

Snubber減少로 因한 利得

— LaSalle原電의 配管緩衝器(Snubber) 除去事例 —

이제까지 많은 原電을 운전해 오는 과정에서 배관완충기(Snubber)의 보수, 시험에 많은 費用이 소요되어 왔다. 그러나 최근 美國의 LaSalle原電은 配管系統에 영향을 주지 않고 기존 완충기들의 80%를 제거했다.

LaSalle原電은 일리노이주 북부에 위치하고 있는 1,130MWe BWR로서 운영자는 Commonwealth Edison社이다. 1호기는 1982년6월에, 2호기는 1984년3월에 각각 初臨界에 도달했는데 비슷한 시기에 건설된 다른 원전들과 마찬가지로 동 원전은 1970년대에 운전되던 원전들 보다 훨씬 많은 완충기를 지니고 있었다. 즉, 설계 당시에 設計要件의 보수성으로 인하여 1호기는 약 1,190개, 2호기는 약 1,140개의 안전성관련 완충기를 지니고 있었으며, 이들은 모두 機械式이었다.

기계식 완충기를 사용한 결과 작동의 신뢰성을 유지하기 위해서는 주기적인 보수와 시험을 필요로 함이 밝혀졌다. 즉, 설치 당시의 여건, 운전중 주변환경의 조건, 배관진동 등에 의해 예상 보다 많은 보수를 초래하게 된 것이었다. 또한 완충기의 信賴性を 보장하기 위해서 NRC는 모든 原電의 技術指針書(Technical Specification)에 완충기의 육안검사 및 기능시험요건을 명시할 것을 요구하고 있다.

완충기의 보수, 시험에는 소요 인력이 적지 않을 뿐 아니라 종사자의 방사선피폭도 증가한

다. 더구나 각 핵연료재장전 기간마다 모든 완충기의 기능시험을 수행할 경우도 발생한다.

그러나 이제까지 적용된 보수적인 設計要件들이 안전성 증진에 기여하지 못함이 명백해짐에 따라 NRC는 최근의 배관시험결과를 검토한 후 원자력계통 배관의 설계요건을 再檢討중이다. 이에 따라 LaSalle와 몇몇 원전들은 ASME 코드의 케이스 N-411의 적용을 허락받았다. ASME코드의 케이스 N-411은 배관계통의 動的解析을 보다 현실화하기 위해 壓力容器研究會(PVRC)가 권고한 배관감쇄계수를 반영하고 있는데, N-411을 적용하고 최신 전산해석기법을 활용한 결과 LaSalle원전은 완충기의 80%를 제거할 수 있었다.

1. 運轉經驗

완충기의 신뢰성 확보를 위해서는 더욱 많은 보수, 검사가 요구된다는 주장이 커짐에 따라 NRC는 안전성관련 완충기의 육안검사 및 기능시험을 포함하여 엄격한 요건을 부과했다.

ASME 제11장 및 發電所技術指針書에 주어

진 육안검사기준에 미달한 완충기에 대해서는 검사빈도를 늘려야하며, 이 경우 매월 검사가 필요할 수도 있다. 기능시험을 위해서는 매 핵연료재장전 기간마다(즉, 18개월 마다) Activation Level과 Breakaway / Drag Force를 측정해야만 한다.

LaSalle의 配管系統을 해석하여 배관에 심각한 손상을 입히지 않는 완충기의 최대 Activation Level과 Breakaway / Drag Force를 계산하였다. 이 결과들과 완충기 제작자의 권고를 반영하여 완충기 기능시험 수락기준을 제정했다. Commonwealth Edison사는 완충기의 수가 많은 LaSalle원전의 완충기 個數를 줄이면 현저한 이득을 볼 수 있다고 판단하였으며, 동 원전의 기능시험 개시때 완충기 제거를 위한 파일로트프로그램을 이미 완료하고 있었다.

파일로트프로그램의 목적은 NUREG-601의 완충기 제거를 위한 새로운 배관해석기법의 적용 타당성을 조사하는데 있었는데, 이 기법은 동 원전설계 초기에는 개발되어 있지 않았었다.

2. 費用/利得分析

파일로트프로그램과 아울러서 기존 체제의 유지, 유압식 완충기로의 교체, 배관해석에 의한 완충기 제거 등의 대안을 놓고 비용/이득 분석을 수행하였다. 이 분석결과 발전소 운전정지시간이 완충기에 의해 크게 좌우됨이 명백해졌다. 이는 완충기 기능시험을 위해 1,200개의 완충기를 제거하여 시험한 후 재설치하는데 따른 많은 인력에 기인한다. 또한 앞으로의 완충기 파손률을 예측함에 불확실성이 개재되므로 핵연료재장전 계획수립에 지장이 있는 것으로 밝혀졌다.

1,200개의 완충기를 시험하는 작업 때문에 결과적으로 핵연료재장전 운전정지시간이 연장되는 것으로 평가되었다.

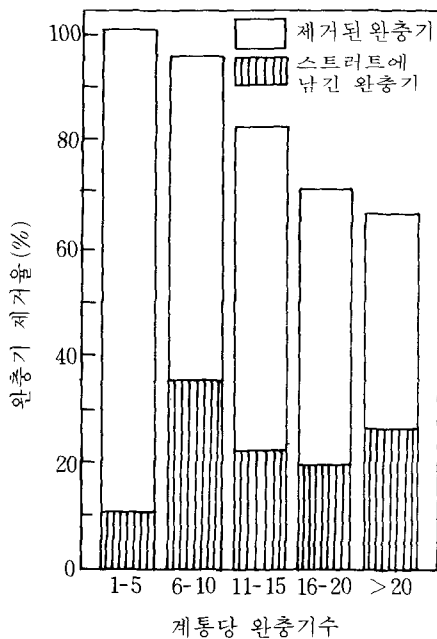
3. 主要目標

완충기를 제거하기 위한 엔지니어링작업에 앞서 주요 목표가 설정되었다.

○배관계통의 설계가 설계기준요건에 합당하도록 유의한다. 원래의 배관계통설계와 완충기 제거후의 배관계통설계에 있어서의 차이점은 ASME N-411을 적용하고 ASME Code 1983년판을 필요에 따라 적용한다는 것이었다.

○완충기 제거의 우선 순위를 고려하여 완충기를 가능한한 최대로 제거한다. 해석에 앞서 각 완충기에는 네가지 등급의 우선 순위를 부여한다. 이 우선 순위에 의해 배관해석담당자는 계통의 완충기 제거작업을 수행한다. 제1순위 완충기는 접근이 곤란하고, 고방사선 구역에 위치하며 파손의 우려가 큰 것들이었다. 제4순위 완충기는 접근이 용이하며 파손의 우려가 적은 것이었다.

○各種 支持用 강재들의 설계변경을 최소화한다. 비용효과를 최대로 하기 위해서는 지지물의 설계변경을 최소화해야 함은 기본상식이



〈그림1〉 系統別 완충기 제거율

다. 극단적인 경우 만약에 아무런 제한없이 지지물의 위치변경, 제거, 추가가 가능하다면 완충기를 모두 제거할 수도 있을 것이다. 그러나 이는 비용면에서 비효과적이다. 또 다른 극단적인 경우, 모든 지지물에 대한 하중을 기존의 설계하중과 동일하게, 또는 그 이하로 유지시키기만 한다면 支持用 강재의 설계변경은 불필요하지만 이 경우 완충기 제거율이 매우 저하된다. LaSalle의 경우 높은 하중이 걸리는 지지물들의 설계변경을 하여 비용효과를 높일 수가 있었다.

또 다른 중요한 사항은 格納建物內的 배관에 수정을 가하는 작업이 운전정지시간을 좌우하지 않도록 유의해야 하는 것이며, 기술지침서상의 계통에 대한 작업은 정해진 기간내에 완료가 되어야만 한다는 것이다.

○ 증가된 노즐 하중의 영향을 최소화 한다. 기기 노즐에 걸리는 하중을 기존의 설계하중 이하로 유지시킴이 바람직하지만 우선 순위가 높은 완충기의 제거를 위해서는 기기 노즐을 높은 하중에 견딜 수 있도록 조치함이 합당하다. 벨브 및 기타 배관내 기기들의 경우 加速度가 허용치 이내로 유지되어야만 한다.

○ 계통으로의 영향을 최소화 한다. 대부분의 배관계통은 주배관과 몇개의 枝管으로 구성된

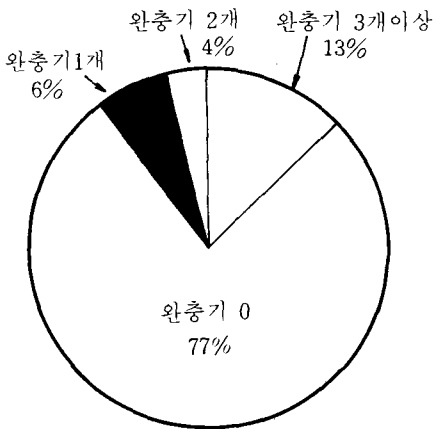
다. 대부분의 지관들은 주배관에 큰 영향을 주지 못하므로 해석에 있어서 주배관으로 부터 격리시킨다. 그러나 주배관상의 완충기의 제거로 인하여 지관의 변형을 증가시킬 수가 있으므로 이들에 과다한 응력이 가해지지 않도록 유의해야 한다.

○ 새로운 配管拘束器(Pipe Whip Restraints)의 설치를 피한다. 배관응력을 배관과단치 이하로 낮춤으로써 새로운 구축기의 설치를 막아야 한다.

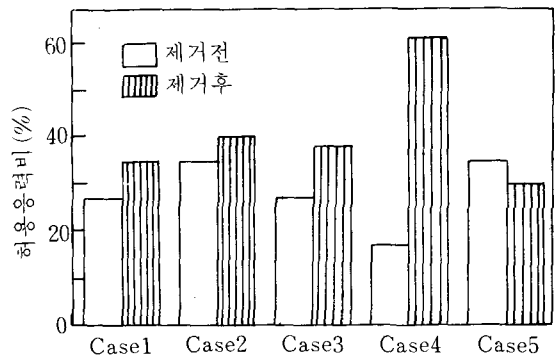
○ 動的干涉現象(Dynamic Interaction)을 최소화한다. 완충기를 제거할 경우 地震時 동적 배관변형이 증가할 수 있다. 따라서 배관이 인접 배관이나 구조물, 기기와 간섭을 일으킬 가능성을 고려해야 한다. 이는 엔지니어링에 있어서 반드시 고려되어야 하며, N-411도 이를 고려하고 있다.

○ 現場作業이 용이해야 한다. 완충기의 제거는 운전중인 발전소에 적용되며 건설중인 발전소를 위한 것이 아니므로 모든 작업은 간단해야만 하며, 작업의 단순화로 방사선피폭을 최소화하여야 한다. 가능한 한 용접식 스트러트(Strut) 보다는 나사식 스트러트를 사용한다.

○ 우수한 응력보고서를 작성한다. 완충기를 지닌 모든 안전성관련 배관계통의 再解析이 필요하므로 手計算作業을 하지 않는다.



〈그림2〉 잔류완충기 個數別 계통분포



〈그림3〉 완충기 제거 전후의 응력여유비교

4. 3段階 접근방식

LaSalle의 완충기 제거 엔지니어링은 예비해석, 최종해석, 설계문서 작성의 순서로 수행되었다.

예비해석은 완충기의 수를 배관계통의 설계 제한치 내에서 최대로 줄이기 위해 반복제산(Iterative Process)을 수행함으로써 시작되었다. 기존의 지지물을 설계 변경함에 있어서는 완충기 제거 우선 순위를 고려하였다.

해석에 있어서는 전산비용의 절감과 계산의 정확도를 동시에 추구해야 하며, 최종해석단계에서의 수정이 필요없게끔 예비해석에 만전을 기했다.

이를 위해서 단순화된 動的解析技法을 사용하는 지지물 최적화 전산코드와 최소진동상태 평가를 위한 유한요소해석코드, 경험적 판단 등을 활용하였다.

예비해석의 利點은 Commonwealth Edison사가 지지물 변경을 위한 최종 결정권을 지니고 있으므로 완충기 제거사업의 비용/효과가 최대로 될 수 있다는 것이다. 이는 전력회사가 완충기비용과 관련된 모든 인자와 이들의 제거가 지니는 가치를 파악하기에 유리한 입장에 있기 때문이다.

최종해석단계에서 배관, 지지물, 기기계산이 완료되고 검토, 승인되었다. 배관해석이 우선 완료되었으며 그 다음에 표준지지물, 보조강재, 구조재들이 새로운 하중에 적합함을 확인하였다. 이 단계에서 예비해석단계에서의 판단에 대한 검증을 하였다. 예비해석단계에서의 적절한 판단이 이루어졌었다면 지지물의 성능을 대폭적으로 향상시킬 필요는 없을 것이다. 최종해석이 종료된 후에는 완충기 제거를 위한 설계변경을 수행하였다.

설계문서는 현장에서의 수정을 위한 지지물도면, 10CFR·50:59에 의한 안전성 평가 및 설계관리 점검표, 계통운전요건 등으로 구성되었

LaSalle原電의 완충기 제거사업은 사업자가 기대한 이상의 성과를 거두었다. 전체 완충기의 80%(NSSS 배관 포함)를, 즉 2기에서 합계 1,900개의 완충기를 제거하여 각 호기마다 250개 정도의 완충기만 남게 되었다.

다. 완충기를 제거하기 이전에 관련계통의 운전을 중지하며, 제거작업 종료시까지 계속 운전을 중지하였다. 그러나 특별한 경우에는 배관계통이 모든 설계기준하중에서도 허용용력 내에 있도록 특수한 시공절차를 개발했다. 이러한 특수절차들은 원전 출력운전중에 격납건물 관통부와 연결된 계통으로 부터의 완충기 제거가 필요할 경우에 적용되었다. 또한 작업자의 점검표는 시공중에 부딪칠 수 있는 난점들을 지적하게끔 하였다. 이러한 난점의 예로는 특정지역에서의 완충기로의 접근가능성, 방독면 착용요건 등을 들 수 있다.

5. 結 論

LaSalle原電의 완충기 제거사업은 사업자가 기대한 이상의 성과를 거두었다. 전체 완충기의 80%(NSSS 배관 포함)를, 즉 2기에서 합계 1,900개의 완충기를 제거하여 각 호기마다 250개 정도의 완충기만 남게 되었다. 또한 투자회수가 2년 이내에 가능할 것으로 예상되는 등 비용/효과가 매우 높은 사업이었다.

모든 事業目標가 달성되었으며 단지 남아있는 지지물의 1%만이 다소의 수정을 필요로 했다. 즉, 대폭적인 보강이나 새로운 배관구속기의 설치가 필요없었으며, 완충기를 많이 제거했음에도 평균 배관응력이 현저히 증가하지도 않았다.