P-36

폴리에틸렌 소재의 플랜트 소방배관 설계측면 고찰

김응수
서울시립대학교

국내 원자력플랜트의 용수공급계통 및 화재방호계통 배관설계는 주로 주철소재를 사용하여 왔으나 지중매설구간의 주철배관은 매설 후 운영시간이 장시간 지속됨에 따라 부식에 의한 계통수 누설 문제가 발생해 왔다. 이에 대한 대안으로 폴리에틸렌 소재가 화재방호계통 매설배관에도 적용되고 있는 추세이며 최근 내열성이 향상된 HDPE 배관의 수요가 확대되고 있다. 그러나 국내 원자력플랜트의 경우 Close Loop 배관배치, 설계압력의 1.1배(또는 최고사용압력 + 50psig)에서의 수압시험 수행, 고압 운전 대기상태 및 기동초기 배관 내 수충격 유발 가능성 등 수도용 HDPE와 운전환경과 차이가 있으므로 이에 대비한 별도의 설계기준 정립이 필요하다고 판단된다. 따라서 손상된 HDPE 배관의 물리적물성치 분석, HDPE 배관 과압파단 실증시험, 원자력플랜트 수압시험 규정 분석 등을 통해 폴리에틸렌 배관의 원자력플랜트 화재방호계통 설계 적용시 사용측면에서 설계기준 및 고려사항에 대해서 고찰하고자 한다.

RCP(Rapid Crack Propagation)는 가압된 배관계를 따라 낮은 연성균열이 고속(약 300㎧)으로 발생하는 것으로 보통 균열의 성장과 정지는 배관 내부압력 또는 감압률에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 폴리에틸렌 수도배관의 경우, 고압, 저온에서 대구경배관의 에어 포켓위치에서 발생할 수 있고, 일반적으로 관경/관벽 두께가 증가함에 따라 RCP 발생 가능성이 증가한다. 또한 HDPE 배관 내에서 RCP는 배관 내 Air 잔존량에 따라 배관 운전압력보다 낮은 압력에서도 배관 손상이 발생할 수 있는 것으로 시험결과 확인되었다.

계통 내 과압 지속상태에서 금속배관 대비 비금속배관인 HDPE 배관의 물리적인 변형/파손형태 분석을 위한 PE100(SDR11) 배관 압력시험을 수행한 결과, HDPE 배관은 최고사용압력 이상으로 가압될 경우 배관의 부분적인 소성변형을 발생시킬 수 있는 것으로 확인되었으며, 파괴시 배관 상부에서 부풀음이 발생하고 부풀음 부위 중앙에서 반경방향으로 파괴가 급속히 진행하는 것으로 확인되었다. 따라서 HDPE 배관을 플랜트의 소방용 매설배관으로 사용할 경우 수압시험 후 배관의 물리적 변형 및 기계적물성치 약화를 초래할 수 있으므로, 수압시험에 의한 물리적인 변형 가능성이 HDPE 배관 설계에 적절히 고려되어야 한다.

Figure 1. Rupture shape of HDPE at static Pressure.

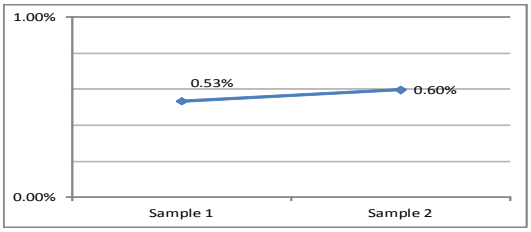

Figure 2. Increase rate of pipe diameter before/after verification test.

원자력플랜트의 배관 두께 설계는 아래 공식을 적용하여 최소두께 및 설계두께를 계산하여 적용하고 있다. 최고운전압력 이상에서 수행된 수압시험 후 HDPE 배관의 물리적변형을 최소화하기 위한 배관의 적정두께 결정시 수압시험에 의한 소성변형 영향을 C 값에 반영시켜 계산되어야 한다.

$$T_{\min} = \frac{P_D D}{2S + P_D} \qquad T_{design} = T_{\min} + C$$

지상의 소방용수원을 지하의 매설배관 내 충수시 대기압 상태에서는 매설배관 내 배기설계가 반영되어 있지 않아 완전한 충수상태를 유지할 수 없다. 대기압 상태에서의 불충분한 충수는 펌프 기동초기 급격한 유량이동 및 일시적인 수압의 급상승으로 인해 충격파가 발생하여 배관의 균열 손상을 발생시킬 수 있다. 따라서 HDPE 배관의 소방용 매설배관으로 사용시 구간 배기장치 설계 요건 및 배관 내 잔존 Air에 의한 영향을 최소화 할 수 있는 충수 및 배기설비가 반영되어야 한다.

손상이 발생한 플랜트 소방용 매설배관(HDPE)의 시편의 물성치를 분석한 결과, 용융흐름질량율과 파단점신장율이 KS 허용기준을 초과하였으며 손상배관은 HDPE 배관의 연성특성이 미흡하여 배관 내부 충격에 쉽게 균열이 발생하고 성장하여 누설결함이 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 시편을 절단한 결과, 파단면 육안검사에서 초기 균열현상이 확인되었고, 균열단면의 SEM 분석결과, 배관 내부충격으로 축방향 관통균열이 단기간에 발생/성장한 것으로 확인되었다.

소방용 HDPE 배관은 『소방용 합성수지배관의 성능인증 및 제품 검사의 기술기준』의 최고사용압력(1.5MPa) 또는 최고사용압력 이상의 수압력 시험을 통과해야 하나, 최고사용압력 이상의 압력에서 사용하는 것은 제품 사용보증시간과의 반비례관계가 있다. 플랜트 소방용 배관은 설치 후 NFPA 24 및 AWWA M55 규정에 따라 최고운전압력 보다 높은 압력에서 수압시험이 반복적으로 수행될 수 있고 이러한 환경에 노출된 비금속성인 HDPE 배관은 잠재적으로 물리적 성능이 약화될 수 있다. 또한 매설배관의 불충분한 충수 시, 배관 내 Air Pocket으로 인한 충격파 및 배관 균열 손상을 초래할 수 있다. 따라서 플랜트 소방용 HDPE 계통설계 시 수압시험조건을 고려하여 PE 배관이 적절하게 선택되어져야 하며, 계통 수격영향 최소화를 위한 계통 보호설계의 적정성이 검토되어야 한다.

4. 결론

국내 수도용 폴리에틸렌 소재 배관의 기계적/물리적물성치 적용규정인 『KS-D-3408 1 & 2』와 원자력플랜트 소방용 배관 사용을 위한 『소방용 합성수지배관의 성능인증 및 제품 검사의 기술기준』에서 정적 압력에 대한 기술기준을 제시하고 있으나, Air 잔존으로 유발되는 충격파를 대비한 상세 기술기준이 제시되지 않아 계통 설계시 충격파로 인한 배관 손상가능성이 고려되지 않고 있다. 따라서 비금속 재료인 폴리에틸렌 HDPE 배관의 원자력플랜트의 계통 배관 배치설계, 시공조건 및 운영조건을 필수적으로 고려하여 최고사용압력 이상에서 수행되는 수압시험에 따른 보수적인 배관규격(두께 등) 적용기준, 배관 내 Air 잔존을 고려한 수격현상 파급영향 최소화를 위한 보호장치 설계기준, Air 잔존을 최소화하기 위한 배기설계, 배관 배치(Lay-out 및 Level)설계의 안전성을 확보하기 위한 『폴리에틸렌 소재 배관의 원자력플랜트 화재방호계통 매설배관 배치설계기준에 대한 재정립』이 필요하다.