

# 철도차량 화재위험도 평가 사례 분석

## A case study of fire risk analysis for train coach without gangway doors

이덕희<sup>†</sup>      김치훈\*      김종훈\*\*      박원희\*      정우성\*  
Duck-Hee Lee    Chi-Hun Kim    Jeong-Hun Kim    Won-Hee Park    Woo-Sung Jung

### ABSTRACT

A case study of fire risk analysis was conducted for train coach which has no gangway doors between coaches. The analysis boundary was limited to the time of outgoing from the coaches for it was train fire risk analysis. ASET(available safe egress time) and RSET(required safe egress time) methodology was used for calculating the dead. 4 liters of gasoline and cable fire at the electric cabinet and the standard fire of EN 45545 were selected for the fire sources. The fire were considered to be occurred at 3 different locations in the car. The train had 3 cases of driving scenarios. The result of all event was summarized for remained tunnel and station egress step.

### 1. 서론

현재 국내에서 신규 제작되는 철도차량은 국토해양부에서 부령으로 제정한 철도차량안전기준에 관한 규칙의 제6조 2항과 철도차량안전기준에 관한 지침(국토해양부 고시 제2007-278호) 별표12로 요구하고 있는 철도차량 위험도 평가 기준의 적용에 따라 위험도평가를 수행하여야 한다. 본 연구에서는 철도차량에서 검토되어야 할 주요사고인 화재사고에 대하여 화재위험도 평가를 수행한 사례를 고찰하자 한다. 철도차량에 대한 화재위험도 분석 절차는 우선 화재위험요인을 분석하고 이로부터 화재사고로 진전될 수 있는 사고 시나리오를 구성하는 단계에서 시작된다. 안전기준 지침의 별표에서는 화재위험도 평가에 관하여 화재발생 시나리오, 화재의 규모, 전기화재 안전기능, 감지 및 경보체계, 화재전파의 차단, 탑승자의 대피유도, 비상탈출 지원 설비에 해당하는 8개항에 대하여 고려하도록 하고 있으며, 사고결과의 심각도 산출에는 사고 통계를 이용한 사고영향분석 또는 전산화재모사와 실물(모형)화재시험을 이용할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 화재 및 피난 시뮬레이션을 이용한 방법을 사용하였다. 사망자의 산정을 위해서는 각 사고 시나리오에 따라 요구되는 화재시뮬레이션과 피난시뮬레이션을 이용하여 안전피난허용시간(Available Safe Egress Time)과 안전피난필요시간(Required Safe Egress Time)을 구하고 이를 비교하여 탈출의 성공여부를 판단하는 전통적인 방법을 사용하였다. 일반적인 화재위험도 분석은 피난 경로 전체가 포함되지만 본 연구에서 평가하고자 하는 분석범위는 철도차량에 국한하였기 때문에 승객이 철도차량으로부터 탈출하는 순간까지로 한정하였다.

### 2. 본론

본 연구에 사용된 대상차량은 고무차륜 무인 경량철도차량이다. 이 차량은 폭이 2.4미터이고 높이가

† 책임저자 : 한국철도기술연구원, 선임연구원, 정회원  
E-mail : dhlee27@krri.re.kr  
TEL : (031)460-5371 FAX : (031)460-5279  
\* 한국철도기술연구원 연구원, 정회원  
\*\* 경민대학, 정회원



이 때 사건 시나리오 중 대표사건으로 처리될 수 있는 경우는 축약하여 발생 확률에 반영하였고, 중복 사항이나 발생확률이 현저히 낮아서 제외 가능한 시나리오는 분석 대상으로 포함시키지 않았다. 정리하자면 화재발생 위치는 승강장 화재-승강장 피난을 포함하여 4가지 경우로 분류하였고, 열차편성에서 화재의 위치는 선단과 중앙차량으로 차량 내 화재위치는 외부 문 앞과 연결통로 앞으로 분류하였다.

표 1. 철도차량 화재/피난 요소 분류

대분류		중분류		소분류		설정확률		
1	화재발생위치	1-1	구간위치	1-1-1	역사 승강장	0.25		
				1-1-2	지하구간	0.75		
				1-1-3	고가구간			
				1-1-4	지상구간			
		1-2	편성차량위치	1-2-1	최선단차량	0.33		
				1-2-2	중간차량	0.33		
				1-2-3	최하단차량	0.33		
				1-2-4	기타 특정 차량	-		
		1-3	차량위치	1-3-1	외부문 앞	0.25		
				1-3-2	연결통로문 앞	0.25		
				1-3-3	차량 구석	0.25		
				1-3-4	의자	0.25		
				1-3-5	차량 외부	-		
		2	가연물 특성	2-1	1차 가연물	2-1-1	휘발유 4L*	0.1
						2-1-2	유입가연물	0.7
2-1-3	전기설비					0.2		
2-2	2차 가연물			2-2-1	내장재	화재해석 결과반영		
				2-2-2	의자			
				2-2-3	유입가연물			
				2-2-4	타 차량 구성품			
				2-2-5	착화없음			
3	경보/소화특성			3-1	경보	3-1-1	감지기	-
		3-1-2	승객			1		
		3-2	소화	3-2-1	소화기	1		
				3-2-2	소화장치	0		
4	피난특성	4-1	인적특성	4-1-1	정상속도 보행자	피난해석 결과반영		
				4-1-2	고령자			
				4-1-3	장애인			
		4-2	인적상태	4-2-1	정상인지상태	피난개시 8.8초		
				4-2-2	비정상인지상태	-		
		4-3	피난경로	4-3-1	즉시 탈출	승강장화재		
				4-3-2	연결차량 경유	선로화재		

## 2.2. 차량화재 시뮬레이션 수행 결과

화재시뮬레이션 프로그램으로 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발된 FDS V. 5.4(Fire Dynamic Simulator)를 활용하였다. 화원은 4ℓ의 가솔린(Gasoline)을 연료의 질량 감소율을 고려하여 연소시간을 100초로 하였고 화원 면적은 0.5m<sup>2</sup> 설정하였다. 이때 단위면적당 최대 열방출율은 2.185MW/m<sup>2</sup>로 설정하였다. 표준화원의 경우 10분까지는 CEN/TS 45545-1 Annex A의 화원 곡선을 따르고 이후 매 2분마다 50kW씩 상승시켰다. 추가로 경량철도차량의 전기적 화재의 발생 위험성을 분석하기 위해 전력, 통신 케이블 등에서 발생할 수 있는 케이블 화재시나리오를 구성하였다. 케이블 화원은 ISO 5660(콘 칼로리미터법) 시험을 통해 분석한 발열량을 이용하여 실제 차량에 사용되는 비율을 적용해 케이블에서 발생 가능한 화원을 구성하였다. 표2는 화재해석을 위하여 분류된 화재해석 시나리오 분류표이다. 이차 가연물인 내장재는 알루미늄 벽체와 모켓커버와 우레탄폼 쿠션 의자, 합성고무 바닥재 등의 열방출율, 밀도, 비열, 열전도율, 발화온도 등의 물성치를 실험결과와 문헌값을 인용하여 입력하였다.

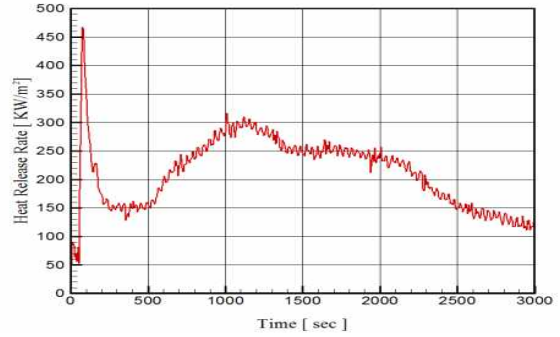
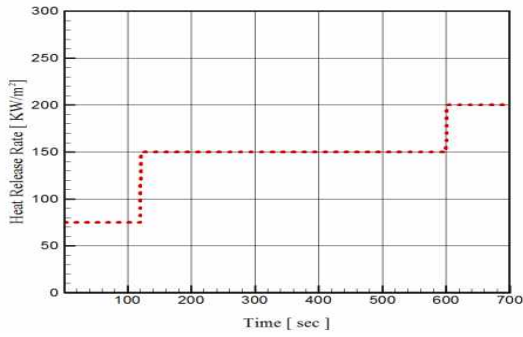


그림 2. 표준화원(왼쪽) 및 전선의 발열량(오른쪽) 적용 곡선

표 2. 화재해석 시나리오 분류표

차 량	화원 위치	화원 종류	문 개방 (우측문)	소화 (1분)	화재해석 분류번호
선단차량	문 앞 의자	가솔린 4ℓ	초기 개방	실패	F-1
			1분후 개방	실패	F-2
			2분후 개방	실패	F-3
		표준화원	초기 개방	성공	F-4
				실패	F-5
			1분후 개방	성공	F-6
				실패	F-7
			2분후 개방	성공	F-8
				실패	F-9
	연결 통로	가솔린 4ℓ	초기 개방	실패	F-10
			1분후 개방	실패	F-11
			2분후 개방	실패	F-12
		표준화원	초기 개방	성공	F-13
				실패	F-14
			1분후 개방	성공	F-15
				실패	F-16
			2분후 개방	성공	F-17
				실패	F-18
		전선 화재	초기 개방	성공	F-19
				실패	F-20
			1분후 개방	성공	F-21
				실패	F-22
			2분후 개방	성공	F-23
				실패	F-24
중간차량	문 앞 의자	가솔린 4ℓ	초기 개방	실패	F-25
			1분후 개방	실패	F-26
			2분후 개방	실패	F-27
		표준화원	초기 개방	성공	F-28
				실패	F-29
			1분후 개방	성공	F-30
				실패	F-31
			2분후 개방	성공	F-32
				실패	F-33
	연결 통1로	가솔린 4ℓ	초기 개방	실패	F-34
			1분후 개방	실패	F-35
			2분후 개방	실패	F-36
		표준화원	초기 개방	성공	F-37
				실패	F-38
			1분후 개방	성공	F-39
				실패	F-40
			2분후 개방	성공	F-41
				실패	F-42
		전선 화재	초기 개방	성공	F-43
				실패	F-44
			1분후 개방	성공	F-45
				실패	F-46
			2분후 개방	성공	F-47
				실패	F-48

그림 3은 각 해석에 적용된 화원의 위치를 나타내며, T1 - T6는 차량별 실내 온도 및 연층높이를 계산하는 위치이다. 화재 해석 시 창문은 800℃ 도달한 경우 개방하여 실제 화재현상에서의 환기조건 변화를 모사하도록 설정하였다.

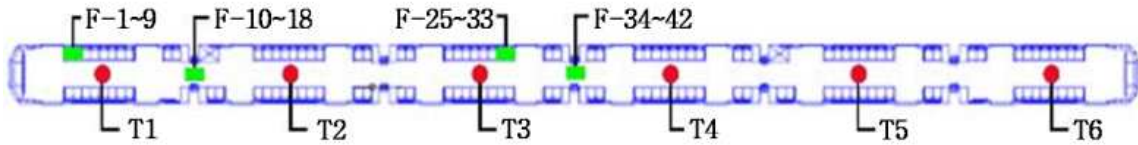


그림 3. 시나리오별 화원 및 온도측정 위치(T1~T6)

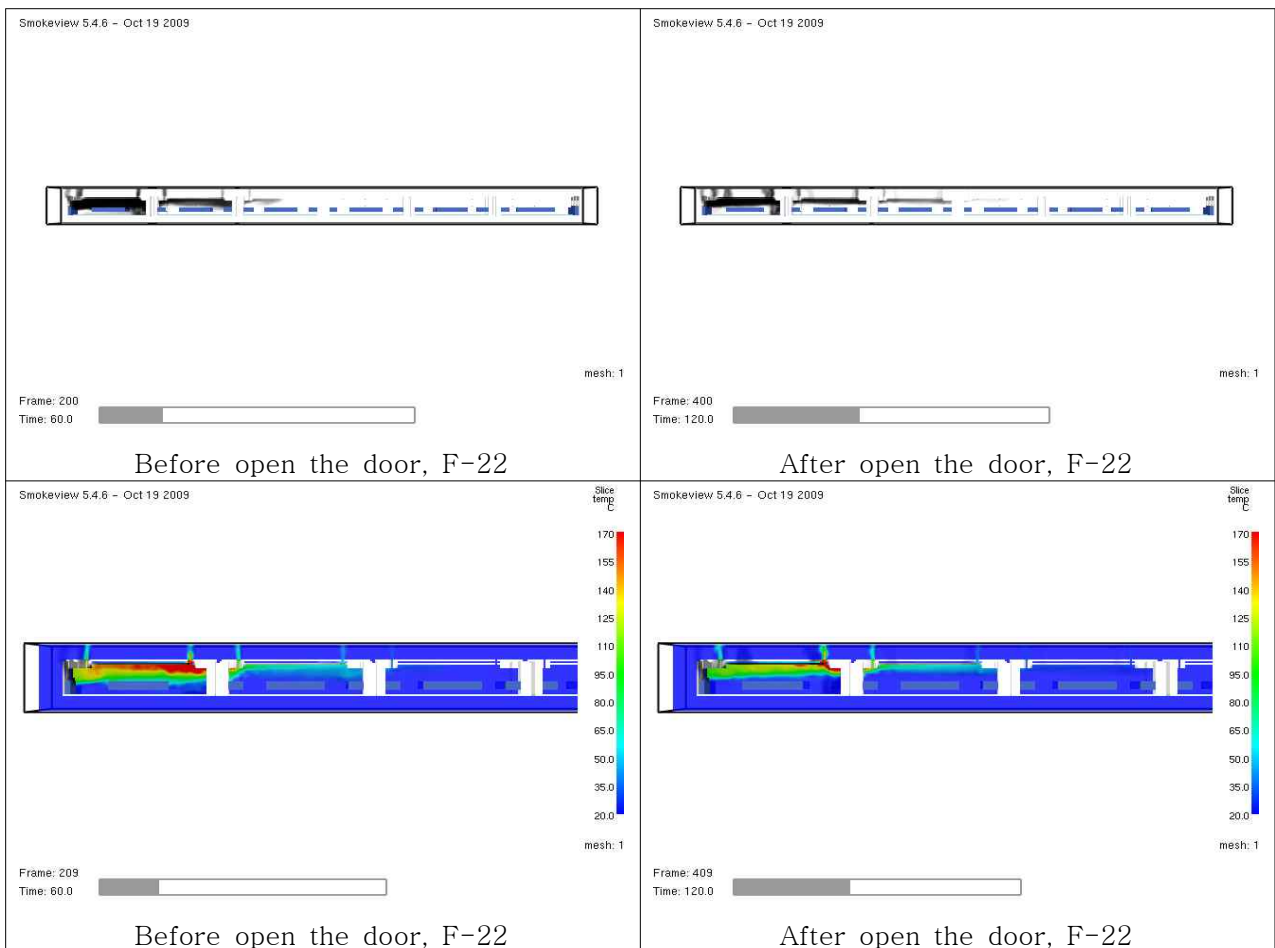


그림 4. 화재시나리오 F-22의 해석 결과

사망자 산정을 위한 한계거주조건은 섭시 100도 및 연층하강 높이로 정하였으며 한계조건에 노출된 이후 2분이 경과한 경우 피난 불능 상태가 되어 구난 조건이 없는 경우 사망 처리하는 것을 기준으로 계산하였다. 이때 기준 높이는 승객이 보행조건이 아니라 차량 출입문에 정체된 상태로 차량 내에서 연소가스의 열기류를 앉은 자세로 회피할 것을 감안하여 1m 높이를 기준으로 평가하였다. 해석결과 연층높이 도달시간이 한계온도 도달 시간에 비하여 빠른 것으로 나타났다. 표3에는 주요 시나리오에 대하여 연기층이 1m 이하로 낮아진 시간을 표시하였다. 해석결과를 통하여 본 결과 대부분의 시나리오에서 발화원 인근 차량에서 신속하게 연층이 낮아졌으나, 2분간 주행한 경우를 제외하면 도어 개방에 따른 연층의 재상승에 의하여 연층이 1m 이하로 유지된 시간은 대체로 120초 이하로 나타났다.

표 3. 주요 시나리오별 연층높이가 1m에 도달한 시간

구분	F-2	F-3	F-11	F-12	F-16	F-18	F-22	F-24	F-26	F-27	F-35	F-36	F-40
T1	-	*114 ~141	8 ~300	8 ~300	20 ~76	15 ~145	22 ~67	19 ~129	*56 ~83	44 ~136	34 ~81	35 ~137	-
T2	*25 ~44	-	*9.3 ~62	*9 ~128	*31 ~63	28.2 ~124	*50 ~62.7	*49 ~122	*21 ~36	-	*16 ~60.6	16.8 ~137	*48 ~67
T3	*44 ~66	48 ~124	*18 ~63	*21.6 ~125	-	*103 ~120	-	*80 ~125	-	-	7 ~61	7 ~158	*18 ~62
T4	-	-	*50 ~67	*51 ~125	-	-	-	-	-	-	11 ~61	9 ~123	26 ~64
T5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*56 ~60	59.4 ~122	-
T6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*54 ~68	53 ~140	-

\* '객차내의 연기층이 일부만 도달(50%적용), 연기층 도달시간~배기로 인한 연층 상승 시간

### 2.3 승객 피난 시뮬레이션 수행 결과

피난 모델의 차량에 탑승하는 피난인의 남녀는 동일비율로 설정하였다. 인구특성을 고려하여 65세 이상 고령자의 비율은 8.7%, 지체장애인의 비율은 1.9%로 설정하였다. 피난개시시간의 산정을 하는 방법은 화재의 감지시간, 감지 후 수신반으로 전달되는 시간, 수신반 전달 후 경보장치를 작동시키는 시간, 경보를 들은 후 판단하여 피난을 시작하는 시간을 각각 구하는 방법이 있으나 차량화재에서는 화재발생 차량의 경우 화재발생 즉시 또는 매우 짧은 시간에 그 사실을 알게 될 가능성이 높다. 또한, 대상 차량은 차량 사이의 출입문이 없어 화재 발생 사실에 대한 통보와 인지 확산이 매우 신속할 것으로 예상되므로, 경보의 발령이전에 화재사실을 알게 될 가능성이 높다. 그러한 이유인지 일본의 지하철 피난안전성 검토를 위한 절차에는 피난개시시간에 대한 고려가 없다. 피난 검증법에서의 거실피난개시시간은 다음의 수식으로 계산된다. 이 수식은 화원에서 화재가 발생하고 연기와 냄새가 퍼지는 시간을 고려하여 제안된 것이다. 비화재실의 피난개시시간은 화재실의 피난개시시간에 2배로 선정하였다.

$$t_{start} = 2\sqrt{A_{area}} \quad \text{식 (1)}$$

$t_{start}$  : 피난개시시간 (sec),  $A_{area}$  : 당해거실의 바닥면적 ( $m^2$ )

표 4. 피난개시 시간

대 상		화재 인지 및 피난개시시간	정차 및 출구개방 소요시간
승강장 정차	화재 발생 차량	8.8 sec	-
	비화재발생 차량	17.6 sec	-
선로정차	화재 발생 차량	8.8 sec	30sec, 60sec
	비화재발생 차량	17.6 sec	30sec, 60sec
승강장 이동 후 정차	화재 발생 차량	8.8 sec	120sec
	비화재발생 차량	17.6 sec	120sec

피난인의 이동속도를 계산하기 위한 보행속도는 일본에서 제시된 데이터를 기초로 설정하였다. 선로 정차시 차량 외부로 내려가는데 소요되는 시간은 일반인의 경우 1.17초, 고령자와 장애인의 경우 8.43초로 설정하였다. 위의 내용에 대한 근거와 정체시간의 산정, 최대 체류가능 인원의 산정 등의 자료

는 참고문헌1에 상세하게 기술하였다. 표6은 피난해석을 위하여 분류한 시나리오 분류표이다. 승객수는 피크시간에 504명 일반시간에는 정원인 316명을 기준으로 분석하였다.

표 5. 인원 특성

재실자	보행속도 (m/s)		개인당 요구 면적 (m <sup>2</sup> /person)
	수평부분	계단부분	
고령자	0.7	0.4	0.36 (0.6m X 0.6m)
장애인 (휠체어 사용자)	0.5	0.2	1.08 (1.2m X 0.9m)
일반인	1.0	0.5	0.36 (0.6m X 0.6m)

표 6. 피난해석 시나리오 분류표

승객수	차 량	화원 위치	피난위치	피난해석 분류번호
피크 시간	선단차량	문 앞 의자	승강장-승강장(즉시피난)	E-1
			선로-승강장(1분지연)	E-2
			선로-승강장(2분지연)	E-3
			선로-선로(1분지연)	E-4
		연결통로	승강장-승강장(즉시피난)	E-5
			선로-승강장(1분지연)	E-6
			선로-승강장(2분지연)	E-7
			선로-선로(1분지연)	E-8
	중간차량	문 앞 의자	승강장-승강장(즉시피난)	E-9
			선로-승강장(1분지연)	E-10
			선로-승강장(2분지연)	E-11
			선로-선로(1분지연)	E-12
		연결통로	승강장-승강장(즉시피난)	E-13
			선로-승강장(1분지연)	E-14
			선로-승강장(2분지연)	E-15
			선로-선로(1분지연)	E-16
일반 시간	선단차량	문 앞 의자	승강장-승강장(즉시피난)	E-17
			중간차량	E-18
			선로-승강장(2분지연)	E-19
			선로-선로(1분지연)	E-20
		연결통로	승강장-승강장(즉시피난)	E-21
			선로-승강장(1분지연)	E-22
			선로-승강장(2분지연)	E-23
			선로-선로(1분지연)	E-24
	중간차량	문 앞 의자	승강장-승강장(즉시피난)	E-25
			선로-승강장(1분지연)	E-26
			선로-승강장(2분지연)	E-27
			선로-선로(1분지연)	E-28
		연결통로	승강장-승강장(즉시피난)	E-29
			선로-승강장(1분지연)	E-30
			선로-승강장(2분지연)	E-31
			선로-선로(1분지연)	E-32

피난해석에는 영국의 에딘버러 대학에서 개발된 시플렉스(Simulex)를 사용하였다. 이 모델은 차량에서 선로로 이동하는 구간의 모델링이 불가능하기 때문에 계단을 이동하는 것으로 등치하여 모델링 하였다. 그림 5는 피난 시나리오 중 E-3의 피난 경로를 표시한 것이며, 차량이 정지하는 2분 동안 승객이 이동한 것을 고려한 시플렉스의 인원배치 상황을 그림 6에 나타내고 피난 해석 결과를 표 7에 나타내었다. 이와 같은 방법으로 표 6의 분류기준에 따라 피난해석을 수행하였다.

### Case 3

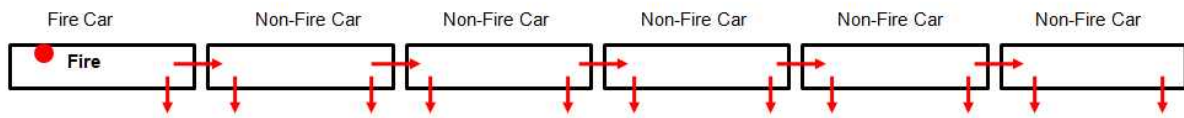


그림 5. 피난 시나리오 E-3 피난경로

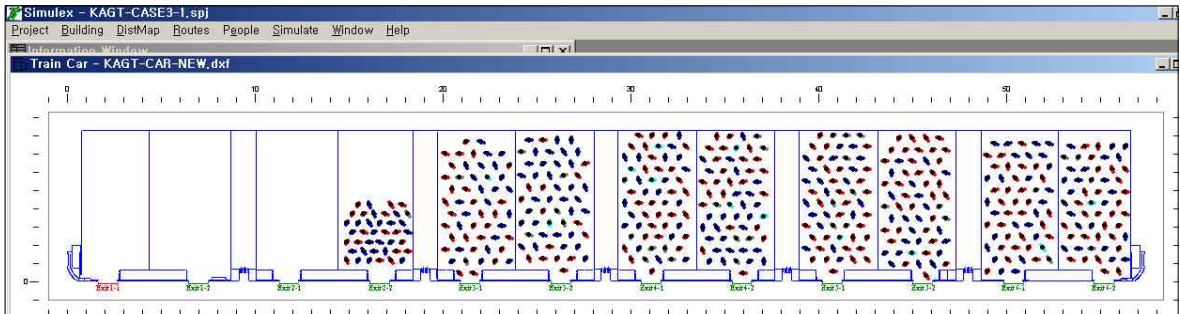


그림 6. Simulex 인원배치 상황

표 7. 피난 시나리오 E-3 차량별 최종 피난시간

차량	차량 인원	Door No.	N(People)	Simulex 예측시간	문 별 최종피난시간 (120초 포함)
1	0	DW1-1	-	-	-
		DW1-2	-	-	-
2	40	DW2-1	-	-	-
		DW2-2	40	30	150
3	109	DW3-1	54	40	160
		DW3-2	55	40	160
4	120	DW4-1	60	42.5	162.5
		DW4-2	60	42.5	162.5
5	120	DW5-1	60	40	160
		DW5-2	60	40	160
6	115	DW6-1	58	42.5	162.5
		DW6-2	57	35	155

## 2.4 위험도 계산

화재시뮬레이션을 통한 안전피난허용시간을 산정하는 기준은 앞에 설명한 바와 같이 1m 높이에서 섭시 100도 또는 연층도달 시간으로 정하였다. 사망산정은 한계조건에 노출된 이후 승객이 인내할 수 있는 노출한계시간을 2분으로 산정하여 이를 초과한 경우 피난 불능 상태가 되어 사망 처리하는 것을 기준으로 하였다. 또한 30초가 경과한 이후 피난한 경우는 경상, 1분이 경과한 이후 피난한 경우는 중



상으로 계산하였으며 10명의 경상자는 1명의 중상자로, 10명의 중상자는 1명의 사망자로 등가 처리하여 계산하였다. 이와 같은 방식으로 당초 선정된 80개의 사고 시나리오에 대한 위험도를 계산하여 그림 7과 같이 분류하고 각 구간화재의 위험도 값을 합산한 결과를 표8과 표9에 나타내었다.

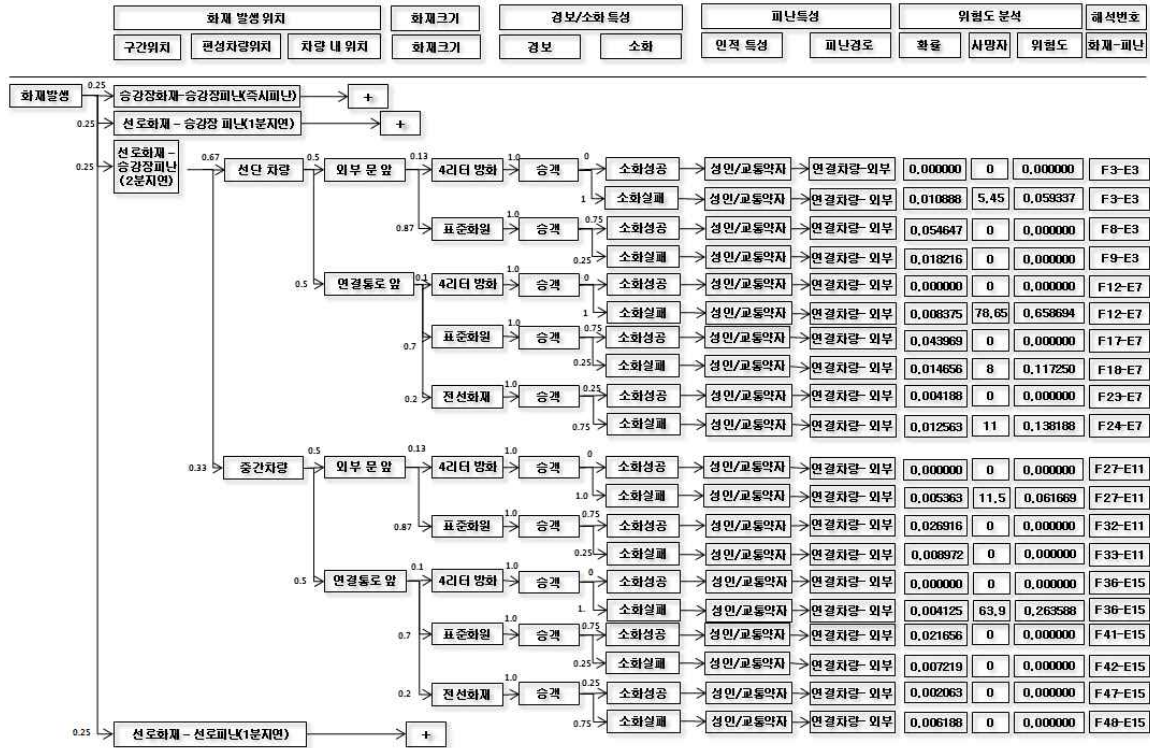


그림 7. 선로화재-승강장 피난(2분지연) 케이스의 위험도 계산결과

본 연구의 분석대상인 경량철도의 경우에는 승객이 많지 않고 강화된 화재안전기준에 따라 난연등급이 높은 내장재를 사용한 이유로 의자를 제외한 이차 가연물의 발화가 나타나지 않았으며, 대체로 사망 발생조건이 성립하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 4리터 방화와 표준화원에 의한 연기 확산 조건에서 차량이 승강장으로 이동하거나 또는 선로에 비상정차를 한 경우에는 승객의 신속한 대피가 지연되어 다수의 사망자가 발생하였다. 이와 같은 결과를 정리하면 화재발생을 전제로 피크시간에는 1.913명의 사망자가 발생하였다. 교통통계연보의 여객차량 화재사고 발생률을 고려하여 계산한 경우는 피크시간에 0.02488/10<sup>6</sup>tr.km의 사망자가 발생할 수 있는 것으로 계산되었다.

표 8. 화재 위험도 평가표

구 분	화재-피난 조건	위험도(사망자)		비고
		피크시간	일반시간	
화재발생	승강장화재-승강장피난(즉시피난)	0.000000	0.000000	
	선로화재-승강장피난(1분지연)	0.000000	0.000000	
	선로화재-승강장피난(2분지연)	1.298724	0.232560	
	선로화재-선로피난(1분지연)	0.614496	0.068278	
합 계		1.91322	0.300838	

표 9. 화재발생률을 고려한 화재 위험도 계산결과

화재발생률(여객)	화재발생 조건부 화재 위험도(사망자)		화재 위험도(사망자)		비고
	피크시간	일반시간	피크시간	일반시간	
0.013건/10 <sup>6</sup> tr-km	1.91322	0.300838	0.02488/10 <sup>6</sup> tr-km	0.00391/10 <sup>6</sup> tr-km	

현재 국내에는 위험도 평가 결과의 적절성에 대한 성능기준이 정해지지 않은 상태이다. 다만, 본 연구에서 적용한 화재 사고시나리오를 통하여 분석한 결과로는 홍콩의 잠재적 위험시설(Potentially Hazardous Installation)에 적용되는 확률-사망자(Fatality-Number) 곡선의 허용수준에 비하여 다소 높은 위험수준을 나타내는 것으로 분석되었다. 이는 초기 화원으로부터 대량의 연기확산이 있으나 차량의 이동이나 선로로의 하차에 요구되는 시간으로 인하여 피난이 지연되는 시나리오에서 의해서 나타나는 현상이다. 따라서 차량간 출입문이 없는 광폭 갱웨이 차량의 경우는 화재가 발생한 차량에서 인근차량으로 연기가 확산되지 않도록 연기전파를 차단할 수 있는 개선 대책이 요구된다.

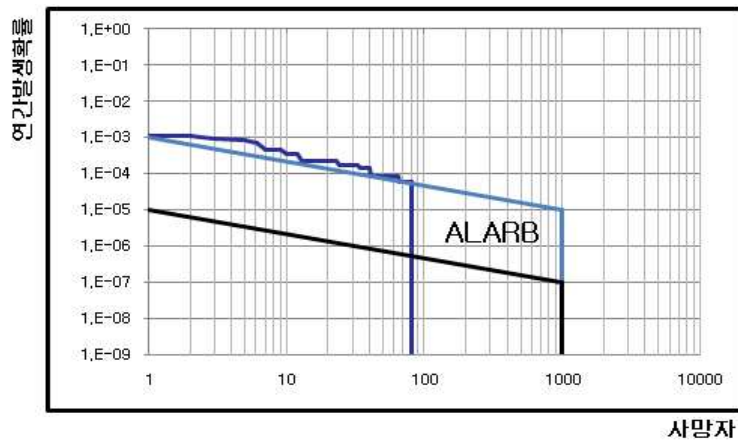


그림 8. 확률-사망자(F-N) 곡선을 이용한 위험도 결과 분석

### 3. 결론

차량 간 출입문이 없는 경량구조의 철도차량 모델에 대하여 화재 및 피난 모델링을 이용한 화재위험도 평가를 수행하고 결과를 분석하였다. 다수의 사망자가 발생한 사고 시나리오를 확인하여 화재 차량으로부터 인근차량으로의 연기전파를 차단할 수 있는 개선대책이 요구됨을 분석하였다. 다만, 본 연구에 적용된 사고 시나리오의 분기확률은 엔지니어링 추정에 의하여 설정되었으며 케이블 화원과 화재해석의 이차 가연물인 내장재의 물성치 등은 유사재료의 실험치와 문헌값에 의존한 한계가 있음을 밝힌다.

### 참고문헌

1. 이호용, 이덕희 외, “무인경량전철시스템 RAMS 향상연구” 한국철도기술연구원 2009년도 연구보고서
2. 최원일, 최정환, 문연오, 김선홍, 유호식 “고속철도 터널의 정량적 위험도 분석(QRA)을 위한 세부기준에 관한 고찰” 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제18권 제6호, pp.393 - 407, 2008
3. 국토해양부 “철도차량안전기준에관한지침, 별표12”, 국토해양부 고시 제2007-278호.
4. Fire Safety Design of Apartment Building - Japanese Case Study, 7th International Conference on Performance Based Codes and Fire Safety Design Method. 2008