Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 24, No. 6, pp. 651~658, December, 2012
http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2012.24.6.651

비선형 초음파 변조 기법을 이용한 열손상 콘크리트의 미세균열 평가

박선종[1] · 임홍재[1] · 곽효경[1]*
[1]한국과학기술원 건설 및 환경공학과

Evaluation of Microcracks in Thermal Damaged Concrete Using Nonlinear Ultrasonic Modulation Technique

Sun-Jong Park,[1] Hong Jae Yim,[1] and Hyo-Gyung Kwak[1]*
[1]Dept. of Civil and Environmental Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

ABSTRACT This paper concentrates on the evaluation of microcracks in thermal damaged concrete on the basis of the nonlinear ultrasonic modulation technique. Since concrete structure exposed to high temperature accompanies the development of microcracks due to the physical and chemical changes from temperature and exposed time, the adoption of nonlinear approach is required. Instead of using the conventional ultrasonic nondestructive methods which have the limitation in evaluating excessive microcracks, accordingly, a nonlinear ultrasonic modulation method which shows better sensitivity in quantifying microcracks is introduced. Upon the analysis for the modulation of ultrasonic wave and low frequency impact to measure the nonlinearity parameter, which can be used as an indicator of thermal damage, the verification processes for the introduced technique are followed: SEM investigation and permeable pore space test are performed to characterize thermally induced microcracks in concrete, and ultrasonic pulse velocity tests are performed to confirm the outstanding sensitivity of nonlinear ultrasonic modulation technique. In advance, compressive strength of thermal damaged concrete is measured to represent the effect of microcracks on performance degradation. Correlation studies between experimental data and measured data show that nonlinear ultrasonic modulation technique can effectively be used to quantify thermally induced microcracks, and to estimate the compressive strength of thermally damaged concrete.

Keywords : nonlinear ultrasonic wave, nondestructive evaluation, thermal damaged concrete, microcracks, impact modulation

1. 서 론

콘크리트는 일반적으로 물, 시멘트, 굵은 골재, 잔골재 등으로 이루어진 무기질의 비균질성 물질로 고온에서도 스스로 타지 않는 특성을 지니며, 낮은 열전도율과 열확산계수를 가진다.[1] 따라서 화재 시 철근콘크리트 구조물에서 콘크리트는 내부의 철근을 보호하는 역할을 감당한다. 그러나 고온에 노출된 콘크리트는 균열 및 들뜸, 폭렬, 박락 등의 외관적인 손상 및 성능저하가 발생한다.[2,3] 또한, 내부 구성물질 간 열변형률 차이로 인한 열응력의 발생 및 내부 공극수의 탈수, 화학적인 변형은 콘크리트 내부에 미세균열(microcracks)의 발생을 야기하므로[1] 열손상을 입은 콘크리트 구조물의 손상평가는 구조물에 최대한 영향을 끼치지 않는 동시에 미세균열에 민감한 접근이 필요하다.[3,4]

기존의 열손상 콘크리트 손상평가는 코어 채취, 국소부위의 성분평가, 콘크리트의 변색, 반발 경도법, 초음파 속도법 등을 통해 진행되고 있으며, 주로 구조물에 영향을 끼치지 않는 비파괴검사법을 통한 연구가 이루어지고 있다.[3-6] 이 중 선형 응력파 기반의 초음파 기법은 콘크리트 내부에 발생하는 미세균열 평가에 대한 민감도 및 정확도가 떨어진다.[7,8] 한편, 비선형 음향효과(nonlinear acoustics)를 기반으로 하는 비파괴기법들은 마이크로미터 이하 크기의 균열, 미세구조의 변화 및 결정격자의 결함을 측정할 수 있는 민감도를 가진다.[9,10] 이러한 기법들은 20세기 중반부터 균질한 물질의 미세손상 평가에 적용되기 시작하였으며,[11] 최근 들어 콘크리트와 같은 비균질한 물질의 미세균열 평가[7,8,12-17]에 적용되고 있다. 이중 비선형 초음파 변조기법은 콘크리트 시편의 초기 손상인 미세균열에 보다 적합한 방법으로[16] 초음파의 변조 현상을 통해 미세균열 정도를 나타내는 비선형인자를 측정하며,[12,14] 이를 기반으로 하중,[7] 알칼리-실리카 반응[8] 등으로부터 발생되는 미세균열에 대한 연구가 진행되고 있다.

*Corresponding author E-mail : khg@kaist.ac.kr
Received February 23, 2012, Revised September 1, 2012, Accepted September 3, 2012
ⓒ2012 by Korea Concrete Institute

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이 논문에서는 열손상으로 인한 콘크리트 내부에 발생하는 미세균열을 비선형 초음파 변조기법을 토대로 보다 민감하게 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 먼저 열손상별 콘크리트의 SEM(scanning electron microscopy, 주사전자현미경) 관측 및 열손상 전후 콘크리트의 투수공극률 변화를 측정하여, 시편 내부에 발생한 미세균열의 시각적 관측 및 그 정도를 측정하였다. 그리고 열손상별 콘크리트 시편의 압축강도 측정을 통해 열손상에 의해 발생한 미세균열이 콘크리트의 성능저하에 미치는 영향을 파악하였다. 그 후, 비선형 초음파 변조기법을 통해 비선형인자를 열손상별로 측정하였으며, 이로부터 비선형인자와 열손상으로 인한 미세균열 정도와의 연관성을 파악하였다. 또한, 초음파 속도 측정을 통해 실험에 따른 열손상에 대한 민감도를 비교하였으며, 마지막으로 열손상별 압축강도와 비선형인자의 관련성을 살펴보았다. 이를 통해 비선형 초음파 변조기법을 통한 열손상별 콘크리트의 손상 평가를 진행하였으며, 나아가 비선형인자를 통한 열손상 콘크리트의 압축강도 추정에 대한 적용가능성을 파악하였다.

2. 이론적 배경

비선형 음향효과란 비선형의 응력-변형률 관계를 가진 물질을 통해 파가 전파될 때, 입사파(incident wave)와 다른 주파수 성질을 가지는 고조파(harmonics) 및 변조파(modulated wave)가 발생하는 현상을 뜻한다.[9,10] 미세균열을 가진 물질은 선형의 응력-변형률 관계가 아닌 고차의 비선형 응력-변형률 관계를 나타내며, 이를 1차원의 응력-변형률 관계로 나타내면 다음과 같다.[14]

$$\sigma = \int E(\varepsilon(t), \dot{\varepsilon}(t)) d\varepsilon \tag{1}$$

여기서, σ는 응력, ε은 변형률, $\dot{\varepsilon}$은 변형속도, E는 변형률과 변형속도의 함수로 나타내어지는 탄성계수이다. 이때 탄성계수 E는 다음과 같이 나타낼 수 있다.[12,14]

$$E(\varepsilon(t), \dot{\varepsilon}(t)) = E_0[1 - \beta\varepsilon(t) - \alpha\{\Delta\varepsilon + \varepsilon(t) \cdot sign(\dot{\varepsilon}(t))\} + \cdots] \tag{2}$$

여기서, E_0는 선형탄성계수(Young's modulus), β는 물질의 2차 비선형인자(nonlinearity parameter), α는 물질의 이력현상(hysteresis effect) 및 이산기억(discrete memory)[18]에 의한 비선형인자,[19] $\Delta\varepsilon$은 이전 주기에서 발생한 부분적인 변형률의 양(단일 주기 사인함수의 경우 $\Delta\varepsilon = (\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min})/2$)이다.

비선형 초음파 변조기법은 비선형 음향효과를 기반으로 한 기법으로 미세균열을 가진 콘크리트에 균열의 개폐를 발생시킬 수 있는 세기의 저주파와 고주파가 동시에 전파할 경우 내부의 미세균열[20] 및 이력현상, 이산기억으로 인하여 발생하는 변조를 이용한 방법[12,14]이다. 변조파는 두 파의 주파수 혼합으로 인한 측파대(sidebands)의 주파수 특성을 가지며, 그 크기는 콘크리트 내부의 미세균열 정도에 따라 증가하는 특성을 보인다.[20] 이 관계를 정량적으로 나타내는 비선형인자 α와 β를 다음 식과 같이 정의할 수 있다.[14]

$$\alpha \propto \frac{A(f_H \pm 2f_L)}{A(f_H) \times A(f_L)} \tag{3a}$$

$$\beta \propto \frac{A(f_H \pm f_L)}{A(f_H) \times A(f_L)} \tag{3b}$$

여기서, f_H는 고주파의 주파수, f_L은 저주파의 주파수이며, $A(f_H)$, $A(f_L)$, $A(f_H \pm f_L)$은 각각 주파수 영역(frequency domain)에서의 고주파의 크기(amplitude), 저주파의 크기, 변조파의 크기이다.

그러나 실제 파의 전파 시, 매질인 콘크리트의 특성상 파의 감쇠(attenuation) 및 분산(dispersion)이 발생하여 변조파의 크기 $A(f_H \pm f_L)$를 정확히 측정하기 어렵다.[16] 이러한 문제점을 해결하기 위해 등가 에너지(equivalent energy) 개념[12]을 도입하여 각 파의 크기로 나타나는 식 (3)의 비선형인자 관계식을 이에 상응하는 등가에너지 관계식으로 대체할 수 있다. 이를 통해 각 파의 등가에너지와 측정되는 비선형인자의 관계를 나타내면 식 (4)와 같다.

$$D \propto \frac{E_S(f_H \pm 2f_L)}{E_H(f_H) \times E_L(f_L)} \tag{4}$$

여기서, D는 등가에너지로 측정되는 비선형인자(nonlinearity parameter), E_L은 저주파의 등가에너지, E_H는 고주파의 등가에너지, E_S는 변조파의 등가에너지이다. 이때 등가에너지는 각 파의 주파수 대역의 적분으로부터 구해지는데, 변조파의 주파수 대역이 (3a)와 (3b)의 측파대를 동시에 포함하도록 설정하였다. 이로부터 식 (4)의 비선형인자 D가 식 (3)의 α와 β를 통합한 비선형인자이며, D의 측정을 통해 콘크리트의 미세균열의 정도를 추정할 수 있다.

3. 열손상 콘크리트

3.1 고온 수열 콘크리트의 손상 요인

콘크리트는 고온에 노출될 시 내부에 미세균열이 발생하게 되는데, 이는 크게 물리적 요인과 화학적 요인으로 구분할 수 있다. 먼저 물리적 요인은 콘크리트 구성물질 간의 열팽창률 차이로 인한 응력의 발생이다. Bazant[1]는 시멘트 페이스트와 여러 종류 골재의 열팽창에 대한 연구 결과를 정리하였는데, 시멘트 페이스트는 수열온도가 150~300°C에서 최고 0.2%의 팽창이 발생하지만, 300°C 이상에서는 수축이 발생하기 시작하며, 800°C에 이르러서는 최종적으로 1.6~2.2%의 수축이 발생한다. 한편, 골재의 경우 수열온도가 증가함에 따라 지속적인 열팽창이 발생하는데, 골재의 종류에 따라 열팽창률의 차이가 많

게는 5배까지 나타난다. 이러한 콘크리트 구성물질 간 열팽창률 차이로 인해 발생하는 열응력이 구성 물질 간 결합에 미세균열을 발생시키는 원인이 된다.

그리고 화학적 요인으로는 공극수의 증발, 화학흡착수의 방출 및 탈수, 고온에서 일어나는 여러 변형반응으로 인한 손상을 들 수 있다. 이와 같은 화학적 변화는 수열온도에 따라 순차적으로 발생하는데, 먼저 100°C 부근에서 콘크리트 내부의 자유수가 증발하며, 180°C 부근에서는 시멘트 젤의 탈수가 진행되고, 500°C 부근에서 시멘트 페이스트의 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)이 탈수반응을 일으키며, 570°C 부근에서 석영의 변태($\alpha SiO_2 \rightarrow \beta SiO_2$)가 일어나며, 700°C 부근에서는 규산칼슘수화물(C-S-H paste)의 분해가 시작되고, 800°C 부근에서는 탄산칼슘의 분해가 진행되며, 1200°C에 이르러서는 시멘트 페이스트와 몇몇 골재들의 융해가 일어난다. 이로부터 구성 물질 내부가 열손상으로 인해 악화되고, 미세균열이 콘크리트 내부에 발생한다.[1,3,4,6]

3.2 열손상 콘크리트 시편 제작

콘크리트 시편은 Φ100×200 mm 원주형 몰드를 사용하여 제작하였으며, 그 배합비는 Table 1과 같다. 표에서 W는 물, C는 시멘트, W/C는 물시멘트비, S는 잔골재, G는 19 mm 이하의 부순 굵은 골재, AD는 혼합제이다. 모든 공시체는 상대습도 60%의 항온항습실에 24시간 양생한 후 탈형하여 28일간 수중양생하였다. 양생을 마친 시편은 폭렬을 방지하기 위해 온도 80°C, 습도 5%의 항온항습기에 7일간 건조하였으며, 이후 전기로(electric muffle furnace)를 이용한 열손상을 가하였다. 시편의 열손상 정도는 실험 시 여러 조건들, 가열속도 및 냉각속도, 최고온도, 최고온도에서의 노출시간에 따라 차이를 나타낸다. 이 논문에서는 최고온도(이하 수열온도)로 열손상 정도를 구분하였는데, 150°C, 300°C, 450°C, 600°C와 열손상을 입지 않은 시편(Ref)을 포함하여 총 5가지 수열온도별 경우를 고려하였다. 열손상 시 최대온도 이외의 다른 조건은 일정하게 유지하였으며, 이를 Table 2에 정리하였다.

Table 1 Mix proportion of concrete

W/C (%)	Unit weight (kg/m^3)				Strength (MPa)
	W	C	S	G	
0.5	180	360	837	970	37.8

Table 2 Profile of thermal damage

Maximum temperature (T_{max})	Ref.	150 (°C)	300 (°C)	450 (°C)	600 (°C)
Heating rate (°C/min)	-	10			
Cooling rate		Immediate water cooling (20°C)			
Exposure time (at T_{max}) (min)		120			
Total heating time (min)		135	150	165	180

3.3 수열온도별 콘크리트의 미세균열

3.3.1 SEM 관측

SEM을 이용하여 수열온도별 콘크리트의 미세균열을 시각적으로 파악하기 위해 Table 1과 동일한 열손상을 입은 시료를 관측하였다. 여기에서 SEM은 고에너지 전자빔이 시료면 위로 주사될 때, 둘 사이의 상호작용으로 시료에서 발생하는 이차전자(secondary electron)나 반사전자(back-scattered electron)를 검출하여 표면의 미시적인 특성을 관측한다.[21] SEM 관측은 시료의 표면상태가 매우 중요하므로,[22] 연마기를 이용하여 시료의 표면처리 및 연마를 진행하였다. 이때 입도 #220, #400, #800, #1200, #1500의 연마지를 순차적으로 사용하였다. 그리고 비전도물질인 콘크리트 표면에서 발생하는 charging 현상을 방지하기 위해 카본 테이프(carbon tape)와 실버 페이스트(silver paste)를 이용하여 stub에 부착시킨 후, 시료의 표면을 금으로 코팅하여 관측을 진행하였다. 관측에 사용된 SEM은 Field Emission SEM(Magellan400)이며, SEM을 이용한 측정방법 중 반사전자를 이용한 관측을 수행하였다. 반사전자를 이용한 관측의 특성은 시료의 구성 원자번호가 클수록(원자가 무거울수록) 반사전자의 양이 증가하여 원자번호에 따른 대비가 발생하며, 이로부터 구성물질이 서로 다른 골재(어두운 회색)와 시멘트 페이스트(밝은 회색), 및 미세공극(검정색)을 음영으로 구분할 수 있는 장점을 가진다.[21] 이에 따른 관측 결과는 Fig. 1에 나타나있다. 여기에서 (a)~(e)는 열손상별 시편의 SEM

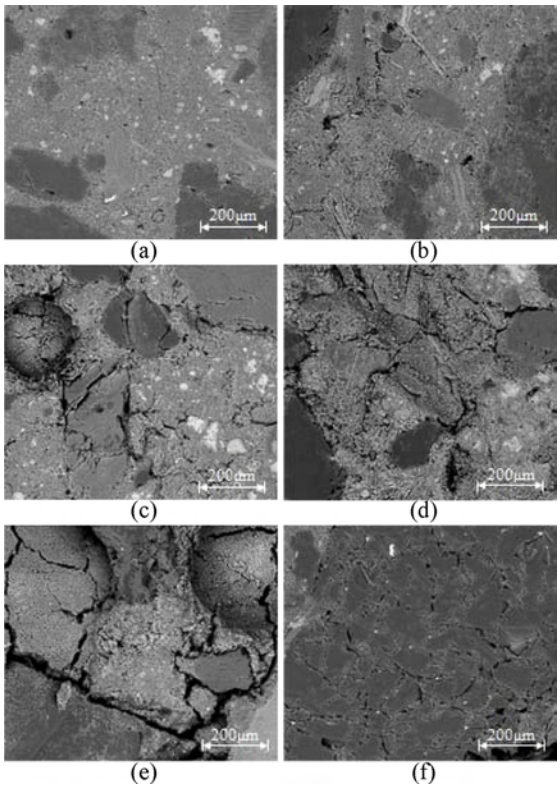

Fig. 1 SEM images of specimen after thermal damage: (a) Ref., (b) 150°C, (c) 300°C, (d) 400°C, (e) 600°C, (f) 600°C aggregate

사진이며, (f)는 수열온도 600°C 시편에서 관측되는 골재의 모습이다. 이로부터 수열온도의 증가에 따라 손상정도의 증대를 관찰할 수 있다. 300°C에서부터 페이스트 내 본격적인 미세균열이 발생하며(Fig. 1(c)), 시멘트 페이스트와 골재 사이의 미세균열이 점차 심화되고(Fig. 1(d), (e)) 특히 600°C의 골재사진인 Fig. 1(f)에서는 골재 내부까지도 미세균열이 발생함을 볼 수 있다. 이로부터 수열온도가 증가할수록 콘크리트 내 발생하는 미세균열 정도를 SEM으로부터 시각적으로 관찰할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 SEM은 시료의 미시적인 부분의 관측만 가능하므로 콘크리트 시편의 전체적인 미세균열 정도를 반영하기 쉽지 않은 한계를 가진다.

3.3.2 투수공극량 변화

위에서 언급한 SEM의 한계를 극복하기 위해 콘크리트 내 공극 및 균열의 양을 측정할 수 있는 투수공극량을 열손상 전후로 측정하였다. 투수공극량의 측정은 ASTM C 642-06[23]에 따라 수행하였으며, 측정된 열손상 전후 투수공극량과 그 변화량을 Table 3에 나타내었다. 이때 150°C 시편에서는 투수공극량 평균이 0.17% 증가하는데 비해, 300°C에서는 2.34%, 450에서는 4.22%, 600°C에서는 6.16%로 급격한 증가를 나타냄을 알 수 있다. 즉, 콘크리트 내 발생하는 미세균열은 150°C보다 높은 온도에서 본격적으로 발생함을 실험으로부터 알 수 있으며, 투수공극량의 변화량으로부터 미세균열이 열손상에 따라 증대되는 정도를 정량적으로 나타낼 수 있다.

SEM 관측과 투수공극량 변화 결과를 종합해볼 때, 150°C 시편보다 300°C 시편에서 내부의 미세균열이 본격적으로 발생하였음을 알 수 있다. 이는 시멘트 페이스트의 탈수반응이 300°C 정도에서 종결되기 때문으로 사료된다. 또한, 450°C, 600°C까지 온도가 상승할 시 내부 구성물질 간 미세균열 정도가 점점 심해지는 결과를 보인다. 특히 600°C의 경우 골재 내부까지 미세균열이 발생하는데, 이는 570°C 부근에서 발생하는 골재 내 석영의 변태로 인한 손상이 끼치는 영향으로 판단된다. 따라서 SEM 관측과 투수공극량 변화량의 측정이 열손상으로 인한 콘크리트의 미세균열상태를 제대로 반영함을 알 수 있다. 그러나 실제 콘크리트 구조물의 미세균열 평가 시 SEM 관측은 한정된 관측 범위를 가지며, 투수공극량 변화 측정은 열손상 전 투수공극량을 정확히 측정할 수 없다는 한계를 가진다. 이를 극복하기 위해 4장에서는 비선형 초음파 변조기법을 통한 미세균열평가를 진행하였다.

Table 3 Changes of volume fraction of permeable pore in concrete before and after thermal damage

Maximum temperature	150°C	300°C	450°C	600°C
Before (%)	12.13	12.66	12.91	13.22
After (%)	12.29	15	17.13	19.38
Change (%)	0.16	2.34	4.22	6.16

3.4 압축강도 및 초음파 전파속도

비선형 초음파 변조 측정에 앞서 열손상에 따른 압축강도 측정을 통해 열손상으로 인한 미세균열이 콘크리트의 성능저하에 미치는 영향을 파악하였다. 실험은 KS F 2405[24]를 따라 진행되었는데, 수열온도별 열손상 시편을 3개씩 측정하였으며, 이들의 평균값으로부터 압축강도를 구하였다. 측정은 250톤 용량의 만능재료시험기(Instron. Closed-Loop Dynamic Material Testing System)를 이용하였다. 한편, 비선형 초음파 변조기법과의 민감도 비교를 위해 선형 응력파 기반 초음파기법인 초음파 전파속도(ultrasonic pulse velocity)를 ASTM C 597-09[25]에 따라 수열온도별로 측정하였으며, 압축강도와 초음파 전파속도 결과를 수열온도에 따라 Table 4에 나타내었다. 압축강도는 수열온도의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이는데, 3.3절에서 측정된 열손상에 따른 미세균열의 증대가 압축강도의 감소에 직접적인 영향을 끼치며, 최대 60%의 감소를 나타낸다. 또한, 수열온도의 증가에 따라 초음파 전파속도도 감소하는 경향을 보이는데, 이는 콘크리트의 열손상으로 인한 물질의 탄성계수 감소가 초음파 전파속도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

4. 비선형 초음파 변조 측정

4.1 실험 방법

열손상 콘크리트의 미세균열 평가를 위해 비선형 초음파 변조 측정을 수행하였다. 실험의 개요도는 Fig. 2에 나타나있다. 신호 발생기(signal generator, National Instruments Corp. PXI 5421)로부터 연속적으로 생성된 180 kHz 단일 주파수의 사인파는 증폭기(amplifier) 및 초음파 변환기(ultrasonic transducer, Olympus NDT, Inc. PANAMET-

Table 4 Residual compressive strength and ultrasonic pulse velocity of thermal damaged concrete

Maximum temperature	Ref.	150°C	300°C	450°C	600°C
Residual compressive strength (MPa)	43.59	39.92	37.13	29.05	17.38
Ultrasonic pulse velocity (m/s)	4531	4260	3904	3621	3232

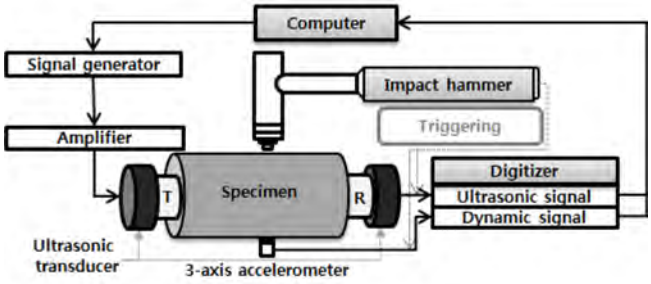

Fig. 2 Experimental setup for nonlinear ultrasonic wave modulation technique

RICS X1019)를 거쳐 초음파로 변환되어 시편에 가진된다. 한편, 저주파의 가진은 충격해머(impact hammer, PCB Piezotronics, Inc. PCB 086C03)로 가진하였으며, 주대역이 10 kHz까지인 팁을 사용하였다. 이는 저주파 충격을 통해 내부 미세균열의 개폐를 보다 효율적이고 간편하게 발생시킬 수 있기 때문이다. 이때 시편 내부에 전파되는 초음파 전달파(ultrasonic probe wave)와 저주파 가진으로 인한 변조파가 발생하게 된다. 전달파 및 변조파는 가진 초음파 변환기와 동일한 초음파 변환기로부터 측정되었고, 충격의 측정은 3축 가속도계(3-axis accelerometer, PCB Piezotronics, Inc. PCB 356A33)를 이용하여 모든 방향의 진동을 측정하였다.

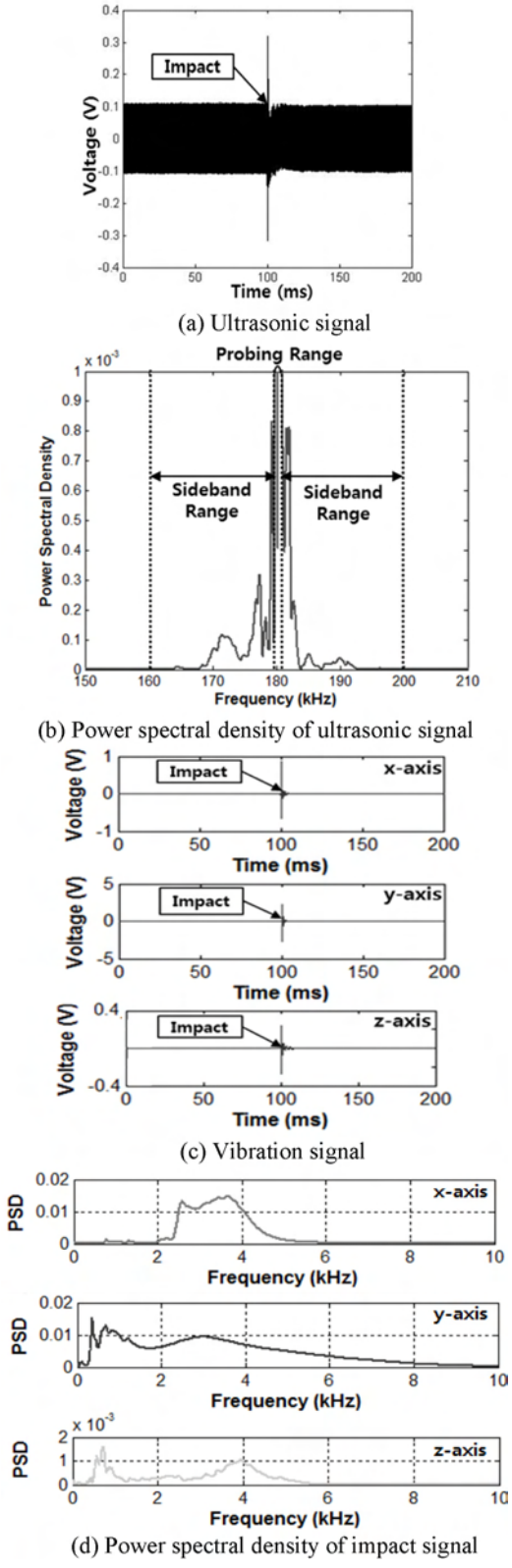

Fig. 3 Typical measured signals of nonlinear ultrasonic wave modulation (600°C).

4.2 실험 결과 및 분석

Fig. 3은 600°C의 시편에서 얻어지는 실제 데이터 및 이를 FFT한 결과를 나타내는데, (a), (b)는 초음파 신호 및 파워스펙트럼 밀도(power spectral density, PSD)이며 (c), (d)는 충격 및 파워스펙트럼 밀도이다. 각 파의 등가에너지를 측정한 후, 식 (4)로부터 비선형인자 D를 산출하였다. 이때 등가에너지는 각 파의 파워스펙트럼밀도를 각각의 영역에 따라 적분하여 구하였으며, 각 파의 영역은 초음파 전달파의 주파수와 충격의 주파수 영역으로부터 결정되었다. Fig. 3(b)는 각 파의 주파수 구간을 나타내고 있으며, 발생한 변조파의 첫 번째 피크는 180±0.2 kHz 구간 밖에서 발생한다. 이로부터 전달파는 180±0.2 kHz, 변조파는 160~200 kHz의 구간에서 전달파를 제외한 범위, 충격은 Fig. 3(d)와 같이 0~10 kHz까지를 등가 에너지의 범위로 설정하였다.

식 (4)의 충격의 세기, 즉 저주파 충격 에너지(E_L)를 독립변수로 두고 나머지 항인 변조파(E_S) 및 전달파 에너지(E_H)를 종속변수로 설정한다면, 비선형인자 D는 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$D \propto \frac{E_n}{E_i} \tag{5}$$

여기서, E_n은 E_S/E_H로써 변조파 에너지를 전달파 에너지로 정규화한 값(normalized sideband energy)이고, E_i은 충격 에너지(impact energy)이다. 식 (5)로부터 D는 충격의 세기를 변화시키면서 측정된 E_i과 E_n의 데이터 집합의 기울기로 추정할 수 있다.

비선형 초음파 변조 실험은 수열온도별 콘크리트 시편을 2개씩 측정하였으며, 실험에 사용된 시편은 공시체를 절반으로 자른 크기인 Φ100×100 mm 시편을 사용하였다 (Fig. 4). 각 시편은 수열온도_시편번호로 표기하여 구분

Fig. 4 Thermal damged concrete specimens for nonlinear ultrasonic wave modulation

하였다. 비선형인자의 측정은 식 (5)의 관계에 따라 세기가 다른 50번의 충격을 가하고, 이로부터 얻어지는 데이터 집합의 선형 추세선 기울기로써 비선형인자를 결정하였다. 또한, 실험의 신뢰성을 확보를 위해 충격의 위치 및 이에 따른 가속도계의 위치를 달리하여 시편별로 5번의 비선형인자 측정을 수행하였으며, 이를 실험 순서에 따라 각각 T1, T2, T3, T4, T5로 구분하였다. Fig. 5는 수열온도별 비선형 초음파 변조 측정 결과를 보여준다. 비선형인자가 시편, 및 가속도계의 위치에 따라 산포를 보이는데, 이는 콘크리트 내부 미세균열의 무작위적인 분포에 따른 결과로 추정된다.

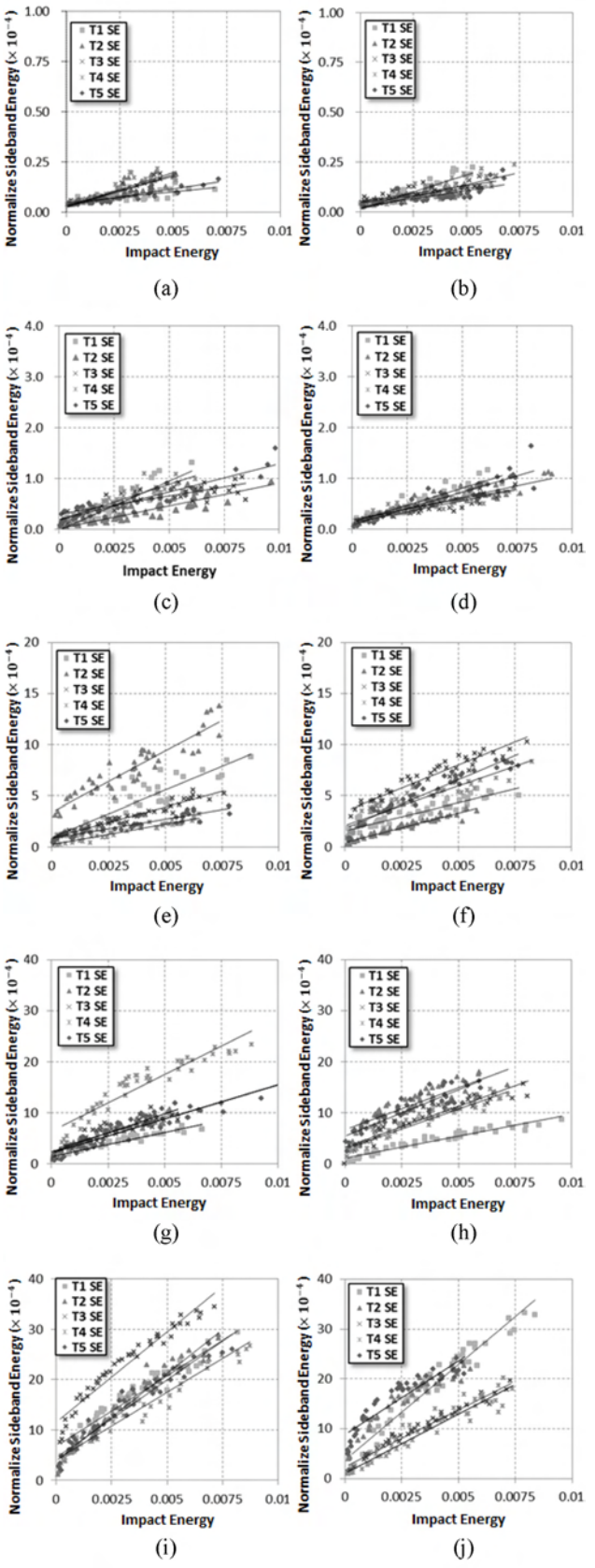

Fig. 5 Experimental results of nonlinear ultrasonic wave modulation technique: (a) Ref_1, (b) Ref_2, (c) 150_1, (d) 150_2, (e) 300_1, (f) 300_2, (g) 450_1, (h) 450_2, (i) 600_1, (j) 600_2

Fig. 5의 실험 결과로부터 얻어지는 비선형인자를 수열온도별로 종합하여 Fig. 6에 나타내었다. 이때 수열온도별 비선형인자의 평균값은 그래프 내 레이블로 나타내었다. 이로부터 콘크리트의 열손상 정도에 따라 비선형인자가 수열온도에 따라 급격하게 증가함을 알 수 있는데, 특히 300°C 이상의 수열온도에서 비선형인자의 증가폭이 뚜렷하게 커짐을 볼 수 있다. 앞선 SEM 관측 및 투수공극량 변화 시험에서 300°C 이상의 열손상을 겪은 시편에 본격적으로 미세균열이 발생하는 점으로 미루어보았을 때, 열손상으로 인한 실제 미세균열 정도와 비선형인자가 밀접한 연관성을 가짐을 알 수 있다.

한편, 3.4절에서 측정된 초음파 전파속도 및 비선형인자의 열손상별 비율변화를 통해 실험방법별 민감도를 비교하였다. 각 실험별 측정값으로부터 구해진 비율 변화는 초음파 전파 속도에서 최대 0.28배 정도인데 비해, 비선형인자의 경우 최대 130배 정도의 큰 변화를 보인다. 이로부터 열손상 콘크리트의 미세균열 평가에 비선형 초음파 변조기법이 선형 초음파 기법에 비해 월등히 민감함을 알 수 있다. 위의 결과로부터 비선형 초음파 변조기법이 열손상 콘크리트의 미세균열 평가에 적합한 평가방법이라는 결론을 내릴 수 있다.

4.3 비선형인자와 압축강도의 관계

열손상에 따른 콘크리트 내부 미세균열의 발생은 3.4절에서 언급한 바와 같이 콘크리트의 성능저하, 즉 압축강도의 감소와 밀접한 연관성을 가짐을 알 수 있다. 한

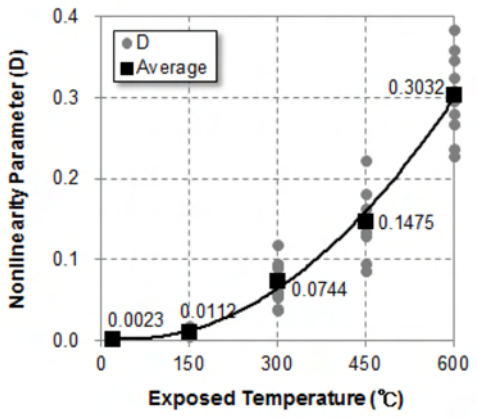

Fig. 6 Relationship between nonlinearity parameter and exposed temperature

편, 비선형 초음파 변조 기법은 앞선 실험을 통해 증명되었듯이 열손상에 따른 콘크리트의 미세균열 증가에 민감하며, 이를 통해 측정되는 비선형인자로부터 미세균열의 발생 정도를 추정 가능하다. 따라서 비선형인자의 증가와 압축강도의 감소는 열손상에 의한 미세균열의 발생과 밀접한 관련성을 가짐을 알 수 있으며, 이를 비선형인자와 압축강도 감소량의 관계로 Fig. 7에 나타내었다. 두 결과의 선형관계로부터 열손상 콘크리트의 비선형인자 측정을 통해 콘크리트의 성능저하 및 압축강도의 추정에 이용 가능함을 보였다. 한편, 선형 응력파 기반 비파괴 기법과의 비교를 위해 초음파 전파속도의 감소비와 압축강도의 감소량 간의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 두 측정값 모두 압축강도의 감소량과 선형관계를 가지나, 초음파 전파속도법은 손상을 입기 전 측정값이 필요하다. 반면, 비선형 초음파 변조기법은 비선형인자의 측정을 통한 강도 추정이 가능하므로 향후 열손상 콘크리트의 강도 추정에 용이한 적용이 가능하다.

5. 결　　론

이 논문에서는 비선형 초음파 변조기법을 토대로 열손상 콘크리트 내부의 미세균열에 따른 열손상 정도를 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 열손상 시편의 미세균열 정도를 SEM 관측 및 투수공극량 측정을 통해 추정하였으며, 압축강도의 측정을 통해 열손상으로 인한 미세균열의 증가가 콘크리트의 성능에 미치는 영향을 파악하였으며 제안된 기법을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

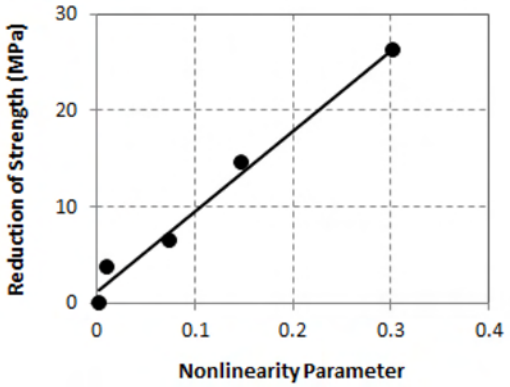

Fig. 7 Relationship between nonlinearity parameter and reduction of strength

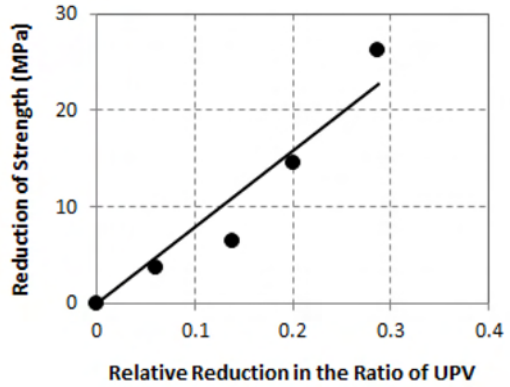

Fig. 8 Relationship between relative reduction in ratio of ultrasonic pulse velocity (UPV) and reduction of strength

SEM 관측 및 투수공극량 측정으로부터 콘크리트 내부의 미세균열 발생 정도를 추정하였으며, 그 결과 수열온도 300°C 이상의 시편에서 급격한 미세균열의 심화 및 최대 6% 정도의 투수공극량 증가가 발생하였다. 이는 시멘트 페이스트, 골재 등 콘크리트의 구성물질 간 열변형률 차이와 같은 물리적인 요인 및 시멘트 페이스트의 탈수, 석영의 변태 등과 같은 화학적인 요인과 밀접한 연관성을 가지는 것으로 판단된다. 또한, 열손상별 콘크리트 공시체의 압축강도 측정을 통해 열손상에 따른 미세균열의 증가에 따라 압축강도의 감소가 최대 60% 정도까지 발생함을 볼 수 있다.

선형 초음파 기법인 초음파 전파속도 측정과의 민감도 비교로부터 비선형 초음파 변조 기법이 선형 초음파 기법에 비해 열손상으로 인한 미세균열에 최대 450배 정도 민감함을 보였다. 그 결과 열손상 콘크리트의 미세균열평가에 비선형 초음파 변조 기법이 적합함을 검증하였다. 또한, 열손상에 따른 콘크리트 시편의 비선형인자 측정은 수열온도가 300°C 이상인 시편에서 급격히 증가하는데, 이는 SEM 관측과 투수공극량 측정 결과에 나타나듯 수열온도에 따른 미세균열의 증가와 밀접한 연관성을 나타내는 것으로 판단된다.

콘크리트 내부 미세균열 증가에 따라 열손상 시편의 비선형인자 및 압축강도와의 상관관계를 분석 하였다. 그 결과 열손상 콘크리트의 비선형인자 증가에 따라 시편의 압축강도는 선형으로 감소하는 결과를 나타내었다. 두 결과의 연관성은 비선형 초음파 변조 기법으로부터 열손상 콘크리트의 압축강도 추정 가능성을 나타내며, 향후 비선형인자의 정량적인 측정을 통해 보다 정확한 콘크리트 비파괴 강도추정법으로 발전 가능함을 보인다.

감사의 글

이 연구는 2012년도 지식경제부 원자력기금으로 한국에너지기술평가원(20101620100050) 및 국토해양부의 U-City 석·박사과정 지원사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bazant, Z. P. and Kaplan, M. F., *Concrete at High Temperature: Material Properties and Mathematical Models,* Longman Group Limited, 1996, pp. 6-85.
2. Kim, W. J., “Fire of Reinforce Concrete Structure,” *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 5, 2008, pp. 12-21.
3. Oh, J. S., Song, H., Song, D. Y., and Park, G. B., “Diagnosis and Repair Methods of Fire Damaged Concrete Structure,”

Infrastructure Safety, Vol. 17, No. 5, 2005, pp. 54-62.
4. Kim, Y. E., "Nondestructive Testing of Concrete for its Stringth, Chemical Degradation, and Damage due to Fire," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 10, No. 2, 1998, pp. 50-64.
5. Chew. M. Y. L., "The Assessment of Fire Damaged Concrete," *Building and Environment*, Vol. 28, No. 1, 1993, pp. 97-102.
6. Colombo, M. and Felicetti, R., "New NDT Techniques for the Assessment of Fire-Damaged Concrete Structures," *Fire Safety Journal*, Vol. 42, No. 6, 2007, pp. 461-472.
7. Warnemuende, K. and Wu, H. C., "Actively Modulated Acoustic Nondestructive Evaluation of Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 4, 2004, pp. 563-570.
8. Chen, J., Jayapalan, A. R., Kim, J. Y., Kurtis, K. E., and Jacobs, L. J., "Rapid Evaluation of Alkali-Silica Reactivity of Aggregates Using a Nonlinear Resonance Spectroscopy Technique," *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 6, 2010, pp. 914-923.
9. Zheng, Y., Maev, R. Gr., and Solodov, I. Yu., "Nonlinear Acoustic Applications for Material Characterization: a Review," *Canadian Journal of Physics*, Vol. 77, No. 12, 1999, pp. 927-967.
10. Jhang, K. Y., "Nonlinear Ultrasonic Techniques for Nondestructive Assessment of Micro Damage in Material: A Review," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 1, 2009, pp. 123-135.
11. Hikata, A., Chick, B. B., and Elbaum, C., "Dislocation Contribution to the Second Harmonic Generation of Ultrasonic Waves," *Journal of Applied Physics*, Vol. 36, No. 1, 1965, pp. 229-236. (doi: http://dx.doi.org/10.1063/1.1713881)
12. Abeele, K. E. A. Van Den, Johnson, P. A., and Sutin, A., "Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part I: Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy (NWMS)," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, Issue 1, 2000, pp. 17-30.
13. Abbele, K. E. A. Van Den, Carmeliet, J., Cate, J. A. T., and Johnson, P. A., "Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part II: Single-Mode Nonlinear Resonance Acoustic Spectroscopy," *Research in Nondestructive Evaluation*, Vol. 12, Issue 1, 2000, pp. 31-42.
14. Abeele, K. E. A. Van Den, Sutin, A., Carmeliet, J., and Johnson, P. A., "Micro-Damage Diagnostics Using Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy," *NDT&E International*, Vol. 34, 2001, pp. 239-248.
15. Shah, A. A. and Ribakov, Y., "Non-Linear Ultrasonic Evaluation of Damaged Concrete Based on Higher Order Harmonic Generation," *Materials and Design*, Vol. 30, 2009, pp. 4095-4102.
16. Payan, C., Garnier, V., and Moysan, J., "Effect of Water Saturation and Porosity on the Nonlinear Elastic Response of Concrete," *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, No. 3, 2010, pp. 473-476.
17. Les´nicki, K. J., Kim, J. Y., Kurtis, K. E., and Jacobs, L. J., "Characterization of ASR Damage in Concrete Using Nonlinear Impact Resonance Acoustic Spectroscopy Technique," *NDT&E International*, Vol. 44, No. 8, 2011, pp. 721-727.
18. Holcomb, D. J., "Discrete Memory in Rock: A Review," *Journal of Rheology*, Vol. 28, No. 6, 1984, pp. 725-728. (doi: http://dx.doi.org/10.1122/1.549772)
19. Guyer, R. A. and Johnson, P. A., "Nonlinear Mesoscopic Elasticity: Evidence for a New Class of Materials," *Physics Today*, Vol. 52, No. 4, 1999, pp. 30-36.
20. Donskoy, D., Sutin, A., and Ekimov, A., "Nonlinear Acoustic Interaction on Contact Interfaces and Its Use for Nondestructive Testing," *NDT&E International*, Vol. 34, No. 4, 2001, pp. 231-238. (doi: http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00063-3)
21. Stutzman, P., "Scanning Electron Microscopy in Concrete Petrography," *In Calcium Hydroxide in Concrete, Proceedings*, Skalny, J., Gebauer, J., Odler, I., eds., The American Ceramic Society, Anna Maria Island, FL, 2001, pp. 59-72.
22. Stutzman, P. and Clifton, J., "Specimen Preparation for Scanning Electron Microscopy, in: L. Jany, A. Nisperos (Eds.)," *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Cement Microscopy*, International Cement Microscopy Association, Duncanville, Las Vegas, NV, Vol. 21, 1999, pp. 10-22.
23. ASTM International, *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, ASTM C 642-06, American Society for Testing and Materials, 2006, 3 pp.
24. Korean Industrial Standards, Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete, KS F 2405, 2005, 10 pp.
25. ASTM International, *Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete*, ASTM C 597-09, American Society for Testing and Materials, 2009, 4 pp.

요 약 이번 연구에서는 비선형 음향효과를 기반으로 한 비선형 초음파 변조 기법을 통해 열손상 콘크리트의 미세균열 정도를 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 화재 시 콘크리트 구조물은 물리적, 화학적 변화에 따른 콘크리트 내 미세균열이 발생하므로, 기존 초음파 비파괴 기법의 민감도 한계를 극복한 비파괴 기법의 도입이 필요하다. 비선형 초음파 기법은 초음파와 저주파의 변조파로부터 열손상 평가 인자인 비선형인자를 측정하며, 이는 열손상 콘크리트의 미세균열에 적합한 민감도를 가진다. 이 연구에서는 SEM 관측, 열손상 전후 콘크리트의 투수공극량 변화 측정으로부터 수열온도에 따라 미세균열이 급격하게 발생함을 보였으며, 수열온도별 콘크리트의 초음파 전파속도 측정을 통해 제안된 방법의 민감도를 검증하였다. 추가적으로 열손상에 따른 미세균열이 콘크리트의 성능저하에 미치는 영향을 파악하고자 열손상 콘크리트 시편의 압축강도 측정을 수행하였다. 측정값 및 실험값의 연관성을 파악하여 비선형 초음파 변조 기법이 열손상 콘크리트의 미세균열 평가에 적합함을 보였으며, 향후 압축강도 추정에 대한 적용 가능성을 확인하였다.

핵심용어 : 비선형 초음파, 비파괴 평가, 열손상 콘크리트, 미세균열, 임팩트 변조