

2005 KEPIC-Week

이재훈, 이상훈, 김우성 | 한국기계연구원 공인시험평가부 원자력공인검사단

대한전기협회는 지난 8월 30일부터 9월 2일까지 부산 해운대 그랜드호텔에서 정부, 산업계, 학계, 연구계 등 전력산업계 관계자 등 800여명이 참석한 가운데 '2005 KEPIC-Week' 행사를 개최했습니다.

이날 발표된 논문주제 중에서 우수한 논문을 시리즈로 게재합니다.

〈편집자 주〉

“한국표준형 원전”으로 채택된 영광 3,4호기의 건설이 완료된 이후 동일한 후속호기가 계속 건설되었음에도 불구하고 품질과 납기에 영향을 주는 유사한 문제점들이 반복적으로 발생되어 오고 있으며, 이는 선행호기 원전의 건설에서 발생했던 사례가 체계적으로 Feedback되어 신규원전의 시공에 적용되지 못했기 때문이라고 판단된다.

따라서 앞으로 KEPIC 기술기준을 전면적으로 적용하여 건설되는 신고리, 신월성 원전에서는 원전건설에 참여하는 많은 인증업체들이 같은 실수를 반복하는 것을 예방하고자, 그간 한국기계연구원이 원자력공인검사 업무를 수행하면서 축적했던 경험을 토대로 선행호기의 안전성등급기기의 제작 및 설치 시 발생했던 주요 사례를 분석하고 대안을 제시함으로써 신규원전의 품질제고에 기여하고자 한다.

1. 서론

1990년대 초반 국내 “한국표준형 원전”으로 채택된 영광3,4호기의 건설이 완료된 이후 울진3,4호기 및 영광5,6호기, 울진5,6호기 까지 동일한 후속호기가 계속 건설되었음에도 불구하고 원전기기의 구조 건전성과 관련하여 품질과 납기에 영향을 주는 유사한 문제점들이 반복적으로 발생하였다.

이는 과거 고리1,2호기에서부터 원전의 건설에 참여한 경험 많은 전문 기술 인력이 현장에서 한 발짝 물러나는 시기적인 이유도 있으며, 우리나라가 독자적으로 원자력발전소를 건설하면서 미처 예상하지 못했던 설계 및 제작, 설치 각 분야 간의 공유영역을 해소하지 못한 구조적인 이유에서도 찾을 수 있을 것이다.

그러나 유사한 사례가 반복되었음에도 이를 방지



하지 못한 것은 선형호기 원전의 건설에서 발생했던 사례가 체계적으로 정리되고 Feedback 되어 신규 원전의 시공에 적용되지 못한 것도 하나의 주요한 원인인 것으로 판단된다.

따라서 앞으로 KEPIC 기술기준이 전면적으로 적용되는 것이 다를 뿐, 기존의 “한국표준형 원전”으로 동일하게 건설되는 신고리, 신월성 원전에 참여하는 발전사업자를 비롯한 많은 각 기관 등이 동일한 실수를 반복하는 것을 예방하고자, 그간 한국기계연구원이 원자력공인검사 업무를 수행하면서 축적했던 경험을 토대로 선형호기에서 발생했던 주요 사례를 나열하고 분석하였다.

또한 이를 바탕으로 향후 국내 원전 건설 시 발생할 미비점을 사전에 파악하고 대안을 준비함으로써 원전의 구조건전성 및 대국민 신뢰성 확보, KEPIC 활성화에 기여하고자 하며, 아울러 신규원전의 품질제고에 도움이 되고자 한다.

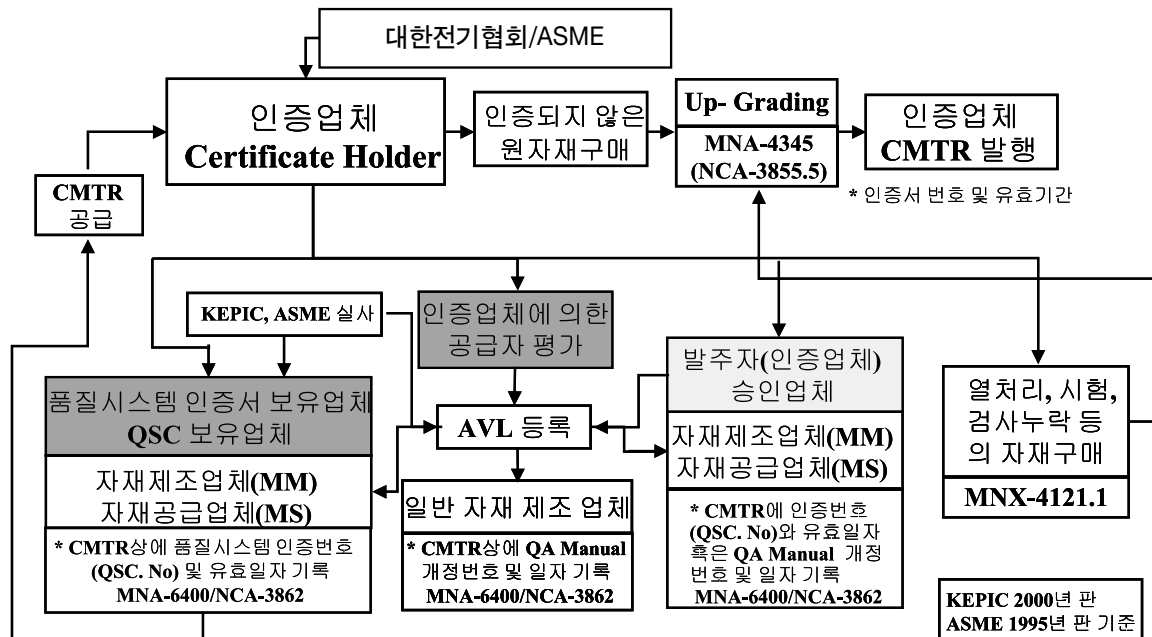
2. 선형호기의 주요 사례 및 분석

1) 해외 업체를 통해 구매되는 기기 및 재료

그림 1에 나타난 바와 같이 재료업체에 대한 자격 인정 요건을 살펴보면 재료업체는 대한전기협회(이하 협회)로부터 품질시스템 인증서를 취득하거나, 협회를 대신하여 협회의 품질시스템 인증서를 보유한 인증업체/재료업체로부터 평가받고 자격을 부여받는 것도 허용하고 있으며, 후자의 경우는 자신을 평가한 인증업체 혹은 재료업체에게만 재료를 공급할 수 있도록 되어 있다.

단, 용가재를 사용하여 제작되는 배관류는 보조품목으로 구분되어 있어 협회로부터 직접 자격인증을 받은 인증업체만이 제작하여 공급할 수 있도록 규정되어 있으나, 원전건설에 사용되는 용가재를 사용하여 제작되는 배관류 중 일부는 아직 국내에서 생산

1 |



되지 않는 재료가 있어 해외에서 수입해 사용하고 있으며, 이들 재료들에 대해서는 협회에서도 적용사례8)를 발행하여 해외 인증업체/재료업체를 활용할 수 있도록 제도적으로 완화시켜 놓고 있다.

한 예로 안전성등급 배관 일부계통에 사용되는 Welded Pipe(14" 이상)의 재료사양은 SA358 Cl.1으로, 이 재료는 철판을 성형 한 후 양면개선으로 가공하여 용접되는 특수 배관이다. 국내에서는 해당 품목(용가재를 사용하여 제작되는 배관류)에 대한 자격인증을 갖춘 업체가 있기는 하나, 배관 양면 중 내면으로의 용접이 불가하여 고가임에도 불구하고 해외의 NPT Certificate Holder로 발주되어 국내 원전에 사용되어 왔다.

선형호기 건설 당시 SA358 Cl.1 배관으로 제작된 일부 Spool의 원주방향 RT film 검토 중 길이 방향 내면 용접부에 결함이 발견되었다. 배관의 크기는 작으면서 양면개선의 형태를 취하고 있으므로 배관 용접부 내면에 대한 수정이 불가능하였고, 결국 폐기 조치된 사례가 발생하였다. 이는 원전의 건설 중에 배관 Spool 부족으로 인해 건설공정에 차질이 발생할 수 있는 중요한 사안이었다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 배관의 설계변경 및 국내 인증업체의 확보를 병행 추진하는 대안을 제시하고자 한다.

먼저 설계변경의 방안으로는 문제가 되었던 배관 길이방향 용접부의 개선방법을 변경하는 것이다. 즉, SA358 Cl.1 배관과 같이 양면개선의 경우는 배관의 내부 용접부에 결함이 발생할 경우 수정이 불가능 하는 등 많은 문제점이 예상되므로, SA358 Cl.1 배관을 한면 개선인 SA358 Cl.3 배관으로 설계를 변경하는 것이다.

SA358 Cl.3 배관은 한면 개선 방식으로 제작되는 배관이므로 KEPIC 인증서를 가지고 있는 국내 인

증업체의 기술력으로도 얼마든지 제작이 가능할 뿐만 아니라, 제작비용도 외국의 NPT Certificate Holder로부터 공급받는 단가에 비해 낮출 수 있을 것이다. 또한 현장에서 배관 내부 용접부에 문제가 발생한다 하더라도 한면 개선형상이므로 손쉽게 보수가 가능하여 예상되는 문제점을 예방할 수 있으며, 건설공정 차질의 문제점도 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 신규원전에는 SA358 Cl.1 배관으로 설계되어 있는 계통 중 특별한 사상이 없다면 한면 개선으로 제작되는 SA358 Cl.3 재료사양으로의 변경에 대해 적극적인 검토가 필요할 것이라 생각된다.

만약 기술적인 문제로 인해 설계변경이 불가할 경우 배관 양면용접에 대한 기술력을 가진 국내 인증업체를 발굴하여, 앞으로 건설되는 원전에는 우리의 기술력으로 만든 배관이 설치되고, 비용절감이나 공정 단축에도 도움이 되기를 기대한다.

2) 용접재료의 시험편에 대한 용접후열처리 요건

기술기준에서 실제 기기의 용접부에 대한 기계적 특성을 확인하는 방법론은 실 제품의 파괴시험을 통한 직접 확인 방법이 아닌 간접적인 방법론을 채택하고 있다. 즉 생산에 사용될 용접재료에 대해서는

첫째, 해당 용접재료에 대해 기계적 시험을 할 때 제작자가 제시한 제조 중에 받을 용접후열처리 온도 및 시간을 시험편에 적용하여 파괴시험을 한 결과 합격된 용접봉만이 생산에 사용되고,

둘째, 제작자가 이 용접재료를 사용하여 기기를 제작하면서, 앞서 용접재료 시험편에 수행한 최종 용접후열처리 조건을 위배하지 않았을 때, 용접재료의 재료시험성적서상에 기록된 기계적 시험 결과가 실 제품 용접부의 기계적 특성을 대표 할 수 있음을 뜻한다.



이는 제작자가 기기를 제작할 때, 용접재료 구매 시방서에 제시하여 시험편에 수행한 용접후열처리 온도를 위배하여 실 제품에 용접후열처리를 수행한다면, 용접재료의 기계적 특성을 제작자가 직접 보증해야 한다는 의미이다.

영광 3,4호기 이전에 건설한 발전소들의 일부 계통들이 운전조건을 수용하지 못해 두께 감육(Erosion) 현상이 발생하였고, 잔여 설계수명기간동안 재료에 대한 건전성을 보증할 수 없어 해당 계통에 대해 대대적인 교체작업이 이루어졌다.

따라서 이러한 문제점을 근원적으로 해결하기 위해 영광 3,4호기부터 건설한 국내원전에는 이전에 사용하지 않았던 새로운 재료들을 사용하였으며, 그 대표적인 것이 2.25Cr-1Mo의 저합금강 재료로서 두께 감육 현상을 근본적으로 방지할 수 있었다.

그러나 설계자의 입장에서 채택된 이러한 재료들을 사용하여 해당 기기를 제작 및 설치해야 하는 인종업체들은 용접과 관련된 기술기준들을 면밀히 검토하여 준비를 해야 하나, 기술기준에 대한 이해부족 및 선행호기의 제작 및 시공경험만을 근거로 그대로 용접 작업을 준비함으로써, 아래와 같은 문제점이 야기되었다.

선행호기의 P-No. 1 재료와 P-No. 5 재료 용접 시공 시 사용된 용접봉은 E-7016 용접봉으로, 구매 시 시험편에 대한 용접후열처리온도를 $620\pm 14^\circ\text{C}$ 로 제시하여 합격된 용접봉을 사용하였다. 그러나 이를 P-No.1 재료와 P-No. 5 재료의 용접부에 사용하여 용접후열처리를 $720\pm 14^\circ\text{C}$ 로 수행한 결과, 앞서 설명한바와 같이 용접부에 대한 기계적 특성을 대표할 수가 없었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는

첫째, 인증업체가 E7016 용접봉의 구매서류를 작성할 때 P-No. 5 재료의 용접후열처리 요건을 감안하여 $720\pm 14^\circ\text{C}$ 로 시험편에 용접후열처리를 수행한

후 기계적 시험을 수행토록 요구해야 하며,

둘째, E7016 용접봉이 P-No. 1 재료에 사용되는 대표적인 용접봉으로 시험편에 대한 용접후열처리 온도가 $620\pm 14^\circ\text{C}$ 인 점을 감안한다면, 시험편에 대한 용접후열처리 온도가 서로 다른 동일사양의 용접봉과 혼용되어 불출되지 않도록 용접봉에 대한 철저한 관리가 요구된다.

3) 입계부식시험 관련(용접절차인정 및 재료)

Austenite계 스테인레스 강(이후 스테인레스 강) 및 용접부가 일정온도($450 \sim 850^\circ\text{C}$)에 장시간 노출이 되어 있을 경우 Cr₂₃C₆ 등의 탄화물이 결정립계에 석출될 가능성이 있고, 결정립계 근방에서 Cr이 결핍되어 내식성이 저하되어 응력부식균열(Stress Corrosion Crack)이 발생할 우려가 있다.

따라서 예비안전성분석보고서(이후, PSAR)에서는 용접절차인정(Procedure Qualification 이후, PQ) 시 입열량과 층간온도를 제한하고 있으며, PQ 시 적용 기술기준과는 별도로 Regulatory Guide의 요구사항에 따라 입계부식의 주요인자인 탄소함유량을 기준으로 IGC(Intergranular corrosion) 감수성 시험을 수행하도록 요구하고 있다.

그러나 Regulatory Guide에서는 비안정화 스테인레스 강 AISI Type 3XX (주로 304, 316) 소재가 원자로 냉각재 압력경계, 원자로 정지계통, 비상 노심냉각계통 및 원자로 내부 구조물에 사용될 때, PQ 시 IGC 감수성 시험을 ASTM A262 Practice A 및 E에 따라 하도록 제한하여 요구하고 있다.

또한 PSAR에서도 이들 계통 중 일부 계통에 대해서만 이러한 시험을 요구하고 있으나, 선행호기의 건설시 작성된 설계시방서에는 계통의 구분 없이 일괄적으로 탄소 함유량이 0.03%를 초과하는 스테인

레스 강의 용접을 수행할 경우 PQ 시 IGC 감수성 시험을 요구하고 있다.

따라서 규제 요건 및 PSAR에 비해 과도하게 적용되고 있는 설계시방서의 내용은 원래의 기술적인 사항을 만족하는 범위에서 조정될 필요가 있으며, 범위 조정 시 시공은 물론 제작, 가동중원전의 보수 및 교체에도 적용되므로 기술적, 경제적 파급효과가 큰 사항이 될 것으로 판단된다.

다른 한 가지는 최대 탄소함유량에 관한 사항이다. 탄소함유량은 예상되는 모재의 최대 탄소함유량을 기준으로 열영향부에 대해 PQ 시험을 수행해야 하고, 시험된 탄소함유량 이하의 모재만 인정된다. 따라서 용접 전에 모재의 탄소함유량을 재료시험성적서(이후 CMTR)에서 확인한 후 PQ에서 입증된 탄소함유량 이하인지 확인하는 절차를 마친 다음, 용접을 시작해야 하는 번거로움이 있다.

앞서 언급한 바와 같이 원전에 사용되는 모든 스테인레스 강 재료의 Fit-up 공정에서 탄소함유량 확인을 위해 현장에서 CMTR을 매번 확인하는 것은 매우 어려운 작업이며 시간도 상당히 소요되고 있는 실정이다.

이러한 예로 선형호기 건설당시 배관의 CMTR을 확인한 결과 탄소함유량이 PQ에서 입증한 최대탄소함유량을 초과하였고, 결국 이미 설치된 모든 배관의 탄소함유량을 조사하게 되어 많은 시간과 인력을 소모한 사례가 있었다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로는 선형호기의 자료를 근거로 원전 건설시 투입된 스테인레스 강 기기 및 배관의 최대 탄소함유량을 조사하여, 신규원전에 투입되는 모든 스테인레스 강의 최대 탄소함유량을 제한하고, 설계시방서에 정확하게 명시하는 것이다.

이후 설계시방서에서 규정한 최대 탄소함유량을

기준으로 PQ 시 IGC 감수성 시험을 수행하면, 그 이하의 재료들은 모두 인정이 되므로 현장에서 CMTR을 매번 확인할 필요가 없어지게 된다. 또한 여러 번 PQ를 수행할 필요도 없어지므로 불필요한 시간 및 인력, 비용의 낭비를 줄일 수 있을 것이라 생각된다.

4) 원자로 Lateral Support 성형요건

원자로 Lateral Support는 성형 시 설계시방서에서 충격시험이 요구되고 기술기준의 면제요건에 해당하지 않는다면, 성형으로 인한 충격값이 합격기준 미만으로 떨어지지 않았음을 입증하여야 한다. 이를 위해 지지물 재료에 요구되는 것과 동일한 시방, 등급, 열처리를 한 시편을 사용하여 지지물의 재료와 동등한 성형 또는 굽힘 공정 및 열처리를 하여야 하며, 변형 후 충격특성요건의 만족여부를 확인하기 위해 해당 시험을 수행하여야 한다고 규정하고 있다.

철판 등의 원재료를 구매하여 안전성등급 기기 및 지지대를 제작하는 과정에서 성형이나 굽힘 등의 공정으로 인해 원재료가 가지고 있는 기계적 성질에 변화가 생기며, 특히 파괴인성 값이 현저히 떨어지게 된다.

따라서 인증업체는 충격시험이 요구되는 재료(일반적으로 공칭두께가 16mm를 초과하는 탄소강)에 대해서는 성형 공정을 통해 저하된 파괴인성 값이 기술기준을 만족하는지의 여부를 확인하기 위해 성형절차 인정시험 또는 성형 후 생산 제품에 대해 충격시험을 수행하여야 한다.

그러나 성형절차 인정시험 방법은 그 자체가 상당히 복잡하고 힘든 방법이고, 성형 후 생산 제품에 대한 충격시험 방법도 파괴인성 값이 요구조건을 만족하지 못할 경우 인증업체가 재료를 다시 구매해야 하는 부담이 있어, 두 방법 모두 거의 채택하지 않고 있는 실정이다.



일반적으로 선택하는 입증 방법은 인증업체가 수행할 성형 조건을 구매시방서를 통해 재료업체에게 알려주고, 재료업체가 그 성형조건을 재료에 가한 후 충격시험을 수행하여 합격된 재료를 제작에 투입하는 방법이다.

그러나 기술기준에 대한 이해부족으로 선형호기 건설 시 원자로 Upper Lateral Support에 사용된 재료는 구매시방서에 성형으로 인한 파괴인성 값 저하를 확인하는 방법을 명시하지 않았다. 이로 인해 시험편에 열간성형을 대표하는 열처리를 하지 않고 충격시험을 수행하여, 성형 후 재료에 대한 건전성 확인이 안 된 사례가 있었다.

이 경우 다행히 동일 Heat No.의 잔재가 존재하여 실 제품에 수행된 성형조건을 시험편에 적용하여 충격시험을 수행하고 합격기준을 만족하여 CMTR을 재발행하는 것으로 마무리 되었으나, 만일 남은 잔재가 없었으면 많은 어려움이 있었을 것이다.

결론적으로 성형으로 인해 파괴인성 값 저하가 우려되는 재료에 대해, 성형 후 파괴인성 값이 합격기준 미만으로 떨어지지 않는 다는 것을 재료업체를 통해 확인할 수 있도록 구매시방서에 반영한다면, 인증업체가 제작 중에 가지는 위험을 사전에 예방할 수 있을 것이다.

5) 저장탱크의 수압시험 요건

저장탱크는 설계압력의 1/2에 도달하도록 서서히 가압을 해야 하고, 이후 수압시험압력인 설계압력의 1.25배에 도달 할 때까지 예정된 시험압력의 1/4 이나 2psig 중 작은 값만큼씩 가압하여야 한다. 이때 시험에 사용되는 게이지는 기록계이지를 사용하도록 요구하고 있다. 이 요건은 저장탱크의 설계압력(약 15 Psig이하)이 일반 압력용기와 비교하여 상당히 낮

으므로, 급속히 가압할 경우 탱크의 파손은 물론 시험원 및 주위 인원의 인명피해 우려가 있어 가압절차를 상당히 엄격하게 규정한 것으로 생각된다.

그러나 선형호기 건설 시 저장탱크의 수압시험에 일반게이지를 사용함으로써, 저장탱크에 압력이 축적되지 않도록 서서히 가압되는 조절 기능이 힘들어 압력시험이 지연되는 등 공정에 많은 영향을 주었다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 신규원전 저장탱크의 압력시험 시에는 가압 조절을 원활히 할 수 있도록 반드시 기록계이지(Recording Gauge)를 사전에 구매하여 사용할 것을 제안한다. 기록계이지를 사용함으로써 저장탱크의 안전성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 파손의 우려 또한 줄일 수 있어 공정지연 및 인명피해를 사전에 예방할 수 있을 것이라 생각한다.

3. 결론

앞으로 건설될 원전인 신고리1,2호기 및 신월성 1,2호기는 표면적으로 현재까지 우리가 경험한 “한국표준형 원전”을 그대로 답습하면 문제가 없을 것으로 생각할 수도 있다. 그러나 내용면에서는 KEPIC 기술기준의 전면 적용 및 신규 인증업체의 대거 참여, 울진5,6호기 이후의 공백으로 인한 전문 기술 인력의 이동 등 품질 면에서 새로운 변수로 고려해야 할 사항이 많을 것으로 판단된다.

그 동안 많은 우여곡절 끝에 사전준비 단계를 거쳐 이제 신규원전 건설이 본격화 될 것이다. 따라서 이 지면을 통해 발표된 내용이 신규원전의 품질제고에 미약하나마 도움이 되길 바라며, 향후에도 기술 기준의 정확한 이해를 돕기 위한 지속적인 교육훈련과 선형호기의 유사 사례에 대해 면밀한 검토가 이루어지길 기대한다.