

원자력 계측 제어 (I&C) 의 특성

최종인

경원대학교 전기전자공학부

계측 제어 (Instrumentation & Control) 는 전기 전자, 기계, 항공, 조선, 화공 및 원자력 등의 모든 분야에 적용되면서 하나의 독자적 세부 분야로 자리잡고 있다. 또한 공학 분야 이외에도 경제, 정치, 사회, 환경 및 의학 등 다양한 분야에서 그 학문적 적용 영역을 확대시켜 나아가고 있다. 그런데 계측 제어가 그 적용되는 분야의 기술적 내용에 따라 고유한 특성을 가지고 있다. 본 기술논문에서는 원자력 분야의 계측 제어의 고유한 특성에 대하여 기술하고자 한다.

1. 배 경

아인슈타인의 $E = mc^2$ 의 질량과 에너지와의 관계를 실현한 결과로서 생겨난 원자력은 불행히도 인류에게는 전쟁 무기로 최초로 사용되어 1945년 일본 히로시마와 나가사키에 투하된 원자폭탄을 통하여 그 가공할만한 위력을 보여줌으로써 2차세계 대전의 종식을 가져왔다. 그 후 이 에너지를 평화적으로 이용하고자 노력함으로써 1950년대 부터 제3의 불이라 불리우는 원자력 발전의 기술 시대를 열었다. 이를 위한 여러 관련 기술 중에 계측 제어는 매우 중요한 역할을 하였다. 즉 핵반응을 잘 제어하는 것이 원자폭탄을 원자력 발전소로 전환하는 핵심 기술이 되는 것이다. 따라서 원자로는 비선형적 동특성을 잘 해석하고 안정성을 확보하는 제어 기술의 활발한 적용 분야가 되었다. 특히 1960년대에는 비선형, 최적 제어 등 당대의 첨단 제어공학에 가장 커다란 연구 동기를 부여하는 산업적 분야가 되었다. 또한 이와 관련 첨단 계측기술의 연구 발전에도 크게 기여하였다.

그러나 1960년대 후반 부터 원자력 발전의 상용기술이 완성되면서, 개발 주기가 매우 긴 원자력 발전의 특성으로 인하여 급속도로 발전하는 전기전자 기술에 따른 첨단 계측 제어 기술을 수용하지 못하여 원자력 계측 제어 분야는 사

실상 타 분야에 비하여 낙후되었다. 특히 원자력 발전소는 안전성이 너무도 중요한 요소로 강조되기 때문에 매우 까다로운 규제 기관의 인허가로 인하여 새로운 기술의 적용에 있어 매우 보수적이다. 결국 오늘날 건설하는 원자력 발전소의 계측 제어 설계도 아직 1960년대 아날로그 기술을 근간으로 하는 낙후성을 가지고 있다.

한편 1979년 미국 Three Mile Island(TMI) 원자력 발전소의 사고 이후 미국을 비롯한 원자력 선진국 들이 원전 건설의 침체를 가지면서 원자력의 새로운 국면을 맞이하게 되었다. 즉 대중들의 원자력 안전성에 대한 불신의 확대와 더욱더 강화되는 규제기관의 인허가로 인하여 타전원과의 경쟁력을 우위를 유지하기 위하여 새로운 기술 혁신이 강력하게 요구되었다. 또한 에너지 수요는 계속 증가하면서 석탄 석유 등 기존 화석 연료는 매장량의 한계 및 이산화탄소로 인한 환경 문제 유발 등의 문제점과 새로운 대체에너지 개발의 요원함 등으로 원자력이 차세대 에너지원으로 다시 고려되고 있어 이를 위한 새로운 기술 혁신 노력이 필요하게 되었다. 그리하여 1980년 후반 부터 미국의 전력연구소 (EPRI)를 중심으로 새로운 원전 기술에 바탕을 둔 차세대 원전 개발을 수행하고 있다[1]. 이렇게 원자력 발전 기술이 새로운 혁신의 장을 맞이하며 오늘날 모든 첨단 기술의 적용 및 새로운 기술 개발의 동기를 부여하는 분야가 되고 있다. 계측 제어도 그 중 하나의 중요한 분야가 되는 것이다.

2. 원자력 계측 제어 기술의 고유 특성

원자력 발전소는 전기 전자, 기계, 재료, 화공, 건축 토목 등 모든 공학 분야의 기술이 종합되는 복합적 계통이다. 따라서 원자력 발전 분야에 사용되는 계측 제어 기술도 자동차, 선박, 항공기, 화력 발전소나 화공 플랜트 등에 사용되

는 일반적 계측 제어 기술과 동일하다. 예를 들면 센서를 통하여 공정 변수를 측정하고, PID 등의 제어 알고리즘으로 보상하여 액추에이터로 보내는 일반적인 자동 제어 기술을 발전소 계통에 두루 사용한다. 또한 공정 변수를 측정하여 신호 검증을 통하여 운전원 패널에 여러 가지 형태로 보여 주고 정상 운전 범위를 벗어나면 경보를 울려주는 일반적인 계측 감시 기술 역시 두루 사용된다. 한편 앞서 설명한 기술 혁신을 위한 원자력 발전소의 계측 제어 분야의 중요한 항목이 디지털 기술의 사용이다[2]. 이는 타분야에서 이미 널리 적용되고 그 기술적 장점이 검증되었기 때문에 원전에 계측 제어 기술의 디지털화와 관련된 연구 개발 내용도 그 일반적 특성에 있어서는 타분야와 동일하다. 따라서 본 논문에서는 타분야와 공통된 계측 제어의 일반적 특성보다는 원자력 고유한 계측 제어 특성을 다음과 같이 네가지 기술 분야 대하여 살펴보았다.

가. 강인 제어 기술

원자력 발전소의 제어 개념을 보면, 최적의 성능을 유지하기 보다는 운전 변수들을 항상 안전 제한치 이내에 유지하는 것이 중요하다. 즉 오랜 기간 최적 운전을 통하여 얻은 이득이 한번의 제어 실패로 발전소 정지를 일으킬 경우 생기는 막대한 손실에 비하면 미미하기 때문이다. 특히 예측하기 어려운 입력인 외란에 대하여 안정된 대처 능력, 즉 강인성(Robustness)이 매우 중요한 요구 사항인 것이다. 따라서 원자력 발전소의 여러 운전에서는 자동 제어 보다 강인성이 높은 인간 즉 운전원에 의한 수동 제어가 주로 사용되고 있다. 그러나 수동 제어시 운전원의 오류는 항상 발생할 가능성을 가지고 있어서 이로 인한 발전소의 정지는 앞서 언급하였듯이 발전소 이용률 감소라는 경제적으로 매우 큰 손실을 가져온다. 또한 미국의 TMI 사고 이후 운전원 오류가 원전 사고의 중요한 원인이 됨이 확인되어 안전성면에서도 이에 대한 개선이 요구되었다. 따라서 수동 운전의 자동화 문제는 차세대원전의 중요한 설계 요건이 되고 있다. 즉 수동 운전의 강인성을 유지하는 자동 제어 기법의 필요성이 대두되는 것이다.

기존 원전은 아날로그 기술에 바탕을 두고 있어 강인성 확보를 위한 제어 설계가 제한을 받았으나, 차세대원전은 디지털 기술이 적용됨에 따라 강인성 증대를 위한 최신 고등 제어 기법의 수용이 가능하게 되었다. 따라서 어느 분야 보다도 강인 제어 기법에 대한 강한 필요성을 바탕으로 새로운 강인 제어 기술 연구 개발에 도전의 장을 제공하고 있다.

원자력 발전소에서 현재 강인 제어를 통한 자동 운전의 필요성이 고려되는 대표적인 주요 계통으로는 원자로심 출력분포 제어 및 저출력시 증기발생기 수위 제어가 있다. 이들 계통은 비선형성, 비최소위상, 그리고 측정 오차 등으로

수동이든 자동이든 제어에 어려움을 가지고 있다. 출력분포 제어인 경우 아직 관련 연구 결과가 부진하며 앞으로 많은 새로운 강인 제어 기술의 연구 개발의 적합한 대상이 될 것이다. 이에 반해 저출력시 증기발생기 수위 자동 제어는 비교적 다음과 같은 노력이 이루어져 왔으나 아직도 상용 적용을 위한 많은 도전 영역이 남아있다.

가장 대표적인 연구로는 디지털 제어 기술의 바탕으로한 적응 제어 기법의 적용으로, 비최소위상과 관련된 상태변수들을 관측기(observer)를 통하여 예측 보완하며 외란에 대한 적응 기능을 포함함으로써 수위 자동화를 이루는 것이다. 이때 관측기는 수위 동특성 모델을 바탕으로 설계되는데 선형 모델 및 비선형 모델 사용하는 경우로 구분된다. 선형모델을 사용하는 경우 설계 적용의 투명성이 확보되어 최적 설계 등이 가능하지만 모델링오차에 대한 적응 기능이 필요하다[3,4,5]. 그러나 대부분의 경우 상용화가 가능할 정도의 적응 기능을 갖는 것이 어려워 수동 운전에 비해 외란에의 강인성이 취약하다. 비선형모델을 사용한 경우 모델링 오차가 적어짐으로써 적응 기능이 단순화되어 상용성은 향상시킬 수 있으나 모델의 복잡성으로 인한 안정성 입증 및 최적 설계 등에 어려움을 가지고 있다[6].

또다른 방법으로 운전원의 운전 기술을 바탕으로 정확한 모델링이 요구되지 않는 퍼지 이론[7,8]이나 신경망[9,10]을 도입하는 것이 많이 연구되고 있다. 이는 운전원의 지능적 제어를 모의하기 때문에 상대적으로 외란에 대한 강인성이 높으나, 앞서 설명하였듯이 정성적 수동 제어 기법을 근간으로 한 것이기 때문에 이론적 배경이 취약하여 설계 적용에 대한 투명성이 없어 설계의 입증이 상용화의 관건이 되고있다.

끝으로 H_{∞} 강인 제어 기법을 고려할 수 있는데 이는 모델링 오차, 비선형성, 측정오차 및 외란 등의 불확실성을 가지는 계통의 강인 최적 제어 기법으로 1988년 Doyle의 논문[11]을 필두로 최근 상당한 관심을 받으며 국내외적으로 거의 모든 제어 관련 분야에서 연구 적용되고 있다. H_{∞} 제어 기법은, 견고한 이론적 바탕을 가지고 안전성을 강인하게 유지하며 성능 최적화를 이루고자 하는 것으로 최악의 경우의 외란에 대한 계통의 영향을 나타내는 Hardy 공간에서 H_{∞} -norm을 제한치 이내에 유지하며 이 제한치를 최소화하는 문제이다. 특히 이는 제어 계통 설계에 이 기법의 적용을 투명하게 보여줄 수 있다. 즉 설계 투명성을 통하여 상용 적용시 인허가성을 증진시킬 수 있다. 따라서 원전의 저출력시 증기발생기 수위제어의 자동화에 매우 적합한 방법으로 고려되지만 이와 관련된 연구는 매우 미흡한 실정이다[12].

이상의 원자력 발전소의 한 계통의 자동화 노력을 살펴봄으로써 강인 제어와 관련된 원자력 계측 제어의 고유 특성을 보여주고 있다.

나. 확인 및 검증 기술

원자력 발전소는 그 안전성이 가장 중요한 설계 요구사항이기 때문에 일찍부터 품질보증 기술 발전에 크게 기여하였다. 즉 다중보호 개념의 안전 설계, 시공, 운전 및 보수 유지 외에도 매우 엄격한 공정 관리와 품질 검사 그리고 운전 지침 등을 통한 규제로 고도의 발전소의 건전성을 유지하고 있다. 특히 발전소 건설 및 운전의 인허가를 관장하는 규제 기관은 다른 어떤 분야보다도 많은 인력과 재정을 가지고 있으며 매우 독립성을 가지고 업무를 수행하고 있다. 예를 들면 미국의 원자력 규제 기구인 NRC(Nuclear Regulatory Commission)의 경우는 기술적인 사항의 검토를 위한 많은 연구진과 해석 도구 등을 확보하는 등 설계 제작사 보다 기술적으로 우위를 점하고 있어 정말로 명실상부한 감독 기관으로서의 자리를 갖고 있다. 또한 규제 개념이 매우 보수적이기 때문에 발전소 건설 및 운영에 있어 안전성을 영향을 미칠수 있는 미세한 설계와의 차이, 시공 부실, 그리고 지침 위반도 결코 허용하지 않는다. 이와 같은 매우 엄격하고 보수적인 행정적 규제는 사실상 원자력 발전소 건설의 공기를 지연시켜 경제성에 부담을 주며 새로운 기술의 이식이 어려워 관련 기술 발전을 저해하는 부정적인 면도 가지고 있다. 그러나 무결함을 목표로하는 철저한 규제를 위한 고도의 품질 보증 기술은 건축, 토목, 화학공장 설계, 자동차, 항공기 및 선박 제조 등 타 분야에 많이 활용되어왔다.

원자력 발전소의 계측 제어 설계도 마찬가지로 매우 엄격한 품질 보증을 받아 왔다. 즉 1960년대에 설계된 원자력 발전소에 사용된 계측 제어 부품 혹은 컴퓨터 등은 당대로서는 타 분야에 같은 용도로 사용되는 것에 비해 매우 비싸고 신뢰도가 높은 고품질의 제품으로서 엄격한 품질 기준을 만족시켰다. 따라서 계측 제어 설계의 품질 보증 기술이 일찍부터 요구되고 이 분야에서 발달된 기술은 전기전자 부품의 신뢰성 증진에 기여하였다. 그러나 원자력 발전소에 계측 제어 설계가 1960년대의 기술을 바탕으로 되어 있어서 빠른 속도로 발전되고 있는 현재의 전기 전자 관련 기술 수준으로 볼 때 매우 낙후하다. 특히 앞서 설명하였듯이 사양 기술인 아날로그 기술이 근간을 이루고 있어 단종 부품의 증가 및 관련 전문가의 감소 등으로 운전 및 보수 유지에 어려움이 많으며, 또한 아날로그 계통의 경직성으로 신기술 이식 등을 통한 성능 향상에 제한을 받고 있다. 따라서 이와 같은 문제점들을 해결하기 위한 방안으로 원전 계측 제어 계통의 디지털화가 점차 요구되고 있다. 특히 차세대 신형 원전에서는 디지털 기술의 적용을 기본 설계 요건으로 제시하고 있다. 원전에서의 디지털 계측 제어 계통의 확대가 불가피한 이러한 추세에서, 관련 소프트웨어의 신뢰성 보장에 대한 문제가 필연적으로 대두되게 되었다. 특히 안전성 관련 규제가 까다로운 원전 설계에서는 소프트웨어를 포함한 디지털 계통의 객관적 품질 보증이 요구되고 있다. 이를 위

해 핵심적으로 필요한 것이 소프트웨어 확인 및 검증 (V&V: Verification and Validation) 기술이다.[13]

소프트웨어 확인 및 검증이란 소프트웨어 설계가 주어진 요구사항대로 되었는가를 확인하고 실제로 원하는 기능을 하는지 검증하는 절차이다. 이에 대한 일반적 방법론은 소프트웨어 공학 등에서 다루고 있으나 그 학문적 역사가 짧고 아직도 정립되는 중이어서 응용 분야별 많은 새로운 시도와 연구가 필요하다. 특히 오늘날 소프트웨어가 우리의 모든 분야에 걸쳐 일반화되어 있는 상황에서 공상 과학 소설에 나오는 소프트웨어의 결함에 의한 예측 못할 대형 사고의 발생 가능성이 점차 현실화되고 있다. 그러나 다른 상용 소프트웨어 분야에서는 사실상 상용 소프트웨어 관련 신뢰성에 대한 엄격한 규제 및 기준이 없고 또한 제품의 주기가 짧고 경제성이 가장 중요한 요소이기 때문에 확인 및 절차를 위해 많은 시간과 투자가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 따라서 마이크로소프트사와 같은 세계적으로 아무리 유명한 회사의 상용 제품이라도 출시후 항상 결함은 계속적으로 발견되고 있는 것을 우리는 경험하고 있다. 강력하고 엄격한 규제가 요구되지 않는 분야에서는 소프트웨어의 무결함 고신뢰성을 위한 확인 및 검증 기술 연구 개발에 대한 투자와 노력이 이루어 지지 않는다. 그러나 이러한 확인 및 검증 기술을 위한 기반 연구 투자 노력이 없이 지금처럼 급속한 소프트웨어의 발달이 진행될 경우 점점 복잡해지는 소프트웨어의 확인 및 검증은 사실상 불가능해질 것이며 인류는 자기가 사용하는 소프트웨어 결함에 의한 예측 못할 상황을 제어할 수 있는 능력을 상실하게 될 것이다.

이러한 관점에서 볼 때, 무결함 고신뢰성을 위한 소프트웨어의 확인 및 검증 기술 개발 노력은 대단한 중요성을 갖게 될 것이다. 원자력 발전소에 사용되는 소프트웨어에 대한 확인 및 검증에 대한 규제 기관의 요구는 대단히 엄격하며 특히 안전성 관련 소프트웨어에 대해서는 무결함 고신뢰성을 보장하는 확인 및 검증 기술이 필요하다. 이러한 기술의 미흡으로 인허가가 지연될 경우 발생하는 경제적 손실은 막대하기 때문에 다른 어느 분야 보다도 이를 위한 연구 개발 투자 및 노력에 대한 강한 동기를 제공한다. 현재 소프트웨어의 공통모드고장 방지, 상용소프트웨어 확인 및 검증, 그리고 전문가시스템 등 고등알고리즘 검증 기술 등이 많이 연구되는 기술적 분야이다.

다. 고장 허용 (Fault-Tolerance) 기술

고장 허용 기술은 고장을 방지하는 기술과 고장이 생겨도 계통의 성능을 유지할 수 있는 설계 기술을 모두 포함한다. 더 나아가 고장이 발생하여도 안전한 방향으로 계통이 정지되는 고장 안전(Fail-Safe) 기술도 포함할 수 있다. 이는 군수 및 항공 우주 분야에서 일찍부터 발달하였으며[14], 최근에는 컴퓨터 및 전자 통신 분야에서 크게 활용되고 새로

운 기술이 연구 개발되고 있다. 원자력 계측 제어 분야에서도 고신뢰성이 요구되기 때문에 설계에 기본 개념으로 사용되었다. 그러나 기존 아날로그 계통인 경우 고장 허용 기술 적용에 제한을 가지고 있어 고신뢰성 유지를 위해 고장 방지 측면에서 엄격한 품질 보증 및 고신뢰성의 부품을 사용하였다. 그리고 대부분 안전 계통인 경우 간단한 다중성 기술을 이용하였으며 고장 안전 설계 개념도 사용하였다.

차세대원전의 경우 디지털 계측 제어 계통이 적용되므로 이를 위한 고신뢰성의 입증은 인허가상 매우 중요하다. 입증에 위한 한 방법으로 고장 허용 설계 구현은 매우 필요하며[15], 대표적 기술로서는 다중성 적용 뿐 아니라 다양성 적용 기술이 있는데 특히 소프트웨어의 공통모드 고장 방지 설계에 필요한 기술이다. 또한 디지털 설계의 특성상 보다 고등 신호 검증 등 다양한 고장 허용 기술의 적용을 용이하게 해준다. 이는 디지털 제어 및 보호 계통의 신뢰성을 높일 뿐 아니라 감시 계통에 적용 원자력 발전소 신뢰성 저하에 큰 요인이 되고 있는 운전원 오류 방지에도 크게 기여할 수 있다.

원자력 발전소의 고장은 안전성 뿐 아니라 경제성으로 곧바로 이어지기 때문에 고장 허용 기술 연구 및 개발에 대한 투자와 노력의 동기는 다른 분야에 비해 매우 크다. 이와같은 고장 허용 설계 기술의 결과는 고신뢰성 계통이 필요한 여러 다른 분야에 적용될 수 있다. 현재 벤츠 등의 고급승용차에 LAN이 설치되어 있는데 승용차에 설치되는 통신망 또한 고온, 습기, 먼지 그리고 강한 진동 등 매우 까다로운 환경(Harsh Condition)에서도 그 견전성이 유지되어야만 하기 때문에 이런 분야에 원전 통신망 기술이 직접 적용될 수 있다.

라. 로봇 이용 기술

원자력 발전소는 그 보수 유지를 위한 작업 환경이 방사선에 노출되어 있을 수 있기 때문에 이를 사람 대신 로봇을 이용하는 가치는 다른 어떤 분야보다도 높다. 특히 그 수행업무가 사람을 대신하여 나사를 돌리는 업무등 정교하고 강력한 토크를 필요로 하기 때문에 이를 위한 새로운 로봇 기술 연구 개발에 강한 동기를 부여한다.

3. 결 언

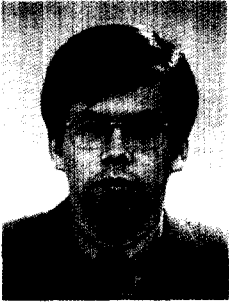
원자력 계측 제어는 타분야와 마찬가지로 일반 계측 제어 기술이 한 중요한 분야로 필요할 뿐 아니라, 위에서 언급한 것과 같이 강인 제어, 확인 및 검증 기술, 고장 허용 기술 그리고 로봇 이용 기술 등의 분야에서는 매우 고유한 특성을 갖는다. 이러한 고유 특성은 관련분야에서의 연구 개발을 위한 투자와 노력에 대한 다른 분야 보다 강한 동기를 부여함으로써 새로운 계측 제어 기술발전에 크게 기여할 수

있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] "ALWR Utility Requirements Document", EPRI, 1989
- [2] "Integrated Instrumentation and Control Upgrade Plan," EPRI NP-7343,1992
- [3] M.G.Na, H.C.No, "Design of Model Reference Adaptive Control System for Steam Generator," Nucl. Eng. Des. Vol.122, 1990
- [4] M.G.Na, H.C.No, "Design of an Adaptive Observed-based Controller for the Water Level of Steam Generators," Nucl. Eng. Des.Vol.135,1992
- [5] Y.J.Lee, "Optimal Design of the Nuclear Steam Generator Digital Water Level Control System," J. Korean Nucl. Soci.,Vol.26, No.1,1994
- [6] J.I.Choi, "Nonlinear Digital Control for the Stesm Generator System in a Pressurized Water Reactor," Ph.D.Thesis, MIT, 1987.
- [7] C.C.Kuan, et.al., "Fuzzy Logic Control of Steam Generator Water Level in PWR," Nucl. Tech. Vol.100, 1992
- [8] N.J.Na, et.al., "A Self-Tuning of a Fuzzy Logic Controller for Steam Generator Water Level," J. Fuzzy Logic and Intell. Sys., Vol.3, No.4, 1993
- [9] C.C.Ku, K.Y.Lee, "Improved Nuclear Reactor Temperature Control using Diagonal Recurrent Neural Networks," IEEE Trans. Nucl.Sci., Vol.39, No.6, 1992
- [10] S.K.Lee, "A Study on the Water Level Control of Steam Generator at Low Power Using Neural Networks," MS Thesis, Seoul National Univ., 1994
- [11] J.Doyle, et.al., "State-Space Solutions to Standard H2 and H Control Problems," IEEE Trans. Auto. Contr., Vol. 34, 1988
- [12] "H Controller Design for Boilers", EPRI TR-103944, 1994
- [13] "Handbook for Verification an Validation of Digital Systems", EPRI TR-103291,1994
- [14] O. Serlin, "Fault Tolerant Systems in Commercial Applications," Computer 17(8),1984
- [15] B.W.Johnson,"Design and Analysis of Fault-Tolerant Digital Systems," Addison-Wesley, 1989

저 자 소 개



최 중 인

1956년 10월 7일생

1979년 서울대학교 원자핵공학과(학사) 및 1981년 동대학원(석사)

1987년 MIT 계측제어전공(박사)

1985~87년 MIT 연구조교

1988~89년 ABB/CE사 연구원

1987~93년 한국원자력연구소 선임연구원

1993~현재 기초전력공학공동연구소 원자력안전센터 계측제어부 부장

1993~현재 경원대학교 전기전자공학부 조교수

주관심분야: 발전소 비선형 지능제어, 강인제어 및 고장 허용 제어

(461-701) 경기도 성남시 수정구 복정동 산 65.

TEL. 0342) 750-5349 / FAX. 0342) 751-7885.