

실험 계획법을 이용한 진공 차단기의 동특성 최적화

조준연^{*†} · 안길영^{*} · 김성태^{*} · 양홍익^{*} · 김규정^{*}

* LS 산전 전력연구소 저고압기기연구팀

Dynamic Responses Optimization of Vacuum Circuit Breaker Using Taguchi Method

Jun yeon Jo^{*†}, Kil Young Ahn^{*}, Sung Tae Kim^{*}, Hong ik Yang^{*} and Kyu Jung Kim^{*}

* Research Engineer, LMV Device Research Team, Electric Equipment R&D Center, LSIS CO., Ltd.

(Received February 16, 2015 ; Revised March 31 2015 ; Accepted April 10, 2015)

Key Words: VCB(진공 차단기), Multibody Dynamics(다물체 동역학), Taguchi Method(다구찌 기법)

초록: 본 연구에서는 진공 차단기(Vacuum circuit breaker)의 동적 특성을 모사하기 위해 리커다인을 이용한 다물체 동역학 해석 모델이 개발 되었다. 진공 차단기는 VI(Vacuum interrupter)를 포함한 3 개의 주회로 부와, 구동 메커니즘을 포함한 기구부로 구성된다. 이 해석적 모델의 검증에 위해, 해석 결과와 실측을 통한 실험적 결과를 비교 하였다. 일반적으로, 원활한 사고 전류 차단에 위해서는 0.9~1.1m/s 의 차단 속도(Opening velocity)가 필요하다. 차단 속도의 향상을 위해, 다구찌 기법을 이용하여 진공 차단기의 설계 변수 최적화를 수행하였다. 또한 향상된 차단기의 동적 특성을 검증하기 위해, 해석 결과와 개선된 샘플의 실험적 결과를 비교 분석 하였다.

Abstract: In this study, the VCB(Vacuum Circuit Breaker) has been developed using the Recurdyn that is widely used on multibody dynamics analysis. The VCB consists of three main circuits with the VI(Vacuum Interrupter) and the main frame with the operating mechanism. This analytic model is validated by comparing the simulation results and the experimental results. Generally, in order to reliably cut off the breaking current, the opening speed of the VCB after contact separation has to be a 0.9~1.1m/s. Therefore, the study of the design parameters of the VCB is needed. To improve the opening velocity, Taguchi design method is applied to optimize the design parameters of a VCB with a lot of linkages. In addition, to evaluate the improvement of the operating characteristics, the simulation results are compared with the Recurdyn and experimental results with improved prototype sample.

1. 서 론

전력 시스템은 전력을 구성하는 발전, 송전, 변전, 배전 시스템으로 구성된다. 고전압과 고전류가 흐르는 송배전 계통에서 과전류, 단락 등에 의한 사고 발생시에 그 과급효과를 최소화하기 위하여 차단기인 고압 회로 차단기(power circuit breaker)를 사용한다. 현재 사용되는 고압 회로차단기는 여러 형태로 발전되어 왔으며 회로 접점의 개폐시에 발생하는 아크(arc)의 소호 매질에 의해 공기, 자기, SF6 가스, 진공 차단기 등으로 분류되고 있다. 진공 차단기는 이러한 기능을 가진 차단기의 일종으로 차단 매질로 진공을 이용한다.

이러한 진공차단기의 구동메커니즘은 소형 차단기의 개폐 스위치와도 같은 역할을 하는 기구로서 스프링에 미리 충전된 탄성에너지를 링크를 이용한 기구부에서 운동에너지로 변환시켜 접점을 개폐하는 운동을 생성한다.⁽¹⁻⁴⁾

† Corresponding Author, jyjo@lsis.biz



Fig. 1 Vacuum circuit breaker used in high distribution voltage

Fig. 1의 진공차단기는 조인트들과 링크들로 구성된 기구학적 체인, 동작시 발생하는 부품들 사이의 충격, 회전 조인트에서의 마찰 등과 같은 많은 동적 현상이 존재한다. 이러한 현상은 구동메커니즘의 동특성을 묘사하는 동적 모델의 수립 및 검증을 어렵게 만들고 있다. 과거에는 이에 대한 체계적 해석과 설계방법 보다는 간단한 이론과 함께 설계자의 경험 및 시행 착오(trial and error)에 의해 보다 많이 설계되어 왔다. 그러나 컴퓨터의 이용과 발전에 따라 진공 차단기의 구동 메커니즘과 같이 여러 개의 물체로 이루어진 시스템에 대한 다물체 동역학의 연구와 병행하여 여러 상용 프로그램들이 개발되었다. 대표적인 상용 프로그램으로는 DADS, ADAMS 등이 있으며, 최근에는 Recurdyn을 이용한 다물체 동역학 해석 사례를 많이 볼 수 있다.

본 연구에서는 이러한 상용 프로그램을 이용하여, 실제 진공 차단기의 동특성을 묘사(simulation)할 수 있는 다물체 동역학 모델(multibody dynamic model)을 구성하였다. 또한, 진공 차단기의 동특성에 영향을 미치는 인자와 수준을 선정하고, 다구찌 기법(Taguchi Method)을 이용하여 진공 차단기의 동특성 개선을 위한 최적 조합을 찾고자 한다.

2. 진공 차단기의 구조 및 동작

진공 차단기는 통전부에 해당하는 주회로(main Circuit)와 주회로 내부 접점을 동작시키는 메커니즘(mechanism)으로 구성된다.

차단기의 스프링 구동방식의 메커니즘은 스프링에 미리 충전된 탄성에너지를 이용하여 링크 구조의 기구부에 전달함으로써, 주회로의 접점을 개폐하는 운동을 생성한다.

Fig. 2는 진공 차단기의 주요 부속품을 나타낸다. 차단기의 주회로부는 접점으로 이루어진 VI와 전로(current path)를 생성하기 위한 terminal, 절연물로 이루어진 push rod, 접점의 투입/차단 동작에도 전로를 유지할 수 있는 flexible shunt 등으로 구성되어 있다. VI 내부의 접점은 차단상태에서 절연을 유지하기 위해 일정 거리(stroke)가 요구된다.

Fig. 3은 차단기의 투입 상태를 나타낸다. 차단기의 메커니즘은 압축된 스프링력에 의해 main shaft를

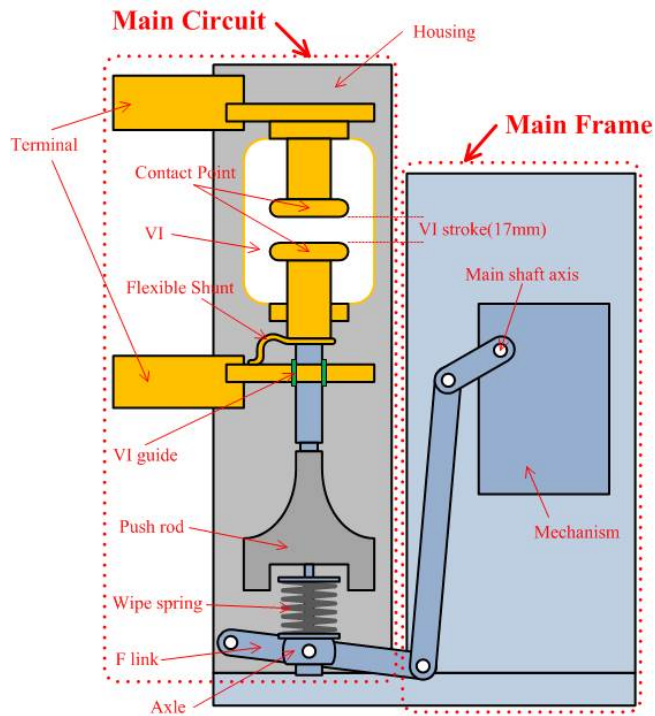


Fig. 2 Construction and components of the VCB in open state

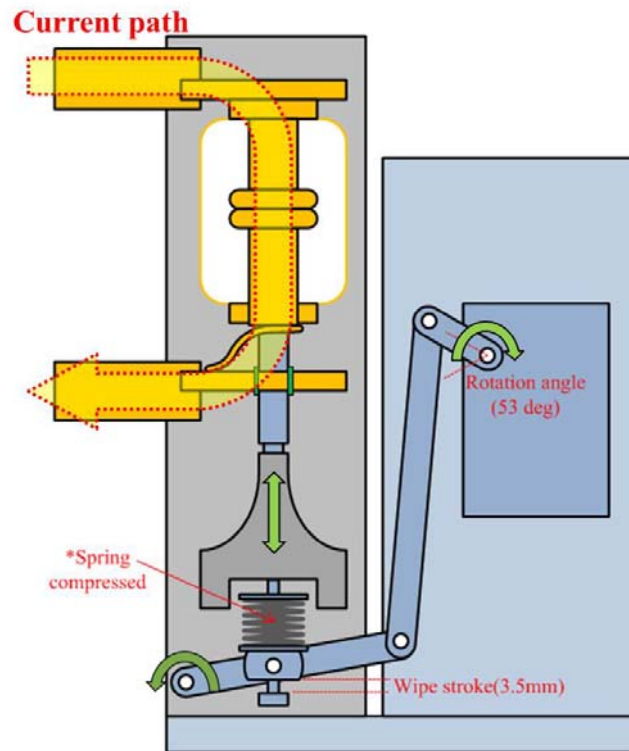


Fig. 3 Closing state of the VCB

약 53 도 가량 회전 시키며, 이 회전운동은 링크 구조의 기구부에 의해 주회로 접점의 상하 병진운동으로 변환된다. 주회로의 상하 운동으로 인해 VI의 접점이 붙게 되면 terminal과 VI를 통해 전류가 흐르

는 전로가 생성된다. 여기서 VI stroke 가 클수록 F link 의 회전량이 많아지며, 이는 주회로 접점의 상하 병진운동을 저해하는 요소로 작용할 수 있다. 따라서, F link 의 레버비, VI stroke 등은 차단기의 설계에 매우 중요하다.^(5,6)

특히, 차단기 접점 개극 후 VI stroke 의 20% 까지의 초기 차단 속도는 차단기의 성능에 중요한 영향을 미치므로, 이에 대한 측정이 필요하다. 실 제품에서는 직접 VI 의 차단 속도를 측정하기 어려운 관계로 main shaft 의 회전속도를 접점의 차단 속도로 환산하여 다음과 같이 대략적으로 추정한다.

$$\begin{aligned} \text{초기 개리 속도(m/s)} &= \text{VI stroke의 20\%} / \text{time} \\ &= 17\text{mm} \times 0.2 / \text{time} \end{aligned}$$

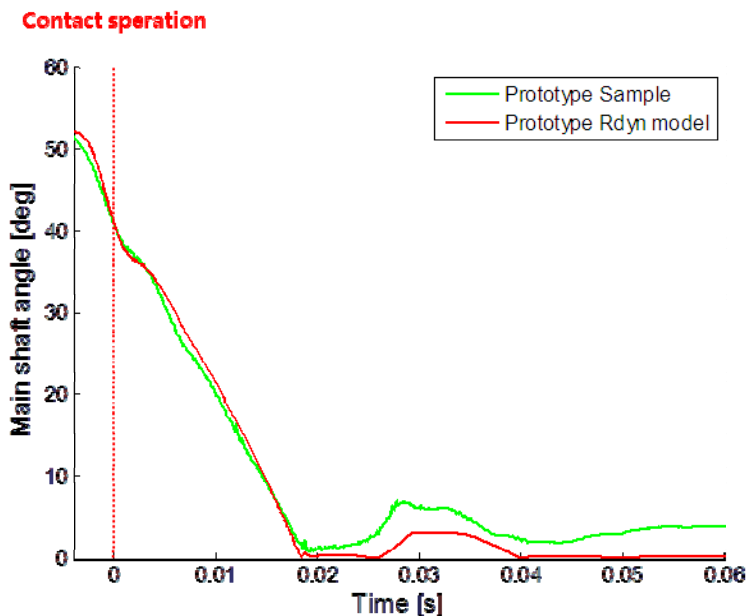
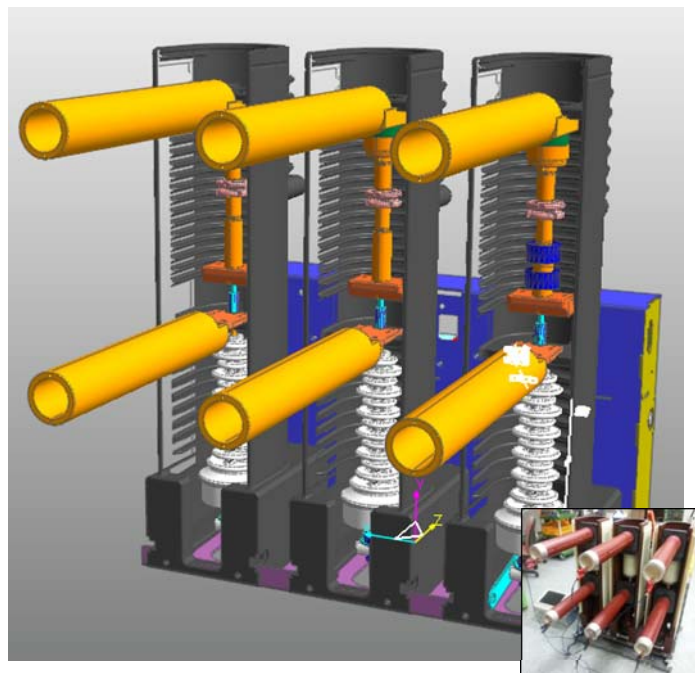


Fig. 4 Analytical model(Recurdyn) and results of simulation and experiment with prototype sample

Table 1 Comparison results of simulation and experiment

	Open velocity (m/s)	ratio
Prototype Sample	0.78	1
Prototype Recurdyn model	0.72	-

여기서 시간은 점점 개극 후 main shaft angle 이 20%에 도달하는 시간을 나타내며, 차단기의 main shaft 의 특성이 거의 선형으로 나타나므로, 평균속도를 계측한다.

3. 진공 차단기의 동역학 모델

진공 차단기는 압축된 스프링력에 의해 발생하는 Contact force 로 동작되는 부분이 많이 존재하므로, 실제 실험결과가 없으면 가상 모델의 동적 특성에 대한 정당성을 검증하기 어렵다. 따라서, 기존에 제작된 시작품에 대해 실험을 통해 main shaft stroke 특성을 구하고, 이 결과를 이용하여 Recurdyn 해석 모델을 개발하였다. Fig. 4 는 리커다인을 통해 개발된 해석 모델과, 초기 시작품의 실험 결과를 나타낸다. 이 결과에서 Recurdyn 해석 모델과 시작품의 main shaft stroke 곡선 결과가 유사하므로 개발된 해석 모델의 정당성을 검증할 수 있다.

Table 1 은 리커다인 해석 모델과, 초기 시작품의 실험적 결과를 나타낸다. 위 결과로부터, 시작품의 점점 개극 속도가 약 0.78m/s 로 나타나며, 원활한 사고 전류 차단을 위해 점점 개극 속도의 개선이 반드시 필요하다.

4. 다구찌 방법을 이용한 최적 설계

안정적인 차단을 위해 점점은 개극 후 20% 지점에서 약 0.9~1.1m/s 의 차단 속도를 요구한다. 현재 제작된 시작품(Prototype)의 경우 차단 속도가 약 0.78m/s 로써 안정적인 차단을 어렵게 만드는 요인으로 작용한다. 따라서 개발된 해석 모델에 다구찌 기법을 적용하여 성능을 개선하고자 한다.

다구찌 기법은 실험계획법에서 널리 활용되고 있는 방법 중 하나이며, 이는 기존의 실험계획법에 비해 제어가 불가능한 조건들이 실험결과에 미치는 영향의 정도를 평가 특성치화 하여, 산포에 유의하게 영향을 미치는 조건들의 조합을 찾아내는 일종의 강건 설계 방안이다.

본 연구에서는 최적화를 위해 진공 차단기의 설계변수들을 각각 Table 2 와 같이 선정하였으며, 인자들의 최적 조합을 구하고자 한다.

Table 2 Level of design parameter

NO	Design parameter	1-level	2-level	3-level
A	Wipe spring Free length	71mm	73mm	
B	Sub open spring Free length	96mm	95mm	94mm
C	Lever ratio	2.97:1	3.07:1	3.17:1
D	Moving part mass	12.5kg	11.5kg	10.5kg
E	Main shaft friction coefficient	0.1	0.05	0.01
F	VI guide length	16mm	33mm	45mm
G	Axle hole gap	0.25mm	0.35mm	0.45mm
H	VI guide hole gap	0.1mm	0.15mm	0.2mm

Table 3 은 다구찌 직교배열표에 따른 Recurdyn 모델의 해석 결과를 나타낸다. 해석 결과는 차단기의 접점 개극 후 20% 지점에 도달하는 시간으로써, 낮을수록 차단기의 평균 속도가 향상 되므로 계량특성치 중 망소특성으로 S/N 비를 계산하였고 각 수준별 평균을 통해 인자의 최적 수준을 구하였다.

$$SN = -10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k^2 \right)$$

Table 3 Results of analysis according to orthogonal array (21x37)

No	Design Value								Result*
	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	4.336
2	1	1	2	2	2	2	2	2	3.712
3	1	1	3	3	3	3	3	3	3.056
4	1	2	1	1	2	2	3	3	3.904
5	1	2	2	2	3	3	1	1	3.584
6	1	2	3	3	1	1	2	2	3.680
7	1	3	1	2	1	3	2	3	4.232
8	1	3	2	3	2	1	3	1	3.472
9	1	3	3	1	3	2	1	2	3.840
10	2	1	1	3	3	2	2	1	3.488
11	2	1	2	1	1	3	3	2	3.696
12	2	1	3	2	2	1	1	3	3.552
13	2	2	1	2	3	1	3	2	3.696
14	2	2	2	3	1	2	1	3	3.336
15	2	2	3	1	2	3	2	1	3.696
16	2	3	1	3	2	3	1	2	3.680
17	2	3	2	1	3	1	2	3	3.488
18	2	3	3	2	1	2	3	1	3.648

* 20% stroke time after contact separation

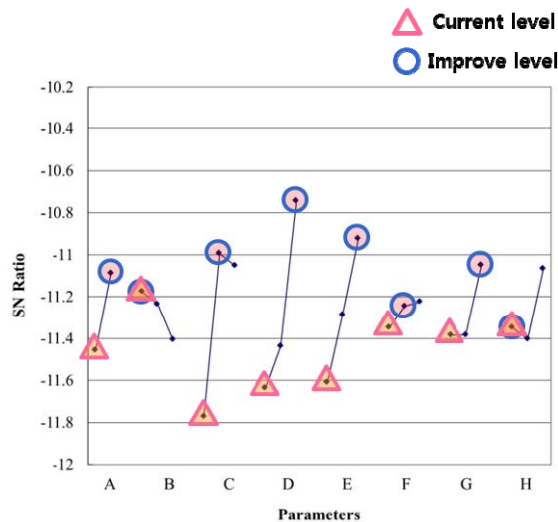


Fig. 5 Diagram of factor effects about S/N ratio (Smaller is better)

여기서 y 는 해석 결과값, n 은 해석 횟수를 나타낸다. Fig. 5 는 실험결과에 따른 설계인자의 S/N 비를 나타낸다. 개극 후 20% 지점 도달 시간에 대한 S/N 비는 D, C, E, A, H, G, B, F 순으로 그 기여도가 높게 나타난다. 최적 조합으로써는 A 의 2 수준, B 의 1 수준, C 의 2 수준, D~F 의 3 수준이며 해당 인자들을 해석 모델에 적용하였다. 몇몇 인자들은 양산성등을 고려하여 최적 수준으로 선택하지 못하였다.

Fig. 6 은 다구찌 기법에 기반하여 개선된 시작품을 나타낸다. 개선된 시작품의 실험적 결과와 리커다인 해석 모델의 결과를 table 4 에 나타내었다.

다구찌 기법의 분석 결과를 통해, 개선된 시작품을 제작하였으며 이를 해석 모델과 비교하였다. Table 3 은 초기 시작품과 개선된 시작품의 해석 및 실험 결과를 나타낸다. 개선된 시작품의 경우, 해석 모델과 실제 실험 결과가 유사하였으며, 초기 시작품 대비 점점 개극 속도가 약 22% 향상되었다.

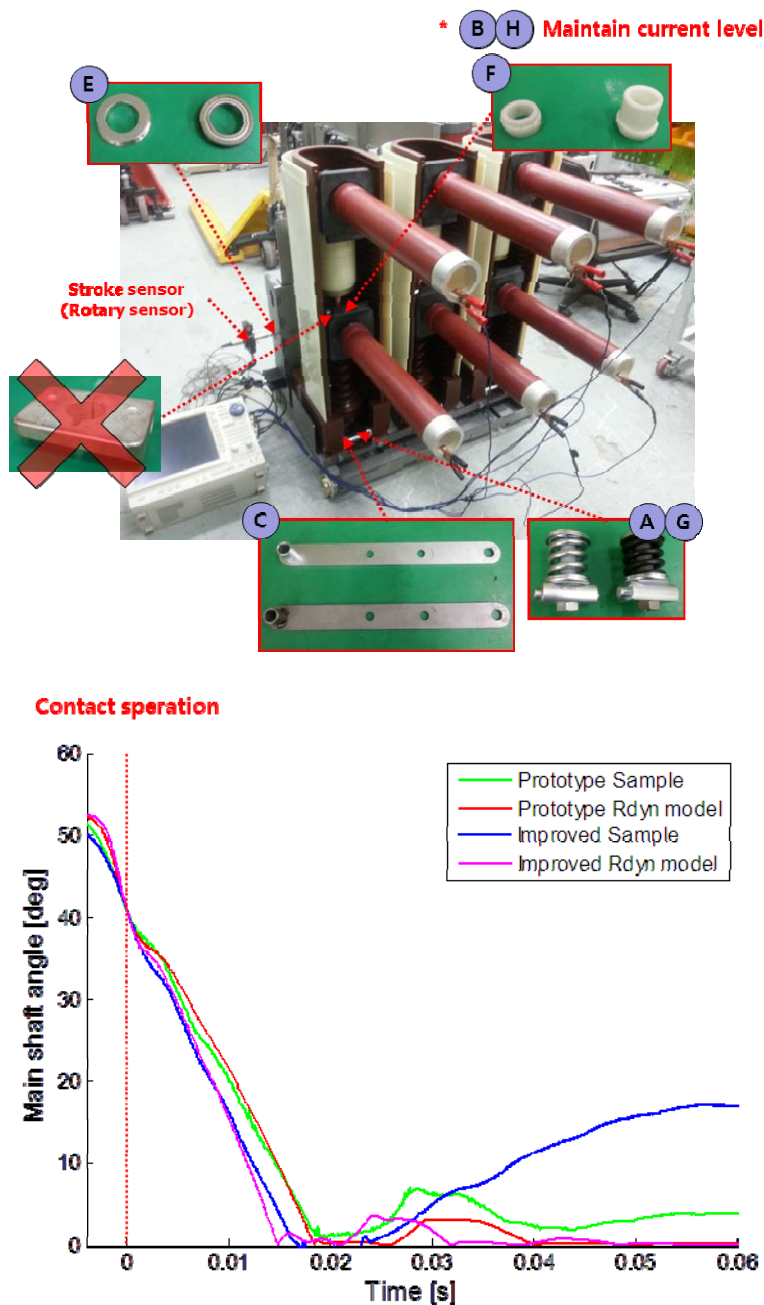


Fig. 6 Improved sample and results of simulation and experiment with improved sample

Table 3 Comparison results of current and improved model

	Open velocity (m/s)	ratio
Prototype Sample	0.78	1
Prototype Recurdyn model	0.72	-
Improved Sample	0.96	1.22
Improved Recurdyn model	0.98	-

5. 결 론

본 논문에서는 진공 차단기의 동특성 분석을 위해, Recurdyn 을 이용한 다물체 동역학 해석 모델을 개발하였다. 그리고 해석 결과와 실험의 비교를 통하여, 그 동적 모델의 타당성을 검증 하였다. 이러한 해석 모델을 기반으로 진공 차단기의 동특성 개선을 위해 다구찌 기법을 적용하여 개선된 시작품을 제작 할 수 있었으며, 기존 시작품 대비 차단 속도를 약 22% 개선할 수 있었다.

참고문헌 (References)

- (1) Willis, H. L., 1997, *Power Distribution Planning Reference Book*, Marcel Dekker, Inc.
- (2) Flurschein, C. H., 1975, *Power Circuit Breaker Theory and Design*, Short Run Press Ltd.
- (3) Greenwood, A., 1994, *Vacuum Switchgear*, Short Run Press Ltd.
- (4) Van Sickle, R. C. and Goodman, T. P., 1953, "Spring Actuated Linkage Analysis to Increase Speed," *Product Engineering*, Vol. 24, pp. 152~157..
- (5) Yang, H. I., Ahn, K.Y., Kim, I. K. and Park, W. J., 2010, "Design of Vacuum Circuit Breaker Using Dynamic Analysis," *Conference of KSPE*, pp. 891~892.
- (6) Yang, H.I., Ahn, K.Y., Yang, S. P., Park, W. J., 2012, "Dynamic Analysis and Design of a Vacuum Circuit Breaker," *Conference of KSME*, pp. 289~290.