

## 고체-유체 연성력 제어를 위한 진화적 최적설계

김현수\*(충남대학교 대학원 기계설계공학과), 이영신(충남대학교 기계설계공학과)

Evolutionary Optimization Design Technique for Control of Solid-Fluid Coupled Force

H. S. Kim(Graduate School, Mecha. Design Eng. Dept. CNU), Y. S. Lee(Mecha. Design Eng. Dept. CNU))

### ABSTRACT

In this study, optimization design technique for control of solid-fluid coupled force (sloshing) using evolutionary method is suggested. Artificial neural networks(ANN) and genetic algorithm(GA) is employed as evolutionary optimization method. The ANN is used to analysis of the sloshing and the genetic algorithm is adopted as an optimization algorithm. In the creation of ANN learning data, the design of experiments is adopted to higher performance of the ANN learning using minimum learning data and ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) numerical method is used to obtain the sloshing analysis results. The proposed optimization technique is applied to the minimization of sloshing of the water in the tank lorry with baffles under 2 second lane change.

**Key Words :** Evolutionary optimization technique(진화적 최적화), Solid-fluid coupled force(고체-유체 연성력), Sloshing(슬로싱), Genetic Algorithm(유전알고리즘), Artificial Neural Network(인공신경망), Tank lorry(탱크로리)

### 1. 서 론

유체를 적재하고 있는 구조물은 유체와 구조물 사이의 상호 간섭에 의해 유체가 채워지지 않았을 때와는 다른 동적특성을 나타내고 있어 시스템 안정성의 측면에서 많은 관심의 대상이 되어왔다. 특히 유체의 출렁임 현상인 슬로싱(sloshing)은 이러한 고체-유체연성력의 대표적인 현상으로 전진국에서는 이미 40 여년 전부터 이러한 슬로싱효과를 저감시키기 위한 연구를 수행하고 있다. 현재 이를 위해 배풀(baffles), 플롯(float), 칸막이(partitions)등의 다양한 슬로싱 억제장치가 사용되고 있는데 특히 배풀은 그 설치의 용이성과 효과 때문에 가장 많이 사용되고 있다. 슬로싱에 관한 주요연구로는 조진래 등<sup>[1,2]</sup>이 ALE 기법을 이용하여 원통형 액체저장탱크의 과도응답 해석을 수행한 연구가 있으며 실험을 이용한 연구로는 이영신 등이 주기적 병진방향하중을 받는 사각형 저장탱크에 발생되는 슬로싱 하중특성분석과 배풀의 슬로싱 저감성능에 관하여 연구를 수행하였다<sup>[3,4]</sup>. 슬로싱 저감 최적화에 관한 연구는 유준태<sup>[5]</sup> 등이 액체연료 탱크내부 연료의 슬

로싱저감을 위하여 슬로싱현상을 스프링-질량-댐퍼 모델로 모델링하고 이를 이용하여 최적설계를 수행한 바가 있다.

기존에 주로 사용되는 최적설계기법에서는 목적 함수의 그래디언트(gradient)정보를 이용한 민감도 해석을 수행하게 되는데 많은 최적화 알고리즘의 개발과 빠른 수렴특성을 보이는 장점이 있다. 하지만, 본 연구에서 고려하는 고체-유체연성문제는 복합물리적인 현상으로서 그 목적함수의 유도가 대단히 어렵고 설사 단진자(pendulum) 시스템이나 스프링-질량(spring-mass) 모델로의 단순화를 적용한 목적함수 유도가 가능하더라도 큰 오차를 수반하기 때문에 이를 이용한 최적화 설계 역시도 많은 오차를 발생시키게 된다.

본 연구에서는 고체-유체 연성력 저감 최적설계에 있어 함수값을 직접 이용하며 보다 정확한 최적설계를 수행할 수 있는 기법을 제안한다. 사용된 최적화 기법으로 생물 진화의 원리를 이용하는 유전알고리즘(Genetic Algorithm)과 인공신경망(Artificial Neural Networks)을 적용하고 탱크로리(tank lorry) 차량에 대해 제안된 최적화 기법을 적용하여

최적화된 배풀의 설계안을 제시하였다.

## 2. 진화적 최적화 기법 및 적용

본 논문에서는 슬로싱에 영향을 미치는 많은 설계변수들 중 배풀과 관련된 설계변수들을 고려하였다. 현재 배풀은 그 설치의 용이성과 기능성으로 인해 연료저장탱크에 슬로싱 저감을 위해 널리 적용되고 있으며 배풀의 개수와 배열방식, 배풀사이의 간격과 내공의 크기 등 슬로싱에 영향을 미치는 다양한 변수들이 존재하기 때문이다. 또한, 최적화 설계의 목적함수는 슬로싱 저감 특성을 잘 평가할 수 있도록 설정하여야 한다. 이러한 목적함수로 유체에 의해 적재용기에 작용하는 하중 또는 모멘트, 유체 출렁임 높이 또는 높이 변화의 감쇠비, 적재용기에 발생되는 응력 또는 변위 등이 될 수 있다.

본 연구에서는 이러한 목적함수 및 설계변수들을 가지고 최적화설계 알고리즘으로 유전알고리즘(GA) 그리고 변경된 설계변수에 대한 목적함수의 계산을 인공신경망(ANN)을 이용하여 슬로싱을 저감시킬 수 있는 최적설계를 수행하였다.

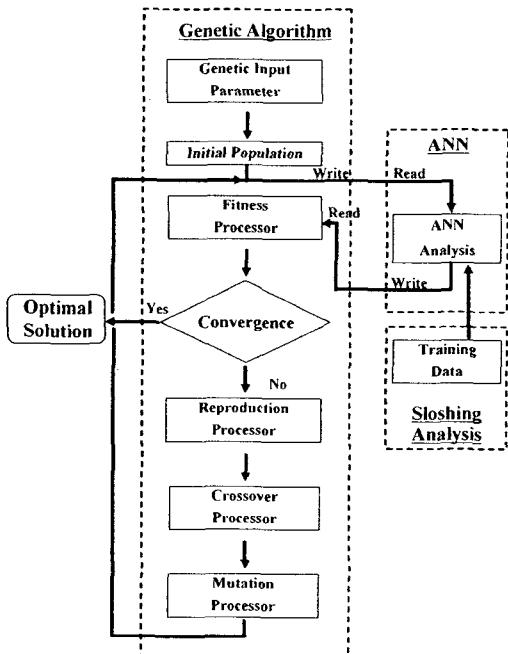


Fig. 1 Flow chart of sloshing reduction optimization using ANN and GA

Fig. 1 은 유전알고리즘(GA)과 인공신경망(ANN)을 이용한 슬로싱 저감 최적화 과정의 흐름도이다. 본 최적화 과정은 몇 가지의 세부과정으로 구성되어 있는데 가장 먼저 최적화설계를 위한 설계변수

와 목적함수를 정의하고 인공신경망의 학습을 위해 적절한 해석의 경우(case)를 계획한다. 그 후 계획된 해석경우들에 대해 ALE전산해석기법을 이용한 슬로싱해석을 수행하고 해석결과로부터 인공신경망 학습데이터를 생성한다.

슬로싱 저감최적화를 위해 적절한 형태의 인공신경망을 구성하고 생성된 학습데이터를 이용하여 인공신경망을 학습시킨다. 학습된 인공신경망을 유전알고리즘의 목적함수계산과정에 적용한 후 유전알고리즘을 이용해 슬로싱을 최소화 할 수 있는 배풀의 최적설계를 수행한다.

## 3. 탱크로리 고체-유체 연성력 최소화

본 연구에서는 개발된 진화적 최적화기법을 적용하여 급차선 변경주행조건하에서 슬로싱에 대한 탱크로리 차량의 동적 안전성을 최대화하고 제안된 진화적 최적화 설계기법의 유용성을 검증하기 위해 실제 운행중인 탱크로리(tank lorry) 모델에 대하여 주행 중 발생되는 슬로싱을 최소화 할 수 있는 배풀의 최적설계를 수행하였다.

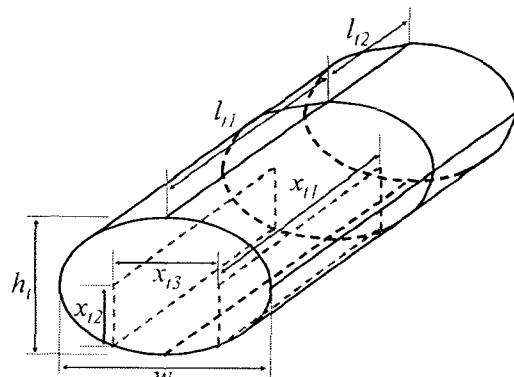


Fig. 2 Analysis model of the tank lorry

Table 1 Dimension of the tank lorry

Type of a car	2 Axis S Oil Tank
Tank	Length ( $l_{t1}$ ) 1,700 [mm]
	Length ( $l_{t2}$ ) 470 [mm]
	Width ( $w_t$ ) 1,700 [mm]
	Height ( $h_t$ ) 880 [mm]
	Thickness 5 [mm]
	Loading Capacity 2,550 [kgf]

슬로싱 저감최적화설계중 탱크로리의 유체적재 탱크부를 해석모델로 고려하였으며 그 형상은 Fig. 2 같다. 해석모델은 적재량 2.55 ton 량의 실제 운용 중인 탱크로리를 고려하였다. 관련 안전법규(소방기 술기준에 관한 규칙 제 218조 이동탱크 저장소의 탱크의 구조)에 따라 내부에 2,000 L의 용적에 대해 하나의 구획으로 구분되어 설치되며 슬로싱 방지를 위한 배풀이 2000 L용적의 탱크내부에 길이방향으로 설치된다. 탱크의 단면은 타원형이며 장축의 직경 및 단축의 직경은 각각 1,700mm~~880~~ mm이며 탱크의 길이는 각각 1,700 mm 와 470 mm 의 크기를 갖는 두 개의 탱크로 구분된다.

해석에 사용된 탱크로리의 전체차량 및 유체저장탱크부의 정확한 치수는 Table 1에 제시되어 있다. 저장탱크의 재질은 통상적인 강철(steel)로 그리고 적재된 유체는 물(water)로 가정하였으며 두께는 5 mm 를 적용하였다.

본 논문에서 적용한 주행경계조건은 탱크로리의 운행 중 발생할 수 있는 급차선 변경조건으로 2초 동안 대한민국 고속도로 표준인 3.5 m 너비의 차로에 대해 차선변경이 이루어지는 조건을 모사하였다. 급차선 변경시 탱크로리의 전복성능에 영향을 미치는 하중성분은 탱크로리의 횡방향으로 발생하는 가속도 성분으로 본 논문에서는 속도 성분으로 변환하여 적용하였다. 탱크로리의 횡방향으로 0.5 Hz 주기의 속도이력이 작용하게 되는 이러한 속도경계조건은 대형 차량의 전복성능 평가 시 널리 사용되고 있다.

본 연구에서는 내부에 적재된 유체의 슬로싱에 의해 탱크로리에 최대하중을 발생시키는 유체높이를 결정하기 위하여 탱크로리 해석모델에 대해 2초간의 급차선 변경조건하에서 25%, 50% 및 75% 유체 채움높이에 대한 고체-유체연성하중해석을 수행하고 최대 횡방향 모멘트를 발생시키는 75% 유체 채움높이에 대해서 최적설계를 수행하였다.

배풀설치를 통하여 슬로싱으로 인한 유체 출렁임을 최소화하기 위한 최적화 문제는 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

$$\text{Minimize } f(x),$$

$$f(x) = \text{Maximum transverse moment of the tank lorry induced by sloshing}$$

Subject to

$$x_{1l} \leq x_1 \leq x_{1h}, \quad x_{2l} \leq x_2 \leq x_{2h}, \quad x_{3l} \leq x_3 \leq x_{3h}$$

여기서,  $f(x)$  는 목적함수로서 슬로싱에 의해 유발

되는 탱크 반경방향 최대 모멘트,  $x_1$ ,  $x_2$  및  $x_3$ 은 각각 배풀의 설계변수로서 배풀의 길이, 폭 그리고 배풀 사이의 설치 간격이다.

최적화 설계과정 중 인공신경망의 학습을 위해 실험계획법 중 3개의 인자에 대해 3수준을 갖는 직교배열표(Tables of orthogonal arrays)를 적용하여 학습데이터를 생성하고 학습을 수행하였으며 적용된 유전알고리즘의 선택기법 및 제어 파라미터는 다음과 같다.

- 1) Real coded GA
- 2) Selection method = Roulette wheel selection,
- 3) Crossover rate = 0.8,
- 4) Mutation rate = Dynamic mutation, 0.05
- 5) Generation number = 300
- 6) Population size=20

최적화 수행결과를 Table 2에 제시하였다. 2.55 ton의 적재용량을 갖는 탱크로리의 2초간의 급차선 변경조건하에서 슬로싱 최소화를 위한 주 탱크에서의 최적 배풀설치조건은 배풀의 길이가 1284.4 mm, 배풀의 폭은 탱크로리 높이의 절반인 440 mm 그리고 배풀 설치간격은 탱크의 중앙선을 기준으로 340 mm 인 것으로 나타났다. 이것을 다시 배풀이 설치되는 탱크로리 주 탱크와의 크기비로 나타내면 배풀 길이는 탱크길이의 0.756배, 배풀의 폭은 탱크로리 높이의 0.5배, 배풀설치 간격은 탱크폭의 0.2배이다.

Table 2 Optimization results for the sloshing minimization of the tank lorry under 2-second lane change

Optimized baffle length, $x_1$	1284.4 mm
Optimized baffle width, $x_2$	440 mm
Optimized baffle installation interval, $x_3$	340 mm
Optimum value, $f(x)$	0.113*
Optimum value by ALE analysis for the optimized baffle design	0.120

\* : Transverse moment reduced by sloshing =  $\times 10^5$  [N-m]

Fig. 3 은 급차선 변경조건하에서 배풀이 설치되지 않은 경우와 최적화된 배풀이 설치된 탱크로리에서 발생되는 모멘트 이력의 비교이다.

배풀이 없을 경우 31,592 N-m 의 횡방향 최대모멘트가 발생되었으나 최적화 된 배풀이 설치된 이후 횡방향 최대발생모멘트가 12,000 N-m 으로 배풀이 설치되지 않았을 경우를 기준으로 약 62 % 가량 최대 발생모멘트의 저감효과를 보였다.

또한, 모멘트 이력선도를 보면 배풀이 설치되지 않은 경우 차선변경 초기와 1 초 지점 및 차선변경이 끝나는 2 초경에 국부적인 최대 모멘트가 발생되었지만 최적화된 배풀이 설치됨으로 인해 전반적인 발생모멘트의 형태가 안정화 됨을 알 수 있다.

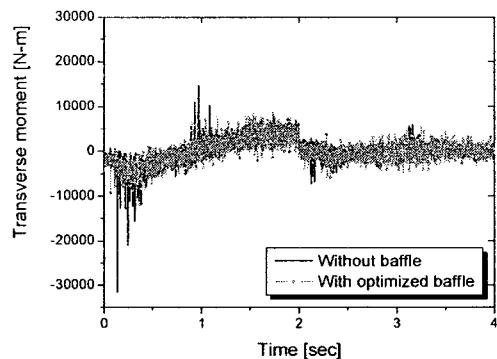


Fig. 3 Transverse moment of the tank lorry without/with optimized baffle under 2-second lane change

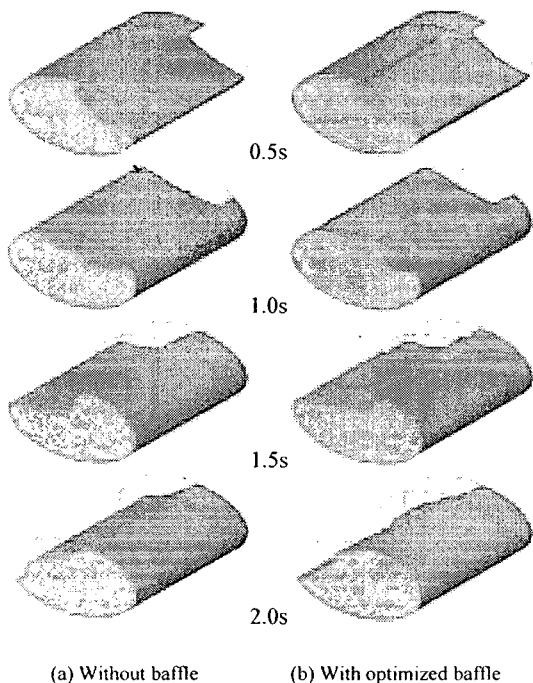


Fig. 4 Water flow in the tank lorry without/with optimized baffle under 2-second lane change

Fig. 4 는 배풀이 설치되지 않은 탱크로리와 최적화된 배풀이 설치된 탱크로리에 적재된 유체의 유동 형상이다. 최적화된 배풀이 설치되면 병진 방향가전에 의한 유체의 유동이 배풀에 의해 방해를 받게

되어 유동의 속도가 다소 느려지게 되며 배풀이 설치된 주탱크와 작은 탱크의 유동간에 차이가 발생됨을 확인할 수 있다. 또한, 1.0초 부근에서 유체 표면에 작은 유동들이 많이 생성됨을 알 수 있다. 배풀의 작용에 의해 배풀이 설치된 주탱크의 유체유동과 배풀이 설치되지 않은 작은탱크의 유체유동간에 차이가 발생됨을 확인 할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 유체를 적재한 구조물에 대해 고체-유체연성특성 즉, 슬로싱을 최소화할 수 있는 배풀의 최적설계기법에 대한 연구를 수행하였다.

생물진화의 원리를 모방한 유전알고리즘과 인공신경망을 이용한 최적화 알고리즘을 제안하고 제안된 최적화 기법은 2초 동안 급차선 변경주행을 하는 75%의 유체 채움높이를 갖는 2.55 ton 용량의 탱크로리차량에 대하여 최적설계를 수행하였다. 최적화 수행결과 급차선 변경주행 중 내부에 적재된 유체에 의해 발생되는 횡방향 모멘트를 기준으로, 배풀이 설치되지 않은 경우와 비교해 최적화된 배풀이 설치되면 약 62%의 슬로싱 저감 효과를 얻을 수 있었고 이러한 결과를 통해 제안된 진화적 최적설계기법의 타당성을 확인할 수 있었다.

#### 참고문현

1. 조진래, 김민정, 이상영, 허진욱, 배풀개수 및 내경변화에 따른 액체 저장탱크의 동역학 효과? 한국전산구조공학회 논문집, Vol. 15, No. 1, pp. 147 - 154, 2002.
2. 조진래, 하세윤, 이홍우, 박태학, 이우용, “수평으로 놓인 배풀형 연료탱크의 슬로싱 고유거동에 관한 유한요소해석? 한국전산구조공학회 논문집, Vol. 15, No. 4, pp. 619 - 628, 2002.
3. 이영신, 김현수, 이재형, 고성호, 병진운동하는 사각형 유체저장탱크 내부의 슬로싱 특성 연구? 한국소음진동공학회 논문집, Vol. 13, No. 8, pp. 591 - 597, 2003.
4. 이영신, 김현수, 이재형, 김영원, 고성호, 날개형 및 격막형 배풀을 이용한 유체저장탱크 내부의 슬로싱 저감연구? 대한기계학회논문집 A권, Vol 27, No. 12, pp. 2039 - 2046, 2003.
5. 유준태, 연정흠, 윤성기, 액체연료 탱크내부의 연료슬로싱 해석 및 최적배풀 설계에 관한 연구? 한국항공우주공학회 논문집, Vol. 27, No. 5 pp. 60 - 70, 1999.