

## 도시철도차량의 운행조건을 고려한 추진제어장치용 필터 리액터 경량화 연구

### Reduced-weight Filter Reactor Based on the Operation Condition of Urban Electric Multiple Unit

이창영\* †, 조정민\*, 정현승\*, 이진호\*, 김정국\*, 한영재\*

Changyoung Lee\* †, Jongmin Jo\*, Jinho Lee\*, Hyunseung Jeong\*, Jungkuk Kim\*, Youngjae Han\*

**Abstract** This paper deals with the feasibility study of a reduced-weight filter reactor for urban electric multiple (EMU) by increasing the max. current density of the coil conductor. A prototype of which current density was designed to be 50 % higher than conventional one was prepared and tested. The test current condition was defined from the operation pattern of the EMU. The results showed that the prototype can be satisfied with the temperature requirement. In this study, we concluded that the weight of filter reactor could be reduced by about 20 %.

**Keywords** : EMU, Filter reactor, Propulsion

**초 록** 본 논문은 도시철도차량용 필터리액터의 경량화를 목적으로, 필터 리액터의 허용전류밀도를 현재보다 높게 설계함으로써 제품의 경량화 가능성을 다루고 있다. 본 연구를 위하여 허용전류밀도를 높여 20 % 경량화된 시작품을 제작하였으며, 실제 차량 운행 조건을 모의한 부하시험을 실시하였다 시험결과, 기존 제품에 비해 약 15~20 °C 정도의 온도 상승이 나타났지만 허용 온도 기준에 비해 충분한 온도 여유가 있음을 확인하였다. 따라서 차량의 실제 운행 환경을 고려할 경우 충분히 적용 가능할 것으로 판단되며, 현 제품을 20 % 이상 경량화 할 수 있음을 확인하였다.

**주요어** : 도시철도, 필터 리액터, 추진장치

## 1. 서 론

도시철도차량의 주행 효율향상과 에너지 절감을 위해서는 철도 차량 부품에 대한 지속적 경량화 연구가 필요하다. VVVF 추진 도시철도 차량에는 급전선으로부터 추진제어용 인버터에 공급되는 전원의 품질향상을 목적으로 필터리액터가 사용된다. 필터리액터는 차량의 견인모터 다음의 중량을 차지하는 추진장치의 구성품이며, 따라서 경량화가 필요한 부품 중의 하나이다.

† 교신저자: 한국철도기술연구원(cylee@krri.re.kr)

\* 한국철도기술연구원

현재 도시철도 차량에 사용되고 있는 필터리액터는 450 A 정격전류로 설계하고 있으며, 정격전류에서 연속 운전시 포화되는 최대 온도 상승 한계를 성능 기준으로 하고 있다. 그러나 실제 차량의 운행 조건에서는 기준 온도 한계 보다 훨씬 낮은 온도에서 운전되고 있다. 따라서 실제 운행조건에 따른 부하 전류에서 발생하는 상승 온도를 성능 기준으로 할 경우 도체 허용전류밀도 설계사양을 완화 시킬 수 있으며 이에 따른 제품의 경량화가 가능할 것으로 추정된다. 본 연구에서는 기존 제품보다 도체 허용전류 밀도를 높인 경량 시작품을 제작하여 실제 차량 운행 조건을 모의한 부하시험을 실시하고, 실험 결과에 따른 경량화 가능성을 고찰하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 필터리액터 설계 사양 분석

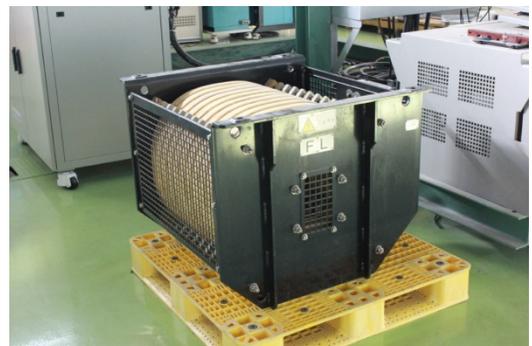
“도시철도용품 품질시험기준”에서 규정하고 있는 국내 도시철도 차량용 필터리액터의 성능 기준은 Table 1과 같다. 철도차량용 필터리액터는 운전전류의 변동에도 동일한 인덕턴스 값을 가지도록 철심이 없는 공심형으로 설계되며, 연속정격전류는 450 A로 규정하고 있다. 부하 운전시 코일에서 발생하는 Joule열의 냉각을 위하여 코일 사이에 공간을 둔 에어덕트형으로 설계하여 차량의 주행에 의해 자연냉각이 되도록 하고 있다. 리액터의 인덕턴스는 8 mH로 규정하고 있으며, 리액터 코일의 내외 직경 및 코일 전체 폭에 의해 결정된다.

코일 절연은 H 중으로서 연속정격전류에서의 코일의 허용 최대온도상승은 150 °C까지로 규정하고 있다. 코일의 허용 최대 온도는 온도상승 시험을 통해 확인하며, 450 A의 정격 전류를 연속으로 운전하여 포화 온도에서 30분이 경과 되었을 때의 값으로 규정하고 있다. 시험은 차량 주행에 따른 자연냉각을 모의하기 위하여 제품의 측면 중앙에서 3 m/s에 해당하는 풍속 조건에서 시험을 실시한다.

코일 권선소재로는 알루미늄 도체를 사용한다. 현재 사용되고 있는 리액터는 허용온도상승 기준을 만족하기 위하여 알루미늄 도체의 전류밀도를 약 3 A/mm<sup>2</sup>가 되도록 설계하고 있다. 이러한 설계조건에 따라 제작된 필터리액터는 약 510 kg의 중량을 가진다. Fig. 1은 현재 사용 중인 필터리액터의 모습이다.

**Table 1.** Requirements of filter reactor for urban EMU

Item	Specification
Type	Coreless type
Cooling	Natural cooling
Inductance	8.0 mH ± 10 %
Rating Current	450 A (Continue)
Rating Voltage	DC 1,500 V
Insulation Class	H Class (Max. 150 °C)
Weight	510 kg ± 10 %

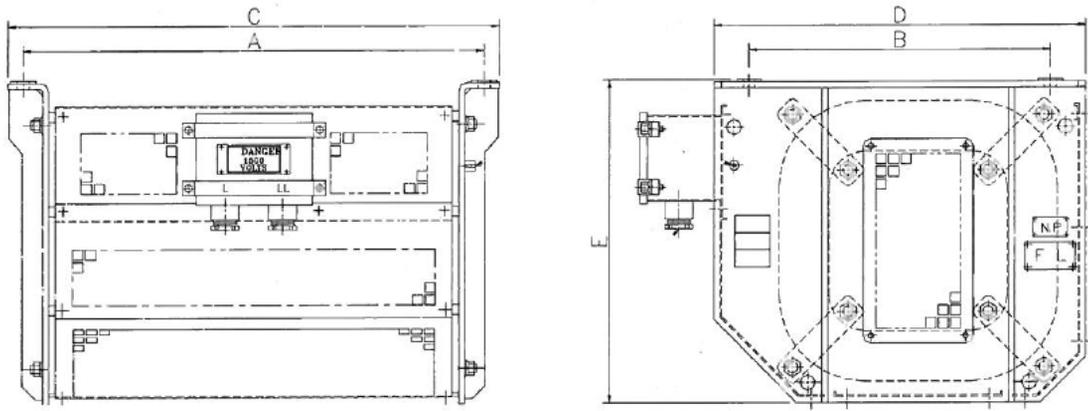


**Fig. 1** Feature of Filter Reactor used in urban EMU

## 2.2. 경량 필터리액터의 설계 및 제작

본 연구를 위해 제작된 경량 필터리액터는 기존 제품 대비 도체의 최대허용전류밀도 설계 기준을  $4.5 \text{ A/mm}^2$ 로 하고, 연속정격 전류는 350 A로 설계하였다. 성능은 Table 1에 제시된 기존 제품의 성능사양 중, 연속정격전류를 제외한 나머지 성능에 부합하도록 제작하였다.

도체허용전류밀도를 기존 설계 기준 대비 약 50 % 높임으로서 리액터 전체 중량의 80 %를 차지하는 도체사용량을 줄일 수 있으며, 따라서 기존 제품 대비 약 20 % 경량화된 395 kg 수준에서 제작되었다.



**Table 2.** Specification of reduced-weight filter reactor

Item	Specification
Dimension	A : 915 mm
	B : 600 mm
	C : 971 mm
	D : 740 mm
	E : 637 mm
Current density	$4.5 \text{ A/mm}^2$
Rating Voltage	350 A (Continue)
Weight	395 kg



**Fig. 2** Prototype reduced-weight filter reactor

## 2.3 실 부하 전류 운전 시험

철도용품 품질기준 규정하는 온도상승 시험은 정격전류를 연속으로 흘렸을 때 제품의 포화 온도를 기준으로 하고 있다. 그러나 실제 도시철도 차량의 운행 조건에 따르면 차량의 가속, 타행, 감속 및 제동 운전에 따라 필터리액터에 흐르는 전류는 주기적으로 변하게 된다. 따라서 품질기준에서 규정하는 연속전류 시험은 실제 차량 주행 패턴에 의해 흐르는 전류보다 더 가혹한 조건이며, 실제 차량 주행 패턴을 고려한 시험 조건의 설정이 필요하다.

실 부하 전류 운전 조건은 Fig. 3과 같이 도시철도차량의 실제 주행 패턴에 따라 필터리액터

에서 측정된 전류 패턴을 고려하여 설정하였다. 실측 전류 패턴은 차량 출발에 따른 가속시 운전전류는 상승하며, 차량의 목표 속도 도달 후 정속 운전시 추진회로에는 전류가 흐르지 않는다. 그리고 감속 및 제동구간에서는 회생제동에 따른 회생전류가 흐르게 되며, 역에서의 정차를 위한 기계 제동 및 정차 중에는 전류가 흐르지 않는다. 실 부하 전류 운전 조건은 실측 전류 패턴과 가장 유사한 주기 및 전류의 크기가 되도록 설정하였다. 또한 피시품으로부터 일정거리에 팬을 설치하여 차량 주행에 따른 자연 냉각을 모의 하였으며, 냉각 조건은 3 m/s로 기존 품질 시험 기준에서 정한 시험 조건을 따랐다. Fig. 4는 시험 장치와 시험 모습을 보여주고 있다. 온도는 리액터 코일 외부 및 내부 표면의 네 지점에 선정하여 온도 센서를 설치하여 측정하였다. 또한 바람에 의한 온도 측정 오차 효과를 보정하기 위해 피시품의 열화상 측정 결과와 비교하였다.

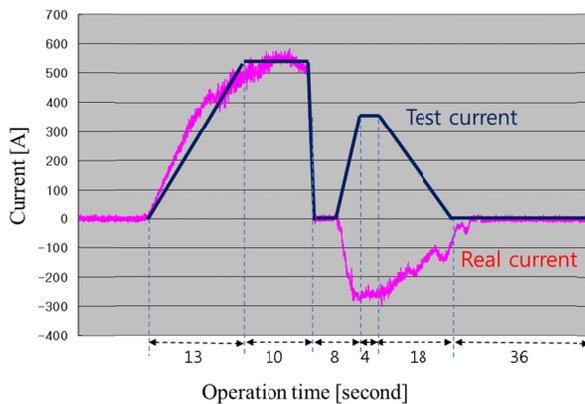


Fig. 3 Test current profile

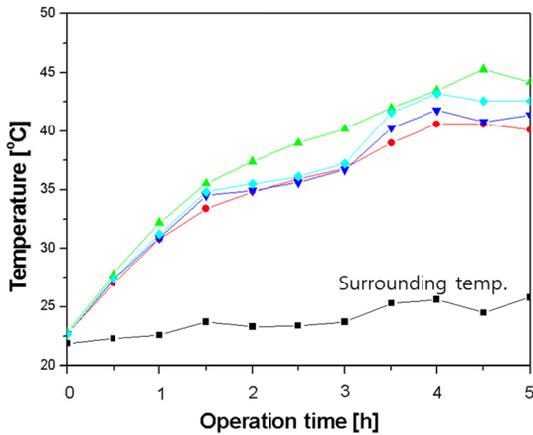


Fig. 4 Setup for load current cycle test

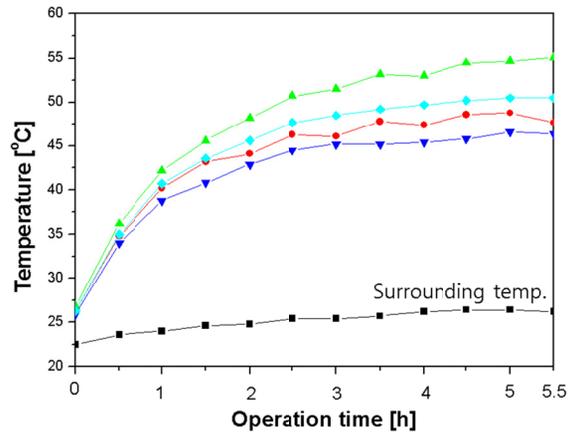
## 2.4 시험 결과

Fig. 5는 실 부하 전류 운전 조건에 따른 온도상승 시험 결과이다. 기존 제품에 대해서도 시험을 실시하여 경량 시제품에서의 결과와 비교하였다. Fig. 5(a), Fig. 5(b)와 같이 온도센서에 의해 측정된 결과에서는 기존 제품의 경우 24 ~ 26 °C의 대기온도조건에서 약 44 °C 부근에서 포화 온도를 나타낸 반면, 경량 시제품의 경우 약 56 °C 에서 온도 포화가 나타났다. 그러나 Fig. 5(c), Fig. 5(d)와 같이 포화 온도에서의 열화상 측정에서는 기존 제품과 경량 시제품에서 각각 약 최대 55 °C 및 75 °C 로 나타났으며, 온도 센서에 의한 결과 보다 약 20 °C정도 높게 나타남을 확인 하였다. 열화상과 온도 센서에 의한 측정의 차이는 바람에 의한 온도센서에서의 측정 오차로 추정되며 따라서 열화상 측정에 의한 결과를 기준으로 성능을 판단하였다.

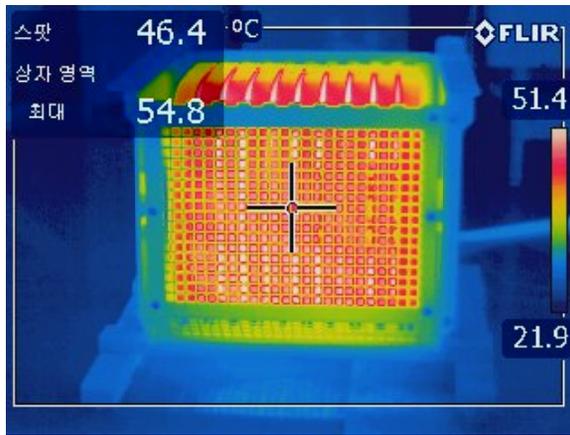
실 부하 전류 운전시험에서는 두 제품 모두 연속부하 운전 시험에서 규정하는 최대 상승 허용 온도인 150 °C를 훨씬 못 미치는 온도에서 운전될 수 있음을 알 수 있다. 만약 최대 사용 대기 온도 조건을 철도용품 품질기준에서 규정하는 온도인 45 °C로 가정한다면, 경량 시제품의 경우 최대 95 °C까지 올라 갈 것으로 추정 되며, 허용 온도 대비 약 50 °C정도의 마진이 여전히 있음을 예측할 수 있다.



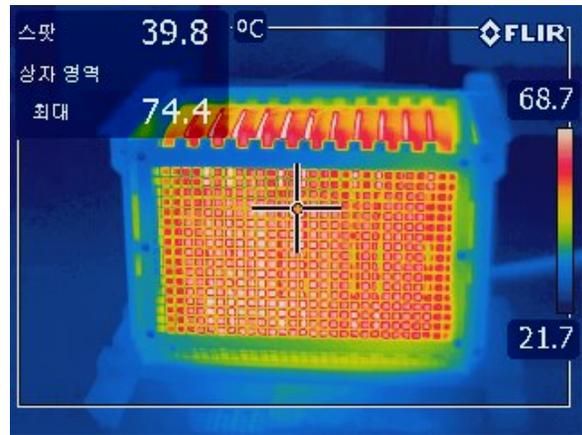
(a) Temperature profile by thermo couples (450 A)



(b) Temperature profile by thermo couples (350 A)



(c) Temperature profile by thermal vision (450 A)



(d) Temperature profile by thermal vision (350 A)

**Fig. 3** Load current test result for filter reactors

### 3. 결론

본 연구에서는 필터 리액터 코일 도체의 허용전류밀도를 기존 제품보다 높은 기준으로 설계한 경량 시작품으로써 실 부하 조건을 고려한 온도상승 시험을 실시하였다. 시험 결과 최대 사용 환경 온도를 고려하더라도 최대 허용 온도 기준 이하에서 운전될 수 있음을 확인하였다. 따라서 리액터 코일 설계에 적용되는 허용전류밀도를 기존 제품 설계 보다 약 50 % 높게 설계하더라도 문제가 없을 것으로 판단되며, 현재 사용되고 있는 제품대비 약 20 % 정도 경량화가 가능할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- [1] 박광복, 정현승, 김종운, “도시철도차량의 시스템 경량화 기술에 관한 연구” 한국철도학회 논문집, pp.2965-2972, 2011.

- [2] “Railway applications – Traction transformers and inductors on board rolling stock”, CEI IEC 60310, pp. 21, 2004.
- [3] “전력용 변압기 - 제2부 : 온도상승”, KS C IEC 60076-2, 2002
- [4] “도시철도용품 품질시험기준 - 전동차용 필터리액터”, KRT-EV-FR001, 2004