

# 전기체 구조시험의 덤프밸브 조절절차 개발

김성찬<sup>†</sup>·김성준<sup>\*</sup>·황인희<sup>\*\*</sup>

## Setup Procedure of Dump Valve for Full-Scale Airframe Test

Sung Chan Kim, Sung Jun Kim and In Hee Hwang

**Key Words:** Setup Procedure(조절절차), Full-Scale Airframe Test(전기체구조시험), Dump Load Release(덤프하중완화), Dump Valve(덤프밸브), Meter-out Flow Control(미터아웃 유량제어)

### Abstract

This paper present a procedure of meter-out flow control method for dump valve in full-scale airframe test. Emergency stop, which results in dump state, can be happened during full-scale airframe test by several causes. Because servo valve can't control hydraulics actuator in the dump state, pressure in cylinder chamber may rise abruptly and overload can be acted to the test article. In this paper, the procedure and technology of orifice setting are investigated to protect the test article from unexpected loads by dump. The test results show that the presented methods decrease peak loads and improve unloading characteristics of hydraulic actuators in the dump state.

### 1. 서 론

항공기개발에 있어 구조적 안전성을 확인하는 전기구조시험에서는 상당히 고가의 시험체인 실기체를 이용하여 시험을 수행한다. 그러므로 시험하중이 아닌 시험수행 오류로 발생한 과하중이 가해져 시험체가 파손되면 항공기 개발일정에 중대한 지연을 야기한다. 따라서 시험수행기관은 시험 착수전에 시험체의 안전확보를 위한 장치에 대해 고려하여야 하고 시험을 위해 70-80여개의 유압작동기를 동시에 제어하는 전기체 구조시험에 있어 대표적인 안전장치가 덤프하중 해소장치이다.

통상, 시험수행 중에는 자연재해로 인한 정전 사고 혹은 시험체의 파손, 설계강도 미달로 인한 시험정지등 기타 내, 외부요인에 의해 비상시험 중지상태가 발생하며, 이 상태에 도달하면 시험 제어장비가 비상시험 중지(Shutdown)절차에 따라 제어장치의 전원을 차단하며 이런 상태를 덤프(Dump)라고 한다.<sup>(1)</sup>

덤프상태가 되면 서보제어 유압작동기를 제어하고 있는 서보밸브의 전원이 차단되므로 시험체에 하중을 가하고 있던 실린더의 양단에 외부조건에 따른 급격한 압력변화가 발생되고, 이 변화는 시험체에 과하중으로 가해지게 되어 시험체의 파손을 유발한다.

본 연구에서는 고가의 장비와 시험체를 보호하기 위한 충격완화장치로서 하중부하시 시험체의 변위를 고려하여 충격을 완화시키는 방법을 소개하고, 이를 위한 밸브의 구성, 특성분석결과를 이용한 오리피스 조절방법 및 절차를 개발하였고, 실제시험을 통해 충격완화가 효과적으로 이루어짐을 확인하였다.

<sup>†</sup> 한국항공우주연구원

E-mail : sckim@kari.re.kr

TEL : (042)860-2018 FAX : (042)860-2009

<sup>\*</sup> 한국항공우주연구원

<sup>\*\*</sup> 한국항공우주연구원

시험정지에 의한 충격을 완화하는 방법은 크게 소프트웨어를 이용하는 것과 하드웨어를 이용하는 경우로 나뉘어 지는데, 이 중 하드웨어방법은 유압의 압력을 제한하는 방법과 유량을 조절하는 방법으로 나뉘어 진다. 본 연구에서 개발한 조절 방법은 시험도중 어느 시간에나 적용이 가능한 유량조절방법으로서, 예측된 자세를 동일비율로 유지하면서 중립상태로 가게하고 변위 변화 동안 시험체에 가해지는 하중이 최대시험하중을 초과하지 않도록 유량을 조절하는 것이 중요한 개념이다.<sup>(2)</sup> 최대시험하중은 시험부의 설계제한하중에 의해 결정되며 한 시험부에 가해지는 전체 시험 조건중 가장 큰 설계제한하중을 의미한다.

본 논문에서는 전기체 구조시험에서 일정변위 변화를 구현하기 위한 밸브의 구성, 변화의 변수로 필수적인 밸브의 특성분석, 오리피스 조절방법과 절차를 설명하고 실제시험에 적용한 결과를 나타내었다

## 2. 덤프밸브의 구성 및 조절절차

### 2.1 덤프밸브 구성회로

시험체의 선형적인 변위변화를 구현하기 위한 덤프밸브의 구성회로는 Figure1과 같다.<sup>(3)</sup>

기본적인 구성은 미터아웃 방식의 유량제어밸브 회로로 구성하였고 하드웨어는 Parker/Mantrol사의 미터링밸브와 HydraForce사의 Switching Element와 Solenoid Valve로 조합한 절환밸브를 사용하였다.

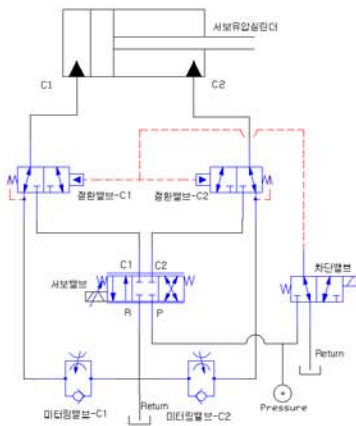


Figure 1 Hydraulic schematic of dump valve

### 2.2 덤프밸브 작동원리

정상 하중 제어상태는 차단밸브에 전원이 들어간 상태에서 로드셀신호에 의해 서보밸브가 서보 유압실린더의 압력과 유량을 제어하고 있는 상태이다. 정상상태에서 덤프가 이루어지면 Figure 1의 구성회로와 같이 유압라인이 형성되는데, 먼저 차단밸브가 절환밸브C1, C2를 누르고 있던 유압유를 탱크로 복귀시켜 절환밸브C1, 절환밸브C2가 작동되고, 서보유압실린더의 C1, C2 라인을 미터아웃 유량제어 방식으로 부착된 미터링밸브 C1, 미터링밸브 C2와 연결시키게 된다. 미터링밸브가 연결되면 미터링밸브의 오리피스를 통해 리턴라인으로 유량이 흐르게 되고, 이 때의 유량은 오리피스면적에 의해 조절되게 된다. 전기체 구조시험에는 Figure 1과 같은 덤프밸브가 부착된 유압작동기 70 ~ 80 개가 동시에 사용되게 되며 이 밸브를 제어하여 충격을 흡수코자 한다.

### 2.3. 덤프밸브 조절절차

시험을 수행하기 전에 모든 미터링 밸브는 각 시험조건에서의 유압작동기의 변위, 시험하중 작용 시의 실린더(인장,압축 방향)의 압력, 미터링 밸브의 특성곡선을 고려하여 조절한다.

#### 2.3.1 미터링밸브의 특성곡선

미터링 밸브의 특성 곡선은 시스템 압력과 유량, 실린더 챔버의 압력과 유량 및 미터링 밸브의 오리피스 단면적과 관련되므로 이에 대한 정보가 미리 준비되어야 한다. 이를 위해 하드웨어 제작업체에서 실험한 특성곡선(Figure 2)을 사용하였다.

본 연구에서는 오리피스 단면적수의 척도로 미터링밸브의 손잡이에 표현된 Color Band와 눈금 회전수를 사용하였다. 밸브의 Color Band 회전수가 커지면 면적이 증가하고, 회전수를 줄이면 면적이 감소하는 구조이고 사용한 오리피스의 유량 계수(Cv)는 .787이다.<sup>(4)</sup>

본 조절절차에서 얻어지는 최종변수는 70-80여 개 유압작동기에 부착된 덤프밸브에 대해 상호 최적화된 Color band로 표현되는 오리피스 조절 값이다

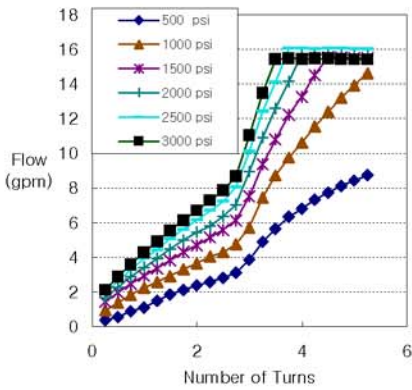


Figure 2 Characteristic curve for flow control

2.3.1 유압작동기의 변위

덤프 시 실린더 내의 오일이 리턴라인으로 흐르게 되는데 시험체에 설치되어있는 모든 유압작동기의 변위가 같은 비율로 감소하여야 특정 유압작동기에 하중이 집중되는 현상이나 과하중이 발생하지 않는다. 그러므로 수행되어야 할 각 시험하중 조건에 대해 시험체의 변위 변화량을 유한요소해석을 수행하여 Figure 3과 같이 구하고, 구해진 변위량에서 유압작동기의 위치에 따라 각 유압작동기의 필요변위를 계산하고 덤프 시 각 유압 작동기가 같은 비율로 변위가 감소하도록 미터링 밸브를 조절함으로써 시험체가 선형적으로 중립위치로 돌아가도록 하여 최종적으로 충격 완화 효과를 얻어낸다.

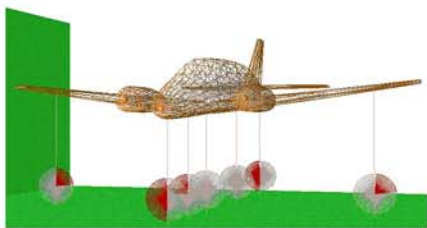


Figure 3 Deflection data for test article

2.3.2 실린더내의 압력변화 예측

덤프 시 Figure 4와 같은 통상의 실린더내부 압력은 작용하중을 실린더내의 단면적으로 나누어 계산한다. 덤프 시에 유압작동기에 작용하는

Peak Load는 하중이 작용하는 방향(C1- $P_{comp}$ )의 실린더에서의 방출되는 단위 시간 당 오일의 양과 반대편 실린더 내부(C2-  $P_{tens}$ )에서 방출되는 단위 시간당 오일의 양과 밀접한 관계가 있다. 하중방향의 실린더 내부의 오일의 단위시간당 방출량보다 반대편 실린더의 오일이 더 빨리 방출되면 아래의 Figure 5와 같이 Peak load가 커지게 된다.

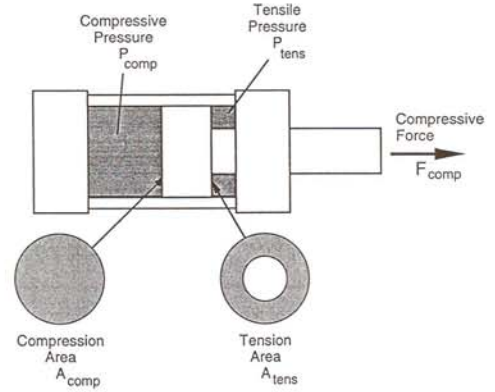


Figure 4 Hydraulic Servo Actuator

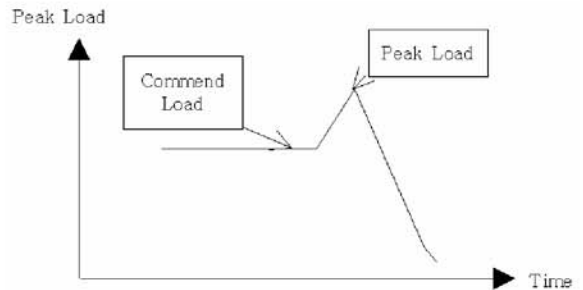


Figure 5 Type of Peak Load

덤프 시 각 실린더에서 방출되는 오일의 양은 각 실린더내부의 압력과 밸브의 오리피스 단면적에 의해 결정되므로 각 실린더 내부의 압력을 정확하게 파악하고 그에 따른 오리피스 단면적을 결정하여야 한다. 각실린더 내부의 압력은 (1)식으로부터 얻을 수 있다.<sup>(3)</sup> 여기서  $P_{c1}$ 은 하중이 가해지는 방향의 실린더 압력이고  $P_{c2}$ 는 반대편 실린더의 압력이다.

$$P_{c1} = \frac{F_{c1}}{A_{c1}} + P_{c2} \frac{A_{c2}}{A_{c1}} \quad (1) \quad (1)$$

$P_{C1}$ 의 압력은  $P_{C2}$ 의 압력에 의해 결정되는데  $P_{C2}$ 의 압력은 유압작동기의 특성과 하중상태에 따라서 변한다.

본 연구에서는 하중용량이 25kN, 31kN, 100kN 인 유압작동기에 있어 하중의 크기에 따른  $P_{C2}$ 의 압력특성에 대해 실험을 수행하였다.

25kN은 명확하게 Figure 6에서 하중이 커짐에 따라  $P_{C2}$ 의 압력이 작아짐을 알 수 있고, 31kN, 100kN은 일정범위로 Figure 7, 8에서 하중이 커짐에 따라  $P_{C2}$ 의 압력이 작아짐을 알 수 있었다. 이들 시험결과를 이용하여 스프레드 쉬트로 각 유압작동기의 압력변화 곡선을 얻어내었다.

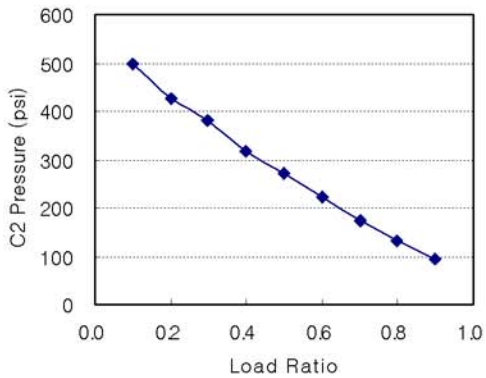


Figure 6 Relation curve between load and C2 pressure(25kN)

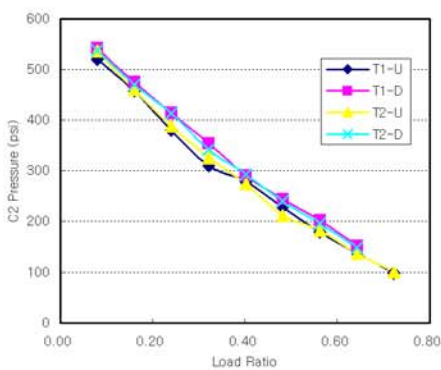


Figure 7 Relation curve between load and C2 pressure(31kN)

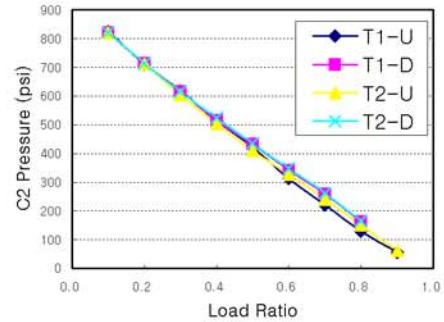


Figure 8 Relation curve between load and C2 pressure(100kN)

2.4 덤프 튜닝

조절된 미터링 밸브가 덤프 시에 제대로 작동되는 가를 확인하기 위해 낮은 하중 수준(0~40%)에서 덤프를 수행하고 각 유압 작동기에 작용하는 하중을 검토하여 시험도중 덤프가 발생했을 때 과하중이 작용될 수 있는 유압 작동기에 대해서는 미터링 밸브를 재 조절을 한다. 과하중의 작용에 대한 판단기준은 Figure 9와 같은 Peak Load Profile을 가지는 유압작동기 이다. 미터링 밸브의 재 조절은 실험적으로 구해진 경험식 2, 3을 이용하여 조정한다. 재차 2 ~ 3회의 추가 Dump를 수행하여 각 유압작동기에서의 peak load data를 분석한 후 Peak가 없어질 때까지 아래의 방법으로 조절한다.

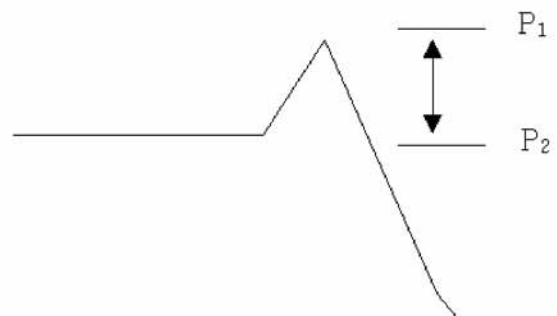


Figure 9 Peak Load Profile

경험적인 방법을 이용하여 밸브의 조절값은 아래와 같이 수정한다. 만약 유압작동기에 인장하중이 작용하면,

$$C1 = P1/P2 * C_{1or} * (1.5 \sim 2.0) \tag{2}$$

$$C2 = P2/P1 * C2_{or} * (0.5 \sim 0.6) \quad (3)$$

같이 조절하고 압축하중이 작용하면 반대로 조절한다.

2.5 덤프밸브 조절절차

앞에서 기술한 바를 정리한 조절절차는 다음과 같다.

- Step 1. 조절전 사전분석을 통해 Database 구축
- Step 2. Database에서 해당 작동기 변위와 압력 계산
- Step 3. 각 실린더별 방출 유량 과 오리피스 단면적 결정
- Step 4. Color Band 를 이용한 오리피스 조절
- Step 5. 덤프 튜닝을 통한 오리피스 면적 보정
- Step 6. 시험수행

3. 개발절차 적용시험

유한요소해석 결과로 얻어진 시험체 변위로부터 유압작동기 변위를 예측하고, 예측된 유압작동기 변위, 시험으로 얻은 미터링 특성곡선과 시험하중의 크기에 의해 Table 1와 같이 오리피스의 회전수를 구하는 절차로 전기체 구조시험에 적용하였고 약40여회의 시험에서 같은 특성을 보여줌을 확인하였다.

Table 1 Example for Setting Orifice

항목	Left Wing								
	LEF		TEF	Wing Box					
CH	13	16	12	10	14	18	11	15	17
AV ID	52	66	65	47	71	20	26	50	43
Load(lbs)	10752	15291	8722	11372	9758	4938	4326	15692	5654
ExpectedDisp(mm)	81.9	292.5	76.9	37.9	150.7	349.2	41.1	162.2	337.4
Cap.Ratio	0.5	0.7	0.4	0.5	0.3	0.7	0.4	0.7	0.4
C2 Pressure (psi)	388	172	502	355	669	157	512	157	525
Type1	T	T	T	T	T	T	T	T	T
C1 Pressure(psi)	2040	2279	1963	2067	1821	2283	1621	2305	1943
Volume(in3)	24.7	88.2	23.2	11.4	74.6	34.4	6.3	48.9	68.4
Flowrate H(lin3/sec)	3.7	13.2	3.5	1.7	11.2	5.2	0.9	7.3	10.3
gpm	1.0	3.4	0.9	0.4	2.9	1.3	0.2	1.9	2.7
NT_H Total turns	0.0	0.9	0.0	0.0	0.8	0.1	0.0	0.3	0.7
NT_H	0.6	0.9	0.6	0.6	0.8	0.6	0.6	0.6	0.7
Type2	C	C	C	C	C	C	C	C	C
C1(T)	0.6	0.9	0.6	0.6	0.8	0.6	0.6	0.6	0.7
C2(C)	0.5	3.3	0.3	0.2	1.0	1.8	0.1	2.7	1.1
C1(T)	0.6	0.9	0.6	0.6	0.8	0.6	0.6	0.6	0.7
C2(C)	0.1	0.5	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.4	0.2
C1(T)	1.2		1.2	1.2	4.5			1.8	2.8
C2(C)								0.1	

오리피스 조절 전 40% 하중크기로 덤프를 수행하면 대부분의 유압작동기가 Figure 10과 같이

Peak가 증가하는 덤프하중 특성을 보여 주고있다.

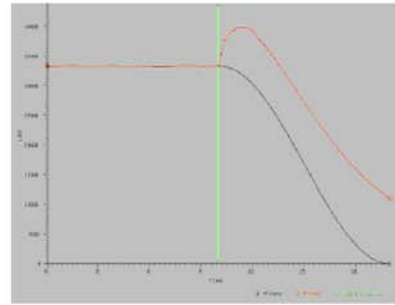


Figure 10 Dump load profile before setting

본 연구에서 획득된 덤프밸브 조절방법에 의해서 얻어진 초기밸브 조절 값으로 덤프밸브를 조절한 후에는 덤프하중특성이 Figure11과 같이 현저하게 감소 되었음을 알 수 있다.

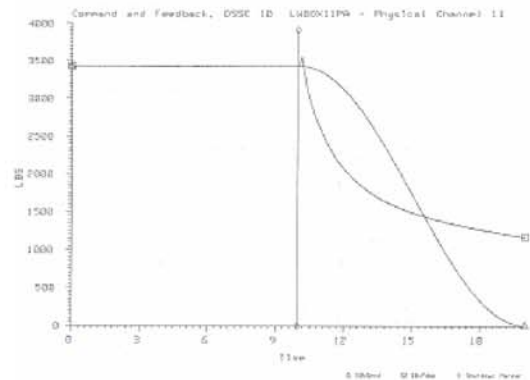


Figure 11 Dump load profile after initial setting

하지만 아직 Peak Load의 형태가 남아있으므로 획득된 조절절차와 경험식에 의거하여 덤프튜닝을 2회 실시하였고 그 결과 Figure 12와 같이 Peak를 완전히 제거하였다.

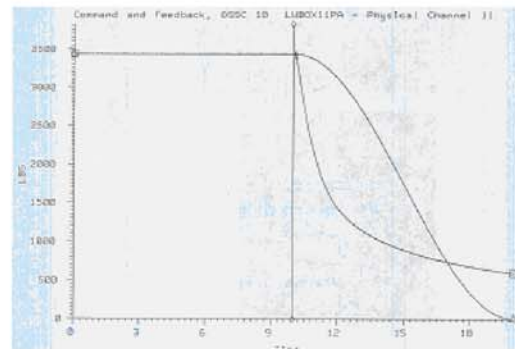


Figure 12 Dump load profile after dump tuning

조절된 덤프밸브를 이용하여 국산 초음속훈련기의 실제 구조시험을 약 40여회 수행하였으며 실제 시험 도중 134% 하중상태에서 패드파손으로 기인한 덤프가 발생하였고, 그 결과 덤프하중 특성이 잘 유지됨(Figure 13)을 확인하였다.

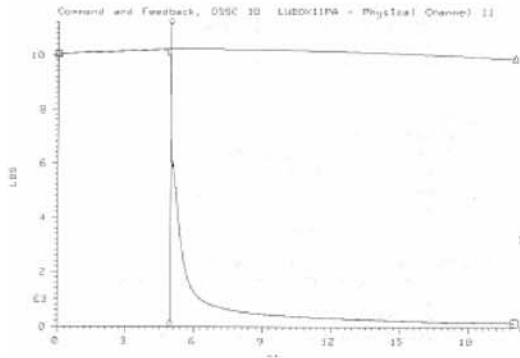


Figure 13 Dump load profile at 134% on actual test of T-50 static test

#### 4. 결 론

전기체 구조시험의 성공적인 시험수행을 위해 시험중 안전장치 확보가 필수적이며 시험의 효율적인 진행을 위해 안전장치 setup 시간축소에 대한 고려가 필요하다. 본 연구에서는 충격완화를 위한 안전장치로서 하중부가시 시험체의 변위를 고려하여 충격을 완화시키는 방법을 소개하고, 이를 위한 밸브의 구성, 특성분석결과를 이용한 오리피스 조절방법 및 절차를 개발하여 최적의 초기값 예측시간 단축, 실험치와 이론을 병합한 경험식을 추출하여 최소의 덤프횟수로 튜닝완료 를 이루었고, 실제 전기체 구조시험에 적용을 하여 그 결과의 유효성을 확인하였다. 향후 얻어진 경험식에 대한 보다 이론적인 접근이 필요하다.

#### 참고문헌

(1) Sung Chan Kim, Jeong Woo Shin, Jae Yeul Shim, In Hee Hwang, 2002, "Technical Report of Fixture Design for Full scale static test", Aerospace Engineering and Technology, Vol 1, No.2, pp. 32-43

- (2) Lockheed Martin, 2002, "Structural Test Manual", LMTAS, DSR-SA-021, pp. 50-51
- (3) MTS Systems Corp., 2000, "Load Limiter Setup module", MTS Product Manual, pp. 2-1
- (4) Parker Hannifin Hydraulics Corp., 2002, "Catalogue HY14-3000/US", Parker Hydraulics, pp. K2-K3