원전 소구경 배관 초고속 비파괴검사 기술

이 희 종
한수원 중앙연구원 비파괴기술그룹 그룹장

전남대 기계공학 학사
충남대 대학원 석사, 박사

한전 입사(' 84)
영광원자력본부 시운전반
원자력발전소 비파괴검사 기술 개발(R&D) 및 기술 지원
원자력발전소 증기발생기 와전류 검사 시스템 개발 외 12건 연구과제 수행
산업재산권 38건(특허)
'원전 제어봉 와전류 검사 기술' 외 55개 논문

한수원 중앙연구원(원장 이종호) 기계재료연구소 비파괴기술그룹은 원자력발전소 원자로 냉각재 계통에 설치된 소구경 배관(호칭경 2인치 미만)의 소켓 용접부에 발생할 수 있는 결함을 단기간에 검출하기 위한 첨단 비파괴검사 기술을 1년간의 연구를 통해 자체 개발하여 현장 적용에 성공하였다.

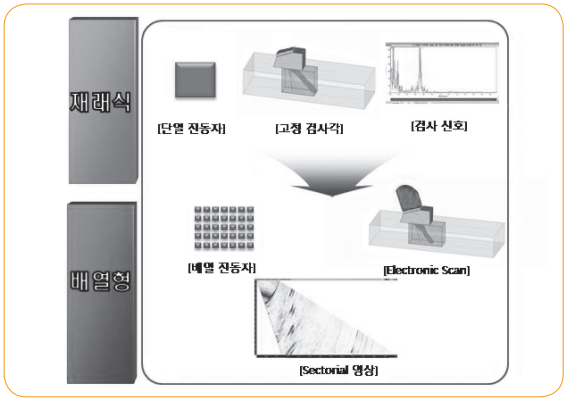
향후 개발 기술의 보호를 위해 국내외 특허를 출원하고 관련 기술을 국내 검사 기관에 이전하여 실용화할 예정이며, 또한 관련 기술과 장비를 해외 원전에 수출할 계획이다.

소구경 배관 소켓 용접부

원자력발전소에 설치되어 차단이 불가능한 소구경 배관의 소켓 용접부는 손상 발생 시 발전 정지를 유발하여 원전 운전에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 소구경배관은 직경 2 inch 미만의 배관으로 재질은 탄소강, 스테인리스강 또는 Cr-Mo 합금으로 제작되어있다.

원전 계통에는 노형에 따라 압력 경계 내에 온도, 압력 측정, 배수 및 시료 채취를 위해서 140개에서 최대 1500여개의 소구경 배관이 설치되어 있다. 소구경 배관은 주배관에서 분기하거나 배관과 연결 시에 소켓 용접으로 연결되며, 소구경 배관 주위에 설치된 펌프 등에 의한 진동에 취약하여 진동으로 인한 고주기 피로 균열이 발생할 수 있다.

원전 건설 적용 코드인 ASME Sec. III 4500에는 2인치 이하의 소구경 배관 소켓 용접부 제작에 관한 요건을 규정하고 있다. 90년대 미국 원전의 경우 배관 관련 손상 450건 중 80%가 소구경에서 발생하는 것으로 나타나 소구경 배관은 배관 관리의 주요한 대상으로 대두되고 있는 실정이다.



〈그림 1〉 재래식 초음파 검사 기술과 위상 배열 초음파 검사 기술의 비교

국내외 기술 개발 현황

1. 해외 기술 현황

미국 원전 규제 기관에서 2003년 원전 운영 허가 갱신 시 장기 사용으로 인한 피로 결함의 존재 여부를 확인하고자 4" 미만의 안전 1등급 소켓 용접부에 대해 체적 검사 수행을 요구하였다.

운영 허가 갱신을 요청한 미국 내 발전 사업자들은 검사 범위, 검사 방법 및 판정 기준에 대한 지침이 없이 사업자별로 조치 중에 있다. 미국 내 원전에서 소구경 배관 소켓 용접부에 손상이 발견됨에 따라 미국 EPRI (Electric Power Research Institute)에서는 적용 가능한 비파괴검사 방법인 방사선 투과 검사(RT)와 기존의 재래식 초음파 검사 및 위상 배열 초음파 검사를 상호 비교하여 검사 기법별 결함 검출능을 비교 분석한 결과 위상 배열이 가장 양호한 것으로 결론을 내린 바 있다. 이에 따라 EPRI는 2011년부터 현재까지 소켓 용접부의 결함 검출 및 결함 유형을 평가하기 위한 검사 기술을 개발 중에 있다.

2. 국내 기술 현황

국내 검사 기관에서 2010년에 원전 소구경 배관 소켓 용접부 초음파검사 장비 및 평가기준을 개발한 바 있으나 개발된 자동 검사 장치의 부착 및 접근성의 문제로 인하여 실제 현장 검사에 애로 사항이 초래되어 효과적인 검사를 수행하지 못하고 있는 상태이다. 또한 재래식 초음파 검사 기법을 적용하여 검사를 하고 있으나 결함 특성 분석이 효과적이지 않고, 결함 검출 능력이 낮은 실정이다.

이에 따라 직경이 작고 접근이 제한된 소구경 배관 소켓 용접부 검사에 적합한 위상 배열 초음파 검사 기법을 적용한 검사 기술 개발이 필요한 실정이므로 한수원 중앙연구원에서는 검사 기술 개발을 위한 연구과제를 착수('12.7월)하여 금년 5월에 개발을 완료한 후 현장 시험 적용을 성공적으로 완료하였다.

기술 개발 내용

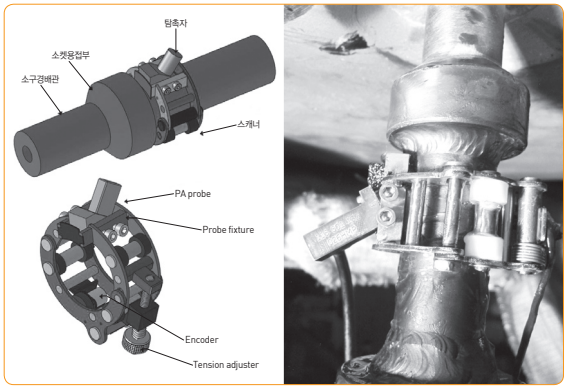
소구경 배관의 소켓 용접부 검사 기술의 신뢰성 향상을 위하여 최신 검사 기술인 위상 배열 초음파 검사 (Phased-array ultrasonic testing) 기술을 적용하여 소구경 배관 소켓 용접부 검사를 위한 신호 평가 기술, 특수 검사 장비 및 검사절차서를 개발하였다.

소구경 배관의 소켓 용접부는 원전 가동중 검사 요건인 ASME Section XI에서 표면 검사를 수행하면 되나, 건전성 확보 방안에 따라 방사선 투과 검사 또는 초음파 검사와 같은 체적 검사를 추가적으로 수행하여야 한다.

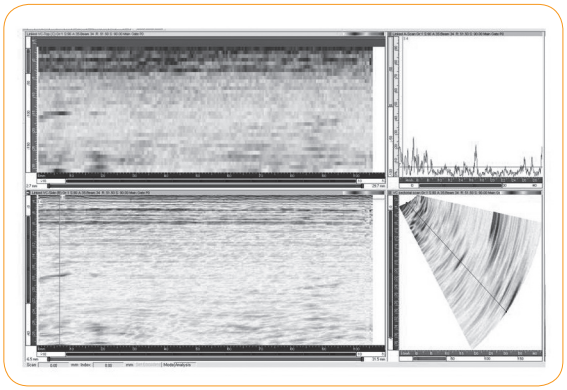
이에 따라 현재 수동 및 자동 초음파 검사를 혼용하여 검사를 수행하고 있으나, 검사 대상 부위의 접근성이 좋지 않고 대부분 소구경에 해당되어 검사 신뢰도가 낮게 된다. 또한 여러 검사 각도를 적용하여 검사할 경우 검사 시간 증가로 인해 검사자의 피폭 선량이 증가되고 있는 실정이다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 위상 배열 초음파 검사 기술을 적용하여 소구경 배관 소켓 용접부를 검사할 수 있는 첨단 비파괴 검사 기술을 개발하였다.

기존의 펄스-에코식 초음파 검사법은 시험체 내의 결함 검사를 위해 입사각(예 : 45°, 60°, 70° 등)이 다른 여러 개의 탐촉자를 사용하는 반면에, 위상 배열 초음파 검사 기술은 한 개 탐촉자에 초음파가 발생하는 여



〈그림 2〉 소켓 용접부 검사 자동 스캐너



〈그림 3〉 위상 배열 초음파 검사 신호 형태

러 개의 진동 소자를 배치하여 각각의 압전 소자에 펄스를 가하는 시간 지연을 조절함으로써 초음파빔의 입사각을 전자적으로 변경시키고 특정 깊이에 집속할 수 있는 최신의 비파괴 검사 기술이다(〈그림 1〉 참조).

소구경 배관 소켓 용접부 검사를 위한 기술 지원을 위해서 접근이 제한된 부위에 검사가 가능하도록 탐촉자의 크기를 최소화시키고 용접부를 스캔하여 데이터를 수집할 수 있는 초소형 특수 수동 스캐너(〈그림 2〉 참조)를 개발하였다.

이 수동 스캐너는 검사자가 소구경 배관에 스캐너를 부착하고 스캐너를 1회전하면 위치에 따른 초음파 검사 신호를 수집하여 평가함으로써 용접부의 결함 유무를 알 수 있게 된다.

인공 결함이 삽입된 시험편을 대상으로 실험한 결과, 기존의 검사 기법으로 검출이 불가능하였던 결함을 검출할 수 있었으며, 특히 여러 가지 굴절 각도에서 정보를 얻을 수 있어 검사 신뢰도 또한 향상된 것으로 나타났다.

16개의 압전 소자가 배열된 3.5MHz 위상 배열 초음파 탐촉자를 링형 스캐너에 체결하고 링 스캐너를 소구경 배관에 부착하여 1회전을 함으로써 검사가 완료되도록 검사를 단순화 하였으나, 취득된 초음파빔은 35도에서 80도까지 기준의 검사 기술보다 획기적으로 많은 정보를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 이미지로 신호 출력이 되므로 보다 정확한 검사 결과를 얻을 수 있다(〈그림 3〉 참조).

소켓 용접부 배관에 신기술을 적용하여 검사함으로써 검사 시간을 약 1/10로 줄여 검사자의 피폭 저감에도 기여할 수 있다. 지금까지는 한 개의 용접부를 검사하는 데 1시간 이상의 시간이 소요되어 검사자가 방사능에 노출이 된 상태에서 장시간 작업을 하여야 하였으나, 금번에 개발한 첨단 위상 배열 초음파 검사 기술은 1분 이내에 용접부 검사를 완료하여 결함 발생 여부를 평가할 수 있는 새로운 개념의 검사 기술이다. 이 기술을 적용함으로써 검사자가 일반적으로 받게 되는 방사능 선량이 획기적으로 감소될 수 있다.

또한 배관의 직경이 작아서 비파괴 센서를 부착하기 어려운 문제점을 해결함으로써 기존의 검사보다 더욱 정확하게 검사를 할 수 있으며, 약 1mm 미만의 균열도 검출이 가능한 것으로 확인되었다.

특히 검사 결과를 입체적으로 표현할 수 있는 3차원적 영상화 기술을 접목하여 검사자가 쉽게 검사 결과를 평가를 할 수 있도록 하였다.

개발된 검사 시스템의 성능을 확인하기 위하여 '13년 초에 현장 발전소를 대상으로 시험 적용 검사를 성공적으로 수행한 결과 검사 신뢰도 및 편이성이 확보된 것을 확인하였다.

향후 발전소 소구경 배관 소켓 용접부를 포함한 일반 용접부 비파괴검사에 본 기술을 적용함으로써 검사자 피폭 저감 및 검사 신뢰도 향상으로 원자력발전소 안전 운전에 크게 기여할 것으로 기대된다.