

# 정보 엔트로피에 의한 RC 교량 상판의 상태속성 및 등급 영향 구조 분석

## The State Attribute and Grade Influence Structure for the RC Bridge Deck Slabs by Information Entropy

황진하†      박종희\*      안승수\*\*  
Hwang, Jin-Ha      Park, Jong-Hoi      An, Seoung-Su

### 요 지

기 수행된 1, 2종 교량에 관한 정밀안전진단 등의 많은 사례를 분석해 보면, 실제로 많은 경우 외관상태가 교량의 대표 등급 결정에 지배적인 요인이 되는 것을 볼 수 있다. 본 연구는 기 시행된 점검 및 진단 자료를 학습사례집합으로 인공지능 분야의 귀납적 학습법을 활용하여 철근 콘크리트 교량 바닥판의 상태평가를 지배하는 상태속성들의 교량등급에 대한 계층적 영향도와 구조적 연관성을 분석하였다. 이는 세부적으로 목표속성은 평가등급으로, 평가속성은 1방향균열, 2방향균열, 백태, 박락 및 층분리, 재료분리 등 7가지로 구성하고, 엔트로피 분석을 통해 주요 속성의 정보량, 정보기대값 및 정보이득을 산정하고 범주별 상태 등급 분포를 분석하였다. 이를 위해 본 논문은 먼저 6개 교량에 대한 안전진단보고서를 토대로 상태등급 평가 과정에서 각 속성이 미치는 간접적 영향을 개관하고 정보공학적 분석의 동기를 부여하였다. 아울러 본 연구는 정보 변별력에 대한 순서로 평가를 지배하는 주 속성 및 조건별 하위 속성 연관성을 의사결정트리 형태로 나타내어 계층적 영향 및 속성간의 구조적 연관성을 보임으로써 손상에 대한 이해도를 높이고 차후 상태평가를 위한 합리적 접근을 지원할 수 있도록 하였다.

**핵심용어** : 상태속성, 귀납적 학습법, 의사결정트리, 엔트로피, 상태평가

### Abstract

The attributes related to the health condition of RC deck slabs are analyzed to help us identify and rate the safety level of the bridges in this study. According to the related reports the state assessment for the outward aspects of bridges is the important and critical part for rating the overall structural safety. In this respect, the careful identification for the various state attributes make the field inspection and structural diagnosis very effective. This study analyzes the influence of the state attributes on evaluation classes and the relationship of them by the inductive reasoning, which raise the understanding and performance for evaluation work, and support the logical approach for the state assessment. ID3 algorithm applied to the case set which is constructed from the field reports indicates the main attributes and the precedence governing the assessment, and derives the decision hierarchy for the state assessment.

**Keywords** : state attributes, ID3 algorithm, decision hierarchy tree, entropy, state assessment

### 1. 서 론

시설물에 대한 안전점검은 육안검사와 간단한 기기를 이용하여 시설물의 현 상태를 파악하고 평가를 실시하는 것을 주목적으로 한다. 안전점검은 조사 시기, 빈도 및 점검수준에

따라 정기점검, 정밀점검(초기점검과 정기적 정밀점검) 및 긴급점검(손상점검과 특별점검)으로 구분한다. 전자의 경우는 외관상태조사, 후자의 경우는 외관상태 및 내구성 조사 시험에 의한 상태평가를 실시하며 필요시 안정성 평가를 추가로 실시한다(건설교통부, 1999; 2003).

† 책임저자, 정희원 · 충북대학교 토목공학부 교수  
Tel: 043-261-2407 ; Fax: 043-263-2409  
E-mail: jhhwang@chungbuk.ac.kr

\* 정희원 · 서원대학교 환경건설정보학과 겸임교수

\*\* 정희원 · 충북대학교 구조시스템공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2010년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2010년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

건설교통부에서 발간한 “시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 지침”에 따르면 상태평가란 「시설물의 외관을 조사하여 결함의 정도를 포함한 시설물에 대한 상태를 평가하는 행위」로 정의하고 있으며, 시설물 주요 구조부에 대한 재료 및 육안검사에서 조사된 상태에 대한 평가를 포함하도록 하고 있다. 책임기술자는 정밀점검 및 안전진단 결과로 각 시설물에서 발견된 결함을 근거로 하여 결함의 범위 및 정도에 따라 등급을 매긴다.

넓은 의미에서 볼 때, 안전점검 및 진단은 정량적인 성격 뿐 아니라 정성적 측면을 함께 갖는데, 수치적 절차를 밟아 가는 전자와 달리, 인지 및 추론과정으로서의 후자는 단순히 지침에만 의존하지 않고 경험에 기초한 지적인 추론과정을 요한다. 이런 점에서 안전진단은 한정된 지식에 의존하는 한 사람의 전문가보다는 다수 전문가들의 협업 영역이라 할 수 있으며, 지침 또한 이러한 많은 과정이 농축된 결과물이다. 인간은 경험적 사실과 학습을 통하여 개념형성과 일반화를 구하며, 인공지능 분야에서 학습방법과 추론 전략은 각각 주요한 연구과제의 한 부분이다. 귀납적 학습법은 경험으로부터 추론을 통하여 일반화를 얻으며, 그 중 의사결정트리 귀납 알고리즘은 사례들로 구성된 훈련집합으로부터 의사결정 트리를 만들어 지식을 분석하고 변별력을 갖는 속성을 취하여 규칙을 생성한다.

기계학습과 관련해서 Pomorski와 Perche(2001)는 유도 모터의 결함탐색 및 분리에 의사결정나무 귀납 학습을 적용했다. 이들은 해석모델만으로 정상 및 이상 상태를 구별할 수 없는 문제에 상향 및 하향식 귀납적 학습기법을 활용하였다.

Shao(2001) 등은 사출 성형부의 공차설계를 위한 지식 획득에 ID3 알고리즘을 적용했다. 그들은 ID3를 이용하여 사례 집합으로부터 명확한 설계 및 제조 관련 속성 계층구조를 생성하고 그것이 다량의 경험 지식이 다양하게 산재되어 있는 설계 공차설계문제에 효과적으로 적용될 수 있음을 보였다.

상태평가와 관련해서는 안종필(2001) 등은 터널의 상태평가를 위해 로지스틱 전달함수를 갖는 역전파 신경망 알고리즘을 이용하였다. Kawamura(2003) 등은 콘크리트 교량 평가 전문가시스템 개발에서 육안 점검과 시방서를 바탕으로 퍼지추론과 다층 역전파 신경망 알고리즘을 결합 사용하였다. 황진하(2002) 등은 교량의 안전점검과 상태평가를 체계적이고 효율적으로 지원하기 위한 생성규칙 기반 전문가시스템의 원형을 개발하였다. 그것은 지침 및 편람과 기 시행된 점검 및 진단사례에 준거한 지식베이스와 문제해결을 위한 추론 기능 및 사용자 인터페이스로 구성되었다.

본 연구는 교량의 주요 부재이면서 손상이 빈번히 발생되

는 바닥판의 상태 평가와 관련된 인공지능 기법의 적용을 나타낸다. 구체적으로 본 연구는 기 시행된 점검 및 진단 자료를 사례집합으로 인공지능 분야의 귀납적 학습법을 활용하여 철근 콘크리트 교량 바닥판의 상태평가를 지배하는 상태속성들의 손상도에 대한 계층적 영향도와 구조적 연관성을 분석함으로써 손상도에 대한 이해도를 높이고 차후 상태평가를 위한 합리적 접근을 지원할 수 있도록 하였다.

## 2. 안전점검 및 상태평가

안전점검은 구조적 문제점이나 재료의 성능저하 등 구조물에 내재되어 있는 위험요인을 경험과 기술을 갖춘 기술자가 육안검사 또는 점검장비 등에 의해 조사하고 그에 적절한 조치를 함으로써 구조물의 구조적 안전성 및 사용성을 확보하는데 목적이 있다.

이것은 시설물의 실제 현장조사를 통하여 현 상태를 판단하여 시설물에 대한 상태 및 안전성을 평가하고, 보수·보강 및 성능회복 작업의 우선순위를 결정함으로써 시설물의 안전성 및 합리적인 유지관리를 할 수 있도록 한다(건설교통부, 1997: 건설안전관리본부, 1999).

정기점검은 현장조사결과를 토대로 주요 부재별, 시설물별로 상태를 개략적으로 평가함을 원칙으로 하며 상태평가등급은 매기지 않는다. 정밀점검과 정밀안전진단에서는 결함이 신규로 발생 또는 진전된 주요 부재에 대하여 외관조사방도를 작성하고 평가한 후, 부재별 중요도를 고려한 가중치를 고려하여 전체 평가등급을 산정한다.

등급사용의 혼란을 방지하기 위하여 부재별 등급은 소문자(a~e)로 표시하고, 전체 상태평가등급은 대문자(A~E)로 등급을 표기한다. 부재별 상태평가 기준에 따라 결함 그룹별로 등급을 매길 경우, 등급별로 결함 및 손상에 대한 내용이 2가지 이상으로 구성된 경우 1개 내용이라도 해당되면(OR의 개념) 그 등급으로 정하는 것을 원칙으로 한다.

부재별 상태평가 기준은 정밀안전진단의 경우 결함 및 손상 유형에 따라 10개의 평가항목에 중성화 및 염화물에 대한 평가항목을 포함하여 총 12개 항목으로 구성되어 있다. 예를 들어, 콘크리트 바닥판의 상태평가 기준은 1방향균열과 2방향균열이 같은 그룹으로, 박락 및 층분리, 재료분리, 백태, 철근노출, 누수 등이 또 하나의 그룹으로 구분되어 있다. 부재 상태평가등급은 해당 그룹의 등급을 평균하여 결정한다(건설교통부, 2003).

그런데 두 번째 그룹의 경우, 백태, 박락 및 층분리, 재료분리, 철근노출, 누수 등 여러 유형의 항목이 구분되지 않은 채 한데 뒤섞여 있고 일부 항목이 구체화되지 않아 관리자

Table 1 결함도 지수 및 등급별 범위

등급	a	b	c	d	e
결함도 지수	0.10	0.20	0.40	0.70	1.00
등급 범위	$0 \leq x < 0.13$	$0.13 \leq x < 0.26$	$0.26 \leq x < 0.49$	$0.49 \leq x < 0.79$	$0.79 \leq x$

또는 점검자의 수준 및 경험 정도에 따른 주관적인 판단이 작용하게 된다. 더욱이 이러한 것들 중에 최악의 경우로 등급을 부여하므로 각 유형의 손상들이 종합적으로 반영되지 못한다.

그러나 콘크리트 구조는 결함, 손상 및 열화로 인하여 다양한 형태로 성능저하가 발생하므로 각각의 결함, 손상 및 열화 유형을 세분함으로써 보다 정밀한 평가를 유도하고 사후 유지관리에도 도움이 될 수 있다. 본 연구에서는 세부지침을 기준으로 손상 유형을 세분하여 가중치를 부여하고, 이를 토대로 각 속성들이 상태 등급에 미치는 영향도를 분석하였다(황진하 등, 2008). 다만 지침의 교량편에서 철근노출에 대한 평가기준은 철근노출 면적을 5%를 기준으로 d등급과 e등급으로만 나뉘어져 있다. 그러나 이 기준은 상세하지 못하고, 적용 시 지나치게 하향 평가되므로 본 연구에서는 “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(터널)”의 기준을 인용하였다(건설교통부 2003).

Table 1은 각 부재의 등급을 계산하는 과정에서 등급을 점수로 환산하거나 점수를 등급으로 환산하기 위한 하나의 수단이다.

### 3. 귀납적 사례학습

#### 3.1 정보 엔트로피

이산 확률변수  $X$ 를

$$X = \{x_i \mid i = 1, 2, \dots, N\} \tag{1}$$

라 할 때

$$0 \leq p_i \leq 1 \text{ and } \sum_{i=1}^N p_i = 1 \tag{2}$$

인 확률

$$p_i = p(X = x_i) \tag{3}$$

로 사건  $X = x_i$ 가 일어난다고 가정한다. 이 때 확률  $p_i$ 의 사건  $X_i$ 를 관찰한 후 얻어진 정보의 양은 대수함수

$$H(x_i) = \log\left(\frac{1}{p_i}\right) = -\log p_i \tag{4}$$

로 정의된다. 여기서 정보단위는 자연대수일 경우 nats, 기저가 2인 경우 bits이다. 식 (4)는 대수함수의 기저가 어느 경우든지 다음 성질을 갖는다.

$$1. H(x_i) = 0 \text{ for } p_i = 1 \tag{5}$$

한 사건의 결과를 분명히 확신한다면 그것의 발생으로 인해 얻어진 정보는 없다.

$$2. H(x_i) \geq 0 \text{ for } 0 \leq p_i \leq 1 \tag{6}$$

즉, 한 사건  $X = x_i$ 의 발생은 얼마간의 정보를 제공하거나 아무것도 제공하지 않는다. 그러나 그것은 결코 어떤 정보의 손실을 가져오지 않는다.

$$3. H(x_i) \geq H(x_j) \text{ for } p_i \leq p_j \tag{7}$$

즉, 한 사건의 발생 확률이 떨어질수록 그것의 발생을 통해서 우리는 더 많은 정보를 얻는다.

정보의 양  $H(x_i)$ 는 확률  $p_i$ 를 갖는 이산 확률 변수다.  $N$ 개의 이산변수의 전역에 걸친  $H(x_i)$ 의 평균값은

$$H(X) = E[H(x_i)] \tag{8}$$

$$= \sum_{i=1}^N p_i H(x_i) = - \sum_{i=1}^N p_i \log p_i$$

로써 주어진다. 이 양  $H(X)$ 는 열역학의 엔트로피와 형태상사성으로 확률변수  $X$ 의 엔트로피라 부른다.

엔트로피  $H(X)$ 는 메시지당 전달되는 평균 정보량의 척도이다. 여기서  $X$ 는 확률변수의 한 수준으로 생각할 수 있다. 식 (8)의 정의로부터 엔트로피  $H(X)$ 는

$$0 \leq H(X) \leq \log N \tag{9}$$

이고, 여기서  $N$ 은 이산수준의 전체 개수이고 다음과 같은 성질을 갖는다.

1 임의의  $i$ 에 대해

$$p_i = 0, \quad p_i = 1 \text{ for } \forall 1 \neq i \tag{10}$$

이면,

$$H(X) = 0 \tag{11}$$

즉, 엔트로피의 하한은 불확실성이 없는 경우에 해당한다.

2. 모든  $i$ 에 대해

$$p_i = 1/N \tag{12}$$

모든 이산 수준의 확률이 동등하면,

$$H(X) = \log N \tag{13}$$

즉, 이 엔트로피 상한은 최대의 불확실성에 해당한다 (Haykin, 1999).

### 3.2 ID3 알고리즘

인간은 축적된 경험사례로부터 일반적으로 적용 가능한 규칙을 생성함으로써 효과적으로 사용할 수 있다. 개념학습은 커다란 클래스를 추정하고 그 클래스에 속한 객체들의 일부분이 계속 목격되면 그에 근거하여 목표개념을 형성한다. 이것은 기본적으로 일반화과정이며 클래스에 속하는 긍정적 사례에 일관되는 법칙을 형성하는 과정이다(Dan, 1990; Luger 등, 1993).

목표개념은 전체 집합에 있는 모든 객체를 구분하는 규칙이며 일반화와 개념형성은 인간이 지니고 있는 학습능력의 대표적인 형태로 볼 수 있다.

귀납법은 클래스를 구성하는 과정, 귀납적 학습은 어떤 클래스의 예제나 사례로부터 일반 지식을 추출해 내는 과정으로, 이러한 형태의 학습은 귀납적 추론에 의해 이루어진다. 여기서 클래스란 전체 객체 집합의 특정한 부분 집합이다.

귀납적 추론이란 부분을 보고 전체를 알아내고 특별한 경우의 사례로 일반적인 상황을 알아내는 과정이며, 일반화와 규칙생성은 목적 지향적이다. 이것은 인간이 자주 사용하는 강력한 학습방법으로, 불완전한 형태지만 대부분의 경우 잘 움직인다.

인공지능을 인간의 지능 활동을 관찰 구현하고자 하는 학문이라고 한다면 컴퓨터가 그것을 모방하여 지능적으로 작동하는 데 필요한 지식은 기계 또는 자동학습(machine learning)을 통해 얻어진다. 여러 기준에 따라 다양하게 분류되는 기계 학습 방법은 관찰, 발견, 사례, 교사, 자율 학습법 신경망 등 많은 방법이 있다.

본 논문에서 활용하는 ID3 알고리즘은 개념학습시스템 (CLS)연구에 기초하여 Quinlan(1986)이 개발한 것으로

학습사례를 통해 객체를 구별한다. 이것은 특정문제에 대한 사례집합으로부터 트리를 구성하여 의사결정을 지원한다.

트리형성은 규칙생성을 의미하고 분별력이 큰 특성을 트리의 루트로 선택할 때 트리의 크기가 작아지고 의사결정과정을 축소한다.

$C_i$ 를  $i$ 번째 특성값을 취하는 사례집합  $C$ 의 부분 집합이라 하고 하나의 특성  $A_i$ 가 취하는 값에 따라 객체집합  $C$ 를  $C_1, C_2, \dots, C_i$ 로 나눌 때 전체 사례집합  $C$ 가 갖는 정보량  $H(C)$ 는

$$H(C) = - \sum_{i=1}^N p_i \log p_i \tag{14}$$

여기서,  $\sum_{i=1}^N p_i = 1$ 이고,  $p_i$ 는  $C_i$ 가 사례집합  $C$ 에서 차지하는 비율이다. 위 식의  $H(C)$ 는 사례집합이 함유하는 정보량으로 엔트로피(entropy)라 부르며 열역학의 그것과 같은 형태를 갖는데 기인한다.

정보이론에서 이 값이 높을수록 이 클래스는 많이 얽혀 있음을 의미한다. 만약 이것이 '0'의 값을 가진다면 이 집합의 객체들은 단일 클래스를 이루고 있음을 나타낸다. 즉, 값이 작을수록 안정상태 또는 변별력이 큰 것을 나타내고, 클수록 불안정 상태 또는 변별력이 약한 것을 나타낸다. 또한 특성  $A_i$ 로 집합  $C$ 를 나누어 그것을 루트로 하는 트리의 정보 기대값은 다음과 같다.

$$E(A_i) = \sum_{i=1}^N \frac{m(C_i)}{m(C)} \times H(C_i) \tag{15}$$

여기서,  $m(C_i)$  :  $C_i$ 에서의 사례의 수

$m(C)$  :  $C$ 에서의 사례의 수

$H(C_i)$  : 부분집합의 정보량

따라서, 특성  $A_i$ 를 기준으로 정보량  $H(C)$ 를 가지고 있는 객체집합  $C$ 를 부분집합으로 나누었을 때 획득되는 정보 이득(gain)은 다음과 같다.

$$G(A_i) = H(C) - E(A_i) \tag{16}$$

정보 이득이 높은 특성을 루트로 트리를 구성하고 낮은 요인을 제거함으로써 필요한 규칙생성을 최소화할 수 있다.

## 4. 상태속성의 등급 영향분석

### 4.1 외관 상태 및 등급 결정

속성분석의 관점은 '상태평가의 등급을 결정하는 주속성과 연관속성이 무엇이며 그 비중과 순서는 어떠한가'에 있다. 결함의 종류, 정도 및 범위를 포함하는 손상속성들의 상태평가에 대한 영향도와 상호 연관성에 대한 분석은 손상도에 대한 이해도를 높이고 차후 상태평가를 위한 합리적 접근을 지원할 수 있다.

분석에 앞서 상태평가 항목이 세분화되고 기 시행된 6개소의 점검 및 진단 자료를 토대로 학습사례집합을 구성하였다. 여기서 학습된 6개 교량은 서울시 00교(총 15경간, 615m, BR1), 경남 마산시 00교(총 11경간, 360m, BR2), 서울시 00교(총 25경간, 1200m, BR3), 전남 화순군 00교(총

6경간, 325m, BR4), 서울시 00교(총 36경간, 1480m, BR5), 대구 00교(총 26경간, 1120m, BR6)이다.

목표속성은 평가등급이며, 평가속성은 1방향균열, 2방향균열, 백태, 박락 및 층분리, 재료분리, 철근노출, 누수의 7가지로 구성된다.

바닥판 점검 자료 중 외관조사결과는 첫 번째 교량(BR 1)에 대해 Table 2와 3에 대표적으로 나타내었다.

BR 1~6 교량의 대표적 1개 경간에 대한 육안점검에 의한 외관조사망도는 Fig. 1~6과 같다.

바닥판 상태평가등급 산정(건설교통부, 2003)을 위해 먼저 BR 1의 경우, Table 2에 나타난 외관조사결과의 각 속성별 손상정도를 철근콘크리트 바닥판 상태평가 기준에 따라 속성별 등급을 부여한다.

선정된 속성별 등급은 Table 1을 활용하여 결함도 지수로

Table 2 외관상태 주요 내용(BR 1)

경간	평가항목 1	
	1방향균열	2방향균열
1	0.3mm	2-10%
2	0.3mm	2-10%
3	0.3mm	2-10%
4	0.3mm	2%미만
5	0.3mm	2%미만
6	0.3mm	2-10%
7	0.4mm	2%미만
8	0.3mm	2%미만
9	0.3mm	2%미만
10	0.3mm	없음
11	0.2mm	없음
12	없음	2%미만
13	0.3mm	2%미만
14	0.2mm	2%미만
15	0.3mm	2%미만

Table 3 외관상태 주요 내용(BR 1)

경간	평가항목 2				
	백태	박락및층분리	재료분리	철근노출	누수
1	2-10%	2%미만	2%미만	1%미만	없음
2	2-10%	2%미만	2%미만	1%미만	없음
3	2-10%	2%미만	2%미만	1%미만	없음
4	2%미만	2%미만	2%미만	1%미만	없음
5	2%미만	없음	없음	1%미만	없음
6	10%이상	2%미만	2%미만	1-3%미만	물비침
7	2-10%	없음	없음	없음	없음
8	2-10%	2%미만	없음	1%미만	없음
9	2%미만	없음	2%미만	없음	물비침
10	2-10%	2-10%	2%미만	1%미만	없음
11	2%미만	2%미만	2%미만	1%미만	없음
12	2%미만	2%미만	없음	1%미만	물비침
13	2-10%	2%미만	없음	1%미만	없음
14	2-10%	2%미만	2%미만	1%미만	물비침
15	2-10%	2%미만	2%미만	1%미만	주변누수

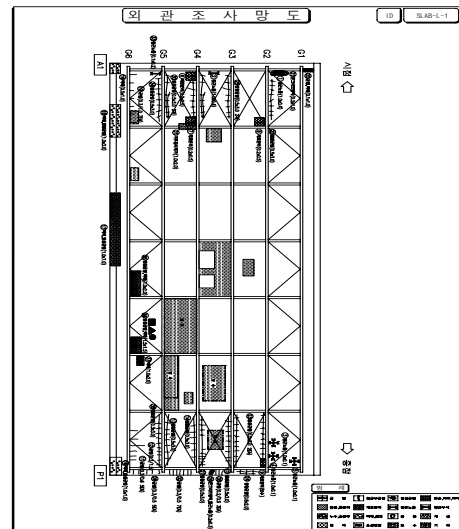


Fig. 1 외관조사망도(BR 1)

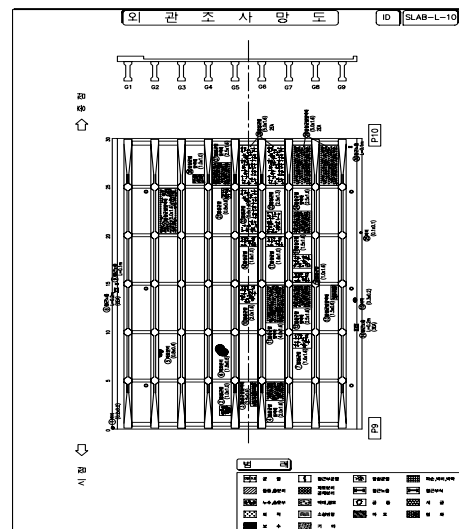


Fig. 2 외관조사망도(BR 2)

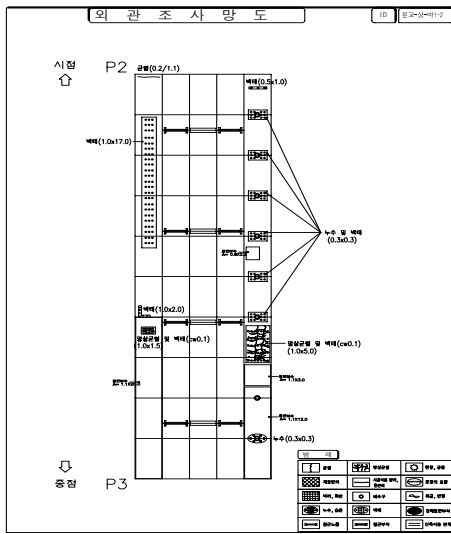


Fig. 3 외관조사망도(BR 3)

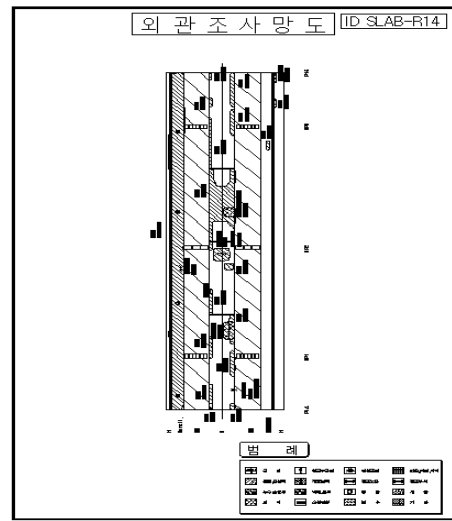


Fig. 5 외관조사망도(BR 5)

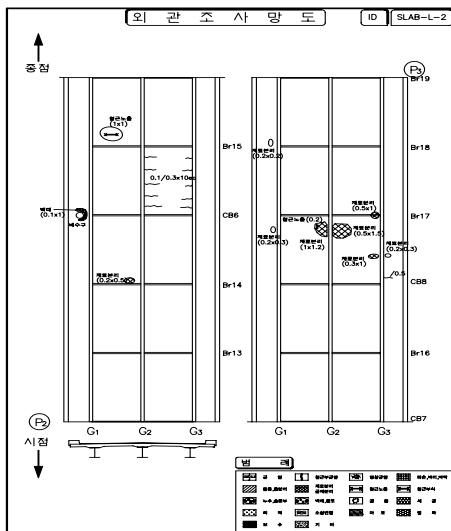


Fig. 4 외관조사망도(BR 4)

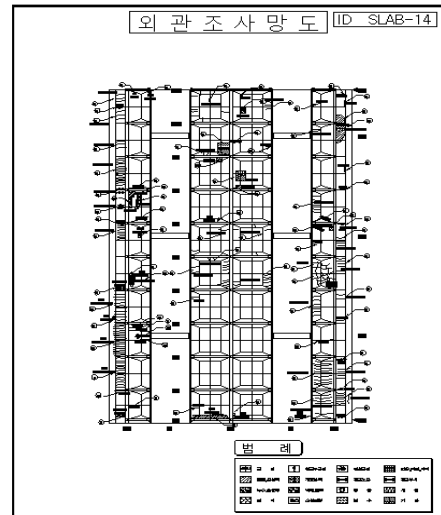


Fig. 6 외관조사망도(BR 6)

Table 4 평가항목 1의 경간별 결함도 지수 및 최대치(BR 1)

경간	평가항목 1		최대치
	1방향균열	2방향균열	
1	0.4	0.7	0.7
2	0.4	0.7	0.7
3	0.4	0.7	0.7
4	0.4	0.4	0.4
5	0.4	0.4	0.4
6	0.4	0.7	0.7
7	0.7	0.4	0.7
8	0.4	0.4	0.4
9	0.4	0.4	0.4
10	0.4	0.1	0.4
11	0.2	0.1	0.2
12	0.1	0.4	0.4
13	0.4	0.4	0.4
14	0.2	0.4	0.4
15	0.4	0.4	0.4

Table 5 평가항목 2의 경간별 결함도 지수 및 최대치(BR 1)

경간	평가항목 2					최대치
	백태	박락및층분리	재료분리	철근노출	누수	
1	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.4
2	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.4
3	0.4	0.2	0.2	0.2	0.1	0.4
4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2
5	0.2	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2
6	0.7	0.2	0.2	0.4	0.4	0.7
7	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0.4
8	0.4	0.2	0.1	0.2	0.1	0.4
9	0.2	0.1	0.2	0.1	0.4	0.4
10	0.4	0.4	0.2	0.2	0.1	0.4
11	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2
12	0.2	0.2	0.1	0.2	0.4	0.4
13	0.4	0.2	0.1	0.2	0.1	0.4
14	0.4	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4
15	0.4	0.2	0.2	0.2	0.7	0.7

변환되고 이들을 경간별로 비교하여 손상정도가 심한 최대 지수값을 Table 4에 나타내었다.

Table 5는 Table 3의 결과를 통해 얻어진 평가항목 2의 경간별 결함도 지수 및 최대치를 나타내고 있다.

이 결과를 통해 경간별 상태등급 결정에 영향을 미치는 속성이 평가항목 1에서는 1방향균열이 지배적인 경우가 3개의 경간, 2방향균열이 지배적인 경우가 6개의 경간, 두 항목이 동일한 경간이 6개임을 알 수 있다. 또한 평가항목 2에서는 백태가 7개의 경간에서, 누수는 3개의 경간에서 나머지 경간에서는 두 개 이상의 속성이 동일한 경우가 부재별 상태등급에 지배적인 영향을 받는 것으로 나타났다.

경간별 상태등급은 Table 4와 5에서 구해진 각각의 최대치를 산술평균하여 얻어진 값을 Table 1에 대입하여 경간별

평가등급을 얻을 수 있고 여기서, 이들 전체를 산술평균하여 교량 전체에 대한 바닥판 상태등급을 결정한다.

Table 6~11은 각 교량의 경간별 및 전체 상태평가를 요약하여 나타낸 것이다.

그러나 이러한 방식으로는 각 평가항목에 대해서만 지배적인 속성을 구할 수 있고, 7개로 이루어진 속성 전체에 대해

Table 9 BR 4 콘크리트 바닥판 평가

경간	결함도점수	평가등급	경간	결함도점수	평가등급
1	0.15	b	4	0.40	c
2	0.15	b	5	0.45	c
3	0.15	b	6	0.25	b
			평균	0.258	b

Table 10 BR 5 콘크리트 바닥판 평가

경간	결함도점수	평가등급	경간	결함도점수	평가등급
1	0.55	d	19	0.55	d
2	0.55	d	20	0.25	b
3	0.25	b	21	0.55	d
4	0.70	d	22	0.40	c
5	0.40	c	23	0.25	b
6	0.40	c	24	0.40	c
7	0.40	c	25	0.25	b
8	0.30	c	26	0.25	b
9	0.45	c	27	0.25	b
10	0.55	d	28	0.25	b
11	0.40	c	29	0.25	b
12	0.25	b	30	0.25	b
13	0.55	d	31	0.15	b
14	0.55	d	32	0.40	c
15	0.40	c	33	0.30	c
16	0.40	c	34	0.15	b
17	0.55	d	35	0.30	c
18	0.40	c	36	0.10	a
			평균	0.375	c

Table 6 BR 1 콘크리트 바닥판 평가

경간	결함도점수	평가등급	경간	결함도점수	평가등급
1	0.55	d	9	0.40	c
2	0.55	d	10	0.40	c
3	0.55	d	11	0.20	b
4	0.30	c	12	0.40	c
5	0.30	c	13	0.40	c
6	0.70	d	14	0.40	c
7	0.55	d	15	0.55	c
8	0.40	c	평균	0.443	c

Table 7 BR 2 콘크리트 바닥판 평가

경간	결함도점수	평가등급	경간	결함도점수	평가등급
1	0.55	d	7	0.85	e
2	0.85	e	8	0.85	e
3	0.85	e	9	0.55	d
4	0.70	d	10	0.85	e
5	0.55	d	11	0.55	d
6	0.85	e	평균	0.727	d

Table 8 BR 3 콘크리트 바닥판 평가

경간	결함도점수	평가등급	경간	결함도점수	평가등급
1	0.70	d	14	0.40	c
2	0.70	d	15	0.55	d
3	0.45	c	16	0.40	c
4	0.40	c	17	0.40	c
5	0.25	b	18	0.25	b
6	0.25	b	19	0.40	c
7	0.25	b	20	0.25	b
8	0.25	b	21	0.25	b
9	0.25	b	22	0.25	b
10	0.25	b	23	0.25	b
11	0.30	c	24	0.25	b
12	0.25	b	25	0.45	c
13	0.40	c	평균	0.358	c

Table 11 BR 6 콘크리트 바닥판 평가

경간	결함도점수	평가등급	경간	결함도점수	평가등급
1	0.40	c	14	0.40	c
2	0.40	c	15	0.55	d
3	0.30	c	16	0.40	c
4	0.70	d	17	0.55	d
5	0.60	d	18	0.40	c
6	0.70	d	19	0.40	c
7	0.55	d	20	0.45	c
8	0.55	d	21	0.45	c
9	0.70	d	22	0.30	c
10	0.70	d	23	0.45	c
11	0.70	d	24	0.40	c
12	0.70	d	25	0.55	d
13	0.45	c	26	0.45	c
			평균	0.507	d

서는 그중 어떠한 속성이 경간 전체의 상태등급에 지배적인 영향을 미치는지 또한 그 속성과 연관되는 속성이 무엇인지 파악하기 어렵다.

### 4.2 등급 영향 구조 분석

사례집합에 대한 귀납적 추론은 교량상판의 상태평가를 지배하는 속성의 우선순위와 그에 연관된 의사결정 계층구조를 도출한다. 평가등급을 클래스로 하여 사례집합으로부터 객체수를 구하면 a 클래스 1개, b 클래스 29개, c 클래스 48개, d 클래스 35개, e 클래스 6이고, 이 경우 교량상판의 상태 클래스에 대해 식 (14)에 의해 계산된 전체 엔트로피 정보값  $H(C)$ 의 값은 1.819이다.

Fig. 7을 통해 0.2mm 이상의 균열이 발생 시에는 바닥판 상태등급이 a 등급인 경우가, 0.3mm이상인 경우에는 a, b 등급인 경우가 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 균열이 0.2mm 및 0.3mm 속성 값에서는 바닥판 상태등급 c가 나올 확률이 50%, 0.4mm에서는 35%를 넘고 있다.

Total Entropy : 1.819 bit

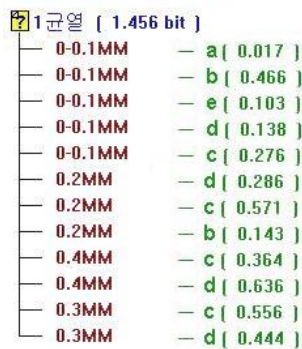


Fig. 7 1방향균열

Table 12.a에서는 1방향균열 0~0.1mm 경우가 타 경우에 비해 가장 큰 불확실성을 갖는다.

Table 12.a 1방향균열

클래스	0-0.1mm	0.2mm	0.3mm	0.4mm	0.5mm
$m(C_i)/m(C)$	0.487	0.118	0.303	0.092	0.000
$H(C_i)$	1.860	1.379	0.991	0.946	0.000
$E(A_i)$	1.456				

Table 12.b에서는 2방향균열이 없는 경우가 전체 사례의 47%정도를 차지하고 있으며, 2~10%의 속성 값이 타 속성에 비해 상당한 변별력을 지니고 있다.

Table 12.b 2방향균열

클래스	없음	2%미만	2~10%	10%이상
$m(C_i)/m(C)$	0.471	0.269	0.160	0.101
$H(C_i)$	1.354	1.043	0.486	1.000
$E(A_i)$	1.096			

Fig. 8을 통해 없음 속성 값 이외에서는 a 등급이, 2~10%이상에서는 a, b 등급이, 10%이상에서는 a, b, c 등급이 나타나지 않고 2~10% 속성 값에서는 d 등급이 나올 확률이 80%가 넘고, 10%이상인 경우는 d 혹은 e 등급임을 알 수 있다.

Total Entropy : 1.819 bit



Fig. 8 2방향균열

Fig. 9에서는 속성 값이 10%가 넘는 경우는 a, b 등급이 나타나지 않고 2%미만의 속성 값에서는 b 혹은 c 등급이, 2~10% 속성 값에서는 c 혹은 d 등급이 나타날 확률이 90%가 넘는다. Table 12.c에서는 2%미만의 속성 값이 사례의 49%정도 차지하고 있다.

Total Entropy : 1.819 bit



Fig. 9 백태

Table 12.c 백태

클래스	없음	2%미만	2-10%	10%이상
$m(C_i)/m(C)$	0.067	0.496	0.261	0.177
$H(C_i)$	1.811	1.487	1.280	1.519
$E(A_i)$	1.460			



박락 및 층분리 평가속성에서 엔트로피는 1.717bit로 감소하였다. 속성 값이 10%이상을 제외한 모든 경우에서 바닥 판 경간이 c 등급일 확률은 40%가 넘는다.

Fig. 10에서 재료분리의 경우 2%미만에서는 a 등급이 나타나지 않고, c 혹은 d 등급이 나올 확률이 68%정도임을 알 수 있다. 또한 없는 경우는 c 등급이 40%정도를 차지한다.



Fig. 10 재료분리

철근노출 속성에서는 속성 값이 1%미만을 넘는 경우 a 등급이 나타나지 않고, 없음인 경우에는 c 및 d 등급이 51% 정도 나타난다. Table 12.d를 통해 거의 모든 사례가 없음 및 1%미만의 속성 값에서 나타남을 알 수 있다.

Table 12.d 철근노출

클래스	없음	1%미만	1-3%	3-5%	5%이상
$m(C_i)/m(C)$	0.513	0.462	0.025	0.000	0.000
$H(C_i)$	1.816	1.789	1.585	0.000	0.000
$E(A_i)$	1.798				

Fig. 11에서 없음 이외의 속성 값에서는 a 등급이, 주변 누수의 속성 값에서는 a, b 등급이 나타나지 않고 없음의 속성 값에서는 c 등급이 나올 확률이 41%정도이고, 주변누수의 속성 값인 경우는 c 혹은 d 등급일 확률이 58%임을 알 수 있다.



Fig. 11 누수

Table 12.e에서는 주변누수의 속성 값이 없음과 1%미만인 경우에 비해 불확실성이 반감됨을 알 수 있으며 또한 물

비침 속성 값인 경우가 사례의 59% 정도임을 알 수 있다.

Table 12.e 누수

클래스	없음	물비침	주변누수	부식및누수
$m(C_i)/m(C)$	0.303	0.597	0.101	0.000
$H(C_i)$	1.982	1.707	0.980	0.000
$E(A_i)$	1.717			

Table 13은 속성별 정보이득과 정보획득순위를 나타낸 것으로 바닥판 상태평가 기준 중 박락 및 층분리, 재료분리, 철근노출의 속성은 정보획득 값이 작아서 상태등급 클래스에 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 2방향균열, 1방향균열, 백태, 누수, 재료분리, 박락 및 층분리, 철근노출의 순서로 정보를 획득하여 의사결정트리를 구성하고 속성간의 구조적 연관성을 파악해야 한다.

Table 13 속성별 정보획득순위

DAMAGE	$E(A_i)$	$G(A_i)$	정보획득순위
1방향균열	1.456	0.363	2
2방향균열	1.096	0.723	1
백태	1.460	0.359	3
박락 및 층분리	1.782	0.037	6
재료분리	1.744	0.075	5
철근노출	1.798	0.021	7
누수	1.717	0.102	4

Fig. 12는 위의 사례집합에 ID3 알고리즘을 적용하여 작성한 의사결정트리이다. 그 구조는 마디(node)와 가지(link)로 구성된다. 각각의 마디는 사례들이 표현된 속성을 표시하고, 가지는 그 속성이 취할 수 있는 값을 나타낸다. 또한 ID3 알고리즘은 원하는 결론에 가장 근접한 의사결정트리를 형성한다. 즉 가장 분별력이 큰(평가등급에 가장 영향력이 큰)속성이 트리의 상단부 노드에 위치한다. 본 사례의 경우 정보획득 값이 가장 큰 2방향균열 속성을 루트로 정하였다. 여기서 전체 엔트로피(1.819bit)는 1.096bit로 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 이것은 그만큼의 불확실성이 감소함을 의미한다.

계층적으로 분석하면 2방향균열에서 속성 값 10%이상의 가지는 백태를 마디로 취하고, 이 때 엔트로피는 1.096에서 0.0으로 되어 불확실성이 제거되었음을 나타내고 있다. 즉, 여기서 평가되는 바닥판의 경간별 등급은 백태 속성 값에 의해 결정되고 모두 d 혹은 e 등급이 된다는 것을 알 수 있다. 없음의 속성 값을 가지로 취한 경우는 1방향균열이 마디로 결정되고 속성 값에 따라 분기되며 각각 백태, 누수, 재료분리의 속성노드 및 속성 값으로 구성된다.



## 5. 결 론

현행 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침에 따라 기 수행된 1, 2종 교량의 정밀안전진단 등의 많은 사례를 분석해 보면, 실제 많은 경우 외관상태가 교량의 대표등급 결정에 지배적 요인이 되는 것을 볼 수 있다. 이런 점에서 결함도와 연관된 여러 상태속성들에 대한 면밀한 분석과 이해를 함으로써 보다 효과적인 점검 및 진단을 수행할 수 있다. 본 연구는 철근콘크리트 교량 바닥판 결함의 종류, 정도 및 범위를 포함한 손상속성들의 상태평가에 대한 영향도와 상호 연관성을 분석함으로써 손상도에 대한 이해도를 높이고 차후 상태평가를 위한 합리적 접근을 지원할 수 있도록 하였다. 본 연구는 인공지능을 이용한 귀납적 추론 기법을 원용하여 기 시행된 점검 및 진단 자료를 학습사례집합으로 교량상판의 상태평가를 지배하는 주요 속성을 분석하였다. 이를 위해 평가항목이 세분화되고 상태등급을 지배하는 속성 순위와 그에 연관된 의사결정구조를 도출하였다.

## 감사의 글

이 논문은 2009년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

## 참 고 문 헌

건설교통부 (1997) 교량관리체계개선에 관한 연구보고서, 건설교통부.  
 건설교통부 (1999) 교량점검 편람, 건설교통부.  
 건설교통부 (2003) 시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 지침, 건설교통부.  
 건설교통부 (2003) 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(교량 편), 한국시설안전(기술)공단, 건설교통부.  
 건설교통부 (2003) 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(터널 편), 한국시설안전(기술)공단, 건설교통부.  
 건설교통부 (2009) 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(교량 편), 한국시설안전(기술)공단, 건설교통부.

서울시 (1999) 성수대교 안전점검 편람, 서울시 건설안전관리본부.  
 안종필, 이증빈, 박주원 (2001) 인공신경망에 의한 터널의 상태 및 안정성 평가, 한국구조물진단학회 학술발표회 논문집, pp.155~160.  
 황진하, 박종희, 안승수, 김기현 (2002) RC 교량의 현장 안전진단을 위한 지식기반시스템의 원형개발, 한국구조물진단학회지, 6(3), pp.185~192.  
 황진하, 안승수 (2008) 손상유형 분할에 의한 콘크리트 바닥판의 상태평가 개선, 한국구조물진단학회지, 12(2), pp.139~148.  
 Dan, W.P. (1990) Introduction to Artificial Intelligence and Expert Systems, Prentice-Hall, p.448.  
 Pomorski, D., Perche, P.B. (2001) Inductive Learning of Decision Trees : Application to Fault Isolation of an Induction Motor, Engineering Applications of Artificial Intelligence, 14(2), pp.155~166.  
 Haykin, S. (1999) Neural Networks, 2nd. ed., Prentice-Hall, p.842.  
 Kawamura, K., Miyamoto, A. (2003) Condition State Evaluation of Existing Reinforced Concrete Bridges using Neuro-Fuzzy Hybrid System, Computers & Structures, 81(18-19), pp.1931~1940.  
 Luger, G., Stubblefield, W. (1993) Artificial Intelligence, 2nd Ed., The Benjamin/Cummings Pub, p.740.  
 Quinlan, J.R. (1986) Induction of Decision Trees, Machine Learning, 1, pp.81~106.  
 Shao, X., Zhang G., Li P., Chen Y. (2001) Application of ID3 Algorithm in Knowledge Acquisition for Tolerance Design, Journal of Materials Processing Technology, 117(1~2) pp.66~74.

- 논문접수일 2009년 8월31일
- 논문심사일 2009년 8월16일
- 게재확정일 2009년10월16일