

직교배열을 활용한 리브 타입 진동 시험용 지그의 최적 두께 결정법

김수민*, 이순근**, 김정진*

*계명대학교 기계공학과

**에스엘(주)

e-mail:kjj4537@gmail.com

Optimal Thickness Determination for Rib-type Vibration Test Jig Based on An Orthogonal Array

Su Min Kim*, Sunkeun Lee**, Jung Jin Kim*

*Dept. of Mechanical Engineering, Keimyung University

**SL Corporation

요약

진동 시험용 지그는 구조물의 동적 특성을 평가하기 위해 널리 사용된다. 정확한 시험을 위해 지그의 강성을 증대하는 경우, 과도한 중량이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 리브 두께를 감소시켜 경량화 효과를 얻을 수 있다. 이를 위해 유전 알고리즘과 같은 기존의 최적화 기법을 적용할 수 있으나, 많은 계산량을 요구하고 이산 설계 변수를 가지는 문제에서는 비효율적이라는 한계가 있다. 본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 직교배열 기반 최적 두께 결정법을 제안한다. 제안된 기법은 리브 두께 조합을 위한 직교배열을 선정하고, 유한 요소 해석을 수행한 뒤, 영향도 분석을 통해 구조적 기여도가 낮은 리브를 식별하여 두께 설계안을 도출한다. 제안된 기법의 검증은 위해 진동 시험용 지그에 직교배열 기반 최적 두께 결정법과 유전 알고리즘 기반 최적 두께 결정법을 적용하고 각 기법의 최종 설계안을 비교하였다. 그 결과, 직교배열 기반 최적 두께 결정법을 통해 도출된 최종 설계안은 유전 알고리즘 기반 최종 설계안과 유사한 리브 감소 패턴을 도출하면서도 필요한 해석 횟수와 계산 시간을 크게 줄일 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 직교배열이 진동 시험 지그의 리브 두께 설계를 위한 효율적이고 실용적인 대안임을 보여준다.

1. 서론

진동 시험용 지그는 시험체를 가진 시험기에 고정하여 동적 특성을 평가하는 장치이다[1]. 지그는 가진력을 시험체에 전달하여 실제 사용 조건과 유사한 환경에서 응답을 측정할 수 있도록 한다. 그러나 지그의 설계가 미흡하면 불필요한 진동이나 공진이 발생하여 시험체의 응답이 왜곡될 수 있다[2]. 따라서 정확한 진동 시험을 위해서는 진동 시험용 지그가 충분한 성능을 확보하여야 한다.

정확한 진동 시험을 위해서는 지그의 고유진동수를 높게 제작하는 것이 중요하다[3]. 그러나 고유진동수를 높이기 위해 강성을 증대하는 경우 구조의 질량이 증가할 수 있다. 이는 설치 효율성을 저하시키고 제조 비용을 증가시키는 문제를 발생시킨다. 이러한 문제는 진동 시험용 지그를 구성하는 리브의 두께 감소를 통해 경량화를 수행하여 해결할 수 있다. 그러나, 리브 두께는 강성과 질량에 동시에 영향을 주는 설계 변수로, 경량화와 강성 확보 사이의 상충 관계를 고려한 설계가 필요하다.

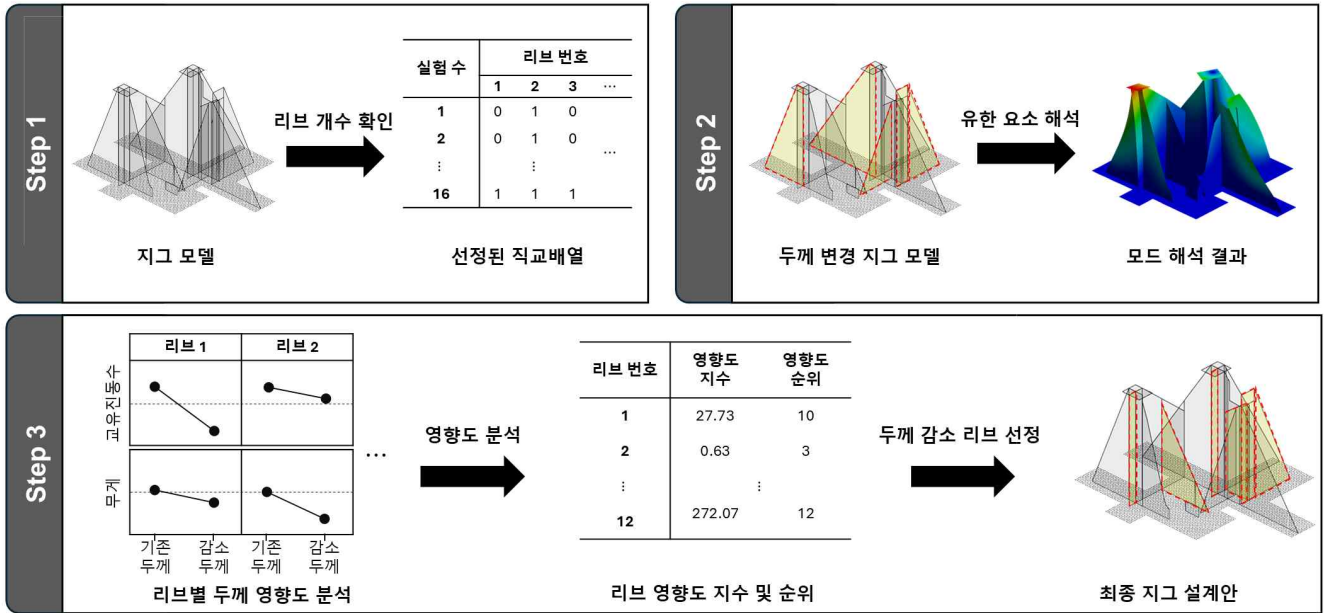
기존 연구에서는 유전 알고리즘과 같은 최적화 기법이 진동 시험 지그의 설계에 적용되었다[4]. 그러나 리브 두께와 같이

이산 수준을 갖는 설계 변수를 다룰 경우, 이러한 기법은 과도한 계산 비용과 긴 해석 시간이 소요되는 한계가 있다[5]. 이에 대한 대안으로 직교배열을 적용할 수 있다. 직교배열은 실험계획법의 일종으로, 최소한의 해석 횟수로 주요 변수의 주효과를 파악할 수 있어 이산 수준 문제에 적합하다[6]. 이를 통해 기존 접근법의 한계를 보완하여 효율적인 경량화를 달성할 수 있다.

본 연구에서는 진동 시험용 지그의 경량화를 위해 직교배열 기반 리브 두께 설계 기법을 제안한다. 우선, 지그를 구성하는 리브의 개수에 따라 사용할 직교배열을 선정하고, 이를 기반으로 해석에 사용할 리브 두께 조합을 결정하였다. 해당 조합을 지그 모델에 반영하여 유한 요소 해석을 수행하였다. 해석 결과를 바탕으로 리브 별 영향도를 산출한 뒤 최종 리브 설계안을 도출하였다. 마지막으로, 도출된 설계안을 검증하기 위해 유전 알고리즘 기반 최적화 결과와 비교하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 그림 1과 같이 세 단계로 수행되었다. 첫째, 지그의 리브 개수에 따라 사용할 직교배열을 선택하였다. 둘째, 유한



[그림 1] 연구 수행 방법

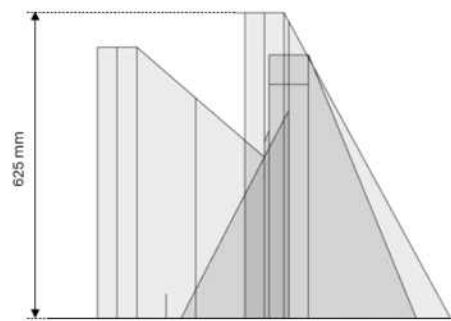
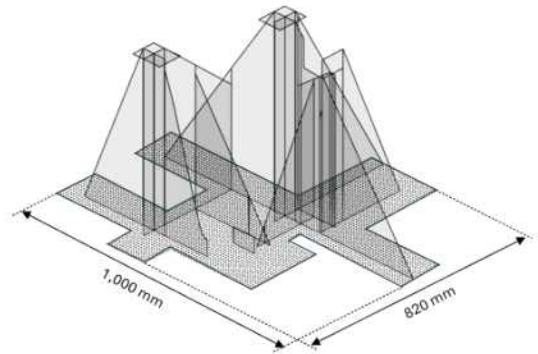
요소 해석을 수행하여 고유진동수와 무게를 도출하였다. 셋째, 유한 요소 해석 결과를 바탕으로 리브 별 영향도를 산출한 뒤 최종 리브 설계안을 도출하였다. 최종 리브 설계안의 검증은 위해 유전 알고리즘 기반 두께 최적화 결과와 비교하였다. 본 연구에서 사용한 진동 시험용 지그는 그림 1과 같다. 해당 모델은 가진 시험기와 연결되는 베이스, 램프와 체결되는 마운팅 플레이트와 14개의 리브로 구성되어 있다. 베이스에는 가진 시험기와 체결하기 위한 볼트 구멍이 100 mm 간격으로 배치되어 있다.

2.1 직교배열 선정

이 단계에서는 리브 두께 변화가 지그의 구조 성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 리브의 개수에 따라 사용할 직교배열을 선정하였다. 본 연구에서는 각 리브의 두께를 기존 두께와 감소 두께로 총 두 가지 수준으로 설정하였으므로 수준은 2이다. 또한 모든 리브의 두께를 변수로 고려하였기 때문에 요인의 수는 총 14이다. 이러한 조건에서 사용할 수 있는 표준 직교배열 중 최소 실험 수를 갖는 배열은 L16이다. 해당 직교배열은 2수준 요인을 15개까지 다룰 수 있다. 따라서 본 연구는 표 1과 같이 L16 표준 직교배열을 사용하였다.

2.2 유한 요소 해석

이 단계에서는 직교배열 기반으로 결정된 두께 조합을 적용하여 진동 시험용 지그의 유한 요소 해석을 수행하고 각 설계안의 성능을 평가하였다. 해당 단계는 유한 요소 모델



[그림 2] 진동 시험용 지그

생성과 해석 수행의 두 과정으로 구성된다.

모델 생성 단계에서는 진동 시험용 지그를 대상으로 평균 10 mm 요소 크기를 가지는 SHELL 181 요소를 사용하여 유한 요소 모델을 생성하였다. 베이스와 기존 리브의 두께는 각각 25 mm와 20 mm로 설정하였으며, 물성치는 다이캐스팅 합금(Young's modulus: 69,650 MPa, Poisson's ratio: 0.33, density: 2.75 g/cm³)을 적용하였다. 또한 베이스와 가진

시험기의 결합 부위에는 고정 조건(Fixed support)을 부여하였고, 시험체의 결합을 모사하기 위해 마운팅 플레이트와 질량 중심을 RBE3 요소로 연결하였다[7].

직교배열을 바탕으로 각 리브의 두께를 부여하여 모드 해석을 수행하였다. 직교배열의 열은 리브를, 행은 두께 조합을 나타낸다. 각 행에서 값이 0인 해당 리브의 두께를 15 mm로 감소시켰으며, 값이 1인 경우 기존 두께를 유지하였다. 모든 조합에 대해 모드 해석을 수행하여 고유진동수와 질량을 산출하였다.

2.3 최종 두께 설계안 결정

이 단계에서는 해석 결과를 바탕으로 리브 두께에 따른 영향도를 분석하고 최종 두께 설계안을 결정하였다. 이를 위해 우선 각 리브의 영향을 정량화하였다. 리브의 영향도를 비교하기 위해 우선 각 요인 수준에서 평균 응답값을 계산하였다. 평균 응답값은 식 1과 같이 계산된다.

$$\bar{y}_{k,l} = \left(\sum_{j=1}^{m_{k,l}} y_j \right) / m_{k,l} \quad (1)$$

위 식에서, $\bar{y}_{k,l}$ 은 요인 k 의 수준 l 에서 y 의 평균 응답값이며, $m_{k,l}$ 은 해당 수준에서의 실험 횟수이다. 이를 통해 두께별 평균 고유진동수와 질량을 도출하였다. 두께 변화에 따른 리브의 영향도는 식2와 같이 계산된다.

$$R = \frac{(f_{ref} - \bar{f}) / f_{ref}}{(m_{ref} - \bar{m}) / m_{ref}} \quad (2)$$

위 식에서, f_{ref} 와 m_{ref} 는 모든 리브가 기존 두께일 때의 고유진동수와 질량이며, \bar{f} 와 \bar{m} 은 각 두께 수준에서 고유진동수와 질량의 평균값이다. 영향도는 질량 감소에 대한 고유진동수 감소를 나타내며 단위 질량 감소당 성능 유지 효율을 평가하는 정량적 지표로 사용된다. 영향도가 가장 작은 리브부터 순차적으로 두께를 줄여 최종 설계를 결정하였다. 이후 도출된 최종 설계안에 대해 모드 해석을 수행하여 고유진동수와 질량을 산출하였다. 유전 알고리즘 기반 최적화를 통해 도출된 설계안의 해석 결과를 최종 설계안의 해석 결과와 비교하여 경량화 효과와 성능을 평가하였다.

2.4 유전 알고리즘 기반 리브 두께 최적화

최종 설계안의 검증을 위해 동일 조건에서 유전 알고리즘을 적용하였다. 설계 변수는 각 리브의 두께로 정의되며 15 mm 또는 20 mm의 이산값을 가지도록 제한하였다. 목적함수는 각

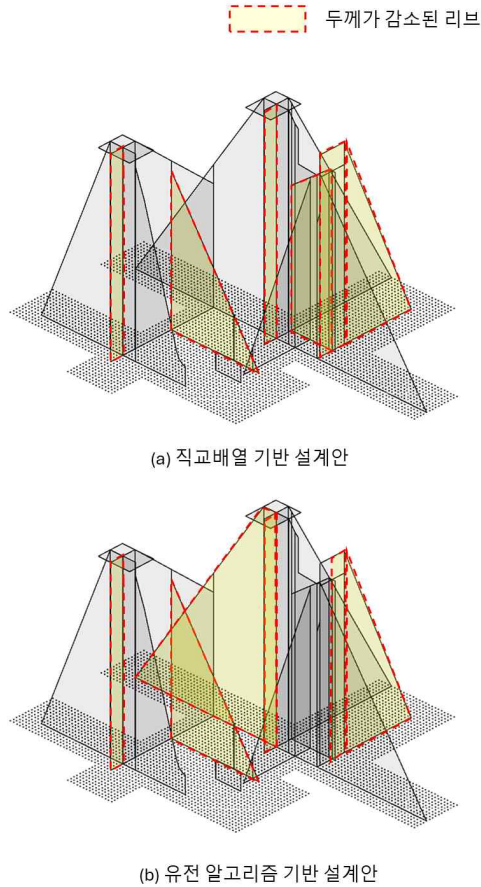
실험 수	요인														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1
4	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0
5	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1
6	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0
7	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0
8	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1
9	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
10	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0
11	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0
12	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
13	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
14	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
15	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	0

리브의 두께, 표면적, 밀도의 곱을 합산한 총 리브 질량을 최소화하는 것이다. 제약조건으로 고유진동수가 직교배열 기반 설계에서 얻은 값 이상만 최적화에 사용되도록 설정하였다. 유전 알고리즘 기반 리브 두께 최적화에 사용한 문제 정식화는 식 3과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Find} && \mathbf{t} \\ & \text{Minimize} && f(\mathbf{t}) = \sum_{i=1}^N A_i t_i \rho \\ & \text{Subject to} && g(\mathbf{t}) = f_{oa} - f_t \leq 0 \\ & && t_i \in \{15, 20\} \\ & && i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 A_i 는 리브 i 의 표면적, t_i 는 리브 두께, ρ 는 재료 밀도, N 은 리브 총 개수, f_t 는 두께가 변경된 모델의 고유진동수, f_{oa} 는 직교배열 기반 최적화에서 도출된 설계안의 고유진동수를 의미한다. 제약조건을 위반하는 설계는 높은 페널티를 부여하여 진화 과정에서 선택될 가능성이 작아지도록 하였다.

유전 알고리즘 기반 최적화를 통해 얻은 결과를 비교하여 직교배열 기법의 성능을 평가하였다. 두 기법으로 도출된 최적 리브 두께 설계의 고유진동수와 질량을 비교하여 성능을 검증하였다. 또한, 두 기법이 선택한 리브 위치를 비교하여 직교배열 결과의 신뢰성을 검증하였다. 마지막으로, 각 최적화 과정에 요구된 해석 횟수와 계산 시간을 비교하여 효율성을 평가하였다.



[그림 3] 두 기법을 통해 도출된 최종 두께 설계안
 : (a) 직교배열 기반 설계안, (b) 유전 알고리즘 기반 설계안

3. 결론

그림 3은 직교배열 및 유전 알고리즘 기반 설계 기법을 사용하여 도출된 최종 두께 설계안을 보여준다.

직교배열 기법을 적용한 경우, 좌측에서는 짧게 좌측으로 뺀 리브와 우측으로 뺀 리브에서 하단 보강 리브가 두께 감소 리브로 선정되었다. 우측에서는 하단부의 우측 리브와 상단부로 뺀 리브가 두께 감소 리브로 선택되었으며, 전반적으로 좌측보다 우측에 두께 감소 리브가 집중된 양상을 보였다.

유전 알고리즘 기반 설계 기법에서도 동일하게 좌측의 짧은 리브와 우측으로 뺀 리브에서 하단 보강 리브가 감소 대상으로 선정되었으며, 이는 직교배열 설계안과 일치한다. 또한 우측 상, 하단 리브 역시 감소 대상으로 결정되어, 두 기법 모두 좌측보다 우측에 두께 감소 리브가 주로 분포함을 확인할 수 있었다. 이를 통해 두 기법 모두 고유진동수와 질량 측면에서 유사한 감소 경향을 보였으며, 결과적으로 비슷한 수준의 최종 설계안을 도출하는 것을 확인하였다.

유전 알고리즘 기반 최적화는 상당히 많은 해석 반복과 긴 계산 시간이 요구된 반면, 직교배열 기반 설계 기법은 훨씬 적은

계산 비용으로 유사한 결과를 확보할 수 있었다. 따라서 두 방법 모두 유사한 리브 감소 패턴과 성능을 보였으나, 직교배열 기반 설계 기법은 유전 알고리즘 대비 1% 미만의 계산 비용으로 유사한 설계를 확보할 수 있는 효율적 대안임을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 문현식, 박성영, “자동차용 파킹 락 기어의 내구시험과 시험 지그 개발”, 한국산학기술학회논문지, 제 19권 제 6호, pp. 104-109, 6월, 2018년.
- [2]. 허광희, 전준용, “준능동형 실시간 Feedback 진동제어시스템의 성능평가.”, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 제 15권, 제6호, pp. 85-94, 1월, 2011년.
- [3] 김중선, 권대규, 안석영, “항공기 엔진용 Long Rod의 생산성 향상을 위한 전용 지그 개발”, 한국공정기술학회지, 제 22권 제 9호, pp. 73-79, 9월, 2023년.
- [4] 백종혁, 백지아, 김정진, “다양한 차량 헤드램프 진동 시험용 지그에서의 최적설계 적용 가능성 평가”, 한국산학기술학회 논문지, 제 26권 제 4호, pp. 35-43, 4월, 2025년.
- [5] 김선호, 박규병, 최동훈, 근사모델 기반 효율적인 탐색방법을 통한 이산변수 최적화 알고리즘. 대한기계학회 춘추학술대회, 11월, 2017년.
- [6] 이정욱, 박준성, 이권희, 박경진, “직교배열표를 이용한 이산 공간에서의 최적화 알고리즘 개발”, 대한기계학회 논문집 A 권, 제 25권 제 10호, pp. 1621-1626, 10월, 2001년.
- [7] 배정빈, 김정진, “최적설계 기반 십자 단면 형상의 진동 시험용 기동형 지그의 높이별 진동 성능 분석” 한국기계가공학회 지, 제23권, 제 6호, pp. 66-73, 6월, 2024년.