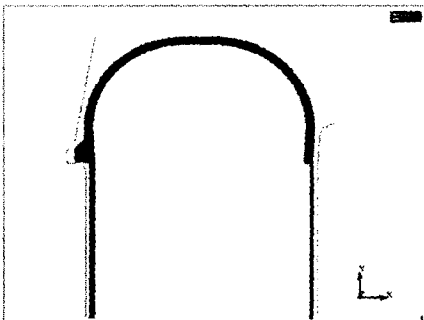


Fig. 2 축대칭 유한요소모델

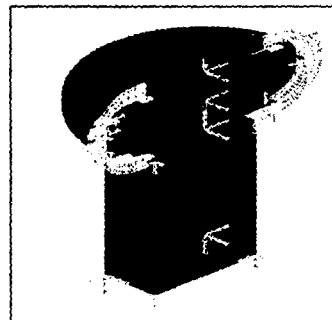


Fig. 3 3차원 유한요소모델

3.2 공기요소의 모델링

일반적으로 공기스프링이 수직 방향 하중이나 수평 방향 하중을 받을 경우 공기스프링의 내용적이 변하게 되며 이에 따라 공기스프링내의 압력이 변하게 된다.

일반적으로 공기스프링의 지지하중, P 는 다음의 식으로 주어진다.

$$P = (p - p_a)A \quad (1)$$

단, p : 절대 내압, p_a : 대기압, A : 유효 단면적이다.

공기스프링 내 공기를 이상기체로 가정하면 다음 식이 성립한다.

$$pv^\gamma = p_a v_a^\gamma \quad (2)$$

여기서, v 와 v_a 는 절대내압과 대기압 하에서의 공기부피이며, γ 는 폴리트로픽 지수로 정적변화 즉 등온은 변화 시 1.0, 동적 변화 즉 단열변화 시 1.4의 값을 취하게 된다. (2)식에서 볼 수 있는 바와 같이, 고무 벨로우즈의 기하학적인 형상이 변함에 따라 공기스프링의 지지하중 및 수평·수직방향 강성도 변화하게 된다. 따라서 지지하중과 수직·수평 방향 강성을 평가하기 위해서는 (2)식을 이용하여 벨로우즈의 기하학적인 형상 변화에 따른 내부 부피를 구하고 이 부피를 이용하여 내부 압력의 변화를 구하여야 한다. 이 계산은 주어진 압력 하에서 부피를 계산한 다음 (2)식을 만족하는 압력을 계산하여 전 단계의 압력과 차이가 무시할 수 있을 정도로 작을 때까지 반복 계산을 수행하여야 한다. 위와 같은 일련의 계산은 MARC에서는 User Subroutine을 통해 수행되며^[6], ABAQUS에서는 캐비티 요소를 이용하여 수행된다^[7].

4. 공기스프링의 유한요소 해석 결과

4.1 수직방향 해석

공기스프링의 해석은 크게 3가지 단계로 나뉘어 수행된다. 1번째 단계는 공기스프링의 초기 장착까지의 해석이며, 두 번째 단계로 내부 압력이 가해지는 단계, 그리고 마지막으로 수직 및 수평 방향의 강성 해석 단계로 나누어진다. Fig. 4에서 6은 축대칭 모델을 이용한 3가지 단계의 변형 거동을 보여주고 있으며, 이때 보강 코드각도는 30°이다.

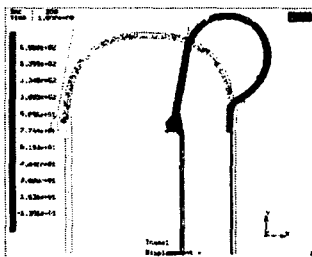


Fig. 4 초기 장착 시 모습

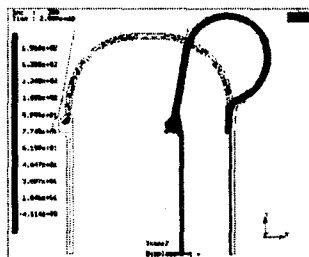


Fig. 5 3 kg/cm² 작용 시 모습

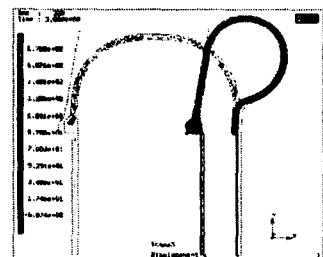


Fig. 6 수직방향 20mm 압축 시 모습

Fig. 7에서는 내부 압력의 변화에 따른 수직지지하중 값을 보여주며 내부 압력 1, 2, 3, 4, 5 kg/cm² 하에서 MARC와 ABAQUS를 이용한 해석 모두 거의 유사한 값을 나타내었다. 해석에서 구한 값들은 실제 시제품을 이용하여 측정된 값보다 약간 크게 나오는 경향을 볼 수 있었다. 그 원인은 실제 시험 시 상당히 큰 변형이 발생되는 상판과 보조스프링의 변형을 해석에서는 무시했기 때문이며, 이의 영향을 고려하면 해석에서 구한 값과 시험에서 구한 값이 근사적으로 잘 일치한다.

4.2 고무 물성 변화의 영향

고무 물성 변화의 영향을 알아보기 위하여 두 가지 다른 고무 재료의 물성을 이용하여 수직지지하중 해석을 수행하였다. Table 1에서 보는 바와 같이 고무의 경도가 10° 정도 차이가 나도 수직지지하중에는 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

Table 1 고무 물성 변화에 따른 수직지지하중 (코드각도 30°)

고무재질	수직지지하중 (3기압)
-고무 경도 50°	7315 kg
고무 경도 60°	7310 kg

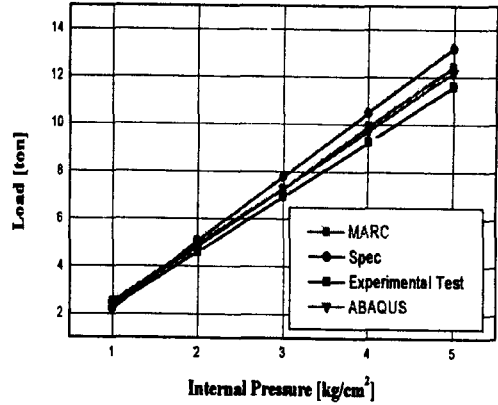


Fig. 7 내부 압력 - 수직지지하중 관계 선도

4.3 보강코드의 영향

공기스프링의 보강 코드는 공기스프링의 특성을 좌우하는 주요 설계 변수로 알려져 있으나, 정량적으로 어느 정도 영향을 끼치는지는 단순한 수식으로 표현되어 있지 않다^[1, 2, 3]. 보강 코드의 주요 설계 변수는 탄성계수, 직경 및 성형각도 등이며, 이들의 영향을 여러 가지 해석을 통하여 분석·검토하였다. Table 2는 보강코드의 여러 가지 변수, 즉 코드 탄성계수(100, 186 kg/mm²), 코드 직경 (0.55, 0.65 mm), 및 코드 각도(10°, 30°) 변화에 따른 수직지지하중과 수직 및 수평 강성 값을 보여준다. 각각의 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 코드의 탄성계수가 커지면 수직지지하중과 수직강성은 거의 변화가 없으나 수평강성은 커진다.
- 2) 코드 직경이 커지면 수직지지하중과 수직강성은 큰 변화가 없으며, 수평강성은 현저히 커진다.
- 3) 코드각도가 커지면 수직지지하중과 수직강성은 감소하는 경향을 나타내며, 수평강성은 현저히 커지는 경향을 나타낸다.

Fig. 8에서 15는 보강코드 각도, 탄성계수 및 직경 변화에 따른 영향을 도식화한 그림이다.

Table 2 코드 변화에 따른 영향

코드 탄성계수, E	100 kg/mm ²				186 kg/mm ²			
	0.55 mm		0.65 mm		0.55 mm		0.65 mm	
코드 직경, d	0.55 mm	0.65 mm	0.55 mm	0.65 mm	0.55 mm	0.65 mm	0.55 mm	0.65 mm
코드 각도, α	10	30	10	30	10	30	10	30
수직지지하중 (kg)	7086	7040	7128	6910	7032	6966	7016	6942
수직강성 (kg/mm)	38.8	36.3	40.4	36.4	39.0	36.7	39.0	36.8
수평강성 (kg/mm)	3.4	6.9	8.0	18.5	4.6	22.4	11.0	26.6

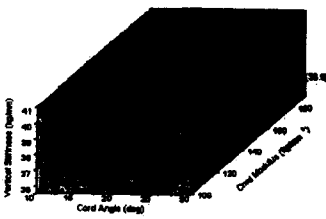


Fig. 8 코드각도와 탄성계수의 영향 (d=0.65mm, 수직강성)

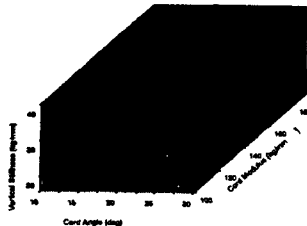


Fig. 9 코드각도와 탄성계수의 영향 (d=0.55mm, 수직강성)

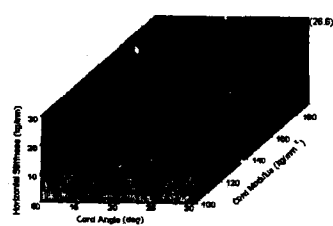


Fig. 10 코드각도와 탄성계수의 영향 (d=0.65mm, 수평강성)

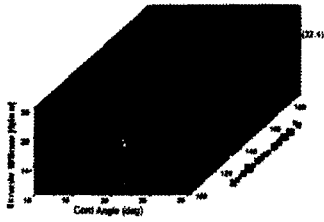


Fig. 11 코드각도와 탄성계수의 영향 (d=0.55mm, 수평강성)

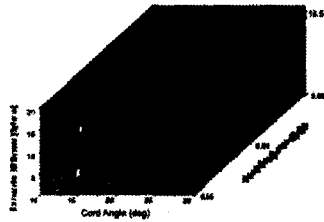


Fig. 12 코드각도와 직경의 영향 (E=100kg/mm², 수직강성)

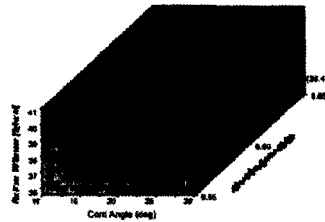


Fig. 13 코드각도와 직경의 영향 (E=100kg/mm², 수평강성)

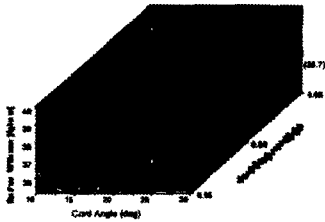


Fig. 14 코드각도와 직경의 영향 (E=186kg/mm², 수직강성)

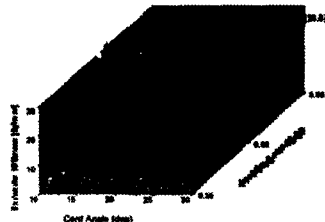


Fig. 15 코드각도와 직경의 영향 (E=186kg/mm², 수평강성)

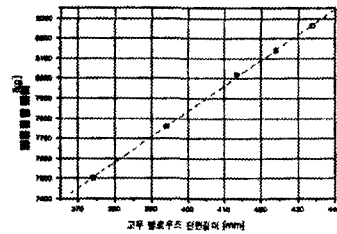


Fig. 16 단면길이 변화에 따른 수직지지하중

4.4 기하학적인 형상 변화에 따른 수직지지하중

앞의 해석 결과로부터 고무 재료의 물성 변화 및 코드의 탄성계수, 직경 및 각도 변화만으로는 공기스프링의 수직지지하중 값을 크게 변화시킬 수 없음을 알았으며, 요구되는 수직지지하중 값을 만족시키기에는 한계가 있음이 드러났다. 좀 더 큰 수직지지하중의 변화를 위해서 공기스프링 벨로우즈의 기하학적 형상, 즉 단면길이를 변화시키는 방안을 고려하여 해석을 수행하였다. 단, 형상 변화의 제한조건으로서 고무 벨로우즈의 초기 금형을 활용할 수 있는 방법을 택하였다. Table 3에서는 여러 가지 변형된 형상의 단면을 지닌 공기스프링의 수직지지하중 값을 비교하였다. 단면 길이가 증가하면 공기스프링의 내용적이 증가하게 되며 이는 곧 벨로우즈의 유효 단면적을 키워주게 되어 지지하중이 증가되는 현상이 나타나게 된다. Fig. 16은 벨로우즈의 단면길이 변화에 따른 수직지지하중 변화를 보여준다.

Table 3 단면길이 변화에 따른 수직지지하중

기하학적 형태	단면길이	수직지지하중
기본 형태	374 mm	7502 kg
l 증가	394 mm	7760 kg
r 증가	398 mm	7762 kg
h 증가	414 mm	8019 kg
l, r 증가	424 mm	8141 kg
l, h 증가	434 mm	8264 kg

5. 공기스프링 시제품 제작 및 특성시험

5.1 시제품 제작 및 시험장치

공기스프링의 주요 구성부품인 상판, 고무벨로우즈, 하판 및 보조공기스프링 등은 각각 제작 금형에 의해 성형된 후 조립·완성된다. 공기스프링의 특성에 큰 영향을 끼치는 고무벨로우즈는 나일론수지재질의 코드를 4층 접합시켰으며, 각 층 사이에 얇은 고무판을 삽입하여 성형하였다. 내층과 외층은 NR과 CR이 혼합된 고무 재질을 사용하였다. 고무벨로우즈는 처음에 원통형 형상으로부터 부풀어짐에 따라 원형 단면에 가까운 성형 후의 모습이 되며 초기 코드각도에 비해 성형 후의 각도는 상당히 커지게 된다. Fig. 17과 18은 상판과 고무벨로우즈 제작을 위한 금형의 모습을 보여준다. 시제품은 벨로우즈의 단면길이와 코드의 직경과 각도를 각각 다르게 제작하였다. Table 4에 각 시제품의 특징과 3 kg/cm² 하에서의 수직지지하중 측정값을 보여준다.

공기스프링의 특성 시험은 50톤 용량의 구조물용 피로시험기에서 실시하였으며, 보조 공기통을 설치하고 시험하였다. 수평강성시험에서는, 상대 운동 면의 마찰력을 최소화하여 측정값의 정확도를 높이기 위하여 직선운동볼베어링을 이용하였다. Fig. 19와 20은 수직과 수평방향 시험 모습을 보여준다.

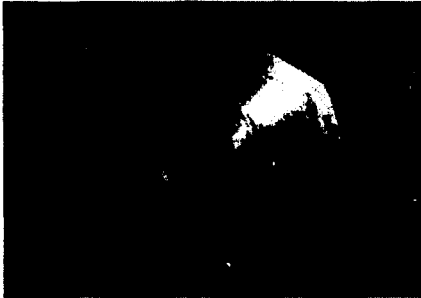


Fig. 17 상판의 제작 금형



Fig. 18 고무벨로우즈의 제작 금형



Fig. 19 수직강성시험 장치

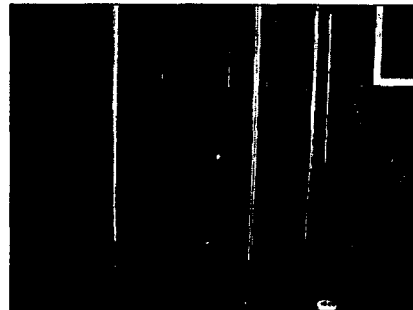


Fig. 20 수평강성시험 장치

Table 4 시제품 구분 및 수직지지하중 (@ 3 kg/cm²)

시편구분	초기코드각도	성형 후 코드각도	단면길이(mm)	코드직경(mm)	수직지지하중(kg)
#1	10°	16°	374	0.65	7325
#2	10°	16°	414	0.65	7750
#3	10°	16°	414	0.55	7500
#4	20°	33°	374	0.65	7150
#5	20°	33°	424	0.65	7600
#6	20°	33°	434	0.65	7750
#7	30°	52°	424	0.65	7000

5.2 특성시험

공기스프링의 시험 방법은 KSR 4001(1985) 및 일본 JRS 17304-1에 규정되어 있다. 기본적인 시험 항목에는 압력시험, 기밀시험, 신축시험, 팽창시험, 고무재료시험, 박리시험, 파괴시험, 및 파괴시험 등이 있으며, 본 논문에서는 특성에 관계되는 시험인 공기압력 변화에 따른 수직지지하중과 수직 및 수평 방향의 정·동적 강성 측정시험을 실시하였다.

- 1) 수직지지하중 : 공기스프링의 여러 가지 요구 성능 항목 중에서 가장 기본이 되는 수직지지하중 측정 결과를 Table 4에 보여준다. 공기스프링 벨로우즈의 단면길이가 길어지고, 코드각도가 작을수록 지지하중이 커지는 경향을 보였으며, 코드직경 변화에는 큰 차이가 나지 않았다. 이러한 경향은 Table 2와 3의 해석 결과의 경향과 잘 일치하였다. Fig. 21은 #3 시편의 압력 변화에 따른 수직지지하중 측정값으로서 압력과 지지하중이 선형적인 관계를 나타내었으며, 설계 요구 조건인 3 bar에서 7700 kg을 만족하였다.
- 2) 수직강성시험 : 수직지지하중 요구 조건이 충족된 #3 시편에 대한 정적 수직방향 강성시험 결과를 Fig. 22에 보여준다. 시험 속도는 동적 영향이 무시할 수 있도록 0.005 Hz로 수행하였다. 정적 수직강성은 3 bar 압력 하에서 38 kg/mm±10%로 규정되어 있으며, 본 제품의 경우 약 39 kg/mm으로서 요구 조건을 만족시켜주었다.
- 3) 수평강성시험 : 수평강성은 정적인 값과 동적인 값을 각각 10 kg/mm 이상과 17 kg/mm±15%로 규정하고 있으며, 정적시험은 0.005 Hz, 동적시험은 1 Hz로 수행하였다. Fig. 23은 3 kg/cm² 하에서의 하중-변위 선도를 보여주며, 정·동적 강성이 각각 13.7 kg/mm, 19.3 kg/mm로서 설계 요구조건을 만족시켜 주었다. Fig. 24는 압력 변화에 따른 정·동적 강성 값을 보여주며, 압력이 올라갈수록 강성 값의 증가가 둔화되는 경향을 나타내었다.

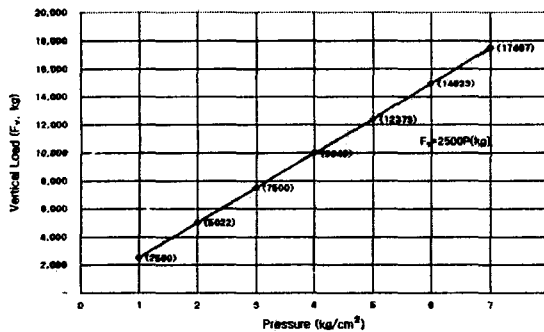


Fig. 21 압력 변화에 따른 수직지지하중

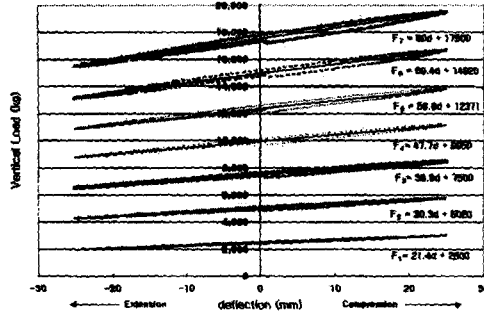


Fig. 22 정적 수직강성시험 결과

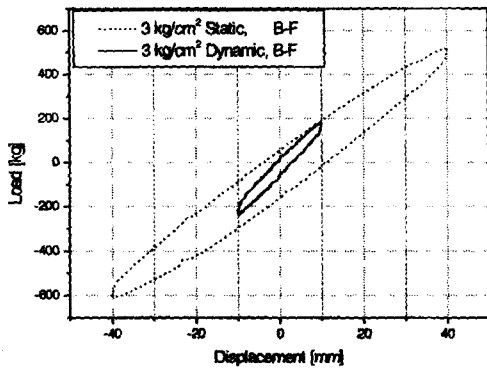


Fig. 23 수평방향 하중-변위 선도

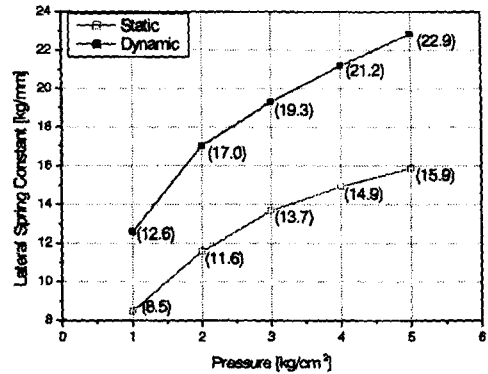


Fig. 24 수평방향 정·동적 강성

5. 결론

본 연구에서는 비선형 유한요소해석을 수행하여 수직지지하중, 수직 및 수평방향 강성 등 공기스프링의 특성을 예측하였으며, 실제 시제품 제작과 시험을 통하여 여러가지 설계 변수 변화에 따른 특성을 비교·평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고무 경도 변화에 따른 수직지지하중 해석 결과로부터 고무 경도 10° 정도의 차이는 지지하중에 큰 영향을 끼치지 않음을 알았다.
- 2) 수직지지하중은 보강코드 직경 변화에는 큰 차이가 없으며 코드각도가 작아질수록 약간 커지는 경향을 나타냄을 유한요소해석 결과와 시험 결과로부터 입증하였다.
- 3) 해석과 시험 결과로부터 고무 벨로우즈의 단면길이 변화는 공기스프링의 수직지지하중에 가장 큰 영향을 미치는 변수로 설계 요구 하중을 맞추기 위한 최우선 설계 변수임을 알았다.
- 4) 고무 벨로우즈의 보강코드 각도가 커짐에 따라 수평 강성은 현저하게 증가하였으나, 수직지지하중과 수직강성은 약간 감소하는 경향을 보였다.
- 5) 상용 비선형 유한요소 프로그램을 이용한 특성 예측과 시제품에 대한 시험을 통하여 설계 요구 조건을 만족시켜 주는 공기스프링의 주요 설계 변수를 결정하였다.

참고 문헌

- [1] 개정 방진고무, 방진고무연구회편, 일본철도차량공업회, 1975, p. 111
- [2] 김완두 외, "공기스프링용 코드강화 고무벨로우즈 국산화 개발", 중소기업 수탁지원사업 결과보고서, 2000. 1. 20.
- [3] 허 훈, 외, "공기스프링 FEM 해석 기법 개발" G7고속전철기술개발사업-현가장치 개발과제