

## 공기압식 외력부가방법을 이용한 구조강도 시험기법 연구

김중환\*, 이기범\*, 김호연\*

## The Study on Structural Strength Test Technique by Using Compressed Air Type Loading Method

Jong- Hwan Kim\*, Kee-Bhum Lee\* and Ho-Yeon Kim\*

## ABSTRACT

The structural strength tests are usually performed to evaluate the structural strength and to verify the structural design and analysis of the vehicle structures. In this paper, the development of a compressed loading type apparatus to load distributed force over the surface of vehicle structure subjected to external loads was described. This apparatus is for structural materials which are easily to fail because of concentrated stresses. This apparatus can apply loads to specimens without any damage on the test specimen's surfaces by using flexible membrane and can be applicable to several kinds of surface profile of structures. The structural strength tests for the flat structure and curved structure with this apparatus were successfully performed, and the test results showed that this type of loading apparatus can be adequate to verify the structural integrity of the fragile structures.

## 초 록

일반적으로 기체 구조물 개발시 운용조건에서의 구조설계 해석 검증 및 구조강도확인을 위해서 구조강도시험이 수행된다. 본 논문에서는 구조시험 하중부가방법 중 응력집중에 의해 파손되기 쉬운 재료를 기체 지지구조로 사용하고자 할 때 구조물 표면에 공기압을 이용하여 국부적 응력집중을 피하면서 분포하중을 부가할 수 있는 새로운 외력부가장치의 개발에 대하여 기술하였다. 본 장치는 부드러운 재질의 하중전달용 매개체를 이용하여 구조물 표면에 손상을 주지 않고 외력을 전달할 수 있으며, 임의형상 구조물에 대하여 쉽게 응용이 가능하다. 본 장치를 이용하여 평판구조물과 곡면구조물에 대하여 외력부가 구조강도시험을 성공적으로 수행함으로써 적용시험기법의 타당성을 입증하였다.

**Key Words** : Structural Strength Test (구조강도시험), Compressed Air Type Loading Apparatus(공기압식 외력부가장치), Loading Method(하중부가방법)

## 1. 서 론

일반적으로 비행체 구조 개발시에 행해지는 구조강도시험은 기체 구조물이 실제 비행시나 운

용 중에 예상되는 외력을 지상에서 모사하여 구조물 및 구조시편이 구조적 지지력을 보유하는가를 검증하는 시험을 말하며, 이 시험결과를 통하여 기체설계자로 하여금 구조물의 취약부위나 과대 설계부위 등을 파악하게 하고, 기체 구조물 설계보완 및 재제작에 필요한 기초 공학자료를 제공한다. 통상적인 비행체 구조물에 대한 구조강도시험시 사용되는 하중부가방법은 텐션패치(tension patch)나 하중패드(load pad)를 이용

† 2010년 1월 7일 접수 ~ 2010년 3월 5일 심사완료

\* 정회원, 국방과학연구소 7본부-2부

교신저자, E-mail : kjh5938@add.re.kr

대전광역시 유성우체국 사서함 35-7

하는 방법[1,2], 또는 전단밴드나 체결구조 등을 이용한 하중부가방법[3,4] 등이 있으며, 이러한 하중부가방법은 구조물이 국부적인 응력영향을 작게 받는 경우는 문제가 없으나, 세라믹 또는 플라스틱 재료와 같은 국부적 응력에 약한 재료로 만들어진 구조물에 적용 시 응력집중으로 인해 예기치 않는 시험결과를 초래할 수 있다. 경우에 따라서는 시험 구조물 표면의 외부 변형이나 손상 없이 구조강도시험이 요구되기도 한다.

이러한 시험목적 달성을 위해서 구조물 표면에 고무와 같은 부드러운 재질의 하중전달용 매개체를 이용하여 공기압에 의한 분포하중상태를 구현함으로써 국부적 하중부가에 의한 응력집중 현상을 배제하면서 구조물 표면에 손상을 주지 않고 하중을 부가할 수 있는 공기압식 외력부가장치를 개발하였다. 개발된 공기압식 외력부가장치를 이용하여 평면형 구조물과 곡면형 구조물에 대하여 구조강도시험을 수행함으로써 개발 시험장치의 적용가능성을 검증하였다.

## II. 공기압식 외력부가장치 설계

공기압식 외력부가장치 개발에 있어서 가장 우선적으로 고려해야 할 점은 취성재료로 구성된 구조물의 구조강도시험시 국부적 응력집중을 피할 수 있고, 시험체의 외부적 변형이나 표면의 손상 없이 외력을 부가하는데 있다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 장치설계에 있어서 부드러운 재질의 하중전달용 매개체를 이용하고, 구조물 표면에 분포하중을 부가하기 위하여 공기의 압력을 제어하여 외력의 크기를 조절할 수 있도록 설계하였다. 설계된 공기압식 외력부가장치의 적용가능성을 확인하기 위하여 평면형과 곡면형의 두 가지 형태를 제작하여 실제 구조강도시험을 수행하였다.

### 2.1 평면형 공기압식 외력부가장치

본 시험장치는 실제 곡면형 구조물에 대한 외력부가장치 개발에 앞서 선행연구로서 행해졌으며, 곡면형 구조물에 대하여 기존의 전단밴드 형태의 하중부가방법 외에 압력부가형 분포하중을 부가할 수 있는 시험장치를 개발하여 실제 구조강도시험을 통한 적용타당성을 검증하고자 하였다.

#### 2.1.1 시험설계

##### 2.1.1.1 하중전달용 멤브레인 설계

평면형 공기압식 외력부가장치에서 멤브레인(membrane)은 구조물 표면에 공기압을 전달하는

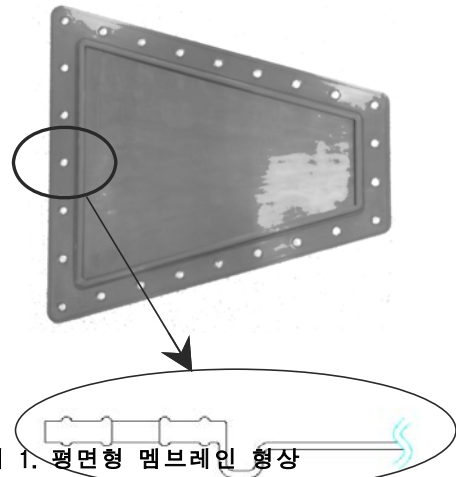


그림 1. 평면형 멤브레인 형상

표 1. 멤브레인 재료의 기계적 물성치

품명	재질	인장강도 (MPa)	연신율 (%)	고온한계 온도(°C) (5시간)	일반 내열 온도(°C) (70시간)
멤브레인	NR55	24.5	400 이상	150	100

매개체 역할을 하는 부분으로서, 재료 선정시 연신률과 강도가 우수해야 한다. 본 연구에 사용된 멤브레인 재질은 NR55이며, 그림 1은 평면형 멤브레인의 형상과 단면을 보여주고 있다. 표 1은 멤브레인 재료의 기계적 물성치를 보여주고 있다.

하중전달용 멤브레인 형상 개념설계는 그림 2와 같이 멤브레인 내부에 공기가 주입되었을 때 멤브레인이 구형으로 팽창하는 것으로 이상화하여 접근하였다. 여기서 인가압력에 대한 멤브레인의 단면이 받는 응력을 계산해 보면 멤브레인의 힘평형도에서 다음과 같이 구할 수 있다.

(1)

$$p \cdot 2\pi r_0 N \sin\phi = p\pi r_0^2$$

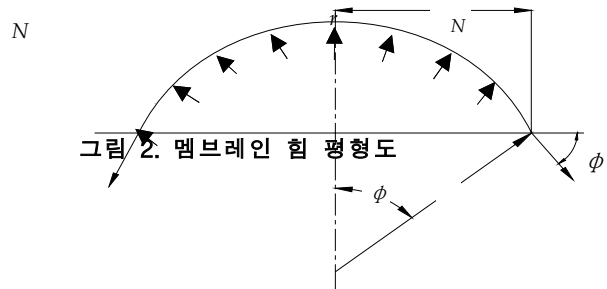


그림 2. 멤브레인 힘 평형도

$$N = \frac{pr_0}{2\sin\phi} = \frac{pr}{2} \tag{2}$$

$$\sigma_n = \frac{N}{t} = \frac{pr}{2t} \tag{3}$$

여기서  $N$ 은 단위길이당 면이 받는 수직력,  $p$ 는 균일 압력,  $r$ 은 구형셀의 반경,  $t$ 는 두께,  $n$ 은 면내 응력을 나타낸다. 본 연구에 사용한 평면형 멤브레인에서  $r = 120/\sin(45^\circ) = 170 \text{ mm}$ ,  $p = 0.07 \text{ MPa}$ ,  $t = 1 \text{ mm}$  를 가정하여 멤브레인 응력을 계산하면, 멤브레인 인장응력은  $5.9 \text{ MPa}$ 로 계산될 수 있다.

2.1.1.2 시험장치 구성

그림 3은 평면형 공기압식 외력부가장치를 이용한 구조강도시험 구성도를 보여주고 있다. 시험장치 구성은 공기공급장치, 외력부가부, 외력계측부로 나눌 수 있다. 여기서 시험조립은 먼저 외력부가부 고정치구를 시험스탠드에 고정시킨 후 반력측정용 하중지지판과 로드셀을 조립하며, 공기공급장치 호스와 외력부가부의 멤브레인 지지부를 연결하고 계측장비에 압력계와 로드셀의 출력단자와 연결한다. 로드셀의 이동 위치에 대한 반력계측을 위해 그림 4와 같은 하중지지판의 후면에 눈금자를 만들었다. 그림 4에서  $F_1$ 은 공기압에 의한 외력을 의미하며,  $F_2$ 는 하중지지판의 반력을 의미한다. 반력지점을 이동하면 힌지부의 모멘트 변화를 계측할 수 있다.

외력부가부

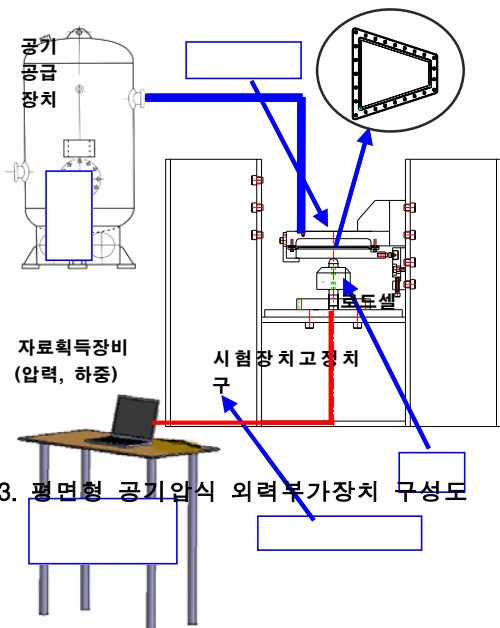


그림 3. 평면형 공기압식 외력부가장치 구성도

표 2. 압력계와 로드셀의 사양

계측기 종류	품명	사양
압력계	BMC-119C-100A-A-3-MC	-측정압력범위: 0~100 psi
		-전원전압: 20 VDC
로드셀	Model 661.19F-08	-최대용량: 25 kN
		-제조회사: MTS

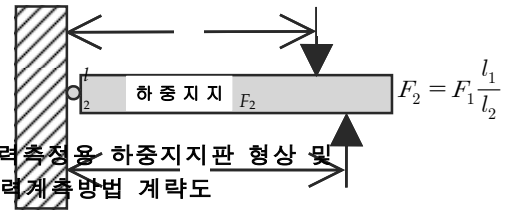
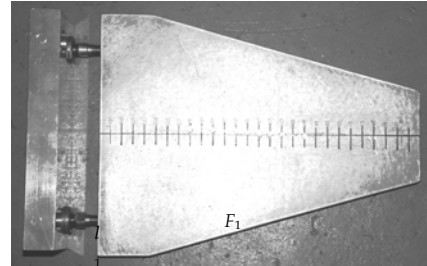


그림 4. 반력측정용 하중지지판 형상 및 반력계측방법 계략도

표 2에 평면형 공기압식 외력부가장치의 압력 제어 및 하중측정을 위한 압력계와 로드셀에 대한 사양을 나타내었다.

2.1.2 시험수행

평면형 공기압식 외력부가장치를 이용한 구조강도시험은 크게 세 가지의 경우로 수행하였다. 첫 번째는 반력측정용 로드셀 위치를 고정된 상태에서 압력을 0.5 MPa까지 증가시키는 시험이다. 두 번째는 반력측정용 로드셀 위치를 이동한 상태에서 압력을 0.5 MPa까지 증가시키는 시험



그림 5. 평면형 공기압식 외력부가장치를 이용한 구조강도시험 수행장면

이며, 끝으로 멤브레인과 반력측정용 하중지지판 사이의 간격을 변화시키면서 압력을 0.5 MPa까지 증가시키는 시험을 수행하였다. 시험자료획득은 Measurement Group사의 System5000을 이용하여 하중, 압력을 시간의 경과에 따라 1초 간격으로 계측하였다. 그림 5는 평면형 공기압식 외력부가장치를 이용한 구조강도시험 수행장면을 보여주고 있다.

2.1.3 시험결과 및 분석

평면형 공기압식 외력부가장치를 이용한 구조강도시험결과로서 압력, 하중 등에 대한 그래프를 그림 6~그림 8에 나타내었다. 멤브레인 면에 대한 압력부가 결과 최대압력 0.5 MPa까지 고무 멤브레인의 파단 없이 하중지지판의 반력을 계측할 수 있었다. 하중지지판의 도심에서 계측한 인가압력에 대한 반발력이 계산결과와 비슷하였다. 즉, 인가압력 0.1 MPa에서 하중지지판 도심에서 계측한 힘은 3,344 N이었으며, 공기압 0.1 MPa를 하중지지판에 가했을 때 멤브레인 접촉면에서 하중지지판에 가해지는 힘은 3,352 N으로 계산되었다. 그림 6의 시간의 경과에 따른 멤브레인에 가해지는 압력부가곡선을 보면 공기압을 유지할 때 압력이 비교적 일정하게 유지되고 있는 것

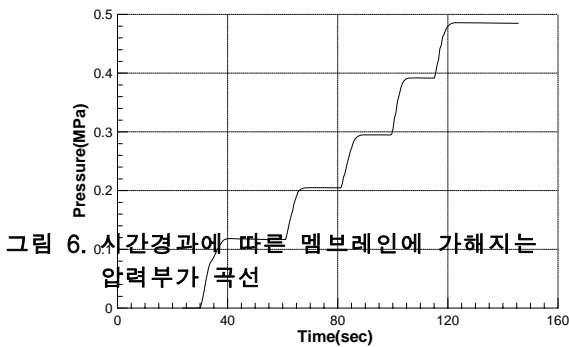


그림 6. 시간경과에 따른 멤브레인에 가해지는 압력부가곡선

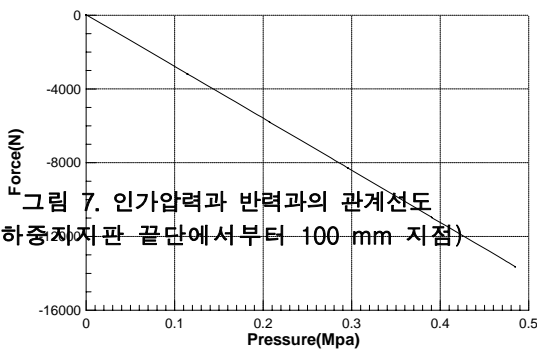


그림 7. 인가압력과 반력과의 관계선도 (하중지지판 끝단에서부터 100 mm 지점)

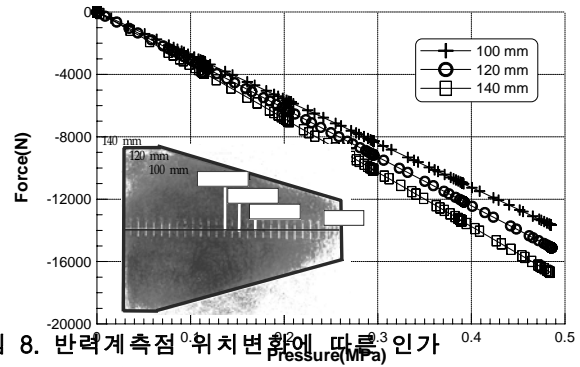


그림 8. 반력계측점 위치변화에 따른 인가압력과 반력과의 관계선도

을 확인할 수 있다. 그림 7의 인가압력에 대한 반력관계에서 보면 인가압력의 증가에 따라 반력이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 그림 8은 반력계측위치 변화에 따른 인가압력에 대한 반력결과를 보여주고 있으며, 여기서 반력 측정 위치가 반력 증가 방향으로 이동함에 따라 실제 계측되는 반력도 증가함을 확인할 수 있다.

2.2 곡면형 공기압식 외력부가장치

본 시험장치는 평면형 구조물에 대한 외력부가장치 개발을 통하여 획득한 설계기술을 이용하여 곡면형 구조물에 대하여 적용할 수 있도록 고안된 장치이다. 기존의 밴드형태의 하중부가방법 외에 공기압에 의한 분포하중을 부가할 수 있는 시험장치로서 실제 곡면구조물에 대한 적용타당성을 검증하고자 금속 및 플라스틱 곡면 구조물에 대하여 구조강도시험을 수행하였다.

2.2.1 시험설계

2.2.1.1 하중전달용 멤브레인 설계

곡면형 구조물에 대하여 분포하중을 부가할 수 있는 공기압식 외력부가장치의 멤브레인은 평면형과 동일 재질로 NR55이며, 형상은 그림 9의 외력부가부에서 보는 바와 같이 곡면형 구조물에

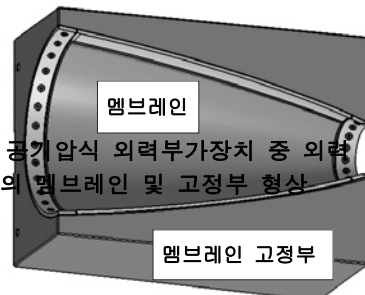


그림 9. 곡면형 공기압식 외력부가장치 중 외력부가부의 멤브레인 및 고정부 형상

적합하도록 설계 및 제작되었다. 멤브레인 고정부는 설치 및 운용이 편리하도록 경량성 및 강도를 고려하여 Al6061로 제작하였다.

2.2.1.2 시험장치 구성

그림 10은 곡면형 공기압식 외력부가장치를 이용한 구조강도시험 구성도를 보여주고 있다. 시험장치는 외력 부가부(1), 외력부가장치 고정부(2), 외력 계측부(3), 자중 보상부(4)로 구성된다. 외력 부가부는 곡면구조물의 표면에 분포하중을 부가하기 위해 고무 멤브레인 내부에 공기를 보관하면서 하중을 구조물에 전달해주는 역할을 한다. 외력부가장치 고정부는 시험물에 가해지는 굽힘모멘트를 계측할 수 있도록 외력 부가부 끝을 회전운동만 허용하고 변위는 고정시키는 역할을 한다. 외력 계측부는 구조물에 가해지는 분포하중의 크기를 계측하는 부분이다. 자중 보상부는 구조물에 대하여 순수한 공기압에 의한 외력만 부가하기 위하여 외력 부가부의 자중에 의한 처짐을 보상하는 역할을 한다. 시험조립은 먼저 시험구조물이 설치되면 외력 부가부와 외력 부가장치 고정부를 조립하고, 외력 계측부와 외

력부가장치 자중 보상부를 설치한다. 구조강도시험시 시험물에 대한 외력부가는 공기공급장치에서 외력부가부에 공기가 주입되면 압력계에서 공기압이 계측되며, 공기압의 증감에 따른 구조물에 가해지는 외력의 증감은 외력 계측부에 있는 로드셀을 통하여 계측된다.

2.2.2 시험수행

곡면형 공기압식 외력부가방법을 이용한 구조강도시험기술을 실제 유도무기 최전방 동체에 적용하였다. 시험조건은 유도무기 최전방 동체에 비행중 예상되는 공력하중을 기준으로 연결부에서 받는 굽힘모멘트를 시험하중으로 정하였으며, 이 하중의 100%하중과 150%하중부하시험을 실시하였다. 시험은 각 시험조건마다 10%하중 단계별로 압력을 상승시키면서 연결부의 굽힘모멘트가 시험하중에 도달할 때까지 수행되었다. 시험중 공기압은 MTS사의 AERO-90장비를 이용하여 제어하였다. 자료획득은 평면형 시험기와 동일한 장비로 하중증감에 따른 반력, 압력, 각 위치별 변위를 시간의 경과에 따라 0.2초 간격으로 계측하였다. 그림 11은 곡면형 공기압식 외력부가장치를 이용한 구조강도시험 수행장면을 보여주고 있다.

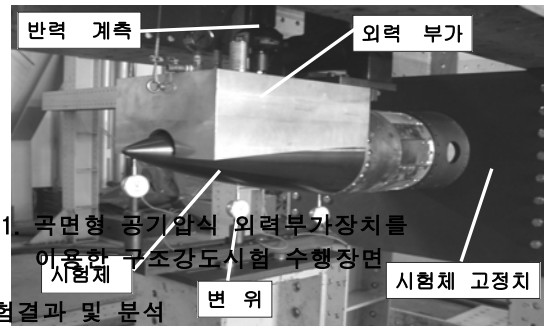
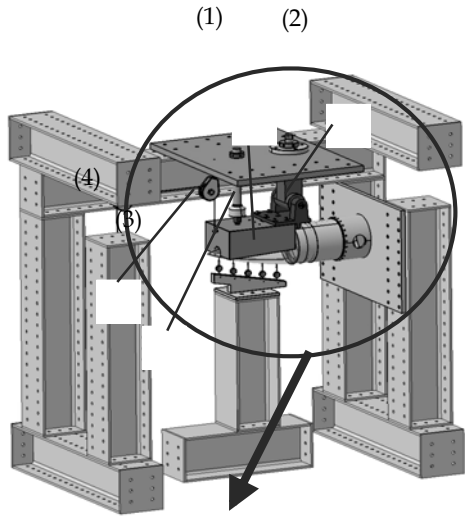


그림 11. 곡면형 공기압식 외력부가장치를 이용한 구조강도시험 수행장면

2.2.3 시험결과 및 분석

그림 12는 곡면형 공기압식 외력부가장치를 이용하여 유도무기 최전방 동체에 수행된 구조강도시험의 인가압력에 대한 굽힘모멘트의 관계를 나타낸 그래프이다. 그림에서와 같이 공기압과 모멘트와의 관계에서 인가압력에 대하여 비교적 선형적인 모멘트 증가현상을 보여주고 있으며, 이는 본 개발 장치가 곡면구조물에 대해서도 분포하중을 부가할 수 있음을 입증하는 것이다. 본 시험에서 유도무기 최전방 동체에 대하여 설계하중의 150%하중까지 성공적으로 수행하였다.

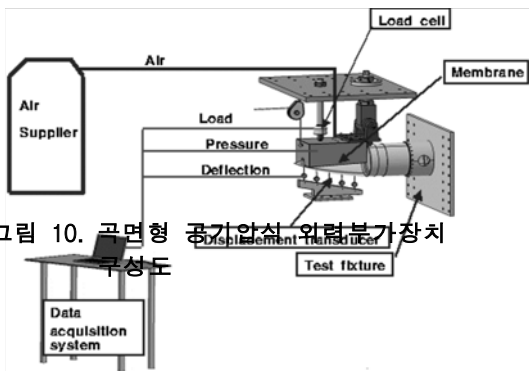


그림 10. 곡면형 공기압식 외력부가장치 구성도

### IV. 결론

본 연구에서 기존의 유압하중부가장치를 이용한 하중부가방법과 달리 공기압과 고무 멤브레인을 매개체로 시험 구조물에 대하여 분포하중을 부가할 수 있는 구조시험장치를 개발하였다. 개발된 시험장치를 이용하여 평면형과 곡면형 구조물에 대하여 구조강도시험을 성공적으로 수행함으로써 개발장치의 실용성을 입증하였다. 본 개발 시험장치 및 시험기술은 플라스틱, 세라믹, 복합재료 등과 같이 응력집중에 취약한 구조물의 개발에 따른 구조강도평가를 위해 수행되는 구조시험이나, 개발 구조물에 대한 외부적 변경이나 추가적인 치구의 부착 없이 제품 품질보증절차가 요구되는 검사시험에 적용 가능할 것이다.

### 참고문헌

- 1) 설창원, 양명석, 이기범, 정재권, 강희원, 이경용 "항공기 전기체 내구성시험기법 개발", 한국항공우주학회지, 제32권 제6호, 2004, pp. 101 ~ 108.
- 2) 전준탁, 이영신 "음향방출법을 응용한 복합재 날개 구조물의 정적구조건전성평가", 한국항공우주학회지 제37권 제8호, 2009, pp. 780 ~ 788.
- 3) 이경용, 김중환, 이기범, 정재권 "원통형 초음속 비행체 내열구조시험기법연구", 한국항공우주학회지 제33권 제6호, 2005, pp. 83 ~ 91.
- 4) O. R. Otto, G. J. Inukai "Elevated Temperature Structural Testing of Advanced Missiles", AIAA, pp. 902 ~ 907, 1980.

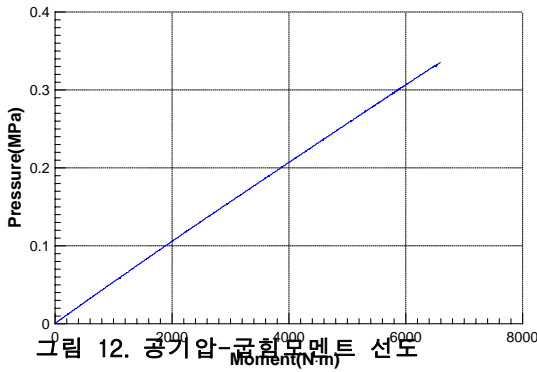


그림 12. 공기압-균형모멘트 선도

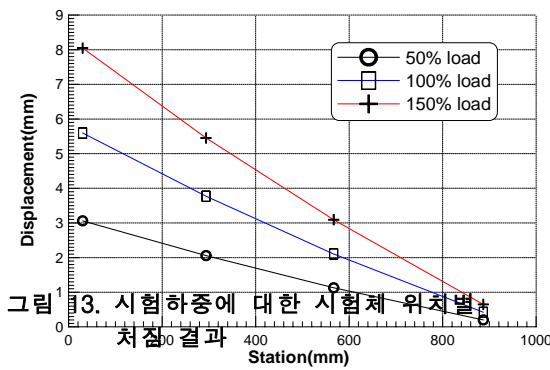


그림 13. 시험하중에 대한 시험체 위치별 처짐 변화

그림 13은 시험하중에 따른 시험체의 각 위치별 처짐변화를 보여주는 그래프이며, 전반적으로 하중증가에 따라 선형적인 처짐 증가를 보여주었다.