

우주발사체용 복합재 산화제탱크 구조 강건성 검증을 위한 정하중 시험

김현기^{1,†} · 김성찬¹

¹한국항공우주연구원

Static Load Test for Verification of Structural Robustness of Composite Oxidant Tank for Space Launch Vehicle

Hyun-gi Kim^{1,†}, Sungchan Kim¹

¹Korea Aerospace Research Institute

Abstract

This study presented the results of the static load tests conducted to verify the structural robustness of the composite oxidant tank for a space launch vehicle. First, we introduced the test equipment used in the static load test of the composite oxidant tank, and then described the test requirements that the composite oxidant tank must satisfy. In addition, we presented a test set-up diagram consisting of the static load test fixture, hydraulic pressure, control equipment, and data acquisition equipment, and the load profile of the static load test of the composite oxidant tank consisting of shear, equivalent compression, bending, and combination tests. As a result of load control, we verified the reliability of this test by showing the errors between the input load and the feedback load in each channel according to the increase of the test load, and the feedback error between the channel A and channel B of load cell in each load actuator. As a result of the static load test, the load of the actuator was properly controlled within the allowable error range in each test, and we found that the test specimen did not cause damage or buckling that causes significant structural defects in the required load.

초 록

본 연구에서는 우주발사체용 복합재 산화제탱크의 구조 강건성을 검증하기 위해 수행된 정하중시험 결과를 제시하였다. 먼저, 복합재 산화제탱크 정하중시험에 사용된 시험장비를 소개하고, 복합재 산화제탱크가 만족해야 하는 시험 요구도를 설명하였다. 그리고, 정하중 시험치구, 유압, 제어장비, 데이터획득장비로 구성되는 시험셋업 구성도를 제시하였고, 전단, 등가압축, 굽힘, 조합시험으로 구성된 복합재 산화제탱크 정하중 시험의 하중 프로파일을 제시하였다. 하중 제어의 결과로 시험하중 증가에 따른 각 하중부과기에서 입력하중과 출력하중 사이의 오차와 각 로드셀 A와 b 채널사이의 오차를 제시하여 본 시험의 신뢰성을 확인하였다. 정하중 시험 결과로, 각 시험에서 하중부과기의 하중은 허용 오차 범위 내에서 적절히 잘 제어되었으며, 시험시편도 요구 하중 내에서 파손이나 심각한 구조적 결함을 유발하는 좌굴은 발생하지 않는 것으로 확인되었다.

Key Words : Actuator(하중부과기), Composite Oxidant Tank(복합재 산화제탱크), Static Load Test(정하중시험), Test Load(시험하중), Test Profile(시험 프로파일)

1. 서 론

2013년 나로호는 세 번의 도전 끝에 고도 약 302km 궤도에 위성을 안착시키는 데 성공하였다[1]. 이 과정에서 발사체 기술관련 다양한 연구가 수행되어 우리나라 과학기술 수준의 향상에 크게 기여한 것으로

평가받고 있으며, 구조 분야에서도 발사체 구조해석 기법과 구조 최적화 등의 연구를 수행할 수 있는 좋은 기회가 되었다[2-5]. 그러나, 나로호는 핵심기술인 1단 로켓이 러시아 엔진이라는 한계를 가지고 있었다. 이런 한계를 극복하기 위해 우리나라는 1단 로켓에 적용할 수 있는 중대형 액체엔진 개발에 착수하였다. 그 결과로 2018년 75톤 추력의 액체엔진을 적용한 누리호 시험발사체가 성공리에 발사되어, 우리나라도 중형 발사체의 1단과 2단에 적용할 수 있는 발사체 엔진기술을 확보하게 되었다[6]. 그리고, 2021년 말

Received: Mar. 16, 2021 Revised: May 10, 2021 Accepted: May 11, 2021

† Corresponding Author

Tel: +82-42-870-3531, E-mail: shotgun1@kari.re.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

우리 손으로 자체 개발한 우주발사체 누리호의 발사를 계획하고 있으며, 600~800km 지구 저궤도 및 태양 동기궤도에 1.5톤급 실용위성을 실어 나를 수 있는 성능을 목표로 하고 있다[7]. 누리호 첫 발사가 성공하면 2022년부터 누리호 신뢰도 및 성능을 개선하기 위한 후속사업을 수행하여 2029년 개량형 발사체를 발사하는 것을 목표로 하고 있으며 궁극적으로는 로켓, 위성분야 기술 자립화를 이루고자 한다.

본 연구에서는 해외에서 추진중인 복합재 산화제 탱크 개발[8]에 착안하여 누리호 발사체 성능(중량감소/ 원가절감)을 개량코자 개발된 복합재 산화제 탱크의 개량형 발사체 적용을 목표로 구조 강건성 평가를 위한 정하중시험을 수행하였다. 복합재 산화제탱크의 정하중시험에 대한 요구도를 제시하고 시험을 수행하기 위한 시험셋업 구성도를 제시하였다. 그리고, 시험요구도에 따른 시험하중을 산출하고 하중부과기에 부과되는 하중 계산결과와 하중 프로파일을 제시하였다. 시험 결과로 하중부과기의 입력하중(command load, 이하 CMD)과 로드셀로부터의 하중 출력신호(Feedback, 이하 FDK) 사이의 오차 분석 결과와 각 하중부과기의 로드셀(load cell) A-b 포트사이의 하중 출력신호 오차를 분석하여 시험결과를 신뢰성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 구조시험 장비구성

구조시험을 수행하기 위해서는 하중제어장비(load control system, LCS), 데이터 획득장비(data acquisition system, DAS), 하중차단모듈(load abort module)과 서보밸브(servo valve), 하중부과기(load actuator), 로드셀(load cell), 유압공급 매니폴드(hydraulic supply manifold, HSM), 유압분배 매니폴드(hydraulic distribution manifold, HDM), 하중제어용 프로그램 등이 필요하다. Figure 1은 구조시험에 사용된 하중제어시스템(a)과 데이터 획득장비(b)이다. 그리고, Fig. 2에서 (a)는 서보밸브, (b)와 (c)는 유압공급(Hydraulic Supply Manifold, HSM) 및 분배 매니폴드(Hydraulic Distribution Manifold, HDM), Fig.

3(a)는 시험시편인 복합재 산화제 탱크 실물형상이고, Fig. 3(b)는 시험설치가 완료된 형상을 보여주고 있다.

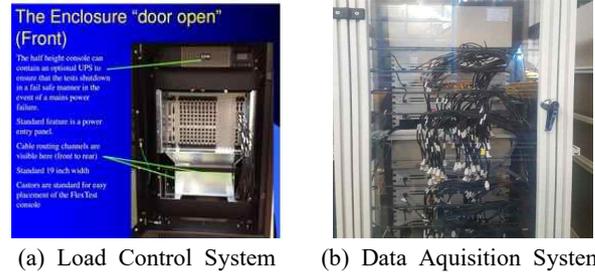


Fig. 1 Load Control System and Data Acquisition System

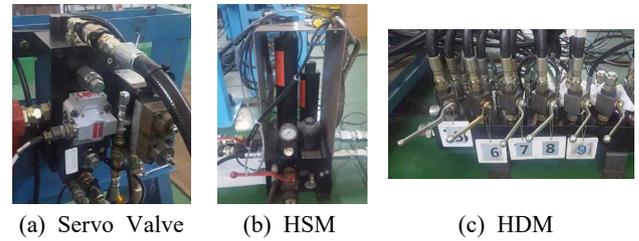


Fig. 2 Servo Valve, HSM and HDM

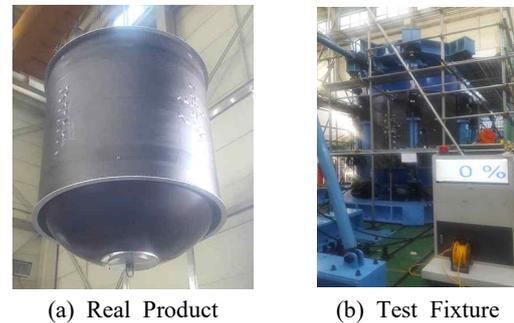


Fig. 3 Composite Oxidant Tank and Test Set-up Assembled with the Test Specimen

2.2 시험 구성 및 셋업

Figure 4는 시험시제인 복합재 산화제탱크가 시험치구에 장착되어 있는 CATIA Model 형상이다. 시험치구는 시험시편에 하중을 부과하기 위한 상부치구와 하부치구로 구성되어 있고, 상/하부 치구 사이에는 하중부과기가 설치되었다. 하중부과기는 수직하중용 8개, 측면하중용 1개로 구성되어 있고, 수직방향 하중부과기는 채널 번호 1번~8번, 측면방향 하중부과기는 채널번호 9번으로 설정하였다. 하중부과기는 서보밸브에 입력된 하중신호(command)에

의해 시험시편에 입력하중을 작용하게 되고, 하중 부과기에 장착된 로드셀(load cell)을 통해 작용하중에 대한 출력신호(feedback)를 제어장비로 전달하게 된다.

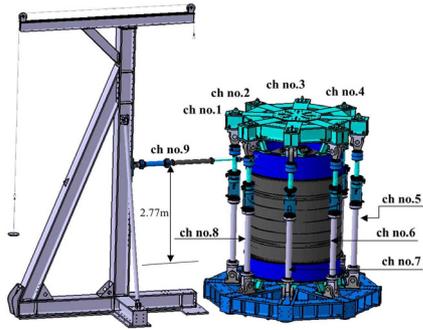


Fig. 4 Test Fixture Assembled with the Test Specimen

2.3 시험요구도 및 시험하중 산출

복합재 산화제탱크의 정하중 시험은 전단하중, 등가압축하중, 굽힘하중 그리고 조합하중의 네 가지 종류의 시험을 수행하고, 부가하는 시험하중은 Table 1과 같이 100% Test Load(이하 TL)와 175% TL이 시험하중 요구도로 주어졌다.

Table 1 Required Test Loads for Composite Oxidant Tank

Test Case	100% Test Load	175% Test Load
Shear Load	24.0kN	-
Comp. Load	938.0kN	-
Bending Load	578.0kN-m	-
^a Comb. Load	Shear load	24.0kN
	^b Comp. load	938.0kN
	Bending load	578.0kN-m
		1,011.5kN-m

a: combination load, b: compression load

Table 2는 전단하중시험에서 각 하중부과기의 시험하중을 보여주고 있다. 전단하중 시험의 100% TL은 24.0kN이다. 따라서, 해당 전단하중은 Fig. 7에 나타난 시험 구성도에서 측면에 위치한 9번 하중부과기에 부과하여 시험을 수행하였다. Table 2에서 tare load는 상부치구 중량을 의미한다. 상부치구 중량(tare load)이 8.72tonf (85.54kN)이므로, 본 시험의

하중을 부과하기 전에 1번~8번 수직방향 하중부과기에 각각 -10.69kN을 부과하여 상부치구의 중량이 시험시편에 부과되지 않도록 하였다. 등가 압축하중시험, 굽힘하중시험 그리고 조합하중시험에서도 본 시험 착수 전에 동일하게 tare load를 반영하였다. 참고로, (-)하중은 하중부과기가 외부로 나오는 방향으로 로드셀에 압축력이 작용하는 것을 의미하고, (+)하중은 하중부과기가 내부로 들어가는 방향으로 로드셀에 인장력이 작용하는 것을 의미한다.

Table 2 Test Loads of Each Channel for Design Limit Load in Shear Load Test

Ch. No.	Test Load (kN)	Tare Load (kN)	Min.Load (kN)	Max.Load (kN)
1~8	N/A	-10.69	-10.69	0
9	24.00	N/A	0	24

등가 압축하중시험에서는 100%TL인 938.0kN을 1번~8번의 수직방향 하중부과기에 분산시키면 각 하중부과기에 117.25kN을 부과하게 된다. Table 3은 등가압축 하중시험에서 각 하중부과기의 시험하중을 보여주고 있다.

Table 3 Test Loads of Each Channel in Equivalent Compression Load Test

Ch. No.	Test Load (kN)	Tare Load (kN)	Min.Load (kN)	Max.Load (kN)
1~8	117.250	-10.69	-10.69	106.56

굽힘시험 하중은 1번~8번의 수직방향 하중부과기에 부과하게 되는데, 요구조건에 맞는 굽힘하중을 부과하기 위해서는 수직방향 하중부과기의 모멘트 암을 고려하여 각 하중부과기의 굽힘하중을 계산해야 한다. Figure 7은 시험치구에 설치된 하중 부과기들의 위치와 각 하중부과기의 모멘트 암(arm)을 보여주고 있다. 참고로, Fig. 8에서 L_1 은 646.5mm, L_2 는 1561.5mm이다.

굽힘하중의 100%TL은 578kN-m이다. 최대하중을 8개의 수직방향 하중부과기에 균일하게 분포시키기 위해서는 각 하중부과기에 72.25kN-m의 굽힘하중을

부과해야 한다. 따라서, 하중부과기 2, 3, 6, 7번에 대해서 모멘트 암 $L_1(646.5mm)$ 을 반영하여 계산하면 각 하중부과기에 111.756kN을 부과해야 한다. 그리고, 시험시편에 동일방향의 굽힘하중을 작용시키기 위해서 하중부과기 2번과 7번에서는 인장방향으로, 하중부과기 3번과 6번에서는 압축방향으로 부과해야 한다. 이와 유사하게 하중부과기 1, 4, 5, 8번에서는 모멘트 암 $L_2(1561.5mm)$ 을 반영하면 각 하중부과기에 부과해야 하는 하중은 46.27kN으로 계산된다. 그리고, 하중부과기 1번과 8번에서는 인장방향, 하중부과기 4번과 5번에서는 압축방향으로 작용하게 된다. 굽힘하중의 각 하중부과기의 시험하중은 Table 4에 주어져 있다. 참고로, Fig. 5에서 숫자는 하중부과기 번호를 의미하는데, Fig. 4의 하중 부과기의 번호와 동일하다.

Table 4 Test Loads of Each Channel in Bending Load Test

Ch. No.	Test Load (kN)	Tare Load (kN)	Min.Load (kN)	Max.Load (kN)
1	46.270	-10.69	-10.69	35.58
2	111.756	-10.69	-10.69	101.06
3	-111.756	-10.69	-122.45	0.00
4	-46.270	-10.69	-56.96	0.00
5	-46.270	-10.69	-56.96	0.00
6	-111.756	-10.69	-122.45	0.00
7	111.756	-10.69	-10.69	101.06
8	46.270	-10.69	-10.69	35.58

조합하중은 전단하중, 등가압축하중, 굽힘하중을 동시에 부과하는 시험이므로 하중부과기에 작용하는 하중은 각 시험하중들의 합으로 계산된다. Table 5는 조합하중시험에서의 100%TL과 각 하중부과기에 부과되는 시험하중이다.

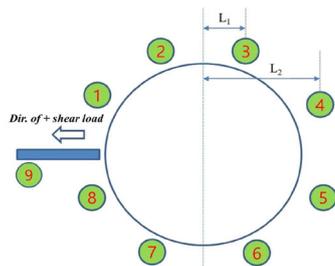


Fig. 5 Locations and Moment Arm of Each Actuator

조합하중에서는 굽힘하중에 의해 각 하중부과기에 가해지는 하중에서 전단하중으로 발생하는 굽힘(전단 굽힘하중)의 영향을 제거해야 한다. Figure 4와 같이 시험시편 하단부에서 전단하중 부과기까지의 길이인 2.77m를 고려하여 전단하중에 의한 굽힘하중은 66.480kN·m 로 계산되었다. 이 전단 굽힘하중을 Table 1에서 주어진 조합하중 요구도의 100%TL 굽힘하중(578.0kN·m)에서 제거하면 수직방향 하중부과기에 작용시켜야 하는 굽힘하중은 511.52 kN·m이다. Figure 5의 작동기 위치를 고려하여 해당 굽힘하중을 발생시키기 위해 각 수직방향 하중부과기에서 계산된 하중들이 Table 5의 ②에 주어져 있다.

최대시험하중은 계산된 전단, 굽힘, 압축 하중의 합으로 계산된 시험하중에 하중계수 1.75를 곱하여 계산한다. 그 결과로, 최대하중은 2번과 7번 작동기에서 378.27kN으로 계산되었다. 그리고, 본 시험에서는 앞서 설명한 전단, 등가압축, 굽힘시험과 동일하게 Table 5의 각 채널별 시험하중에 시험치구 중량인 8.72tonf 을 상쇄시킨 후 시험을 수행하게 된다.

Table 5 Test Loads of Each Channel in Combination Load Test

Ch. No.	Shear Load ^① (kN)	Bending Load ^② (kN)	Comp. Load ^③ (kN)	Tare Load (kN)	100%TL ^④ (kN)	175%TL ^⑤ (kN)
1		40.948	117.25	-10.69	158.198	276.85
2		98.902	117.25	-10.69	216.152	378.27
3		-98.902	117.25	-10.69	18.348	32.11
4		-40.948	117.25	-10.69	76.302	133.53
5	N/A	-40.948	117.25	-10.69	76.302	133.53
6		-98.902	117.25	-10.69	18.348	32.11
7		98.902	117.25	-10.69	216.152	378.27
8		40.948	117.25	-10.69	158.198	276.85
9	24.00	N/A	N/A	N/A	24.00	42.00

①, ②, ③ : 100%TL of shear, bending and compression load
 ④ : ①+②+③
 ⑤ : 1.75×(①+②+③)

2.4 시험 프로파일

시험 프로파일은 하중 프로파일과 하중제어 설정으로 구성된다. 하중 프로파일은 100%TL 이내의 범위에서는 하중이 30초 동안 10%TL씩 증가하도록 하였고, 100%TL을 초과하는 하중부터는 파손에 따른 안전문제 등을 고려하여 동일시간 5%TL씩 증가하도록

설정하였다.

Figure 6은 전단하중 시험에 대한 100% 시험 프로파일이고, 본 시험을 수행하기 전에 30%TL의 사전시험을 수행하도록 시험프로파일을 구성하였다. 참고로, Fig. 7~10에 나타난 등가압축, 굽힘, 조합하중 시험에서도 100%TL 또는 175%TL 시험을 수행하기 전에 30%TL 사전시험을 수행하도록 구성하였다. 그리고, Fig. 6에서, 본 시험착수 전 1번~8번 수직하중부과기에 상부치구 중량 보상을 위한 tare load가 부과되는 것을 볼 수 있다. Figure 7은 등가압축 하중시험에 대한 100%TL 시험프로파일이다. 전단하중 시험과 동일하게 1번~8번 수직방향 하중부과기에 상부치구 중량으로 각각 -10.69kN을 부과하였고, 각 하중부과기에 동일한 하중을 분포시켜서 100%TL 시험을 수행하였다. 굽힘 하중시험과 조합 하중시험의 시험 프로파일도 유사한 방식으로 구성하였는데, 굽힘 하중시험의 프로파일은 Fig. 8, 조합하중시험의 100%TL과 175%TL 시험 프로파일은 Fig. 9와 10에 나타내었다.

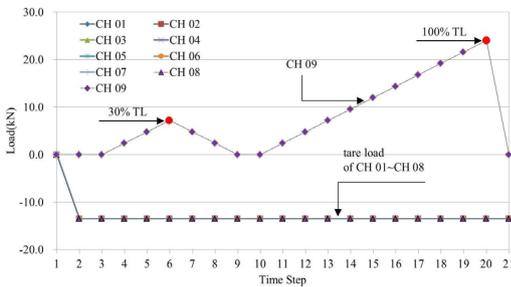


Fig. 6 Test Profile for Shear Load Test

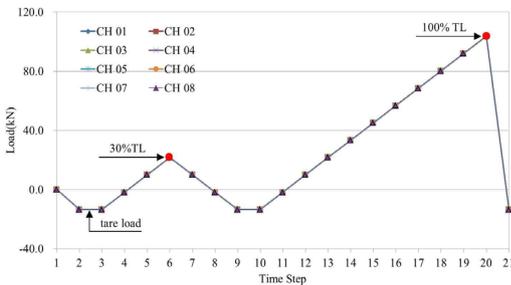


Fig. 7 Test Profile for Compression Load Test

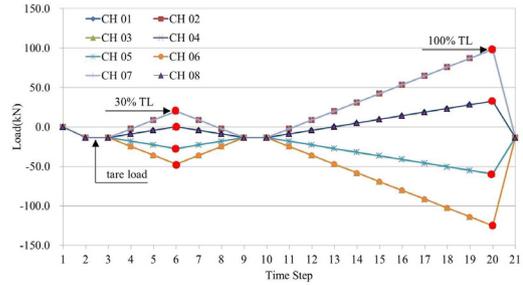


Fig. 8 Test Profile for Bending Load Test

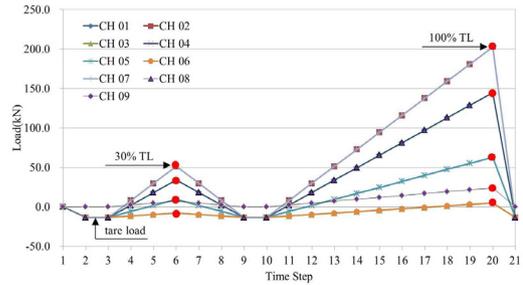


Fig. 9 Test Profile for Combination Load Test

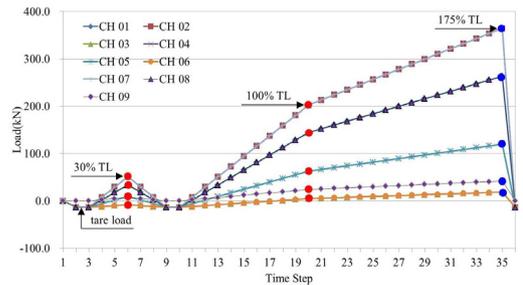


Fig. 10 Test Profile for Combination Load Test

2.5 시험 결과

본 장에서는 정하중 시험 결과로 각 시험으로부터 획득한 load error와 A-b compare error를 제시하였다. Load error는 입력하중(command load, 이하 CMD)과 하중 출력신호(feedback, 이하 FDK) 사이의 오차를 의미한다. 그리고, 로드셀에는 하중신호 출력을 위해 Fig. 11과 같이 channel A와 channel b의 2개 channel이 있는데, A-b compare error는 channel A와 channel b의 FDK 오차를 의미한다. 참고로, 기본적인 FDK는 channel A의 출력신호로 설정하기 때문에 대문자 A로 표기하여 channel b와 구분하였다.

Load error는 inner error와 outer error로 구분하여 설정하였는데, inner error와 outer error는 각 하중부과기에 작용하는 최대하중의 5%와 8%로

설정하였고, A-b compare error의 inner error와 outer error는 최대하중의 1.5%와 2%로 설정하였다.



Fig. 11 Channel A and b of Load Cell

하중부과기 하중이 inner error에 도달하면 시험정지(hold) 그리고 outer error에 도달하면 셧다운(shutdown)시켜 설정된 값 이상의 하중이 시험치구와 시험시편에 작용하지 않도록 설정하였다. 참고로, load error는 돌발 상황이 발생했을 때 시험시제, 시험장비, 그리고 시험치구 보호를 목적으로 설정한다. 그런데, load error를 너무 큰 값으로 설정하게 되면 시험 데이터의 신뢰성에 문제가 발생할 수도 있다. 그러나, 지나치게 작은 값으로 설정하게 되면 시험수행 자체가 어려울 수도 있다. 따라서, 시험결과의 신뢰성과 더불어 원활한 시험장비 운용을 고려하여 load error를 설정해야 하는데, 위에서 제시한 load error 값들은 자체적으로 다양한 구조시험 경험을 통해 획득하여 사용하고 있는 설정 값이다.

Figure 12~15는 전단하중 100%TL, 굽힘하중 100%TL, 압축하중 100%TL 그리고 조합하중 175%TL에서의 load error를 보여주고 있다. 최대 오차는 175%TL 조합하중에서 발생하고 있는데, 특히 6번 수직방향 하중부과기에서의 오차가 약 1.18%로 다른 채널과 비교하여 상대적으로 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 하중부과기가 CMD에 상응하는 하중을 작용하기 위해서는 서보밸브 상태, 유압온도, 작동기 튜닝 등 여러 조건들이 시험수행을 위해 적절하게 준비되어야 한다. 그러한 관점에서 향후 6번 수직방향 하중부과기와 관련된 서보밸브, 로드셀 또는 유압 장치에 대한 추가 점검이 필요할 것으로 보인다. 하지만 입력하중이 증가하면서 6번 하중부과기의 load error는 감소하고 있고, 최대하중에 도달했을 때는 load error가 0.3% 수준으로 나타나고 있다. 그리고, 전단,

굽힘, 압축하중 시험에서도 0.1%~0.69%의 오차가 발생하는 것으로 파악되어 전체적으로 load error 5% 이내에서 하중 제어가 적절히 수행된 것으로 판단된다. 또한, Fig. 16은 전단하중 100%TL, 굽힘하중 100%TL, 압축하중 100%TL 그리고 조합하중 175%TL에서의 A-b compare 오차를 보여주고 있다. 최대 오차는 굽힘하중 시험에서 1.27%로 파악되어 셋업 조건인 A-b compare inner error 1.5% 이내에서 시험이 잘 수행된 것으로 파악된다. 따라서, 각 시험의 load error와 A-b compare error 결과로부터 복합재 산화제탱크의 정하중시험은 전체적으로 하중제어가 잘 되면서 성공적으로 수행된 것으로 판단된다. Figure 17은 시험시제의 0도, 90도, 180도, 270도 위치에 설치되어 있는 변형률게이지에서 측정된 변형률 결과들이다. 변형률게이지는 175%TL 까지 선형으로 증가하고 있으며, 구조적 파손 또는 좌굴에 의한 이상 변형은 발생하지 않는 것으로 파악되어 시험시제의 구조 강건성이 확인되었음을 알 수 있다.

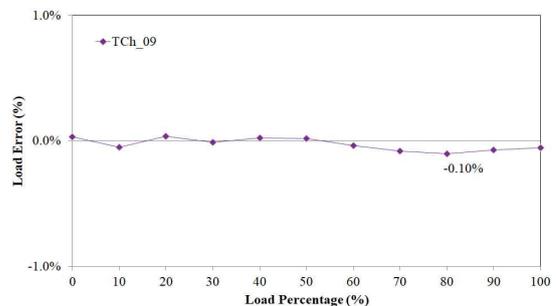


Fig. 12 Load Error of Shear Load Test

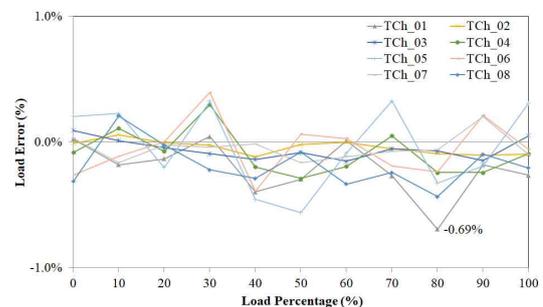


Fig. 13 Load Error of Bending Load Test

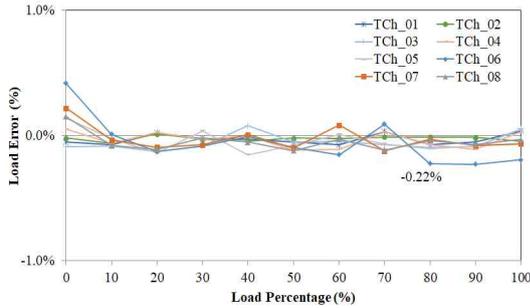


Fig. 14 Load Error of Compression Load Test

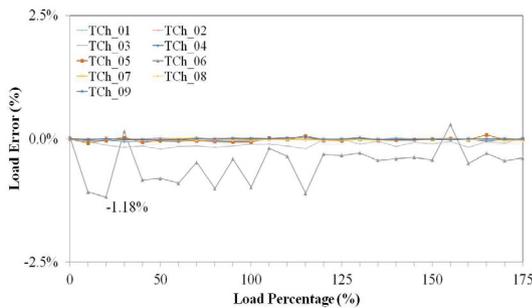


Fig. 15 Load Error of Combination Load Test

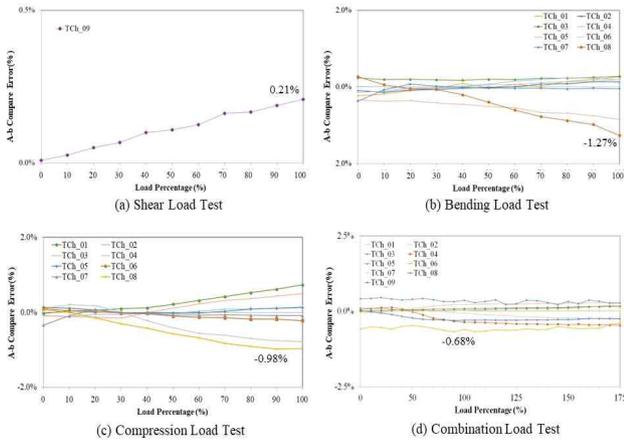


Fig. 16 A-b Compare Error of Shear, Bending, Compression, Combination Load Test

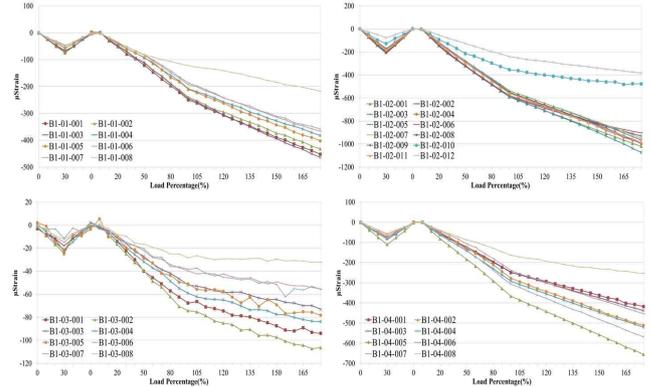


Fig. 17 Result of Strain Gages Installed on Test Specimen

3. 결 론

본 논문에서는 발사체용 복합재 산화제탱크의 구조 건전성 검증을 위해 수행된 정하중 시험의 결과를 제시하였다. 복합재 산화제탱크의 시험 요구도와 정하중시험을 위해 구성된 시험셋업을 설명하고, 시험 요구도를 반영하여 산출된 시험하중과 해당하중을 적용한 시험프로파일을 제시하였다.

정하중 시험결과로, 진단하중, 등가압축하중, 굽힘하중 그리고 조합하중시험에서 CMD와 FDK 사이의 load error와 A-b compare error 를 분석하여 셋업 조건 범위 내에서 하중제어가 적절히 수행되었음을 확인하였고, 더불어, 발사체용 복합재 산화제탱크의 구조 강건성도 확인하였다.

본 논문에서 소개한 정하중 시험은 개량형 발사체 적용을 목표로 하는 복합재 산화제탱크에 대한 구조 강건성의 확인을 목적으로 수행되었으며, 향후, 개량형발사체 사업이 본격화되면 발사체 구조물에 대한 강건성 검증에 적용될 것으로 기대된다.

References

[1] Y.S. Chae, "The success of launching the Naro to a space power-the meaning of the success of the Naro", The science & Technology, sno.526, pp. 51-54, 2013.

[2] G. Kim, Y. Lee, "Structural Sizing and Optimization of Aerospace Vehicle Fuselage", The Korean Society

- for Aeronautical and Space Sciences, vol. 28, no.5, pp.123-132, 2000.
- [3] J. Yoo, J.W. Lee, J.H. Yoon, Y.S. Jang, Y.M. Yi, “Non-linear Analysis and Compressive Test of Isogrid Cylinder that has diameter in 2.4m”, KSME 2006 Spring Conference , pp. 1064-1069, 2006.
- [4] G. Kim, Y. Jang, Y. Lee, “Overview of Structural Analysis of Space Launch Vehicle”, Journal of the Computational Structural Engineering institute of Korea, vol. 21, no.3, pp. 43-50, 2008.
- [5] J. Yoo, K. Kim, “KSLV-II 75-Ton Turbo Pump Support Bar Structure Test”, SASE 2018 Fall Conference FD 2-4, pp.1-6, 2018.
- [6] [ko.wikipedia.org/wiki/NURI_test launch vehicle](https://ko.wikipedia.org/wiki/NURI_test_launch_vehicle)
- [7] ko.wikipedia.org/wiki/NURI
- [8] John Vickers, “Composite Cryotank Technologies and Demonstration”,<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160008034/downloads/20160008034.pdf>