

박 정 열 부산대학교 조선해양공학과 대학원 박사과정 | e-mail : cpu2565@pusan.ac.kr
 김 명 현 부산대학교 조선해양공학과 교수 | e-mail : kimm@pusan.ac.kr

이 글에서는 해양 플랜트 설계 시 사용되는 구조 건전성 평가에 대해 최신 연구 동향 및 보완점을 요약 정리하였다.

해양 플랜트는 다양한 구조 형상, 건조 과정, 운용 조건 등의 측면에서 매우 복잡한 시스템이다. 균열이 없는 경우를 가정한 전통적인 방식의 해양플랜트 설계에서는 재료의 기본적인 물성(항복 강도, 인장 강도)을 고려하여 구조물이 운용 수명동안 견딜 수 있는지 여부를 판단하게 된다. 하지만, 해양 플랜트의 경우 응력 집중 현상이 발생하는 구조적 불연속부가 존재하며, 반복되는 피로하중에 의해 구조적 불연속부에서 피로 균열은 빈번히 발생하게 된다. 또한 과도한 하중의 작용에 의해 부분적으로 소성화가 발생하여 구조물은 전체적으로 붕괴할 가능성이 높아진다. 이러한 관점에서 균열이 존재하는 경우에 해양 플랜트의 건전성 여부 및 잔여 수명을 예측하기 위한 파괴 역학적 관점 평가 기법이 차츰 도입되고 있다.

균열이 존재하는 구조물의 건전성을 평가하는 방법은 크게 유한요소해석을 이용한 방법과 파괴 역학 이론에 기초한 해석적 평가를 이용한 방법으로 나눌 수 있으며, 최근에는 경제성 측면을 고려한 해석적 평가법이 주로 사용되고 있다. 또한, 해석적 균열 평가법은 파손 평가 선도(FAD: Failure Assessment Diagram)를 이용한 방법과 균열 진전력(CDF: Crack Driving Force)을 이용한 방법으로 구분되며 현재는 FAD 선도를 이용한 방법이 주로 사용되고 있다. 하지만, 상기 평가 기법은 주로

배관 설계에 주안점을 두고 연구, 개발되었기 때문에 해양구조물이 가지는 특수한 요건(고강도·극후물 강재의 사용, 용접부 잔류응력, 복잡한 구조물의 응력확대계수)들을 명확히 반영하고 있지 못하고 있다.

이 글에서는 해양플랜트의 안전성 여부를 평가하기 위해 적용되는 구조 건전성 평가 기법 관련 국내외 연구 동향을 정리하고, FAD 선도 기반 건전성 평가에 관한 연구 내용 및 평가 절차를 기술하였다. 또한, 기존의 구조 건전성 평가 기법의 한계점 및 보완점 등을 제시하기 위해 해석적 연구 결과를 비교·정리하였다.

구조 건전성 평가 관련 국내외 연구 현황

국내의 연구기관에서는 균열이 존재하는 용접 구조물의 건전성을 평가하기 위해 다양한 연구를 수행해 왔다. 각국의 code 및 standard에서는 1960년대 이후 결함에 대한 파괴역학적인 해석기술이 발전함에 따라 이를 기초로 ECA(Engineering Critical Assessment)/FFP(Fitness For Purpose) 형식의 결함 평가 기준을 제정하였다. 특히, 배관의 원주용접부에서 발견되는 결함에 대한 평가 지침들이 주로 제시되었는데, 대표적인 기준으로는 BSI PD 6493의 개정판인 BS 7910, CEGB(Central Electricity Generating Board)에서 제시한

R6, API(American Petroleum Institute)에서 제시한 API 579 등이 있다. 또한, DNV-GL에서는 RP F-108, OS F-101 등의 code를 통해 파이프라인에 대한 건전성 평가 및 설계 지침을 제시하고 있다. 이러한 평가 code들은 대부분 FAD를 이용한 평가 기법을 채택하고 있으며, 최근에는 현장에서의 적용성을 높이기 위해 제시된 평가 code들을 프로그램화하여(Crackwise, PREFIS 등) 배관 용접부의 건전성을 평가하는데 사용하고 있다. 한편, 유럽에서는 다국적 프로젝트인 SINTAP(Structural Integrity Assessment Procedure for European Industry)을 통해 가동 중인 배관에 대한 운용 적합성 평가 방안을 제시하였으며, 이를 프로그램화하여 건전성 평가 소프트웨어를 개발하였다.

국내에서도 용접 구조물의 구조 건전성 평가에 관한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 이때, 국외 연구기관과 마찬가지로 기존의 참조 응력법(reference stress method)를 기반으로 한 FAD를 사용하여 배관 용접부의 건전성 평가를 수행하였다. 또한, 용접부 물성에 영향을 미치는 요소(mismatch effect, 잔류응력 등)들이 실제 구조 건전성 평가에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 연구를 광범위하게 수행하였다. 그러나 대부분의 연구는 배관에 대한 것이며 이를 적용하여 해양구조물의 건전성을 평가하면 과도하게 보수적인 설계가 된다.

구조 건전성 평가 절차

일반적으로 다수의 구조 건전성 평가 기법에서는 FAD 방법을 사용하여 균열의 안전성을 평가하고 있다. FAD 방법은 Ainsworth가 제시한 참조 응력법(Reference stress method)를 기반으로 구성되었으며, 범용적으로 사용되는 BS 7910에 적용되고 있다. 또한 FAD는 두 개의 무차원 변수인 인성비(K_r)와 하중비(L_r)가 각각 세로축과 가로축을 구성하고 있다. 인성비와 하중비는 아래와 같이 정의한다.

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} \quad L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_Y}$$

여기서, 인성비는 응력확대계수와 파괴인성의 비이며, 하중비는 참조응력과 항복응력의 비로 표현한다.

위와 같은 FAD 방법은 허용 결함 크기 산정에 사용되는데, 그 절차는 총 3개의 Option으로 나뉜다. Option 1에서 3로 갈수록 요구되는 재료의 특성 및 하중 분석 데이터는 많아져 복잡해지지만 결과의 정확도는 높아진다. 가장 보편적으로 사용되는 Option 1을 기준으로 허용 결함 크기를 산정하기 위해 가장 먼저 해야 할 절차는 구조물에 작용하는 하중 분석을 통하여 응력을 정의하여야 한다. 응력은 하중이 작용하는 구조물이 소성 붕괴가 발생할 때 기여하는 1차 응력과 부수적으로 작용하는 2차 응력으로 구성된다. 1차 응력은 다시 두께 방향의 평균 응력인 멤브레인(Membrane) 응력과 두께 방향에 대해 선형적으로 변화하는 굽힘(Bending) 응력으로 나누어진다. 2차 응력에는 열응력과 잔류 응력으로 구성된다. 일반적으로 1차 응력은 하중 조건을 고려한 유한요소해석을 통하여 정의하며 2차 응력은 BS 7910에서 제안하는 식을 사용하여 정의한다. 다음으로 대상 구조물에 발생할 수 있는 결함에 대하여 정의하여야 한다. 대표적인 균열의 종류는 표면 결함, 관통 결함 그리고 내부 결함이 있다. 세 번째로 재료의 인성 특성을 결정해야 한다. 재료의 인성은 구조물이 운용되는 환경 조건을 고려하여 실험 또는 관련 문헌 분석을 통하여 정의한다. 마지막으로 하중비와 인성비를 계산하여 FAD에 적용함으로써 건전성 평가 결과를 도출하여 최종 파손 선도를 결정하게 된다.

BS 7910에서는 허용 결함 크기 산정뿐만 아니라 잔여 수명도 평가 할 수 있다. 잔여 수명 예측을 위해서는 우선적으로 1차 응력, 응력집중계수 그리고 2차 응력을 고려한 응력 범위를 산정해야 한다. 응력 산정은 허용 결함을 산정하는 경우와 동일한 방법으로 산정한다. 용접부에 대한 응력 집중 계수는 핫스팟 응력(Hot spot stress) 및 노치 응력(Notch stress) 기법을 이용하여 산정한다. 그 후, 구조물에 존재하는 결함들을 최대 주응력에 수직인 방향에 대한 결함들로 재해석해야 한다. 이러한 재해석을 통하여 정의된 결함에 대한 치수를 결정

하고 앞서 평가된 최대 허용 결합 길이를 통하여 최대 균열 진전 길이를 정의한다. 네 번째로 균열 진전 시험 및 관련 문헌 분석을 통하여 얻어지는 재료 상수를 정의한다. 다섯 번째로 응력 범위, 균열 크기 및 형상을 고려한 응력 확대 계수 범위를 정의한다. 응력 확대 계수 범위 또한 결합의 종류에 따라서 제안하고 있는 식을 사용하여 계산한다. 마지막으로 한 응력 주기마다 진전하는 균열 길이를 고려하여 최종 균열 길이를 계산하고 최대 허용 결합 길이에 도달할 때까지 이와 같은 과정을 반복하여 수행 후 잔여 수명을 결정한다.

구조 건전성 평가 기법의 한계점 및 보완점

해양 플랜트를 비롯하여 파이프라인 등 구조물의 접합방법으로 용접이 널리 사용되고 있으며 용접부에 대한 평가 역시 필수적으로 필요한 실정이다. 용접에 의해 국부적인 가열과 냉각으로 인한 비선형 소성변형이 발생하고 이에 따라 용접부에 잔류응력과 변형이 발생한다. 잔류응력과 변형은 국부 좌굴과 취성파괴를 발생시켜 파괴인성 저하 및 피로강도에도 영향을 주어 구조물의 안전성을 저해하며 수명에도 악영향을 미친다. 그러므로 용접 구조물 설계 시 일부 국외선급에서는 사용강재 두께 제한 및 관련규정을 강화하여 엄격한 파괴 설계 기준을 요구하며, 구조 건전성 평가 시 대표적으로 사용되는 BS 7910에서도 잔류응력의 영향을 고려하여 평가하고 있다. 하지만 BS 7910에서 제시하고 있는 잔류응력 분포는 실험값이나 유한요소해석을 이용한 방법에 비해 매우 높은 값으로 나타나게 되며, 이는 보수적인 결과를 도출해 낸다. 그림 1에서는 실제 유한요소해석으로 잔류응력 분포를 도출한 후 허용 결합 크기를 도출하는데 적용한 결과와 BS 7910에서 제시하고 있는 잔류응력 분포를 사용하여 도출된 허용 결합 크기 결과를 비

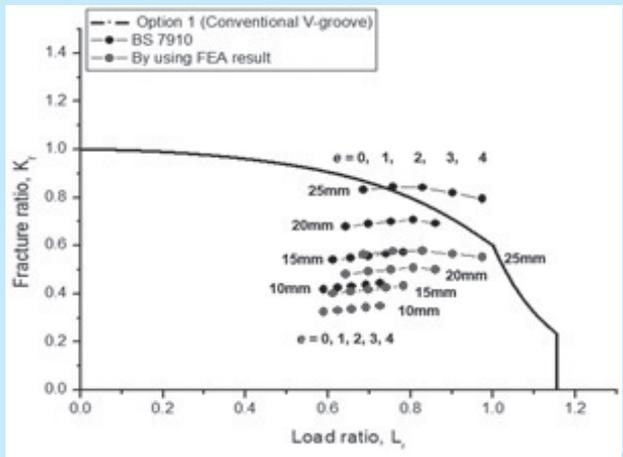


그림 1 잔류응력 효과를 고려한 구조 건전성 평가 결과 비교

교해보았다. 그 결과, BS 7910에서 제시하고 있는 잔류응력 분포를 사용한 경우가 매우 보수적으로 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 결과를 통해, 해양 플랜트에 대한 경제적인 구조 건전성 평가 결과를 도출하기 위해서 실제 잔류응력 분포를 구현할 수 있는 code 개발에 관한 연구가 필요하다.

결 언

이 글에서는 파괴 역학 이론에 기초한 해석적 평가법 중 FAD를 이용한 구조 건전성 평가 관련 국내의 연구 동향을 정리하였다. 또한 FAD 선도 기반 구조 건전성 평가 기법의 한계점 및 보완점을 제시하였다. FAD 기반 구조 건전성 평가에서 가장 큰 보완점은 매우 보수적인 평가가 이루어진다는 점이다. 따라서 향후 정확한 구조 건전성 평가 결과 도출에 주안점을 두고 실제 잔류응력 분포를 구현할 수 있는 code 개발에 대한 많은 연구가 이루어질 것으로 판단된다.