

도시철도차량 신뢰도 최적 분배방법에 대한 연구

The Method of Reliability Optimal Distribution of Urban Transit Vehicle

*박기준¹, 정종덕², 한석윤², #서명원³

*K. J. Park¹, J. D. Chung², S. Y. Han², #M. W. Suh³(suhmw@skku.edu)

¹한국철도기술연구원 도시철도표준화연구단, ²한국철도기술연구원, ³성균관대학교 기계공학과

Key words : Reliability, Distribution, Urban Transit Vehicle

1. 서론

도시철도차량은 전기, 기계적으로 결합된 매우 복잡한 구조를 가진 대형시스템이며 정시성과 대량수송의 장점을 가진 시스템이므로 이에 따른 안전성의 확보가 필수적이다. 이러한 안전성 확보를 위해 도시철도차량은 철저한 유지보수 계획을 수립하며 시행하고 있다. 수행하는 도시철도차량 유지보수에 필요한 비용은 전체 운영비의 60~70% 정도를 차지할 정도로 그 영향력이 크다. 따라서 도시철도차량의 안전성 확보와 경제적 제약에 대응하는 합리적인 유지보수의 기준 마련이 절실한 실정이다. 본 연구에서는 제품이나 장치의 수명만을 고려한 기존의 유지보수 개념에서 탈피하여, 고장 분석의 시스템화를 통해 장치의 고유수명과는 관계없이 발생 가능한 우발고장도 대처할 수 있는 방안을 수립하여 도시철도차량의 안전성을 확보하고 동시에 경제성도 제고할 수 있는 신뢰도 최적분배에 대한 방법에 대해 연구하고자 한다. 본 연구에서는 도시철도차량에 대한 검수/정비주기 최적화를 모든 장치/부품에 대해 수행하지는 않으며, 유지보수 이력 데이터를 분석하여 신뢰성 확보가 중요한 기능품을 위주로 신뢰성 지표 분석과 그에 따른 최적화를 수행하여, 제안하는 방법의 유용성을 확인하고자 한다. 제안하는 방법을 부품체계(BOM) 상의 최소유지보수 부품(LRU)에서 각 서브시스템, 각 서브시스템에서 최상위 전동차까지 순차적으로 적용해 나간다면, 전체 도시철도차량에 대한 효율적인 유지보수 계획을 수립할 수 있을 것이다.

도시철도차량의 최적 신뢰도 분배를 위해 본 연구에서는 다목적 최적화 기법을 이용하여 시스템 운영비용을 최소화하며, 동시에 시스템의 신뢰도를 최대화하는 목표점을 찾는다. 이 때, 시스템 구축 및 운영에 기본이 되는 비용을 모델링하고, 구축된 비용함수는 다양한 시스템에 적용하기 위한 비용 계수를 도입하여 시스템의 특징을 반영하여 제시한다. 또한, 인공지능망을 이용하여 도시철도 서브시스템/부품간의 신뢰도 네트워크를 구성하여 시스템의 신뢰도 함수를 구축한다. 다음으로 유전자 알고리즘과 수치적 최적화 기법을 혼용하여 목표점을 초기값으로 다시 시스템 운영비용을 최소화하며, 시스템의 목표 신뢰도를 만족하는 각 컴포넌트의 유지보수 신뢰도를 배분한다.

2. 신뢰도 분배사례

2.1 복합시스템의 신뢰도 할당 및 최적화

본 연구 사례에서는 중복할당문제보다는, 최소한의 비용으로 목표신뢰도를 달성하기 위해서 시스템의 각각의 부품들에 대한 최소한의 필요 신뢰도를 평가하였다. 본 모델은 신뢰도를 증가시키는데 드는 비용에 따라서 신뢰도를 할당하였다.(예를 들어 비용이 많이 드는 부품들에 대해서는 낮은 신뢰도를 부여하였다.) 본 연구 사례에서의 할당 문제는 비선형 최적화 문제로 공식화하였으며, 그것은 Quasi-Newton과 Lagrange 승수에 기반을 둔 알고리즘을 통해서 해결하였다.

가. 모델공식화

최소한의 비용으로 목표치를 맞추기 위해서 신뢰도를 전체 혹은 일부분에 할당하는 것이 목표이다. 우선 시스템의 해석적인 신뢰도 함수를 구하는데, 이것은 각 부품들의 신뢰도의 항으로 이루어진다.

$$P: \min C = \sum_{i=1}^n c_i(R_i)$$

$$s.t. R_i \geq R_G$$

$$R_{i,\min} \leq R_i \leq R_{i,\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

다음으로 신뢰도의 함수로서 각 부품들의 비용에 관한 관계를 구한다.

$$c_i(R_i; f_i, R_{i,\min}, R_{i,\max}) = e^{\left[(1-f_i) \frac{R_i - R_{i,\min}}{R_{i,\max} - R_i} \right]}$$

유도한 위 식으로부터 아래 그림과 같이 부품의 신뢰도와 비용 함수의 관계를 구할 수 있다.

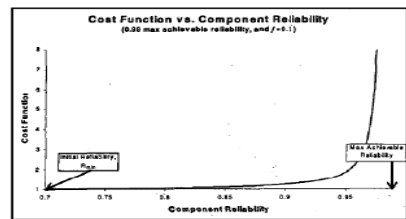


Fig. 1. 부품의 신뢰도와 비용 함수의 관계

f_i (용이성)란 전체 시스템에서 그 부품을 제외한 나머지에 대해서 상대적으로 얼마나 신뢰도의 향상이 어려운지를 나타내는 정도이며 0~1사이의 값을 가진다. 용이성을 변화시켰을 때 부품의 신뢰도와 비용 함수의 관계는 아래와 같다.

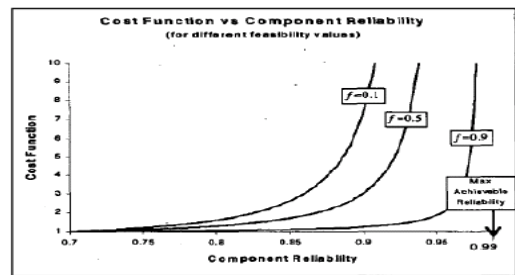


Fig. 2. 부품의 신뢰도와 비용 함수의 관계(용이성 변화)

최대 성취가능 신뢰도란 신뢰도의 한계치를 말하는 것으로 예를 들어 신뢰도 100%가 이에 해당한다. 그러나 실제로 기술적·재정적 한계로 100%는 아니다. 최대 성취가능 신뢰도를 변화시켰을 때 부품의 신뢰도와 비용 함수의 관계는 아래와 같이 나타난다.

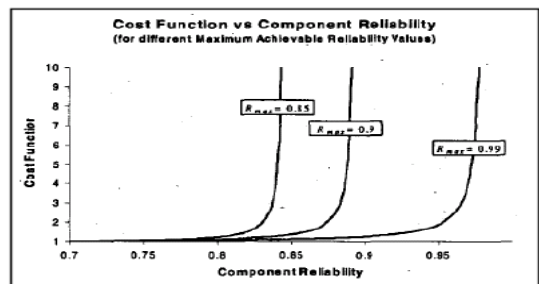


Fig. 3. 부품의 신뢰도와 비용 함수의 관계(취득 신뢰도를 변화)

나. 적용(직렬 시스템)

3개의 부품으로 연결되어 있고, 100시간에 대한 목표 신뢰도 0.9인 직렬 시스템에 대하여 비용 함수를 고려하여 최적화 문제를 formulation하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$P: \min C = \sum_{i=1}^3 e^{\left[f_i \frac{R_i - R_{i,\min}}{R_{i,\max} - R_i} \right]}$$

$$s.t. \quad R_1 R_2 R_3 = R_s \geq R_G$$

$$R_{i,\min} \leq R_i \leq R_{i,\max}, \quad i = 1, 2, 3.$$

위 최적화 식을 바탕으로 case by case로 신뢰도를 아래 표와 같이 할당할 수 있다.

Table 1. 신뢰도 할당 결과

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
부품 1	0.9655	0.9874	0.9552	0.9790	0.9295
부품 2	0.9655	0.9633	0.9649	0.9553	0.9884
부품 3	0.9655	0.9463	0.9765	0.9624	0.9797

또한 최적화 결과로부터 각 부품의 신뢰도에 대하여 민감도 분석을 수행할 수 있다. 민감도 분석이란 입력의 변화에 대한 출력의 변화로 각 부품의 신뢰도의 변화에 대한 전체 시스템의 신뢰도의 변화율이다. 식은 아래와 같다.

$$I_R(i) = \frac{\partial R_s}{\partial R_i}$$

결과로부터 민감도 분석을 수행하여 각 부품별 신뢰도 중요성을 구하면 아래와 같은 결과를 얻을 수 있다.

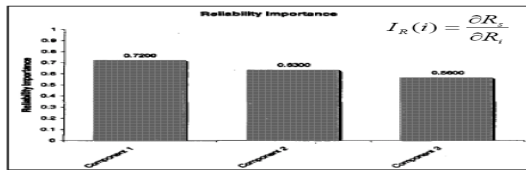


Fig. 4. 각 부품별 신뢰도 중요도 (직렬 시스템)

3. 도시철도차량 신뢰도 최적분배 방법

신뢰도 최적분배를 위해 본 연구에서는 다목적 최적화 기법을 이용하여 시스템 운영비용을 최소화하며, 동시에 시스템의 신뢰도를 최대화할 수 있는 방법을 모색하였다. 이 때, 시스템 구축 및 운영에 기본이 되는 비용을 모델링하고, 구축된 비용함수는 다양한 시스템에 적용하기 위한 비용 계수를 도입하여 시스템의 특징을 반영하여 제시한다. 또한, 인공지능망을 이용하여 도시철도 서비스시스템/부품간의 신뢰도 네트워크를 구성하여 시스템의 신뢰도 함수를 구축한다. 다음으로 유전자 알고리즘과 수치적 최적화 기법을 혼용하여 목표점을 초기값으로 다시 시스템 운영비용을 최소화하며, 시스템의 목표 신뢰도를 만족하는 각 컴포넌트의 유지보수 신뢰도를 배분한다. 본 연구에서 제안하는 도시철도차량 신뢰도 최적분배 방법에 대한 전체 흐름도는 <Fig. 5>에 나타내었다.

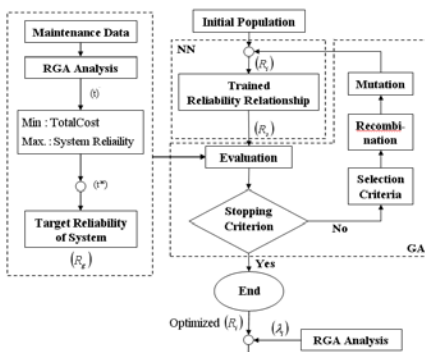


Fig. 5. 시스템 흐름도

제안된 도시철도차량 신뢰도 최적분배 방법을 검증하기 위하여 도시철도차량 서비스시스템의 경우(FBPC subsystem)에 대해서 해석을 수행하였다. <Table 2>는 FBPC subsystem을 구성하는 각 부품의 특정 시점에서의 고장률과 평균고장간격을 나타낸 것이다.

Table 2. FBPC subsystem의 고장률과 MTBF

Part	Developed system		Reference(KRRI report)		Error (%)
	Failure rate	MTBF(hr)	Failure rate	MTBF(hr)	
Brake control	206 E-6	4,855	202 E-6	4,946	1.87
Valves	114 E-6	8,749	107 E-6	9,355	6.93
Friction Brake	114 E-6	8,742	123 E-6	8,157	6.69
Air Comp.	-	-	8 E-6	125,000	-
Reservoirs	-	-	21 E-6	48,544	-
Pneumatic horn	-	-	26 E-6	39,063	-
FBPC(AMSAA)	434 E-6	2,302	486 E-6	2,058	10.6
FBPC	434 E-6	2,304			10.6

비용은 최소화 하면서 각 부품의 신뢰도는 최대화 할 수 있도록 문제를 정의하고 신뢰도 최적 분배한 결과는 <Table 3>과 같다.

Table 3. FBPC subsystem의 신뢰도 최적분배 결과

	Components	R _{BC}	R _{VV}	R _{FB}	R _{FBPC}	Cost
Normal (R _s =0.90)	Reliability	0.9420	0.9727	0.9690	0.9000	33.02
	Maintenance Time(hrs)	290.1	242.8	276.2		
Multi-Opt. (step1)	Reliability	0.9109	0.9520	0.9508	0.8242	19.68
	Maintenance Time(hrs)	453.0	431.5	442.6		
Reli-Opt. (step2)	Reliability	0.9034	0.9504	0.9468	0.8242	17.07
	Maintenance Time(hrs)	492.6	446.3	479.5		
Cost reduction		Step 1 vs Normal : 40.40 %				
		Step 1 vs Step 2 : 13.26 %				
		Step 2 vs Normal : 48.30 %				

4. 결론

본 구축안에서는 도시철도차량과 같은 복합시스템의 안전성 확보와 경제적 제약을 동시에 만족하는 신뢰도 최적분배 방법을 제안하였다. 이 방법의 유용성을 확인하기 위하여 도시철도 서비스시스템의 운영데이터로부터 시스템과 구성 부품들의 신뢰도 성장분석을 통해 신뢰도 지표의 추이분석을 수행하였으며, 소프트웨어 컴퓨팅 기법을 사용하여 시스템의 목표신뢰도를 만족하는 각각의 구성 부품들의 신뢰도를 최적화하였다.

참고문헌

1. Harold S. Balaban, Hal R. Jeffers: The allocation of System Reliability - Vol. I : Development of Procedures for Reliability Allocation and Testing, Technical Documentary Report, Armed Services Technical Information Agency Alington Hall Station, Virginia USA.
2. J.A.Boyd: Allocation of Reliability Requirements: a new approach, Proceedings Annual Reliability and maintainability Symposium, IEEE(N.Y.), Las Vegas USA, 1992.
3. 효율적 유지보수를 위한 도시철도 전동차 브레이크의 시스템 신뢰도 최적화
4. 시스템 신뢰도 최적화를 위한 중복 설계
5. 철도차량 정량적 신뢰성, 가용성, 유지보수성 목표 값 설정에 관한 연구