

# 레이더를 이용한 콘크리트 교량의 바닥판 상태평가

## Condition Evaluation of Concrete Bridge Decks using GPR

서진원\*

이지영\*\*

이일용\*\*\*

Suh, Jin-Won

Rhee, Ji-Young

Lee, Il-Yong

### Abstract

In this study, the Ground Penetrating Radar(GPR) was tested to evaluate the condition of concrete decks. Test results obtained by GPR were compared with values measured from drilled cores and damage mapping by the visual survey. It is shown that GPR can provide highly accurate measurements of layer properties of concrete decks and can map areas of deterioration in bridge decks by dielectric constants. The deck condition can be grouped into categories of "good" or "distressed".

The ground penetrating radar data shows promise for producing rapid and accurate condition assessment for bridge decks. And these data can be used to evaluate highway bridge condition and make cost-effective bridge deck rehabilitation by accurately estimating the quantity of deteriorated concrete.

**keywords** : GPR, concrete deck, dielectric constant, deterioration

### 1. 서론

교량의 중요부재인 콘크리트 바닥판은 차량하중과 우수 침투등과 같은 유해한 환경에 직접 노출되어 손상이 많이 발생하고 있다. 그러나 기존의 바닥판의 상태평가방법은 육안점검, 코어채취, 또는 부식전위시험등을 통하여 이루어지고 있으나, 이러한 방법들은 노동집약적이고, 교통통제를 필요로 하여 특정 부위를

선정하여 시행하므로 바닥판 전체에 대한 평가는 실시하기 어려우며, 더욱이 아스팔트 포장에 되어 있는 경우에는 바닥판의 내부상태를 알기 어렵다.

따라서, 교통장애를 유발시키지 않고 신속·정확하게 콘크리트 바닥판에 대한 상태평가를 하기 위해서, 레이더장비를 탑재한 차량을 제작하여 실교량에서의 적용성을 연구, 검토하였다.

\* 정회원, 한국도로공사, 도로연구소, 책임연구원

\*\* 정회원, 한국도로공사, 도로연구소, 연구원

\*\*\* 정회원, 한국도로공사, 도로처, 대리

• 본 논문에 대한 토의를 2000년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2001년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 2. 레이더 탐사의 원리

### 2.1 구성

교통차단없이 바닥판 상태를 신속하게 조사하기 위해서 레이더 탐사장비(GSSI사에서 개발된 SIR10B)를 차량내부에 설치하고, 후부에 송·수신 안테나가 분리되어 있는 주파수 1GHz의 혼안테나 4조를 교면에서 45cm의 높이를 유지하도록 장착하였다. 또한, 측정하는 데이터의 Sampling 간격설정 및 측정위치를 파악하기 위해서 차량의 뒷바퀴에 거리측정기(Distance Measuring Instrument)를 설치하였다.

이와 같은 탐사차량에 의해 획득된 측정자료는 컴퓨터에서 개발된 전산 프로그램을 이용하여 분석·처리된다.

### 2.2 기본 원리

레이더 탐사법의 원리는 전자파를 이용한 반사법 탐사기술로 이론적 기초는 탄성파 탐사에 있다. 전자파가 안테나를 통해 유전물질로 전달되어 유전물의 성질이 변하는 물질의 경계면에서 반사된다. 이렇게 반사된 신호들은 수신안테나로 전달되어 전압으로 환산되고 "레이더 파형(Radar Waveform)"이라고 불리는 시간-전압의 기록을 생성한다. 이러한 반사파를 수신하여 반사에너지의 크기와 전파시간을 기록하면, 반사가 발생한 곳의 위치 및 심도 등 매질 내부의 정보를

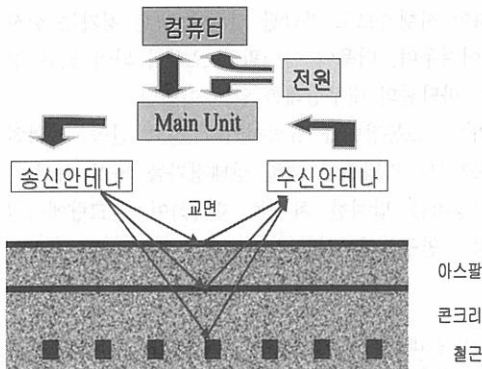


Fig. 1 레이더에 의한 반사파형 수집 개념도

얻을 수 있다. 이것이 가장 기초적인 레이더탐사의 원리로 Fig. 1은 레이더 데이터의 수집 개념도를 잘 나타내고 있다

## 3. 바닥판에서의 레이더 분석모델

### 3.1 레이더와 바닥판 단면 모델

전자파 이론에 근거한 분석 알고리즘을 개발하기 위해서 바닥판의 물리적인 특성과 레이더 반사 사이의 관계를 정확히 나타낼 수 있는 모델이 필요하다. 그림 2는 기본적인 레이더 파형으로 정점 A는 공기/아스팔트 경계면에서의 반사, 정점 C는 아스팔트/콘크리트 경계에서의 반사, 정점 D는 상부 철근에서의 반사를 나타낸다.

### 3.2 경계면에서의 왕복시간 및 진폭 산정

바닥판에 대한 단면특성(교면포장의 두께, 피복두께, 바닥판 두께 등)과 위에서 언급한 바닥판을 통과한 레이더파의 반사특성에 대한 이해는 경계면에서의 레이더 파의 왕복시간과 진폭을 구하는 데 유용하게 사용될 수 있다. 즉, 바닥판의 단면특성을 고려하여 소정의 범위를 입력하고, 그 범위에서 반사파의 크기가 정점(정점 A,C,D)이 되는 왕복시간을 찾게하면, 원하는 경계면에서의 레이더파의 왕복시간과 진폭을 얻을 수 있다.

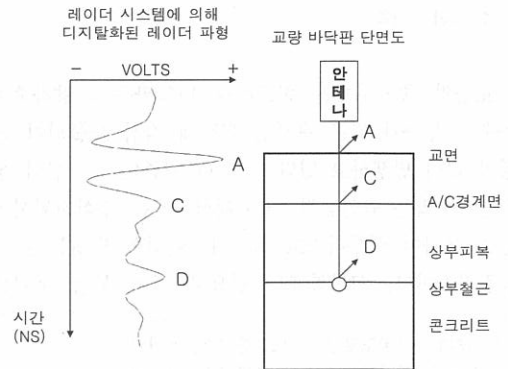


Fig. 2 바닥판에서의 레이더 반사 모델

### 3.3 분석알고리즘

반사 및 투과 법칙을 사용하면, 바닥판을 통과할 때 레이더파의 거동은 Fig. 3과 같이 모델화될 수 있다.

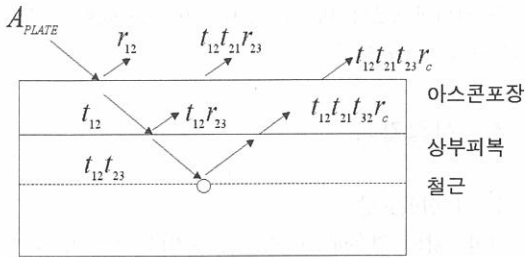


Fig. 3 바닥판에서의 반사와 전달계수

이 모델은 바닥판 경계에서 층의 유전율에 대한 수식을 유도하는 데 사용될 수 있다. 일례로, 공기/아스팔트 경계의 반사계수(\$r\_{12}\$)는 다음과 같이 정의된다.

$$r_{12} = \frac{A}{A_{PLATE}} = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_{ASP}}}{1 + \sqrt{\epsilon_{ASP}}}$$

여기서,

\$A\$ = 공기/콘크리트경계면의 반사

\$A\_{PLATE}\$ = 입사레이더파의 진폭

\$r\_{12}\$ = 공기/콘크리트 경계면의 반사계수

\$t\_{12}\$ = 공기/콘크리트 경계면의 전달계수

\$r\_{23}\$ = 아스팔트/콘크리트 경계면의 반사계수

\$t\_{23}\$ = 아스팔트/콘크리트 경계면의 전달계수

\$r\_C\$ = 원형철근으로의 반사계수

### 3.4 유전율의 산정

교량 바닥판에 평평한 강판의 반사실험은 아스팔트의 유전율을 계산하는 데 사용될 수 있다. 공기/아스팔트 경계로부터의 반사를 입사 레이더 파(금속판으로부터의 반사에 의해 측정될 수 있음)로 나눈 값은 반사계수 \$r\_{12}\$와 같다.

따라서, 앞의 식을 이용하면, 아스팔트포장의 유전율 \$\epsilon\_{ASP}\$을 구할 수 있으며, 이것과 아스팔트와 콘크리트 경계면에서의 반사를 이용하여 콘크리트의 유전율을 얻을 수 있다.

$$\sqrt{\epsilon_{ASP}} = \frac{A_{PLATE} + A}{A_{PLATE} - A}$$

$$\sqrt{\epsilon_c} = \sqrt{\epsilon_{ASP}} \times \left[ \frac{1 + \frac{C(1 + \sqrt{\epsilon_{ASP}})^2}{A_{PLATE}(4\sqrt{\epsilon_{ASP}})}}{1 - \frac{C(1 + \sqrt{\epsilon_{ASP}})^2}{A_{PLATE}(4\sqrt{\epsilon_{ASP}})}} \right]$$

### 3.5 두께의 산정

유전율은 아스팔트 및 상부피복두께를 계산하는 데 사용된다. 진공에서의 빛의 속도(\$c\$)는 \$0.3m/ns\$이고, 깊이는 레이더 신호가 이동한 총 거리의 절반이므로 아스팔트 두께(\$d\_{ASP}\$)와 상부피복두께(\$d\_{TC}\$)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$d_{ASP} = \frac{cT}{2\sqrt{\epsilon_{ASP}}}, \quad d_{TC} = \frac{cT}{2\sqrt{\epsilon_c}}$$

여기서,

\$T\$ = 정점 \$A\$와 \$C\$사이의 시간 차(\$ns\$)이다.

### 3.6 바닥판 상태의 도면화

바닥판 분석 결과는 아스팔트 포장의 두께, 상부피복두께, 슬래브 두께 그리고 노후화된 부위를 Fig. 4에서와 같이 그래픽으로 표시할 수 있으며, 데이터는 ASCII file로 저장하여 범용 프로그램인 suffer 등과 연결하여 바닥판의 상태를 도면화하여 실제 구조물의 외관조사망도와 비교할 수 있다. 하면의 상판조사결과를 함께 나타내는 도면은 단순하고 쉽게 읽을 수 있다. 이러한 방식으로 콘크리트 바닥판의 상태를 평가하기 위한 레이더 기술을 실무에 적용할 수 있다.

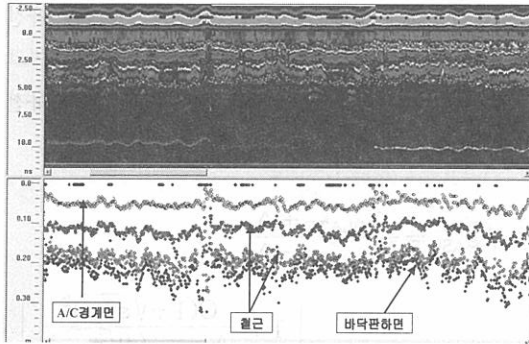


Fig. 4 바닥판 단면 분석 결과

## 4. 현장시험

### 4.1 시험대상교량 선정

레이더 시스템을 이용하여 교량 바닥판의 구조적인 특성(교면포장 두께, 피복두께, 바닥판 두께 등)과 바닥판의 노후특성을 평가하기 위해서 고속도로 상의 몇 개의 교량을 선정하여 현장시험을 실시하였다. 시험대상으로 선정된 교량은 다음과 같다.

- 바닥판 상태가 양호한 신설교량
- 콘크리트 노출포장을 갖는 교량
- 노후도가 심한 교량
- 방수가 부실할 것으로 추정되는 교량

현장시험결과는 신설교량의 경우 콘크리트의 상태가 양호하여 레이더 시스템의 적용성과 건전한 바닥판에서의 신호특성을 파악하고, 노후 교량을 평가하기 위한 기준을 제시할 수 있다. 평가결과는 설계도면과 비교하였다. 콘크리트 노출포장을 갖는 교량은 상면에서

손상이 쉽게 관찰되므로 레이더 탐사결과와 육안조사 및 코어시험과 비교하였다. 노후교량의 경우에는 교면에서 10m 간격으로 코어를 채취하고, 철거시에 아스팔트를 제거하여 상태를 비교하였다. 또한 실험결과는 건전상태의 교량과 비교하여 신호변화 및 바닥판의 특성을 정의함으로써 바닥판 상태평가 도구로서의 레이더능력을 평가하였다.

## 4.2 시험결과

### 4.2.1 신설교량

신설교량의 경우에, 아스팔트 포장의 두께 및 바닥판의 두께는 설계치와 유사하였으나, 상부피복 두께는 전반적으로 크게 시공된 것으로 나타났다. 콘크리트의 노후화에 영향을 주는 우수침투량과 밀접한 연관성이 있는 유전율은 평균값이 9, 표준편차가 1.5로 나타났다. 이것은 건전한 상태에 있는 콘크리트 바닥판의 유전율이  $12(\epsilon_{\text{mean}} + 2\sigma)$ 보다 작은 범위에 있을 가능성을 보여준다.

따라서, 콘크리트 바닥판의 상태를 유전율이 12이 하인 경우에는 "건전", 이상인 경우에는 "불량"으로 하여 레이법에 의한 바닥판의 노후도를 판정기준을 잠정적으로 설정하였다.

### 4.2.2 노출포장을 갖는 교량

콘크리트 노출포장을 갖는 교량 △는 1987년에 준공된 SBG (Steel Box Girder)교이며, 교량 ○는 1986년도에 준공된 SBG와 PSC의 혼합교로, 두 교량 모두 콘크리트 바닥판에 부분적으로 철근 노출이 발생하여 일부 브래머 보수를 시행하였고 철근에 발생한 부식이 육안으로 확인이 가능하였다.

Table 1 실험대상교량 개요

| 구 분     | 신설교량 |           | 콘크리트포장 |         | 아스팔트포장 |     |
|---------|------|-----------|--------|---------|--------|-----|
|         | A    | B         | △      | ○       | a      | b   |
| 형 식     | PSC  | Steel Box | SBG    | SBG+PSC | T      | PSC |
| 교 량 장   | 300M | 140M      | 100M   | 200M    | 40M    | 40M |
| 공 용 년 수 | 2년   | 2년        | 13년    | 15년     | 30년    | 30년 |

Table 2 신설바닥판에 대한 실험결과

| 구 분     | A    |      |      |
|---------|------|------|------|
|         | 평균   | 표준편차 | 설계   |
| 포 장 두 겹 | 8.0  | 1.3  | 8.0  |
| 상 부 피 복 | 8.1  | 2.1  | 4.0  |
| 바닥판 두께  | 20.7 | 1.9  | 20.0 |
| 유 전 율   | 9.0  | 1.3  | -    |
| 구 분     | B    |      |      |
| 포 장 두 겹 | 8.9  | 1.3  | 8.0  |
| 상 부 피 복 | 8.2  | 1.6  | 6.0  |
| 바닥판 두께  | 24.4 | 2.1  | 25.0 |
| 유 전 율   | 9.0  | 1.5  | -    |

Table 3 노출포장에 대한 실험결과

| 구분     | 위치   | △    |      |      |      | 설계   |     |
|--------|------|------|------|------|------|------|-----|
|        |      | 상행선  |      | 하행선  |      |      |     |
|        |      | 레이더  | 코어   | 레이더  | 코어   |      |     |
| 상부 피복  | mid  | 2.0  | 2.0  | 2.0  | 3.0  | 8.0  |     |
|        | pier | 9.0  | 9.0  | 4.0  | 3.0  |      |     |
| 바닥판 두께 | mid  | 20.0 | 23.0 | 22.0 | 21.0 | 29.0 |     |
|        | pier | 23.0 | 23.0 | 23.0 | 23.0 |      |     |
| 유전율    |      | 10.5 |      | 9.9  |      | -    |     |
| 구분     | 위치   | ○    |      |      |      | 설계   |     |
| 상부 피복  | SBG  | 9.0  | 8.5  | 11.0 | -    |      | 9.0 |
|        | PSC  | 10.0 | 13.0 | 9.5  | -    |      |     |
| 유전율    | SBG  | 9.4  |      | 9.6  |      | -    |     |
|        | PSC  | 9.2  |      | 8.5  |      |      |     |

현장실험은 두 교량의 바닥판 상부 피복두께 및 바닥판 두께를 구하여 설계치와 비교하여 상태평가 후 이를 외관조사 결과 및 균열발생부위에 코어채취와 드릴작업을 통한 실제값과 비교하였다.

실험결과를 요약하면 Table 3과 같다. 나타난 바와 같이 상부철근의 피복두께 및 바닥판 두께는 코어채취 및 드릴작업에 의한 실제값과 유사하게 나타났다. Fig. 5는 교량 △의 상부피복두께를 나타낸 것으로, 레이더에 의해 측정된 상부피복두께가 설계치에 비해 상당히 부족하게 평가된 부위에서는 이미 철근의 부식 및 손상이 발생되어 있었다. 따라서 바닥판의 주된 손상원인은 상부 피복부족임을 알 수 있었다.

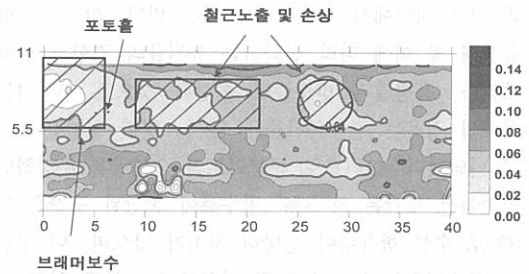


Fig. 5 교량 △의 상부피복 평가결과

#### 4.2.3 노후교량

노후교량의 경우에, 레이더법에 의한 바닥판의 구조적 특성 평가결과는 코어와 잘 일치하였으나, 전반적으로 아스팔트 두께 및 철근 피복두께가 설계치보다 매우 크게 나타났다. Fig. 6은 교량 a의 유전율을 나타낸 것으로, 그림에서 알 수 있듯이 평균은 13.5이며 표준편차 또한 크게 나타나, 우수유입에 의해 콘크리트 바닥판의 열화가 계속 진행되고 있는 것으로 추정되었다. 아스팔트 제거 후 바닥판 상면의 상태를 조사한 결과 콘크리트가 상당히 노후화 되어 있었음을 확인할 수 있었다. 동일년도에 준공된 교량 b의 경우에는 부분적으로 유전율이 크게 나타났지만 방수 상태가 양호하여 평균유전율이 건전한 교량의 평균값인 9에 근접한 결과를 나타내, 노후교량이라든 보수·보강으로 방수상태를 양호하게 유지시키면 바닥판의 수명을 상당히 연장될 수 있음을 알 수 있었다.

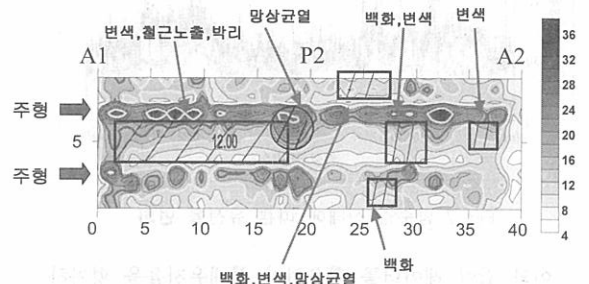


Fig. 6 교량 a의 유전율 평가 결과

#### 4.2.4 방수층 상태에 따른 신호특성

동일 교량에서 방수층이 손상된 차로와 그렇지 않은 차로의 레이더 결과를 비교함으로써 동일한 기상조건

과 같은 지역에서 방수상태에 따른 바닥판의 수분 함유상태 및 이에 따라 변화하는 유전율의 경향을 살펴 보았다. 측정결과 방수층이 손상된 것으로 추정되는 차로의 경우는 평균유전율은 12.7, 일반 구간은 9.2로 나타났다. 그러므로 콘크리트의 수분량을 추정하면 일반차선 구간은 약 3%, 방수층이 손상된 구간은 약 8%로 수분 함유량이 상당히 차이가 났으며, 이 구간은 상대적으로 동결융해 및 염화물의 침투로 인한 교량의 노후화의 속도가 빠를 것으로 추정된다.

Table 4 노후바닥판에 대한 실험결과

| 구분    | a     |       |      |
|-------|-------|-------|------|
|       | 레이더   | 코어    | 설계   |
| 포장두께  | 12-14 | 13-14 | 5.0  |
| 상부피복  | 6.5   |       | 5.0  |
| 바닥판두께 | 19.9  |       | 20.0 |
| 유전율   | 13.5  |       |      |
| 구분    | b     |       |      |
| 포장두께  | 11    | 11-12 | 5.0  |
| 상부피복  | 7.0   |       | 3.0  |
| 바닥판두께 | -     |       | 18.0 |
| 유전율   | 9.6   |       |      |

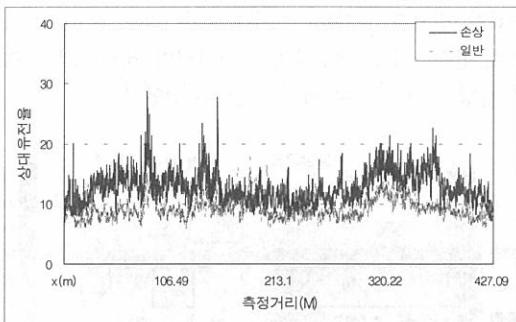


Fig. 7 방수층 상태에 따른 유전율 변화

이와 같이 레이더를 활용하여 상대유전율을 평가하여 바닥판의 노후화와 밀접한 관련이 있는 우수의 유입을 추정할 수 있다는 것을 보여주었으며, 유지관리 도구로서의 레이더의 활용도를 나타내었다.

## 5. 결 론

- 1) 금속판에서의 반사와 아스팔트 표면에서의 반사를 이용하여 아스팔트와 콘크리트의 실제 유전율을 구하고, 이 유전율을 이용하여 콘크리트 내에서의 전파속도를 구할 수 있었다.
- 2) 1)과 파의 도달시간을 구하여 바닥내부의 상태(포장의 두께, 상부피복두께, 하부피복두께, 바닥판 두께 등)를 평가한 결과는 실측치와 매우 유사하였다. 피복두께는 신설교량과 노후교량 모두 크게 시공된 것으로 나타났다.
- 3) 콘크리트 상태가 양호한 교량에서의 시험결과를 근거로 하여, 콘크리트의 유전율이 12이하인 경우에는 "건전", 12이상인 경우에는 "불량"한 것으로 하는 레이더 탐사법에 의한 바닥판의 판단기준을 정하였다.
- 4) 콘크리트 노출형 교량 중 교면에 손상이 발생한 2개 교량에 대해 실험한 결과, 레이더에 의해 추정된 바닥판의 내부상태(상부철근 피복두께, 바닥판 두께 등)는 코어채취 및 드릴작업에 의한 실제값과 일치하였다.
- 5) 노후교량 a에 대한 현장시험결과, 평균유전율이 13이상으로 크게 나타나, 콘크리트가 손상되어 있을 것으로 추정되었으며, 바닥판 하면 및 아스팔트 제거시에 상면을 조사한 결과 실제로 콘크리트에 상당한 노후화가 진행되어 있는 것을 확인할 수 있었다.
- 6) 이와 같은 레이더 시스템을 이용하면, 아스팔트 두께, 상부피복 및 바닥판의 두께를 상당히 정확하게 평가할 수 있으며, 바닥판의 손상위치와 손상 가능성을 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 레이더 방법을 사용하여 얻은 자료는 콘크리트 바닥판의 상태평가 및 유지관리에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 서진원 외 2인, "교량 바닥판 노후도 평가 연구", 한국도로공사 도로연구소, 1998. 12.

- 
2. 강인평 외4인, "시설물 안전진단을 위한 지하레이더 (GPR) 탐사기 활용성 연구," 시설안전기술공단, TS-97-R5-004, 1997.
  3. C. Peter F. Ulriksen, "Application of Impulse Radar to Civil Engineering," Doctoral Thesis, Lund University of Technology, Sweden, 1982
  4. Itunumi A. Savage, "Evaluation of Radar & Other Predictors in Non-Destructive Testing of Bridge Decks," MS in Civil Engineering, the Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1990. 6.
  5. Jeffrey Stuart Hersch, "Digital Signature Analysis of Radar Reflections for the Assessment of Concrete Bridge Deck Deterioration," S.M. in Civil Engineering, the Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 1987. 6.
  6. Anthony J. Alongi, Gerardo G. Clemena, Philip D. Cany, "Condition Evaluation of Concrete Bridges Relative to Reinforcement Corrosion," SHRP, Vol. 3, Washington DC., 1992.

(접수일자 : 2000년 9월 27일)