

* 첫면의 초록부분까지만 준수하고 이후부터는 자유로이 작성가능(PPT 파일 삽입도 가능)

고장 오진단을 고려한 복원도 지수의 정식화

윤정택*†, 윤병동*‡

Formulation of Resilience Measure Considering False Alarm

Joung Taek Yoon and Byeng D. Yoon

Key Words: Resilience(복원도), False Alarm(고장 오진단), Reliability-based Design Optimization(신뢰성 기반 최적 설계), Prognostics and Health Management(고장 예지 및 건전성 관리)

Abstract

Recent engineering systems are getting high capacity and under harsh operating conditions in order to achieve superior performance. Consequently, the systems come to be unreliable and risky thus, the techniques to analyze and ensure system reliability are necessary. Among the techniques, the resilient-driven system design are spotlighted for combining the reliability-based design optimization (RBDO) with the prognostics and health management (PHM). Two methods are used redundantly by applying separately. This paper aims at formulating the resilience measure of engineering systems considering false alarm. The false alarm, regarding healthy systems as faulty ones and vice versa, can severely reduce the system availability, sustainability and reliability. The effects and importance of false alarm on the resilience measure are verified with case study.

1. 서론

공학 시스템은 설계, 생산, 운영 단계 동안 다양한 불확실성에 노출되며 예기치 못한 외부 교란을 받으며 사용된다. 이는 시스템의 건전성을 저하시키며 목표 성능을 충족시키지 못하게 만들어 사회적, 경제적, 인적 손실을 야기한다. 이를 방지 하기 위해 안전계수 기반 설계, 주기적 유지보수 계획, 중복도 설계 등의 기술이 도입되었으나 이는 과도한 시스템 제작, 유지보수, 또는 관리 비용을 야기한다. 최근에는 Youn et al.에 의해 복원도 기반 설계 기술 (resilience-driven system design; RDSD)이 제안되었다⁽¹⁾. 신뢰성 기반 최적 설계(reliability-based design optimization; RBDO)와 고장예지 및 건전성 관리 기술 (prognostics and health management; PHM)을 통합적으로 적용하는 RDSD 기술은 차세대 시스템 신뢰도 관리 및 복원가능 시스템 설계 기술로 주목 받고 있다. 한편 PHM 기술은 상태

기반 유지보수를 현실화 했지만, i) 고장 진단/예지 플랫폼의 완성도가 떨어지며 ii) 현장 전문가의 개입 없이 플랫폼 판단에 전적으로 의존할 경우, 오진단 (false alarm)으로 오히려 악영향을 끼칠 수 있다. 즉 PHM 기술을 도입할 경우에는 오진단을 고려해야 하나 기존 연구에서는 이에 대한 부분이 미흡하였다. 따라서 본 연구에서는 오진단을 고려하여 기존에 제안된 복원도 지수 (resilience measure)를 정식화하는 것을 목적으로 한다.

2. 리뷰: 공학적 복원도(1)

복원도(resilience)는 시스템이 잠재적인 또는 예기치 못한 충격에 대해 저항하고 회복하여 본래 성능을 유지하는 능력으로 정의되며 생태학, 심리학, 경제학 등의 분야에서 먼저 성립한 개념이다. Youn et al.은 복원도의 두 요소인 수동적 저항 능력과 능동적 회복 능력을 시스템 신뢰도 (reliability) R 과 시스템 회복도 (restoration) ρ 에 대응시켰다⁽¹⁾. 그리고 RBDO와 PHM 기술을 통해 공학적으로 복원 가능한 시스템(resilient system)을 구현하였다. Fig. 1에 시스템 신뢰도에 대한 RBDO와 PHM의 효과를 보였다. 기존에 제안한

† 발표자

‡ 교신저자: bdyoun@snu.ac.kr, (02)880-1664

* 서울대학교 공과대학 기계항공공학부

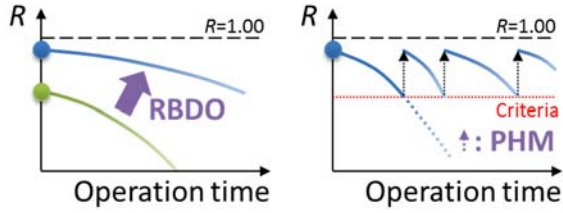


Fig. 1 Effects of RBDO and PHM on reliability

복원도 지수 ψ 는 이 둘의 확률적 관점에서의 합으로 다음과 같이 정식화 된다.

$$\psi = R + \rho \quad (1)$$

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

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

여기서 E_{sf} , E_{cp} , E_{mr} 은 시스템 고장 (system failure), 고장 예측 성공 (correct prognosis), 수리/교체 성공 (mitigation/recovery success; M/R success)의 사건이다. 고장 예측 정확도 Λ 는 고장 진단 정확도 Λ_D 과 고장 예지 정확도 Λ_P 의 곱이며 ($\Lambda = \Lambda_D \cdot \Lambda_P$), $\lambda (= \kappa \cdot \Lambda)$ 는 PHM 효율, κ 는 M/R 성공확률이다. 이 복원도 지수에 기반한 시스템 설계 방법론은 참고문헌 (1)을 참고하기 바란다.

3. 오진단을 고려한 공학적 복원도 지수

3.1 고장 오진단

고장 오진단 (false alarm; FA)은 Table 1과 같이 정상 시스템을 고장으로 진단하는 Type I (false faulty; FF)과 그 반대인 Type II (false healthy; FH)로 나뉜다. 여기에서 E_{sh} , E_{ff} , E_{fh} 는 시스템 정상, 거짓 고장 진단, 거짓 정상 진단 사건을 의미한다. Type I의 경우 불필요한 시스템 정지, 검사, 유지보수를 야기하며, Type II는 시스템 고장을 예방하지 못하게 된다.

Table 1 Types of false alarm

FA type	True HS	Esti. HS	Equation
Type I	Healthy	Faulty	$\Pr(E_{ff} E_{sh}) = FA_1$
Type II	Faulty	Healthy	$\Pr(E_{fh} E_{sf}) = FA_2$

3.2 오진단을 고려한 복원도 지수 정식화

오진단을 고려하였을 때 가능한 건전성 시나리오는 Table 2와 같다. 시스템의 실제/추정 건전성에 따라서 야기되는 결과가 달라지며 각각에 대한 확률적 정식을 나타내었다. 여기에서 E_{th} , E_{fh} 는 참 정상 진단, 참 고장 진단 사건을

Table 2 Health scenarios considering false alarm

#	True	Esti.	Result	Equation
1	H	H	available	$\Pr(E_{th}E_{sh}) = (1 - FA_1)R$
2		F	M/R	$\Pr(E_{ff}E_{sh}) = FA_1R$
3	F	H	failure	$\Pr(E_{fh}E_{sf}) = FA_2(1 - R)$
4		F	restoration	$\Pr(E_{mr}E_{tf}E_{sf}) = \kappa \Pr(E_{tf}E_{sf}) = \kappa(1 - FA_2)(1 - R)$

의미한다. 표의 항목 중 첫 번째와 네 번째일 경우에 시스템의 성능을 유지할 수 있으므로 이들의 합으로서 다음과 같이 새로운 복원도 지수를 정식화할 수 있다.

$$\psi = (1 - FA_1)R + \kappa(1 - FA_2)(1 - R) \quad (4)$$

기존의 복원도 지수 (Eq. 1-3)와 비교하였을 때 고장 예측 정확도 Λ 의 정의가 $1 - FA_2 = \Pr(E_{th}|E_{sh})$ 로 정밀해졌으며, 두 종류의 오진단 확률 FA_1 , FA_2 이 존재할 경우의 복원도 지수 정량화가 가능해 졌다.

4. 수학적 사례 예시

고장 오진단의 복원도 지수에 대한 영향도를 보기 위하여 Fig. 2에 예시를 나타내었다. 기존 복원도 지수는 거짓 고장 진단 확률 FA_1 에 아무런 영향을 받지 않으나 개선된 복원도 지수는 영향을 받게 된다. 또한 복원도 지수의 FA_1 과 FA_2 에 대한 민감도는 각각 $-R$, $-\kappa(1-R)$ 로 신뢰도 수준 (0.70, 0.95)에 따라 민감도가 달라지는 것을 볼 수 있다. 즉 신뢰도가 높은 시스템일수록 거짓 고장 진단 확률 FA_1 을 주의하여 관리해야 한다.

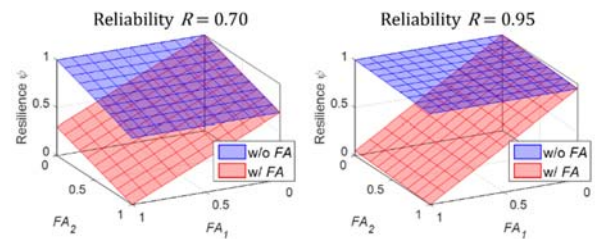


Fig. 2 Effects of false alarm on resilience measure

5. 결론

본 연구에서는 고장 오진단을 고려한 복원도 지수를 정식화함으로써 시스템의 복원도 정량화를 정밀하게 만들었다. 향후 개선된 복원도를 고려한 설계 방법론 검증, 다(多)고장 모드에서의 복원도 정의에 관한 연구를 진행할 예정이다.

참고문헌

- (1) B.D. Youn, C. Hu and P. Wang, 2011, "Resilience-Driven System Design of Complex Engineered Systems", Journal of Mechanical Design, Vol. 133, No. 10, 101011.