

기존 교량의 내진성능평가를 위한 개선된 내진보강 우선순위 결정

Advanced Seismic Retrofit Priority Decision For Seismic Performance Estimation of Existing Bridges

박광순¹⁾ · 주형석²⁾ · 최홍철³⁾ · 김익현⁴⁾

Park, Kwang-Soon · Ju, Hyeong-Seok · Choi, Hong-Cheol · Kim, Ick-Hyun

국문 요약 >> 기존교량의 내진보강 우선순위 결정방법은 교량을 지진도 그룹으로 분류한 후 교량의 취약도 및 영향도를 고려하여 4개의 내진그룹으로 분류된다. 그러나, 현재 사용되고 있는 내진보강 우선순위 결정방법을 442개의 국도상 기존교량에 적용한 결과 비합리적인 부분이 조사되었다. 지진도를 정량화하여 좀 더 세분화할 필요가 있고, 연속경간장이 긴 PSC 박스거더교량의 취약도가 과소평가되는 모순점을 개선할 필요가 있었으며, 영향도 수준 또한 취약도 수준으로 증가시킬 필요가 있었다. 본 연구에서는 기존 교량의 조사 결과를 근거로 기존 평가기법을 수정 보완하여 개선된 내진보강 우선순위 결정방법을 제안하였다.

주요어 내진보강 우선순위, 지진도, 취약도, 영향도, 내진그룹화

ABSTRACT >> Existing bridges are classified into 4 retrofit groups using the current preliminary screening method, considering key terms such as seismicity, vulnerability and social impact effect. However, some irrationality was found when the current method was applied to 442 existing bridges. As a result, it was determined that quantification and a more detailed classification of seismicity were required. The estimation of the vulnerability of box girder bridges having a long span length should be improved, as this showed a tendency to underestimate. It was also necessary to increase the level of social impact effect to that of vulnerability. In this study, an improved preliminary screening method has been proposed on the basis of the estimation results of existing bridges.

Key words Seismic retrofit priority, Seismicity, Vulnerability, Social impact effect

1. 서론

지진으로 인한 교량의 심각한 손상 및 붕괴는 구조물 자체의 직접적인 손실뿐만 아니라 지진피해 후 피해지역에 대한 접근로 소실로 복구의 어려움 및 복구 기간동안 필수적으로 야기되는 교통통제 등으로 주변 경제흐름의 지연 등과 같은 엄청난 간접적 손실을 유발하게 된다. 하지만 현재까지도 일부 관리주체별로 기 내진보강된 교량을 제외하고 내진설계개념 도입 이전에 건설된 기존 교량들은 적절한 내진보강 대책이 마련되지 않은 상태로 공용중에 있는 실정이다. 따라서 기존 교량의 손상 및 붕괴로 인한 사회적, 경제적 측

면에서의 손실비용을 최소화하기 위해서는 설계지진에 대해 교량의 내진안전성을 확보하는 것이 중요하다. 이를 위해서는 기존교량의 내진성능에 대한 상세평가와 그에 따른 내진보강이 필요하다. 한정된 재정자원으로 기존교량의 내진안전성을 보다 효율적으로 확보하기 위해서는 간단한 정보를 이용한 우선순위 결정법으로 지진에 보다 취약한 교량을 선별하여 우선적으로 내진성능상세평가를 실시하는 것이 합리적이다.

우리나라의 국도상 교량의 내진보강 우선순위 결정방법은 ‘기존교량의 내진성능 평가 및 향상요령(2004)¹⁾’에 따르고 있다. 교량이 위치한 지역의 지진세기를 고려한 지진도와 교량의 구조적 취약도 및 교량피해 시 유발되는 사회경제적 영향도를 종합적으로 고려하여 내진성능 상세평가를 위한 우선순위가 결정된다. 이러한 우선순위 결정방법이 제안된 시기에는 기존교량의 내진성능 평가결과에 대한 자료가 축적되어 있지 않아 우선순위 결정에 미치는 영향인자를 다양하게 고려하고 공학자들의 직관적 판단에 의해 이를 적

¹⁾ 정회원·한국시설안전공단 기술개발팀 차장, 토목구조기술사

²⁾ 정회원·한국시설안전공단 기술개발팀 대리, 공학석사

³⁾ 한국시설안전공단 기술개발팀 직원, 공학석사

⁴⁾ 정회원·울산대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사

(교신저자 : ickhyun@ulsan.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 8. 20 / 수정일 1차 : 2009. 11. 2, 2차 : 11. 4/

게재확정일 : 2009. 11. 4)

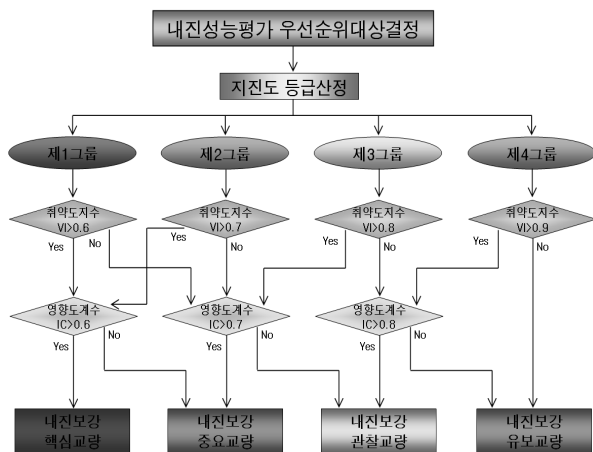
절히 정량화하였다. 따라서, 다양한 형식의 실 교량에 적용함에 있어 비합리적인 부분이 조사되었고⁽²⁾, 향후 기존교량의 내진성능 상세평가에 대한 자료가 충분히 축적되면 이에 따라 적절한 수정 또는 보완이 요구되어왔다.

이에 본 연구에서는 현재까지 수행된 442개의 다경간 교량의 내진성능 상세평가 결과에 기초하여 기존 내진보강 우선순위 결정법을 개선하였다. 우선순위 결정법 단계에서 이용 가능한 정보로 평가요소를 현실화하였으며, 직관적 판단에 의해 정량화된 요소를 공학적 평가결과에 근거하여 정량화하고 정식화하였다. 본 연구에서 제안된 개선된 우선순위 결정법에 의해 기존의 평가교량이 보다 합리적으로 내진그룹화 되는 것을 확인하였다.

2. 내진보강 우선순위 결정을 위한 기존기법 고찰

2.1 기존기법의 개요

그림 1은 기존교량의 우선순위를 결정하기 위하여 그룹화하는 흐름도이다. 교량이 위치한 지역의 지진도세기를 고려한 지진도와 구조적 취약도를 고려하여 정량화한 취약도 지수 및 교량에 지진피해 발생 시 미치는 사회경제적 영향도를 정량화한 영향도 계수에 따라 교량을 4개의 등급으로 그룹화하여 내진보강 핵심교량에 속한 교량부터 내진성능 상세평가를 수행하게 된다.



〈그림 1〉 내진그룹화 흐름도

〈표 1〉 기존 지진도 그룹분류

지진 구역	도시권역 구분	지 반 종 류			
		IV	III	II	I
I	도시	1	1	2	2
	기타지역	1	2	3	3
II	도시	1	2	3	4
	기타지역	2	3	4	4

2.2 기존기법의 고찰

2.2.1 지진도 등급 기준에 따른 지진도 그룹

표 1은 지진도 그룹의 분류를 나타낸 것으로 교량이 위치한 지진구역과 지반종류, 도시권역을 고려하여 1~4그룹으로 분류가 된다. 지반이 연약할수록(지반종류 IV) 지진운동은 증폭되므로 위험그룹(그룹1)으로 배치되도록 하고 동일한 지반종류라도 시설물의 밀집도가 큰 도시권역이 좀 더 위험그룹으로 분류되도록 고안되었다. 그룹 배치의 전반적인 흐름에는 합리성을 지니고 있으나 구체적인 배치에는 정량적인 평가에 기초하지 않고 공학자의 직관적 판단에 근거하고 있다. 특히, 기존교량이 위치한 지역의 지반종류가 대부분 II인 점을 감안하면 그룹 2-4에 편중되어 교량을 효율적으로 분류할 수 없는 단점이 있다.

2.2.2 취약도 지수(Vulnerability Index, VI)

취약도 지수는 지진에 대한 교량의 구조적 취약성을 나타낸 것으로 교각의 형태 및 연약지반 존재 유무, 사각과 같은 기하학적인 형상을 고려하여 식(1)과 같이 정식화 된다.

$$\begin{aligned}
 \text{취약도 지수(VI)} = & 0.2 \left(\frac{CONT}{3} \right) + 0.15 \left(\frac{LENGTH}{100} \right)^{0.1} \times \left(\frac{WIDTH}{WIDTH_{기준}} \right) \\
 & + 0.05 \left(\frac{AGE_{현재}}{AGE_{기준}} \right) + 0.2(PIER) + 0.1(EARTH) \times (PILE) \\
 & + 0.1(LIQ) + 0.1 \sqrt{\sum_{지점수} \left(1 - \frac{SUPPORT_{같이}}{SUPPORT_{기준}} \right)^2} \\
 & + 0.05(DETOUR) + 0.05(SKEW)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, CONT, LENGTH, WIDTH, WIDTH_{기준}, AGE, AGE_{기준}, PIER, EARTH, PILE, LIQ, SUPPORT_{같이}, SUPPORT_{기준}, DETIOR, SKEW는 각각 최대연속경간수, 최대연속경간장(m), 교량 폭(m), 도로교설계기준에 의한 교량폭 기준, 교량수명(년), 기준수명, 교각형태지수(1.0, 0.8, 0.6), 토압영향지수(1.0, 0.1), 지반구조물 상호작용 및 기초위험지수(1.0, 0.1), 액상화지수(1.0, 0.7, 0.4, 0.0), 교량받침지지길이(m), 도로교설계기준에 의한 받침지지길이(mm), 교량 노후화등급지수(0.1-1.0), 사각영향지수(1.0, 0.5 0.0) 이다.

식 (1)을 구성하는 개별항목 앞의 숫자는 그 항목이 취약도 지수에 기여하는 비율로 합은 1.0이 된다. 지진 시 상부구조의 관성력에 큰 영향을 주는 연속경간수(CONT), 연속경간장(LENGTH), 교폭(WIDTH)과 상부구조의 낙교에 크게 영향을 주는 받침지지길이(SUPPORT)는 기준값에 대한

비율로 정량화되어 있다. 따라서, 기준값의 합리적인 선정이 취약도 지수를 합리적으로 산정하는 주요한 요소임을 알 수 있지만 현 기법에는 이를 직관적 판단으로 정하고 있다.

교량 442개에 대한 취약도 지수를 산정하여 각 항목별 도수분포 그래프를 그림 2에 나타내었고, 표 2에는 각 항목별 최대값, 최소값, 평균값을 나타냈다.

표 2에서와 같이 전체 취약도 지수에서 연속경간수에 대한 값이 상대적으로 가장 많은 비중(0.286, 41.2%)을 차지하고 있고, 지진 시 상부구조의 관성력에 절대적인 영향을 미치는 연속경간장과 교폭에 대한 값의 비중(0.161, 23.2%)이 현저하게 낮게 평가되고 있음을 알 수 있다. 그림 2에서도 연속경간장과 교폭은 도수분포가 좁은 폭에 한정되어 있는 반면에 연속경간수는 폭넓게 분포되어 있어 취약도지수가 연속경간수에 의해 절대적으로 결정되는 것을 알 수 있다. 이로 인해 연속경간장이 짧지만 연속경간수가 많은 슬래브교는 상향평가 되고, 연속경간장이 길고 연속경간수가 적은 강교나 PSC교는 하향평가 되는 비합리적인 결과가 도출되게 된다.

한편, 교량에 대한 토압의 영향유무(EARTH), 지반구조물 상호작용 및 기초의 위험유무(PILE), 액상화 가능여부(LIQ) 등은 간단하게 정량화 되어 있지만 우선순위 결정 단계에서 제공되는 정보를 이용하여 이를 판단하기는 불가능하며 이를 적용하기 위해서는 별도의 평가가 수행되어야 하

므로, 실제 적용에서는 일괄적으로 동일한 값을 취하게 된다. 따라서 이들 요소는 실제의 변별력을 지니지 못하면서 오히려 전체 취약도 지수에 대한 일정 비중을 차지함으로써 취약도를 판별하는 민감도를 감소시키는 역작용을 하고 있다.

2.2.3 영향도 계수(Impact Coefficient, IC)

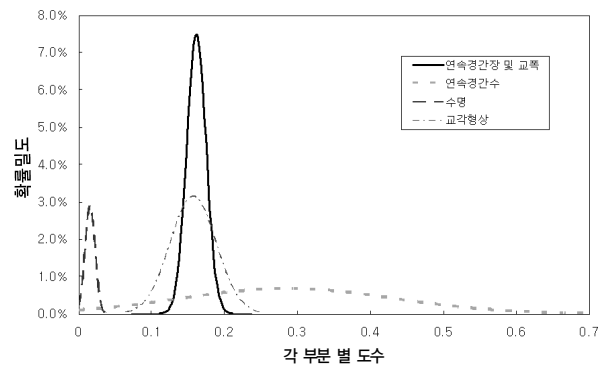
영향도 계수는 교량이 지진으로 인해 피해가 발생할 경우에 이로 인한 사회 및 경제적인 영향을 고려하는 결정인자로 교량의 설계등급과 시설물구분 및 교통량과 중요시설물의 설치유무 등을 고려하여 취약도 지수(VI)와 유사한 개념으로 식 (2)와 같이 정식화된다.

$$\text{영향도 계수(IC)} = 0.30\text{Log}\left(1 + \frac{ADT}{5000}\right) + 0.35(LEVEL) \times (CATEGORY) + 0.15(UTILITY) + 0.10(FACILITY) + 0.10\left(\frac{DETOUR}{50}\right)^{0.25} \quad (2)$$

여기서, ADT, LEVEL, CATEGORY, UTILITY, FACILITY, DETOUR는 각각 일 평균교통량(대), 교량설계등급지수(1.0, 0.8, 0.6), 시설물종별 지수(1.0, 0.8, 0.6, 0.0), 교량하부의 기간망 지수(1.0, 0.9, 0.8, 0.0), 부차시설물 지수(1.0, 0.8, 0.5, 0.0), 우회도로 길이(km)이다. 일 평균 교통량의 기준값과 우회도로 길이의 기준값은 직관적 판단에 의해 설정된 값이다. 일 평균교통량이 많은 교량의 경우 지진으로 인해 피해를 받게 되면 사회경제적인 영향도가 크기 때문에 30%로 큰 비중을 갖도록 되어 있다. 또한, 교량의 설계등급(LEVEL)과 시설물의 종별(CATEGORY)의 두 개의 중요항목은 하나의 평가항목으로 평가되기 때문에 비중을 35%로 높게 고려하고 있다. 그러나, 이들 두 주요항목이 곱의 형태(LEVEL×CATEGORY)로 평가되기 때문에 기타교량으로 분류되는 교량의 경우에는 시설물종별 지수(CATEGORY=0)가 0이 되어 교량의 설계등급에 관계없이 0이 된다. 따라서 기타교량에 대한 변별력이 떨어진다.

그림 3은 교량 442개의 IC 산정결과에 대한 도수분포이며, 표 3은 최대값, 최소값, 평균값과 표준편차를 나타낸다.

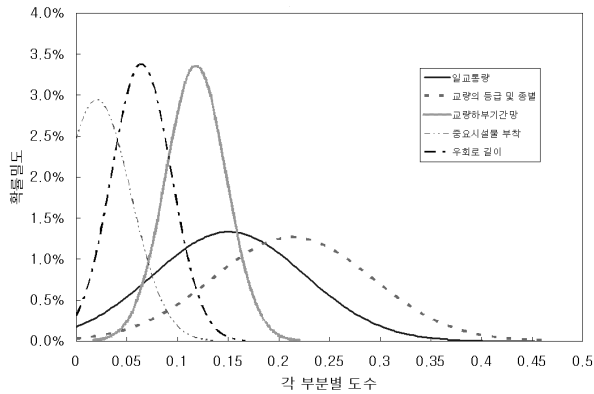
그림 3에 의하면, ADT, LEVEL 및 CATEGORY가 IC값을 결정하는 핵심요소임을 알 수 있으며, 표 3에서와 같이 IC값의 평균값은 0.56으로 VI 평균값 0.69의 81% 수준이며, 표준편차는 0.121로 VI의 표준편차 0.163의 74%이다. 그림 1에서와 같이 교량을 내진그룹화하는 과정에서 취약도지수(VI)와 영향도계수(IC)는 동일한 분류계급크기(0.6, 0.7, 0.8)로 사용된다. 따라서, 평균값과 표준편차가 작은 영



〈그림 2〉 기준 VI값 산정시 각 항목별 도수분포 그래프

〈표 2〉 각 항목에 대한 최대값, 최소값, 평균값 (기준 VI값)

구분	연속경간수	연속경간장 및 교폭	교각형상	지지길이	수명	사각	VI
최대값	1.20	0.22	0.20	0.02	0.039	0.05	1.68
최소값	0.07	0.12	0.12	0.02	0.008	0.0	0.41
평균 (%)	0.286 (41.2)	0.161 (23.2)	0.157 (22.6)	0.02 (2.9)	0.016 (2.3)	0.008 (1.1)	0.69
표준편차	0.146	0.013	0.032	0	0.007	0.016	0.163
기대기여도 (%)	20	15	20	10	10	5	식 (1)에서 계수값



〈그림 3〉 기존 IC값 산정시 각 항목별 도수분포 그래프

〈표 3〉 각 항목에 대한 최대값, 최소값, 평균값 (기존 IC값)

구 분	교통량	설계등급 및 종별	하부통행 기간망	시설물 부착	우회로 길이	IC
최대값	0.36	0.28	0.15	0.08	0.14	0.82
최소값	0.01	0.0	0.0	0.0	0.0	0.23
평균 (%)	0.151 (26.8)	0.214 (38.0)	0.118 (21.0)	0.021 (3.6)	0.065 (11.5)	0.56
표준편차	0.075	0.079	0.030	0.034	0.030	0.121
기대 기여도 (%)	30	35	15	10	10	식 (2)에서 계수값

향도계수가 취약도지수에 비해 내진그룹화 과정에 효율적으로 기여하지 않음을 알 수 있다.

3. 내진보강 우선순위 결정을 위한 개선기법 제안

3.1 지진세기 기반 지진도 그룹

지진도 그룹은 교량이 위치한 지역의 지진세기를 반영하기 위한 것이다. 따라서, 지진세기를 정량적으로 평가하여 그룹화하도록 한다. 현 도로교설계기준에 따라 지진구역 I 및 II의 설계지진시의 지반가속도(가속도계수)는 각각 0.11g, 0.07g이며 지반종류에 따른 증폭비는 지반종류 I, II, III, IV 일 때 각각 1.0, 1.2, 1.5, 2.0이다. 한편, 기타지역에 비해 도시지역의 지진위험도를 높게 평가하기 위해 기타지역의 가속도계수를 1.2배한다. 이에 따라 가속도계수를 산정하면 표 4와 같다. 가속도계수의 크기에 따라 지진도그룹을 분류하기 위해서 본 연구에서는 지진구역과 설계지진의 재현주기를 도입하여 구분하였다. 지진구역 I의 재현주기 1,000년과 500년 설계지진의 가속도계수는 각각 0.154g, 0.110g이며, 지진구역 II에서는 각각 0.098g, 0.070g이다. 따라서, 지진도그룹은 0.154g, 0.110g, 0.098g, 0.070g를 기준값으로 하여 그 이상인 경우 각각 1, 2, 3, 4그룹으로 하였다. 개선된 지진도그룹의 결과는 표 5와 같다.

〈표 4〉 지진도 그룹을 위한 지반가속도(g)

지진 구역	도시권역 구분	지 반 종 류			
		IV(2.0)	III(1.5)	II(1.2)	I(1.0)
I	도시	0.264	0.198	0.158	0.132
	기타지역	0.220	0.165	0.132	0.110
II	도시	0.168	0.126	0.101	0.084
	기타지역	0.140	0.105	0.084	0.070

〈표 5〉 개선된 지진도 그룹

지진 구역	도시권역 구분	지 반 종 류			
		IV	III	II	I
I	도시	1	1	1	2
	기타지역	1	1	2	2
II	도시	1	2	3	4
	기타지역	2	3	4	4

우리나라의 대부분의 지반이 지반종류 II인 점을 감안할 때 기존 기법에서는 지진도 그룹이 2~4가 되지만 개선된 기법에서는 1~4그룹으로 분류되어 보다 세분화된 평가가 가능하다.

3.2 취약도 지수(Vulnerability Index, VI) 정식화

기존의 취약도 지수 산정에는 다양한 항목을 고려하고 있지만 내진보강 우선순위 결정단계에서 제공되는 교량의 정보는 매우 제한적이므로 이들 항목을 모두 고려하는 것은 현실적으로 어려움이 많다. 본 연구에서는 제한적인 정보에서 교량의 취약도에 많은 영향을 미치는 것으로 판단되는 항목만을 반영하여 식 (3)과 같이 정식화하였다.

교량의 붕괴에 해당되는 파괴모드로는 크게 상부구조의 낙교, 교각의 파괴, 기초부의 파괴 및 지반 액상화를 고려할 수 있지만 우선순위 평가단계에서는 기초부와 액상화의 지진 위험성을 판단하는 것은 무리이다. 따라서 본 연구에서는 상부구조의 낙교와 교각의 파괴 위험성을 주요항목으로 고려하였으며 이들 두 요소의 취약도 지수 비중은 동일하게 40%로 하였다. 교각의 파괴 위험성 평가는 설계지진에 대한 상부구조의 관성력 크기와 교각의 형상으로 고려할 수 있으며 간단한 정보로부터 이들 항목을 평가할 수 있도록 각각 WEIGH_{지수}와 PIER_{지수}를 도입하였으며 비중은 30%, 10%(총 40%)로 하였다. 낙교는 받침지지길이가 부족한 경우 발생하며 받침선이 교축직각 방향과 일치하지 않는 사교의 경우 낙교 확률은 증가하게 된다⁽³⁾. 따라서, 이들을 평가하기 위해 SUPPORT_{지수} 및 SKEW_{지수}를 도입하였으며 비중은 각각 20%, 20%(총 40%)이다. 한편, 교량의 수명이 오래 되어 노후화 된 경우 지진 취약성이 크게 평가되도록

기존의 평가요소를 그대로 도입하였다.

$$\begin{aligned} \text{개선 취약도 지수(VI)} = & \\ & 0.3(\text{WEIGHT}_{\text{지수}}) + 0.10(\text{PIER}_{\text{지수}}) + 0.2(\text{SUPPORT}_{\text{지수}}) \\ & + 0.2(\text{SKEW}_{\text{지수}}) + 0.2\left(\frac{\text{AGE}_{\text{현재}}}{\text{AGE}_{\text{기준}}}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, WEIGH_{지수}, PIER_{지수}, SUPPORT_{지수}, SKEW_{지수}, AGE_{지수}, AGE_{기준} 은 각각 상부중량 지수, 교각형상 지수, 받침지지길이 지수, 교각받침의 사잇각 지수, 교량의 수명(년), 교량의 기준수명(년)이다.

3.2.1 상부중량 지수(WEIGH_{지수})의 정량화

지진 시 교각의 파괴 확률은 교각 강도에 대한 상부구조의 관성력이 커질수록 커진다.

설계지진시 상부구조의 탄성지진력은 식 (4)와 같다.

$$F_e = C_s \times W \quad (4)$$

여기서, C_s는 지진응답계수로 식 (5)와 같고, W는 상부구조의 중량으로 식 (6)과 같다.

$$C_s = \frac{1.2AS}{T^{2/3}} \quad (5)$$

$$W = \gamma \cdot \text{LENGTH} \cdot \text{WIDTH} \quad (6)$$

여기서, A, S 는 각각 가속도계수, 지반계수이며, T는 진동주기(sec)로 식 (7)과 같다. γ, LENGTH, WIDTH는 각각 상부구조의 단위중량(N/m³), 연속경간장(m), 교량폭(m)이다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g \times k}} \quad (7)$$

여기서, k는 교각의 강성으로 식 (8)과 같다.

$$k = \frac{\alpha EI}{H^3} \quad (8)$$

여기서, α, E, I, H는 각각 단순한 계수, 탄성계수(N/m²), 교각의 단면2차모멘트(m⁴), 교각높이(m)이다.

식 (8)을 식 (7)에 대입하면,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g \times \alpha_1 / H^3}} \quad (\dots \alpha_1 = \alpha EI) \quad (9)$$

식 (4)에 식 (5)와 식 (9)를 대입하여 정리하면 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} F_e &= 1.2 \times A \times S \times T^{(-2/3)} \times W \\ &= \alpha_2 \times \left(\frac{W \times H^3}{g \times \alpha_1}\right)^{\frac{1}{2} \times (-\frac{2}{3})} \times W \quad (\dots \alpha_2 = 1.2AS) \quad (10) \\ &= \alpha_3 \times W^{\frac{2}{3}} / H \quad (\dots \alpha_3 = \alpha_2 \times (g \times \alpha)^{(-\frac{1}{3})}) \end{aligned}$$

한편, 교각의 강도는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_n = \frac{M_n}{H} = \beta_1 / H \quad (11)$$

여기서, 교각의 휨강도(M_n)는 상부구조의 제원과 무관하므로 단순히 상수(β₁) 로 처리한다.

교각의 파괴 위험성은 교각의 강도(Capacity)에 대한 탄성지진력(Demand)의 비로 나타낼 수 있으므로 식 (12)와 같다. 즉, 상부구조의 2/3제곱에 비례하여 위험성이 커지는 것을 알 수 있다.

$$\frac{\text{Demand}}{\text{Capacity}} = \alpha_3 \frac{W^{\frac{2}{3}} H^{(-1)}}{\beta_1 H^{(-1)}} = \alpha_4 W^{\frac{2}{3}} \quad (\dots \alpha_4 = \alpha_3 / \beta_1) \quad (12)$$

여기서, W는 식 (6)과 같지만 상부중량 지수로 도입하기 위하여 식 (13)과 같은 유효중량 W_{eff}를 도입하였다.

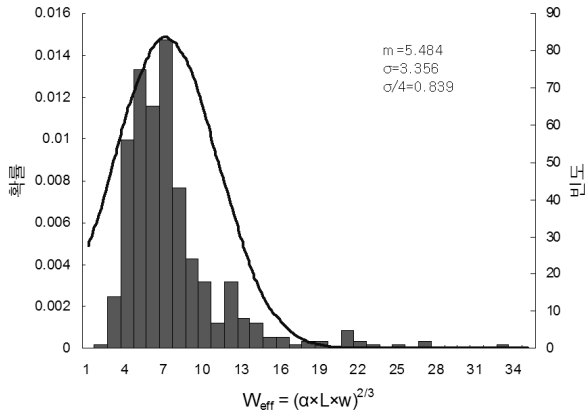
$$W_{\text{eff}} = (\alpha \times \text{LENGTH} \times \text{WIDTH})^{2/3} \quad (13)$$

여기서, α는 상부형식에 따른 단위중량의 상대적인 비를 나타내는 계수로서 상부중량이 가장 무거운 PSCB를 1.0으로 하여 표 6과 같이 나타내었다.

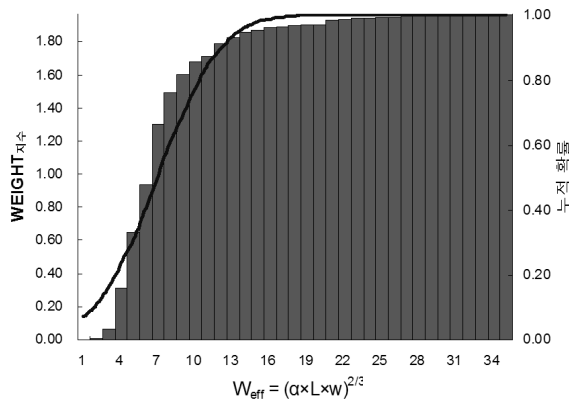
〈표 6〉 상부구조 형식별 α값

상부구조	α	상부구조	α	상부구조	α
PSCB	1.0	RCT	0.7	PF	0.6
RCS	0.8	RCB	0.7	STB	0.5
RCH	0.8	PSCS	0.7	STI	0.5
PSCH	0.8	PSCI	0.6	SPG	0.5

※ PSCB:PSC박스거터교, RCS:RC슬래브교, RCH: RC중공슬래브교, PSCH:PSC중공슬래브교, RCT:RC T빔교, RCB:RC박스거터교, PSCS:PSC슬래브교, PSCI:PSC I빔교, PF:프리플렉스거터교, STB:강박스거터교, STI:강I거터교, SPG:플레이트거터교



〈그림 4〉 W_{eff}의 도수분포 그래프



〈그림 5〉 WEIGHT_{지수}의 누적확률 그래프

상부중량 지수(WEIGH_{지수})를 정량화하기 위하여 내진성능 상세평가가 수행된 442개 교량에 대하여 W_{eff}의 분포를 그림 4에 나타내었다. W_{eff}의 분포가 정규분포라고 가정하여 평균값(*m*)과 표준편차(*σ*)를 산정하면 각각 5.484, 3.356이다. 기존 교량으로부터 W_{eff}가 산정되면 이는 식 (14)와 같이 평균값(*m*)과 표준편차(*σ*)의 배수로 표현할 수 있다. 이를 식 (15)와 같이 평균값으로 정규화하여 상부중량 지수(WEIGH_{지수})를 정량화하였다. 이렇게 평균값으로 정량화함으로써 평균값을 갖는 W_{eff}의 WEIGH_{지수}가 1.0이 되고 취약도지수(VI)에서 WEIGH_{지수}의 기여도를 당초 의도대로 30% 수준을 확보할 수 있게 된다. W_{eff}와 WEIGH_{지수}의 상관관계를 그림으로 나타내면 그림 5와 같다.

$$W_{eff} = m \pm k \cdot \sigma \tag{14}$$

$$WEIGHT_{지수} = \frac{W_{eff}}{m} = 1 \pm k \frac{\sigma}{m} \tag{15}$$

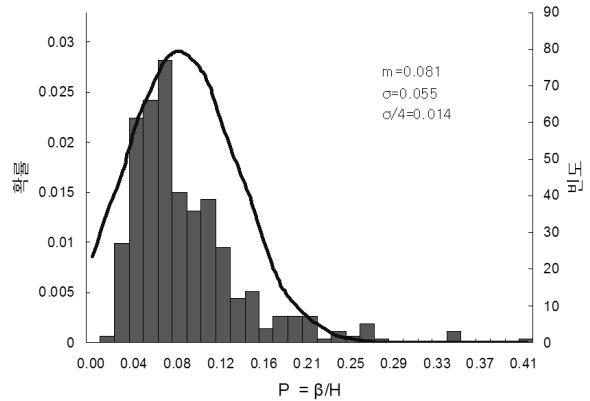
3.2.2 하부구조형태(PIER_{지수})의 정량화

PIER_{지수}는 하부구조의 형식과 제원적 특성에 따른 지진

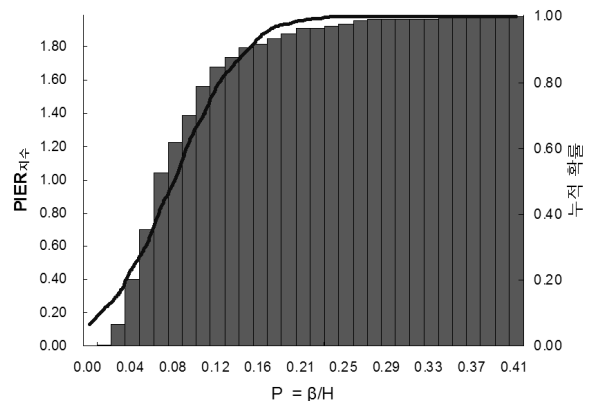
〈표 7〉 하부구조 형식별 β값

하부구조	β	하부구조	β	하부구조	β
GP	1.0	RP	0.7	RAP	0.5
SGP	1.0	TP	0.6	ARP	0.5
WLP	0.8	VP	0.6		

※ GP:중력식, SGP:반중력식, WLP:벽식, RP:구주식, TP:T형, VP:V형, RAP:라멘식, ARP:아치식



〈그림 6〉 P의 도수분포 그래프



〈그림 7〉 PIER_{지수}의 누적확률 그래프

취약도를 나타낸 것으로 식 (16)으로부터 식 (17)과 같이 정의하였다. 식 (16)에서 β는 하부구조 형식에 따른 계수로서 지진에 가장 취약한 GP 및 SGP에 대한 값을 1.0으로 하여 철근의 유·무, 코핑의 유·무, 단주 혹은 다주형식에 따라 취약도를 상대적인 값으로 표 7과 같이 나타내었다.

한편, 교각의 길이가 짧을수록 지진하중에 대한 전단파괴의 위험성이 높아지므로 교각의 높이(H)로 나누어 정량화하였다.

$$P = \beta / H \tag{16}$$

기존 교량 442개에 대한 P의 분포는 그림 6과 같다. 정규분포로 가정하는 경우 평균값과 표준편차는 각각 0.081, 0.055이다. P와 PIER_{지수}의 상관관계는 그림 7과 같다.

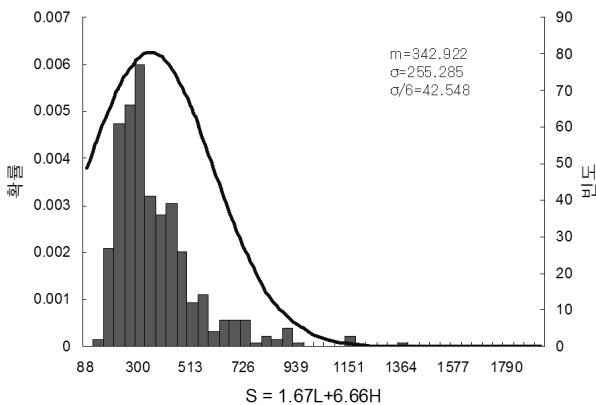
$$PIER_{지수} = \frac{P(= m \pm k\sigma)}{m} = 1 \pm k \frac{\sigma}{m} \quad (17)$$

3.2.3 받침지지길이(SUPPORT_{지수})의 정량화

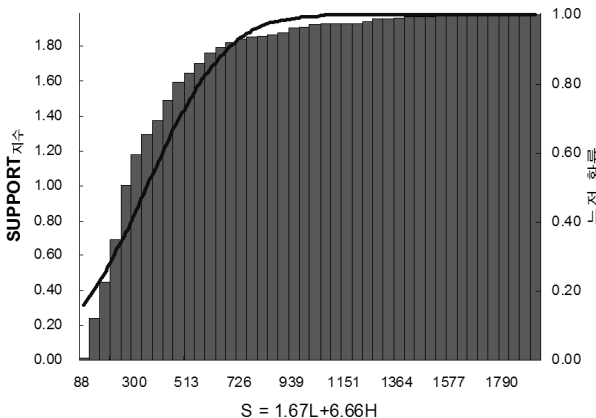
SUPPORT_{지수}는 설계지진 시 상부구조의 낙교에 대한 위험지수이다. 식 (18)의 S는 현행 ‘도로교설계기준(2005)’이 제시한 받침지지길이 공식에서 사잇각 및 상수부분을 제외한 부분으로서 교량에서 제일 취약한 연속부의 받침지 길이를 나타낸 것이다.

$$S = 1.67L + 6.66H \quad (18)$$

여기서, L과 H는 각각 연속경간장(m)과 교각높이(m)이다. 기존 442개의 평가교량에 대한 S의 분포는 그림 8과 같고, 평균값과 표준편차는 각각 342.9, 255.3이다. S를 식 (15)와 같은 개념으로 정규화하여 SUPPORT_{지수}를 산정하였다. S와 SUPPORT_{지수}의 관계는 그림 9와 같다.



〈그림 8〉 S의 도수분포 그래프



〈그림 9〉 SUPPORT_{지수}의 누적확률 그래프

3.2.4 사잇각(SKEW_{지수}) 및 교량수명(AGE)의 정량화

SKEW_{지수}는 사잇각이 커질수록 낙교에 대하여 불리하므로 이를 고려한 것이다. 기존의 평가와 동일하게 교량의 받침선과 교축직각방향의 사잇각의 크기로 평가하고 변별력을 두기 위해 식 (19)와 같이 좀 더 세분화하여 정량화하였다. 한편 교량수명에 대한 취약도는 기존식과 동일하게 적용하였다.

$$SKEW_{지수} = \theta \text{에 따른 점수} \quad (19)$$

여기서, 교량의 받침선과 교축직각방향의 사잇각으로가 10미만, 30미만, 45미만, 60미만 및 60이상인 경우 SKEW_{지수}는 각각 0, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0이다.

3.3 영향도 계수(Impact Coefficient, IC) 정량화

기존의 영향도 계수 산정에서 고려하고 있는 항목을 동일하게 고려하여 식 (20)과 같이 정식화하였다. 이는 2.2절에 기술된 기존 평가식의 문제점을 개선하고, 취약도의 개선에서와 같이 일부 항목(ADT_{지수} 및 DETOUR_{지수})에 대해서는 기존 442개 교량의 영향도 계수 항목에 대한 통계 값에 근거하여 산정함으로써 기존의 직관적 판단에 공학적 의미를 부여하였다.

$$\begin{aligned} \text{개선(IC)} = & 0.30(ADT_{지수}) + 0.20(LEVEL) + 0.20(CATEGORY) + \\ & 0.10(UTILITY) + 0.10(FACILITY) + 0.10(DETOUR_{지수}) \end{aligned} \quad (20)$$

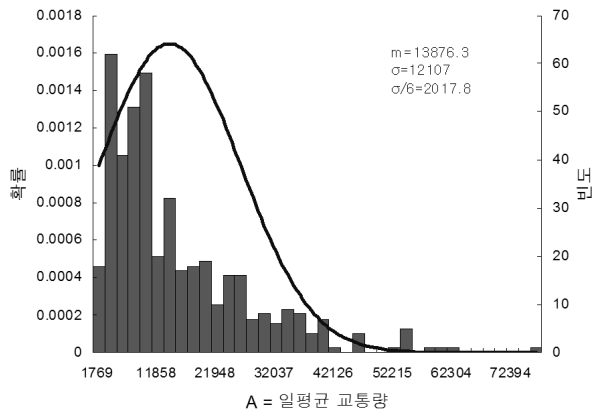
여기서, 각 항목의 정의는 식 (2)와 동일하다.

3.3.1 교통량지수(ADT_{지수}) 및 우회도로지수(DETOUR_{지수})의 정량화

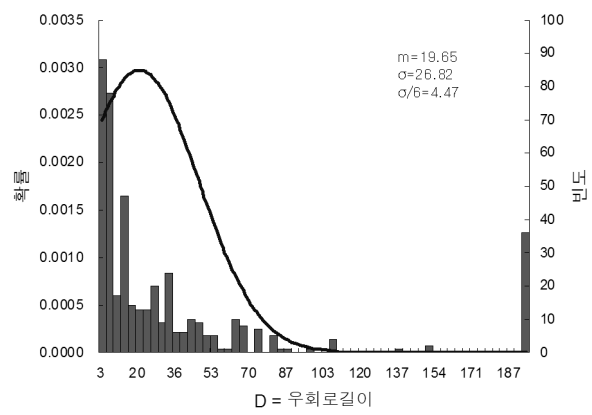
442개 교량의 일 교통량(A)과 우회도로길이(D)를 조사하여 평균값과 표준편차를 산정하면, A는 각각 13,876.3, 12,107이고, D는 각각 19.65, 26.82이다. 그림10과 그림 12에 이들의 도수분포를 나타내었으며, ADT_{지수} 및 DETOUR_{지수}는 VI 정식화에서와 같이 이들 값을 평균값으로 정규화하여 정식화하였다. A-ADT_{지수} 및 D-DETOUR_{지수}의 상관관계는 그림 11과 그림 13과 같다.

3.3.2 기타 항목의 정량화

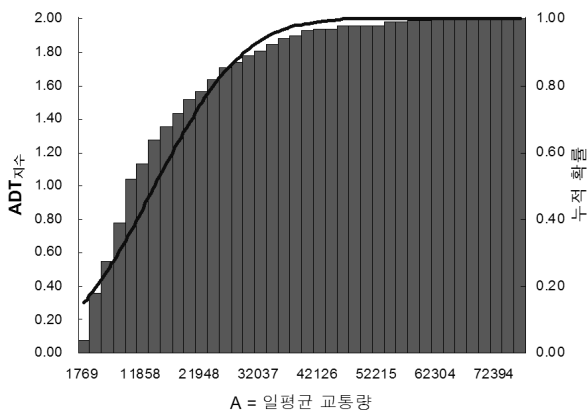
교통량지수와 우회도로지수를 제외한 다른 항목은 등급 또는 종별로 구분되어 있어 연속적인 데이터를 얻을 수 없



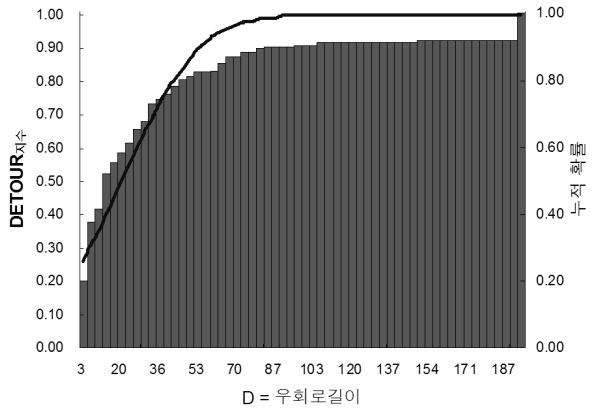
〈그림 10〉 A의 도수분포 그래프



〈그림 12〉 D의 도수분포 그래프



〈그림 11〉 ADT_{자수}의 누적확률 그래프

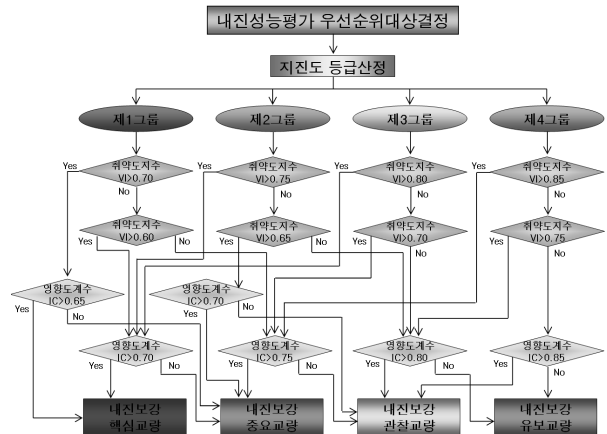


〈그림 13〉 DETOUR_{자수}의 누적확률 그래프

는 평가항목이다. 따라서, 기존 평가식과 같은 등급 또는 중별로 구분하였다. 다만 등급 또는 중별에 대해 부여점수를 다소 조정하였다.

3.4 내진그룹화 흐름도의 개선

그림 1과 같이 기존의 내진 그룹화 흐름도에서는 취약도 지수와 영향도계수의 분류계급이 크고 단순화 되어 교량의 내진등급이 지진도 등급산정에 지나치게 크게 좌우되는 단점을 지니고 있다. 이에 본 연구에서는 그림 14에서와 같이 취약도지수와 영향도계수의 계급을 세분화하고 다단계화하여 교량의 내진그룹화에서 이들 영향이 효율적으로 반영될 수 있도록 개선하였다.



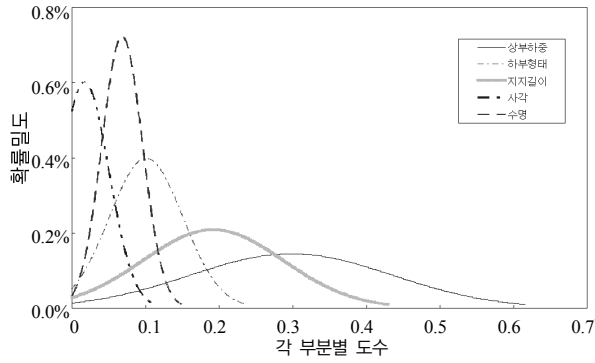
〈그림 14〉 개선 내진그룹화 흐름도

4. 우선순위 결정법의 비교·분석

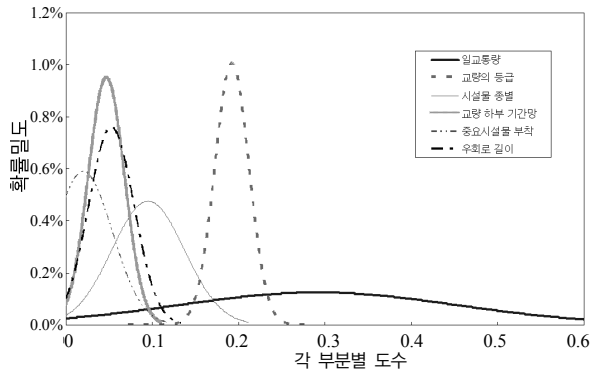
4.1 취약도지수 및 영향도계수의 결과 비교

국도상 442개 교량에 대해서 기존방법과 개선된 방법에 의하여 취약도지수와 영향도계수를 산정하여 그 결과를 비교·분석하였다. 표 8과 표 9는 개선된 방법으로 산정된 취약

도지수와 영향도계수의 각 항목별 및 전체의 최대값, 최소값, 평균값, 표준편차를 나타낸 것이며, 그림 15와 그림 16은 각 항목의 도수분포 그래프이다. 표 2는 기존 VI에 의해 산정된 결과이며 각 항목의 평균값이 전체 평균에서 차지하는 비율과 식 (1)에서 각 항목의 평균적인 기여도(계수값)를 함께 나타내었다. 연속경간수와 연속경간장 및 교폭의 평균값이 VI의 평균값에 차지하는 비율이 각각 41.2%, 23.2% (합은 65%)이며, 이 들 값의 기대기여도가 각각 20%, 15%



〈그림 15〉 개선 VI값 산정시 각부분별 도수분포 그래프



〈그림 16〉 개선 IC값 산정시 각부분별 도수분포 그래프

인 점을 고려하면 VI 산정에 두 항목이 기대치 이상으로 지나치게 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 그림 2는 확률 밀도함수로 상부구조의 중량에 영향을 주는 주요 항목 중의 하나인 연속경간수 및 교폭이 또 다른 주요 항목인 연속경간수에 비해 상대적으로 분산도가 작아(표 2에서 표준편차 0.013) 변별력이 많이 떨어지는 것을 알 수 있다. 표 8은 개선된 VI로 상부구조의 유효중량의 평균값이 전체 VI에서 44.0%를 차지하여 기존 방법에 비해 많이 개선된 것을 확인할 수 있다. 유효중량, 하부형태, 지지길이의 평균값의 비율이 기대 기여도 보다 다소 높게 산정되고 있는데 이는 교량의 수명과 사각 항목을 평가하는데 있어 평균값으로 정규화하지 않아 이들 항목의 비율이 많이 작아져서 유효중량, 하부형태, 지지길이의 비율이 상대적으로 올라갔기 때문이다. 그림 15는 개선된 방법의 항목별 확률밀도함수로 교량의 파괴와 관련 주요요소인 상부구조 유효중량과 상부구조 낙교와 관련한 받침지지길이가 폭 넓게 분포되어 상당한 변별력을 이들 취약도로 평가할 수 있는 것을 알 수 있다.

표 9는 개선된 IC에 의해 산정된 결과이다. 교통량의 비율이 41.7%로 가장 중요한 평가항목이다. 당초 기대치 30%보다 다소 큰 비율을 나타내고 있는데 이는 우회도로 길이를 제외한 다른 항목들의 데이터 값이 연속적인 값 보다는 등급, 종류 또는 종별과 같은 그룹에 대해 최대 1.0을 갖는

〈표 8〉 각 부분에 대한 최대값, 최소값, 평균값 (개선 VI값)

구 분	유효 중량	하부 형태	지지 길이	사각	교량 수명	VI
최대값	0.589	0.198	0.390	0.100	0.160	1.269
최소값	0.063	0.022	0.064	0.000	0.036	0.321
평균 (%)	0.298 (44.0)	0.101 (14.9)	0.192 (28.4)	0.013 (2.6)	0.068 (10.1)	0.677
표준편차	0.138	0.049	0.096	0.023	0.028	0.198
기대 기여도(%)	30	10	20	20	20	식 (3)에서 계수값

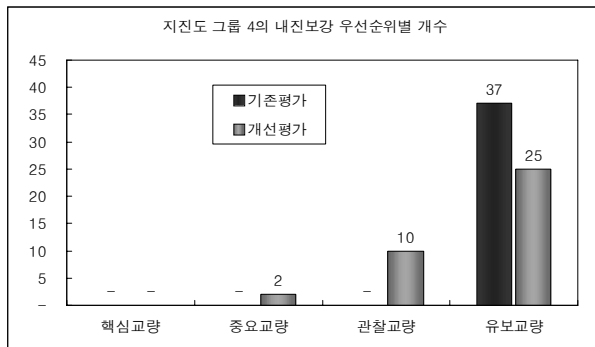
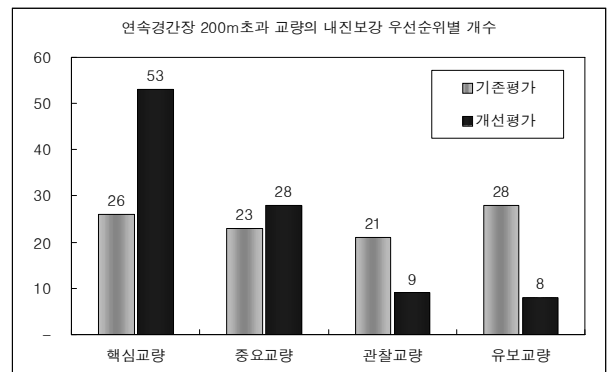
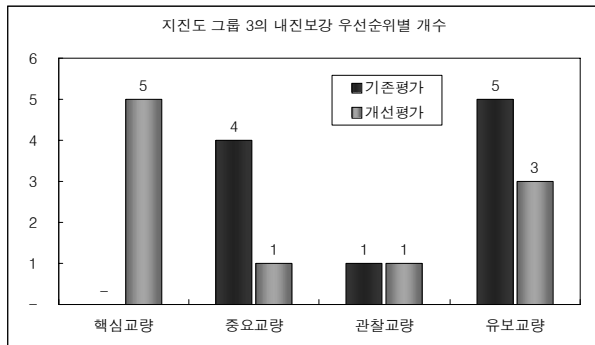
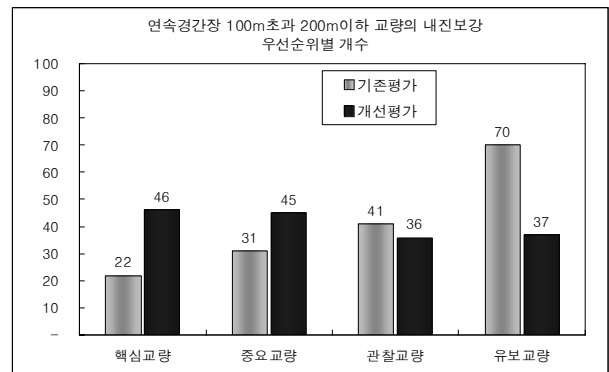
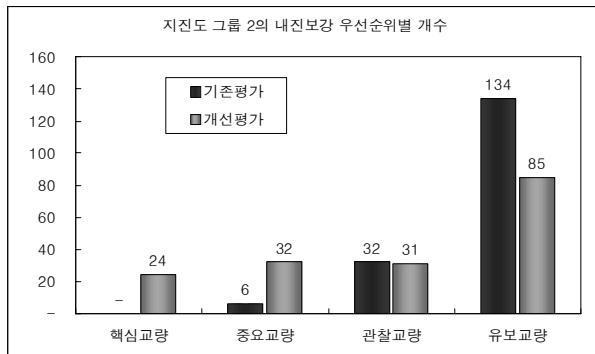
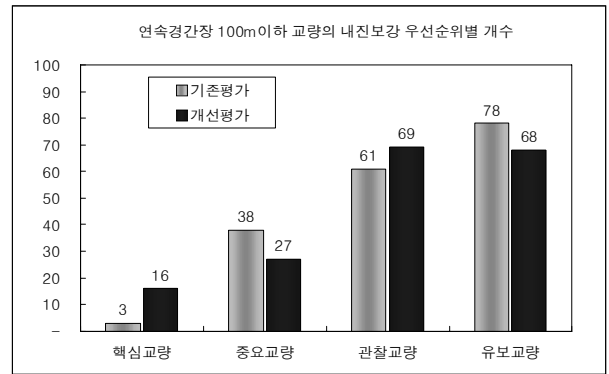
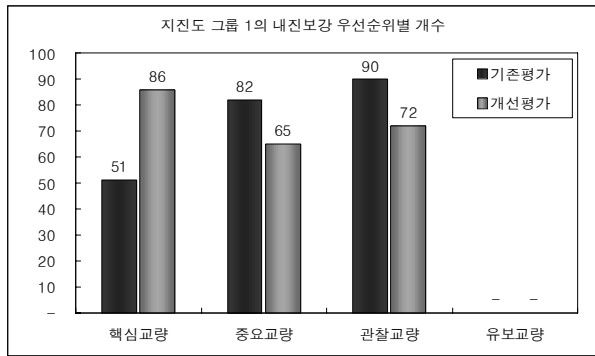
〈표 9〉 각 부분에 대한 최대값, 최소값, 평균값 (개선 IC값)

구 분	교통량	설계 등급	시설물 종별	하부통행 기간상	시설물 부락	우회로 길이	IC
최대값	0.591	0.200	0.140	0.100	0.080	0.096	1.138
최소값	0.090	0.140	0.000	0.000	0.000	0.026	0.353
평균 (%)	0.292 (41.7)	0.193 (27.5)	0.095 (13.6)	0.047 (6.7)	0.021 (2.9)	0.053 (7.6)	0.701
표준편차	0.161	0.020	0.020	0.021	0.034	0.026	0.182
기대 기여도 (%)	30	20	20	10	10	10	식 (20)에서 계수값

이산화 된 값을 사용하는 것이 편리해서 평균에 대해 정규화하지 않았다. 그 결과 이들 항목의 차지 비율이 작아져서 교통량의 비율이 상대적으로 증가하였기 때문이다. 향후 좀 더 개선할 부분이기도 하다. 기존 기법에서는 설계등급과 시설물종별을 곱의 형태로 평가함으로써 기타교량에 대한 평가가 제대로 수행되지 않았으나 개선된 평가에서는 이를 분리하였으며 두 항목의 전체 IC에서 차지하는 비율이 각각 27.5%, 13.6%(합은 41%)로 기대치 40%에 유사하게 평가 되는 것을 알 수 있다. 한편, 2.2.3절)에서 기술한 바와 같이 기존 기법에서는 IC의 평균과 표준편차가 각각 0.56, 0.121로 VI의 0.69와 0.163의 각각 81%, 74%(표 2, 표 3 참조)로 작아 교량의 내진그룹화에 기여하는 정도가 상대적으로 크게 떨어지는 문제점이 있었으나 개선된 기법에서는 VI의 평균과 표준편차가 각각 0.677, 0.198이며 IC는 각각 0.701, 0.182로 VI의 103.5%, 91.9%(표 8, 표 9 참조)로 교량의 내진그룹화에 기여하는 수준이 거의 동등한 수준으로 크게 개선된 것을 확인할 수 있다.

4.2 교량의 내진그룹화 결과 비교

442개 교량에 대해 기존 방법과 개선된 방법으로 평가하여 내진그룹화에 어떠한 변화가 생기는지 비교분석하였다. 그림 17은 지진도 그룹에 따른 내진그룹화 결과를 비교한 것이다. 지진세기가 큰 지진도 1그룹의 경우 유보교량은 나오지 않았으며 개선된 방법에 의해 핵심교량이 다소 증가하였다. 지진세기가 중간정도인 지진도 2, 3에서는 기존 방법



〈그림 17〉 지진도 그룹에 따른 내진보강 우선순위별 개수

〈그림 18〉 연속경간장에 따른 내진보강 우선순위별 개수

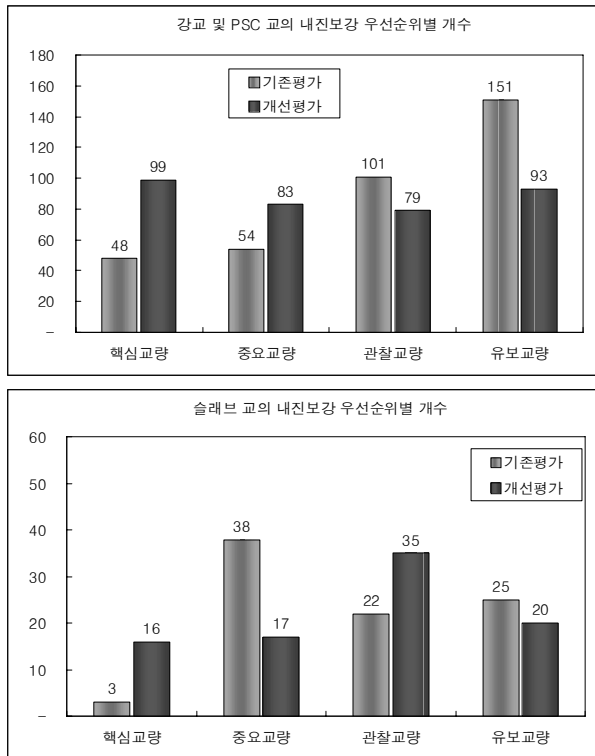
에서는 핵심교량 없이 중요교량 이하로만 분포되나 개선방법에 의해서는 모든 내진그룹으로 분류될 수 있음을 알 수 있다. 지진세기가 작은 지진도 4그룹에서는 기존방법으로는 유보교량만으로 분류되는데 이는 지진도그룹이 절대적인 영향을 가지고 있어 취약도 지수나 영향도 계수의 영향을 효과적으로 반영할 수 없는 방법이기 때문이다. 이에 반해 개선된 방법에서는 중요교량까지 내진그룹화 되어 교량의

취약도와 영향도가 적절하게 반영되고 있음을 알 수 있다.

그림 18은 연속경간장에 따른 내진그룹화 현황으로 연속경간장이 200m 이하인 교량에 대해서는 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나, 연속경간장이 200m를 초과하여 상부구조의 중량이 매우 커지는 교량에 대해서는 개선된 방법에 따라 핵심교량이 많아져 보다 합리적으로 분류됨을 알 수 있다. 그림 19는 상부구조형식에 따른 내진그룹화 현황으로 연속경간장이 긴 강교 및 PSC교의 내진보강 우선순위가 상향평가 되고, 연속경간장이 짧은 슬래브교는 하향평가가 되는 경향이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다.

5. 결론

기존에 사용되던 내진성능평가를 위한 우선순위 결정방



〈그림 19〉 상부구조형식에 따른 내진보강 우선순위별 개수

법의 비합리적인 부분을 개선하기 위해 본 연구를 진행하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 기존 우선순위 결정방법이 제안된 시기에는 기존교량의 내진성능 평가결과에 대한 자료가 축적되어 있지 않아 우선순위 결정에 미치는 영향인자를 다양하게 고려하고 공학자들의 직관적 판단에 의해 이를 적절히 정량화하였으나, 이는 실질적으로 얻을 수 있는 자료 또는 근거가 명확하지 않았다. 따라서 본 연구는 보다 명확한 기준 근거 자료를 제시하고자 진행되었으며, 기존의 방법보다 합리적이고 명확한 근거를 제시하였다.
- 2) 기존의 지진도 그룹 및 취약도 지수와 영향도 계수에서 비합리적이고 모순되게 평가되었던 항목들을 세분화 및 정량화하였고, 또한 내진그룹화 흐름도를 세분화시켜 우

선순위 결정방법을 보다 합리화하였으며, 명확한 근거를 제시하였다.

- 3) 국도상 442개의 기존 교량으로 기존평가 방법에서 개선평가 방법으로 평가하였을 시에 교량들이 각각의 지진도 그룹에서 보다 다양한 등급으로 분포되었으며, 기존의 우선순위가 높았던 연속경간장이 짧은 슬래브 교는 등급이 하향평가 되고, 연속경간장이 긴 강교 및 PSC교는 등급이 상향평가 되는 경향이 뚜렷하게 나타났다. 따라서 본 연구의 개선된 내진보강 우선순위 결정방법이 기존 기법을 수정 및 보완할 수 있었고 보다 합리적인 평가방법이라고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 연구비 지원(기존교량의 내진성능 평가 및 향상요령 보완-개정연구)에 의해서 수행 되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 한국시설안전기술공단, 기존교량의 내진성능 평가 및 향상요령, 2004.
2. 박광순, 주형석, 최홍철, 김익현, “국도상 기존교량에 대한 내진성능 예비평가의 고찰,” 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, 2009.3., pp.121-128.
3. 시설안전기술공단, 기존교량의 내진성능 평가 및 보강방안, 1999.
4. 국토해양부, 교량현황조사서, 2008.
5. 한국도로교통협회, 도로교 설계기준, 2005.
6. 시설안전기술공단, 국도상 기존교량의 내진성능 평가 및 보강방안 연구, 2001.
7. 한국시설안전기술공단, 교량내진보강을 위한 성능평가 연구보고서(1차-3차), 2006-2008.
8. 한국도로공사, 고속도로 교량의 내진설계지침 개정 및 기존교량의 내진성능 향상을 위한 실험적 연구(I), 2000.