

무선 레이저 센서를 이용한 원전격납건물의 건전성 평가기법 개발

강경구, (주)에이티맥스 대표이사
김호진, (주)에이티맥스 기술연구소 차장



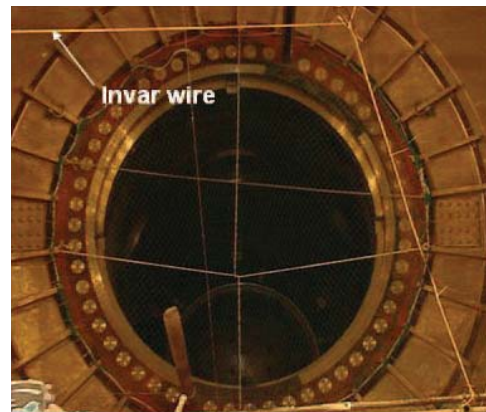
1. 기술개발 배경

원전격납건물은 냉각재 손실사고 시 내부온도와 압력이 급격하게 상승하더라도 최종 방사능 차폐역할을 담당할 수 있도록 설계 및 시공되고 있다.

일반적으로 원전 격납건물의 구조 건전성 평가는 발전소 가동전 설계압력의 1.15배로 내부를 가압하면서 변형거동 계측하여 실험하는 SIT (Structural Integrity Test)를 통해 구조물의 건전성 입증하고 있다. 이 규정은 여러 국가 별로 자국의 규정을 가지고 있지만, 우리나라를 포함한 대부분의 국가가 주요 부분을 미국의 ASME Code(ASME SECiii DIV2 CC6000)를 준하여 정기적으로 내압시험을 실시함으로써 원전 격납건물의 구조 안정성 및 건전성을 평가하고 있다.

그러나, SIT 시험을 수행함에 있어 기존 Invar wire type 전자식 게이지에 의한 원통형 내벽의 변형측정 방법은 wire의 자중 처짐에 의해 정확한 체적의 변화를 측정하기 곤란하며 미소 변형의 측정에 센서자체의 정확도도 낮을 뿐더러 격납 건물 내 전기설비에 의한 전자기적 노이즈의 영향을 완전히 배제하기 어렵기 때문에 기존의 계측기법으로는 정확한 변형량을 측정하는데 어려움이 많다.

한편, 레이저 변위센서는 레이저 처짐계, 3차원 광과기 등의 핵심기술로서 이미 높은 수준의 정확도와 안정성을 검증 받은 장거리에서 비접촉식으로 변위를 측정할 수 있는 효과적인 기술이다. 따라서, 원전 격납건물의 건전성 평가시험을



[그림 1] 기존 원전격납계측센서 예

수행함에 있어 레이저 센서 및 이 기술을 적용·실용화 할 수 있는 무선통신기술개발을 통하여 레이저센서를 원격제어 하여 중앙에서 데이터의 수집 및 센서의 제어, 신호의 수집과 분석을 통합하여 수행할 수 있는 차세대 원전용 지능감시 센서와 장기모니터링 무선계측시스템을 구축하였다.

2. 레이저 센서 특징

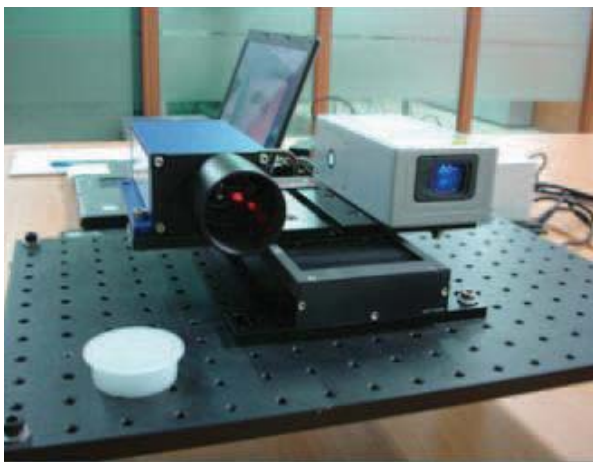
원전 격납건물의 SIT에 적용되는 레이저 센서는 해당 규정의 정확도를 만족하고, 가압환경 내에서 제성능을 발휘할 수 있어야 한다. 국내에서 따르고 있는 미국 ASME의 규정에 따르면, SIT 시험시 변위계측 정확도는 예상되는 최대 변위 발생 지점 변위의 $\pm 5\%$ 와 0.01 in.(0.25mm) 중 큰 값 이내여야 한다.

차세대 원전(APR1400) 격납건물은 기존 한국형표준 원전과는 다른 구조특성을 가지고 있을 것으로 예상되지만, 비슷한 설계기준과 안전율을 가지고 설계를 수행하였다고 가정하여 SIT 수행 시에 기존 한국형표준 원전과 비슷한 구조 거동을 보인다고 가정하고 레이저 센서의 성능을 검토하였다.

레이저센서의 요구성능을 검토를 위해 기존 올진 5호기의 SIT 자료를 참고하였으며, 이를 근거로 할 때 센서의 정확도가 1.041mm 이내가 되면 계측기의 정확도 규정을 만족하는 것으로 판단할 수 있다. 따라서, 개발된 평가기법에 적용되는 레이저 센서는 요구되는 정확도 성능을 만족하도록 하였다.

(1) 정확도(Accuracy) 시험

실제 적용하려는 차세대 원전에서의 장거리 측정에 거리는 47.9m이 최대 거리이므로 이 때, 레이저 거리측정 모듈의 정확도를 측정하기 위하여 두 개의 모듈을 선정하여 동일한 조건에서 정확도 시험을 실시하였다.



[그림 2] 레이저 센서의 정확도 시험

[표 1] 레이저 센서의 정확도 시험결과

센서 모듈	측정 거리(m)	정확도(mm)
D사 (스위스)	10.0	0.362
	47.0	0.490
L사 (덴마크)	10.0	0.081
	47.0	0.290

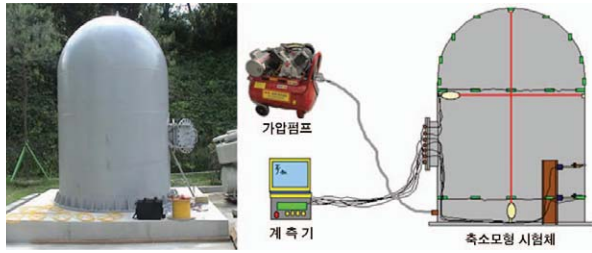
정확도 시험은 (그림 2)와 같이 동일한 측정 거리에 레이저 센서를 설치하고, 150mm 정밀 스테이지를 이용하여 5mm씩 20단계(총 100mm)로 센서 위치를 이동하면서 계측하였다. 각 단계에서 계측된 결과로부터 정확도의 평균 값을 모듈의 정확도로 표시하면 (표 1)와 같다. (표 1)에서와 같이 레이저거리측정 모듈의 정확도 시험 결과 ASME Code에서 요구하는 변위측정 장비의 정확도(최대 변위 발생 지점 변위의 $\pm 5\%$ 와 0.01in. 중 큰 값 이내)를 만족하는 결과를 확인하였다.



[그림 3] 가압환경시험

(2) 가압환경시험

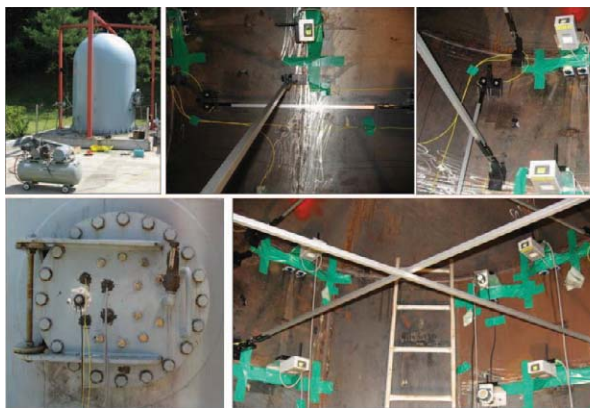
SIT에 적용되는 레이저 센서는 원전격납건물 내부의 가압환경에 노출되므로, 가압환경에서 센서의 손상없이 제성능을 발휘할 수 있어야 한다. 따라서, (그림 3)과 같이 가압 시험장비를 통해 가압환경에서 적용된 레이저 거리측정 모듈의 성능을 검토하였으며, 가압시험 결과 레이저 거리측정 모듈은 실제 시험시 압력인 69psig 보다 높은 압력환경에서의 작동을 원활하여 내구성을 확보하는 것으로 확인되었다.



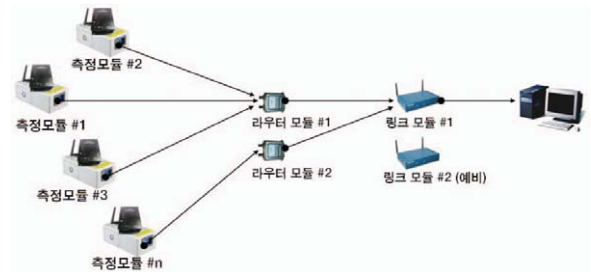
[그림 4] 축소모형 시험



[그림 6] 센서 및 무선모듈 측정 시스템



[그림 5] 축소모형 시험 현장 및 센서설치 전경



[그림 7] 무선 레이저 센서 시스템의 구성도

3. 축소모형 원전 격납건물의 건전성 평가

앞서 성능평가 된 레이저 센서를 실제 구조물에 적용하기 위해서는 기본적인 정확도 등의 성능검증이외에도 부착 장치의 설계, 부착방법의 고안 및 통신방법의 제안이 필요하다. 따라서, 실구조물에 적용하기에 앞서 이상의 고려항목을 반영하여 무선 레이저 센서에 의한 원격 변위계측시스템을 구성하였다. 이를 평가하기 위해서 (그림 4)와 같이 한전전력연구원내에 제작된 1/20축소모형부재에서 개발된 시스템의 검증시험을 수행하였다.

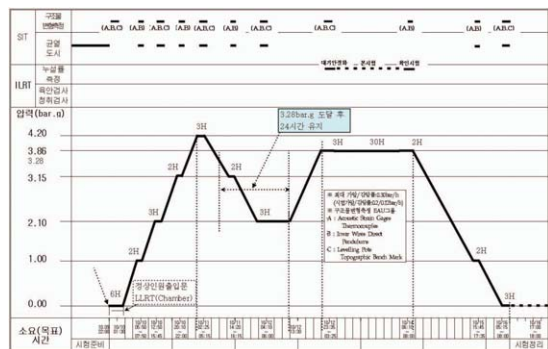
축소모형부재에는 원통형 단면의 수직 수평방향으로 각각 2개의 레이저센서를 별도로 제작된 마그네틱 브라켓을 이용하여 부착하였으며, 가압 단계에 따른 변위를 측정하여 외부의 계측기에서 측정, 기록하도록 하였다. 축소모형 시험 현장 및 센서가 설치된 전경은 (그림 5)와 같다.

(1) 무선레이저 센서의 구성

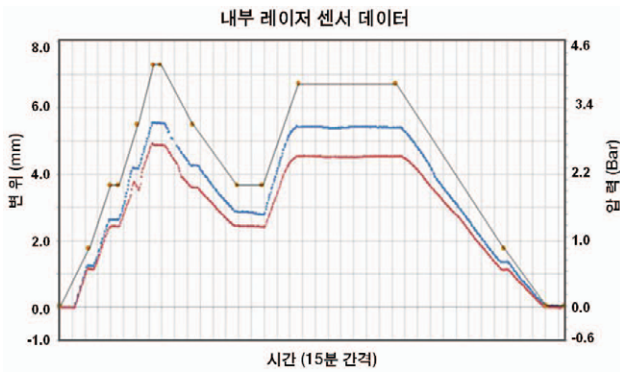
원전 격납건물의 내부에는 많은 설비가 이미 설치되어 있어 레이저 센서를 배치하기 위한 추가배선은 어려움이

있다. 또한 측정점도 다수이며 각각이 상당히 이격되어 있어 계측기의 배치도 곤란하다. 따라서, (그림 6)과 같이 근거리 통신에 널리 쓰이고 있는 2.4GHz의 Zigbee통신을 이용하여 무선계측시스템을 구성하였다.

적용된 Zigbee통신모듈은 장애물이 없는 경우 60m까지 송수신이 가능하나 장애물이 있는 경우 수신 성능을 높이기 위해 (그림 7)과 같이 중계역할을 하는 라우터를 추가로 설치하여 통신성능을 확보하였다.



[그림 8] 현장 축소모형 시험 진행절차



[그림 9] 레이저 센서를 통해 취득한 축소모형 시험 데이터

(2) 무선레이저 센서의 측정결과

현장 축소모형 시험 진행절차는 (그림 8)과 같고, 측정된 무선레이저 센서의 각 가압단계별 응답은 아래의 (그림 9)와 같다. 측정결과에 의하면 레이저 센서에서 측정된 변위의 패턴은 각 가압 및 감압에 따른 가압에 따른 구조물의 팽창과 수축을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다.

또한, 압력 데이터와 비교 분석한 결과, 가압 및 유지, 감압 등의 단계가 압력데이터와 유사한 경향을 나타내고 있으며 무선계측의 성능 및 가압환경에서의 안정적인 계측이 가능하여 실제 원전구조물에서도 유용할 것으로 판단된다.

4. 결론 및 기대효과

차세대 원전 격납구조(APR1400)의 개선된 구조건전성 평가(SIT) 기술을 개발하기 위하여 기존의 SIT에서 이용하던 측정 방법을 개선하여 차세대 원전 격납건물에 맞는 무선 레이저 변위계측시스템을 구성하였다.

본 기술을 적용함으로써 SIT 수행 시 계측센서 설치기간 단축 및 인력 축소에 따른 경제성 확보 가능할 것으로 판단되며, 원자력 격납건물의 SIT에 소요되는 비용도 약 30% 이상 절감되고, 정확도의 향상과 계측 인력의 감소효과로 본다면 그 이상의 경제적인 효과가 예상된다.

또한, 개발된 레이저센서를 활용한 차세대 원전의 건전성 평가기법을 통해 SIT수행 시 격납 건물의 계측시스템 구축 기술 확립하고, 격납건물 구조건전성 시험 및 상태감시기법의 체계화 및 선진화를 도모할 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 향후 IT산업이 원자력 발전소 구조분야에 진출할 수 있는 적용기반을 구축하는 기술로도 활용될 수 있을 것으로 판단된다.