

# 충격반향기법을 이용한 국도상 노후교량의 결함검사

## Flaw Detection of the Aged Bridge on National Roadway by Impact Echo Testing

유재열\* 김기봉\*\* 정영수\*\* 조성호\*\*  
You, Jae Yaul Kim, Gi Bong Jung, Young Su Joh, Sung Ho

### ABSTRACT

As nation's infrastructure is getting old, nondestructive evaluation of existing structures and construction quality control are getting important. In this thesis, flaw detection techniques of concrete members with asphalt using impact echo test were introduced. This techniques are based on stress wave propagation. In this field impact echo test, As load is gradually increased, frequency is increased. From this change of frequency through impact echo test, we can detect that the crack of bridge ascends and what the depth of crack is.

### 제1장 서론

#### 1.1 연구의 배경

본 연구에서는 교량의 실제적인 성능평가 방법 중 최근 새롭게 부각되는 비파괴 시험기법인 충격반향기법을 실제 국도상 교량에 적용시키면서 항복하중까지 재하하여 현재 사용되는 성능평가 기법과 비교하고, 각 하중단계별로 구조물의 진동수, 감쇠비와 같은 동적 요소를 충격반향기법을 이용하여 구조물 손상에 따른 특성 변화를 살펴보고자 한다. 노후교량의 결함을 알기 위해서 코아를 현장에서 채취하여 실내실험을 하는 경우가 일반화되었지만, 이 방법은 비용과 시간의 문제, 그리고 실험대상에 대한 충분한 정보를 얻기 곤란하다는 점이 지적되어왔고, 코아를 뚫은 위치를 기준으로 해서 구조물에 품질저하가 발생할 수 있다고 사료된다. 이러한 이유로 해서 현재 외국에서는 구조물의 결함을 조사하는 방법으로 비파괴 시험에 관한 이론이 완전히 정착단계에 이르렀지만 현재 국내에서는 비파괴 시험이 이론적으로 뿐만 아니라 실험적으로도 용이 함에도 불구하고 아직 미정착 단계이다. 그리고, 비록 비파괴 실험이 정착된 외국일지라도 단순히 구조물의 결함유무의 진단일 뿐이고, 구조물의 피로가 가중됨에 따라 진동수와 댄핑의 변화로써 구조물의 결함의 변화를 비파괴 시험으로 알아내는 연구는 아직 이루어지지 않았다.

\* 중앙대학교 토목공학과 석사과정

\*\*정회원, 중앙대학교 토목공학과 교수

## 1.2 연구목적

본 연구에서는 구조물의 결함을 진단하는 비파괴 시험법으로서 충격반향기법(Impact echo Test)의 타당성과 구조물의 피로가 가중됨에 따라 진동수와 댐핑의 변화로써 구조물의 결함의 변화에 관한 연구 그리고 충격반향기법(Impact-echo Test)시 발생하는 파에 대한 연구를 통해 비파괴 시험법에 관한 기초적 자료의 축적을 그 목적으로 하고 있다.

## 2장 충격반향기법의 고찰

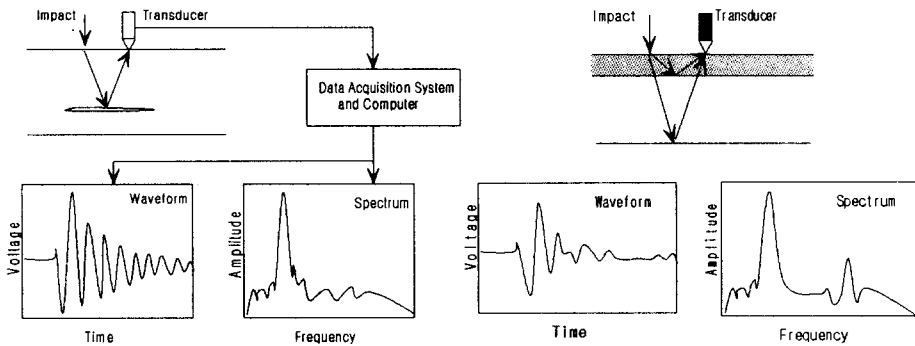


그림 1. 충격반향기법 개략도

충격반향기법은 외부표면에서 매질내에 충격파를 발생시켜 내부균열 및 외부표면에서 반사되어온 파를 감지함으로써 콘크리트내의 균열과 다짐부족으로 인한 공극, 철근과 콘크리트의 부착불량의 진단 뿐만 아니라 후긴장 콘크리트구조물의 그라우팅에서 tendon duct의 공극 위치를 찾아내고, 아스팔트를 위 층으로 둔 콘크리트 구조물, 여러 가지단면의 기둥, 보, 중공 구조물의 성능을 평가하는 비파괴 시험법이다. 또한 이 기법은 교량, 옹벽 그리고 다른 거대한 구조물의 유지, 보수에 엄청난 비용과 시간을 절약하는 결과를 가지고 온다. 충격반향기법을 도식화하면 그림 1과 같다.

## 2.1 충격반향기법의 응용

본 연구의 대상이 된 구조물은 두께45cm 콘크리트 슬래브 위에 두께 10cm의 아스팔트 포장을 가진 교량으로서 충격반향기법의 적용시 충격파의 이동특성이 아스팔트와 콘크리트에서 다른 점을 고려하여야 한다. 위 층에 아스팔트가 있는 콘크리트 슬래브의 충격반향기법에 의한 응답을 이해하려면 우선 두 재료의 Acoustic Impedance차이로 인한 반사계수 (R)를 알아야한다. 아스팔트는 콘크리트보다 음향적으로 부드럽지만 두 재료사이의 반사계수 (R)는 0.2정도밖에 안되어 두 재료사이의 경계면에서 반사된 파를 간과하기 어렵다. 그러므로 아스팔트와 콘크리트사이에 부착의 정도가 우수하다면 충격반향기법으로 인한 이 구조물의 응답은 Full Thickness Mode가 지배적이고 반대로 부착되지 않은 부분이 있다면 그 부분에서 P파는 반사되기에 충분한 조건을 가진다. 이러한 이론을 수식화 하면 충격파가 아스팔트 매질 내를 이동하는 시간 ( $t_a$ )과 콘크리트 내를 이동하는 시간 ( $t_c$ )은  $t_a = 2T_a / (0.96V_a)$

$t_c = 2T_c / (0.96V_c)$  이므로 예상 진동수 ( $f_{a+c}$ )는

$$f_{a+c} = \frac{1}{t_{a+c}} = \frac{1}{\frac{2T_a}{0.96V_a} + \frac{2T_c}{0.96V_c}} \quad (1)$$

하지만 만약 아스팔트와 콘크리트사이 에 균열이 존재한다면 그 경계면에서의 반사로 인한 예상 진동수 ( $f_a$ )는

$$f_a = V_a / (2T_a)$$

이 식에서는 아스팔트가 단일 판으로서 자유롭게 진동할 수 없으므로 계수 0.96을 사용할 수 없다.

## 2.2 균열깊이 추정

본 연구에서는 실제 아스팔트/콘크리트 층의 구조물에서 충격반향기법을 적용할 때  $V_a$ 와  $V_c$ 를 구하는 이론을 응용하여 균열의 깊이를 추정할 수 있는 활용적인 식을 권장하려한다. 실제 실험에서 얻은 진동수가 슬래브의 바닥면에서 반사된 것이 아니라 슬래브내의 깊이  $d$ 의 균열에서 반사된 것이라면 식(1)은 다음 식과 같이 된다.

$$f_d = \frac{1}{\frac{2T_a}{0.96V_a} + \frac{2(d - T_a)}{0.96V_c}} \quad (2)$$

## 3. 실내실험 및 현장실험

### 3.1 실내 실험

아스팔트에서 속도와 콘크리트에서의 속도를 각각 알기 위해 코아에서 분리시킨 후 Resonance 실험을 실시하였다. 코아의 한면에서 직경 3mm의 쇠구슬로 타격하여 발생시킨 파를 반대면에 붙인 Receiver로 감지하여 진동수를 구하고  $v_p = 2fl$  식을 이용하여 P파의 속도를 측정하였다.

표 1 실내 코아 실험 결과

Core ID	Frequency(KHz)	Length(cm)	$V_p$ (m/ sec)
Ascon1	14.675	8.4	2465.4
Ascon2	12.975	9.5	2465.25
Concrete1	7.4125	21	3113.25
Concrete2	7.3375	22	3228.5

일반적으로 콘크리트의 P파속도의 범위는 3500~4500m/s이고 아스팔트의 P파속도의 범위는 2800~3000m/s이다. 따라서 표 1에서 보듯이 교량에서 채취한 코아의 속도가 일반적인 값보다 작은 것으로 보아 노후교량임을 실내 비파괴 실험으로도 알수 있었다.

### 3.2 현장 실험

이번 실험에서 충격반향기법을 적용한 곳은 교량의 중앙 부분과 오른쪽 하중 재하 블록이 위치한 곳 2군데로서 수직방향 균열이 많은 중앙 부분에서 실시한 충격반향기법의 결과치가 신뢰성이 떨어지라고 예상하였다. 또한 실험대상이 아스팔트가 있는 실험교량으로서 충격반향기법의 이론을 응용하여 적용해야 한다.[2.1]

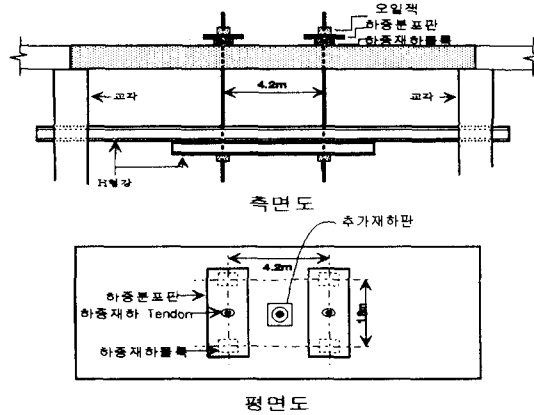


그림 2 폐교 파괴실험 개략도

아스팔트와 콘크리트의 경계면에서 반사되는 예상 진동수를 계산하기 위하여 일반적으로 알려진 아스팔트의 속도 (2800~3000m/sec)를 사용하여 아스팔트의 예상 진동수를 구하면,

$$f_{\text{Asphalt}} = V_{\text{Asphalt}} / (2T_{\text{Asphalt}}) = 2800 / (2 \times 0.1) = 14000\text{Hz}$$

이 값은 실험시 Setting한 진동수 범위를 벗어나 아스팔트에서 반사되어온 파는 감지되지 않았다. 하지만 아스팔트와 콘크리트의 P파 속도는 분명히 차이 나는 것이기 때문에 Two Layer로 취급한다. 따라서 실내실험에서 얻은 아스팔트의 속도 ( $V_a = 2465.4\text{m/sec}$ )[표 1]를 사용하고 콘크리트의 P파 속도를 알기 위하여 하중 재하전, 즉 0ton에서의 진동수 ( $f_{a+c} = 2783.78\text{Hz}$ )가 슬래브의 바닥면까지 다녀온 파로 인한 진동수라고 가정하고 식(1)에 적용시키어  $V_c = 3450.48\text{m/sec}$ 를 사용하였다. 여기서 일반적인 콘크리트 P파 속도의 범위(3500~4500m/sec)보다 작은 값을 가진 실험 대상교량이 노후교량임을 충격반향기법으로 알 수 있었다. 또한 하중이 증가함에 따라 균열이 상승하므로 진동수도 변할 것이다. 이렇게 변화하는 진동수를 이용하여 식(2)에  $V_a$ 와  $V_c$ 를 대입하여 균열의 깊이를 추정하면,

$$d = \frac{1 - 0.00002412 f_{a+c}}{0.0006038 f_{a+c}} \quad (3)$$

#### 4. 실험 결과

하중이 증가할수록 파의 진동수도 증가하였고[그림 3] 이는 발생시킨 파가 반사되는 면, 즉 균열이 점점 상승하는 것을 의미하고, Bandwidth method(Half-Power)로 구한 파의 감쇠비가 감소되는 것[그림 4]을 보면 파의 경로폭이 작아지는 것을 의미하며 이는 곧 발생시킨 파가 반사되는 면, 즉 균열이 점점 상승하는 것을 의미하며 실제 식(3)에 의해 계산한 균열의 깊이 또한 상승하는 것을 볼 수 있다 [그림 5].

더불어 실험시 얻은 Power spectrum에서 하중 재하전부터 peak frequency가 하나 더 관찰되었는데 이는 주철근 부근으로 반사된 것임을 식(3)에 의해 계산되었다[그림 6]. 따라서 이 교량은 주철근과 콘

크리트사이에 부착상태가 우수하지 못한 노후교량임을 비파괴 시험법인 충격반향기법으로 증명할 수 있었다. 또한, 중앙부분에서 실시한 실험결과[그림 7,그림 8]를 보면 진동수와 damping의 변화가 신뢰성 있는 경향이 없는 것으로 보아 수직 방향의 균열이 생김을 추측할 수 있었다.

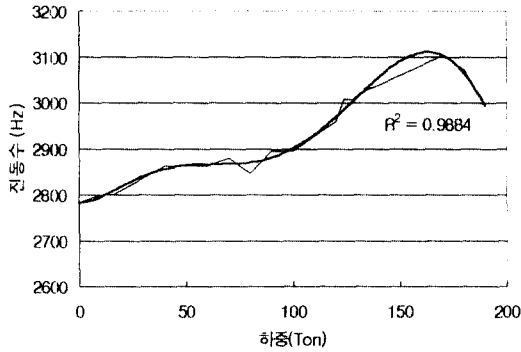


그림 3 재하불력 위치에서 first peak의 진동수 변화

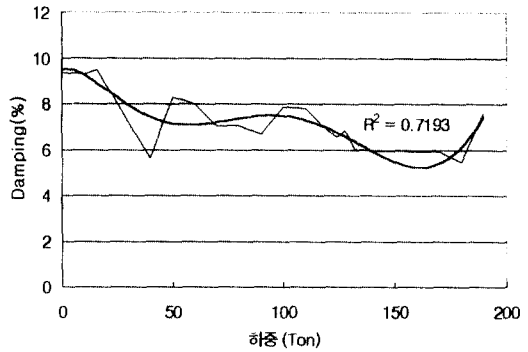


그림 4 재하불력위치에서 Damping 변화

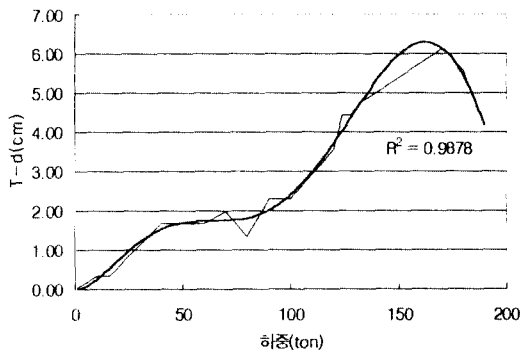


그림 5 재하불력위치-first peak 바닥면에서 균열깊이

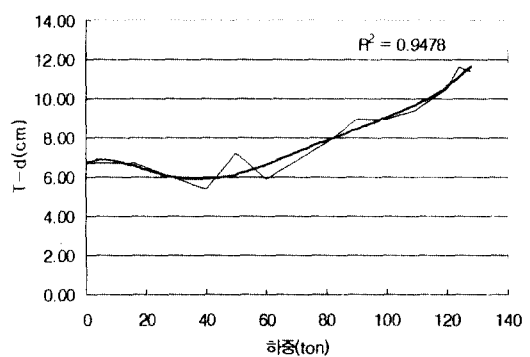


그림 6 재하불력위치-second peak에 의한 바닥면에서의 균열 깊이

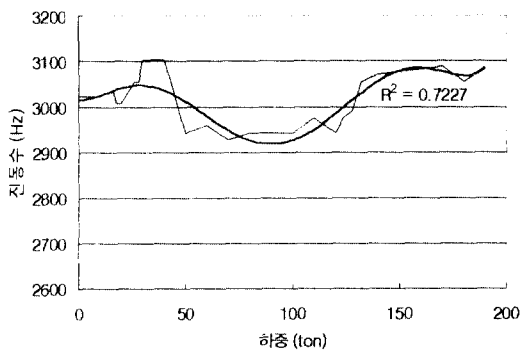


그림 7 중앙부분-first peak의 진동수변화

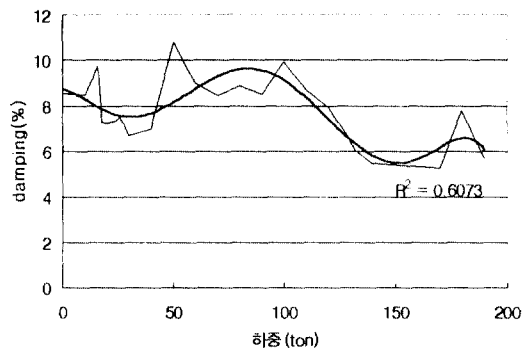


그림 8 중앙부분-first peak의 damping 변화

## 5.참고문헌

1. Mary J. Sansalone and William B. Streett., "Impact-Echo : Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry, " New York : Bullbrier Press Ithaca., 1997
2. Mario Paz., "Structural Dynamics : Theory and Computation ," New York : Van Nostrand Reinhold, 1991
3. 이희현 채원규 남순성., "지진파의 스펙트럼 해석 입문," 서울 : 도서출판 팔드., 1996
4. Don E. Bray and Don McBride., "Nondestructive Testing Techniques, " New York : John Wiley & Sons,Inc., 1992