

원전 유지보수 규정의 역사와 진화

Martin Bridges

미 전력연구소(EPR) 수석 기술고문

미국 원자력규제위원회(NRC)는 1991년 7월, 원전의 유지보수 규정(Maintenance Rule) - 공식적으로는 원전의 효율적 유지보수를 모니터링하기 위한 필수 요건(10CFR 50.65)이라고 호칭-을 발표하였다. 이 규정은 1996년 7월부터 시행되었는데 NRC가 추가로 '리스크 정보 활용적이고 성능 기반적인 규정'을 명시하여 제정함으로써 많은 원전업계 종사자들은 이 정비규정이 채택한 성능 기반적이고 리스크 정보 활용적인 접근 방식이 전체 원전에서 성공하게 될 것으로 생각하였다.

이 규정의 시행 이후 원전업계 전체의 유지보수 업무 성과는 현저하게 향상되었는데 이는 원전의 가동과 유지보수 업무를 개선시킨 여러 조치들과 경제적인 요인 때문에 더욱 더 유발되는 추진력과 향상된 경영 관리 시스템, 그리고 원자력발전운영협회(INPO : Institute of Nuclear Power Operations) 및 여러 유관 단체에서 그러한 점들을 강조한 덕분이었다.

또한 유지보수 규정으로 원전의 계통, 구조물 및 기기(SSC : Systems, Structures and Components)상의 좋지 못한 유지보수 업무의 성과에 대한 주의를 환기시키고 그에 대한 시정 조치에 초점을 맞추게 함으로써 SSC 유지보수 업무 성과를 현저하게 향상시키는 데 기여했다고 많은 사람들이 생각하고 있다.

미국 전력연구소(EPRI : Electric Power Research Institute)는 1997년에 원전 유지보수 규정 사용자그룹(Maintenance Rule Users Group)의 설립을 통해 이 규정의 이해를 도와왔으며, 2007년에는 원전의 시스템과 그 실무를 담당하는 컴포넌트 엔지니어들에게도 도움을 주기 위해서 유지보수 규정을 제정한 근거와 규정의 변천 과정을 기록하여 문서화한 보고서를 발행하였다. 또한 2014년 3월에는 이 규정의 최근의 변동사항(EPRI 보고서 3002002864)를 다루기 위해서 규정의 변천사 개정본을 펴냈다.



유지보수 규정의 변천사

1980년대에 NRC는 원전의 비효율적인 유지보수가 원전의 안전 전체에 악영향을 끼칠 수 있다는 지적을 근거로 원자력발전소의 유지보수 업무에 적용할 규정의 필요성을 고려하기 시작했다. 그래서 NRC는 1988년 11월에 발전소의 가동 정지와 기타 사고의 가능성을 줄이기 위한 유지보수 프로그램을 전체 원전업계가 시행토록 하기 위해 제안된 규정을 발표하게 되었다.

이에 미국 원전업계는 원전운영위원회(NUMARC : Nuclear Management and Resources Council)를 통해서 유지보수 업무의 성과를 향상시키겠다는 목표 달성에 대한 결의를 천명하였다.

처음에 NRC는 과정 중심적인 규정을 고려하였으나, 유지보수 프로그램의 효율성에 대한 기대치를 명시하고 원전업계 자체의 지침이나 업계가 받아들일 만한 다른 방식들에 기반하게 됨으로써 매우 효과적인 실행도 기대할 수 있는 성과 중심적 또는 결과 중심적인 규정도 업계와 함께 논의하게 되었다.

이 과정에서 NRC는 유지보수의 실질적인 개선과 원전업계가 주도적으로 참여하는 것이 중요하다는 점에 주목하고 유지보수 규정의 틀을 유지보수 프로그램의 유효성을 평가하는 쪽으로 확정하게 되었다.

NRC는 위원들의 의견과 업계의 건의, 그리고 1988년도에 이미 제안했던 규정에 대한 세간의 평가 등을 참작한 다음 1991년 7월 10일에 유지보수 규정을 최종 승인하였다.

이 규정에 대한 원전업계의 평가와 이에 대한 NRC의 대응은 다 같이 유지보수 규정의 기준을 개선하면 기존 프로그램의 융통성과 활용도를 향상시킬 수 있다는 것이었다. 이에 따라 유지보수 규정상의 지침을 개발하는 작업은 NUMARC와 모든 NRC 관할 지역을 대표하는 원전 사업자들과 원전증기공급시스템(NSSS : Nuclear

Steam Supply System) 사업자, INPO, EPRI 등 원전업계 전체의 폭넓은 참여와 협조로 이루어졌다.

유지보수 규정의 효과적 이행을 지원하기 위해서 NUMARC는 NUMARC 93-01의 초안-효과적인 원전 유지보수의 모니터링을 위한 가이드라인(Industry Guidelines for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants)을 내놓았다.

NRC는 1992년 7월에 이 확인 및 검증(V&V : Verification and Validation) 프로그램을 만족할 만한 모니터링 수행 방식으로 받아들였고, 이어 V&V 프로그램은 모든 종류의 NSSS 시스템을 대표하는 9개의 시험 발전소에서 실행되었다.

이 유지보수 규정은 NRC의 첫 번째 성과 중심적, 리스크 정보 활용적 규정이었었는데, NRC는 1996년 7월 10일부터 원전들과 규제 당국의 지침서 개선을 위해 2년, 그리고 규정을 이행하기까지 3년의 기한을 주었다.

NRC는 원전들이 이 유지보수 규정을 효과적으로 이행하고 있는지 확인하기 위해 1996년 7월 15일부터 1998년 7월 10일 사이에 가동중인 모든 원전에서 이 규정의 기준 검사(MRBI : Maintenance Rule Baseline Inspection)를 시행하였다. 이때 NRC는 MRBI 검사원들의 교육, 검사팀들의 지역 간 교차 검사, 그리고 각각의 팀에 NRC 본부의 유지보수 규정 전문가를 배정하는 등 검사와 규정의 집행에 있어 일관성 있는 조치를 취하였다.

MRBI는 규정을 이행하는 과정 중심적 검사 또는 주로 유지보수 프로그램의 준수 여부를 검사하는 방식이었다. 원전업계의 많은 사람들이 성과 중심적인 유지보수 규정에 대한 이러한 검사 방식이 타당한 것인지 의문을 제기하였으나, NRC는 원전의 유지보수 규정 프로그램을 초기에 정착시키기 위해서 반드시 필요한 방식이라고 생각하였다.

MRBI 검사 방식이 정착된 이후에, NRC의 유지보수 규정 이행에 대한 검사 방식은 대체로 성과 중심적인 방

식으로 바뀌었는데, 검사 결과 과정 중심적인 검사가 필요하다는 권고 사항이 나오게 되면 이를 시행하는 단서 조항도 함께 유지하였다.

다소 변경 사항이 있었음에도 불구하고 전반적으로는 NRC와 원전업계의 일관된 상호 연계와 공동 작업이 유지보수 규정들이 잘 이행되고 유지보수 프로그램이 지속적 효과를 유지하는 데 지대한 기여를 한 것으로 보인다.

NUMARC와 원자력에너지협회(NEI : Nuclear Energy Institute)는 원전 간의 의사소통을 증진시키고, 규정에 대한 안내서를 개발하고, 유지보수 규정들을 이행함에 있어 NRC와 접촉하여 중재 작업을 하는 데 핵심 역할을 하였다.

유지보수 프로그램이 성숙되어감에 따라 업계의 경험을 유지보수 규정에 반영하여 공유하고 NRC같은 기관들과 업계를 연결해 줄 단체의 필요성이 제기되었고, 결국 1998년 12월 원전업계의 워크숍에서 몇몇 원전의 대표

들이 사용자 단체를 결성하기 위해서 따로 만나 유지보수 규정 사용자그룹 (MRUG : Maintenance Rule Users Group)을 설립했는데 1999년 5월 첫 번째 회의에서 그룹의 강령이 채택되었다.

한편 EPRI는 각종 프로젝트의 관리기구로 계속 존치시켜서 각종 회의를 준비하고 기술적인 문제의 해결과 기타 MRUG의 활동을 맡도록 하였다. 설립 이후 MRUG는 매년 두 번씩 회의를 열고 있으며, 유지보수 규정의 이행상 발생하는 문제에 대처하는 전문적 의견을 생산해 내는 주공급원의 역할을 하고 있다. 미국의 모든 원전이 MRUG의 회원으로 가입하고 있고 연례회의에는 대부분의 회원업체들이 대표자를 참석시키고 있다.

유지보수 규정의 범위

NRC는 처음에 유지보수 규정의 범위를 원전의 모든

유지보수 규정의 개요

유지보수 규정의 (a)(1)항은 원전업자들이 원전의 구조물과 계통 및 기기(SSC : Structures, Systems, and Components)의 성능이나 상태를 모니터링하고, SSC 성능 개선을 촉진하기 위한 목표를 인가받아서 수립하도록 요구하고 있다. 그 목표와 모니터링 계획은 안전의 기준에 잘 맞춰서 현실적으로 적용할 수 있는 설비에 대해 업계 전반의 경험을 감안하여 설정해야 한다.

유지보수 규정 (a)(2)항은 예방 정비 프로그램에 의해 효과적으로 잘 관리되고 있는 SSC는 (a)(2)항에 의거한 모니터링을 할 필요가 없다고 명시하고 있다.

유지보수 규정 (a)(3)항은 성능 모니터링과 상태 모니터링 업무, 그와 관련된 목표의 설정, 그리고 예방 정비 업무를 적어도 24개월 간격을 초과하지 않는 연료 교체 주기마다 적용 가능한 설비에 대해 업계의 폭 넓은 경험을 참조해서 시행하도록 요구하고 있다.

유지보수 규정 (a)(4)항은 규정상 하계 되어 있는 유지보수 업무에 의해 초래될 수도 있는 위험성의 증가를 조사하고 관리해야 한다고 명시하고 있는데 이 조항은 2000년 11월 28일부터 시행되었다. 이전에는 (a)(3)항의 마지막 구절에 의해 설비의 성능 유지 보수 작업 시에 안전 기능의 전반적인 효능을 고려하여 조사하도록 되어 있었다.



1980년대에 NRC는 원전의 비효율적인 유지보수가 원전의 안전 전체에 악영향을 끼칠 수 있다는 지적을 근거로 원자력발전소의 유지보수 업무에 적용할 규정의 필요성을 고려하기 시작했다. 그래서 NRC는 1988년 11월에 발전소의 가동 정지와 기타 사고의 가능성을 줄이기 위한 유지보수 프로그램을 전체 원전업계가 시행토록 하기 위해 제안된 규정을 발표하게 되었다.

계통, 구조물 및 기기(SSC : Systems, Structures and Components)는 물론이고 원자로 이외의 설비 전체를 포함시키려고 하였다. 그러나 원전업계와 일반의 의견을 고려하고 성과 중심적인 방식의 규정을 채택하게 된 다음에는 프로그램의 범위를 안전과 직결된 SSC와 고장이 발생할 경우 경우에 주민들의 건강과 안전에 곧바로 위협이 되는 원자로를 제외한 SSC로 제한하는 데 동의하였다. 유지보수 규정 (b)항은 원자로 이외의 SSC에 포함되는 범위를 다음과 같이 정하고 있다.

- 사고 발생이나 과도전류를 저감시키는 데 필요하거나 비상 운전 절차(EOP : Emergency Operating Procedures)에 사용되는 설비
- 고장 나면 안전을 담당하는 SSC의 작동을 방해하게 되는 설비
- 고장 나면 원자로를 긴급 자동 정지시키거나 안전 설비를 작동시키는 설비

처음에 일부 원전들은 특히 안전과 직결된 부품과 관련해서는 설비의 부품 차원에서 규정의 범위에 포함시킬 것인지 결정하였으나, 다른 원전들은 각 설비 시스템상의 기능 차원에서 어떤 기능이 규정의 범위 내에 포함될 것인지 결정하였다. 그래서 유지보수 규정의 범위 내에 있는 설비의 기능을 실행시키는 부품들은 모두 유지보수 규정의 범주에 포함되는 것으로 간주하게 되었다.

초창기에 규정의 범위를 결정하는 과정에서 두 가지 문제점이 대두되어 원전업계와 NRC의 합의 도출이 필요하게 되었다. ① 사고나 과도전류 발생을 저감시키는 역할을 하거나 EOP에 사용되는 하지만 안전과는 직접 관련이 없는 설비들과 ② 고장이 나면 원자로를 긴급 자동 정지시키거나 안전시스템을 작동시키기는 하지만 안전과 직접 관련이 없는 설비들이 문제였다.

이 설비들이 시스템의 기능을 저감시키는 데 '심대한 수준'의 영향을 끼치는 SSC인지 그리고 그런 영향을 '끼

칠 수도 있는' 것인지와 '분명히 끼쳤는지'에 대한 확인 문제가 쌍방의 합의 도출을 지연시켰다.

결국 NUMARC 93-01의 4A 개정본은 '심대한 수준'이라는 용어와 합의 조정된 지침서상의 '끼칠 수도 있는'이라는 표현을 삭제하였고, 원전 비상 운전 절차(EOP)상의 SSC와 관련하여 중요한 새 지침서를 제공하였다.

NUMARC 93-01상에 명확하게 의무화된 사항은 아니었지만 대부분의 원전들은 전문가 자문위원회나 그와 유사한 실무그룹을 운용하여 규정의 적용 범위를 확고하고 명문화 하였다.

NRC는 적지 않은 예외적 사항이 존재함에도 불구하고 원전 사업자들이 MRBI(규정 기준 검사)에 근거하여 SSC들을 규정상 범위 내의 설비로 제대로 확정하고 있는지 판단하였는데, 원전마다 다른 설계상의 차이가 규정 프로그램의 범주 안에 속하는 SSC 설비의 수와 종류에 따라 상당한 변화를 초래한다는 사실이 발견되었다.

이에 NRC는 원전의 유지보수 규정이 성과 중심적 방식이므로 기술상의 타당한 근거만 있다면 각각의 SSC를 규정상의 범위 안에 넣을지 여부는 원전사업자들이 융통성을 가지고 결정할 수 있다고 인정하였다.

유지보수 규정의 확대된 활용 범위

유지보수 규정이 시행된 이후 NRC와 원전업계의 다른 여러 프로그램들은 이 규정을 활용하고 참조해 왔다. 그 프로그램들은 새로운 SSC를 그 프로그램의 범위에 추가로 집어넣는 대신 유지보수 규정상의 프로그램에 의해서 이미 시행되고 있는 모니터링 과정을 이용하는 것이었다.

원자력발전소는 10 CFR 50.48 규정과 상대적으로 상세하고 법적으로 유효한 부속조항 R에 의한 방화 자격 요건의 대상이다. 2004년에 NRC는 원전들이 자발적으로 NFPA (National Fire Protection Association : 전미방화협회)의 805 표준 - 경수로 원자력 발전소의 성능 중심적 방화 표준(Performance-based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants)을 기존의 원전 기본 방화 계획 대신에 채택할 수 있도록 허용하였는데 대략 절반 정도의 미국 원전들이 이 리스크 정보 활용적, 성능 중심적 표준을 선택하였다.

이 표준을 적용하여 NFPA 805 프로그램을 시행할 때는 NFPA 805 기반의 분석을 이용한 SSC 성능의 모니터링을 해야 하는데 이미 많은 SSC들이 유지보수 규정에 의해 모니터링되고 있으므로 NFPA 805 표준 활용에 대한 원전업계의 지침은 서로 상응하는 유지보수 규정상의 모니터링을 NFPA 805 표준상의 모니터링으로도 인정하고 있다.

전력선과 지하 배관 및 탱크의 상태에 대한 모니터링 프로그램은 원전업계 자체에서 시행하고 있는데 이 프로그램들도 해당 설비에 적절하게 시행된다면 유지보수 규정상의 모니터링 작업으로 인정받을 수 있다.

원전업계는 2011년 3월 일본의 지진 해일에 의한 후쿠시마 제1원전의 사고가 끼친 악영향에 대처하여 특별한 원전의 재해 경감 능력을 개발하고 있다. 이런 사항들은 일반적으로 원전의 기본적 설계 범위를 벗어날 뿐 아니라 유지보수 규정상의 범위에도 포함되지 않지만 원전업계가 이러한 능력 개발 노력을 뒷받침하기 위해 구매한 장비들은 비상 운전 절차상의 목적 달성을 지원하는 데도 사용할 수 있게 되었다.



일부 원전들은 정기 검사를 이전의 검사와는 완전히 별도의 독자적인 유지보수의 효과에 대한 검사로 실시하기도 하며, 분기마다 검사를 자주하고 그 결과를 취합해 연료 교체 주기마다 높은 수준의 악식 검사를 하는 방식을 택하는 원전들도 있다.

안전상의 중요도에 대한 측정

유지보수 규정에 SSC의 성능을 모니터링하는 데 있어서 위험 요소에 대한 고려 사항은 다음의 말로 잘 정리되어 있다. “유지보수 규정의 목표는 안전에 비례하여 결정된다.”

NRC는 최종 유지보수 규정을 제정하면서, 확률론적 위험도 평가(PRA : Probabilistic Risk Assessment)상의 가정과 결과를 활용이 가능하다면 반드시 감안해야 하고 모니터링은 각 시스템의 위험도 수준에 따라 다르게 해도 된다고 인정하였다. 또 NRC는 모든 SSC를 안전에 최적화시키는 것을 목표로 설정하는 것이 유지보수 규정을 잘 이행하는 좋은 방법의 하나라고 생각하였다.

또 한 가지 좋은 방법으로 NUMARC 93-01에서 채택된 것은 유지보수 규정 범위 내 모든 SSC에 대한 위험도 기반 이행 기준을 확립하는 것이었는데, 이 기준에 맞는 시스템들은 유지보수 규정 (a)(2)항에 따라 모니터링 될

수 있으며 그렇지 않은 것들은 (a)(1)항의 규정에 따라 목표 설정과 모니터링을 위한 평가를 받게 하고 있다.

그러므로 적절한 이행 기준을 확립하는 과정은 범위 내 SSC의 상대적 위험 중요도를 확인하는 것으로 시작된다. 대부분의 원전에서는 개별 발전소 시스템의 범위 내 성능을 밝혀내는 작업을 종료한 후에 그 성능 수준에서 위험 중요도를 확인하고 있다.

NUMARC 93-01에서는 SSC의 위험 중요도를 설정하는 데 적용할 몇 가지 방법을 설명해 놓고 있다. 특정 발전소 확률론적 위험도 평가(plant-specific PRA) 혹은 개별 원전 평가(IPE : Individual Plant Examination) 기법은 중요한 적용 방식이기는 하지만 공유 사고의 처리 방식이나 운전원 조작 기술에 대한 평가 방식 등에서 개별 발전소마다 평가의 범위와 방식이 달라질 수도 있고 일부 중요한 시스템이 제외되기도 하였다.

이는 그 당시 대부분의 PRA나 IPE 방식의 평가 결과

가 원자로 격납용기의 파손이나 그 외의 방사능 조기 방출 우려 상황은 고려하지 않고 노심 손상 빈도(CDF : Core Damage Frequency)에만 초점을 맞춘 PRA Level 1이었기 때문이다. 그 결과 PRA 기법의 한계를 보완해 주는 하나의 방편으로서 ‘전문가위원회’라는 개념이 NUMARC 93-01로 확정되었다.

유지보수 규정을 이행하는 데 있어 대부분의 원전들은 위험 중요도(혹은 안전 중요도)를 두 단계로 구분해 놓게 되었다. 일부 원전에서는 처음에 위험중요도를 3단계로 설정해 놓기도 했으나 유지보수 규정이 전면 실시됨에 따라 전부는 아니지만 거의 모든 원전이 두 단계로 바꾸었다.

NUMARC 93-01에서 사용된 용어에 근거하여 그 두 단계는 대개 중요한 위험(risk significant)과 중요하지 않은 위험(non-risk significant)으로 지칭했는데 다른 용어들도 다양하게 쓰이고 있었다.

이에 NRC는 원전업계의 대표들과 의논한 다음 고안전 중요도(HSS : High Safety Significnat), 저안전 중요도(LSS : Low Safety Significant)로 결정하였으나 원전 사업자들이 다른 용어로 선택해 혼용할 수도 있으므로 safety-related 그리고 non-safety-related 둘 다 HSS 나 LSS로 오해될 수도 있으니 주의해야 한다.

NUMARC 93-01의 지침은 전문가위원회가 3단계의 위험 등급 척도를 고려한 다음에 위험 중요도를 확정하도록 하고 있다. 리스크 감소 등급, 리스크 달성 등급, 그리고 CDF 유발 등급이 그것이다.

이 지침 이외의 다른 방식도 나름대로 사용할 수 있으며, 전문가위원회가 다른 SSC의(일례로 PRA 방식에는 나타나지 않는) 등급을 규정된 투표 방식에 의해 HSS급으로 결정할 수도 있고 다른 전문적 요소를 도입하기 위해서 유사한 다른 방법을 사용할 수도 있다.

MRBI(규정기준검사) 제도가 확립된 이후 대부분의 원

전에서는 위험 중요도를 확정하는 데 다음과 같은 추가적인 확률론적 위험도 평가(PRA)에 기반한 방식을 쓰기 시작했다.

- 원자로 격납용기의 파손이나 대규모의 방사능 조기 누출에 대비한 Level II PRA
- 기상 조건 같은 외부 요인을 고려한 IPE 방식으로 원전 자체의 외부적 요인의 평가
- 화재나 원자로의 운전 정지(shutdown safety) 상황을 평가하는 PRA 방식의 평가

초기 PRA상의 여러 가정 상황은 주로 SSC 고장률 같은 원전업계의 포괄적 정보에 크게 의존했으나 계속 누적되는 각 원전의 성능 모니터링 정보가 각 발전소의 고유 자료를 더 신뢰할 수 있도록 만들었기 때문에 현재는 업계 표준이 PRA 기준으로 쓰이고 있으며 정기적으로 업데이트하여 확인된 SSC의 성능과 변경 사항을 발전소 설제에도 반영하고 있다. 또한 구체적인 시기는 아직 확실치 않으나 머지않은 시기에 전문가위원회가 SSC의 위험 중요도를 재평가하여 PRA 기법을 갱신하거나 원전의 설제에도 중요한 변화가 뒤따를 것으로 기대하고 있다.

성능 표준(Performance Criteria)

유지보수 규정을 이행하면서 업계에서 채택한 방법은 규정 범위 내 모든 SSC의 성능을 모니터링 하기 위한 성능 표준을 정하는 것이었는데 이 표준에 맞으려면 유지보수 규정 (a)(2) 조항에 의거한 정상적인 모니터링에도 부합해야 한다. 이렇게 정한 표준에 맞지 않는 SSC는 유지보수 규정 (a) (1)항에 따라 목표 설정과 모니터링 평가를 받아야 하는데, 이는 유지보수 규정이 요구하는 기본



설비의 상태에 관한 기록과 설비의 경향적 특성을 대상으로 하는 상태 모니터링은 설비의 성능이 설정된 목표나 성능 표준의 한계치를 충족시키는지 알아내기 위한 것인데 대개는 기존의 모니터링 시스템을 최대한 활용하는 방식을 취하고 있다.

적인 목표는 원전 설비가 안전 기준에 맞게 설정되어야 하고 성능 표준은 HSS와 LSS 두 가지 안전 중요도에 모두 맞도록 설정되어야 하기 때문이다.

처음에는 설비의 비가동률, 신뢰성 또는 설비의 상태를 통해서 SSC의 성능을 모니터링 할 수 있다는 것이 NRC의 생각이었으므로 NUMARC 93-01은 이러한 요건들을 토대로 한 성능 표준의 설정을 plant-level 표준과 함께 V&V 프로그램 작업의 일환으로 시행할 것을 권고했는데, 그 취지는 기존의 모니터링 프로그램을 신뢰하고 최대한 활용하겠다는 의미였다.

유지보수 규정의 (a)(2)항에 명시된 것처럼 설비의 성능이나 상태가 예방 정비 프로그램으로 잘 관리되고 있는 SSC들은 (a)(1)항에 의한 모니터링을 할 필요가 없다. 성능 표준을 설정하는 데 있어 그 표준에 부합한다는 의미는 모니터링하는 SSC가 효과적으로 확실하게 관리되도록 하는 것이다.

이런 예로 NRC가 제시한 몇 가지 중에는 SSC의 성능이 괜찮은 상태임을 잘 보여줄 수 있도록 모니터링 기준을 제대로 설정해 놓지 않는 바람에 성능 표준에는 맞다 하더라도 SSC를 (a)(1)항에 의거해서 모니터링했어야만 하는 경우 등이 있었다.

유지보수 규정을 이행하기 위한 지침을 만들면서 NUMARC 93-01에는 ‘유지보수’ 개념에 보정 정비와 예방 정비, 모니터링, 그리고 지원 작업(정비 후 테스트를 위한 장비 제거 등)을 포함시켜 폭 넓게 명시해 놓았다.

이에 더해 NRC는 원전의 어느 조직이 그 작업을 실행하는지 관계없이 모두 유지보수에 해당한다고 명시하고 있다. 예를 들면 유지보수 작업과 관련된 업무를 수행할 때 발생하는 운전원의 실수도 유지보수의 정의에 포함될 수 있다고 보는 것이다.

유지보수를 이처럼 폭넓게 정의하고자 하는 맥락에서 성능 표준은 일반적으로 다음의 두 가지 타입 가운데 하

나로 설정 된다.

① 특정 요건 타입 성능 표준(특정한 SSC용으로 설정된 비가동률, 신뢰성 또는 설비 상태에 대한 모니터링 표준)

② 전체 발전소 수준의 성능 표준(7,000 임계시간당 예기치 못한 원자로의 긴급 정지 횟수, 계획 외 이용 감소율, 계획 외 안전 시스템 작동 횟수에 대한 모니터링)

설비의 상태와 성능 모니터링

유지보수 규정의 (a)(1)항은 원전 사업자들이 SSC의 성능과 상태가 설정된 목표에 맞게 유지되는지 모니터링해야 한다고 명시하고 있다. 규정(a)(2)항도 역시 명시하고 있지는 않으나 SSC 설비의 성능이나 상태가 예방 정비 프로그램에 의해 효과적으로 잘 관리되고 있는지 모니터링으로 잘 확인해야 한다는 의미를 내포하고 있다.

모니터링의 필요성은 미국 연방규제기준(Code of Federal Regulations) 10 CFR 50.65조항의 제목과 관련된 고려사항에도 나타나 있다. NUMARC 93-01의 9.3.3 조항과 10.2.2 조항에도 SSC의 성능이 설정된 표준에 잘 맞는지 평가하라고 되어 있고, 9.4 조항에는 SSC의 성능 데이터를 설정된 성능표준과 목표치에 비교하면서 모니터링하도록 되어 있다.

그간 대부분의 원전에서는 설비의 성능과 상태가 설정된 목표와 성능 표준에 맞는지 확인하기 위해 유지보수 규정 (a)(1)과 (a)(2)항에 의거한 SSC 설비 모니터링만을 생각해왔다. 그러나 유지보수 규정을 이행해온 경험에 비추어 보면 원전의 설비 시스템에 적용하는 유지보수 규정을 그 원전의 시스템엔지니어가 주인 의식을 가지고 주도적인 자세로 시행하는 것이 모니터링 프로그램의 가장 중요한 요소인 것으로 드러났다.

1. 비가동률 모니터링

대부분의 원전은 기존의 운전 일지, 설비 폐쇄 일지와 해제 일지, 그리고 운전 일지 내용상의 제한 조건 기술 명세 같은 발전소의 기록에서 뽑은 SSC의 비가동률 데이터를 축적해 놓고 있다. 일부 원전들은 이 데이터 컴파일 업무를 시스템 엔지니어 개인에게 맡기기도 하나 정보의 수집을 한 곳으로 집중시켜 놓은 원전들도 있다. 원전업계의 일반적 기준은 성능 표준과 설정된 목표 달성에 실패한 상황을 제때에 확실하게 식별하기 위해서 최소한 매월 비가동률 데이터를 업데이트하도록 정하고 있다.

비가동률의 산정은 SSC가 가동되지 않고 있는 상황이 벌어지거나 그런 상황이 발견되었을 때부터 시작되는데, 확인되는 일자에 실시했던 수리가 잘 못된 것을 알게 된 경우와는 달리 이전에 가동이 멈추게 된 상황이 발생한 시간을 확인하지 못할 경우는 그때부터 상황이 시작된 것으로 간주한다.

설비의 장애 복구 시간(고장 발견 시간부터 확인된 마지막 SSC 가동 시간까지의 절반에 해당하는 시간)의 계산은 유지보수 규정상 모니터링의 대상은 아니다. 또한 일정 요건만 충족한다면 테스트를 위한 SSC의 비가동률은 계산에 넣을 필요가 없는데, 이에는 요구 신호 실제 상황에 해당되는 사고에 대한 즉각적이고 실질적인 운전원의 복구 업무에 관한 문서화된 절차도 포함된다.

비가동률은 SSC가 원래의 기능을 발휘할 수 있도록 상태가 회복되었을 때 종료된 것으로 본다. 수리 후 테스트가 아직 진행 중이라 해도 나중에 성공적으로 테스트가 끝난다면 종료된 것으로 간주한다.

2. 신뢰성 모니터링

신뢰성 모니터링은 어떤 부품이 기능 고장(Failure)이나 규정상 기능 고장(MRFF : Functional Failure)이나 규정상 기능 고장(MRFF :



Management Rule Function Failure)을 초래하는지, 또 그 FF와 MRFF가 예방 가능한 기능 고장(Maintenance Preventable Function Failure)이었는지 확인하기 위해서 부품상의 문제를 평가하는 것이다.

대부분의 원전은 상태조사보고서, 작업요청서 또는 그런 사항을 확인하기 위한 유사한 서류들을 문서화하여 모니터링 작업을 시행해왔다. 대개 FF/MRFF/MPFF 확인 작업은 어렵지 않게 할 수 있지만 일부 확인 작업은 정비나 다른 평가 작업이 완료될 때까지 기다려야 한다. 앞서 살펴본 바와 같이 NUMARC 93-01에는 SSC 성능을 통해 기능 고장을 쉽게 가늠할 수 있어야 한다고 설명해 놓고 있다.

정비 규정상의 기능(Maintenance Rule Function)을 잃게 하는 부품의 고장은 해당 기능이 꼭 필요하지 않은 경우일지라도 고장이 발생하면 FF 상황으로 간주한다.

이와는 반대로 테스트하는 동안 발생하거나 SSC의 통상적인 가동 상황에서가 아니라 테스트의 결과로 발생한 고장은 보통 FF로 간주하지 않을 뿐 아니라 정비 작업과 직접 관련된 정비상의 테스트 이후에 확인되는 고장도 통상 FF로 간주하지 않는다.

원전업계의 모니터링 기준은 매월 또는 매번 고장이 확인될 때마다 FF/MRFF/MPFF의 발생 횟수를 설정된 성능 표준이나 목표와 비교하여 평가하는 것이다.

3. 설비 상태 모니터링

설비의 상태에 관한 기록과 설비의 경향적 특성을 대상으로 하는 상태 모니터링은 설비의 성능이 설정된 목표나 성능 표준의 한계치를 충족시키는지 알아내기 위한 것인데 대개는 기존의 모니터링 시스템을 최대한 활용하는 방식을 취하고 있다.

4. Plant-level 모니터링

일반적으로 원전 전체에 영향을 미치는 수준의 사고에 대한 모니터링은 항상 장기적으로 이루어지고 있는데 원자로의 긴급 정지, 예기치 못한 안전 시스템 작동이나 출력 감소 또는 전체 원전에 영향을 주는 기타 사고가 발생할 경우 사고의 누적 횟수를 관련 plant-level 성능 표준과 비교한다.

관련 성능 표준과 대비한 계획 외 이용 감소율(capability loss factor) 혹은 비상 손실 계수(forced loss rate) 모니터링은 각 원전이 대외 기관에 보고한 데이터를 토대로 하여 대부분 한 달에 한번 실시하고 있다.

원전 구조물 모니터링

정비 규정은 원전의 구조물에도 적용할 수 있도록 명시되어 있는데 구조물 모니터링에 대한 NRC의 관심은 대부분 1995년에 일찍이 문서화되어 발간된 보고서로부터 시작되었다. 원전업계 보고, NRC 보고서, 가동중인 6개의 노후 원전 검사 등을 토대로 한 그 보고서에서 안전과 관련된 원전의 구조물은 정기적으로 검사하고 정비해야 한다고 결론지었다.

원전의 구조 문제를 다루면서 NUMARC 93-01의 9.4항 초기 수정 조항에는 정비 규정 (a)(1)항의 목표 설정이 필요할 경우, 대부분의 원전 구조물은 규정(a)(2)항에 의해 모니터링되고 상태 모니터링에 대한 신뢰를 기준으로 할 것을 요구하고 있음을 분명히 하고 있다.

원전의 구조물 문제가 유지보수 규정의 성능 표준과 기타 기본적 요소들과 연관되어 구체적으로 논의된 바는 없는데, NUMARC 가이드라인의 9.3.3 조항에 명시되어 있고 원전업계에서 처음에 많이 채택했던 방법인 V&V 프로그램은 원전의 구조물을 '원래 그냥 신뢰할 수밖에 없는' 대상으로 여기는 경향이 있다.

NRC는 초기 9개의 시험 원전에 대한 방문 관찰에 근

거해, 원전의 구조물에 대한 모니터링 프로그램은 전체적으로 부적절했으며 원전업계와 NRC의 모니터링에 대한 지침도 비효율적인 것이었다고 결론지었다. 또한 NRC는 구조물 모니터링의 '원래 그냥 신뢰할 수밖에 없는'식의 접근이 적절하지 못한 것임에 주목하고 원전업계의 구조물 모니터링에 대한 접근 방식을 재고하라고 권하고 있다.

이런 상황은 결국 1996년 7월에 NEI 96-03-원전의 구조물 상태 모니터링에 대한 지침서 수정본 D(Industry Guideline for Monitoring the Condition of Structures at Nuclear Power Plants)-의 발표를 이끌어냈다. NRC는 원전업계의 대표들과 함께 검토하고 토의한 결과 이 지침서가 유지보수 규정의 요건을 맞출 수 있는 신뢰할 만한 것이라고 발표했다. 나중에 NRC의 이 권고를 NEI가 따르지 않기로 결정은 했지만 구조물 모니터링을 위한 NEI 96-03 기술적 지침서의 많은 부분은 아직도 원전업계에서 활용하고 있다.

MRBI의 시행 초기에 일부 원전사업자들이 구조물을 여전히 원래 신뢰할만한 것으로 여기고 있다는 점과 처음 검사한 18곳의 원전 가운데 15곳의 구조물 모니터링상의 문제가 NRC와 원전업계의 부적절한 지침서에서 기인했음을 확인하게 되었다.

이로 인해 NRC는 RG 1.160의 C.1.5 조항에 지침 사항을 추가했는데 그것은 유지보수 규정 (a)(1)항에 의해 구조물을 모니터링할 때 상태 모니터링의 방법을 검토하고 평가를 위한 기술적 토대를 확립한 결과였다. 원전업계는 이 추가 지침이 제공된 후에야 유지보수 규정의 요건에 맞는 구조물 모니터링 프로그램을 개발하게 되었다.

유지보수의 효과

1991년에 유지보수 규정을 처음 내놓았을 때 (a)(3)항

은 설비의 성능과 상태 모니터링 작업, 통합 목표, 그리고 예방 정비 활동에 대한 평가를 최소 연 1회 하도록 하였다.

이후 1993년에 NRC와 원전업계의 논의 결과 이 정기 검사의 빈도수는 - (a)(3)항의 검사에서도 거론되는 경우도 있음-매 연료 교체 주기마다 24개월을 초과하지 않는 기간 내에서 실시하는 것으로 변경 하였다.

NUMARC 93-01의 12.2와 13.5 조항은 정기 검사의 시행과 문서화 작업에 대한 지침을 제시하고 검사 프로그램의 필수 평가 항목을 확정해 놓고 있다. 일부 원전에서는 처음부터 매번 연료 재장전을 위한 운전 정지마다 정기 검사를 실시하고 있다.

규정 12.2.4 조항에 명시되어 있는 바와 같이 정기 검사는 ① 연료 교체 시기마다 한 번씩 실시하거나 ② 검사 간격이 24개월을 초과하지 않는 한 연료교체 주기 내에 아무 때나 할 수 있다.

이 지침에 따라 원전들은 보통 정기 검사를 가동 기간 중에 하도록 계획을 세우며 원전 내 모든 설비에서 동시에 실시하고 있다.

일부 원전들은 정기 검사를 이전의 검사와는 완전히 별도의 독자적인 유지보수의 효과에 대한 검사로 실시하기도 하며 분기마다 검사를 자주하고 그 결과를 취합해 연료 교체 주기마다 높은 수준의 약식 검사를 하는 방식을 택하는 원전들도 있다.

NRC는 이러한 방식들을 시험 운영하는 원전들을 통해 두 가지 가운데 어느 방식이 더 나은지에 주목하였고, MRUG는 2002년 12월에 유지보수 규정 (a)(3)항의 검사 가이드라인에 대한 합동 검토 작업의 결과를 발표하여 분기별 평가와 정기적인 약식 검사를 함께 묶는 방식의 검사가 바람직한 것으로 결론을 내고 그에 대한 지침과 모델을 내놓았다. 

- 〈Nuclear News〉 Vol.57 No.11