

교량 집단의 특성 수준간 통계적 응답 동질성 검정 및 다중 비교 분석

Statistical Homogeneity Tests and Multiple Comparison Analysis for Response Characteristics between Treatments of Bridge Groups

황진하^{1)*}
Jin-Ha Hwang

김주한²⁾
Ju-Han Kim

안승수³⁾
Seoung-Su An

Abstract

This study tests homogeneity and performs multiple comparison analysis among treatment levels of each factor group through t-test by materials and analysis of variance by structural type and service period. For that descriptive statistical analysis is performed for static and dynamic response characteristics and their ratios of calculated versus measured values based on a good many safety assessment reports for bridges. Homogeneity and post hoc test based on descriptive statistical analysis provide the measures for homogeneity identification among comparison groups in addition to the statistical reference values such as central tendency, variation and shape. This study is expected to be valuable for structural integrity assessment and design by comparing the measured and calculated values with the reference values for the homogeneous group identified, which can help the engineers review the adequacy of the values and put the group database to practical use.

Keywords : Homogeneity tests, Structural Integrity assessment, ANOVA, Multiple comparison, Descriptive statistics, Response ratio, Natural frequency, Impact factor

1. 서론

교량 등 사회기반 시설물은 공용기간에 따라 통행 하중 및 주변 환경의 영향으로 손상 및 열화가 발생한다. 따라서 관리 주체는 교량의 안전성을 확보하기 위하여 정기적으로 또는 필요에 따라 건전성을 평가한다.

내하성, 내구성 및 사용성을 포함하는 건전성 평가는 이력 검토 및 육안 점검, 각종 시험 및 계측, 구조해석 및 보정 등 여러 가지 방법이 개별적 또는 종합적으로 활용되고 있다. 최근 시험적 (symptom-based method) 및 이론적 방법 (model-based method)들이 첨단 컴퓨터와 센서 네트워크를 기반으로 IT와 기계 전자공학 (mechatronics) 등과 융합하며 SI (system identification) 분야 연구가 보다 실용적으로 발전하고 있다.

안전성 평가의 접근방향으로 보면, 감시 기준치를 설정하여 이상발생을 감지하고 이상상태를 판별하는 시험적 접근

방법 (experimental approach), 반응 모델 (response model)로부터 주파수 응답함수 (FRF ; frequency response function)를 구하고 모드 모델 (modal model)과 공간 모델 (spacial model)로 역해석하여 시스템을 확인·정정하는 해석적 접근방법 (analytic approach)과 시험, 해석, 보정, 평가 등으로 구조 내하성능을 평가하는 종합적 접근방법 (synthetic approach)으로 나누어 볼 수 있다.

내하 성능 평가는 해당 교량이 안전하게 지지할 수 있는 활하중 저항능력을 정량적으로 평가하는 것으로 현장조사, 재료시험, 구조계산, 재하시험 등의 절차를 통해 이루어지고 그 결과를 교량의 정밀안전진단 및 유지관리업무의 기초자료로 활용한다.

여기서 외관점검과 비파괴검사 및 현장재하시험은 각각 뚜렷한 적용의 한계를 갖는다. 이론적인 전산 수치해석은 많은 가정을 전제한다. 그러나 교량은 재료의 열화, 지지조건

1) 정회원, 충북대학교 토목공학부 교수, 교신저자
2) 정회원, 충북대학교 토목공학부 강사
3) 정회원, 한국시설안전공단 진단평가실 부장

* Corresponding author : jhhwang@chungbuk.ac.kr
• 본 논문에 대한 토의를 2014년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2014년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

의 변화, 합성작용, 실제 하중분배, 사용 손상 등으로 이러한 가정은 비현실적이며 실제 거동은 이론적인 해석치와 상이하여 구조진단에 세심한 분석과 보정이 필요하다. 공학 분야 전반에 걸쳐 활발히 연구 축적되고 있는 SI 기법은 제한된 동적 자유도에 대한 응답 예측으로는 실효성을 갖기에 아직 미흡하다.

그런 점에서, 다양한 환경 조건에서의 구조 응답 및 평가에 대한 공학적 판단을 위해서는 구조 진단 사례를 통한 통계학적 분석이 유용하며, 이것은 기본적으로 이론적 해석치와 시험으로부터 얻은 측정치의 차이를 이해하는데 효과적이다.

통합 구조진단시스템의 주요 요소인 DSP (digital signal processing)와 SI의 주요 기법 중의 하나인 신경망 (ANN ; artificial neural networks) 분야에서도 통계학적 접근방법이 활발히 결합 응용되고 있는 점에 비추어 보더라도 그것은 앞에서 언급된 기반 이론 및 기술을 연결 보완해줄 수 있는 유용한 방안이라 할 수 있다. 그러나 아직 통계학적 접근을 위한 연구는 대단히 미흡하다. Kim et al. (1999)은 기존의 내하력 평가자료에 대한 통계분석을 통해 교량의 구조거동상태를 충분히 반영할 수 있는 응답비 및 충격계수의 선정기준을 제안하였다. Lee et al. (2009)은 고속도로 교량의 실측자료를 기초로 다양한 변수를 고려하여 공용내하력을 통계적으로 비교·분석하였으며, 합리적인 고속도로 교량의 안전성 평가 방안에 대해 고찰하였다. An (2012)는 사례기반 분석 및 통계적 품질관리의 관리도 개념을 도입, 원용하여 구조 건전성 평가의 절차 및 방법에 관한 개선된 프레임워크를 제시하였다. 교량 구조물의 형식별 안전율, 내하율 등에 대한 통계적 분석을 통하여 재하시험 수행여부에 대한 정량적인 기준을 제시함으로써 기술자 또는 진단자의 의사결정에 도움을 주는 한편, 합리적인 응답보정 판별조건을 제안하여 내하력 평가에 신뢰성을 부여하였다.

토목시스템은 규모가 크고 복잡하며 유사사례는 많지만 직접 경험하거나 동일한 프로젝트는 없고 바로 참조할 사례는 의외로 부족하다. 새로운 진단/설계/계획 프로젝트에 대하여 기존 사례들로부터 쉽게 적용할 수 있는 특성 동질성을 확인할 수 있다면, 각각의 설계 혹은 진단 환경에서 프로젝트 조직이나 개인은 프로젝트의 착수부터 종료에 이르기까지 시행착오를 줄이면서 합리적으로 그것을 이끌어 갈 수 있을 것이다.

본 연구의 목적은 진단 사례에 근거하여 교량 집단의 응답 특성에 대한 통계적 대표값 및 분포를 파악하고 그것을 기초

로 부집단 간 동질성을 식별할 수 있는 통계적 근거 및 레퍼런스를 제공하는 것이다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 먼저 내하성능 평가 및 손상추정 모델로부터 통계분석에 필요한 요인변수를 결정한 후, 구조 재료, 형식 및 공용기간에 따른 정·동적 응답 특성에 대한 기술통계분석을 수행하고, T-검정 및 분산분석을 통해 특성 부 집단 간 통계적 동질성 검정과 다중 비교를 수행한다.

2. 기술 통계 분석

2.1 통계 분석 표본

본 연구에서 활용한 통계분석 표본은 2003년부터 2010년까지 한국시설안전공단에서 수행한 안전점검 및 정밀안전진단 사례 중에서 공용내하력 평가 수행 빈도가 높은 PCB (Prestress Concrete Box Girder), PCI (Prestress Concrete I Girder), SBG (Steel Box Girder), SPG (Steel Plate Girder), TR (Truss) 등 5개 형식의 각 37/12/48/28/14개소, 도합 139개소의 교량으로 구성되었다.

본 연구는 상용프로그램인 SPSS를 사용하여 대표값, 산포도, 분포형태 등에 관한 기술통계분석을 수행하였다. 분석에 앞서 표본으로부터 이상치 및 특이치들을 식별, 배제하기 위해 자료의 분포를 극단값 (최소값, 최대값)과 사분위수 (1사분위수, 중위수, 3사분위수)로 상자에 표현한 상자수염 (box-whisker)그림을 이용하였다. 이들은 자료의 무리로부터 비정상적으로 떨어져 있는 관측치 (1사분위수에서 사분위수범위의 1.5배를 뺀 값보다 작거나 3사분위수에서 사분위수범위의 1.5배를 더한 값보다 큰 경우)로서 발생 빈도는 매우 낮지만 그 집단의 특성치인 평균, 분산 등에 미치는 영향은 매우 크기 때문이다 (Choi et al., 2010; Peck et al., 2001).

2.2 분석 모형, 요인 및 반응 변수

교량의 여러 부집단 간 동질성을 식별 검정하기 위한 첫 단계는 통계적 분석 모형을 구성하는 특성 요인과 반응 변수를 결정하는 것이다. 즉 내하력평가나 손상추정에 영향을 미치는 중요한 인자를 선정해야 한다.

내하 성능 평가는 현재 교량 내하력의 설계 활하중에 대한 비율을 나타내는 공용내하력을 구하는 것으로 실제 구조물과 구조해석 모델의 응답 차이를 응답보정계수 K_s 를 통하여 보정한다. 응답보정계수는 처짐 (δ)과 변형률 (ϵ)에 대해 계

산할 수 있으며, 공용내하력 P 는 식 (1)과 같이 산정한다. 여기서 내하율은 허용응력설계법에 의한 경우 식 (2), 강도설계법에 의한 경우 식 (3)과 같이 산정한다 (MLTM, 2010).

$$P = K_s \times RF \times P_r \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } K_s &= \frac{\delta_{calculate}}{\delta_{measure}} \cdot \frac{1 + i_{calculate}}{1 + i_{measure}} \quad \text{또는} \\ &= \frac{\epsilon_{calculate}}{\epsilon_{measure}} \cdot \frac{1 + i_{calculate}}{1 + i_{measure}} \end{aligned}$$

RF = 내하율
 P_r = 설계 활하중

$$RF = \frac{f_a - f_d}{f_l(1 + i)} \quad (2)$$

여기서, f_a = 실측 허용응력
 f_d = 실측 고정하중에 의한 응력
 f_l = 설계 활하중에 의한 응력
 i = 충격계수

$$RF = \frac{\phi M_n - \gamma_d M_d}{\gamma_l M_l (1 + i)} \quad (3)$$

여기서, ϕM_n = 극한저항모멘트
 M_d = 실측 고정하중모멘트
 M_l = 설계 활하중에 의한 모멘트
 γ_l = 활하중 계수 = 2.15
 γ_d = 고정하중 계수 = 1.30

손상추정을 위한 시스템식별은 손상전후 또는 기본계와 손상계의 시스템방정식모델을 정의하고, 손상계에 대한 모드 시험으로 측정된 반응변수에 대한 손상된 모드특성과 구조모수를 역해석하는 것으로 이루어진다.

비감쇠 N 자유도계의 경우, 자유진동 운동방정식은

$$[M] \{\ddot{x}\} + [K] \{x\} = \{0\} \quad (4)$$

으로 표현하고 모드좌표계로 변환하면,

$$[I] \{\ddot{p}\} + [\omega_r^2] \{p\} = \{0\} \quad (5)$$

$$\{x\} = [\Phi] \{p\} \quad (6)$$

으로 정의된다.

기본계로부터 수정된 손상계의 시스템방정식은

$$([M] + [\Delta M]) \{\ddot{x}\} + \quad (7)$$

$$([K] + [\Delta K]) \{x\} = \{0\}$$

또는 모드변환을 통해

$$([I] + [\Phi]^T [\Delta M] [\Phi]) \{\ddot{p}\} + \quad (8)$$

$$([\omega_r^2] + [\Phi]^T [\Delta K] [\Phi]) \{p\} = \{0\}$$

으로 기술할 수 있다 (Maia et al., 1997). 여기서 변경된 질량 및 강성도 매트릭스를

$$[M^*] = [I] + [\Phi]^T [\Delta M] [\Phi] \quad (9)$$

$$[K^*] = [\omega_r^2] + [\Phi]^T [\Delta K] [\Phi] \quad (10)$$

라 놓고 정정된 방정식을 풀면 측정된 손상계의 주파수 응답함수 또는 리셉턴스 (receptance)로부터 고유치와 고유벡터를 얻고, 다시 손상계의 공간모델로부터 변화된 강성을 구한다 (Maia et al., 1997).

교량의 정·동적 거동과 같이 실제 측정 또는 계산되는 반응변수 (response variable)에 영향을 미치는 구조 재료와 형식 및 공용기간 등의 인자 또는 요인 (factor)으로 교량 집단을 구분할 때 이들의 하부 집단인 부집단 (subgroup)은 분석의 처리 수준 (level)이라 한다. 동질성 검정 (homogeneity tests)은 특정 유의수준 (significance level)에서 각 부집단의 응답특성이 서로 같은가 또는 다른가를 식별·파악하는 것이다.

본 장에서는 식 (1)과 (8)로부터 공용내하력 산정 및 손상추정에 영향을 미치는 주요 반응변수로 응답, 충격계수와 그들의 비 값 (ratio) 및 고유진동수를 선정하여 통계적 중심성향과 산포성 및 형태 등에 관한 기술통계분석을 수행하였다 (Chang et al., 1988; Ewins, 2000; Jung et al., 2009; Yi et al., 2004).

2.3 응답비

$$i = \frac{15}{40 + L} \leq 0.3 \quad (11)$$

응답비는 시험차량을 재하하여 측정된 실 구조물의 변형치 (또는 처짐)에 대한 구조해석 결과치 (변형 또는 처짐)의 비로 산정한다.

대상 교량에 손상 및 열화가 발생하지 않은 경우 응답비는 1.0 이상으로 구조적 여유도를 갖는 반면, 손상 및 열화가 발생하여 강성이 저하될 경우 응답비는 1.0 이하로 산정된다 (KISTEC, 2006).

이상치를 배제한 응답비에 대한 기술통계량을 Table 1에 나타냈다. 응답비의 평균은 모두 1.0을 초과하고 있으며, PCI 형식은 1.151로 다른 형식에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 분산의 정도는 SBG 형식이 평균을 중심으로 가장 밀집되어 있고, PCI 형식이 가장 넓게 분산되어 있다. 최소값은 SPG 형식이 가장 작고 SBG 형식이 가장 크게 나타났으며, 최대값은 TR 형식이 가장 작고 PCI 형식이 가장 크게 나타났다. 범위는 TR 형식이 가장 작고 PCI 형식이 가장 크게 나타났다. 왜도는 SPG 형식이 음의 값으로 큰 값들의 빈도가 높지만, 다른 형식들은 양의 값으로 작은 값들의 빈도가 높게 나타났으며, TR 형식은 좌우대칭에 가깝다. 첨도는 PCI, SBG 형식들이 양의 값으로 표준정규분포보다 중심점 주위에 더 많이 밀집해 있는 것으로 나타났지만, 다른 형식들은 표준정규분포보다 밀집도가 작은 편으로 나타났다.

2.4 충격계수

도로교 표준시방서에서 충격계수 i 는 식 (11)과 같이 교량의 시간 L 의 함수이며 시간이 짧을수록 충격계수는 커지지만 최대 0.3을 초과할 수 없다 (MLTM, 2010).

이것은 교량의 노면조도, 차량의 주행속도, 시간장, 고정하중과 활하중의 비, 구조적 특성 등 다양한 인자들에 의해 결정되며, 현 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침 (MLTM, 2010)에서는 내하력 산정 시 도로교 표준시방서의 설계 충격계수가 아닌 실측 충격계수만을 적용하고 있다 (Koo et al., 2002).

실측 충격계수 (이하 측정충격계수)에 대한 기술통계량을 Table 2에 나타냈다. PCB 형식은 이상치가 7개로 다른 형식에 비해 이상치를 많이 포함하고 있다. 평균은 PCI 형식이 가장 크며 가장 작은 TR 형식은 다른 형식보다 30~45% 정도 작게 나타났다. 이들 형식은 다른 형식들과 상대적으로 큰 차이를 보이고 있다. 절대적으로 측정된 분산의 정도는 PCB 형식이 평균을 중심으로 가장 밀집되어 있고 TR 형식이 가장 넓게 분산되어 있지만, 상대적으로 측정된 분산의 정도는 SBG 형식이 가장 밀집되어 있고 TR 형식이 가장 넓게 분산되어 있다. 최소값은 TR 형식이 가장 작고 PCB 형식이 가장 크게 나타났으며, 최대값은 SBG 형식이 가장 작고 SPG 형식이 가장 크게 나타났다. 왜도는 PCB, TR 형식들은 작은 값들이, 다른 형식들은 큰 값들의 빈도가 높게 나타났다. 첨도는 PCB, PCI, SBG, TR 형식들이 중심점 주위에 더 많이 밀집해 있는 것으로 나타났다.

충격계수비 $((1 + i_{calculate}) / (1 + i_{measure}))$ 에 대한 기술통계량을 Table 3에 나타냈다. PCB 형식은 이상치가 12개로 다른 형식에 비해 이상치를 많이 포함하고 있다. 평균은 모든 형식이 1.0을 초과하고 있어 대부분 계산 충격계수가 실측 충격계수보다 크게 평가됨을 알 수 있으며, TR 형식이 상대적으로 크게 나타났다. 분산의 정도는 PCB 형식이 가장 밀집되어 있고, SPG 형식이 가장 넓게 분산되어 있다. 최소

Table 1 Statistic for response ratio

	PCB	PCI	SBG	SPG	TR
n	35	12	47	28	14
mean	1.075	1.151	1.061	1.005	1.004
S.D ¹⁾	0.118	0.197	0.065	0.114	0.082
C.V ²⁾	0.018	0.049	0.009	0.021	0.022
minimum	0.904	0.910	0.947	0.770	0.874
maximum	1.360	1.583	1.235	1.230	1.152
range	0.456	0.673	0.288	0.460	0.278
skewness	0.687	0.968	0.657	-0.178	0.016
kurtosis	-0.154	0.586	0.465	-0.369	-0.858

1) S.D : standard deviation

2) C.V : coefficient of variation

Table 2 Statistic for measured impact factor

	PCB	PCI	SBG	SPG	TR
n	30	12	46	28	14
mean	0.140	0.176	0.138	0.149	0.098
S.D	0.032	0.042	0.033	0.043	0.053
C.V	0.042	0.070	0.035	0.054	0.144
minimum	0.087	0.076	0.059	0.060	0.034
maximum	0.220	0.218	0.197	0.238	0.218
range	0.133	0.142	0.138	0.178	0.184
skewness	0.271	-1.226	-0.628	-0.078	0.868
kurosis	0.026	1.501	0.185	-0.194	0.288

Table 3 Statistic for impact factor ratio

	PCB	PCI	SBG	SPG	TR
n	25	11	47	28	14
mean	1.020	1.031	1.027	1.075	1.193
S.D	0.015	0.031	0.033	0.107	0.047
C.V	0.003	0.009	0.005	0.019	0.011
minimum	1.002	1.001	0.950	0.943	1.110
maximum	1.049	1.103	1.102	1.294	1.266
range	0.047	0.102	0.152	0.351	0.156
skewness	0.764	1.244	0.385	1.008	-0.435
kurtosis	-0.726	1.845	0.101	-0.376	-0.868

값은 SBG, SPG 형식은 1.0 이하이지만, PCB, PCI, TR 형식은 1.0 이상으로 이들 형식은 모두 계산 충격계수가 실측 충격계수보다 크게 평가되었다. 최대값은 PCB 형식이 가장 작고 SPG 형식이 가장 크게 나타났으며, 범위는 SBG 형식은 PCB 형식보다, SPG 형식은 PCI 형식보다 3배 이상 크게 나타났다. 왜도는 PCB, PCI, SBG, SPG 형식들이 작은 값들의 빈도가 높으며, 첨도는 PCI, SBG 형식들이 중심점 주위에 더 많이 밀집해 있는 것으로 나타났다.

2.5 고유진동수

구조물의 진동 특성은 해석적으로 구조물의 질량과 강성 및 감쇠 등에 직접 관계되나 실제 구조물은 기하학적 형상이나 지지조건 및 부부재 등에 따라 매우 복잡한 거동을 하게 된다. 실측 고유진동수는 교량의 노후화 또는 손상이 발생된 현상태를 반영하므로 특정 기간 전후의 측정치 비교를 통해 강성 및 질량 변화에 의한 영향을 파악하는데 도움을 준다.

건전도 또는 노후도의 지표가 되는 실측 고유진동수 (이하 고유진동수)의 분포를 Fig. 1에 나타냈다. PCB 형식의 분포가 가장 밀집되어 있으며, PCI 형식의 값들은 다른 형식에 비해 크게 나타났다.

고유진동수에 대한 기술통계량을 Table 4에 나타냈다. 통계적 이상치는 PCB 형식 6개, PCI 형식 4개, SPG 형식 6개 교로 다른 특성에 비해 이상치를 많이 포함하고 있는 것으로 나타났다. 평균은 PCI 형식이 가장 크며 가장 작은 SBG 형식보다 2.3배 정도 크게 나타났다. 분산의 정도는 PCB 형식이 평균을 중심으로 가장 밀집되어 있고, TR 형식은 가장 넓게 분산되어 있다. 최소값은 PCI 형식이 가장 크며 가장 작은 SBG 형식보다 3.6배 정도 크게 나타났으며, 최대값은 PCI 형식이 가장 크며 가장 작은 PCB 형식보다 1.9배 정도 크게 나타났다. 범위는 강교가 콘크리트교보다 크게 나타났

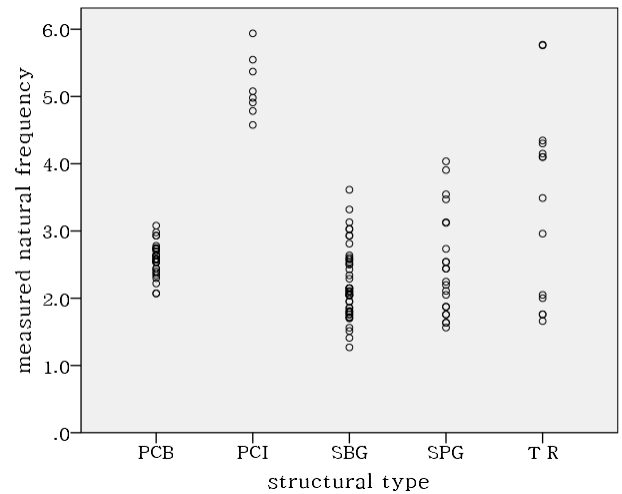


Fig. 1 Scatter plot for measured natural frequency

Table 4 Statistic for measured natural frequency

	PCB	PCI	SBG	SPG	TR
n	31	8	47	22	14
mean	2.581	5.148	2.222	2.482	3.443
S.D	0.240	0.444	0.520	0.755	1.436
C.V	0.017	0.030	0.034	0.065	0.111
minimum	2.070	4.577	1.269	1.563	1.660
maximum	3.080	5.938	3.613	4.036	5.770
range	1.010	1.361	2.344	2.473	4.110
skewness	-0.187	0.683	0.646	0.729	0.190
kurtosis	0.205	-0.099	0.058	-0.529	-1.126

Table 5 Statistic for natural frequency ratio

	PCB	PCI	SBG	SPG	TR
n	37	10	48	26	12
mean	0.911	0.966	0.939	0.976	0.975
S.D	0.060	0.036	0.053	0.046	0.047
C.V	0.011	0.012	0.008	0.009	0.014
minimum	0.812	0.890	0.823	0.873	0.910
maximum	1.023	1.001	1.037	1.068	1.045
range	0.211	0.111	0.214	0.195	0.135
skewness	-0.181	-1.124	-0.066	-0.451	-0.004
kurtosis	-1.028	0.946	-0.775	0.176	-1.385

으며, TR 형식이 가장 크며 가장 작은 PCB 형식보다 4.1배 정도 크게 나타났다.

고유진동수비에 대한 기술통계량을 Table 5에 나타냈다. 평균은 모든 형식이 1.0 이하로 대부분 실측 고유진동수가 계산 고유진동수보다 크게 평가됨을 알 수 있으며, 박스형태인 PCB, SBG 형식이 다른 형식에 비해 상대적으로 작게 나

타났다. 절대적으로 측정된 분산의 정도는 PCI 형식이 평균을 중심으로 가장 밀집되어 있고 PCB 형식이 가장 넓게 분산되어 있지만, 상대적으로 측정된 분산의 정도는 SBG 형식이 가장 밀집되어 있고 TR 형식이 가장 넓게 분산되어 있다. 최소값은 PCB 형식이 가장 작고 TR 형식이 가장 크게 나타났으며, 최대값은 PCI 형식이 가장 작고 SPG 형식이 가장 크게 나타났다. 범위는 SBG 형식이 가장 크며 가장 작은 PCI 형식보다 1.9배 정도 크게 나타났다. 왜도는 모든 형식들이 음의 값으로 큰값들의 빈도가 높으며, 첨도는 PCI, SPG 형식들이 정규분포보다 중심점 주위에 더 많이 밀집해 있는 것으로 나타났다.

3. 구조재료에 따른 동질성 검정

3.1 가설 설정

전체 표본을 강교 (90개)와 콘크리트교 (49개)로 분류하고 이상치를 식별 배제한 후 두 집단 간 평균 (μ)의 차이가 통계적으로 유의한지를 검정하기 위하여 유의수준 5%에서 T-검정을 수행하였다. 유의수준이란 귀무가설을 기각하게 되는 확률의 크기로 ‘귀무가설이 참인데도 불구하고 이를 기각함으로써 발생하는 오류의 최대허용한계’이며 본 연구에서는 통상적으로 많이 사용되며 SPSS에서도 기본 설정값인 5%를 취한다.

T-검정은 두 집단의 모분산을 모르는 경우 두 가지 즉, 두 집단의 분산 (σ^2)이 같다고 가정할 경우 (등분산)와 다르다고 가정할 경우 (이분산)로 분류하여 검정한다 (Peck et al., 2001).

등분산 검정을 위한 가설의 형태는 다음과 같다.

$$\text{귀무가설 } (H_0) : \sigma^2_{concrete} = \sigma^2_{steel}$$

$$\text{대립가설 } (H_1) : \sigma^2_{concrete} \neq \sigma^2_{steel}$$

평균차 검정을 위한 가설의 형태는 다음과 같다.

$$\text{귀무가설 } (H_0) : \mu_{concrete} = \mu_{steel}$$

$$\text{대립가설 } (H_1) : \mu_{concrete} \neq \mu_{steel}$$

3.2 기본 통계

이상/특이치를 배제한 응답비, 충격계수, 충격계수비, 고유

Table 6 Group statistic

	material	n	mean	standard deviation	standard error mean
response ratio	concrete	46	1.084	0.125	0.018
	steel	87	1.040	0.082	0.009
measured impact factor	concrete	44	0.155	0.042	0.006
	steel	86	0.135	0.040	0.004
impact factor ratio	concrete	38	1.019	0.021	0.003
	steel	67	1.026	0.033	0.004
measured natural frequency	concrete	32	2.591	0.242	0.043
	steel	82	2.434	0.765	0.084
natural frequency ratio	concrete	49	0.918	0.063	0.009
	steel	86	0.955	0.053	0.006

진동수, 고유진동수비 등에 대한 집단 통계량을 Table 6에 나타냈다. 응답비, 충격계수, 고유진동수의 평균은 콘크리트교가 강교보다 크게 나타났으며, 충격계수비와 고유진동수비는 강교가 콘크리트교보다 크게 나타났다. 분산의 정도는 충격계수비가 평균을 중심으로 가장 밀집되어 있고 고유진동수가 가장 넓게 분산되어 있다. 표에서 충격계수비와 고유진동수는 다른 속성에 비해 이상/특이치를 많이 포함하고 있다. 충격계수비의 경우 TR 형식은 대부분 이상치로 식별되었고, PCB 형식은 다른 형식에 비해 상대적으로 많은 이상치를 포함하고 있다. 고유진동수의 경우 PCI 형식은 PCB 형식보다 계측값이 크기 때문에 대부분 이상치로 식별되어 배제되었다.

3.3 동질성 검정

응답비, 충격계수, 충격계수비, 고유진동수, 고유진동수비에 대한 독립표본 검정 결과를 Table 7에 나타냈다. 응답비의 독립표본 검정 결과에서 우선 등분산 검정을 위한 Levene의 검정값은 F값이 13.468이고 유의확률이 0.0으로 유의수준 0.05보다 작으므로 대립가설을 채택하여 모집단의 분산이 다르다고 가정한다. 평균차 검정은 검정값 t값이 2.153이고 유의확률은 0.035로 유의수준 0.05보다 작으므로 대립가설을 채택한다. 따라서, 응답비는 강교와 콘크리트교 집단 간 평균의 차이가 있다고 할 수 있다.

동일한 방식으로 충격계수는 모집단의 분산이 같다고 가정되고, 평균차 검정에서 검정값 t값이 2.584이고 유의확률은 0.011로 유의수준보다 작으므로 대립가설을 채택하여 강교와 콘크리트교 집단 간 평균의 차이가 있다고 할 수 있다.

충격계수비는 모집단의 분산이 다르다고 가정되고, 평균차 검정값 t값이 -1.181이고 유의확률은 0.240으로 유의수준보

Table 7 Independent samples test

		Levene's test for equality of variances		t-test for equality of means			
		F	significance probability	t	significance probability (2-tailed)	mean difference	standard error
response ratio	equal variances assumed	13.468	0.000	2.443	0.016	0.044	0.018
	equal variances not assumed			2.153	0.035	0.044	0.020
measured impact factor	equal variances assumed	0.025	0.875	2.584	0.011	0.020	0.008
	equal variances not assumed			2.543	0.013	0.020	0.008
impact factor ratio	equal variances assumed	6.898	0.010	-1.044	0.299	-0.006	0.006
	equal variances not assumed			-1.181	0.240	-0.006	0.005
measured natural frequency	equal variances assumed	27.999	0.000	1.137	0.258	0.157	0.138
	equal variances not assumed			1.659	0.100	0.157	0.095
natural frequency ratio	equal variances assumed	1.966	0.163	-3.629	0.000	-0.037	0.010
	equal variances not assumed			-3.466	0.001	-0.037	0.011

다 크므로 강교와 콘크리트교 집단 간 평균의 차이가 없다고 할 수 있다.

고유진동수는 모집단의 분산이 다르다고 가정되고, 평균차 검정값 t값이 1.659이고 유의확률은 0.100으로 유의수준보다 크므로 강교와 콘크리트교 집단 간 평균의 차이가 없다고 할 수 있다.

고유진동수비는 모집단의 분산이 같다고 가정되고, 평균차 검정값 t값이 -3.629이고 유의확률은 0.0으로 유의수준보다 작으므로 강교와 콘크리트교 집단 간 평균의 차이가 있다고 할 수 있다.

위와 같이 재료별 동질성 검정 결과 응답비, 충격계수, 고유진동수비는 강교와 콘크리트교 집단 간 평균의 차이가 있지만, 충격계수비와 고유진동수는 평균의 차이가 없는 것으로 나타나 각 부집단 간 해당 속성이 같다고 할 수 있다.

4. 구조형식 및 공용기간에 따른 동질성 검정

4.1 유의성 검정 및 다중 비교

교량은 시간의 경과에 따라 재료 자체가 노후화되며, 주변 환경의 변화 등에 의하여 부재 및 재료 자체의 성능이 점차 저하되고 사용성이 저하된다. 따라서, 본 장에서는 응답비, 충격계수, 고유진동수 등의 응답 특성치에 영향을 미치는 인자로서 구조형식 및 공용기간을 고려하여 그에 따른 모집단의 평균이 유의한지를 검정하였다. 이를 위해 교량의 정·동적 응답을 5개의 구조형식별로 분류하고 이상치를 식별 및 배제한 후에 분산분석 (유의수준 5%)을 수행하였다. 분산분석 (analysis of variance : ANOVA)은 셋 이상의 모집단 평균의 차이를 검정하기 위한 분석 방법으로 본 연구에서 가설

의 형태는 다음과 같다 (Kim et al., 2004; Kim et al., 2013; Peck et al., 2001).

귀무가설 ($H_{0\alpha}$) : $\mu_{PCB} = \mu_{PCI} = \mu_{SBG} = \mu_{SPG} = \mu_{TR}$
 대립가설 ($H_{1\alpha}$) : 구조형식별 모집단의 평균이 모두 동일한 것은 아니다.

귀무가설 ($H_{0\beta}$) : $\mu_{0-19} = \mu_{20-39} = \mu_{more\ than\ 40}$
 대립가설 ($H_{1\beta}$) : 공용기간별 모집단의 평균이 모두 동일한 것은 아니다.

공용기간은 20년 단위로 20년 미만 (μ_{0-19}) 75개, 20년 이상 40년 미만 (μ_{20-39}) 52개, 40년 이상 ($\mu_{more\ than\ 40}$) 12개의 3개 집단으로 구분하였다.

여기서 PCI와 TR 형식, 공용기간 40년 이상의 집단은 분석을 수행하는데 필요한 표본 수가 충분하지 못하여 추가적인 보완이 필요하다.

사후검정 및 다중비교 방법으로 Tukey, Scheffe, Duncan 등 여러 기법들을 사용하여 검토한 결과, 본 연구와 관련된 분석에서 Duncan 방법이 가장 차별화되고 일관된 결과를 보여주었다.

4.2 응답비

응답비에 대한 분산분석 결과 Table 8에서 구조형식의 F값은 3.186이고, 유의확률은 0.016으로 유의수준 0.05보다 작으므로 대립가설을 채택한다. 즉, 구조형식별 집단 중에서 적어도 두 집단 이상 간 모집단의 평균에 차이가 있다고 할

Table 8 Tests of between-subjects effects for response ratio

	sum of squares	mean square	F	significance probability
corrected model	0.251	0.042	3.567	0.003
intercept	72.666	72.666	6202.279	0.000
type	0.149	0.037	3.186	0.016
period	0.017	0.009	0.742	0.478
error	1.511	0.012		
total	153.199			
corrected total	1.762			

Table 9(a) Duncan's multiple comparison for response ratio

structural type	n	subgroup		
		1	2	3
TR	14	1.003		
SPG	28	1.005		
SBG	47	1.061		
PCB	35	1.075		
PCI	12		1.151	
significance probability		0.051	1.000	

Table 9(b) Duncan's multiple comparison for response ratio

service period	n	subgroup		
		1	2	3
more than 40	12	0.974		
20-39	50		1.050	
0-19	74		1.072	
significance probability		1.000	0.463	

수 있다. 공용기간의 F값은 0.742이고, 유의확률은 0.478로 유의수준보다 크므로 귀무가설을 기각하지 못한다. 즉, 공용기간별 집단 간 모집단의 평균에 차이가 없다고 할 수 있다.

응답비에 대한 구조형식별 부집단 간에는 모평균의 차이가 있다. 다중비교 결과 Table 9(a)에서 TR, SPG, SBG, PCB 형식은 유의수준 5% 하에서 차이가 없지만, PCI 형식은 유의한 차이를 나타냈다. 즉, TR, SPG, SBG, PCB 형식이 모인 하나의 집단과 그와 다른 PCI 형식 집단 등 2개의 집단으로 나누어진다.

응답비에 대한 공용기간별 집단 간 다중비교 결과 Table 9(b)와 같이 2개의 집단군으로 분류되었다. 표에서 공용기간 40년 이하에서는 평균이 1.0 이상이며 감소율이 2% 정도로 작지만 40년을 경과하면서 평균이 1.0 미만으로 감소하고 20-39년 평균보다 7% 작게 나타났다.

Table 10 Tests of between-subjects effects for measured impact factor

	sum of squares	mean square	F	significance probability
corrected model	0.064	0.011	8.063	0.000
intercept	1.105	1.105	837.439	0.000
type	0.023	0.006	4.329	0.003
period	0.021	0.011	8.039	0.001
error	0.162	0.001		
total	2.781			
corrected total	0.226			

Table 11(a) Duncan's multiple comparison for measured impact factor

structural type	n	subgroup		
		1	2	3
TR	14	0.098		
SBG	46		0.138	
PCB	30		0.140	
SPG	28		0.149	
PCI	12			0.176
significance probability		1.000	0.357	1.000

Table 11(b) Duncan's multiple comparison for measured impact factor

service period	n	subgroup		
		1	2	3
more than 40	12	0.086		
0-19	68		0.142	
20-39	50		0.151	
significance probability		1.000	0.386	

4.3 충격계수

충격계수에 대한 분산분석 결과 Table 10에서 구조형식의 F값은 4.329이고, 유의확률은 0.003으로 유의수준보다 작으므로 구조형식별 두 집단 이상 간에 모집단의 차이가 있다고 할 수 있다. 공용기간의 F값은 8.039이고, 유의확률은 0.001로 유의수준보다 작으므로 공용기간별 두 집단 이상 간에 모집단의 차이가 있다고 할 수 있다.

충격계수에 대한 다중비교 결과 Table 11(a)에서 SBG, PCB, SPG 형식은 차이가 없지만, TR 및 PCI 형식과 유의한 차이를 나타냈다. 즉, SBG, PCB, SPG 형식이 한 집단으로, TR과 PCI 형식은 각각 다른 집단인 3개의 집단으로 나누어진다.

Table 12 Tests of between-subjects effects for impact factor ratio

	sum of squares	mean square	F	significance probability
corrected model	0.465	0.077	31.576	0.000
intercept	74.792	74.972	30552.671	0.000
type	0.096	0.024	9.731	0.000
period	0.112	0.056	22.767	0.000
error	0.290	0.002		
total	139.959			
corrected total	0.754			

Table 13(a) Duncan's multiple comparison for impact factor ratio

structural type	n	subgroup		
		1	2	3
PCB	25	1.020		
SBG	47	1.027		
PCI	11	1.031		
SPG	28		1.075	
TR	14			1.193
significance probability		0.524	1.000	1.000

Table 13(b) Duncan's multiple comparison for impact factor ratio

service period	n	subgroup		
		1	2	3
0-19	64	1.029		
20-39	49	1.049		
more than 40	12		1.220	
significance probability		0.388	1.000	

공용기간별 집단은 Table 11(b)에 나타난 것처럼 2개의 집단군으로 나누어진다.

충격계수비에 대한 분산분석 결과 Table 12에서 구조형식의 F값은 9.731이고, 유의확률은 0.0으로 유의수준보다 작으므로 구조형식별 두 집단 이상 간에 모집단의 차이가 있다고 할 수 있다. 공용기간의 F값은 22.767이고, 유의확률은 0.0으로 유의수준보다 작으므로 공용기간별 두 집단 이상 간에 모집단의 차이가 있다고 할 수 있다.

충격계수비에 대한 다중비교 결과 Table 13(a)에서 PCB, SBG, PCI 형식은 차이가 없지만, SPG와 TR 형식과 유의한 차이를 나타냈다. 즉, PCB, SBG, PCI 형식이 한 집단으로, SPG와 TR 형식은 각각 다른 집단인 3개의 집단으로 나누어

진다.

공용기간별 집단은 Table 13(b)에 나타난 것처럼 3개의 집단으로 나누어지며, 충격계수비는 공용기간이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다.

4.4 고유진동수

고유진동수에 대한 분산분석 결과 Table 14에서 구조형식의 F값은 38.921이고, 유의확률은 0.0으로 유의수준보다 작으므로 구조형식별 두 집단 이상 간에 모집단의 차이가 있다고 할 수 있다. 공용기간의 F값은 10.378이고, 유의확률은 0.0으로 유의수준보다 작으므로 공용기간별 두 집단 이상 간에 모집단의 차이가 있다고 할 수 있다.

고유진동수에 대한 다중비교 결과 Table 15(a)에서 SBG, SPG, PCB 형식은 동일 집단군으로 차이가 없으며, TR과 PCI 형식은 각각 또 다른 집단인 3개의 집단으로 나누어진다.

공용기간별 집단은 Table 15(b)에 나타난 것처럼 2개의 집단으로 나누어진다.

고유진동수비에 대한 분산분석 결과 Table 16에서 구조형식의 F값은 5.298이고, 유의확률은 0.0으로 유의수준보다 작

Table 14 Tests of between-subjects effects for measured natural frequency

	sum of squares	mean square	F	significance probability
corrected model	76.201	12.700	31.755	0.000
intercept	466.048	466.048	1165.285	0.000
type	62.264	15.566	38.921	0.000
period	8.301	4.151	10.378	0.000
error	45.994	0.400		
total	1006.463			
corrected total	122.195			

Table 15(a) Duncan's multiple comparison for measured natural frequency

structural type	n	subgroup		
		1	2	3
SBG	47	2.222		
SPG	22	2.482		
PCB	31	2.581		
TR	14		3.443	
PCI	8			5.148
significance probability		0.121	1.000	1.000

Table 15(b) Duncan's multiple comparison for measured natural frequency

service period	n	subgroup		
		1	2	3
20-39	44	2.496		
0-19	70	2.674		
more than 40	8		3.928	
significance probability		0.395	1.000	

Table 16 Tests of between-subjects effects for natural frequency ratio

	sum of squares	mean square	F	significance probability
corrected model	0.086	0.014	5.205	0.000
intercept	50.861	50.861	18431.494	0.000
type	0.058	0.015	5.298	0.001
period	0.003	0.002	0.582	0.560
error	0.348	0.003		
total	118.904			
corrected total	0.434			

Table 17 Duncan's multiple comparison for natural frequency ratio

structural type	n	subgroup		
		1	2	3
PCB	37	0.911		
SBG	48	0.939	0.939	
PCI	10		0.966	
TR	12		0.975	
SPG	26		0.976	
significance probability		0.106	0.056	

으므로 구조형식별 두 집단 이상 간에 모집단의 차이가 있다고 할 수 있다. 공용기간의 F값은 0.582이고, 유의확률은 0.560으로 유의수준보다 크므로 공용기간별 모집단의 차이가 없다고 할 수 있다.

고유진동수비에 대한 다중비교 결과 Table 17에서 PCB 형식이 한 집단으로, PCI, TR, SPG 형식은 다른 집단으로 분류되었지만, SBG 형식은 두 집단에 모두 포함되었다.

5. 결론

본 연구에서는 공용 교량의 실측 데이터를 이용하여 정·

동적 응답 특성에 대한 기술통계분석을 수행하고, 구조재료에 대한 T-검정, 구조형식 및 공용기간별 분산분석을 통한 동질성 검정 및 다중비교를 통해 응답 특성치에 대한 통계적 유의성을 분석하였다. 본 연구를 통해 얻은 다양한 결과 중 특기할 만한 것들은 다음과 같다.

- (1) 응답비는 평균이 모두 1.0을 넘어 구조적 여유도를 갖으며, 재료, 구조형식별 집단 간에는 유의한 차이를 보였으나, 공용기간별 집단 간 차이는 나타나지 않았다.
- (2) 고유진동수의 평균은 콘크리트교 (2.591)가 강교 (2.434)보다 크고, 형식 및 공용기간별 집단 간에는 유의한 차이가 있으며, 다른 형식에 비해 PCI 형식은 2.0~2.3배, TR 형식은 1.3~1.5배 크다.
- (3) 변동계수로 본 상대적 분산은 대부분 항목에서 박스형태인 PCB, SBG 형식이 다른 형식에 비해 평균을 중심으로 밀집되어 있으며, PCI 형식 (응답비), SPG 형식 (충격계수비), TR 형식 (충격계수, 고유진동수, 고유진동수비)는 넓게 분산되어 있다.
- (4) 충격계수는 재료, 형식, 공용기간별 집단 간 평균에 유의한 차이를 나타냈다.
- (5) 충격계수비는 형식 및 공용기간, 고유진동수비는 재료와 형식별 집단 간 평균의 차이를 나타냈다.
- (6) 형식별 집단에 대한 다중비교 결과 박스형태인 PCB, SBG 형식은 5개 응답특성에서 동일 집단으로 분류되었다.

본 연구의 결과는 구조기술자가 안전진단시 특정 형식 및 공용기간에 따른 해석 결과나 시험으로부터 얻은 계측치를 본 연구에서 제시하는 통계적 참조값과 비교하고 집단간 동질성을 식별함으로써 해석치와 계측치의 적정성을 비교 판별하고 합리적으로 내하력 평가 등을 수행하는 데 활용할 수 있다. 또한 특정 집단에 대한 해석/진단 사례가 불충분할 경우 본 연구에서 확인된 동질성을 갖는 인근 집단의 진단 자료를 참조 활용할 수 있다.

본 연구를 통해 얻은 기술통계분석과 특성 부집단 간 통계적 유의성 검정 및 다중비교 결과는 응답특성에 대한 통계적 근거 및 레퍼런스를 제공하여 실무적 경험과 직관의 근거를 뒷받침함으로써 구조 진단과 설계 환경에 맞는 유용한 정보를 제공할 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

1. An, S. S. (2012), Improvement on Procedure and Method of Structural Integrity Assessment for Bridges via Case-Based Analysis, Doctoral thesis, Chungbuk University (in Korean).
2. Chang, D. I., Lee, H. H., and Eom, Y. H. (1988), A Study on Statistical Analysis of Load Carrying Capacity of Steel Bridges, *The Korean Society of Civil Engineers*, 8(1), 41-48 (in Korean).
3. Choi, K. J., Chang, I. H., Lee, J. J., and Lee, J. H. (2010), Probability and Statistics for Science and Engineering, Free academy, Korea (in Korean).
4. Ewins, D. J. (2000), Modal Testing : Theory, Practice and Application, 2nd, Research Studies Press Ltd..
5. Jung, H. J., Kim, G. S., Lee, D. K., and Lee, S. C. (2009), An Analysis on the Impact Factors According to Fundamental Frequency Based on the Statistical Data of Dynamic Load Tests of Bridges, *The Korean Society of Civil Engineers*, Conference, 2253-2256 (in Korean).
6. Kim, D. H., and Park, S. Y. (2004), Analysis of Variance Using SPSS, Kyo Woo Sa (in Korean).
7. Kim, D. Y., Kyung, K. S., Jeon, J. C., Lee, H. H., and Chang, D. I. (1999), A Reformed Rating Method for Highway Bridges Based on Statistical Analysis of Existing Data, *Korean Society of Civil Engineers Journal*, 19(I-6), 847-857 (in Korean).
8. Kim, J. H., Hwang, J. H., and An, S. S. (2013), Group Homogeneity Analysis for the Static and Dynamic Response Characteristics of Bridges, *The Korea institute for Structural Maintenance Inspection*, Spring Conference, 175-175 (in Korean).
9. KISTEC (Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation) (2006), Load Carrying Capacity Assessment Manual of Bridge, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (in Korean).
10. Koo, B. K., Ryu, T. E., Lee, J. B., and Ryu, Y. J. (2002), An Improvement for Impact Factor Determination to Traffic Loads, *Journal of Korea institute for Structural Maintenance Inspection*, 6(2), 217-224 (in Korean).
11. Lee, J. H., Han, S. H., and Shin, J. C. (2009), The Examination of Load Carrying Capacity Based on Existing Data for Improved Safety Assessment Method of Expressway Bridges, *Korean Society of Civil Engineers Journal*, 29(6A), 597-605 (in Korean).
12. Maia, N. M. M., and Silva, J. M. M. (1997), Theoretical and Experimental Modal Analysis, Research Studies Press Ltd.
13. MLTM (Minister of Land, Transport and Maritime Affairs) (2010), Detailed Guideline (Bridge) for Safety Inspection and Precision Safety Diagnosis, Minister of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (in Korean).
14. Peck, R., Olsen, C., and Devore, J. (2001), Introduction to Statistics and Data Analysis, Duxbury.
15. Yi, J. H., Lee, J. J., Lee, C. G., and Lee, W. T., Yun, C. B. (2004), Ambient Vibration Tests for Enhanced Bridges Integrity Assessment, *The Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Conference, 611-614 (in Korean).

Received : 05/13/2014

Revised : 05/30/2014

Accepted : 06/05/2014

요 지

본 연구는 실제 구조진단 사례에 기초하여 재료와 형식 및 공용기간에 따라 교량의 응답, 충격계수, 고유진동수 및 각 특성의 해석값/계측값 비 등에 관한 기술통계를 분석하고 주재료에 따른 T-검정과 구조형식 및 공용기간에 따른 분산분석을 통해서 요인 부집단 수준 간 동질성 검정 및 다중비교분석을 수행하였다. 본 연구 결과는 응답 분포의 중심값, 산포도, 대칭성 등 통계적 특성 및 비교분석 집단 간 동질성 식별을 위한 참조값을 제공하며, 이것은 내하력 평가 등 구조 진단과 설계에서 엔지니어들이 취득한 계산 또는 계측값의 타당성을 비교 검토하고 데이터베이스를 활용하는 등의 공학적 판단을 하는데 실제적으로 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

핵심 용어 : 동질성검정, 구조진단, 분산분석, 다중비교, 기술통계, 응답비, 고유진동수, 충격계수