

# 철도차량 견인전동기의 가속열화수명평가 기술현황

## A technology State of Accelerating Degradation and Life Estimation on the Traction Motor for Railway Rolling Stock

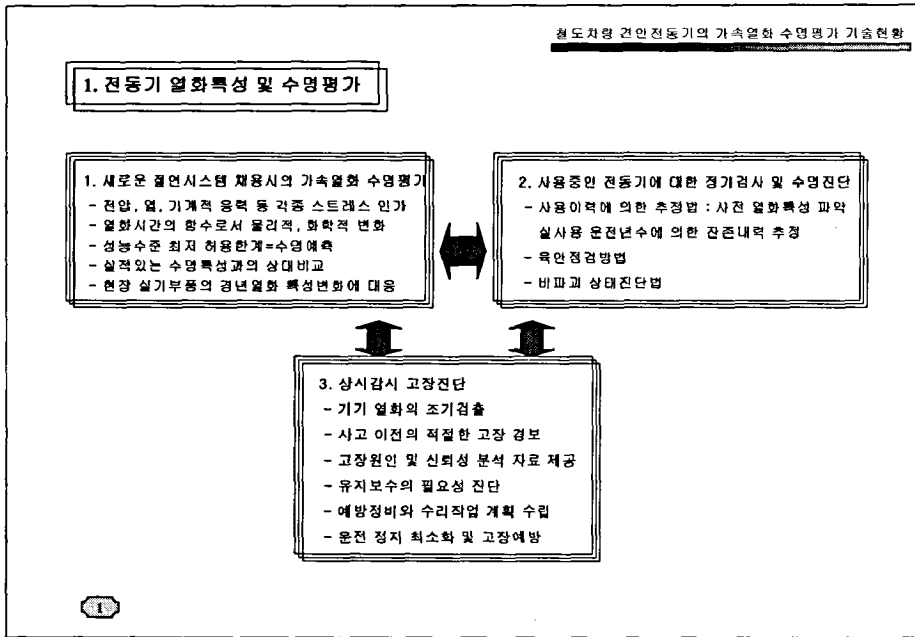
왕종배\*, 김기준\*\*, 최영찬\*\*\*

(Jong-Bae Wang\*, Ki-Jun Kim, Young-Chan Choi)

### Abstract

In this paper, the technology for accelerating degradation & life estimation on the traction motor was introduced with the stator form-winding sample coils of the 200 Class insulation system. The accelerative degradation was performed in 10 cycles, which were composed of thermal stress, fast rising surge voltage, vibration, water immersion and overvoltage applying. After aging of 10 cycles, condition diagnosis test such as insulation resistance & polarization index, capacitance & dielectric loss and partial discharge properties were investigated in the temperature range of 20~160°C. Relationship between degradation conditions and diagnosis results were analyzed to find an dominative degradation factor at the end-life point.

Key Words : Accelerating Degradation(가속열화), Life Estimation(수명평가), Traction Motor(견인전동기) Railway Rolling Stock(철도차량), Condition Diagnosis(상태진단)



\* 한국철도기술연구원 차량연구본부 선임연구원  
 (Fax: 031-461-8561, E-mail : jbwang@krii.re.kr)  
 \*\* 시립인천전문대학 제어계측과 부교수  
 \*\*\* 현대중공업 기전연구소 전력기술연구실 선임연구원

**철도차량 견인전동기의 가속열화 수명평가 기술현황**

**2. 가속열화시험**

- 신뢰성 시험의 일부로서, 기거나 장치가 실제 사용조건에서 받는 스트레스를 모의
- 시험시간을 단축할 목적으로 기존조건보다 열악한 조건에서 실시
- 수명특성이나 고장률의 단기간 평가(• 고장 모드 및 그 원인은 변하지 않음)
- 이론적 근거는 반응론 모델과 누적손상(열화) 모델에 기초함

**고장 물리적 가속법**

- 스트레스 증가법
- 일정스트레스인가
- 스텝스트레스 인가
- 연속스트레스 증가
- 스트레스 인가 빈도 증가법
- 열성인자에 의한 축전법
- 환경가속법

**통계적 가속법**

- 크기효과 이용 시간단축법
- 온도정차에 의한 시간단축법

**가속열화 수명평가의 활용성**

- 수명에유니나 고장률의 예측 가능
- 열화과정을 비파괴적으로 추적하여 열화 메카니즘 해명
- 실험시의 보수진단에 기여

**모터별 시험조건**

구형	시험조건	시험조건	시험조건	시험조건
구형	-규격온도의 일수 (3종이상)	-60Hz, 1.5G, 1hr (peak-peak 0.2mm)	-상온, 100%RH, 48hr -상온 침수 1hr	-규격전압 10분 인가

**전동기 시험조건**

구형	시험조건	시험조건	
구형	-5000회/일(다상) 250회/일(단상) -정격전압 -규격 열화온도 (3종 이상)	-상온, 100%RH, 48hr	-과고치 600V 이상의 교번 임펄스 상간에 1분간 인가

**한국철도기술연구원**

**철도차량 견인전동기의 가속열화 수명평가 기술현황**

**2.1 인버터 구동설 고려한 가속열화 시험법**

- 최근 인버터 구동에 따른 전동기 열연시스의 고조파와 반사파 고려한 문제
- IEC 7921 NEMA MG-31 등의 규격에서 시험적인 시도 불 소거
- 불행히도 수차율을 넘는 고속 스위칭시 권선열연의 안전한계와 예상수명을 보장하는 과도최대반전압(Vm)과 상승률(dV/dt)을 규정하지는 못함.
- 사용재료와 절연구성이 현저히 다른 고전압의 견인전동기형급 열연시 고려할 것

**(1) 열화 조건 설정**

- 10°C 수열방각에 따라 최고 허용 온도 보다 높은 온도에서 20°C 이상이 되도록
- 3가지 이상의 온도를 선택하여 열화
- 200Class 열크립 권선선로에 대해 표와 같은 총 10주기의 열화 열화 수행

**(2) PWM 임펄스전압 모의**

- 각 열화주기마다 파폭 0.1~0.2 sec
- 주파수 800Hz의 임펄스 3.5pu전압 10분간 인가 (=3.5×1.270Vrms=4.5 kVrms)

**표 2. 가속 열화 조건**

열화온도	열화기간 (1 주기)	총 열화기간 (10 주기)
27°C	15 일	15 일
25°C	5 일	50 일
23°C	175 일	175 일

**시험의 준비**

```

    graph TD
      A[시험의 준비] --> B[각 온도당 최소 5개, 총 15개]
      B --> C[열화인시]
      C --> D[확인검사, 고전압 시험, 초기 진단시험]
      D --> E[열화 열화 수행]
      E --> F[실정된 온도로 열화]
      F --> G[기계적 진동 수행]
      G --> H[권선 표면과 수직인 방향 60Hz, 1.5g로 1hr]
      H --> I[진동기 진단시험]
      I --> J[열전저항, land, 부분방전 측정]
      J --> K[습기/침수 시험]
      K --> L[수분을 30분간 침수]
      L --> M[내관압 시험]
      M --> N[내관압 시험으로 파괴되지 않은 경우 최대 10회까지 주기 실시]
    
```

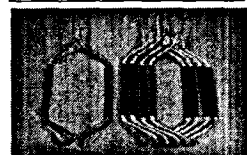
**한국철도기술연구원**

**철도차량 견인전동기의 가속열화 수명평가 기술현황**

**2.2 전동차용 견인유도전동기 절연구성**

- VVVF 기본속 운전 견인전동기 사양
- 정격출력 200kW
- 정격전압 1,100V
- 정격전류 130A
- 운전주파수 0~200kHz
- 고정자 권선구조
- 권선 현수 용기로 고조파 표피효과 저감
- 내부 2병렬 Y-결선
- 2중 배열 "다이아몬드"형 코일
- 권선절연
- 인버터 써지 스트레스와 부분방전 고려
- 충분한 대지간 절연여유 설계
- 200 Class 실리콘 베이스 시스템
- 높은 열안정성과 신뢰성 확보
- 권선 절연(VPI) 처리
- 고정자 프레임과 권선 구조물을 함께 처리
- 전동 및 오일조건에 내력 강화
- 높은 절연강도와 열충격 보유

**견인전동기 200 Class 절연시스템 구성**

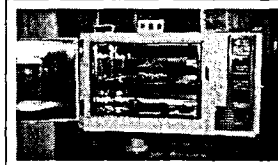


층 명	소재	사양 및 규격
1. 200class 절연소재	스테인강판	Kapton 코팅강판
	대지절연물	Kapton Film
	주절연물	Nomex-aramid paper
	주절연물	Silicone resin
2. 절연처리 및 절연성능 제고	솔트페이지	Epoxy-glass tape 적층판
	단절연 시일용 인출선 코팅	소스필 인출선 절연코팅제
	모의절연물 기판	동반솔트구조의 모의절연물
	생물코일 제작	생물코일 제작
3. VPI 절연처리	Silicone Resin	임침 60°C-3hr
	진공침전	건조 200°C-18hr

**한국철도기술연구원**

2.3 절연진단 시험조건 및 사용장비

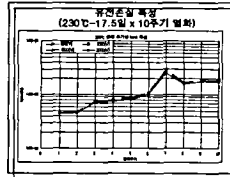
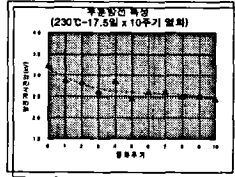
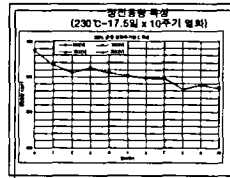
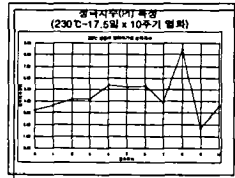
- 절연진단시험 측정장치 구성
  - 노이즈 차폐 오픈 이룸
  - 20℃~160℃에 걸쳐 20℃ 단위로 설정
  - 각 온도별 1시간 안정화
- 절연저항 및 성극지수 측정시험
  - 직류 1000V 동선과 대지간 인가
  - electrometer(Keithley model 6517A)에 의한 12분간의 전류변화를 측정, 자동기록
  - 1분치와 10분치 절연저항에 의한 성극지수(Pi) 계산
- 유전특성 : 온도의존성 및 집합의존성
  - 각 온도별 60-Hz의 정현파 전압 250V~2250V 인가
  - Capacitance & dielectric loss 측정장치 (Teltex사 Type 2809)
- 부분방전 개시전압 및 소멸전압 특성
  - Robinson사 PD detector(Model 803.1)
  - 본서 시스탈(CDA-3)



5

2.4 가속열화 주기별 결연열화특성

- 열화주기 전전에 따라 부분방전 개시전압 저하
  - 전동기의 DC Link 전압 1,100[V] 고리할 때 10주기 까지 2.5[kV]를 유지하여 안정된 수명 보장

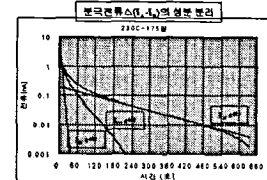
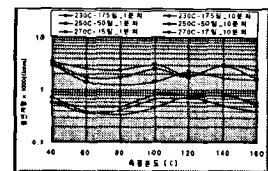
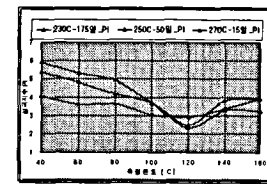


6

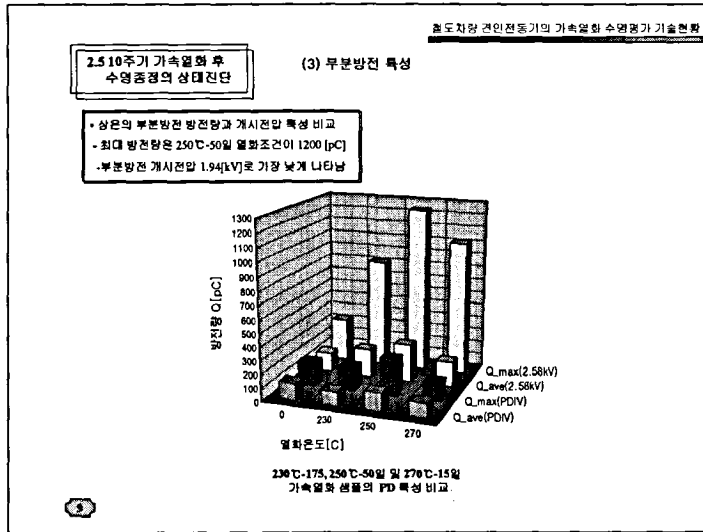
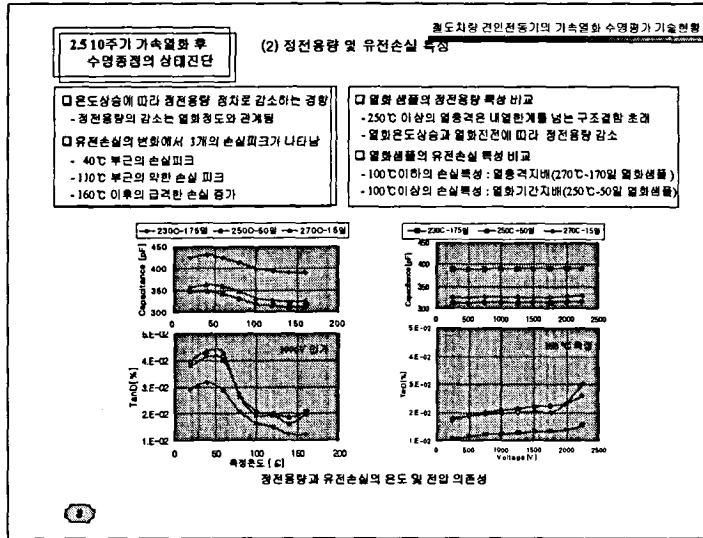
2.5 10주기 가속열화 후 수명중점의 상태진단

- (1) 절연저항 및 성극지수 특성
- 온도, 온도상승에 따른 전수시험 기반으로 수행
  - 측정시의 환경조건(온도, 습도, 오염)에 크게 의존

- 성극지수
- 1분치 절연저항 : 유전흡수 성분 지배
  - 10분치 절연저항 : 절연표면 누설 성분 지배
  - 측정온도상승에 따라 성극지수 저하(누설 증가)
  - 고도흡수전류 : 분극전류 특성은 절연물의 구조(열화)상태와 연관
- $$I_n = I_0 + A t^{1/2} + I_{10} e^{-t/\tau} + I_{20} e^{-2t/\tau} + I_{30} e^{-3t/\tau} + \dots \quad (1)$$
- 여기서,  $I_0$ 은 연속전류(최종포화)  
 $A, t^{1/2}$ 항은 엔드와일 영역의 표면전류 분산 지수3항은 체적 또는 벌크 분극현상의 기여



7



철도차량 권인전동기의 가속열화 수명평가 기술현황

**2.6 가속열화 상태진단 분석 결과 요약**

**VVVF 인버터 구동 권인전동기 고장자형코일을 대상으로 가속열화 상태진단**

- (1) 인버터 구동 스트레스를 고려한 주기적인 복합가속열화 시험법 개발
  - 고속 인버터 스위칭에 따른 과도씨지, 열충격, 진동인가 및 침수시험 조합
- (2) 열화조건에 따른 상태 진단 및 결과 분석
  - 절연저항 및 삼극지수(PF) 특성: 측정시 주변환경의 영향을 고려
  - 흡수전류특성: 분극전류의 성분분리에 의한 열화경도 평가의 가능성 제시
  - 유전특성 및 부분방전 특성: 전압 및 온도의존성 분석에 의한 열화 판정
- (3) 유지관리 자동화 시스템 구축을 통한 수명예측 및 신뢰성 평가
  - 주기적이고 지속적인 고장모드별 상태진단 수행 및 체계적인 결과분석 요약
  - 적정 유지보수 상태기준 제시 및 이력관리의 기준자료로서 활용