

건설 중장비 구조물의 신뢰성 평가

글 ◦ 고 정 / 대우종합기계 중앙연구소 신뢰성평가센터, 수석연구원
 ◦ 조 용 근 / 대우종합기계 중앙연구소 신뢰성평가센터, 선임연구원

e-mail ◦ jko77@dhilt.com.kr
 e-mail ◦ cyg@dhilt.com.kr

이 글에서는 굴착기의 용접구조물에 대한 필드 하자데이터의 분석과, 용접조인트의 피로이론을 적용한 수명예측, 및 가속수명시험 결과들 사이의 상관관계 분석을 통한 신뢰도 높은 구조물 수명예측 및 검증 프로세스에 관해 소개하고자 한다.

굴착기 등 건설현장에서 사용되는 중장비들은 작업납기의 준수와 장비가동률의 제고를 위하여 매우 가혹한 작업환경 하에서도 높은 신뢰성이 요구되고 있다. 특히, 작업시의 가혹한 부하에 1차적으로 노출되는 용접 구조물(주로 제관품을 말함)의 경우 보증기간 내균열, 변형, 또는 파괴 등의 고장이 발생하지 않아야 함은 물론, 장비의 총수명과 같은 반영구적인 수명을 가지도록 설계되는 것이 일반적이며, 이러한 구조물의 내구성이 시장에서의 제품경쟁력을 좌우하는 매우 중요한 요소 중의 하나이다.

세계 유수의 제조업체에서는 오래 전부터 자사 제품의 내구성 확보를 위한 필드 데이터 분석, 신뢰도 설계, 가속수명 시험, 고장 분석 등의 활동이 유기적으로 이루어져 왔고 그 데이터가 체계적으로 축적되어 활용됨에 따라 매우 신뢰도 높은 수명평가가 가능한 수준에 있다.

그러나 Best in Class에 속하는 몇몇 기업을 제외한 많은 기업에서는 자사 제품 구조물에 대한 내구성 평가를 전산 시뮬레이

션(구조해석, 피로해석, 충돌해석 등) 또는 Field 응력시험 이나 Test Rig를 이용한 가속수명시험 등의 방법에 따르고 있으나, 예측 또는 평가의 정확도 즉, 신뢰도에 대해서 논하기는 어려운 상황이다.

당사 또한 이와 유사한 방법 및 기준에 따른 평가 프로세스를 적용하였으나, 다음과 같은 문제점으로 인해 평가결과의 신뢰도에 한계가 있음을 인식하게 되었고 이에 따라 기존 프로세스에 대한 보완활동을 추진하게 되었다.

첫째, 판매된 제품의 필드 하자에 대한 피드백 정보가 체계적으로 관리되지 못함으로써 하자사항에 대한 조치 및 단순 품질개선에 주로 활용되었다.

둘째, 신뢰성 분석에 기반을 둔 내구성 평가 시스템이 고려되지 못함으로써 설계 변경시 단순 한 강도적 증가가 아닌 산포의 축소에 의한 최적 피로 설계가 어렵고, 목표 수명 및 하자율 저감을 위한 방안들의 통계적 접근이 불가능 하였다.

셋째, 다수의 시료를 대상으로 한 시험이



불가능한 고가의 용접구조물에 대한 내구성 평가 결과는 품질특성상의 큰 산포가 모집단에 대한 통계적인 수명추정을 어렵게 한다.

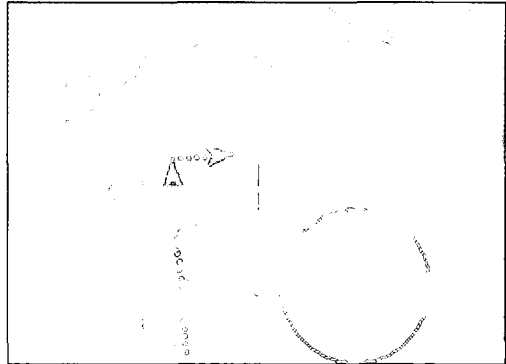
또한, 피로 해석을 통한 용접부 수명 계산은 용접 이음부의 형상 및 하중 방향에 따른 용접 클래스를 규격집의 분류 조건에 따라 적용해야 하는데, 이를 위해서는 당사에서 제작한 용접 품질이 규격집(예를 들면 BS7608)의 데이터베이스 구축시의 시험품 조건과 동일하다는 가정이 필요하다.(실제로 업체별로 용접 시공자의 기량, 제관품의 공차 수준, 접합부의 잔류 응력 수준 등에 따른 용접 품질은 큰 차이가 있으며, 이는 피로 수명과 직결되는 사항이라 할 수 있다)

이 글에서는 당사 제품인 굴착기 붐, 암 구조물(Boom & Arm Structure)을 대상으로 정확한 수명예측 및 신뢰성 확보를 위해 수행한 내용을 서술하고자 한다.

건설 중장비의 신제품을 개발하거나, 장비의 성능 향상, 경량화, 원가절감 등 다양한 목적에 따른 설계 변경이 발생했을 때, 제품의 구조물에 대한 신뢰성 검증은 전산 시뮬레이션을 통해 정적 설계 안전율을 확인한 후, 피로 하중 조건 하에서의 벤치 가속 시험을 통해 제품의 내구성을 평가하는 것이 일반적인 프로세스라 할 수 있다. 이때 시험 및 해석에 고려되는 하중 및 구속조건은 실차 시험을 통해 계측한 자료로부터 추출하거나, 설계 단계에서 고려한 제품의 하중계산에 의해 결정한다.

굴착기 붐, 암 구조물의 내구성 평가 프로세스 및 시험 결과 고찰

굴착기 붐(boom), 암(arm)에 대한 응력분포 측정을 위한 정하중시험과 내구성 평가는 실제 작업 환경에서 구조 역학적으로 가



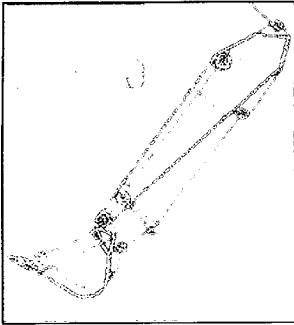
굴착기 붐, 암의 내구시험자세

장 취약한 상태인 Sagging 자세와 최대 굴착력 및 스윙 토크(swing torque)를 벡터적으로 조합함으로써 내구 시험 자세 및 하중 조건을 결정하였다.

하중은 서보-유압 제어 시스템을 이용해서 정현파를 인가하였고, 관심 부위의 선정 및 데이터 획득은 필드 하자 빈도가 높은 부위와 구조적 취약부에 센서(스트레인 게이지)를 부착하여 부위별 동적 스트레인 이력을 계측하였다. 특히, 이 글에서 주로 다룬 암 구조물의 경우 회전운동의 링크부 역할을 하는 센터 보스부 주변은 측판 맞대기 용접선, 하판 맞대기 용접선, 내부 격판 및 보강판 등이 밀집한 부위로 피로역학적으로 매우 취약한 주관심 대상부라 할 수 있다.

정하중 및 내구시험 전에 시험품은 용접 시공상태를 초음파 탐상을 이용한 비파괴 검사를 통해 설계 사양에 의한 용접 품질의 합부 여부를 확인하였다. 따라서 내구시험 시 용접 불량에 의한 초기 균열 발생을 미연에 방지 하였고, 피로 강도적 측면에서 구조물을 평가 하였다.

센서(스트레인 게이지)는 총 32개를 붐, 암 주요부(용접부 주변)에 부착하여 최대, 최소 변형률과 변형률 진폭을 구하였다. 정하중 시험결과를 통하여 동일 기종의 설계변경 전,후 제품에 대한 응력 완화 정도를 파



굴착기 암 구조물의 피로수명 평가부

약하였고, 모재의 정적 강도 안전율을 확보하였다. 본 과제에 해당하는 굴착기 붐, 암의 최대 변형률은 모재 항복 강도의 30 ~ 35% 수준이었

다. 정하중시험 결과는 정적 강도의 평가 외에 피로 해석 소프트웨어(적용 S/W : Nsoft 5.2)를 이용하여 주요부에 대한 피로 수명을 내구시험 전에 예상 할 수 있는데, Stress-Life Method에 의한 암 구조물의 ㉔ 부 평가 결과는 가속수명시험의 하중조건에서 약 223(Hr)의 피로수명을 나타내었다.

피로 해석에 적용된 파라미터는 S-N 정역시 BS7608(강 구조물의 피로 설계 및 평가를 위한 영국 규격)의 용접 클래스 "D"와 생존율 90%를 적용하였다.

"BS 7608"에서는 용접부 형상 및 하중 방향에 따라 용접 클래스(welding class)의 코드를 제시하고 있으나, 이 규격은 참고적으로 활용할 수 있을 뿐, 당사의 제관 용접부에 대한 특성을 완전하게 고려하지 못한다.

따라서 자사 제품에 대한 정확한 내구수명을 평가하기 위해서는 국제 규격집의 제시 조건과 자사 제품과의 상관관계를 파악하는 것이 중요하다 하겠다. 실제 본 과제에서도 이에 대한 고찰을 위해 BS7608에서 제시하는 여러 코드에 대한 용접 클래스를 적용하여 타당성을 분석 하였다. 벤치 가속 내구시험을 통한 암 구조물의 ㉔ 부의 시험 파단 수명은 243(Hr)이었으며, 파면 분석 결과 피로 균열의 특징을 나타내었다.

피로 해석시 용접 클래스 "D" 및 생존율 90%를 적용했을 때 예상 피로수명은 시험

파단 수명과 불과 8% 차이의 보수적 결과를 보였다. ㉔부 외에 대부분의 평가 부위도 유사한 수준으로 그 차이는 5~12%의 보수적 경향을 나타내었다. 실차 시험은 부위별 벤치 내구시험의 가속계수 확보를 위한 스펙트럼 하중 및 설계 단계에서 필요한 주요 정보를(연결부 핀의 힘, 실린더에 작용하는 압력, 변위 등) 확보하기 위하여 수행 하였다. 작업 환경에 따른 Load Class의 가중치는 당사의 굴착기가 투입된 주요 장소에 따라 필드 서버이를 통해 확보된 데이터 베이스(D/B)를 고려하였다.

여기에서는 가장 가혹한 환경인 석산(채석장)에서의 실차시험 결과를 다루었다.

가변 하중 이력인 실차 시험 결과를 분석한 결과 ㉔ 부의 피로 수명은 10,022(Hr)이었다(용접 클래스 "D", 생존율 90% 적용). 따라서 석산 작업 환경 조건에 근거한 벤치 내구 시험의 가속 계수는 "41.2"이며, 계산 수명과는 "44.9"에 해당한다. 주관심 부위인 센서 부착 위치에서의 가속 계수는 예상대로 다양한 결과를 나타냈으며, 참고적으로 붐 구조물의 측판 맞대기 용접부 주변은 "54"이다.

가속계수를 도출함으로써 당사의 작업 환경에 따른 Load Class별 가중치 데이터 베이스를 활용하면 작업 환경에 따른 차별화된 구조물의 내구 수명 평가가 가능하게 되었다.

한편, 이 과제를 수행함으로써 얻은 부수적인 효과로서 "BS 7608"과 같이 오랜 기간에 걸쳐 완성되는 데이터 베이스를 당사의 용접품 특성에 부합되게 활용 할 수 있게 되었다. 또한 기존 내구성 평가 프로세스의 재 고찰을 통해 구조물의 용접 비드면에서 부터의 Nominal Stress와 Structural Stress의 경계 및 응력 구배 차이를 파악할 수 있었다.



궁극적으로는 붐, 암 구조물의 주요 취약 부에 대한 부위별 가속 계수를 구함으로써 벤치 내구시험 결과의 신뢰도를 향상시킬 수 있게 되었다.

체계적으로 수집되어 피드백된 필드 하자 정보로부터 장비 사용 중의 제 환경변수 및 신뢰도지수를 분석함으로써 내구성 평가 시스템의 검증 및 효율화를 기할 수 있다.

비 통계적 접근에 의한 붐, 암 구조물의 내구성 평가는 보수적 설계, 또는 다량의 하자 발생을 초래할 수 있다. 따라서 예상치 못한 사용 조건(마모, 부식 등 포함) 및 제품 제조품질의 산포를 고려하려면 통계적 접근에 의한 “구조 신뢰성 특성값”이 요구된다 하겠다.

필드 하자 정보의 신뢰도 분석 및 기 확보 데이터와의 상관 관계 분석

당사에서는 기 출하된 굴착기의 지속적인 품질 추이를 관리하기 위해 필드 하자 정보 시스템을 가동하고 있으며, 이를 통해 붐, 암 구조물에 대한 신뢰도 특성값(MTTF, $R(t)$, B-10 Life)을 분석하였다. 신뢰도 분석에 사용된 필드 하자 데이터는 최근 5년간의 정보를 근거로 하였다. 하자 시간의 결정은 하자 시점까지의 가동시간을 사용하였으며, 미하자 호기에 대해서는 평균 가동 시간을 추정하여 기준 시점에서의 가동 시간을 환산하였다. 또한 최근의 장비 내구성 향상에 따라 하자 발생까지의 시간이 증가하여 장비 보증시간(2,000시간)을 초과한 4,000시간에서 데이터를 중도 절단(censoring)하여 분석하였다.

하자확률밀도함수의 결정은 분포 적합도 분석을 통해 지수 분포를 사용, 신뢰도 특성값을 구했고, 평균고장시간(MTTF)을 산출시에는 동일 호기에 대한 중복 하자는 분석에

서 제외 하였다.

신뢰도 분석은 붐의 메인부, 센터부, 엔드부와 암의 센터부를 경계로 구간별 특성값을 얻었다.

암 센터부의 경우 평균 고장 시간(MTTF)은 67,642(Hr)이었고, 2,000시간에서의 생존확률은 $[R(t=2000)]$ 98.09%로 분석되었다. 그리고 기업에서 제품의 신뢰성 관리지수로 주로 사용하는 B10 Life는 9,127(Hr)이었다.

암 센터부 구간에 대한 상기의 신뢰도 분석값을 실차 시험을 통해 구한 피로 수명(총 5개소의 평균값)과 비교한 결과 수명이 11% 짧은 것으로 평가 되었다. 이는 양산 품질의 산포성과 사용 환경의 미반영 인자에 의한 것으로 판단된다.

내구성 증대를 위해 실시한 설계 변경부의 신뢰도 분석 결과 항목별로 설계변경 효과도 다양하게 파악 되었다. 붐 엔드부에 대한 재질 및 형상 측면의 설계변경 전,후의 수명 변화는 B-10 Life를 기준으로 1.3배 증대된 것으로 분석 되었다.

지금까지 다룬 내용은 지면상 굴착기의 암 구조물의 한 개소를 집중적으로 다루었지만 본 과제는 굴착기 프론트부(붐, 암) 전체를 그 대상으로 하였다. 본 과제의 최종 목표는 신제품 개발 및 기존 제품의 설계 변경시, 즉각적으로 신뢰도 높은 내구수명을 예측하는 것이라 할 수 있다. 현 단계까지의 과제 활동을 통해 붐, 암 주요 부위별 내구성 평가 결과의 신뢰도를 향상시킬 수 있었고, 필드 하자 정보를 통한 신뢰도 특성값을 분석, 내구 수명 결과에 반영함으로써 향후 보증 시간을 신뢰도 측면에서 접근 할 수 있는 기반을 확립하였다. 또한 국제적으로 널리 사용되는 데이터 베이스(BS7608)를 당사 제품의 구조 및 용접부 특성과 부합되게 수정하여 활용할 수 있는 성과도 얻었다.