제1종 시멘트를 이용한 원전 콘크리트 시편 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Concrete Specimens for Nuclear Power Plant Using Type I Cement

조남진* · 황수진** · 방현욱*** · 조태연**** · 이정임*****

Cho, Namjin*, Hwang, Sujin**, Bang, Hyunwook***, Cho, Teayeon****, and Lee, Junglim*****

Abstract

Concrete surfaces inside containment buildings in nuclear power plants are painted with a protective coating to prevent deterioration due to the influence of fire, temperature, and humidity, and for ease of decontamination. In particular, it is necessary to prevent the degrading of the coating inside the containment building when design basis accidents occur and to maintain the adequacy and integrity of the coating in case of damages due to defects after repairing the coating. Until now, the protective coating materials for concrete specimens have been tested using the Moderate Heat Portland Cement Type II specified in ASTM D5139. However, it is difficult to produce specimens, as Cement Type II cement is currently extremely limited in production and use. In this study, concrete specimens were prepared using Normal Portland Cement Type I, which is widely used in Korea, and the specimens were coated with protective coatings and tested. Concrete specimens of Cement Type I were developed to facilitate the development of concrete protective coating materials through degradation tests, irradiation tests, adhesion tests, and design basis accident tests.

Key words : Fire, Aging, Protective Coating, Concrete Specimen, Moderate Heat Portland Cement

요 지

원자력발전소 격납건물 내부의 콘크리트 표면은 화재, 온도, 습도 등의 영향으로 인한 열화 가능성 방지 및 제염용이성 등의 사유로 방호도장이 되어 있다. 특히 격납건물 내부는 설계기준사고(Design Basis Accident) 발생 시 도장의 탈락 등을 방지하고, 결함으로 인한 도장 손상시에 보수도장 사용 후 적정성과 건전성을 유지해야한다. 지금까지는 콘크리트 시편에 대한 방호도장재 시험은 ASTM D5139에 명시된 제2종 중용열 포틀랜드 시멘트(Moderate Heat Portland type II)를 사용하여 시험해 왔다. 하지만 2종 시멘트는 현재 생산 및 사용이 극히 제한되어 있어 시험편을 제작하기 어려운 상태이다. 본 연구에서는 국내에서 널리 사용되고 있는 제1종 보통 포틀랜드 시멘트(Normal portland cement type I)을 사용한 콘크리트 시편을 제작하고, 방호도장재를 시편에 도장하여 시험하였다. 이를 위해 열화시험, 방사선조사시험, 부착력시험, 설계기준사고시험을 통해 콘크리트 방호도장재의 개발을 원활히 하고자 제1종 시멘트 재질의 콘크리트 시편을 개발하였다.

핵심용어 : 화재, 열화, 방호도장, 콘크리트 시편, 중용열 포틀랜드 시멘트

*정회원, 공학박사, (주)한국발전엔지니어링 이사(E-mail: cnj7924@hanmail.net)

Member, Ph.D., FROSIO Level III, Korea Power Engineering

** (주)한국발전엔지니어링 건축기술자(E-mail: sujinei@hanmail.net)

Construction Engineer, Korea Power Engineering

*** (주)한국발전엔지니어링 안전기술자(E-mail: gusnrl75@naver.com)

Safety Engineer, Korea Power Engineering

**** (주)한국발전엔지니어링 도장기술자(E-mail: supercore7922@gmail.com)

Coating Inspector, Korea Power Engineering

***** 교신저자, 정회원, (주)한국발전엔지니어링 이사(Tel: +82-70-4667-3845, Fax: +82-70-8282-3857, E-mail: freshjl@hanmail.net)

Corresponding Author, Member, Nuclear Specialist, Korea Power Engineering

1. 서 론

원자력발전소는 격납건물, 보조건물, 핵연료건물 등 콘크리트 형식의 다양한 건물들이 존재한다. 각 건물들은 안전성과 건전성을 유지하기 위해 최소 두께 이상으로 시공되어 있으며, 격납건물은 1.2 m 두께의 콘크리트 벽체를 갖도록 설계되어 있다. 특히 하지만 최근 일부 원전에서는 격납건물 라이너플레이트 배면과 접촉한 콘크리트 부위에서 공극이 발견되었으며, 핵연료건물의 경우 콘크리트 벽 내면에 규모가 있는 공극이 발견되어 사회적인 이슈가 되고 있다. 콘크리트 구조물은 시간이 경과함에 따라 열화 현상이 발생되며, 열화인 동해, 중성화, 염해, 화학적 침식 등의 가능성이 상시 존재한다. 특히 격납건물 내부에도 콘크리트 구조물이 시공되어 있으며, 열화를 방지하고 방사선 오염 시 제염을 원활하게 하기 위해 방호도장이 시공되어 있다.

격납건물 내부 방호도장은 설계기준사고(Design Basis Accident) 시 열화나 결함이 있는 방호도장의 탈락으로 인해 재순환 냉각계통이 막혀 안전정지에 문제를 야기할 수 있다. 원전의 격납건물 내부는 화재, 온도, 습도, 방사선 등의 영향에 의한 열화 가능성과 18개월마다 수행하는 계획예방정비 기간 동안 정비, 보수, 설치 등의 영향으로 물리적인 손상이 다수 발생하며, 물리적 손상으로 인한 2차적인 다른 결함의 발생 가능성도 있다. 경년열화로 인한 결함의 발생이든, 정비로 인한 물리적손상이든 콘크리트 표면에는 방호도장이 시공되어 있고 손상된 도장표면에는 보수도장을 해야한다.

국내 원전에서 사용하는 방호도장은 1973년부터 사용해 온 U.S Regulatory Guide 1.54 Rev.0이며, 2000년에 U.S Regulatory Guide 1.54 Rev.1 (2000) 개정본이 발행되면서 관련 ASTM 기술 기준을 승인·채택한 새로운 시험기준을 적용하고 있으며, 원전 방호도장 관련 체계는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1. ASTM Standard (protective coating)

2. 연구 내용

2.1 목적

원전의 방호도장재는 설계기준사고(DBA) 조건이 각 발

전소마다 상이하여 온도, 압력, 습도, 화학살수, 방사선 등을 만족시키는 방호도장재가 건설당시 개발되어 시공되었고 보수도장재로 사용되었다. 현재 발전소 수명이 40~60년이고 최근에 건설된 발전소를 제외하고 10~30년 정도 지난 발전소들이 대부분이다.

우리나라 초기에 건설된 원전은 해외에서 생산된 방호도장재를 사용하여 콘크리트, 라이너플레이트, 기기류 등에 도장되거나 보수도장으로 사용 되었다. 표준원전을 기준으로 최근에 건설된 발전소들은 국내에서 생산된 방호도장을 대부분 사용하고 있지만 원전의 수명이 오래되어 국내외에서 생산된 도장재의 생산 중단으로 인해 도장결함 부위에 대한 보수도장이 어려워졌다.

보수도장재의 개발을 위해서는 가장 기본이 되는 콘크리트 시편의 제작이 원활해야 한다. 하지만 기존 콘크리트 시편의 경우 ASTM D5139 (1996)에 명시된 제2종 중용열 포틀랜드 시멘트(Moderate heat portland cement type II)만을 사용하여 시험하도록 되어 있다. 제2종 중용열 포틀랜드 시멘트는 수화열이 낮고, 건조수축이 적으며, 방사선 차단효과가 우수하여 방호도장재 시편으로 제작되어 사용되었지만, 현재는 시멘트 생산이 원활하지 않아 시편제작에 어려움이 있다. 이에 대한 대안으로 국내에서 일반적으로 토목 및 건축공사에 널리 사용되며 손쉽게 구매가 가능한 제1종 보통 포틀랜드 시멘트(Normal portland cement type I)를 사용한 콘크리트 시편을 제작하고, 방호도장재를 적용하여 시험함으로써 새로운 형식의 콘크리트 시편을 개발하고자 한다.

2.2 실험방법

2.2.1 시험시편 제작(ASTM D 5139)

시험시편은 ASTM D 5139 (1996)에 따라 시편을 제작하였다. 도장시스템은 원전도장시방서를 적용한 Coating System 1을 준용하여 도장을 수행한다. Table 1은 콘크리트 배합의 기준과 실제 배합 상태를 나타내고 있다. Table 2는 콘크리트 시편에 사용되는 방호도장시스템을 보여주고 있다. Fig. 2는 콘크리트 시편 제작 후 (a)는 시편에 스프레이 도장을 수행하는 모습. (b)는 도장 후 습도막 측정게이지로 두께를 측정하는 모습을 보여주고 있다.

2.2.1.1 열화, 방사선조사, DBA, Adhesion Test 시편

- 60 mm(가로) × 60 mm(세로) × 110mm(길이) 이상
- 모서리: 최대 1/4 in 모따기 처리
- 재질: 제1종 시멘트, 제2종 시멘트
- 수량: 제1종 24 EA, 제2종 24 EA
- 도장 제조사: KCC 24 EA, Caboline 24 EA
- 도장위치: 바닥, 벽
- 도장방식: 스프레이, 붓, 롤러

2.2.1.2 표면처리

- 시편 표면처리는 준나금속상태(Near White Blast Cleaning)인 SSPC-SP10/NACE NO.2로 처리

Table 1. Test Specimen Condition

Contents	Standard	Criterion	Test
Cement	C 150	300	300
Gravel	C 33	45	44
Sand	C 33	64.3	56.7
Air Admixture	C 260	4~7%	4.67
Water	-	193	170

Table 2. Concrete Specimen Coating System

Coating Division	Manufacturer	Coating Name	Film Thickness
Primer	KCC Caboline	EP 139 CL 1340	0.3-1.0 mils
Intermediate	KCC Caboline	EU 2290 CL 195	20-27 mils
Finish	KCC Caboline	ET 5290 CL 890	6-8 mils

Fig. 2. (a) Spray (b) Wet Film Measurement

2.2.2 시험항목

2.2.2.1 열화시험(Aging Test)

ASTM 코드에는 열화 후 검사나 합격기준에 대한 내용은 명시되어 있지 않다. 열화시험 종료 후 육안검사를 통해 ASTM D 5144에서 심각한 결함으로 보고 있는 층간박리, 벗겨짐, 박리와 ASTM D 5163에서 부풀음, 균열, 박리, 벗겨짐에 대한 결함기준을 적용하였다. Fig. 3의 (a)는 전기로에 삽입, (b)는 콘크리트 시편(대표샘플)이다.

Fig. 3. (a) Aging Chamber (b) Aging Specimen

2.2.2.2 방사선조사시험(Radiation Test)

내방사선 도료의 선정시험 중 방사선에 노출되는 지역에 적용되는 도료의 설계 수명기간 동안의 방사선 조사량에 대한 내구성을 확인하기 위한 시험으로서 Coating Service Level I 과 II의 지역에 공통적으로 적용되는 시험이다. 본 연구를 위하여 시편에 조사한 총 방사선량은 2.2×10^6 Gy로 하였고 시험편이 받는 “감마선의 방사선량은 1.43×10^4 Gy/hr이 되도록 조사하였으며”, 시편에서의 방사선 조사량의 편차는 10% 이내로 조정 하였다. 방사선조사시험을 수행하고 난 후의 내방사성 도장 합격기준은 체크링(Checking), 균열(Cracking), 박리(Flaking), 층간박리(Delamination), 벗겨짐(Peeling), 부풀음(Blistering)은 허용되지 않으며, 이러한 결함의 존재 여부를 평가한다. Fig. 4의 (a)는 “Co-60 선원을 사용”, (b)는 방사선조사 후의 콘크리트 시편의 외관을 나타내고 있다.

(a) Co-60 Source

(b) After Radiation Test

Fig. 4. Gamma Radiation Test (Sample)

2.2.2.3 설계기준사고시험(DBA Test)

내방사선 도료의 선정시험 중 설계기준사고(DBA)시 도장의 건전성 유지 여부를 확인하기 위하여 시험을 통하여 도장체계의 물성을 확인하는 시험이다. 일반적으로 DBA시험에 사용되는 변수인 시간별 압력, 온도 조건과 대략 시험 시작 후 10초 정도 후에 고온고압의 환경조건을 원자력 발전소 격납건물의 사고조건과 동일하게 모사한다.

본 연구에 적용 한 설계기준사고 조건은 10 CFR 50.49 (2007)의 내환경검증 요건과 Environmental Parameter

Report의 “설계기준사고(DBA) 프로파일”을 적용하였고 ASTM 3911 (1995)에 준하여 시험을 수행하였다. 시험 수행 후 도장의 건전성 유지여부를 결정하는 기준은 벗겨짐, 층간 박리는 허용하지 않으며, 균열과 부풀음은 일부 제한사항이 있으며, 합격기준에 따른다. Fig. 5는 설계기준사고(DBA) 시 온도시험 조건을 나타낸다. Fig. 6은 DBA 시험을 하기 위한 챔버와 콘크리트 시편이 장입된 상태를 나타낸다.

Fig. 5. DBA Test Profile

Fig. 6. DBA Chamber and Specimen

2.2.2.4 부착력시험(Adhesion Test)

도장의 부착력 시험은 ASTM D 4541에 따라 시행하며 도장설계를 위한 표준 부착력은 200 kPa 이상으로 관리한다. 시편은 가로 60 mm, 세로 60 mm, 길이 110 mm 이상의 크기로 하고, 시멘트 종류별로 각각 24개의 시편을 제작하여 시험 후 판정한다. 부착력의 측정은 시험의 정밀성을 고려하여 ASTM D 4537 (1996)에 따라 인증된 도장 검사자가 수행한다.

2.2.3 시험 환경조건

방사선조사시험, 설계기준사고시험, 부착력시험과 관련

된 환경조건 및 시험 방법은 Table 3과 같다.

Table 3. Test Environmental Condition

Item	Condition	Method
Aging Test	150 °F	ANSI N 101.2
Radiation Test	2.2×10^6 Gy	ASTM D 4082
DBA Test	LOCA Profile	ASTM D 3911
Adhesion Test	200 kPa more	ASTM D 4541

2.3 시험 결과

2.3.1 열화시험

열화시험은 ANSI N101.2 (1972)의 Section 5.3.2에 따라 실시하였다. 시험은 150 °F에서 2주 동안 전기로에서 열화를 수행 하였고, 전기로는 2주 동안 열리지 않도록 봉인 하였으며, 온도의 유지를 점검하기 위해 시험기간 동안 전기로 및 온도계를 기록하였다. 시험결과 대부분의 시편에서는 변색(Discoloration)을 나타내고 있으나 도장면에 발생하는 결함 형태인 벗겨짐, 층간박리, 균열, 부풀음 등의 상태를 평가하였고 결함은 발견되지 않았다.

2.3.2 방사선조사시험

방사선조사시험은 ASTM D 4082 (1995)를 따라 실시하였다. Fig. 4(대표샘플)의 총조사선량은 2.2×10^6 Gy 였으며, 방사선 조사시험 시간은 시간당 1.43×10^4 Gy/hr로 154시간 이 소요되었다. 시험된 시편의 도장면에서 발생하는 결함 형태인 체킹, 균열, 박리, 층간박리, 벗겨짐, 부풀음의 결함 평가를 수행하였으나 결함은 발견되지 않았다. 다만 대부분의 시편에서는 변색(Discoloration)을 나타내고 있다. Fig. 7은 방사선조사 시험 전후의 시편비교 사진이다.

2.3.2.1 Environment

- Temperature start (0 hr): 26.5°C
- Temperature stop (154.0 hr): 26.0°C
- Pressure: ~ 1 atm
- Medium: air

2.3.2.2 Term

- 7 days(lose time: 9 hr 12 min)

2.3.2.3 Condition

- 감마선원: Co-60, 253,790Ci, 1.17&1.33 MeV
- 총 조사선량: 2.2×10^6 Gy
- 조사선량을: 1.43×10^4 Gy/hr
- 조사시간: 154 hr

(a) Before Test (b) After Test (Discoloration)

Fig. 7. Gamma Radiation Test (Sample)

2.3.3 설계기준사고 시험

설계기준사고 시험은 ASTM D 3911 (1995)에 따라 시험을 실시하였다. 시험 결과 Fig. 8의 격납건물 DBA Test Profile에 나타난 바와 같이 결과치는 기준을 만족하였다. Fig. 9(대표샘플)와 같이 시험된 시편의 도장재의 특성상 최초 고온고압 유지 후 급랭 단계에서의 도장면에 발생하는 결함 형태인 벗겨짐, 층간박리, 균열, 부풀음 등을 시험 후 4시간 이내와 14일 이후에 상태를 평가하였고 결함은 발견되지 않았다.

Fig. 8. DBA Test Profile (Actual)

(a) Before DBA (b) After 4 hr (c) After 14 day

Fig. 9. DBA Test Specimen (Sample)

2.3.4 부착력시험

부착력 시험은 ASTM D 4541 (1995)에 따라 시험하였다.

Fig. 10(대표샘플)과 같이 Pull-Off 부착력 시험으로 규정 부착력(200 kPa) 이상의 결과치를 보여 만족함을 나타내었다.

Fig. 10. Adhesion Test (Sample)

2.4 분석

콘크리트 시편은 제1종 시멘트 24개(바닥 12개, 벽 12개), 제2종 시멘트 24개(바닥 12개, 벽 12개), 부착력 시험편 48개(바닥 24개, 벽 24개)에 대해 (a) 방사선조사 전, (b) 방사선조사 후 및 냉각재상실사고(LOCA) 후를 비교평가 하였으며, 방사선조사 시험 및 설계기준사고 시험의 불합격 기준에 해당되는 결함은 발견되지 않았고, 부착력 값은 기준치 이상 이었다. 제1종 시멘트와 제2종 시멘트를 사용한 콘크리트 시편에 시공된 방호도장의 시험결과는 유사하였다. 향후에는 제1종 시멘트를 사용한 콘크리트 시편 제작 및 시험이 가능한 것으로 확인되었다.

3. 결 론

본 연구에서, 콘크리트 시편 개발을 위한 방호도장재는 국내 원전에서 가장 많이 사용하는 Caboline CL 1340(하도), CL 195(중도), CL 890(상도), KCC EP 139(하도), EU 2290(중도), ET 5290(상도) 도장재를 사용하였다. 원전 격납건물 내부 콘크리트 방호도장의 보수도장재를 개발하기 위해 필요한 콘크리트 시편은 제2종 시멘트만을 사용하도록 코드에 명시되어 있어 시편제작의 어려움이 있었다. 이에 생산 및 구매가 원활한 제1종 시멘트를 사용하여 콘크리트 시편을 제작하였고 열화시험, 방사선조사 시험, DBA 시험, 부착력 시험을 수행한 결과 제1종 시멘트와 제2종 시멘트의 시험결과는 거의 차이가 없었다. 시험결과 향후에는 제1종 시멘트를 사용하여 콘크리트 시편을 제작할 수 있으므로, 보수도장재의 개발이 보다 원활해질 수 있다. 다만 다음과 같은 사항들이 반영될 수 있도록 권고한다.

- (1) 국내원전은 지금도 해외규정을 준용하고 있으므로 제1종 시멘트를 시편으로 사용하기 위해서는 ASTM에 시험 결과를 통보하고 ASTM의 변경(Rev.)이나

추록을 발행할 수 있도록 해야하며, 특히 국내 규제기관에서는 제1종 시멘트도 공식적으로 사용이 가능하도록 인허가심사 기준에 명시할 것을 권고한다.

- (2) 미국 원전의 안전성 관련 도장체계의 인증을 통과한 도장체계는 140여 가지로서, 현재 EPRI의 NUCC 웹사이트(Website)에서 관리 중이며 이에 대한 기술 자료는 향후 국내 원전의 내방사성 도장재 인증요건 설정과 관련하여 중요한 기술 자료로 활용할 것을 권고한다.

References

10 CFR 50.49. (2007). *Environmental qualification of electric equipment important to safety for nuclear power plants*. U.S.NRC Regulations.

ANSI N101.2. (1972). *Protective coatings (paints) for light water nuclear reactor containment facilities*.

ASTM D 3911. (1995). *Standard test method for evaluating coatings used in light-water nuclear power plants at simulated design basis accident conditions*.

ASTM D 4082. (1995). *Standard test method for effects of gamma radiation on coatings for use in light-water nuclear power plants*.

ASTM D 4537. (1996). *Standard guide for establishing procedures to qualify and certify inspection personnel for coating work in nuclear facilities*.

ASTM D 4541. (1995). *Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers*.

ASTM D 5139. (1996). *Standard specification for sample preparation for qualification testing of coatings to be used in nuclear power plants*.

U.S. Regulatory Guide 1.54, Rev. 1. (2000). *Service level I, II and III protective coatings applied to nuclear power plants*.

Received	■	June 11, 2018
Revised	■	June 14, 2018
Accepted	■	June 26, 2018