

대전류펄스 측정용 로고스키 코일 설계 및 특성 연구

김진성\* , 추중호, 정재원, 김성태\*\*, 문희종, 마규홍  
 \* 국방과학연구소, \*\* 한국중공업

Study on the Design and Characteristics of Rogowski Coil for Measurement of High Current Pulse

Jin-Sung Kim\* , Jeung-Ho Chu, Jae-Won Jung, Sung-Tae Kim\*\*, Hee-Jong Moon, Kyu-Hong Ma  
 \* Agency for Defense Development, \*\* Hanjung Heavy Industries Co.

Abstract -

In this study, the design, the fabrication and the evaluation of Rogowski coil are presented for the measurement of the high current pulse (the order of 100kA, ~10kHz, 0.1msec~a few msec). And the fabricated Rogowski coil is tested and compared with the pre-proved rogowski coil.

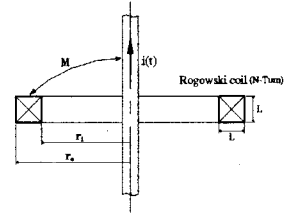


그림 1. 로고스키 코일 설치도

1. 서 론

전자력 성형, 전자력 가속 및 신소재 제조기술 등 새 로이 연구되는 펄스 파워 응용분야에서는 침두치 수백 kA~수MA, 펄스폭 수n~수msec의 대전류펄스를 이용 하고 있다. 이러한 대전류 펄스를 측정하기 위한 전류센 서는 일반 전류센서와 달리 고전압 절연과 대전류로 인 한 자기포화의 회피 및 펄스폭에 따른 응답특성 등을 고 려하여야 한다.

상호인덕턴스는 그림 2와 같이 임의의 폐곡선에 대한 자계의 선적분과 그 폐곡선에 의해 둘러싸인 폐곡면을 관통하는 전류와의 관계는 식(2)로부터 식(3)과 같이 유도되어진다.

대전류 펄스를 측정하기 위하여 사용되는 센서로는 전 류변환기(Current Transformer), 션트(Shunt)저항, 로고스키 코일(Rogowski Coil) 등이 있다.[1][2] 이 중에서 로고스키 코일은 공심(Air Core)로 되어 있기 때문에 대전류에 의한 자기포화를 피할 수 있으며 저전 류에서 대전류에 걸친 선형성, 넓은 주파수 대역, 간단 한 구조, 설치의 용이성, 신뢰성 및 안정성, 경제성 등 의 장점이 있다. 또한, 전압 발생회로와 전계적으로 분 리되어 있기 때문에 장비의 안전성을 손쉽게 확보할 수 있는 장점이 있다.

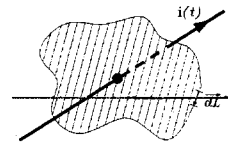


그림 2. 폐곡선 적분과 전류와 관계(암페어 주회 법칙)

$$\oint H \cdot dL = i(t) \tag{2}$$

$$M = \frac{\mu_o}{2\pi} N L \ln \frac{r_o}{r_i} \tag{3}$$

여기서  $N$  : 권선수,  $L$  : 코일의 높이[m]

본 연구에서는 수kA~수MA, 주파수 ~10kHz, 펄스 폭 0.1~수ms급 대전류 펄스를 측정하기 위한 로고스 키 코일을 설계, 제작하고, 그 특성을 검교정된 로고스 키 코일과 비교 확인하였다.

그리고, 측정하고자 하는 전류는 식(1)에서 제시된 로 고스키 코일에서 유기된 전압을 적분하므로써 식(4)와 같이 구할 수 있다.

2. 로고스키 코일 센서 원리, 설계 및 제작

로고스키 코일은 시간에 따라 변화하는 교류 또는 과 도상태의 전류를 측정하는 센서이다. 그림 1과 같이 설 치된 로고스키 코일에서 유기되는 전압은 코일 창을 관 통하는 전류선과 코일간의 상호인덕턴스와 전류의 변화 율에 의해 식(1)과 같이 결정된다.[1]~[5]

$$e = M \frac{di(t)}{dt} \tag{1}$$

여기서  $e$  : 로고스키 코일 유기전압[V],

$M$  : 상호인덕턴스 [H]

$$i(t) = \frac{1}{M} \int e(t) dt \tag{4}$$

다음 식(5)를 만족하는 경우, 적분기가 필요 없는 자 기적분(Self Integrating) 로고스키 코일의 설계가 가 능해진다. 코어가 공심이고 주파수가 100kHz급 이상, 또는 코어 재질의 비투자율이 1000급 이상인 경우에는 식(5)를 만족할 수 있는 것으로 볼 수 있다. 자기적분 로고스키 코일에서는 출력단자에 설치되는 중단저항의 전압이 직접 측정전류를 나타낸다.[1]

$$\frac{L_c}{R_c + R_t} \frac{di_c}{dt} \gg i_c \text{ 또는 } \omega L \gg R_c + R_t \quad (5)$$

여기서,  $L_c$  : 코일의 자기인덕턴스,  $R_t$  : 종단 저항,

$R_c$  : 코일의 저항  $i_c$  : 코일 전류

로그스키 코일 설계 및 제작에 따른 측정오차를 최소화하기 위해서는 설계, 제작시 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다.

- (i) 코일의 단면적과 선도각을 동일하게 하면서 코일 원주에 걸쳐 균일하고 대칭적으로 배치함.
  - (ii)  $r_i$ 는  $(r_o - r_i)$ 과  $L$ 보다 충분히 크게 함.
  - (iii) 코일의 회귀선은 코일 단면을 통과하면서 반대 방향으로 설치함.
- : 로그스키 코일의 창을 통과하는 자계에 의해 코일에 유기되는 기전력을 상쇄함.

다른 전류에 의한 외부 자계의 영향을 차단하기 위하여 로그스키 코일의 표면을 금속으로 둘러싸아 차폐를 할 경우, 구조적으로 로그스키 코일에는 코일과 차폐벽 간에 분포 커패시턴스가 존재하게 된다. 분포 커패시턴스와 코일의 자기인덕턴스와의 상호관계로 로그스키 코일은 전송선(Transmission Line)처럼 동작되므로, 고주파 전류 측정을 위해서는 로그스키 코일의 시지연이 고려되어 설계되어야 한다. [6]

그리고, 실제 로그스키 코일의 설계, 제작시 고려 사항으로는 측정 전류의 크기와 주파수 그리고 계측기의 측정허용전압 및 코일과 적분기의 절연내압을 고려하여야 한다. 그외로 운용성과 경제성이 고려되어야 한다.

본 연구에서는 측정하고자 하는 전류의 특성과 센서의 운용성을 고려하여 다음 <표 1>과 그림 3과 같이 로그스키 코일을 설계, 제작하였다.

<표 1> 제작된 로그스키 코일 규격

항목	내용	비고
코어(core)	공심	측정전류 - 주파수 : 1~10kHz - 최대값 : 200kA - 펄스폭 : 1msec
권선수	1000 회	
코일 창직경	200 mm	
코일 직경	φ7 mm	
상호인덕턴스	153nH	
코일의 최대 출력전압	192 V	

계산치

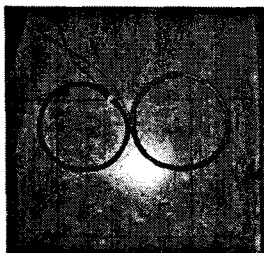


그림 3. 기준 센서와 제작 로그스키 코일

로그스키 코일의 출력전압과 전류와의 관계는 식(4)로 표현되며, 적분을 위해서는 R-C회로 또는 OP-Amp 적분기를 사용한다. R-C회로는 OP-Amp 적분기에 비해 구조가 간단하고 신뢰성이 높으나 이득이 작고 주파수에 따른 위상의 변화가 크기 때문에 정확도 측면에서 불리하다. 본 연구에서는 OP Amp. 적분기를 사용하였으며, 입력단의 오프셋(Off-set) 전압에 의해 출력전압이 포화되지 않도록 설계하였다. 또한, 측정전류의 주파수 1k~10kHz를 고려하여 이 영역에서 위상오차가 최소화 되도록 그림4와 같이 설계하였다. [4][7]

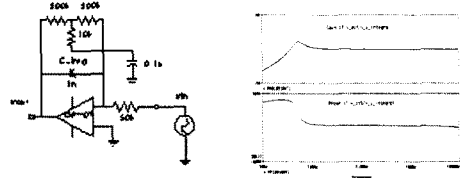


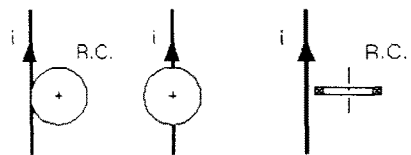
그림 4. 적분기 회로 및 오프셋에 대한 전달함수 특성

### 3. 로그스키 코일 센서의 특성평가 방법

제작된 로그스키 코일을 센서로 사용하기 위해서는 정확도와 관련된 측정오차에 대한 평가와 전류-코일 출력전압간의 비례상수가 필요하다. 일반적인 센서의 경우 기준신호에 대하여 센서의 출력을 비교하므로써 오차 및 비례상수를 확인할 수 있으나 로그스키 코일의 경우 대전류펄스의 발생 및 제어가 쉽지 않으므로 기준전류를 확보하기가 매우 힘들다. 또한, 코일을 시험할 때 시험장치 및 조건 등의 영향으로 인하여 코일의 설치 위치에 따라 수%이상의 오차가 발생될 수 있다. [3] 따라서, 본 연구에서는 제작된 로그스키 코일의 평가를 위하여 기존에 검증되어 판매되는 로그스키 코일을 기준센서로 이용하여 오차 및 비례상수를 상대 비교하여 평가하였다.

로그스키 코일의 제작상태에 따른 오차 발생 요인으로 코일의 단면적, 선도각 및 배치의 불균일과 보상코일의 효과 미비로 인하여 발생될 수 있다. 이러한 출력오차를 평가하기 위하여 다음의 3가지 시험을 그림 5와 같이 기준 센서와 비교시험하였다. 이상적인 경우 출력전압은 유기되지 않아야 한다.

- (i) 전류방향이 코일창의 축과 수직인 경우
  - 전류선과 코일변이 접한 경우
  - 전류선과 코일축이 일치되는 경우
- (ii) 전류방향이 코일창의 축과 평행인 경우



(a) 수직 방향(1)/(2) (b) 평행 방향

그림 5. 로그스키 코일의 제작에 의한 측정오차 평가

제작된 로그스키 코일과 기준 센서를 동시 시험하여 결과를 비교하므로써 제작된 로그스키 코일의 출력전압

비례상수를 결정하고 선형성을 평가하였다.

#### 4. 실험 및 결과 분석

제작된 로고스키 코일을 실험하기 위한 실험장치로 다 음 <표 2>와 같은 커패시터 뱅크를 이용하였다.

<표 2> 실험장치 규격

항 목	내 용	비 고
형태	커패시터 뱅크	R-L-C 직렬회로
최대충전전압	44kV	
커패시턴스	0.41mF	
인덕턴스	63μH	

기준 전류센서로는 상용화된 JJ System사의 Recoil 로고스키 코일을 이용하였으며, 로고스키 코일의 제작 상태에 따라 발생하는 출력전압오차를 평가하기 위하여 전류선에 21kA, 915Hz 전류펄스를 흘리면서 그림5에 제시된 시험을 수행하였다.

수직방향(2)와 평행방향으로 로고스키 코일을 설치할 경우, 기준센서와 제작된 코일의 유기전압은 그림 6과 같이 측정되었다. 제작된 코일에서는 약 10A에 상응하는 전압이 계측되었다.

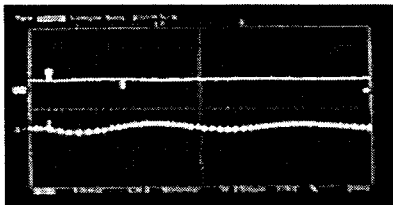


그림 6. 코일을 전류방향과 평행방향으로 설치한 경우 출력전압(상:기준 센서, 하:제작 센서)

그러나, 수직방향(1)의 경우는 그림 7과 같이 기준센서에서는 48A, 제작된 로고스키 코일에서는 740A에 상응하는 전압이 발생되었다. 제작된 센서에서는 전류 시작 시점에서 과도현상이 나타나고 있다.

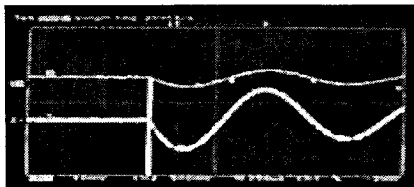


그림 7. 코일을 전류선과 접하여 수직방향으로 설치한 경우 출력전압(상:기준 센서, 하:제작 센서)

발생 가능한 측정오차를 평가하기 위한 실험결과를 볼 때, 본 연구에서 제작된 로고스키 코일의 단면적과 코일의 배치는 균일하게 제작되었으나, 로고스키 코일의 창을 통과하는 자장에 의한 유기전압은 적절하게 상쇄되지 못했다.

제작된 로고스키 코일의 종합적인 설계 타당성을 확인하기 위하여 2kA, 6.3kA, 14.8kA, 21kA의 첨두치를 갖는 전류펄스를 기준센서와 함께 비교 측정하였다. 실험 결과, 제작된 로고스키 코일은 0.629V/kA의 특성을 선형적으로 갖고 있음을 확인할 수 있었으며, 또한 2개의 센서로부터 측정된 전류파형은 주파수가 915Hz로 일치함을 확인하였다. 확인된 실험결과로부터 로고스키 코일의 설계 타당성을 확인할 수 있었다. 그림 8은 9kV로 충전된 커패시터 뱅크의 방전시 발생하는 전류펄스의 측정결과이다.

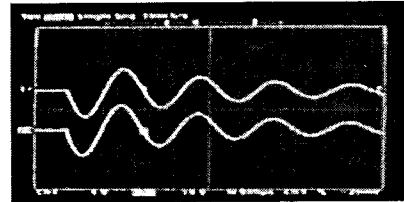


그림 8. 기준 센서와 제작된 로고스키 코일에서 측정된 전류파형 (상:기준 센서, 하:제작 센서)

#### 5. 결론

본 연구에서는 로고스키 코일의 설계 절차 및 고려사항, 제작에 따른 오차의 최소화 방안, 그리고 오차 평가 기법을 기술하였다. 로고스키 코일의 출력전압 적분에 사용될 수 있는 OP-Amp. 적분기를 제시하였다.

제작된 로고스키 코일의 측정오차를 평가하였으며, 400kJ 커패시터 뱅크에서 발생하는 주파수 915Hz, 첨두치 ~21kA, 펄스폭 1msec의 전류펄스를 기준센서와 동시에 측정하여 설계 타당성을 확인하였다.

향후, 로고스키 코일의 창단면을 통과하는 자장에 의해 유기되는 출력전압을 최소화 하기 위한 추가적인 연구가 필요로 된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 原田達, "核融合分野における高電壓, 大電流の測定", 電力技術研究所, 昭和58年4月27日
- [2] S.T. and Qi Zhang, "High Power Pulse Technology", World Scientific, 1995
- [3] John D. Rambox, "Machinable Rogowski Coil, Design, and Calibration", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. 45, No. 2, April, 1996, pp511-515
- [4] W.F. Ray and R.M. Davis, "Developments in Rogowski Current Transducers", EPE'97, pp3.308-3.312
- [5] JJ System Ltd.의 Rogowski Coil 팜플렛
- [6] Kin-Lu Wong and Tsair-Rong Chen, "Studies of a Slow-Wave Rogowski Coil", IEEE Trans. on Plasma Science, Vol. 18, No. 2, April 1990, pp219-222
- [7] 한영신, 김경호, "리니어 IC의 응용과 실제", 전자기술사, pp132-138