

물류보관 랙선반시설물의 시스템신뢰성 해석

옥승용[†] · 김동석^{*}

한경대학교 토목안전환경공학과 · ^{*}(주)인터컨스텍
(2014. 5. 7. 접수 / 2014. 7. 11. 채택)

System Reliability Analysis of Rack Storage Facilities

Seung-Yong Ok[†] · Dong-Seok Kim^{*}

Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University

^{*}R&D Center, Interconstech Co., Ltd.

(Received May 7, 2014 / Accepted July 11, 2014)

Abstract : This study proposes a system reliability analysis of rack storage facilities subjected to forklift colliding events. The proposed system reliability analysis consists of two steps: the first step is to identify dominant failure modes that most contribute to the failure of the whole rack facilities, and the second step is to evaluate the system failure probability. In the first step, dominant failure modes are identified by using a simulation-based selective searching technique where the contribution of a failure mode to the system failure is roughly estimated based on the distance from the origin in the space of the random variables. In the second step, the multi-scale system reliability method is used to compute the system reliability where the first-order reliability method (FORM) is initially used to evaluate the component failure probability (failure probability of one member), and then the probabilities of the identified failure modes and their statistical dependence are evaluated, which is called as the lower-scale reliability analysis. Since the system failure probability is comprised of the probabilities of the failure modes, a higher-scale reliability analysis is performed again based on the results of the lower-scale analyses, and the system failure probability is finally evaluated. The illustrative example demonstrates the results of the system reliability analysis of the rack storage facilities subjected to forklift impact loadings. The numerical efficiency and accuracy of the approach are compared with the Monte Carlo simulations. The results show that the proposed two-step approach is able to provide accurate reliability assessment as well as significant saving of computational time. The results of the identified failure modes additionally let us know the most-critical members and their failure sequence under the complicated configuration of the member connections.

Key Words : system reliability analysis, failure probability, rack storage facilities, dominant failure modes, forklift collision

1. 서론

물류창고 내 안전사고 중 지게차 충돌에 따른 선반 시설물의 붕괴 또는 보관 물류의 낙하로 인한 2차 피해 등이 빈번하게 발생하고 있음이 최근 통계자료로부터 관측된다¹⁾. 이러한 물류보관 랙선반시설물의 지게차 충돌에 따른 붕괴는 수많은 파괴모드(failure mode)들의 조합으로 표현될 수 있으며, 각 파괴모드는 다시 전체 시설물을 구성하는 여러 부재의 연속 파괴로서 구성된다. 즉, 지게차충돌에 의하여 전체 부재들에 부재력이 전파되면 그 중 가장 취약한 부재가 파괴하고, 파괴된 부재는 더 이상 하중을 분담할 수 없으므로 그 때 작용하던 부재력은 인접한 다른 부재들로 재분배되어간다. 이렇게 재분배되는 추가적인 부재력은 기존

인접한 부재들의 허용치를 초과함으로써 연속적인 부재의 파괴를 유발하여 최종적으로 전체 시스템의 붕괴를 유발하게 된다. 따라서 전체 시설물의 파괴확률(반대의미로 신뢰성)을 구하기 위해서는 발생가능한 모든 파괴모드의 확률을 합집합으로서 고려하여야 하지만, 실제 시설물에 대하여 파괴모드는 무수히 많이 존재하므로 현실적으로 이를 모두 고려하는 것은 불가능하다. 따라서 기존 연구들은 전체 시스템의 파괴확률에 기여도가 큰 주요파괴모드들로 전체 시스템의 파괴확률을 근사화시키는 방향으로 일부 진행되었다^{2)~6)}.

한편, 물류보관 랙시설물에 대한 신뢰성 연구는 지게차 충돌에 따른 동적거동 특성 분석 연구¹⁾의 결과를 바탕으로, 지게차 충돌에 따른 선반구조물의 부재파괴를 4가지 유형으로 분류하고 각 유형별 요소신뢰성

[†] Corresponding Author : Seung-Yong Ok, Tel : +82-31-670-5282, E-mail : syok@hknu.ac.kr

Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University, 327, Jungang-ro, Anseong, Kyonggi-do 456-749, Korea

(component reliability) 해석 연구⁷⁾가 진행된 바가 있다. 하지만, 하나의 부재에 대한 요소신뢰성은 실제 랙의 파괴를 대표하지 못하는 한계를 가진다. 즉, 실제 선반 시설물은 많은 부재로 구성되며, 대체적으로 구조적 여유성(redundancy)을 일정 수준 이상으로 갖게 된다. 따라서 부재 하나만 파괴된다고 해서 전체 랙이 붕괴되는 경우는 매우 드물며, 대부분 여러 부재의 연속적인 파괴, 즉 하나의 부재 파괴로부터 하중 재분배에 의하여 인접한 다른 부재의 연쇄적인 파괴에 의하여 전체 시설물이 무너지는 경우가 일반적이다. 따라서, 전체 랙시스템의 파괴를 평가하기 위해서는 부재의 연속 파괴(파괴모드)에 대한 신뢰성해석이 수행되어야 하며, 본 연구는 선반구조물의 붕괴를 유발하는 주요 파괴모드들 중 시스템 파괴에 가장 크게 기여하는 주요 모드들을 검색하고 이들의 조합으로 구성되는 파괴확률을 산정함으로써 전체 시스템의 신뢰성해석을 수행하고자 한다.

신뢰성해석(파괴확률산정) 방법으로는 최근 제시된 모드검색과 신뢰성해석을 분리한 접근법²⁾을 도입하고자 한다. 이 방법은 시스템의 파괴에 크게 기여하는 주요 모드들을 간략화된 추정방법으로 검색한 후, 검색된 파괴모드들로 구성되는 전체 시스템신뢰성 해석을 독립적으로 수행하는 접근법이다. 신뢰성 해석과정에서는 시설물의 신뢰성해석의 효율을 높이고자, 비교적 작은 개수의 부재파괴로 구성되는 파괴모드의 신뢰성 해석을 먼저 수행하고, 이들의 결과를 다시 입력정보로 하여 파괴모드들의 합집합으로 구성되는 전체 시스템의 신뢰성해석을 반복적으로 수행하는 다단계(multi-scale) 구조를 가진다.

제시하는 방법에 의한 신뢰성해석 결과는 Monte-Carlo Simulation(MCS)의 결과와 비교하여 검증하고자 하며, 연산에 소요되는 시간도 같이 고려하여 제시하는 방법의 수치효율성도 평가하고자 한다.

2. 다단계 시스템신뢰성 해석법

2.1. 시스템신뢰성

시스템의 파괴는 서론에서 전술한 바와 같이, 파괴를 유발하는 모든 파괴모드의 합집합으로서 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{sys} = \bigcup_{k=1}^{N_G} C_k = \bigcup_{k=1}^{N_G} \left[\bigcap_{i \in I_{C_k}} E_i \right] \quad (1)$$

여기서, E_{sys} 는 시스템 파괴사건이고, C_k 는 k 번째 파괴모

드로서 여러 부재의 연속 파괴사건으로 구성되며, N_{C_k} 는 파괴모드의 전체 개수이다. 한편, I_{C_k} 는 k 번째 파괴모드 C_k 를 구성하는 부재들의 인덱스(index) 집합이라 할 때, 파괴모드 C_k 는 $I_{C_k} = \{\dots, i, \dots\}$ 에 속하는 부재들의 파괴사건 E_i 의 교집합으로 정의된다. 예를 들어서, 파괴모드 1이 부재 2번, 5번, 8번의 연속 파괴로 구성된다고 가정할 때, $I_{C_1} = \{2, 5, 8\}$ 이 되며, 파괴모드 C_1 은 이들 부재들의 파괴사건들의 교집합, 즉 $E_2 \cap E_5 \cap E_8$ 으로 정의될 수 있다.

식 (1)에서 정의되는 시스템 파괴사건에 대한 확률, 즉 시스템 파괴확률은 결국 식 (2)와 같이 직렬시스템(series system)의 확률로서 정의될 수 있다⁸⁾.

$$P(E_{sys}) = P\left(\bigcup_{k=1}^{N_G} C_k\right) = 1 - \Phi(\mathbf{B}, \mathbf{R}) \quad (2)$$

여기서, Φ 는 다변수 누적 표준정규분포함수(multivariate standard normal cumulative distribution function)이며, $\mathbf{B} = [\beta_{C_1}, \beta_{C_2}, \dots]$ 는 평균벡터로서 각 파괴모드의 확률값을 표준정규분포로 근사($P(C_k) \approx \Phi(-\beta_{C_k})$)할 때의 신뢰성지수(β_{C_k})이며, $\mathbf{R} = [\rho_{C_i C_j}]$ 은 파괴모드간 상관계수행렬(correlation coefficient matrix)이다. 참고로, 두 파괴모드간 상관계수 $\rho_{C_i C_j}$ 는 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다⁹⁾. 식 (3)의 수치해석기법은 기존 연구들¹⁰⁻¹¹⁾에서 제시된 바가 있다.

$$\begin{aligned} \Phi(\beta_i, \beta_j, \rho_{ij}) & \quad (3) \\ & = \Phi(\beta_i) \Phi(\beta_j) + \int_0^{\rho_{ij}} \phi(\beta_i, \beta_j, r) dr \end{aligned}$$

만약 평균벡터 \mathbf{B} 와 상관계수행렬 \mathbf{R} 이 주어진다면 식 (2)는 MSR(Matrix-based System Reliability) 방법¹²⁾, Genz 알고리즘¹³⁾ 등을 이용하여 산정할 수 있다.

2.2. 파괴모드의 신뢰성

파괴모드의 파괴는 각 부재 파괴사건들의 병렬시스템(parallel system)으로서 식 (4)로 표현될 수 있다.

$$P(C_k) = P\left(\bigcap_{i \in I_{C_k}} E_i\right) = \Phi(-\beta, \mathbf{r}) \quad (4)$$

여기서, $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots]$ 는 각 요소의 파괴확률에 상응하는 신뢰도지수로서 역시 표준정규분포로 근사($P(E_i) \approx \Phi(-\beta_i)$)된다. 또한, $\mathbf{r} = [\rho_{ij}]$ 은 요소 파괴사건 사이의 상관계수행렬이다.

각 요소의 파괴확률($P(E_i)$)과 각 요소파괴간 상관계수 ρ_{ij} 를 구할 수 있다면, 파괴모드의 파괴확률, 식 (4)도 결국 MSR방법¹²⁾ 또는 Genz 알고리즘¹³⁾을 이용하여 산정할 수 있다. 따라서, 최종적으로 남는 문제는 파괴모드 검색과 파괴모드를 구성하는 요소들의 개별적인 파괴확률 및 파괴되는 요소간 상관계수를 산정하는 것이다. 여기서는 각 요소들의 파괴확률과 요소간 상관계수를 산정하는 방법에 대하여 기술하며, 다음 절에서 파괴모드의 검색방법에 대하여 기술한다.

각 요소의 파괴확률은 주어진 확률변수들의 결합 확률밀도함수(joint PDF; Joint Probability Distribution Function)에 대하여 식 (5)로 표현되며⁷⁾, 이에 대한 근사적인 수치해석기법으로 FORM(First-Order Reliability Method) 또는 SORM(Second-Order Reliability Method) 등이 있다⁸⁾.

$$P_f = P(E_i) = \int_{g(\mathbf{v}) < 0} f_{PDF}(\mathbf{v}) d\mathbf{v} \quad (5)$$

여기서, $f_{PDF}(\mathbf{v})$ 는 확률변수벡터 \mathbf{v} 의 joint PDF이다. 함수 $g(\mathbf{v})$ 는 파괴와 안전의 경계를 나타내는 한계상태함수(limit-state function)이다.

한편, 두 요소의 파괴사건간 상관계수는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 각 사건에 대한 확률밀도함수의 최단 거리(β_i, β_j)를 이루는 한계상태함수 상의 접점(design point)의 방향벡터(directional vector) α_i 와 α_j 의 내적 $\rho_{ij} = \alpha_i \cdot \alpha_j$ 으로 정의된다.

FORM 기법 또는 SORM 기법을 통하여 design point 및 신뢰성지수(β) 그리고 α 벡터 등을 얻을 수 있으므로, 이로부터 상관계수행렬 $\mathbf{r} = [\rho_{ij}]$ 을 얻을 수 있다.

3. 시뮬레이션 기반 파괴모드 검색

시스템 파괴는 무수히 많은 파괴모드들의 합집합으

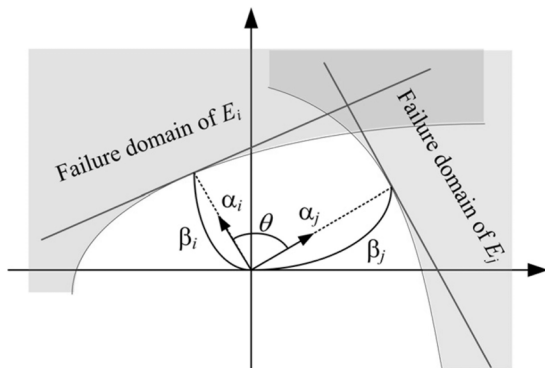


Fig. 1. Correlation coefficient between two failure events.

로 구성된다. 이 연구에서 파괴모드라 함은 부재파괴의 조합을 의미한다. 예를 들어서, 구조물의 붕괴는 몇몇 주요부재의 파괴로 유발될 수 있으며, 이 때 발생하는 주요부재의 순차적 파괴조합을 파괴모드라 명명한다. 실제 구조물은 무수히 많은 부재들로 구성되므로 구조물의 파괴를 유발하는 부재파괴의 조합도 무수히 많이 존재할 수 있다. 하지만, 이들 파괴모드들 중에는 시스템 파괴에 크게 기여하는 주요 파괴모드들이 있는 반면, 존재는 하지만 실제 발생할 확률은 매우 낮은 파괴모드들도 존재한다. 따라서, 존재하는 모든 파괴모드들의 합집합의 확률로서 시스템의 파괴확률을 산정하는 것보다는 주요 파괴모드들만 고려하는 것이 합리적이라 할 수 있다. 이를 위해서 이 연구에서는 선택적 검색방법(selective searching method)²⁾을 적용하여 시스템에의 기여도가 높은 주요 파괴모드들을 효과적으로 검색하고 이들에 대한 시스템 신뢰성해석결과로부터 전체 시스템의 신뢰성을 근사하고자 한다.

선택적 검색방법은 확률변수들의 표준정규분포공간 상에서 원점으로부터 멀수록 발생확률이 작다는 표준정규분포 공간의 특징을 이용하여 파괴모드의 중요도를 결정하고자 하는 방법이다. 즉, 원점에서 가까운 곳에서 시스템 파괴가 발생하는지를 점검하고 차츰 먼 쪽으로 검색해 나감으로써 순차적으로 시스템 파괴에 기여도가 높은 주요 파괴모드를 검색해 나가는 방법이다. 그러나 확률변수가 많아질수록 검색할 표준정규분포공간의 차원은 기하급수적으로 늘어나므로, 모든 방향을 균등하게 검색하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 Latin Hypercube Sampling 방법¹⁴⁾으로 초기에는 가능한 모든 방향에 균등하도록 확률변수의 샘플을 랜덤하게 생성하고자 한다. 한편, 동일한 요소파괴를 공유하는 파괴모드들은 유사한 방향에 있을 가능성이 높기 때문에 기존 검색된 파괴모드가 발견된 방향을 집중적으로 검색하는 것이 효과적인 검색전략이 될 수 있다. 또한, 기존 검색된 파괴모드 외에도 여전히 새로운 검색되지 않은 파괴모드는 존재할 수 있으므로 기존 검색된 파괴모드가 발견된 방향과 전혀 다른 방향으로 검색하는 것도 필요하다. 따라서, 파괴모드가 발생하는 샘플의 주변을 집중적으로 검색하면서도 일부 검색은 전혀 다른 방향의 샘플들에 대해서도 검색하여야 하며, 이러한 특징들에 부합하는 기법으로 유전자알고리즘(genetic algorithm; GA)을 고려할 수 있다. 즉, 초기 랜덤생성은 샘플링기법에 기반하며, 주변검색은 GA의 교배(crossover) 연산으로서 그리고 일부 랜덤 검색은 GA의 돌연변이(mutation) 연산으로서 구현될 수 있다. 보다 상세한 내용은 참고문헌²⁾에 구체적으로 수록되어

있으며, 여기서는 간략하게 기술한다.

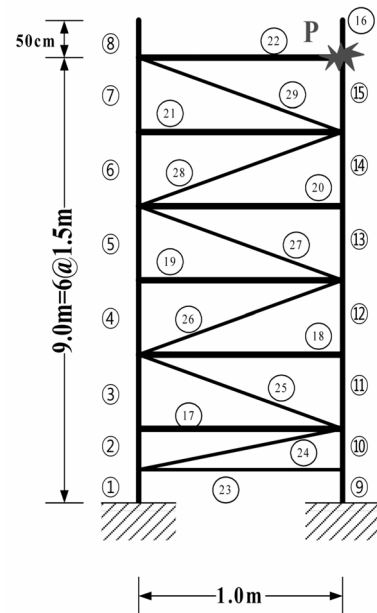
이 방법은 먼저 확률변수들의 표준정규분포 공간에서 기선정한 반지름에 해당하는 원 위에서 초기 sampling point를 랜덤하게 생성한다. 이 때, 원 위의 각 sampling point는 표준정규분포에서 원래 확률변수의 값으로 변환된다. 이들은 시스템을 구성하는 다양한 물리량(부재단면, 2차모멘트, 탄성계수, 작용하중 등)을 의미한다. 변환된 물리량을 시스템에 적용하여 구조해석을 수행하며, 이로부터 시스템 파괴 여부를 평가할 수 있다. 만약 한 세대(generation)의 모든 sampling point(population)에서 시스템 파괴가 발생하지 않았다면 위 과정을 반복적으로 수행하여 시스템 파괴를 지속적으로 검색하며, 시스템 파괴가 발생하였다면 시스템 파괴가 발생한 개체(방향벡터와 파괴모드)를 저장한다. 그리고 저장된 개체 중에서 임의적으로 뽑힌 개체를 다음 세대의 자손개체를 생성하기 위한 부모 염색체로서 사용한다. 이 때 다음 세대 구성에는 교배 연산과 돌연변이 연산이 사용되는데 교차연산은 기존 파괴모드 방향 주변을 검색하도록 하며 변이연산은 다른 방향에 있을지 모르는 파괴모드를 검색하기 위해 부호를 바꿔줌으로써 기존 검색방향의 반대방향을 검색하도록 하였다. 이렇게 새로 만들어진 sampling point에 대해 구조해석을 수행하고 시스템 파괴여부를 조사한다. 위 과정을 반복 수행하는 동안 새로운 파괴모드가 정의한 세대수 동안 발견되지 않으면 그 원위에서는 더 이상 새로운 파괴모드가 없다고 판단하고 원의 반지름을 증가시킨다. 원의 반지름이 증가될 때마다 위 과정을 처음부터 반복한다. 증가된 반지름이 의미하는 확률의 크기가 파괴모드가 처음 발견된 반지름의 확률보다 충분히 작으면, 예를 들어 1/1000이하가 된다면 모든 검색 과정을 종료한다.

4. 지게차 충돌에 따른 선반 랙시설물

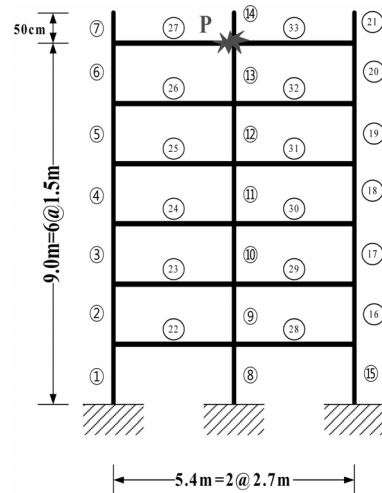
본 연구에서 다루고자 하는 문제는 기존 연구⁷⁾에서 다루어진 문제와 동일하며, Fig. 2와 같다. 대상 랙의 물성치의 확률분포모델 및 매개변수는 Table 1에 제시하였으며, 그 외 물성치로는 부재 밀도(ρ)가 $7.86(\text{ton}/\text{m}^3)$ 이며, 선반에 보관되는 적재물의 단위길이당 중량(w)는 $10(\text{kN}/\text{m})$ 이며, 부재의 항복응력(σ_y)는 365MPa 로 설정하였다. 하중의 작용 위치는 Fig. 2와 같이 하중 효과가 가장 크게 발생하는 6층으로 고려하였다^{1),7)}. 또한, 부재의 파괴는 기존 연구에서 사용한 모멘트에 의한 휨 파괴뿐만 아니라 축방향 좌굴파괴를 새로이 추가·고려하였다.

Table 1. Probability distribution and probabilistic parameters of rack properties

Model	Cross			Down		
	Type	μ	σ	Type	μ	σ
$I_{\text{beam}} (\text{m}^4)$	Normal	1.39×10^{-5}	0.1	Normal	9.26×10^{-6}	0.1
$I_{\text{column}} (\text{m}^4)$	Normal	1.30×10^{-6}	0.1	Normal	8.11×10^{-7}	0.1
$I_{\text{bracing}} (\text{m}^4)$	Normal	9.27×10^{-8}	0.1			
$A_{\text{beam}} (\text{m}^4)$	Normal	3.94×10^{-3}	0.1	Normal	2.63×10^{-3}	0.1
$A_{\text{column}} (\text{m}^4)$	Normal	1.84×10^{-3}	0.1	Normal	1.22×10^{-3}	0.1
$A_{\text{bracing}} (\text{m}^4)$	Normal	4.59×10^{-4}	0.1			
P (kN)	Normal	26.24	0.15	Normal	22.96	0.15
E (GPa)	$\mu : 212, \sigma : 0.1$					



(a) Cross-aisle model



(b) Down-aisle model

Fig. 2. Cross-aisle and down-aisle rack models.

4.1. 파괴모드 검색

전술한 시뮬레이션기반 검색방법으로 대상 구조물에 대하여 주요 파괴모드를 검색하였으며, 검색 과정에서 사용된 주요 파라미터들은 Table 2와 같다. 여기서, N_{same} 은 검색된 파괴모드가 새로 업데이트되지 않을 경우 반복되는 해석 수를 의미한다. 따라서, 40회 이상 새로운 파괴모드가 검색되지 않든지 또는 40회 동안 파괴모드 자체가 발견되지 않으면 확률변수의 표준정규분포공간에서 검색하는 반지름을 증가시켜서 증가된 원 위의 점들로 시스템 파괴여부를 다시 검색하게 된다.

제시하는 방법에 따라 통로방향(down-aisle direction) 및 통로직각방향(cross-aisle direction)으로 각각 랙이 파괴되는 주요 10개의 파괴모드들을 검색하였으며, 검색된 파괴모드들의 파괴확률 크기에 따라 정렬하여 Table 3에 수록하였다. 여기서, 양수는 휨 파괴를 의미하며, 음수는 좌굴파괴를 의미한다.

Table 3에서 알 수 있듯이, 통로직각방향으로는 가장 하단부에 있는 부재 1, 2, 9, 10번 부재들이 1~4번째 파괴모드들을 구성하는 양상을 보이며 나머지 파괴모드들에도 공통적으로 발생하고 있으며, 그리고 25, 27, 29

Table 2. GA Parameters used in simulation-based searching

Parameters	Population	Stopping criterion
Values	200	$N_{same} = 40$
Parameters	Crossover probability	Mutation probability
Values	0.7	0.3

Table 3. Dominant failure modes

Failure modes	Cross-aisle	Down-aisle
1	$9 \rightarrow 1$	$8 \rightarrow 15$
2	$9 \rightarrow \frac{1}{2}$	$20 \rightarrow 13$
3	$9 \rightarrow \frac{1}{10}$	$9 \rightarrow 16$
4	$9 \rightarrow \frac{1}{2}, \frac{1}{10}$	$13 \rightarrow 20$
5	$-25 \rightarrow 9 \rightarrow 1$	$17 \rightarrow 10$
6	$-27 \rightarrow 9 \rightarrow 1$	$18 \rightarrow 11$
7	$-29 \rightarrow 9 \rightarrow 1$	$8 \rightarrow \frac{9}{15}$
8	$-27 \rightarrow 9 \rightarrow 10$	$17 \rightarrow \frac{8}{10}$
9	$-27 \rightarrow 9 \rightarrow \frac{1}{10}$	$17 \rightarrow \frac{9}{10}$
10	$-25 \rightarrow 9 \rightarrow 10$	$9 \rightarrow \frac{8}{16}$

번 경사부재들도 5~10번째 파괴모드들을 구성하고 있음을 알 수 있다. 한편, 통로방향으로는 인접한 2개의 수직부재들의 연속파괴로 주요 파괴모드들이 발생하는 양상을 보이고 있다. 즉, 8번과 15번 부재, 20번과 13번 부재, 9번과 16번 부재들이 순차적으로 파괴되는 양상을 확인할 수 있다. 한편, 통로방향에 대해서는 모든 부재가 휨 파괴를 보였으며, 통로직각방향으로는 1~4번째 파괴모드들은 모두 휨 파괴모드를 보였으며, 5~10번째 파괴모드들은 첫 번째 부재(25번, 27번, 29번)들은 좌굴파괴로, 나머지 부재들은 휨에 의한 파괴를 보였다.

한편, 화살표는 순차적 파괴를 의미한다. 즉, “ $9 \rightarrow 1$ ”는 9번 부재가 휨 파괴한 후 1번 부재가 휨 파괴함을 의미하며, “ $9 \rightarrow \frac{1}{2}$ ”는 9번 부재의 휨 파괴 후 1번 부재와 2번 부재가 파괴하는 것을 의미한다. 여기서 1번 부재와 2번 부재의 파괴순서는 없다. 따라서, 이들을 사건으로 표현하면 식 (6)과 같다. 부연하여, 식 (6d)는 부재 27이 좌굴 파괴된 후 부재 9가 휨 응력 초과로 파괴되고, 그 이후 부재 10이 휨응력 초과로 파괴되는 순서를 보인다. 여기서, $E_{10(27,9)}$ 는 부재 27과 부재 9가 파괴된 후 부재 10이 파괴되는 사건이다. (6d)에서 다루고 있는 파괴모드는 27 부재 다음에 9번 부재가 파괴되는 순차적인 파괴를 다루고 있기 때문에 정확히 하자면 $E_{10(27,9)}$ 사건은 $E_{10(9)27}$ 로 고려되어야 한다. 그러나 $E_{10(9)27}$ 사건과 $E_{10(27,9)}$ 사건의 한계상태식이 동일하기 때문에 27과 9의 파괴 순서는 의미가 없다. 따라서 $E_{10(27,9)}$ 와 같이 표현한 것이다¹⁵⁾.

$$9 \rightarrow 1 \quad E_9 \cap E_{19} \quad (6a)$$

$$9 \rightarrow \frac{1}{2} \quad E_9 \cap E_{19} \cap E_{29} \quad (6b)$$

$$9 \rightarrow \frac{1}{2}, \frac{1}{10} \quad E_9 \cap E_{19} \cap E_{29} \cap E_{109} \quad (6c)$$

$$-27 \rightarrow 9 \rightarrow 10 \quad E_{27} \cap E_{9(27)} \cap E_{10(27,9)} \quad (6d)$$

$$-27 \rightarrow 9 \rightarrow \frac{1}{10} \quad E_{27} \cap E_{9(27)} \cap E_{1(27,9)} \cap E_{10(27,9)} \quad (6e)$$

참고로 Table 3에서 초기 3개 파괴모드는 Fig. 3과 같이 표현될 수 있다.

4.2. 신뢰성 해석

Table 3에서 검색된 파괴모드들에 대하여 FORM을 이용하여 요소 신뢰성해석을 수행하였으며, 그 결과로

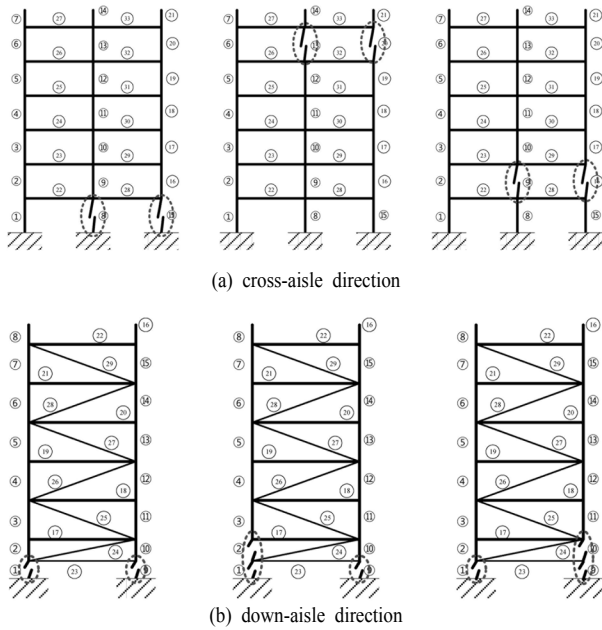


Fig. 3. Dominant failure modes.

각 요소별 파괴확률 $P(E_i)$ 및 요소간 상관계수 ρ_{ij} 를 얻을 수 있다. 다음으로 이들 결과로부터 파괴모드 및 전체 시스템의 신뢰성해석을 MSR방법을 적용하여 수행하였다. 비교대상으로 MCS방법을 적용하였으며, MCS의 수렴조건으로는 통로방향해석에 대하여 변동계수(coefficient of variation; cov)를 0.01이하, 통로직각방향으로는 cov가 0.05이하가 되도록 설정하였다. 해석결과, 파괴모드의 신뢰성 및 전체 시스템의 신뢰성은 Table 4와 같이 평가되었다.

참고로, 통로직각방향(cross-aisle direction)으로 MCS

Table 4. Reliability indices of dominant failure modes

Failure modes	Cross-aisle			Down-aisle		
	Proposed	MCS	Error(%)	Proposed	MCS	Error(%)
1	4.1503	4.1271	-0.56	2.8334	2.7400	-3.41
2	4.1514	4.2719	2.82	3.2162	3.1887	-0.86
3	4.2157	4.8761	13.54	3.2260	3.1551	-2.25
4	4.2159	4.8650	13.34	3.2348	3.3101	2.27
5	4.3829	4.3439	-0.90	3.2542	3.2326	-0.67
6	4.3833	4.4439	1.36	3.3689	3.3476	-0.64
7	4.3988	4.4159	0.39	3.4230	3.3760	-1.39
8	4.4605	4.8916	8.81	3.4371	3.4002	-1.09
9	4.4605	4.8916	8.81	3.4974	3.4494	-1.39
10	4.4619	4.7534	6.13	3.5273	3.4727	-1.57
System	4.0172	4.0001	-0.43	2.6113	2.4650	-5.94

는 총 417만회, 통로방향(down-aisle direction)으로 MCS는 총 287만회 수행되었으며, 총 연산시간은 통로직각방향 해석에서는 20.72(hr), 통로방향 해석에서는 14.45(hr)이 소요되었다. 이에 반해 제시하는 방법은 각각 총 0.67(hr), 1.29(hr)의 연산시간이 소요되어 MCS에 비해 약 1/11~1/31로 시간이 절약되었다. MCS방법과 해석결과에서의 차이는 Table 4에 나타난 바와 같이, 통로직각방향으로 3번째와 4번째 파괴모드에서 13.54%의 다소 높은 차이를 보이지만 시스템 파괴의 신뢰성지수는 -0.43%의 근소한 차이를 보였으며, 통로방향으로는 첫번째 파괴모드에서 -3.41%의 최대 오차를 보인 반면 시스템 신뢰성지수에서 -5.94%의 다소 큰 차이를 보였다. 이처럼 MCS방법과 제시하는 기법간 신뢰성 평가의 차이가 발생하는 이유는 가장 우선적으로 제시하는 기법에서 초기 요소신뢰성을 FORM의 1차 근사법으로 평가함에 따른 오차가 존재하기 때문이며, 두 번째로는 MCS 기법도 변동계수의 설정에 따라 수렴되는 값이므로 엄격한 의미에서 정해와 오차를 가지는 추정값이기 때문이다. 즉, 두 해석결과가 모두 정해와는 일정 수준의 오차를 가지므로, 두 해석결과의 오차는 매우 단순한(선형) 문제의 경우를 제외하고는 일반적으로 차이를 보이는 것이 당연하다. 따라서 MCS기법과의 신뢰성 해석 비교는 상대적인 차이를 검토함으로써 해의 정확성을 검증하는 것이라 할 수 있다. 비록 통로직각방향으로 시스템 신뢰성 평가결과가 -5.94%의 오차를 보였으나, 이는 파괴확률의 측면에서는 MCS해석결과보다 보수적인 결과, 즉 파괴확률은 높게 평가하므로 보수적 평가결과를 제시하므로 안전의 측면에서는 수용가능한 결과이다. 이상의 결과로부터 제시하는 방법의 수치효율성과 해의 정확성을 확인할 수 있다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 지게차 충돌에 따른 물류보관 랙 시설물의 시스템신뢰성 해석을 수행하였으며, 해석방법으로는 수치효율성을 높이고자 주요 파괴모드의 검색과 신뢰성해석을 분리하는 접근방법을 도입하였다. 랙 시설물의 파괴는 부재의 휨파괴와 좌굴파괴를 동시에 고려하였으며 통로방향과 통로직각방향으로 지게차가 충돌하는 경우를 각각 고려하였다.

제시하는 방법에 따른 신뢰성해석 결과를 MCS방법과 비교한 결과, 제시하는 방법이 해의 정확성을 확보하면서도 연산시간을 큰 폭으로 줄여주는 장점을 가짐을 보였다. 또한, 하중효과가 가장 크게 발휘되는 6층에 충돌하중을 재하한 결과, 통로직각방향으로는 가장

하단부에 있는 수직부재의 연속적 파괴가 시스템파괴에 크게 기여하는 양상을 보였으며, 통로방향으로는 하단부의 인접한 수직부재의 파괴뿐만 아니라 각 층별 인접한 2개의 수직부재들의 연속 파괴도 시스템파괴에 주요하게 기여하고 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 향후 충돌에 따른 시스템 신뢰성을 향상시키기 위한 부재 보강 시나리오를 수립하는 데 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글: 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2013R1A1A2009782)

References

- 1) S.-Y. Ok, O.-Y. Kwon and S. W. Paik, "Behavioral Characteristics Investigation of Rack Structure Depending on Forklift Impact Scenarios and Storage Distributions", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 28, No. 6, pp. 49-56, 2013.
- 2) D.-S. Kim, S.-Y. Ok, J. Song and H.-K. Koh, "System Reliability Analysis using Dominant Failure Modes Identified by Selective Searching Technique", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 119, pp. 316-331, 2013.
- 3) F. Moses and B. Stahl, "Reliability Analysis Format for Offshore Structures", In: *Proceedings of the 10th Annual Offshore Technology Conference*, Paper 3046, 1978.
- 4) Y. Murotsu, H. Okada, K. Taguchi, M. Grimmelt and M. Yonezawa, "Automatic Generation of Stochastically Dominant Failure Modes of Frame Structures", *Structural Safety*, Vol. 2, pp. 17-25, 1984.
- 5) R. Ranganathan and A. G. Deshpande, "Generation of Dominant Modes and Reliability Analysis of Frame", *Structural Safety*, Vol. 4, pp. 217-228, 1987.
- 6) A. Srividya and R. Ranganathan, "Automatic Generation of Stochastically Dominant Failure Modes in Frame Structures for Reliability Studies", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 37, pp. 15-23, 1992.
- 7) S. -Y. Ok, "Reliability Assessment and its Tendency Investigation of Rack Structure for Failure Modes under Uncertainties in Load and Model Parameters", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 28, No. 7, pp. 44-51, 2013.
- 8) A. Der Kiureghian, "First- and Second-order Reliability Methods", *Engineering Design Reliability Handbook*, Edited by E. Nikolaidis, D.M. Ghiocel & S. Singhal, CRC Press, Boca Raton, FL, Chapter 14, 2005.
- 9) O. Ditlevsen and H. O. Madsen, "Structural Reliability Methods", Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1996.
- 10) S. Gollwitzer and R. Rackwitz, "An Efficient Numerical Solution to the Multinormal Integral", *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 3, No. 2, 98-101, 1988.
- 11) M. D. Pandey, "An Effective Approximation to Evaluate Multinormal Integrals", *Structural Safety*, Vol. 20, 51-67, 1998.
- 12) J. Song and W. H. Kang, "System Reliability and Sensitivity under Statistical Dependence by Matrix-based System Reliability Method", *Structural Safety*, Vol. 31, No. 2, pp. 148-156, 2009.
- 13) A. Genz, "Numerical Computation of Multivariate Normal Probabilities", *Journal of Computational and Graphical Statistics*, Vol. 1, No. 2, pp. 141-149, 1992.
- 14) N. J. McKay, R. J. Beckman and W. J. Conover, "A comparison of Three Methods for Selecting Value of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code", *Technometrics*, Vol. 21, pp. 239-245, 1979.
- 15) P. Thoft-Christensen and Y. Murotsu, "Application of Structural System Reliability Theory", Springer Verlag, 1986.