

# 체결단계를 고려한 승용차용 에어스프링 정특성 설계해석기법 개발

이형욱<sup>1#</sup> · H. Thomas Hahn<sup>2</sup> · 박진용<sup>3</sup>

## Static FE Analysis of Air Springs for Passenger Cars Considering the Mounting Steps

H. W. Lee, H. T. Hahn, J. Y. Park

(Received September 24, 2015 / Revised October 5, 2015 / Accepted October 6, 2015)

### Abstract

Air springs are designed to support loads using the volume elasticity in a cylindrical shaped air bag made of a composite material with a rubber matrix and two plies of reinforced fibers. Recently, applications of these springs have been expanded from railway vehicles to passenger cars. The current study presents a finite element analysis of a manufactured air spring for a passenger car. The analysis was conducted including the mounting steps of the air bag using a static loading condition. A method for controlling the internal pressure and displacements during the mounting step was developed. The characteristic load curve and the shape of the air bag were in good agreement with the experimental data with respect to the design height, the bump height and the rebound height. Results indicate that ply angles of fibers vary from 38 degrees to 56 degrees during static loading.

**Key Words** : Air Spring, Design Height, Bump Height, Rebound Height, Ply Angle

### 1. 서 론

에어스프링은 고무기저의 복합재료에 섬유계열의 강화코드가 있는 소재로 만든 원통 모양의 에어백에 공기를 채우고, 체적탄성을 이용하여 하중을 지지하도록 설계된 스프링이다. 에어스프링은 큰 용량에 비해서 낮은 스프링 상수를 얻을 수 있고, 타 스프링과 다르게 다른 부하하중에서도 동일한 스프링 높이를 유지할 수 있으며, 스프링의 높이 조절이 가능한 장점을 가진다. 금속재 스프링에 비하여 상당히 크고 고유 진동수가 작아 동특성이 좋으며, 중량이 가볍고 진동 전달이 적어 다른 스프링에 비하여 안락한 승차감과 안정성을 유지할 수 있다.

에어스프링은 이러한 특성 때문에 기차, 전철, 버스와 같은 대형 고급 수송기관의 현가장치 부품으로 채택되어왔으며, 고급 승용차로의 적용이 확대되고 있다. 승용차는 오프로드 주행 등 철도차량 보다는 가혹한 환경에서 사용되기 때문에 에어백 파손에 대한 저항성능이 설계 시 중요한 고려 요인이 된다. 또한 승용차용 에어스프링은 가격이 비싸고 대부분 수입에 의존하여 이를 대체하기 위한 국산화 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

에어스프링의 기본 특성인 정특성에 대한 연구는 주로 유한요소해석을 통하여 많이 수행되고 있다. 에어스프링의 유한요소해석을 위해서는 보강재 물성평가, 고무물성 평가, 요소선택, 경계조건, 해석단

1. 한국교통대학교 에너지시스템공학과  
2. UCLA, Mechanical and Aerospace Engineering Department  
3. 대원강업 기술연구소  
# Corresponding Author : Korea National University of Transportation,  
E-mail: hwlee@ut.ac.kr



**Fig. 1** Static experiments of an air spring for automotive at the unmounted, the bump height, the design height, and the rebound height

계 등 다양한 부문에서 기법을 정립할 필요가 있다. Huh 등[2]은 셸 요소를 이용하여 유한요소해석을 수행하고 주요 설계변수들의 영향을 고려하여 시제품 제작 및 실험과 비교하였다. Kim 등[3]은 에어스프링 해석을 위하여 보강코드의 각도에 따른 응력과 변형률을 비교하였다. Jeong 등[4]은 리바 요소를 사용하여 에어스프링의 축대칭 유한요소해석을 수행하였다. Lee 등[5]은 다이아프램형 에어스프링에 대하여 부위별로 코드지 각도를 측정하여 내압에 따른 유한요소해석을 수행하였고, Yang 등[6]은 자동차용 에어스프링을 축대칭으로 모델링하고 코드지의 각도에 따라 하중을 비교하였다. Han 등[7]은 에어스프링 해석을 위한 자동설계프로그램을 개발하였다. 이상의 연구들로부터 다양한 형상과 설계변수에 대하여 유한요소해석이 적용되어 스프링의 특성에 대한 평가들이 이루어지고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 연구이외에도 공기현가 시스템에 대한 시뮬레이션 연구도 진행되고 있다[8].

하지만 에어스프링을 제작하는 과정 중 설계 시에는 코드지의 특성, 각도, 고무재질의 특성을 알 수 있으나, 기성품의 평가를 위해서는 이러한 재료의 기본 물성을 확보하지 못한 채 실험을 통한 성능평가를 수행하게 된다. 또한 설계기술 확보를 위해서는 에어백에 대한 해석적 기법이 필요하며 기성품을 분석하여 필요한 물성 및 설계변수를 확보하여야 한다.

본 연구에서는 기존에 제작된 에어스프링에 대하여 유한요소해석을 위한 해석기법, 물성치 확보 방법 등을 제시하고, Fig. 1에서와 같이 체결상태에서부터 설계높이까지 장착하는 단계와 설계높이에서 정특성 측정 시 최대 압축하중(bump 위치, 만차하중), 최대 인장하중(rebound 위치, 공차하중)까지 작동구

간에 따른 스프링 특성을 유한요소해석 기법으로 평가할 수 있는 방법을 제시하도록 한다.

## 2. 해석기법

에어스프링의 정특성 해석을 위하여 에어백의 물성, 형상 모델링, 경계조건 설정 등의 사전작업 과정이 필요하다. 우선 승용차용 에어 스프링은 슬리브형(sleeve type)에어스프링 임에도 작동 시 수직방향의 구동뿐만 아니라 회전방향의 변형도 받기 때문에, 기존의 연구자들이 많이 적용하고 있는 대칭을 이용한 절반 형태의 모델링이나 축대칭 모델링이 아닌 3차원 전체 모델링이 필요하다. 또한 다양한 비선형성 때문에 해석방법의 선정이 중요하다. 유한요소 해석을 위한 기법을 2.1에 기술하도록 한다.

본 연구에서와 같이 기존 제품을 분석하기 위해서는 해석을 위한 데이터를 확보해야 하는데, 우선 에어백의 물성치를 확보하기 위하여 에어백으로부터 시편을 채취하여 인장실험을 수행하였다. 에어백의 코드지의 형상 및 배치 간격, 에어백에서의 위치들을 파악하기 위하여 스캐닝을 통하여 형상치수를 측정하도록 하였다. 이러한 과정을 2.2에 기술하였다.

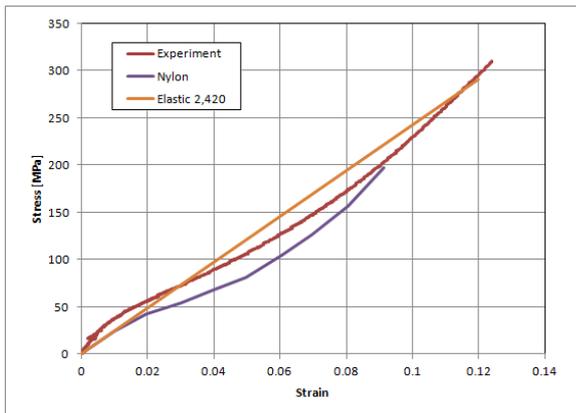
### 2.1 유한요소 해석기법

에어스프링은 내부에 공기가 들어있는 상태에서 변형을 받으며, 변형에 따라서 내부압력과 내부체적의 곱이 일정한 조건을 유지하도록 해야 한다. 이러한 조건을 적용하기 위해서 본 연구에서는 ABAQUS/Standard 의 유체요소[9](fluid element)를 사용하였다.

에어백은 고무재질의 모재에 2겹의 보강재로 구성된 복합재료로 유한요소해석을 위해서는 셸 요소와 리바(rebar) 요소[9]를 사용하는 방법이 많이 이용된다. 이러한 방식으로 모델링하면 이방성 재료의 구성방정식을 사용하는 방법보다 쉽게 변형에 따라 바뀌는 보강재 각도의 변화를 추적할 수 있게 된다. Fig. 1과 같이 에어백과 피스톤, 에어백과 하부 캡 사이에는 에어백이 작동됨에 따라 접촉현상이 발생하게 되는데, 이는 면과 면의 접촉(surface to surface contact)을 이용하여 처리하도록 하였다. 에어백을 피스톤과 결합시키는 체결 링과 에어백을 하부 캡과



**Fig. 2** Extraction of the specimen from the air bag for the tensile test



**Fig. 3** Comparisons of the true stress-strain curves between the polyester, the nylon fiber and the linear elastic fitting line with the modulus of elasticity of 2420 MPa

결합시키는 체결 링과의 접촉도 동일한 방식을 통하여 처리하였다.

## 2.2 해석데이터 확보

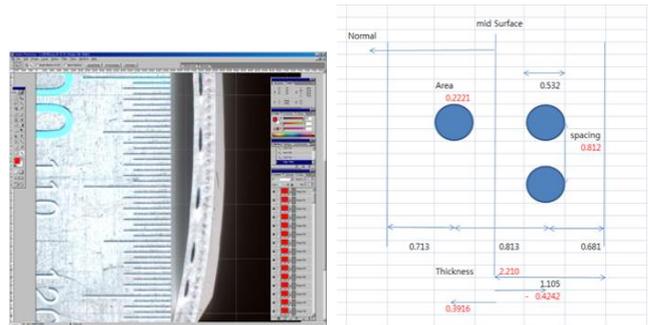
### 2.2.1 에어백 물성치

본 연구에서 사용된 에어백은 고무재질의 모재에 2겹의 폴리에스터 계열의 폴리머 보강재로 되어 있다. 에어백에서 보강재를 따로 분리할 수 없기 때문에, 고무재질의 영향이 상대적으로 작은 길이방향의 시편을 채취하여 인장시험을 수행하도록 하였다. 에어백 소재의 인장시험을 위하여 Fig. 2와 같이 보강재의 길이방향에 맞게 시편을 채취하였다. 시편의 폭은 11.74mm이고, 두께는 2.07mm, 시편의 표점길이는 90.6mm, 시험 속도는 2.0mm/min으로 수행하였다.

인장실험을 통하여 얻은 응력-변형률 선도는 초탄성 특성을 가지고 있으며, 나일론 소재의 선도와도

**Table 1** Hyperelastic material properties of the fiber

Model	Coefficients			
Mooney -Rivlin	D1	C10	C01	
	4.6799E-04	-6.093E2	1.067E3	
Polynomial N=2	D1	C10	C01	
	2.4910E-04	-27530.7189	28390.9495	
	D2	C20	C11	C02
	0.000	3.1438E6	-7.122E6	4.0695E6



**Fig. 4** Scanning photo of the air bag and measured dimensions of fibers with respect to the ply layers

유사한 경향을 가지고 있다. 시험편에 포함된 보강재의 개수와 면적을 이용하여 보강재만의 응력-변형률 선도를 Fig. 3와 같이 정리하였다.

초탄성 재질은 내연적 유한요소해석에서 선형 탄성재질 보다 수렴성이 좋지 않으며, 특히 접촉해석, 대변형 해석 등 비선형 해석과 결합될 경우 해의 발산 가능성이 매우 높다. 따라서 Fig. 3와 같이 응력-변형률 선도 상에서 사전해석에서의 최대 변형률인 변형률 0.12까지 구간을 평균하여 탄성계수 2,420 MPa의 선형 탄성재료로 회귀하였다. 폴리에스터 재질의 폴리머의 포와송 비는 0.4로 사용하였다 [10].

초탄성 모델의 경우 다항식으로 1차식과 2차식을 이용하여 회귀하여 상호 비교할 수 있도록 하였다. ABAQUS를 이용하여 각 차수로 회귀한 데이터를 Table 1에 도시하였다.

### 2.2.2 에어백 단면 형상치수

에어백의 단면에서 보강재의 치수는 유한요소 해석 시 리바 요소를 사용할 때 필요하다. 단면을 스캐너를 통하여 Fig. 4와 같이 7,200 dpi로 스캐닝한

**Table 2 Dimensions of fibers and layers in the cross section**

Fiber	Diameter [mm]	Spacing in the plane [mm]	Position in thickness direction [mm]	Ply Angle [Degree]
Inner	0.532	0.812	0.3916	-38.0
Outer			-0.4242	38.0

후, 20개의 위치에 대하여 픽셀 계산을 통하여 데이터를 확보한 후, 평균값으로 직경과 보강섬유 간의 거리, 층간 거리를 산정하였다. 에어백 두께의 평균값은 2.207mm이며 두께 방향의 보강재의 위치 및 치수는 Table 2에 정리하였다.

## 2.3 경계조건 및 형상 모델링

### 2.3.1 에어백 형상 모델링

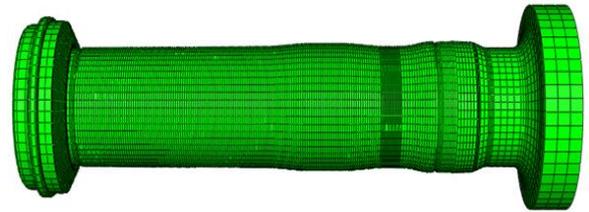
에어 스프링의 해석을 위하여 에어백의 형상을 모델링하여야 한다. Fig. 5 과 같이 에어스프링은 복합재의 에어백과 피스톤, 에어백과 캡을 체결 링으로 결합하여 구성하게 되는데, 초기 에어백의 직경보다 피스톤 부위는 직경이 크고, 캡 부위는 직경이 작아 체결 후 형상의 변화를 고려하였다.

에어백은 피스톤의 벽을 따라 변형을 하기 때문에 피스톤 부위와 접촉 후 피스톤 면의 직경에 따라 팽창된 형상을 나타낸다. 이러한 형상적 특성은 피스톤의 위치에 따른 직경을 고려하여 체결 링을 위치를 중심으로 해당 위치에 에어백의 직경에 변화를 주었고, 피스톤의 벽면에서 직경이 감소하는 경사면 부분에 닿게 되는 위치는 타 위치보다 세밀하게 모델링하여 기준설계 위치에서의 강성변화를 정확하게 추적할 수 있도록 하였다. 피스톤 벽면의 직경변화는 에어스프링의 강성에 변화를 주며, 중요한 설계인자가 된다.

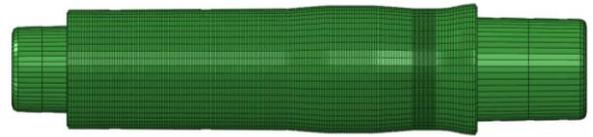
유한요소 모델링 된 에어스프링의 형상을 Fig. 5에 도시하였다. 감절점 쉘 요소로 구성된 에어백은 원주방향으로 총 50개로 분할하였고, 총 8550개의 절점과 8500개의 요소로 모델링 하였다. 에어스프링 내부에 내압을 체적과 관계하여 부과하기 위하여 유체요소를 사용하였다. 유체요소는 내부의 밀폐된 공간을 둘러싸도록 경계면을 모델링하는 방법으로 에어백, 캡, 피스톤의 내측 외면을 따라 요소로 모델링하였고, 이를 Fig. 5(c)에 도시하였다.



(a)



(b)



(c)

**Fig. 5 (a)An air bag with names of components, (b) its finite element model, and (c) fluid elements**

### 2.3.2 경계조건

에어 스프링의 해석을 위해 Fig. 5의 형상을 초기 형상으로 하여 유체요소의 압력을 증가시키면서 동시에 피스톤을 캡 방향으로 변위를 부과하여 초기 설계높이(design height)까지 변화하도록 1 단계 해석을 수행한다.

2단계 해석에서는 설계높이에서 유체요소로 체적에 따라 내부 압력이 변화하도록 경계조건을 설정하고 Fig. 1과 같이 만차 하중조건(bump)인 25mm까지 피스톤으로 캡 부위로 이동하고, 다시 설계높이 위치로 되돌린 후, -25mm까지 피스톤을 캡 방향의 반대방향으로 이동시켜 공차 하중조건(rebound)을 계산한다. 최종적으로 설계높이로 되돌아와 전체 1 사이클을 구성한다. 실험에서는  $\pm 25\text{mm}$ 의 변위를 부과하지만, 해석에서는  $\pm 30\text{mm}$ 의 변위를 부과하여 상대적으로 큰 범위까지도 검토하도록 하였다.

해석된 결과로부터 에어스프링의 변위에 따른 하중과 설계높이에서의 스프링 강성계수, 공차 하중조건에서의 스프링 강성계수, 만차 하중조건에서의 스프링 강성계수를 주요 비교인자로 하였다.

### 3. 해석결과

#### 3.1 에어백 물성치에 따른 해석결과

에어스프링의 해석은 에어백의 내부의 압력의 변화와 대변형, 대회전의 기하학적 비선형성이 존재하는 난해한 해석이며, 특히 피스톤과 에어백의 접촉, 캡과 에어백의 접촉이 동시에 발생하여 에어백의 양쪽 측면에서 접촉과 해리가 동시에 일어나는 문제이다. 접촉 비선형 해석에서 일방향의 접촉문제는 비교적 수렴성이 좋으나 해석모델의 양쪽 측면에서 접촉과 해리가 동시에 발생하는 문제는 해의 진동을 가져올 수 있어 수렴성이 대단히 나빠진다.

특히 본 연구와 같이 에어백의 체결 상태부터 해석을 진행하는 경우, 초기에는 에어백이 하부의 캡부와 접촉하고, 점차 해석이 진행될수록 상부의 피스톤 부와 접촉한다. 에어백은 피스톤 부위를 타고 접촉현상이 일어나는데, 쉘 요소가 180도 회전되어 접촉하는 형태를 보인다. 에어백이 피스톤의 벽면을 지나가면서 캡과 접촉한 에어백이 다시 해리하는데, 이 경우 양쪽 측면에서의 접촉과 해리가 일어나는 접촉 진동이 발생한다. 이와 같이 다양한 형태의 비선형성이 존재하면서 재료의 비선형성이 동시에 존재하면 해의 수렴성이 극히 나빠지게 되어 일부 모델에 대한 해석이 성공하더라도 에어백의 형상의 변화 또는 보강섬유의 코드각도 또는 위치의 변화에 따른 추가 설계해석에서는 해가 발산하는 경우가 많다. 따라서 보다 강건한 수렴조건을 갖는 해석기법을 확보할 필요가 있다.

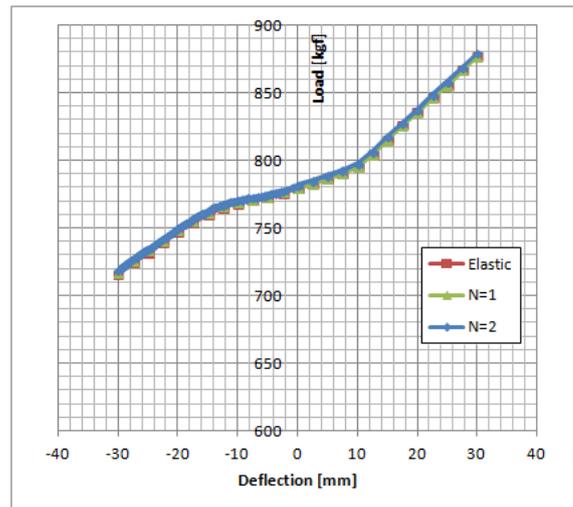
일단 본 연구에서는 보강 섬유코드의 물성을 변형 구간까지 선형탄성으로 모델링할 수 있도록 초탄성 모델과 선형탄성 모델을 각각 사용하여 해석을 수행하고 주요 인자에 대하여 비교하여 해의 정확성을 비교하고 선형탄성 모델의 적용이 가능한지를 검토하였다.

Table 3에서 정리된 바와 같이 변위 ±30 mm를 부과하여 해석하고, 설계높이, 공차 하중높이, 만차 하중높이 일 때 재료 모델 별 스프링 상수와 해석 시 수행된 총 증분(increment)과 총 축차횟수(iteration)를 비교하였다.

각 단계에서 스프링 상수는 상대적으로 정확하게 모델링 한 것으로 보이는 N=2의 다항식 모델에 비하여 약 3% 정도 차이를 나타내고 있으나, 해석의 총 증분과 총 축차 횟수는 N=2에 비하여 50% 수준을

**Table 3** Calculation of the spring constant (K) and the carrying load at the bump, the design height (D.H.) and the rebound with respect to the material models

Variable	Linear Elastic	Mooney - Rivlin	Polynomial N=2
K at Bump	4.320 kgf/mm	4.245 kgf/mm	4.259 kgf/mm
K at D.H.	1.404 kgf/mm	1.351 kgf/mm	1.389 kgf/mm
K at Rebound	3.212 kgf/mm	3.190 kgf/mm	3.104 kgf/mm
Load at D.H.	779.74 kgf	779.65 kgf	781.85 kgf
Increment	147	161	292
Total Iteration	925	922	1,793



**Fig. 6** Variations of the carrying load according to the deflection of the air spring with respect to the material models

보인다. 다항식 모델은 해석 시간적 측면에서는 상당히 수렴성이 좋지 않아 다양한 설계문제에 접근하기에는 어려워 보인다고 할 수 있다. 선형탄성모델과 1차로 모델링 된 Mooney-Rivlin 모델은 설계높이에서 동일한 하중을 보이며 상대적으로 총 증분에서는 선형탄성모델이 유리한 것으로 나타났다. 에어스프링의 변위에 따른 하중을 Fig. 6에 도시하였고, 이 결과를 볼 때는 세 가지의 해석 모델이 거의 동

일한 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 해석의 안정성, 경제성, 정확성 등을 검토하면 선형 탄성으로 보강섬유를 모델링하는 것도 타당한 것을 알 수 있다. 기성 제품을 분석하려고 하는 본 연구와 달리, 만일 보강섬유 자체를 확보할 수 있다면 재료 자체의 실험을 통하여, 재료의 물성모델을 적용할 수 있을 것으로 생각된다.

### 3.2 에어스프링 체결과정 해석

에어백의 초기 장착단계에서 설계높이까지의 해석은 변위에 따라 내압을 조절하는 방법을 이용하였다. 본 에어스프링 모델에서는 설계 높이까지의 피스톤의 변위는 -203.6mm 이며, 설계 높이에서의 내압은 8.79bar 이다. 이 경계조건은 해석에서 하나의 단계로 수행하면 해가 발산하며, 이는 에어백이 피스톤을 따라서 접히는 현상을 모사하기에는 내부압력과 조합이 적절하지 않다.

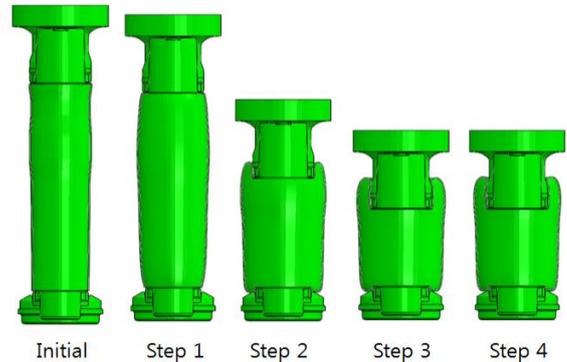
이를 해결하기 위해서 4단계로 나누어 해석을 진행하였다. 초기 해석상의 에어백의 좌굴현상을 피하기 위하여 내압을 부과하면서 소량의 변위를 부과하고, 이후 에어백이 하단부의 캡과 접촉하는 순간까지를 2단계 조건으로, 3단계에서는 에어백이 피스톤을 따라 접히는 단계로 보다 쉽게 접힐 수 있도록 내압을 설계높이에서의 압력보다 더 부과하면서 최종 높이에 도달하도록 한다. 마지막으로 내압을 설계높이에서의 내압으로 맞춘다. 이와 같은 단계는 Table 4와 같이 압력과 높이를 제어하면 된다. 이러한 방식의 체결해석을 기존의 문헌에서 찾을 수 없으며, 이와 같은 방식은 체결해석에 유용함을 확인할 수 있다. 각 단계에서의 변형형상을 Fig. 7에 도시하였다.

### 3.3 에어스프링 정특성 해석결과

앞서 기술한 해석기법을 적용하여 에어스프링의 체결상태를 고려하여 설계높이를 설정하고, 설계높이에서 공차 하중높이, 만차 하중높이에 대하여 해석을 수행하였다. 설계높이에서의 특성해석은 공기의 추가 주입 없이 피스톤의 변위를 부과하여 진행하였다. 실험과 비교하기 위하여 설계높이 이후의 해석은  $\pm 25\text{mm}$ 의 변위를 부과하여 정특성 선도, 에어백 형상, 내부 보강 섬유층의 응력, 하중 등을 검토하였다.

**Table 4 Control chart of internal pressures and displacements for the mounting analysis**

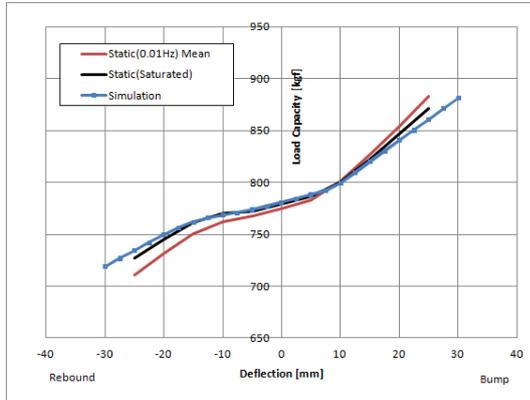
STEP	Piston Displacement	Internal Pressure	remark
1	-20mm	4.5bar	to prevent bag buckling
2	-153.5mm	7.0bar	contact initiation with the cap
3	-203.6mm	9.5bar	contact start with the piston
4	-203.6mm	8.79bar	design height condition



**Fig. 7 Deformed shapes of the air spring according to controlled step for mounting steps**

스프링의 특성선도를 실험과 비교하여 Fig. 8에 도시하였다. 실험에서 얻은 데이터는 두 가지이다. 첫째는 0.01Hz의 정하중 조건으로 설계높이에서  $\pm 25\text{mm}$  변위에서 얻은 하중선도의 평균값이고, 둘째는 정적 평형값을 얻기 위한 방법으로 매 5mm 이동 후 450초 동안 변위를 유지하여 안정화(saturate)시킨 후 하중을 측정된 데이터이다. 본 해석은 내연적 기법을 사용하였기 때문에 매 순간 정적평형을 이루는 것과 같다. 따라서 본 결과는 안정화 조건과 비교하는 것이 더 타당하다. 선도 상으로는 설계 높이에서  $\pm 10\text{mm}$ 의 변화에서는 거의 동일하게 나타나고 있으며, 그 이상의 변형에서는 실험치 보다 강성이 조금 낮게 나타나고 있다. 이것은 대변형 상태에서 접촉, 마찰 등의 비선형성에 기인한 것으로 생각된다.

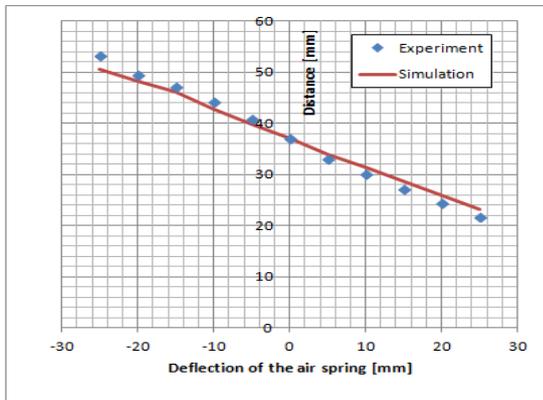
에어백의 형상을 비교하기 위하여 에어백의 직경과 높이를 비교할 수 있다. 에어백의 직경은 실험에서는 특성구간( $\pm 25\text{mm}$  변위)에서 134.4mm~135.6mm



**Fig. 8** Characteristic curves of the air spring with respect to the static loading condition, the saturated loading condition and the simulation



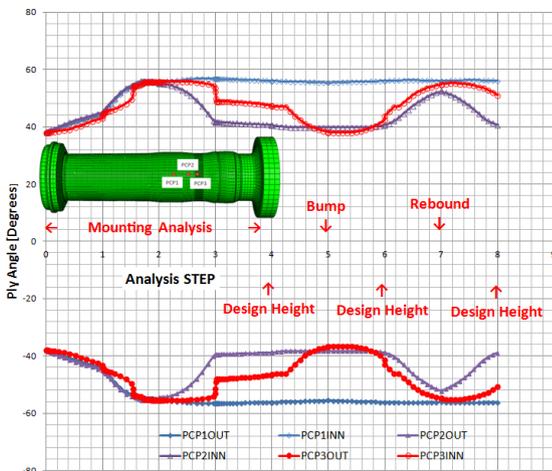
**Fig.11** Comparisons of deformed shapes (bump, design height and rebound) between the simulation and the experiment



**Fig. 9** Comparisons of the distance between the air bag and the base of the piston according to the air spring deflection

로 변화하고 해석에서는 134.8mm~135.8mm로 거의 변화가 없는 것을 확인할 수 있었다. 높이는 측정 상 피스톤의 바닥 면에서부터 에어백의 가장 높은 위치를 측정하여 비교하였고 이를 Fig. 9에 도시하였다.  $\pm 25\text{mm}$  동안  $+13.5\text{mm} \sim 13.9\text{mm}$ 까지 변화하며 실험과 해석이 거의 일치하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10에는 체결과정 및 정특성 해석 시, 내측 보강재와 외측보강재의 각도변화를 도시하였다. 작동 시 에어백에서 최대 외경부를 PCP1, 만차상태에서 피스톤과 접점 위치를 PCP2, 설계높이에서 피스톤과 접점 위치를 PCP3로 설정하였다. 내측 보강재와 외측보강재의 변형양상은 동일하다.



**Fig.10** History of ply angles of inner and outer plies on the three designated points during the full analysis

체결 시 에어백의 최대 외경부의 각도는  $\pm 38^\circ$ 에서 약  $\pm 56.1^\circ$ 로 약  $18^\circ$  변화를 가지며, 에어백의 정특성 시험 동안에는 각도의 변화가 거의 없다. 이것은 앞선 외경의 변화가 거의 없는 것과 동일한 현상을 보여준다. 하지만 PCP2와 PCP3는 변형 동안 피스톤과의 접점부는 피스톤 벽면을 따라 내측과 외측으로의 변형이 일어나기 때문에  $\pm 38^\circ$ 에서  $\pm 55^\circ$ 사이에서 지속적으로 변화하며, 내측과 외측플라이의 각도는 대칭이 아니라 PCP2의 경우는 최대  $2.1^\circ$ 의 각도차이를 보인다. 이는 피스톤을 따라 접히면서 위치 때문에 발생한다고 생각된다.

에어스프링의 변형형상을 피스톤의 높이 변화에 따라 실험과 비교하여 Fig. 11에 도시하였다. 본 에어백의 변형은 아래의 캡 부의 높이가 높아 변형 초기에 에어백이 캡 부에 먼저 닿아 상부로의 변형이 집중되

는 모드를 보인다. 이에 따라 상대적으로 에어백의 상부에서 변형이 일어나는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 상용으로 사용되고 있는 에어스프링의 설계분석을 위하여 에어스프링의 유한요소해석 기법을 정립하였다.

(1) 에어스프링 해석기법에서는 에어백의 물성은 정확한 물성데이터의 확보 보다는 기성품의 분석을 통하여 해석의 기본 물성데이터로 활용하도록 접근하였다. 내부 공기의 탄성을 유지하도록 유체요소를 사용하고, 보강섬유의 방향성과 이력추적을 위하여 리바 요소를 사용하였다.

(2) 보강섬유의 물성을 초탄성모델과 선형탄성모델로 근사하고 물성에 따른 스프링 특성치와 해석 진행의 강건성을 비교하였다. 결과로는 선형탄성모델을 사용하여도 무리가 없음을 보였다.

(3) 에어스프링의 체결과정 해석을 통하여 보강섬유의 각도를 설계높이에서의 형상에 근사하지 않고 각도를 지속적으로 추적하여 해석을 하였다. 이를 통하여 초기 각도에서 약 18도의 각도변화가 발생한다. 체결해석은 내압과 변위를 조합을 통하여 수행하였으며, 이러한 방법은 평형상태를 계산하는 내연적 기법에서 유용하다.

(4) 에어스프링의 정특성 해석과 실험을 통하여 스프링의 하중특성 선도와 에어백 형상치수를 비교하였고, 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

상기의 결과를 통하여 해석기법이 적절히 정립된 것을 확인할 수 있다. 향후 보강재 각도, 두께, 물성 등 다양한 설계변수에 대하여 설계검토가 가능할 것으로 생각된다.

#### 후 기

이 논문은 2013년도 한국교통대학교의 해외파견 연구교수지원금을 받아 수행한 연구임

#### REFERENCES

- [1] S. Lee, C. Lim, 2009, Development of Passenger Car Air-spring, Auto Journal, Vol.31, No.2, pp. 52~57.
- [2] S. Huh, C. Woo, H. Han, W. Kim, S. Kim, 2007, Performance Test and Finite Element Analysis of Air Spring for Automobile, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A, Vol.31, No.7, pp. 725~731.
- [3] B. Kim, B. Moon, 2011, Optimum Evaluation of Reinforcement Cord of Air Spring for the Vehicle Suspension System, J. Kor. Soc. Precis. Eng., Vol.28, No.3, pp. 357~362.
- [4] S. Jeong, H. Huh, J. Song, S. Lee, J. Chang, 2008, Proc. Kor. Soc. Automot. Eng. Annual Conf., Kor. Soc. Automot. Eng., Seoul, Korea, p. 407.
- [5] H. Lee, S. Kim, H. Huh, J. Kim, S. Jeong, 2003, Finite Element Analysis of Diaphragm-type Air Springs with Fiber-reinforced Rubber Composites, J. Compos. Mater., Vol. 37, No.14, pp. 1261~1274.
- [6] W. Yang, C. Chen, Y. Chen, Y. Ren, 2004, Finite Element Analysis of an Air Spring for Automobile Suspension, J. Beijing Univ. Chem. Technol., Vol.31, No.3, pp. 105~109.
- [7] H. Han, S. Hur, Y. Kim, 2006, Numerical Analysis of the Characteristics of Automobile Air Springs by using Developed Pre-processor, Proc. Kor. Soc. Mech. Eng. Spring Conf., pp. 235~240.
- [8] Y. Ko, K. Park, I. Baek, G. Kim, J. Lee, 2013, Study on Development of Virtual Components for Active Air Suspension System Based on HILS for Commercial Vehicle, Trans. of Kor. Soc. Automot. Eng., Vol.21, No.2, pp. 26~36.
- [9] ABAQUS/Standard User's Manual.
- [10] D. W. Van Krevelen, K. Te Nijenhuis, 2009, Properties of Polymers, 4th Edn., Elsevier.