

## 대변형을 시험을 위한 공진주/비틀전단 시험기의 해결방안

## A Solution to Large Strain Resonant Column and Torsional Shear Tests Apparatus

배윤신\*

Bae, Yoon-Shin

## Abstract

In this study, the limitations of large strain resonant column and torsional shear tests apparatus are described and solutions to the limitations are also described. The limitations are rotational distance, limited torque, and measurable deformation system, respectively. To resolve the rotational distance, the bottom platen was modified. And the four-armed drive plate was modified into eight-armed drive plate and the drive coil connection was changed to obtain powerful torque.

**Keywords** : large strain test, resonant column and torsional shear test, drive system, torque

## 요 지

본 연구에서는 대변형을 시험을 위한 공진주/비틀전단 시험기의 한계점과 해결방안을 기술하였다. 대변형을 시험의 세가지 한계점은 첫째, 시험기의 제한된 회전거리이며 둘째, 시험기의 제한된 비틀력과 셋째, 변형측정 시스템의 한계 등이 있다. 대변형을 시험의 제한요소 중에서 시험기의 제한된 회전거리를 해결하기 위하여 시료 받침대를 개량하였으며 비틀력을 향상시키기 위하여 가진기 팔의 개수를 증가시키고 가진기 코일의 연결방법을 변경하여 보다 강한 비틀력을 얻을 수 있었다.

**핵심용어** : 대변형을 시험, 공진주/비틀전단 시험기, 가진기, 비틀력

## 1. 개 요

Stokoe식 공진주/비틀전단 시험기는 비선형·동적 지반 물성치 규명을 위하여 널리 사용되어 왔다. 이 시험기의 장점은 첫째, 동적시험인 공진주시험과 진동시험인 비틀전단시험을 동일한 공시체에 대하여 수행함으로써 두 시험결과와의 효율적인 비교가 가능하고 둘째, 순응도(compliance) 문제없이 저변형율( $\gamma < 10^{-3}\%$ ) 이하에서의 비틀전단시험이 가능하며 셋째, 비틀전단시험에서 진동주파수를 자유로이 조절할 수 있어서 주파수 변화에 대한 지반의 변형특성을 효과적으로 규명할 수 있다.

기존의 Stokoe식 공진주/비틀전단 시험기는 길이와 지름의 비율이 2:1로서 가진 시스템의 최대 회전시 대략 1.0% 최대 전단 변형율을 얻을 수 있다(Kim, 1991). 대변형을 영역에서 시험이 가능한 개량된 시험기를 소개하기 위하여 대변형을 시험의 한계 및 해결방안들을 서술하고 개량형 시험기를 이용한 이론적 결과를 제시해 보고자 한다.

## 2. 기존 공진주/비틀전단 시험기의 한계

대변형을 공진주/비틀전단 시험을 제한하는 요인 중 첫번

째는 시험기의 제한된 회전거리이다. 시험기에서 최대 전단 변형율( $\gamma_{\max}$ )은 식 (1)을 사용하여 계산되며 그림 1에서는 주어진 비틀각( $\theta$ )과 최대 전단변형율( $\gamma_{\max}$ )과의 관계를 보여 주고 있다.

$$\gamma_{\max} = \frac{r_0}{L} \cdot \theta \quad (1)$$

여기서,  $\gamma_{\max}$  = 전단변형율,

$r_0$  = 시료의 반지름,

$L$  = 시료의 높이,

$\theta$  = 비틀각(radian)

두번째는 가진시험기의 제한적 비틀력이다. 비틀력( $T$ )은 그림 2에서 보는 바와 같이 전자력( $F$ )과 가진기 팔의 길이( $d$ )의 곱으로 표현된다. 여기서 전자력( $F$ )은 식 (2)와 같이 코일에 흐르는 전류( $i$ ), 코일의 감은 수( $N$ ), 자기장 상수( $B$ ), 코일의 원호길이( $l_c$ )의 곱으로 표현된다(Sasanakul and Bay, 2008).

$$F = i \cdot N \cdot l_c \cdot B \quad (2)$$

\*정회원 · 교신저자 · 서울시정개발연구원 환경안전연구실 부연구위원 (E-mail : ysbae@sdi.re.kr)

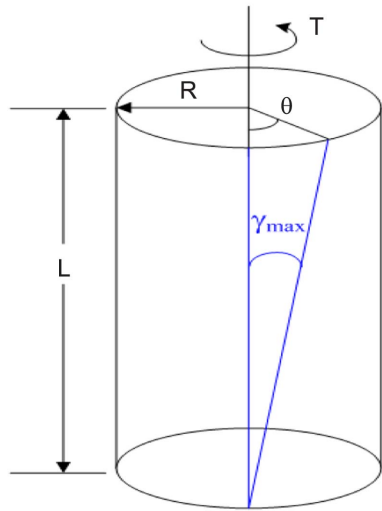


그림 1. 주어진 비틀력(T)에서 얻어지는 비틀각(theta)에서의 최대단변형률(gamma\_max)

여기서,  $i$  = 코일에 흐르는 전류

$N$  = 코일의 감은 수

$l_c$  = 코일의 원호길이

$B$  = 자기장 상수

결국 전자력( $F$ ) 대신 식 (2)를 사용하면 비틀력( $T$ )은 식 (3)과 같으며 전류( $i$ )를 제외한 상수를 비틀-전류 상수( $k_i$ )로 표기하면 비틀력( $T$ )은 전류( $i$ )에 비례함을 알 수 있다.

$$T = F \cdot d = (i \cdot N \cdot l_c \cdot B) \cdot d = k_i \cdot i \quad (3)$$

여기서,  $k_i$  = 비틀-전류 상수 =  $i \cdot N \cdot l_c \cdot B$

식 (3)에서 보는 바와 같이 비틀력( $T$ )은 강한전류로 인한 가진 신호의 증폭이나 강한자석을 이용하여 기존 시험기의 비틀력 한계를 극복할 수 있다.

마지막으로, 대변형률 공진주비틀전단 시험을 위해서는 변형측정 시스템의 한계를 극복해야 한다. 변형측정 시스템에

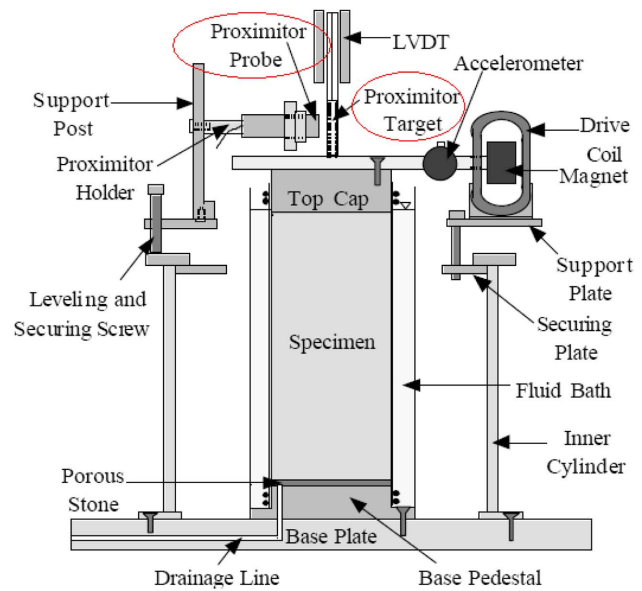


그림 3. RC-TS 시험기의 Proximator를 포함한 변형측정시스템 (Stokoe et al., 2000)

서 proximator는 그림 3과 같이 비틀전단 시험시 가진기가 저주파로 작동할 때 회전각을 측정하는데 사용된다(Stokoe et al., 2000). RC-TS 시험기의 변형측정 시스템은 그림 3과 같이 두 개의 proximator probe와 proximator target으로 구성되어 있다. 변형측정 시스템은 접촉하지 않은 상태에서 측정이 이루어진다. Proximator probe는 probe와 target 사이의 간격에 비례하여 전압을 생성하고 여기에 보정계수를 곱해서 정확한 간격이 측정된다. 일반적으로 proximator와 target의 간격이 대략 0.216cm이 넘어가면 비선형구간으로 정확한 계측이 불가능하다.

따라서, 변형 측정 시스템의 한계극복을 위해서는 대변형률 영역에서 덜 민감한 proximator를 사용할 수 있다. 또는 Safaqa 등(2004)이 개발한 현장 시험을 위한 국부 변형률 게이지를 시료 멤브레인에 부착하여 국부 변형률을 측정할 수 있다.

본 연구에서는 시료의 받침대를 개량하여 짧은 시료의 사

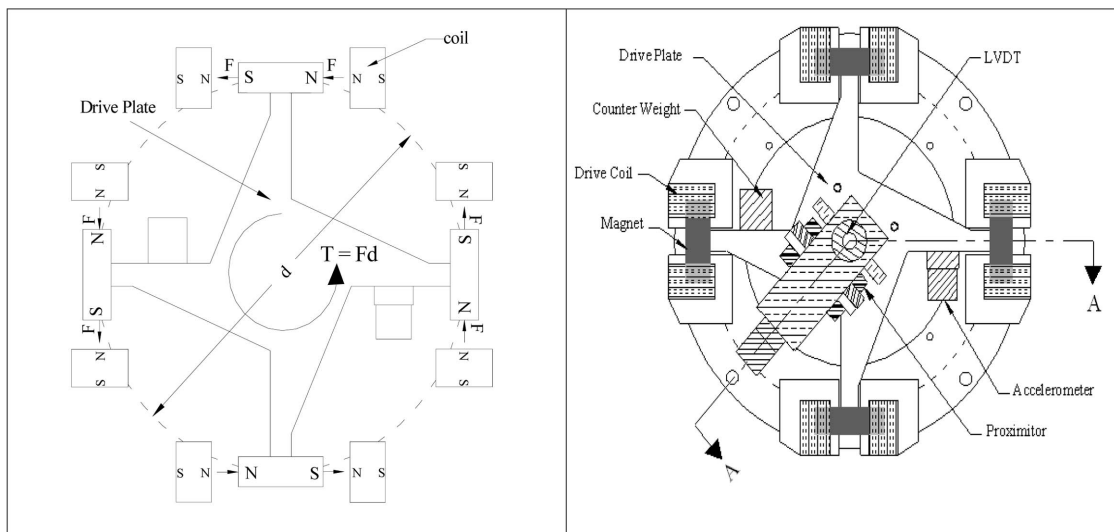


그림 2. 가진팔과 코일에 의해 생성되는 비틀력

용으로 제한된 회전거리를 해결하고 시험기 코일 연결방법의 변형과 가진기 팔의 수를 증가시켜 비틀력( $T$ )의 증폭을 얻고자 한다.

### 3. 대변형률 시험을 위한 해결 방안

#### 3.1 시험기 회전거리 한계의 해결

식 (1)에서 보는바와 같이 시험기 회전거리의 한계는 짧은 시료를 사용하면 극복이 가능하다. 즉, 시료의 길이( $L$ )를 줄임으로써 주어진 회전각( $\theta$ )에서 증가된 전단변형률을 얻을 수 있다. 그림 4는 기존의 시험기(시료의 길이와 지름의 비율이 2:1)와 개조된 시험기(시료의 길이와 지름의 비율이 0.5:1)의 개요도이다. 시료의 길이를 4분의 1로 줄이면 기존의 시험기보다 약 4배 증가된 전단변형률을 얻을 수 있다.

개량된 시험기와 기존의 시험기를 사용하여 얻어지는 전단탄성계수에 대한 검증은 필요하며 공진주시험기를 사용하여

최대전단탄성계수( $G_{max}$ )를 비교한 결과 짧은 시료(길이와 지름의 비율이 0.5:1 또는 1:1)를 사용할 경우 시험기 단부와 시료간의 마찰이 유효응력에 영향을 주어 이에 대한 보정이 필요하다(Bae, 2008). 또한 ASTM D4015-92(2000)에서는 공진주시험기에 사용되는 시편의 길이/직경의 비를 2~3으로 제안하였다. 따라서, 본 연구에서 제시하고 있는 짧은 시료를 사용하여 공진주 시험을 수행할 경우 단부와의 마찰보정이 없다면 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 없으므로 공진주 시험보다는 비틀전단 시험기 사용을 제시한다.

#### 3.2 시험기의 제한된 비틀력의 해결

##### 3.2.1 가진기에서 가진팔이 4개인 경우

본 연구에서는 대변형률 시험을 위하여 앞 절에서 제시한 세 가지 요인 중 제한적 비틀력을 향상시키기 위하여 시험기 코일 연결방법의 변형을 통한 비틀력( $T$ )의 증폭을 제시하였다. 그림 5는 가진팔과 코일로 구성된 가진기를 위에서

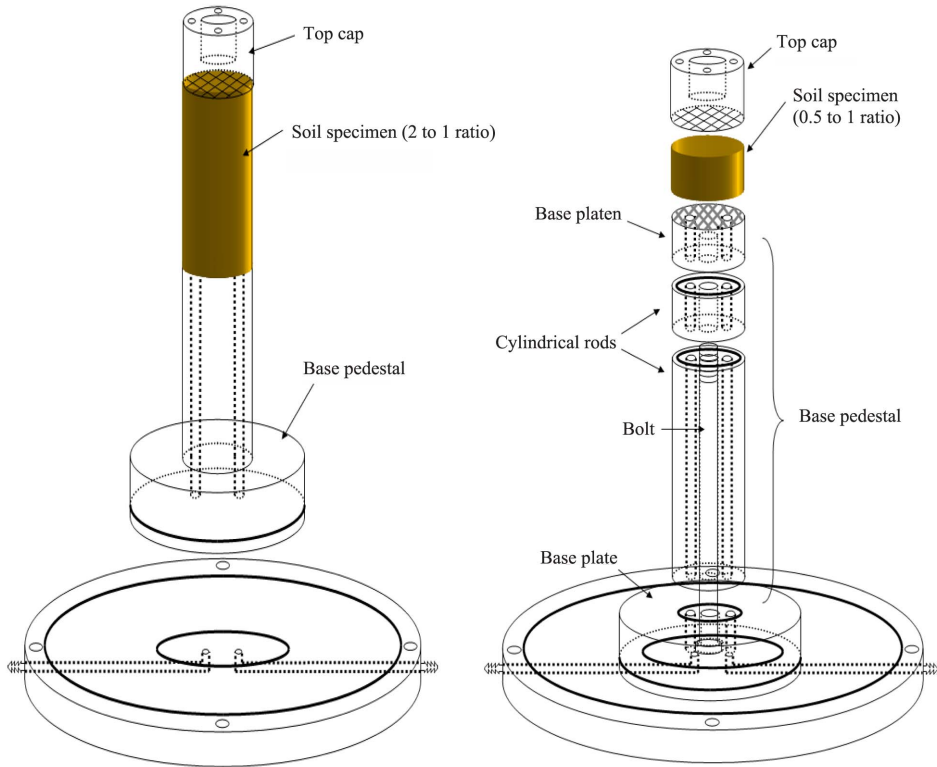


그림 4. 기존 시험기 및 개량된 시험기의 개요도 (Bae and Bay, 2009)

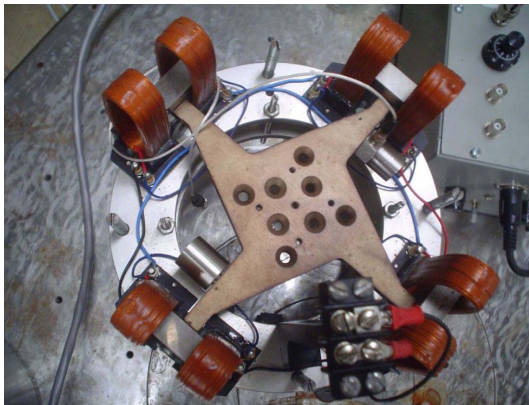


그림 5. 가진팔과 코일 사진 (직렬연결)

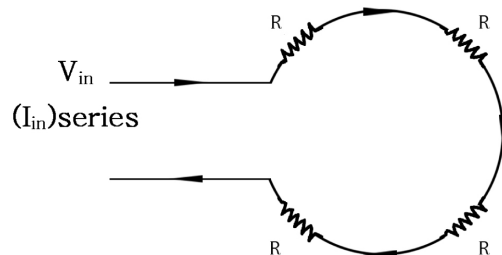


그림 6. 직렬로 연결된 코일

찍은 사진이며 그림 6은 이를 단순하게 도식화한 그림이다.

그림 6에서와 같이 코일 4개가 직렬로 연결되었을 경우 비틀력( $T_{series}$ )을 산정해 보았다. 식 (3)에서와 같이 비틀력( $T$ )은 전류( $i$ )에 비례하므로 코일에 유입되는 전류 ( $I_{in,series}$ )는 가진력( $V_{in}$ )을 총 저항으로 나누면 되고 총 저항은 직렬로 연결되어 있으므로 오옴의 법칙에 따라 각각의 저항의합( $4R$ )과 같다. 결국, 직렬로 연결된 코일에 유입되는 전류는 식 (4)와 같이 계산된다(Halliday and Rensnick, 1981).

$$(I_{in})_{series} = \frac{V_{in}}{R+R+R+R} = \frac{V_{in}}{4R} \quad (4)$$

한 개의 코일에서의 비틀력( $f_i$ )는 비틀-전류 상수( $k_i$ )와 각각의 코일에 흐르는 전류( $I_{coil}$ )의 곱과 같으며 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$f_i = k_i \cdot I_{coil} \quad (5)$$

그리고 비틀력( $T_{series}$ )은 각 코일에서의 비틀력( $f_i$ )의 합과 같으며 직렬 연결에서 각 코일에 흐르는 전류( $I_{coil}$ )는 코일에 유입되는 전류( $I_{in,series}$ )와 같으므로 식 (6)과 같이 표기된다.

$$(T)_{series} = \sum_{i=1}^4 f_i = \sum_{i=1}^4 k_i \cdot I_{coil} = 4 \cdot k_i \cdot (I_{in})_{series} \quad (6)$$

반면, 가진기에서의 코일을 병렬로 연결하였을 경우 가진팔을 포함한 가진기 사진과 회로의 도식화를 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

같은 방법으로 그림 8에서 코일 4개가 병렬로 연결되었을 경우 비틀력( $T_{parallel}$ )을 산정해 보았다. 코일에 유입되는 전류( $I_{in,parallel}$ )는 가진력( $V_{in}$ )을 총 저항으로 나누면 되고 총 저항은 병렬로 연결되어 있으므로 오옴의 법칙으로 계산할 수 있다. 병렬로 연결된 코일에 유입되는 전류는 식 (7)과 같이 계산된다.

$$(I_{in})_{parallel} = \frac{V_{in}}{\frac{R}{4}} = \frac{4 \cdot V_{in}}{R} \quad (7)$$

여기서 식 (4)와 식 (7)을 비교하면 병렬로 연결된 코일에 유입되는 전류( $I_{in,parallel}$ )는 직렬로 연결된 코일에 유입되는 전류( $I_{in,series}$ )보다 16배 크다는 것을 알 수 있다.

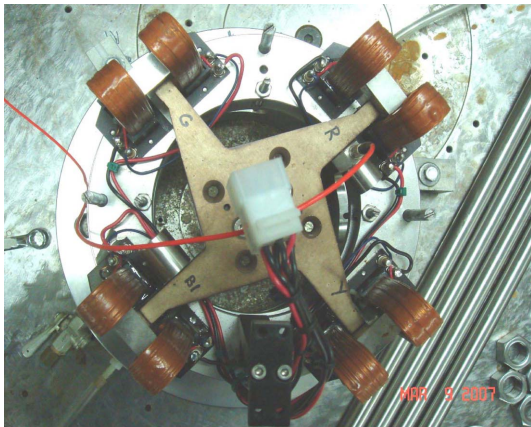


그림 7. 가진팔과 코일 사진 (병렬연결)

$$(I_{in})_{parallel} = 16(I_{in})_{series} \quad (8)$$

그리고 비틀력( $T_{parallel}$ )은 각 코일에서의 비틀력( $f_i$ )의 합과 같으며 병렬 연결에서 각 코일에 흐르는 전류( $I_{coil}$ )는 코일에 유입되는 전류( $I_{in,parallel}$ )의 4분의 1과 같으므로 식 (9)와 같이 표기된다.

$$(T)_{parallel} = \sum_{i=1}^4 f_i = \sum_{i=1}^4 k_i \cdot I_{coil} = 4 \cdot k_i \cdot \frac{(I_{in})_{parallel}}{4} = k_i \cdot (I_{in})_{parallel} \quad (9)$$

여기서 식 (8)을 참조하여 식 (5)와 식 (9)를 비교하면 병렬에서의 비틀력( $T_{parallel}$ )은 직렬에서의 비틀력( $T_{series}$ )보다 4배 강한 비틀력이 발생함을 알 수 있다.

$$(T)_{parallel} = 4(T)_{series} \quad (10)$$

그림 9는 개량된 받침대의 사용으로 짧은 시료를 사용하고 코일 연결방법을 병렬로 하였을 경우 전단변형율과 전단력의 이력곡선을 보여주고 있다(Bae and Bay, 2009).

### 3.2.2 가진기에서 가진팔이 8개인 경우

기존의 시험기의 가진기에는 가진팔을 4개 사용하고 있다. 본 연구에서는 대변형율 시험을 위하여 코일연결 방법의 변형과 함께 가진팔의 수를 8개로 증가시켜 비틀력을 향상시

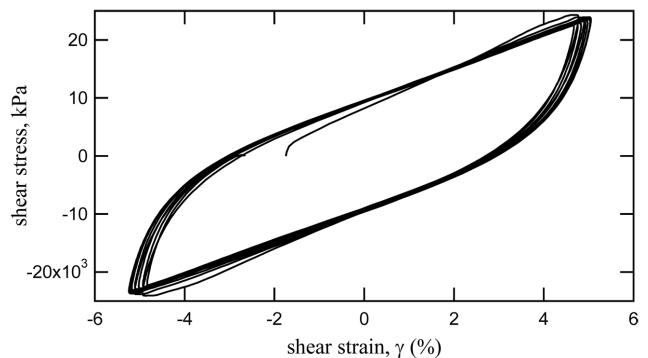


그림 9. 구속압 101.3kPa에서의 사질토 시료를 이용한 비틀전단 시험의 이력곡선 (Bae and Bay, 2009)

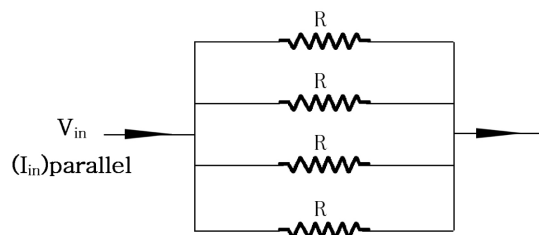


그림 8. 병렬로 연결된 코일

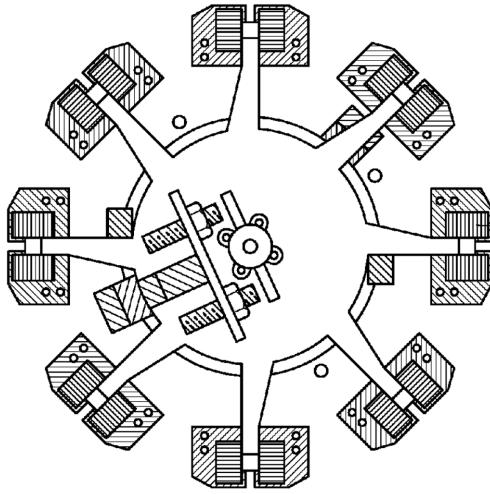


그림 10. 8개의 가진팔과 코일의 개요도 (직렬연결)

켜 보고자 하였다. 그림 10은 8개의 가진팔과 코일로 구성된 가진기 개요도이며 그림 11은 이를 단순하게 도식화한 그림이다.

그림 11에서와 같이 코일 8개가 직렬로 연결되었을 경우 비틀력( $T_{series}$ )을 산정해 보았다. 8개의 코일이 직렬로 연결된 경우 유입되는 전류는 식 (11)과 같이 계산된다.

$$(I_{in})_{series} = \frac{V_{in}}{R+R+\dots+R} = \frac{V_{in}}{8R} \quad (11)$$

비틀력( $T_{series}$ )은 8개 각각의 코일에서의 비틀력( $f_i$ )의 합과 같으며 직렬 연결에서 각 코일에 흐르는 전류( $I_{coil}$ )는 코일에 유입되는 전류( $I_{in, series}$ )와 같으므로 식 (12)와 같이 표기된다.

$$(T)_{series} = \sum_{i=1}^8 f_i = \sum_{i=1}^8 k_i \cdot I_{coil} = 8 \cdot k_i \cdot (I_{in})_{series} \quad (12)$$

그리고 가진팔이 8개인 가진기에서의 코일을 병렬로 연결하였을 경우 8개의 가진팔과 병렬로 연결된 코일의 개요도를 그림 12에 나타내었다.

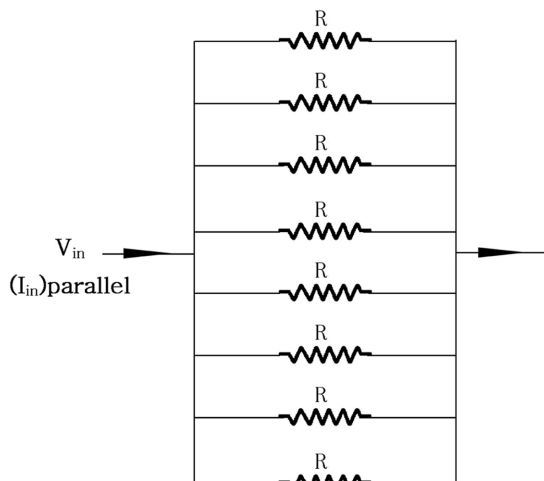


그림 12. 8개의 코일이 병렬로 연결된 개요도

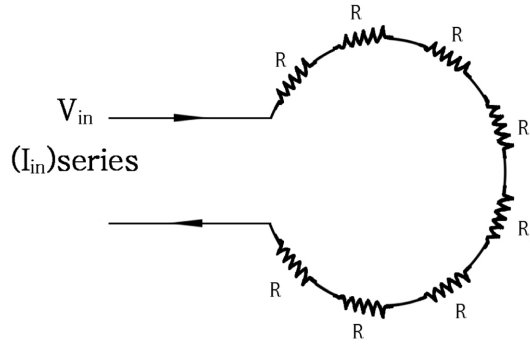


그림 11. 8개의 코일이 직렬로 연결된 개요도

코일에 유입되는 전류 ( $I_{in, parallel}$ )는 가진력( $V_{in}$ )을 총 저항으로 나누어 계산하였다. 병렬로 연결된 코일에 유입되는 전류는 식 (13)과 같이 계산된다.

$$(I_{in})_{parallel} = \frac{V_{in}}{\frac{R}{8}} = \frac{8 \cdot V_{in}}{R} \quad (13)$$

여기서 식 (11)과 식 (13)을 비교하면 8개의 가진팔에서 병렬로 연결된 코일에 유입되는 전류( $I_{in, parallel}$ )는 직렬로 연결된 코일에 유입되는 전류( $I_{in, series}$ )보다 64배 크다는 것을 알 수 있다.

$$(I_{in})_{parallel} = 64(I_{in})_{series} \quad (14)$$

그리고 비틀력( $T_{parallel}$ )은 각 코일에서의 비틀력( $f_i$ )의 합과 같으며 병렬 연결에서 각 코일에 흐르는 전류( $I_{coil}$ )는 코일에 유입되는 전류( $I_{in, parallel}$ )의 8분의 1과 같으므로 식 (15)와 같이 표기된다.

$$(T)_{parallel} = \sum_{i=1}^8 f_i = \sum_{i=1}^8 k_i \cdot I_{coil} = 8 \cdot k_i \cdot \frac{(I_{in})_{parallel}}{8} = k_i \cdot (I_{in})_{parallel} \quad (15)$$

여기서 식 (14)를 참조하여 식 (12)와 식 (15)를 비교하면 8개의 가진팔에서 병렬연결된 코일에서의 비틀력( $T_{parallel}$ )은 직렬에서의 비틀력( $T_{series}$ )보다 8배 강한 비틀력이 발생함을 알 수 있다.

$$(T)_{parallel} = 8(T)_{series} \quad (16)$$

한 가지 주의하여야 할 사항은, 코일이 직렬 연결된 경우는 가진팔의 개수와 상관없이 비틀력( $T$ )은 식 (17)과 같이 일정하다는 것을 알 수 있다.

$$(T)_{series} = k_i \cdot \frac{V_{in}}{R} \quad (17)$$

즉, 식 (10)에서 보는 바와 같이 코일의 연결방법을 직렬에서 병렬로 변경하는 것만으로 비틀력( $T$ )은 4배 증가됨을 알 수 있으며 병렬로 연결된 코일에서 기존의 4개 가진팔의 개수를 8개로 가진팔의 개수를 2배 증가시키면 식 (16)과 같이 기존 4개의 가진팔의 직렬로 연결된 코일에서 발생하는 비틀력보다 8배 강한 힘을 얻을 수 있다. 본 연구결과는 대변형을 시험이 가능한 공진주 및 비틀전단 시험장치에 적용하는 기술로 특허등록이 완료되었다(배운신, 2010).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 대변형을 시험을 위하여 기존의 공진주/비틀전단 시험기의 한계점과 해결방안을 기술하였다. 대변형을 시험을 제한하는 세가지 요인은 시험기의 제한된 회전거리, 제한된 비틀력, 그리고 변형측정 시스템의 한계 등이 있다. 제한된 회전거리를 극복하고자 기존의 시료보다 짧은 시료를 사용하기 위하여 시료 받침대를 개량하였다. 비틀력의 한계를 극복하기 위해서는 기존의 코일을 직렬연결에서 병렬연결로 변경하여 4배 강한 비틀력을 얻을 수 있었으며 가진기 가진팔의 개수를 8개로 증가시키면 4개 가진팔을 가진 직렬연결된 코일의 경우보다 8배 강한 비틀력을 이론적으로 얻을 수 있었다. 향후 개선된 제작기술의 시료에 적용한 결과와 그 결과의 정확도를 입증하거나 활용에 대한 연구가 필요하다.

#### 참고문헌

배운신(2010) 대변형을 시험이 가능한 공진주 및 비틀전단 시험

장치, 한국특허등록(번호 제 10-0994424호), 특허청.

- Kim, Dong-Soo (2001) *Deformational characteristics of soils at small strains from cyclic tests*, PhD dissertation, Univ. of Texas, at Austin, Austin, USA.
- Bae, Yoon-Shin (2008) *Modeling soil behavior in large strain resonant column and torsional shear tests*, PhD dissertation, Utah State University, Utah, USA.
- Sasanakul, I. and Bay, J. (2008) Stress integration approach in resonant column and torsional shear testing for soils, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol. 134, No. 12, pp. 1757-1762.
- ASTM D4015-92 (2000) Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method, ASTM standard D4015-92. In Annual book of standards. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa. Vol. 04.08, pp. 473-494.
- Halliday, D. and Rensnick, R. (1981). *Fundamentals of physics*. Wiley, New York.
- Stokoe *et al.* (2000) *Technical Procedures for Resonant Column and Torsional Shear Testing of Soil and Rock Samples*. Project No. A17376YSOA Geotechnical Engineering Center, University of Texas, Austin.
- Safaqah, O. A. and Riemer, M. F. (2004) Effects of sampling disturbance on dynamic soil properties. *Proc. of 11th SDEE and 3rd ICEGE*, Berkeley, CA, Vol. 1.
- Bae, Y. and Bay, J. (2009) Modifications of resonant column and torsional shear device for large strain, *Computers and Geotechnics*, Vol. 36, Issue 6, pp. 944-952.

(접수일: 2011.3.2/심사일: 2011.4.12/심사완료일: 2011.4.12)