

## Network Level을 고려한 교량의 우선순위 산정 알고리즘에 관한 연구

김광수<sup>1)</sup> · 김형열<sup>2)</sup> · 박선규<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 성균관대학교    <sup>2)</sup> 한국건설기술연구원

(2004년 4월 20일 원고접수, 2005년 5월 20일 심사완료)

### A Study on the Priority Ranking Algorithm for Bridge Management at Network Level

Kwang-Soo Kim<sup>1)</sup>, Hyeong-Yeol Kim<sup>2)</sup>, and Sun-Kyu Park<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, SungKyunKwan University, Suwon, 440-746, Korea

<sup>2)</sup> Korea Institute of Construction Technology, Goyang, 411-712, Korea

(Received April 20, 2004, Accepted May 20, 2005)

#### ABSTRACT

Bridge structures are properly designed in accordance with the design specifications with required safety margin. However, due to the heavy vehicle traffic and environmental attacks, bridge often requires repairs and the deteriorated one should be replaced or rehabilitated. In this paper, a prior ranking algorithm is proposed to assist a decision making process in bridge management at network level. Based on the literature survey for the existing studies, two important factors which affect the decision making procedure for bridge management at network level are identified. These factors are implemented into the algorithm as a load carrying capacity function and traffic function, respectively.

**Keywords :** priority ranking, network level bridge, road capacity, deficiency point

## 1. 서 론

우리나라에서는 '95년 성수대교 붕괴사고 이후에 노후화된 교량에 대해서 지속적으로 개축 및 보수사업을 시행하여 교량의 안전성과 사용성을 확보하고 있으나, 도로를 통행하는 차량의 증량화로 인하여 교량의 설계하중이 현행 설계기준으로 1등급에 미달하는 교량과 통행제한하중이 설정되어 있는 교량에 대한 근본적인 대책마련이 필요하게 되었다. 2004년 작성된 교량현황조사<sup>1)</sup>에 따르면 우리나라에 가설되어 있는 21,117개소의 교량중에서 약 40%에 해당하는 8000여개소의 교량은 2등급 이하의 교량에 해당된다.

본 논문에서는 개별적인 교량<sup>1)</sup>(Project Level)에 대한 것이 아닌 관리주체가 관할하고 있는 전체 교량(Network Level)에 대하여 주어진 예산범위 내에서 보다 효과적인 예산의 배분이 이루어질 수 있도록 하기 위한 우선순위 산정 알고리즘에 대한 연구를 수행하였다. 우선순위 산정에 대한 목적은 위에서 언급된 바와 같이 1등급에 미달하

는 교량에 대한 등급상향이 될 수도 있으며, 보수나 보강 또는 성능개선이 목적이 될 수도 있다. 이와 같은 목적에 따라 교량을 선택해야 할 경우 교량이 보유하고 있는 내하력, 외관상태, 중차량 통과빈도 등을 고려하여 우선적으로 예산을 배분해야 할 교량의 순위를 선정함으로써 유지관리주체의 주관성이 배제된 보다 합리적이고 효율적인 교량의 유지관리가 이루어져야 할 것이다. 우리나라에서는 건설교통부, 한국도로공사, 지방자치단체가 각각 교량에 대한 관리주체로 있으나, 본 연구에서는 건설교통부가 관리주체로 있는 일반국도상 교량의 통계치를 활용하여 우선순위에 대한 알고리즘을 제시하였다.

## 2. 국내·외 현황

### 2.1 국내 현황

건교부에서는 일반국도상에 가설되어 있는 모든 교량에 대해 과학적이고 합리적인 방법으로 유지관리하기 위하여 1995년에 교량관리시스템(BMS)<sup>2)</sup>을 개발하고 1996년에는 6개 지방국도관리청, 18개 국도유지건설사무소를 연결하는 전산망을 구축하여 활용하고 있으며, BMS내에 포함된 방

\* Corresponding author

E-mail : whitesky@skku.edu

©2005 by Korea Concrete Institute

대한 자료를 바탕으로 여러 가지의 선정 알고리즘을 확보하고 있다. 따라서 국내의 교량관리시스템(BMS)으로서는 가장 활발한 연구가 지속되고 있는 시스템이라 할 수 있다.

한국도로공사의 경우 고속도로상에 가설된 교량을 대상으로 1999년에 교량유지관리 시스템의 개발 및 운용에 관한 연구를 수행하였으며, 고속도로 교량관리시스템(HBMS)<sup>3)</sup>을 개발하여 여러 가지 모듈을 포함하고 있다.

지방자치단체의 경우 우선순위 선정방법에 대한 체계는 수립되지 않았으며, 한강상 교량에 요구되는 사업에 대하여 유지관리를 실시하고 있다. 또한, "시특법"상 실시하도록 규정된 정밀안전진단 실시 이후 내하력이 저하된 저등급(1등급미만) 교량에 대하여 현행 설계등급상 1등급으로 등급을 상향시키는 사업을 시행중에 있다. 현행 국내의 교량 유지관리주체가 시행하고 있는 사업의 대상교량을 선정하는데는 나름대로 기준이 수립된 곳도 있으나, 그 기준이 미흡하거나 합리적이지 못한 아쉬움이 있으며 이에 대한 보다 과학적이고 합리적인 기준마련이 시급하다 하겠다.

## 2.2 국외 현황

선진외국의 경우 가장 활발하게 교량의 유지관리에 연구비를 투자하고 있는 나라는 미국으로서 미국은 1967년 West Virginia주(州) 실버교(Silver Bridge) 붕괴사고 이후 저등급 교량의 성능개선을 위한 SBRP(Special Bridge Replacement Program)<sup>7)</sup>를 제정하였고, 연방정부는 주정부가 관리하고 있는 교량중 우선순위를 선정하여 보수, 개축 등에 필요한 예산을 지원하고 있다. 하지만 모든 교량에 대해 동일한 기준을 적용하는데는 여러 가지 한계가 있으므로 각 주에서는 독자적인 의사결정 모듈을 개발하여 적용하고 있다.

### 2.2.1 미연방도로국(FHWA)

미연방도로국(FHWA)에서는 각 주(州)에서 조사된 결과를 바탕으로 하여 충분도(Sufficiency Rating)를 이용해 교량의 개축과 보강에 대한 판단을 하고 있으며, 충분도<sup>8)</sup>(Sufficiency Rating)는 다음의 식(1)에 나타난 것처럼 교량이 제기능을 하는데 필요한 충분한 정도를 나타내는 지표로서 전체교량에 대해 단독적으로 또는 다른 요소와 더불어 우선순위 산정공식으로 폭넓게 사용되고 있으며, 일명 HBRRP(Highway Bridge Replacement and Rehabilitation Program)의 예산을 배분하기 위한 대상교량을 선정하는데도 사용하고 있다.

$$SR = S_1 + S_2 + S_3 - S_4 \quad (1)$$

여기서, SR : 충분도

S<sub>1</sub> : 구조적인 적합성 및 안전성(최대 55%)

S<sub>2</sub> : 기능적인 노후성 및 사용성(최대 30%)

S<sub>3</sub> : 사용 목적성(최대 15%)

S<sub>4</sub> : 잉여변수(최대 13%)

충분도(SR)는 0과 100사이에 존재하게 되며, S<sub>1</sub>은 교량의 구조적인 결함상태 및 내하력으로 판단하고, S<sub>2</sub>는 교폭, 통과높이, 선형 등에 의해 사용자에게 불편함을 주는 정도로 판단한다. 또한, S<sub>3</sub>는 교량의 중요도나 교통량에 의해 판단되고, S<sub>4</sub>는 잉여변수로서 나머지 항목들의 합이 50%를 초과할 때 적용된다. SR이 0에서 50사이의 값이면, 교량의 성능개선이나 개축을 심각하게 고려해야할 수준이며, 80보다 클 경우에는 일상적인 유지관리로도 충분한 것을 나타낸다.

### 2.2.2 노스캐롤라이나 도로국

미국의 노스캐롤라이나 도로국(North Carolina DOT)에서는 기존의 충분도(Sufficiency Rating)방법을 보다 개선하여 의사결정의 모듈로 LOSAP(Level-of-Service Prioritization Program)이라는 프로그램을 개발하였다. LOSAP은 교량이 사용성에서 규정된 사용자수준을 어느정도 만족시키는 지에 따라 개축이나 보강에 대한 교량의 우선순위를 정하며, 다음의 식(2)에서와 같이 결함점수<sup>9)</sup>(Deficiency Point)를 정하고 있다.

$$DP = CP + WP + VP + LP \quad (2)$$

여기서, DP : 결함점수

CP : 내하결함점수(Load Capacity)

WP : 교폭결함점수(Width)

VP : 통과높이결함점수(Vertical Clearance)

LP : 잔존수명결함점수(Remaining Life)

NCDOT에서는 교량의 사용성 목표수준은 단위차량에 대한 내하력, 교폭, 다리밑공간, 잔존수명 등의 평가항목을 바탕으로 정의된다. 일평균교통량(ADT), 우회로연장, 도로의 기능적 분류, 사용성 목표 등과 관련된 항목들을 평가하여 결함정도를 고려한 경험식에 의해 사용성 목표 수준에 미달하는 교량의 결함점수를 산정하며, 여기서 산정된 결함점수가 높은 교량일수록 결국 우선적인 대상교량으로 선정 된다.

### 2.2.3 버지니아 도로국

버지니아 도로국(Virginia DOT)에서 사용하는 의사결정 시스템<sup>9)</sup>은 사용자수준의 목표내하력, 교폭, 그리고 다리밑공간 등과 같은 항목에 근거하고 있으며, 위에서 언급된 NCDOT의 시스템과 거의 유사한 방식으로 구성되어 있다.

### 2.2.4 펜실베니아 도로국

펜실베니아 도로국(Pennsylvania DOT)의 의사결정 시스템<sup>8)</sup>은 연방도로국의 충분도와 North Carolina주의 사용자수준(Level of Service)을 결합한 것이다. 또한, 세부적으로 8개의 필요함수(Need Function)로 표현되며, 전체결함지수(Total Deficiency Rating: TDR)는 0과 100사이의 값으로 다음의 식(3)과 같이 평가한다.

$$TDR = \phi [LCD + WD + VCOL + VCU + BCD + RLD + AAD + WAD] \quad (3)$$

여기서, TDR : 전체결함지수  
 $\phi$  : 기능별 가중계수  
 LCD : 내하력 결함도  
 WD : 교폭결함도  
 VCOL : 상부통과높이 결함도  
 VCU : 하부통과높이 결함도  
 BCL : 교량상태 결함도  
 RLL : 잔존수명 결함도  
 AAL : 접근선형 결함도  
 WAL : 수로적합 결함도

위의 펜실베니아 도로국의 전체결함지수를 평가하는 항목중에서 가장 높은 점수비중(70%)을 차지하고 있는 내하력 결함도를 살펴보면 다음의 식(4)와 같다.

$$LCD = \Phi [K_0 (CG_B) (K_1 (TR))^{K_3} + K_2 (TR) (DR)] (1 - \frac{RC}{CG_B})^{K_4} \quad (4)$$

여기서,  $\Phi$  : 내하력가중치  
 $CG_B$  : 내하력목표하중  
 TR : 교통비  
 DR : 우회도로비  
 RC : 내하력등급  
 $K_0(0.044), K_1(0.75), K_2(0.25), K_3(0.3), K_4(1.5)$

위의 내하력 결함도는 교량의 내하등급, 일평균교통량 및 도로의 우회길이의 함수로 구성된 것을 알 수 있으며, 교통량과 우회도로에 대한 비중을 75% 및 25%로 설정하였다.

상대적으로 복잡한 시스템을 갖고 있는 펜실베니아 도로국의 의사결정시스템은 일평균교통량과 내하력 및 교량의 외관상태를 종합적으로 고려하여 접근하는 방식이므로 다른 주(州)에 비해 효과적인 시스템이라 하겠다.

### 3. 우선순위 산정 알고리즘

본 논문에서는 전체적인 교량에 대하여 우선순위를 산정하기 위하여 교량의 평가지수(Rating Index)를 사용하였다. 즉, 평가지수<sup>10,12)</sup>는 교량의 내하성능과 관련된 내하결함지수(LCD)와 외관상태와 관련된 외관상태결함지수(CFI)의 항목으로 구성되어 있으며, 다음의 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$RI = LCD + CFI \quad (5)$$

여기서, RI : 교량의 평가지수(Rating Index)  
 LCD : 내하결함지수  
 CFI : 외관상태결함지수

위의 식(5)에서 나타낸 평가지수에서 내하결함지수와 외관상태결함지수의 점수 배정은 각각 60점과 40점으로 설정하여 100점 만점으로 구성하였다. 각각의 항목은 결함을 나타내는 정도이므로 평가지수가 높게 산정될수록 우선적인 대상교량으로 선정되도록 하였다.

#### 3.1 외관상태결함지수(CFI)

외관상태에 대한 결함지수(CFI)는 40점 만점으로 구성되어 있으며, 세부적인 평가항목<sup>5,6)</sup>은 다음의 Table 1에 나타내었다. 또한, 상태등급<sup>5,6)</sup>에 따른 평가점수는 다음의 Table 2에 나타내었다.

**Table 1** Appraisal rating for condition and function

Category	Appraisal item		Point	
Condition (60)	Expansion joint	Body	2	
		Grouting	2	
	Parapet, kerb		2	
	Drainage		2	
	Slab	Crack, delamination	12	
		Leakage, efflorescence	7	
	Shoe		7	
	Girder	Concrete	End	11
			Center	11
		Steel	Crack, displacement	6
Connection			6	
Cross beam	Concrete	Diaphragm	4	
	Steel	Sub-element	4	
Function (40)	Vertical clearance		8	
	Approach, roadway alignment		16	
	Traffic safety		8	
	Repair		8	
	Total		100	

**Table 2** Deficiency point for condition rating

Condition rating	A	B	C	D	E	X	Q	etc.
Deficiency point	0	1	2	3	4	0	2	0

Table 1에 나타난 각각의 평가항목에 대한 배점은 교량의 상태 및 기능성 측면에 대하여 구성하였으며, 이 값은 교량점검결과에 근거하여 산정되며, 배점기준은 상태에 60점, 기능성에 40점으로 하여 총 100점 만점으로 구성하였으나, 평가지수에서 할당된 점수는 40점이기 때문에 외관 상태에 대한 결합지수는 산정된 점수의 40%를 사용하도록 하였다.

위의 Table 2의 상태등급에 따른 평가점수에서는 점수를 A~E의 5개구간으로 구분하였으며, 상태등급 X는 해당사항이 없는 경우이며, 상태등급 Q는 해당항목에 대한 자료를 알 수 없는 경우를 나타낸다.

**3.2 내하결합지수(LCD)**

교량의 내하결합지수는 두 부분으로 나누어 생각할 수 있는데, 하나는 교량이 보유하고 있는 내하력과 대상 교량이 위치하고 있는 노선에서의 교통량이다. 교통량은 중차량에 의한 효과를 반영하기 위하여 일평균트럭교통량(ADTT)값을 사용하였다. 하지만 교량의 내하력과 일평균트럭교통량과의 결합을 위해서는 두 변수간의 상관성을 분석해야 하며, Fig. 1은 이와 같은 상관도를 나타내고 있다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 내하력과 일평균트럭교통량은 서로 독립적인 관계임을 확인하고 식(6)과 같이 내하력과 일평균트럭교통량의 선형결합으로 나타내었다.

$$LCD = W_{LCD} \cdot [ A \cdot LCF + B \cdot ADTTF ] \quad (6)$$

여기서,  $W_{LCD}$  : 내하결합지수 가중치

A : 내하력 가중치

LCF : 내하결합함수

B : 일평균트럭교통량 가중치

ADTTF : 교통량결합함수

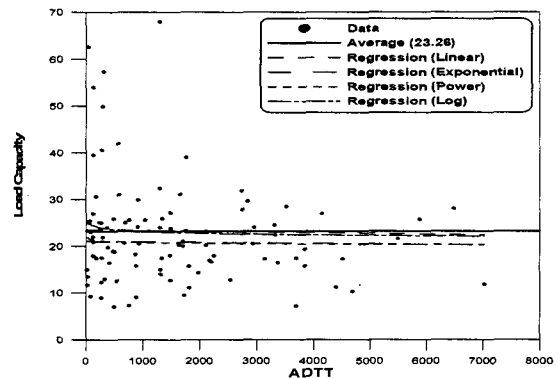
위에서 사용된 내하결합지수 가중치는 평가지수의 60%에 해당하는 값이며, 내하력 가중치 및 일평균트럭교통량(ADTT) 가중치값은 각각 0.75와 0.25값을 사용하였다<sup>13)</sup>.

**3.2.1 내하결합함수(LCF)**

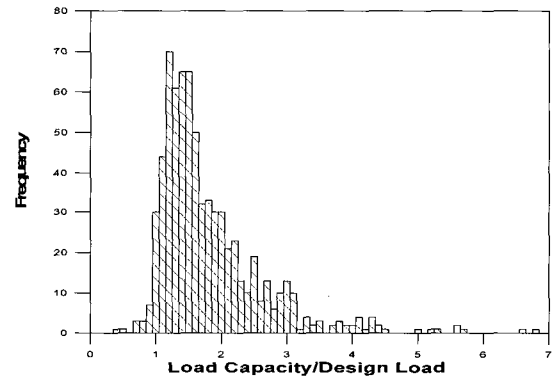
내하결합지수(LCD)에서 75%의 비중을 차지하고 있는 내하결합함수는 선형적으로 결합도를 평가할 수 없으므로 현재 교량이 위치하고 있는 노선에서 내하력 분포특성을

반영하기 위하여 교량의 내하력을 설계하중으로 나눈 내하력 빈도곡선을 다음의 Fig. 2에 나타내었다.

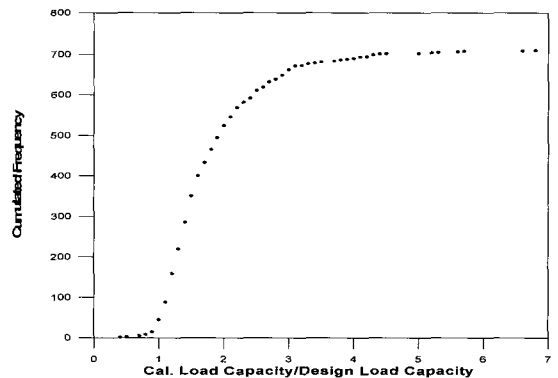
교량이 보유한 내하력을 본래의 설계하중으로 나눈 것에 대한 빈도곡선을 Fig. 2에 나타내었으나, 내하력에 대한 우열을 나타내기 위한 함수를 구성하기 위하여 Fig. 3과 같이 내하력 누적빈도 곡선을 구하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 누적빈도 곡선상의 초반부에 기울기가 “0”에 가까운 값이 포함되어 있어 대상교량에 대한 우열을 나누기에는 부적합하기 때문에 초반부의 데이터를 제외하고 수정된 내하력 누적빈도 곡선을 Fig. 4와 같이 구하였다.



**Fig. 1** Relativity of load capacity to ADTT



**Fig. 2** Curve of frequency by load capacity/design load



**Fig. 3** Curve of cumulated frequency by Fig. 2

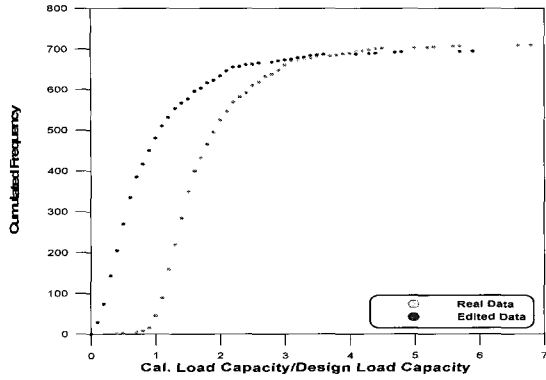


Fig. 4 Cumulated frequency curve of modified by Fig. 3

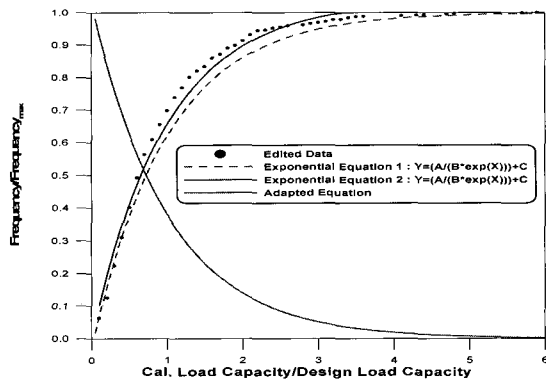


Fig. 5 Regression analysis for the LCF

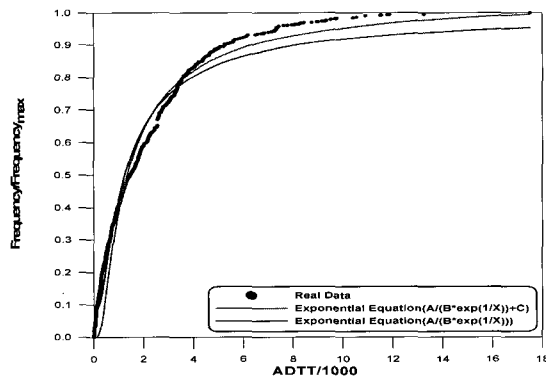


Fig. 6 Regression analysis for the ADTTF

본 논문에서는 수정된 내하력 누적빈도 곡선을 회귀분석하여 지수함수형태의 내하결함함수를 다음의 식(7)과 같이 산정하였다. Fig. 5에서는 교량의 내하력값이 높을수록 내하결함지수(LCD)는 낮은 평가를 받아야 하므로 수정된 함수의 사용을 나타낸다.

$$LCF = \frac{A}{B \cdot \exp(X_1)} + C \quad (7)$$

여기서,  $LCF$ : 내하결함함수,  $A$ : 0.0057  
 $B$ : -0.00553,  $C$ : 1.00,  $X_1$ : 내하력/설계하중값

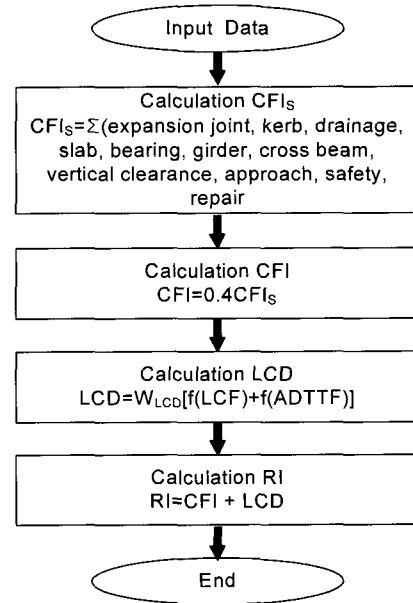


Fig. 7 Priority ranking algorithm

### 3.2.2 교통량결함함수(ADTTF)

대상교량에 대한 일평균트럭교통량을 조사하여 내하결함함수에서와 같은 방법으로 빈도곡선을 구하였으며, 이후 누적빈도 곡선을 산정하여 회귀분석을 수행하였다. 교통량결함함수(ADTTF)는 교통량이 많을수록 결함점수를 높게 부여하게 되므로 내하결함함수(LCF)와는 달리 수정되지 않은 값을 그대로 사용하였다. 회귀분석된 곡선식을 식(8)에 나타내었으며, Fig. 6은 그 결과를 나타내고 있다.

$$ADTTF = \frac{D}{E \cdot \exp\left(\frac{1}{X_2}\right)} \quad (8)$$

여기서,  $ADTTF$ : 교통량결함함수,  $D$ : 0.000681,  
 $E$ : 0.000647,  $X_2$ : 일평균트럭교통량/1000'

이상에서 내하결함함수(LCF)와 교통량결함함수(ADTTF)를 산정하였으므로 위에서 산정된 식(6)에 대입하여 내하결함지수(LCD)를 산정하게 된다. 따라서, 최종적으로 구하고자 하는 교량의 평가지수는 다음의 식(9)에서와 같이 나타낼 수 있으며, 평가지수를 산정하는 흐름은 다음의 Fig. 7에 나타내었다.

$$RI = 0.6 \cdot \left[ 0.75 \left( 1 - \frac{10.31}{\exp(X_1)} \right) + 0.25 \cdot \frac{1.053}{\exp\left(\frac{1}{X_2}\right)} \right] + CFI \quad (9)$$

여기서,  $RI$ : 평가지수(Rating Index)

지금까지 산정된 각각의 항목을 이용하여 최종적으로 구하고자 하는 평가지수 산정을 위한 순서도를 다음의 Fig 7에 나타내었다.

## 5. 결 론

교량에 대한 유지관리는 갈수록 그 비중이 더해가고 있으며, 이러한 상황에 대응하기 위하여 보다 합리적인 방법으로 우선순위 산정알고리즘에 대한 연구를 수행하였으며 다음과 같이 결론을 요약할 수 있다.

- 1) 대상교량에 대한 유지관리주체의 주관적인 판단의 배제가 가능하므로 보다 객관성을 유지할 수 있다.
- 2) 제한된 예산범위내에서 우선적인 교량에 대한 선택을 할 수 있으므로 효율적인 예산집행으로 인한 국고절감을 기대할 수 있다.
- 3) 유지관리주체가 관리하고 있는 대상교량에 대한 실제적인 내하력과 일평균트럭교통량의 통계치를 활용함으로써 보다 현실적인 식을 제안할 수 있다.

## 참고문헌

1. 건설교통부, 2004년 교량현황조사, 건설교통부, 2004.
2. 건설교통부, 교량관리체계개선, 건설교통부, 최종보고서, 1995, pp.34~54.
3. 한국도로공사, 교량유지관리 시스템의 개발 및 운용, 한국도로공사, 연구보고서, 1999, pp.82~104.
4. 건설교통부, '97 교량관리체계 개선에 관한 연구, 건설교통부, 최종보고서, 1997, pp.40~50.
5. 건설교통부, '01 교량관리시스템 운영 및 유지관리, 건설교통부, 최종보고서, 2002, pp.27~34.
6. 한국건설기술연구원, 도로용량편람 개선 연구, 제2단계, 한국건설기술연구원, 2000, pp.42~44.
7. FHWA, *Bridge Management Systems*, Washington D.O.T, U.S.A., 1989, pp.2~13.
8. FHWA, *Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges*, Washington D.O.T, U.S.A., 1995, pp.2~13.
9. AASHTO, *Manual for Condition Evaluation of Bridges*, AASHTO, U.S.A., 1994, pp.23~46.
10. P. P. Xanthakos, *Bridge Strengthening and Rehabilitation*, Prentice Hall PTR, 1996, pp.1~60.
11. California Department of Transportation, *Element Level Inspection Manual*, California Department of Transportation, 1996, pp.102~160.
12. G. T. Akan, "Priority Ranking of Highway Improvement Projects", *Construction Management and Economics*, Vol.2, 1984, pp.49~55.
13. C. S. Kumares, *Enhancements of the Project Selection Module of the Indiana Bridge Management System*, TRB Transportation Research Circular 498, 1997, pp.3~8.

## 요 약

교량구조물은 설계당시에 설계기준에서 요구하는 구조적 안전성을 확보할 수 있도록 설계 및 가설된다. 그러나 시간이 지날수록 중차량이나 교통환경변화 등 여러 원인에 의해 손상을 받게되고 문제가 있는 교량은 결국에는 교체 또는 개선이 필요하게 된다. 본 논문에서는 기존 연구자료를 검토하여 교량의 유지관리조치를 수행하기 위한 의사결정과정에 영향을 미치는 인자를 파악하였고, 이를 이용하여 우선순위 산정 알고리즘을 제안하였다.

**핵심용어** : 우선순위, 전체교량, 내하력, 결합집수