

# 기존 도로교의 내진성능향상 방법 선정을 위한 가중치 평가기법

## Weighting-Factored Evaluation Method for Determination of Seismic Retrofitting Schemes for Existing Bridges

하동호<sup>1)</sup> · 이지훈<sup>2)</sup> · 박광순<sup>3)</sup> · 이용재<sup>4)</sup>

Ha, Dong-Ho · Lee, Ji-Hoon · Park, Kwang-Soon · Lee, Yong-Jae

**국문 요약** >> 본 논문에서는 기존 도로교의 합리적이고 일관적인 내진성능향상 방법 선정을 위한 가중치 평가기법을 제안하였다. 한반도의 증가하는 지진위험도를 반영하여, 현재 기존교량의 내진성능향상 작업이 다양한 공법을 이용하여 진행 중이나 최적의 공법을 선정하기 위한 적절한 판단기준이 부재한 형편이다. 이에 제안한 기존교량 가중치 평가기법은 구조적 적합성, 경제성, 환경적 영향, 시공성, 유지관리 측면의 다섯 가지 영향인자의 가중치를 부여하여 최적의 내진 보강방안을 선정하는 방법이다. 제안된 가중치 평가기법을 공용중인 도로교 160개교에 적용한 결과 최고점수는 실제 최종 보강방안과 대부분 일치하여 적절한 가중치로 설정되었다고 판단된다. 제안하는 방법을 기존교량의 내진 보강방안 선정 시에 활용한다면, 사회적 비용을 최소화하는 보다 합리적이고 일관적인 보강이 가능할 것이다.

**주요어** 가중치 평가, 내진 보강, 내진성능 향상, 기존 교량

**ABSTRACT** >> This study suggests a method to determine optimal seismic retrofitting schemes for existing bridges based on weighting-factored evaluation. According to the recognition for potential seismic risk, various kinds of retrofitting methods are applied to improve the seismic performance of existing bridges. However, the relevant technique is not available to select optimal retrofitting scheme for bridges now. This suggested method weights five factors, structural compatibility, economic efficacy, environmental factor, constructability and maintenance, and draws out optimal seismic retrofitting schemes. The application of the developed method to one hundred sixty existing bridges verifies the adaptability of this method. As a result, this study provides an idealized retrofitting schemes, and the suggested method could be a guideline to determine the more cost-effective and optimal retrofitting schemes for existing bridges in Korea.

**Key words** Weighting-Factored Evaluation, Seismic Retrofit, Enhancing Seismic Performance, Existing Bridges

### 1. 서론

최근 한반도와 그 인근에서 지속적으로 증가하는 지진에 의하여 지진재해 대책의 중요성이 대두되고 있다. 특히 국가의 주요 사회기반시설인 교량은 재해발생시 복구 및 구조 활동을 위한 핵심시설로서 내진성능 확보는 대단히 중요하다고 하겠다. 우리나라의 도로교는 1992년 도로교시방서에 AASHTO의 내진설계기준이 도입되며 내진설계가 시작되

었다고 할 수는 있으나, 실질적으로는 20세기 말까지 완공된 대부분의 교량은 내진성능이 부족하다고 할 수 있으며, 21세기에 완공된 일부 교량도 내진성능이 부족한 상황이다. 이에 따라 건설교통부와 각 지방자치단체는 기존교량의 내진성능향상을 위하여 지속적으로 예산을 투입하고 있다.

기존교량의 내진성능향상 방안은 “기존교량의 내진성능 평가 및 향상요령”에 정립화되어 있으며 기존교량 소관주체 별로 단계적인 내진대책에 의해 내진 보강공사를 수행 중에 있으나, 아직 초기화 단계로 합리적인 기술개발이 요구되는 시점이다.<sup>(1-3)</sup> 교량의 내진성능을 향상시키는 주요 방법으로는 낙교방지장치의 도입, 받침교체, 교각 및 기초 등 구조부재의 보강, 지진격리받침과 댐퍼 등의 지진보호장치를 설치하여 지진력을 감소시키는 방안 등을<sup>(4-7)</sup> 고려할 수 있다. 기존교량의 내진성능향상은 이러한 여러 방법 중 대상교량

<sup>1)</sup> 정회원·건국대학교 토목공학과 조교수, 공학박사  
<sup>2)</sup> 정회원·한국시설안전기술공단 진단1본부 교량실, 공학박사  
(대표저자: yaku@kistec.or.kr)  
<sup>3)</sup> 정회원·한국시설안전기술공단 진단1본부 교량실, 토목구조기술사  
<sup>4)</sup> 건국대학교 토목공학과 명예교수, 공학박사  
본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.  
(논문접수일 : 2007. 2. 20 / 심사종료일 : 2007. 4. 9)

에 적합한 보강방안을 선정하여 수행되어야 하나, 현재까지의 시공은 기술자의 경험적 판단에 의해 선정된 방법이 개별교량별로 구조적으로 적합한지를 검토하고, 경제적으로 저렴한 보강인지 판단하여 보강방안을 결정하는 방법으로 수행되어 왔다. 따라서 엄밀하게는 객관성을 확보하지 못한 상태에서 내진성능향상이 이루어져왔다.

본 논문은 보다 합리적이고 일관된 내진성능향상 방법의 선정을 위하여 고려할 수 있는 구조적 적합성, 경제성, 환경적 영향, 시공성, 유지관리 측면 등의 영향인자를 도출하였으며, 다섯 가지 영향인자에 가중치를 부여하고 가중치 평가기법에 의한 최적의 내진성능향상 방안을 선정하는 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 내진성능향상 방법선정의 절차

내진성능향상은 그림 1에서와 같이 현장조사 및 내진성능평가를 통해 내진성능향상방안을 선정하며, 선정된 보강방안이 적절하면 보강설계 및 보강공사를 실시한다. 이 중 내진성능향상방안의 선정 절차로 우선 대상교량의 중요도를 결정하여 이에 따라 받침 등 구성부재의 피해허용범위를 결정한다. 이후 구조부위별 내진성능을 평가하며, 대상교량에 각각의 보강방안별로 내진성능향상을 검토한다. 내진성능향상방안 검토 시 상·하부구조의 특성 및 보강방안별 특성을 고려하여야 한다. 내진성능향상 방안별 검토방법은 종래에 구조설계자의 경험에 근거한 주관적 판단이 지배적이었으나, 본 논문에서는 객관적이고 일관된 보강을 위해 가중치 평가기법을 제시하고자 한다. 보강방안이 선정되었으면 선정된 보강공법이 적정한지 재검토가 필요하며, 이 작업은 객관성 확보를 위해 자문위원이나, 독립된 설계자가 재평가하는 것이 적절하다. 보강방법이 적절하다고 판단되

면 보강설계 후 보강공사를 실시한다.

국내에 적용할 수 있는 대표적인 보강방법은 일반적인 보강방법으로 낙교방지를 위한 낙교방지장치 설치, 다점고정방안, 받침부 보강, 철근콘크리트 교각과 교대의 보강, 기초 및 지반의 보강 등을 고려할 수 있으며 지진력 감소방안으로 댐퍼 등의 지진에너지 소산장치 설치하는 방안과 지진격리장치 등을 적용할 수 있다. 내진성능향상의 검토는 낙교 및 교각보강 등 일반적인 보강방안을 우선적으로 검토하며, 일반적인 보강방법으로 보강이 부적합하다고 판단되는 경우 받침교체 등의 지진력 감소방안을 적용함이 적절하다. 받침부, 교각, 기초, 지진력 감소방안 등 대표적인 보강방안의 주요검토 항목 및 순서는 그림 2와 같다.

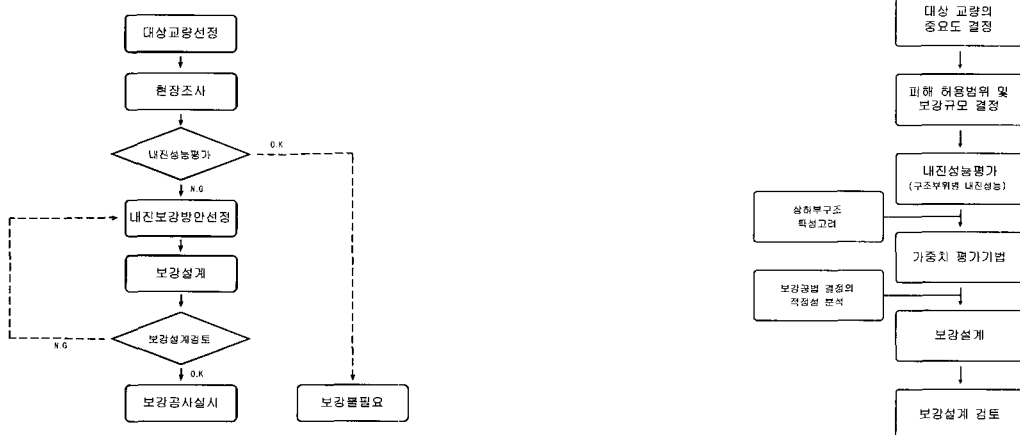
## 3. 가중치 평가기법

### 3.1 개요

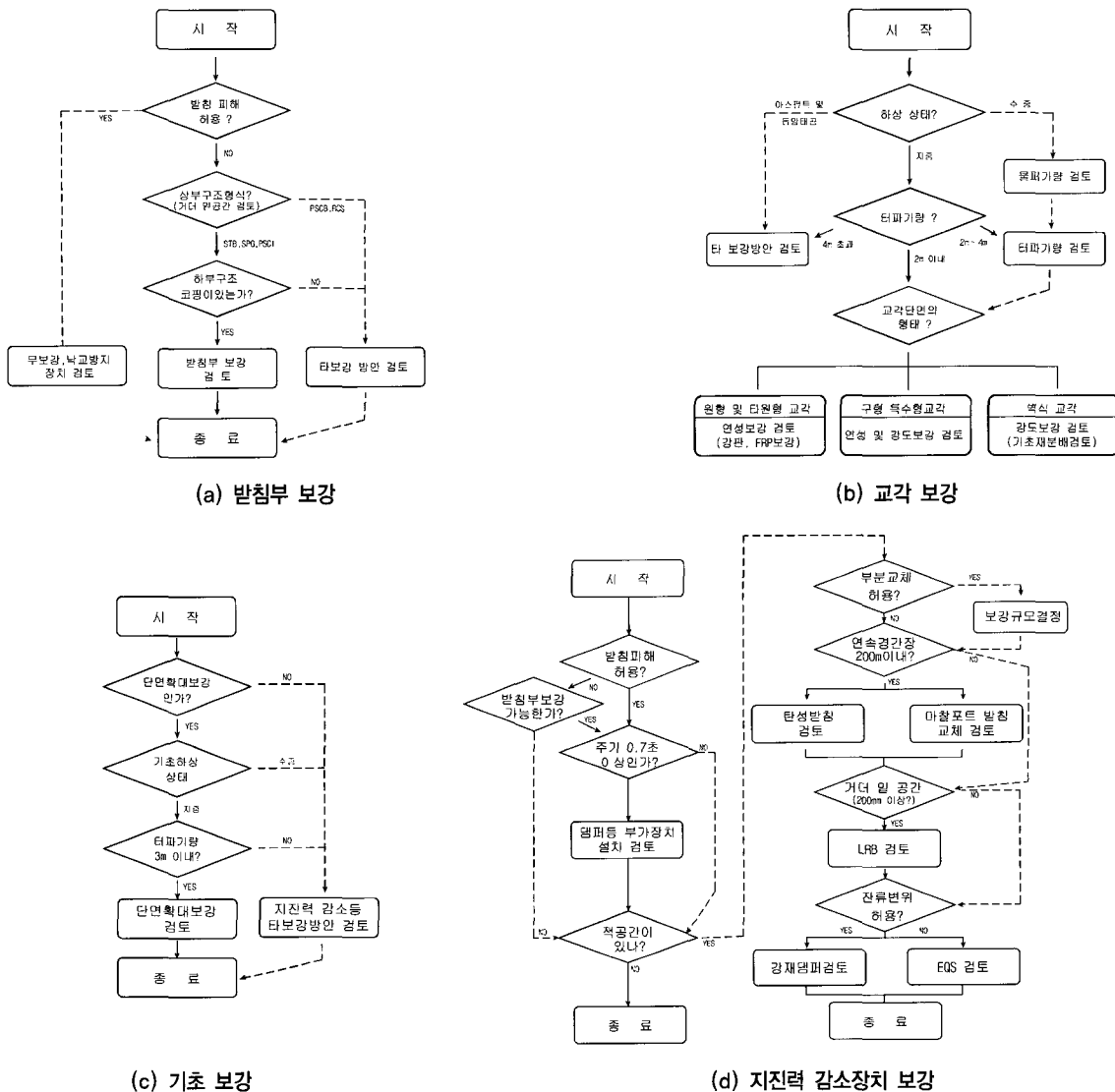
가중치 평가기법은 내진성능향상방안 선정에 영향을 주는 구조적합성, 경제성, 환경적 영향, 시공성, 유지관리 측면 등 다섯가지 영향인자에 가중치를 부여하여 대상구조물에 적합한 보강방안을 선정하는 방법으로 보강방안 선정 식을 제안하였다.<sup>(8,9)</sup> 또한, 평가결과와 점수분포에 따라 표 1을 적용하여 보강방안의 적정성을 분석한다.

$$I_{retrofit} = \sum_{j=1}^n = w_1 \cdot I_{str} + w_2 \cdot I_{cost} + w_3 \cdot (I_{env} + I_{con} + I_{main}) \quad (1)$$

여기서  $I_{retrofit}$  : 가중치 평가점수,  $I_{str}$  : 구조적합성 평가점수,  $I_{cost}$  : 경제성 평가점수,  $I_{env}$  : 환경적 영향 평가점수,  $I_{con}$  : 시공성 평가점수,  $I_{main}$  : 유지관리 측면 평가점수  
 $w_1$  : 구조적합성 가중치,  $w_2$  : 경제성 가중치,  $w_3$  : 부가인자 가중치



〈그림 1〉 내진성능향상 방안 선정 절차



〈그림 2〉 대표적인 보강방안의 검토순서

〈표 1〉 가중치 평가기법의 점수분포

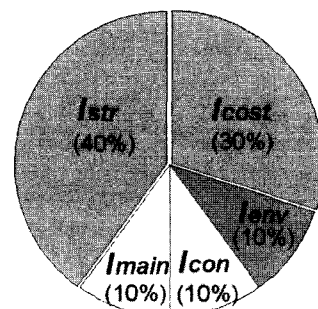
등급	점수분포	보강 적정성
A	80이상	보강방안이 매우 적정한 상태
B	70~79	보강방안이 적정한 상태
C	60~69	보강방안이 보통인 상태
D	50~59	보강방안의 재검토 필요한 상태
E	50미만	보강방안으로 적용이 불가능한 상태

대표인자의 가중치를 구조적합성 0.4, 경제성 0.3, 부가인자 0.1로 적용하는 경우 식 (2) 및 그림 3과 같다.

$$I_{retrofit} = 0.4 \cdot I_{str} + 0.3 \cdot I_{cost} + 0.1 \cdot (I_{env} + I_{con} + I_{main}) \quad (2)$$

### 3.2 구조적합성

구조 적합성은 보강방안 선정의 대표인자이며 각 보강방안 별로 일반적인 보강방안과 지진력 감소방안으로 구분하였다.



〈그림 3〉 가중치 평가기법

#### 1) 일반적인 보강방안

##### (1) 낙교방지장치

낙교방지장치는 받침지지길이 부족하거나 받침의 파손을 허용하는 경우 받침파손에 의한 과대변위 발생 가능성 여부를 검토한다. 따라서, 받침만 파손되는 경우 낙교방지장치를 적용할 수 있는 지 판단하여 100점을 부여하였다.

### (2) 받침부보강

받침부 보강의 구조적합성에서 가장 중요한 영향 인자는 상부구조 형식으로 상부구조 형식이 강교형식인 경우 구조적합성 점수를 100점으로 산정하였으며, 프리스트레스 콘크리트 I 거더교 및 프리프렉스교의 경우 60점, 거더 밑 공간이 부족한 프리스트레스 콘크리트 박스 거더교 및 철근콘크리트 슬래브교의 경우 30점으로 가중치를 선정하였다. 또한, 코핑이 없는 교각형태의 경우 받침부 보강공간이 부족하므로 25점을 부여하였다. 본 평가는 콘크리트 블록(Shear key)등의 공간이 필요한 보강방안의 경우이며, 최근 협소한 거더 밑 공간을 이용한 강재 전단키 등을 적용할 경우에는 가중치를 재조정하여야 한다.

### (3) 교각보강

교각보강은 보강방법에 따라 강판보강 및 섬유 래핑 보강 등의 연성보강과 단면확대 등의 강도보강으로 보강방법을 분류하였다. 두 가지 보강방법 모두 구조적합성의 가장 중요한 인자는 고정단 교각 하상상태 및 단면의 형상이다. 연성 보강의 경우 원형교각이며, 기초상면이 노출되어 있어 교각보강이 용이한 경우 구조적합성 점수를 100점으로 산정하였으며, 터파기량이 2.0m 이내인 경우 80점, 터파기량이 2.0m 이상인 경우 70점으로 산정하였다. 구형교각인 경우 구형으로 보강할 경우 우각부의 응력집중에 의해 연성능력이 떨어지므로 타원형으로 단면확대를 하여 보강하여야 하므로 65점의 점수를 부여하였다. 벽식교각, 특수한 형식의 교각은 교각부 천공 후 강선앵커 삽입 및 단면확대등의 부가적인 보강이 병행되어야 하며, 수중부의 교각은 하상에 따른 물퍼기공 및 시공성 저하, 부유물의 충돌, 부식 및 기타 문제점 발생이 예상되므로 40점을 부여하였다. 또한, 과도한 변위연성도를 요구하는 경우 지진발생시 잔류변위 발생 등의 문제점이 발생할 수 있으며, 최대의 변위연성도를 고려하여도 요구성능을 만족시키지 못하는 경우가 있으므로 20점을 부여하였다. 교각 하부를 도로로 사용하여 아스팔트로 포장되어 있는 경우 등 현실적으로 교각보강이 불가능 한 경우 0점을 부여하였다. 단면확대등의 강도보강도 연성보강과 마찬가지로 기초상면이 노출되어 있는 경우, 터파기량이 2.0m이내, 2.0m이상인 경우 각각 100점, 80점, 60점으로 부여하였으며, 수중교각인 경우와 교각의 단면확대 보강을 하였으나, 보강 후 교각 강성 및 강도증가에 따른 하중 재분배에 의해 기초 보강을 병행하여야 하는 경우 40점을 부여하였다.

### (4) 기초보강

단면확대 등의 기초보강은 터파기량이 3.0m이내의 경우 시공성과 경제성을 고려하여 100점을 부여하였으며, 터파

기량이 3.0m를 초과하는 경우 평가점수를 60점 부여하였다. 또한 교각 하상상태(기초의 상면)가 수중인 경우 기초보강이 매우 어려우므로 30점을 부여하였다.

### 2) 지진력 감소방안

지진력 감소방안의 보강방안은 댐퍼등 부가장치의 설치 또는 지진격리받침으로 교체 등의 보강방안을 고려할 수 있으나, 보강 후 특성이 유사하여 어느 보강방안을 적용하여도 내진성능확보에 문제가 발생하지 않는다. 본 논문에서는 대상교량에 적합한 보강방안을 선정하기 위하여 각각 장치의 기본적인 몇 가지의 특성만을 고려하여 우선적으로 평가점수를 부여하였다. 따라서, 평가점수의 결과에 따른 상위 보강방안의 재평가가 필수적이며, 자문회의 및 설계자의 구조적 판단에 의하여 보강방안을 선정 하여야 한다.

## 3.3 경제성

경제성은 대상교량의 보강방안별로 경제성을 비교하여 식 (2)와 같은 경제성 환산 비율을 계산하였다.

$$C.I = \frac{\text{Total Retrofit Cost}}{\text{Pier Number} \times C.S} \quad (2)$$

경제성 환산비율(C.I)은 보강방안별로 간접비를 포함한 총공사비(Total Retrofit Cost)와 고정단 교각수(Pier Number) × 일반적인 보강비용(C.S)의 비율로 계산한다. 여기서, 일반적인 교량의 C.S 값은 교각보강 4차선 2개소의 보강비용인 100백만원을 적용하였다. 단 프리스트레스 콘크리트 박스 거더교 및 연장 700m 이상의 장대교의 경우 보강공사비가 과대하여 경제성 가중치가 매우 비경제적으로 평가될 수 있으므로 300백만원 수준으로 조정하였다. 경제성 가중치의 점수부여 방법으로 경제성 환산비율이 1.0 이내인 경우 100점, 1.1~2.0인 경우 80점, 2.1~4.0인 경우 60점, 4.1~8.0인 경우 40점, 8.1 이상인 경우 0점을 부여하였다. 보강방안별 경제성을 비교하면 낙교방지장치, 받침부 보강, 교각 및 기초보강등 일반적인 보강방안이 댐퍼등 부가장치설치 및 지진격리받침 교체 등의 방안 보다 저렴하다. 단 받침 부분교체 등의 경우 상대적으로 일반적인 보강방안보다 저렴해 질 수 있다.

## 3.4 환경적 영향

환경적 영향은 보강에 소요되는 기간과 시공순서, 공사기간 중 부분적 또는 전면적 교통통제, 내진 외적으로 보수·보강계획 등을 고려하여 결정하였다. 보강공사의 소요기간은 보강공사의 규모와 연관성이 있다. 중·소규모의 보강은 일

반적으로 3개월 이내에 보강이 완료 되며, 구조물의 사고요인 및 구조체 손상정도가 적다. 보강공사가 오랫동안 지속되면 보강 외적인 요인에 의해 구조체에 치명적 손상을 야기시킬 수 있다. 보강공사의 소요기간 외에 또 한 가지 검토해야 할 부분은 보강의 순서이다. 일 예로 받침부 보강으로 콘크리트 블록 설치시 시공의 편의를 위해 교각 상면을 전 교각에 치핑을 한 후에 콘크리트 블록을 타설을 하는 경우가 있다. 이 경우 구조적으로 불안정한 상태가 1-2주 혹은 그 이상 지속될 수 있으며, 이 시기에 외적 충격에 의해 손상이 발생할 수 있다. 따라서 보강공사를 2-3개 교각씩 순차적으로 시공하여 구조적 불안정 기간을 최소화하여야 한다. 보강공사로 인한 교통 통제 시 교통의 정체 및 사회 간접적인 영향을 미칠 수 있다. 따라서 교통 통제 필요시에는 통제시간을 최소화하여야 하며, 대상교량의 교통량 등을 감안하여 가급적 교통통제가 필요하지 않는 보강방안의 선정이 합리적이다. 특히 받침교체의 경우 차량의 부분적 통제 및 서행이 필요하므로 교통통제 시간 및 교통량 등의 사회 간접비용을 고려하여야 한다. 내진외적으로 받침 교체 등의 보강계획이 있는 경우 교각보강 등의 일반적인 보강은 중복투자가 될 수 있다. 또한, 받침교체시 일반 받침으로 교체하였으나 내진성능이 부족하여 재 보강을 하여야 하는 경우도 있다. 이 경우 보강방안 선정 전에 충분한 검토 및 조사를 하여 중복투자가 되지 않도록 한다. 가중치의 점수부여 방법으로 교통통제가 불필요한 경우 보강 소요기간에 따라 1개월 이내시 100점, 3개월 이내시 80점, 6개월 이내시 60점, 6개월 이상 소요시 20점을 부여 하였다. 또한, 교통통제가 필요한 경우 차량서행이 필요한 경우 60점, 2주 이내의 교통통제가 필요한 경우 20점, 2주 이상의 교통통제가 필요한 경우 0점을 부여하였으며, 교량이 도심지에 위치하여 교통량이 많은 경우 평가점수×0.5로 조정하였다. 또한, 지진외적으로 교량의 보강계획이 있는 경우 0점을 부여하였다.

### 3.5 시공성

시공성은 시공의 난이도, 사고요인 등을 고려하여 결정하였다. 시공의 난이도는 보강공법에 따라 분류하며 현장의 보강공사 저하요인 등에 따라 복잡한 경우가 낙교방지 장치의 설치 및 받침부 보강의 경우 비교적 간단한 보강이라고 볼 수 있으나, 콘크리트 블록의 설치시 기존 콘크리트면의 치핑이 필요한 경우가 있으며, 강재 거더의 수직 보강재 간섭 등으로 인하여 시공성 저하 요인이 있다. 교각의 보강은 일반적으로 보통의 난이도를 가지고 있으나, 고정단 교각의 터파기의 물량, 교각 하부가 아스팔트로 되어있는 경우, 터

파기시 돌망태공 등 주변시설의 간섭, 수중부 교각의 물퍼기량 등의 시공성 저하요인이 있다. 댐퍼 등의 부가장치의 설치는 보통의 시공성을 가지고 있으나, 설치 방법 및 각도 등이 숙련된 기술을 요구한다. 받침교체는 보통의 시공난이도를 요구하나, 받침교체 시 교량인상이 수반되며, 교각상면의 치핑 등의 시공성 저하요인이 있다. 보강 공사 중 사고의 발생가능성은 시공사의 숙련도 및 시공방법에 따라 항시 내포되어 있다. 특히, 받침교체시 교량인상 연단거리의 검토 및 확보가 필수적이며, 부족한 경우 교량인상시 가시설의 설치 등이 고려된 보강공법 선정 등으로 사고요인을 미연에 방지하여야 한다. 안전사고의 발생은 인명적, 재산적 손실이 외에 구조적으로 치명적 손상을 야기할 수 있으므로 보강공사 선정시 검토하여야 한다. 가중치의 점수부여 방법으로 보강공사 중 사고요인이 없는 경우 시공 난이도에 따라 간단한 경우(낙교방지장치 등) 100점, 보통인 경우(교각보강) 80점, 복잡한 경우(수중부 기초보강 등) 60점을 부여하였으며, 사고요인이 있는 경우 시공 난이도에 따라 간단한 경우 80점, 보통인 경우 40점, 복잡한 경우 0점을 부여하였다.

### 3.6 유지관리 측면

유지관리 측면에서 점검시 지장시설물 유무, 유지관리상 문제점 유무, 보강 후 손상이 발생할 수 있는 점 등을 고려하여 결정 하였다. 보강방안에 따라 점검이나 정밀안전진단시 지장시설물이 되는 경우가 있다. 일 예로 콘크리트 블록을 교축직각방향으로 설치시 받침부의 점검이나 받침교체시 지장시설물이 되는 경우가 있다. 따라서, 보강방안 선정시 가급적 유지관리가 간편하며, 철거가 가능한 보강방안으로 선정하는 것이 적절하다. 유지관리상 문제점으로 선정된 보강방안의 문제점이 있는지 검토한다. 예를 들어 기초보강의 경우 보강완료 후 토사를 되메우기 하여 유지관리상 시공상태를 육안으로 확인하기 어렵다. 보강 후 구조물의 손상이 발생할 가능성이 있는지 검토하여야 한다. 일 예로 보강공사에 다량의 볼트구멍을 천공하거나 위치 확보의 어려움으로 인해 수직보강재 등을 절단하게 되는 경우가 있다. 이 경우 상시 하중에 의한 구조적 손상 및 유지관리 측면에서 적절하지 못하다. 가중치의 점수부여 방법으로 유지관리 측면에서 양호한 상태의 경우 100점, 유지관리상 문제점이 없으나 보통의 지장물 또는 지장이 매우 많은 경우 각각 80점, 60점을 부여하였으며, 유지관리상 문제점이 있거나, 보강 후 교량에 손상이 있는 경우 지장시설물이 아닌 경우 20점, 지장시설물인 경우 0점을 부여하였다.

### 4. 가중치 평가기법의 도로교량 적용 예

#### 4.1 대상교량

현재 공용중인 도로교량을 대상으로 가중치 평가기법을 적용하여 점수를 산정하였으며, 적용한 결과 실제의 최종보강방안과 비교하였다. 평가 대상교량은 현재 공용중인 도로교량 160개교로서 상·하부구조의 형식별 및 내진성능평가 결과 내진성능 부족부위의 교량 수는 표 2와 같다.

#### 4.2 대표교량의 가중치 적정성 분석

평가된 160개교 중 각 보강방안별로 대표 교량 6개교를 선정하여 가중치 평가기법을 적용한 결과는 표 3과 같다. 여기서, BR3, BR4교량에 대하여 구조적합성 및 경제성 가중치를 4가지 CASE에 따라 변화를 주어 평가하였으며, 각 교량별로 대표적인 CASE1에 대하여 평가하였다.

표 3에서 BR3의 보강방안은 가중치 변화에 따라 CASE1~CASE3의 경우 댐퍼+받침부가 가장 높은 점수이며, CASE4의

〈표 2〉 대상교량의 제원

Superstructure	SUM	Prestress Concrete Box Girder	Steel Box Girder	Steel Plate Girder	Prestress Concrete I Girder	Reinforced Concrete Slab
	160	9	44	6	43	58
Substructure	SUM	T-Type	Rectangular	Rahmen	Wall Type	Etc
	160	48	26	47	37	2
Failure Member	SUM	Bearing	Column+(Bearing)	Footing+(Bearing)	Column+Footing+(Bearing)	
	160	69	54	12	25	

〈표 3〉 대표교량의 가중치 평가 결과

구분	상부형식	하부형식	교장(m)	교폭	받침종류	준공년도	내진성능 부족부위
BR1	강박스교	T형교각식	45+5@50+45=340	19.0	포트받침	1999	받침
BR2	PSC I교	라멘식	5@25.04=125.2	17.5	받침판받침	1986	받침+교각
BR3	강박스교	라멘식	4@37.5=150	19.0	받침판받침	1992	받침+교각
BR4	RC슬래브교	벽식	12+3@15+12=69	18.5	받침판받침	1997	받침+교각
BR5	강박스교	구주식	35+3@50+35=220	19.5	포트받침	1998	받침+교각+기초
BR6	PSC박스교	T형교각식	10@50=500	10.5	포트받침	1994	받침+교각

구분	최종보강방안 BR3/BR4	낙교 방지	교각+(낙교)	교각+기초+(낙교)	댐퍼+(받침부)	받침교체			
						탄성받침	마찰포트	LRB	EQS
CASE1	댐퍼/탄성받침	60/60	57/57	49/49	78/48	66/76	76/73	74/72	72/72
CASE2	댐퍼/마찰포트	70/70	67/65	59/59	77/54	66/74	77/75	76/71	74/71
CASE3	댐퍼/탄성받침	50/50	48/48	40/40	78/41	70/79	75/71	73/74	70/74
CASE4	마찰포트/마찰포트	80/80	76/70	68/68	77/61	63/71	78/76	77/69	76/69

구분	최종보강방안	낙교 방지	교각+(낙교)	교각+기초+(낙교)	댐퍼+(받침부)	받침교체			
						탄성받침	마찰포트	LRB	EQS
BR1	낙교방지방강	100	67	61	67	44	44	50	52
BR2	낙교+교각보강	100	89	49	67	72	71	76	68
BR3	받침부+댐퍼보강	60	57	49	78	66	76	74	72
BR4	받침교체(탄성받침)	60	57	49	48	76	73	72	72
BR5	받침교체(LRB)	60	44	38	40	58	57	74	68
BR6	받침교체(EQS)	60	57	49	61	58	60	72	74

※ CASE1 (w<sub>1</sub>=0.4, w<sub>2</sub>=0.3), CASE2 (w<sub>1</sub>=0.3, w<sub>2</sub>=0.4), CASE3 (w<sub>1</sub>=0.5, w<sub>2</sub>=0.2), CASE4 (w<sub>1</sub>=0.2, w<sub>2</sub>=0.5)

경우 마찰포트로 선정되었다. 또한, BR4의 보강방안은 CASE1, CASE3의 경우 탄성받침, CASE2, CASE4의 경우 마찰포트로 선정되었다. 이는 경제성 가중치에 따라 경제적으로 우수한 보강방안의 점수가 매우 높게 나올 수 있음에 기인한다. 일반적으로 내진보강방안 선정시 가장 중요한 인자는 구조적합성으로 판단되며, 구조적으로 불리한 경우 보강방안 선정이 부적절하다고 판단되며, 보강효용성 측면에서 경제성도 무시할 수 없는 영향인자이므로 본 논문에서는 CASE1 ( $w_1=0.4, w_2=0.3$ )을 대표적인 가중치로 선정하여 대상교량에 적용하였다. 교량별로 분석하여 보면 BR1의 경우 내진성능평가 결과 받침 파손만 예상되므로 낙교방지가 100점으로 매우 적합하다고 평가되었으며, BR2의 경우 받침+교각의 파손이 예상되므로 일반적인 보강방법인 교각연성보강이 89점으로 적합하다고 평가되었다. BR3~BR6은 받침+교각 또는 받침+교각+기초의 파괴가 예상되며, 내

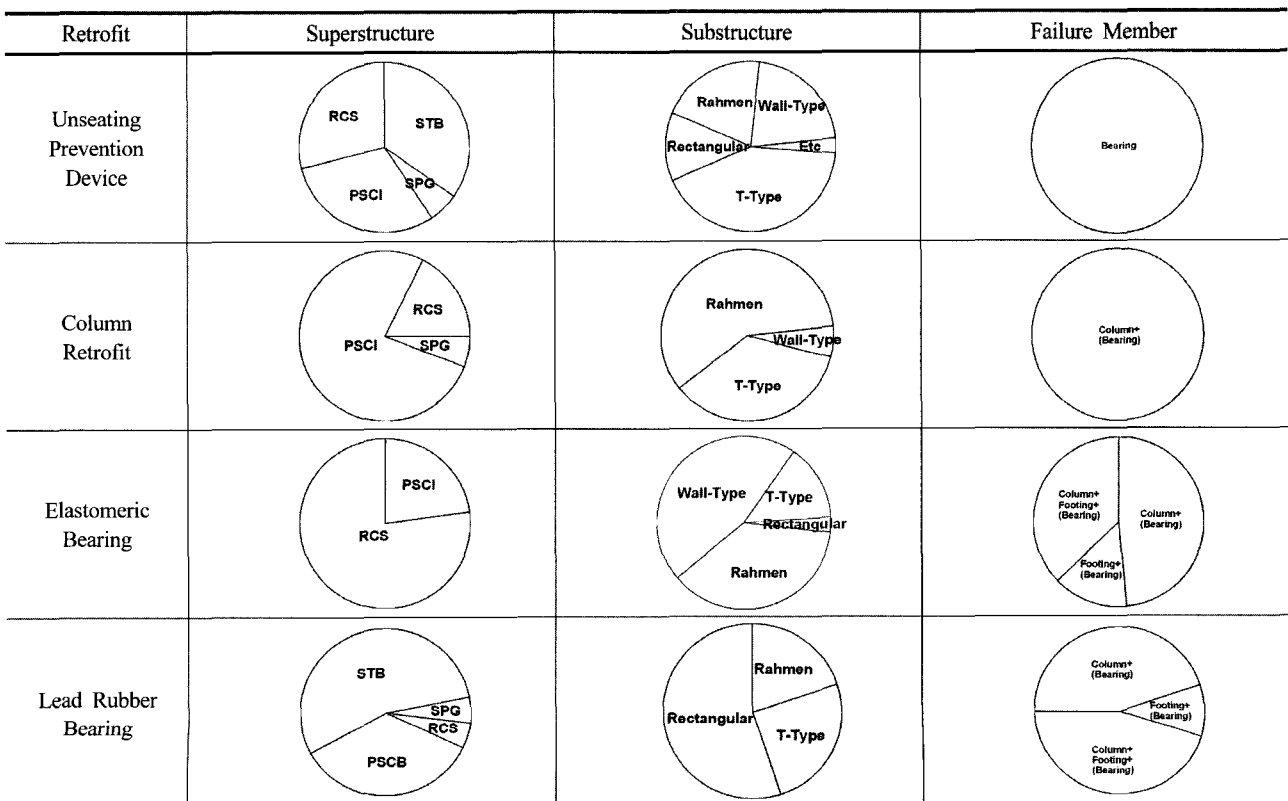
진성능이 매우 부족해 일반적인 보강방법으로 보강이 어려운 경우로 지진력 감소방안으로 각각의 방법의 점수가 높게 평가되었다. 이 경우 점수분포는 74~78점 수준으로 보강방안이 적절한 상태로 평가되었다. BR2와 BR3의 경우 두 가지 이상의 보강방법을 병행하므로 병행보강에 따른 구조저해요인을 고려하여 두 가지 보강방안의 점수 중에 작은 값의 95%를 최종점수로 적용한 결과이다.

4.3 보강방안 유형별 분석

보강방안 유형별로 분석하면 표 4와 그림 4와 같으며, 160개교 중 낙교방지장치 보강이 69개교(43%), 교각+낙교보강이 17개교(11%), 탄성받침보강이 35개교(22%), 납면진받침(Lead Rubber Bearing)이 20개교(12%)로 상기 4개 보강방안이 141개교로 전체 보강방안의 88% 이상을 차지한다. 이는 11가지 보강방안을 검토하였으나, 실제 대상교

〈표 4〉 보강방안 유형별 분석

Common Retrofit Method	Unseating Prevention Device	Multi Fixed Support	Column + Unseating	Footing + Unseating	Column + Footing	Total
	69	1	17	4	1	160
Energy Dissipation Method	Damper + Shear Key	Elastomeric Bearing	Friction Pot Bearing	Lead Rubber Bearing	Steel Damper Bearing	Eradi Quake System
	5	35	0	20	2	6



〈그림 4〉 보강방안 유형별 상세분석

량에 적합하며, 적용할 수 있는 보강방안은 한정되어 있음에 기인한다. 우선 낙교방지보강의 경우 받침만 파손되는 경우 낙교방지장치가 최고점수로 평가되므로, 이는 적절한 평가 결과라고 판단된다. 교각보강의 경우 교각 또는 받침+교각의 파손이 예상되는 경우 보강방안이 선정되었으며, 상하부구조의 유형별로 분석 해보면 프리스트레스 콘크리트 I 거더교의 원형 및 타원형교각이 대부분을 차지함을 알 수 있다. 탄성받침의 경우 철근콘크리트 슬래브교 및 프리스트레스 콘크리트 I 거더교등 중소규모 교량의 보강에 적합한 보강방안이며, 납면진받침 등 지진격리받침의 경우 강박스 거더교 및 프리스트레스 콘크리트 박스 거더교등 장경간 연속교에 적합한 보강방안으로 평가된다.

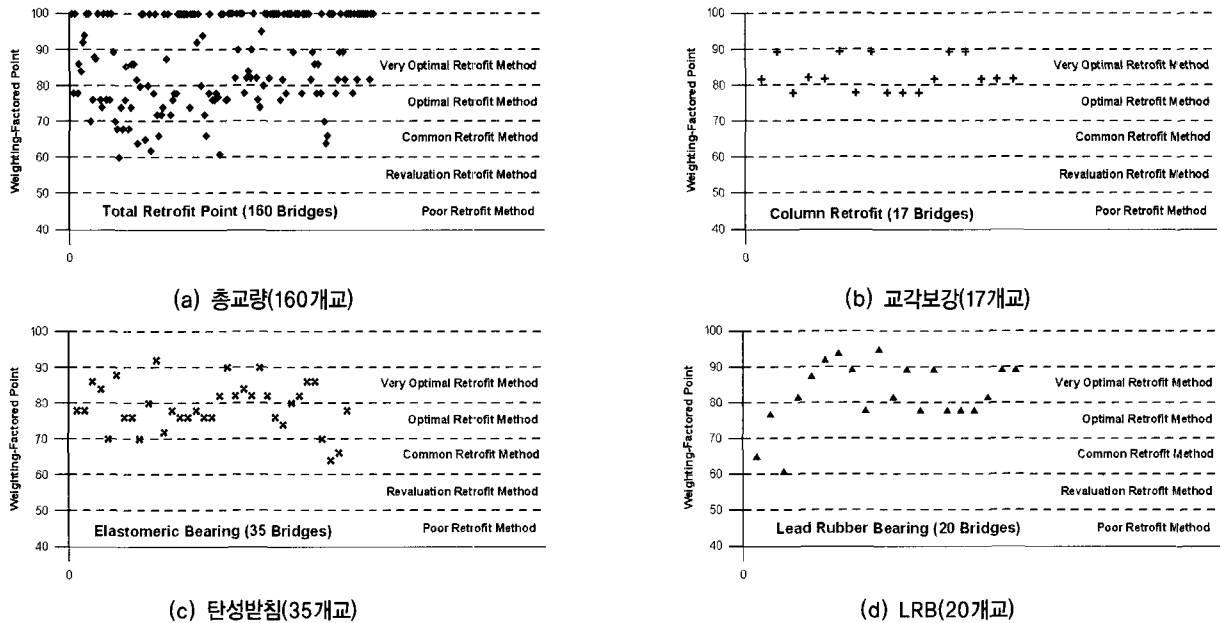
4.4 보강방안 유형별 점수분포

보강방안별로 점수분포를 비교하면 그림 5에서와 같이 160개교가 60점 이상을 차지하여 보강방안이 적용 가능한 수준의 점수로 평가되었다. 또한 점수분포상 보강방안이 적절한 상태인 70점 이상의 교량은 148개교로 92%를 차지하

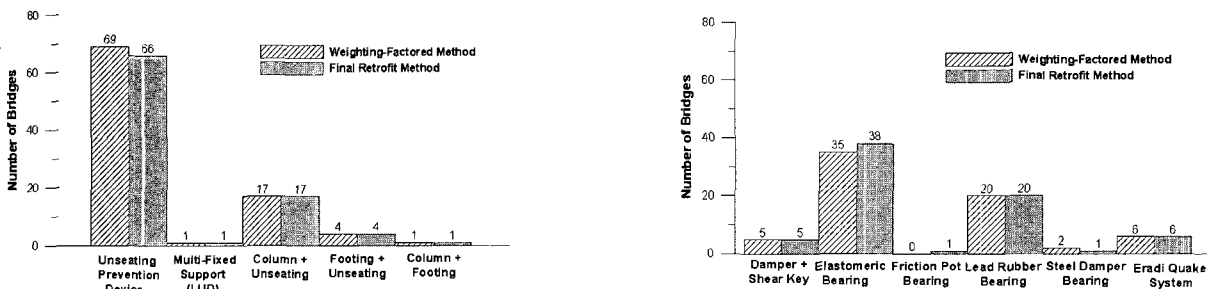
므로 가중치 평가기법의 적용성에 무리가 없으므로 판단된다. 대표적인 보강방안에 따라 검토하여 보면 우선 낙교방지보강의 경우 모두 100점으로 평가되게 가중치를 결정하였다. 교각보강의 경우 17개교 전부 70점 이상을 차지하여 보강방안이 적절한 상태로 평가되었다. 교각보강이 90점 이상이 나오지 않은 이유는 병행보강에 따른 구조 저해요인을 고려한 결과 때문이다. 탄성받침보강의 경우 2개교를 제외하고는 70점 이상을 분포하였으며, LRB의 경우도 2개교를 제외하고는 70점 이상을 분포하여 보강방안이 적절한 상태로 평가되었다. 탄성받침과 LRB의 60점대 4개교의 점수를 검토하여 보면 경제성 측면에서 보강소요비용의 과다에 기인한다. 이 경우 다른 보강방안을 적용하더라도 비용이 많이 들며, 타 보강방법에 따른 대안이 없으므로 최종 보강방안으로 선정하되 해당교량에 대해서는 면밀한 분석이 요구된다.

4.5 실제 보강방안과 비교

가중치 평가기법에 따른 보강방법과 종래의 방법으로 구



〈그림 5〉 보강방안 유형별 점수분포



〈그림 6〉 실제 보강방안과 비교



조자의 판단에 의해 실제 적용된 보강방법을 비교한 결과는 그림 6과 같다. 그림 6에서 보강공법이 다른 경우는 보강방안별로 상호 바뀐 보강방안을 포함하여 11개 교량이며, 이를 유형별로 분류하여 원인을 분석하여 보았다.

(1) 낙교방지장치 → 받침교체 또는 부분받침교체 (3개교)

2개 교량의 경우 평가 결과상 낙교방지장치만 설치하여도 내진성능을 만족하나, 지진외적인 측면에서 받침이 노후화되어 받침교체가 필요한 경우이다. 1개 교량의 경우 총 12 경간 중 9경간은 기존의 받침판받침에서 내진성능이 있는 탄성받침으로 교체되어 있으나, 3경간이 미교체 되어 있는 경우로 미교체 받침을 탄성받침으로 교체하는 방안이 전체적인 교량관리 측면에서 적절하다고 판단되는 경우이다. 이러한 사례는 구조평가자가 받침의 노후화 정도를 정량적으로 평가 하기 보다 교량관리자의 전반적인 유지관리 계획 및 전문가의 자문 등을 종합적으로 수렴하여 내진성능향상 방안을 선정하여야 한다. 향후 연구과제로 받침 교체주기를 고려한 생애주기비용(LCC)을 고려하면 보다 합리성 있는 결과를 기대한다.

(2) 낙교방지장치+교각보강 → 탄성받침 부분 교체 (1개교)

대상교량 기존받침은 탄성받침으로 고정단 교각 받침의 고무두께가 가동단에 비해 낮아 교각이 내진성능을 만족하지 못한 경우로 최종보강은 고정단의 받침을 고무두께가 높은 탄성받침으로 교체하여 내진성능을 확보한 경우이다. 가중치 평가기법의 경우 낙교방지장치+교각보강은 기초상면이 지중에 노출되어 있음으로 인해 89점, 탄성받침의 경우 다음순위의 점수로 86점으로 평가되었다.

(3) 탄성받침 교체 → 낙교방지장치+교각보강 (1개교)

가중치 평가기법 평가결과 탄성받침, 교각보강 모두 86점으로 동일 점수가 산정되었으나, 교각보강의 경우 낙교방지와 병행보강을 하여야 하므로 최종점수에서 95%를 곱하여 82점으로 탄성받침의 점수가 최고점수로 선정된 결과이다. 본 교량은 두 가지 방안 모두 80점 이상으로 어떠한 보강을 적용하더라도 내진성능확보에는 문제점이 발생하지 않을 것으로 판단되며, 전문가의 자문등을 거쳐 일반적인 보강방안인 낙교방지장치+교각보강 교체방안을 최종보강방안으로 선정한 사례이다.

(4) 지진력 감소방안 내에서의 순위변화 (6개교)

대상교량 6개교의 최종보강방안은 LRB→EQS 2개교, EQS→LRB 2개교, 강재뎀퍼받침→LRB, LRB→마찰포트 받침으로 변화하였으나, 점수의 차이가 2~4점으로 편차가

크지 않다.

우리나라와 같은 중·약진 지역에서 지진력 감소방안은 어떠한 장치를 적용하더라도 유사한 특성을 보이므로 가중치 평가에 따른 큰 변별력은 없는 것으로 판단된다. 6개교의 경우 최고점수와 차기점수의 보강방안에 대해 전문가 자문회의 결과 등을 고려하여 재검토한 결과 차기점수의 보강방안이 선정된 사례이다.

(5) 전반적인 결과를 분석하면 제안된 가중치 평가기법에 의한 최고점수는 실제 최종보강방안과 대부분 일치하여 내진성능향상방안 선정시 근거자료로 활용가능 하다고 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 기존 도로교의 내진성능향상을 위한 최적인 선정에 필요한 주요 다섯가지 영향인자를 도출하였다. 주요 다섯가지 인자의 가중치를 적절히 설정함으로써 기존 도로교의 내진성능향상방안을 선정하는 가중치 평가기법을 제안하였다. 또한 제안한 평가기법을 160개소의 도로교에 적용하여 그 타당성을 검토하였으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 교량 내진성능향상방안 선정의 가장 중요한 영향인자는 구조적합성과 경제성이며, 부가적으로 환경적영향과 시공성, 유지관리 측면이 고려되어야 함을 확인하였다.
- (2) 주요 다섯가지 영향인자를 이용한 가중치 평가식을 다음과 같이 제안하였다.

$$I_{retrofit} = 0.4 \cdot I_{str} + 0.3 \cdot I_{cost} + 0.1 \cdot (I_{env} + I_{con} + I_{main})$$

- (3) 제안된 가중치 평가기법을 실제 내진성능향상 사업이 수행되었거나 사업이 예정된 도로교에 적용한 결과, 최고점수는 실제 최종 선정된 내진보강방안과 대부분 일치하여, 구조적합성 및 경제성 등 주요 두가지 영향인자의 가중치가 적절하게 부여되었다고 판단된다.
- (4) 본 기법의 적용을 보다 많은 내진성능향상 대상 교량에 적용하여 본 연구에서 고려하지 못한 다양한 영향인자의 도출과 민감도 분석등을 통해 각 인자가 가지고 있는 중요도 고찰이 필요하며, 가중치의 조정 및 확대를 통하여 더욱 합리적인 평가기법으로의 정립이 필요하리라 사료된다. 또한, 도로교 뿐만 아니라 철도교 등에 대하여도 구조물의 특성, 작용하중 특성 및 영향인자 등이 고려된 가중치를 선정하고 적용하는 연구가 이루어져야 할 것이다.

- (5) 본 연구는 향후 기존도로교의 내진성능향상 방법 선정에 대단히 유용한 기법으로 폭 넓게 이용되리라 판단되며, 유사한 기법이 도로교 이외의 구조물의 내진성능향상에도 적용 가능할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 “교량 내진성능향상을 위한 성능평가 연구” 결과의 일부이며 또한 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업(05 건설핵심 D02-01)의 재정적 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 한국시설안전기술공단, “기존교량의 내진성능평가 및 향상요령”, 건설교통부, 2004.
2. 한국시설안전기술공단, “국도상 기존교량의 내진성능평가 및 보강방안 연구”, 건설교통부, 2001.
3. 한국시설안전기술공단, “교량 내진성능향상을 위한 성능평가 연구”, 건설교통부, 2006.
4. 한국지진공학회, “기존교량의 내진보강방안 연구, 한국시설안전기술공단”, 1999.
5. 한국시설안전기술공단, “기존교량의 내진성 평가 및 보강방안”, 건설교통부, 1999.
6. Priestley, M.J.N., Seible, F. and Calvi, G.M., Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley&Sons Inc, 1996, pp. 686.
7. U.S. Department Transportation Federal Highway Administration, “Seismic Retrofitting Manual for Highway Bridges”, Report No. FHWA-RD-94-052., 1994, pp. 308.
8. 이지훈, “가중치 평가기법에 의한 기존교량의 내진성능향상방안 결정”, 공학박사학위 논문, 건국대학교, 2006, pp. 213.
9. 이지훈, 박광순, 하동호, 이용재, “가중치 평가기법에 의한 기존교량의 내진성능향상방안 결정법”, 대한토목학회 2006년도 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, 2006, pp. 45-48.