

차량용 단열제의 종류에 따른 난연성 평가

Flammability of insulators for railroad vehicles

이덕희* 이철규** 경우성*** 김선옥**** 백민*****

Lee, Duck-Hee Lee, Cheul Kyu Jung, Woo-Sung Kim, Sun-ok Back, Min

ABSTRACT

New materials are being considered for insulator of railroad vehicles. Because people want more environmental material than glass fiber, there are certain needs of finding safe and economical insulating material. We checked the flammability of some kinds insulators such as PE foam, neoprene rubber foam, melamine foam and glass fiber. You could find out the characteristics such as oxygen index, optical smoke density, toxicity index of that insulators.

1. 서론

철도차량은 차내의 열손실을 차단하고, 차량 운행에 의한 외부 소음의 유입을 차단하기 위하여 상당량의 단열 및 폼용재를 삽입하고 있다. 우리나라의 경우 기존에는 KS M 3808 또는 FMVSS 302 기준의 난연 폴리에틸렌 폼 또는 폴리프로필렌 폴리에스테르 등이 주로 사용되어 왔으나 대우 지하철 화재사고 이후 도시철도 차량용 내장재의 화재안전 기준이 강화됨에 따라 새로운 단열재의 적용이 불가피한 상황에 있다. 특히 폴리에틸렌 폼의 경우 기존의 KS M 3808 기준에도 59% 정도나 미흡한 결과를 보여주었다. 불연성 단열재인 유리섬유의 경우 화재측면에서 매우 안전한 재료 특성을 보여주고 있으나 작업성이 좋지 않고 환경 위해 논란이 있을 수 있어 근래에는 알루미늄 막을 활용한 포장상태로 사용되고 있으나 이에 따른 단열 및 차음성능의 하락이 우려된다. 그래도 그라스울에 난연성 접착제를 도포하여 흡입 현상을 개선한 제품은 환경성 논란을 크게 해소하여 선전국에서도 벽체용 단열재로 널리 사용되고 있는 상황이다. 차량의 에어컨 덕트 또는 냉방기 내부의 결로 방지용 단열제는 차내로 흡입되는 공기의 유동과 겹하고 있어 특별한 관리가 요구된다. 이러한 문제로 인하여 최근 기존의 폴리에틸렌 폼이나 유리섬유를 대체할 만한 안전하고, 환경 친화적인 새로운 단열재의 검토가 요구되고 있는 상황이다.

본 연구에서는 기존에 사용되었던 폴리에틸렌 폼과 폴리프로필렌 폴리에스테르를 비롯하여 새로이 검토되고 있는 네오프렌 발포폼과 기타 발포 고무류, 벨라민 폼, 유리섬유 등에 대한 재료별 난연성을 평가하였다. 시험항목으로는 산소지수, 연기밀도, 독성지수 및 화염전파 특성 등이 평가되었다. 단열재의 가장 중요한 성능에 해당하는 단열성 및 차음성 등에 대하여는 추가의 시험 보완이 필요하다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원

** 한국철도기술연구원 주임연구원

*** 한국철도기술연구원 책임연구원

**** 한국철도기술연구원 연구원

2. 본문

2.1 철도차량 운영기관의 단열재 사양

표1에 철도차량 운영기관의 단열재 주요 사양을 수록하였다. 단열재는 단열성능(열전도율) 및 차음성능(흡음율)이 가장 중요하며 기타 유지관리를 위한 인장, 인열강도, 흡수량, 밀도 등의 물성이 요구된다. 난연성의 경우 다른 차량대상재와 마찬가지로 간단한 연소성 시험의 적합 판정을 확인하는 것으로 대체되었다. 표1에 나타낸 주요 기관의 경우 모두 단열재의 재질을 폴리에틸렌으로 규정하였고 해당하는 각 성능 요구치도 재료의 특성값을 반영하여 작성된 것으로 보인다.

표 1. 철도운영 기관의 단열재 주요 요구 사양

	A기관 1호선		B기관 6호선		C기관 1호선		기타
	OPEN CELL	CLOSE CELL	OPEN CELL	CLOSE (F1) + OPEN CELL	OPEN CELL	CLOSE CELL	
재 질	폴리에틸렌		폴리에틸렌		폴리에틸렌		
열전도율 (m/m HRC)	0.031이하	0.038이하	0.037이하	0.037이하	0.038이하	0.031이하	*열도봉 취하시의 경우 - 그라스울 사용
인열강도 (kgf/cm)	1.4이상	0.8이상	1.1이상	1.1이상	0.8이상	1.4이상	*방주기하중-폴리프로필렌-폴리에틸렌 시스레터 사용
난 연 성	자기 소화성	자기 소화성	자기 소화성	자기 소화성	이상 없을 것	이상 없을 것	
인장강도 (kgf/cm ²)	1.8이상	0.9이상	1.5이상	1.5이상	0.9이상	1.8이상	
압축강도 (kgf/cm ²)	0.5이상	0.03이상	0.08이상	0.08이상	0.03이상	0.5이상	*단열재의 난연성 사양은 KCS M 2800R FMVSS 302 III 94HF-1 KSP2271 난연등급 이상 등이 사용됨.
흡수량 (g/cm ²)	0.005이하	0.04이하	0.04이하	0.04이하	0.03이하	0.004이하	
밀 도 (g/cm ³)	0.03이상	0.03이상	0.04이상	0.04이상	0.03이상	0.03이상	
흡음율시험 (a)	-	0.5이상	NRC 0.5이상	NRC 0.5이상	0.5이상	-	
외관검사	양호한 것	양호한 것	표면에 오염 흔적이 없음 것 이물질의 혼입 부착이 없음 것	표면에 오염 흔적이 없음 것 이물질의 혼입 부착이 없음 것	양호한 것	양호한 것	
치수검사	두께 (40±10%)	두께 (10±10%)	두께(20 ± 2%) 폭(100 ± 25) 길이 (3000 ± 25)	두께(25 ± 3%) 폭(100 ± 25) 길이 (2000 ± 25)	두께 (±10%)	두께 (±40±10%)	
기 타	산장유 : 80%	산장유 : 100%	-	-	-	-	

표2에는 대구화재사고 이후에 적용되게될 도시철도차량 방화 안전 단열재의 화재기준(안)을 나타내었다. 이 규정에는 화재특성을 재료의 연소성(산소지수) 평가항목과 연기 유흥성(연기밀도, 가스 특성)으로 구분하여 평가하도록 하였다.

표 2. 신규 도시철도차량 화재안전 기준 입법예고(안)

구 분	산소지수 ISO 4589-2	연기밀도 ASTM E 662	특성 BS 6853 Annex B.2
	LOI	Ds(4min)	R(특성지수)
단열재	40	100	1.6

2.2 단열재의 종류에 따른 화재특성 조사

단열재의 종류에 따른 화재특성을 평가하기 위하여 연기밀도(ASTM E 662), 발열량(ISO 5660-1), 상온 산소지수(ISO 4589-2), 화염전파(ISO 5638-2), 연소가스 독성지수(BS 6853 Annex B2) 시험을 수행하고 그 결과를 정리하였다.

1) 연기밀도(ASTM E 662, Ds)

일반적으로 사용되고 있는 폴리에틸렌 단열재의 경우도 열린 셀(Open Cell)과 닫힌 셀(Closed Cell)이 있는데 열린 셀의 경우 첨가제를 이용한 난연성능 향상이 가능하여 닫힌 셀에 비해 연기밀도가 높게 측정되는 경우가 많았다. 고무 발포재의 경우에도 제품에 따라 편차폭이 매우 큰 것으로 나타나서 첨가제를 이용한 난연성 조절이 다양하게 가능한 제품으로 평가되었다. 폴리프로필렌과 멜라민 폼의 경우 연기특성이 우수하게 나타났으며 유리섬유의 경우는 화염 착화가 발생하지 않았지만 접착제의 연소에 의하여 소량의 연기가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 폴리프로필렌의 경우는 연소와 함께 녹아 내림이 발생하였다.

표 3. 단열재 종류별 연기밀도 시험결과

단열재	Ds max		Ds	
	Ds max	Time(sec)	1.5min	4min
폴리에틸렌 A	400.38	217.00	269.80	393.63
폴리에틸렌 B	202.05	228.00	215.73	233.87
폴리프로필렌	75.3	210.5	6.5	72.5
고무 발포폼	60~400	200~400	-	60~200
멜라민 폼	-	-	5~10	8~20
유리섬유	7.34	1290.0	0.36	0.96

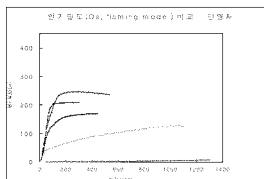


그림 1. 단열재의 종류에 따른 연기밀도 결과

연기특성 만으로만 보자면 폴리에틸렌을 제외한 나머지 제품들이 모두 지하철용 단열재로 사용 가능한 것으로 나타났다. 더불어 유리섬유 적목이나 알루미늄 막을 이용하여 화염 차단벽을 설치할 경우 초기 연기 발생 특성은 더욱 향상될 수도 있다는 것도 확인되었다.

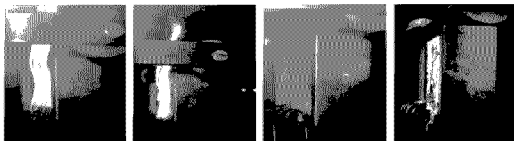


그림 2. 폴리에틸렌, 발포 고무, 유리섬유, 폴리프로필렌(왼쪽부터) 연기밀도 시험장면

2) 발열량(Heat Release Rate, ISO 5660-1, 2)

표4는 25kW/m² 열부하 조건에서의 시험결과를 정리한 것이다. 유리섬유에서 발생한 소량의 연기 및 열량은 단열재의 점착을 위하여 혼합한 점착제의 연소에 의해 발생하였다. 폴리프로필렌의 경우 폴리에틸렌과 비슷한 수준의 발열량을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 유리섬유가 가장 낮은 발열량을 나타냈으며 멜라민 폼이 다음으로 우수한 특성을 나타냈다.

표 4. 단열재 종류별 발열량 시험결과

단열재	Ignition Time (sec)	Total Heat evolved (MJ/m)	Total Smoke Released (m ³)	Heat release rate (kW/m ²)
폴리에틸렌	12.67	10.43	183.40	67.82
유리섬유	-	0.20	6.00	2.73
폴리프로필렌	24.67	12.30	168.30	64.11

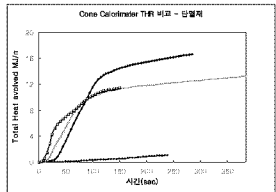


그림 3. 발열량 시험 결과 비교

3) 산소지수(ISO 4589-2)

산소지수 시험은 대형화된 제품의 화재특성을 평가하기에는 어려운 점이 있지만 각 제품에 사용된 기본 재료의 난연성을 평가하는 고전적인 시험방법으로 널리 사용되어 왔다. 폴리에틸렌의 경우 첨가제를 활용한 다양한 제품이 사용되고 있어서 산소지수 시험 값이 넓은 분포에 걸쳐서 나타났다. 고무 발포폼의 경우에도 이와 같은 첨가 작업이 많이 활용됨을 알 수 있었다.

표 5. 단열재 종류별 산소지수 시험결과

구 분	산소지수 (LOI)
폴리에틸렌	23 ~ 29
폴리프로필렌	30 ~ 33
고무 발포폼	30 ~ 47
멜라민 폼	33 ~ 35 (34~50 : 차단막)
유리섬유	90 이상 (40~50 : AL포장용)

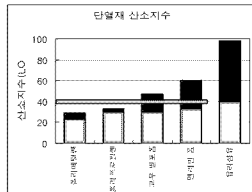


그림 4. 단열재 종류별 산소지수

유리섬유는 인체 유해성 우려로 알루미늄 포장막을 붙여 사용하는데 멜라민 폼과 다른 단열재에서는 화염 차단막의 역할을 하는 알루미늄 막이 오히려 산소지수를 줄이는 역작용을 하고 있었다. 유리섬유 자체는 불연재이지만 접착제와 알미늄막 등을 혼용하는 경우 산소지수는 40 정도까지 내려오기도 하였다. 특히 유리섬유는 섬유밀도가 낮을수록 산소지수 값이 낮게 나타나 제품밀도와 시편면의 밀도를 동일하게 유지하는 것이 중요한 변수가 되었다. 시험결과 재료자체로는 유리섬유와 난연 고무발포폼 등이 차단막을 활용할 경우 멜라민폼도 도시철도기준을 만족할 수 있는 것으로 나타났다.

4) 화염전파(ISO 5658-2)

수직형 화염전파 시험방법을 이용한 시험결과를 아래표에 정리하였다. 폴리에틸렌과 폴리프로필렌은 시편 모두 불꽃에 접촉되자마자 점화가 시작되었다. 폴리프로필렌의 경우는 연기밀도 시험에서와 마찬가지로 시편이 녹아 내리는(dripping) 특성을 나타내었다. 멜라민 폼의 경우 화염의 접화는 없었지만 탄화가 진행되었고 탄화거리를 가만한 CFE는 23.2 정도로 나타났다. 멜라민 폼이 화염이 발생하지 않는 것은 발열량이 적은 것에 기인하는 것으로 판단된다.

표 6. 단열재 종류별 화염전파 특성

구분	점화시간 (sec)	연소거리 (mm)	CFE (kW/m ²)	Q _{th} (MJ/m ²)
폴리에틸렌	1~2	470~520	15~8	1.7~0.3
폴리프로필렌	1	640	3.79	0.297
멜라민폼	점화안됨	-	23.2 (탄화)	-
유리섬유	점화안됨	-	-	-

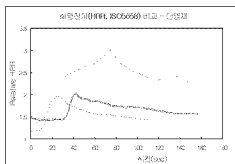


그림 5. 단열재 화염전파 연소 특성

5) 독성평가(BS 6853 Annex B.2)

독성가스 분석은 캔버법으로 시편을 연소시켜 채집된 가스로부터 CO, CO₂, NO_x, SO₂, HCl, HCN, HBr, HF의 연소가스를 정량 분석하여 기준값과 비교하는 지수화 방법을 사용한다. 단열재의 독성지수 시험결과를 표7에 나타내었다. 산소지수와 마찬가지로 첨가제의 활용에 의한 다양한 제품군이 나오는 폴리에틸렌, 난연 고무 발포폼의 경우가 넓은 분포를 나타내었다. 유리섬유와 멜라민 폼이 상대적으로 우수한 값을 나타내었으며 폴리에틸렌 폼의 독성지수가 2를 상회하는 값을 나타내어 상대적으로 많은 가스가 발생하는 것으로 조사되었다. 독성의 경우 모든 종류의 제품에서 도시철도 기준을 만족하는 제품이 생산 가능한 것으로 평가되었다.

표 7. 단열재 종류별 독성지수 분포

구 분	독성지수 (R)
폴리에틸렌	0.8 ~ 2.5
폴리프로필렌	0.6 ~ 0.9
고무 발포폼	0.2 ~ 1.5
멜라민 폼	0.15 ~ 0.5
유리섬유	0.1 ~ 0.6

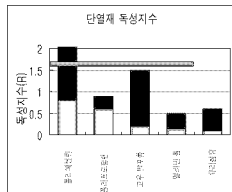


그림 6. 단열재 종류별 독성지수

3. 결과고찰

본 연구를 통하여 국내에 검토되고 있는 단열재 제품군의 종류별 화재 특성을 평가하여 보았다. 한정된 제품군으로부터 채취된 시편에 대한 평가에 국한되어 한계가 있었지만, 유리섬유이외에도 차단막을 붙인 멜라민 폼과 난연 고무 발포폼이 도시철도용 화재안전기준(안)의 모든 항목을 만족하는 재료로 사용될 수 있음을 확인하였다. 그러나 가장 효율적인 최적의 단열재 선정을 위하여 각 재료의 단열성능과 흡음을 유지관리 특성, 정상상태에서의 유해물질 방출 특성 등에 대한 평가가 보완되어야 할 것이다.

참고문헌

1. ISO 5659-2, "Determination of optical density by a single-chamber test"
2. ASTM E 662, "Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials"
3. NFPA 130, "Fixed Guideway Transit System"
4. BS 6853, "Code of practice for fire precautions in the design and construction of passenger carrying trains"