

# 전동차의 견인전동기 상태진단 및 유지보수 체계 개선안 도출

## Deduction of inspection and maintenance system for traction motor of electronic locomotive

이상수\* 김민표\* 광상록\* 조연옥\*  
Lee, Sang-Soo Kim, Min-Pyo Kwak, Sang-Log Cho, Yun-Ok

---

### ABSTRACT

The present volume should address the unique method of deterioration analysis tailorly applicable to the study of traction motor, not existent maintenance works system with the time period standard, such as regular inspection works, maintenance works, selection for the repair works. The present volume has executed various field experiments in this method, should propose the procedures and baselines for anticipating the life expansion of traction motor and building precautonal maintenance system for it, on the basis of these field experiments. The improvement scheme of traction motor maintenance system in the present volume should be to keep the out - of - order rate from unexpectedly soaring and make the cost - reduction effect through better maintenance work method.

---

### 1. 서론

현행 전동차 주요전기장치의 유지보수체계는 일정한 시간간격이나 운행거리를 기준으로 하는 주기적인 유지보수를 하고 있다. 이러한 유지보수 체계는 정비대상 장치의 노후정도 열화 상태를 고려하지 않고 일률적인 운행거리나 시간간격으로 장비의 교환 및 수리가 이루어진다. 장치가 수명한계에 다다르면 고장률이 급증하고 유지보수 비용과 노력을 과다하게 투입해야 하는 등의 문제점을 가지고 있다. 최근 도시철도 이용자가 증가하고 있으며, 이용객의 철도에 요구하는 신뢰성이나 안전성에 관한 요구가 높다. 빈번한 전동차 고장은 철도운영사의 신뢰도를 저하시키는 요인이며, 사회적으로 큰 불편을 초래한다. 따라서 전동차 주요 전기장치의 유지보수 문제는 과거 항공·원자력·국방 등 선진산업에서 제기되었던 사항으로 이들 산업에 적용중인 상태진단 및 유지보수 체계를 적용하고자 한다.

본 논문에서는 전동차의 주요 전기장치중 신뢰성 확보 및 돌발사고시 전동차 안전운행에 지대한 영향을 주는 견인전동기의 현행 유지보수 체계에서 벗어나 지금까지 유지보수 작업 시 적용 사례가 없는 상태진단 기법 중 견인전동기에 적용 가능한 열화진단 기법과 현장시험 결과에 대하여 기술하였다. 또한 전동차 견인전동기의 열화진단 및 현장시험결과를 바탕으로 수명예측을 실시하고, 이를 근거로 예방정비체계를 구축하기 위한 절차와 기준을 제시하여 현행 견인전동기의 유지보수체계에 대한 개선안을 도출하였다.

### 2. 견인전동기의 상태진단

#### 2.1 열화의 발생과 진전

대용량 회전기의 절연체에서 가장 중요한 부분은 고정자의 전기자 코일이며, 철심부에는 마이카와 합침수지(에폭시, 폴리에스테르) 및 보강재(glass 포, 필름)로 구성되어진 절연체가 이용되며, coil end 부

---

\* 한국철도기술연구원, 철도시스템안전연구본부, 정희원

는 기중에서 변곡 되거나 연명방전을 일으키지 않도록 하기 위하여 표면에 전계 완화층을 설치하고 있다. 이와 같은 절연 형태에서 주된 절연열화 요인은 열적 스트레스, 기계적 스트레스, 진동 및 전기적 스트레스이다. 이 경우 절연열화는 열 스트레스에 의한 마이카 에폭시계면의 박리와 에폭시수지층의 크랙 및 반복되는 기계적 스트레스에 의한 마이카의 열화(가 원인이라 할 수 있다.[1]

회전기 코일의 절연은 제작 시에는 보이드(공극)가 거의 존재하기 않는 조밀한 절연조직이다. 그러나 회전기의 운전이력에 의하여 전기적 열화, 히트 싸이클 열화, 열적 열화, 환경 열화 등과 같이 다양한 열화과정을 통하여 절연층 전체에 다수의 미세한 보이드와 함께 국부적으로 큰 보이드가 발생된다. 따라서 장시간 운전으로 인하여 열화가 진전하며, 보이드의 양이 상당히 증가하고, 보이드가 서로 연결된다. 즉 절연열화는 절연층 내부에 보이드가 발생, 확대되고, 고전압을 인가하면 보이드 부분에서 방전이 발생하고, 보이드가 도전체로 되기 때문에 절연과피 전압이 저하된다.

## 2.2 절연열화 진단기법

### 가. 정전용량과 절연저항 시험법

다른 절연특성 시험에 앞서 절연저항 측정으로 극단의 흡습·오손 등의 결함에 의한 절연저항 저하의 유무를 진단할 수 있다. 장기적인 절연저항의 변화를 기록함으로써 흡습·오손의 축적, 진행의 경향을 분석하며, 장기적인 절연저항의 변화를 기록하고, 절연층 흡습의 진행을 추정하는 것에 의하여 절연열화의 진행경향을 판단할 수 있다.

정전용량은 절연재료가 오손되거나 흡습하면 값이 증가하므로 절연저항의 값과 비교, 검토하여 절연재료의 열화를 진단한다. 그림 1은 절연저항-정전용량과 절연과피 전압의 관계를 나타내며, 절연 저항 ( $R$ )×정전 용량값  $C_n$ 이 절연과피 전압과 선형 관계임을 알 수 있다.[2]

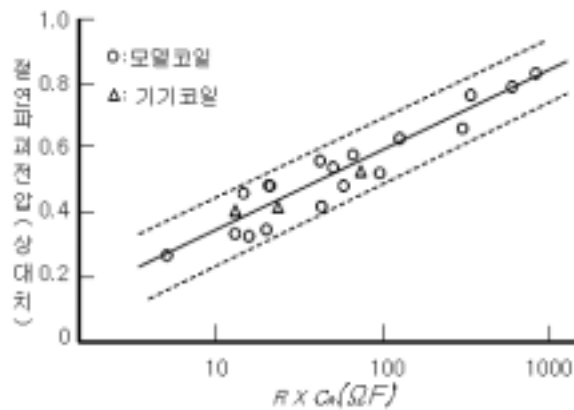


그림 1. RC와 절연과피 전압

### 나. 부분방전 시험법

부분방전은 전극과 전극 사이에서 일어나지 않고 한 부분에 생기는 방전으로, 부분방전 개시전압  $V_f$ , 부분방전 소멸정압  $V_e$ , 걸보기 방전전하  $Q$ , 발생빈도수  $n$  등을 측정하여 열화를 진단하는 방법이다. 부분방전 측정을 통하여 열화의 의한 크랙과 박리 등의 공극의 발생과 진전상황을 추정하는 것에 의하여 열화의 진전을 추정, 열화인자로써 부분방전의 정도를 추정하여 수명에 대한 영향을 파악할 수 있다. 부분방전 시험법은 방전펄스를 직접 계측하기 때문에 상세한 데이터의 측정, 국부적인 방전의 측정과 정확한 측정이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 부분방전 시험법은 발전기와 전동기의 절연열화검출에 가장 유효한 것으로 알려져 있다.[3]

### 다. 기계적 고유진동수 측정법

진동검출법에 의한 On-line 절연진단법으로 코일 절연체가 열화하여 균열이나 박리가 일어났을 때,

고유진동수가 저하한다. 이러한 경우 고유진동수 저하율과 절연과피 전압의 저하율과의 관계를 이용하여 절연열화의 정도를 판정한다. 회전기가 운전 중일 때, 코일에서 전자력에 의한 진동이 발생 하는데, 이 진동수를 측정함으로써 On-line 진단하는 것이 가능하다. 또한 정지 중에는 가진용 Hammer를 부착하여 정지 중에도 절연진단이 가능하다. 그림 2에 고유진동수의 저하율과 전압의 저하율과의 관계이다.[2]

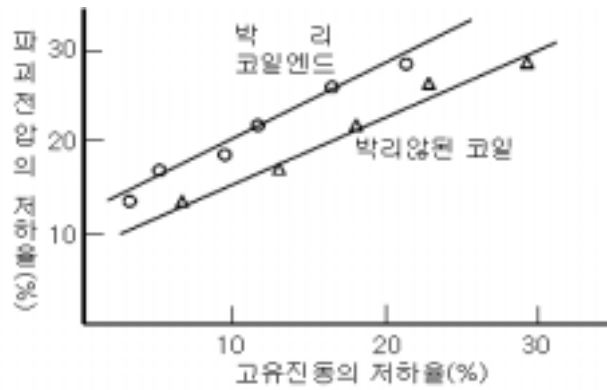


그림 2. 파괴전압과 고유진동수

라. 발전기 코어 모니터(GCM : Generator Core Monitor GE사)

발전기 내부에 국부적인 이상과열이 발생하면, 이 부분의 절연물 등의 유기물질의 일부분에서 과열에 의한 열분해가 발생하고, 초기단계의 현상으로 미립자(복수 분자의 결합)가 발생한다. GCM은 이 미립자를 검출하여, 경보를 발함으로써 발전기 내부의 이상과열을 조기에 발견하도록 고안된 감시 장치이다.

### 3. 상태진단에 의한 정비체계 개선안 도출

#### 3.1 상태진단 및 수명예측

가. 열화요인과 형태

전동기 운전 중 고정자 권선절연체가 받는 열화요인으로서, 열, 전압, 기계력 및 외부환경이 있으며, 이것들의 열화요인이 단독, 혹은 복합적으로 작용한다. 열적요인 중에서, 열적응력은 크랙을 발생시키고, 열분해는 수지의 분해에 의한 가스압의 증가나 접착강도를 저하시키고, 계면에서 박리를 발생시킨다. 그 결과 절연체가 팽창하여, 부분방전에 의한 유전정점의 증가나  $\Delta \tan \delta$ (유전손실)의 증가로 나타난다. 기계적 스트레스는 계면이나 마이카-수지 단체부분에 각각 마이크로크랙을 발생증가시키지만, 동시에 이미 다른 원인에 의하여 발생된 크랙을 확대·진전시킨다. 전기적으로는 결합 부분에서 부분방전이 발생하고, 코로나침식·트리가 진행되지만 마이카편에서의 진전은 느리다. 열화의 최적단계에서는 독립적으로 발생하는 매크로크랙이 결합하여, 최종적으로 기계적으로 파괴에 도달하지만, 파괴 직전에 대규모로 연결된 크랙으로부터 트리가 급속하게 진전되는 절연과피를 생각할 수 있다.

이상의 메커니즘을 상정하면, 열화는 시간적으로 일정하게 진전되지 않으며, 초기에는 결합의 싹이 생기고 또 열화가 진전하는데 장시간이 요구되지만, 일단 대규모의 크랙이 진전하고, 각각의 스트레스에 의한 상승작용으로 단시간 내에 파괴에 도달한다.

나. 수명진단 추정기법

전동기의 형식이나 정격은 다양하고, 부하의 상태, 운전시간, 기동·정지회수, 주위환경 등의 운전조건도 여러 가지이다. 이들을 고려한 고정자 권선의 절연 잔여 수명추정법의 개발이 중요시되고 있다. 또한 터빈 발전기 고정자권선에 있어서, 고정방법을 고려하여 진단의 정도를 향상할 필요가 있다.

비파괴법으로는 운전이력으로부터 잔여수명을 추정하는 방법과 실기기 권선의 절연진단 특성시험으로부터 잔여수명을 추정하는 방법이 있다. 또, 파괴법으로서는 실제 권선에 의한 여러개의 코일을 샘플링

하여, 그 실측치를 이용하여 통계적 해석수법에 의하여 잔여수명을 추정하는 방법이 있다.

### 3.2 진단시험을 위한 장비 및 현장적용 방안

견인전동기의 시험 항목에는 교류전류시험, 유전손실, 부분방전을 사용하였으며 각 시험 소요시간(준비 및 결과 분석시간을 미포함)은 각각 10분/개, 10/개, 5분/개 이었다.

교류전류시험을 위해서는 고전압 전원설비, 교류전류계, 기록계가 필요하다. 전압에 따른 전류변화를 측정 기록하며, 기록된 데이터를 그래프에 기록하여 변곡점을 쉽게 파악할 수 있으므로 현장에서 쉽게 절연상태를 판정할 수 있다. 측정된 결과로부터 변곡점 등의 이상이 발생할 경우 더 상세한 진단시험(유전손실, 부분방전측정)을 실시해야 한다.

유전손실 시험 및 부분방전 시험을 위해서는 유전손실 측정기, 고전압 전원설비가 필요하다. 유전손실 측정기는 표준커패시터와 브릿지 회로로 구성이 되어 있다. 전압상승에 따른 유전손실 변화량을 가지고 판정을 실시하며  $\Delta \tan \delta$  6.5 %이상이 되면 1년 이내에 기기를 교체해야 한다.

부분방전시험은 커플링커패시터, 부분방전용변압기, 검출회로, 분석용 컴퓨터와 같은 다양한 기기들이 필요하다. 또한 측정 시에 외부 노이즈 영향을 많이 받기 때문에 측정 시에 상당한 주의를 요한다. 측정 결과에 대한 분석에 있어서도 부분방전에 대한 많은 지식을 가지고 있는 전문가에 의해서 이루어져야 하므로 보다 정밀한 분석을 위해서는 외부 전문기관에 의뢰 할 것을 추천한다.

### 3.3 열화진단 측정 결과

본 논문에서 시험대상으로 선정된 견인전동기의 세부 사양은 표 1과 같다.

표 1. 각 사무소별 견인전동기 사양

	A형	B형	C형	D형
Capacity	200KW	120KW	200KW	200KW
Voltage	1,100V	375V	1,100V	1,100V
Current	130A	360A	130A	130A
Speed	2,055RPM	1,650RPM	1,945RPM	2,055RPM
Frequency	70Hz	N.A	70Hz	70Hz
Poles	4	4	4	4

#### 가. 부분방전 시험

전력기기의 절연물 중 보이드, 균열, 이물 혼입 등에 의한 국부적 결함의 원인으로 발생하는 부분방전을 측정하였으며, 열화상태를 측정하기 위해서 부분방전을 측정 하였다. 다음 그림 3은 부분방전 시험을 위한 계측기 사진 및 회로구성도이다. 부분방전 시험장비는 전력분리 필터, 증폭기 및 오실로스코프 표시 창으로 구성되어 진다.

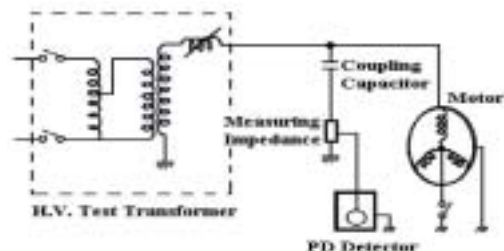


그림 3. 부분방전 시험을 위한 계측기 사진 및 회로구성도

부분방전 시험의 결과 부분방전 현상은 나타나지 않았다.

나. 교류전류시험

교류전류 시험은 교류전압을 인가하였을 때 흐르는 전류와 전압의 관계, 즉 I-V 특성으로부터 절연 상태를 측정하는 시험으로, 본 논문에서는 0.1kV ~ 1.5kV 까지 전압을 증가시켜가며 교류전류를 측정하였다. 그림 4 는 측정 결과이다. 측정 결과에서 제2 변곡점이 발행하는지 유무를 확인하여 제2변곡점이 발생 시 대상기기의 정밀상태진단을 실시하고 1년 내에 기기를 교환하는 것으로 한다. 측정결과 각 사무소별로 변곡점이 없어 양호한 것으로 판단된다.

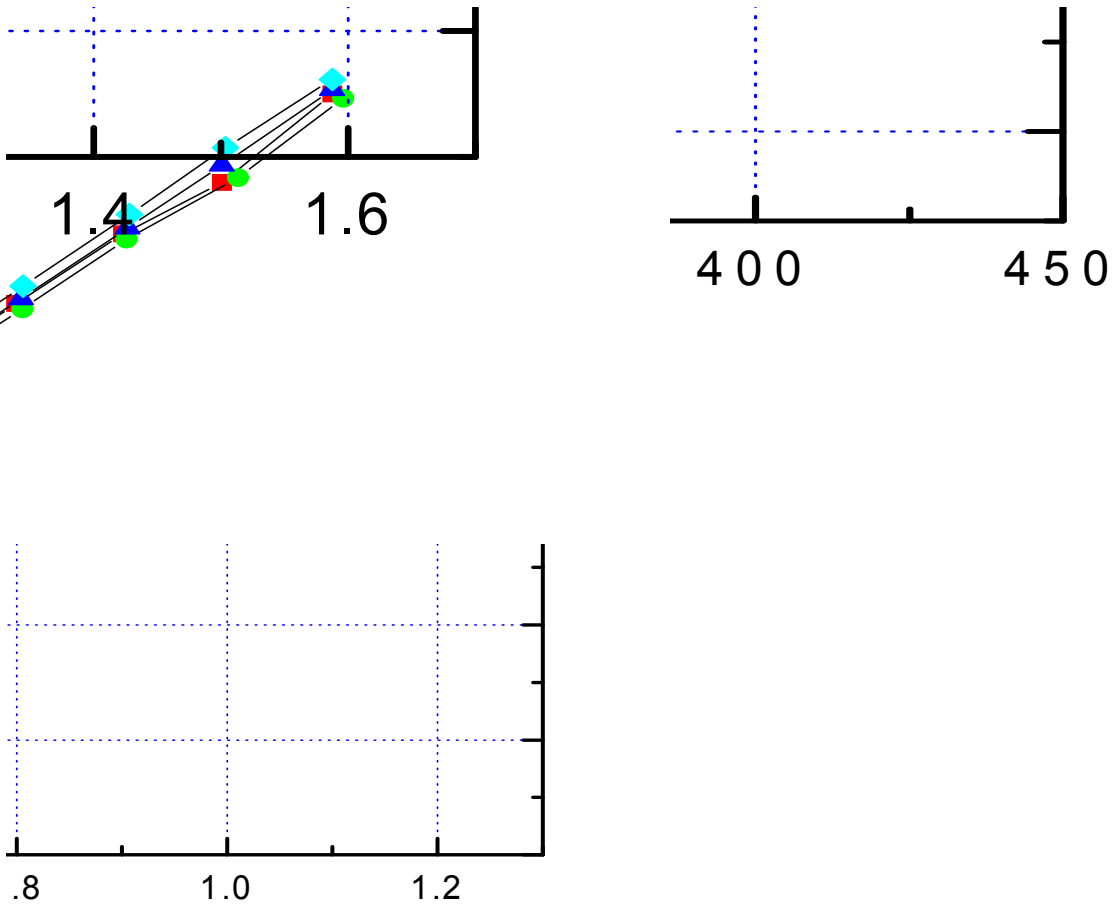


그림 4. 교류전류 측정 결과(A형, B형, C형, D형)

다. 유전손실 시험

전력기기의 절연층 흡습상태 확인과 절연층 내부의 열화정도를 판정하기 위해서는 유전손실 및 정전 용량 측정한다. 그림 5는 유전손실 시험을 위한 계측기 사진 및 회로구성도 이다.

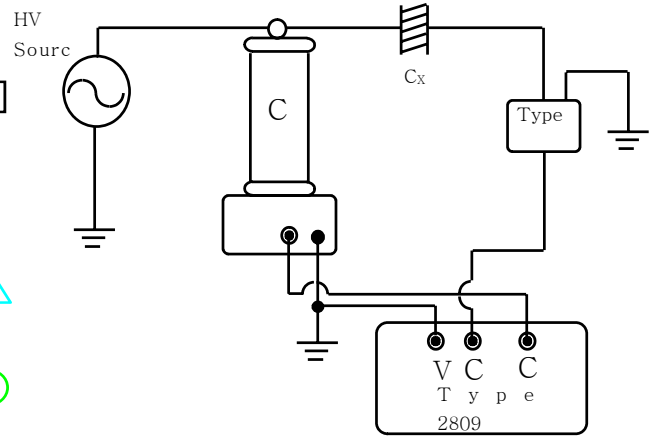
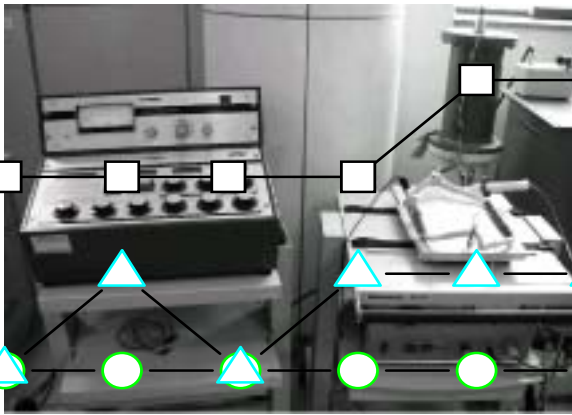
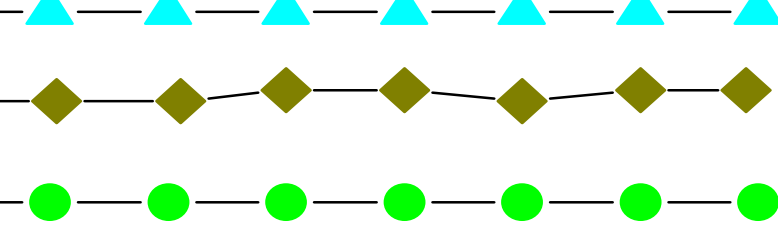


그림 5. 유전손실 시험을 위한 계측기 사진 및 회로구성도

측정방법은 교류전류시험방법과 동일하며, 그림 6의 결과 측정 결과로부터  $\Delta \tan \delta$  값의 변화량이 6.5%를 넘지 않아 양호한 상태라 할 수 있다.

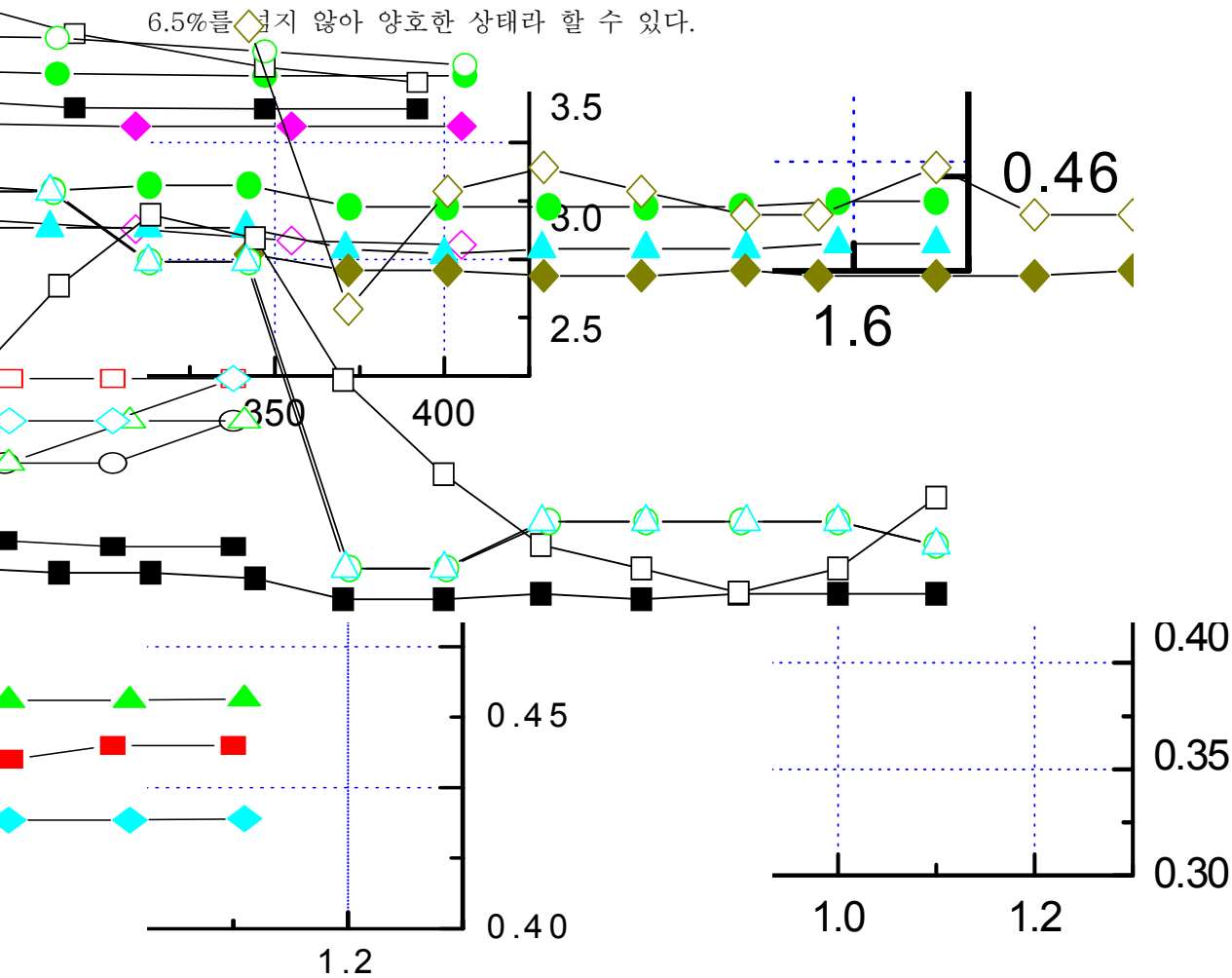


그림 6. 유전손실 측정 결과(A형, B형, C형, D형)

#### 4. 결론

본 논문에서는 전동차의 중요 전기장치 중 견인정동기의 유지보수 작업 시 상태진단 기법 중 견인전동기에 적용 가능한 열화진단 및 실험결과를 바탕으로 수명예측을 실시하고, 이를 근거로 하는 예방정비체계를 구축하기 위한 절차와 기준안을 도출하였다. 제시된 기준안을 적용할 경우 전동차 전체의 고장률을 감소시키며, 유지보수에 따른 비용절감효과를 가져올 것으로 예상된다.

#### 참고문헌

- [1] T. Hayamizu, "전기설비의 절연진단", Ohmsha, 2001. 9.
- [2] "발전기 절연수명 진단시험기술 연구", 한국기공주식회사, 1993.8
- [3] "전기동차 유지보수체계 개선을 위한 전기장치 정밀진단", 한국철도공사, 2005.12
- [4] 일본 전기학회, "전력설비의 운전 중 절연진단기술", 일 본 전기학회 기술보고, 2부 No.402