원전 구조물의 바닥 마감재료와 도장재료의 연소성능평가 연구

Combustible Performance of Floor Finishing Materials and Coating Applied to Nuclear Power Plants

권인규*

Kwon, Inkyu*

Abstract

Finishing construction materials applied to nuclear power plants and other attached structures are manufactured domestically; however, their fire-related performance has not yet been clarified, and data exist only for common materials with general purposes. Finishing construction materials must meet the requirement of Nuclear Regulatory Commission (NRC), which is regarded as a global standard in the nuclear power plant industry. In this study, to support data when a new guideline for evaluation of fire safety in nuclear power plant and the attached structures thereof are prepared, the finishing materials on the floor and the coating applied onto the floor and other portions were selected and tested using related standards of two nations. The results showed that there were differences in the manner of evaluation and testing. Moreover, certain criteria did not meet Korean standards. Nevertheless, most criteria were satisfied with testing methods suggested by the NRC.

Key words : Nuclear Power Plant, Floor Finishing Materials, Coating, Non-combustible

요 지

국내에서 설계, 시공되는 원전 구조물과 이의 부속 건축물에 적용되는 바닥재와 도장재는 대부분 국내산이나, 화재 발생 시의 안전성 평가에 관한 자료는 국내 관련 시험규격에 의한 일부 자료를 제외하고는 거의 전무한 수준이다. 특히 원전 구조물의 설계와 시공분야에 무유형의 영향력을 가진 미국 NRC에서 요구하는 마감재료의 불연성능에 대한 자료와 이를 토대로 작성된 안전지침은 아직 요원한 수준이다. 따라서 본 연구에서는 국내 설계 원전 구조물과 부속 건축물의 화재 안전성능 확보 가이드라인 구축 요소자료 확보를 목적으로 국내 설계 원전 구조물에 적용된 바닥 마감재료와 도장재료를 대상으로 국내와 미국의 기준에 따라 연소성능평가를 수행하였으며, 국내와 미국의 마감재료 불연성능 기준의 차이점과 각각에 대한 성능평가 결과를 제시하였다.

핵심용어 : 원전 구조물, 바닥 마감재료, 도장재료, 불연재료

1. 서 론

건축 구조물에서의 화재는 특히 마감재로 인한 화재의 경우, 유독가스와 연기의 대량 발생 및 높은 열에너지의 방출로 인한 재산자의 이용자의 인명피해와 구조물의 성능 저하를 유발시킬 수 있는 잠재적 재난의 성격을 띠고 있으며, 그 발생 빈도수와 위험성은 점차 확대되는 경향을 보이고 있다.

특히 원자력 발전소관련 구조물(이하 원전 구조물) 및 원전 구조물의 부속 건축물과 같은 특수 구조물에 적용되는 내부 마감재로 인한 화재 위험성에 대해서는 마감재료 연소 성능 평가시험법의 제한성과 시험평가 자료의 미흡적으로 크게 인식되지 못하는 문제점을 안고 있다.

마감재료의 연소성능에 관련된 논문으로서는 Cho et al. (2012) 등에 의한 마감재료 연소가스의 독성평가 연구와 복합자재의 패널간 화염확산방지를 통한 플래시오버지연

*교신저자, 정회원, 강원대학교 소방방재공학전공 교수(Tel: +82-33-570-6433, Fax: +82-33-570-6705, E-mail: kwonik@kangwon.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Professor, Department of Fire Protection Engineering, Kangwon National University

효과 등에 대한 Kim and Cho (2017)의 연구가 있으나, 마우스에 의해 평가되는 독성평가를 대체하기 위한 새로운 평가법의 개발과 패널자체의 화재확산 방식을 주 목적으로 연구되었다(KICT, 2003).

건축물에 적용되는 마감재료의 역할은 크게 두 가지로 구별될 수 있다. 첫째는 해당 구조체 자체와 구조체로 형성되는 공간의 완성도를 높이고, 구조적 역할을 지속적으로 유지, 발휘될 수 있도록 조력하는 보조적 기능이다. 둘째는 구조체와 공간의 기능적 역할을 완성하고, 유지하는 것으로써 열, 음, 소리 및 진동과 같은 전달체의 차단과 억제를 발휘함으로써 공간의 기능을 완성, 유지 및 쾌적함을 제공할 수 있다.

본 연구에서는 원전 구조물의 부속 건축물에 적용되는 바닥재와 도장재를 대상으로 화재와 같은 고온 환경에서의 국내의 마감재료의 연소성능평가를 수행함으로써 향후 설계, 시공되는 원전 구조물에서의 화재안전설계 가이드라인 참고자료 제시를 목적으로 한다.

연소성능평가를 위해서 적용 마감재료의 범위는 바닥재료와 도장재료를 대상으로 하고, 평가는 국내의 연소성능시험 기준과 원전 구조물의 전세계 적용 모델기준인 NRC에 적용된 시험법으로 설정하였다.

2. 마감재 선정 및 연소성능평가 기준

2.1 마감재 선정 및 시험편 제작

바닥재와 도장재의 선정은 국내에서 설계되고 건설 중인 원전 구조물의 건축 마감재로 사용된 종류 중(Table 1)에서 가장 많이 적용되고 향후 사용빈도가 많을 것으로 예상되는 것으로 선정하였으며, 특징은 Table 2와 같다(KNU, 2019).

Table 1. Finishing Materials Applied into the Works

Classification	Sorts	Remarks
Floor	Access floor	Domestic
	Vinyl composition tile	
	Vinyl sheet flooring	
	Chemical resistant floor finish	
Coating	Service level I & II Coating	Domestic
	Industrial and architectural	
	Textured coating	

Table 2. Characteristics of Selected Finishing Materials

Classification	Types	Thickness
Floor	PVC Tile	3 mm
Coating	Epoxy coating (wall, ceiling)	Surfacer: 15 mils Finish: 9 mils
	Epoxy coating (Floor)	Surfacer: 27 mils Finish: 8 mils

2.2 연소성능평가 기준 분석

마감재료의 국내 연소성능은 종래의 Kwon and Woo (2019) 연구에서 제시한 불연재료, 준불연재료 및 난연재료의 성능평가로 이루어지고 있으며, 미국의 경우는 Kwon and Woo (2019)의 연구와 NRC의 RG 1.189 (2009)에서 요구하는 NFPA 253 (2000)에 규정된 바닥의 임계방출열속 시험으로 평가되고 있다(Table 3). 마감재료의 국내와 미국의 연소성능 평가 시험의 주요 차이점은 국내의 경우, Table 4에 제시된 세 가지 시험방법의 조합으로 평가되지만, 미국의 경우 ASTM E136 (2016)에 의한 마감재의 불연성능평가, ASTM E84 (2017)의 화염전파와 연기확산 평가, NFPA 253에 의한 임계방출열속평가 그리고 NFPA 259 (2012)의 잠재열량 평가 등 각각 시험기준으로 이루어지는 점이다.

따라서 본 연구에서는 동일한 마감재료를 대상으로 Table 4와 같은 시험계획을 수립하였고, 국내의 방재시험연구원과 미국의 화재전문평가기관인 UL (Chicago)에서 각각 시험을 수행하였다.

Table 3. Summary of NFPA 253

Sorts	Contents
Test procedure	- ignite the radiant panel using sliding platform (1 ^{1/2} hours)
	- Sample placed and ignite pilot burner keeping 50 mm away
	- Measuring flaming propagation on the specimen and distance
	- Determine the critical radiant heat energy flux (CRF)
Criteria	Over CRF 0.45 w/cm ² : Class I Over CRF 0.22 w/cm ² : Class II

Table 4. Testing Plans for Finishing Materials

Classification	Testing specifications	Remarks
FILK	KS F ISO 1182 (2010)	Non-combustible
	KS F 2271 (2016)	Gas toxicity
	KS F ISO 5660-1 (2015)	Cone calorimetry
UL	ASTM E 136	Non-combustible
	ASTM E84	Flame spread
	NFPA 253	Floor, Flame
	NFPA 259	Potential heat

3. 연소성능평가

3.1 시험편 제작 및 규격

선정된 바닥 마감재료의 시료 제작은 제조사의 협조를 받아 선정된 재료와 동일한 Lot에서 생산된 시험체를 대상

으로 진행되었으며, 각각의 시험기관에 운송되었고, 각각의 시험규격에 따라 양생되었다. 도장재의 경우, 국내와 미국의 시험 규격이 큰 차이를 보였으며, 특히 KS F ISO 1182과 ASTM E 136의 유사성을 제외하고는 국내에 적용되지 않는 방법이 대부분이었다. 따라서 국내의 경우는 제조사와 시험기관의 협조를 받아 제작, 양생되었고, 국외의 경우는 도장재 원재료를 국외 운송한 이후, 해당 시험기관에서 시험규격에 따라 시멘트계 보강 보드(CRC Board)에 코팅, 양생되었다.

바닥재와 도장재의 국내외 연소성능평가 시험체의 조건은 Table 5와 같다.

3.2 연소성능평가 시험 및 결과

3.2.1 국내 시험

우리 나라에 적용되는 마감재료의 연소상태에 따라 발생되는 열에너지와 유독가스의 양에 따라불연, 준불연 및 난연성능으로 구분되며, 각각의 시험은 Table 5의 세 가지 시험방법의 조합으로 이루어진다.

3.2.1.1 바닥재료

바닥재료는 플라스틱 베이스의 PVC Tile이므로 불연성능 확보는 어려울 것으로 판단하여, 준불연 및 난연 성능 확보 유무를 평가하기로 하였고, 각 시험규격에 따라 일정크기와 시편과 양생조건을 준수하였으며, Table 6 및 Fig. 1과 같은 시험 결과를 보였다.

Fig. 1. Specimens for Semi-combustible Test of PVC Tiles

준불연시험 결과, 콘칼로미터법 시험의 평가기준은 만족하지 못하였으나, 가스 유해성 기준은 만족하는 것으로 나타났다.

난연시험 결과, 5분 동안의 총방출량이 18.6, 18.1 및 19.3 MJ/m²로 나타나 기준을 초과하였고, 가스 유해성은 기준을 13분 21초와 14분 15초로 나타나 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 바닥 마감재료인 PVC Tile은 국내의 마감재 연소성능 시험결과, 준불연재료와 난연재료 기준에 미치지 못하는 것으로 나타났다.

3.2.1.2 도장재료

실내 마감재료 중에서 가장 많은 면적을 차지하는 것은 도장으로 판단되나, 도장재료에 대한 연소성능평가는 극히

Table 5. Conditions for the Specimens

Classification	Testing specifications		Specimen	Numbers, curing
Domestic	KSF ISO 1182		D: 45 mm, V: (76±8) cm ³ , H: (50±3) mm	3, Temp: (60±5) °C
	KSF 2271		A: 220 × 220 (mm)	2, Temp: (23±2) °C
	KSF ISO 5660-1		A: 100 × 100 (mm), t: 50 mm	3, Temp: (23±2) °C
USA	ASTM E 136		38 × 38 × 51±2.5 (mm)	4, (60±3) °C
	ASTM E84		20-24 in × 24 ft	1, Temp: (23±2.8) °C
	NFPA 253		200 × 1,000 (mm)	3, Temp: (21±3) °C
	NFPA 259	Bomb	13 × 76 (mm)	1, Temp: (23±1) °C
		Muffler	13 × 19 × 64 (mm)	3, Temp: (23±1) °C

Table 6. Results of Semi-combustible Tests of PVC Tiles

Classification		No.			
		1	2	3	Criteria
Heat release	Total Heat release	20.5	20.8	21.6	Below 8 MJ/m ²
	Time (s) to exceed 200 kw/m ²	0	0	0	No exceed 200 kw/m ²
	Whether crack occurs	No	No	No	No
Gas noxious-ness	Average stop time of mice (s)	13:21	14:15	-	Over 9 mins

Table 7. Results of Semi-combustible Tests of the Coating

Classification		No.			
		1	2	3	Criteria
Heat release	Total Heat release	18.6	18.1	19.3	Below 8 MJ/m ²
	Time (s) to exceed 200 kw/m ²	0	0	0	No exceed 200 kw/m ²
	Whether crack occurs	No	No	No	No
Gas noxious-ness	Average stop time of mice (s)	13:21	14:15	-	Over 9 mins

제한적이다. 따라서 본 연구에서는 불연성능 평가를 위한 시험을 하였으나, 시험 실시 후 가열로 내부의 재료 연소에 의한 발화가 발생됨으로써 즉시 중단하였다. 따라서 준불연성능과 난연성능 만족 여부에 초점을 두고 시험을 실시하였으며, 준불연 성능평가 결과는 Table 7과 Fig. 2와 같이 나타났다.

Fig. 2. Specimens for Semi-combustible Test of the Coating

난연시험 결과, 5분 동안의 총방출량이 13.0, 14.2 및 12.8 MJ/m²로 나타나 기준을 초과하였고, 가스 유해성은 09분 40초와 09분 42초 나타나기준을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 도장재료의 국내 마감재 연소성능 시험결과, 준불연재료와 난연재료 기준을 모두 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

3.2.2 미국 시험

NRC와 IBC, NFPA 등에서 요구하는 마감재의 불연성능은 우리나라의 마감재의 불연성능과는 일치하지는 않지만 우리나라보다 성능평가의 방법과 기준이 세분화 및 다양화되어 있다고 판단된다. 즉 재료의 위치별 평가와 발열량에 따른 평가 그리고 화염과 연기확산에 의한 평가 등으로 구분될 수 있다. 본 연구에서는 NRC 기준에 의한 마감재료의 불연성능 시험기준에 따라 바닥재와 도장재를 평가하였다.

3.2.2.1 바닥재료

PVC 3 mm의 바닥 타일을 대상으로 불연성을 평가하는

ASTM E136 시험결과, 시험개시 30초 이후에도 상당 수준의 화염이 지속되는 결과를 보임으로써 불연성능 평가 자체의 한계가 있음을 확인하였다. 마감재료의 표면 시험인 ASTM E84 시험결과는 Table 8과 같이 나타남으로써 Class A수준을 보였으나, 연기발생지수(SDI)가 기준을 초과하였다.

Table 8. Results of ASTM E84 of PVC Tiles

Test code	Sample	FSI	SDI
01241908	Vinyl Tiles	15	over 500

잠재열량을 평가하는 NFPA 259 시험결과, 1,372.96 Btu/lb를 보임으로써 3,500 Btu/lb를 초과하지 않는다는 것을 확인하였다. 또한 타일 바닥재료의 임계방출열속을 평가하는 NFPA 253의 시험체 상태와 시험 과정은 Fig. 3과 같다. 평가 결과, 0.45 W/cm²로 나타나 Class I임이 확인되었다 (Table 9).

Fig. 3. Specimens and Test Apparatus for NFPA 253 of Coating**Table 9.** Results of NFPA 253 of PVC Tiles

Classification	Values	Remarks
Sample 1	0.82	Critical Radiant Flux (W/cm ²)
Sample 2	0.63	Critical Radiant Flux (W/cm ²)
Sample 3	0.87	Critical Radiant Flux (W/cm ²)
Average	0.77	
Standard Deviation	0.13	

따라서 바닥재인 PVC tiles의 경우, 재료의 불연성 평가기준인 ASTM E136과 화염확산 기준인 ASTM E84기준으로는 불연성능의 부족함이 나타났으나, 잠재열량과 임계방출열속 개념으로는 불연재료의 영역에 있음이 확인되었다.

3.2.2.2 도장재료

벽체용으로 사용되는 도장재료를 대상으로 재료의 불연성을 평가하는 ASTM E136 시험결과, 시험 개시부터 시료의 착화가 발생됨으로써 동일한 시험 평가의 지속함이 불가함을 확인하였다. 또한 벽체용 도장재료를 시멘트 보강보드(CRC)에 도포하여 표면연소 시험인 ASTM E84를 실시하였다. 본 시험의 시험체와 시험과정은 Fig. 4와 같으며, 시험결과는 Table 10과 같다. 시험결과 벽체에 적용되는 도장재는 Class B로 평가되었다.

Fig. 4. Specimens and Test Apparatus for ASTM E84 of Coating

Table 10. Results of ASTM E84 of the Coating

Test code	Sample	FSI	SDI
01241910	coating 24 mils	65	350

바닥용으로 사용되는 도장재의 임계방출열속을 측정하기 위한 NFPA 253의 결과는 Table 11과 같고, 평가결과 바닥용 도장재는 Class I로 확인되었다.

Table 11. Results of NFPA 253 of PVC Tiles

Classification	Values	Remarks
Sample 1	0.91	Critical Radiant Flux (W/cm ²)
Sample 2	0.89	Critical Radiant Flux (W/cm ²)
Sample 3	0.91	Critical Radiant Flux (W/cm ²)
Average	0.90	
Standard Deviation	0.01	

따라서 도장재의 경우, 재료의 불연성 평가기준인 ASTM E136 기준으로는 불연성 확보가 어려우나, 화염확산 기준인

ASTM E84과 잠재열량(NFPA 259)와 임계방출열속(NFPA 253)기준으로는 불연재료임이 확인되었다.

4. 결 론

국내에서 설계, 시공되는 원전 구조물에서 선정된 바닥재료와 도장재료를 대상으로 국내와 미국의 연소성능평가 기준의 비교와 상호 성능평가 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 마감재료의 불연성능 평가기준을 비교한 결과, 국내와 미국의 기준의 차이점이 존재하며, 미국의 경우 불연성, 화염전파, 연기확산, 잠재열량 및 방출열유속 등 각각에 기반을 둔 평가가 이루어지는 반면, 우리나라는 불연성과 연기확산 조합 위주로 평가하는 것으로 나타났다.
- (2) 도장재료에 대한 불연성능 평가는 국내와 미국의 시험결과(ASTM E 136), 가열로 인입과 동시에 화염발생으로 인하여 적합하지 않음을 확인하였다.
- (3) 바닥재료(PVC tile)와 도장재료는 국내 마감재료 성능평가 결과 기준에 부합하지 않은 것으로 나타났다.
- (4) 바닥재료와 도장재료를 대상으로 미국 기준으로 평가한 결과, NRC와 IBC, NFPA에서 요구하는 불연재료 기준을 대부분 만족하는 것으로 나타났다.
- (5) 향후 국내외에서 수행된 건축 마감재료의 불연성능평가 결과를 바탕으로 원전 구조물 적용 마감재료의 화재안전 가이드 라인(안) 개발 및 국내 마감재료의 불연성능평가 기준의 적정성을 분석할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20161510400110).

References

- ASTM E136. (2016). *Standard test method for behavior of materials in a vertical tube furnace at 750 °C*.
- ASTM E84. (2017). *Standard method of test for critical radiant flux of floor covering systems using a radiant heat energy source*.
- Cho, N.W., Cho, D.H., Oh, E.H. (2012). A toxicity evaluation for the toxic gases of building finish materials. *J. of Korean Oil Chemists' Soc.*, Vol. 29, No. 1, pp. 129-140.
- Kangwon National University (KNU). (2019). *Report on*

- the non-combustible test done at the FILK and UL.*
- Kim, D.H., and Cho, N.W. (2017). Experimental study on the flash over delay effects according to the prevention of flame spread between composite material panels. *Fire Science and Engineering*, Vol. 31, No. 2, pp. 1-8.
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). (2003). *Development of fire design(II) - Report to interior finishing materials including sandwich panels, applied into factory.*
- KS F 2271. (2016). *Testing methods for gas toxicity of finish materials of buildings.* Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F ISO 1182. (2010). *Test method of non-combustibility of building products.* Korean Agency for Technology and Standards.
- KS F ISO 5660-1. (2015). *Reaction to fire tests – heat release, smoke production and mass loss rate – Part 1 : Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement).*
- Kwon, I.K., and Woo, A.S. (2019). Basic study on combustible performance of finishing materials for nuclear power plants. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 7, pp. 269-274.
- NFPA 253. (2000). *Standard method of test for critical radiation flux for floor covering system using radiant heat energy source.*
- NFPA 259. (2012). *Standard test method for potential heat of building materials.*
- RG 1.189. (2009). *Fire protection for nuclear power plants.* Regulatory Guide, U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC).
-
Received	May 4, 2020
Revised	May 7, 2020
Accepted	July 24, 2020