

다목적 최적화 기반 구조물 수명관리의 효율적 의사결정을 위한 목적감소 기법의 적용

김선용
원광대학교 토목환경공학과

Objective Reduction Approach for Efficient Decision Making of Multi-Objective Optimum Service Life Management

Sunyong Kim

Department of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University

요약 사회기반시설물은 적절한 수명관리를 통해 경제적이고 안전한 구조성능을 유지한다. 일반적으로 최적화 기법을 적용하여, 유지보수의 시점과 방법을 결정하게 되는데, 이 적용에 있어서 단일 목적함수만을 고려하기 보다는 다수의 목적함수를 동시에 고려하는 것이 보다 합리적인 의사결정을 유도한다. 최근까지 수명관리에 관련한 연구는 생애주기 비용 최소화 또는 구조성능 최대화와 관련한 목적함수를 적용하여 왔으며, 새로운 확률론적 구조성능 및 안전성 평가 기법을 이용하여 다양한 형태의 목적함수를 개발/적용하고 있다. 이러한 다수의 목적함수를 동시에 고려하는 다목적 최적화 기반 사회기반시설물 수명관리가 최근 국내외에서 많이 적용되고 있다. 하지만, 수명관리 최적화를 위한 목적함수의 개수가 증가함에 따라 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 많은 계산시간이 소요되며, 특히 확률론적 계산을 위한 시뮬레이션 기법이 적용되는 목적함수의 경우 계산시간은 더욱 증가하게 된다. 또한, 목적함수의 개수 증가에 따라 계산결과의 차수가 증가하기 때문에 이를 시각화하고 나아가 의사결정에 어려움이 발생한다. 따라서, 본 논문에서는 다목적 최적화 문제의 계산된 결과를 바탕으로 한 의사결정의 효율성 향상을 위해 최소 필수 목적함수를 구별하는 목적감소 기법을 적용하여 콘크리트 교량 상판의 수명관리에 대한 연구를 수행하였으며, 최초 4개의 목적함수가 2개까지 감소되는 결과를 보여준다.

Abstract The service life of civil infrastructure needs to be maintained or extended through appropriate inspections and maintenance planning, which results from the optimization process. A multi-objective optimization process can lead to more rational and flexible trade-off solutions rather than a single-objective optimization for the service life management of civil infrastructure. Recent investigations on the service life management of civil infrastructure were generally based on minimizing the life-cycle cost analysis and maximizing the structural performance. Various objectives for service life management have been developed using novel probabilistic concepts and methods over the last few decades. On the other hand, an increase in the number of objectives in a multi-objective optimization problem can lead to difficulties in computational efficiency, visualization, and decision making. These difficulties can be overcome using the objective reduction approach to identify the redundant and essential objectives. As a result, the efficiency in computational efforts, visualization, and decision making can be improved. In this paper, the multi-objective optimization using the objective reduction approach was applied to the service life management of concrete bridges. The results showed that four initial objectives can be reduced by two objectives for the optimal service life management.

Keywords : Civil Infrastructure, Inspection, Maintenance, Multi-Objective Optimization, Objective Reduction Approach, Service Life

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의연구비지원(16RDRP-B076564-03)에 의해 수행되었음

*Corresponding Author : Sunyong Kim(Wonkwang Univ.)

Tel: +82-63-850-6716 email: sunyongkim@wonkwang.ac.kr

Received October 31, 2016

Revised January 6, 2017

Accepted February 3, 2017

Published February 28, 2017

1. 서론

사회기반시설물의 수명관리는 구조적 성능과 안전성 관련 요구가 지속적으로 증대하고 있지만, 재정적 여건이나 관련 인력의 투입에 제한을 받고 있어, 수명관리의 효율적 의사결정이 필요한 실정이다[1]. 따라서, 구조적 성능과 안전성, 그리고 비용을 동시에 고려하는 최적의 유지관리 전략 수립을 위한 노력이 지속되고 있다[2]. 일반적으로 두 개 이상의 목적함수(Objective function)를 고려하는 다목적 최적화 기법(Multi-objective optimization)을 사회기반시설 수명관리에 적용함으로써 의사결정자에게 제공되는 다양한 결과는 보다 현실적인 유지관리 전략수립을 유도한다[3]. 하지만, 목적함수의 개수가 증가함에 따라 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 많은 계산시간이 소요되며, 특히, 확률론적 계산을 위한 시뮬레이션 기법을 적용하는 목적함수의 경우 그 계산은 더 늘어나게 된다. 또한, 목적함수의 개수 증가에 따라 계산 결과의 차수가 증가하기 때문에 이를 시각화하고 나아가 의사결정에 어려움이 발생한다[4]. 이를 해결하기 위한 방법으로 본 논문에서는 목적함수 감소 기법(Objective reduction approach)을 적용한다. 이는 목적함수의 상호관계를 분석하여, 최소 필수 목적함수를 구하게 된다.

본 논문에서는 대표적인 사회기반시설물인 콘크리트 교량의 수명관리를 위한 유지보수 점검 전략 수립에 사용되는 목적함수를 소개하고, 이를 다목적 최적화기법에 적용한다. 또한, 적용되는 목적함수의 상호관계를 목적함수 감소 기법을 통해 분석하여, 최소 필수 목적함수를 바탕으로 의사결정에 효율성을 높이고자 한다. 다목적 최적화기법 적용되는 목적(Objective)은 생애주기비용(Life-cycle cost)의 최소화, 사용수명(Service life)의 최대화, 파괴확률(Probability of failure)의 최소화, 그리고 구조물 손상발견 지연(Damage detection delay)의 최소화이다.

2. 목적함수 감소기법

최적화문제는 목적(Objective), 설계변수(Design variable)와 제한조건(Constraint)으로 구성된다[5]. 목적함수의 개수에 따라 해(Solution)의 차수가 결정되는데, 목적함수가 여러 개의 경우 다수의 해를 가지며 이를 파레토 해(Pareto solutions)라고 한다. 일반적으로 목적함수의

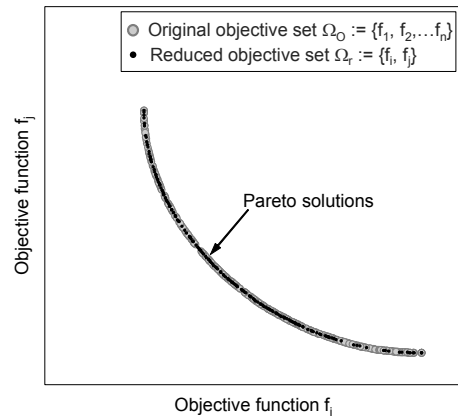


Fig. 1. Comparison between Pareto solutions associated with Ω_O and Ω_r for $\Delta_{norm} = 0$

개수가 증가할수록 신뢰성 있는 파레토 해를 구하기 위한 계산시간이 증가하며, 이를 시각화하고 나아가 의사결정을 하는데 어려움이 발생한다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 다양한 목적함수 감소기법들이 개발/적용되고 있는데, 본 논문에서는 [6]과 [7]에서 개발된 지배관계(Dominance relation) 기반 목적함수 감소기법을 적용한다.

지배관계 기반 목적함수 감소기법에서는 n 개의 목적함수를 가지는 최초 목적함수 집합 $\Omega_O = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 과 Ω_O 에 포함되는 임의의 목적함수 집합 Ω_r 과의 정규 상충도(Normalized degree of conflict) Δ_{norm} 를 계산한다. 정규 상충도 Δ_{norm} 는 Ω_O 과 Ω_r 에 해당하는 파레토 해의 상대적인 차이로 정의될 수 있다. 즉, $\Delta_{norm} = 0$ 일 경우, Ω_O 에서의 파레토 해와 Ω_r 의 파레토 해는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 서로 일치하여, 결과적으로 다목적 최적화 문제의 최초 목적함수 집합 Ω_O 이 감소 목적함수 집합 Ω_r 로 대체 가능하게 된다. 이때 Ω_r 의 목적함수를 필수목적(Essential objective) 함수라고 하며, 해당 최소 집합단위를 최소 필수목적함수 집합(Minimum essential objective set)이라고 한다. 또한, Δ_{norm} 가 커질수록 Ω_O 의 파레토 해와 Ω_r 의 파레토 해는 그 차이가 커진다. 본 논문에서 적용한 목적함수 감소기법에 대한 상세한 이론적 배경과 설명은 [6]과 [7]에서 찾아볼 수 있다.

3. 구조물 수명관리를 위한 목적함수

사회기반시설물의 수명관리 및 유지보수 전략 수립을

위한 최적화기법 적용에 있어 구조적 성능과 비용을 고려한 다양한 목적함수가 적용될 수 있다[2]. 가장 일반적으로 적용되고 있는 목적함수로는 생애주기비용 C_{life} 최소화이며, 이는 다음의 식을 이용하여 계산한다[8].

$$C_{life} = C_{ini} + C_{ma} + C_{fail} \quad (1)$$

여기서, C_{ini} 는 초기비용, C_{ma} 는 유지관리비용, 그리고 C_{fail} 은 구조물의 파괴로 인해 발생하는 손실비용이며, 다음의 식을 통해 구할 수 있다.

$$C_{fail} = P_f C_f \quad (2)$$

여기서, C_f 는 구조물의 파괴로 인해 발생하는 손실을 나타내며, 목표수명 t_{life}^* 에서의 파괴확률 P_f 는 다음과 같이 정의한다.

$$P_f = P(t_{life} \leq t_{life}^*) \quad (3)$$

유지보수에 의해 연장되는 사용수명의 최대화 또한 최적화기법의 목적함수로 적용할 수 있다[9]. i 번째 유지보수를 고려한 사용수명 $t_{life,i}$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$t_{life,i} = (1 - P_{ins}) \cdot t_{life,i-1} \quad \text{for } t_{ins,i} \leq t_{life,i-1} \quad (4a)$$

$$+ P_{ins} \cdot (t_{life,i-1} + t_{ex}) \quad t_{life,i-1}$$

$$t_{life,i} = t_{life,i-1} \quad \text{for } t_{ins,i} > t_{life,i-1} \quad (4b)$$

Eq. (4a)의 사용수명 연장기간 t_{ex} 은 구조물의 손상정도를 고려한 유지보수 방법에 따라 결정된다. 또한, 유지보수 점검에 따른 손상감지 확률 P_{ins} 는 Eq. (5)와 같이 표현할 수 있다[10].

$$P_{ins} = \Phi \left[\frac{\delta(t) - \delta_{0.5}}{\sigma_\delta} \right] \quad (5)$$

Φ 는 표준정규분포 누적함수(Standard normal cumulative distribution function)이며, σ_δ 는 손상정도 δ 의 표준편차이다. 또한, $\delta_{0.5}$ 는 검사를 통해 손상이 발견될 확률이 0.5일 때의 손상정도를 나타낸다.

또한, 구조물의 손상이 한계시점 t_{cr} 내에 감지가 되어야 파괴를 방지할 수 있다는 점을 고려하여, 구조물의 파괴확률 P_{fail} 을 다음과 같이 표현할 수 있다[11].

$$P_{fail} = P(t_{cr} - t_{det} \leq 0) \quad (6)$$

여기서, t_{det} 은 구조손상이 감지되는 시점을 나타낸다. Eq. (6)은 손상발견 지연 t_{dely} 와 시간기반 안전여유도

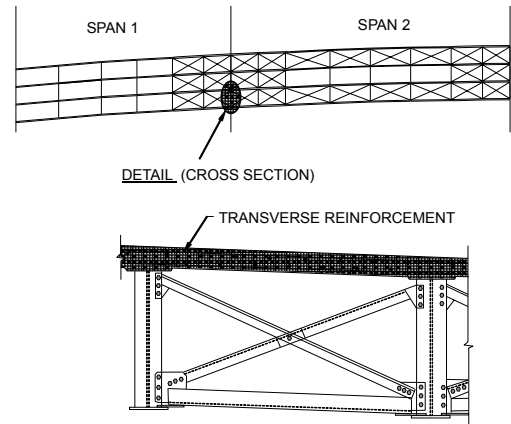


Fig. 2. I-39 Northbound Wisconsin River Bridge (adapted from [13])

(Time-based safety margin) t_{ma} 을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{fail} = P(t_{ma} - t_{det} \leq 0) \quad (7)$$

여기서, t_{ma} 는 구조물 손상의 한계시점 t_{cr} 과 손상 발생시점과의 차이이며, 손상발견 지연 t_{dely} 는 다음과 같이 정의한다[12].

$$t_{dely} = \quad (8)$$

$$\sum_{k=i}^{N_{ins}+1} \left[\left\{ \prod_{j=1}^k (1 - P_{ins,j-1}) \right\} P_{ins,k} t_{ins,k} \right] - t$$

Eq. (8)에서 N_{ins} 는 점검횟수, $t_{ins,k}$ 는 k 번째 점검적용 시간, t 는 손상발생시점을 나타낸다. 손상발생시점 t 의 불확실성을 고려하여, 기대 손상발견 지연 $E(t_{dely})$ 는 다음이 나타낸다.

$$E(t_{dely}) = \sum_{i=1}^{N_{ins}+1} \left(\int_{t_{ins,i-1}}^{t_{ins,i}} [t_{dely,i} f_T(t)] dt \right) \quad (9)$$

여기서, $f_T(t)$ 는 t 의 확률밀도함수(Probability density function)이다. 앞서 설명한 바와 같이, 본 논문에서의 구조물 수명관리 최적화를 위해 Eq. (1)의 생애주기비용 C_{life} 의 최소화, Eq. (4)에서 정의된 사용수명 기댓값 $E(t_{life})$ 의 최대화, Eq. (6)의 파괴확률 P_{fail} 과 Eq. (9)의 구조물 손상발견 지연 기댓값 $E(t_{dely})$ 의 최소화를 적용한다.

4. 콘크리트 교량 수명관리의 적용

수명관리 대상의 구조물은 미국 Wisconsin에 위치한 I-39 Northbound 교량이며, Fig. 2에서 보는 바와 같이 콘크리트 상판의 상부 철근 부식으로 인한 열화현상에 초점을 둔다. 해당 교량의 상세한 설명은 [13]에서 찾아볼 수 있다. 본 연구에서는 국지적 부식(Pitting corrosion) 모델을 사용하여, 최초 수명 22.14년의 평균 값과 4.91년의 표준편차를 가지는 로그정규분포(여기서, LN(22.14년; 4.91년)으로 표시)를 적용하였으며, 손상정도(Damage intensity)에 따른 두 가지 유형의 유지보수 방법을 적용하여 예상되는 수명연장을 각각 LN(6년; 0.5년)과 LN(22.14년; 4.91년)으로 가정하였다[9].

4.1 다목적 최적화 문제의 구성

구조물 수명관리를 위한 다목적 최적화 문제는 다음과 같이 구성된다.

$$\text{Find } \mathbf{t}_{ins} = \{t_{ins,1}, t_{ins,2}, \dots, t_{ins,N_{ins}}\} \quad (10a)$$

$$\text{to minimize } C_{life}, \text{ maximize } E(t_{life}), \quad (10b)$$

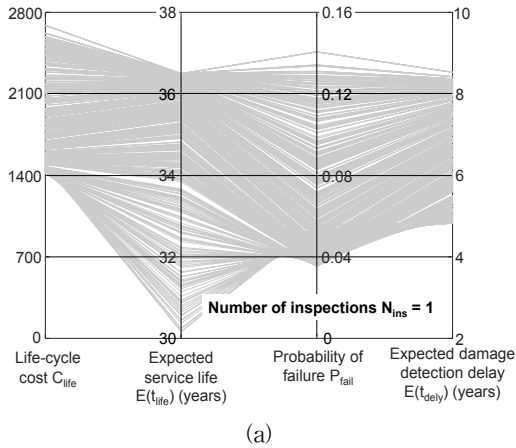
$$\text{minimize } P_{fail} \text{ and } E(t_{delay}) \quad (10c)$$

$$\text{subject to} \quad (10c)$$

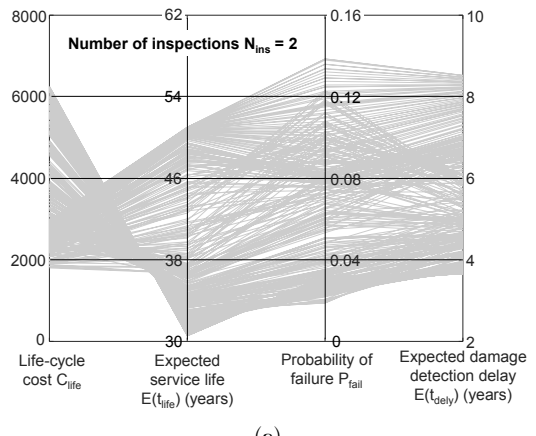
$$1 \text{ year} \leq t_{ins,i} - t_{ins,i-1} \leq 20 \text{ years}$$

$$\text{given } N_{ins} \quad (10d)$$

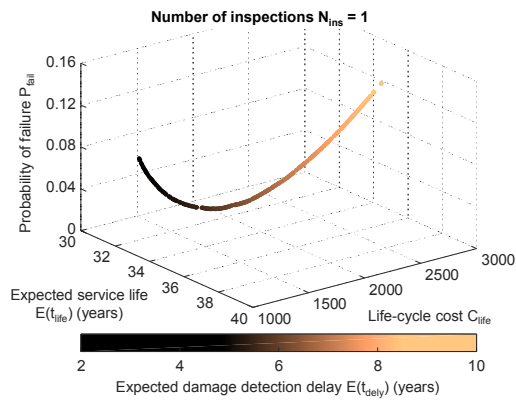
여기서, 목적함수는 Eq. (10a)에서 보는 바와 같으며, 설계변수는 유지보수를 위한 점검시간 t_{ins} 이다. 또한, 점검시간의 간격은 1년 이상, 20년을 넘지 않도록 하며, 점검시간 t_{ins} 의 횟수 N_{ins} 는 주어진다. Eq. (10)에서 정의된 최



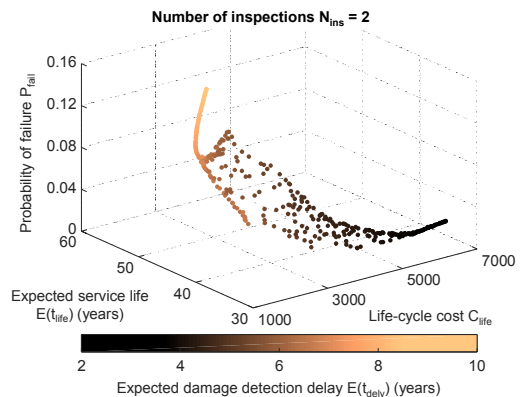
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 3. Pareto solutions for number of inspections $N_{ins} = 1$: (a) Parallel coordinate system; (b) 3D Cartesian coordinate system

Fig. 4. Pareto solutions for number of inspections $N_{ins} = 2$: (a) Parallel coordinate system; (b) 3D Cartesian coordinate system

Table 1. Normalized degree of conflict Δ_{norm} between reduced objective set and original objective set

$N_{ins} = 1$		$N_{ins} = 2$	
Reduced objective set	Δ_{norm}	Reduced objective set	Δ_{norm}
{f ₁ , f ₂ }	0.21	{f ₁ , f ₂ }	1.0
{f ₁ , f ₃ }	1.0	{f ₁ , f ₃ }	0.78
{f ₁ , f ₄ }	1.0	{f ₁ , f ₄ }	0.78
{f ₂ , f ₃ }	0.51	{f ₂ , f ₃ }	0.51
{f ₂ , f ₄ }	0.0	{f ₂ , f ₄ }	0.57
{f ₃ , f ₄ }	1.0	{f ₃ , f ₄ }	1.0
{f ₁ , f ₂ , f ₃ }	0.21	{f ₁ , f ₂ , f ₃ }	0.50
{f ₁ , f ₂ , f ₄ }	0.0	{f ₁ , f ₂ , f ₄ }	0.53
{f ₁ , f ₃ , f ₄ }	1.0	{f ₁ , f ₃ , f ₄ }	0.78
{f ₂ , f ₃ , f ₄ }	0.0	{f ₂ , f ₃ , f ₄ }	0.19

Note: f₁ = minimizing C_{lcc}; f₂ = maximizing E(t_{life});
f₃ = minimizing P_{fail}; f₄ = minimizing E(t_{delay})

적화 문제는 MATLAB(R2016b)의 Optimization toolbox에서 제공되는 Multi-objective genetic algorithm을 이용하였으며, 초기 모집단 300, 세대수 변환 1000을 제외한 다른 변수는 MATLAB의 기본값을 적용하여 최종 파레토 해를 얻었다.

4.2 다목적 최적화 문제의 파레토 해

Fig. 3과 Fig. 4에서는 Eq. (10)에서 정의된 최적화 문제의 최종 파레토 해를 $N_{ins} = 1$ 과 2에 대해 각각 시각화 하였다. Fig. 3(a)와 Fig. 4(a)는 4차원의 최종 파레토 해의 C_{life} , $E(t_{life})$, P_{fail} , $E(t_{delay})$ 값을 그래프의 수직축에 표시하고 이를 직선으로 연결한 것으로 이와 같은 유형의 그래프를 평행좌표(Parallel coordinate) 그래프라고 한다. 여기서, 한 개의 해는 한 개의 연결된 직선에 해당하므로 총 연결된 직선의 개수는 모집단의 개수인 300개이다. 또한, Fig. 3(b)와 Fig. 4(b)에서는 4차원의 파레토 해를 3차원 직교좌표계와 컬러바로 표시하였다. Fig. 3(a)혹은 Fig. 4(a)의 한 개의 연결된 직선이 Fig. 3(b)혹은 Fig. 4(b)의 한 개의 점에 대응된다. Fig. 3(a)와 3(b)에서 $E(t_{life})$ 의 최소값이 약 30년으로 유사한 값을 가지게 되는데, 이는 유지보수 점검 횟수와 시기에 영향을 받는 손상감지 확률 P_{ins} 과 사용수명 연장 t_{ex} 을 고려한 t_{life} 의 확률론적 평가로 인한 결과라 볼 수 있다.

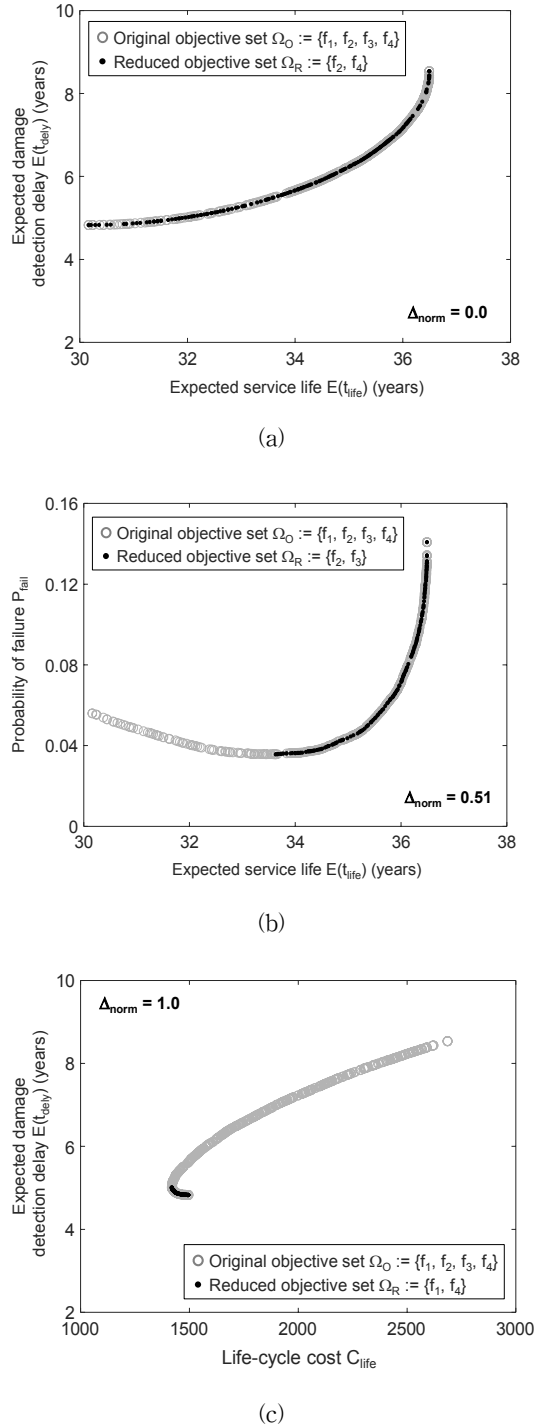


Fig. 5. Comparison between Pareto solution sets for number of inspections $N_{ins} = 1$: (a) $\Delta_{norm} = 0.0$; (b) $\Delta_{norm} = 0.51$; (c) $\Delta_{norm} = 1.0$

4.3 감소목적함수 집합과의 상충관계 및 필수 목적함수 집합

Fig. 3에서의 파레토 해를 지배관계 기반 목적함수 감소기법에 적용하여 최초의 목적함수 집합 $\Omega_0 = \{f_1 = \text{minimizing } C_{lcc}, f_2 = \text{maximizing } E(t_{life}), f_3 = \text{minimizing } P_{fail}, f_4 = \text{minimizing } E(t_{delay})\}$ 과 이에 포함되는 임의의 감소 목적 집합 Ω_k 과의 정규 상충도 Δ_{norm} 를 Table 1에서 보는 바와 같이 유지보수를 위한 점검 횟수 $N_{ins} = 1$ 과 2에 대해 계산하였다. $N_{ins} = 1$ 일 경우, $\Delta_{norm} = 0.0, 0.51, 1.0$ 에 대하여 Ω_0 과 Ω_k 에 해당하는 파레토 해를 Fig. 5에서 비교하였다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 Δ_{norm} 가 증가하여 1에 접근할수록 두 파레토 해의 겹치는 부분이 작아지는 것을 알 수 있다. 특히, $\Delta_{norm} = 0.0$ 에 해당하는 최초의 목적 집합 (Original objective set) $\Omega_0 = \{f_1, f_2, f_3, f_4\}$ 과 감소 목적 집합 (Reduced objective set) $\Omega_k = \{f_2, f_4\}$ 의 파레토 해는 서로 일치함을 알 수 있다. 이는 최초 목적함수 $\{f_1, f_2, f_3, f_4\}$ 가 $\{f_2, f_4\}$ 로 대체되어도 그 해에는 영향이 없음을 의미한다. 따라서, 파레토의 해를 시각화한 Fig. 3과 Fig. 5(a)는 동일한 결과를 의미하며, 지배관계 기반 목적함수 감소기법에 적용하여 얻어진 Fig. 5(a)를 사용하는 것이 직관적 의사결정에 유리하다고 볼 수 있다. 또한, $\{f_2, f_4\}$ 를 포함한 감소 목적 집합인 $\{f_1, f_2, f_4\}$ 과 $\{f_2, f_3, f_4\}$ 도 마찬가지로 Δ_{norm} 가 0.0임을 알 수 있다. 여기서, $\Omega_k = \{f_2, f_4\}$ 를 최소 필수 목적함수 집합이라고 한다. 한편, 유지보수를 위한 점검 횟수 $N_{ins} = 2$ 일 경우는 Table 1에서 보는 바와 같이 $\Delta_{norm} = 0.0$ 에 해당하는 감소 목적 집합 Ω_k 이 존재하지 않음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 다목적 최적화 기법을 이용한 수명관리에 있어서 목적함수의 증가에 따른 의사결정의 효율성을 높이기 위해 목적감소 기법을 적용하였다. 여기서 사용된 수명관리 목적은 네 가지로 생애주기비용의 최소화, 사용수명의 최대화, 파괴확률의 최소화, 구조물 손상 발견 지연 기댓값의 최소화이다. 본 논문에서 제시된 큰 크리트 교량 상판의 수명관리 적용에 있어서, 유지보수를 위한 점검의 횟수가 1일 경우 네 개의 목적함수를 모두 적용하는 것과 사용수명의 최대화와 생애주기 비용의

최소화를 적용하는 것이 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

본 논문에서 유지보수를 위한 점검 횟수를 2회 이내로 제한하여 네 가지의 목적함수에 적용하였지만, 점검 횟수 3회 이상을 가지는 수명관리와 관련한 어떠한 목적함수도 확대 적용할 수 있다.

사용된 목적감소 기법은 이미 구해진 파레토 해를 통해 목적함수 집합의 상관관계를 평가하였다. 하지만, 이를 다목적 최적화 기법의 계산과정에 적용하여 목적함수의 개수를 줄이는 것이 결과적으로 계산의 효율성을 더욱 증대시킬 수 있을 것으로 판단되며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

References

- [1] Kabir, G., Sadiq, R., Tesfamariam, S. "A review of multi-criteria decision-making methods for infrastructure management," *Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor & Francis, 10(9), pp. 1176 - 1210, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.795978>
- [2] Frangopol, D. M., "Life-cycle performance, management, and optimization of structural systems under uncertainty: accomplishments and challenges," *Structure and Infrastructure Engineering*, Taylor & Francis, 7(6), pp. 389 - 413, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1080/15732471003594427>
- [3] Zeleny, M. *Multiple Criteria Decision Making*, McGraw-Hill, New York, 1982.
- [4] Deb, K., Saxena, D. K., "Searching for Pareto-optimal solutions through dimensionality reduction for certain large-dimensional multi-objective optimization problems," 2006 IEEE Congress on Evolutionary Computation, IEEE Press, Vancouver, BC, Canada, 2006, pp. 3353 - 3360, 2006.
- [5] Arora, J. S., *Introduction to Optimum Design*. 3rd edn, Elsevier, UK, 2012.
- [6] Brockhoff, D., Zitzler, E. "Improving hypervolume-based multiobjective evolutionary algorithms by using objective reduction methods," 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation, IEEE Press, Singapore, pp. 2086 - 2093, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEC.2007.4424730>
- [7] Brockhoff, D., Zitzler, E., "Objective reduction in evolutionary multiobjective optimization: Theory and applications," *Evolutionary Computation*, MIT Press, 17(2), pp. 135-166, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1162/evco.2009.17.2.135>
- [8] Chang, S. E., Shinozuka, M. "Life-cycle cost analysis with natural hazard risk," *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, 2(3), pp. 118 - 126, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1076-0342\(1996\)2:3\(118\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1076-0342(1996)2:3(118))
- [9] Kim, S., Frangopol, D.M., Zhu, B. "Probabilistic

- optimum inspection/repair planning to extend lifetime of deteriorating RC structures.” Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE, 25(6), pp. 534 - 544, 2011.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000197](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000197)
- [10] Frangopol, D. M., Lin, K. Y., Estes, A. C. “Life-cycle cost design of deteriorating structures,” Journal of Structural Engineering, ASCE, 123(10), pp. 1390-1401, 1997.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:10\(1390\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:10(1390))
- [11] Kim, S., Frangopol, D. M., "Cost-based optimum scheduling of inspection and monitoring for fatigue-sensitive structures under uncertainty," Journal of Structural Engineering, ASCE, 137(11), pp. 1319-1331, 2011.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000365](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000365)
- [12] Kim, S., Frangopol, D. M., “Optimum inspection planning for minimizing fatigue damage detection delay of ship hull structures,” International Journal of Fatigue, Elsevier, 33(3), pp. 448-459, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2010.09.018>
- [13] Mahmoud, H. N., Connor, R. J., & Bowman, C. A., Results of the fatigue evaluation and field monitoring of the I-39 Northbound Bridge over the Wisconsin River (ATLSS Report No. 05-04). Bethlehem, PA: Lehigh University, 2005.

김 선 용(Sunyong Kim)

[정회원]



- 2004년 2월 : 한국과학기술원 건설 환경공학과 (공학석사)
- 2011년 5월 : Lehigh University 토목공학 (공학박사)
- 2012년 5월 ~ 2015년 2월 : 한국 수력원자력(주) 중앙연구원 선임연구원
- 2015년 3월 ~ 현재 : 원광대학교 토목환경공학과 조교수

<관심분야>

구조물 유지관리, 확률론적 구조해석