

개선된 복원도 기반 설계 방법론과 풍력발전기 블레이드 설계로의 적용

A Revised Framework of Resilience-driven System Design and its application to Wind Turbine Blade design

윤정택* · 윤병동*† · 왕핑펑** · 후차오***

Joung Taek Yoon, Byeng D. Youn, Pingfeng Wang and Chao Hu

1. 서 론

공학 시스템은 목표 생애 주기 동안 요구되는 기능을 수행하도록 설계 되지만 제작 오차, 물성치·운행환경의 불확실성 등에 의해 성능이 저하되고 사고가 발생하여 사회적으로 큰 손실을 야기한다. 신뢰도 높은 시스템을 구현하기 위한 대표적 방법에는 신뢰도 기반 최적 설계 기법(Reliability-based design optimization; RBDO)와 고장 예지 및 건전성 관리 기술(Prognostics and health management; PHM)이 있다. RBDO 는 설계 단계에서 다양한 불확실성을 통계적으로 고려하여 목표 신뢰도를 만족하도록 최적설계를 수행하며, PHM 은 운행 중인 시스템의 상태 신호를 측정, 그 건전성을 추정·예지하여 고장을 방지하는 기술이다. 이 둘은 모두 시스템의 신뢰도를 보장하는 상호 보완적 기술이지만 독립적으로 설계, 적용하는 과정에서 중복되는 측면이 발생하여 그 효율성에는 한계점을 가진다. 이에 Youn et al. (2011)은 의해 복원도 기반 설계 방법론(resilience-driven system design; RDSD)을 제안하였다. 본 연구에서는 복원도 기반 설계 방법론의 개선안을 제시하며 풍력 발전기에 대한 적용 사례를 통해 방법론의 효용성을 검증한다.

2. 복원도의 공학적 정의

복원도는 생태학, 심리학, 경제학 등의 여러 분야에서 다뤄져 왔다. 생태학에서는 이상 변화에 대한 기능 유지, 경제학에서는 갑작스런 혹은 지속적인

외부 변화에 안정상태를 지속 또는 복구하는 능력으로 정의 된다. 즉 복원도는 지속적 혹은 갑작스런 손상에 대응하여 시스템이 저항 또는 회복하는 능력을 뜻하며, 이를 공학적 시스템에 적용할 경우 생애주기 전반에 걸쳐 신뢰도 높은 복원적 시스템을 도출 가능하다 (Figure 1). Youn et al. (2011)은 공학적 복원도 ψ 를 두 요소인 저항과 회복에 해당하는 신뢰도 R 과 회복도 ρ 의 합으로 정의하였으며 (식 (1)) 회복도는 식 (2)와 같이 정의되며 (3)으로 정리된다.

$$\psi = R + \rho \tag{1}$$

$$\rho(R, \Lambda, \kappa) = \Pr(E_{sf} E_{cp} E_{mr}) = \Pr(E_{mr} | E_{sf} E_{cp}) \cdot \Pr(E_{cp} | E_{sf}) \cdot \Pr(E_{sf}) = \kappa \cdot \Lambda \cdot (1 - R) \tag{2}$$

$$\psi = R + \rho = R + \kappa \cdot \Lambda \cdot (1 - R) = 1 + \lambda \cdot (1 - R) \tag{3}$$

여기서 E_{sf} , E_{cp} , E_{mr} 은 시스템 고장(system failure), 고장 예측 성공(correct prognosis), 수리/교체 성공(mitigation/recovery success)의 사건이다. 고장 예측 확률 Λ 는 건전성 진단 성공 확률 Λ_D 과 건전성 예지 성공 확률 Λ_P 의 곱이며($\Lambda = \Lambda_D \cdot \Lambda_P$), $\lambda (= \kappa \Lambda)$ 는 PHM 효율, κ 는 M/R 성공확률이다.

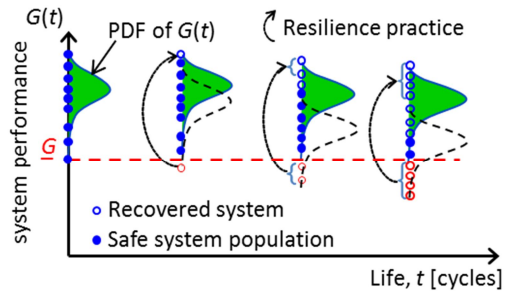


Figure 1 Resilience in engineered systems

3. 개선된 복원도 기반 설계 방법론

3.1 기존 복원도 기반 설계 방법론

† 교신저자; E-mail : bdyoun@snu.ac.kr,

Tel : + 82-2-880-1919

* 서울대학교 기계항공공학부

** Department of Industrial and Manufacturing Engineering, the Wichita State University

*** Department of Mechanical Engineering, the University of Maryland at College Park (Currently at Medtronic Inc.)

Youn et al. (2011)이 제안한 복원도 기반 설계 방법론은 상위의 복원도 할당 문제 (resilience allocation problem; RAP), 하단의 RBDO 와 PHM 설계 3 가지 부분으로 나뉜다. RAP 는 생애주기비용 (life cycle cost; LCC)를 최소화하며 목표 복원도를 만족하기 위한 신뢰도와 PHM 효율을 하단에 할당한다. RBDO 는 할당받은 목표 신뢰도를 만족하며 목적 함수를 최소화하는 최적설계를 수행하며, PHM 설계는 RBDO 로부터의 시스템 설계와 할당받은 목표 PHM 효율을 고려하여 합당한 하드웨어/알고리즘 요소를 설계한다.

3.2 복원도 기반 설계 방법론 개선안

(1) 생애주기비용 모델의 개선

기존 방법론은 LCC를 신뢰도, PHM 효율, 중복도 (redundancy)를 변수로 하는 모델을 구성하여 시간 효율적 설계를 가능케 하였으나, 실제 설계에 적용하기에는 그 정확도에 한계점을 갖는다. 본 연구에서는 LCC를 구성하는 요소들을 RAP 단계에서 계산하는 것이 아닌 RBDO와 PHM 설계로부터 얻음으로써 실제 설계 비용 예측의 정확도를 높였다 (Figure 2).

(2) 시간의존 신뢰도의 고려

운영에 따라 시스템의 신뢰도는 점차 떨어지며 이는 고장율의 증가, 시정/예방 유지보수 비용(C^{CM} , C^{PM})을 야기한다. 기존의 방법론은 고정된 신뢰도 값을 사용하여 시간-설계 효율성을 높였으나 정확도에는 한계점을 보였다. 본 연구에서는 생애주기에서의 시간의존 신뢰도를 고려하여 실제 시스템의 특성을 설계에 잘 반영토록 개선하였다.

4. 사례 연구: 풍력발전기 블레이드 설계

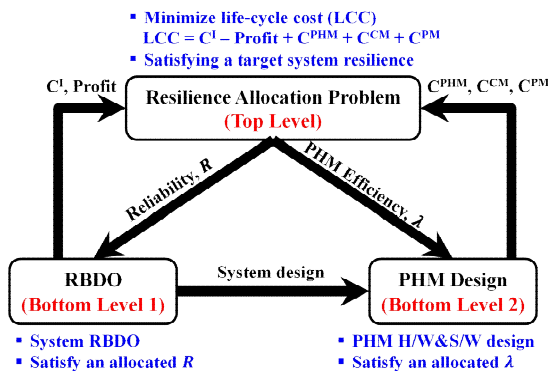


Figure 2 A revised RDS Framework

복원도 기반 설계 방법론의 효용성을 검증하기 위해 미국 국립풍력기술센터의 CAE툴과 샌디아 국립 연구소의 Numerical Manufacturing And Design Tool을 사용하였다. 이에 포함된 1.5MW 풍력발전기 모델의 블레이드 길이와 시위길이를 설계 변수로 블레이드, 타워, 주축에 대한 구속조건을 토대로 신뢰도를 분석하였다. GFRP 탄성 저하 모델과 Wöhler 피로곡선을 통해 건전성 저하 모델을 도출하였으며, 유사도기반 내삽기법과 relevance vector machine을 사용하여 PHM 알고리즘을 구현하였다 (Figure 3). RDS 방법론의 적용결과

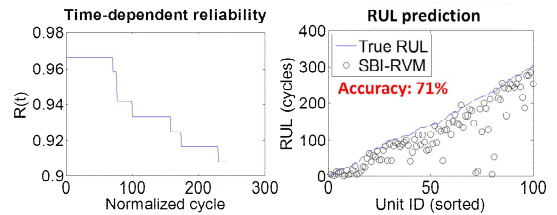


Figure 3 Time-dependent reliability (left) and RUL prediction result (right)

\$14,170의 경제적 효용을 얻을 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 복원도 기반 시스템 설계 방법론의 개선안에 대해 다루었다. 본 방법론은 RBDO와 PHM을 통합적으로 접목하여 생애주기 전반에 걸쳐 시스템의 신뢰도를 유지, 복원함과 동시에 생애주기 비용을 최소화하는데 그 이점이 있다. 기존의 방법론을 실제 설계에 적용하는 데 있어 정확도를 높이기 위하여 생애주기비용 모델의 개선과 시간의존 신뢰도의 도입을 제안하였다. 개선된 방법론은 풍력발전기 해석모델을 활용하여 그 효용성을 검증하였다. 개선된 방법론은 기존 방법론에 비해 높은 설계 시간이 소요된다는 한계점을 가지고 있어 이를 개선하기 위한 향후 연구와 다양한 사례 연구를 통한 실용성 검증이 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 연구사업의 일환으로 산업 기술연구회의 지원을 받아 수행 중인 “대형기계설비 안전기술 개발” 연구사업의 결과이며 서울대학교 정밀기계연구소(SNU-IAMD)의 지원을 받았습니다.