

# 철도교의 지진취약도 함수 도출을 위한 안전율평가 결과 이용

## Seismic Fragility Evaluation for Railway Bridge Structures using Results of a Safety Factor

김민규<sup>1)</sup> · 함대기<sup>2)</sup> · 최인길<sup>3)</sup>

Kim, Min-Kyu · Hahm, Dae-Gi · Choi, In-Kil

**국문 요약** >> 본 연구에서는 HAZUS와 같은 지진위험도 추정을 위한 입력으로서 교량구조물에 대한 대표 지진취약도 함수를 도출하기 위하여 기존에 수행되었던 안전율 평가 결과를 이용하여 일련의 교량군에 대한 대표 지진취약도 함수를 도출하는 방법을 제안하였다. 지진응답해석 결과를 근거로 하여 제시된 교량 집단의 각 부재별 안전율을 정리하였으며 이 안전율 결과를 이용하여 각 파괴모드별 지진취약도 곡선을 도출하였다. 각 부재별로 평가된 지진취약도 함수를 이용하여 HAZUS의 입력으로 사용할 수 있는 손상단계별 지진취약도 함수를 도출하였다. 부재별 파괴모드를 이용하여 교량전체의 시스템 취약도를 도출하기 위하여 고장수목을 사용하였다. 결과적으로 본 연구에서는 기존의 안전율결과를 이용하여 취약도결과를 도출할 수 있는 방법을 제시하였다.

**주요어** 안전율, 지진취약도 함수, 파괴모드, 손상단계, 고장수목

**ABSTRACT** >> This study is an evaluation of seismic fragility function using the HAZUS program for railway bridge systems, based on the results of previous research on seismic safety factor. First, a fragility function for each of the bridge members was evaluated according to the damage criteria and failure mode. Subsequently, bridge system fragility was evaluated using a fault tree to describe damage status. Finally, a fragility evaluation method for the bridge system was developed, based on the safety factor derived from the previous research.

**Key words** Safety factor, Seismic fragility function, Failure mode, Damage status, Fault tree

### 1. 서론

구조물의 안전성을 판단하는 기준으로서 기존에는 결정론적인 방법으로 각 부재의 성능과 외력에 의한 응답과의 비를 통하여 나타내는 안전율을 널리 사용하였다. 그러나 최근들어 재료 및 외부하중등의 불확실성을 고려하여 파괴 확률을 제시할 수 있는 취약도평가의 사용이 증가하고 있는 추세이다. 특별히 불확실성이 큰 지진하중과 같은 경우는 안전율에 의한 결정론적인 평가보다는 확률론적인 평가가 더욱 의미있는 결과를 도출한다고 할 수 있다.

지진취약도평가 연구는 원자력 발전소의 안전도를 평가

하기 위하여 가장 처음 시도하였으며 Kennedy and Ravindra<sup>(1)</sup>에 의해서 정립되었다고 할 수 있다. 취약도 분석연구는 원자력발전소의 확률론적 위험도 평가(Seismic Probabilistic Risk Assessment)를 위하여 개발된 방법인 만큼 초기에는 대부분의 연구가 원자력발전소를 대상으로 하여 구조물과 기기 등에 대한 평가를 실시하였으며 최근에 일반 구조물로 그 대상을 넓혀가고 있는 상황이다. 국내에서 지진취약도 분석에 대한 연구가 수행된 것은 최근의 일이며 주로 원전 시설물을 중심으로 그 연구가 이루어져 왔다. 최인길 등<sup>(2),(3)</sup>은 원자력 발전소를 대상으로 하여 국내 실정에 맞는 취약도 함수의 개발을 위한 연구를 수행하였으며, 김상훈<sup>(4),(5)</sup>은 교량에 대한 지진취약도 분석을 수행한 바 있다. 고현무 등<sup>(6)</sup>은 철근콘크리트 교량에 대한 지진취약도 해석을 위하여 교각의 지진손상인자 결정에 대한 연구를 수행하였으며, 이진학 등<sup>(7)</sup>은 지진취약도의 결과를 지진재해도와 결합하여 지진위험도를 평가하는 연구를 수행하였다. 최근에는 김재천 등<sup>(8)</sup>이 교량의 지진취약도 분석에 지반특성을 고려하기

<sup>1)</sup> 정희원·한국원자력연구원 종합안전평가부 선임연구원, 공학박사 (교신저자: minkyu@kaeri.re.kr)

<sup>2)</sup> 한국원자력연구원 종합안전평가부 선임연구원, 공학박사

<sup>3)</sup> 정희원·한국원자력연구원 종합안전평가부 책임연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2009년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 6. 18 / 수정일 : 2009. 8. 4. / 게재확정일 : 2009. 8. 4)

도 하였다. 건축물의 경우에 박주남과 최은수<sup>(9)</sup>는 취약도 해석을 통하여 빌딩구조물의 내진성능을 비교하는 연구를 수행하였으며, 김남희와 홍성걸<sup>(10)</sup>은 HAZUS 자료를 이용하여 국내 건축물의 취약도 분석을 수행하기도 하였다.

교량의 지진취약도 평가 연구는 대부분 단일교량에 대하여 설계도면에 근거하여 수치해석을 통하여 파괴모드별로 수행하는 것이 일반적이다. 교량의 파괴형상은 항상 동일하게 발생하는 것이 아니기 때문에 대표적인 파괴모드에 대하여 각 파괴모드별로 취약도함수를 도출하게 된다. 그러나 이러한 경우 단일 교량에 대한 취약도 평가는 가능하지만 여러개의 교량에 대한 대표 지진취약도 함수를 도출하는 것은 불가능하다. 반면 미국의 HAZUS<sup>(11)</sup>에서는 지진발생시 해당지역의 지진피해규모를 예측하기 위하여 유사한 그룹의 구조물에 대한 대표 지진취약도 함수를 제시하고 있다. 본 연구에서는 HAZUS와 같은 지진피해 예측 시스템에 적용하기 위한 일련의 교량군에 대한 대표 지진취약도 함수를 도출하기 위한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 기존에 결정론적인 방법으로 구해진 교량의 안전율 값을 이용하여 지진취약도함수를 구하는 방법을 제시하였으며 실제로 기존의 안전율 결과를 이용하여 파괴모드별 및 손상단계별 지진취약도 함수를 제시하였다.

## 2. 취약도 평가대상 교량

### 2.1 검토대상 교량

지진취약도함수 도출을 위한 검토대상의 철도교량은 “일반철도 기존시설물의 내진성능 상세평가 및 보강방안 수립” 연구<sup>(12)</sup>에서 대상으로 한 교량을 동일하게 적용하였으며 위 보고서의 안전율 결과를 이용한 취약도 평가를 수행하였다. 이 보고서에서는 전체 교량을 핵심교량과 중요교량으로 구분하여 각각을 무근콘크리트 교각 교량, 철근콘크리트 교각 교량 그리고 라멘교량을 포함한 기타교량으로 구분하였다. 핵심교량과 중요교량은 내진설계가 반영되지 않은 전국의 503개소의 철도교량에 대하여 내진성능 예비평가를 수행한 결과, 내진보강이 필요하다고 판단되어 상세평가의 대상이 된 교량이다. 본 연구에서는 상세평가 대상인 무근콘크리트 교각 교량에 대한 안전율 평가 결과를 이용하여 취약도 평가를 수행하였다. 취약도 평가 대상이 되는 무근콘크리트 교각 교량은 54개로서 각각의 명칭과 일반적인 형식은 표 1에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 교량의 건설연도가 매우 오래된 것을 알 수 있다.

무근 콘크리트 교각 교량은 일반적으로 무도상 강관형교

라고 불리는 교량형식으로 최근에는 건설되지 않는 형식이며 자갈이나 콘크리트 슬래브 등의 도상 시스템이 없이 강관으로 제작된 주형 바로 위에 궤도가 직접 올라가는 구조로 되어 있으며 하부구조는 대부분의 경우 무근 콘크리트 교각으로 이루어져 있다. 우리나라 기존 철도 교량의 약 40% 정도를 차지하는 것으로 알려져 있다.<sup>(13)</sup>

### 2.2 안전율 평가 방법

국내 철도교량의 지진하중에 대한 취약도 평가를 위해서는 정의된 파괴모드 각각에 대한 지진 시 요구 성능과 구조물 보유성능에 대한 확률적 정보가 필요하다. “일반철도 기존시설물 내진성능 상세평가 및 보강방안 수립” 연구에서는 국내 철도교에 대하여 교량 구성품 각각에 대한 보유성능과 지진에 의한 요구량을 비교하여 안전율을 분석하였다. 안전율의 평가는 안전으로 평가되는 경우에는 (+)값으로 표기하였고, 손상으로 평가되는 경우에는 (-)값으로 표기하였으며, 각각 다음과 같은 식 (1)과 (2)를 이용하고 있다.

i) 안전으로 평가되는 경우:

$$\text{안전율} = \frac{\text{구조물보유성능}}{\text{지진요구량}} \quad (1)$$

ii) 손상으로 평가되는 경우:

$$\text{안전율} = -\frac{\text{지진요구량}}{\text{구조물보유성능}} \quad (2)$$

위 방식으로 안전율을 계산하면 안전율의 값이 안전인 경우에는 항상 1.0보다 크게 나타나며 손상일 경우에는 -1.0보다 작게 나타난다. 보유성능과 요구량이 같은 경우에는 손상으로 판단하고 -1.0의 안전율을 부여하였다. 안전율 평가를 위한 지반운동은 국내 도로교설계기준에 근거하여 PGA 0.154g로 환산된 인공지진 가속도 시간이력을 사용하였다.

안전율 평가는 교축방향과 교축직각방향에 대하여 수행하였으며, 또한 교각과 교대의 손상을 고려하였다. 따라서 교축방향의 경우 교각의 손상, 교각의 받침손상, 교각의 낙교, 교대의 받침손상, 교대의 낙교를 고려하였으며, 교축직각방향의 경우 교각의 손상, 교각의 받침손상, 교대의 받침손상을 고려하였다.

### 2.3 안전율 평가 결과

상기 방법으로 대상교량 54개의 안전율을 평가한 결과를 표 2에 정리하였다. 전술한 바와 같이 교축방향과 교축직각

〈표 1〉 안전을 평가를 수행한 철도교량 목록

번호	교량명	지역	선로	상부구조	하부구조	교량받침	준공년도
1	하원천교	순천	경전선	강판형	중력식(무근)	면	1968
2	제천천3교	제천	기회선	T형거더	중력식(무근)	면	1968
3	옥계천교	동해	영동선	강판형	중력식(무근)	선	1963
4	건천천2교	대구	중앙선	강판형	중력식(무근)	선	1938
5	천리천1교	영주	중앙선	강판형	중력식(무근)	선	1938
6	미천천2교	영주	중앙선	강판형	중력식(무근)	선	1939
7	미천천3교	영주	중앙선	강판형	중력식(무근)	선	1939
8	만경강교	익산	호남선	강판형	중력식(무근)	받침판	1982
9	미호천(상)	대전	경부선	강판형	중력식(무근)	선	1905
10	미호천(하)	대전	경부선	강판형	중력식(무근)	선	1905
11	삼봉천	김천	경부선	콘크리트슬래브	중력식(무근)	면	1934
12	한강C선	서울	경부선	트러스	중력식(우물통)	핀-롤러	1944
13	금강1교(상)	대전	경부선	트러스	중력식(우물통)	핀-롤러	1938
14	금강1교(하)	대전	경부선	트러스	중력식(우물통)	핀-롤러	1940
15	화산천1교	수원	경부선	강판형	중력식(무근)	선	1979
16	화산천2교	수원	경부선	강판형	중력식(무근)	면	1979
17	백천교	대전	경부선	강판형	중력식(무근)	선	1937
18	경호강(상)	김천	경부선	강판형	중력식(무근)	선	1989
19	경호강(하)	김천	경부선	강판형	중력식(무근)	선	1989
20	영동천2교	김천	경부선	T형거더	중력식(무근)	면	1905
21	영동천3교	김천	경부선	T형거더	중력식(무근)	면	1905
22	영동천4교	김천	경부선	T형거더	중력식(무근)	면	1905
23	장평천2교	제천	중앙선	T형거더	중력식(무근)	면	1968
24	장평천6교	제천	중앙선	T형거더	중력식(무근)	면	1968
25	개령천교	김천	경부	T-거더	중력식(무근, 트래형)	유지	1934
26	구미천교	김천	경부	T-거더	중력식(무근, 트래형)	유지	1934
27	복삼천교(상)	김천	경부	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1934
28	복삼천교(하)	김천	경부	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1934
29	낙동강교(상)	김천	경부	단순트러스	중력식(무근, 트래형)	핀-롤러	1939
30	낙동강교(하)	김천	경부	연속트러스	중력식(무근, 트래형)	핀-롤러	1944
31	두동천교(상)	김천	경부	T-거더	중력식(무근, 트래형)	유지	1934
32	두동천교(하)	김천	경부	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1934
33	이언천교(상)	김천	경부	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1934
34	이언천교(하)	김천	경부	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1934
35	금호강교(상)	김천	경부	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1934
36	금호강교(하)	김천	경부	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1934
37	낙풍천교	동행	영동선	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1963
38	군성강교	동행	영동선	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1963
39	금량천교	대구	중앙	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1938
40	대전교	대구	중앙	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1938
41	백천교(인상)	대전	경부	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1937
42	마미포천교	대전	경부	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1937
43	심천천교(상)	대전	경부	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1942
44	심천천교(하)	대전	경부	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1909
45	하당천제2(하)	대전	충북	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1923
46	원동천교(상)	부산	경부	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1944
47	원동천교(하)	부산	경부	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1944
48	남천교	영주	중앙	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1939
49	대평천교	영주	중앙	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1938
50	운산천제1교	영주	중앙	강판형	중력식(무근, 트래형)	선	1938
51	금구천교(상)	익산	호남	강판형	중력식(무근, 트래형)	평면	1939
52	제천천제2교	제천	중앙	T-거더	중력식(무근, 트래형)	유지	1968
53	소산천교	제천	태백	강판형	중력식(무근, 원형)	평면	1965
54	사음천교	제천	태백	T-거더	중력식(무근, 트래형)	유지	1965

〈표 2〉 평가대상 교량의 파괴모드별 안전율

구분	교 축 방 향					교 축 직 각 방 향		
	교 각			교대		교 각		교대
	교 각 전단력	받 침 전단력	낙 교 상대변위	받 침 전단력	낙 교 절대변위	교각 전단력	받침 전단력	받침 전단력
하원천교	5.11	-2.90	8.25	-2.57	1.35	4.51	-8.09	-4.32
제천천3교	1.96	-	64.00	-	1.69	1.70	-	-
옥계천교	8.30	13.49	2.06	-1.04	1.33	6.21	-1.21	-7.74
건천천2교	2.75	-2.17	5.17	-4.43	1.34	2.64	-1.61	-7.98
천리천1교	2.77	14.30	3.07	-2.37	355.56	5.43	1.47	-8.89
미천천2교	3.78	-2.02	2.63	-2.49	1.75	23.45	-2.86	-5.23
미천천3교	4.44	1.56	4.06	-2.61	1.36	7.49	1.39	-8.10
만경강교	2.21	18.33	4.05	-1.45	5.61	4.01	1.42	-7.03
미호천	3.39	9.53	3.65	-3.39	2.12	5.98	1.07	-20.70
미호천(하)	3.39	9.53	3.65	-3.39	2.12	5.98	1.07	-20.70
삼봉천	2.65	-	12.18	-	1.76	2.61	-	-
한강C선	3.46	65.00	-	-19.25	-	4.51	-1.67	-5.51
금강1교(상)	3.08	2.17	1.26	-4.83	1.73	5.66	-2.29	-18.48
금강1교(하)	3.08	2.17	1.26	-4.83	1.73	5.66	-2.29	-18.48
화산천1교	4.75	1.10	29.47	-1.37	1.76	2.94	1.01	1.57
화산천2교	3.46	-	89.61	-	1.95	5.15	-	-
백천교	5.71	-1.64	4.17	-1.32	1.32	4.24	-2.59	-1.23
경호강교(상)	5.17	13.00	9.56	1.36	1.76	6.14	1.08	-6.48
경호강교(하)	5.17	13.00	9.56	1.36	1.76	6.14	1.08	-6.48
영동천2교	2.52	-	13.55	-	1.48	3.13	-	-
영동천3교	2.52	-	13.55	-	1.48	3.13	-	-
영동천4교	2.52	-	13.55	-	1.48	3.13	-	-
개령천교	4.20	1.20	233.30	1.60	2.40	5.00	2.50	1.50
구미천교	3.20	-1.90	158.33	-1.10	3.30	6.20	1.90	1.20
북삼천교(상)	2.90	-7.10	42.20	-3.00	2.80	3.60	-1.30	1.10
북삼천교(하)	2.90	-7.10	42.20	-3.00	2.80	3.60	-1.30	1.10
낙동강교(상)	3.40	3.20	65.20	-	-	3.20	5.10	-
낙동강교(하)	3.90	8.00	82.70	-	-	1.60	3.50	-
두동천교(상)	6.70	-1.10	105.30	1.10	2.00	6.30	1.80	1.10
두동천교(하)	6.70	2.00	202.30	-1.30	1.70	6.30	1.50	1.70
이연천교(상)	11.00	1.20	52.70	-1.30	1.60	6.90	1.40	-1.10
이연천교(하)	11.00	1.20	41.20	-1.30	1.80	6.90	1.40	-1.10
금호강교(상)	9.80	1.20	50.00	-1.30	2.20	5.10	-2.90	-3.10
금호강교(하)	9.80	1.20	50.00	-1.30	2.20	5.10	-2.90	-3.10
낙풍천교	5.90	-1.20	64.60	1.30	2.00	-1.00	-3.00	-4.10
군성강교	7.10	-4.70	17.30	-1.80	3.20	7.90	-1.20	1.10
금량천교	8.00	1.30	51.10	-1.10	1.80	5.40	-1.00	1.80
대천교	3.80	-2.10	72.20	1.10	2.00	2.30	-1.20	-1.40
백천교(인상)	8.30	-1.20	38.00	-1.30	2.10	5.70	1.10	-1.30
마미포천교	6.80	-1.10	86.20	-1.30	2.00	3.50	-5.20	-3.30
심천천교(상)	7.60	-1.40	58.80	-1.60	2.00	3.30	1.10	-1.00
심천천교(하)	6.80	-1.30	63.60	-1.60	2.10	3.30	1.00	-1.10
하당천제2(하)	10.00	-1.30	107.30	1.90	2.40	9.00	2.50	2.10
원동천교(상)	5.90	-1.30	114.30	1.60	2.00	3.70	-1.20	-1.40
원동천교(하)	5.90	-1.30	83.50	-1.60	2.00	3.70	-1.20	-1.40
남천교	7.80	1.30	92.10	1.20	2.00	3.50	-1.10	-1.10
대평천교	1.60	-3.30	23.90	-2.20	19.00	4.60	-1.80	-1.10
운산천제1교	7.30	1.20	91.80	-1.20	1.60	3.20	-1.70	-1.00
금구천교(상)	4.30	1.20	139.40	1.20	2.00	3.00	1.50	1.50
제천천제2교	4.10	-2.50	153.90	-1.20	2.00	2.90	-1.00	1.00
소산천교	7.90	3.80	18.30	9.60	1.60	7.60	20.00	8.70
사읍천교	5.30	-2.10	18.40	-1.40	2.00	1.70	-1.30	-3.50

방향으로 모두 8개의 파괴모드에 대한 안전율을 계산하였다. 본 연구에서는 기존의 이와 같은 파괴모드별 안전율을 모두 사용하여 파괴모드별 지진취약도곡선을 도출하고 도출된 곡선을 이용하여 전체 시스템의 지진취약도곡선을 도출하고자 하였다.

### 3. 지진취약도함수 도출 방법

#### 3.1 구조요소의 손상상태 정의

철도교량의 지진취약도함수 평가를 위해서는 먼저 정의된 취약부위의 파괴모드 별 손상상태 정의가 필요하다. “일반철도 기존시설물 내진성능 상세평가 및 보강방안 수립” 보고서에서는 파괴모드를 받침의 파괴, 교각의 전단파괴 및 낙교로 크게 구분하였다. 각각의 손상상태는 다음과 같이 정의한다.

철도교량에 사용되는 받침은 선받침과 스페리칼받침, 포트받침 및 핀 받침 등으로 구분할 수 있다. 이 중 선받침의 경우는 예폭시 모르타르의 균열로 손상 여부를 판단할 수 있으며, 스페리칼 받침과 포트받침, 핀 받침에서는 앵커볼트의 항복 여부로 손상을 판단할 수 있다.

무근콘크리트 교각은 균열이 발생하면 균열이 교각 내부로 진전하여 교각에 손상을 발생시키므로 균열발생 여부를 손상 기준으로 설정하는 것이 타당하다. 무근콘크리트 교각은 전단에 의한 균열과 인장에 의한 균열이 발생할 수 있는데, 전단에 의한 균열발생 기준<sup>(14)</sup>은 “철도설계기준(철도교편)”에 제시되어있는 것으로 다음 식 (3)과 같으며, 인장에 대한 균열발생 능력은 식 (4)와 같다.

$$v_{ca} = 0.08 \sqrt{f_{ck}} \tag{3}$$

$$v_{ca} = 0.33 \sqrt{f_{ck}} \tag{4}$$

여기서,  $v_{ca}$ 는 균열발생 능력이며,  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 공칭강

도이다. 단위는 SI단위인 MPa이다. 위의 식에서 보듯이 균열발생 기준에 의하면 인장균열 발생 기준이 전단균열 발생 기준에 비하여 약 4.125배 크다. 따라서 선받침 모르타르 및 무근콘크리트 교각의 균열 발생 여부 판단은 전단균열 발생 기준을 사용하였다. 여기서, 콘크리트의 공칭강도는 무근콘크리트 교각이 대부분 오래전에 시공이 이루어진 것이기 때문에 20.6MPa를 사용하였다.

이상의 손상 여부 판단을 위한 손상 상태는 HAZUS의 손상 정도 기준에 의하면 경미한 손상(Slight Damage)에 해당된다고 볼 수 있다. 보다 상세한 취약도 평가를 위해서는 Moderate 및 Extensive, Complete 손상 수준에 대해서도 명확한 기준과 정의가 필요하나, 아직 국내 교량에는 지진으로 인한 손상 상태에 대한 DATA의 축적이 현저히 부족하기 때문에, 본 연구에서는 경미한 손상을 유발하는 응답 수준을 1.0으로 하였을 때, 중간정도의 손상(Moderate Damage), 심각한 손상(Extensive Damage), 완전한 손상(Complete Damage)을 유발하는 응답 수준을 각각 HAZUS의 기준에 따라서 3, 7, 13으로 가정하고, 각각의 손상 수준을 기준으로 하여 취약도평가를 수행하였다.<sup>(13)</sup>

낙교의 발생 여부는 지진해석시 도출되는 교각과 상부구조의 상대변위가 교각의 교량받침 길이를 초과하는가의 여부로서 판별할 수 있다. 교대부에서의 낙교 가능성은 교각 상부의 절대변위로서 판단하였다. 앞서의 손상 기준과 달리, 낙교의 경우 교각-상부구조의 상대변위 또는 교각 절대변위가 받침지지 길이를 초과하게 되면 즉시 낙교로 인한 손상이 발생하게 되며, 이는 곧 해당 교량 구성품의 완전한 기능 손실을 의미하므로, 판단 기준이 되는 낙교 손상 상태는 HAZUS(1997)의 손상 상태 정의에 근거하면 완전한 손상(Complete Damage)에 해당한다고 볼 수 있다. 따라서 낙교의 경우에는 기준 손상 상태를 완전한 손상 상태로 보고 경미한 손상, 중간정도의 손상 및 심각한 손상에 대한 응답 수준을 앞서와 같은 비율로 환산하여 정의하였다. 이상의 손상평가 기준을 표 3에 정리하였다.

〈표 3〉 교량 각 구성품의 손상기준

교량 구성품	손상기준	기준응답	손상결과	손상상태
선받침	$v_{ca} = 0.08 \sqrt{f_{ck}}$	교량 받침의 전단력	받침의 균열	경미한 손상 (Slight Damage)
앵커볼트	항복강도	교량 받침의 항복강도	앵커볼트의 항복	경미한 손상 (Slight Damage)
무근콘크리트 교각	$v_{ca} = 0.08 \sqrt{f_{ck}}$	교각하부의 전단력	교각의 균열	경미한 손상 (Slight Damage)
낙교(교각)	교각-상부구조 상대변위	교각의 받침 지지길이	교각 낙교 발생	완전한 손상 (Complete Damage)
낙교(교대)	교각 절대변위	교대의 받침 지지길이	교대 낙교 발생	완전한 손상 (Complete Damage)

### 3.2 취약도 평가 기법

취약도 해석은 지반운동 규모에 따른 파괴확률 곡선들을 신뢰도 수준에 따라 제공하게 된다. 즉, 구조물의 지진취약도는 지반운동이 구조물에 손상을 입히게 될 확률을 표현한다고 할 수 있다. 파괴확률  $P_f(a)$ 는 지반운동 규모를 나타내는 지표인 최대지반운동가속도(PGA,  $a$ )의 함수로 표현되며, 특정 신뢰도 수준  $Q$ 에 대한 파괴확률은 다음의 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.<sup>(1)</sup>

$$P_f(a) = \phi\left(\frac{\ln(S_m(a)/C_m) + \beta_U \phi^{-1}(Q)}{\beta_R}\right) \quad (5)$$

여기서,  $\phi()$ 는 표준정규분포의 누적확률밀도함수를 나타내며,  $\phi^{-1}()$ 은 표준정규분포 누적확률밀도함수의 역함수이다.  $S_m(a)$ 와  $C_m$ 은 주어진 지반운동 가속도  $a$ 에서의 지진응답 중앙값과 내진성능의 중앙값을 나타낸다.  $\beta_R$ 과  $\beta_U$ 는  $S_m(a)$ 와  $C_m$ 의 무작위성(randomness)과 불확실성(uncertainty)을 각각 나타내는 대수정규 표준편차이다.

본 연구에서는 앞 절에서 얻어진 철도교량의 파괴모드별 안전율 자료로부터 구조물 보유성능에 대비 요구 성능의 통계학적 정보를 얻고, 이로부터 내진 보유용량에 대한 지진 응답 중앙값을 산출하였다. 대수정규분포를 따르는 응답  $r$ 에 대하여, 응답의 중앙값  $S_m$ 과 대수정규 표준편차  $\beta_r$ 은  $r$ 의 평균  $\mu_r$ 과 변동계수(Coefficient of Variation)  $\delta_r$ 로부터 각각 다음의 식 (6), (7)과 같이 주어진다.<sup>(15)</sup>

$$S_m = \frac{\mu_r}{\sqrt{1 + \delta_r^2}} \quad (6)$$

〈표 4〉 철도교량의 취약도함수평가를 위한 각 부재의 손상수준결정

전체 시스템의 손상수준	철도교량 각 부재의 손상수준		
	받침의 손상	낙교에 의한 손상	교각의 손상
경미한 손상	광범위한 손상	경미한 손상	경미한 손상
중간손상	완전손상	중간손상	중간손상
광범위한 손상	X	광범위한 손상	광범위한 손상
완전손상	X	완전손상	완전손상

$$\beta_r^2 = \ln(1 + \delta_r^2) \quad (7)$$

한편, 응답의 대수정규 표준편차  $\beta_a$ 와 무작위성을 나타내는 대수정규 표준편차  $\beta_R$ 과  $\beta_U$  간에는 다음 식 (8)과 같은 관계가 존재한다.

$$\beta_a = \sqrt{\beta_R^2 + \beta_U^2} \quad (8)$$

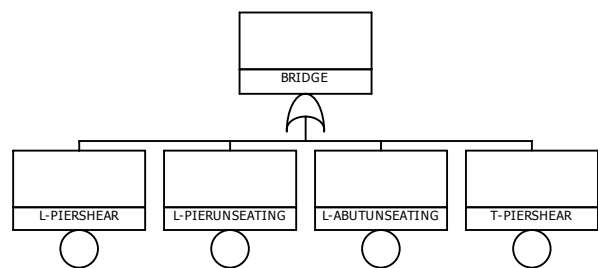
여기서는  $\beta_R$ 의 값은 0.31로 가정하였다.<sup>(16)</sup>

각 구성품에 대하여 손상단계별로 도출된 지진취약도 평가결과는 교량 전체의 지진취약도함수 도출을 위하여 표 4에서 제시한 바와 같은 방법을 이용하여 조합하였다. 즉 받침의 손상인 경우 광범위한 손상의 수준으로 전체 시스템에서의 경미한 손상으로 고려하였으며 받침의 완전손상수준을 전체시스템에 조합할 경우 중간손상단계로 고려하였다. 이후 전체 시스템의 광범위한 손상과 완전손상의 경우에는 받침의 손상을 고려하지 않았다. 낙교와 교각의 전단손상에 의한 파괴는 각 손상단계를 그대로 교량 전체의 손상상태로 고려하였다. 이러한 정의를 바탕으로 다음 그림 1 및 2와 같은 고장수목을 사용하여 교량의 전체 시스템에 대한 취약도함수를 도출할 수 있다.

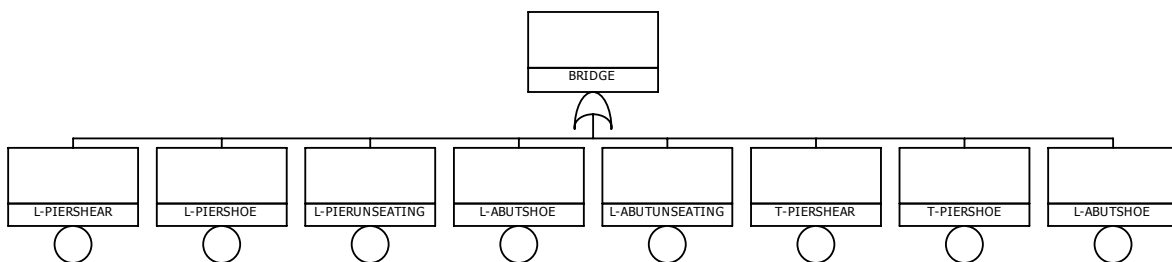
### 4. 지진취약도함수 도출 결과

#### 4.1 파괴모드에 따른 지진취약도함수 도출

무근콘크리트교각 교량의 지진취약도평가 결과를 나타내



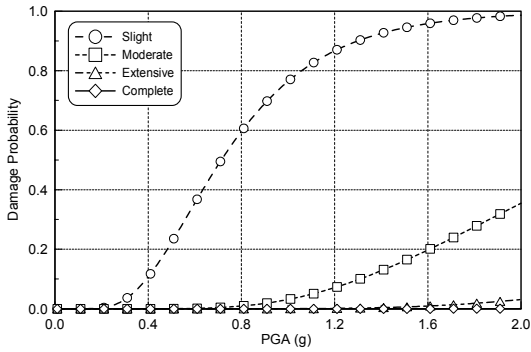
〈그림 2〉 광범위한 손상, 완전손상의 경우 철도교량의 취약도함수 도출을 위한 고장수목



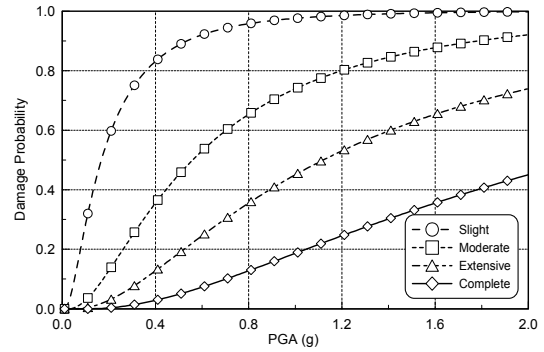
〈그림 1〉 경미한 손상, 중간손상의 경우 철도교량의 취약도함수 도출을 위한 고장수목

는 취약도곡선과 지진취약도함수의 값을 그림 3~그림 10에 나타내었으며 각 지진취약도의 중앙값(Median)과 대수정규 표준편차(Beta)값을 손상상태별로 표 5에 정리하였다. 그림과 표에서 볼 수 있듯이, 국내 무근콘크리트교각 철도교의 경우, 전단에 대한 파괴확률이 상대적으로 낮고 받침 및 낙

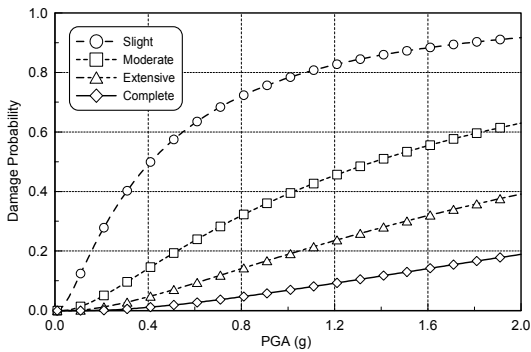
교에 대한 손상확률이 큰 것으로 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 비록 무근 콘크리트 교각임에도 불구하고 교각의 단면이 크고 상부 중량이 교각에 비하여 작기 때문에 전단과 파괴확률이 작게 나타나는 것으로 판단된다.



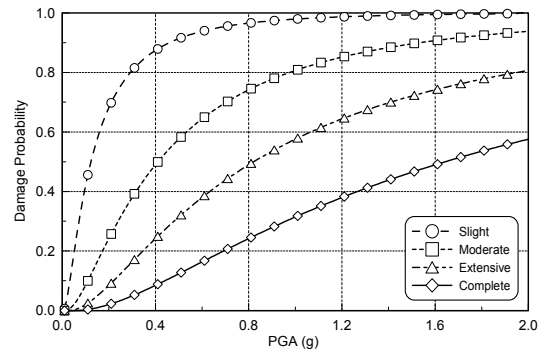
〈그림 3〉 교축방향 교각 전단에 대한 지진취약도 곡선



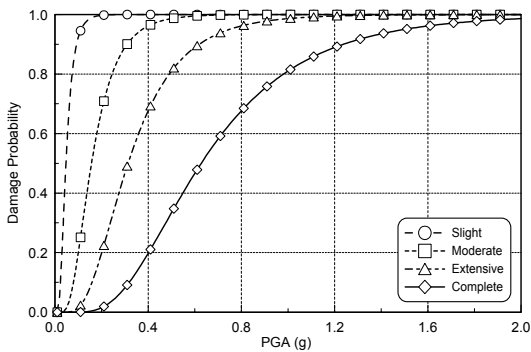
〈그림 4〉 교축방향 교각 받침에 대한 지진취약도 곡선



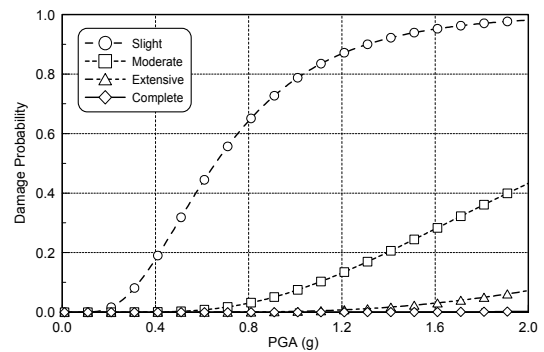
〈그림 5〉 교축방향 교각 낙교에 대한 지진취약도 곡선



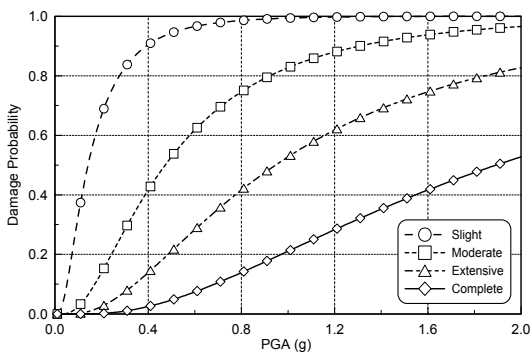
〈그림 6〉 교축방향 교대 받침에 대한 지진취약도 곡선



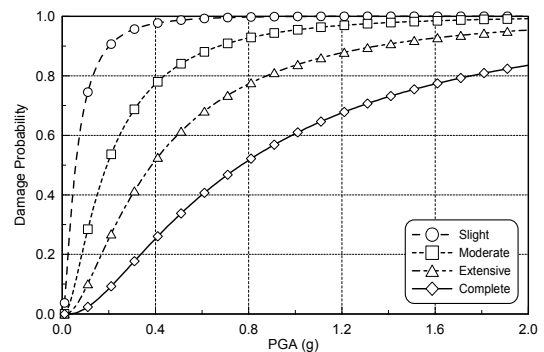
〈그림 7〉 교축방향 교대 낙교에 대한 지진취약도 곡선



〈그림 8〉 교축직각방향 교각 전단에 대한 지진취약도 곡선



〈그림 9〉 교축직각방향 교각 받침에 대한 지진취약도 곡선



〈그림 10〉 교축직각방향 교대 받침에 대한 지진취약도 곡선

〈표 5〉 교축방향 교각 전단에 대한 무근콘크리트교량의 지진취약도함수

파괴모드 구분	손상상태	Median	Beta
교축방향 교각 전단	Slight	0.714	0.35
	Moderate	2.380	0.35
	Extensive	4.761	0.35
	Complete	9.52	0.35
교축방향 교각 받침	Slight	0.168	0.85
	Moderate	0.560	0.85
	Extensive	1.120	0.85
	Complete	2.239	0.85
교축방향 교각 낙교	Slight	0.411	1.10
	Moderate	1.370	1.10
	Extensive	2.740	1.10
	Complete	5.480	1.10
교축방향 교대 받침	Slight	0.123	0.98
	Moderate	0.410	0.98
	Extensive	0.821	0.98
	Complete	1.643	0.98
교축방향 교대 낙교	Slight	0.047	0.43
	Moderate	0.156	0.43
	Extensive	0.313	0.43
	Complete	0.627	0.43
교축직각방향 교각 전단	Slight	0.657	0.44
	Moderate	2.191	0.44
	Extensive	4.382	0.44
	Complete	8.765	0.44
교축직각방향 교각 받침	Slight	0.141	0.73
	Moderate	0.473	0.73
	Extensive	0.946	0.73
	Complete	1.892	0.73
교축직각방향 교대 받침	Slight	0.057	0.93
	Moderate	0.192	0.93
	Extensive	0.384	0.93
	Complete	0.768	0.93

#### 4.2 교량 시스템의 지진취약도평가

무근콘크리트교각 교량의 구조요소에 따른 파괴모드 별 지진취약도평가 결과를 토대로 하여 전체 교량 시스템의 지진취약도를 평가하여 그 결과를 표 6과 그림 11에 나타내었다. 표 4에서 정의한 바와 같이 시스템의 경미한 손상이 발생하는 것은 받침 중 어느 한 곳이라도 완전한 파손이 발생하거나, 받침 이외의 파괴모드가 경미한 손상 이상의 손상이 발생할 때로 정의하였다. 시스템의 중간정도 손상은 교각의 전단 손상, 교각 및 교대에서의 낙교로 인한 손상이 중간정도 손상에 이르는 것으로 정의하였으며, 심각한 손상과 완전 손상에 받침 이외의 파괴모드가 각각 심각한 손상과

완전 손상에 이르게 되는 것으로 정의하였다. 받침은 교각의 전단 파괴나 상부구조의 낙교에 비하여 중요도가 낮기 때문에 중간 손상 이상 규모의 손상에서는 고려하지 않았다.

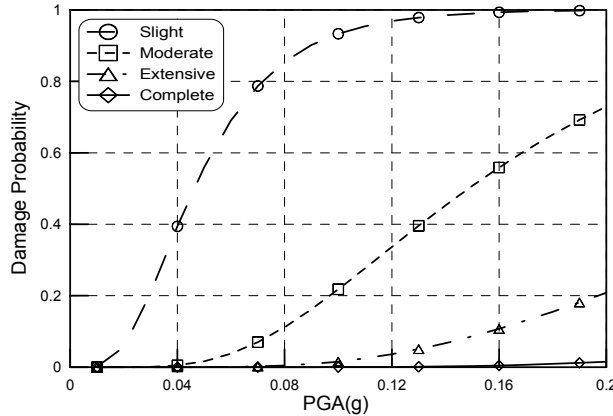
정량적으로 볼 때, 설계 지반운동인 0.154g에서 시스템이 완전 손상될 확률은 중앙값으로 볼 때 약 0.3%가량인 것으로 나타났으며, 95% 신뢰도 하에서도 약 1%에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 전체 교량 시스템은 평균신뢰도를 기준으로 약 0.6g의 내진성능 용량을 보유하고 있었으며, 평균값 기준으로 약 0.32g의 지반운동 가속도에 대하여 약 10%의 파괴확률을 보였다.

여기서 국내 무근콘크리트 교각 철도교량을 대상으로 하여 산출한 지진취약도 평가 결과가 그리 좋지 않은 것으로



〈표 6〉 무근콘크리트교량의 지진취약도함수

구분	손상상태	Median	Beta
무근콘크리트교량 교량 시스템	Slight	0.046	0.52
	Moderate	0.147	0.49
	Extensive	0.305	0.50
	Complete	0.616	0.53



〈그림 11〉 무근콘크리트교량의 대표 지진취약도 곡선

평가된 것은 평가대상 교량의 준공년수가 표 1에서 보는 바와 같이 상당히 오래되었으며 내진설계가 되어 있지 않고 특히 전술한 바와 같이 내진보강이 필요한 것으로 판단되어 상세평가대상 교량으로 분류된 교량을 대상으로 한 것이기 때문이다. 따라서 본 연구에서 제시한 결과가 국내 철도교량을 대표하는 지진취약도 결과라고는 할 수 없는 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 교량구조물에 대한 대표 지진취약도 함수를 도출하기 위하여 기존에 수행되었던 안전율 평가 결과를 이용하여 일련의 교량군에 대한 대표 지진취약도 함수를 도출하는 방법을 제안하였다. 지진응답해석 결과를 근거로 하여 제시된 교량 집단의 각 부재별 안전율을 정리하였으며 이 안전율 결과를 이용하여 각 파괴모드별 지진취약도 곡선을 도출하였다. 각 부재별로 평가된 지진취약도 함수를 이용하여 HAZUS의 입력으로 사용할 수 있는 손상단계별 지진취약도 함수를 도출하였다. 부재별 파괴모드를 이용하여 교량전체의 시스템 취약도를 도출하기 위하여 고장수목을 사용하였다. 결과적으로 본 연구에서는 기존의 안전율결과를 이용하여 취약도결과를 도출할 수 있는 방법을 제시하였다.

### 감사의 글

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.(연구과제 관리코드: M20702030003-08M0203-00310)

### 참고 문헌

- Kennedy, R.P. and Ravindra, M.K. "Seismic fragilities for nuclear power plant risk studies," Nuclear Engineering and Design, Vol. 79, 47-68, 1984.
- 최인길, 안성문, 진영선, "비선형 지진해석에 의한 PSC격납건물의 지진취약도 분석," 한국지진공학회 논문집, 제10권, 제1호, 63-74, 2006.
- Choi, I.-K., Choun, Y.-S., Ahn, S.-M., and Seo, J.-M., "Probabilistic seismic risk analysis of CANDU containment structure for near-fault earthquakes," Nuclear Engineering and Design 238, 1382-1391, 2008.
- 김상훈, "다경간 콘크리트 교량의 지진 취약도," 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제6호, 35-47, 2003.
- 김상훈, "Steel Jacket으로 보강된 콘크리트 교량에 대한 지진취약도 개발," 한국지진공학회 논문집, 제7권, 제5호, 75-83, 2003.
- 고현무, 이지호, 강준원, 조호현, "취약도 해석을 위한 철근콘크리트 교각의 지진손상 평가인자 결정," 한국지진공학회 2002년도 추계학술대회 논문집, 308-315, 2002.
- 이진학, 윤진영, 윤정방, "지진취약도 분석을 통한 교량의 지진위험도 평가," 한국지진공학회 논문집, 제8권, 제6호, 31-43, 2004.
- 김재천, 변지석, 신수봉, "지반특성을 고려한 FCM 교량의 지진취약도 분석," 한국지진공학회 논문집, 제12권, 제3호, 37-44, 2008.
- 박주남, 최은수, "취약도 해석을 통한 빌딩구조물의 내진성능 비교 및 평가," 한국지진공학회 논문집, 제11권, 제3호, 11-21, 2007.
- 김남희, 홍성길, "HAZUS 자료를 이용한 국내 건축물의 취약도 분석," 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, 2009. 3.
- FEMA, HAZUS99 Technical Manual, 1999.
- 한국철도시설공단, 일반철도 기존시설물 내진성능 상세평가 및 보강방안 수립, 한국철도기술연구원, 2008.
- 박주남, 조성철, "강판형 철도교의 지진취약도 해석," 2008 한국위험통제학회 학술발표회, 2008.
- 철도시설공단, 철도설계기준, 2004.
- Alfredo, H-S. A., and Wilson, H. T., Probability Concepts in Engineering Planning and Design, John Wiley & Sons., 1975.
- 국립방재교육연구원, 철도시설물의 지진취약도함수 국산화 연구, 방재연구소, 2008.