

유전 알고리즘에 의한 배관 지지대의 최적배치

(제 2보, 지진과 가진의 경우)

°양보석*, 전상범**, 유영훈*, 김진욱***

Optimum Allocation of Pipe-Support by Genetic Algorithm

(2nd Report, In Case of Seismic Excitation)

Bo Suk Yang, Sang Bum Jeon, Young Hun Yu, Jin Wook Kim

ABSTRACT

This paper deals with the optimization of pipe-support allocation using the genetic algorithm, and shows the feasibility of the optimization method to actual design problems and also the convergence characteristics of optimization calculation with respect to the various seismic waves. The piping system was modeled as mass-spring system with 5 degrees of freedom and the support was as spring-damper. The support allocation problem was formulated to minimize the response of the piping system to seismic excitation.

1. 서론

각종 플랜트 등에 설치되는 배관은 통상 구조물 상에 지지되고 있고, 배관의 열팽창 등을 완화시키기 위해 고정시키지 않고 배관의 유연성을 확보하도록 spring-hanger 등의 강성이 낮은 지지대 (support)를 일정간격마다 설치하고 있다. 이러한 배관계에 지진 등이 작용하는 경우에는 배관계의 구속을 가능한 늘리어 지진에 대한 응답이 증폭되지 않도록 하든가, 배관계의 구속을 극단적으로 적게하여 어떤 지진이 도래하여도 그 지진을 유연구조에 의해 흡수하는 방법이 고려될 수 있다. 그러나 후자의 방법은 배관중량에 의한 극단적인 변형을 일으키고, 내부 유체의 원활한 흐름을 방해할 수 있으므로 동적인 작용력에 대해 적절한 구속효과를 발휘하도록 지지방법을 강구하여야만 한다.⁽¹⁾

우리나라도 최근 지진이 자주 발생하고 있고, 작년의 경우 35회의 크고 작은 지진이 발생하여 더 이상 지진의 안전지대가 아님을 보여주고 있다. 따라서 향후 내진설계에 대한 중요성이 더욱 강조되고, 이를 적극적으로 고려하지 않으면 안되리라 생각된다. 지진이 많이 발생하고 있는 일본에서의 피해사례조사의 결과를 보면 지진에 의해 많은 피해를 입는 곳중의 하나가 배관계로 알려져 있다.⁽²⁾

따라서 본 연구에서는 대표적인 실제 지진테이터를 이용하여 배관계의 기초여진응답을 최소화하는 배관계 지지대의 최적배치문제에 유전알고리즘⁽³⁾(Genetic Algorithm, GA)을 적용하고, GA의 최적화능력 및 특성에 대해 조사하여 배관설계에 의 GA의 응용가능성을 검토한다.

2. 배관 모델과 응답 계산

2.1 배관계의 모델링

배관계의 모델은 Fig. 1과 같이 상하방향 운동의 1차원 모델로 고려하고, 취급을 간단히 하기 위해 다음과 같이 가정한다.

① 배관계의 질량은 집중질량으로 모델화한다.

* 부경대학교 기계공학과
** 부경대학교 대학원
*** 한국기계연구원 원자력공인사업단

- ② 각 집중질량사이의 부재는 질량이 없고, 강성만을 가지는 스프링으로 모델화한다.
- ③ 각 집중질량은 수직방향으로 병진운동만 한다.
- ④ 각 집중질량들 사이의 부재의 스프링정수는 각각 모두 같다.

이상의 가정에 의해 구성되는 질점수 5의 배관 모델을 Fig. 1에 나타낸다. Fig. 1과 같은 배관계에 Fig. 2와 같이 각각 강성계수 k_i 와 감쇠계수 c_i ($i = 1 \sim 5$)를 가지는 지지대(support)를 설치한다. 이때 양단고정부에 가해지는 지진파가진에 대한 각 질점의 절대가속도응답의 rms합을 최소로 하도록 하는 최적화문제를 정식화한다.

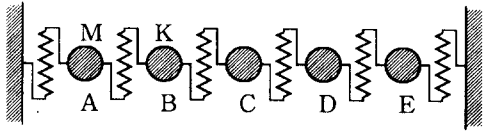


Fig. 1 Mass-spring model of piping system

2.2 운동방정식의 유도

배관계의 질점·스프링모델의 양단지지점에 x_0 의 지진변위가 입력되면, 각 질점의 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$M\ddot{z}_i + K(z_i - x_0) = 0 \quad (i = 1 \sim 5) \quad (1)$$

여기서 M 은 질점의 질량, K 는 부재의 스프링정수, z_i 는 질점 i 의 절대변위이다. 식 (1)에 각 질점의 상대변위 $x_i = z_i - x_0$ 를 도입하고, 운동방정식을 변형하여 행렬로 표시하면

$$M\ddot{x} + Kx = -M\ddot{x}_0 I \quad (2)$$

로 된다. 여기서 I 는 단위행렬, \ddot{x}_0 는 입력지진파의 가속도이다. 해석에 이용한 입력지진파는 단주기성분을 많이 포함한 대표적인 지진파로서 EI Centro NS파, Taft NS파를, 그리고 장주기성분을 많이 포함한 지진파로서 Akita NS파를 각각 이용하였다.

배관계의 각 질점에는 Fig. 2에 나타내는 지지대

s_i 를 부착한다. 지지대는 스프링정수 k_i 의 스프링과 감쇠계수 c_i 의 감쇠기로 구성되어 있다. 이 지지대를 부착하는 것에 의해, 각 질점은 그 상대변위 x_i 와 상대속도 \dot{x}_i 에 비례하는 반력 F_i 를 받는다. F_i 는 식 (4)와 같이 표시된다.

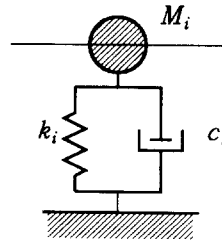


Fig. 2 Support model

$$F_i = k_i x_i + c_i \dot{x}_i \quad (3)$$

이 F_i 를 벡터표시하고, 식 (2)에 대입하면 지지대를 고려한 배관계의 운동방정식은 다음 식과 같이 된다.

$$M\ddot{x} + Kx = -M\ddot{x}_0 I - F \quad (4)$$

2.3 배관의 응답계산

배관의 응답은 $t=0 \sim 20$ 초(Akita NS파의 경우는 40초)까지를 $\Delta t = 0.01$ sec의 시간증분으로 하여 계산점수 $N=2000$ 또는 $N=000$ (Akita NS파)으로 \ddot{x}_i 를 중앙차분법을 이용해서 구하고 절대가속도응답 \ddot{z}_i 를 다음 식에서 구한다.

$$\ddot{z}_i(t) = \ddot{x}_i(t) + \ddot{x}_0(t) \quad (5)$$

본 계산에서 질점 i 의 절대가속도응답 \ddot{z}_i 의 rms값 e_i 는 식 (6)과 같이 계산하고, 그 합 e 를 구한다.

$$e_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \ddot{z}_i^2} \quad (6)$$

$$e = \sum_{i=1}^n e_i \quad (7)$$

여기서 n 은 질점의 수(=5)이다.

Table 1 GA parameters

초기생물집단수(N)	20개체
도태방법	적응도비례전략
교차방법	1점 교차
교차확률	60%
돌연변이확률	지수함수

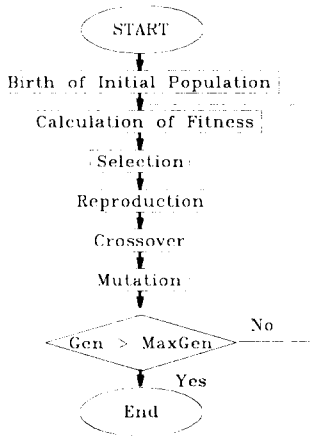


Fig. 3 Flow chart of GA

3. GA에 의한 최적화

GA는 생물진화의 원리인 자연도태(natural selection)와 유전학(genetics)에 착상을 얻은 확률적 탐색법이다. 지금까지 많은 적용예에서 GA는 방대한 해공간 속에서도 강한 탐색능력을 가지고 있으며, 다양한 최적화문제와 학습문제에서 이 방법의 우수성이 입증되었다. 또한 GA는 탐색공간에 제한을 받지 않으며, 다점탐색을 하기 때문에 국소최적해에 빠질 가능성이 적다.⁽³⁾

GA는 우수한 형질을 가진 개체가 환경에 더 잘

적응하여 더 큰 생존확률을 가지고 더 많은 교배(selection)에 참가하여 우수한 자손을 생성한다는 자연계의 법칙과 번식(reproduction), 교차(crossover), 돌연변이(mutation)의 과정을 수행하는 유전학에 착상을 얻는 최적화방법이다. 본 연구에 사용된 GA의 흐름도와 GA파라미터를 각각 Fig. 3과 Table 1에 나타낸다. GA파라미터는 전보⁽⁴⁾에서 수행한 연구 결과에 따라 결정된 값을 이용한다. 이하에 GA에 의한 최적화절차를 나타낸다.

1) 기존의 GA가 유전자로서 이진수(0과 1)를 이용하여 염색체를 표현하였으나, 본 논문에서는 Fig. 4와 같이 정수를 이용하여 하나의 염색체를 표현한다. 본 논문에 적용한 방법은 아래와 같다.

5	2	1	3	4
---	---	---	---	---

Support points 1st 2nd 3rd 4th 5th

Fig. 4 Genotype

배관계를 5질점으로 모델링한다면, 위의 개체는 길이가 5가 되고, 1번 질점에 5번 지지대가, 2번 질점에 2번 지지대가 배치되어 있는 경우를 표현하고 있다.

2) 위와 같은 방법으로 초기에 지정된 갯수만큼 임의로 개체를 만들어서 초기집단(initial population)을 만들어낸다. 그리고 각각의 개체를 평가함수를 이용하여 적응도(fitness)를 계산한다. 그리고 이 개체들에 적응도순으로 순위를 주고, 상위그룹 40%에 속하는 개체중에서 임의로 교배에 참여할 개체를 선택하는 적응도 비례전략을 사용한다.

3) 교차는 2)번 과정에서 선택된 개체들에 대해서 수행된다. 2개의 개체가 선택되어 교차확률에 따라서 일부분을 교환하여 새로운 2개의 개체를 만들어낸다. 본 연구에서는 임의로 개체의 한점을 잡아서 교차를 수행하는 1점교차(one-point crossover)를 이용하였다.

4) 교차과정에서 교차가 이루어진 후 다시 돌연변이과정을 거친다. GA에서 돌연변이는 개체의 다양성을 높이고, 해가 국소최적해에 빠지지 않도록 하는 중요한 과정이다. 교차의 과정을 거친 개체는 돌연변이확률에 따라서 변화된다. 본 연구에서는 1~6의 6개의 제한된 숫자를 이용하여 염색체를 만든다. 즉 1개의 숫자가 정해지면 이 숫자에 대해서

대립유전자가 5개가 존재하게 되는데 돌연변이시에 이 대립유전자 5개중에서 임의로 선택하여 바꾸는 방법을 사용한다. GA에서 돌연변이는 초기에 만들어진 집단의 다양성을 높이기 위한 것으로, 진화의 초기에는 뛰어난 성능을 발휘하지만, 진화의 후반부에는 높은 적응도를 바꿔버릴 수도 있다. 따라서 여기에서는 세대가 진행됨에 따라서 돌연변이확률을 지수함수를 이용하여 감소하게 하였다.

실수를 이용해서 염색체를 만들 때에는 이진수를 이용할 때보다 더욱 정확하게 해를 표현할 수 있다. 하지만 실제로 실수를 사용하게 되면 대립유전자가 엄청나게 많으므로 돌연변이과정에서 대립유전자로 대체하는 방법을 사용할 수 없다.

5) 위의 조작을 통해서 다시 지정된 갯수만큼의 개체를 만들어내고 다시 2) ~ 4)의 계산을 반복한다.

따라서 본 최적배치문제는 식 (7)의 e 값을 평가함수의 적응도(fitness)로 하여, 이 값이 최소로 되도록 지지대를 배치하는 것이다.

4. 계산결과

본 연구에서는 질점수가 5개인 경우의 최적지지대 배치문제에 대해서 계산을 수행한다. 계산에 있어서 각 수치를 이하와 같이 정하였다.

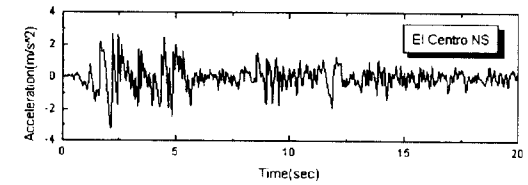
부재의 스프링정수	$K = 20,000 \text{ N/m}$
부재의 질량	$M = 33.94 \text{ kg}$
지지대의 배치수	= 5 개소
지지대의 종류	= 6 종류

Table 2 Support characteristics

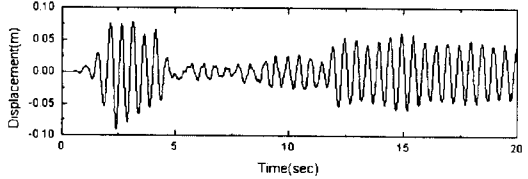
Support point	Spring constant (N/m)	Damping coefficient (N·s/m)
s_1	0	0
s_2	10,000	260.52
s_3	20,000	285.39
s_4	30,000	308.26
s_5	50,000	349.53
s_6	100,000	435.94

또한 사용되는 지지대의 각 특성치는 Table 2와

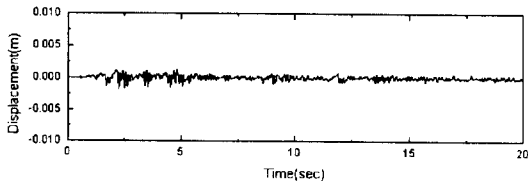
같다. 6종류의 지지대 중에서 중복을 허용하여 5개를 선택하도록 한다. 이때 개체수는 20개, 세대는 35세대까지 계산을 수행하였다.



(a) Input acceleration



(b) Displacement at mid-point without supports



(c) Displacement at mid-point with optimum support

Fig. 5 Time history responses (El Centro NS)

Fig. 5는 시간응답의 한 예로서 El Centro NS 지진파(그림 a)가 작용하였을 때의 배관중앙부에서의 변위응답을 지지대가 없는 경우(그림 b)와 최적배치된 경우(그림 c)에 대해 나타낸 것이다.

Fig. 6에 El Centro 지진파에 대하여 GA로 시뮬레이션하였을 때의 적응도(fitness)의 수렴특성을 나타내었다. 이 경우에는 지지대를 배치할 수 있는 경우의 수가 $6^5 (=7766)$ 으로 해공간이 그리 넓지 않으므로 신속하게 최적해를 찾아내고 있다. 이 과정으로 찾아낸 최적의 값에 대응하는 지지대의 배치를 최적배치로 간주한다. 이로부터 GA가 지진파입력시의 배치문제에 대하여 최적해의 탐색능력을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 이를 확인하기 위해서 6^5 가지의 모든 경우에 대해서 rms값을 계산하

고, rms값의 순으로 상위 4위까지와 최하위값 (Max)을 Table 3에 나타내었으며, GA의 결과와 잘 일치하고 있다. Table 4는 배관계의 각 절점 위치에서의 변위응답을 지지대가 없는 경우와 지지대가 최적배치된 경우에 대해 나타내고 있다.

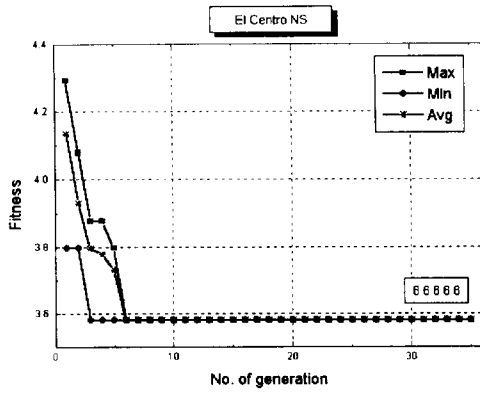


Fig. 6 Transition of fitness function

Table 3 Best 4 of support allocation

Rank	Allocation					rms value (m/s ²)
	A	B	C	D	E	
1	6	6	6	6	6	3.48874
2	6	6	4	6	6	3.69871
3	6	6	2	6	6	3.70150
4	6	6	6	2	6	3.70519
	6	2	6	6	6	
Max.	1	1	1	1	4	30.65117
	4	1	1	1	1	

Table 4 Comparison with initial and optimum conditions

Support point	Displacement(cm)	
	Without support	Optimum allocation
1	1.4915	0.0275
2	2.5627	0.0336
3	2.9626	0.0347
4	2.5627	0.0336
5	1.4915	0.0275

Table 3은 본 연구에서 이용된 El Centro NS파, Taft NS파 및 Akita NS파에 대한 최적배치결과와 그때의 최소 rms값을 나타내고 있다.

탁월주파수가 비교적 낮은 El Centro파(0.3 Hz, 1~2 Hz, 5 Hz 부근)와 Akita파(0.4~1.2 Hz)의 경우는 강지지조건을 만족하도록 하는 배치를 나타냈으며, 한편 비교적 탁월주파수가 높은 Taft파(2.7~3.5 Hz, 5.4~6.4 Hz, 8~9 Hz)의 경우는 유연지지형태가 되도록 배치되고 있음을 알 수 있다.

Table 5 Comparison of optimum allocation

Input wave	Allocation					Minimum fitness (m/s ²)
	A	B	C	D	E	
El Centro NS	6	6	6	6	6	3.4887
Taft NS	2	2	3	2	2	3.4452
Akita NS	6	6	6	6	6	2.8323

5. 결론

배관계의 최적지지대 배치문제에 대해 유전알고리즘을 이용한 해법을 정식화하고, 3종류의 실제지진파를 이용하여 GA의 최적화능력과 응용가능성을 검토하고 좋은 결과가 얻어지는 것을 확인하였다. 본 방법을 실제 배관계에 확장하므로써 각종 플랜트용 배관계의 내진설계에 기여할 수 있으리라 생각된다.

참고문헌

- 1) 일본기계학회편, 내진설계와 구조동역학, 일본공업출판(주), 1985, pp.189~191
- 2) Iwatsubo, T., Hanshin-Awaji 대지진에 있어서 Life-line의 기계시설의 피해, 일본기계학회지 Vol. 99, No. 935, pp.809~815, 1996. 10.
- 3) Goldberg, D. E., Genetic Algorithm in Search, Optimization & Machine Learning, Addison-wesley Pub. Co., pp.1~146, 1989
- 4) 전상범, 양보석, 유영훈, 김진욱, 유전알고리즘을 이용한 배관지지대의 최적배치(제1보), 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 1997