

工學碩士 學位論文

耐放射線 塗膜의 定量的 劣化
評價法에 대한 研究



2008年 2月

釜慶大學校 大學院

工業化學科

李 哲 宇

工學碩士 學位論文

耐放射線 塗膜의 定量的 劣化 評價法에 대한 研究

指導教授 朴 振 換

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함.

2008年 2月

釜慶大學校 大學院

工業化學科

李 哲 宇

李哲宇의 工學碩士 學位論文을 認准함.

2008年 2月 26日



主	審	工學博士	徐 且 守 (印)
委	員	工學博士	李 根 大 (印)
委	員	工學博士	朴 振 換 (印)

목 차

1. 서론	1
2. 원자력 산업에서의 도장 품질관리	3
2.1 개요	3
2.2 내방사성 도장의 설계조건	6
2.2.1 ASTM D 3911 (DBA Test)	8
2.2.2 ASTM D 4082 (방사선 조사 시험)	11
2.2.3 제염시험 (Decontamination test)	11
2.2.4 부착력 시험 (Adhesion test)	11
2.2.5 내마모성 시험 (Abrasion resistance test)	12
2.2.6 내화학성 시험 (Chemical resistance test)	12
2.2.7 화재 연소성 시험 (Fire evaluation test)	12
2.2.8 열전도성 시험 (Thermal conductivity test)	13
3. 교류 임피던스 이론적 배경	14
3.1 교류 임피던스에 대한 이론	14
3.1.1 교류임피던스 기초 이론	14
3.1.2 부식계의 등가회로와 임피던스 특성	19
3.1.2.1 등가회로	19
3.1.2.2 교류 임피던스의 표시 방법	22
4. 시편 제작 및 시험	26
4.1 시험편 제작	26
4.2 시편 제작, 표면처리, 도장 및 열화 과정	27
4.3 방사선 조사 시험	29

4.4 설계기준사고 시험 (DBA 시험)	29
4.5 교류 임피던스 측정	30
4.6 전자 현미경 사진	31
5. 결과 및 고찰	32
5.1 열화조건에 따른 도막의 외관의 사진	32
5.2 교류 임피던스 측정 결과	40
5.3 방사선 (RAD)을 조사한 시험편의 SEM 이미지	45
5.4 침지조건에서의 임피던스 특성	47
6. 결론 및 의견	51
References	54



List of Figures

Fig. 1. 원전 내방사성도장의 기술기준	5
Fig. 2. 격납건물 단면도	7
Fig. 3. Sump strainer 개략 상세도	7
Fig. 4. 원자력 발전의 표준 설계기준 사고 조건(DBA test condition) ..	10
Fig. 5. Equivalent circuit, and current response	21
Fig. 6. Equivalent circuit of organic coating	23
Fig. 7. Calculated impedance diagram for degraded coated steel	25
Fig. 8. Equivalent circuit and calculated impedance diagram for degraded coated steel	25
Fig. 9. 표면처리 과정의 시편	25
Fig. 10. 도장시공 및 열화과정	27
Fig. 11. 보수도장용 시험시편의 제작 과정	27
Fig. 12. 방사선 조사 시험을 위한 조사과정과 방사선원	28
Fig. 13. 설계기준사고 시험(DBA시험)	29
Fig. 14. S 342 시험편의 외관사진	30
Fig. 15. S 462 시험편의 외관사진	33
Fig. 16. S 226 시험편의 외관사진	35
Fig. 17. S 236 시험편의 외관사진	36
Fig. 18. S 346 시험편의 외관사진	37
Fig. 19. S 356 시험편의 외관사진	38
Fig. 20. S 467 시험편의 외관사진	39

Fig. 21. Control 시험편의 임피던스 특성	40
Fig. 22. DBA 처리한 시험편의 임피던스 특성	41
Fig. 23. 방사선(RAD)처리한 시험편의 임피던스 특성	42
Fig. 24. RAD+DBA 처리한 시험편의 임피던스 특성	43
Fig. 25. 방사선(RAD)을 조사한 각 시험편의 SEM 이미지	46
Fig. 26. S 119 시험편의 임피던스 특성.	48
Fig. 27. S 229 시험편의 임피던스 특성	48
Fig. 28. S 239 시험편의 임피던스 특성	49
Fig. 29. S 349 시험편의 임피던스 특성	49
Fig. 30. S 359 시험편의 임피던스 특성	50
Fig. 31. S 469 시험편의 임피던스 특성	50

List of Tables

Table 1. Preparation of specimens	35
---	----



1. 서 론

인류역사를 에너지 발달사로 보면 원시동력시대-자연동력시대-증기동력시대-전기동력시대-원자동력시대의 다섯 단계로 볼 수 있다. 이런 에너지자원의 세계적인 추세는 석유사용이 점차 감소하는 반면 천연가스, 원자력 등의 비중이 점점 증가하는 추세를 나타내고 있다.

우리나라의 경우는 부존자원이 빈약하여 어느 나라보다도 에너지 문제가 심각하다. 그 만큼 에너지 자립을 위한 국가적인 차원에서 주력해야 한다. 특히 우리나라는 대부분의 에너지를 수입에 의존하고 있어 2000년도에 들어 왔어도 해외 의존도가 무려 97.3%에 이르고 있다. 또한 에너지원의 수입량은 전체 수입량의 상당부분을 차지하고 있어 에너지 자립을 통해 에너지수입의 대체 효과가 매우 클 것으로 판단된다.

우리나라는 전력생산용으로 총에너지의 12%를 사용하고 있기 때문에 대체 에너지 개발이 시급하고, 원자력발전의 이용도 확대해야 한다. 대체 에너지의 개발에 있어서 세계적인 추세는 이산화탄소를 배출하지 않은 청정 에너지인 대체에너지 개발에 주력하고 있으며, 그 대안으로 원자력발전의 확대를 추진하고 있다. 그러나 원자력발전은 안전설계, 안전설비, 안전운전으로 철저한 안전성 운전이 필수적이다.

우리나라의 원자력발전소는 1978년 4월 고리 1호기가 최초로 상업운전을 시작하여 고리에 4호기, 월성 4호기, 영광 6호기, 울진 6호기 총 20호기가 운전 중이고, 건설 중 또는 건설 준비 중인 발전소가 8기가 있다. 이와 같이 원자력발전소의 증가에 따라 원자력산업 설비의 유지관리가 매우 중요하게 대두되고 있다.

특히 원자력설비의 도장 방식 산업에서 도막(In-service coating)의 열화와 관련하여 물리적 보유성능을 정량적 측정법, 표준 기술기준 및 시험방

법은 현재까지는 정립된 것이 없다. 이러한 상황은 구조물에 기 적용된 도막의 물성은 시공 당시의 도료선정, 표면처리 및 검사 등에 의해서 결정되고 있다. 이에 따라 다양한 도장공정에 대한 표준화가 정립되고, 시공된 도장면에 대한 품질표준화가 선행되어야 도장된 전면적의 품질이 일정 수준에서 동일하다는 가정 하에서 도장된 면적에 대해 지엽적이고 국부적으로도 도장물성 평가에 대한 분석이 가능하기 때문이다.

원자력산업의 설비에 적용되는 도장은 건설 당시 품질관리가 표준화되어 전반적으로 도장품질이 일정 수준으로 시공된 것으로 판단할 수 있으나, 운전시간의 경과에 따른 도막의 방식성능 저하 정도를 정량적이 평가할 수 있는 방법이 대두되고 있다. 따라서 본 연구는 원자력산업의 설비에 적용되어 사용 중인 도장(In-service coating)에 대해 열화되어 가는 정도를 정량적으로 평가할 수 방법을 접목하기 위하여 전기화학적 임피던스(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)로 도막의 저항변화를 정량적으로 측정하고, 또한 전자현미경(Scanning Electro Microscopy, SEM)을 이용하여 도막의 물리적 변화 현상을 측정하여 방사선에 의한 도막의 노화 메커니즘을 규명하고자 한다.

2. 원자력산업에서의 도장 품질관리

2.1 개 요

원자력산업에 적용되고 있는 안전성 관련 도장의 품질등급은 Q 등급으로서, 도장설계 및 도장 시공시에 일정 수준 이상의 품질관리가 관련 규제요건에 따라 수행되어야 한다. 우선 도장시공을 위하여 도장재료 선정 시 고려되어야 하는 사항은 본 논문 2.2항에 기술하였다. 나.2항에 기술된 내방사성 도장재료의 물성확인 시험은 DBA(Design Basis Accident)시험과 방사선 조사 시험을 제외한 부착력 및 내화학성능시험 등이 시행되고 있다.

일반적으로 원자력발전산업에 적용되는 내방사성 도장은 도료 물성 자체의 품질확인뿐만 아니라 도장시공시의 다양한 공정에 대하여 정해진 절차와 도장 관련 전문인력(Certified or Qualified Coating Personnel)에 의하여 수행함으로써 최종 결과물인 현장에 시공된 도장품질의 일정 수준을 확보하는 것으로 규정되어 있다. 이러한 측면에서 원자력 내방사성도장의 품질을 확보하기 위한 조건으로 기술기준에서 도료의 물성확인 시험과 도장 작업자의 시공 능력 확인과 도장 검사자 및 도장시공회사의 인증에 대한 요건에 추가하여 사용 중인 도장의 성능감시 절차를 별도로 수립하여 관리함으로써 현장에 시공된 도막의 최종 시공품질의 표준화를 실현하게 되어 있다.

○ 도장품질보증 규격

- ASTM D3843 : 품질보증
- ASTM D5139 : 시편제작
- ASTM D3911 : DBA시험
- ASTM D4082 : 방사선조사시험

- 도장인력의 자격인증
 - ASTM D4537 : 검사자 인증기준
 - ASTM D4286 : 도장업체인증
 - ASTM D4227 : 콘크리트 도장공 인정(Qualification)
 - ASTM D4082 : 강재 도장공 인정
- 도장성능감시절차
 - ASTM D5163 : 도장성능감시절차
 - ASTM D4541 : 부착력시험
 - ASTM D3359 : 형식 부착력시험
 - ASTM D3912 : 내화학성 시험
 - ASTM D5962 : 미검증도장 유지관리

상기에 기술된 원자력발전소 내방사성도장의 품질을 확보하기 위한 관련 기술기준의 전반적인 구조는 Fig. 1과 같다.

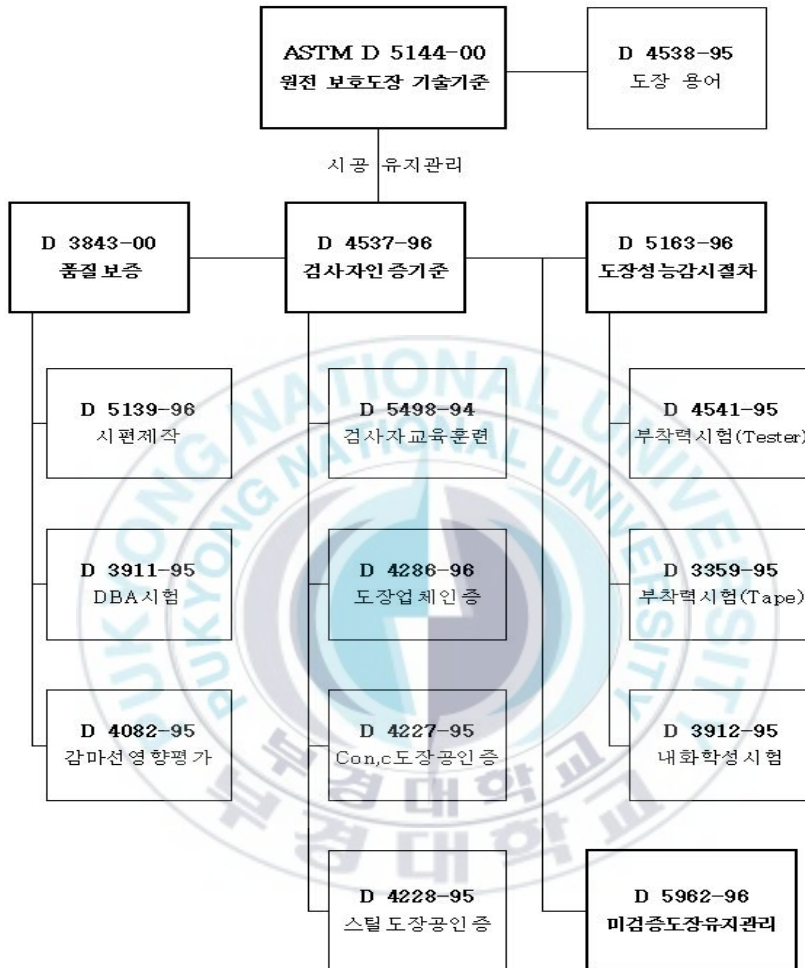


Fig. 1 원전 내방사성 도장의 기술기준

그러나 이러한 도료 선정시 물성확인도 종전에는 설계목적의 부합 정도와 각기 다른 도료제조업체와의 도장재료 물성에 대한 비교를 하기 위한 시험으로 제한되어 시행되었다. 최근 원자력발전소의 안전에 대한 관심이 대두됨에 따라 도장에 대한유지보수에 대한 관련 규제요건인 U.S. Regulatory Guide 1.54, Rev.1¹이 2000년에 변경되었다. 이 후 사용 중인 도장의 유지관리를 위하여 원자력 도장전문가(Coating Specialist)에 의하여 열화 정도 및 결함 여부를 평가하는 것으로 규정되었으나, 정량적인 분석방법을 제공하지 못하고 ASTM D4541의 부착력 시험, 현장 칼날시험 정도의 간단한 시험으로 도장전문가의 주관적인 평가에 의해서 이루어지고 있다.

2.2 내방사성 도장의 설계조건

일반적으로 원자력 발전설비에 적용되는 안전성 관련 도장재의 노출환경은 발전소 별로 다소 차이는 있지만, 발전소 설계수명 기간 동안 받을 수 있는 방사선 노출조건에서 내구성을 가져야 한다. 또한 ECCS(emergency core cooling system) 사고 조건 시(이하 설계기준사고, DBA : design basis accident)에 발생하는 300°F 이상의 순간적인 고열조건, 60 psig 이상의 고압환경 하에서 발생하는 부풀음 등의 도막결함 현상이 CSS(containment spray system)의 작동 시 격납건물 하부에 있는 emergency sump의 strainer를 막을 수 있는 도막 탈락의 현상으로서, 비상노심냉각계통의 원활한 운전에 영향을 미치지 않도록 설계되어야 한다. 이렇게 격납건물 내부에서 ECCS와 CSS의 원활한 가동을 위하여 시공된 도막은 DBA조건에서의 허용기준은 크랙 및 부풀음이 없는 것으로 제한하고 있다. 격납건물 내부와 sump strainer의 개략적인 구조는 아래 그림과 같다.

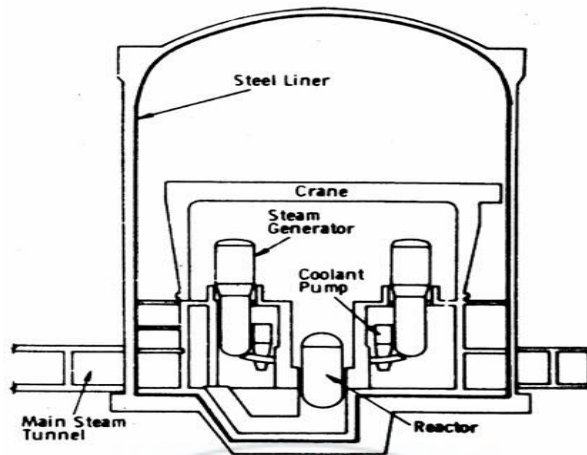


Fig. 2 격납건물 단면도

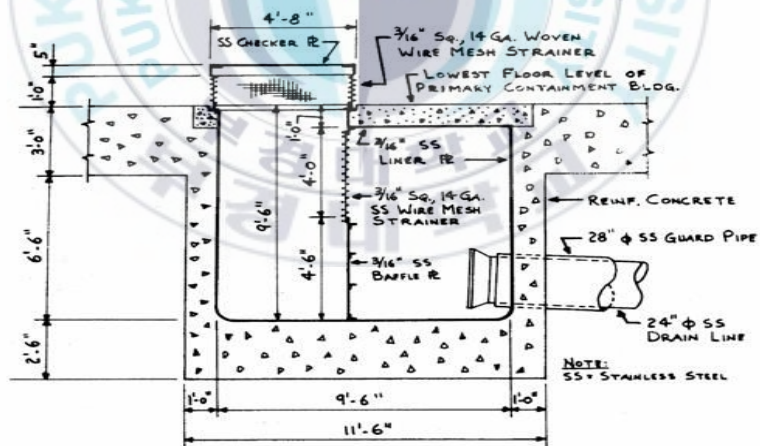


Fig. 3 Sump strainer 개략 상세도

내방사성 도장의 물성을 검증한 후, DBA시험용 시험편을 표면처리, 도장시공, 검사 및 품질보증에 대하여 도장작업자(Nuclear coating applicator)와 검사자(Nuclear coating inspector) 및 도장시공사(Nuclear coating contractor)가 모의 시험하여 인증된 동일한 품질의 도료를 현장에 시공한다. 품질관리 절차는 원자력발전소 내방사성 도장 품질 시험에 합격한 동일한 도료를 도료제조사, 표면처리, 도장시공, 도장검사 및 도장 품질보증의 5단계 과정을 만족한 품질등급 Q class의 도료를 내방사성 도료로 최종 인증한다.

상기 구조물에 적용된 원자력발전소 내방사성 도장에 대한 물성은 사전에 관련 기술기준에 따라 현장에 적용될 도장체계(Coating System)에 대한 물리적, 화학적 특성 등의 고유 물성 시험을 시행하며, 이러한 물성시험에 대한 설계기준으로 검증하는 요건은 다음과 같다.

2.2.1 ASTM D 3911(DBA Test)

내방사선 도료의 선정시험 중 설계기준사고(DBA) 시 도막의 건전성 유지 여부를 확인하기 위하여 모의시험을 통하여 도장체계의 물성을 확인하는 시험법이다. 본 기술기준은 시험조건, 방사선 조사 시험조건, 온도-압력 조건, 시편의 준비 및 평가 등에 대한 내용을 기술하고 있다.

일반적으로 시험편은 ASTM A36의 탄소강을 두께 3mm, 폭 2", 길이 4"의 크기로 하여 시험되는 도장의 도장시스템별, 표면처리 조건별로 4개의 시편을 제작하여 2개의 시편은 방사선조사를 한 후 DBA시험을 위하여 시험로(원자력산업계에서는 autoclave라 함)에 들어가고 나머지 2개의 시편은 별도의 방사선 조사를 하지 않고 autoclave에 집어넣고 시험한다.

일반적으로 DBA시험에 사용되는 변수는 시간별 압력, 온도조건과 대략 시험 시작 후 10초 정도 후에 고온고압의 환경조건을 원자력발전소 격납 건물의 사고조건과 모사하기 위하여 순간적으로 냉각하기 위한 냉각수(일

종의 quenching 효과로서 이 때 압력과 온도가 순간적으로 변화하면서 도막의 물성에 영향을 줌)의 종류에 따라 시험조건이 다르다.

일반적인 가압경수형 원자력발전소(Pressurized Water Reactor Nuclear Power Plants)에 적용할 수 있는 설계기준사고 조건은 다음과 같으며, ASTM D3911에 따른다.



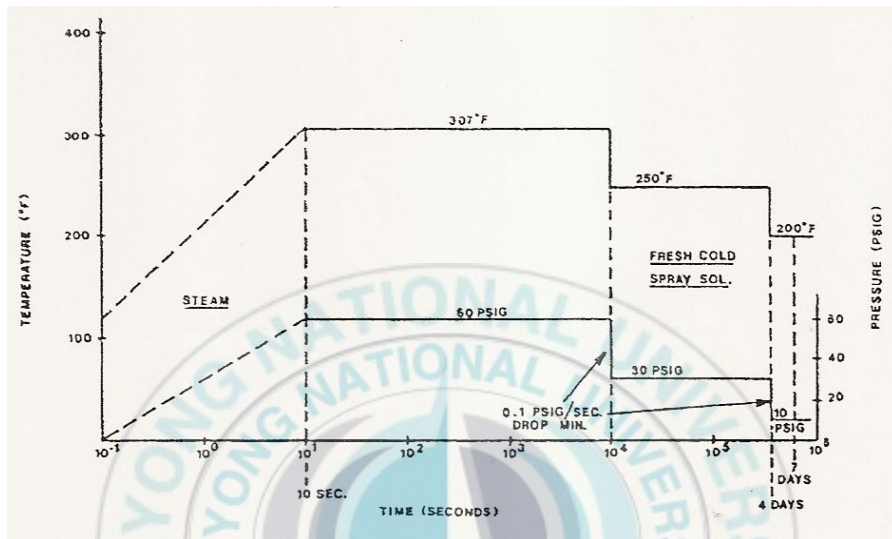


Fig. 4 원자력발전의 표준 설계기준사고 조건(DBA test condition)

2.2.2 ASTM D 4082(방사선 조사 시험)

내방사선 도료의 선정시험 중 방사선에 노출되는 지역에 적용되는 도료의 설계 수명기간 동안의 방사선 조사량에 대한 내구성을 확인하기 위한 시험법으로서 Coating Service Level I 과 Coating Service Level II의 지역에 공통적으로 적용되는 시험법이다.

본 연구를 위하여 열화된 시편에 조사한 총 방사선량(Total radiated dose)은 2×10^8 rads로 하였고, 시험편 면에서 받는 γ -에너지장(Gamma energy field)은 최소 시간당 2×10^8 rads의 량으로 조사하여 시편을 만들었으며 시편에서의 방사선조사량의 편차는 10% 이내로 조정되었다.

방사선 조사 시험을 시행하고 난 후 내방사선도장의 적용 가능여부를 결정하는 허용기준은 checking, cracking, flaking, delamination, peeling, blistering 등의 결함이 시편에 나타나면 안 된다.

2.2.3 제염시험(Decontamination Test)

제염시험은 ASTM D 4256에 따라 시행하며 원자력 산업설비에 적용되는 도장재료가 방사능 물질에 오염될 가능성이 있음으로, 적용된 도료시스템별 오염물을 씻어 내는 정도를 확인하기 위한 시험으로서 참고적인 제염율을 확인하기 위하여 시험을 시행하며, 절대적인 합격기준으로 적용되지는 않는다.

2.2.4 부착력 시험(Adhesion Test)

도막의 부착력 시험은 ASTM D 4541에 따라 시행하며, 도장설계를 위한 표준 부착력은 일반적으로 200 psi/in^2 로 관리한다. 시험편은 폭 2", 길이 4"의 크기로 하고, 최소 2개의 시편을 제작하여 시험 후 판정한다. 부착력의 측정은 시험의 정밀성을 고려하여 ASTM D 4537에 따라 인증된

도장 검사자가 수행한다.

2.2.5 내마모성 시험(Abrasion Resistance Test)

원자력발전의 내방사성 도장에 적용되는 도막의 내마모성능을 확인하는 시험방법은 ASTM D 4060에 따라 시행한다. 시편의 크기 및 두께는 ASTM D 4060에 기술된 요건에 따라 제작하고 내마모성 시험을 수행한 후에 도막의 무게 감소는 CS-17 wheel을 1000g의 중량으로 1000 사이클로 마모했을 때 175mg보다 크면 안 된다.

2.2.6 내화학성 시험(Chemical Resistance Test)

원자력발전의 내방사성 도장에 적용되는 도막의 내화학적 성능을 확인하는 시험방법은 ASTM D 3912에 따라 시행하며, 일반 노출환경 또는 침적조건에 따라 사용되는 시약은 다르지만, 현장에서 실제 적용되는 화학물질의 종류를 고려하여 설계됨으로 project/site specific condition에 따라 시행한다. 일반적으로 ASTM D 3912에 기술된 화학용액은 참조용이므로 사업수행 시에는 발전소에 실제로 적용되는 조건(침지조건이나 살수조건 등) 및 화학 용액으로 시험요건을 설정하는 것이 일반적이다.

2.2.7 화재 연소성 시험(Fire Evaluation Test)

원자력발전의 내방사성 도장에 적용되는 도막의 화재연소 성능을 확인하기 위한 시험방법은 ASTM E 84에 따른다. 일반적으로 화재연소성능을 확인하기 위한 기술기준으로서 ANSI 규정은 flame spread rate의 확인 요건과 동시에 허용기준을 50미만으로 설정하고 있으나, ASTM의 요건은 필요 시 수행과 flame spread rate의 권고치가 도막두께가 25mil(625 μ m) 이하 일 경우 25미만으로 설정하고 있고, smoke density에 대해서는 별도로 언급하고 있지 않다. 따라서 각 사업체에서는 필요에 따라 화재연소성 시험 요건을 규정하여야 하며, 발전소 별 필요 시 화재 연소성 요

건의 설정이 요구될 때에는 연기 확산 지수(Smoke Development Index)의 요건 추가가 필요하다고 할 수 있다.

2.2.8 열전도성 시험(Thermal Conductivity Test)

원자력발전의 내방사성 도장에 적용되는 도막의 열전도성 성능을 확인하는 시험방법은 ASTM D 2214 또는 ASTM C 177을 적용한다. 일반적으로 징크 프라이머 위 에폭시 도장체계(I.Z+E.F)나 에폭시 프라이머 위에 에폭시 상도의 도장시스템(E.P+E.F)에서는 열전달 계수(Thermal Conductivity Coefficient)가 1000~3500 (B.t.u)/(h)(ft²)(°F)/mil의 범위에 있다.



3. 교류 임피던스 이론적 배경

3.1 교류임피던스에 대한 이론

3.1.1 교류임피던스 기초 이론

교류임피던스는 전기회로에서 전류가 흐르는 통로에 방해가 되는 저항(resistance), 축전기(capacitor) 및 유전기(inductor) 등으로부터 발생하는 복합저항이다.

저항에 대해 간단히 정리하면, 저항 R (단위, ohm(Ω))을 전기의 양에 연결되는 가장 기본적인 방정식은 Ohm의 법칙으로써,

$$V = I \cdot R \quad (1)$$

이다. Ohm의 법칙을 교류의 회로로 바꾸면,

$$v = i \cdot R \quad (2)$$

이 사용된다. 다시 말하자면 어느 회로 상에서 저항의 역할은 직류회로, 또는 교류회로를 구별할 필요가 없다. 그러나 축전기 또는 유전기의 역할은 그들이 직류 또는 교류회로에 따라서 다르다. 임피던스 측정법은 교류 전원에 의해서 발생하는 전류의 측정으로 계산한다. 교류는 어떤 일정한 시간 간격에 따라 그 크기가 주기적으로 변하며, 그 크기는

$$v(t) = v_{\max} \cdot \sin(\omega t) \quad (3)$$

로 표시된다. ω 는 각속도(angular velocity)로써 그 값은 $2\pi f$ 이다. 여기서 f 는 단위 s^{-1} 를 가지는 주파수이다. 교류회로에 저항만 끼어 있을 때는

Ohm의 법칙을 그대로 사용하여

$$i(t) = \frac{v(t)}{R} = \frac{v_{\max} \cdot \sin(\omega t)}{R} = i_{\max} \cdot \sin(\omega t) \quad (4)$$

이 된다. 이 식을 식(3)과 비교해 보면, 전류값은 저항 R의 값에 따라 전위와 함께 sine 함수를 따라다닌다. 즉 이들 두 양들은 위상이 같다. 그러면 축전기가 전기회로 중에 연결되었을 경우, 축전기는 두 개의 전도체 판 사이에 유전성물질(dielectric material)을 채워 넣어 만들기 때문에 직류 회로에 연결하면 회로는 열리고 유전성 물질에 충전(charge)된다. 충전된 양 Q는

$$Q = C \cdot V \quad (5)$$

이며 여기서 C는 축전기의 크기이며 그 단위는 Faraday(=F)이다. 교류 회로 속에서는 v의 값이 식 (3)으로 표현되므로 축전기에 충전되는 전기의 양은

$$Q = C \cdot v_{\max} \cdot \sin(\omega t) \quad (5)'$$

이 될 것이며, 이때 흐르는 전류는 시간에 따른 전기량의 변화이므로

$$i(t) = dQ/dt = C \cdot v_{\max} \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \quad (6)$$

$$= i_{\max} \cdot \cos(\omega t) \quad (6)'$$

이 됨을 알 수 있다. 이 식으로부터 $i_{\max}$ 는 C 및 ω 에 달렸다는 점과 아울러 전류의 값은 cosine 함수를 따르므로 전위보다 $\pi/2$ radian만큼의 위상차를 가지고 있다. 이 점이 저항에 흐르는 전류(식 (4))와 크게 다른

점이라고 하겠다.

식 (6)과 (6)'으로부터

$$i_{\max} = C \cdot v_{\max} \cdot \omega \quad (7)$$

임을 알 수 있고 Ohm의 법칙으로부터 $i=v/R$ 이므로 식(7)에 의하면 저항 R 에 해당하는 양은

$$X_c = \frac{v_{\max}}{i_{\max}} = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi fC} \quad (8)$$

이 됨을 알 수 있다. 교류회로 안에서의 축전기는 직류회로 속에서 저항처럼 행동하는데 이에 해당하는 양을 reactance라고 하고, 그 단위는 저항과 마찬가지로 Ω 이다. Reactance에는 위에서 설명한 바와 같이 축전기로부터 생기는 capacitive reactance와 유전기로 인하여 생기는 inductive reactance가 있다. 식 (8)로부터 알 수 있는 사실은 교류회로 안에서의 축전기는 저항의 역할을 하는데 그의 크기는 주파수 f 와 축전기의 크기에 반비례한다는 사실이다.

교류전원을 코일에 연결해도 전류가 흐르는 데에 저항을 받는다. 이는 전류가 흐름에 따라 자장이 생기고, 그로 인해 역 전류가 발생되기 때문이다. 이와 같은 성질을 가지는 coil을 유전기라고 하고, L 이란 부호로 나타내며 그 단위는 Henry이다. 유전기를 통과하는 전위는

$$v(t) = 2\pi f \cdot L \cdot i(t) \quad (9)$$

이며, 따라서 inductive reactance X_L 은

$$X_L = \frac{v(t)}{i(t)} = 2\pi fL \quad (10)$$

이 된다. 이 때의 전류는 전위에 대해서 $90^\circ(\pi/2)$ 뒤져간다.

이들 세 개(저항, 축전기, 유전기)가 함께 직렬로 연결된 경우에는 이들의 크기와 서로간의 위상관계는 벡터의 합으로 나타낸다. 저항까지 합친 임피던스는 이들 전체의 벡터합이 되는데, 위상이 서로 다른 경우에는 대수합을 직접 표시할 수 없으므로 축전기와 유전기의 양에는 허수라는 걸 나타내기 위하여 허수상수 $j(=\sqrt{-1})$ 를 덧붙여서 표기한다. 즉,

$$X = R + jX_L - jX_C = R + j(X_L - X_C) \quad (11)$$

로 나타내며, 이는 곧 저항의 값은 축전기와 유전기로부터 얻은 값과 직접 더하거나 뺄 수 없음을 시사한다.

따라서 이 벡터합의 절대 scalar값은

$$X = \sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2} \quad (12)$$

이고 이때의 위상각(phase angle)은

$$\Phi = \tan^{-1} \left[\frac{\sqrt{R^2 + (R_C - R_L)^2}}{R} \right] \quad (13)$$

이 된다. 이들 중 식 (11)에 나타난 내용을 좀 더 새겨 보면, 실수항 R 과 허수항 X 들이 함께 섞여 있다. 이와 같은 경우를 도표로 나타내려면 Cartesian 또는 극좌표(polar coordinate)의 방식을 따를 수 있다. 임피던스 측정결과를 도시하는 데에는 Cartesian방식을 많이 사용하므로, 식 (11)을 먼저 Cartesian방식으로 표현하면

$$Z(\omega) = Z' + j Z'' \quad (14)$$

가 되는데 여기서 실수항인 Z' 은 x값으로 사용하고 허수인 Z'' 의 값을 y값으로 사용하여 정해지는 값에 한점을 찍는다. 또한 이렇게 정해진 값을 $Z(\omega)$ 라고 표시하여 이 임피던스의 값은 주파수의 함수임을 시사한다. Z'' 의 값은 축전기 또는 유전기에서 발생하는가에 따라 y축의 양(+) 또는 음(-)의 값을 나타낸다. 같은 결과를 극좌표로도 표시할 수도 있는데, 이 경우에는

$$Z(\omega) = |Z| e^{j\Phi} \quad (15)$$

이다. 그럼 지금까지의 소개된 양들을 정리해 보면 다음과 같다.

$$|Z|^2 = (Z')^2 + (Z'')^2 \quad (12)'$$

$$\Phi = \tan^{-1} \left[\frac{Z''}{Z'} \right] \quad (13)'$$

$$Z' = |Z| \cos \Phi \quad (16)$$

$$Z'' = |Z| \sin \Phi \quad (17)$$

이들 상호관계는 매우 중요하고 임피던스 측정 뒤에 필요한 양을 계산하는데 쓰인다. 이들 함수는 모두 교류신호의 주파수의 함수이다.

3.1.2 부식계의 등가회로와 임피던스특성

금속/수용액계면은 저항, 축전기, 코일에 의한 전기회로 소자의 조합(등가회로)으로 나타내는 것이 가능하다. 교류임피던스에 의한 해석에도 기본적으로 금속/수용액계면에서 일어나는 현상을 전부 전기회로로 치환하는 것이 가능하다. 부식계에서 일어나는 몇 개의 등가회로 및 그 임피던스특성은 다음과 같다.

3.1.2.1 등가회로

가장 단순한 부식계의 등가회로는 전하이동저항 R_{ct} 와 C_{dl} (전기 2중층)의 병렬회로에 용액저항 R_s 가 직렬로 결합한 회로를 Fig. 5(a)와 같이 나타낼 수가 있다. 그리고 Fig. 5(b)는 음극반응에 확산이 관여하는 경우의 등가회로이다. 부식반응에 확산이 관여하는 경우에는 확산임피던스인 Warburg 임피던스 W 가 도입된다.

Fig. 5(a)의 등가회로에 미소진폭(일반적으로 10mV이하)의 교류전압을 Fig. 5(c)와 같이 인가시켰을 때 도막/용액 계면에는 C_{dl} 이 존재하기 때문에 인가한 전압의 주파수로부터 다른 진폭 및 위상차(인가전압과 응답전류의 위상차, Fig. 5(c) 참조)를 가진 전류응답을 얻게 된다.

교류 임피던스법이란 측정계에 여러 가지 주파수의 교류를 인가하여 그 임피던스의 절대값 ($=\Delta V/\Delta i$)와 위상차 θ 를 측정하는 것이다. Fig. 5(a)와 같은 등가회로에 나타난 두 임피던스성분 즉 저항 R_{ct} 와 C_{dl} 로부터 유래되는 admittance의 합은

$$\frac{1}{Z(\omega)} = \frac{1}{R_{ct}} + j\omega C$$

이 되는데 이를 $Z(\omega)$ 에 대하여 풀은 다음 이들과 직렬로 연결된 R_s 와 합쳐서 적당히 정리하면 등가회로의 임피던스 Z 는 식 (18)로 나타낼 수

있다.

$$\begin{aligned}
 Z(\omega) &= R_s + \frac{R_{CT}(1 - j\omega C_{dl} R_{CT})}{(1 + j\omega C_{dl} R_{CT})(1 - j\omega C_{dl} R_{CT})} \\
 &= R_s + \frac{R_{CT}}{1 + \omega^2 R_{CT}^2 C_{dl}^2} - \frac{j\omega R_{CT}^2 C_{dl}}{1 + \omega^2 R_{CT}^2 C_{dl}^2} \quad (18)
 \end{aligned}$$

여기서 ω 는 각 주파수($\omega=2\pi f$, f : 주파수)이다. 고주파수($\omega \rightarrow \infty$)에서는 C_{dl} 의 임피던스가 $1/\omega C_{dl} \rightarrow 0$ 로 되기 때문에 전류는 C_{dl} 와 R_s 를 통해서 흘러 결과적으로 전기이중층 용량 C_{dl} 과 용액저항 R_s 가 측정된다. 한편 저주파수($\omega \rightarrow 0$)에서는 C_{dl} 의 임피던스가 무한대로 되어 전류는 R_{CT} 와 R_s 를 통해서 흐르기 때문에 R_{CT} 와 R_s 가 측정된다. 그러므로 저주파수의 임피던스와 고주파수의 임피던스의 차로부터 전하이동 저항 R_{CT} 를 구할 수 있다. 여기서 앞에서 설명한 분극저항 R_p 는 정상 분극곡선에 있어서 전류-전위곡선의 미소과전압 영역(<10mV)의 기울기에 해당하는 값으로 교류 임피던스에 있어서는 $\omega \rightarrow 0$ 때의 임피던스로서 정의할 수 있다. 따라서 anode반응, cathode반응이 전하 이동율속의 경우에는 $R_p=R_c$ 로 된다. 예를 들면 산성용액에 중에서의 철의 부식이 이것에 상당한다.

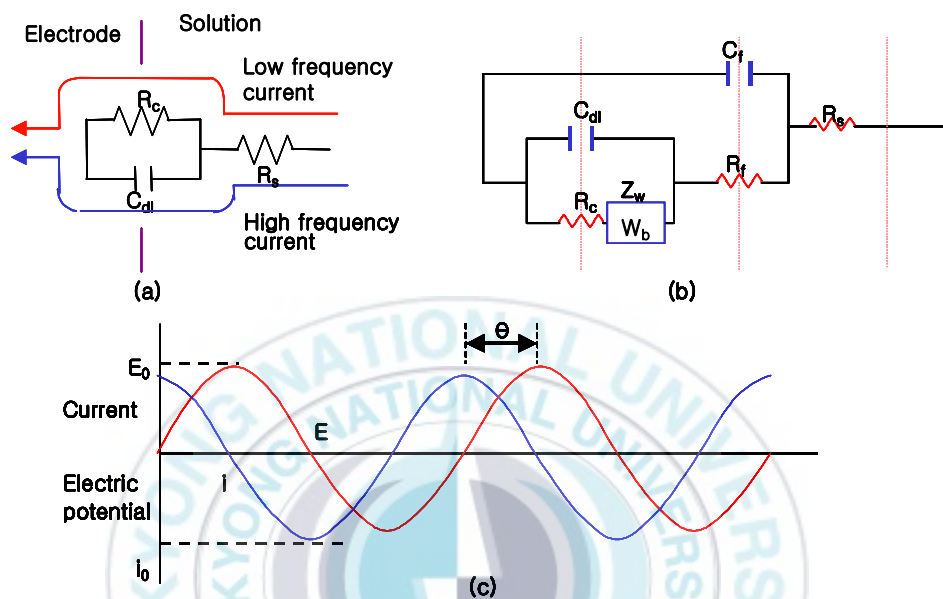


Fig. 5 Equivalent circuit, and current response.
 (a) Charge transfer control
 (b) Anode reaction : Charge transfer control
 Cathode reaction : Diffusion
 (c) Current response to applied alternating current potential.
 Resistance : $\theta=0^\circ$, Condenser : $\theta=-90^\circ$, Coil : $\theta=+90^\circ$

3.1.2.2 교류 임피던스의 표시 방법

교류 임피던스의 표시 방법으로는 Nyquist plot과 Bode plot의 두 가지가 주로 이용되고 있다. 일반적으로 임피던스의 실수부를 R , 허수부를 X 라고 하면 식 (14)로부터 교류 임피던스 Z 는 식 (19)으로 표시된다.

$$Z = R + jX \quad (19)$$

Nyquist plot 은 각주파수 ω 를 파라미터로 하고, 임피던스 $Z, |Z|$ 의 실수부 R 을 횡축, 허수부 X 를 종축으로 하여 복소 평면상에 linear scale로 표시하는 방법으로 전기화학분야에서는 Cole-Cole plot이라고 불리어지고 있다.

Bode plot은 횡축에 주파수 f 의 대수, 종축에 임피던스의 절대치 하여 두 개의곡선을 조합해서 표시하는 방법이다.

도장강판에 대한 부식을 해석할 수 있는 등가회로의 예를 Fig. 6에 나타내었다. 그리고 그 특성을 나타내는 Nyquist plot 및 Bode plot을 각각 Fig. 7, Fig. 8에 나타내었다. 또한 여기에서는 Nyquist plot과 Bode plot의 특징을 설명한다.

먼저 복소평면 표시인 Nyquist plot은 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 알기 쉬운 표시 방법이고, 몇 개의 완전한 반원을 만드는 경우에는 매우 정밀도가 높은 것으로서 그 저항성분이나 시간정수를 결정할 수 있다.

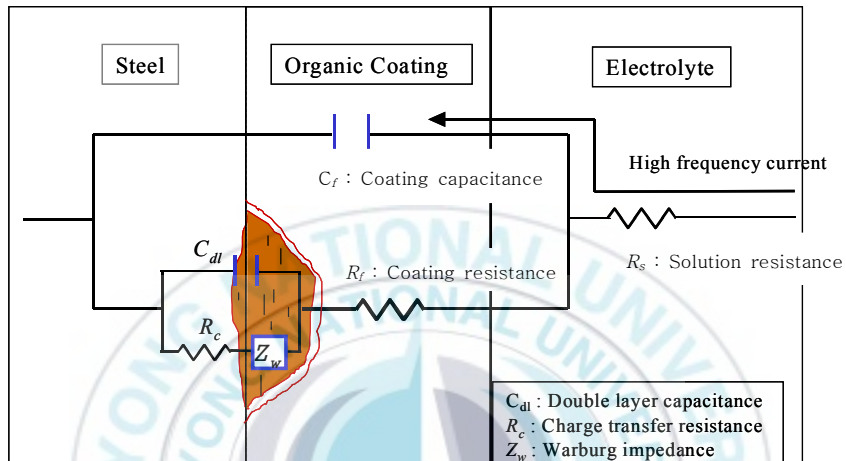


Fig. 6. Equivalent circuit of organic coating

한편 Bode plot은 Fig. 7에 나타나 있는 것과 같이 주파수와 임피던스가 대수로 표시되기 때문에 매우 높게 읽을 수는 없지만, 저주파수에서 고주파수까지 넓은 범위의 임피던스의 변화를 나타낼 수 있다. 더욱이 임피던스가 측정시간에 따라 큰 폭으로 변화하는 경우에도 동일 그림상에 표시할 수 있고 경시변화의 비교가 쉽고 오차의 비율은 그림의 어디에서도 일정하게 평가할 수 있다. 이런 이유로부터 도장강판의 부식과 같이 임피던스 및 시간정수가 큰 폭으로 차이가 나는 계에 대한 해석은 Bode plot의 쪽이 적당하다고 할 수 있다.



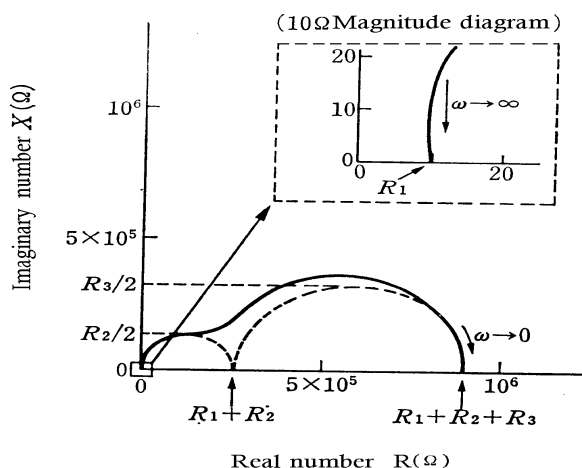


Fig. 7. Calculated impedance diagram(Nyquist plot) for degraded coated steel.

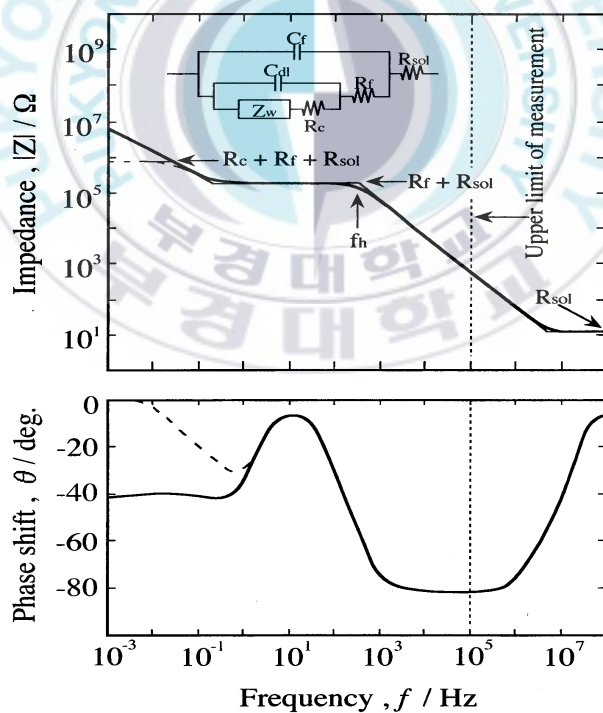


Fig. 8. Equivalent circuit and calculated impedance diagram(Bode plot) for degraded coated steel.

4. 시편제작 및 시험

4.1 시험편 제작

시험편 제작은 국내에서 가동 중인 원자력발전소에 실제 적용된 도장시스템과 적용 중에 현장에서 임의로 보수한 도장시스템을 대상으로 하였다. Table 1에 나타난 시험편은 강제 열화 과정을 거친 control 시편(도장의 사용 수명기간 동안 자연 열화된 상태), 방사선 조사시험만 수행한 시편, DBA시험만 수행한 시편, 방사선조사와 DBA시험을 함께 수행한 시편을 도장시스템별, 표면처리 별로 제작하여 각각 단계별로 시험을 진행하였다.

Table 1. Preparation of specimens

Substrate	System	Pre-treatment	Sample number			
			RAD+D BA	Only DBA	Only RAD	Control
Steel(SI DE A/B)	Z.P/E.F	SP10	S111, S112	S116, S117	S119	S118
	Z.P/E.F/E. F	SP2+SP 1	S221, S222	S226, S227	S229	S228
	Z.P/E.F/E. F	SP1	S231, S232	S236, S237	S239	S238
	Z.P/E.F/P. E.F	SP2+SP 1	S341, S342	S346, S347	S349	S348
	Z.P/E.F/P. E.F	SP1	S351, S352	S356, S357	S359	S358
	E.P/E.F	SP10	S461, S462	S466, S467	S469	S468
소계			12 E/A	12 E/A	6 E/A	6 E/A

4.2 시편제작, 표면처리, 도장 및 열화과정

각 시험편은 2.2항에서 기술한 규격으로 제작하였으며, 강재의 표면처리는 SSPC SP10으로 처리하였고 보수도장체계에 대해서는 기존 도막의 표면처리를 SSPC SP1으로만 한 것과, SSPC SP1을 한 후에 SSPC SP2를 병행하여 처리한 후, 상도를 시공하는 것으로 구분하여 제작하였다.

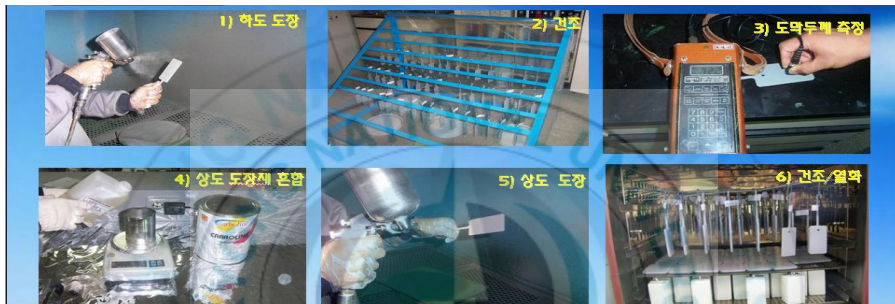


Fig. 9 표면처리 과정의 시편

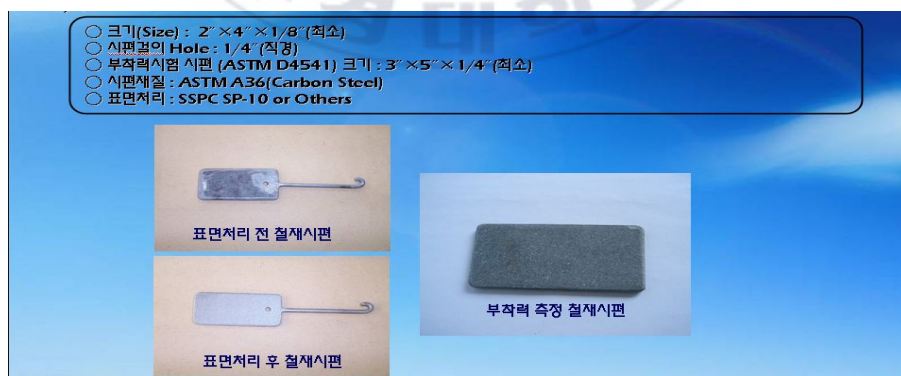


Fig. 10 도장시공 및 열화과정

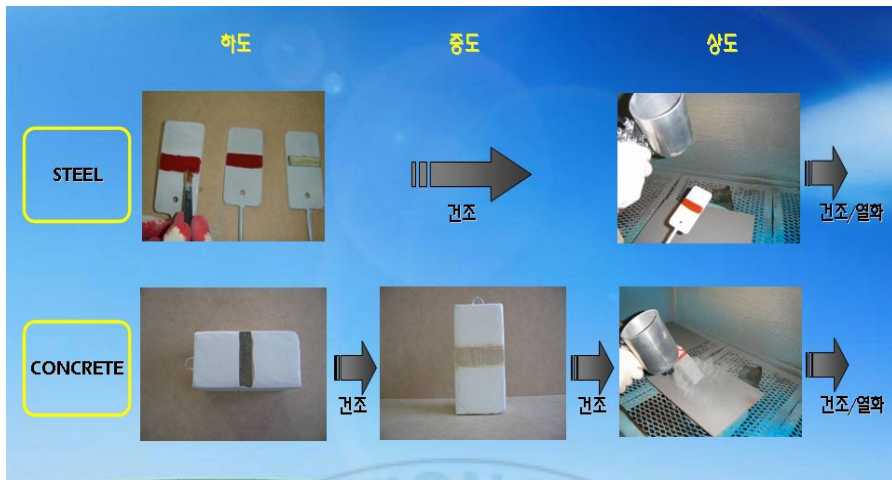


Fig. 11 보수도장용 시험시편의 제작 과정

4.3 방사선 조사 시험

방사선 조사 시험은 ASTM D 4082에 따라 실시하였다. 총 방사선(Total radiated dose)은 2×10^8 rads로 조사하였으며, 방사선 조사시험 기간은 약 8일 정도 소요되었다. DBA시험은 ASTM D 3911 및 D 5139에 따라 방사선 조사가 완료된 시편 2개와 방사선 조사를 하지 않은 시편 2개를 같이 시험하도록 되어 있는 요건에 따라 각각의 도장시스템별로 4개의 시편을 제작하였다. 방사선 조사시험은 Fig. 12와 같이 실시하였다



Fig. 12 방사선 조사 시험을 위한 조사과정과 방사선원

4.4 설계기준사고 시험(DBA시험)

설계기준사고시험은 ASTM D 3911에 의해 실시하였으며, 총 시험기간은 site specific condition에 따라 30일 동안 autoclave에서 온도/압력 시험을 Fig. 13과 같이 수행하였다.



Fig. 13 설계기준사고 시험(DBA시험)

4.5 교류임피던스 측정

임피던스 측정은 시험전극과 탄소전극으로 구성된 2전극 방식(方式)으로 측정하였고, 전해질 용액은 ASTM D 1141에 의한 인공해수를 사용하였다. 측정에 사용된 장비는 Solartron사(영국)의 FRA(Frequency Response Analyzer) 1260 과 Dielectric interface 1296 이고, 측정 주파수는 $10^5 \sim 10^{-2}\text{Hz}$ 까지 설정하여 측정하였다. 인가 교류 전압은 50mV, 측정점은 decade당 5로 하였다. 측정된 임피던스 값은 각 주파수의 대수에 대한 임피던스의 절대치의 대수와 위상차를 표시하는 Bode plot으로 나타내었다.

시험편은 Table 1에 나타낸 것과 같이 조건별 시험편 제작에서 기준시험편으로 제작한 control 시편 6개, 방사선 조사만 한 시편 6개를 EIS로 측정하였다. 또한 DBA처리한 시험편 24개가 대부분이 열화되어 EIS 측정이 불가능했고, 그 중 7개는 측정이 가능했다.

4.6 전자현미경 사진

방사선 조사에 의해 도막 층의 물리적 노화 거동을 규명하기 위하여 도막의 표면에서 소지까지의 도막 층을 전자현미경으로 그 이미지를 확인하였다.



5. 결과 및 고찰

5.1 열화조건에 따른 도막의 외관의 사진

열화조건은 표준 시험편용으로 작성한 control 시험편 6개, 방사선 조사 시험편 6개, DBA 시험 시험편 12개, 방사선 조사(RAD) 및 DBA 시험을 실시한 시험편 12개를 열화시험을 실시하였다. 그 중 특히 DBA+RAD 및 DBA 처리한 시험편 총 24개 중 DBA+RAD 시험편 2개, DBA 처리한 시험편 5개 이외는 열화가 심하게 발생하여 EIS시험을 수행하기 불가능했다.

Fig. 14에서 Fig. 20까지는 DBA로 처리한 시험편 12개 중에서 S226, S236, S346, S356, S467의 5개, RAD+DBA처리한 시험편 12개에 중에서 S342와 S462의 2개 시험편에 대한 외관 사진을 나타내었다.

AFTER TEST PANEL - S342 (Irradiation & DBA)

SIDE	After Aging	After Irradiation	After DBA
A			
B			

Fig. 14. S 342 시험편의 외관사진

AFTER TEST PANEL - S462 (Irradiation & DBA)			
SIDE	After Aging	After Irradiation	After DBA
A			
B			

Fig. 15. S 462 시험편의 외관사진

AFTER TEST PANEL — S226 (Only DBA)		
SIDE	After Aging	After DBA
A		
B		

Fig. 16. S 226 시험편의 외관사진

AFTER TEST PANEL — S236 (Only DBA)		
SIDE	After Aging	After DBA
A		
B		

Fig. 17. S 236 시험편의 외관사진

AFTER TEST PANEL — S346 (Only DBA)		
SIDE	After Aging	After DBA
A		
B		

Fig. 18. S 346 시험편의 외관사진

AFTER TEST PANEL — S356 (Only DBA)		
SIDE	After Aging	After DBA
A		
B		

Fig. 19. S 356 시험편의 외관사진

AFTER TEST PANEL — S467 (Only DBA)		
SIDE	After Aging	After DBA
A		
B		

Fig. 20. S 467 시험편의 외관사진

5.2 교류 임피던스 측정 결과

원자력발전용 설비에 적용되는 도막에 대한 열화 거동을 정량적으로 평가하기 위하여 각 조건에 따른 도막의 임피던스 특성을 나타내었다.

Fig. 21은 원자력발전용 설비에 적용된 도막의 수명기간 만큼 자연 열화시킨 시험편을 각 도장시스템별로 제작한 control 시험편의 임피던스 특성을 나타내었다. 여기서 전체 도장시스템에서 $10^{10}\Omega$ 이상의 높은 임피던스 특성을 나타내었다. Control 시험편에 적용한 열화에서는 도막의 기능을 그대로 유지한다는 것을 알 수 있었다.

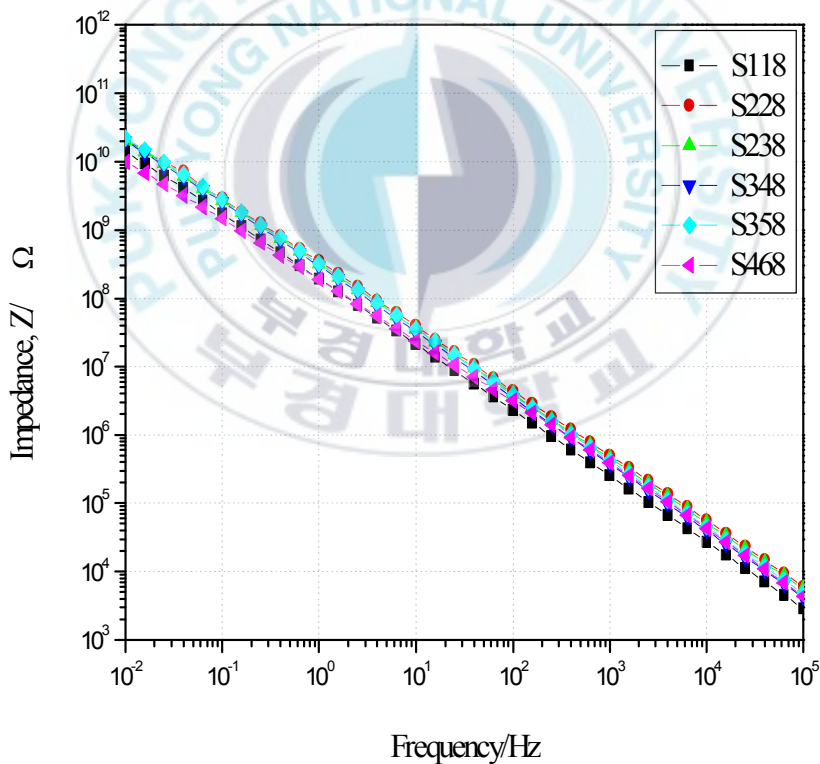


Fig. 21. Control 시험편의 임피던스 특성

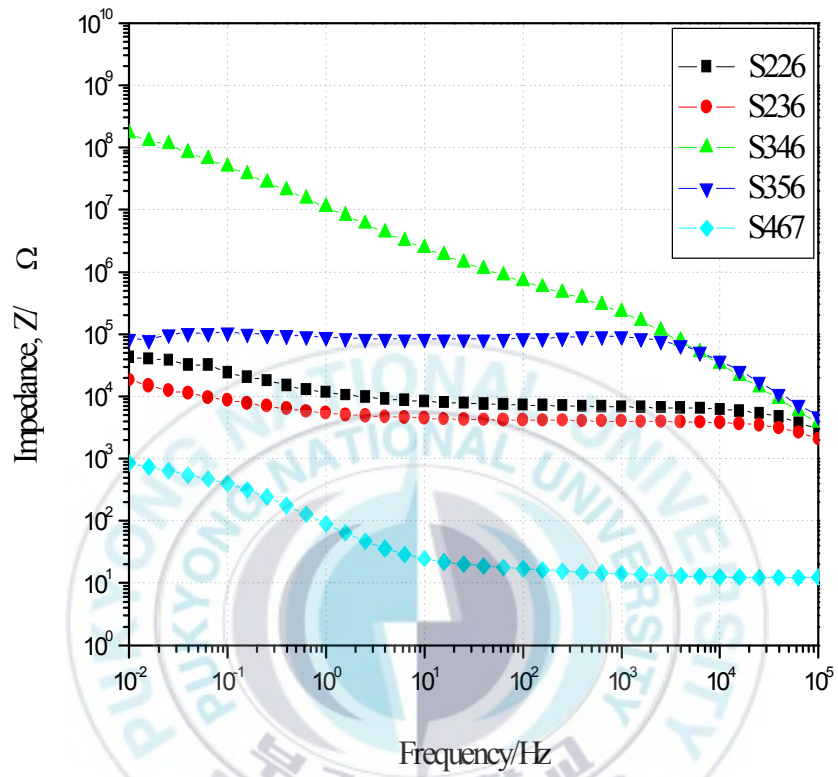


Fig. 22. DBA 처리한 시험편의 임피던스 특성

Fig. 22에서는 DBA 처리 한 시험편 중 S226, S236, S346, S356, S467에 대한 임피던스 특성을 나타내었다. 여기서 S346은 $10^8 \Omega$ 정도의 임피던스 특성을 나타내었으나, S226, S236, S356 및 S467은 $10^5 \Omega$ 의 낮은 임피던스 특성을 나타내었다. 이것은 도막의 기능을 완전히 상실한 상태라고 말할 수 있다.

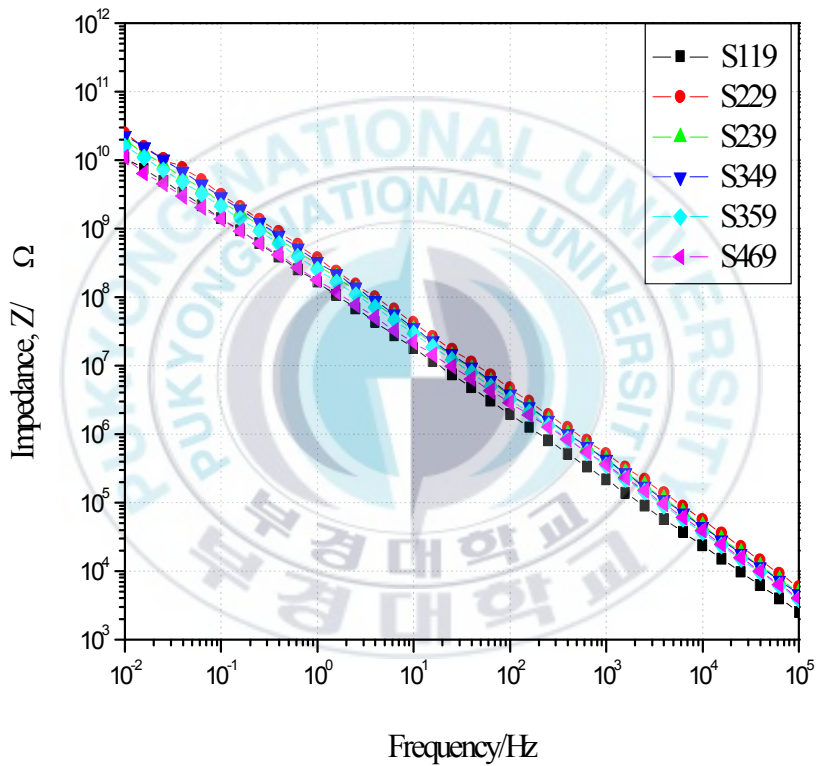


Fig. 23. 방사선(RAD)처리한 시험편의 임피던스 특성

Fig. 23에서는 방사선(RAD)만 처리한 시험편의 임피던스 특성을 나타내었다. 여기서 시험편 모두 $10^{10}\Omega$ 이상의 높은 임피던스 특성을 나타내는 것을 알 수 있다. 즉, 방사선에 의해서 도막의 성능에 그다지 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있었다.

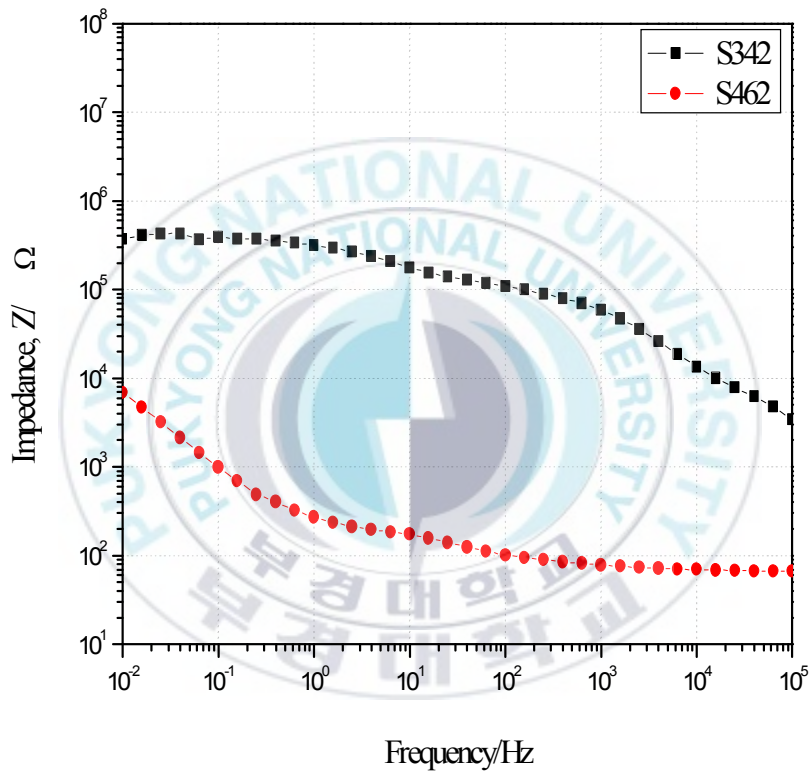


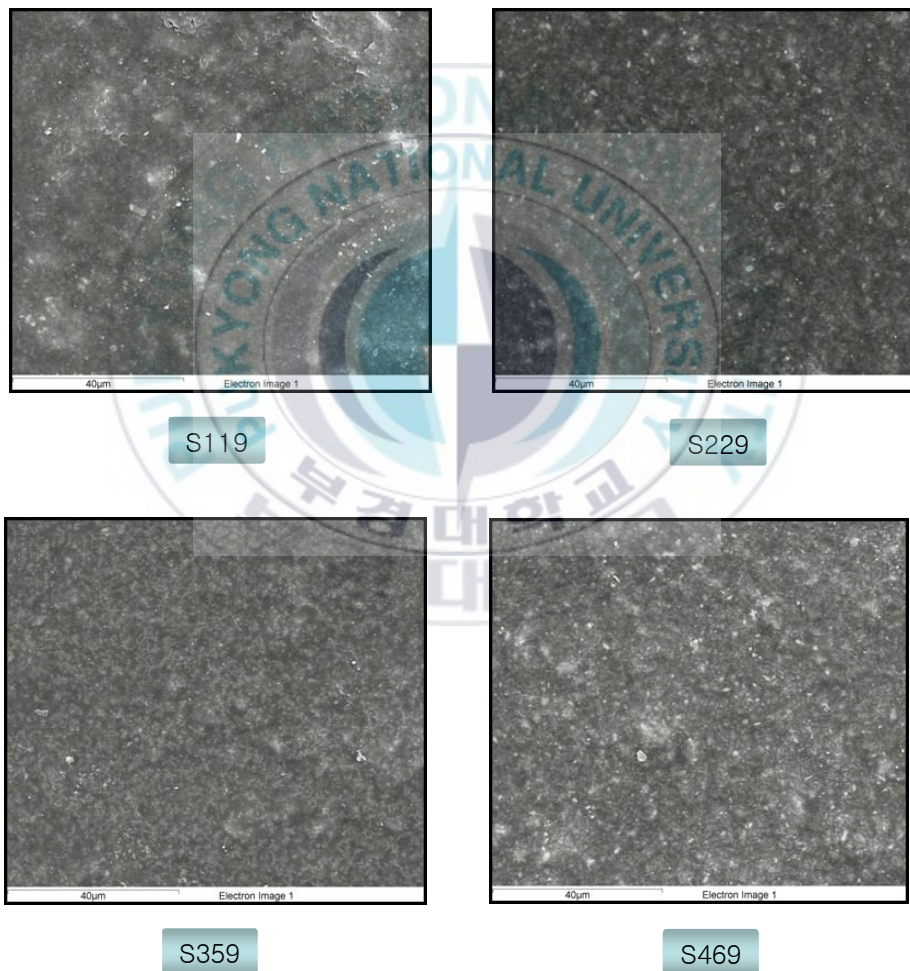
Fig. 24. RAD+DBA 처리한 시험편의 임피던스 특성

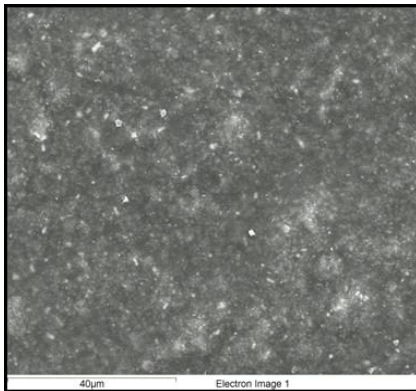
Fig. 24에서는 RAD+DBA 시험편의 임피던스 특성을 나타내었다. 12종 시험편 중에 S342, S462만이 임피던스의 측정이 가능하였지만, 모두 낮은 임피던스 특성을 나타내었다. 즉, DBA만 처리한 시험편보다 더욱더 많이 열화되어 완전히 도막의 기능을 상실한 상태로 판단된다.



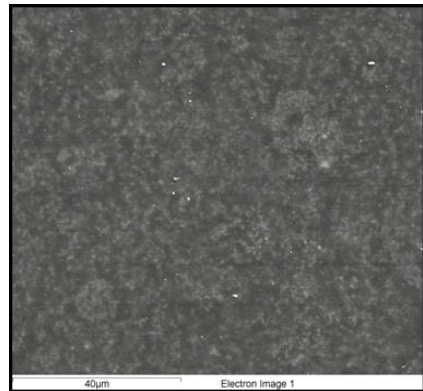
5.3 방사선(RAD)을 조사한 시험편의 SEM 이미지

원자력발전용 설비에 적용되는 도막에 있어서 방사선에 의해 열화된 도막의 물리적 표면 특성을 조사하기 위하여 표면의 SEM 이미지를 관찰하였다. Fig. 25에서는 도료 시스템에 따라 표면상태는 약간의 차이는 있으나 열화에 의한 도막의 노화의 영향은 나타나지 않았다.





S239



S349

Fig. 25. 방사선(RAD)을 조사한 각 시험편의 SEM 이미지



5.4. 침지조건에서의 임피던스 특성

도막의 열화조건, RAD+DBA, DBA, RAD 및 control 시험에서 RAD+DBA, DBA 시험편은 대부분 임피던스 특성이 매우 낮게 측정되어 도막으로서의 기능을 상실한 상태로 판단되었다. 여기서 도장시스템별 RAD만 조사된 시험편을 자연노화 환경에 노출되었을 때의 도막의 기능을 조사하기 위하여 3% NaCl용액에 침지하여 시간의 경과에 따른 임피던스 특성을 측정하였다.

Fig. 26에서는 S119, S229, S239, S349, S359, S469의 시험편을 자연적으로 노화를 시키기 위하여 3% NaCl용액에 침지한 상태에서 시간 경과(1일~74일)에 따른 임피던스 특성을 측정하였다. 여기서 S119를 제외한 전 시험편 모두 $10^9\Omega$ 이상의 높은 임피던스 특성을 나타내었다. 즉, RAD 처리한 시험편 자체에도 도막의 저항 값 변화를 없었지만, 3% NaCl 용액에 침지한 상태에서 저항 값의 변화가 없는 것은 $2 \times 10^8 \text{rads}$ 정도의 방사량에서는 그다지 영향을 받지 않는 것으로 생각된다. S119의 경우는 74일에서 $10^8\Omega$ 정도 떨어지는 것을 알 수 있었다. 이 경우, 표면처리 정도 및 도장규격상의 문제는 없는 것으로 판단되고, 도장 시공시 약간의 도막의 결함에 의해 것으로 생각된다.

S119

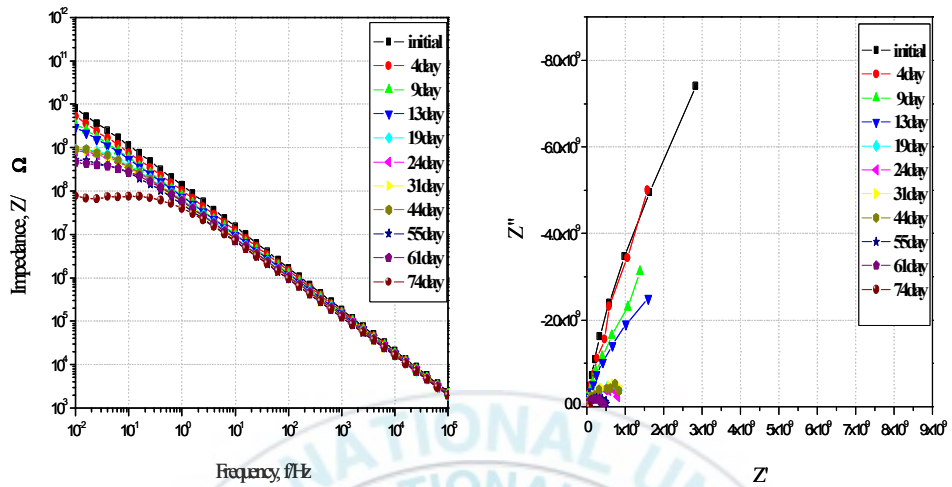


Fig. 26. S 119 시험편의 임피던스 특성

S229

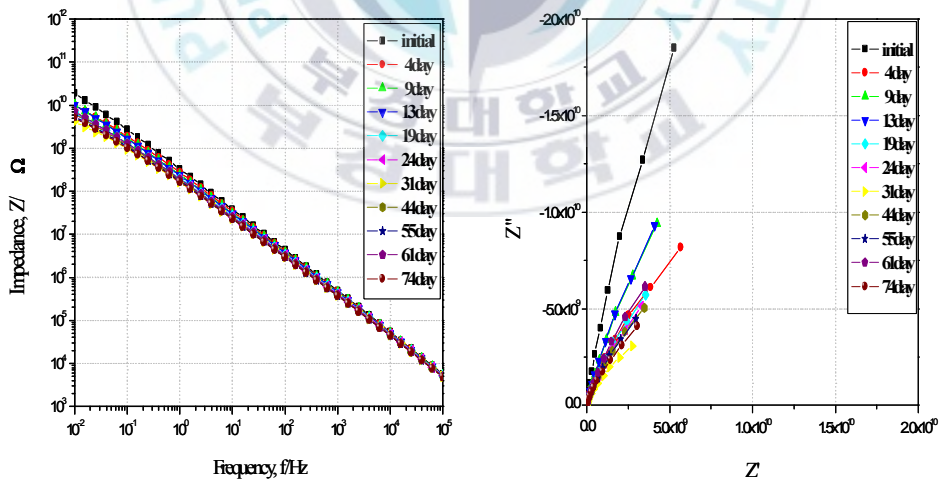


Fig. 27. S 229 시험편의 임피던스 특성

S239

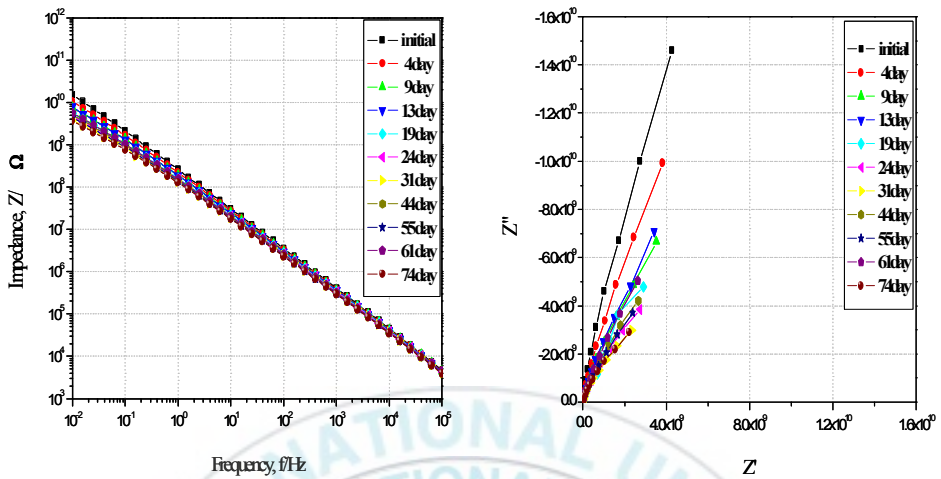


Fig. 28. S 239 시험편의 임피던스 특성

S349

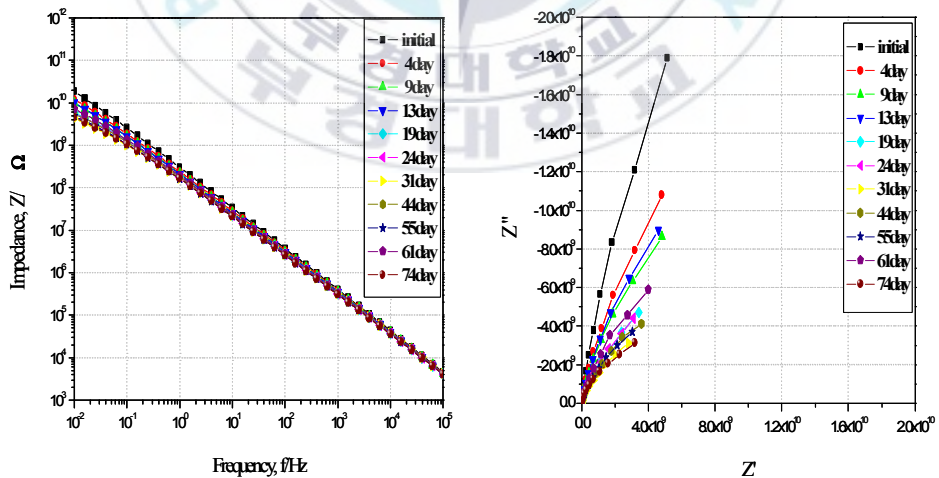


Fig. 29. S 349 시험편의 임피던스 특성

S359

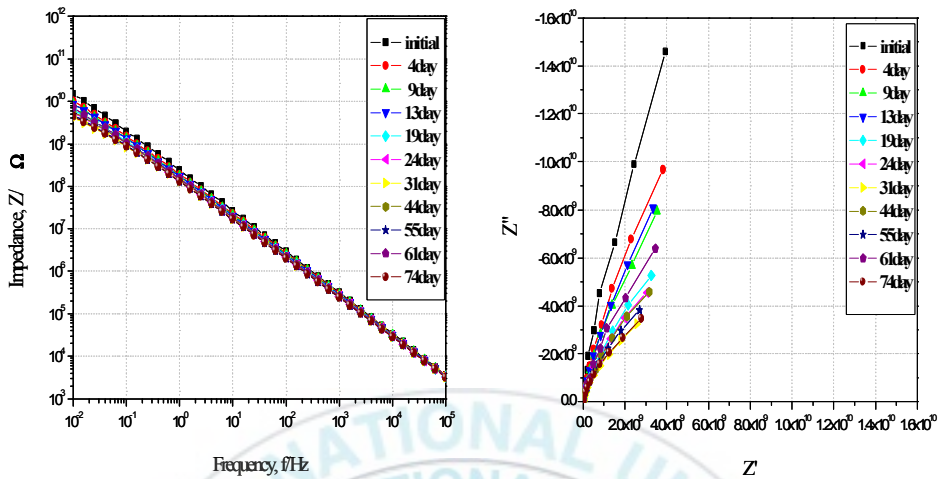


Fig. 30. S 359 시험편의 임피던스 특성

S469

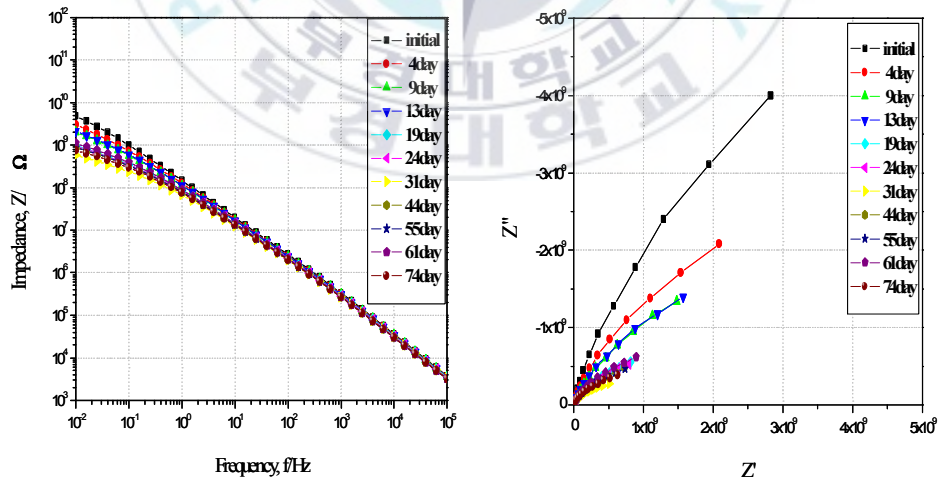


Fig. 31 S 469 시험편의 임피던스 특성

6. 결론 및 의견

본 연구의 목적은 현장에 기 시공되어 수십년 동안 특정 환경에 노출되어 사용 중인 도장(In-service coating)의 열화정도와 설계기준사고시험 후의 도막의 변화를 측정한 결론 의견은 다음과 같다.

(1) 열화조건은 ASTM D-33 committee에서 발행한 지시서에 따라 2주 동안 150°F 조건에서 열로서 열화시켰다. 이러한 조건은 원자력 발전소 내방사성 도장의 사용조건이 일반 대기조건에서 약간의 방사선원에 노출되는 것을 고려하여 작성된 것으로 판단되나, 실질적으로 이러한 조건이 수십년 동안 사용한 도막의 노화조건과 동일한 것인 지에 대한 연구는 별도로 수행한 적이 없는 것으로 알고 있다. 이번 연구를 통하여 ASTM D-33 committee에서 작성한 열화조건이 EIS시험을 통하여 도막과 모재와의 계면 사이에서의 전기화학적 저항치의 변화가 Fig. 23, Fig. 26~31과 같이 일반 신도막의 경우와 거의 유사한 임피던스 특성을 나타내는 것을 고려하면 ASTM D-33 committee에서 권고하는 열화조건인 2주 동안 150°F의 열화 조건이 실질적으로 발전소 사용기간 동안의 자연 열화를 반영하고 있다는 확신을 할 수 없었다. 따라서 이러한 기준을 설정 시에 미국 원전의 발전사업자의 의견을 반영하여 권고치를 발전사업자에게 유리한 방향으로 작성될 수 있었다는 가정 하에 열 열화(heat deterioration) 조건에 대하여 발전소 사용기간을 고려한 실질적인 조건수립을 위하여 별도의 연구가 필요하다는 결론을 도출할 수 있었다.

향후 이러한 열화조건에 대하여는 기간 연장이나 열 온도의 상향 등을 고려할 수 있을 것으로 예상되며, 또한 조선 및 해양플랜트 산업에서 수행하고 있는 NORSOK M-501 Cyclic Test(QUV 조사, Salt Spray Test, 대기방치)의 시험조건과 같이 발전소 환경을 고려한 시험조건 반영 등을 고려하여 수정된 시험조건을 수립할 필요가 있을 것으로 판단한다.

(2) 내방사성 도장의 방사선 조사 시험에 대한 내구성 확인

현재 운영 중인 원자력 발전소에 적용되는 도장시스템은 무기질 징크 하도/에폭시 상도 또는 에폭시 하도/에폭시 상도가 적용되고 있다. 본 연구에서 검토한 도장시스템도 동일한 시스템으로 시편을 제작하여 ASTM D 4082에 따라 방사선 조사 시험을 시행하였으며 방사선 조사 후 시편에 대한 EIS시험 결과는 Fig. 23, Fig. 26~31에 나타내었다. 그림에서 나타나는 바와 같이 원자력 발전소에 일반적으로 적용되는 도장시스템은 방사선원에 내구력이 있는 도장시스템으로 설계되었음을 EIS시험 결과로부터 확인할 수 있었다.

(3) 도막열화의 EIS시험에 의한 정량적 분석 가능성 확인

일반적인 원자력발전소 환경의 열화조건과 방사선에 노출된 시편에 대한 EIS시험 결과는 조건에 따라 전기화학적 임피던스 특성을 정량적으로 측정할 수 있었다. 그러나 방사선 조사 시험편 및 설계기준사고시험으로 고온, 고압의 환경조건에 노출된 시험편이 발전소 설계기준을 통과되었으나, DBA 환경조건에 노출된 시험편은 EIS 시험에 의한 전기화학적 저항 물성은 도막으로서의 기능을 상실한 것으로 확인되었다.

그리고 DBA 환경 노출된 시험편 7개 중 S346의 경우는 다른 DBA시험 시편보다는 임피던스 특성이 약간 높게 나왔다. 이러한 결과의 도출 도장시스템별 사용된 도료제조회사 별 물성차이에 의한 것인지 추후 추가적인 분석이 필요하는 것으로 판단되고, 현 단계에서는 DBA시험 후에도 도료의 특성에 따라 도막물성의 최소치를 유지하는 도장시스템의 한 예로 확인할 수 있다.

이상과 같이 발전소 사용기간을 고려하여 인위적으로 열화시킨 도장시스템과 보수조건을 고려하여 제작한 시편을 이용하여 방사선 조사 및 DBA 시험을 한 시편에 EIS를 이용하여 도막열화의 정량적 평가는 가능

할 것으로 확인되었으며, 향후 추가적으로 지속적인 시험 데이터의 수집과 궁극적으로는 현장에 EIS 장비를 설치하여 실시간으로 모니터링을 할 수 있는 실질적인 연구가 필요하다고 판단된다.



Reference

- [1] U.S. Regulatory Guide 1.54, Rev.1, "Service Level I, II and III Protective Coatings Applied to Nuclear Power Plants", 2000
- [2] "A Study on Physicochemical Properties of Epoxy Coatings for the Steel Liner Plate in NPPs", Sang-kook Lee, Jae-rak Lee, Chul-woo Lee, 14th APCCC (Asian-Pacific Corrosion Control Conference), China, 2006
- [3] "Corrosion Science and Technology" Vol. 5, No.3(2006), "Degradation of Epoxy Coating due to Aging Acceleration Effects". PP99-105, Hwan-seon Nah and Chul-Woo Lee
- [4] "Corrosion Prevention by Protective Coatings" P.47, Charles G. Munger
- [5] ASTM D 5163, "Standard Guide for Establishing Procedures To Monitor the Performance of Safety Related Coatings in an Operating Nuclear Power Plant," American Society for Testing and Materials, Vol. 06.02, pp. 532~535.
- [6] ASTM D 4227, American Society for Testing and Materials, "Standard Practice for Qualification of Coating Applicators for Application of Coatings to Concrete Surfaces," Vol. 06.02.
- [7] ASTM D 4228, American Society for Testing and Materials, "Standard Practice for Qualification of Coating Applicators for Application of Coatings to Steel Surfaces," Vol. 06.02.

- [8] ASTM D 4537 (Re-approved 1996), American Society for Testing and Materials, "Standard Guide for Establishing Procedures To Qualify and Certify Inspection Personnel For Coating Work in Nuclear Facilities," Vol. 06.02, pp. 331~337.
- [9] ASTM D 5498, American Society for Testing and Materials, "Standard Guide for Developing a Training Program for Coating Work Inspectors in Nuclear Facilities", Vol. 06.02, pp. 597~600.
- [10] ASTM D 3911, American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Evaluating Coatings Used in Light-Water Nuclear Power Plants at Simulated Design Basis Accident (DBA) Conditions," Vol. 06.02, pp. 225~228.
- [11] ASTM D 4082, American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Effects of Gamma Radiation on Coatings for Use in Light Water Nuclear Power Plants", Vol. 06.02, pp. 247~248.
- [12] ASTM D 3359, American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Measuring Adhesion by Tape Test", Vol. 06.02, pp. 247~248.
- [13] ASTM D 3843, American Society for Testing and Materials, "Standard Practice for Quality Assurance for Protective Coatings Applied to Nuclear Facilities", Vol. 06.02, pp. 221~222.
- [14] ASTM D 3912, American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Chemical Resistance of Coatings Used in Light-Water Nuclear PowerPlants", Vol. 06.02, pp. 229~230.

- [15] ASTM D 4286, American Society for Testing and Materials, "Standard Practice for Determining Coating Contractor Qualifications for Nuclear Powered Electric Generation Facilities", Vol. 06.02, pp. 294~296.
- [16] ASTM D 4538, American Society for Testing and Materials, "Standard Terminology Relating to Protective Coating and Lining Work for Power Generation Facilities", Vol. 06.02, pp. 338~340.
- [17] ASTM D 4541, American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers", Vol. 06.02, pp. 341~353.
- [18] ASTM D 5139, American Society for Testing and Materials, "Standard Specification for Sample Preparation for Qualification Testing of Coatings to be Used in Nuclear Power Plants", Vol. 06.02, pp. 502~504.
- [19] ASTM D 5144, American Society for Testing and Materials, "Standard Guide for Use of Protective Coating Standards in Nuclear Power Plants", Vol. 06.02, pp. 505~509.