

경량굴삭기 설계를 위한 주요부재의 두께 최적화 연구 Thickness Optimization of the Excavator for the Light-Weight Design

*#송정환¹, 이근안¹, 이혜진¹, 박진호¹, 이낙규¹, 석정호¹

*#J. H. Song(jhsong@kitech.re.kr)¹, G. A. Lee¹, H. J. Lee¹, J. H. Park¹, N. K. Lee¹, J. H. Seok²
¹ 한국생산기술연구원 융합생산기술연구부, ² 스페이스솔루션

Key words : Excavator, Light weight design, Optimization, Advanced high strength steel

1. 서론

최근 환경오염이 전세계적으로 중요한 이슈로 부각되면서 각종 환경규제에 따라 자동차 및 기타 업계에서는 배기가스 저감 및 연비 향상에 많은 관심을 가지게 되었다. 특히 차체 경량화를 통한 차량의 연료감소가 현재 상용화 가능한 최선의 친환경 기술이라는 판단 때문에 이에 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 동향은 굴삭기 업계에서도 마찬가지이다. 굴삭기 경량화 기술은 미래 기술을 선점할 수 있는 친환경 기술로, 굴삭기 부품의 경량화를 통하여 제품의 연비절감 효과를 도출하고, 향후 하이브리드 굴삭기, 연료전지 굴삭기 등 미래 기술 적용 제품의 기반이 되는 기술이다. 이에 선진 굴삭기 업체들이 환경문제에 대처하기 위하여 앞다투어 경량화 기술개발에 매진하고 있는 반면 국내 굴삭기 제조업체들은 아직 외국의 선진 업체들에 비해 기술력이 다소 떨어져 있는 실정이다. 굴삭기 붐 및 암 등의 부재에 대하여 지금까지는 기존 강판에 대한 최적화 연구만 진행되어 왔으나(1)~(3) 본 연구에서는 굴삭기 붐에 대하여 인장강도 600MPa 급의 고강도 강판을 적용하여 치수 최적화 해석을 수행하여 기존 강판 대비 경량화 효과를 평가하였다. 이를 위하여 먼저 동역학 해석 프로그램을 이용하여 반력을 구하였으며 이 반력을 토대로 기존 치수 최적화 해석을 수행하였다.

2. 유한요소모델링 및 경계조건 도출

최적설계를 위한 기초 단계로서 정적 구조해석을 수행하였다. 모델은 굴삭기 전체의 시스템(Fig. 1) 중 가장 큰 중량 감소를 보일 것을 예상되는 붐의 질량을 최적화 하고자 하였다. 굴삭기는 매우 다양한 자세에서 여러 가지 하중을 받으며 작업을 하기 때문에 그에 따르는 자세와 하중 조건들을 모두 고려하여야 한다. 하지만 현실적으로 모든 자세를 고려한다는 것은 불가능하기 때문에 Fig. 2 와 같이 가장 작업빈도가 많을 것으로 예상되는 4 가지 경우와 붐 실린더와 암실린더에 가장 큰 힘이 걸리는 최대굴삭자세까지 고려하여 총 3 가지의 굴삭자세를 정하였다. 굴삭기 붐과 암의 부재는 후판을 이용하여 제작되므로 쉘(shell)요소를 사용하였다. 최적화에 영향이 없는 붐과 암의 메인보스(main boss)와 엔드 브래킷(end bracket), 및 실린더가 결합되는 러그(lug) 등은 3 차원 솔리드(solid)요소를 사용하여 모델링하였다. 붐과 암 부재들 간의 용접부는 모재의 유한요소 크기의 절반정도로 모재부분보다 작게 표현하여 모델링하였다.

구조해석에서 사용될 각 조인트의 편반력을 구하기 위하여 다물체 동역학을 수행하였다. 앞 절의 3 가지의 각 작업 모드에 대하여 Fig. 4 와 같이 각 조인트의 편반력을 구하여 각 작업모드 별 최대 편반력자세에서 하중조건으로 대입하였다. 다물체 동역학 해석에 사용된 해석 프로그램은 RecurDynTM 을 사용하였다.

굴삭기 부재의 구조해석을 위해서 유한요소모델의 범위를 굴삭기 전체로 할 수도 있지만 그렇게 되면 각 자세별로 모델링을 따로 해주어야 하는 번거로움이 있다. 따라서, 붐과 암을 독립적인 유한요소모델로 만들어 각 자세에서 시간에 따른 여러 가지의 하중을 가해주는 방식으로

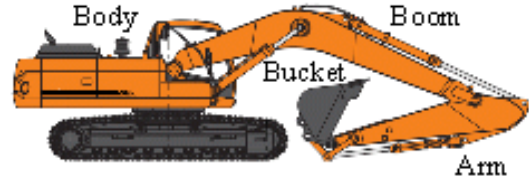


Fig. 1 Configuration of an excavator

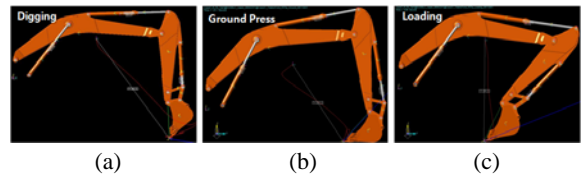


Fig. 2 Various position of an excavator ; (a) Digging, (b) Ground Press, (c) Loading

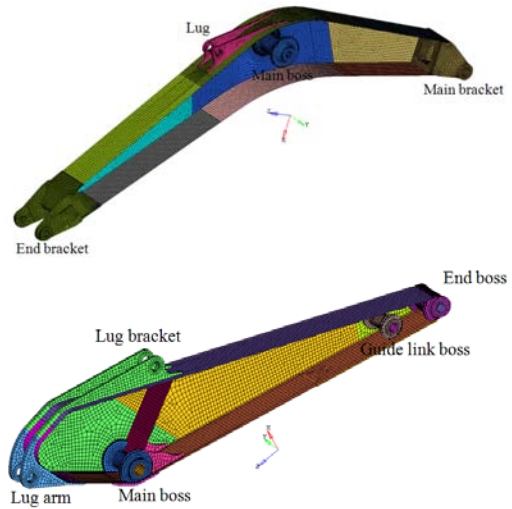


Fig. 3 FEM model for boom

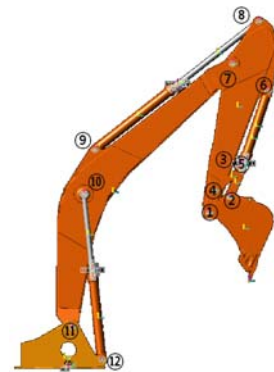


Fig. 4. Joint reaction forces of an excavator boom

구조해석을 수행할 수 있다. 본 논문에서는 동역학 해석을 통해 얻어진 동하중 이력들을 이용하여 붐과 암을 각각 분리하여 각 자세에 대해 정적평형 상태에 있다고 가정하고 관성제거(inertia relief) 정적해석을 수행하였다.

3. 굴삭기 구조물의 두께 최적화

구조해석에서 도출한 응력을 토대로 각 작업모드에 대하여 기존 강판사용 굴삭기 모델과 고강도 강판을 적용한 굴삭기 모델에 대하여 치수최적화 해석을 수행하였다. 고강도 적용 강판의 경우에는 식 (1)과 같이 인장강도 600MPa 급의 고강도를 적용하여 항복강도의 30%, 즉 180MPa 을 허용응력으로 하여 최적화를 수행하였다. 이때 굴삭기 붐의 치수최적화는 상용 소프트웨어인 OptiStruct 를 사용하였다.

Find T

Minimize M_{tot}

s. t. $\sigma_{eq} < 0.3\sigma_y$ in Ω_e

$0.8t_i^{initial} \leq t_i \leq t_i^{initial}$

where $\sigma_y = 600MPa$

굴삭기 붐과 암에 대하여 고강도 강판을 적용한 최적화 해석 결과 Fig. 5 와 같이 설계 반복(iteration) 되면서 최적화가 진행되었다. 각 경우 3 회 이내에서 최적해가 수렴되었으며, 이는 각 설계변수의 민감도가 초기 추정값에 크게 영향을 받지 않아 확실한 미분방향을 가지며 각 설계반복 내에서 선형추적(linear searching)이 수행되었기 때문이라 생각된다. 피로허용응력을 만족하는 범위 내에서 붐의 중량은 2501.51 kg 에서 2291.95 kg 으로 약 8.3% 의 경량화를 보였다. 암의 경우에는 초기중량 1058.43 kg 에서 최적화시 976.43 kg 으로 약 7.7% 의 중량 감소효과가 나타났다. 치수 최적화 결과를 살펴보면 응력이 크게 나타나는 붐의 중앙부 판재에서 두께의 변화는 크게 없었던 반면 응력이 크게 걸리지 않았던 엔드 브래킷(end bracket) 등 붐의 양쪽 끝단 부재의 경우 두께가 얇아지는 경향을 보였다.

4. 결론

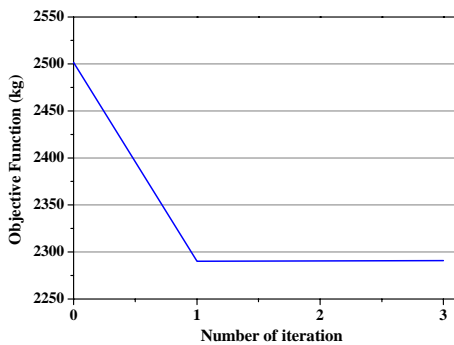
본 연구에서는 굴삭기 붐 구조물의 경량화를 위해 고강도 강판을 적용하여 치수최적화를 수행하였다. 굴삭기를 정지 상태에서부터 평형상태로 가정하고 모델링하여 유한요소 해석을 수행하였다. 동역학 해석을 통해 핀반력을 추출하였으며 기존강판과 고강도 강판을 적용한 두께최적화를 수행하여 그 결과를 비교하였다. 두께최적화 해석 결과 초기 두께의 약 80%범위 내에서 두께최적화가 일어났으며 각 작업 모드에 따라 약간씩의 결과 차이가 나는 것을 볼 수 있었다. 붐의 구조물의 중간 부분인 붐실린더가 결합되는 부분의 두께가 비교적 두꺼웠으며 아래쪽 보다는 위쪽의 판재의 두께가 두꺼웠다. 고강도 강판을 적용한 경우에는 약 14%의 경량화 결과를 보였다. 이 결과는 굴삭기 작업장치인 붐의 경우에만 해당된 결과이므로 다른 작업장치인 암과 버킷에 대해서도 경량화를 수행한다면 굴삭기 전체의 무게를 상당히 감소시킬 것으로 예상된다.

후기

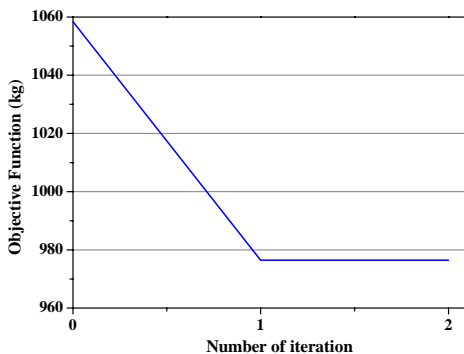
본 논문은 지식경제부의 지원으로 산업기술개발사업 중 “차세대 친환경 경량 굴삭기 구조해석 기술 및 CAD/CAE 통합 소프트웨어 개발” 로 수행된 연구임. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. HyperWorks User's Guide, Version 9.0, 2008, Altair Engineering Inc.
2. Park, J. Y., Yoo, W. S., 2003, "Modeling and simulation of an excavator using flexible multibody dynamics," Proc. of the KSAE Autumn, pp. 909~914.
3. Hong, J. M., Kim, H. W., Kim, D. H., 2003, "Dynamic analysis of an excavator manipulator by experimental data," Proc. of the KSME Spring, pp. 711~716



(a) boom



(b) arm

Fig. 4-2 Change of the objective function during optimization