

도로교 내진보강 우선순위 결정을 위한 알고리즘에 관한 연구

김형규¹, 장일영^{2*}

A Study on Algorithm for Determining Seismic Improvement Priority of Highway Bridges

Hyung-Gyu Kim¹, Il-Young Jang^{2*}

Abstract: With the recent series of damage caused by earthquakes in Korea, such as Gyeongju and Pohang, we know that Korea is no longer a safe zone for earthquakes and that we need to be prepared for them. In addition, bridges built prior to the introduction of seismic design concepts remain without adequate seismic reinforcement measures, and earthquake reinforcement should be performed efficiently considering economic and structural safety. Preliminary assessment of seismic performance of existing bridges is divided into four seismic groups, taking into account seismicity, vulnerability and Impact, considering the magnitude of the existing bridge's seismic, and prioritization for further evaluation of seismic performance. In this study, unlike the existing anti-seismic reinforcement priority method, scores are calculated based on the seismic design criteria applied to bridges, importance coefficient of the bridge including the zone coefficient and the Importance, vulnerability index of the bridge including the soil condition and the elapsed years, detail coefficient of the bridge including the superstructure form, the span length, the width, the height, the design load, and the daily traffic volume. The calculated score items will be weighted and grouped according to the results. Using this, a simpler and more efficient algorithm was proposed to determine the priority of seismic reinforcement on a bridge.

Keywords: Seismic retrofit priority, Seismicity, Priority Ranking, Algorithm

1. 서론

최근 2016년 9월 경주, 2017년 11월 포항 등 국내에서 연이어 발생한 기록적인 규모의 지진으로 인한 피해가 발생하면서, 우리나라가 더 이상 지진의 안전지대가 아니며 이에 대한 대비가 필요하다는 범국가적 인식을 함께하는 계기가 되었다. 이와 함께 국내의 내진설계기준 성능수준을 초과하는 규모의 지진이 언제든지 발생할 가능성이 있다는 사실을 보여주었다. 현재 도로교 설계기준은 1992년 도로교표준시방서에 서부터 2012년 도로교 설계기준에 이르기까지 시기별 설계기준 변천이 이루어졌으며 그에 따라 각 시기별 준공된 교량들 또한 내진설계 적용에 차이를 보여주고 있다. 우리나라에서는 1992년 도로교표준시방서를 통해 내진설계 관련 기준이 정비되면서 내진설계 및 시공이 의무화 되었으나, 비내진 교량의 내진보강에 대해서는 관련 기준이 정립되지 않았으며

적용사례 또한 거의 없다. 국토교통부와 한국도로공사의 조사 내용에 따르면 국도교량은 내진설계 적용률이 86%로 고속도로 교량에 비해 상대적으로 낮은 수준이며 기존 고속도로 교량 중 내진보강이 필요한 교량이 전체 교량의 28.5%인 1,660여개에 이른다고 보고하고 있다. (Kang et al, 2005)

일부 관리주체별로 내진보강이 되어있는 교량을 제외하고 내진설계 개념 도입 이전에 건설된 교량들은 적절한 보강 대책이 마련되지 않은 상태로 남아있는 실정이다. 내진설계가 고려되지 않은 기존의 모든 교량들을 현행 내진설계수준으로 보강하는 것은 경제적으로 매우 큰 문제에 직면할 수 있다. 따라서 경제성과 구조적 안전성이 고려된 내진보강이 합리적이며 한정된 유한자원 내에서 보다 효율적으로 내진안전성을 확보하기 위해서는 전체 교량 중 우선적으로 내진보강이 요구되는 교량들을 결정하는 의사과정이 중요한 요소로 여겨진다. (Lee and Kim, 2004)

미국이나 일본 등과 같은 지진발생이 빈번한 국가들은 내진보강 우선순위를 결정하는 단순화된 방법론을 제시하고 있으며 이를 개선시키고 있다. 기존의 단순화된 방법론들은 교량별 우선순위를 간편하고 빠르게 결정할 수 있다는 장점을 갖고 있으며, 결정된 우선순위에 따라 상세 내진성능평가가 요구되는 교량에 대해 내진보강여부를 결정하게 되고, 결정

¹정회원, 금오공과대학교 토목공학과 박사과정

²정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수, 교신저자

*Corresponding author: jbond@kumoh.ac.kr

(Professor, Dept. of Civil Eng., Kumoh National Institute of Technology(KIT), Gumi, Gyeongbuk 39177, Korea)

•본 논문에 대한 토의를 2018년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

여부에 따라 보강기법의 시공성과 유효성을 고려하여 적용하게 된다. 그러나 기존의 방법론에서는 유사한 기하학적 형상이나 구조적 특징들을 갖는 교량의 보강우선순위를 명확하고, 상세하게 구분하는 것이 어려우며, 보강기법의 적용여부를 교량구조물의 실제적인 지진거동분석에 의존하여 결정하기 보다는 상당히 보수적으로 작성된 설계수준에 대한 판정기준에 따라 결정하고 있다.(Lee et al., 2003)

일본에서의 교량의 중요도를 평가하는 항목에 있어서는 교량의 연령, 적용 설계기준의 개정에 따른 등급 교체 대상으로 보수 및 보강 공사의 시공 난이도와 제삼자 피해의 영향, 공공재로서의 가치 등을 고려할 수 있도록 하고 있으며 미국의 캘리포니아에서는 부지 위험, 구조 취약성, 시스템 영향이란 큰 범주에 각 세부항목을 추가하여 각 세부항목별로 가중치를 주어 평가하고 있다.

우리나라의 국토 상 교량의 내진보강 우선순위 결정방법은 ‘기존 시설물(교량)의 내진성능 평가 및 향상요령’에 따르고 있다. 교량이 위치한 지역의 지진 규모를 고려한 지진도와 취약도 및 영향도를 고려하여 ‘내진보강 핵심교량’, ‘내진보강 중요교량’, ‘내진보강 관찰교량’, ‘내진보강 유보교량’ 등 4개의 내진 그룹으로 구분하고 이를 통해 내진성능 상세평가를 위한 우선순위가 결정된다. 이러한 결정방법이 제안된 시기에는 기존교량의 내진성능 평가결과에 대한 자료가 축적되어 있지 않아 실제 교량에 적용함에 있어 비합리적인 부분들을 개선할 필요성이 있었다. 이에 우선순위 결정에 미치는 항목들을 보다 다양하게 고려하고 공학자들의 직관적 판단에 의해 이를 보완하고 있는 실정이다.(Park et al, 2009)

본 연구에서는 국토교통부가 관리하는 ‘도로 교량 및 터널 현황정보시스템’ 사이트 내의 “2018 도로 교량 및 터널 현황조사”에 포함 된 도로교의 현황 자료를 바탕으로 도로교의 합리적인 내진보강을 위해 내진보강 우선순위의 결정을 위한 의사결정에 대해 연구하였다. 총 4개의 내진그룹으로 분류하는 알고리즘의 제안은 4개의 평가부분으로 구성된다. 이는 지역계수와 중요도 항목을 고려한 교량의 중요도와 지반조건 및 경과년수를 포함한 교량의 취약도, 그리고 교량의 상부구조 형식, 최대 경간장, 폭, 교고, 설계하중, 일일교통량을 포함한 도로교 세부항목으로 구분된다. 3개의 평가부분의 각 항목별 평가점수를 결정하고 그에 따른 가중치를 고려하여 내진보강의 우선순위를 결정하였다. 개발한 알고리즘에 실제교량의 데이터를 입력하여 나온 결과를 바탕으로 내진보강 우선순위의 적절성 및 성능 평가의 적합성을 검토하고자 하였으며 교량의 현황조사 정보를 통해 기존보다 효율적으로 내진그룹화 되는 것을 목적으로 하였다.

2. 도로교 설계기준의 변천

도로교의 내진설계기준은 건설부가 제정한 1992년 도로교 표준시방서를 시작으로 2012년 도로교 설계기준에 이르기까지 도로교설계기준(내진설계)은 계속하여 개정이 이루어짐으로서 추가적인 보완이 이루어져왔다. 이에 본 연구에서는 이러한 도로교 설계기준의 변천과정을 각 주제별 대비표로 나누어 정리함으로써 도로교의 준공 시 적용된 해당 설계기준에 맞추어 해당 교량의 내진성능평가 및 보강이 적절히 이루어졌는지 판단함에 있어 도움이 되도록 하였다.

2.1 내진설계기준 및 가속도계수

Table 1 내진설계기준 및 가속도계수의 변천

조항	내진설계기준	가속도계수		
		지역	가속도계수(A)	
도로교표준시방서 (1992)	AASHTO	강원도, 전라남도, 제주도	0.07	
		기타지역	0.14	
도로교표준시방서 (1996)	-유철수-한반도의 지진활동과 동적 해석을 위한 최대 지반가속도값의 산정 -1988년 3월 대한 토목학회 논문집 등			
도로교 설계기준 (2000)	내진설계 기준연구(II) (1997.12)	-지진구역 구분(Table. 5참고) -지진구역계수(재현주기 500년에 해당)		
도로교 설계기준 (2005)		지진구역	I	II
도로교 설계기준 (2010)		구역계수	0.11	0.07
도로교 설계기준 (2012)		-위험도계수		
		재현주기(년)	500	1000
		위험도계수,I	1	1.4

2.2 내진등급

Table 2 내진등급의 변천

조항	내진등급	
도로교표준시방서 (1992)	등급 구분	가속도계수
도로교표준시방서 (1996)	내진1등급교	A > 0.07
	내진2등급교	A ≤ 0.07

도로교 설계기준 (연도)	내진등급	교량	설계지진의 평균재현주기
도로교 설계기준 (2000)	내진 I 등급교	-고속도로, 자동차전용도로, 특별시도, 광역시도 또는 일반국도상의 교량 -지방도, 시도 및 군도 중 지역의 방재계획상 필요한 도로에 건설된 교량, 해당도로의 일일계획교통량을 기준으로 판단했을 때 중요한 교량 -내진 I 등급교가 건설되는 도로 위를 넘어가는 고가교량	1000년
도로교 설계기준 (2005)			
도로교 설계기준 (2010)			
도로교 설계기준 (2012)		내진 II 등급교	내진 I 등급교에 속하지 않는 교량

2.3 지반계수 및 지반종류

Table 3 지반계수의 변천

조항	지반의 영향			
	지반종류	I	II	III
도로교표준시방서 (1992)	지반계수(S)	1.0	1.2	1.5

도로교 설계기준 (연도)	지반계수	지반종류			
		I	II	III	IV
도로교 설계기준 (1996)	S	1.0	1.2	1.5	2.0
도로교 설계기준 (2000)					
도로교 설계기준 (2005)					
도로교 설계기준 (2010)					
도로교 설계기준 (2012)					

Table 4 지반종류의 변천

조항	지반종류 I	지반종류 II	지반종류 III	지반종류 IV			
도로교표준시방서 (1992)	혈암 등이나 자연상태에서 결정체를 갖는 암반, 또는 지반의 깊이가 60m이하인 단단한 모래자갈 또는 견고한 점토질의 안정성 있는 견고한 지반	지반의 깊이가 60m를 초과하는 단단한 모래자갈 또는 견고한 점토질의 안정성 있는 견고한 지반	연약 또는 중간 정도의 점토 또는 느슨한 모래질의 지층 두께가 9m를 초과하는 지반	-			
도로교표준시방서 (1996)	-어느 형태든지 혈암이나 자연상태에서 결정체를 갖는 암반층의 깊이가 60m이하인 견고한 지반으로서, 암반 위에 쌓인 토질이 모래, 자갈, 또는 단단한 점토의 반종류 II로 간주한다.	지반의 깊이가 60m를 초과하고, 암반 위에 쌓인 모래, 자갈 또는 단단한 점토의 안정된 퇴적물인 지반이거나, 비점착토가 두텁게 쌓인 지반은 지반종류 II로 간주한다.	연약 또는 중간 정도의 점토 또는 모래로 구성된 지반이기에 중첩력이 없는 지층의 유무와 관계없이 9m이상의 점토층으로 형성된 지반	연약점토나 실트층의 깊이가 12m 이상 되는 지반은 지반종류 IV로 간주한다.			
도로교 설계기준 (2000)	지반종류	지반종류의 호칭	지표면 아래 30m 토층에 대한 평균 값				
도로교 설계기준 (2005)			전단파속도 (m/sec)	표준관입 시험(N치)	비배수전단강도 (kPa)		
도로교 설계기준 (2010)			I	경암지반, 보통암지반	760이상	-	-
도로교 설계기준 (2010)			II	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360-760	> 50	> 100
도로교 설계기준 (2010)			III	단단한 토사지반	180-360	15-50	50-100
도로교 설계기준 (2012)	IV	연약한 토사지반	180 미만	< 15	< 50		
	V	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반					

3. 내진성능 상세평가를 위한 점수 산정

3.1 설계기준에 대한 점수 산정

교량의 내진설계에 관한 내용을 처음으로 다룬 시점은 1992년도 도로교 표준시방서였다. 그 이전 시점의 교량들에 대해서는 내진설계가 적용되지 않았을 가능성이 다분하며 내진설계는 1992년 이후 해가 거듭될수록 수정 및 보완이 이루어져 왔으므로 현대의 내진설계 기준이 과거의 내진설계 기준이나 표준시방서보다 신뢰도가 높다고 판단된다. 이에 따라 교량이 설계된 연도에 따라 차등한 점수를 배점하고자 하였다. 다만 2000년을 기준으로 그 이전의 도로교 표준시방서

나 그 이후 제정된 도로교 설계기준의 각 내진설계 내용의 차이가 크지 않으므로 차등 배점되는 점수의 차이가 크지 않도록 할 것이며 도로교 표준시방서와 도로교 설계 기준의 평균 제정연도인 5년을 기준으로 차등 배점하였다. 또한 본 연구에서 사용하는 국토교통부 ‘도로 교량 및 터널 현황정보시스템’ 사이트 내 ‘2018 도로 교량 및 터널 현황조사’ 파일 내에서는 준공년도만 포기되어 있으므로 정확한 설계년도를 파악할 수 없으며 그로 인해 해당 교량이 어떤 설계 기준을 적용하였는지 불확실하다. 이를 명확히 하기 위해 교량이 설계에서 완공되기까지의 평균 기간을 6년이라 가정하여 준공년도에서 6년 전을 설계년도라 판단해 해당 연도의 설계 기준을 적용하였다고 판단한다. 이에 아래의 표와 같이 점수를 배점한다.

Table 5 준공년도에 따른 교량의 적용 설계기준별 점수

준공년도	점수
~1998년	100
1998~2002년	50
2002~2006년	45
2006~2011년	30
2011년~2016년	25
2016년~	20

3.2 중요도에 대한 점수 산정

도로교의 중요도(Importance Coefficient, IC)에 대한 점수를 산정하기 위하여 본 연구에서는 교량의 지역 별 지역계수와 중요도를 항목으로 선정하여 각 기준에 따라 다음과 같이 점수를 배점하고 가중치를 두었다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\text{중요도 (IC)} = 0.4 \times IC_1 + 0.2 \times IC_2 \quad (1)$$

3.2.1 지역계수 (Zone Coefficient, ZI)

지역계수는 소방방재청에서 지진재해대책법 제 12조에 따라 공표한 ‘국가지진위험지도(2013)’ 를 이용하는 것이 가장 이상적이나 현실적으로는 극히 세분화된 등고선 형태의 지진재해지도를 각 지진수준별로 작성하여 설계에 적용한다는 것은 일반적인 시설의 설계에서는 설계자에게 지나친 부담이 될 가능성이 있다. 이러한 점을 고려하면 지진구역을 설정함에 있어서 조금 보수적인 경향이 있더라도 현실성을 설정하는 것이 타당하므로 내진설계기준연구(II)(내진설계성능기준과 경제성평가), 1997에서 제시한 지진구역 구분 표를 이용하여 점수를 배점하도록 하며 점수는 아래 표의 지진구역계수(Z)에 비례하여 0.11g의 경우 100점, 0.07g의 경우 50점을 각 배점하도록

하였다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$IC_1 = 0.4 \times \text{지역계수 (ZI)} \quad (2)$$

Table 6 지진구역 구분

지진구역	행정구역	지진구역 계수 (Z)	우선순위 점수	
I	시	서울, 인천, 대전, 부산, 대구, 울산, 광주, 세종	0.11g	100점
	도	경기, 충북, 충남, 경북, 경남, 전북, 전남, 강원 남부*		
II	도	강원 북부**, 제주	0.07g	50점

* 강원 남부: 영월, 정선, 삼척, 강릉, 동해, 원주, 태백
 ** 강원 북부: 홍천, 철원, 화천, 횡성, 평창, 양구, 인제, 고성, 양양, 춘천, 속초

3.2.2 중요도 (Importance, I)

건설교통부의 ‘내진설계기준연구(II)(내진설계성능기준과 경제성 평가)’에 따르면 교량을 중요도에 따라 내진특등급교, 내진 I 등급교, 내진II 등급교로 아래의 표와 같이 등급을 구분한다.

Table 7 도로교의 내진등급 분류

내진등급	교량
내진특등급교	내진 I 등급교 중 복구의 난이도가 높고 경제적인 측면에서 특별한 교량(예. 장대교)
내진 I 등급교	<ul style="list-style-type: none"> 고속도로, 자동차전용도로, 특별시도, 광역 시도 또는 일반국도 상의 교량 지방도, 시도 및 군도 중 지역의 방재 계획상 필요한 도로에 건설된 교량, 해당도로의 일일 계획교통량을 기준으로 판단했을 때 중요한 교량과 내진 I 등급교가 건설되는 도로위를 넘어가는 고가교량
내진II 등급교	내진특등급교와 내진 I 등급교에 속하지 않는 교량

국내 약 35,000개 교량 중 내진특등급교에 해당하는 교량이 약 1,000개, 내진 I 등급교에 해당하는 교량이 약 20,000개, 내진II 등급교에 해당하는 교량이 약 10,000개 이다. 등급이 높을수록 교량의 복구난이도와 2차적인 피해, 경제적 손실 및 인명피해가 발생할 가능성이 크므로 등급에 따라 점수를 차등 배점하도록 하며 각 등급별 교량의 개수를 고려하여 특등급의 경우 100점, I 등급은 70점, II 등급은 30점으로 배점하도록 기준을 정하고 도로교의 중요도는 사용자 입력값을 적용한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$IC_2 = 0.2 \times \text{중요도}(I) \quad (3)$$

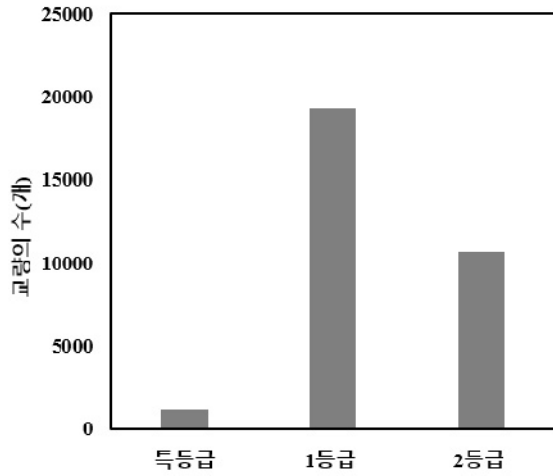


Fig. 1 중요도 별 교량의 수

3.3 취약조건에 대한 점수 산정

도로교의 취약조건(Vulnerability Index, VI)에 대한 점수를 산정하기 위하여 본 연구에서는 교량의 각 지역에 따른 지반 조건과 교량의 준공년도 이후 경과년수를 항목으로 선정하여 각 점수를 배점하고 가중치를 두었다. 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\text{취약조건 지수}(VI) = 0.2 \times VI_1 + 0.2 \times VI_2 \quad (4)$$

3.3.1 지반조건 (Soil Condition, SC)

한국시설안전공단의 ‘기존 시설물(교량) 내진성능 평가요령’에 따르면, 아래의 표와 같이 지반을 분류한다. 지반의 종류는 다음과 같이 정의된다.

- S_A : $\bar{v}_s > 1500\text{m/s}$ 인 경암지반
- S_B : $760\text{m/s} < \bar{v}_s \leq 1500\text{m/s}$ 인 보통암 지반
- S_C : $360\text{m/s} < \bar{v}_s \leq 760\text{m/s}$ 이거나, $\bar{N} > 50$ 또는 $\bar{s}_u \geq 100\text{kPa}$ 인 매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반
- S_D : $180\text{m/s} \leq \bar{v}_s < 360\text{m/s}$ 이거나, $15 \leq \bar{N} \leq 50$ 또는 $50\text{kPa} \leq \bar{s}_u < 100\text{kPa}$ 인 단단한 토사지반
- S_E : $\bar{v}_s < 180\text{m/s}$ 인 지반이거나, $PI > 20$, $w_{mc} \geq 40$ percent 이고 $\bar{s}_u < 25\text{kPa}$ 인 연약 점토의 두께가 3.048m 이상 되는 토사지반
- S_F : 부지 고유의 특성 평가가 요구되는 다음 경우에 속하는 지반

- 가. 액상화가 일어날 수 있는 흙, Quick Clay와 매우 민감한 점토, 붕괴될 정도로 결합력이 약한 붕괴성 흙과 같이 지진하중 작용시 잠재적인 파괴나 붕괴에 취약한 지반
- 나. 이탄 또는 유기성이 매우 높은 점토지반 [지층의 두께, $H > 3.048\text{m}$]
- 다. 매우 높은 소성을 갖은 점토지반 [$H > 7.620\text{m}$ 이고 $PI > 75$]
- 라. 층이 매우 두꺼우며 연약하거나 중간 정도로 단단한 점토 [$H > 36.580\text{m}$]

단, 예외적으로 지반의 종류를 결정하기에 충분한 정도로 지반의 특성이 자세하게 알려져 있지 않은 경우에는 지반종류 S_D 를 사용한다. 관계 공무원이 해당 부지에 지반 종류 S_E 가 있다고 결정하거나 지반 공학적 자료에 의하여 지반종류를 S_E 라고 입증되는 경우를 제외하고는 부지를 지반 종류 S_E 라고 가정할 필요가 없다. 이에 각 지반종류에 따라 아래와 같이 점수를 적용하고 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$VI_1 = 0.2 \times SC \quad (5)$$

Table 8 지반의 종류

지반 종류	지반종류의 호칭	상부 30.480m에 대한 평균 지반 특성		
		전단파 속도 (m/s)	표준관입시험 $\bar{N}(N_{CH})$ (blow/foot)	비배수 전단강도 \bar{s}_u (kPa)
S_A	경암지반	1500초과	-	-
S_B	보통암지반	760~1500	-	-
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반	360~760	> 50	> 100
S_D	단단한 토사지반	180~360	15~50	50~100
S_E	연약한 토사지반	180미만	< 15	< 50
S_F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반			

Table 9 지반조건에 의한 점수 배점

지반조건에 의한 구분	구분 기준	점수
		S_A
	S_B	40
	S_C	60
	S_D	80
	S_E, S_F	100

3.3.2 경과년수($AGE_{시수}$)

한국시설안전공단의 ‘기존 시설물(교량) 내진성능 평가요령’에 따르면, 교량 수명의 정량화를 위한 기준수명은 강교의 경우는 50년, 콘크리트교의 경우 40년으로 정의하고 있다. 이에 근거하여 기준수명 40년(50년)을 초과한 교량의 경우에는 최대 점수인 100점을 배점하며 경과년수가 그 이하인 경우에는 각 경과년수에 2.5점(콘크리트교), 2점(강교)을 곱해주어 100점을 기준으로 직선보간한 값에 따라 점수를 배점한다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$V_2 = 0.2 \times AGE_{현재} \quad (6)$$

여기서, $AGE_{현재}$ 는 교량의 준공년도 이후 경과년수(년)을 의미한다.

Table 10 경과년수에 따른 점수 배점

경과년수	구분기준	점수
	40년(50년) 초과	100점
40년(50년) 이하 경과년수*2.5점(2점)		

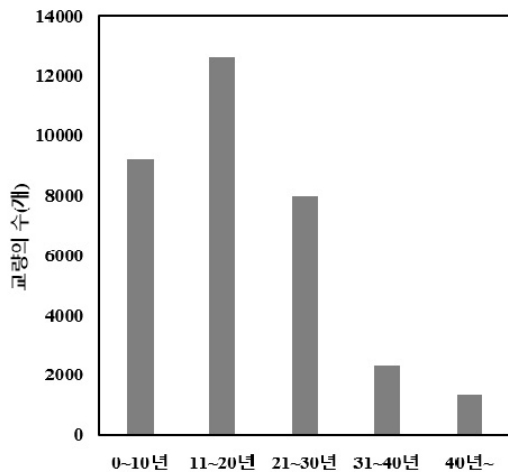


Fig. 2 경과년수(년) 별 교량의 수

3.4 도로교 세부에 대한 점수 산정

도로교의 세부 사항(Detail Coefficient, DC)에 대한 점수를 산정하기 위해 본 연구에서는 각 교량의 상부구조 형식과 교량의 지간, 최대 경간장 및 일일교통량을 평가 항목으로 선정하여 각 기준에 맞추어 점수를 배점하고 가중치를 두었다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$DC = 0.30(SF) + 0.15(SI_{MAX}) + 0.15(WIDTH) + 0.15(HEIGHT) + 0.15(\leq VEL) + 0.10(ADT_{시수}) \quad (7)$$

3.4.1 교량의 상부구조 (Superstructure Form, SF)

교량의 상부구조형식에 따라 교량 구조물의 여러 지진피해 중 가장 중요한 낙교를 기준으로 하였다. 낙교란, 교량이 교각 코핑부에서 떨어지는 현상으로서 지진 발생 시 교량의 기능을 상실하도록 하는 가장 심각한 피해의 하나이다. 보통 교량의 거더 구조에서 낙교가 발생하며 코핑부의 연단거리 부족 등 다양한 원인이 있다. 교량의 상부구조가 무거울수록 낙교에 취약하다는 연구가 있으며 이를 기준으로 낙교에 가장 취약하다 판단되어지는 교량의 상부구조 형식을 우선순위에 두고 아래의 표와 같이 점수를 배점하였으며 구조물의 중요도 또한 고려하였다.

Table 11 교량의 상부구조에 따른 점수 배점

세부항목	구분	점수
슬래브교	RC슬래브교, RC중공슬래브교, PSC슬래브형교, PSC중공슬래브교, RCT형교	100
	단순 거더교	80
상부구조	프리플렉스형교, PSC I형교, PSC 박스형교, 강I형교, 강관형교, 강박스거더교	60
	연속 거더교	60
트러스교	트러스교	50
아치교	아치교	40
사장교, 현수교	사장교, 현수교	30
기타	라멘교, 목교, 기타	20

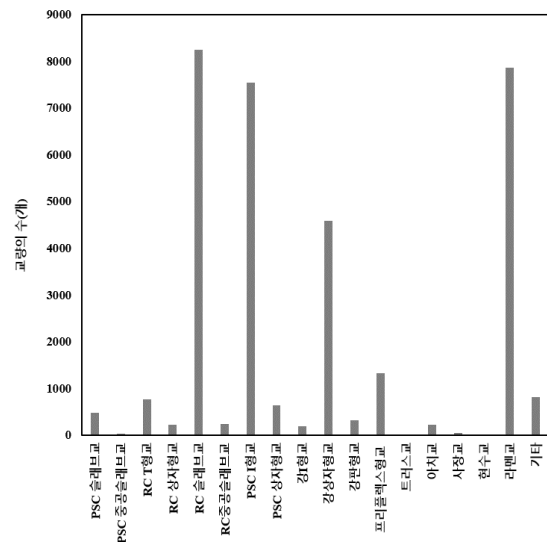


Fig. 3 상부구조형식 별 교량의 수

3.4.2 교량의 최대 경간장 (Span length, SI_{MAX})

국토교통부가 관리하는 ‘도로 교량 및 터널 현황정보시스템’ 사이트 내 “2018 도로 교량 및 터널 현황조사” 파일에 포함된 약 3만 개 교량들의 최대 경간장 상위 10%를 계산한 결과, 50m를 기준으로 하여 최대 경간장이 50m 이상인 교량은 100점, 그 이하의 값들은 각 경간장 길이에 50을 나눈 값에 100을 곱하여 점수를 부여한다.

Table 12 교량의 최대 경간장에 따른 점수 배점

최대 경간장	50m 이상	100
	50m 미만	길이/50m*100점

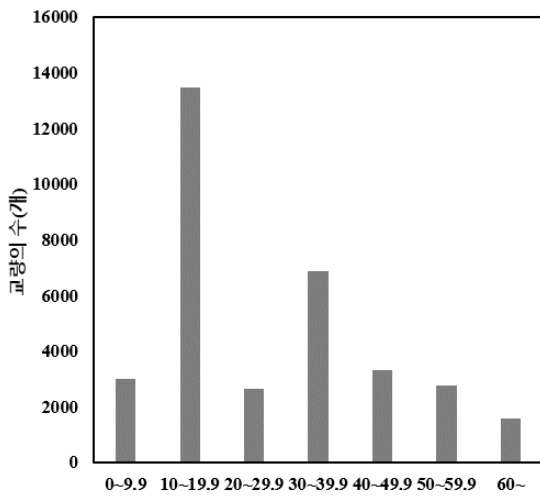


Fig. 4 최대 경간장(m) 별 교량의 수

3.4.3 교량의 폭 (WIDTH)

교량의 폭이 넓을수록, 지진으로 인한 충격으로 받게 되는 영향과 그로 인한 피해가 커지게 된다. 국토교통부가 관리하는 ‘도로 교량 및 터널 현황정보시스템’ 사이트 내 “2018 도로 교량 및 터널 현황조사” 파일에 포함된 교량들의 총 폭의 평균을 계산한 결과값인 15m를 기준으로 하여 총 폭이 15m 이상인 교량은 100점, 그 이하의 값들은 각 폭의 길이에 15를 나눈 값에 100을 곱하여 점수를 부여한다.

Table 13 교량의 폭에 따른 점수 배점

폭	15m 이상	100
	15m미만	폭 / 15m*100점

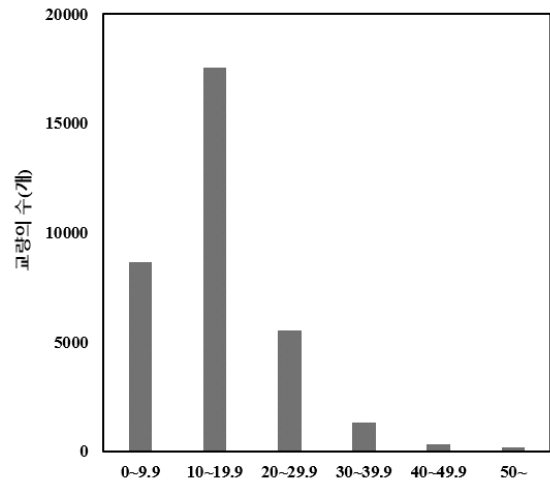


Fig. 5 총 폭(m) 별 교량의 수

3.4.4 교량의 교고 (HEIGHT)

교량의 교고가 높을수록, 지진으로 인해 외부로부터 받게 되는 영향과 그로 인한 인명 피해가 커지게 된다. 국토교통부가 관리하는 ‘도로 교량 및 터널 현황정보시스템’ 사이트 내 “2018 도로 교량 및 터널 현황조사” 파일에 포함된 약 3만 개 교량들의 교고의 평균을 계산한 결과 값인 8m를 기준으로 하여 총 폭이 8m 이상인 교량은 100점, 그 이하의 값들은 각 교고 값에 8을 나눈 값에 100을 곱하여 점수를 부여한다.

Table 14 교량의 교고에 따른 점수 배점

교고	8m 이상	100
	8m미만	교고 / 8m*100점

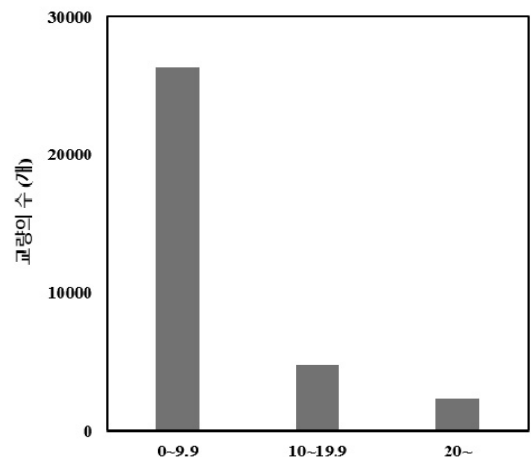


Fig. 6 교고(m) 별 교량의 수

3.4.5 교량의 설계하중 ($\leq VEL$)

도로교 설계기준에 따르면, DB-24로 설계하는 교량을 1등급, DB-18로 설계하는 교량을 2등급, DB-13.5로 설계하는 교량을 3등급으로 한다. 또한, 한국시설안전공단 ‘기존 시설물(교량) 내진성능 평가요령’에 따르면, 이들 각각에 1등급(DB24)의 경우 1.0, 2등급(DB18)의 경우 0.7, 3등급(DB13.5)의 경우 0.4점을 부여한다. 이를 기준으로 아래의 표와 같이 1등급 100점, 2등급 70점, 3등급 40점의 점수를 부여한다.

Table 15 교량의 설계하중에 따른 점수 배점

	DB 24	100
설계하중	DB 18	70
	DB 24	40

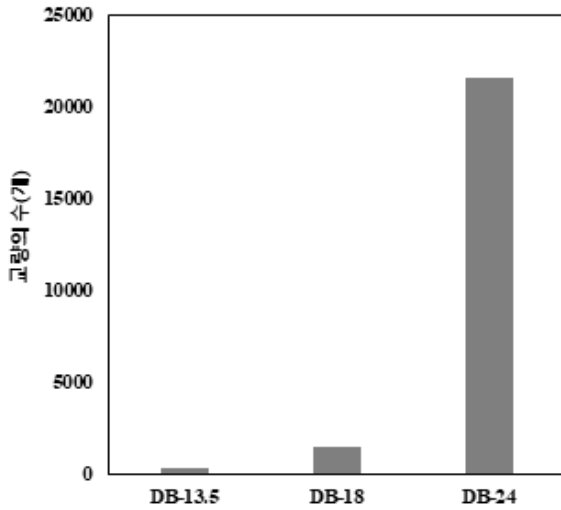


Fig. 7 설계하중 별 교량의 수

3.4.6 일일 교통량 ($ADT_{지수}$)

도로교의 교통량이 클수록 교량이 지진으로 인하여 손상을 입었을 경우의 경제적 손실과 인명피해 등이 커지게 된다. 이에 따라 일일교통량을 항목으로 선정하여 그에 따른 점수를 부여하였으며 교통량 자료는 국토교통부가 관리하는 ‘도로교량 및 터널 현황정보시스템’ 내 “2018 도로교량 및 터널 현황조사서” 파일 내 약 3만 개 교량들의 일일교통량의 상위 10%는 5만 대 이상인 경우에 해당되었다. 이를 기준으로 5만 대 이상의 교량은 100점, 그 이하는 교통량을 5만으로 나눈 값에 각 100을 곱하여 점수를 부여한다.

Table 16 일일교통량에 따른 점수 배점

	5만대 이상	100
일일교통량	5만대 미만	교통량/5만대*100점

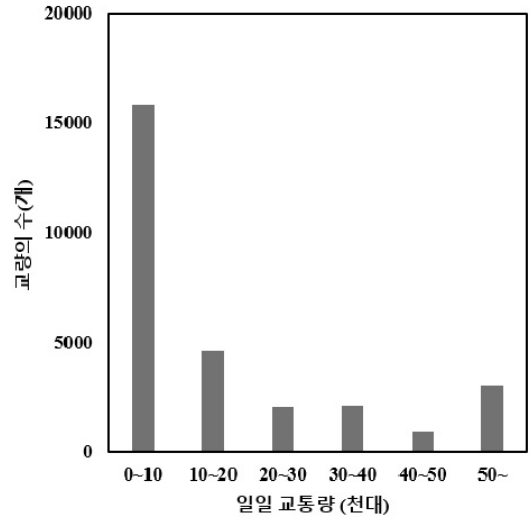


Fig. 8 일일교통량 별 교량의 수

4. 점수산출 및 우선순위 알고리즘

4.1 설계기준 점수 산출

각 교량의 준공년도에 따른 적용 설계기준(Design Standard, DS)에 대해 Table 5에 따라 총 점수 100점을 기준으로 산출한다.

4.2 중요도 및 취약조건 점수 산출

식 (1)과 식 (4)를 이용하여, 중요도(IC) = $0.4 \times$ 지역계수(ZI) + $0.2 \times$ 중요도(I) + 취약조건 지수(VI) = $0.2 \times$ 지반조건(SC) + $0.2 \times AGE_{지수}$ 를 통해 총 점수 100점을 기준으로 산출한다.

4.3 세부 항목 점수 산출

식 (7)을 이용하여, 도로교의 세부 항목(DC) = $0.30(SF) \times 0.15(SI_{MAX}) \times 0.15(WIDTH) \times 0.15(HEIGHT) \times 0.15(\leq VEL) \times 0.10(ADT_{지수})$ 를 통해 총 점수 100점을 기준으로 산출한다.

4.4 점수 산출

앞에서 언급된 산출식을 이용하여 전체적인 비율을 적용한다. 설계기준을 10%, 중요도와 취약조건을 60%, 세부 항목을 30%로 기준하여 최종 점수를 산출한다. 이에 대한 식은 아래와 같다.

$$\text{최종 점수} = 0.1 \times DS + 0.6 \times (IC + VI) + 0.3(DC) \quad (8)$$

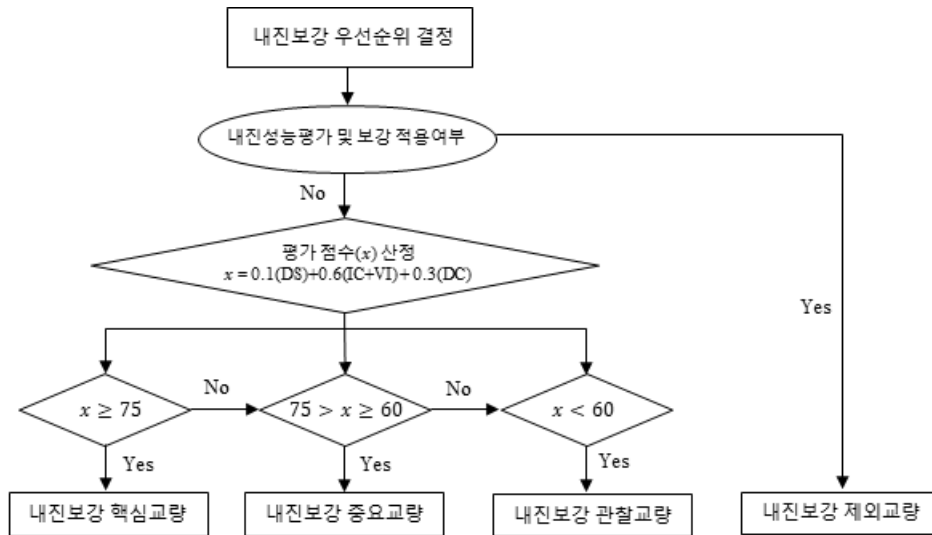


Fig. 9 내진보강 우선순위 알고리즘

4.5 우선순위 알고리즘

한국시설안전공단의 ‘기존 시설물(교량) 내진성능 평가요령’에 따르면, 교량은 지진구역과 지반종류, 도시권역을 고려한 지진도, 지진으로 인해 교량이 붕괴되거나 손상이 입기 쉬운 형태를 구분하는 취약도, 교량이 지진으로 인해 피해가 발생할 경우 이로 인한 사회 및 경제적인 영향을 고려하는 영향도를 이용하여 내진성능 예비평가를 함으로서 내진보강 핵심교량, 내진보강 중요교량, 내진보강 관찰교량, 내진보강 유보교량의 4개 그룹으로 나누고 동 순서대로 우선순위를 부여한다. 이에 따라 우선순위가 높은 내진그룹에 속하는 교량에 대하여 우선적으로 내진성능 평가를 수행하는데 본 연구에서는 앞에서 정의한 바와 같이 중요도, 취약조건, 세부사항의 각 조건에 맞추어 점수를 배점하여 아래의 우선순위 알고리즘에 적용하고 이를 통해 기존과 동일한 4개의 그룹으로 분류하고자 한다.

총 평가되어진 점수가 75점 이상인 경우 내진보강 핵심교량, 60점 이상 75점 미만인 경우 내진보강 중요교량, 60점 미만인 경우 내진보강 관찰교량으로 정의하며 내진성능평가 및 보강이 적용된 경우 내진보강 제외교량으로 분류하여 그룹화한다. 위의 동 순서대로 내진보강 우선순위를 두어 순차적으로 보강을 실시할 수 있도록 구분하였다.

5. 우선순위 결정 예

위의 평가점수 산정 식을 이용하여 실제 교량을 알고리즘에 적용한 예는 아래와 같다.

경기도 안산시 단원구 성곡동에 위치하고 있는 시화대교를 대상교량으로 선정하여 비교하면, 내진 I 등급교로서 지간은 2765m이고, 최대 경간장은 50m이다. 총 폭은 24.3m이며 지반조건은 S_E 이다. 교량의 높이는 13m이고 설계하중은 DB-24이며 준공년도는 2013년인 상부구조가 PSC I형교인 교량이다. 해당 교량의 일일 교통량은 68,364대이다.

이를 토대로 위에서 산정한 우선순위 결정 식에 대입해보면 우선 중요도(IC) = $0.4 \times 100 + 0.2 \times 70 = 54$ 점, 취약조건 지수(VI) = $0.2 \times 100 + 0.2 \times 12.5 (=5 \times 2.5) = 22.5$ 점, 세부항목 점수(DC) = $0.30 \times (80) + 0.15 \times (100) + 0.15 \times (100) + 0.15 \times (13) + 0.15 \times (100) + 0.10 \times (100) = 80.95$ 점이다. 이를 각 비율에 맞춰 곱해주면 $0.7 \times (54 + 22.5) + 0.3 \times 80.95 = 77.84$ 점이 산출된다.

위의 과정을 통해 시화대교는 총 점수 합산 77.84점으로 우선순위 알고리즘에 적용한 결과, 내진보강 핵심교량으로 정의된다.

두 번째 사례는, 강원도 삼척시 노곡면 상마읍리에 위치하고 있는 신주교를 대상교량으로 선정하여 비교하면, 내진 II 등급교로서 지간은 28m이고, 최대 경간장은 14m이다. 총 폭은 9.5m이며 지반조건은 S_4 이다. 교량의 높이는 6m이고 설계하중은 DB-24이며 준공년도는 1994년인 상부구조가 라멘교인 교량이다. 해당 교량의 일일 교통량은 737대이다.

이를 토대로 위에서 산정한 우선순위 결정 식에 대입해보면 우선 중요도(IC) = $0.4 \times 100 + 0.2 \times 30 = 46$ 점, 취약조건 지수(VI) = $0.2 \times 20 + 0.2 \times 60 (=24 \times 2.5) = 16$ 점, 세부항목 점수(DC) = $0.30 \times (20) + 0.15 \times (28) + 0.15 \times (63.3) + 0.15 \times (75) + 0.15 \times (100) + 0.10 \times (1.47) = 46.15$ 점이다. 이를 각 비율에 맞춰 곱해주면 $0.7 \times (46 + 16) + 0.3 \times 46.15 = 57.2$ 점이 산출된다.

위의 과정을 통해 신주교는 총 점수 합산 52.8점으로 내진보강 관찰교량으로 정의된다.

6. 결 론

본 연구에서는 도로교 설계기준의 변천과정을 조사하고 그를 반영하여 기존의 우선순위 결정방법과 다른 새로운 평가항목을 통한 우선순위 결정방법을 개발하였다. 지표 취득의 간편성 및 편의성, 각 항목이 설계기준에 제시된 지표를 사용함으로써 얻어지는 객관성 등 보다 간편하고 효율적인 평가가 가능하도록 하였다. 또한 최근 집계된 자료인 국토교통부가 관리하는 ‘도로 교량 및 터널 현황정보시스템’ 사이트 내 “2018 도로 교량 및 터널 현황조사” 파일에 포함 된 교량들의 정보를 이용하여 새로운 기준을 정하고 점수를 배점함으로써 보다 정확한 평가를 할 수 있도록 하였다. 앞에서 제시한 내진보강 우선순위 알고리즘에 따라 우선순위가 높은 교량부터 순차적으로 내진보강을 시행할 수 있도록 할 예정이며, 현재 중요도에 대한 세부적인 항목들은 교량에 대한 충분한 검토가 진행된 이후에 변경될 수 있다. 또한, 이에 대한 추가적인 보완은 도로교에 적용되면서 계속 진행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한재난대응기반기술개발사업(과제번호:2017-MOIS31-003)에 의한 결과의 일부이며 이에 감사드립니다.

References

- Evaluation and improvement of seismic performance of existing bridges (2004), Korea Infrastructure Safety Corporation.
- Kang, H.T., Park, C.M., Park, J.C., (2005), Guidelines for Seismic Retrofit of Existing Highway Bridges(II), Korea Expressway Corporation.
- KRTA (2005), Korea Bridge Design Specification, Korea Road and Traffic Association.
- Lee, S.W, Kim, S.H., (2004), Retrofit Measures Based on Seismic Retrofit Priority of Existing Bridges, *Journal Of Earthquake Engineering Society of Korea*, 8(3), 77-86.
- Lee, S.W., Kim, S.H., Mha, H.S., (2003), Retrofit Measures Based on Retrofit Priority of Bridges, *Conference Of Korean Society of Civil Engineers*, 2003(10), 849-854.
- Park, K.S., Ju, H.S., Choi, H.C., Kim, I.H (2009), Advanced Seismic Retrofit Priority Decision For Seismic Performance Estimation of Existing Bridges, *Journal Of Earthquake Engineering Society of Korea*, 13(6), 47-57.
- Seismic Design Criteria Research(II)(Seismic design performance standards and economical efficiency) (1997), Ministry of Construction Transportation

Received : 09/20/2018

Revised : 10/02/2018

Accepted : 10/25/2018

요 지 : 최근 경주, 포항 등 국내에서 지진으로 인한 피해가 지속적으로 발생하면서, 우리나라가 더 이상 지진의 안전지대가 아니며 이에 대한 대비가 필요함을 알게 되는 계기가 되었다. 또한 내진설계 개념 도입 이전에 건설된 교량들은 적절한 보강 대책이 마련되지 않은 상태로 남아있는 실정으로 경제성과 구조적 안전성이 고려된 내진보강이 순차적으로 이루어져야한다. 기존 교량의 내진성능 예비평가는 교량이 위치한 지역의 지진세기를 고려한 지진도와 취약도 및 영향도를 고려하여 4개의 그룹으로 내진 그룹화하고 이를 통해 내진성능 상세평가를 위한 우선순위가 결정된다. 본 연구에서는 기존의 방법과 다르게 교량의 중요도와 취약조건, 도로교의 세부사항을 기준으로 선정하여 도로교의 내진 보강 우선순위를 결정하는 보다 간편하고 객관적인 알고리즘을 제안하고 이를 실제 교량에 적용하여 적합성을 확인하였다.

핵심용어 : 내진보강 우선순위, 내진, 우선순위, 알고리즘
