

감속 스텝모터를 이용한 2축 인장·전단 시험기의 개발 Development of Biaxial Tension & Shear Tester using Stepper Motor with Harmonic Driver

최 병 선*, 배 원 호**, 채 영 석***
Byung-Sun Choi,* Won-Ho Bae**, Young-Suck Chai***

<Abstract>

The lower toughness or brittle materials for mechanical test lead to the additional requirement that applied displacements be controlled with high resolution. Biaxial tension and shear tester using stepper motor with harmonic driver is shown. The device had to be high resolution so that the crack initiation process of slow extension and steady growth could be examined. Grip plates were connected to a linear bearing and actuator. The actuators consisted of stepper motors with harmonic driver connected to pre-loaded ball screw and nut assemblies. The encoders and motor controllers were connected to a personal computer so that arbitrary displacements histories could be prescribed in normal and tangential directions. The linear bearings were used to react loads perpendicular to their axes while allowing low friction, parallel movement of the attached grips. Load cells measured the reactions normal and tangential, the loads measured the reactions were recorded by the computer.

Key-Words : *Biaxial, Tension & Shear Tester, Stepper motor, Load cell, Linear bearing, Linear Encoder*

1. 서 론

본 연구는 작은 용량의 금속이나 강성이 크지 않은 재료, 비철금속 및 취성이 큰 유리나 세라믹 등의 인장, 압축 및 전단시험을 용이하게 할 수 있는 정밀 시험기에 관한 것이다.

일반적으로 재료의 기계적 성질 및 파괴특성을 파악하기 위한 시험기는 단일모드(인장(압축) 또는 전단 또는 비틀림)만을 시험할 수 있는 즉, 하나의 인장(압축) 시험을 위한 인장시험기나 인장시험기를 응용한 전단시험기 또는 비틀림 시험을 위한 비틀림 시험기가 독립적으로 구성되어 있다. 최근에는 인장과 비

* 정회원, 경일대학교 기계공학부, 공학박사, 영남대 졸업

** 정회원, 경일대학교 기계공학부, 공학박사, 영남대 졸업

*** 정회원, 영남대학교 기계공학부,

Ph.D., Univ. of Texas at Austin, U.S.A.,

cbsun@yu.ac.kr 011-793-2510

baewh@bear.kyungil.ac.kr

yschai@yu.ac.kr

틀림을 동시에 행할 수 있는 시험기가 있으나 인장과 전단시험을 동시에 할 수 있는 시험기는 없는 실정이다. 이러한 종래의 시험기는 시험하고자 하는 대상이나 시험요소에 따라 각각의 시험기를 구비하여야 하기 때문에 경제적인 비용부담이 가중되는 단점을 가진다. 또한 하중을 부여하는 방식은 스크루에 의한 기계식과 유압에 의한 유압식이 있으나 이러한 시험기는 하중 방향이 바뀔 때 따라 백래쉬(backlash)가 존재하고 변위를 제어함에 있어 정밀제어가 곤란하여 취성이 큰 재료의 정밀 시험에는 부적합하다.

이에 본 연구에서는 상기와 같은 문제점들을 해결한 2축 인장·전단 시험기를 고안, 개발하였다. 이 시험기는 평면상에 직각방향으로 각각 독립적인 2축 하중장치를 제공하여 하나의 시험기로부터 인장과 압축 및 전단시험을 행하고 하중의 방향변화에 대한 백래쉬 제거와 정밀한 변위제어가 가능한 시험기로서 재료시험의 용이성을 제공하고자 하는데 그 목적이 있다.

2. 시험기의 구조

본 연구에서 개발한 2축 정밀 인장·전단 시험기는 기존의 일축 시험기에서 할 수 없는 다양한 조건에서 파괴 역학적인 실험을 행할 수 있으며 시험편에 가해진 변위 및 하중을 잴 수 있는 장치가 부착되어 시험편에서 많은 정보를 얻을 수 있도록 고안되었다. 이 장치를 고안하는데 있어 가장 중점을 둔 사항은 고정밀(high precision), 고분해능(high resolution), 고정렬(well-aligned) 그리고 장치 자중에 의한 처짐(deflection) 등을 고려하여 정확하고 독립적인 2축 변위제어와 부가 변위 또는 하중에 대하여 충분한 강성을 갖도록 고안하였다.

Fig.1은 장치의 평면 구조이다. 시험기는 그림에서 보는 바와 같이 법선방향의 인장변위(모우드 I)와 접선방향의 전단변위(모우드 II)를 각각 독립적으로 발생시킬 수 있는 두 축이 평판에 직각으로 배치된 구조이다. 각 축은 크게 이송부(translation part)와 그립부(grip part)로 이루어져 있으며 부하를 발생시키는 부분인 이송부는 감속기(harmonic driver)가 부착된 고분해능의 스텝 모터를 사용하여 마찰이 매우 적고 예압이 부가되어 백래쉬가 없는 볼나사(ball screw)를 구동함으로써 변위를 제어하는 기계식으로 설계하였다. 이는 유압식보다 변위 제어속도는 느리나 매우 정밀한 변위제어 측면에서는 매우

유리하다. 그리고 이송부의 전진, 후퇴시 순수한 직진 변위와 불필요한 모멘트에 의한 좌굴, 그리고 이송부의 자중에 의한 처짐 등이 볼나사부에 미치지 않도록 직선운동 시스템인 리니어 베어링을 부착하였다.

시험편이 부착되는 그립부는 실제 시험편을 고정하는 그립이 나사 체결에 의하여 탈, 부착되는 부분으로 이송부의 변위량이 그대로 그립에 적용되도록 최대한 단순한 형태로 설계하였다. 또한 시험편의 형상에 따라 적절한 그립을 부착할 수 있도록 그립부에 다수의 나사구멍을 설치하였다. 역시 그립부에도 정확한 법선방향의 인장변위와 접선방향의 전단변위를 각각 독립적으로 제어하기 위하여 고정밀도의 직선운동 시스템을 적용하였는데 각 축당 4개씩 부착함으로써 충분한 강성이 유지되도록 하였다.

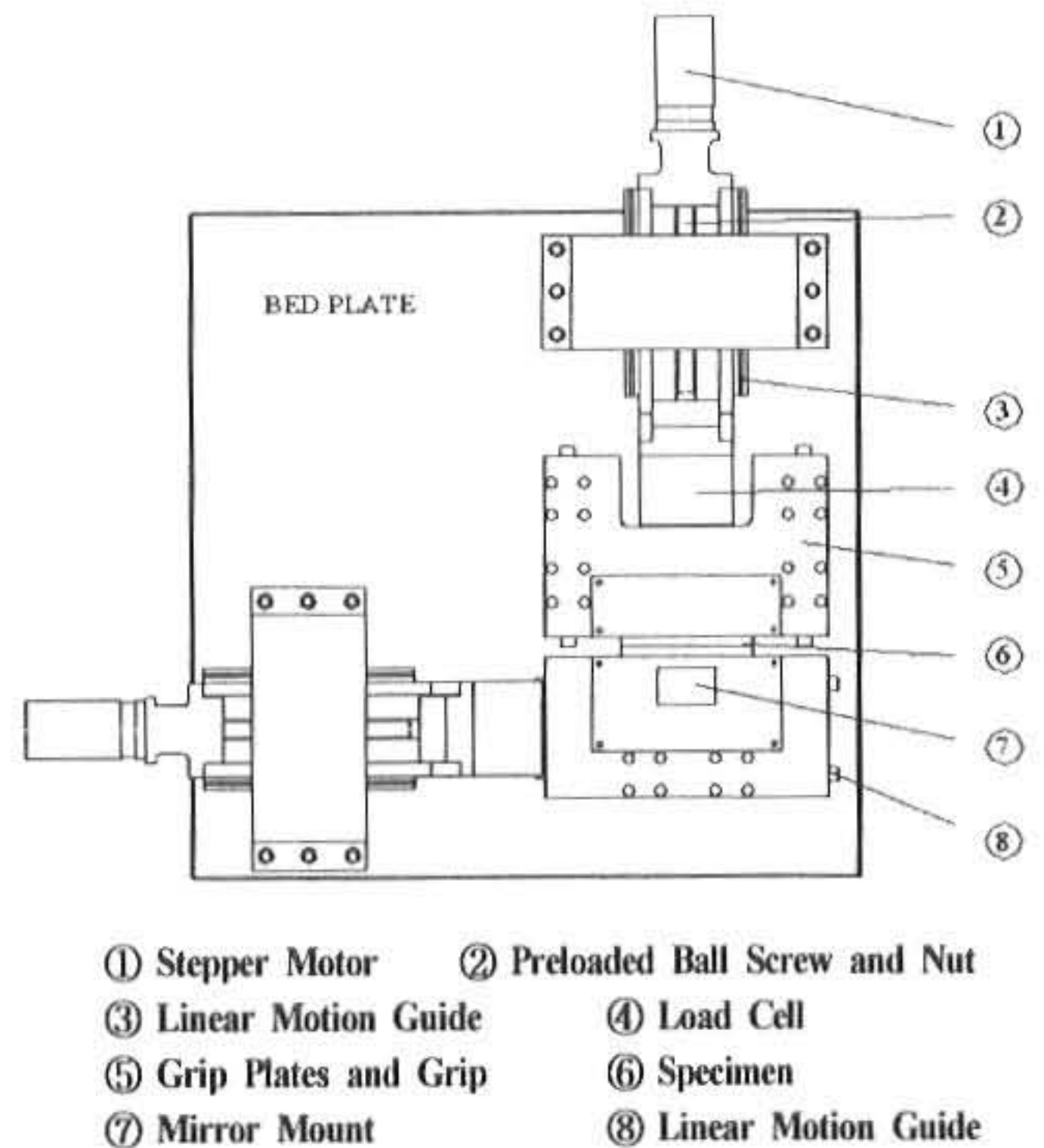


Fig.1 Schematics of Biaxial Tension and Shear Tester

Fig.1에 표현된 그립은 취성이 큰 재료를 접착제에 의해 부착이 용이하도록 설계된 모습이며 경우에 따라서 적당한 형태의 그립으로 쉽게 바꿀 수 있다. 또한 전단변위 제어 축의 그립부에는 시험편이 유리나 같이 투명체일 때 균열의 발생 및 진전 현상을 관찰할 수 있도록 미세 각도 조절이 용이한 거울 부착대를 마련하였다.

이송부의 변위에 대한 그립부의 하중을 측정하기 위하여 고감도의 로드 셀(load cell)을 이송부와 그립부의 중간에 부착하였다. 그리고 모터의 구동에 대한 실제 그립의 법선방향과 접선방향의 변위량을 검증할 수 있도록 변위측정 센서인 리니어 엔코드(linear encoder)를 그립부에 직접 부착하였다. 이렇게 함으로써 2축 방향의 변위와 하중을 동시에 출력 데이터로 얻을 수 있도록 하였다. 그리고 순수한 인장, 압축력만이 작용하고 불필요한 모멘트에 의해 좌굴이 발생하지 않도록 이송부의 볼나사와 로드 셀, 그리고 시험편이 부착되는 그립부가 일직선상에 놓이도록 설계하였다. 또 한편으로 두 축의 전체 자중으로 인한 처짐을 보완하기 위해 모든 시스템은 고정밀도로 가공된 강성이 좋은 두꺼운 평판에 배치되도록 설계하였다. 본 연구에서 개발된 2축 인장·전단 시험기를 제작하는데 있어 적용된 중요 부품의 사양을 예를 들어 간단히 설명하면 다음과 같다.

스텝 모터 : 장치의 구동은 정확한 위치결정과 큰 토크의 발생을 위하여 하모닉 드라이브(harmonic drive)를 감속기로 하는 스텝 모터(stepper motor)를 채택하였다. 스텝 모터는 개회로(open loop)만으로도 정밀한 제어를 할 수 있고 저속에서 큰 토크(torque)를 발생시킬 수 있으며 입력펄스에 비례한 회전 각도, 정지시의 높은 유지 토크, 그리고 고정밀도, 고분해능의 위치결정 등의 장점이 있다. 하지만 특정 속도영역 및 부하의 종류에 따라 공진 현상이 일어날 뿐만 아니라 구동이 완료되기 전까지는 스텝 모터의 상태가 안정한 지를 알 수 없다는 단점이 있다.

이와 같은 단점 때문에, 개회로 제어 시스템에 의한 스텝 모터의 구동은 적합한 상태의 입력 주파수 영역에서만 운전하여야 한다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해서는 서보(servo) 모터를 사용하면 되나 서보 모터에 의한 폐회로 제어 시스템은 회로 구성이 복잡하고 스텝 모터에 비해 가격이 비싸며 또한 장치의 특성상, 모터의 구동펄스에 비례한 변위량보다 그립부의 실제 변위량이 중요하므로 상대적으로 값이싼 스텝 모터가 적당하리라고 생각한다.

본 시험기에 적용된 제품은 Oriental 모터사의 UPD566HG2-A2 형으로써 1/100의 감속비를 가지는 하모닉 드라이브(harmonic drive)가 부착되어 있으며 허용토크는 4상 여자방식(full step mode)일

때 80 kgf-cm이고, 4-5상 여자방식(half step mode)일때는 150 kgf-cm이므로 마찰계수가 0.003-0.004 인 볼나사를 구동하면 최고 1,000 kgf의 구동력을 얻을 수 있다. 그리고 1 회전을 4상 여자방식에서는 50,000 스텝으로 분해하고 4-5상 여자방식에서는 100,000 스텝으로 분해하므로 이 모터를 리드 5 mm의 볼나사를 구동하면 한 펄스에 대하여 0.1 μm 에서 0.05 μm 까지 변위제어가 가능하며 운전 주파수 영역은 0 - 58,333 pps이다.

볼나사 : 고분해능의 스텝 모터에서의 회전 각도를 정확한 직선 변위로 변환하기 위하여 볼나사(ball screw)를 채택하였다. 따라서 본 장치에 사용된 볼나사는 지름이 20 mm이고 리드(lead)가 5 mm인 THK-SAMICK사에서 생산된 BIF형의 제품이다. 이 볼나사는 0.003-0.004의 마찰계수와 나사 부 길이 300 mm에 대하여 리드 오차가 4 μm 이내이며 축 방향의 최대 허용인장하중은 3,200 kgf이다. 또한 각 스텝 모터의 정방향과 역방향의 구동에 대한 정확한 이송을 위하여 예압이 부가됨으로써 백래쉬 현상을 제거하였다.

직선운동 시스템 : 시험기를 설계하는데 있어 가장 중요한 요소는 구동 모터에 의한 정확한 변위와 부가된 하중에 대하여 충분한 위치 결정을 유지하는 것이 필요하다. 따라서 본 장치에는 하나의 레일에 각 2개의 블록이 장착된 총 8개의 직선운동 시스템인 리니어 베어링을 사용하였다. 사용된 제품은 높은 정격하중과 예압이 부여된 블록과 1,000 mm 주행시 10 μm 이내의 주행 평형도를 보이며 마찰계수가 0.002-0.003인 THK-SAMICK사에서 생산된 HSR형의 LM 가이드이다. 총 8개의 LM 가이드 중에서 4개의 HSR25형의 LM 가이드는 하나의 블록에 최고 40.0 kgf-m의 모멘트가 허용되며, 이는 두 축에 대한 그립부의 정확한 이송을 위하여 장착하였고 나머지 4개의 HSR20형의 LM 가이드는 최고 23.7 kgf-m의 모멘트가 허용되며 이는 이송부의 볼나사와 스텝 모터 등의 자중에 의한 처짐 등을 보완하기 위하여 장착하였다.

하중 변환기 : 모터 구동에 의한 변위에 대해 실제 그립부에 부여되는 하중을 동시에 파악하기 위하여 이송부와 그립부 사이에 고감도의 하중변환기인 로드 셀(load cell)을 부착하였다. 본 시험기에 부착된 제

품은 SHOWA사의 SHU-1T형으로 인장, 압축 겸용 변환기이며 최고 1,000 kgf의 하중을 측정할 수 있다.

변위측정 센서 : 측정물의 크기나 치수를 측정하는 센서로써 펄스를 이용하는 엔코더와 전기적 변환 등을 이용하는 차동트랜스 등의 방식이 있으나 본 시스템에서는 물체의 변위 측정을 펄스로써 검출하는 인크리멘탈 엔코더 방식을 이용한 리니어 게이지를 사용하였다. 이것은 전적으로 치수나 변위를 측정하는 계기로서 광전식 리니어 엔코더라 부른다. 원리는 정밀하게 인쇄된 메인스케일과 인덱스스케일이 일정한 거리를 가지고 평행으로 설치되어 있으며 이들을 사이에 두고 두 쌍의 광원과 수광소자가 대향으로 배치되어 기동에 따라 투광과 차단이 반복하여 소자에서 2상의 정현파(sine wave)를 얻을 수 있다. 정현파의 위치 관계는 1/4 피치(90°)의 간격을 두고 있고 정현파의 주기는 10 μm이다. 그러나 정현파는 일정 변위를 나타내는 펄스가 아니므로 리니어 엔코더의 정현파를 펄스로 변환시켜야 한다. 결국 변위측정 센서의 분해능은 정현파를 몇 개의 펄스로 변환시키느냐에 좌우된다. 따라서 본 장치에서는 리니어 엔코더의 한 주기 정현파를 5개의 펄스로 변환하는 기존의 디지털 변환장치를 사용하였고 측정 감도를 높이기 위하여 1 펄스를 4 펄스로 나누는 4체배 회로를 제작하여 총 20개의 펄스로 변환시켜 측정 감도를 0.5 μm로 하였다.

본 장치에 사용된 변위측정 센서인 리니어 엔코더는 접촉식 센서로써 HEIDENHAIN 사의 MT형이

다. 그리고 적용된 디지털 변환장치는 역시 HEIDENHAIN 사의 EXE 602E로써 분해능은 5 펄스/주기 이고 4체배 회로는 Fig.2와 같이 본 연구에서 직접 제작하였다.

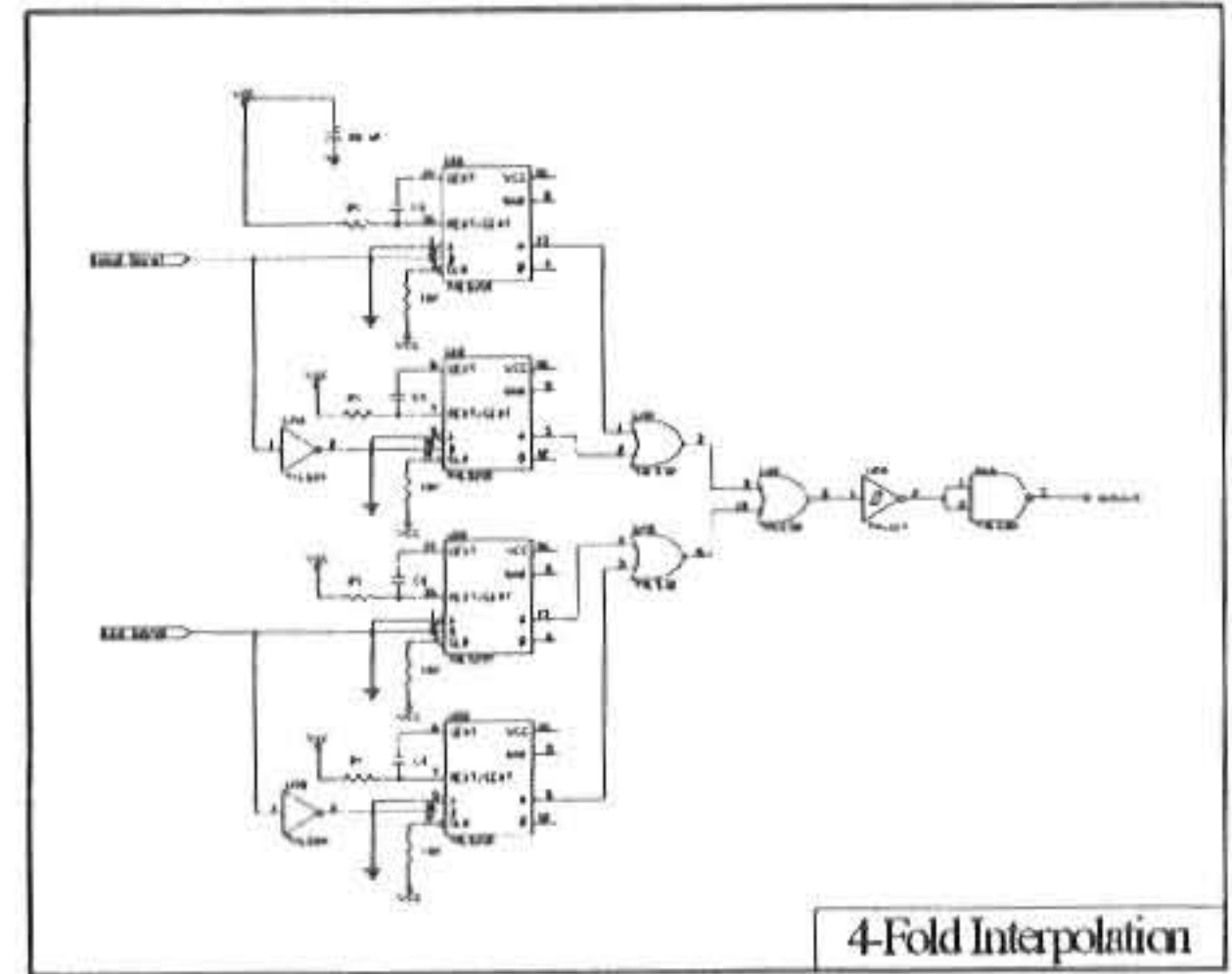


Fig.2 Circuit Diagram of 4-Fold Interpolation

3. 구동 및 데이터 처리

본 시험기는 Fig.3에 나타낸 바와 같이 개인용 컴퓨터와 접속하여 모든 조작은 컴퓨터에서 이루어지도록 하였고 시험기에서 출력되는 각 축의 하중과 변위량을 인터페이스 카드(interface card)를 통해 컴퓨터로 입력되도록 설계, 제작하였다. Fig.3은 시험기와 컴퓨터와의 연결관계를 나타낸 그림이다. 그림과 같이 시험기가 움직이기 위해서는 스텝 모터를 구동하여야 하고 이를 위해서는 구동 펄스가 필요하다. 이는 컴퓨터에서 소프트웨어적인 논리연산과 8255 칩으로

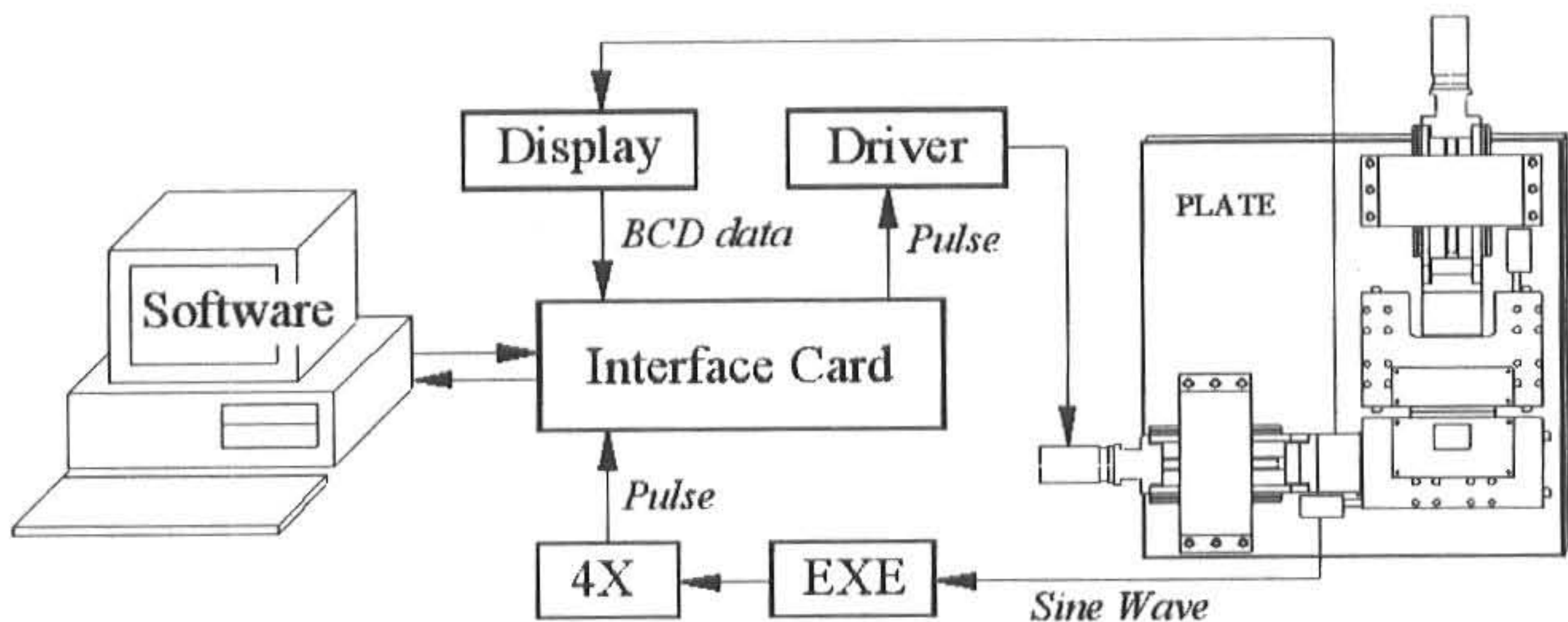


Fig.3 Schematics of Interface of PC with Biaxial Tension and Shear Tester

부터 토글링 펄스(toggling pulse)를 발진시켜서 발생되도록 하였다. 이에 대해 시험기에서 출력되는 데이터는 두 축의 하중과 변위이다. 먼저 각 축의 변위량은 앞에서 설명하였듯이 변위측정 센서로부터 디지털 변환장치를 거쳐 펄스로 출력된다. 그러나 이때 출력되는 펄스는 한 펄스 당 $2\mu\text{m}$ 의 변위를 나타내므로 이를 다시 4배 회로(Fig.2)를 통하여 분할함으로써 변위측정 센서의 한 정현파를 20배의 펄스로 변환하였다. 이렇게 함으로써 한 펄스 당 $0.5\mu\text{m}$ 의 분해능을 얻을 수 있고 이 출력 데이터는 인터페이스 카드를 통해 컴퓨터로 입력된다. 또한 로드 셀로부터 출력되는 각 축의 하중은 로드 셀 하중 지시계를 통해 표현되며 이 값은 다시 지시계로부터 십진(BCD) 형태의 데이터로 출력되고 이 값 또한 인터페이스 카드를 통해 컴퓨터로 입력된다.

시스템 인터페이스의 하드웨어(hardware)적인 면을 보면 시험기와 컴퓨터를 연결하기 위해서는 인터페이스 카드(Fig.4)가 필요하다. 회로도에서 알 수 있듯이 컴퓨터의 미사용 I/O(input/output)공간 중 16진수 300-30F까지는 74LS154를 이용하여 디코드(decode)하였고 이 중 16진수 300-303까지는 8255 프로그래머블 병렬 인터페이스(PPI)의 어드레스 공간으로 사용하였으며 16진수 304-307까지는 8253

프로그래머블 타이머 컨트롤러(PTC)의 어드레스 공간으로 사용하였다. 이들은 구체적으로 4 입력 AND-gate를 사용하여 칩 선택을 하도록 하였다. 구체적인 I/O 어드레스는 Table 1과 같다.

Table 1 I/O address and Function

I/O address	Chip	Function
16진수 300	8255	port A
16진수 301	8255	port B
16진수 302	8255	port C
16진수 303	8255	control-word
16진수 304	8253	channel 0
16진수 305	8253	channel 1
16진수 306	8253	channel 2
16진수 307	8253	control-word

각 I/O 포트(port) 당 할당된 기능을 살펴보면 8255의 포트 A와 포트 B는 하중변환기의 십진(BCD) 입력데이터를 받아들이는 데 사용하였고 8255의 포트 C의 5번에서 7번까지는 각각 8253의 게이트컨트롤(gate control)로 사용하였다. 그리고 8255의 포트 C의 0-3번은 각각 토

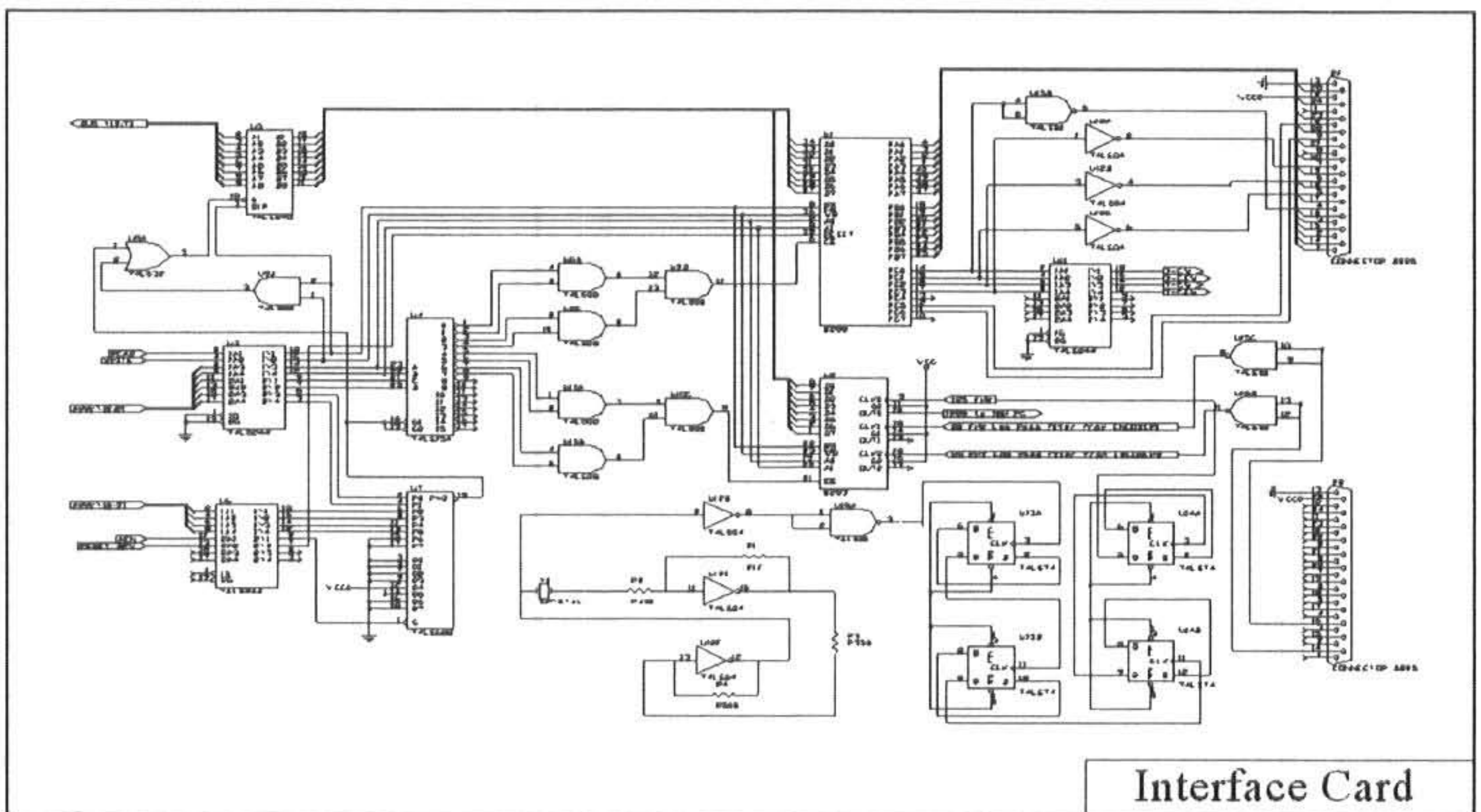


Fig.4 Circuit Diagram of Interface Card

글링 펄스(toggling pulse)를 발진시켜서 이를 7406에 입력하여 포트 C - 0번은 X축 전진, 포트 C - 1번은 X축 후진, 포트 C - 2번은 Y축 전진 그리고 포트 C - 3번은 Y축 후진으로 사용하였다. 또한 8253의 채널(channel) 0번과 1번은 변위측정 센서에서 발생하는 정현파를 20채배의 디지털 값으로 바꾸어 이를 카운터하는 데 이용하였다. 그리고 8253의 채널 2번은 2메가 수정발진자를 이용, 이를 16분주하여 125 KHz를 발진 클럭으로 입력하였고 이는 임의의 카운팅을 실행하여서 나오는 출력 펄스를 다시 컴퓨터의 슬롯(slot)에 있는 인터럽트 요구 5번(interrupt request-5) 단자에 인가, 컴퓨터 내부에 있는 프로그래머블 인터럽트 컨트롤러(PIC)인 8259를 초기화하여 실시간(real time) 인터럽트를 구현해 내었다.

4. 구동 프로그램

본 시험기는 개인용 컴퓨터와 접속하여 모든 조작은 컴퓨터에서 이루어지도록 하였는데 이는 시스템의 소프트웨어적인 프로그램으로 제어를 하였다. 이를 위하여 구동 프로그램을 개발하였고 시험기는 프로그램을 통하여 다양한 구동 기능을 가지게 되었다. 프로그램은 Turbo-C 언어를 사용하여 개발하였으며, 이를 BIAX로써 명칭하였다. Fig.5는 BIAX 프로그램의 주요 기능 및 구동을 보여준다.

먼저 Simple Tension은 시험편에 법선방향의 변위를 제어하는 루틴(routine)으로 시험편에 인장변위와 압축변위를 제어할 수 있다. Simple Shear는 시험편에 접선방향의 전단변위를 제어하는 루틴으로써 양의 전단변위와 음의 전단변위를 제어할 수 있다. Mixed Loading은 두 축을 순차적 또는 동시에 제어하는 루틴으로써 먼저 Simple Tension followed by Shear은 먼저 인장변위를 제어한 후, 이어 전단변위를 제어함으로써 시험편에 인위적인 혼합 모우드를 발생시킬 수 있다. Simple Shear followed by Tension은 비슷한 작동 개념으로 시험편에 전단변위를 제어한 후 인장변위를 제어하는 루틴이고, Simultaneous Mixed Loading은 두 축이 순차적으로 움직이는 것이 아니고 동시에 변위를 제어하는 루틴이다.

또한 본 시험기는 Fatigue 루틴을 부가하여 정적

파괴 실험 외에 피로파괴시험도 할 수 있도록 하였는데 재료의 피로파괴 특성을 살펴보는데 특히 공헌하리라 생각된다. 그 외의 기능으로써 단속적인 시험기의 제어기능을 Option 루틴에 첨가하였다. 그리고 각 루틴마다 시험편에 파괴가 일어난 직후, 부가변위가 순간적으로 제거되도록 작동변위 만큼의 역방향 구동(return motion)기능을 첨가하였다. 이 기능은 제어 변위에 대하여 균열이 진전하면 이어 곧바로 균열을 원위치로 단음으로써 균열의 계속적인 진전을 정지시켜 후에 이를 새로운 초기 균열로 이용함으로써 하나의 시험편으로 다수의 데이터를 얻을 수 있도록 한 것이다.

한편 시험기는 다양한 구동 방식에 대하여 정밀한 위치 이동과 동시에 정확한 속도제어가 요구되므로 이를 위하여 정확한 개수의 펄스와 주파수를 만들어 내야한다. 정확한 개수의 펄스는 ON-OFF신호를 소프트웨어적인 논리연산을 실행하여서 가능하게 하였고 오차 보정은 조건문을 통하여 조건이 만족될 때까지 제 위치를 찾아가는 형식의 문장

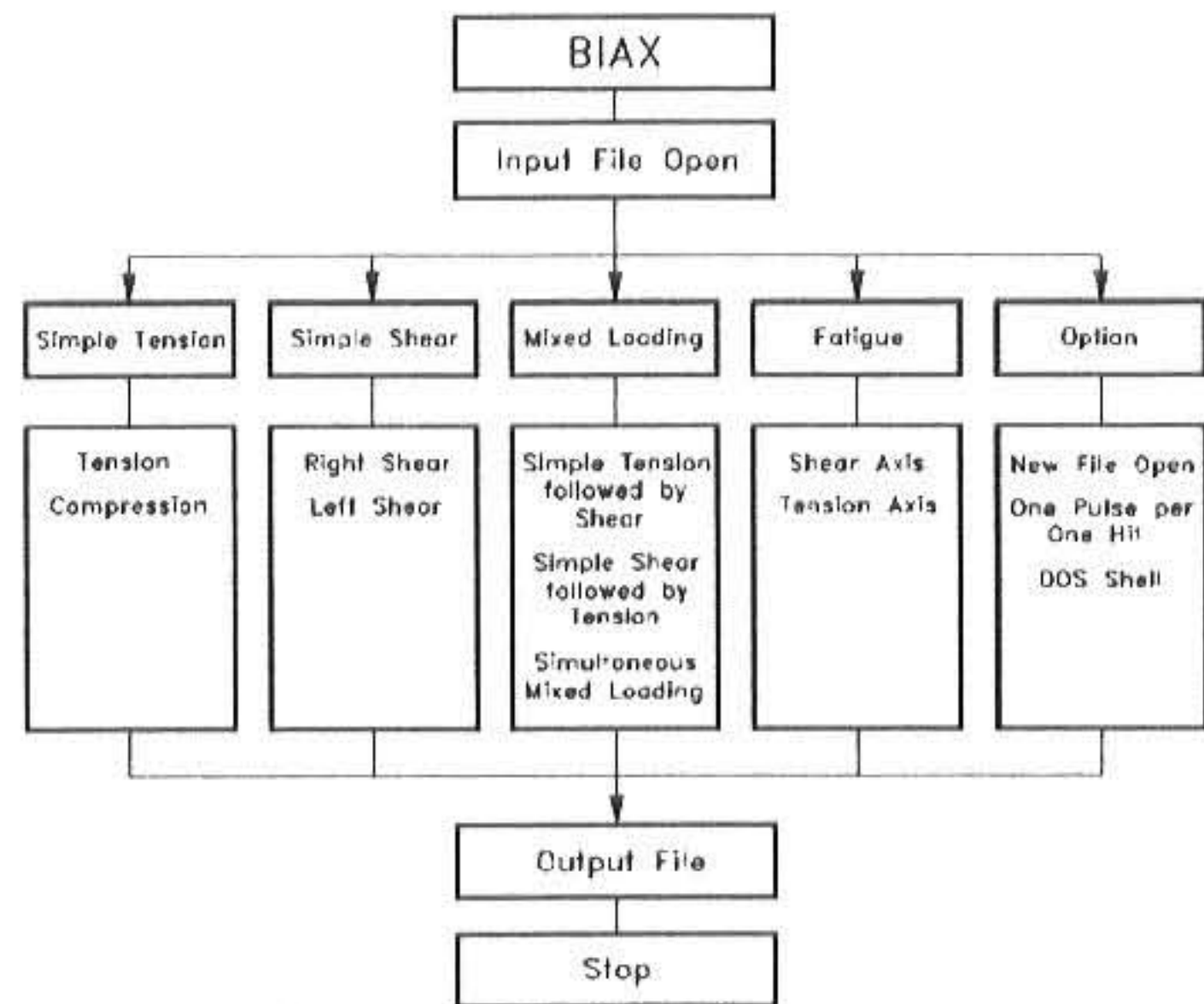


Fig.5 Composition of BIAX Program

을 주로 사용하였다. 또한 정확한 속도의 구동을 위하여, 정기적인 인터럽트 신호를 실시간 인터럽트 클럭으로서 정확한 타이밍(timing)을 맞추어 발진 주파수의 신호 간격을 조정하였다. 이는 스텝 모터의 가감속 속도 제어에 활용되었으며 또한 일정한 시간간격의 실시간 데이터 수집에도 활용하였다.

5. 결과 및 검토

Fig.6은 본 연구에서 설계, 제작한 2축 인장·전단 시험기의 모습이다.

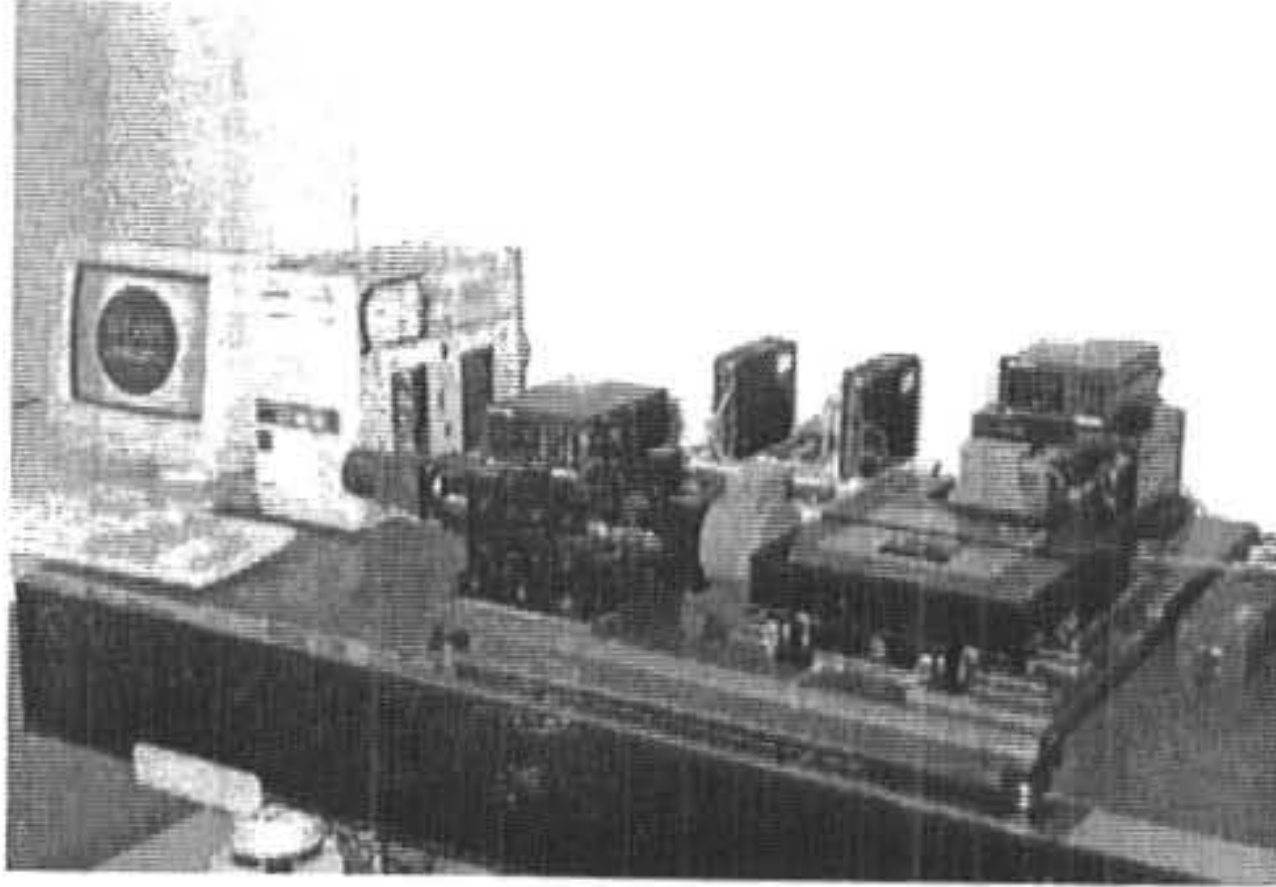


Fig.6 Biaxial Tension and Shear Tester

앞에서 설명한 바와 같이 본 시험기의 중요 작동 사항 중 하나는 정확한 위치 이송이다. 이를 위해서는 각 축이 전진, 후퇴할 때 백래시가 없어야 한다. 본 시험기의 정확한 이송을 확인하기 위하여 구동 펄스에 대하여 그립부의 이송량을 측정하였다. 스텝 모터는 펄스 당 0.1 μm 의 이송량을 부여 할 수 있으나 이를 검출할 수 있는 리니어 엔코드의 감도는 최소 0.5 μm 이다. 천천히 약 2초당 1 펄스를 구동 프로그램으로부터 부여하고 이에 대해 리니어 엔코드로부터 그립부의 이송량을 검출하였으며 Fig.7은 그 결과이다.

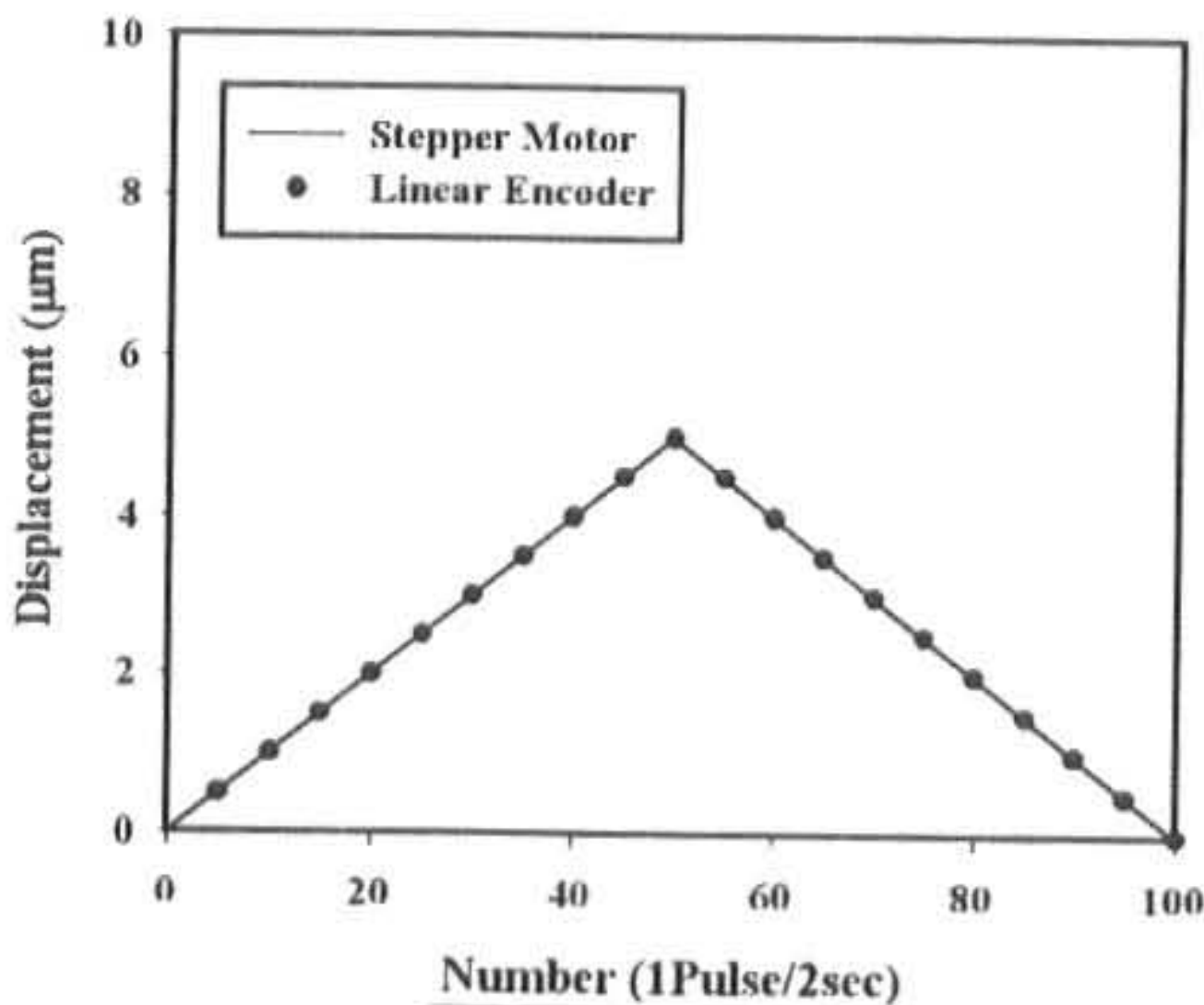


Fig.7 Forward and Backward Translation of Grip Part to Stepper Motor with Unloading

그림에서 알 수 있듯이 스텝모터의 회전에 대한 이송량과 리니어 엔코더에서 검출한 이송량

이 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며 특히 전진 후 후퇴할 때에도 백래시가 없이 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다.

Fig.8은 본 시험기에 연속적인 일정 펄스를 부여하여 일정 속도에서 작동 상태를 살펴보았다.

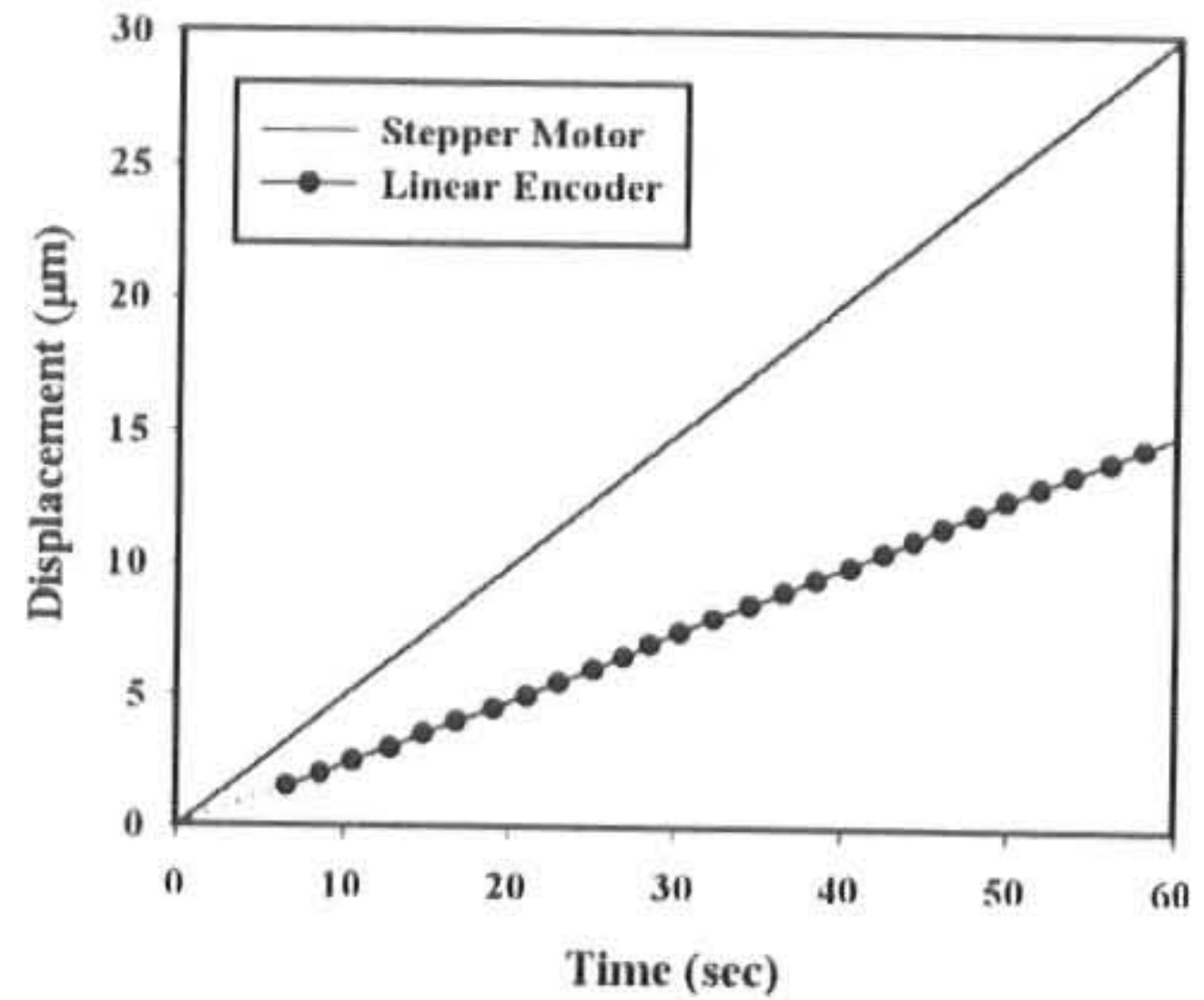


Fig.8 Translation of Grip Part to Stepper Motor with Loading

그림에서의 스텝모터의 구동 펄스에 의한 속도는 0.5 $\mu\text{m}/\text{sec}$ 이다. 그러나 그립부의 실제 이송량은 스텝모터의 구동에 바로 대응하지 못하였다. 이는 스텝모터의 이송량에 대하여 볼나사의 예압 그리고 이송부와 그립부에 장착된 직선 운동 시스템의 예압이 그 원인으로 생각된다. 그러나 그립부의 이송량은 전체적으로 선형적인 응답을 보이므로 그립부의 이송량을 정확히 검출한다면 본 시험기의 작동 상태는 매우 만족스러운 기능을 발휘할 것이다.

6. 결론

본 연구는 인장, 압축 및 전단시험을 용이하게 할 수 있는 정밀 2축 인장·전단 시험기의 개발에 관한 것으로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시험기를 제작하여 작동하여 본 결과 스텝모터의 회전에 대한 이송량과 리니어 엔코더에서 검출한 이송량이 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며 특히 전진 후 후퇴할 때에도 백래시가 없이 매우 잘 작동하는 것을 볼 수 있었다.
- (2) 그립부의 이송량은 선형적인 응답을 보이며 시험기의 작동 상태는 아주 만족스러웠다.

참고문헌

- 1) Liechti, K. M. and Chai, Y. S. : Biaxial Loading Experiments for Determining Interfacial Fracture Toughness, *J. Appl. Mech.*, Vol. 58, pp 680-687 (1991)
- 2) *ANSYS User's Manual for Revision 5.4*, Swanson Analysis Systems, Inc. (1997)
- 3) Oriental Motor Catalogue, Oriental Motor Co. LTD, (1998)
- 4) THK LM SYSTEM Catalogue, THK Co., LTD, (1998)
- 5) FAG Bearing standard manual, FAG Co. LTD, (1996)
- 6) 기계설계 도표편람, 대광서림, (1995)
- 7) 마이크로 컴퓨터에 의한 모터의 제어, 기전 연구사, (1993)

(2001년 6월 16일 접수, 2001년 11월 24일 채택)