

실험에 적합한 직교 배열표의 자동 생성 및 2 단계 구조 최적화에의 적용

이 수 범[†]·곽 병 만^{*}

(2003년 3월 10일 접수, 2003년 8월 14일 심사완료)

Automatic Generation of Orthogonal Arrays and Its Application to a Two-Step Structural Optimization

Soo Bum Lee and Byung Man Kwak

Key Words : Orthogonal Array(직교 배열표), Taguchi Method(다구찌법), Finite Difference Method(유한 차분법), Two-Step Optimization(2 단계 최적화)

Abstract

In this paper, an approach of automatically finding and modifying the most appropriate orthogonal array (GO) is suggested and applied to a new structural optimization procedure with two steps. GO is motivated by the situation where finding a proper orthogonal array from the tables in the literature is difficult or impossible. Now the Taguchi method is made available for various numbers of variables and levels. In the two-step structural optimization, the Taguchi method equipped with GO and a shape optimization using the finite differencing method is consecutively applied. The existence or non-existence of an element can be taken as a factor level and this feature is utilized finding the best topology from a set of potential topologies suggested from the user's expertise. This greatly enhances applicability and one can expect a better result than the case in which each step is applied independently because these steps are complementary each other.

기호설명

n : 설계 변수의 개수
 i : 설계 변수 색인
 L_i : i 번째 설계 변수의 수준수

1. 서 론

다구찌의 직교 배열표(이하 직교표)를 이용한 인자 설계 기법은 설계 변수의 최적 조합을 찾아내는 효과적인 방법으로써 다방면의 산업체에 적용되어 여러 성공 사례와 함께 그 실효성이 입증되고 있다. 단, 설계 변수의 수준 조합 및 실험 목적에 적합한 직교표를 선택하고 실험을 계획하는 과정은 설계자가 그 방법을 숙지하고 있어야

한다. 그러나 실험에 적합한 직교표를 찾는 방법에 대해 자세히 설명하고 있는 저서 및 논문이 거의 없는 형편이어서 다구찌의 직교표를 사용하려는 설계자들에게 하나의 걸림돌로 작용하고 있다. 특히 지금까지의 다구찌법 응용 사례들을 보면, 표준 직교표에 설계 변수의 개수 및 수준을 맞춰가는 식의 실험 계획이 많이 이루어지고 있어서 정작 설계자들이 살펴보고자 하는 설계 변수 및 수준의 설정이 그리 자유롭지 못하다.

본 연구에서는 이러한 제약을 극복하는 방안으로, 설계자가 파악하고자 하는 설계 변수의 개수 및 수준 설정을 그대로 반영할 수 있도록 표준 직교표를 자동으로 선택하고 변형하여 주는 알고리즘을 제안하고, 이를 기계 구조의 위상 설계에 도입하여 새로운 구조 최적화 방법을 제시하였다. 즉, 구조에 보강재를 삽입하거나 새로운 구멍을 생성하는 등 구조의 위상을 변경할 수 있는 몇 가지 안을 설계자가 가지고 있을 때, 변경 후보 안들의 최적의 조합을 제시하여 줄 수 있다는 점

[†] 책임저자, 회원, 한국과학기술원 대학원 기계공학과
 E-mail : sblee@khp.kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3051 FAX : (042)869-8270

^{*} 회원, 한국과학기술원 기계공학과 석좌교수

에서 이 알고리즘의 실효성은 크다고 할 수 있다.

1.1 관련 연구

다구찌의 직교표를 이용한 설계들⁽¹⁻⁴⁾은 앞서 지적인 바와 같이 표준 직교표를 그대로 사용하였다. 특히 Chen⁽¹⁾은 다구찌법을 두 번 이용하되, 여러 설계 변수 중 첫번째 설계에서는 주요 설계 변수들을 걸러내고 두번째 설계에서는 이 주요 변수들만을 가지고 다시 다구찌법을 적용하였다. Lim⁽²⁾은 전조합법(FFD, full factorial design)과 다구찌법의 필요한 실험 횟수를 비교하여 다구찌법의 효율성을 강조하였다.

1.2 연구 목적

본 연구에서는 앞서 설명된 직교표 생성 알고리즘을 구축, 불연속 최적화 과정이 포함된 새로운 구조 최적화 방법에 적용하고 실제 최적화를 통해 그 실효성을 입증하고자 한다.

2. 직교표의 자동 변형

다구찌법은 직교 배열을 이용하여 실험을 진행하고 다구찌는 이를 위해 표준 직교 배열을 제안하고 이들 중 적절한 직교표를 선택할 것을 추천하고 있다. 하지만 많은 경우에 있어서 설계 변수의 개수 및 그들의 조합에 정확히 일치하는 직교표가 없기 때문에 직교표를 현재 설계 변수의 조합에 맞도록 변형하여야 한다. 직교표를 변형하는 방법으로는 의수준법, 조합법, 다수준 작성법 등이 있는데⁽⁵⁾ 이들 방법을 적용하여 실험에 적합한 직교표를 만들 수 있지만 때 설계마다 알맞은 직교표를 만드는 과정은 매우 번거롭고 때로는 실패하기도 한다. 따라서 Lee⁽⁶⁾는 설계 변수의 개수 및 그 수준에 알맞게 직교표를 선택하고 필요에 따라 이를 자동적으로 변형해주는 방법으로 GO(automatic Generation of Orthogonal array)를 제안하였다. 본 연구에서는 기존에 제안된 GO의 문제점을 보완하고 알고리즘을 다소 수정하여 그 완성도를 높이는 데 중점을 두었다. GO가 직교표를 선택하고 변형하는 일련의 절차를 설명하면 다음과 같다.

2.1 실험 자유도의 계산

실험 자유도는 교호작용을 고려하지 않는 경우,

$$1 + \sum_{i=1}^n (L_i - 1) \quad (1)$$

와 같이 계산된다. 여기서 i 는 설계 변수 색인, n 은 설계 변수의 개수, L_i 는 i 번째 설계 변수의 수준수이다. 실험의 자유도는 표준 직교표를 선

택할 때 사용되며 이때 실험의 자유도가 직교표 자유도 이하가 되도록 선택하여야 한다.

2.2 직교표의 선택

표준 직교표는 직교 배열의 행수와 수준 조합에 따라 $L_4, L_8, L_9, L_{12}, L_{16}, \dots, L_{81}$ 등으로 그 이름이 정해지는데 총 18여 종류가 있다. 이들 중 앞서 계산된 자유도 이상의 행수를 가진 직교표 중 가장 적은 행수를 가진 직교표를 우선 고려 대상으로서 선택하여 낭비되는 자유도의 최소화하도록 한다.

2.3 선택된 직교표의 사용 가능 여부 판정

2.2 절에서 실험 자유도보다 여유를 두어 직교표를 선택했지만, 현재 실험에 적합하지 않은 직교표가 선택되었을 가능성도 있으므로 사용 가능 여부를 확인해 보아야 한다. 예를 들어 총 4개의 설계 변수 중 A가 2수준이고 B, C, D가 3수준이며 교호 작용을 고려하지 않는다면 자유도는 $1+(1+2+2+2)=8$ 이 되고 최초로 고려할 직교표로서 L_8 이 선택된다. L_8 은 2수준 열 7개로 구성되어 있으므로^(5,7) 다수준 작성법을 사용하여 직교표를 변형할 필요가 있다. 그러나 2수준 열을 합쳐서 더 많은 수의 수준을 다룰 수 있는 새 열을 만들기 위해서는 최소한 3개의 열을 합쳐야 하므로 이 직교표의 경우 현재 실험에 알맞은 직교표의 변형이 불가능하다. 이러한 방식으로 현재 선택된 직교표가 사용 가능한지 여부를 판단하여, 불가능한 경우 사용 가능한 직교표를 찾을 때까지 2.2~2.3 절의 내용을 반복한다.

2.4 설계 변수의 배치 및 직교표의 변형

직교표의 변형 절차를 Fig. 1에 실었다. Fig. 1의 첫번째 회색 영역은 기존의 표준 직교표를 변형 없이 그대로 사용할 수 있는 경우로써, 두번째 회색 영역인 직교표 변형 절차를 거치지 않는다. 단, 본 연구에서 제시한 직교표 변형 절차는 교호작용을 고려하지 않는 실험 계획을 위한 것으로, 설계 변수 배치에 예외 없이 적용이 가능하도록 배려하였다.

GO는 기본적으로 가장 큰 수준을 가진 설계 변수를 우선 배치하여 설계 변수들이 모두 적절한 열에 배치될 때까지 배치 작업을 반복한다. 만일 배치 작업 도중 직교표의 열이 모자라는 경우, 현재 직교표보다 많은 자유도를 가진 것들 중 최소의 자유도를 가진 직교표를 선택하여 가장 큰 수준을 가진 설계 변수부터 다시 배치작업을 수행한다.

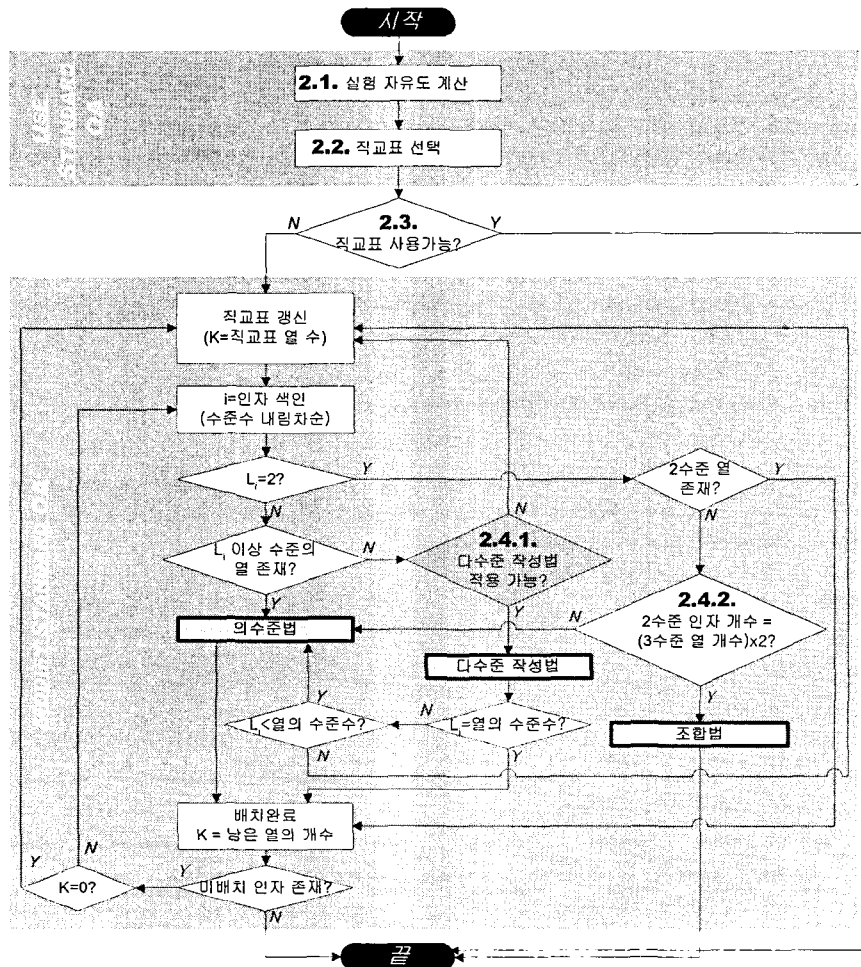


Fig. 1 The flowchart of GO algorithm

Fig. 1 을 참고하면 GO 는 의수준법을 가장 먼저 시도하고, 열의 수준수가 현재 설계 변수를 배치하기에 충분하지 않으면 다른 방법들을 시도함을 알 수 있다. 다수준 작성법을 적용할 때 유의 사항 및 조합법이 적용되는 경우를 설명하면 다음과 같다.

2.4.1 다수준 작성법 가능 여부 판정

다수준 작성법을 적용하기 위해선 선점도나 교호작용 표를 참조하여 서로 교락되는 열들을 선택, 이들 중 적절한 열들을 합치고 나머지 열은 지우는 절차를 거쳐야 한다. 그러나 다구찌가 제시한 18 종의 직교배열표^(5,7) 중에는 (1)다수준 작성법이 불가능한 직교표: $L_4, L_9, L_{12}, L_{17}, L_{25}, L_{36}$, (2)1 번만 합칠 수 있는 직교표: $L_{18}, L'_{32}, L'_{36}, L_{50}, L_{54}$, (3)선점도나 교호작용 표를 이용하여 2 번 이상 합칠 수 있는 직교표: $L_8, L_{16}, L_{27}, L_{32}, L_{64}, L'_{64}$,

L_{81} 의 세 종류가 있으므로 이들을 그룹화하여 다수준 작성법의 적용 가능 여부를 판정하여야 한다. 즉, 2 번 이상 합칠 수 있는 직교표라 할지라도 선점도 및 교호작용 표를 계속 점검해가면서 새로 합쳐질 열들이 기존에 합쳐진 열들과 교락되지 않는지를 매 절차마다 검토해야 하고, 1 번만 합칠 수 있는 직교표는 합칠 수 있는 열들이 이미 추천되어 정해져 있으므로^(5,7) 이외의 열을 합치지 않도록 해야 한다.

2.4.2 조합법

조합법은 남아있는 3 수준 열 개수의 두 배에 해당하는 2 수준 설계 변수들이 남아 있을 경우에만 적용되도록 하였다. 예를 들어 3 수준 열이 1 개, 2 수준 설계 변수가 2 개 남아 있을 경우엔 조합법이 적용되지만, 3 수준 열이 2 개, 2 수준 설계 변수가 2 개 남아 있을 경우엔 의수준법이 적

용된다. 이상의 규칙들은 GO 알고리즘 내부에 모두 포함되어 프로그래밍 되어 있다.

2.5 비교 검토

본 연구에서는 GO의 성능을 시험하기 위해 자동으로 직교표를 선택하여 변형해 주는 쉐어웨어인 Qualitek-4와 그 성능을 비교해 보았다. Table 1은 고려해 보고자 하는 임의의 설계 변수 조합들에 대해서 GO와 Qualitek-4가 어떤 직교표를 선택하여 변형하였는지에 관한 내용으로, 2수준부터 5수준까지 다양한 설계 변수 조합을 시도해 보았다.

Table 1과 같이 Qualitek-4에 비해 GO가 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. 그 까닭은 Qualitek-4는 예상되는 모든 설계 변수의 조합을 프로그램에 입력하였기 때문에 이들 중 없는 조합을 사용자가 입력하면 적절한 직교표의 변형 형태를 제시하지 못하는 반면, GO는 2.4절에서 설명된 체계적인 알고리즘에 의한 직교표 변형 과정을 거치기 때문이다. 이러한 이유로 인해 GO는 다양한 수준끼리의 설계 변수 배치에도 유용한데, 일례로 Qualitek-4는 4수준 설계 변수까지만 고려할 수 있는 반면 GO는 8수준 설계 변수까지 고려할 수 있다.

지금까지 직교표의 자동 선택 및 변경 알고리즘인 GO를 살펴보았다. GO는 여러 직교표 변형 방법들 중 어떤 방법을 먼저, 어떻게 써야 할 것인지를 자동으로 결정해 준다. 또한 GO는 경우에 따라 직교표 변형 방법 중 단지 어느 한가지 방법만 이용하지 않고 두 가지 이상의 방법을 효과적으로 혼용함으로써, 자유도 낭비를 최소화하도록 직교표를 변형할 수 있다.

3. 2 단계 구조 최적화에서의 적용

이상 설명된 GO를 이용하여 엔진 브라켓 최적화 문제에 적용하여 보았다. 엔진 브라켓은 차체와 엔진을 고정시켜주기 위한 브라켓의 일종으로 이들 중 최적화하고자 하는 엔진 브라켓은

판금과정을 통해 만들어진 얇은 판 구조의 브라켓이다.

Fig. 2는 이 브라켓의 캐드 모델과 유한 요소 모델로, 바닥쪽의 구멍에 볼트가 삽입되어 엔진과 체결되고 옆 판에 긴 볼트를 삽입, 차체 쪽의 고무 부싱과 연결된다. 특히 옆판에 삽입되는 긴 볼트는 유한 요소 모델상에 보 요소로써 모델링되었고 나머지 브라켓 본체 부분은 사각형 셀 요소로 모델링 되었다.

이 브라켓은 구조 자체의 강성을 높이기 위하여 1차 고유 진동수를 크게 하는 설계가 선호된다. 특히 이러한 판 구조의 브라켓은 주조에 의해 만들어진 구조에 비해 응력 집중에 의한 변형 및 파괴 가능성이 낮으므로 본 최적화에서는 응력 해석을 배제하고 고유치 해석만을 통해 최적화를 수행하였다.

3.1 모델의 제약조건

본 모델은 판금 공정에 의해 만들어지는 브라켓으로 판의 두께는 이미 준비된 재료를 사용하기 때문에 임의로 두께 변경이 어렵다. 또한 아래 판쪽의 두 구멍은 엔진에 볼트 체결되는 부위로서 이 구멍의 위치 및 개수는 변경시 엔진쪽 체결 부위 또한 변경되어야 하기 때문에 변경하지 않는 것이 좋다. 결국 체결 부위와 판의 두께만을 제외하면 임의로 변경 가능하도록 설계 변수를 지정할 수 있다

3.2 2 단계 구조 최적화 방법의 필요성

비선형 최적화 기법 중 순차 선형 계획법(SLP: Sequential Linear Planning)을 이용하여 이 구조물의 1차 고유진동수를 최대화하는 형상최적화를 수행하여 보았다. 또한 최적화 과정에서 필요한 민감도 값은 유한 차분법(FDM: Finite Difference Method)을 이용하여 계산하였고 이때 사용된 설계 변수의 섭동은 0.1%이다.

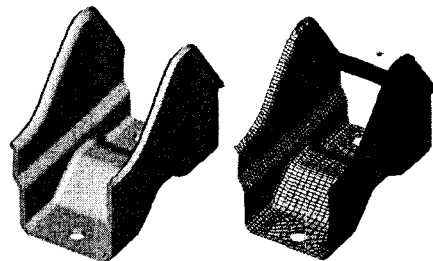


Fig. 2 CAD and FE model of rear roll bracket

Table 1 Comparison of experiment design

GO	Level Combination	Qualitek-4
L ₁₈ (2×3 ⁷)	2 ³ ×3 ⁵	-
L ₁₆ (2 ¹⁵)	2×3×4	-
L ₁₆ (2 ¹⁵)	2×3 ² ×4	-
L ₁₆ (2 ¹⁵)	2 ⁵ ×3 ² ×4	L ₁₆ (2 ¹⁵)
L ₂₅ (5 ⁶)	2×3×4×5	-

Table 2 Design variables and side constraints

Design variables	Lower bound	Initial value	Upper bound
①	2.0	6.2	11.0(mm)
②	30.0	50.0	60.0(mm)
③	40.0	56.0	67.0(°)
④	31.0	33.0	36.0(mm)
⑤	72.0	83.2	85.0(mm)

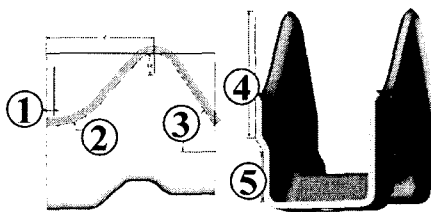


Fig. 3 Design variables

고려하고자 하는 설계변수는 Fig. 3 과 같이 옆판의 형상 및 단면 굴곡을 결정하는 5 개의 치수들로서 이들의 상한, 하한은 Table 2 와 같다.

초기 모델의 1 차 고유 진동수는 255.0Hz 이고 진동 모드는 두 옆판이 같은 방향으로 진동하는 형상이다.

최적화 결과, 총 4 번의 측차를 거쳐 255.7Hz 로 목적함수가 개선되긴 하였지만, 이 결과는 향상 폭이 그리 많지 않고, 개선의 결과가 실제 부품에 그대로 반영될지 또한 미지수이다. 이처럼 브라켓의 치수 및 형상 최적화로는 만족할 만한 목적함수의 개선을 이루기 어려운 경우가 있다. 이에 따라 브라켓에 보강재를 추가하거나 구멍을 뚫는 등 치수 및 형상 최적화를 통해 할 수 없는 설계 개선안을 제시할 필요성이 제기되었는데, 본 연구에서는 이러한 단계를 준 위상 최적설계 (pseudo topology optimization) 단계라 명명하고 치수 및 형상 최적화 단계 이전에 수행하여 목적함수의 괄목할 만한 개선을 시도하였다.

3.3 2 단계 구조 최적화의 개념

2 단계 구조 최적화를 Fig. 4 에 개략적으로 표현하였다.

1 차 준 위상최적설계 단계에서는 보강재, 구멍 등을 첨가하여 보고 이들의 유무에 따른 목적함수의 향상도를 파악하여 구조물의 대략의 위상을 결정한다. 이 설계과정은 일종의 개념 설계 단계로, 형상 및 치수 설계를 통해서 는 설계할 수 없는 것들이다. 또한 다구찌의 직교표를 이용하면 불연속 최적화가 가능하므로, 형상의 유무 혹은

Table 3 Design variables and description

Design variables	Level 1	Level 2	Level 3
①	o	x	-
②	x	o(2-1)	o(2-2)
③	x	o(3-1)	o(3-2)

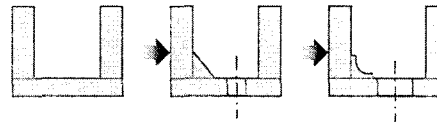


Fig. 4 Two-step optimization

은 형상의 대략의 위치 등을 결정하는 데 적합하다. 이 1 차 설계 단계에서 GO 가 사용된다.

2 차 설계 단계에서는 치수 및 형상 최적 설계 단계로서 세부 치수 및 형상 최적화를 마무리하는 단계이다. 이 1 차 설계 및 2 차 설계는 상호 보완적으로 작용하여 각각 설계 단계의 단점을 보완하고 있음을 알 수 있다.

3.4 1 단계 - 준 위상최적설계

다구찌법을 이용한 1 차 최적 설계에 고려할 설계 변수를 Fig. 5 에 실었다. Fig. 5 에서 ①은 옆판의 꺾임 리브(rib), ②와 ③은 각각 브라켓 안쪽에 고정될 앞 리브 및 뒷 리브로서 보강재의 역할을 한다. 꺾임 리브의 경우 기존 초기 모델에 있던 형상이지만 보강재는 초기 모델에 없었던 형상이다. Fig. 5 에서 보강재 부분은 보강재가 놓일 후보 위치를 나타낸 것으로서, 설계 변수 ②에 해당하는 앞 리브는 (1)보강재를 삽입하지 않거나 (2)2-1 위치에 놓거나 (3)2-2 위치에 놓을 수 있는 3 수준의 설계 변수로서 고려되었다. Table 3 에 각 설계 변수와 수준을 자세히 표시하였다.

3.4.1 직교표 생성 및 실험 결과

Table 3 에 따르면 현재 설계 변수의 개수는 3 개이며 각각 2 수준, 3 수준, 3 수준이다. 따라서 자유도는 1+(1+2+2)=6 이 되며 6 보다 큰 가장 최소의 행 수를 가진 L_8 을 우선 적용할 수 있는 표준 직교표로써 고려한다. L_8 직교표는 7 개의 2 수준 열들로 구성된 표로써 3 수준 설계 변수를 다루려면 다수준 작성법 및 의수준법을 써서 3 수준 열을 새로 만들어야 한다. 그러나 L_8 표준 직교표는 서로 교락을 일으키지 않는 독립된 2 개의 3 수준 열을 만드는 것이 불가능하므로, 그

다음으로 행 수가 많은 L_9 를 고려한다. L_9 직교표는 Table 4 과 같이 4 개의 3 수준 열들로 구성 되었으므로 ②번 및 ③번 설계 변수는 임의의 열에 배치하고 ①번 설계 변수는 나머지 남은 두 열중 한곳에 배치하되 의수준법을 써서 Table 4 와 같이 실험을 구성하였다. 이 일련의 절차는 GO 에 의해 자동적으로 수행되며 이미 프로그래밍화 되었기 때문에 사용자는 직교표에 대한 내용을 전혀 모르더라도 무리 없이 실험을 자동적으로 계획할 수 있다. 또한 이 문제에서는 각 보강재의 후보 위치를 2 곳으로만 지정했지만, 더 많은 후보 위치를 지정하여 수준수가 많아지더라도 GO 알고리즘을 이용하여 자유도의 낭비를 최소화 하도록 실험에 적합한 직교표를 선택하고 수정할 수 있다.

Table 4 의 괄호 표시는 배치된 설계 변수의 색 인으로써 예를 들면 설계 변수 ①에 해당하는 꺾임 리브는 3번 열에 배치되었다. 또한 설계 변

수 ①은 2 수준이므로 이에 맞게 3 번 열에 의수준법이 적용되어 수준 3 이 수준 1 로 조정되어 직교표가 변형되었음을 알 수 있다. 이 실험에서 4 번 열은 사용되지 않았다. 이 직교표에 따라 총 9 번의 실험 결과를 유한요소법을 이용하여 도출하였는데, 이렇게 다구찌의 표준 직교표를 이용하면 전조합법을 이용했을 때 필요한 실험 횟수 ($2 \times 3 \times 3 = 18$)에 비해 훨씬 적은 횟수의 실험으로도 결과 도출이 가능하다. 실험 결과 역시 Table 4 에 나타내었다.

3.4.2 평균분석

평균 분석 결과를 Table 5 및 Fig. 6 을 통해 나타내었다. Table 5 및 Fig. 6 에서 알 수 있듯이 최적 수준은 ①꺾임 리브는 제거하고 ②앞 보강재는 앞쪽에, ③뒷 보강재는 뒤쪽에 배치하는 것이 목적함수인 구조의 첫번째 고유진동수를 높이는 데 유리한 것을 알 수 있다.

Table 4 Modified L_9 orthogonal array and experiment results

Expt. No.	Column(design variable)				Results
	1(②)	2(③)	3(①)	4	
1	1	1	1	1	254.90
2	1	2	2	2	343.39
3	1	3	3→1	3	297.28
4	2	1	2	3	329.13
5	2	2	3→1	1	310.23
6	2	3	1	2	319.57
7	3	1	3→1	2	277.30
8	3	2	1	3	296.31
9	3	3	2	1	377.49

Table 5 ANOM table

Overall mean of experiment results			311.7
Design variables	Level	Contribution	Description
①	1	-19.14	x
	2	38.27	
②	1	-13.21	o(2-1)
	2	7.91	
	3	5.30	
③	1	-24.62	o(3-2)
	2	4.91	
	3	19.71	

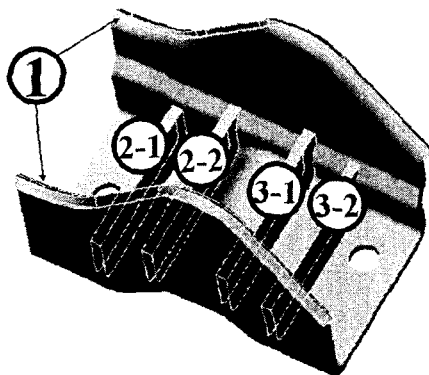


Fig. 5 Design variables at the first design step

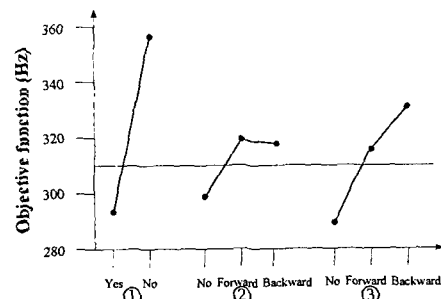


Fig. 6 Effect diagram

Table 6 ANOVA table

Column	Design variable	Dof	SS	MS	F
3	①	1	6590.7	6590.7	177.2
1	②	2	795.5	397.7	10.7
2	③	2	3057.1	1528.5	41.1
Error	-	3	111.6	37.2	
Total		8	10554.8	1319.4	

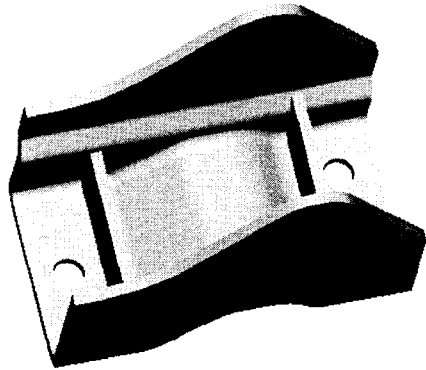


Fig. 7 Optimal design after the first optimization step

3.4.3 분산분석

Table 6 은 분산 분석 결과를 나타낸 표이다. 이 분산 분석을 통하여 각 설계 변수의 목적 함수에 대한 영향도를 파악할 수 있다.

Table 6 를 보면 모든 설계변수가 풀링되지 않고 모두 유의한 것으로 판정되었는데 풀링은 다음의 세 기준을 모두 만족할 때 수행하도록 정하였다.

- 제곱합이 전체 제곱합의 5% 이하인 경우
- 자유도가 전체 자유도의 50% 이하인 경우
- F 값이 해당 자유도의 F 값보다 작은 경우⁽⁸⁾

현재 가장 작은 제곱합은 설계 변수 ②의 795.5 이지만 이는 전체 제곱합의 5%인 527.7 보다 크기 때문에 풀링되지 않았다. 제곱합을 참조하면, 고유 진동수에 ①귀임 리브 - ③뒷 리브 - ②앞 리브의 순으로 영향을 끼친다는 것을 수치로써 알 수 있다.

3.4.4 최적값 예측 및 확인실험

풀링된 설계 변수 없이 모두 유의한 설계 변수로 판정되었으므로 모든 설계 변수의 영향을 최적값 예측에 반영한다. 최적값 예측은 Table 5 의 실험치 전체 평균(311.7)에 유의한 설계 변수의 최적 수준에서의 기여량을 더하여 얻어진다. 만

Table 7 Expected optimum and confirmation

Sum of contribution	Overall mean	Expected optimum	Confirmation experiment
65.9	311.7	377.6	382.2

일 최적 수준의 조합이 기존의 실험 직교표에 존재하지 않을 경우 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서 확인 실험을 거쳐야 한다. 현재 최적 수준인 ②2 - ②2 - ③3 이 Table 4 의 직교 배열에 없으므로 확인 실험을 수행한다. Table 7 에 최적치 예측 및 확인 실험결과와의 비교를 보면, 예상 최적치(377.6)와 확인 실험치의 비교 결과값(382.2)에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 또한 질량 면에서 초기 모델은 1.29kg 이었던 것이 최적 모델에서는 1.34kg 로 큰 변화가 없었는데 이로써 거의 같은 양의 재료로써 효율적인 배치를 이루었음을 알 수 있다. Fig. 7 은 1 차 최적 결과 모델의 형상이다.

3.5 2 단계 - 치수 및 형상 최적 설계

다구찌법을 사용하여 얻은 1 차 준위상 최적설계결과를 순차 선형 계획법을 이용하여 2 단계인 치수 및 형상 최적화를 수행하였다. 2 단계에서는 설계 변수의 연속 최적 설계가 가능하다. 따라서 다구찌법으로 불연속 최적 설계한 결과에 대한 상세 설계를 할 수 있다. 2 차 최적 설계의 설계 변수는 3.2 절에 설명된 바와 동일하며 Fig. 3 에 표시하였다.

다구찌법으로 1 차 최적화 결과 382.2Hz 로 향상된 고유 진동수가 2 단계 절차에서는 410.0Hz 로 더 향상되었다. 한편 2 차 최적화 단계를 통해 모델의 질량은 1 차 최적화 결과의 1.34kg 에서 더 감소한 1.23kg 이 되었다. 이로써, 다구찌법으로 적절히 분배된 질량을 2 차 최적화를 통하여 더욱 효과적으로 분배함과 동시에 고유진동수를 향상시키는 효과를 보았다.

3.6 결과 분석

Fig. 8 은 목적함수의 향상 과정을 도표로 나타낸 것이고, Fig. 9 는 2 단계 구조 최적화 과정을 통한 브라켓의 변화 양상이다.

Fig. 8 에서 알 수 있듯이 형상 최적화만을 적용했을 때에 비하여, 2 단계 구조 최적화를 거쳤을 때 보다 큰 폭으로 향상된 목적함수 값을 얻을 수 있다. 또한 형상 최적화만을 거친 과정은 목적함수의 향상 폭이 거의 없었는데 이는 초기 모델 형상 자체가 국부 최적해였기 때문으로 분석된다. 결국 준 위상 최적 설계 단계를 통하여

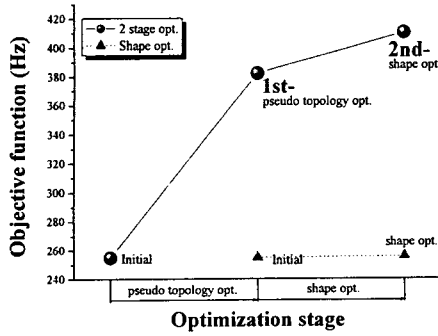


Fig. 8 Comparison of optimization history

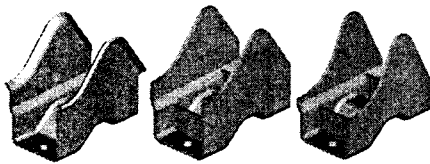


Fig. 9 Change of shape through 2 optimization steps

이 국부 최적해를 벗어난 구조의 효과적인 위상을 새로 결정하고, 이어서 2 차 최적화를 통해 목적함수의 큰 개선을 이룰 수 있었다.

4. 결론

다구찌의 직교표를 이용한 설계 과정은 전조합법에 비해 적은 횟수의 실험으로도 효율적으로 최적 설계 안을 얻을 수 있는 장점으로 인해 많은 사례에 적용이 되어 왔고 그 실효성이 입증된 바 있다. 본 연구에서는 이러한 다구찌법을 쉽게 적용할 수 있도록 자동으로 실험 계획을 구축해 주는 GO 알고리즘을 개발하였다. 특히 GO는 가능한 설계 변수 및 수준의 조합을 일일이 경우의 수를 따지지 않고 일련의 알고리즘으로 구현하였으므로, 향후 직교표를 이용한 설계에 필요한 실험 계획의 지표가 될 수 있다.

또한 GO를 2 단계 구조 최적화에 적용하여 그 실효성을 입증하였다. 2 단계 구조 최적화는 준위상 최적설계와 치수 및 형상 최적설계의 2 단계로 구성하였으며, 각각의 설계 단계는 다른 설계 과정의 단점을 보완하는 방향으로 설계가 진행될 수 있도록 하였다. 또한 최근 많은 연구가

이루어지고 있는 위상 최적설계가 실제 적용 면에 있어서 많은 제약이 있지만, 2 단계 최적화에서는 즉시 설계 변경이 가능한 부분들을 설계 변수의 수준으로 즉시 반영할 수 있기 때문에 더 많은 현장 적용을 기대할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실 사업 '동시공학설계 개념에 의한 통합최적설계시스템'의 일환으로, 현대자동차로부터 지원 받았음을 밝힙니다.

참고문헌

- (1) Chen, R. S., Lee, H. H. and Yu, C. Y., 1997, "Application of Taguchi's Method on the Optimal Process Design of an Injection Molded PC/PBT Automobile Bumper," *Composite Structures*, Vol. 39, No. 3-4, pp. 209~214.
- (2) Joon-Mook Lim, Kil-Soo Kim, Bong-Jin Yum and Hark Hwang, 1996, "Determination of an Optimal Configuration of Operating Policies for Direct-Input-Output Manufacturing Systems Using the Taguchi Method," *Computers ind. Engng*, Vol. 31, No. 3/4, pp. 555~560.
- (3) Lin, T. Y. and Tseng, C. H., 2000, "Optimum Design for Artificial Neural Networks: and Example in a Bicycle Derailleur System," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 13, pp. 3~14.
- (4) Kwang Hyeon Hwang, Kwon Hee Lee, Gyung-Jin Park, Byeong Leul Lee, Yong Chul Cho and Seok Han Lee, 2002, "Robust Design of the Vibratory Gyroscope with Unbalanced Inner Torsion Gimbal Using Axiomatic Design," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 26, No. 5, pp. 914~923.
- (5) Madhav S. Phadke, 1989, *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, pp. 149~174, 285~319.
- (6) Soo Bum Lee and Byung Man Kwak, 2002, "Automatic Generation of Orthogonal Arrays for the Taguchi Method and Applications to Structural Optimal Design," *Proc. The Second China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems*, pp. 299~305.
- (7) Ranjit K. Roy, 1990, *A Primer on the Taguchi Method*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 182~229.
- (8) Douglas C. Montgomery and George C. Runger, 1999, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, John Wiley & Sons, New York, pp. 410~416.