

고등훈련기 전기체 정적 극한하중시험

Ultimate Load Test for Full-scale Airframe of Advanced Jet Trainer

심재열*, 황귀철, 채동철, 성경진, 김성찬, 황인희(한국항공우주연구원)

1. 서 론

한국항공우주연구원에서는 한국공군이 개발하는 고등훈련기(T-50)에 대한 전기체 정적시험(Full-scale airframe static test)을 수행하였다. 고등훈련기는 한국항공우주산업이 개발주관이며, 전기체 정적시험은 한국항공우주연구원에서 수탁사업으로 1999년 10월에서부터 4년 10개월간 진행되었다. 2001년 12월까지 시험준비를 위해 시험하중해석, 시험장치 설계 및 제작, 시험설비구축 등의 업무가 진행되었고 2002년 초에 시험수행이 시작되었으며, 2002년 3월까지 1단계시험인 초도비행에 관련된 5가지의 시험조건에 대한 설계제한하중(Design limit load, DLL) 시험이 진행되었다.[1] 2단계시험에서는 항공기 전기체를 대상으로 기동조건에 대한 150%설계제한하중시험(150%DLL)이 진행되었다. 3단계시험에서는 국부적인 시험체에 150%DLL을 작용하는 국부시험이 진행되었다.

전기체 정적시험을 수행하기 위해서 시험하중해석, 시험설비 구축, 시험장치 설계 및 제작, 시험체 및 시험장치 설치, 시험계장설치, 시험수행, 시험데이터 감시 및 분석, 시험체 검사 등의 업무가 진행되었다.

본 연구에서는 고등훈련기 전기체 정적시험에서 150%DLL 시험 수행을 위한 시험하중조건, 시험하중해석, 시험장치, 시험설비, 시험절차, 시험결과 등에 대하여 기술하였다.

2. 시험하중 조건

고등훈련기의 전기체 정적시험의 시험요구조건에는 당초 28가지의 하중조건과 3가지가 추가되어 총 31가지의 하중조건이 포함되었으며, 이들은 모두 기동하중에 대한 것이다. 지상하중에 대한 하중조건은 독립적인 다른 시험에서 실시

되므로 본 시험에서는 요구되지 않았다. 31가지의 시험조건에 대한 하중조건별 관심영역을 그림 1에서 나타내었다. 예를 들어 날개의 관심영역에 대하여 살펴보면 날개 Box, LEF(Leading edge flap), TEF(Trailing edge flap)에 각각 14회, 3회, 2회가 고려되었음을 나타내어 주며, 실제 요구사항에는 주요관심영역이 세분화되어 구체적으로 명시되어 있다. 그리고 하중조건 No. 2에서는 날개의 Box, LEF, Cockpit, Fuselage fuel tank가 관심영역인 하중조건임을 보여주고 있다. 그림1에서 Cockpit, Fuselage fuel tank, Air inlet은 여압시험과 관련된 것으로 고등훈련기 전기체 정적시험에서 여압이 포함된 시험조건들은 총 6회가 있으며 이들 하중조건에는 압력과 기동하중을 동시에 작용하여야 하였다.

3. 시험하중 해석

시험하중 산출을 위한 첫번째 단계는 그림 2에서와 같이 설계하중 분석으로 시작된다. 두번째 단계에서는 시험체에 하중을 작용할 수 있는 시험체의 하중지점들이 정의되어야 한다. 시험체의 하중지점에는 일반적으로 피팅(Fitting)과 스트랩(Strap) 그리고 패드(Pad) 등이 부착되어 사용된다. 본 시험에서 피팅과 스트랩은 큰 하중이 작용될 수 있는 동체의 구조물과 연결될 수 있도록 시험체 조립 전에 미리 정의하여 동체가 조립될 때, 볼트류 등의 하드웨어를 사용하여 부착시켰고 날개와 수직 꼬리날개 등에는 접착제를 사용하여 패드를 부착하였다. 설계하중 VMT는 이론적인 값으로 위에서 설명된 하중지점들을 고려하지 않고 산출되므로 설계하중 VMT로부터 이들 하중지점들에 작용할 외부하중인 시험하중을 산출하여야 한다. 세번째 단계

는 시험진행의 효율성을 고려한 일차(Primary) 휘플트리의 정의와 시험의 정확도 검토이다. 이 단계에서는 고려되는 수십 가지의 시험조건들을 위해 영역별 휘플트리를 각각 설계/제작하여 시험조건이 변경될 때마다 새로 설치하는 것은 정확도 면에서는 바람직하지만 시험진행 시간을 대단히 많이 요구하게 된다. 그림1에서 설명한 바와 같이 각 시험 하중조건에는 시험체의 관심영역이 정의되어 있으므로 이들의 관심영역에서는 시험하중이 설계하중과 비교하여 높은 정확도를 유지(2%이내)하도록 각각의 휘플트리를 설계/제작하여 해당 시험조건에 관심영역에서 사용하도록 한다. 반면, 그 외의 영역에서는 요구하는 정확도를 다소 완화(10%이내)시켜 이차(Secondary) 휘플트리를 설계/제작한다. 이차 휘플트리는 우선 기존의 일차 휘플트리들 중에서 요구되는 정확도를 만족시키는 것이 있는 지 검토하고 없는 경우 휘플트리를 추가로 설계/제작하여 휘플트리의 제작 수를 최소화 한다. 이차 휘플트리를 검토할 경우 바로 앞에서 사용된 해당영역의 일차 또는 이차 휘플트리를 우선 고려하여 이들이 선정되는 경우는 휘플트리 설치변경의 횟수를 줄일 수 있도록 하였다. 이렇게 하여 설계하여 시험에 사용된 휘플트리 수는 날개 Box, LEF, TEF, VT, 동체에 각각 42개, 29개, 26개, 16개, 37개 등 총 150개이다. 이 단계에서는 설계하중에서 산출된 초기 시험하중들은 약간씩 조정이 되고 이들로 인한 시험하중 VMT가 설계하중 VMT와 비교하여 원하는 오차범위에 들어가는 지를 계속적으로 점검하여야 한다. 마지막 단계에서는 날개, 동체 등이 각각 독립적으로 평가되고 하중이 다소 조정이 되므로 날개와 동체가 합쳐진 시험체에 대한 균형유지를 점검하여야 하고 이때 하중의 추가작용은 시험체에 하중작용에 대한 여유가 있는 부분을 선정하게 된다.

4. 시험 장치

전기체 시험을 위해 고려되는 모든 하드웨어들을 시험장치로 정의한다. 시험장치들 중 대표적인 시험장치들로는 시험 후레임(Frame), 하중부가시스템>Loading system), 중량보상시스템(Counterbalance system), 시험체 자세제어시스템(Constraint system) 등이 있다.

시험 후레임은 그림3에서 보는 바와 같이 상부와 측방향에서 시험체에 작용할 하중을 지지하는 기본 구조물로서 16개의 기둥과 기둥위에 10개의 종방향 보와 횡방향의 보로 구성된 3층 H-형강 보 구조물이다. 하중작용을 위해 반력보(Reaction beam)를 시험후레임의 상부와 기둥에 설치한다. 상부에 설치된 반력보에 유압작동기를 설치하여 시험체에 윗방향 하중을 작용할 수 있고 측방향에 설치된 반력보에 유압작동기를 설치하여 측방향의 하중을 시험체에 작용할 수 있게 된다. 시험 후레임은 반력보 뿐만 아니라 유압배관지지대, 유압작동기 제어를 위한 케이블 배선을 위한 트레이를 지지하는 역할도 하도록 설계하였다. 특히, 시험장치 설치수정 및 시험체 육안검사를 위한 시험체 접근할 수 있도록 2층에 미끄럼 플랫폼으로 설계되었다. 하중 후레임 설계는 CATIA의 솔리드 모델링기법을 이용하여 3차원 설계를 하였고 이를 통해 시험장치간의 간섭을 설계단계에서 점검할 수 있어 설계기간을 단축할 수 있었다.[2]

시험체에 하중작용을 하기 위해 구성되는 하드웨어를 하중부가 시스템으로 정의한다. 하나의 유압작동기가 시험체에 하중작용을 하기 위한 하드웨어들로는 우선 시험체와 하중부가 시스템을 연결하는 연결수단(피팅 또는 패드), 그리고 유압작동기로부터 작용되는 하중을 분배시키는 휘플트리, 마지막으로 유압작동기 등이 있다. 제3장에서 설명한 절차에 따라 산출된 하중작용 지점들인 피팅 또는 패드에 작용할 시험하중으로부터 옆에 위치한 두 개의 지점들을 서로 연결하는 베럴과 레버로 기본 구성을 한다. 레버의 하중지점은 두 피팅 또는 패드의 하중비에 의해 결정되고 하중크기는 두지점의 시험하중합이 된다. 1단 레버들의 하중지점이 결정되고 나면, 옆에 위치한 1단의 레버들과 다시 연결되는 2단을 구성, 계속하여 3, 4단 등으로 단계를 높여가며 반복하여 마지막 단의 지점에 유압작동기를 연결하도록 하는 하나의 휘플트리 시스템을 구성한다.(그림4)

시험하는 동안 시험하중으로 인하여 시험체 구조물 내부의 거동은 시험체에 설치된 스트레인 게이지의 출력값으로 모니터링 된다. 시험동안 관찰되는 스트레인 값은 무하중상태(Zero stress)를 기준으로 하여 측정 및 기록하여 관찰하게 된다. 따라서 시험체를 무하중상태로 도달

시키기 위해 사용되는 것이 중력보상(Counterbalance) 시스템이다. 시험체가 무하중 상태로 유지되기 위해서는 스트랩, 피팅, 패드 등을 포함한 시험체 자체에 대한 중량분포, 더미 구조물 그리고 하중부가시스템의 중량정보가 필요하고 이들 중량 분포를 맞추어 시험 전에 보상해 주어야 한다. 시험체와 더미구조물의 중량정보는 설계자료를 통하여 알 수 있고 하중부가 시스템은 기본적으로 설계도구인 CATIA를 통하여 중량과 무게 중심을 산출하고 제작 후 중량 측정하여 검토한다. 중량보상방법은 유압 작동기 또는 기타 기계적 장치를 사용하는 방법으로 구분된다. 유압작동기를 사용하는 경우 독자적인 중량보상장치용 유압작동기를 사용하는 방법과 시험하중 작용 유압작동기를 사용하여 초기 하중(Tare load)기능을 활용하는 방법으로 구분할 수 있다. 초기하중 기능을 사용하는 경우 시스템이 비교적 간단하다. 기타 기계적 장치를 사용하는 경우로는 스프링, 번지 케이블, 도르레와 더미질량을 사용하는 것으로 구분할 수 있고 이들 사용 선택은 하중의 크기, 시험체의 변형정도를 고려하여 결정한다. 시험체 하부에 설치된 휘플트리는 상부에 설치된 유압작동기를 통하여 중량보상을 하게 된다. 시험체와 상하부의 하중부가시스템의 중량정보들을 이용하여 상부에 설치된 유압작동기의 위치와 근접한 위치에 무게 중심이 오도록 시험체의 중량보상 영역을 나누어 각 영역별로 중량보상량을 결정하였다. 본 시험에서 사용된 하중부가시스템에 대한 중량보상의 예제를 그림5에서 보였다. 전기체 구조시험을 수행하기 위해 시험체에 하중을 작용하는 동안에 발생하는 시험체의 강체 이동은 구속되어야 한다. 이는 시험체에 하중을 작용하기 위한 하중부가 시스템이 시험체의 고정상태를 기준으로 설계되므로 시험체의 이동은 하중작용의 정확성을 떨어지게 하기 때문이다. 이와 같이 시험체의 강체이동을 제한하는 시험 시스템을 자세제어 시스템(Constraint system)이라 하고 이 방식을 결정할 때는 변위제어의 기능을 보유한 장비의 특성, 장비의 운용 소프트웨어 능력, 그리고 자세제어를 위해 사용되는 시험체 지지점의 강도 등을 고려하여야 한다. 자세제어 시스템은 전기체 시험체의 3방향(x,y,z)이동과 3방향의 회전(Pitching, Yawing, Rolling)을 제한하여야 하므로 6자유도를 제한하

여야 한다. 일반적으로 전기체 구조시험에서 사용되는 자세제어 시스템 구성방식은 몇몇 가지로 구분할 수 있으며[5], 본 시험에서는 그림6와 같이 6개의 스프링 링크로 구성된 자세제어 시스템을 사용하였다. 각 스프링 링크 양 끝단은 회전이 자유롭도록 링크로 구성하고 각 시험조건에 대하여 각 스프링에서 의도하는 반력을 계산을 통하여 계획하고 각 시험조건에서 스프링에 유발되는 반력을 감시하였다. 계획된 반력을 차이를 보일 수 있으며, 이 차이는 시험체의 강성변형, 하중제어의 허용 오차, 하중부가 시스템의 설치 오차, 중량 보상을 정확하게 할 수 없는 중량물(게이지 선, 여압용 내부 충전재 등) 등으로 인하여 발생할 수 있다. 따라서 하중이 증가되면서 계산된 스프링 예상 반력과 다른 반력이 유발되면, 시험동안 지속적으로 감시하고 사전에 정의한 허용값을 초과하게 되면, 시험을 자동적으로 중지시킬 수 있도록 하였다. 그림7에서 보는 바와 같이 시험에 사용된 스프링 링크는 상하부 각각 두개의 스프링을 예비하중(Pre-load)까지 작용시켜 조립을 한 후 내부의 정지자(Stopper)를 설치하여 스프링이 변형될 수 있는 최대값(Stop tube)을 설정한다. 상부와 하부에 설치된 스프링은 동일한 특성곡선을 가지며 시험체가 스프링 시스템을 위로 잡아 당길 때와 아래로 밀 때 상하부의 스프링이 각각 반응하게 된다. 따라서 스프링 링크에 인장과 압축하중을 작용할 때 측정된 변위-하중특성선도는 그림8과 같았다.[3]

5. 시험설비

전기체 구조시험장비 시스템은 미국MTS사 제품으로 Aero-90 시스템을 기본으로 하고 시험제어(LTC)시스템, 컴퓨터부, 서어보제어(DSSC)시스템, 데이터획득시스템, 유압시스템, 여압시스템 등으로 구성되었다.[1]

데이터 획득장치는 약 2,500채널정도가 사용되고 이들 데이터들을 시험도중 관찰 감시하기 위해 약 10여대의 모니터용 컴퓨터를 사용하였다. 하중작용 동안 실시간으로 하중-스트레인 데이터를 예상값과 비교 관찰하여 시험체의 이상거동을 즉시 판단할 수 있도록 하였다.

여압시스템은 3가지의 시험부위에 대해 압력작용을 하고 이들은 각각 연료탱크, 조종실, 공기

흡입구 등이다. 여압장비 시스템은 서어보 제어 장비와 통합되어 유압작동기에 의한 하중과 압력 작용제어는 동기가 유지되도록 하였다.[4]

유압작동기는 각 시험조건별로 약 70~80개가 사용되었고 각 유압작동기에는 과하중방지 모듈이 장착되어 있어 시험 전 기계적 밸브의 조절을 통하여 시험체에 작용될 수 있는 과하중을 방지되도록 하였다. 과하중방지 모듈의 주요 구성은 미터링 밸브(Metering valve)와 하중제한 밸브(Load limit valve)이다. 시험도중 비상시험 중지(shutdown)가 발생되면 시험장비는 유압작동기의 유압회로를 서보밸브를 통하는 정상회로에서 과하중방지모듈에 포함된 미터링밸브(그림 9)를 통하는 비상회로로 전환시킨다. 이러한 상태를 덤프(Dump)라고 하고 이때 유압작동기 실린더 안의 오일은 미터링 밸브를 통하여 리턴라인으로 바로 흐르게 된다. 이 오일 유량은 미터링 밸브의 오리피스 단면적 넓이에 따라 조절되므로 각 시험조건에 대해 유압작동기의 변위, 시험하중 작용 시의 실린더내부의 압력, 미터링 밸브의 특성곡선 등을 고려하여 분석하여 미리 조절하여 둔다.[5] 조절된 미터링 밸브가 덤프시에 제대로 작동되는 가를 확인하기 위해 낮은 하중 수준(0~40%)에서 덤프시험을 수행하고 각 유압작동기에 작용하는 하중을 검토하여 시험도중 덤프가 발생했을 때 과하중이 작용될 수 있는 유압작동기에 대해서는 미터링 밸브를 재조절을 한다.(그림10) 하중제한 밸브는 그림11에서 자세히 볼 수 있으며, 이 밸브는 두 스테이지로 구성된 릴리프 밸브이다. 시험 수행 시 유압작동기에 설정하중 이상의 하중이 작용하게 되면 실린더 주부분의 내부압력이 증가되어 주 스테이지는 닫힌 상태지만 파이럿 스테이지 하부의 압력이 증대되어 조절자와 연결된 포켓이 자리로부터 이탈된다. 이 상태에 도달하면 오일이 Drain 포트에 흐르기 시작해 실린더 주부분의 압력이 더 이상 증가되지 않도록 하여 유압작동기가 작용할 수 있는 하중을 제한하게 된다. 이 밸브 조절은 각 유압작동기로 작용할 하중 크기, 그리고 피스톤면적들로 계산된 실린더 내부 압력과 릴리프 밸브의 특성인 Drain 라인으로 흐르는 유량과 관련된 작동지점(Cracking)을 알아야 한다. 이상과 같이 실린더내부의 설정압력 조절과 Drain 라인으로 흐르는 유량을 측정할 수 있도록 하는 하중제한밸브 조절장치를 개발

하여 모든 시험조건별, 모든 유압작동기에 대하여 미리 조절한 다음 시험을 수행하였다.

6. 시험절차

고등훈련기는 시험장치와 시험장비의 규모가 방대하므로 시험실시절차를 개발하여 체계적으로 시험을 수행하였다. 시험절차는 그림12에서 보는 바와 같이 시험 장치설치 점검, 시험제어를 위한 시험파일점검, 과하중방지밸브 조절점검, 그리고 데이터 획득장치를 위한 시험파일 점검 등으로 구분된다. 이 점검이 완료된 후 Dump 시험을 실시하고, 40%DLL, 시험, 100%DLL, 150%DLL 시험을 실시한다. 앞에서 실시하는 시험데이터들은 뒤에 실시할 시험의 결과를 예측하기 위한 자료로 활용된다. 40%DLL 시험에서는 변형을 관찰(Strain survey)을 목적으로 하고 동시에 장비 및 하중부가시스템의 설치완전성을 마지막으로 점검하게 된다. 이시험을 통하여 얻어진 스트레인 데이터를 분석하여 최종 관심게이지를 선정하게 된다. 100% DLL시험 결과를 분석 검토한 후 150% DLL시험을 실시하였으며, 하중에 따른 시험데이터 획득지점은 80%DLL 이하/이상에서 각각 20%/5%DLL간격으로 하였고 이는 150%DLL 시험형상인 그림13에서 볼 수 있으며, 이 시험형상에서는 영점실시 시점, 하중의 증분특성, 시험진행 승인결정 등도 나타나 있다.

시험진행 인력구성은 시험진행자, 시험 장치관찰자, 시험장비 운전자, 시험데이터 관찰자 등으로 구성되었다. 시험데이터 관찰자의 대표를 시험 오피서라고 하고 시험진행자와 시험오피서(Test officer)와 단독 통신라인을 연결하여 시험의 진행여부를 현장에서 최종 결정하게 된다. 시험 진행 중 시험데이터는 인터넷을 통하여 실시간으로 미국의 LM Aero 시험실로 보내어 시험데이터를 공유하여 데이터분석이 가능하도록 하였다. 이것은 시험데이터 분석인력들이 동일 장소에 있어야만 했던 과거의 시험수행 형태와는 다른 것으로 공간적 한계를 극복할 수 있었으며, 향후 많은 시험들이 이와 같이 진행될 것으로 예상된다.

7. 결론

고등훈련기 전기체에 대한 150%DLL 시험을 성

공적으로 수행하여 아래와 같은 결론을 내릴 수 있었다.

고등훈련기는 31가지의 시험하중조건에 대해 150%DLL하중까지 파손없이 견디는 것을 확인할 수 있었다. 본 시험수행을 성공적으로 수행한 항우연은 전투기급에 대한 전기체 정적시험 기술을 보유하게 되었다. 항우연이 보유한 전기체 구조시험설비, 그리고 본 시험을 통하여 확보한 전기체 구조시험평가기술은 향후 국내 비행체 개발사업(위성발사체, 차세대 전투기, 중형 항공기 사업 등)에 지속적으로 활용될 것이다.

참고문헌

1. 심재열,황인희,김성찬,채동철,“전기체 정적 설계제한하중 시험”, 제11회 국제항공우주심포지움 논문집,2002, pp.141~162.
2. 김성찬, 김성준,심재열,“고등훈련기 전기체 정적시험 장치개발,”
3. 김태욱,김성찬,심재열,황인희,“전기체 정적시험을 위한 시험하중 해석 및 하중부가장치 개발,”대한기계학회 2002 추계학술대회 논문집, pp.523~527.
4. 심재열,김태욱,황귀철,송재창,황인희,“고등훈련기 전기체 정적시험을 위한 여압시스템,” 기계학회 2003 추계학술대회, pp.1384~1387.
5. 김성찬,김성준,채동철,황인희,“미터링벨브를 이용한 충격완화장치 연구,” 군사과학기술학회, 2003년 종합학술대회, pp.991~994.

순서	시험하중조건	Wind		Pitch		Roll		Yaw		Gust		Turbulence	
		W-1	W-2	P-1	P-2	R-1	R-2	Y-1	Y-2	G-1	G-2	T-1	T-2
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
23													
24													
25													
26													
27													
28													
29													
30													
31													
32													
33													
34													
35													
36													
37													
38													
39													
40													
41													
42													
43													
44													
45													
46													
47													
48													
49													
50													

그림 201 시험 하중조건별 관심영역

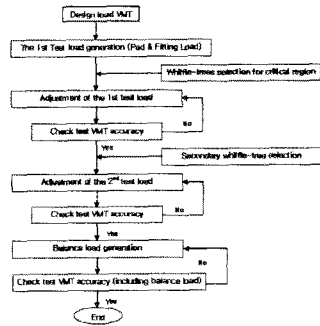


그림 202 시험하중 해석절차

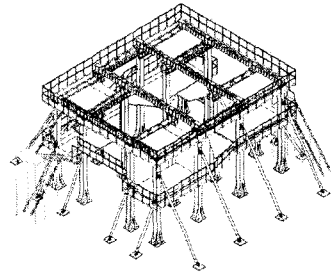


그림 203 시험 후레임 설계

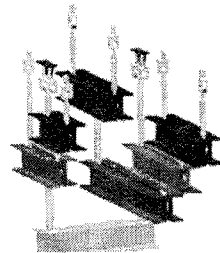


그림 204 대표적 Whiffle Tree

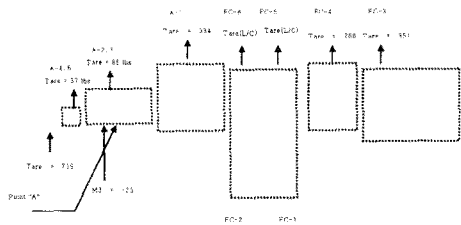


그림 205 Whiffle tree의 중량보상 예제



그림 206 자세제어 시스템

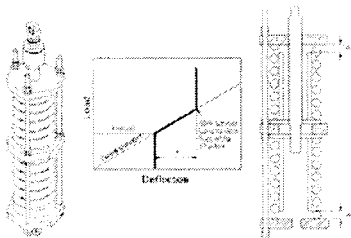


그림 207 자세제어용 스프링링크

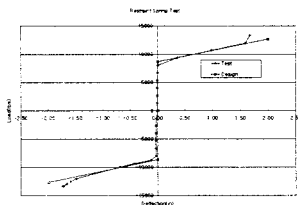


그림 208 스프링 링크 특성곡선

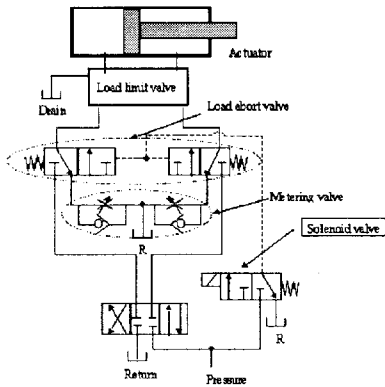


그림 209 과하중방지모듈 유압회로도

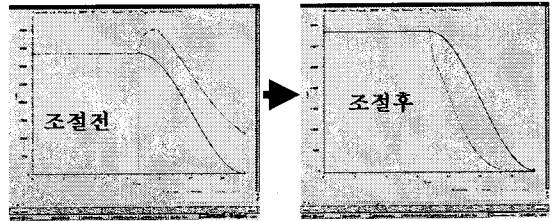


그림 210 미터링밸브조절에 따른 하중변화

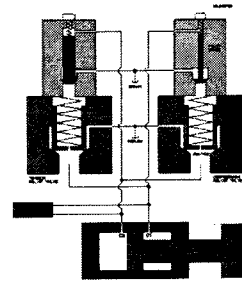


그림 211 하중제한밸브 구성도

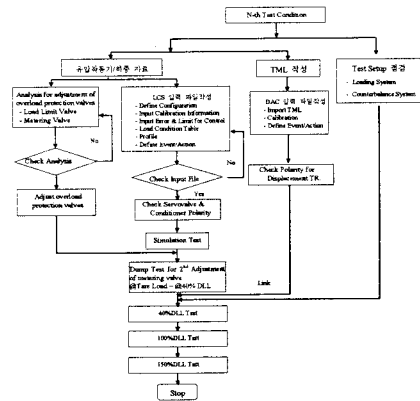


그림 212 시험절차 흐름도

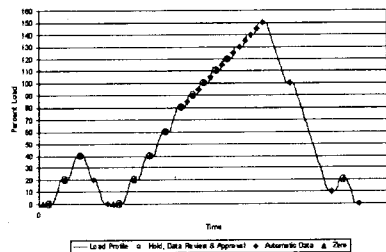


그림 213 150% DLL 시험형상