

컴퓨터를 이용한 트랙터-로터리 전동 라인의 최적 설계 (II) - 최적 설계 -

Computer Aided-Optimum Design of Tractor-Rotary Power Driveline (II) - Optimum Design -

류 일 훈*	김 경 옥*	김 대 철**
정회원	정회원	정회원
I. H. Ryu	K. U. Kim	D. C. Kim

ABSTRACT

Using the design variables and conditions reported in the first part of this paper, an analysis and optimum design of the tractor-rotary power driveline were carried out. The optimum design method involved 1 variable, 2 variable and multiple variable analysis performed as requested in the design process. In order to evaluate the effects of the design variables on the power transmission performance a sensitivity analysis were also conducted. The results indicated that the length and link point of the upper link, the upper hitch point of the implement master and the location of the implement input connection affect most significantly the driveline performance. The optimum design improved the performance of an exemplated tractor-rotary driveline by 93% in terms of cosine ratio.

주요용어 (Key Words): PTO 전동라인(PTO Power Driveline), 최적설계(Optimum Design), 최적 설계 변수 (Optimum Design Variable)

1. 서 론

본 연구의 제1보(류 등, 1996)에서는 트랙터-로터리 전동 라인의 분석 방법과 최적 설계를 위한 설계 조건, 목적 변수 및 최적화 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 제1보의 연구 결과를 이용하여 최적 설계의 예로 기존 트랙터-로터리 전동 라인에 대한 최적 설계 과정을 제시하고, 최적 설계와 주요 설계 변수에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 또한, 트랙

터-로터리 전동 라인의 분석과 최적 설계를 수행하기 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

2. 전동 라인의 최적 설계

가. 최적 설계 변수 선정

최적 설계 변수는 일반적으로 설계 변수 중에서 목적 변수에 큰 영향을 주며, 임의로 변화시킬 수 있

* 서울대학교 농업생명과학대학 농업기계전공
** 동양물산 (주) 중앙기술연구소

는 변수를 대상으로 한다. 최적 설계는 설계 조건을 만족하는 이러한 최적 설계 변수의 값을 결정하는 것이라고 할 수 있다.

트랙터-로터리 전동 라인의 최적 설계 변수는 상부 링크의 취부점(C_X, C_Y : Position of an upper link attachment point), 상부 링크의 길이(L5 : Length of an upper link), 로터리의 상부 취부점(UH_X, UH_Y : Upper hitch point of a rotary), 로터리의 하부 취부점(LH_X, LH_Y : Lower hitch point of rotary), 로터리의 유니버설 조인트 연결점(PI_X, PI_Y : Power input position of a rotary)을 결정하는 9가지 변수로 하였다. 그 중 트랙터와 관련된 변수는 C_X, C_Y, L5이며, 나머지 6개 변수는 로터리와 관련된 것이다. 로터리와 관련된 변수는 모두 임의로 변경할 수 있는 변수이며, 상부 링크의 취부점(C_X, C_Y)과 길이 L5도 그 값을 조정할 수 있도록 되어 있다. 따라서, 9개의 최적 설계 변수는 적절한 것으로 판단되며, 필요한 경우에는 몇 가지의 변수를 제외시킬 수도 있다.

나. 최적 설계 방법

최적화는 다음 3가지 방법으로 수행하였다.

(1) 1변수 분석

1변수 분석은 각 최적 설계 변수를 독립 변수로 하여 목적 변수의 변화를 분석한 것이다. 9개의 최적 설계 변수를 하나씩 변화시키면서 목적 변수의 값을 최소화하는 각 최적 설계 변수의 값을 찾는다. 이 방법은 각 최적 설계 변수를 차례로 찾아가는 방법이기 때문에 최적 설계에 접근하면서 먼저 구한 설계 변수의 값을 다시 변화시키는 경우가 많다. 따라서, 최종적으로 최적 설계 변수의 값이 결정될 때까지는 각 설계 변수에 대하여 다수의 반복 과정이 요구된다. 따라서 많은 시간과 노력이 필요하다. 그림 1-그림 9는 각각 9개의 최적 설계 변수의 변화에 따른 목적 변수의 변화를 나타낸 것이다. 분석에 사용된 전동 라인의 기본 치수는 본 연구 제1보의 표 1에서와 같고, 로터리의 수직 이동 범위는 -200 mm

에서 450 mm까지 하였다.

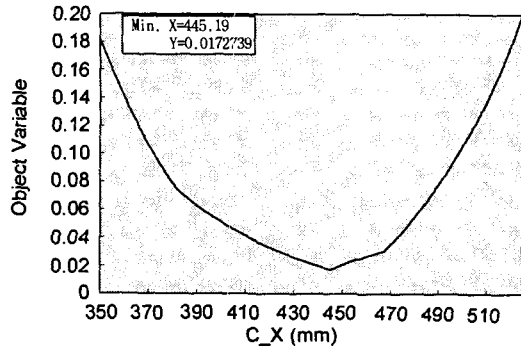


Fig. 1 Object variable vs. optimum design variable C_X (X coordinate of an upper link attachment point).

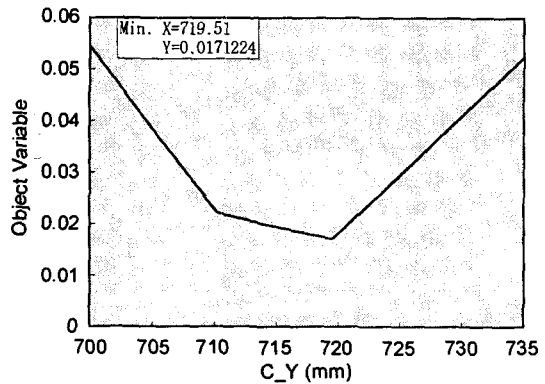


Fig. 2 Object variable vs. optimum design variable C_Y (Y coordinate of an upper link attachment point).

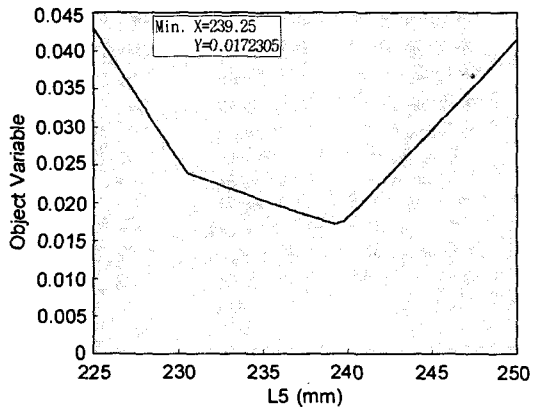


Fig. 3 Object variable vs. optimum design variable L5 (Length of an upper link).

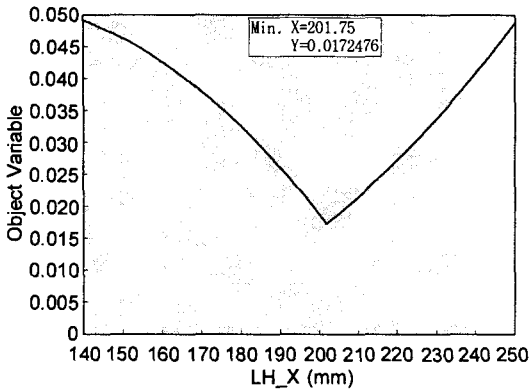


Fig. 4 Object variable vs. optimum design variable LH_X (X coordinate of a lower hitch point).

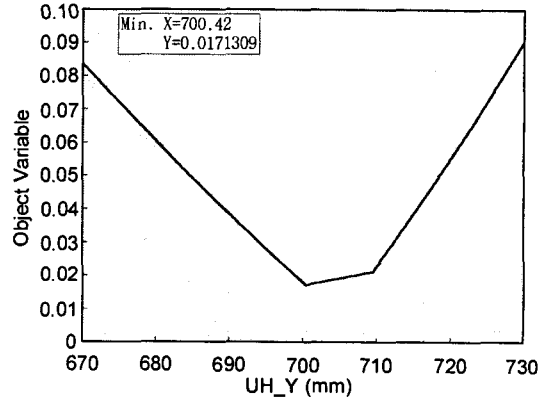


Fig. 7 Object variable vs. optimum design variable UH_Y (Y coordinate of an upper hitch point).

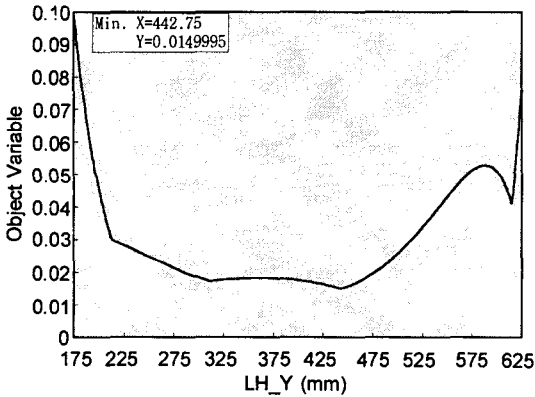


Fig. 5 Object variable vs. optimum design variable LH_Y (Y coordinate of a lower hitch point).

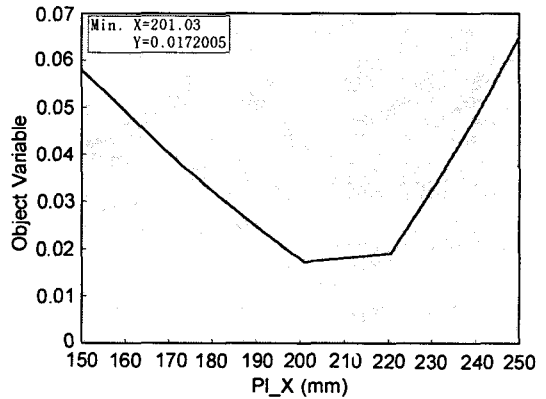


Fig. 8 Object variable vs. optimum design variable PI_X (X coordinate of a power input position).

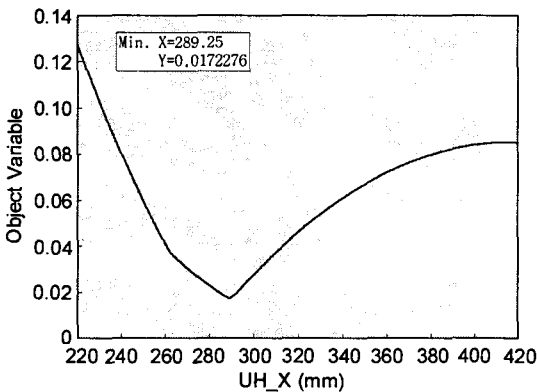


Fig. 6 Object variable vs. optimum design variable UH_X (X coordinate of an upper hitch point).

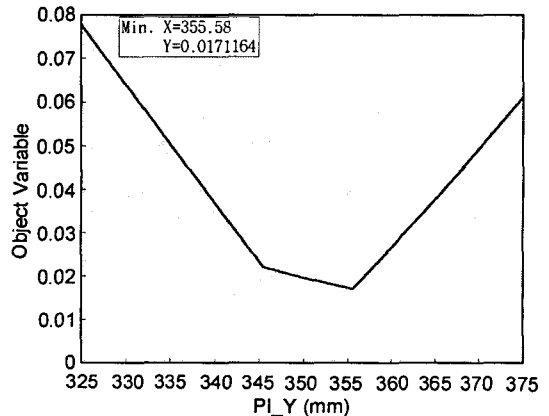


Fig. 9 Object variable vs. optimum design variable PI_Y (Y coordinate of a power input position).

Table 1. Relations between optimum design variables

	C_Y	L5	LH_X	LH_Y	UH_X	UH_Y	PI_X	PI_Y
C_X	◎, P, E	◎, P, E	◎, P, S	×, , S	◎, IP, E	△, IP, E	×, , S	◎, P, E
C_Y		◎, IP, S	△, IP, E	×, , S	◎, IP, E	◎, P, S	△, P, S	◎, IP, S
L5			△, P, E	×, , S	◎, IP, S	◎, P, S	△, P, S	◎, IP, S
LH_X				×, , S	◎, P, S	◎, IP, E	×, , E	◎, P, E
LH_Y					×, -, S	×, -, S	△, IP, E	×, -, S
UH_X						◎, P, E	△, P, E	◎, IP, E
UH_Y							△, IP, S	◎, P, S
PI_X								◎, P, S

상관 형태 : P=비례형, IP=반비례형, | =수직형, - =수평형, E=타원형, S=막대형, ◎=높음, △=경미함, ×=없음

1변수 분석 결과에 의하면 목적 변수는 그림 1~그림 9에서와 같이 2~4개의 곡선과 직선으로 구성된 불연속 변화를 나타내었다. 이러한 불연속 변화는 목적 변수를 최대값으로 하였기 때문이며, 평균값일 경우에는 연속 변화로 나타난다. 2개의 극점을 가지는 LH_Y를 제외한 모든 변수에서는 1개의 극점이 있다. 또한 LH_X, UH_Y의 경우에는 최소점에서 심한 불연속을 나타내고 있다. 이러한 불연속이 있는 경우에는 목적 변수가 제작 오차나 변형에 의한 최적 설계 변수 LH_X의 변화에 민감하게 반응하게 된다.

그림 10은 1변수 분석법으로써 결정한 최적 설계 변수의 값을 이용하여 로터리의 수직 높이에 따라 코사인비를 계산한 결과이다. 코사인비 선도에서 목적 변수의 값이 결정되는 위치는 그림 10의 ①~⑥으로 6개가 있다. 일반적인 최적 설계 구간인 ③~⑥의 위치와 그 이전에 발생된 극소점 구간 ①, ②가 코사인비의 최대 절대값이 결정되는 위치가 된다.

1변수 분석 선도에서 나타난 곡선과 준 직선의 형태는 이 6개의 위치 중 어느 것이 목적 변수가 되는냐에 따라 결정되며, 꺾임점은 목적 변수의 위치가 바뀌는 점이 된다. 보통 극점인 ②, ④, ⑤가 목적 변수일 때는 1변수 분석 선도에서 기울기가 작게 나타나며, 굽김점 ①, ③, ⑥이 목적 변수일 때는 기울기가 커서 목적 변수 값이 크게 증가된다.

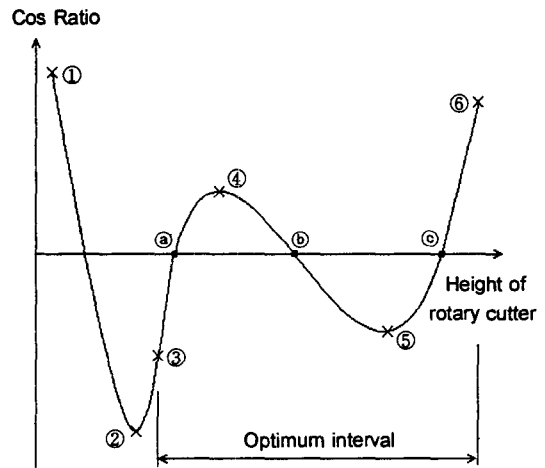


Fig. 10 Variations of cosine ratio.

(2) 2변수 분석

2변수 분석은 최적 설계 변수 중에서 두 변수를 독립 변수로 하여 목적 변수의 변화를 분석한 것이다.

(가) 최적 설계 변수 사이 상관 관계

두 독립 변수를 각각 x-y 평면 좌표계의 x축과 y축으로 표시하였을 때 같은 목적 변수의 값을 가지기 위한 두 변수 사이의 상관 관계는 다음과 같은 4가지 형태로 구분된다.

① 비례형

같은 목적 변수의 크기를 유지하려면 한 변수의 값이 증가될 때 다른 변수의 값도 증가되어야 하는 형태로서, 등목적 변수 선도의 기울기가 45° 전후인 경우이다. 두 변수의 상관 관계가 높다.

② 반비례형

같은 목적 변수의 크기를 유지하려면 한 변수의 값이 증가될 때 다른 변수의 값은 감소되어야 하는 형태로서, 등목적 변수 선도의 기울기가 135° 전후인 경우이다. 두 변수의 상관 관계가 높다.

③ 수평형

등 목적 변수 선도가 x축 변수와는 무관하고 대부분 y축 변수의 변화에 따라 결정되는 형태로서 선도의 기울기는 0° 전후이다. 목적 변수가 x축보다 y축 변수의 변화에 더 민감하게 반응하는 경우이다. 이 경우 두 변수의 상관 관계는 없거나 경미하다.

④ 수직형

수평형과는 반대로 등 목적 변수 선도가 y축 변수와는 무관하고 x축 변수의 변화에 따라 결정되는 형태로서 선도의 기울기는 90° 전후이다. 목적 변수가 x축 변수의 변화에 더 민감하게 반응하는 경우이다. 이 경우 두 변수의 상관 관계는 없거나 경미하다.

등목적 변수 선도의 형태에는 타원형과 막대형이 있으며, 타원형은 최적 설계에 미치는 두 변수의 민감도가 비슷한 경우이고, 막대형은 두 변수의 민감도에 차이가 있는 경우이다. 그림 11~그림 16은 최적 설계 변수의 상관 관계를 2변수 분석으로 분석한 결과이다. 각 변수간의 상관 관계를 구체적으로 정리하면 표 1에서와 같다.

2변수 분석은 등목적 변수 선도의 형태가 타원형에 가깝고, 상관 정도가 높은 변수들을 대상으로 적용하는 것이 효과적이다.

(나) 등목적 변수 선도 작성

등목적 변수 선도를 작성하기 위한 목적 변수의 값은 실제값, 4점 모델 보간법, 9점 모델 보간법, 3가지 방법을 이용하여 구하였다. 실제값은 모든 최적 변수의 값에 대하여 목적 변수의 값을 구하는 방식으로서, 계산에 많은 시간이 요구되기 때문에 정확한 선도가 필요한 경우에만 사용된다. 4점 모델 보

간법과 9점 모델 보간법은 등간격으로 121개의 목적 변수의 값을 구하고, 나머지 값은 이를 이용하여 2차원 보간법으로 구하는 방법이다.

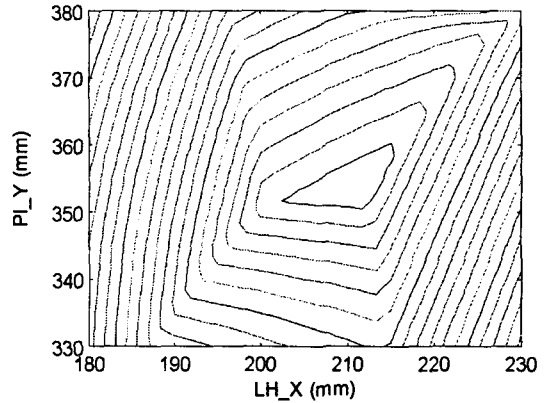


Fig. 11 Relation between LH_X and P1_Y.

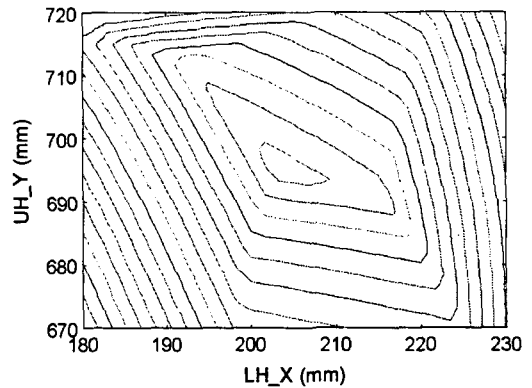


Fig. 12 Relation between LH_X and UH_Y.

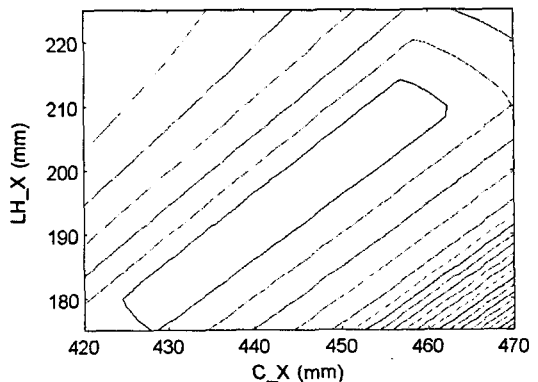


Fig. 13 Relation between C_X and LH_X.

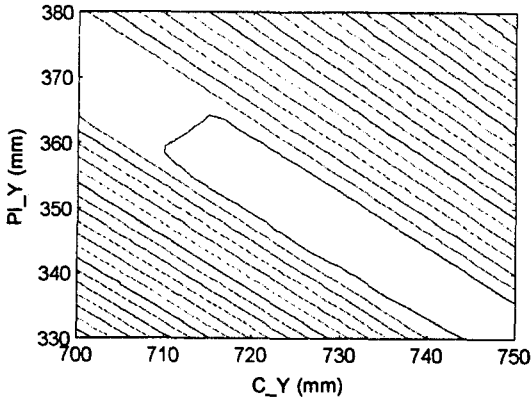


Fig. 14 Relation between C_Y and PI_Y.

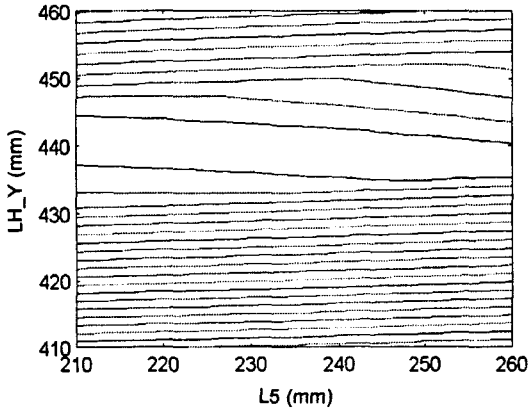


Fig. 15 Relation between L5 and LH_Y.

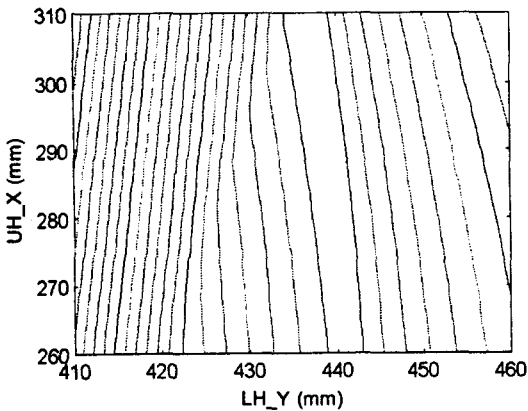


Fig. 16 Relation between LH_Y and UH_X.

(다) 2차원 보간법

등목적 변수 선도를 평면에 정확히 나타내기 위해서는 200,000번의 계산이 필요하다. 121개의 노드 (node)점에서는 실제 목적 변수의 값을 구하고, 나머지 노드점에서는 이미 계산된 121개의 값을 이용하여 보간법으로 구한다. 9점 모델 보간법의 계산 방법은 다음과 같다.

$$Z(x, y) = \sum_{i=1}^9 h_i(x, y) \cdot Z_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서, $h_1(x, y) = x(x+1)y(y+1)/4$

$$h_2(x, y) = x(x-1)y(y+1)/4$$

$$h_3(x, y) = x(x-1)y(y-1)/4$$

$$h_4(x, y) = x(x+1)y(y-1)/4$$

$$h_5(x, y) = (1-x^2)y(y+1)/2$$

$$h_6(x, y) = x(x-1)(1-y^2)/2$$

$$h_7(x, y) = (1-x^2)y(y-1)/2$$

$$h_8(x, y) = x(x+1)(1-y^2)/2$$

$$h_9(x, y) = (1-x^2)(1-y^2)$$

Z_i 는 노드점 i 에서 목적 변수의 값을 나타낸다. $h_i(x, y)$ 는 노드점 i 에서 목적 변수의 값이 점 (x, y) 에 미치는 영향을 가중치로써 나타낸 것이다.

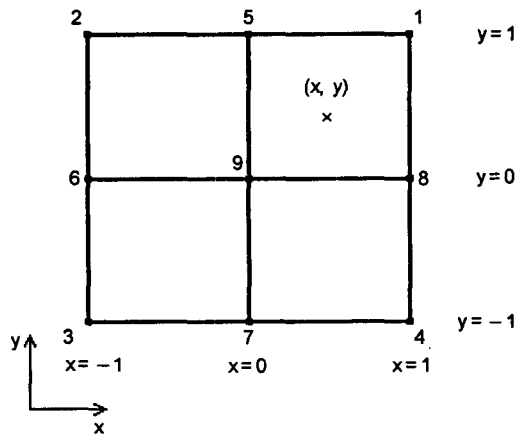


Fig. 17 Two dimensional interpolation using 9 node point model.

9점 모델 보간법은 4점 모델 보간법에 비하여 계산량이 5배 정도 많다. 그러나, 보간법은 목적 변수를 직접 구하는 경우와 비교하면 계산량은 훨씬 적다.

(3) 다변수 분석법

최적 설계 변수가 3개 이상인 경우에는 다차원 분석이 요구된다. 다차원 분석은 그 결과를 그림으로써 나타내기 어렵기 때문에 스스로 최저점을 찾는 방식이 요구된다. 본 연구에서는 전 영역 검색과 다차원 경사도 탐색법 두 가지 방법으로 분석을 시도

하였다.

(가) 전 영역 검색

최적 설계 변수의 영역에 포함되는 모든 변수의 값에서 목적 변수의 값이 최소가 되는 점을 찾는 방법이다. 컴퓨터 검색에서는 최적 설계 변수의 범위와 탐색 간격을 입력하여 차례로 검색하는 방법을 취한다. 예를 들면, C_X의 범위를 440~450mm, 탐색 간격을 1mm로 설정하고, C_Y의 범위를 714~724mm, 탐색 간격을 1mm로 하였을 때 총 검색 지점은 121점이 되며, 121번의 목적 변수의 계산이 요구된다. 이러한 검색법은 설계 변수의 영역 내에서 정

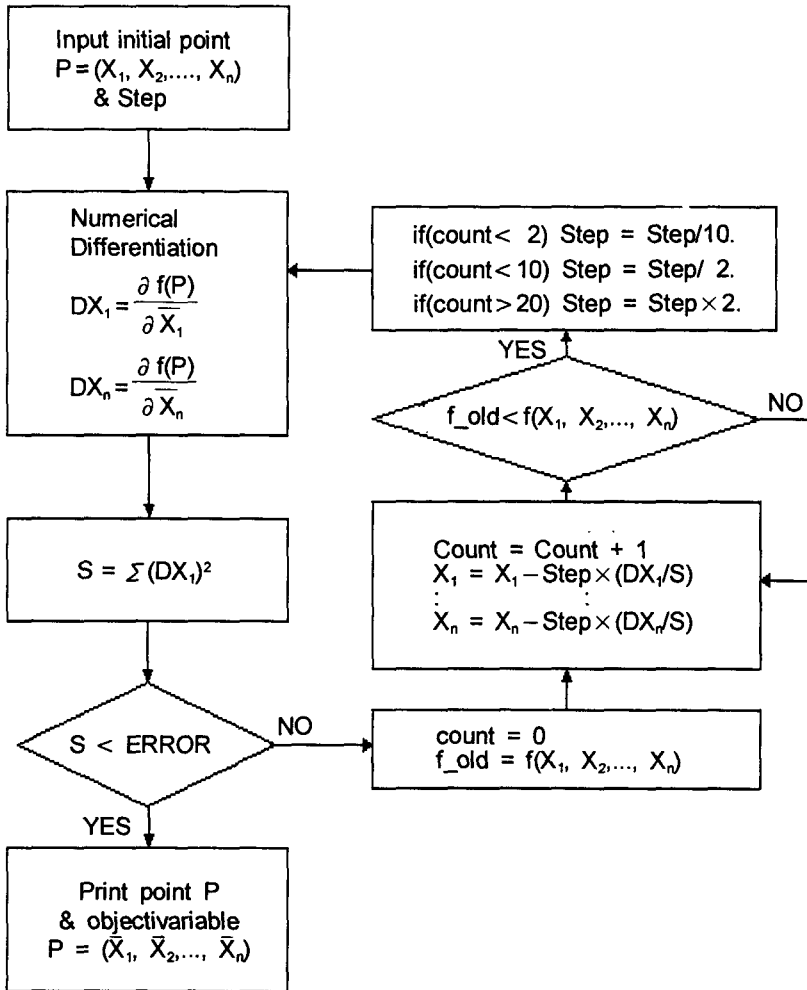


Fig. 18 Flow chart of gradient search method to find a multi-dimensional optimum value.

확한 최적값을 찾을 수 있으나, 최적 설계 변수의 영역이 크거나 탐색 간격이 작을 때는 계산량이 급증하는 단점이 있다. 또한 최적 설계 변수가 많을 때 도 같은 이유로써 적용하기가 어렵다.

(나) 경사도 탐색법

목적 변수를 최적 설계 변수에 대하여 편미분을 취하고, 이 편미분 값에 비례하는 방향으로 최적치를 찾아가는 방법이다. 이 방법은 다차원 최적화에 널리 응용되고 있으며, 이를 기본으로 하여 본 연구에서 채택한 알고리즘은 그림 18에서와 같다.

이 알고리즘은 편미분 값 즉 경사도를 구할 때 수치 미분을 적용한 것으로서 일반적인 경사도 탐색법과 동일한 방식이나, 탐색 간격 step을 설정하는 방식에 있어서 차이를 두었다. 기본적으로 step은 경사도를 구한 점으로부터 경사 방향으로 10 step 후 최소값에 도달하는 것으로 가정하였다. 따라서, 탐색 거리가 너무 길거나 짧으면 step의 크기를 그림 18에서와 같이 스스로 조정할 수 있도록 하였다. 수치 미분은 앞서 제시된 3점 중간 미분 근사법을 이용하였다.

경사도 탐색법은 설계 변수의 범위만 설정되면 스스로 최적치를 찾아가는 장점이 있다. 그러나 본 연구에서는 목적 변수 자체의 특성과 경사도 탐색법의 결함으로 인하여 완전한 최적치를 얻는 데 어려움이 있었다. 첫째, 목적 변수 자체의 특성으로 인한 문제는 1변수 분석법에서와 같이 계산된 목적 변수의 값이 불연속점에 위치할 경우 더 이상의 탐색이 불가능하다는 점이다. 둘째, 경사도 탐색법의 결함으로 인한 문제는 그림 19에서와 같이 경사진 등목적 변수 선도에서 탐색점 P가 선도의 골짜기 지점에 이르르면 더 이상 탐색이 진행되지 않는다는 점이다.

그림 19(a)는 등목적 변수 선도를 나타낸 것이다. (b)는 X축과 평행한 단면 AA' 에서 목적 변수의 변화를 나타낸 것이며, (c)는 Y축에 평행한 단면 BB' 에서 목적 변수의 변화를 나타낸 것이다. 경사도 탐색 중 점 P가 목적 변수 선도의 골짜기에 위치하는 점을 지날 경우, X축과 Y축에 대한 경사도는 모두 0이 된다. 이 경우 경사도 탐색에서는 이 점을 극소점으로 판단하여 탐색을 중지하고 P점을 극소점으로

출력한다. 이러한 문제는 탐색 초기에는 발생되지 않지만, 최적점에 접근할수록 자주 발생하는 것으로 구명되었다. 따라서, 경사도 탐색법은 탐색 초기에서만 적절한 방법으로 판단된다.

이러한 문제점 때문에 경사도 탐색법만을 이용한 최적 설계는 어려울 것으로 판단되었다. 이를 극복하기 위하여 1변수 분석법과 2변수 분석법을 병용하는 방법을 취하였다.

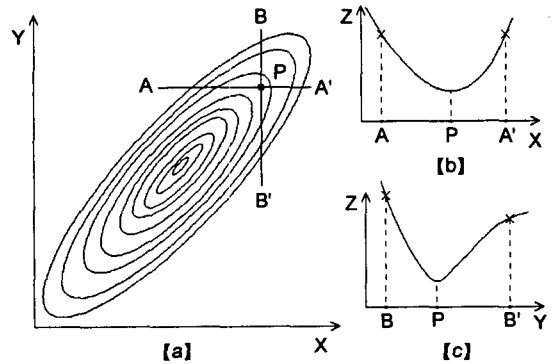


Fig. 19 Problems encountered in gradient search method.

3. 설계 민감도 분석

모든 최적 설계 변수의 값은 항상 일정한 것이 아니라 제작시의 공차, 사용 중의 변형 등으로 인하여 미소한 차이가 발생된다. 최적 설계에서는 설계 변수의 미소 변화가 목적 변수에 미치는 영향을 조사하여야 한다. 이는 각 설계 변수의 미소 변화가 변수 자체에서는 큰 문제가 되지 않더라도 목적 변수에서는 여러 설계 변수의 오차가 증폭되어 문제를 유발할 수 있기 때문이다.

최적 설계 변수에 대한 설계 민감도를 평가하기 위하여 다음과 같이 설계 변수의 민감도를 정의하였다.

$$\begin{aligned}
 DVS &= \frac{1}{\Delta DV} \frac{\Delta OV}{OV_{cur}} \times 100 \dots\dots\dots(2) \\
 &= \frac{100(OV_{max} - OV_{min})}{OV_{cur}(DV_{end} - DV_{start})}
 \end{aligned}$$

- 여기서, DVS = 설계 변수의 민감도
- DV = 설계 변수
- OV = 목적 변수
- DV_{start} = 설계 변수의 탐색 시작점
- DV_{end} = 설계 변수의 탐색 종료점
- OV_{max} = 목적 변수의 최대점
- OV_{min} = 목적 변수의 최저점
- OV_{cur} = 목적 변수의 현재값

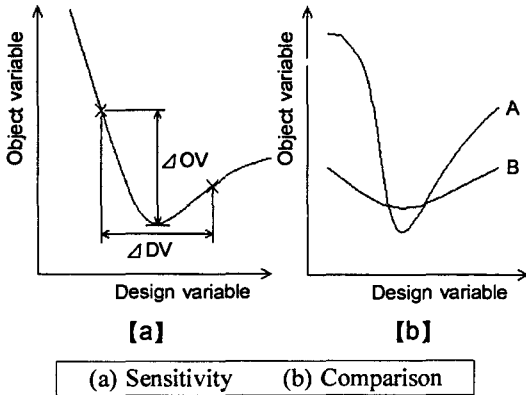


Fig. 20 Sensitivity analysis of design parameters.

설계 변수 민감도는 설계 변수의 단위 변화량에 대한 목적 변수의 변화량을 목적 변수의 구간 최소치에 대한 %로써 나타낸 것이다. 설계 변수 민감도에 변수의 예상 변형치를 곱하면 목적 변수가 현재 값을 기준으로 최대 몇 %까지 변화 되는지를 알 수 있다. 설계 변수의 민감도는 다음과 같은 방법으로 구하였다. 먼저, 공차 등을 고려하여 분석 대상 설계 변수에 대한 민감도 분석 범위(ΔDV)를 결정한다. 다음에는 그림 20에서와 같이 현재의 변수값(DV)을 기준으로, 좌우 등간격으로 분석 범위($DV_{start} - DV_{end}$)를 설정하고, 이를 식 (2)에 대입하여 이 범위 내에서 목적 변수의 최대치(OV_{max}), 최소치(OV_{min}) 및 현재의 값(OV_{cur})을 구한다.

그림 20(b)는 설계 민감도가 다른 두 변수의 예를 나타낸 것이다. A의 경우에는 목적 변수의 최저값이 낮아 가장 좋은 상태가 될 수 있으나 민감도가 높아 설계 변수 변화에 따른 목적 변수의 변화가 심하

다. 즉 설계 변수의 값이 약간만 변화되어도 목적 변수의 값이 크게 변화된다. 그러나 B의 경우에는 목적 변수의 최소값은 A보다 크나, 설계 변수의 민감도가 낮기 때문에 설계 변수의 값이 변화되어도 목적 변수의 값은 크게 변화되지 않는다. 따라서, 로터리와 같이 작용 부하가 크고 열악한 조건에서 사용되는 기계의 경우에는 B에서와 같이 목적 변수가 다소 큰 값을 가지더라도 민감도가 낮은 것이 유리할 것으로 판단된다.

4. 설계 효율

목적 변수를 계산하는 데는 많은 시간이 소요되기 때문에 목적 변수의 계산 횟수로써 설계 효율을 나타내었다. 본 연구에서 사용된 각 분석법의 효율은 표 2에서와 같다.

Table 2 Numbers of computations for objective variable

one variable analysis	two variable analysis			multi variable analysis	
	4 point interpolation	9 point interpolation	actual value	slope search	whole region search
490	121	121	200000	500-1000	∞

최신 PC 기종으로 계산하였을 경우, 목적 변수를 1회 계산하는 데 약 0.07초 정도가 소요된다. 따라서, 2변수 분석으로 실제 값을 이용하면 계산하는데 3.8시간이 소요된다. 다변수 분석법의 전영역 검색으로써 변수 범위가 10mm인 변수를 1mm 단위로 분석하면, 본 연구에서와 같이 최적 설계 변수가 9개인 경우 총 1.0E9 번의 계산이 필요하다. 시간으로는 2년 이상이 소요된다. 그러나, 1변수 분석법으로써는 약 35초가 소요되며, 2변수 분석법의 4점 모델, 9점 모델, 경사도 탐색에서는 10초 이하에서 분석할 수 있다. 따라서, 2변수 분석법의 실제값 계산은 반드시 필요한 경우에만 실시하여야 하며, 전영역 검색은 설계 변수가 4개 이하이고 변수 범위가

작은 경우에만 채택할 수 있다.

5. 최적 설계 순서

최적 설계 변수의 최적값을 구하기 위하여 본 연구에서는 경사도 탐색과 1변수, 2변수 분석법을 모두 적용하였다. 먼저, 경사도 탐색법을 이용하여 최적 설계치의 부근에 접근하고, 다음에는 1변수 분석과 2변수 분석을 다음과 같은 방법에 따라 실시하였다. 각 최적 설계 변수에 대하여 1변수 분석을 실시하고 목적 변수가 아직 최적화되지 않은 변수를 찾는다. 다음에는 1변수 분석을 실시한 최적 설계 변수와 가장 상관 관계가 큰 변수를 표 1에서 선택하여 이 두 변수로 2변수 분석을 실시한다. 그 다음으로 2변수 분석을 실시한 두 변수와 상관 관계가 가장 낮은 변수를 표 1에서 찾아 1변수 분석을 실시한다. 이러한 3과정을 몇 차례 반복하여 1변수와 2변수 분석을 동시에 실시한 최적치에 도달하였다.

1변수 분석 결과를 2변수 분석에 적용할 때, 1변수 분석에 사용된 변수와 상관 관계가 가장 큰 변수를 선택하는 것은 상관 관계가 큰 두 변수를 2변수 분석에 이용하는 것이 유리하기 때문이다. 또한, 2변수 분석 후 1변수 분석을 실시할 때, 2변수 분석에 쓰인 변수와 상관 관계가 가장 낮은 변수를 선택하는 이유는 2변수 분석에서 최적화가 이루어졌을 경우, 사용된 변수와 상관 관계가 높은 변수는 대개의 경우 1변수 분석에서 접근 가능한 최적점에 이미 도달해 있기 때문이다.

6. 최적 설계의 예

이상의 최적화 방법을 이용하여 컴퓨터 프로그램을 작성하였다. 컴퓨터 프로그램은 이미 설계된 트랙터-로터리 전동 라인을 분석하여 최적화 정도를 평가하고, 새로운 전동 라인에 대해서는 최적화 설계를 수행할 수 있도록 하였다. 이 설계 프로그램을 이용하여 전동 라인의 분석과 최적화 설계의 과정을 제시한다. 본 설계 예에서 사용된 전동 라인의 주요 설계 변수는 표 3에서와 같다.

표 3에서 주어진 설계 변수로써 구한 목적 변수의 값은 0.203669이었다. 즉 전동 라인의 설계 기준인 코사인비 0.04~0.05를 크게 초과하였다.

Table 3 Values of design parameters of the driveline used for optimization

Variable	Value (mm)	Variable	Value (mm)	Variable	Value (mm)
A_X	30	L1_v	0	rr	242
A_Y	798	L2	440	LH_X	191.73
B_X	90	L3	300	LH_Y	304.7
B_Y	464	L4	670	UH_X	300
C_X	400	L5	250	UH_Y	690.55
C_Y	734	R	550	PI_X	192.67
PTO_X	212	d	40	PI_Y	366.02
PTO_Y	552	t1	94		
L1_h	420	t2	128		

최적화 설계를 위하여, 먼저 경사도 탐색법을 적용한 후 1변수, 2변수 분석법을 차례로 적용하여 최적 설계를 수행하였다.

최적 설계 변수의 변화 범위를 입력하고 경사도 탐색을 2회 시행한 결과는 표 4에서와 같다.

Table 4 Results of optimization by the gradient search method

	Before optimization	After gradient search 1	After gradient search 2	Standardization
C_X	400	408.569119	409.122931	409
C_Y	734	719.292176	718.500154	719
L5	250	238.497084	237.702564	238
LH_X	191.73	199.429049	199.396556	199
LH_Y	304.7	308.159756	308.196671	308
UH_X	300	290.783251	290.469364	290
UH_Y	690.55	702.185753	702.961336	703
PI_X	192.67	196.865589	197.228198	197
PI_Y	366.02	354.843139	354.024470	354
Object variable	0.203669	0.050859	0.0401921	0.042278

Table 5 Change of optimum design variable in the process of 1 & 2 variable analysis
(VA: variable analysis)

		C_X	C_Y	L5	LH_X	LH_Y	UH_X	UH_Y	PI_X	PI_Y	Object variable
Number	Method	409	719	238	199	308	290	703	197	354	0.0422780
①	1 VA	443									0.0180113
②	2 VA	442	720								0.0179945
③	1 VA					448					0.0151797
④	1 VA								180		0.0144654
⑤	2 VA					445			181		0.0141951
Result		442	720	238	199	445	290	703	181	354	0.0141951

경사도 탐색을 2회 실시한 이후에는 더 이상 최적치로 진행하지 못하였다. 따라서, 각 설계 변수의 소수점 이하를 반올림한 후 다시 1변수, 2변수 분석법을 적용하였다. 경사도 탐색법에 의한 1차 최적화 결과, 목적 변수의 값은 0.042278로서 설계 조건을 만족하는 범위로 개선되었으나, 최적화의 여지는 아직 남아 있었다.

1변수와 2변수 분석은 다음과 같은 순서로 실시하였다. 첫째, C_X에 대한 1변수 분석을 실시하여 C_X의 변화에 따라 목적 변수의 값이 크게 변화되는 것을 확인하였다. 이 결과는 표 5의 과정 ①과 같으며, 경사도 탐색이 더 이상 진행되지 못하였던 것은 목적 변수가 불연속점에 도달해 있었기 때문으로 구명되었다. 둘째, C_X와 상관 관계가 큰 변수인 C_Y를 택하여 2변수 분석을 실시하였으며, 그 결과는 표 5의 과정 ②에서와 같이 특별한 변화가 없는 것으로 나타났다. 셋째, C_X, C_Y와 상관 관계가 낮은 변수 LH_Y를 대상으로 1변수 분석을 실시하였으며, 그 결과는 표 5의 과정 ③에서와 같다. 다음에는, 1변수 분석 대상으로서 LH_Y와 상관 관계가 높은 PI_X를 선택하였으며, PI_X에 대한 1변수 분석의 결과는 표 5의 과정 ④에서와 같다. 따라서, LH_Y와 PI_X로써 2변수 분석을 실시하여 표 5의 과정 ⑤에서와 같이 목적 변수의 값이 0.0141951인 최선의 최적 설계에 도달하였다.

각 최적 설계 변수에 대한 민감도를 분석하기 위하여 최적 설계 변수의 폭을 10mm로 설정하고 식 2

를 이용하여 민감도를 계산하였다. 민감도 분석의 결과는 표 6에서와 같다. 표 6에서와 같이 목적 변수는 C_Y, L5, PI_Y, UH_Y 즉, 상부 링크의 길이와 링크 포인터, 작업기 마스트의 상부 취부점, 작업기 입력축 연결점의 위치 변화에 따라 민감하게 변화되는 것으로 나타났다. 따라서 전동 라인을 설계할 때 설계 변수 C_Y, L5, PI_Y, UH_Y의 값이 변형 또는 제작 오차 등에 의하여 변화되지 않도록 하여야 한다.

Table 6 Results of sensitivity analysis of design variable

	OV _{min}	OV _{max}	ΔDV	DVS(%)
C_X	0.1417810	0.0198286	10.0	3.98
C_Y	0.0141907	0.0257750	10.0	8.16
L5	0.0141764	0.0261403	10.0	8.43
LH_X	0.0141717	0.0201166	10.0	4.19
LH_Y	0.0141770	0.0147253	10.0	0.39
UH_X	0.0141730	0.0205404	10.0	4.49
UH_Y	0.0141899	0.0238659	10.0	6.82
PI_X	0.0141689	0.0180311	10.0	2.72
PI_Y	0.0141684	0.0244960	10.0	7.28

7. 결론 및 요약

트랙터-로터리간 전동 라인에 사용되는 2점 유니버설 조인트의 전동 속도비 변화는 진동, 소음 및 동력 손실의 원인이 된다. 본 논문은 이러한 문제점

을 해결하기 위하여 본 연구의 제1보에서 제시된 트랙터-로터리 전동 라인의 설계 변수와 설계 조건을 이용하여, 설계 조건을 만족할 수 있는 최적 설계 방법을 제시하였다. 최적 설계 방법은 1변수, 2변수, 다변수 분석법을 복합적으로 적용한 최적화 방법으로서 트랙터-로터리 전동 라인의 최적화 설계에 적합하였다. 또한, 최적 설계 변수가 목적 변수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 설계 변수 민감도를 정의하고 이를 계산하기 위한 방법을 제시하였다. 제시된 최적화 및 설계 변수 민감도 계산 방법을 이용하여 트랙터-로터리 전동 라인의 분석과 설계를 수행할 수 있는 컴퓨터 프로그램을 개발하였다.

본 연구에서 개발된 최적화 설계 방법을 적용하여 기존 전동 라인을 분석하였으며, 그 결과는, 설계 조건을 만족하지 못하였던 전동 라인의 최적화 목적 변수, 즉 전동 코사인비를 93% 이상 향상시킬 수 있

었다.

본 연구에서 개발된 트랙터-로터리 전동 라인의 분석과 설계 프로그램은 트랙터-작업기 전동 라인의 최적화 설계에 널리 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 지영준, 김화준, 허정권. 1995. C로 구현한 수치 해석. 높이깊이.
2. 류일훈, 김경옥, 김대철. 1996. 컴퓨터를 이용한 트랙터-로터리 전동라인의 전동 특성 분석. 한국농업기계학회지 22(1):1-10.
3. Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery. 1992. Numerical recipes in C. Cambridge University Press.