

과도서지를 이용한 가속열화 시험법에 따른 견인전동기 고정자 코일의 전기적 특성 변화

Properties of Electrical Performance on Stator Coil of Traction Motor by Accelerated Test using Transient Surge

박현준*, 장동욱*, 이길현*, 최종선**, 김정수**

(Hyun-June Park*, Dong-Uk Jang*, Gil-Hun Lee*, Jong-Sun Choi**, and Jung-Soo Kim**)

Abstract

The winding problems of traction motor are the major determinant of motor's life. The root cause of winding failure is gradual deterioration of the insulation due to thermal, electrical, mechanical and environmental stresses. The aging of the insulation reduces the electrical and mechanical strength of the insulation. At same point, a voltage surge or mechanical shock from a traction motor start will fracture or break down the insulation. To achieve the expected life usually requires extensive laboratory evaluation of the insulation systems and the use of accelerated aging tests. There are several nondestructive test available for checking, the condition of motor insulation, the probable extent of aging, and the rate of which aging is taking place. So the insulation characteristics of stator coil were each analyzed by measurement of dielectric loss($\tan\delta$), capacitance and partial discharge. The method of diagnosis is able to analyze the insulation condition and evaluate the life of the traction motor.

Key Words : Accelerated aging, Insulation diagnosis, Stator coil

1. 서론

현재 전기철도에 사용되고 있는 견인전동기는 일반적으로 지하철 환경의 높은 습도, 고온 및 기계적 충격 등 열악한 환경 하에서 운행이 되고 있다. 이러한 환경에서는 부분방전 개시전압이 낮게 나타나고, VVVF(variable voltage variable frequency) 인버터 구동에 의한 전압과도현상 또한 부분방전

을 일으킬 수가 있다[1,2]. 그리고 최근에는 IGBT (insulated gate bipolar transistor)와 같은 고속 스위칭 소자의 사용에 따라서 더 큰 스위칭 서지전압이 발생하고 있다. 견인전동기는 사용 년수의 증가에 따라서 코일의 열화가 진전이 되어 절연이 악화되고 결국에는 절연이 파괴되어 사고에 이르게 된다[3-5]. 현재 G.C. Stone 등에 의해서 인버터 구동에 의한 유도전동기 고정자 코일에서 발생하는 부분방전을 실시간으로 current transformer(CT) 및 결합커패시터를 이용하여 측정하는 연구가 진행되고 있으며[6], Kaufhold 등은 저압 유도전동기에 있어서 절연파괴 메카니즘에 영향을 주는 요인으로 턴간 절연의 부분방전과 온도에 의한 것이라는 연구결과를 발표하였다[7].

* : 한국철도기술연구원 전기신호연구본부
(경기도 의왕시 월암동 360-1,
Fax: 031-460-5459

Corresponding Author : hjpark@krri.re.kr

** : 홍익대학교 전기정보 제어공학과
2003년 3월 17일 접수, 2003년 4월 8일 1차 심사완료,
2003년 4월 29일 최종 심사완료

본 논문에서는 고정자 코일의 절연진단을 실시하기 위해서 열열화를 실시한 후 코일의 턴간에 모의 인버터 서지전압을 인가하여 전기적 가속열화를 실시하였다. 전기적 가속열화에 의한 절연진단 시험으로 정전용량, 유전손실, 부분방전을 측정하였으며, 부분방전은 전기적 가속열화에 의해서 변화하는 부분방전 통계량을 통하여 열화전후의 변화를 검토하였다[8-14].

2. 본 론

2.1 시편제작

본 연구에 사용된 복합가속열화용 고정자 형코일 샘플의 형상은 내부의 턴간 절연을 평가하기 위해서 그림 1과 같은 형상으로 제작하였으며, 실제 견인전동기 제작시의 요소를 모두 반영하고 있다.

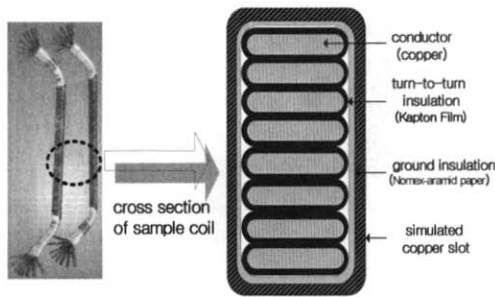


그림 1. 시편형상.

Fig. 1. Shape of specimen.

제작방법 및 절연구성은 표 1과 같으며, 폴리이미드(Kapton) 및 실리콘 수지를 주체로 한 C종(200℃급) 절연구성과 진공함침(VPI)처리를 통하여 높은 열 안정성, 진동 및 오염조건에서의 내력을 강화하여 인버터 구동에 대한 신뢰성을 확보한 절연구성을 가지고 있다.

2.2 실험방법

견인전동기 고정자 코일에 직접 인버터 전압을 인가하기 위해 모의 VVVF 인버터 서지전압 발생장치를 그림 2와 같이 구성하였다. 이 모의 장치는 가변전압조정기를 이용하여 입력전압을 조절할 수 있으며, 다이오드 삼상 정류기를 통하여 DC전압을 출력하고, 이 출력이 IGBT 스위칭 소자를 이용한

단상 인버터 입력으로 사용된다. 인버터에서 출력된 구형파는 고주파 변압기에서 승압되며, 변압기의 승압비는 1:30으로 최대 3000 V 까지 전압인가 실험이 가능하다.

표 1. 견인전동기용 고정자 형코일의 C종(200℃) 절연구성.

Table 1. Structure of stator coil(C class) on traction motor.

품 명	사양 및 규격	
200 class 절연자재	소선절연물	Kapton코팅처리
	대지절연물	Kapton Film Nomex-aramid paper
	주절연물	Silicone resin
	슬롯왁지	Epoxy-glass tape 적층판
	모의철심용 동판	두께: 1.5 mm
절연처리, 형코일 샘플제작	턴절연 시험용 인출선 처리	소선별 인출선 절연보강 처리
	모의철심을 가진 샘플코일 제작	동판 슬롯 구조의 모의철심 및 형코일 샘플제작
VPI 함침처리	Silicone Resin 진공함침	함침 60℃-3hr 건조 200℃-16hr

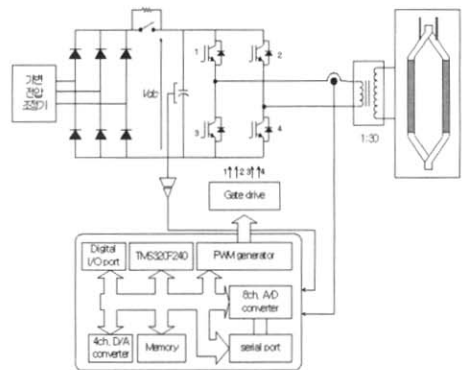


그림 2. 모의 VVVF 인버터 서지전압 발생장치.

Fig. 2. Schematic diagram of simulated VVVF inverter surge voltage generator.

그림 3은 dc link 전압 $V_{dc}=1,500\text{ V}$ 를 인가하여 PWM 인버터로 구동되는 견인전동기 단자에서 측정된 선간전압 파형으로서, 피크전압 $V_m=2,700\text{ V}$ 이고 상승시간 $t_r=0.7\mu\text{s}$ 정도의 전형적인 IGBT 구동시의 과도전압 특성을 나타내고 있다. 전기적 가속 열화시 인가한 전압은 선간 피크전압을 상 피크전압으로 계산하면 $V_{pm}=1,800\text{ V}$ 가 되므로, 인가전압을 $1,800\text{ V}$ 로 설정하였다[4]. 모의 인버터 서지전압 발생장치에서 발생하는 서지전압 파형을 그림 4에 나타내었다.

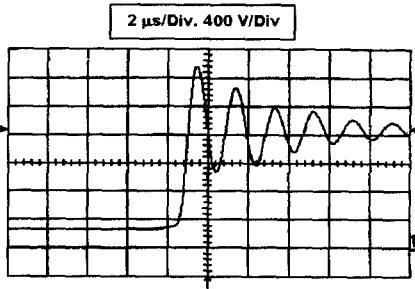


그림 3. PWM 구동 견인전동기의 단자간 과전압 ($V_{dc}=1,500\text{ V}$).

Fig. 3. Waveform of line to line voltage fed by PWM inverter ($V_{dc}=1,500\text{ V}$).

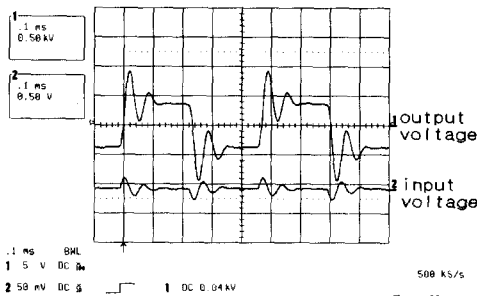


그림 4. 모의 VVVF 인버터 서지 전압 파형.

Fig. 4. Waveform of simulated VVVF inverter surge voltage.

따라서 가속열화시험시 인가한 모의 인버터 서지 전압은 주파수 2 kHz , 전압 $1,800\text{ V}$ 를 20시간을 1주기로 설정하여 총 5주기(100시간)동안 고정자 코일에 인가하였다. 고정자 코일의 결함에 의한 평가를 실시 할 수 있는 정전용량과 유전손실은 Tettex사 Capacitance & Dielectric loss 측정장치

(Type 2809)를 사용하여 각 주기마다 60 Hz의 정현파 전압을 250 V 에서 $2,000\text{ V}$ 까지 250 Hz 씩 증가시켜 측정하였다. 그림 5에 정전용량과 유전손실의 측정을 위한 장치 구성도를 나타내었다.

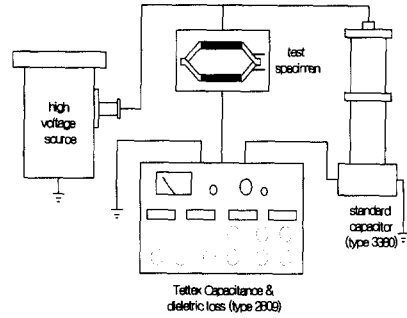


그림 5. 정전용량 및 유전손실 측정설비 구성도.
Fig. 5. Schematic of capacitance and $\tan\delta$ measurement system.

유전특성 측정 후 절연물중의 보이드 또는 절연물 표면에서 발생하여 절연물 열화에 영향을 주는 부분방전 측정실험을 위해 Robinson사의 PD detector(model 803.1) 및 분석시스템(CDA-3)을 이용하여 부분방전 개시전압과 소멸전압, 방전전하량 크기를 분석하였다. 그리고 실험 전 모든 고정자 코일에는 습기에 의해 나타날 수 있는 유전손실 증가와 절연내력의 저하에 의한 절연특성의 측정 오차 범위를 줄이기 위해 미리 오븐에서 습기제거를 위한 건조 작업이 수행되었다.

2.3 실험결과

2.3.1 정전용량 및 유전손실

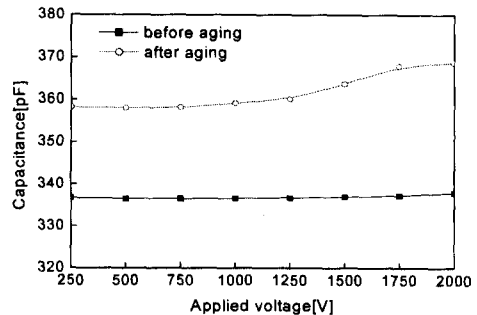


그림 6. 열화 전·후의 정전용량 변화.

Fig. 6. Change of capacitance.

그림 6, 7은 각각 열화전과 후의 전압에 따른 정전용량과 $\tan\delta$ 변화를 나타내고 있으며, 값은 코일 하나에 3개의 턴간을 측정하여 평균하였다. 정전용량은 전압증가에 따라서 비례적으로 증가를 하고 있다. 정전용량측정결과와 정전용량이 변화를 한 것은 전기적 스트레스로 인하여 결함이 생겨 변화한 것으로 판단된다.

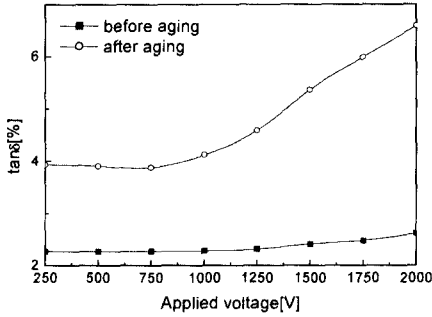


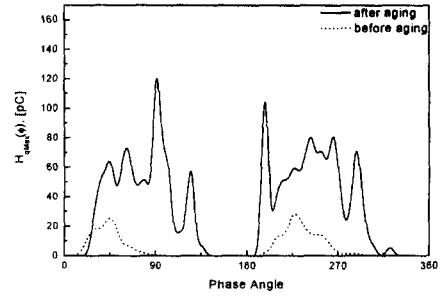
그림 7. 열화 전 · 후의 $\tan\delta$ 변화.
Fig. 7. Change of dielectric loss.

$\tan\delta$ 는 열화전에는 약 1,000 V에서 증가하기 시작하였고, 열화후에는 약 800 V에서 증가하기 시작하였으며, 증가율도 열화후가 더 심하게 나타나고 있다. 이것은 열열화에 의해서 턴간 절연으로 사용되고 있는 Kapton에 결함이 생기고 내부에 많은 미소 보이드가 발생을 했기 때문으로 추정된다. 이러한 결함은 전계가 집중이 되고 상대적으로 절연 내력이 낮은 결함부분에서 부분방전이 발생하게 되어, 부분방전에 의한 점진적인 열화에 의하여 절연특성이 상당히 악화되면 결국 절연파괴에 도달할 수도 있다.

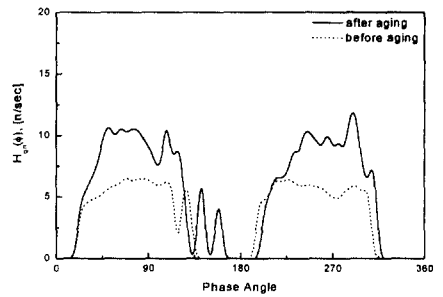
2.3.2 부분방전특성

그림 8(a)~(d)는 열화 전 · 후의 부분방전의 통계적 분포를 나타내고 있다. 그림에서도 알 수 있듯이 열화후에 방전량이나, 발생율이 더 많게 나타나고 있으며. 그림 8(a)는 최대방전 전하량의 분포 패턴을 나타낸 것으로 열화전에는 방전발생 위상 각이 양의 주기에서는 $12\sim 85^\circ$, 음의 주기에서는 $200\sim 270^\circ$ 에서 나타났으며, 열화후에는 $20\sim 140^\circ$, $190\sim 330^\circ$ 에서 나타났었다. 최대방전 크기도 열화전에는 30 pC이었으며, 열화후에는 150 pC으로 더 큰 값을 나타내었다.

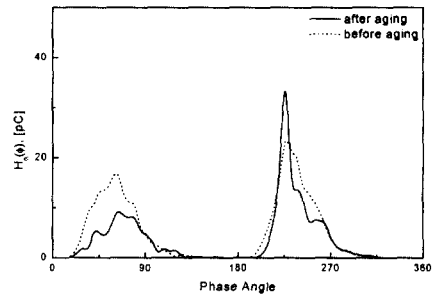
그림 8(d)를 보면 열화전에는 작은 크기의 부분방전이 많이 발생을 하다가, 열화후에는 부분방전



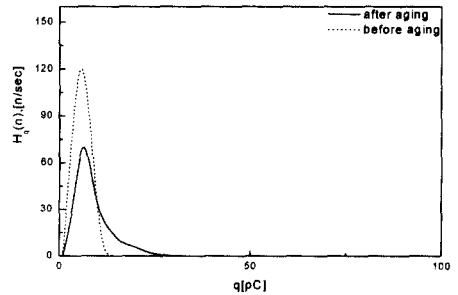
(a) $H_{qMax}(\phi)$ distribution



(b) $H_{qn}(\phi)$ distribution



(c) $H_n(\phi)$ distribution



(d) $H_q(\phi)$ distribution

그림 8. 부분방전 통계적 분포(인가전압 1.5 kV).

Fig. 8. Statistical distribution of partial discharge (applied voltage 1.5 kV).

크기가 큰 것이 더 많이 발생을 하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 것은 전기적 가속열화에 의해서 내부의 미소 보이드 크기가 커지거나 더 많이 생긴 것으로 앞의 유전손실 측정과 부합하는 결과이다. 그림 9는 인가전압 1.5 kV에서 3차원 분포(Φ -q-n)를 나타내며, 넓은 위상각의 범위에서 부분방전이 분포하고 있는 것을 볼 수가 있다.

부분방전의 패턴분류에는 부분방전의 3차원 패턴인 Φ -q-n 분포의 데이터 자체를 사용하는 방법과, Φ -q-n 분포로부터 펄스의 발생 위상각에 따른 펄스의 평균 크기 분포 $H_{qn}(\Phi)$, 위상각에 따른 펄스의 최대 크기 분포 $H_{qmax}(\Phi)$, 위상각에 따른 펄스의 발생 빈도수 분포 $H_n(\Phi)$, 펄스의 크기-발생 빈도수 $H_q(n)$ 와 같은 분포를 이용하여 여러 가지 통계적 파라미터들의 열화전과 후를 비교하였다.

사용한 통계적 파라미터는 분포의 왜도(skewness, S+, S-), 첨예도(kurtosis, K+, K-), 평균 위상각(AP+, AP-)과 분포의 비대칭도(asymmetry), 상관계수(cross-correlation factor) 등이 있다. 아래 표 2는 부분방전분포에 대한 통계량들을 나타내었으며, 통계량은 식(1)~(6)을 이용하여 계산을 하였고[15], 이들은 $H_{qn}(\Phi)$ 분포로부터 분포 특성량을 도출하기 위한 식으로써 다른 분포들도 이들 식과 크게 다르지 않다. 앞에서 나타낸 그림에서와 같이 평균방전 전하량이나 평균발생빈도수가 모두 열화전에 비하여 열화후에 증가한 것을 확인할 수 있다. 다른 통계량 첨예도, 왜도, 비대칭도, 상관계수에서도 열화전과 열화후에 차이가 나고 있으므로 이 통계량을 이용하면 고정자 코일에 대한 열화를 판별할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서 제시한 견인전동기 고정자 코일의 절연진단 시험결과를 향후 견인전동기의 절연진단에 운전관리 및 유지보수 판정기준 수립을 위한 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

$$\bar{\phi} = \sum_{j=1}^n \phi_j \cdot q_j / \sum_{j=1}^n q_j \quad (1)$$

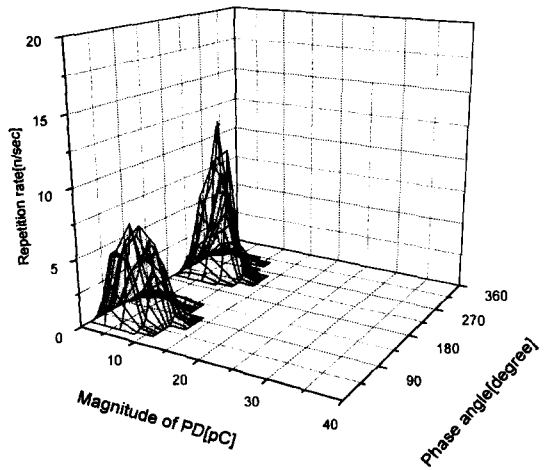
$$q_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^n q_{ji} \quad (2)$$

$$S_{\phi} = \sum_{j=1}^n (\phi_j - \bar{\phi})^3 q_j / \left(\left(\sum_{j=1}^n q_j \right) \cdot \sigma_{\phi}^3 \right) \quad (3)$$

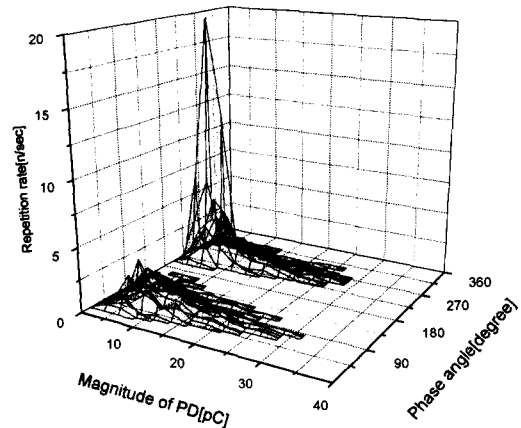
$$K_{\phi} = \sum_{j=1}^n (\phi_j - \bar{\phi})^4 q_j / \left(\left(\sum_{j=1}^n q_j \right) \cdot \sigma_{\phi}^4 \right) \quad (4)$$

$$asy = \frac{\sum Q_{ja} / \sum n_{ja}}{\sum Q_{jb} / \sum n_{jb}} \quad (5)$$

$$cc = \frac{\sum (Q_{ja} Q_{jb}) - \sum Q_{ja} \sum Q_{jb}}{(\sum (Q_{ja} Q_{jb}) - \sum Q_{ja}^2)(\sum (Q_{ja} Q_{jb}) - \sum Q_{jb}^2)} \quad (6)$$



(a) Before aging



(b) After aging

그림 9. 부분방전 3차원분포(인가전압 1.5 kV).
Fig. 9. Typical distribution of the number and magnitude of PD vs. phase angle of the applied voltage.

표 2. 부분방전통계 파라미터.

Table 2. Statistical parameter of partial discharge.

통계량	H ₀ (n)		H _{qn} (Φ)		H _n (Φ)		H _{nMax} (Φ)	
	전	후	전	후	전	후	전	후
평균방전 전하량	8.97	10.80						
평균발생 빈도수	675.8	909.4						
왜도 +	1.19	2.77	-0.29	-0.06	-1.04	-1.03	-0.64	-0.40
왜도 -			2.08	0.30	1.09	1.01	4.22	1.38
첨예도 +	4.64	14.54	0.22	0.02	1.11	1.08	0.60	0.30
첨예도 -			3.32	0.22	1.26	1.03	8.51	1.61
비대칭도	1.38	2.00					1.49	1.80
상관계수	0.68	0.89					0.77	0.90

3. 결론

견인전동기의 고정자 코일로 사용되고 있는 것을 피시험체로 실제품과 동일하게 인버터 전압을 인가하여 가속열화 시험을 실시하였다. 가속열화를 실시하면서 정전용량, 유전손실을 측정하였고, 부분방전의 통계량 및 분포 변화를 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 모의 인버터전압에 의한 가속열화 전후의 정전용량과 유전손실을 검토한 결과 정전용량은 열화후에 감소를 하였고, 유전손실은 증가하는 경향을 보이고 있으나, 이것은 전체적인 열화진전의 커다란 변화를 의미하지는 않으며 이러한 경향의 원인은 코일 내부에 결함이 증가하기 때문에 나타난 결과로 보여진다.
2. 유전손실 크기는 열화후에 증가를 하였으며, 급증하는 시점은 부분방전 개시전압과 일치하였고, 열화후에 더 크게 증가하였다. 따라서 이러한 유전손실과 정전용량의 측정은 견인전동기의 상태진단 및 관리에 활용이 가능할 것이다.
3. 부분방전의 측정결과 방전개시전압은 큰 차이를 나타내지는 않았지만, 방전분포를 보면 열화후에 최대방전량이 더 크게 발생하였고, 발생을 또한 증가하였다. 또한 부분방전분포의 통계량을 이용한 열화상태진단이 가능할 것으로 판단된다.

향후 인버터 장치를 실제의 인버터 서지전압과 같은 전압 파형을 제작하여 서지전압이 절연수명에 미치는 내용을 추가로 연구할 예정에 있으며, 실시간으로 인버터 추진시스템에서 부분방전을 측정할 수 있는 시스템을 구축하여 절연진단을 실시할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원에서 수행 중인 기본연구사업(PK03101B)의 지원에 의해 수행된 것입니다.

참고 문헌

- [1] C. Petrarca, L. Egiziano, V. Tucci, and M. Vitelli., "Investigation on performance of insulation materials for inverter-fed traction Motors", CEIDP, Vol. 2, p. 564, 1998.
- [2] R. Goffeaux, M. Krecke, B. Comte, M. Cottet, and B. Fruth, "Dielectric test methods for rotating machine stator insulation inspection", CEIDP, Vol. 2, p. 528, 1998.
- [3] Jong-Bae Wang, Myung-Yong Kim, Gil-Dong Kim, Hyunn-Jun Park, and Ki-Joon Kim, "Degradation evaluation of insulation system for form-wound stator coils for traction motors", ICEE, Vol. 2, p. 243, 1999.
- [4] 한국철도기술연구원, "전동차 전기추진장치의 고장예방 및 유지관리자동화 시스템 기술개발 - 1차년도 보고서", p. 163, 2000.
- [5] Alexandra Mbaye and Thierry Leby, "Analytical approach of PD activity in low voltage motors FED by inverters", IEEE International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, p. 161, 1998.
- [6] G. C. Stone, S. R. Campbell, and M. Susnik, "New tools to determine the vulnerability of stator windings to voltage surges from IFDs", Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, p. 149, 1999.
- [7] M. Kauffhold, G. Börner, M. Eberhardt, and

- J. Speck, "Failure mechanism of the interturn insulation of low voltage electric machines fed by pulse-controlled inverters", *Elect. Ins. Mag.*, Vol. 12, No. 5, p. 9, 1996.
- [8] 왕중배, "전기철도용 견인전동기의 복합가속 열화 상태진단에 관한 연구", *전기전자재료학회논문지*, 15권, 1호, p. 93, 2002.
- [9] 박대희, 김동식, 한상욱, "XLPE / EPDM의 유전특성과 그의 온도, 전계, 압력의존성", *전기전자재료학회논문지*, 12권, 13호, p. 248, 1999.
- [10] R. Cadela, C. Petrarca, P. Romano, and M Vitelli, "Numerical simulation of PD activity in a spherical cavity embedded in the stator winding insulation of an inverter-fed induction Motor", 2001 CEIDP, p. 356, 2001.
- [11] S. Grzybowski, E. A. Feilat, and P. Knight, "Accelerated aging test on magnet wires under high frequency pulsating voltage and high temperature", CEIDP, p. 555, 1999.
- [12] R. Bartnikas, "Partial discharges their mechanism, detection and measurement", *IEEE Trans. on DEI*, Vol. 9 No. 5, p. 763, 2002.
- [13] R. E. James and B. T. Phung, "Development of computer-based measurements and their application to PD pattern analysis", *IEEE Trans. on DEI*, Vol. 2 No. 5, p. 838, 1995.
- [14] 강성화, 박영국, 정수현, 이광우, 임기조, "저밀도 폴리에틸렌에서 부시형 전기트리에 수반되는 부분방전 펄스의 특성", *전기전자재료학회논문지*, 11권, 12호, p. 1055, 1998.
- [15] E. Gulski and F. H. Kreuger, "Computer-aided recognition of discharge sources", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 27, p. 82, 1992.