

# IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기의 절연성능 향상기술 연구

황돈하\* · 박도영\* · 김용주\* · 이영훈\*\* · 김동희\*\* · 이인우\*\*\*

한국전기연구원 Mechatronics연구그룹 회전기진단TFT\*,

영남대학교 정보전자공학부\*\*, (주)효성중공업연구소\*\*\*

## A Study on the Insulation Performance Improvement of Induction Motors Fed by IGBT PWM Inverter

D.H. Hwang\*, D.Y. Park\*, Y.J. Kim\*, Y.H. Lee\*\*, D.H. Kim\*\*, I.W. Lee\*\*\*

Mechatronics Research Group, KERI\*, Yeungnam Univ.\*\*\*, Hyosung Co.\*\*\*

### ABSTRACT

The recent advancements in power electronic switching devices have enabled high frequency switching operation and have improved the performance of pulse-width modulated (PWM) inverters for driving induction motors. But, the insulation failures of stator winding have attracted much concern due to high dv/dt of IGBT PWM inverter. In this paper, the test results for evaluation on the stator winding insulation of low-voltage induction motors for IGBT PWM inverter applications are presented. The insulation characteristics are analyzed with partial discharge and dissipation factor tests. Also, insulation breakdown tests by switching pulse voltage are performed. An effective insulation technique to enhance the insulation strength is suggested from the test results.

**Key Words** - Induction motor, Stator winding, Pulse-width modulated inverter, Insulation system

### 1. 서 론

최근 산업계 전반의 가변속 구동 유도전동기 제어 시스템에 스위칭 속도가 2~20 [kHz]의 IGBT PWM 인버터가 채용되면서 전압상승율(dv/dt)이 크게 증가하여 지금까지 나타나지 않았던 새로운 문제점이 대두되었다. 즉, PWM 인버터의 고주파 스위칭 동작과 높은 전압상승율에 의하여 전동기 입력단에 2 [pu] 이상의 써지전압이 인가되기 시작하였다. 또한, 인버터와 전동기사이의 케이블 길이도 전압상승의 큰 요인으로 등장하게 되었다. 이러한 써지전압과 높은 전압상승으로 인하여 유도전동기 고정자 권선의 초기 절연파괴가 빈번히 발생되고 있는 실정이다<sup>[1-4]</sup>.

IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기 고정자 권선의 절연파괴에 대한 대책으로서<sup>[1-5]</sup>, 국내외적으로 써지전압 저감을 위한 필터설계, 절연내력이 큰 Magnet wire의 채용, 향상된 절연 시스템 개발 등

의 연구가 많이 이루어지고 있지만, 이러한 방법들은 대부분 전동기의 가격상승을 초래하고, 드라이브의 특성에 따라 적용이 불가능한 경우가 많다. 또한, 전동기 제작시의 핵심적인 절연기술은 업체 고유의 Know-how로써 거의 공개되지 않고 있다.

본 논문에서는 IGBT PWM 인버터 구동형 저압 유도전동기의 절연성능 향상과 절연문제 분석을 위하여, 전선(magnet wire), 함침기법, 함침횡수 등의 절연설계를 다르게 적용하여 제작한 2개 정격, 10가지 방식의 저압 유도전동기를 대상으로 하여 고정자 권선의 절연특성 분석과 절연내력 평가결과를 제시한다. 부분방전(Partial Discharge ; PD) 시험을 통한 최대 부분방전 크기(Max. PD Magnitude ; Qm)와 부분방전 개시전압(Discharge Inception Voltage ; DIV)을 구하였고, 교류전류 시험에 의해 유전정접 변화율( $\Delta \tan \delta$ )을 산출함으로써, 각각의 전동기에 대한 전선과 함침방법에 따른 절연특성을 상세히 분석하였다. 또한, 실제 인버터의 전압상승율과 동일한 써지전압에 의한 절연파괴 시험을 수행하여 각각의 전동기별로 고정자 권선의 절연파괴 전압을 비교 분석하였다. 이를 통하여 저압 유도전동기의 제작시 절연성능을 향상시키기 위한 전선과 함침기법의 선정에 유용한 자료를 제시하였고, 전동기의 절연내력을 크게 감소시키지 않도록 하기 위한 전동기 단자전압의 제한치를 제시하였다.

### 2. IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기

#### 2.1 유도전동기 고정자 권선의 절연 시스템

유도전동기 고정자 권선의 절연 시스템은 그림 1에 나타낸 슬롯내 단면도와 같이 주절연(main), 상절연(phase) 및 턴절연(turn insulation)으로 구성되어 있다. 주절연 또는 슬롯절연(slot phase)은 고정자 철심으로부터 권선을 분리시키게 되고, 상절연(phase separation)에 의해서 개별 상의 전위가 서로 다르게 분리된다. 코일 내부의 인접한 Turn 간의 턴절연은 에나멜 전선(enamel wire)과 함침레진(impregnating resin) 또는 바니쉬(vanish)로 이루어져 있다. 저압 유도전동기는 Random-wound 권선방식이 일반적이고, 용량이 커지게 되면 몇 개

의 전선을 묶어 코일을 병렬로 감기 때문에, 1개 코일의 처음과 마지막 턴이 인접하게 배치될 가능성이 가장 크다. 따라서 전체 코일전압이 인접한 2개의 전선 사이에 걸리게 되어 전기적 스트레스가 가장 크게 나타나고, 가혹한 상태에서는 턴절연이 다층코일 또는 코일그룹 전체에 걸리는 것보다 더 큰 전압강하를 받을 수도 있다<sup>[3]</sup>.

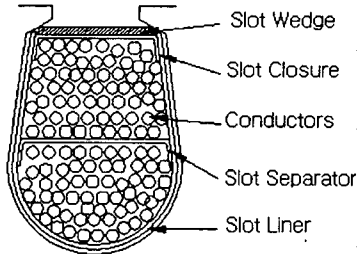


그림 1. 고정자 권선의 절연 시스템

## 2.2 IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기 시스템

산업설비의 가변속 드라이브에 채용되는 전형적인 IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기 시스템의 구성도를 그림 2에 나타내었다. 그림 3은 PWM 인버터의 출력단자와 전동기 입력단자에서의 전압파형을 나타내고 있다. 이러한 파형은 전동기 단자에서 전압상승율(dv/dt)이 높은 2 [pu] 이상의 스위칭 써지전압을 발생시키게 된다. 또한, 인버터와 전동기 사이의 케이블 길이에 따른 임피던스 비정합에 의한 반사전압으로 인하여 단자전압이 더욱 커지게 된다. 이와 같은 급격한 써지전압과 인버터의 고주파 스위칭 동작은 전동기의 고정자 권선에 불규칙한 전압분포를 야기시키게 되고, 특히, 입력단자에 인접한 코일에 집중적으로 전압을 분포시킴으로서, 고정자 권선의 절연강도를 약화시켜 결국 절연파괴를 초래하게 된다<sup>[1-5]</sup>.

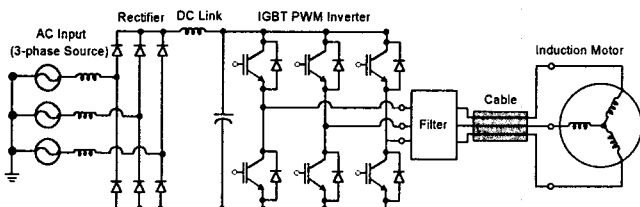


그림 2. IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기의 구성도

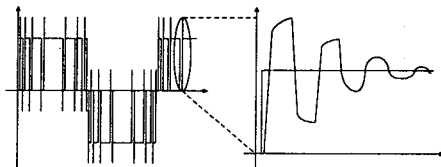


그림 3. 유도전동기 입력단자에서의 전압파형

## 2.3 유도전동기의 절연성능 향상기술

IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기 시스템의 절연문제를 해결하고자, 인버터 스위칭시 발생하는 써지전압의 크기를 줄이고, 전동기 단자에 인가되는 전압상승율을 감소시키고, 고정자 권선의 절연내력을 향상시키기 위한 많은 연구결과가 발표되고

있다. 특히, 유도전동기 제작측면에서의 전선, 함침방법 등의 절연성능 향상을 위해서는 다음과 같은 방법이 주로 도입되고 있다<sup>[3][4]</sup>.

- PWM 인버터에 의한 써지전압에 견디는 ISR (Inverter-Spike Resistant) magnet wire 사용
- Dipping과 Bake 함침을 최소 2회 이상 적용
- 핵심설비용 소량 생산 전동기의 경우, Trickle 함침방법의 도입
- Varnish dipping 대신에 Corona Shield Resin (Polyesterimide Resin)을 이용한 Dipping방식 적용
- 상간 절연파괴 방지를 위해서 절연내력이 큰 상간 절연지의 채용

## 3. 전동기 사양과 절연특성 시험방법

### 3.1 유도전동기의 사양과 절연설계 방식

IGBT PWM 인버터 구동용 유도전동기의 고정자 권선에 대한 절연특성 분석을 위해 제작한 유도전동기 고정자는 표 1과 같이 총 48基이다. 전동기의 사양은 3상, 4극, 310/380 [V], 5.5/3.7 [kW]의 2가지 정격이고, 절연등급은 최고 허용온도가 155 [°C]인 F종 절연으로서 Nomex 소재의 절연물을 사용하였다.

전선종류와 함침방법에 따른 절연특성 평가를 위해서 310 [V], 5.5 [kW]의 A형 전동기의 경우, Polyester enameled wire (PEW)를 사용한 표준코일과 마이카 절연의 Mica-film taped copper wire의 2종류 전선을 사용하였고, 함침방법은 일반적인 Varnish dipping 및 Bake 방식의 표준함침과 진공가압 함침(Vacuum pressure impregnation)의 2종류를 적용하여 함침횟수를 다르게 하여 제작하였다. 표준코일(PEW)의 직경은 도체(conductor) 직경 0.9 [mm]와 절연두께 0.033 [mm]를 포함해서  $0.966 \pm 0.02$  [mm]이고, 마이카 절연전선의 절연두께는 0.16 [mm]이다.

동일한 표준코일을 사용한 380 [V], 3.7 [kW]의 B형 유도전동기의 경우에는 절연처리 방식에 따른 절연특성 비교를 위하여, 표준함침과 진공가압 함침의 2종류 함침기법을 사용하여 함침횟수를 여러 가지로 적용하여 제작하였다.

표 1. 유도전동기의 사양과 절연방식

구분/정격	함침기법	전동기 번호	대수	전선종류
A형 전동기 5.5 [kW] 310 [V]	표준 1회	C1#1 ~ C1#7	7	PEW
	표준 2회	C2#1 ~ C2#3	3	PEW
	진공 1회	P1#1 ~ P1#3	3	PEW
	진공 2회	P2#1 ~ P2#3	3	PEW
	표준 1회	T1#1 ~ T1#7	7	Mica-film Taped Coil
B형 전동기 3.7 [kW] 380 [V]	표준 1회	S1#1 ~ S1#5	5	PEW
	표준 2회	S2#1 ~ S2#5	5	PEW
	표준 3회	S3#1 ~ S3#5	5	PEW
	진공 1회	V1#1 ~ V1#5	5	PEW
	진공 2회	V2#1 ~ V1#5	5	PEW

### 3.2 부분방전, 유전정접 및 절연파괴 시험방법<sup>[4]</sup>

유도전동기의 절연특성 분석을 위해서 부분방전 및 유전정접 시험을 수행하였다. Haefely Trench Tettex사의 Partial Discharge Detector (Model TE 571)를 이용하여 최대 부분방전 크기(Qm)와 부분방전 개시전압(DIV)을 측정하였다. 부분방전 시험은 높은 측정 정밀도와 전원과 접지로부터 유입되는 외부잡음의 제거가 필수적이므로 본 연구에서는 Radio frequency shield room에서의 실험과 Noise-free power supply를 사용하여 잡음제거와 1 [pC] 이하의 Sensitivity를 갖도록 하였다.

유전정접 시험을 위해 사용한 장비는 Tettex사의 Automatic insulation test system (Type 2818-QA)으로서, 인가전압에 따른 유전정접( $\tan \delta$ )을 측정하였다. 유전정접 시험을 통하여 부분방전이 발생하지 않는 낮은 전압에서의  $\tan \delta_0$ 와 특정전압에서의  $\tan \delta$ 와의 차이를 나타내는 유전정접 변화율( $\Delta \tan \delta$ )을 산출하여 절연특성을 분석하였다.

또한, 본 연구에서는 전동기가 실제 운전중일 때 가해지는 스위칭 써지에 따른 펄스전압에 의해 권선이 절연파괴되는 현상을 분석하기 위해서, 통상적인 AC 또는 DC 내전압 시험 대신에 펄스 파괴 시험을 수행하였다. 실제 IGBT PWM 인버터의 출력전압과 동일한 전압상승율의 모의 스위칭 펄스 전압을 전동기 단자와 대지간에 인가하여 고정자 권선의 절연이 파괴되는 전압을 측정하였다.

## 4. 절연특성 시험결과

### 4.1 부분방전 시험결과

그림 4와 그림 5의 (a), (b)는 각각 인가전압이 1,000 [V]와 1,200 [V]일 때 측정한 전동기별 최대 부분방전 크기(Qm)를 나타낸 것으로서, 왼쪽 축은 검은 막대그래프(■), 오른쪽 축은 흰색 막대그래프(□)를 나타낸다.

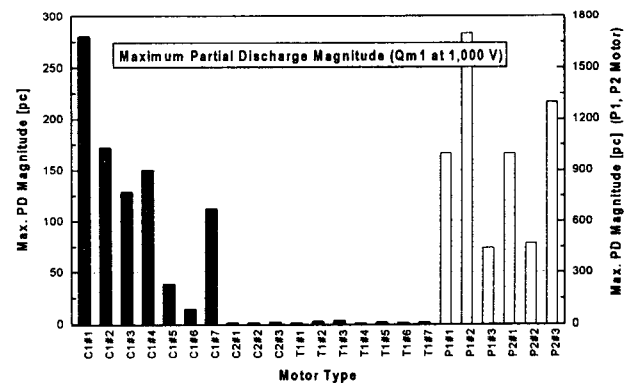
그림 4의 310 [V], 5.5 [kW]급 A형 전동기의 경우, Mica 절연전선을 사용한 T1 전동기의 Qm값이 가장 작은 반면에, 진공압 함침을 1회 및 2회 적용한 P1과 P2 전동기는 Qm1, Qm2가 모두 높게 나타남을 볼 수 있다. C2(표준함침 2회) 전동기의 경우, 1,000 [V]에서의 Qm1은 매우 작게 측정되었으나, 1,200 [V]에서의 Qm2는 C1(표준함침 1회) 전동기와 비슷하게 큰 값을 나타내었다.

380 [V], 3.7 [kW] 정격의 B형 전동기에 대한 최대 부분방전 크기를 나타낸 그림 5에서는, V2(진공함침 2회) 전동기의 Qm값이 2개 측정전압에서 가장 작은 것을 볼 수 있고, V1(진공함침 1회) 전동기의 경우에는 1,000 [V]에 비해서 1,200 [V]에서의 Qm값이 크게 증가하고 있다. 표준함침 전동기의 경우에는 함침횟수가 증가할수록 부분방전의 크기가 작게 되어 절연특성이 개선됨을 알 수 있다.

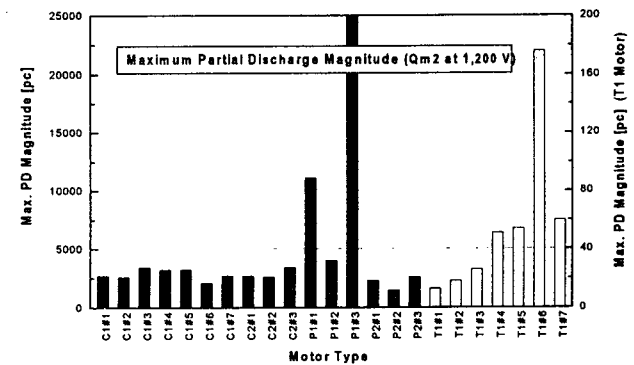
그림 6은 함침방법과 전선의 종류에 따라 각각의 전동기별로 측정한 부분방전 개시전압으로서, DIV1, DIV2 및 DIV3는 각각 최대 부분방전 크기가 10, 100 및 1,000 [pC]이 될 때의 인가전압을 나타내고 있다. 그림 6 (a)의 A형 전동기에서는 T1(Mica

절연전선) 전동기, 그림 6 (b)의 B형 전동기의 경우에는 V2 전동기(진공함침 2회)의 DIV가 가장 커서 부분방전이 가장 높은 전압에서 발생한다는 것을 알 수 있다. 그러나 A형 전동기의 진공압 함침한 P1 및 P2 전동기는 다른 전동기에 비해서 현저히 낮은 DIV를 나타내어 가장 빨리 부분방전이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 한편, 그림 6 (b)의 B형 전동기에서는 S1(표준함침 1회) 전동기의 DIV가 가장 작게 나타났고, 표준함침 및 진공압 함침 모두 함침횟수가 증가할수록 DIV 특성이 비교적 향상됨을 확인할 수 있다.

그림 7은 각각의 전동기별로 인가전압에 따른 최대 부분방전 크기의 평균값을 나타낸 것으로서, 전압이 증가함에 따라 부분방전이 점점 많이 발생하는 전형적인 특성을 볼 수 있다. 표준코일(PEW)을 사용하는 저압 유도전동기 고정자 권선의 경우에는 부분방전이 발생하지 않아야만 절연열화가 억제되어 양호한 절연상태가 유지된다. 따라서 부분방전이 최초로 발생하는 전압의 크기가 중요한 파라미터로 취급된다. 그림 6과 그림 7에서 표준코일을 사용하고 표준함침을 적용한 C1, C2와 S1, S2 및 S3 전동기의 경우, 5 [pC] 이상의 부분방전이 발생하는 전압은 900~1,000 [V]인 것을 볼 수 있다. 그러므로 절연내력을 악화시키는 주요 원인인 부분방전의 크기를 5 [pC] 이하로 유지하기 위해서는 전동기 단자에서의 전압을 900 [V] 이하로 억제해야 한다. 또한, 공장에서의 절연내력 평가를 위해서는, 외부잡음의 영향을 고려하여 1,000 [V] 이상에서 10 [pC]을 초과하는 부분방전이 발생하면 절연이 불량한 것으로 판단할 수 있다.

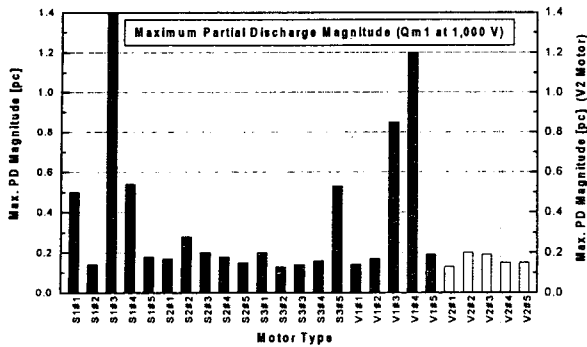


(a) 1,000 [V]에서의 Qm1

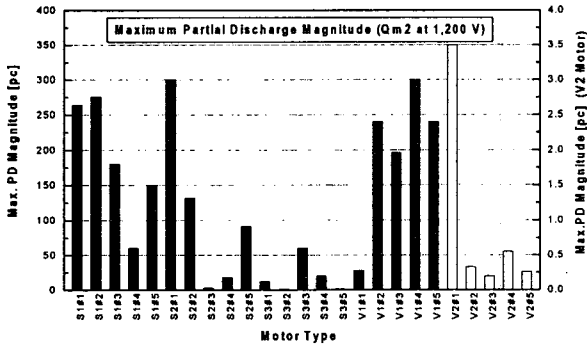


(b) 1,200 [V]에서의 Qm2

그림 4. A형 전동기의 최대 부분방전 측정결과

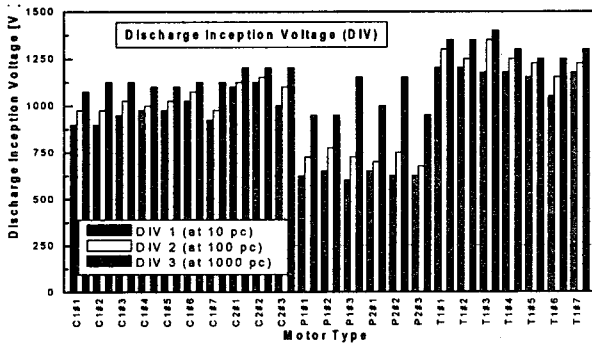


(a) 1,000 [V]에서의 Qm1

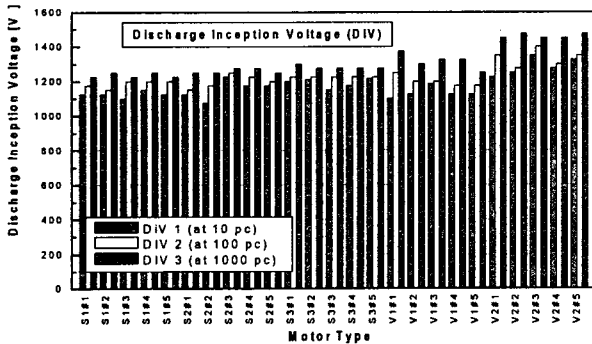


(b) 1,200 [V]에서의 Qm2

그림 5. B형 전동기의 최대 부분방전 측정결과



(a) A형 전동기

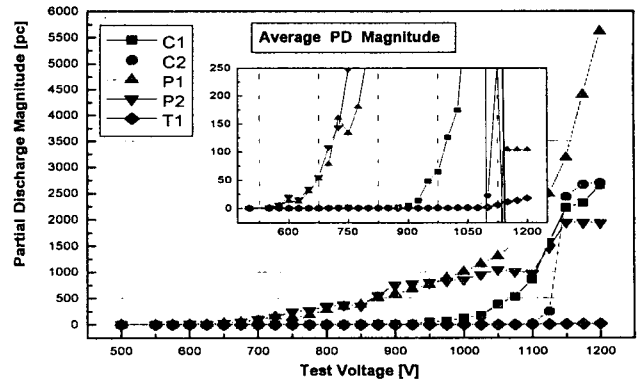


(b) B형 전동기

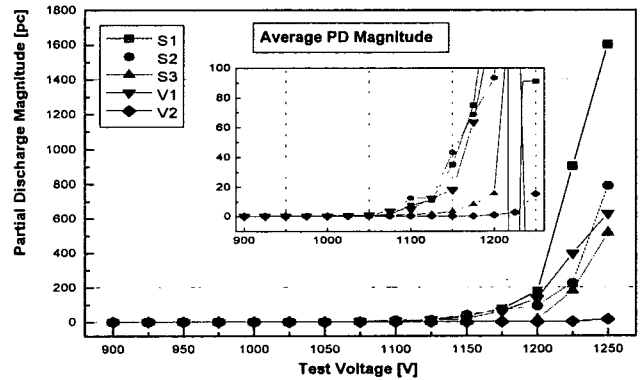
그림 6. 부분방전 개시전압 측정결과 (DIV)

## 4.2 유전정접 시험결과

그림 8 (a)와 (b)는 전선종류와 함침방법을 다르게 적용하여 제작한 유도전동기 고정자 권선의 유전정접 시험결과를 나타내고 있다. 유전정접 변환율인  $\Delta \tan \delta 1$ 과  $\Delta \tan \delta 2$ 는 각각 1,250 [V], 1,300 [V]에서의  $\tan \delta$ 와 정격전압의  $\sqrt{3}$ 배 전압인 537 [V], 658 [V]에서의  $\tan \delta$ 와의 차이를 나타낸다.



(a) A형 전동기



(b) B형 전동기

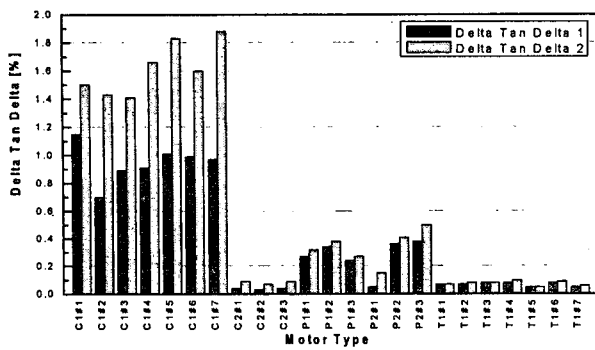
그림 7. 최대 부분방전 크기의 평균치

그림 8 (a)의 A형 전동기에서는 C1(표준함침 1회) 전동기의  $\Delta \tan \delta$ 가 가장 큰 값을 나타내고, T1 전동기가 가장 작은  $\Delta \tan \delta$  값을 나타내어 절연특성이 우수함을 보여주고 있다. 그러나 진공가압 함침한 전동기(P1, P2) 보다는 표준함침 2회 처리한 C2 전동기의  $\Delta \tan \delta$ 가 더 작은 값을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 그림 8 (b)에 나타난 B형 전동기의 경우, 표준함침으로 제작한 전동기보다 진공가압 함침에 의한 전동기의  $\Delta \tan \delta$ 가 더 작은 것을 볼 수 있고, 함침횟수가 많아질수록  $\Delta \tan \delta$ 가 감소하여 절연특성이 더 좋은 것으로 나타났다.

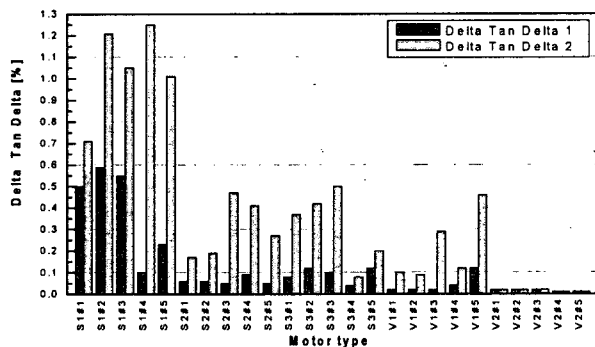
## 4.3 절연파괴 시험결과

그림 9에서는 모의 스위칭 써지전압에 의한 절연 파괴 전압을 나타내고 있다. 그림 9 (a)에 나타난 310 [V], 5.5 [kW]의 A형 전동기에서는 Mica 절연 전선을 사용한 T1 전동기의 절연파괴 전압이 상대적으로 매우 높아 절연성능이 가장 양호한 것으로 나타났다. 나머지 전동기는 대부분 7 [kV] 부근에서 절연이 파괴되었고, 표준 및 진공가압 함침을 2회씩 적용한 C2 및 P2 전동기의 절연파괴 전압이 상대적으로 약간 높게 나타났다.

380 [V], 3.7 [kW] 정격의 B형 전동기에 대한 절연파괴 시험결과를 나타낸 그림 9 (b)를 보면, 진공가압 함침한 V1 및 V2 전동기의 절연파괴 전압이 상대적으로 높아서 절연내력이 가장 좋은 것을 알 수 있고, 표준 및 진공가압 함침 전동기 모두 함침횟수를 증가시킬수록 절연파괴 전압이 높아짐을 볼 수 있다.

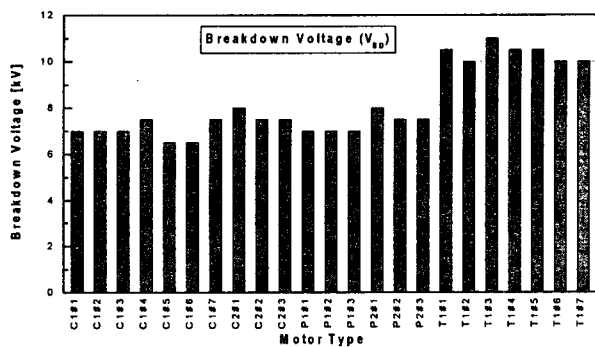


(a) A형 전동기

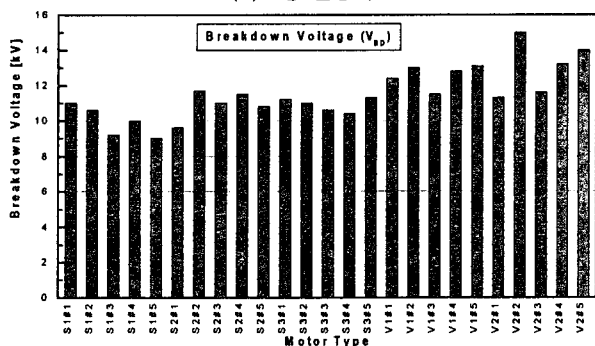


(b) B형 전동기

그림 8. 유전정접 시험결과 ( $\Delta \tan \delta$ )



(a) A형 전동기



(b) B형 전동기

그림 9. 절연파괴 전압 측정결과 (V<sub>50</sub>)

## 5. 결 론

본 논문에서는 함침기법과 권선종류를 다르게 적용한 2가지 정격의 저압 유도전동기 고정자 48基를 제작하여 각각의 전동기에 대한 부분방전, 유전정접 시험과 스위칭 써지전압에 의한 절연파괴 시험을 수행함으로써, 여러 가지 절연설계 방법에 따른 절연특성을 상세히 분석하였고, 고정자 권선의 절

연성능을 향상시킬 수 있는 방안을 제안하였다. 또한, 고정자 권선의 절연내력을 악화시키지 않는 한계전압으로서 전동기 단자전압에 대한 제한치를 제시하였다. 본 연구를 통해 얻어진 주요 결과와 제안사항을 다음에 정리하였다.

1. 스위칭 펄스에 의한 절연파괴 전압과 부분방전 특성이 가장 유사한 결과를 나타내어 최대 부분방전의 크기(Qm)와 부분방전 개시전압(DIV)이 인버터용 전동기의 절연내력과 가장 밀접한 관련이 있다고 판단된다.
2. Mica-film taped copper 전선을 채용한 T1 전동기의 절연특성이 모든 측면에서 가장 좋은 것으로 나타났다. 따라서 높은 신뢰성이 요구되는 중요설비에는 인버터 써지전압에 대한 내력이 높은 ISR(Inverter-spike resistant) magnet wire의 사용을 고려할 필요가 있다.
3. 진공가압 함침을 2회 적용한 V2 전동기는 전반적으로 우수한 절연특성을 나타냈지만, 그외의 진공함침 전동기(P1, P2 및 V1)의 경우에는 두드러진 절연특성의 향상이 보이지 않았다. 이것은 진공 가압시의 진공도, 절연물의 점도 등의 함침조건을 유의하지 않으면 Random-wound 권선방식의 저압 유도전동기에는 진공가압 함침이 큰 효과를 기대하기 어렵다는 것을 나타낸다.
4. Varnish dipping 및 Bake 함침을 기본으로 하는 표준함침 전동기의 경우에는 함침횟수가 증가할수록 절연특성이 향상됨을 확인하였다. 그러나 제작비용의 절감, 제작공정의 용이, 전반적인 절연성능의 향상정도를 고려하면, 표준함침 2회에 의한 저압 유도전동기의 제작을 권장한다.
5. 고정자 권선의 절연내력을 악화시키는 주된 요인인 부분방전이 5 [pc] 이상의 크기로 발생되지 않도록 하기 위해서는 전동기 입력단자에서의 과도전압을 900 [V] 이하로 저감시켜야 한다.
6. 공장에서의 절연내력 평가를 위해서는, 외부잡음의 영향을 고려하여 인가전압이 1,000 [V]에서 10 [pC]을 초과하는 부분방전이 발생하면 절연이 불량한 것으로 판단하면 될 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] J.M. Bentley and P.J. Link, "Evaluation of Motor Power Cables for PWM AC Drives", IEEE Trans. on IA, Vol. 33, No. 2, pp. 342~358, Mar./Apr. 1997
- [2] Erik Persson, "Transient Effects in Application of PWM Inverters to Induction Motors", IEEE Trans. on IA, Vol. 28, No. 5, pp. 1095~1101, Sep./Oct. 1992
- [3] M. Kaufhold, et al., "Electrical Stress and Failure Mechanism of the Winding Insulation in PWM-Inverter-Fed Low-Voltage Induction Motors", IEEE Trans. on IE, Vol. 47, No. 2, pp. 396~402, Apr. 2000
- [4] D.H. Hwang, et al., "Analysis of Insulation Characteristics of Low-Voltage Induction Motor Driven by IGBT PWM Inverter", Conf. Rec. of the IEEE ISEI, Anaheim, USA, pp. 17~20, Apr. 2-5, 2000
- [5] Y. Sozer, et al., "New Inverter Output Filter Topology for PWM Motor Drives", IEEE Trans. on PE, Vol. 15, No. 6, pp. 1007~1017, Nov. 2000