

# 초음파법에 의한 콘크리트 손상의 정량적 해석에 관한 연구

## A Study on the Quantitative Analysis of Damaged Concrete by UNDT

김 세 동\*, 전 창 익\*\*, 노 승 용\*\*\*, 김 성 환\*\*\*

(Se Dong Kim\*, Chang Ik Jeon\*\*, Seung Ryong Rho\*\*\*, Sung Hwan Kim\*\*\*)

### 요 약

본 논문에서는 정상 콘크리트 시편과 손상된 콘크리트 시편으로부터 초음파 신호의 특징 추출에 관해서 연구하였다. 정상 시편과 다양한 손상 시편으로부터 수집된 초음파 신호는 콘크리트 자체의 이종특성에 기인하여 특징을 분류하는데 많은 문제점을 가지고 있다. 본 논문에서는 콘크리트 시편의 특징 추출 방법으로 초음파 신호의 분산에 의한 손상 계수 및 영점 교차 횟수를 이용한 복합 해석을 제안하였다. 또한 초음파 속도법과 Suaris가 제안한 최대 진폭에 의한 손상 계수를 살펴 보았다. 본 실험에서는 180kg/cm<sup>2</sup> 와 240kg/cm<sup>2</sup>으로 제작된 두가지 종류의 콘크리트 시편이 사용되었고 초음파 신호는 직접 투과방법에 의하여 반사신호를 측정하였다. 실험 결과 제안한 복합 해석 방법이 기존의 초음파 속도법이나 최대 진폭을 이용한 손상 계수에 의한 방법보다 우수한 성능을 보였다.

### ABSTRACT

In this paper, we have introduced the feature extraction for the ultrasonic signal analysis of the undamaged and damaged concrete specimens. Since the concrete has the heterogeneous nature by itself, it has been difficult to classify the feature with using ultrasonic signal which is acquired from the undamaged and damaged concrete specimens. Therefore, in this paper, we proposed the combinational analysis which is using both the damage coefficient and the number of zerocrossing for the feature extraction. And the pulse velocity method and the damage coefficient, which was proposed by Suaris, were reviewed. In this experiment, two types of concrete specimen have been considered: 180kg/cm<sup>2</sup> and 240 kg/cm<sup>2</sup>. The ultrasonic signals were acquired in normal direction. As a result, it has been that combinational analysis method, which is proposed in this paper, shows the better performance than the traditional ultrasonic pulse velocity method and the damage coefficient using maximum amplitude of the ultrasonic signal in the feature extraction.

### 1. 서 론

1990년대 이후 삼풍백화점 붕괴, 성수대교 붕괴 등을 계기로 하여 사회기간 시설물의 안전에 관한 문제가 사회적으로 크게 대두되고 있다. 기존에 건설된 대형 건축물, 교량, 댐 등은 경제성장기에 목표 지향적으로 조급히 건설되어 상당수가 안전성에 대한 지적이 있으며, 사후관리 또한 부실하여 대형 사고가 계속 발생하였고, 앞으로도 이러한 대형 사고의 가능성이 잠재해 있는 실정이다.

이와 같은 사회적 요청에 따라 구조물의 적절한 관리와 유지보수 업무에 대한 중요성이 날로 증대하고 있으나 구조물은 재료, 배합설계, 환경 등의 설계 조건 및 입지 조건이 상당히 다르고, 열화·손상의 형태도 다양하며, 또한 부재 자체에서도 다른 거동을 나타내는 경우가 많기 때문에 정량적이고 효율적인 자료를 얻기가 매우 어렵다.

구조물의 파괴를 유발하게 되는 인자로는 손상, 결함, 균열, 부식 등을 들 수 있다. 이러한 파괴인자들은 성장됨에 따라 구조물의 강도나 내하성능을 크게 감소시키고, 붕괴를 유발 시키게 됨으로 가능한 초기에 탐지하여 적절한 조치를 하여야 한다. 특히, 구조물의 파괴 유발인자 가운데 가장 주요한 원인으로 정의되는 파괴 지배인자의 초기 탐지를 위해서는 비파괴 검사법을 활용하는 것이 효과적이며, 콘크리트 구조물의 안전성 및 건전성 평가를 위한 비파괴 검사 방법의 기술 확보 및 연구개발에 대한 필요성이 절실히 요구되고 있다[1-2].

초음파를 이용한 비파괴 검사는 초음파 신호를 정보의 매체로 하여 물체 내부의 정보를 얻는 방법이다. 현재 초음파법으로 효과를 얻고 있는 분야는 의학진단, 강재탐상, 어군탐지 등의 분야가 있으며, 이러한 모든 분야에서 초음파 탐상 대상들은 구성분자가 작고 고밀도로서 밀도분포가 안정되어 있다. 따라서, 초음파탐상 대상 내부부의 전파가 용이하고 내부결함 검출, 대상물의 위치 평가 등을 정확히 파악하는 것이 가능하다[3-5].

\* 두원공과대학

\*\* 서울 시립대학교 전자전기공학부

\*\*\* 서울 시립대학교 전자전기공학부

접수일자: 1999년 5월 27일

이에 반해 콘크리트는 재료의 구성분자가 크고 밀도가 불균질하며 불특정하기 때문에 초음파의 적용시에는 여러 가지의 문제점이 지적되고 있고 연구결과 발표가 현재까지도 미미한 상태이다. 일반적으로 사용되고 있는 초음파 속도법은 초음파의 속도를 측정하여 콘크리트의 강도 및 균일성을 조사한다. 이 방법은 콘크리트의 내부 상태에 따라서 초음파의 속도가 달라지는 성질을 이용하는 것으로 콘크리트의 손상 여부를 초음파의 속도를 측정함으로써 판단하는 방법이다. 그러나, 초음파 속도 측정법은 대상 구조물에 따라서 측정이 불가능한 경우도 있고, 측정값의 정확도가 낮은 점등으로 초음파에 의한 결함 탐상방법의 응용은 제한되어 있다[6-10]. 그리고 초음파 신호에 대한 주파수 평면 해석에 관한 연구가 많이 진행되고 있지만 이 또한 연구 결과는 실제 응용에는 제한되어 있다[12-16].

이러한 문제점을 보완하기 위해서 Suaris[11]는 정상 시편과 손상 시편에 대한 초음파 신호의 최대 진폭의 크기를 비교한 손상 계수(damage coefficient)를 제시, 손상의 정도를 파악하는 연구를 시도하였는데 이는 콘크리트 연구 분야에 있어서 현실적으로 가장 실용적으로 사용되고 있다. 그러나, 콘크리트 시편은 그 제작과 양생 과정에 있어 주변 환경의 변화와 측정장치등의 잡음에 민감한 특성을 갖고 있으며 최대 진폭 크기의 측정에 있어서 정확도가 떨어지는 단점을 가지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 콘크리트의 손상에 따른 정량적인 분석을 위하여 Suaris가 제안한 손상계수에 대응하는 분산(variance)에 의한 새로운 손상계수를 정의하였고, 이와 함께 영점 교차 해석을 통한 복합해석 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 콘크리트 구조물과 동일한 조건과 부재로 제작한 시험 시편에 다양한 압력을 인위적으로 가한 후 압력에 대한 영향을 실험하여 제안한 복합 해석 방법(분산+영점교차)이 기존의 Suaris가 제안한 손상 계수에 의한 해석보다 우수함을 입증하였다.

## II. 콘크리트 손상의 정량적 해석

### 2.1. 초음파 전파 속도에 의한 해석

일반적으로 사용되고 있는 초음파 속도법은 펄스 전송 시간을 측정하는 방법으로 발신자로부터 발신된 초음파가 수신자에 도달할 때까지의 시간차를 구하고, 전파거리를 시간차로 나누어 매체에서의 전파속도를 산출하며 식 (1)로 표현된다[2].

$$V_o = \frac{d}{t} \quad (1)$$

여기서,  $V_o$ 는 시험편의 전파 속도[m/s],  $t$ 는 발신자에서 수신자까지 초음파펄스 전파시간[s],  $d$ 는 시험편의 길이[m]를 나타낸다.

이 방법은 콘크리트의 매질 상태에 따라서 발신된 초음파 신호의 산란의 정도가 달라지며 경로 또한 달라진다. 정상 콘크리트 시편의 경우 초음파는 산란이 적고, 가장

짧은 경로로 전파하게 되며 손상 콘크리트 시편의 경우 산란이 심해지며 정상 시편보다 경로가 길어지게 된다. 즉 매질의 상태에 따른 전파속도의 변화를 정량화하는 방법으로 초음파속도에 의한 콘크리트의 품질 및 강도기준(미국)에 의하면, 3100% 이상일 경우에는 양호, 2100~3100% 사이는 불량, 2100% 이하는 사용 불가로 정하고 있다. 그러나 초음파 속도법은 콘크리트의 양생 후 시간이 지남에 따라 동일한 시편에 대해서 전파속도의 차이를 보이는 부정확함을 가지고 있다. 또한, 전파속도와 밀접한 관계가 있는 산란의 정도는 골재의 크기에 따라 크게 영향을 받으며, 특히 발신 초음파 파장의  $\frac{1}{10}$  이상일 경우에 초음파 속도법에 의한 오차는 상당히 크게 나타나는 문제점을 가지고 있다.

### 2.2. 최대 진폭에 의한 해석

콘크리트는 재료의 구성 분자가 크고 불균질하며, 재료의 이종 특성으로 인하여 초음파 센서로부터 검출되는 신호는 산란, 변조되고 감쇄되는 복합 중첩된 파형이다. 특히 콘크리트의 손상 정도가 심할수록 내부에 공극이 많이 생기고, 균열의 발생으로 초음파의 산란현상이 극히 심하여 더욱 파형이 간쇄되고 진폭의 크기도 감쇄되어진다. 이와 같은 특성을 고려하여 Suaris[11]는 콘크리트의 손상 정도를 나타내는 손상 계수를 제안하였으며, 콘크리트의 정상 시편과 손상 시편의 초음파 신호를 구하여 최대 진폭으로 정의한 손상계수를 식 (2)과 같이 표현하였다.

$$D_A = 1 - \frac{A'}{A} \quad (2)$$

여기서,  $A$ 는 기준이 되는 정상시편의 최대진폭을 의미하고,  $A'$ 는 실험 시편의 최대진폭을 의미한다. 정상 시편의 경우 손상계수  $D_A$ 는 0이 되고 완전 손상시편일 경우  $D_A$ 는 1의 값에 근접하게 된다.

### 2.3. 영점 교차와 분산을 이용한 손상계수에 의한 복합 해석의 제안

콘크리트 구조물의 안전성 평가를 위한 비파괴검사 방법으로 초음파속도법이 가장 널리 사용되고 있으나 콘크리트의 이종 특성 및 제작과 양생과정 등에 따라서 콘크리트 손상을 추정하기에는 매우 부정확하다. Suaris가 제안한 콘크리트의 손상 정도를 나타내는 손상계수의 경우는 단지 수신신호의 최대 진폭만으로 손상계수를 계산하므로 갑작스런 시스템의 불안이나 환경적 요인에 의해 유입된 순간적인 진폭의 변위는 콘크리트의 손상 유무 판별에 오류를 일으킬 수 있다.

그러므로, 본 연구에서는 초음파 센서로부터 검출된 신호 즉, 산란, 변조되고 감쇄된 복합 중첩된 파형으로부터 콘크리트 손상 해석을 위한 정량적인 정보를 추출하기 위해서 영점교차와 분산을 이용한 손상계수를 동시에 이용하는 시평면에서의 복합 해석방법을 제안하였다. 제안한 복합 해석방법은 기존의 Suaris가 제안한 최대 진폭을

이용한 손상계수 해석보다 비정상적인 환경에서 강건하며, 간단히 설명하면 아래와 같다[13].

(1) 영점교차(zero-crossing)

수신된 초음파 신호가 원점을 교차하는 횟수

(2) 분산(variance)을 이용한 손상계수

수신된 초음파신호의 데이터가 그 평균값 주위에 어느 정도 흩어져 있는가를 측정하는 량인 분산을 이용하여 식 (4)와 같은 손상계수를 정의

첫 번째의 영점 교차 해석은 수신된 초음파 신호가 매질의 손상정도에 따라 주기성이 달라지는데 기인한다. 수신된 초음파신호의 주기성 변화는 간단히 원점을 교차하는 횟수로서 평가할 수 있는데, 즉, 주기성이 늦을 경우에는 영점 교차 횟수가 적어지며, 주기성이 빠를 경우에는 영점 교차 횟수는 많아지게 된다.

두 번째의 분산을 이용한 손상계수 해석은 수신된 초음파신호의 통계적 특성인 분산을 이용하기 때문에 위에서 언급한 시스템 불안이나 환경적 요인에 의한 초음파 신호의 왜곡에 강건하게 대처할 수 있다. 분산을 식 (3)이라고 정의하였을 때 분산을 이용한 손상계수는 식 (4)로 정의할 수 있다.

$$\sigma^2 = E[(f(k) - m_f)^2], \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

여기서,  $E[\cdot]$ 는 평균 연산자,  $f(k)$ 는 수신된 초음파 신호, 그리고  $m_f$ 는 수신된 초음파 신호  $f(k)$ 의 평균값을 나타낸다.

$$D_V = 1 - \frac{\sigma'^2}{\sigma^2} \quad (4)$$

여기서,  $\sigma^2$ 는 기준이 되는 정상시편의 분산을 의미하고,  $\sigma'^2$ 는 실험 시편의 분산을 의미한다. 식 (4)의 제안한 손상계수는  $0 \leq D_V \leq 1$ 의 구간값을 가지고  $D_V$ 가 1에 가까울수록 손상의 정도가 심함을 나타낸다.

이 두가지 방법을 이용하여 일부 압력 구간은 영점교차방법으로 손상의 정도를 판별하며, 나머지 압력 구간은 분산을 이용한 손상계수로 손상의 정도를 판별하도록 고안하였다.

그림 1은 제안한 복합 해석방법의 순서도를 나타내고 있다. 초음파 신호의 입력에 대해서 첫 번째로 분산을 계산하게 되고, 이렇게 계산된 분산값과 기준으로 설정된 분산값을 이용해서 제안한 손상 계수  $D_V$ 를 계산하여 임계값  $Th$ 보다 작은 경우에는 손상 계수만으로 콘크리트의 손상정도를 판별하고, 손상계수가 임계값  $Th$ 보다 큰 경우에는 영점 교차 횟수를 계산하여 손상 정도를 판별하도록 구현되었다.

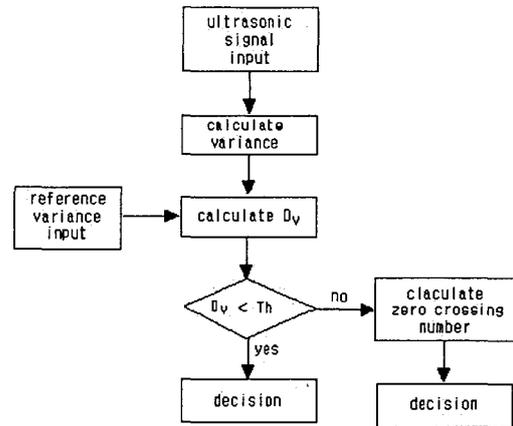


그림 1. 복합 해석을 위해 제안된 알고리즘의 순서도.  
Fig. 1. Flowchart of the proposed algorithm for the compound analysis.

### III. 실험 및 결과 고찰

#### 3.1. 실험방법

콘크리트는 수경성(水硬性)시멘트와 물과 섞여 비빈 반죽이 모래(잔골재), 자갈 또는 깬돌(굵은 골재)과 함께 굳어서 일체로 된 것이며, 이것은 적절한 배합과 충분한 혼합으로 단단한 콘크리트가 된다. 이와 같은 콘크리트는 그 제작과 양생 과정에 있어 주변 환경의 변화에 민감한 특성을 갖고 있다.

일반적으로 콘크리트시편은 KSL5201(포틀랜드 시멘트)과 ASTM C150 규정에 따라 시멘트, 물 및 골재를 일정한 비율로 섞은 후 22~24℃의 수중에서 28일 동안 양생 과정을 거친 것을 사용한다. 본 연구에서도 동일한 양생 과정을 거쳐 배합강도 180 및 240kg/cm<sup>2</sup> 두가지의 콘크리트 시험시편을 제작하였다. 이렇게 제작된 콘크리트 정상시편에 대하여 콘크리트 손상해석 실험을 위해 UTM(Universal Testing Machine)을 사용하여 단계적으로 압축을 주었다. 콘크리트 정상시편에 대하여 UTM Panel을 관측하면서 약 3~5초 동안의 압축을 가하여 손상시켰으며, 배합강도 180kg/cm<sup>2</sup>의 콘크리트 정상시편에 대하여 25ton<sub>r</sub> 및 31.8 ton<sub>r</sub>, 44.2ton<sub>r</sub>, 51.6ton<sub>r</sub>(완전 손상)의 압축을 가한 각각 5개씩의 시편을 준비하였고, 배합강도 240kg/cm<sup>2</sup>의 콘크리트 시편에 대해서도 26.5ton<sub>r</sub> 및 34ton<sub>r</sub>, 42.4ton<sub>r</sub>, 52.1ton<sub>r</sub>(완전 손상)의 압축을 가한 각각 5개씩의 시편을 준비하였다.

본 연구에서 제작한 콘크리트 시편은 180 및 240 kg/cm<sup>2</sup>의 배합강도를 가지는 것으로 각 시편의 재료특성은 표 1과 같고 사진 1에 실험에 사용된 실제 시편을 보였다. 왼쪽의 사진(a)는 손상정도가 심한 경우의 콘크리트 시편을 보여주고 있다. 이는 약 50ton<sub>r</sub> 이상의 압력이 인가된 경우로서 크랙이 육안으로 보일정도이다. 오른쪽의 사진(b)는 실험에 사용된 전체 시편을 보여주고 있다.

표 1. 콘크리트 시편의 재료 규격

Table 1. Material specifications of concrete specimen.

종류	크기	W/C비[%]	골재[mm]
180kg/cm <sup>2</sup>	φ 15×30 cm	55.1	25
240kg/cm <sup>2</sup>	φ 15×30 cm	47.1	25

비고) W/C : Water cement weight-ratio

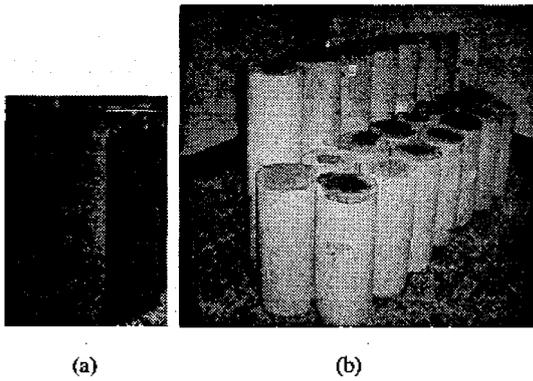


사진 1. 제작된 콘크리트 시편

- (a) 손상 시편의 예
- (b) 전체 시편

Photo 1. Manufactured concrete specimen;

- (a) the example of damaged specimens,
- (b) total specimen.

다음으로 제작한 시편으로부터 초음파 신호를 얻기 위하여 그림 2와 같은 데이터수집장치를 구성하였다. 초음파 탐상기는 PUNDIT MARK IV를 사용하였고, 이 장비는 탐촉자(발신자 및 수신자)와 본체로 구성되며, 본체 장치에는 펄스발진기, 전원부, 증폭기부, 동기회로와 표시부로 되어 있다. 압전소자를 이용한 발신자와 수신자의 중심 주파수는 54kHz이고, 외경이 50mm이다. 각 탐촉자는 수신단과 송신단으로 분리되어 시편의 양쪽 끝의 중앙에 위치시키고, 탐촉자와 콘크리트 사이에 초음파의 통과를 용이하게 하기 위해서 그리스(grease)를 바른 상태에서 측정하였다. 수집된 데이터는 발신자와 수신자의 출력단으로부터 디지털 오실로스코프(LeCroy 9310AM)의 입력단으로 들어가 2.5MHz로 샘플링한 후 IBM-PC에 송신하여 시평면 신호해석 소프트웨어로 처리하도록 하였다. IBM-PC(Pentium 150Mhz)로 송신된 데이터는 처리되기 전단에서 차단 주파수가 64kHz인 저역 통과 필터를 거치게 하여 잡음성분을 줄인 상태에서 신호처리를 행하였다. 또한 각각의 시험 시편마다 초음파 신호 수집과 동시에 초음파 탐상기로부터 전파 속도를 기록하였다.

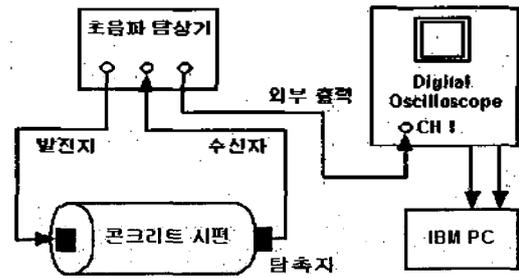
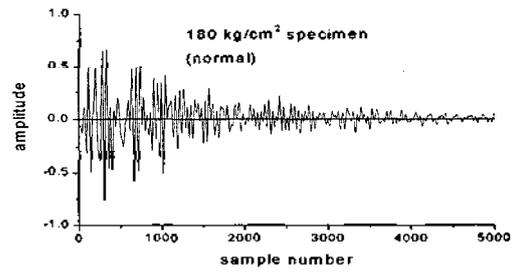


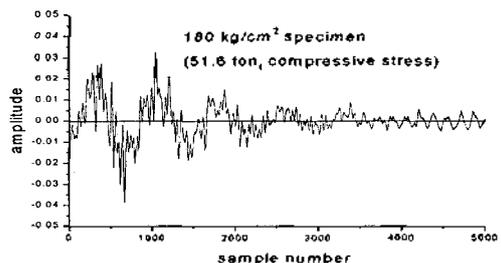
그림 2. 실험장치의 기본 구조(초음파 탐상기: PUNDIT MARK IV, 탐촉자: 54kHz 중심주파수, 오실로스코프: Lecroy 9310AM)

Fig. 2. Basic structure of experimental setup (Ultrasonic equipment: PUNDIT MARK IV, transducer: 54kHz center frequency, Oscilloscope: Lecroy 9310AM).

그림 2와 같은 초음파 데이터 수집장치로부터 획득된 초음파 신호는 그림 3과 같다. 그림 3에서 (a)는 180kg/cm<sup>2</sup>으로 제작된 콘크리트 정상시편에서 수집된 전형적인 초음파 신호이다. 초음파 신호는 시간이 지나면서 감소하는 양상을 보이고 있다. (b)는 180kg/cm<sup>2</sup>으로 제작된 시편을 인위적인 압축압력(51.5ton)을 가한 경우의 수집된 초음파 신호를 보이고 있다. 그림 3의 (a)에 비해 (b)는 진폭이 많이 감소했음을 알 수 있다. 그림 3의 (c)는 240kg/cm<sup>2</sup>으로 제작된 콘크리트 정상 시편에서 수집된 전형적인 초음파 신호이고 (d)는 인위적인 압축압력(52.1ton)을 가한 경우의 수집된 초음파 신호를 보여주고 있다. (d)의 초음파 신호도 역시 (c)의 초음파 신호에 비해 진폭이 많이 감소했음을 알 수 있다.



(a)



(b)

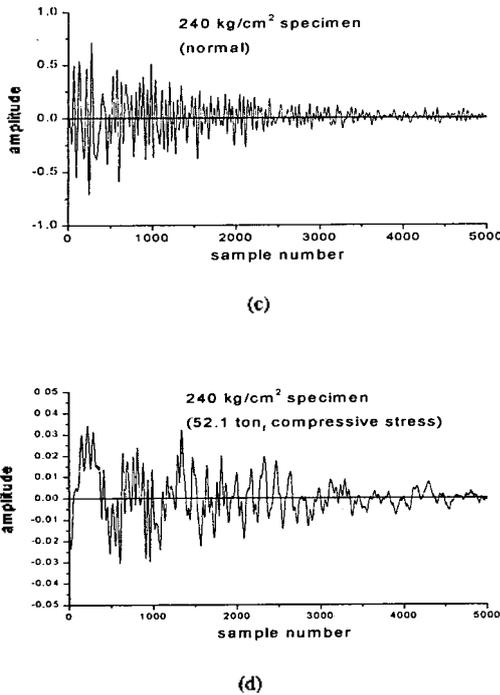


그림 3. 전형적인 초음파 신호  
 (a) 180 kg/cm<sup>2</sup> 정상 시편의 경우  
 (b) 180 kg/cm<sup>2</sup> 손상 시편의 경우(51.6 tonf)  
 (c) 240 kg/cm<sup>2</sup> 정상 시편의 경우  
 (d) 240 kg/cm<sup>2</sup> 손상 시편의 경우(52.1 tonf)

Fig. 3. Typical ultrasonic signal;  
 (a) A case of 180 kg/cm<sup>2</sup> normal specimen,  
 (b) A case of 180 kg/cm<sup>2</sup> compressive stress specimen (51.6 tonf),  
 (c) A case of 240 kg/cm<sup>2</sup> normal specimen,  
 (d) A case of 240 kg/cm<sup>2</sup> compressive stress specimen (52.1 tonf).

3.2. 결과 고찰

표 2는 초음파 탐상기로부터 직접 기록된 초음파 전파 속도의 평균값을 나타내고 있다. 180kg/cm<sup>2</sup> 과 240kg/cm<sup>2</sup> 으로 제작된 각 시험 시편에 대해서 압축 압력별로 전파 속도를 나타내고 있는데, 압축 압력별로 초음파 전파 속도가 감소하는 경향을 보이고 있다.

표 2. 180kg/cm<sup>2</sup>과 240kg/cm<sup>2</sup> 시편의 초음파 속도 측정 결과  
 Table 2. measured results of ultrasonic velocity with 180kg/cm<sup>2</sup> and 240kg/cm<sup>2</sup> specimens.

		180kg/cm <sup>2</sup>				
압축압력(tonf)		0	25	31.8	44.2	51.6
초음파 속도(%)		4601	4477	4379	4310	4010
		240kg/cm <sup>2</sup>				
압축압력(tonf)		0	26.5	34	42.4	52.1
초음파 속도(%)		4878	4636	4437	4298	4065

비고) 초음파 속도는 각각 80회 측정된 데이터의 평균값임.

그러나 앞에서 언급한 콘크리트의 품질 및 강도기준(미국)에 따르면 초음파 속도가 3100% 이상이면 정상시편으로 판단되는데, 실험한 모든 시편에서 초음파 전파 속도가 3100% 이상이므로 완전 파괴된 시편까지도 정상시편으로 판단되어 초음파 속도법은 정확도가 매우 떨어짐을 알 수 있다.

그림 4는 각각의 시험 시편에 대해서 Suaris가 제안한 최대 진폭을 이용한 손상 계수(D<sub>A</sub>)의 변화를 보여준다. 그림 4에서는 각각의 압축 압력별로 80개의 초음파 수집 데이터로부터 계산된 D<sub>A</sub>의 평균값을 중심으로 퍼져 있는 정도를 함께 보여주고있다. 그림 4의 (a)는 180kg/cm<sup>2</sup> 시편의 D<sub>A</sub> 변화를, 그림 4의 (b)는 240kg/cm<sup>2</sup> 시편의 D<sub>A</sub> 변화를 보여주고 있다. 둘 다 압력이 커질수록 손상계수 D<sub>A</sub>가 0에서 1로 증가하는 경향을 보이고 있다.

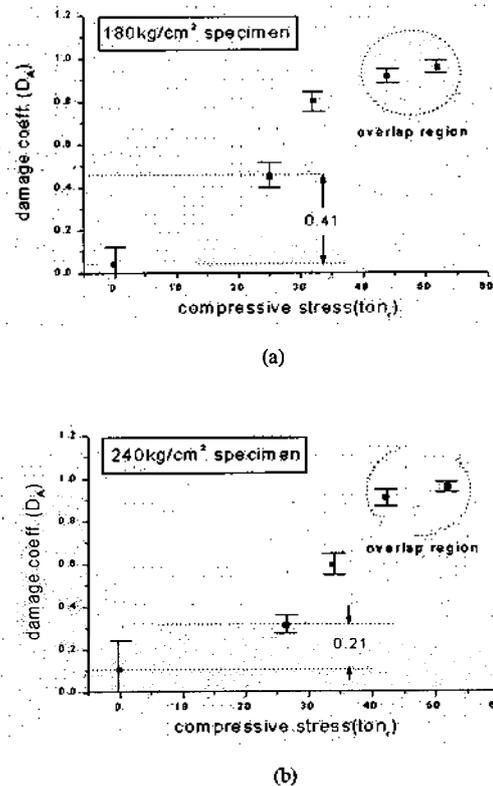


그림 4. 압축 압력에 따른 D<sub>A</sub>의 변화( I : 변화 폭, 점: 평균값 )

(a) 180 kg/cm<sup>2</sup> 시편  
 (b) 240 kg/cm<sup>2</sup> 시편

Fig. 4. Variation of D<sub>A</sub> with respect to the compressive stress( I : variation depth, dot: mean value );  
 (a) 180kg/cm<sup>2</sup> specimens,  
 (b) 240kg/cm<sup>2</sup> specimens.

그러나 그림 4의 (a)와 (b)에서 40tonf 이상의 압력이 인가된 경우 손상계수 D<sub>A</sub>의 분포는 겹치는 부분(overlap region)이 생긴다. 여기서 겹치는 부분이란 실제 압축 압력 과 실

현적인 결과로서 다른 압축 압력으로 판별될 수 있음을 말하고, 본 연구에서는 180kg/cm<sup>2</sup> 2개씩의 시편이 다른 압축 압력으로 판별되었으며 240kg/cm<sup>2</sup> 1개씩의 시편이 다른 압축 압력으로 판별되었다. 즉 이러한 압축 압력 부분에서는 정확하게 콘크리트의 손상정도를 판별하는데 분별력이 떨어짐을 말해주며 오류를 범할 수 있음을 알 수 있다. 또한 그림 4의 (a)와 (b)에서 압축 압력이 30tonr 미만의 경우 손상 계수의 차이가 평균값을 중심으로 각각 0.41과 0.21로 나타났는데, 만약 이러한 구간에서 손상 계수의 편차가 커진다면 그만큼 분별력이 증대될 것을 기대할 수 있다. 분별력의 증대는 이러한 구간의 임의의 압축 압력을 좀 더 자세히 추정할 수 있음을 말한다.

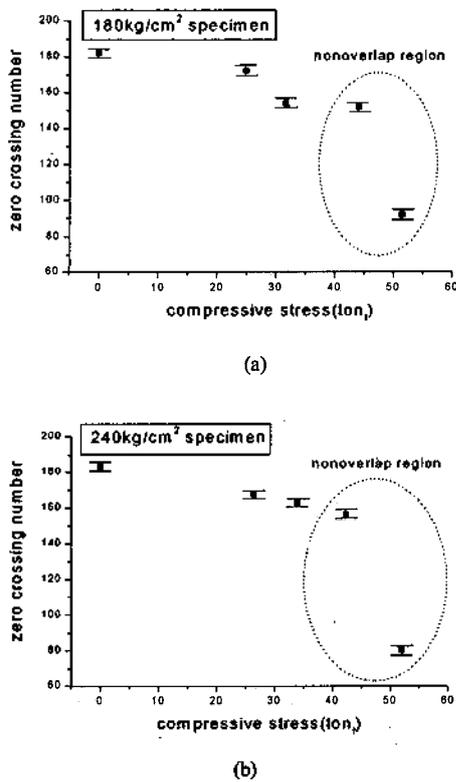


그림 5. 압축 압력에 따른 영점교차 횟수의 변화(┌: 변화 폭, 점: 평균값)  
(a) 180kg/cm<sup>2</sup> 시편  
(b) 240kg/cm<sup>2</sup> 시편

Fig. 5. Variation of zero crossing number with respect to the compressive stress(┌: variation depth, dot: mean value);  
(a) 180kg/cm<sup>2</sup> specimens,  
(b) 240kg/cm<sup>2</sup> specimens.

그림 5는 본 연구에서 제안한 복합해석 방법의 첫 번째로 영점 교차 방법을 이용하여 수집된 초음파 신호의 시평면 해석을 나타낸 그래프이다. 그림 4에서와 마찬가지로 x축은 압축 압력이고, y축은 압축 압력에 따른 영점 교차 횟수를 보여주고 있다. 그림 5의 (a)와 (b)에서 압축

압력이 40tonr 미만일 경우의 영점 교차 횟수는 분별력이 떨어지지만, 40tonr 이상의 압축 압력에서는 분별력이 커짐을 알 수 있다. 즉 그림 4의 (a)와 (b)에서 겹쳤던 부분이 영점 교차 해석에서는 겹치지 않는 양상으로 나타나고 있다. 따라서, 영점 교차 횟수를 이용하는 방법은 압축 압력이 클 경우에 장점을 가지게 된다. 이는 Suaris가 제안한 최대 진폭을 이용한 손상계수 D<sub>A</sub>에서 압축 압력이 큰 경우 즉 손상 정도가 심한 경우의 대안이 될 수 있다.

그림 6은 본 연구에서 제안한 복합해석의 두 번째로 수집된 초음파 신호의 분산을 이용하여 새롭게 정의한 손상 계수 D<sub>V</sub>에 대한 그래프이다. 그림 4에서 처럼 압축 압력에 따라 D<sub>V</sub>는 0에서 1까지의 값으로 증가하는 추세를 보이고 있다. 여기서 주목할 것은 압축 압력이 30tonr 미만에서이다. 그림 4에서 보여준 최대 진폭을 이용한 손상 계수 D<sub>A</sub>보다 분별력이 좋음을 알 수 있다. 즉 D<sub>V</sub>의 경우 30tonr 미만의 구간에서 손상계수의 평균값의 차이는 각각 0.51과 0.46으로 D<sub>A</sub>의 경우 0.41과 0.21에 비해 증가했음을 알 수 있다.

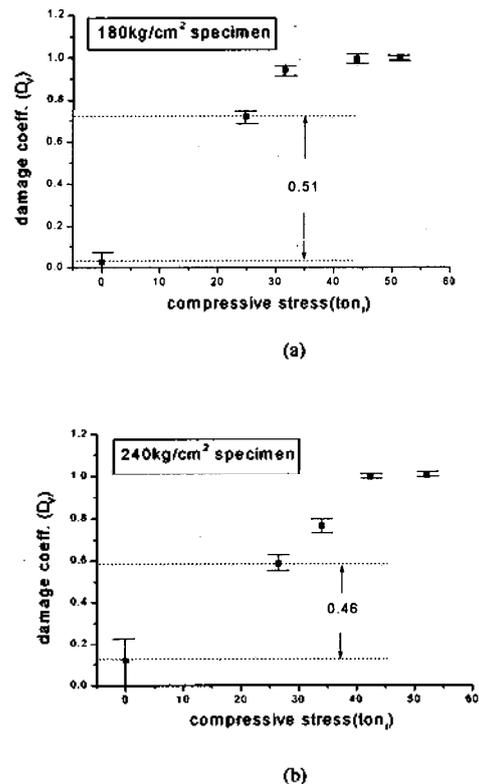


그림 6. 압축 압력에 따른 D<sub>V</sub>의 변화(┌: 변화 폭, 점: 평균값)  
(a) 180kg/cm<sup>2</sup> 시편,  
(b) 240kg/cm<sup>2</sup> 시편

Fig. 6. Variation of D<sub>V</sub> with respect to the compressive stress (┌: variation depth, dot: mean value);  
(a) 180kg/cm<sup>2</sup> specimens,  
(b) 240kg/cm<sup>2</sup> specimens.

이는 콘크리트의 손상정도가 적은 경우 분산을 이용한 손상계수를 이용함이 유리하다고 할 수 있다. 뿐만 아니라 초음파 신호에 대해 2차 통계적 특성인 분산의 경우 순간적인 잡음의 영향에 강건할 수 있다. 즉 순간적인 잡음이 들어왔을 때 Suaris가 제안한 방법은 잡음신호를 최대한으로 특징하여 손상 계수 측정에 오류가 있을 수 있는 반면 분산을 이용한 방법은 잡음의 영향을 무시할 수 있음을 뜻한다. 결론적으로 압축 압력이 작을 경우는 분산에 의한 손상계수를 이용하고 압축 압력이 큰 경우에는 영점 교차 횟수를 이용함으로써 상호 보완적으로 콘크리트의 손상을 추정할 수 있다.

제안한 방법에서의 콘크리트 손상의 추정시 요구되는 임계값은 분산을 이용한 손상계수  $D_v$ 의 값에 따라 실험적으로 결정하였는데,  $180\text{kg/cm}^2$ 의 시편의 경우 임계값은 0.9(압축 압력 35ton에 해당)로 결정하였고,  $240\text{kg/cm}^2$ 의 시편의 경우 임계값은 0.93(압축 압력 35ton에 해당)로 결정하였다. 따라서 이렇게 결정된 임계값을 이용하여 임의의 시편의 손상정도는 손상계수가 실험적으로 결정된 임계값보다 작은 경우에는  $D_v$ 만으로 손상 정도를 판별하고, 임계값보다 큰 경우에는 영점 교차 횟수를 계산하는 처리 과정을 거쳐 손상 정도를 판별하도록 알고리즘을 수행하였다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 구조물에 대한 정량적인 손상 해석방법을 제안하였다. 제안한 방법은 초음파 신호의 분산을 이용한 새로운 손상 계수의 정의 및 영점 교차 횟수를 계산하여 복합적인 손상 해석 방법이다. 첫 번째의 분산을 통한 손상 계수는 기존의 Suaris가 제안한 최대 진폭을 이용한 손상 계수를 이용하는 방법보다 손상 정도가 약한 경우 분별력이 컸고, 분산의 경우 분석하고자 하는 초음파 신호의 2차 통계적 특성을 나타내는 지수로서 단발적인 잡음 환경의 경우 단순히 최대 진폭을 지수로 사용하는 방법보다 강건할 수 있다. 두 번째의 영점 교차 횟수를 이용하는 방법은 손상 정도가 큰 경우의 실험에서 분별력이 크게 나타났다. 제안한 방법은 기존의 초음파 속도법에 의한 손상 해석과 Suaris가 제안한 손상 계수를 통한 해석 방법과 비교를 통해 성능 평가를 하였다. 실험 결과 초음파 속도법은 정상 시편과 손상 시편 모두에서  $4000\text{(m/s)}$  이상의 속도값이 측정되었고, 이는 미국에서 기준으로 정하고 있는  $3100\text{(m/s)}$ 를 초과하는 값으로 정상 시편이라고 판별될 수 밖에 없었고, Suaris가 제안한 최대 진폭을 이용한 손상 계수  $D_A$ 의 경우 압축 압력에 대한 분별력에 문제점이 있었다. 즉 동일한 압축 압력의 경우 손상 계수  $D_A$ 의 분포가 비슷한 압축 압력의 경우와 겹치는 부분이 컸다. 그러나 제안한 방법은 분산을 이용한 손상 계수  $D_v$ 는 손상 정도가 적은 경우  $D_A$ 보다 분별력이 컸고, 손상 정도가 심한 경우에는 영점 교차 횟수가 분별력이 커지는 특성을 이용하여 손상 정도에 따라 구간별로 해석을 수행하여 손상 해석의 정밀도를 높일 수 있었다.

따라서 본 연구에서 제안한 복합 해석을 통한 콘크리트 손상 해석 방법은 앞으로 각종 콘크리트 구조물의 손상 정도를 판별하는데 있어서 많은 응용이 기대된다.

#### 참 고 문 헌

1. A. M. Neville, Properties of concrete, Pitman, 1981
2. W. N. Reynolds, Measuring concrete quality nondestructively, Br. J. NDT, Vol. 26, No. 11, 1984
3. G. L. Gooberman, Ultrasonics ; theory and application, Hart publishing company INC., 1968
4. C. N. S. Electronics Ltd, PUNDIT manual for use with the portable ultrasonic nondestructive digital indicating tester Mark IV, 1996
5. J. and H. Krautkramer, Ultrasonic testing of materials, 1990
6. J. S. Propovics and J. L. Rose, "A survey of developments in ultrasonic NDE of concrete," IEEE Trans. Ultrasonic, Ferroelec., Frequency contr., Vol. 41, Jan., 1994
7. Tomsett, H. N, "Practical use of ultrasonic pulse velocity measurements in assessment of concrete quality," Magazine of concrete research(London), Vol. 32, No. 110, Mar., 1984
8. T. N. Claptor and W. A. Ellingson, "Development of ultrasonic methods for the nondestructive inspection of concrete," Ultrasonics International Conference, Canada, July 12-14, 1983
9. N. J. Carino, M. Sansalome and N. N. hsu, "A point source-point receiver, pulse-echo technique for flaw detection in concrete," ACI Jour., Mar.-April, 1986
10. N. J. Carino, "Laboratory study of flaw detection in concrete by the pulse-echo method," Proc. Int. Conf. on In Situ/NDT Testing of Concrete, Oct., Canada, 1984
11. W. Suaris and V. Fernando, "Detection of Crack Growth in Concrete from Ultrasonic Intensity Measurements," Materials and Structures, Vol. 20, pp. 214-220, 1987
12. P. Daponte and R. S. Olivito, "Crack detection measurements in concrete," in Proc. of Microcomputer Application Conf., LA, Dec. 14-16, 1989
13. X. P. Maldague, Advances in signal processing for nondestructive evaluation of materials, Kluwer academic publishers, 1993
14. A. K. Maji, S. Paul and M. L. Wang, "Improved impact-echo technique by signal processing," Res. NDE, Vol. 2, No. 1, 1990
15. Steven M. Kay, Modern spectral estimation ; theory and application, Prentice Hall, 1988
16. P. Daponte, F. Maceri and R. S. Olivito, "Ultrasonic signal-processing techniques for the measurement of damage growth in structural materials," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 44, No. 6, Dec., pp. 1003-1008, 1995

▲김 세 동(Se Dong Kim)

1956년 3월 3일생



1981년 : 한양대학교 공과대학 전기  
공학과 졸업, 동대학원 전기  
공학과(석사)졸업,

1997년 : 서울시립대학교 전자전기공  
학부 박사과정 수료, 건축전기  
설비기술사

1980년~1984년 : 한국전력공사 수화력  
건설부 근무

1984년~1997년 : 한국건설기술연구원 수석연구원

1997년~1999년 : 현재 두원공과대학 전기과 조교수

▲전 창 익(Chang-Ik Jeon)

1971년 3월 9일생



1996년 : 서울시립대학교 전자공학과  
졸업

1999년 : 동 대학원 전자공학과 졸업  
(석사)

▲노 승 용(Seung-Ryong Rho)

1944년 5월 1일생



1971년 2월 : 한양대학교 전자공학과  
졸업

1988년 2월 : 한양대학교 대학원 전자  
공학과(공학박사)

1982년~현재 : 서울시립대학교 전자·  
전기공학부 교수

▲김 성 환(Sung-Hwan Kim)

1952년 6월 12일생



1975년 2월 : 연세대학교 전기공학과  
졸업

1980년 2월 : 연세대학교 대학원 전기  
공학과(공학박사)

1977년~1982년 : 대전 기계창

1982년~현재 : 서울시립대학교 전자·  
전기공학부 교수