

실험계획법을 이용한 굴삭기 암의 최적 설계 Optimal Design of Excavator Arm Part Using Design of Experiments

*김재민¹, #정원지¹, 박기범¹, 강종민², 정안균², 주총희², 이상기²

*J. M. Kim¹, #W. J. Chung(wjchung@changwon.ac.kr)¹, K. B. Park¹, J. M. Kang², A. K. Jung², C. H. Joo², S. K. Lee²
¹창원대학교 기계설계공학과, ²㈜볼보그룹코리아

Key words : Excavator, ANSYSWorkbench, Structural analysis, Optimization design

1. 서론

오늘날 굴삭기는 다양한 작업을 수행할 수 있어 높은 수행성과 경제성등 고효율성을 자랑하고 있다. 이에 건설 현장 뿐만 아니라 제조업, 농업, 해저영역등 다양한 분야로 활동영역이 점차 확대되고 있다. 하지만 굴삭기를 이용하여 수행하는 Digging, Dumping, Scratching, Extraction, Hammering 등의 작업 형태들은 운전자가 작업시 굴삭기의 여러 관절을 동시에 가동시키게 된다. 이때 굴삭기 작업의 형태에 따라 굴삭기 각각의 부분들에 발생하는 응력 분포도 각기 달라지게 된다. 또한 굴삭기는 자중이 큰 기계이므로 고장시 큰 사고로 이어질 확률이 높기 때문에 설계단계에서부터 세심한 고려를 필요로 한다. 본 논문에서는 굴삭기의 작업장치중 파괴시 가장 큰 피해가 있을 것으로 예상되는 Arm 을 최적 설계 모델로 선정하여 해석하였다. Arm 모델의 각 관재의 두께를 설계변수로 설정하고 변위와 구조물의 자중을 목적함수로 선정하였다. 실험 계획법은 Daguchi 설계법을 이용하였고, 암의 모델링은 CATIA V5[®]에서 하여 ANSYS Workbench[®]에서 구조 해석을 수행하였다.

2.1 모델 선정 및 모델링

굴삭기의 암을 정적 변위 및 응력 제한 조건을 만족하는 판 복합 구조물의 형태로 모델링하였다. 굴삭기의 일반적인 작업시의 굴삭력 8 톤과 굴삭기 버킷의 무게를 고려하여 암에 걸리는 외부하중의 크기를 931100N 으로 선정하였다. Fig. 1 은 실제 굴삭기의 설계도를 바탕으로 CATIA V5[®]에서 모델링한 모습이다.

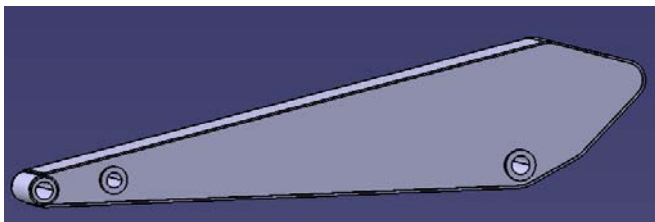


Fig. 1 Arm part modeling of excavator

2.2 전산해석 실험 계획

실험계획법은 통계적 분석 기법으로 최근 기업의 경영혁신 도구로 사용되는 식스 시그마의 개선단계에 유용하게 쓰인다. 실험계획법은 CAE(Computer Aided Engineering)와 결합할 때 매우 유용하다. 즉, 시간이 많이 소요되는 해석을 수행할 때 실험계획법에 따라 해석을 수행하면 몇 번의 해석으로 인자의 영향을 파악해 주인자가 무엇인지 파악할 수 있다. 본 논문에서는 실험계획법 중 Daguchi 기법을 사용하였다. Daguchi 기법의 목적은 제어할 수 있는 영향력이 강한 인자를 찾아내어 이 인자들의 영향력을 최대로 하여 잡음의 영향력을 최소로 하는 것이다. Arm 의 변위에 영향을 미칠것이라 생각되는 주 요인을 Arm 의 상판두께, 하판두께, 옆면 두께로 설정하고 수준수를 기존의 Arm 각각의

관재의 크기 및 전체 체적을 고려하여 각각 1mm 씩 증감시켜 5-수준 설계를 시행하였다. 실제 3 개의 요인에 5 수준수일 경우 총 125 번의 실험을 시행하여야 하지만 Daguchi 설계법의 5-수준 설계를 이용하여 Table 1 의 수준수로 Table 2 와 같은 25 번의 실험 계획을 세웠다.

Table 1 Number design of level

	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Side	14	15	16	17	18
Up	11	12	13	14	15
Down	14	15	16	17	18

2.3 실험 및 분석

Table 1 의 25 가지 수준수에 따라 CATIA V5 에서 25 번의 모델링을 통해 옆면두께, 상판두께, 하판두께에 변화를 주었다. ANSYS Workbench[®]에서의 해석 조건⁽¹⁾은 재질을 Structural steel, Young's Modulus 2.0e+005 MPa, Poisson's Ratio 0.3, Density 7.85e-006kg/mm³ 로 설정하였다. Fig. 2 에 나타나듯이 Arm 과 Boom 의 연결부를 Fixed 시키고, Arm 과 Bucket 의 연결부에 Force 를 주고, +Y 축 방향으로 중력을 주어 실제 굴삭기에 하중 조건과 거의 동일시 시켰다. 질량은 CATIA V5 에서 재질(Structural steel) 입력 후 관성측정을 통해 알 수 있었다. 목적함수 F(t)⁽²⁾는 요인선정 실험을 거쳐 주요한 인자를 도출하여 준다. 실험 결과인 Deformation 과 mass 를 목적함수 F(t)에 적용하여 설계변수의 최적화를 이루었다.

$$f() = \frac{f_1()}{f_1^*} + \frac{f_2()}{f_2^*} \quad (1)$$

위 식에서 f 은 실험결과의 Deformation, f 는 실험결과의 mass, f 은 기존 모델의 Deformation, f 는 기존모델의 mass, 그리고 는 가중치로서 스케일링된 결과를 중요도에 따라 반영하기 위한 것으로 본 실험에서는 Deformation 과 mass 모두 중요하기 때문에 과 모두 0.5 로 동일한 비중을 두고 계산하였다. Fig. 4 는 목적함수의 계량치 망소 특성의 S/N 선도를 나타낸 것으로 망소 특성의 S/N 비 공식은 다음과 같다.

$$N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{i} \sum_i^2 \right) \quad (2)$$

S/N 비⁽³⁾는 신호의 힘/잡음의 힘으로 모평균 제곱의 추정값/분산의 추정값이므로 높을수록 좋은 값을 나타내므로 옆면 16mm, 상판 11mm, 하판 16mm 로 실험 11 번이 가장 최적화 되었다고 나타나지만 Table 1 에서 목적함수 F(t)를 보면 14 번 실험의 목적함수 값이 가장 작게 나타났다. 그 이유는 그래프상의 크기차가 1/1000 정도의 차로 오차범위 안에 들어가기 때문이라 생각되기 때문에 두 실험값 중 어떠한 값을 선택하더라도 그 차이는 크지 않을 것이라 생각된다. Fig. 2 는 구조 해석 경계조건을 나타낸 것이고, Fig. 3 은 ANSYS Workbench[®]에서의 구조해석 결과 중 11 번 실험의 Total Deformation 양을 나타낸 것이고, Fig. 4 는 S/N 선도의 주효과 플롯을 나타낸 것이다.

Table 2 Result of Daguchi Design

	side	up	down	Deformation	mass	F(t)
1	14	11	14	83.17	900.39	1.00703
2	14	12	15	81.45	923.99	1.00736
3	14	13	16	79.08	947.61	1.00337
4	14	14	17	77.77	971.23	1.00645
5	14	15	18	76.41	994.87	1.00921
6	15	11	15	79.03	943.54	1.00099
7	15	12	16	77.29	967.15	1.00120
8	15	13	17	76.00	990.78	1.00443
9	15	14	18	74.27	1014.41	1.00471
10	15	15	14	77.51	974.15	1.00618
11	16	11	16	75.35	986.70	0.99804
12	16	12	17	73.78	1010.32	0.99939
13	16	13	18	72.47	1033.95	1.00248
14	16	14	14	74.56	993.93	0.99638
15	16	15	15	73.78	1017.30	1.00288
16	17	11	17	72.33	1029.87	0.99950
17	17	12	18	70.73	1053.50	1.00065
18	17	13	14	73.84	1013.23	1.00125
19	17	14	15	72.11	1036.84	1.00152
20	17	15	16	70.53	1060.46	1.00280
21	18	11	18	69.25	1073.04	1.00055
22	18	12	14	72.05	1032.78	0.99908
23	18	13	15	70.49	1056.39	1.00049
24	18	14	16	68.86	1080.00	1.00144
25	18	15	17	67.69	1103.63	1.00546

행상태로 가정하여 모델링하여 구조해석을 실시하였다. Daguchi 기법을 통해 실험 데이터의 목적함수를 구한 뒤 목적함수의 망소 특성을 계산하여 얻어낸 결과 값으로 압의 최대 처짐을 0.27mm 감소 시킬 수 있었고, 압의 질량은 3.6kg 감소 시킬 수 있었다. 이는 미세한 양에 불과하지만 앞으로 굴삭기의 Bucket이나 Boom 및 각 실린더에 관한 지속적인 연구가 뒷받침이 된다면 굴삭기 전체의 중량 감소 효과 및 강성 강화 효과를 더욱 크게 기대할 수 있을 것이다.

후기

본 논문은 교육인적자원부·부산업자원부·노동부의 출연금으로 수행한 산학협력중심대학육성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

1. ㈜태성에스엔이 FEA 사업부역음, ANSYS Workbench® 왕초보 탈출하기, 시그마프레스
2. Won Jee Chung, Dong Won Jung, "Six Sigma Robust Design of Fork Part for LCD Transfer System" WMSCI, 347~352, 2006.
3. 박상규, 이영광, MINITAB 을 활용한 현장 실무 중심의 실험계획법, 424~442, 2003

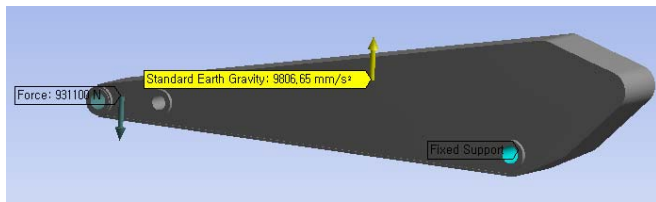


Fig. 2 Boundary condition in ANSYSWorkbench®

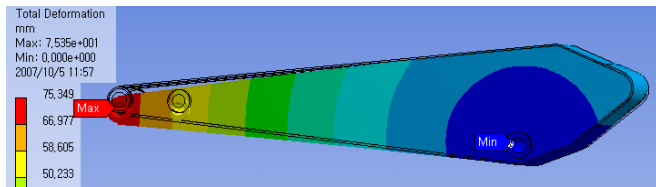


Fig. 3 Structural analysis result in ANSYSWorkbench®

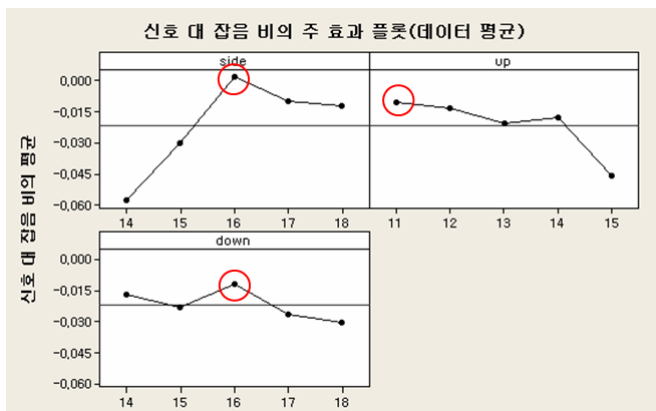


Fig. 4 Main effect plot of S/N ratio

3. 결론

본 논문에서는 산업 전반에서 널리 사용되고 있는 굴삭기에 대해 강성을 높이고, 무게를 낮추어 설계단가 감소와 작업시의 성능을 높이기 위한 목적으로 작업장치 중에서 암에 대한 최적 설계에 관한 연구를 수행하였다. 굴삭기의 암에 대한 최적 설계를 수행하기 위하여 정지상태에서 평