

# 전기장 센서를 이용한 교류 400 kV 고전압 분압기의 제작 및 평가

論 文  
57P-3-10

## Fabrication and Evaluation of AC 400 kV High Voltage Divider using Electric Field Sensor

李相和<sup>†</sup> · 韓相吉<sup>\*\*\*</sup> · 鄭在甲<sup>\*</sup> · 姜銓洪<sup>\*\*</sup> · 金潤亨<sup>\*\*\*</sup> · 鄭辰慧<sup>\*\*\*</sup> · 韓相玉<sup>§</sup>  
(Sang-Hwa Lee · Sang-Gil Han · Jae-Kap Jung · Jeon-Hong Kang · Yoon-Hyoung Kim · Jin-Hye Jeong · Sang-Ok Han)

**Abstract** - Output voltage value of AC high voltage source has usually been obtained by measuring the low arm voltage of high voltage divider or the secondary voltage of high voltage transformer. In this study, we have fabricated the AC 400 kV high voltage divider using high voltage electrode and electric field measurement sensor. The dividing ratio of the fabricated 400 kV high voltage divider was evaluated using reference 400 kV capacitive divider. The dividing ratio of 400 kV high voltage divider is found to be 12,322 and has the good linearity within 0.63 % against AC high voltage up to 400 kV. Therefore, the developed 400 kV high voltage divider could evaluate 400 kV high voltage supply and voltage divider used in industry.

**Key Words** : High Voltage Divider, AC High Voltage Source, Dividing Ratio, Electric Field Sensor

### 1. 서 론

고전압 발생원은 발전, 송전, 배전설비와 관련된 국가 모든 산업활동 및 국민생활에 에너지를 공급하기 위한 필수적인 중전기이다. 고전압 발생원의 신뢰성 확보를 위해 고전압 발생원의 정밀측정이 요구된다. 수백 kV까지의 교류 고전압 발생원의 정밀측정은 저항형 분압기, 용량형 분압기 혹은 고전압 변성기를 이용한다. 이러한 방법은 고전압을 직접 측정하는 것이 불가능하기 때문에 분압 또는 강압된 낮은 전압을 측정 후 분압기의 분압비 또는 전압변성기의 정격변환비를 곱하여 고전압 발생원의 전압을 알 수 있다 [1-4].

현재 국내 산업체에서 사용하고 있는 고전압 발생원의 최대 출력값은 1800 kV이다. 따라서 IEC 규격에 의해 최대 전압의 20%에 해당하는 360 kV까지의 전압 측정 및 직선성을 평가할 수 있어야 한다 [5]. 고전압 발생원의 평가를 위해서는 국가표준기관에서 소급을 받은 약 360 kV까지의 정격전압을 가진 고전압 용량형 분압기나 고전압 변성기가

필요하다. 그러나 국내에서는 200 kV까지만 표준이 확립되어 있기 때문에 360 kV까지 용량의 분압기 개발 및 평가 기술이 필요하다.

본 연구는 산업체의 360 kV까지 고전압 발생원의 평가를 위하여 고전압 전극 및 전기장 측정 센서를 이용하여 400 kV까지 적용 가능한 고전압 분압기를 제작하였다. 또한 제작된 400 kV 고전압 분압기는 산업체 현장의 고전압 발생원을 평가하기 위하여 이동과 조립이 가능하게 제작하였다. 선행 연구에서 개발된 교류 고전압 측정범위 확장 기술을 통하여 평가된 400 kV 용량형 분압기를 이용하여 제작한 고전압 분압기의 분압비를 측정하였다 [6]. 또한 고전압 분압기의 등가 모델의 구현과 400 kV까지의 인가전압에 대한 전기장 센서의 출력 전압값의 직선성 평가, 분압비의 오차 평가를 통하여 제작한 400 kV 분압기의 유효성을 검증하였다.

### 2. 400 kV 고전압 분압기의 구성 및 시뮬레이션

#### 2.1 400 kV 고전압 분압기의 구성

400 kV 고전압 분압기는 그림 1(a)와 같이 두 개의 평행하게 배열된 고전압 전극과 접지 전극, 고전압 전극의 코로나 방전을 방지하기 위한 코로나 링, 두 전극 사이에 위치한 전기장 측정 센서, 고전압 전극과 접지 전극 사이의 절연을 위한 절연체(FRP), 전기장 측정센서와 접지전극 사이의 절연을 위한 절연체(에폭시), 센서로부터의 출력값을 측정하기 위한 오실로스코프로 구성된다. 고전압 전극의 직경은 420 mm이고 두께는 20 mm로 제작하였으며, 접지 전극의 직경

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 韓國標準科學研究院 先任研究員  
E-mail: shlee@kriss.re.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 韓國標準科學研究院 責任研究員 · 理博

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 韓國標準科學研究院 先任研究員

<sup>\*\*\*</sup> 學生會員 : 忠南大學校 電氣工學科 碩士課程

<sup>§</sup> 正會員 : 忠南大學校 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2008年 4月 15日

最終完了 : 2008年 5月 17日

은 410 mm이고, 두께는 15 mm로 제작하였다. 고전압 전극과 접지 전극 사이의 절연체는 FRP로 제작하였고, 2단으로 구성하여 이동과 조립이 용이하도록 하였으며 총 높이는 3 m로 제작하였다. 전기장 센서는 그림 1(b)와 같이 에폭시 절연물에 구리(Cu) 1 온스를 입혀서 제작하였고, 에폭시의 직경은 150 mm 두께는 3 mm 이며, 구리의 직경은 140 mm이다. 전기장 센서와 접지전극 사이의 전압은 Tektronix사의 4채널 오실로스코프 DPO7254 2.5 GHz를 이용하여 측정하였다.

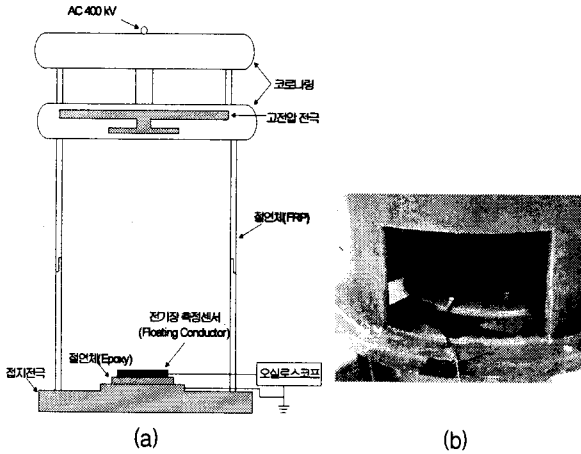


그림 1 평행판 전극과 전기장 센서를 이용한 400 kV 고전압 분압기 구성도와 전기장 센서 사진

Fig. 1 Constitution of 400 kV high voltage divider using parallel plates electrode and electric field sensor and photo of electric field sensor

2.2 유한요소법을 이용한 고전압 분압기의 시뮬레이션

그림 2(a)는 유한요소법의 전자계 해석 프로그램 Flux 2D를 이용하여 제작한 분압기를 모델링한 그림이다. 에폭시와 FRP의 유전율은 각각 4.75와 3.8로 하였으며, 각각의 치수는 실제 치수를 입력하였고, 접지 전극은 0 V, 전기장 센서는 구리(floating conductor)로 설정하였다. 그림 2(b)는 시뮬레이션 결과의 전위 분포도이다. 그림 2(b)와 같이 등전위선이 고전압 전극과 접지측 전극에 균일하게 분포하고 있으며, 전기장 센서가 위치한 중앙 부분이 주변의 부분에 비해 높은 전위를 나타내고 있음을 알 수 있다.

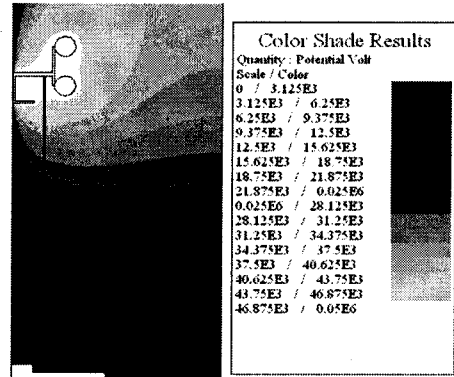
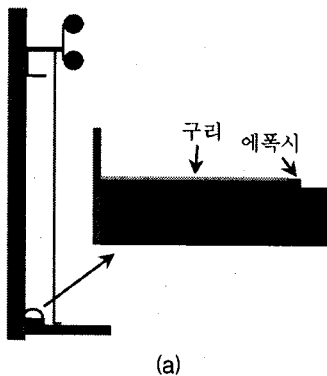


그림 2 유한요소법 프로그램을 이용한 시뮬레이션  
Fig. 2 Simulation of electric field using FEM program

그림 3과 같이 고전압 전극의 전압값에 대한 전기장 센서의 전압값을 시뮬레이션하여 그래프를 그리면 인가된 전압값에 따라 전기장 센서의 전압값이 일정하게 증가함을 알 수 있다. 인가된 전압값과 전기장 센서의 출력 전압값의 선형성은 분압기의 기본 요소로서 고전압 전극과 전기장 센서를 이용한 400 kV 고전압 분압기가 고전압 발생원의 교정을 위해 적용 가능함을 알 수 있다.

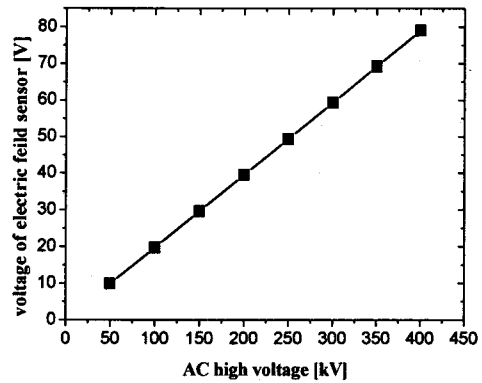
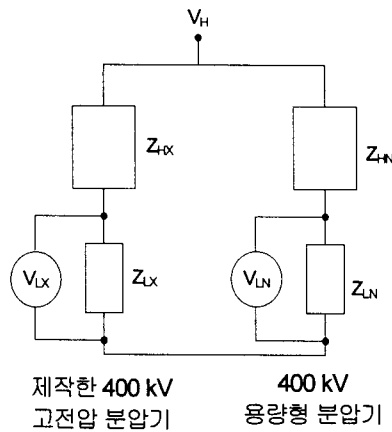


그림 3 교류 고전압에 대한 전기장 센서의 출력 전압의 시뮬레이션 값

Fig. 3 Simulation values of output voltage of electric field sensor as a function of AC high voltage

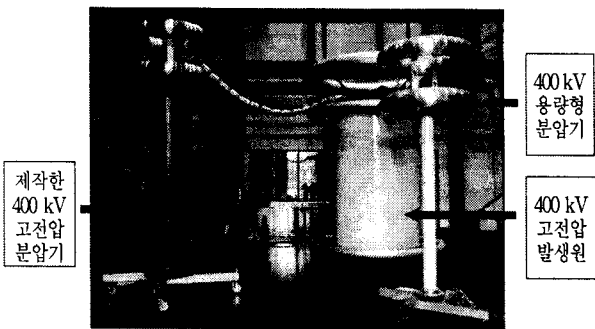
3. 400 kV 고전압 분압기의 안정성 평가

그림 4(a)는 선행 연구에서 평가된 400 kV 표준 용량형 분압기를 이용하여 제작한 400 kV 고전압 분압기의 분압비를 측정하기 위한 회로의 연결도이며, 그림 4(b)는 연결의 실물사진이다. 그림 4(b)의 왼쪽은 제작한 400 kV 고전압 분압기이고, 가운데는 400 kV 까지 공급 가능한 고전압 발생원이며, 오른쪽은 선행 연구에서 평가된 400 kV 용량형 분압기이다.



제작한 400 kV 고전압 분압기      400 kV 용량형 분압기

(a)



(b)

그림 4 400 kV 표준 용량형 분압기를 이용하여 제작한 고전압 분압기를 평가하기 위한 회로의 연결도 및 실물사진

Fig. 4 Circuit diagram and photo for evaluating fabricated high voltage divider using 400 kV standard capacitive divider

400 kV 표준 용량형 분압기의 분압비( $R_N$ )는 선행 연구를 통해 구해졌다<sup>[6]</sup>. 고전압 발생원의 크기는 식 (1)과 같이 400 kV 표준 용량형 분압기의 분압전압( $V_{LN}$ )을 측정함으로써 구해진다.

$$V_H = R_N V_{LN} \tag{1}$$

여기서  $R_N$ 은 평균값인 2,383을 적용하였다. 정격전압에 대해 400 kV 표준 분압기의 분압전압과 계산된 교류 고전압( $V_H$ )은 각각 표 1의 두 번째와 세 번째 열에 나타내었다. 제작한 400 kV 고전압 분압기의 분압비( $R_X$ )는 분압전압( $V_{LX}$ )을 측정함으로써 구해진다. 관계는 식 (2)와 같다.

$$R_X = \frac{V_H}{V_{LX}} \tag{2}$$

식 (2)를 이용하여 계산한 분압비( $R_X$ )는 표 1의 마지막 열에 나타내었다.

표 1 정격전압에 대해 분압전압( $V_{LN}$  과  $V_{LX}$ )의 측정을 통해 얻은 제작한 400 kV 고전압 분압기의 분압비( $R_X$ )

Table 1 Dividing ratio( $R_X$ ) of fabricated 400 kV high voltage divider obtained from dividing voltages( $V_{LN}$  and  $V_{LX}$ ) for rated voltage

정격전압 [kV]	400 kV 표준 용량형 분압기 분압전압 ( $V_{LN}$ ) [V]	인가된 교류고전압 ( $V_H$ ) [kV]	전기장 측정 센서 출력전압 ( $V_{LX}$ ) [V]	제작한 400 kV 고전압 분압기의 분압비( $R_X$ )
17.0	7.18	17.105	1.39	12,350
33.8	14.21	33.859	2.73	12,403
50.7	21.31	50.776	4.12	12,339
67.6	28.37	67.608	5.48	12,337
84.8	35.62	84.878	6.87	12,355
100.0	42.56	101.422	8.21	12,353
118.0	49.65	118.305	9.64	12,272
135.0	56.75	135.244	11.00	12,295
152.0	63.98	152.454	12.40	12,295
169.0	70.97	169.113	13.75	12,299
211.0	88.66	211.286	17.25	12,248
253.0	106.29	253.300	20.65	12,266
295.0	123.97	295.428	23.90	12,361
337.0	141.49	337.169	27.35	12,328
평균				12,322

표 1의 마지막 행에 나타낸 것과 같이 제작한 고전압 전극과 전기장 센서를 이용한 400 kV 고전압 분압기의 평균 분압비는 12,322로 평가되어 졌다.

제작한 400 kV 고전압 분압기의 안정성을 평가하기 위해서는 우선 인가되어지는 교류 고전압의 크기에 대해 전기장 센서의 출력 전압값이 선형성을 가져야 한다. 즉, 인가된 각각의 전압값에 대한 분압비가 일정하게 유지되어야 한다. 그림 5는 제작한 400 kV 고전압 분압기의 전기장 센서의 출력 전압( $V_{LX}$ )과 인가된 교류 고전압( $V_H$ )과의 관계를 나타낸 그래프로서, 전기장 센서의 출력 전압값과 교류 고전압의 관계가 선형성을 나타냄을 알 수 있다. 즉, 인가된 교류 고전압이 일정한 비율로 분압되어 전기장 센서로 출력됨을 확인할 수 있다.

또한 출력값을 피팅하여 보면 그림 5와 같이 1차 함수로 나타내어지며, 여기서  $y$ 는 인가된 교류 고전압 발생원의 크기,  $x$ 는 전기장 센서의 출력 전압값이고, 기울기 12,304는 분압비를 의미하며 -13.830은 offset 전압을 의미한다. 즉, 전기장 센서의 출력 전압값을 측정하면 구해진 1차 함수를 이용하여 교류 고전압 발생원의 크기를 400 kV 혹은 그 이상까지도 평가가 가능하다.

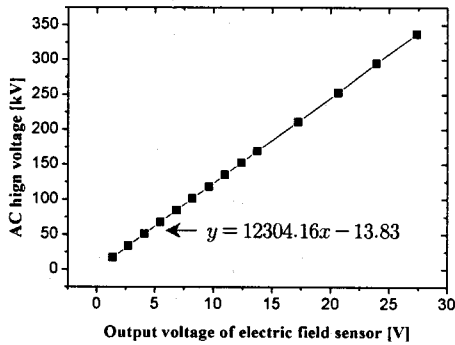


그림 5 교류 고전압에 대한 전기장 센서의 출력전압  
Fig. 5 AC high voltage as a function of output voltage of electric field sensor

그림 6은 인가된 교류 고전압에 대한 400 kV 고전압 분압기의 분압비를 나타낸 그래프이다.

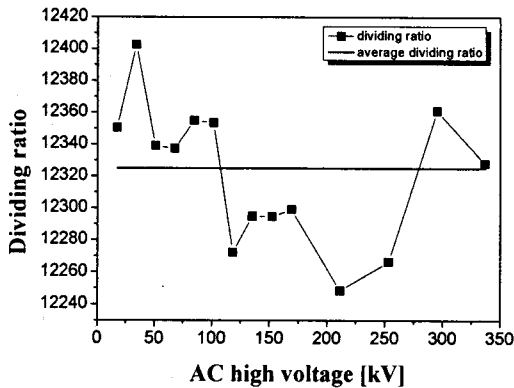


그림 6 교류 고전압에 대한 400 kV 고전압 분압기의 분압비  
Fig. 6 Dividing ratio of 400 kV high voltage divider as a function of AC high voltage

분압비의 상대 평균편차는 다음 식 (3)에 의해 구해진다.

$$\text{분압비의 상대 평균편차} = \frac{(R_{\max} - R_{\min})}{2} \times \frac{1}{R_a} \times 100 [\%] \quad (3)$$

여기서  $R_{\max}$ 는 그림 6에서 분압비의 최대값이 12,403이고,  $R_{\min}$ 은 분압비의 최소값은 12,248이고,  $R_a$ 는 분압비의 평균값인 12,322이다. 따라서 분압비의 상대 평균편차는 약 0.63% 정도이다. 고전압 국제규격(IEC 60044)에서 명시한 고전압 측정 불확도가 3% 임을 감안하면 제작한 400 kV 고전압 분압기의 교류 고전압 발생원에 대한 평가 기술이 적용 가능한 방법임을 확인할 수 있었다<sup>[4]</sup>. 즉, 이동이 가능한 400 kV 고전압 분압기의 평균 분압비 12,322를 이용하면 교류 고전압 장비를 400 kV 혹은 그 이상까지도 평가가 가능하다.

그림 7은 케이블의 정전용량과 오실로 스코프의 내부 임피던스를 고려하여 시뮬레이션한 400 kV 고전압 분압기의 등가회로이다. 여기서  $C_H$ 는 고전압 전극과 전기장 센서 사

이의 정전용량이고,  $C_L$ 은 전기장 센서와 접지전극 사이의 정전용량,  $C_w$ 는 사용된 케이블의 정전용량이며,  $r$ 은 측정기의 내부 임피던스이다. 그림 7과 같이 등가회로에 400 kV를 인가하였을 때 출력 전압값은 32.40 V로서 식 (2)에 의해 분압비는 약 12,345이다.

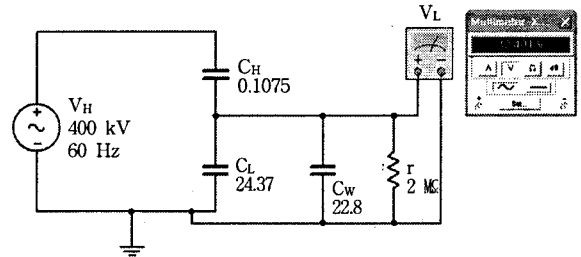


그림 7 400 kV 고전압 분압기의 등가회로  
Fig. 7 Equivalent circuit of 400 kV high voltage divider

#### 4. 결 론

본 연구에서 제작한 고전압 분압기를 유한요소법 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 시뮬레이션한 결과 인가된 전압원과 출력 전압값 사이의 선형성을 확인할 수 있었다. 실제 실험을 통하여 인가된 AC 400 kV까지의 전압원과 전기장 센서의 출력 전압값과의 선형성을 확인하였으며, 각각의 분압비가 오차율 0.63% 내로 유지됨을 확인함으로써 제작한 분압기의 안정성을 검증하였다.

결론적으로 이번에 제작한 고전압 분압기는 현재 시판되고 있는 용량형 분압기에 비해 가격이 1/10 수준이고, 분해와 조립이 용이하여 중전기기 산업체 현장에서 사용 중인 내전압 시험기, 고전압 분압기 등의 고전압 관련 장비들을 400 kV 혹은 그 이상의 범위에서도 현장에서 평가가 가능할 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] William E. Anderson "A Calibration Service for Voltage Transformers and High-Voltage Capacitors" NBS Measurement Services Special Publication 250-33, 1988.
- [2] T. Tadokoro, T. Tsuchiyama, "AC voltage divider test set" JEMIC Technical Report, vol. 37, no. 3, pp 45-47, 2002.
- [3] D. I. Nefed'ev, "Equipment for checking high-voltage measuring transformers" Measurement Techniques, vol. 48, no. 8, pp 812-816, 2005.
- [4] 강전홍, 정재갑, 류제천, 이상화, 김규태, 김명수, 한상욱, "평행판 전극과 전기장 센서를 이용한 교류 고전압 발생원의 측정범위 확장 기술 개발" 대한전기학회지, vol. 55C, no. 9, pp 446-451, 2006.
- [5] International Electrotechnical Commission, IEC 60, 1987.
- [6] 정재갑, 이상화, 강전홍, 김명수, 김윤형, 한상길, 정진혜, 한상욱, 정종만, "200 kV 용량형 분압기 2대를 이용한 교류 고전압 측정범위 확장" 대한전기학회지, vol. 57P, no. 1, pp 1-5, 2008.

저 자 소 개



**이 상 화 (李相和)**

1967년 1월 26일생. 1994년 한밭대 전자공학과 졸업. 2008년~현재 충남대학교 전기공학과 석사 과정. 1986년~현재 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기센터 선임기술원

Tel : 042-868-5151  
Fax : 042-868-5018  
E-mail : shlee@kriss.re.kr



**김 윤 형 (金潤亨)**

1981년 10월 15일생. 2007년 충남대학교 전기공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정.

Tel : 042-821-7604  
Fax : 042-821-8895  
E-mail : yoonhyoung@cnu.ac.kr



**한 상 길 (韓相吉)**

1981년 11월 23일생. 2007년 충남대학교 전기공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정.

Tel : 042-821-7604  
Fax : 042-821-8895  
E-mail : sanggilhan@cnu.ac.kr



**정 진 혜 (鄭辰慧)**

1985년 01월 12일생. 2007년 충남대학교 전기공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정.

Tel : 042-821-7604  
Fax : 042-821-8895  
E-mail : eyhnij@cnu.ac.kr



**정 재 갑 (鄭在甲)**

1965년 7월 4일생. 1998년 고려대 물리학과 졸업 박사. 2001년~현재 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기센터 책임연구원

Tel : 042-868-5759  
Fax : 042-868-5018  
E-mail : jkjung@kriss.re.kr



**한 상 옥 (韓相玉)**

1974년 충남대학교 공업교육과(전기)졸업. 1986년 인하대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1985년 독일 하노버대 객원교수. 1989년 일본 나고야대 객원교수. 현 충남대학교 전기공학과 교수

Tel : 042-821-5655  
Fax : 042-821-8895  
E-mail : sohan@cnu.ac.kr



**강 전 홍 (姜鎿洪)**

1963년 2월 8일생. 2008년 충남대학교 전기공학과 졸업 (공학박사). 1988년~현재 한국표준과학연구원 기반표준부 전자기센터 선임연구원

Tel : 042-868-5152  
Fax : 042-868-5018  
E-mail : jhkang@kriss.re.kr