

## 전자동 공진주/비틀전단 시험시스템 개발

### Development of Computer-Aided Resonant Column/Torsional Shear Testing System

김동수<sup>1)</sup>, Dong-Soo Kim, 추연욱<sup>2)</sup>, Yun-Wook Choo

<sup>1)</sup> 한국과학기술원 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, KAIST

<sup>2)</sup> 한국과학기술원 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, KAIST

**개요(SYNOPSIS)** : In this paper, a computer-aided resonant column/torsional shear testing system was developed for obtaining reliable test results and facilitating testing procedures. GPIB and A/D board were used to control electronic equipments by computer, and the control program to automate RC/TS testing system was developed using LabVIEW. The computer-aided system performs the whole testing procedures, signal monitoring, and data analysis, automatically. A soil specimen was tested using the developed computer-aided system and a reliable test result was obtained.

**주요어(Key words)** : resonant column/torsional shear test, computer-aided testing system, GPIB, A/D board, LabVIEW

## 1. 서 론

공진주/비틀전단시험은 지반의 변형특성인 전단탄성계수 및 감쇠비를 가장 신뢰성 있게 평가할 수 있는 시험으로 동적하중을 받는 토목구조물의 지반-구조물 상호작용과 관련된 연구를 수행하는데 많이 사용되어 왔다. 공진주/비틀전단시험은 동적시험인 공진주시험과 반복시험인 비틀전단시험을 동일한 공시체에 수행할 수 있어, 변형특성에 대한 변형율, 하중반복회수, 하중주파수의 영향을 적절히 고려할 수 있다.

최근 선진국에서는 대부분의 시험시스템이 전기식 트랜스듀서나 전자장비를 이용하여 컴퓨터에 의해 제어되며 자동 수행되도록 개발되고 있다. 이러한 전자동시험시스템은 장비들을 통합적으로 관리하여 시험자에 의해 발생하는 오차를 줄일 수 있어 시험결과의 질을 높일 수 있다. 또한, 시험과 동시에 결과해석 및 정리가 이루어지므로 시간을 절약할 수 있으며 일상적인 시험수행이 필요한 경우 시험자의 많은 노력을 줄일 수 있어 효율적으로 시험을 수행할 수 있다. 특히 공진주/비틀전단 시험시스템은 많은 전자장비의 조합으로 구성되어 있어 자동시스템 개발이 매우 필요하였다.

본 논문에서는 공진주/비틀전단시험기의 구성시스템인 구속응력재하시스템, 가진시스템, 변위측정시스템을 설명하고 이들을 제어하는 제어시스템의 제작과 제어시스템을 운용하고 결과를 해석하는 프로그램의 작성에 관하여 설명하였다.

## 2. 공진주/비틀전단 시험시스템의 개요

공진주/비틀전단시험은 0.0005%~0.5%의 전단변형을 범위에서 지반의 동적물성치 특성을 규명하기 위하여 사용되어왔다. 동일한 시험기에서 동적시험인 공진주시험과 반복시험인 비틀전단시험이 실시되어 전단변형율의 변화에 따라 전단탄성계수(G)와 감쇠비(D)의 변화를 구할 수 있다(김동수, 1995).

본 연구에서 사용된 공진주/비틀전단시험기는 Texas 주립대학의 Stokoe 교수와 연구진이 지반의 동적물성치를 획득하기 위하여 개발하여 사용해온 시스템으로 개요도는 그림 1과 그림 2에 나타난 것과 같다(Kim, 1994).

공진주시험의 기본원리는 원통형시료가 일차모드에서 공진이 유발되도록 하고 탄성과전단이론을 바탕으로 시료의 동적물성을 획득하는 것이다. 주파수를 변화시키며 정현파 비틀력을 코일-자석 상호작용에 의해 시료의 윗단부에 작용시키고 주파수에 따른 시료의 변위를 가속도계로 측정하여 주파수응답곡선을 구성한다. 주파수응답곡선으로부터 일차모드의 공진주파수를 찾고 시험장치의 특성과 시료의 크기 등을 연관시켜 전단과속도와 전단탄성계수를 결정한다. 또한 이때 얻은 주파수응답곡선의 폭과 자유진동 감쇠곡선을 이용하여 감쇠비를 구할 수 있다.

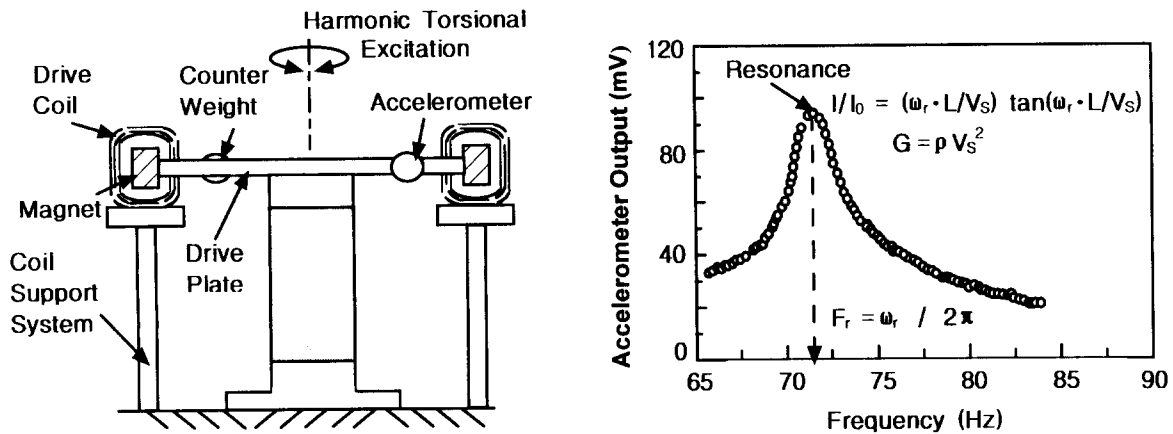


그림 1 공진주시험기의 개요도와 전형적인 주파수 응답곡선

비틀전단시험은 같은 시험장치를 이용하여, 공진주시험과는 다른 시험법에 의해 전단탄성계수와 감쇠비를 결정한다. 비틀전단시험기의 개략적인 형상은 그림2와 같다. 반복 비틀력을 10Hz이하의 고정된 주파수로 시료의 윗단부에 재하한다. 공진주파수를 획득하는 대신 시료에 재하되는 비틀력과 시료의 비틀각을 측정하여 응력-변형을 이력곡선을 구성한다. 간격측정기(proximito)를 이용하여 비틀각을 측정하고 비틀력은 코일에 가해지는 전압으로부터 비틀력 환산계수를 적용하여 구한다. 이력곡선의 양 끝점을 연결하는 선의 기울기로부터 전단탄성계수를 이력곡선의 넓이로부터 감쇠비를 획득하게 된다(그림2).

### 3. 컴퓨터와 계측시스템 인터페이싱(Interfacing) 기법

컴퓨터와 계측시스템사이의 인터페이싱은 두 가지 도구로 이루어질 수 있다. 하나는 계측장비를 직접 컴퓨터와 인터페이스하는 방법으로 GPIB보드를 이용하여 계측기와 컴퓨터사이에 통신선을 구성하는 방법이고, 다른 하나는 A/D보드를 이용하여 컴퓨터에 직접 계측시스템을 구현하는 방법으로 컴퓨터가 계측장비와 같은 역할을 한다.

#### 3.1 GPIB보드

일반적으로 GPIB(General Purpose Interface Bus)라고 알려진 1987년 제정된 ANSI/IEEE 표준 488.1은 여러 기계간의 상호통신과 제어를 위한 표준 인터페이스이다. GPIB버스는 일반적으로 컴퓨터와 같

은 하나의 시스템 제어기에 14개까지의 추가 기기를 장착할 수 있다.

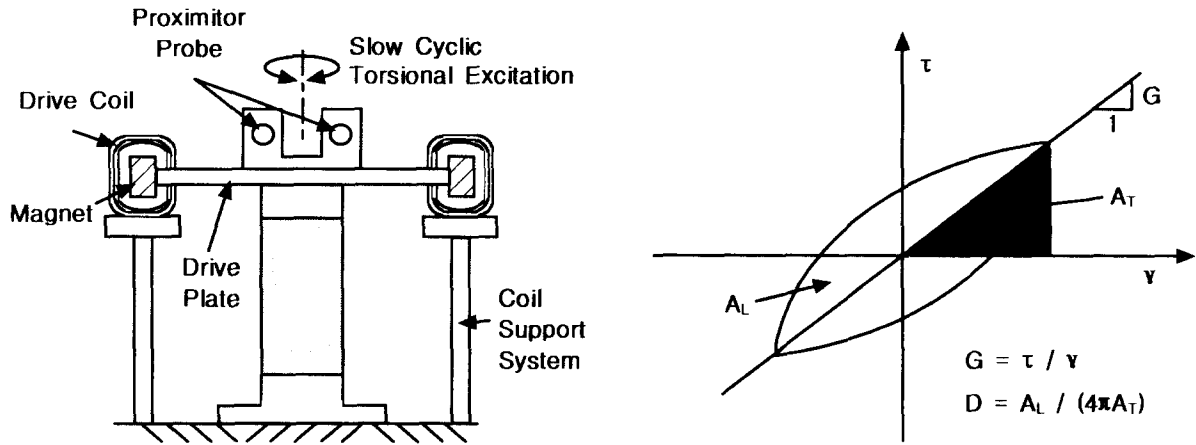


그림 2 비틀전단기의 개요도와 전형적인 시험결과

개개의 GPIB장치는 Talker, Listener 또는 Controller의 세가지 역할을 담당하게 된다. Talker는 데이터 메시지를 전송하며 Listener는 데이터 메시지를 전송 받는다. 일반적으로 제어기는 컴퓨터가 사용되어지며, GPIB버스 상에서 정보의 흐름을 제어하게 된다. 즉 제어기는 연결 기기간의 통신 연결 구성을 지정하고, 개개의 기기들간의 GPIB명령 전송 역할을 하게된다.

### 3.2 A/D보드

A/D보드는 아날로그 전기신호를 측정하고 숫자화된 값으로 변환하여 컴퓨터에 저장하는 기능을 가지고 있다. 근래에 들어 퍼스날 컴퓨터의 발달로 A/D 보드를 이용한 물리량 계측이 전용계측장비(오실로스코프, 시그날 아날라이저, 정적 리코더 등)의 수준을 넘어서고 있다. 이제는 전용계측장비가 가지고 있는 CPU나 화면보다 더 크고 좋은 화면과 더 빠르게 신호처리가 가능한 CPU를 컴퓨터가 가지고 있기 때문에 A/D보드의 활용은 매우 효과적인 일이 될 수 있다.

## 4. 공진주/비틀전단 시험시스템 구성과 전자동시스템의 개발

공진주/비틀전단시험 시스템은 시료를 거치하는 몸체, 시료에 구속압을 재하하는 구속응력 재하시스템, 비틀력을 가하는 가진시스템, 변형을 측정하는 변위측정시스템, 그리고 가진시스템과 변위측정시스템을 운용하여 시험을 자동 수행하게 하는 제어시스템으로 구성된다. 공진주/비틀전단시험기의 몸체는 시료가 거치되는 부분과, 코일-자석 상호작용에 의해 시료에 비틀력을 가하는 가진판(drive plate), 변위 측정을 위한 간격측정기(proximator), 가속도계 등을 설치·지지하게 된다.

### 4.1 구속응력재하시스템

공진주/비틀전단시험에서는 진공압 또는 압축공기를 이용하여 시료에 구속응력을 재하한다. 진공압을 이용하는 경우, 멤브레인으로 둘러싸인 시료내부에 진공압을 가하여 대기압과의 차이만큼이 구속압으로 재하 되도록한다. 따라서 대기압(1kg/cm<sup>2</sup>)이상의 구속압이 필요한 경우 진공압을 이용할 수 없고, 압축공기를 사용하여 구속압을 재하하여야 한다. 압축공기 사용할 때의 구속응력 재하시스템은 스테인레스 스틸로 제작된 구속실과 압축공기를 보내는 압축기(air compressor)와 압력을 조절하는 regulator로 구성된다. 구속실은 hollow cylinder(두께 0.6cm)를 바닥판과 상부판에 패인 홈에 끼워 스테인레스제 연결

막대(지름 1.28cm)로 고정시켜 구성한다. 흠에는 O-ring 끼워 넣어 압축공기가 새지 않도록 하였다. 이 구속실은 최대 600psi(4137kPa)에 저항하도록 설계되었다.

#### 4.2 가진 시스템

가진 시스템은 코일-자석 시스템, 신호발생기(function generator), 신호증폭기로 구성된다. 비틀력은 코일과 자석의 상호작용에 의해 생기는 전자기적 힘에 의해 유발된다. 본 시험에서는 그림 3과 같이 컴퓨터가 신호발생기를 작동시키고, 신호발생기에서 발생된 정현파의 전기적 신호를 코일-자석 시스템에 공급하여 시료에 비틀력을 가한다. 공진주시험의 경우 신호발생기에서 일정한 진폭을 갖는 정현파의 전기적 신호를 낮은 주파수에서 높은 주파수로 바꾸어가면서 비틀력을 재하하고(sweeping) 이때 주파수에 따른 시료의 반응(주파수 응답곡선)을 측정하게 된다. 비틀진단시험의 경우, 일정한 주파수의 정현파신호를 가하여 시료의 응력-변형율곡선을 얻는다.

큰 진폭의 하중을 가해야 하는 경우(고변형율 시험)에는 신호발생기에서 발생가능한 전기적 신호의 한계( $\pm 10$  V)가 있으므로 신호증폭기를 이용하여 신호발생기에서 발생된 전기적신호를 증폭하여(최대  $\pm 40$  V) 코일-자석시스템에 공급하여 큰 비틀력을 가한다.

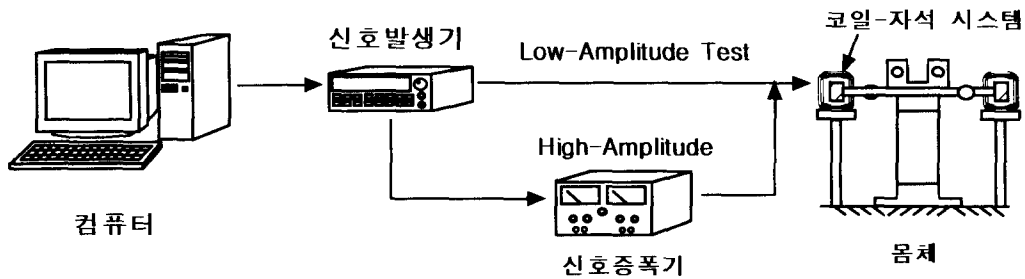


그림 3 가진 시스템

#### 4.3 변위측정 시스템

공진주시험과 비틀진단시험은 다른 주파수대역에서 시험이 이루어지기 때문에 각각 다른 변위측정시스템을 구성하여야 한다. 공진주시험은 수십 Hz이상에서 시험이 수행되므로 그 대역에서 신호획득능력이 좋은 가속도계를 이용하여 변위를 측정하고, 비틀진단시험에서는 10 Hz미만의 낮은 주파수에서 시험이 수행되므로 간극측정기를 이용하여 변위측정시스템을 구성하였다.

공진주시험의 변위측정시스템은 공진주파수, 전단변형을 및 자유진동감쇠곡선을 획득하기 위한 장치이다. 그림 4와 같이 가속도계, signal conditioner, 멀티미터(multimeter), 카운터(counter), A/D 보드로 구성된다. signal conditioner는 가속감도계에서 나오는 신호를 안정화하고 증폭한다. 주파수응답곡선 구성시, 카운터는 하중주파수를 측정하고 멀티미터는 각 주파수에서 가속도계의 출력전압을 측정한다. A/D 보드는 자유진동감쇠곡선을 획득하는데 사용된다.

비틀진단시험에서의 변위측정 시스템은 비틀력에 의한 시료의 비틀각을 측정하기 위한 장치들로 구성된다. 시스템은 간격측정시스템(target, probe, proximator), D.C. 전원공급장치, OP-amplifier, 필터, 오실로스코프로 구성된다. 간격측정기(proximator probe)는 시험체와 접촉 없이 변위를 측정하는 장치로 두 개의 간격 측정기를 시료의 중심에서 원주방향 일정거리에 설치하여 probe와 target사이의 간격 변화를 측정하고 이렇게 측정된 두 신호를 OP-amplifier의 subtraction회로를 통과시켜서 시료의 비틀각을 산정한다. OP-amplifier를 통과한 전기적 신호는 low-pass filter를 사용하여 일정한 시험주파수 이상의 잡음을 제거한 후 A/D 보드를 통하여 컴퓨터로 획득하게 된다. 전기신호가 필터를 통과할 때 약간의 위상차이가 발생하게 된다. 하중 신호와 위상차이를 없애기 위해 신호발생기로부터 나오는 신호도 필터를 거치도록 하였다(그림5).

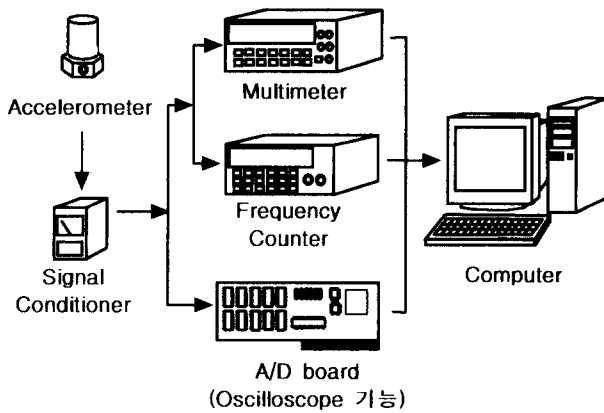


그림 4 공진주시험의 변위측정 시스템

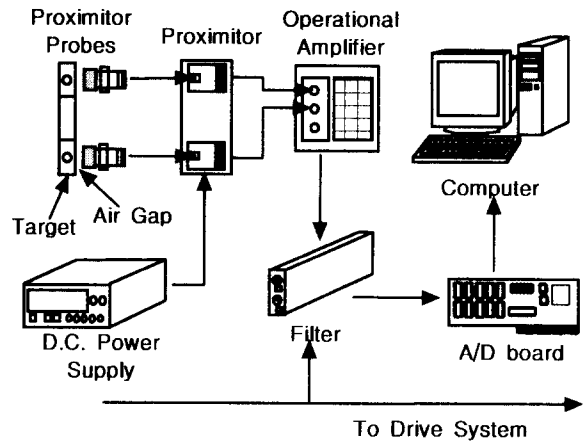


그림 5 비특전단시험의 변위측정 시스템

#### 4.4 제어시스템

공진주/비특전단시험은 구성시스템의 전자장비(신호발생기, 멀티미터, 카운터, 오실로스코프등)를 수동으로 조작하여도 시험이 가능하지만, 모든 전자장비를 통합적으로 관리하여야 효과적이고 신뢰도 높은 시험결과를 얻는다. 따라서, 전자장비들을 운영하는 제어시스템을 제작하여 수동으로 조작되던 전자장비들을 컴퓨터가 조작하도록 하였다.

제어시스템은 시스템 자동화의 중심이 되는 컴퓨터, 컴퓨터 내에서 시험시스템을 제어할 수 있게 하는 제어프로그램, GPIB보드, A/D 보드로 구성된다. 본 연구에서는 윈도우95 환경의 펜티엄급 IBM 컴퓨터를 기준으로 하고, 시험기를 자동 제어하는 프로그램을 만들기 위해 National Instrument사의 LabVIEW라는 상용 프로그램을 이용하여 자동제어 시스템을 구축하였다. GPIB보드와 A/D보드는 National Instrument사의 제품을 이용하였고, 컴퓨터 안의 확장슬롯에 설치하고 각 보드에 제공되는 케이블을 사용하여 장비와 보드를 연결하였다.

본 연구에서는 공진주/비특전단시험기의 구성 중 하중재하 시스템과 변위측정 시스템을 컴퓨터로 제어하였고, 구속압력 재하장치는 수동으로 조작되게 하였다.

### 5. 전자동 시험수행 프로그램

전자동 공진주/비특전단시험 수행 프로그램은 앞절에서 설명한 바와 같이 LabVIEW를 이용하여 작성하였다. 본 프로그램은 전자장비들을 조직적으로 운용하여 시험절차에 맞는 시험을 수행하게 하고, 수행된 시험결과를 분석하여 지반물성을 산정해내는 두 가지 역할을 하게 된다.

제작된 프로그램은 사용자의 선택에 따라 저변형을 공진주시험(LA-RC), 고변형을 공진주시험(HA-RC), 고변형을 비특전단시험(HA-TS)을 선택적으로 수행하게 된다. 저변형을 공진주시험은 구속압 및 시간에 따른 최대전단탄성계수의 변화를 평가하기 위한 시험이고 고변형을 공진주시험은 저변형율에서 고변형율까지 변형율크기를 변화시키며 공진주시험을 수행하는 시험이다. 고변형을 비특전단시험에서도 변형율 크기를 변화시키며 비특전단시험을 수행한다.

공진주시험에서 주파수응답곡선을 주파수를 변화시키며 하중을 가하는 sweeping 작업을 통해 구해진다. sweeping시 시료에 가해지는 하중재하횟수를 줄이기 위해 rough sweeping과 fine sweeping으로 나누어 수행한다. rough sweeping은 넓은 영역의 주파수대역에서 하중주파수를 큰 폭으로 증가시키며 대략적인 공진주파수를 결정한다. fine sweeping은 rough sweeping에서 결정된 공진주파수 전후의 좁은 주파수대역을 설정하고 하중주파수를 세밀하게 증가시키며 주파수응답곡선을 측정하는 과정이다. 획득된 주파수응답곡선으로부터 공진주파수(최대진폭시의 주파수)를 찾아내어 전단탄성계수를 계산해내고,

half-power band width법을 이용하여 감쇠비를 계산한다. 결정된 공진주파수로 하중을 재하하다가 순간적으로 하중재하를 중지하여, 자유진동이 될 때의 자유감쇠곡선을 획득하여 감쇠비를 계산한다. 저변형을 공진주시험은 컴퓨터에 내장된 시계를 실행시켜 계속적으로 시각을 감지하여 측정예정시각과 일치할 때 공진주시험을 자동으로 수행하게 된다. 고변형을 공진주시험에서는 입력전압을 변화시키며 공진주시험을 수행하며 변형율 크기에 따른 전단탄성계수와 감쇠비를 얻는다.

고변형을 비틀림전단시험은 신호발생기를 작동시켜 시료에 하중을 가하고 변위측정기를 이용하여 시료의 반응을 측정한다. 신호발생기에서 가해진 입력신호 크기로부터 결정된 시료에 재하되는 전단응력과 변위측정기에서 측정된 각변위(전단변형율)로부터 응력-변위 이력곡선을 구성하고 전단탄성계수와 감쇠비를 계산한다.

설정된 여러 구속압에서 시험들이 반복 수행되고 수행된 결과는 각 단계별로 화면에 표시되고 컴퓨터의 하드디스크에 저장되게 된다. 그림 6은 지반재료에 대하여 시험을 수행하여 얻은 전자동 공진주/비틀림 전단시험 시스템의 대표적 컴퓨터 화면 출력결과이다.

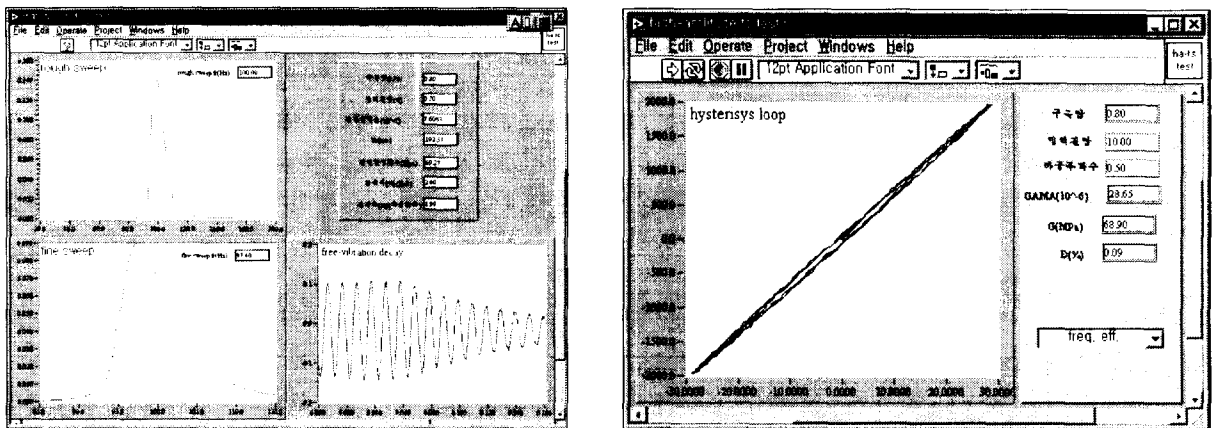


그림 6 전자동공진주/비틀림전단시험 시스템의 시험결과출력화면

## 6. 결 론

본 연구에서는 수동으로 조작되던 공진주/비틀림전단시험기의 전자장비들을 컴퓨터에 의해 제어되도록 하는 제어시스템을 GPIB와 A/D보드를 이용하여 구축하였고, 만들어진 제어시스템을 운용하는 프로그램을 LabVIEW를 이용하여 제작하였다. 개발된 전자동 공진주/비틀림전단시험은 시험 전과정의 수행, 신호의 획득, 신호의 해석 및 출력을 컴퓨터에 의해 자동으로 수행한다. 시스템 개발을 통하여 이전보다 효과적이고 신뢰도 높은 시험을 수행할 수 있게 되었다.

## 참고문헌

1. 김동수(1995), "공진주/비틀림전단(RC/TS) 시험기를 이용한 건조 사질토의 변형특성", 한국지반공학회지, 제11권, 제1호, pp. 101-112.
2. 추연욱(1997), "공진주/비틀림전단시험을 이용한 사질토의 정규화 전단탄성계수 감소곡선에 관한 연구", 한국과학기술원, 석사학위논문.
3. Kim, D.S. (1991), "Deformational Characteristics of Soils at Small to Intermediate Strains from Cyclic Tests", Ph. D Dissertation, The University of Texas at Austin.
4. NI-488.2M User Manual for Windows 95 and Windows NT