

레이더를 이용한 아스팔트 포장이 있는 콘크리트 교량 바닥판 상태평가

Condition Evaluation of Concrete Bridge Decks with Asphalt Layer

서진원*
Seo, Jin Won

이지영**
Rhee, Ji Young

이일용*
Lee Il Young

ABSTRACT

In this study, the usefulness of Radar method by means of assessing deck data - layer properties - was tested on the highway bridge. The obtained GPR data were compared with values measured from drilled cores and damage mapping by the visual survey. It is shown that GPR can provide the highly accurate measurements of layer properties of concrete decks and can map areas of deterioration in bridge decks by dielectric constants.

1. 개요

교량의 중요부재인 콘크리트 바닥판은 차량하중과 우수 침투등과 같은 유해한 환경에 직접 노출되어 손상이 많이 발생하고 있다. 그러나 기존의 바닥판의 상태평가방법은 육안점검, 코어채취, 또는 부식전위시험 등을 통하여 이루어지고 있으나, 이러한 방법들은 노동집약적이고, 교통통제를 필요로 하며, 특정 부위를 선정하여 시행하므로 바닥판 전체에 평가는 실시하기 어려운 실정이다. 더욱이 아스팔트포장이 되어 있는 경우에는 바닥판의 내부평가가 곤란하다.

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

2. 레이더 탐사의 원리

레이더 탐사법의 원리는 전자파를 이용한 반사법 탐사기술로 이론적 기초는 탄성과 탐사에 있다. 전자파가 안테나를 통해 유전물질로 전달되어 유전물질의 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 얻을 수 있다. 이것이 가장 기초적인 레이더탐사의 원리로 그림 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.

* 정희원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원,

** 한국도로공사 도로연구소 연구원

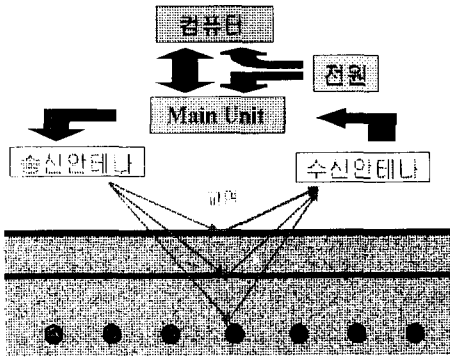


그림 1. 레이더에 의한 반사파형 수집 개념도

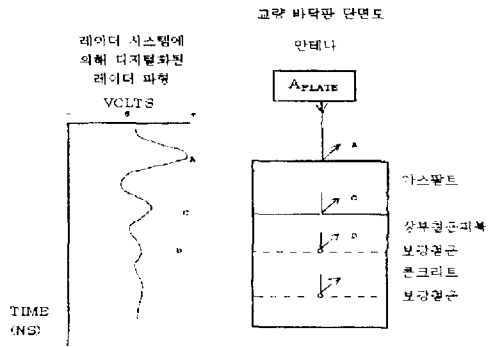


그림 2. 바닥판에서의 레이더 반사 모델

3.2 분석알고리즘

반사 및 투과 법칙을 사용하면, 바닥판을 통과할 때 레이더파의 거동은 그림 3과 같이 모델화될 수 있다. 이 모델은 바닥판 경계에서 층의 유전율에 대한 수식을 유도하는 데 사용될 수 있다. 일례로, 공기/아스팔트 경계의 반사계수(r_{12})는 다음과 같이 정의된다.

$$r_{12} = \frac{A}{A_{PLATE}} = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_{ASP}}}{1 + \sqrt{\epsilon_{ASP}}} \quad \text{식(1)}$$

여기서,

- A = 공기/아스팔트 경계면에서의 반사
- A_{PLATE} = 입사 레이더파의 진폭
- r_{12} = 공기/아스팔트 경계면에서의 반사계수
- t_{12} = 공기/아스팔트 경계면에서의 전달계수
- r_{23} = 아스팔트/콘크리트 경계면에서의 반사계수
- t_{23} = 아스팔트/콘크리트 경계면에서의 전달계수
- r_C = 원형 철근으로부터의 반사계수

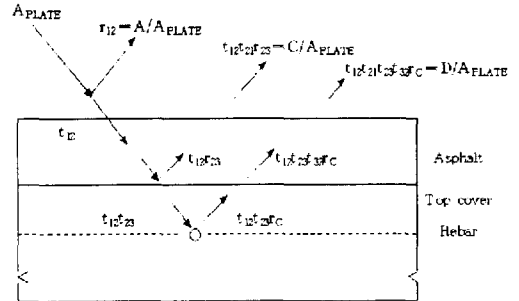


그림 3. 바닥판에서의 반사와 전달계수

3.3 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, 식(1)을 이용하면, 아스팔트포장의 유전율 ϵ_{ASP} 을 구할 수 있으며, 또한, 이것과 아스팔트와 콘크리트 경계면에서이 반사를 이용하여 콘크리트의 유전율을 구할 수 있다.

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

3.4 두께의 산정

유전율은 아스팔트 및 상부피복두께를 계산하는 데 사용된다. 물질내에서의 전파속도는 빛의 속도 ($c=0.3m/ns$)을 유전율의 제곱근으로 나눈 값이고, 깊이는 레이더 신호가 이동한 총 거리의 절반이므로 아스팔트 두께(d_{ASP})와 상부피복두께(d_{TC})는 다음과 같이 구할 수 있다..

$$d_{ASP} = \frac{cT}{2\sqrt{\epsilon_{ASP}}} \quad , \quad d_{TC} = \frac{cT}{2\sqrt{\epsilon_c}} \quad \text{식(3)}$$

여기서, T - 정점 A와 정점 C 사이의 시간 차 (ns)이다.

3.5 바닥판의 상태의 도면화

획득된 바닥판에서의 파형을 분석하여 각 조사위치에서의 아스팔트포장의 두께, 상·하부철근의 위치 및 바닥판의 두께 등의 단면특성을 그림 4에서와 같이 나타낼 수 있다. 또한, 이러한 데이터를 이용하여 교량 바닥판 전체에서의 상태평가 결과를 아래 그림 5와 같이 도면화하여 교량의 도면 및 외관조사결과와 비교할 수 있다.

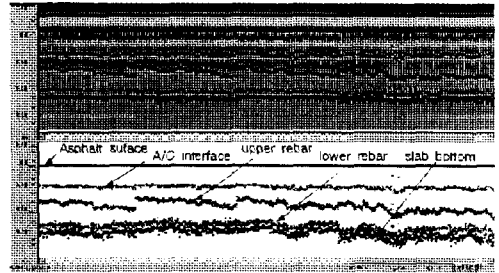


그림 4. 바닥판 단면 분석 결과

4. 현장시험

레이더 탐사법을 이용하여 교량 바닥판의 구조적인 특성(교면포장 두께, 피복두께, 바닥판 두께 등)과 노후특성을 평가하기 위해서 고속도로 상에 최근에 건설된 교량과 공용기간이 30년된 노후교량을 선정하여 현장시험을 실시하였다. 레이더 결과는 신설교량의 경우에는 설계도면과 비교하였으며, 노후교량의 경우에는 도면과 10m 간격으로 코어를 채취하고, 철거시에 아스팔트를 제거하여 상태를 비교하였다.

신설교량 A의 경우에, 아스팔트 포장의 두께 및 바닥판의 두께는 설계치와 유사하였으나, 상부피복두께는 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 유전율은 $12(\epsilon_{mean} + 2\sigma)$ 보다 작은 범위에 있을 가능성을 보여준다. 따라서, 콘크리트 바닥판의 상태를 유전율이 12이하인 경우에는 "건전", 이상인 경우에는 "불량"으로 하여 레이법에 의한 바닥판의 노후도를 판정 기준을 정하였다.

노후교량 B의 경우에, 레이더법에 의한 바닥판의 구조적 특성 평가결과를 코아와 잘 일치하였으나, 전반적으로 아스팔트 두께 및 철근 피복두께가 설계치보다 매우 크게 나타났다. 콘크리트의 유전율은 평균이 13.5, 표준편차가 3.0으로 크게 나타나, 우수유입에 의해 콘크리트 바닥판의 열화가 계속 진행되고 있는 것으로 추정되었다. 그림 5는 바닥판 하면조사와 비교한 것으로 유전율 분포와 잘 일치하고 있었으며 그림 6에서와 같이 아스팔트 제거 후 바닥판 상면의 상태를 조사한 결과 콘크리트가 상당히 노후화 되어 있었음을 확인할 수 있었다.

표 1. 레이더 실험결과

구분	신설 교량			노후 교량				
	레이더	설계	비율	레이더	코어	설계	비율	비율
포장	8.0	8.0	1.0	13	14	5.0	1.0	0.4
				14	13			
				12	13			
상부피복	8.1	4.0	0.5	6.5	-	5.0	0.8	
바닥판	20.7	20.0	1.0	19.9	-	20.0	1.0	
유전율	9.0(건전)			13.5(불량)				

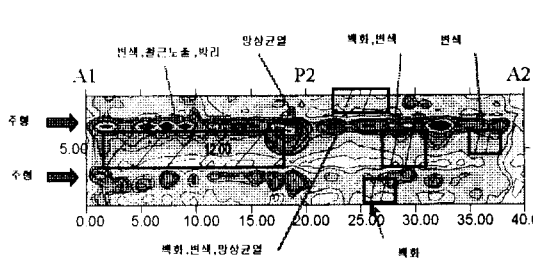


그림 5. 노후교량의 유전율 평가결과

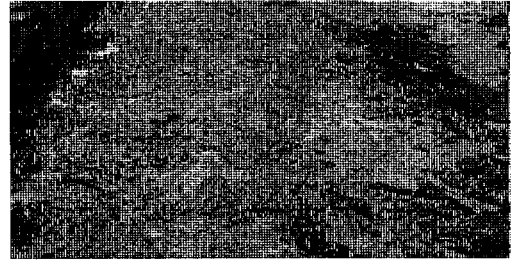


그림 6. 포장제거 후 바닥판의 모습

5. 결론

- 1) 감속판에서의 반사와 아스팔트 표면에서의 반사를 이용하여 아스팔트와 콘크리트의 실제 유전율을 구하고, 이 유전율을 이용하여 콘크리트 내에서의 전파속도를 구할 수 있었다.
- 2) 이것과 파의 도달시간을 구하여 바닥내부의 상태(포장의 두께, 상부피복두께, 하부피복두께, 바닥판 두께 등)를 평가한 결과는 실측치와 매우 유사하였다. 피복두께가 신설교량 및 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) 노후교량에 대한 현장시험결과, 평균유전율은 13.5이고, 부분적으로 매우 큰 유전율을 나타내는 부위가 있어서 이러한 부위는 콘크리트 열화가 심할 것으로 추정되었으며, 바닥판 하면 및 아스팔트 제거시에 상면을 조사한 결과 실제로 우수침투 및 상당한 박리가 진행된 것을 확인할 수 있었다.
- 5) 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.

6. 참고문헌

1. 서진원, 이일용, 이지영, “교량 바닥판 노후도 평가 연구”, 한국도로공사 도로연구소, 1998. 12.
2. 강인평 외4인, “시설물 안전진단을 위한 지하레이더 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.