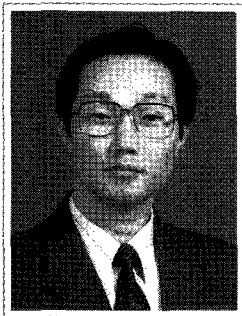


제8회 원전 기기 건전성 워크숍

원전 압력 기기 건전성 확보를 위한 연구

박 윤 원

한국원자력안전기술원 방사선·공학연구실장



원자로 용기·증기발생기·원전 배관·핵연료 압력관 등과 같은 원전의 압력 경계 기기의 건전성 확보를 위한 「원전 기기 건전성 워크숍」이 지난 5월 14~15일 한국원자력안전기술원에서 개최되었다.

이 워크숍은 1993년부터 매년 개최되는 것으로서 국내에서 개최되고 있는 기존의 학회나 학술대회가 대부분 대학 중심으로 운영되어 현장에서의 경험을 발표하기에는 수준이 맞지 않는 문제가 있다는 점을 감안하여 산업 현장에서의 참여를

최대한 독려하고 있으며 실제 현장의 문제점과 애로 사항 등을 논의할 수 있도록 하고 있다. 본 워크숍의 태동 배경과 발전 과정을 간략히 소개하면 다음과 같다.

국내에서 원전 압력 기기 분야에 대해 관심이 본격적인 연구가 수행된 것은 영광 3·4호기로 시작되는 국내 원전 표준화 사업 이후부터라고 할 수 있다. 특히 영광 3·4호기에서는 건설 원전에 세계 최초로 파단전 누설 개념, 즉 배관의 갑작스런 파단보다는 균열이 서서히 성장해가며 누설을 유발하여 급격한 파단전에 이러한 누설을 탐지해 내고 필요한 안전 조치를 취할 수 있다는 개념을 주요 배관 설계에 반영하여 설계를 최적화하게 되었다.

이 파단전 누설이라는 새로운 개념에 대해 규제자·설계자 및 연구자가 상호 이해를 같이 하는 것이 필요하다고 판단되어 제1회 배관 건전성 워크숍이 개최되었는데 당시에는 12편의 논문이 발표되고 약

40여명이 참가하였다.

이듬해부터 범위를 배관에서 원자로 용기·증기발생기 등으로 확대하여 원전 기기 건전성 워크숍으로 자리잡게 되었다. 본 워크숍이 비약적인 발전을 하게 된 계기는 1996년에 제3회 워크숍을 개최하면서 국내뿐 아니라 일본의 전문가도 참여하여 국제화하면서부터라고 하겠다.

이 때 일본측에서는 일본 용접학회 산하 원자력연구회 소속 위원 7명이 참가하였고 향후 본 워크숍을 발전시켜 아시아의 원자력 국가들이 기술 정보를 공유할 수 있도록 하는 계기를 만들어 가기로 하고 국제 워크숍은 매 2년마다 참여국이 돌아가면서 개최하기로 하였다.

그리고 이 국제 워크숍에서 발표된 논문은 원자력 분야의 국제 학술잡지로서 SCI 저널인 <Nuclear Engineering & Design>에 특별판으로 발행되었다(1997년 NED Vol. 174/No. 1).



이후에 매년 5월에 워크숍을 개최하여 금년으로 이미 8회째가 되었으며 참여자 및 발표 논문도 점차 증가하여 이제는 200여명 이상이 참여하고 발표 논문은 매년 60편이 넘는 수준으로 정착되었다.

국제 공동으로 개최하기로 하였던 워크숍은 성격상 매년 국내에서 개최된 워크숍과는 달리 매 2년마다 개최하게 되어 우리나라의 차례가 되는 경우를 제외하고는 별도의 행사로 발전되었으며, 국내에서는 성균관대의 SAFE 연구센터가 중심이 되어 운영하고 있다.

제2회 국제 원전 기기 건전성 워크숍은 1998년도에 일본에서, 제3회는 2000년도 대만에서 개최하면서 매번 발표된 논문은 엄선하여 <Nuclear Engineering & Design>에 특별판으로 발행하고 있으며 제2회 결과는 NED의 Vol. 191/No.2로 1999년에 발행되었고 제3회 결과는 현재 NED에서 논문 검토중이다.

원전 기기 건전성 워크숍에서 주로 다루어진 내용으로서는 제1, 2회에서는 배관 건전성이 중심이 되었고, 이후는 원자로 용기·증기발생기 세관·중수로 압력관 등 주요 압력 기기들이 모두 포함되었으며, 이들 기기의 건전성 확인을 위해 현장에서 수행되는 가동중 검사 및 비파괴 검사 관련 기술도 중요한 주제로 자리잡게 되었다. 제6회 이후부

터는 이들 설비의 노후화, 원전의 수명 연장 등도 중요한 주제로 되어 가고 있다.

이 워크숍의 주관은 한국원자력 안전기술원이 계속해 오고 있으며 원자력학회와 대한기계학회의 압력기기위원회가 1997년 제4회 워크숍부터 공동 개최 기관으로 지원을 하고 있다. 특히 2001년 춘계 압력기기위원회에서는 압력 기기 분야를 원자력과 일반으로 구분하되 춘계 대회는 원자력 분야에 초점을 맞추어 한국원자력안전기술원이 주관하는 본 워크숍을 중심으로 치를 수 있도록 결정하였다.

이번 워크숍에서는 특히 분야별로 매 세션이 끝난 후 토론 시간을 가졌고 유사 분야에 대한 세션이 모두 완료된 후 종합 토론을 다시 가지도록 하여 분야별로 현재의 기술 수준과 현황을 점검하고 향후 필요한 분야와 기관간 협력 방안 등을 논의하였다. 각 분야별로 발표된 주요 연구 내용 및 토론 결과는 다음과 같다.

원자로 용기

원자로 용기에 대해서는 중성자 조사 취화로 인한 문제점이 모든 논문에서 공통된 주제였으며, 재료의 파괴 인성 저하에 대한 감시 시험, 직접적으로 파괴 인성을 측정하는 Master Curve 관련 기술, 원자로

용기의 가압열충격에 대한 결정론적 및 확률론적 평가, 그리고 가동 원전의 운전 영역을 결정하는 압력-온도 운전 제한 곡선에 대한 논문이 발표되어 원자로 용기의 파괴 인성 저하와 관련된 모든 주제들이 전반적으로 다루어졌다.

특히 가압열충격 해석과 압력-온도 곡선 평가는 국내의 여러 기관이 함께 참여한 Round Robin 형태로 수행된 것이어서 계산 과정 및 결과에 대한 상호 비교 평가가 가능하였다.

원전의 수명 연장에 가장 중요한 인자가 원자로 용기의 노후화, 즉 파괴 인성의 저하라는 데에는 모두가 공감하였으며, 이의 정확한 측정과 예측 방법의 개선이 필요하다는 데 의견이 모아졌다.

지난 20여년 동안 국내에서도 상당한 양의 재료 시험 데이터가 축적되었고 시험의 정확성도 세계적인 수준으로 인정받는 실정이나 아직도 예측 영역에서는 불확실성이 상당히 존재하고 있는 것이 사실이다.

특히, 그동안 크게 다루지 않았던 중성자 조사량에 대한 불확실성을 낮출 수 있도록 Ex-vessel dosimetry 등을 적극 활용할 필요가 있으며, 재료의 화학 조성에 대한 국내 고유의 데이터 특성을 파악하고 이를 재료 물성치 예측시 사용할 수 있도록 하는 것이 중요하다.

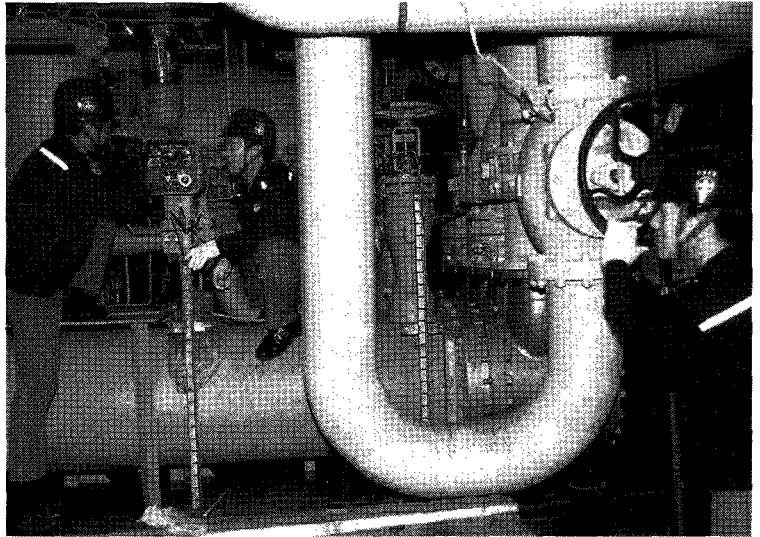
현재까지도 원자로 용기의 건전

성 평가에 사용되는 대부분의 기술 기준들이 1970년대 초에 개발된 것을 그대로 사용하고 있으나 이제는 지난 20여년간의 국내외 연구 결과를 적극 실제 현장에 적용할 수 있도록 하여 불필요하게 지나친 보수성은 줄여나가도록 하는 노력이 필요하다.

그 대표적인 예로써 탄소성 파괴 역학에 기초한 Master Curve 개념의 도입을 들 수 있다. 이미 원자로 용기의 재료인 저합금강에 대해서는 방대한 시험 결과가 마련되어 Master Curve 개념의 적용 가능성을 보여주고 있으며 국내에서도 상당한 연구가 수행되어 왔다. 최근에 이 방법을 수용한 ASME Code도 발행되었고 미국에서 일부이기는 하지만 적용된 사례가 있어 우리도 이의 적용을 적극 고려할 필요가 있다.

건전성 평가 측면에서는 가장 어려운 것이 가압열충격 해석으로 알려져 있으나 결정론적인 방법에 대해서는 국내 7개 기관이 참여하여 Round Robin 해석을 수행한 결과 의외로 편차가 크지 않아 국내의 해석 수준이 상당한 수준에 올라 있음을 확인할 수 있었다.

가압열충격 해석에 사용된 다양한 인자들을 비교 검토한 결과 현재 사용하고 있는 미국의 PTS Screening Criteria에 개선되어야 할 요소들이 여러 가지 있음을 확인



국내에서 원전 압력 기기 분야에 대해 관심이 본격적인 연구가 수행된 것은 영광 3·4호기로 시작되는 국내 원전 표준화 사업 이후부터라고 할 수 있다. 특히 영광 3·4호기에서는 건설 원전에 세계 최초로 파단전 누설 개념, 즉 배관의 갑작스런 파단보다는 균열이 서서히 성장해가며 누설을 유발하여 급격한 파단전에 이러한 누설을 탐지해 내고 필요한 안전 조치를 취할 수 있다는 개념을 주요 배관 설계에 반영하여 설계를 최적화하게 되었다.

할 수 있었다.

이러한 결정론적 해석에 이어 확률론적 해석을 수행한 결과 PTS로 인해 원자로의 파손 확률에 잔류 응력, Shallow flaw 및 clad 영향이 가장 큰 영향을 미치는 인자로 파악되었다.

확률론적인 해석은 아직 그 방법론이 충분히 개발되었다고 보기 어려우나 인자들의 우선 순위 결정 등에 매우 유용하게 사용될 수 있어 향후 기술 개발이 필요한 분야이다.

재료의 파괴 인성 저하와 이를 토대로 수행된 건전성 평가의 결과는 운전중에 압력-온도 운전 영역의 설정을 통해 현장 원자로 운전이 활용되며 이번엔 국내에서 처음으로 이 PT Curve 결정에 대해 다양한 인자의 영향을 파악하기 위한 Round Robin을 수행하고 그 중간 결과를 이번엔 발표하였다. 여러 중

요한 인자들의 영향을 비교하였으나 PT Curve에는 영향이 크지 않다는 것을 잠정적으로 확인하였다.

배 관

배관에 대해서는 크게 재료 특성 평가, 국내 3개 기관이 컨소시엄을 구성하여 수행하고 있는 배관 건전성 평가 국제 공동 연구(BINP), 탄소강 배관에서 주로 문제가 되고 있는 침부식으로 인한 감육, 그리고 파단전 누설에 관한 연구 결과가 발표되었다.

재료 특성 평가에서는 SA 106 재료가 하중 속도에 따라 파괴 인성이 차이가 있어 단일 속도만으로 동적 파괴 인성 특성을 대표하는 것은 무리라는 연구 결과가 있었고, 1차 계통 배관 재료인 CF8M이 열화 후 저주기 피로 수명이 크게 감소한다

는 것과 마모 특성은 차이가 없다는 발표가 있었다.

주조 스테인리스강의 열취화 특성과 재료 특성 변화 예측 방법을 제시하였고, 미소압입을 이용하여 간단하게 현장에서 재료의 물성치를 측정하는 방법 및 상용화 장비가 소개되었으며, 용접 방법에 따른 SA312 TP316강의 파괴 저항 특성에 대한 연구 결과가 있었다.

배관 건전성 관련 안전 규제 현안으로 그동안 국내에서 발표된 관련 논문의 주요 내용을 검토하고, 탄소강 배관의 감육으로 인한 평가 방법, 지진 및 열성층 하중을 고려한 평가, 가동중 원전에서 발견된 결함 등 문제에 대한 검토 결과 소개가 있었다.

BINP의 일환으로 수행된 연구 결과로서 2차 응력이 1차 응력과 파괴에 거의 동일한 영향을 미친다는 것과 반복/동적 하중으로 인한 상승 효과는 없다는 것이 발표되었으며, 압력 유인 굽힘 제한 효과에 대한 Round Robin 결과 발표가 있었다.

탄소강 배관의 침부식으로 인한 감육에 대해 현장의 손상 관리 방안, 측정 데이터에 근거한 평가 기법의 비교가 있었으며, 초기 Baseline 데이터 확보의 중요성이 강조되었다.

감육 배관의 건전성 평가를 위한 ASME Code Case를 분석하고 감육 배관에 적용 가능한 한계 하중해

를 제시한 연구가 있었다.

감육 배관의 손상 형태를 조사하고 감육부 형상에 따른 파단 시험 결과 압력, 감육부 길이 및 폭 등이 많은 영향을 미치고 있었다.

파단전 누설 평가에 많이 사용하였던 GE/EPRI 방법의 문제점을 보완하여 실제 배관 파손 시험 데이터를 잘 모사하는 예측식을 새로이 제시한 연구 결과가 있어 관심을 끌었다.

증기발생기 세관

증기발생기 세관에 대해서는 건전성, 와전류 탐상 검사, 그리고 최근에 국내 원전에서 주요한 관심사로 부각되고 있는 세관 마모 현상을 다룬 14편의 논문이 발표되었다.

증기발생기 세관에서 자주 발생하고 있는 누설을 정량적으로 평가, 예측하기 위해 국내 증기발생기 세관 재료에 실제에 가까운 인공 결함을 넣고 압력 시험을 수행하여 누설량과 압력 및 균열의 길이간의 관계를 구한 연구 결과가 발표되었다.

아직 구체적 기준이 마련되어 있지 않은 다중 결함 세관의 허용 기준에 대한 연구가 발표되었고, 결함 세관의 슬리브 재생 기술에 대한 현황 소개 및 미국 원전에서 사업자들이 대부분 적용하고 있는 증기발생기 세관 건전성 확보를 위한 NEI 지침의 적용성에 대한 논의가

있었다.

증기발생기 2차측 균열 및 진동으로 인한 손상 예측, 세관 결함 제조, 검사된 와전류 신호의 자동 평가 시스템 소개 등 현장과 밀접한 연구 결과들이 소개되었으며, 와전류 신호에 대해 신경망 회로를 사용한 평가 방법 개발, Ferromagnetic 배관에 주로 적용되었던 Remote ECT를 증기발생기 세관에 적용하기 위한 연구도 발표되었다.

국내 표준형 원전에서 문제가 되고 있는 증기발생기 세관의 마모와 관련해서, 마모를 유발하는 반진동 구조물의 구조적 형상 진단을 통해 마모의 원인을 파악한 결과가 있었으며, 재료의 소성 변형층이 마모에 미치는 영향 평가, 결정입의 크기가 마모에 미치는 영향, 그리고 sliding 및 fretting이 마모에 미치는 영향 등을 분석한 연구가 발표되어 국내에서는 처음으로 증기발생기 마모 현상에 대해 종합적인 진단이 이루어졌다.

중수형 원자로 압력관 및 피더 배관

중수형 원자로에서는 1차 계통의 압력 경계로서 많은 관심 대상이 되고 있는 압력관과 피더 배관의 감육 문제에 대해 9편의 집중적인 연구 발표가 있었다.

특히 첫 번째 발표된 CANDU 일

차 열수송 계통의 건전성 확보 방안은 CANDU 원전의 압력관에서 확인된 잠재적 문제점인 수소 농도 증가, 파괴 인성 저하, 스프링의 위치 이동, 압력관의 중성자 조사 연신 등에 대해 국내의 검사 결과를 폭넓게 소개하였으며 피더 배관의 감육 측정 결과를 설명하였다.

피더 배관에 대해서는 자기장을 인가하여 산화 피막을 강화하여 침식을 완화시키는 방안에 대한 연구 발표가 있었고, CANDU 원전에서의 피더 배관의 감육 데이터를 종합 분석하고 검사 데이터로부터 수명을 예측하는 모델을 설명하였으며, 최종적으로 월성 1·2·3·4호기에 대한 검사 및 대응 방향을 제시하는 발표가 있었다.

압력관의 경우는 압력관 재료의 조사 전후 기계적 특성을 측정하고 월성 3·4호기에 설치된 Quad-melt Ingot으로 제작된 압력관의 기계적 특성을 Double-melt Ingot 재료의 것과 비교 평가하여 국내 압력관의 건전성 평가에 필요한 기본 데이터를 주는 연구 결과가 발표되었다.

압력관의 블리스터 형성, 지연 수소 균열의 속도 측정에 대한 연구 결과가 있었으며, 압력관의 건전성 평가를 종합적으로 수행할 수 있는 건전성 평가 시스템도 소개가 되었고, 마지막으로 압력관의 검사에 대한 발표가 있었다.

비파괴 검사

비파괴 검사에는 다중-가우시안 빔 모델을 이용한 결함 신호 예측, wavelet transform을 이용한 초음파 신호의 잡음 감소, Tip diffraction 방법을 이용한 결함 탐지능 개선, 초음파를 이용한 재료 열화 평가 및 초음파 모델링 등에 대한 해석적 연구 결과가 발표되었고, 최근에 기량 검증과 관련하여 국내 13개 비파괴업체가 참여하여 수행된 초음파 검사 Round Robin 결과 분석에 대한 발표 및 가동중 검사에 대한 현행 과기부 고시 제 98-15호의 개정 방향에 대한 발표가 있었다.

특히 초음파 검사 Round Robin 결과에서는 국내 처음으로 비파괴업체가 대거 참여하여 동일한 시험편을 놓고 결함의 탐지능과 크기 결정을 ASME Code의 방법 및 각 업체가 보유한 개선된 기술을 적용하여 측정한 것으로서 국내 비파괴업체의 수준을 정량적으로 가늠해 보고 향후 도입한 기량 검증 제도에 기본 데이터를 제공하였다는 데에 큰 의미가 있었다.

이 결과에 따르면 결함의 검출 성능은 양호하나 결함의 크기 결정은 개선할 점이 많이 있는 것으로 분석되었다. 선진국의 사례를 볼 때 기량 검증을 도입한 후 수행된 검사에

서 예전에 발견하지 못했던 결함을 다수 검출해내고 있어 가동 원전의 안전성에 직결되는 기량 검증 제도의 조속한 도입이 절실히 필요한 것으로 생각된다.

이러한 기량 검증 제도의 도입에 초음파 신호에 대한 해석적 접근이 많은 도움을 줄 수 있으나 국내에서는 아직 이러한 분야에 연구가 매우 미흡한 실정이다.

수명 관리

원전 수명 관리에서는 그동안 별로 다루어지지 않았던 매설 설비인 콘크리트 매설 배관과 전기 케이블에 대한 노화 진단 및 수명 평가, 그리고 노화 관리 방안이 제시되었다.

현재 매설 설비는 부분적 노화 현상이 발견되기는 하나 미국 원전 수준의 관리가 이루어지고 있다.

실용적 정비 규정의 적용으로 원전 수명 연장시 능동형 기기에 관한 노화 관리를 정비 규정으로 가름할 수 있을 것으로 제안한 연구 결과가 있었다.

장기 가동 구조물의 노화 진단 및 평가로 대상 설비를 분류하고 구조물별 노화 특성을 파악하여 노화 관리 방안에 대한 발표가 있었고, 실제 원전 가동 환경 온도 모니터링 데이터를 사용하여 수행된 케이블의 노화에 대한 시험 평가 결과 발표가 있었다. 