

프리스트레스트 보의 콘크리트 응력 수준 평가를 위한 비선형 초음파 공진 기법의 적용

김 규 진¹ · 곽 효 경^{1*}

¹한국과학기술원 건설 및 환경공학과

Adoption of Nonlinear Resonant Ultrasonic Spectroscopy for the Evaluation of Stress State on Concrete in Prestressed Beam

Gyu-Jin Kim¹ and Hyo-Gyoung Kwak^{1*}

¹Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 34141, Korea

Abstract

In order to evaluate a stress state of concrete according to the change of tensile force of prestressed beam, improved nonlinear resonant ultrasonic spectroscopy(NRUS) method is proposed. This technique is advantageous to evaluate the stress state in initial state because the method shows much higher sensitivity than existing linear ultrasonic methods. The NRUS technique measure a nonlinearity parameter, which is calculated from the resonant frequency shift of ultrasonic wave related to the medium state, and the result is also closely related to the stress state of concrete. In this study, the nonlinearity parameter was measured with the change of tensile force to verify the close relationship between the two factors, and the effect of repetitive load cycle on the change of nonlinearity parameter was analyzed. In addition, sensitivity comparison with the linear ultrasonic pulse velocity method was performed. Through the experimental results, the possibility of NRUS technique for the evaluation of stress state in prestressed beam was confirmed.

Keywords : prestressed beam, concrete stress state evaluation, nonlinear resonant ultrasonic spectroscopy, sensitivity

1. 서 론

고강도 콘크리트와 강재가 개발됨에 따라 프리스트레스트 콘크리트 구조의 사용이 증가하고 있다. 특히, 포스트 텐서닝 공법 등의 시공 기술이 발전하면서 교량, 원형 구조물 등의 적용 범위가 넓어지고 있으며, 향후 프리스트레스트 콘크리트의 도입은 더욱 확대될 것으로 보인다(Lee, 2013). 이러한 구조는 설계자의 의도에 따라 외부하중에 의해 발생하는 콘크리트 단면의 응력 분포를 미리 결정할 수 있고, 보다 작은 단면적으로 같은 효과의 저항력을 발생시킬 수 있으므로 경제적이고 안정적이라는 장점을 가지고 있다(Naaman, 1982).

그러나 구조물의 사용 연한 증가에 따라 크리프, 건조 수축

등의 장기거동과 과도한 외부 하중 노출에 따른 안정성 감소가 문제로 대두되고 있다. 일례로, 프리스트레스트 콘크리트를 사용한 장대 교량은 해상에 건설되는 경우가 많으며, 염 노출에 따른 손상, 작은 단면적에 따른 낮은 강성으로 인한 잦은 진동 등이 주요 고려사항이 된다. 시설물 안전관리에 대한 특별법에 따라 정기적인 검사를 통해 관리가 되고 있으나, 육안 검사와 재하 실험에 의존하는 방식으로는 초기 상태를 파악하기가 쉽지 않은 실정이다(KCI, 1993). 또한, 기존의 철근 콘크리트 구조물에 비해 비교적 높은 외부 하중을 받고 있는 프리스트레스트 콘크리트 구조물은 화재 등의 다양한 손상 요인에 노출되는 경우 강도가 더 크게 감소한다는 단점을 갖고 있다(Yi *et al.*, 2012; Atienza and Elices, 2009). 이러한 상

* Corresponding author:

Tel: +82-42-350-3621; E-mail: kwakhg@kaist.ac.kr
Received February 15 2017; Revised February 22 2017;
Accepted March 14 2017

©2017 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

황에서 초음파를 이용한 비파괴 검사를 통해 시설물의 관리가 이루어진다면 시설물의 관리가 보다 수월하게 이루어질 것이다.

초음파 기반의 비파괴 검사 기법은 매질에 초음파를 통과시키는 경우, 매질 상태에 따라 측정되는 파의 특성이 변화하는 현상에 그 원리를 두고 있다. 예를 들어 초음파 전파 속도법은 보의 표면 또는 검사하고자 하는 부위에서 초음파를 진행시키고 일정 구간까지의 전파 시간을 측정하는데, 매질의 손상이 진행될수록 파의 전파 속도가 감소하게 된다(Parisa *et al.*, 2012). 프리스트레스트 콘크리트 보를 평가하기 위한 기존의 연구로는 실험실 규모의 보에 긴장력을 가하며 처짐을 측정하는 사례가 있으며, 이외 일반 보에 대해서는 육안 확인, 반발경도법, 초음파 전파 속도법, 비선형 초음파 기법 등이 있다. 이 중 선형 초음파를 기반으로 하는 초음파 기법은 콘크리트의 미세구조적 변화에 따른 측정 정확도 및 민감도가 확연히 떨어지는 한계를 보인다(Aparicio *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2010; Rabbat and Sowlat, 1990; Warnemuende and Wu, 2004). 반면 비선형 음향효과 기반의 비파괴 검사 기법은 마이크로 미터 단위의 균열을 측정할 수 있기 때문에 하중이 가해지기 시작하는 초기 단계의 변화를 평가할 수 있을 정도의 민감도를 갖는다(Jhang, 2009). 비선형 초음파 기법은 1965년 AKIRA HIKATA에 의해 균질 매질인 알루미늄에 대한 평가가 이루어진 것(Hikata *et al.*, 1965)을 시작으로, 2000년 대에 이르러 규석, 시멘트 및 콘크리트 등의 불균질 물질 평가에 도입되고 있다(Van Den Abeele *et al.*, 2000; Shah and Ribakov, 2009). 최근에는 열 손상, 알칼리-실리카 반응 등 다양한 손상 요인에 대한 평가가 진행되고 있으며, 이 중 비선형 초음파 공진 기법(NRUS: nonlinear resonant ultrasonic spectroscopy)은 콘크리트를 통과한 후의 공진 주파수 변화가 매질 상태에 따라 천이하는 효과를 이용하는 것으로, 프리스트레스트 보의 응력 상태를 평가하기에 적합한 방법이지만 관련 연구가 드물게 진행되고 있는 실정이다(Park *et al.*, 2012; Kim *et al.*, 2016).

더불어, 하중의 작용에 따른 미세균열의 형성에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 초기 수준의 하중이 작용함에 따라, 시멘트 조직망 내의 일부분에서 미세 균열이 형성되기 시작하고, 이와 별개로 골재와 시멘트 계면 영역에서의 미세균열이 형성된다. 이 때, 높은 민감도를 갖는 비선형 초음파 기법의 경우, 낮은 수준의 하중이 가해질 때에도 초음파적 측정 결과가 미세하게 달라지는 것을 확인할 수 있다(Jhang, 2009). 보다 높은 수준의 하중이 작용함에 따라 기존에 형성되어 있던 미세균열들이 연결 및 전파되기 시작하며, 최종단계에 이르러 보다 큰 규모의 균열이 형성되는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 인장력 도입에 따라 변화하는 프리스트레스트

보의 콘크리트 응력 상태를 비선형 초음파 공진 기법 도입을 통해 보다 높은 민감도 수준으로 평가하고자 하였다. 실험을 위해 제작한 프리스트레스트 보의 슈스관 내에 긴장재를 삽입, 유압 펌프를 이용하여 힘을 가하는 과정에서 일정 수준 간격으로 공진 주파수의 변화를 측정하였다. 초기 상태 및 하중 변화에 따른 실험 결과를 토대로 외부 하중과 기법 측정 결과가 밀접한 관계가 있음을 확인하였으며, 이 때 선형 초음파 전파 속도를 측정 및 비교하여 제시한 기법의 민감도를 검증하였다. 추가적으로, 반복적인 하중 이력을 설계하고 적용하여 이러한 하중 이력이 측정 결과에 미치는 영향을 분석하고, 이 과정에서 콘크리트에서 발생하는 응력 기억 효과를 확인할 수 있었다. 최종적으로 외부 하중(인장력)과 측정 결과를 토대로 계산한 비선형 인자의 관계를 확인함으로써, 비선형 초음파 공진 기법을 적용한 프리스트레스트 보의 콘크리트 응력 상태 평가에 대한 가능성을 확인할 수 있었다.

2. 이론적 배경

비선형 초음파 공진 기법은 비선형 음향효과에 그 기반을 두고 있는데, 비선형 음향효과란 비선형적 응력-변형률 관계를 가지는 매질에 입사파를 통과시켰을 때에 고조화 파, 공진 주파수 천이 등의 기존과 다른 특성이 나타나는 현상을 뜻한다(Buck *et al.*, 1978; Zumpano and Meo, 2008). 콘크리트는 재료의 특성상 비선형성을 띄는 물질로서, 콘크리트에 외부 하중 등의 작용으로 손상이 심화될수록 내부 균열이 증가하고, 매질의 비선형적 응력-변형률 관계는 선형이 아닌 고차의 비선형적 응력-변형률 관계를 따르게 된다. 이를 1차원의 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\sigma = \int E(\epsilon(t), \dot{\epsilon}(t)) d\epsilon \quad (1)$$

이 때, σ 는 응력, ϵ 은 변형률, $\dot{\epsilon}$ 은 변형속도, E 는 변형률과 변형속도의 관계식으로 표현되는 탄성계수이다. 탄성계수 E 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$E(\epsilon(t), \dot{\epsilon}(t)) = E_0 [1 - \beta \epsilon(t) - \alpha \{ \Delta \epsilon + \epsilon(t) \cdot \text{sign}(\dot{\epsilon}(t)) \} + \dots] \quad (2)$$

여기서, E_0 는 매질의 선형탄성계수이며 β 는 물질의 2차 비선형 인자, α 는 물질의 이력 현상과 이산기억에 따른 비선형 인자로, 본 실험에서는 비선형 인자 α 의 값을 계산하기 위하여 공진 주파수를 측정하였다(Holcomb, 1984; Guyer and Johnson,

1999; Donskoy *et al.*, 2001).

$$\frac{f_0 - f}{f_0} \propto \alpha \cdot \Delta\epsilon \quad (3)$$

위 식에서 f_0 는 선형 공진 주파수 값으로 본 실험에서는 최소 진폭의 입사파(초음파 펄스)에서 측정된 공진 주파수 값으로 선택하였고, f 는 특정 진폭 수준에서 측정되는 공진 주파수의 값이다. 입사파의 진폭이 증가함에 따라 공진 주파수는 낮은 방향으로 감소하게 되며, 공진 주파수 값의 차와 비선형 인자 α 의 관계가 식 (3)에 표현되어 있다. 손상을 입은 콘크리트의 경우 내부 미세균열로 인해 초음파가 진행하는 과정에서 탄성파의 왜곡이 발생하게 되며, 공진 주파수 값의 차가 더욱 커진다. 이 때, 이전 주기에서 발생한 변형률의 양인 $\Delta\epsilon$ 는 일정하므로 비선형 인자 알파의 값을 구할 수 있으며 이는 콘크리트의 손상 정도를 나타낸다(Van Den Abeele *et al.*, 2001).

자유 진동을 하는 콘크리트의 경우 주파수 대역에서의 피크 값은 오직 하나만 나타나는데, 구속조건 등의 실험 환경에 의해 실제로는 여러 개의 피크가 나타나 공진 주파수 천이의 계산에 있어 오차의 원인 된다. 이 때 피크 값 천이를 비교하는 통계적 방법인 상호상관(cross-correlation) 기법을 도입하여 오차를 최소화 하였다(Santamarina and Fratta, 2005).

3. 비선형 초음파 공진 기법

3.1 프리스트레스트 보 준비 및 장비 구성

실험을 위하여 단면 240mm×500mm, 길이 3000mm의 프리스트레스트 보가 제작되었다. 콘크리트의 배합비는 Table 1과 같다. 이 때, W는 물, C는 시멘트, W/C는 물시멘트비, S는 잔골재, G는 25mm 이하의 굵은 골재이다. 보는 타설 후 증기양생을 하였으며, 상대습도 60%의 조건에서 28일간 양생 및 건조하였다. Fig. 1은 보의 단면을 나타내고 있다. 지름 65mm의 쉬스관을 삽입, 각각 8가닥의 15.2mm 강선을 통해 인장력을 가하였으며 띠철근 및 스티럽을 통해 보강하였다. 5개의 공시체 압축강도 시험 결과 보의 강도는 30MPa로 측정되었다. Fig. 2에는 유압 펌프를 통해 힘을 가하기 위한 인장기가 나타났다. 두 개의 인장기를 이용하여 총 16가닥의 강선을 고정하고, 위 아래 단면 각각 6.75MPa의 응력에 도달할 때까지 힘을 가하였다. 이 과정에서 보의 긴장력이 증가함에 따라 인장 응력의 상쇄 전·후의 공진 주파수 천이를 측정하였다.

Table 1 Mixing proportion and compressive strength of specimen

W/C (%)	Unit Weight (kg/m ³)				Strength (MPa)
	W	C	S	G	
0.5	180	360	837	970	30.0

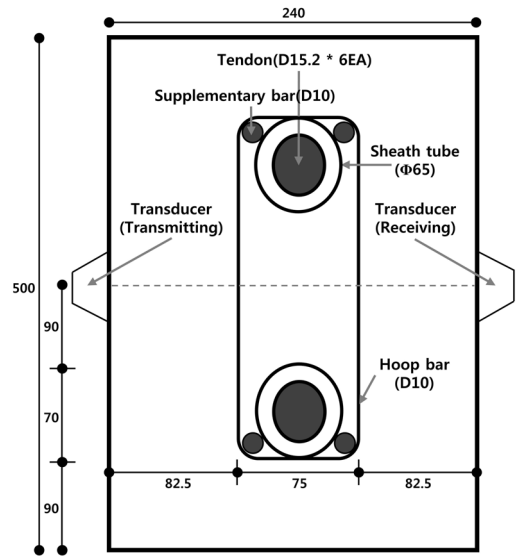


Fig. 1 Section description of test specimen

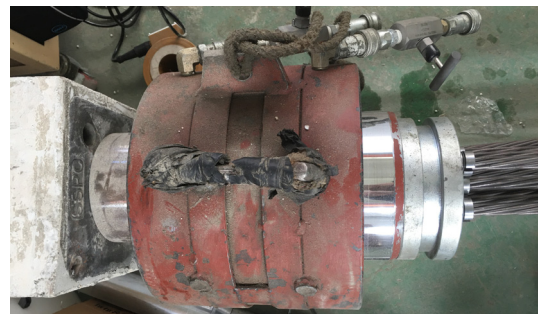


Fig. 2 Hydraulic jacking machine for 8 tendons

다음으로, 비선형 초음파 공진 기법에 대한 실험 개요도가 Fig. 3에 도시되어 있다. 신호 발생기(signal generator, National Instruments Corp. PXI 5421)로부터 50kHz의 진동수를 갖는 디지털 펄스파가 지속적으로 생성되며, 신호 증폭기(amplifier)를 거치며 진폭은 50V부터 240V까지 10V 간격으로 증가한다. 이 신호는 보의 정중앙 양쪽 측면에 위치한 초음파 변환기(ultrasonic transducer, Olympus NDT, Inc. PANAMETRICS X1019)를 거쳐 아날로그 신호로 변환되어 콘크리트를 통과하는데, 이 과정에서 신호가 간섭을 받지 않도록 강선이 지나가는 위치를 피해 변환기를 부착하였다. 보의 맞은편에서 수신된 신호는 다시 디지털 신호로 변환되어 저장되며, 이 과정에서 공진 주파수의 값을 계산하였다.

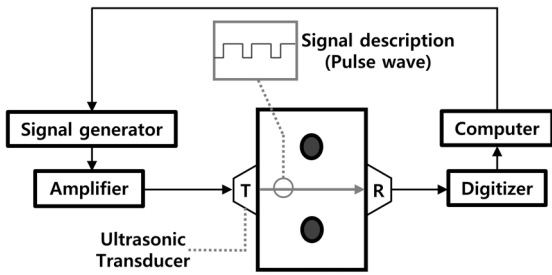
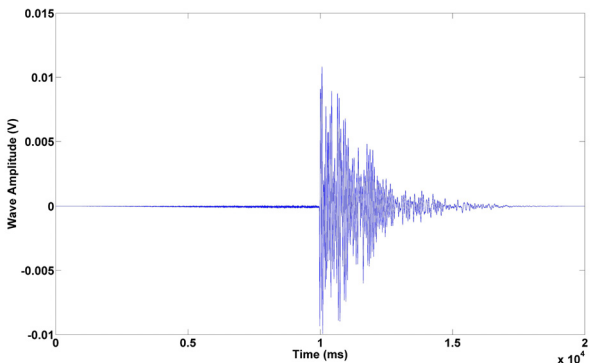


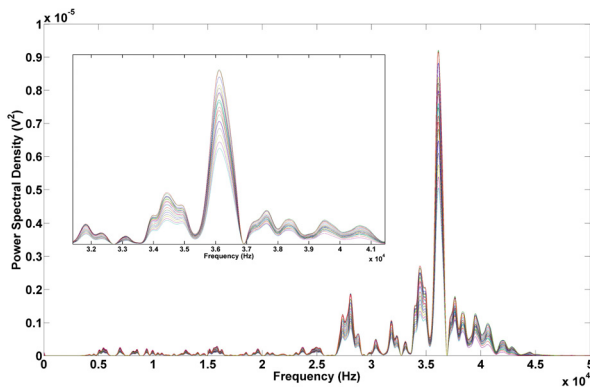
Fig. 3 Experimental description of NRUS test

3.2 실험 결과 및 분석

Fig. 4는 초기 하중 수준에서 측정된 대표적인 실험 결과를 도시하고 있다. (a)는 240V 입상파 진폭에서의 시간 축 측정 결과이며, 같은 단계 내에서 10V부터 240V까지의 주파수 대역 측정 결과를 중첩한 결과가 (b)에 나타나있다. 공진 주파수의 값은 36.2kHz로 측정된 것을 확인할 수 있는데, 진폭이 증가함에 따라 미세하게 천이되는 것을 확인할 수 있다. 공진 주파수의 천이는 매트랩을 활용, 피크 값을 비교하는 통계적 방법인 상호 상관 기법을 통해 자동으로 계산하여 진폭에 따른 천이 값으로 나타내었다.

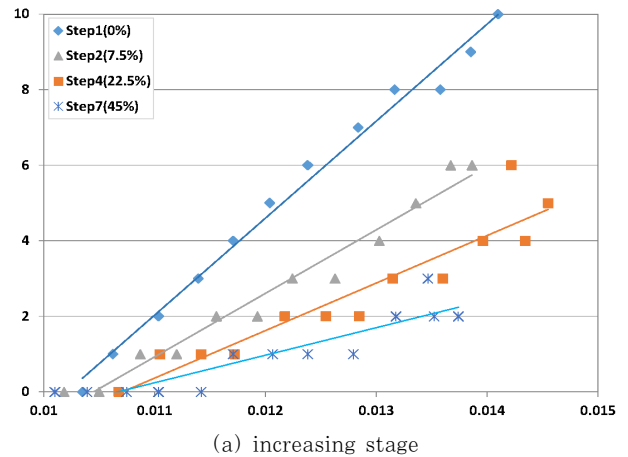


(a) time domain signal

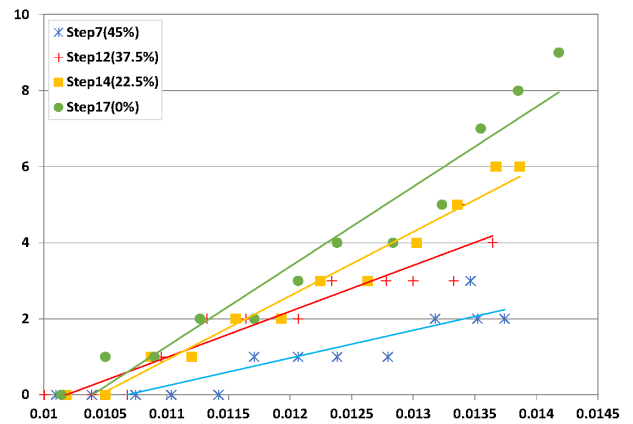


(b) frequency domain signal

Fig. 4 Experimental results in initial load level



(a) increasing stage



(b) decreasing stage

Fig. 5 Resonant frequency shift in various load level

하중 수준에 따른 측정 결과를 비교하기 위해, 각각의 하중 단계에서의 측정 결과가 Fig. 5에 정리되어 있다. (a)와 (b)는 동일한 조건에서 측정한 결과이며, (a)는 하중이 점차적으로 증가하여 압축강도 기준 45% 수준에 도달하는 과정, (b)는 최고 하중에 도달한 후 하중이 다시 감소하는 과정에서의 측정 결과이다. 두 그래프 모두 비슷한 경향을 보이고 있는데, 하중 수준이 증가함에 따라 기울기가 전체적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이 때 선형 회귀분석을 통해 그려진 선형 결과의 기울기는 진폭 증가에 따른 공진 주파수 천이 값, 즉 비선형 인자의 값을 의미한다. 따라서 초기 수준의 하중 조건에서도 콘크리트의 비선형 인자는 구분 가능한 수준에서 변화하는 것을 확인할 수 있다.

한편, 비선형 초음파 공진 기법의 민감도를 검증하기 위해 동일한 조건에서 선형 초음파 전파속도(ultrasonic pulse velocity)를 측정하였다.(Daponte *et al.*, 1995) 선형 응력 파를 기반으로 하는 본 기법은 ASTM C 597-09 에 따라 수행 되었으며, 민감도 계산 식을 아래에 나타내었다.

$$S(f,x) = (f(x) - f(1))/f(1) \quad (4)$$

Table 2 Result of UPV measurement in each load

Step	Load level(%)	UPV(m/s)	Sensitivity(%)
1	0	4183	-
2	7.5	4190	0.17
3	15	4195	0.29
4	22.5	4201	0.43
5	30	4210	0.65
6	37.5	4218	0.84
7	45	4227	1.05

이 때, f 는 실험 측정 값, x 는 실험 번호이며 $f(1)$ 은 초기 측정 값이다. 이에 따라 대표적 하중 수준에서의 민감도 계산 결과를 Table 2에 나타내었다(ASTM International, 2009). 초기 측정 값인 4183m/s를 기준으로 초음파의 전파 속도가 점차 증가하며, 이에 따라 민감도의 계산 값이 감소하는 경향을 보인다. 이는 콘크리트 내부의 미세균열이 증가하면서 매질의 탄성 계수가 감소하는 현상에 따른 것으로 보인다. 그러나 초기 값을 기준으로 각 측정 인자의 변화를 계산해 보면, 초음파 전파 속도법의 경우는 45% 하중 수준에서 1.05%, 비선형 초음파 공진 기법의 경우는 약 42%로 월등한 차이가 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 초기 하중 단계인 10% 수준에서도 각각 0.17%, 26.1%로 큰 차이가 나는 것을 확인할 수 있는데, 이를 통해 콘크리트의 미세한 손상 평가에 있어 비선형 초음파 공진 기법이 적합한 방법이라는 결론을 내릴 수 있다.

4. 반복 하중 이력의 적용

4.1 하중 이력 설계

Fig. 6는 본 실험에 적용된 전체 하중 이력을 보여주고 있다. 반복적인 하중의 작용이 콘크리트에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 30MPa의 압축강도를 기준으로 45%, 즉 13.5MPa의 응력 수준을 상한으로 하여 2회 반복하였다. 하중의 간격은 압축강도를 기준으로 7.5%이며 총 40단계, 3개의 구간으로 구성되어 있다. 첫 번째와 두 번째 구간은 각각 16단계로 구성되어 있으며, 마지막 구간은 8단계로 보가 파괴될 때까지 하중을

지속적으로 증가시켰다. 특히, 보다 미세한 하중 변화에 따른 측정 결과를 확인하기 위하여, 최고 하중에 도달한 후의 다섯 단계는 하중의 간격을 1.5%로 세밀화하여 실험을 진행하였다.

반복적인 하중이 가해지면서, 콘크리트 내에 추가적인 손상이 가해지는 것으로 보이나, 이전에 작용한 최대 하중보다 낮은 수준의 하중이 가해지는 경우 그 정도가 크지 않은 것으로 연구된 바가 있다(Parisa *et al.*, 2012). 이는 응력 기억 효과(stress memory effect)에 따른 것으로서 미세균열의 추가적인 형성이 억제되는 현상을 뜻한다. 비선형 인자의 값은 콘크리트의 손상 정도, 즉 미세균열의 형성과 밀접한 연관이 있으며 이는 곧 외부 하중 작용에 따른 콘크리트의 응력 수준과 관계된다. 따라서 반복적인 하중의 작용이 측정 결과에 미치는 영향을 확인하고자 하였다.

4.2 하중 및 비선형 인자의 관계

프리스트레스트 보에 하중을 가하며 콘크리트에 초음파를 통과시켰을 때에, 공진 주파수 천이의 정도를 통해 계산된 비선형 인자의 값을 하중 단계별로 나타내었다. Fig. 7은 전체 실험 결과를 요약하고 있는데, 가장 먼저 단계 40을 제외한 모든 구간에서 보에 작용하는 하중 수준과 반비례하여 비선형 인자가 측정되는 것을 확인할 수 있다. 이는 기준에 콘크리트 내에 존재하는 미세균열이 증가된 외부 하중에 의해 닫히게 되는 과정에서, 비선형성이 감소하여 나타나는 현상으로 생각된다(Kim *et al.*, 2016). 이후, 하중이 감소함에 따라 비선형 인자의 측정 값은 다시 증가하며 두 번째의 하중 구간에서도 비슷한 경향이 나타나는 것을 알 수 있다.

다음으로, 측정된 비선형 인자의 절대 값에 대한 분석을 수행하였다. 비선형 인자의 절대 값은 단위가 없으며, 콘크리트의 초기 비선형성을 포함하여 하중이 가해짐에 따라 변화하는 측정 결과를 비교할 수 있는 지표가 된다. 보에 어떤 하중도 가해지지 않은 상태에서 측정되는 최초 값은 약 1650으로, 이후의 하중이 완전히 제거되는 단계 17과 단계 33에서는 비선형 인자의 값이 각각 1793, 1798 정도로 측정된다. 콘크

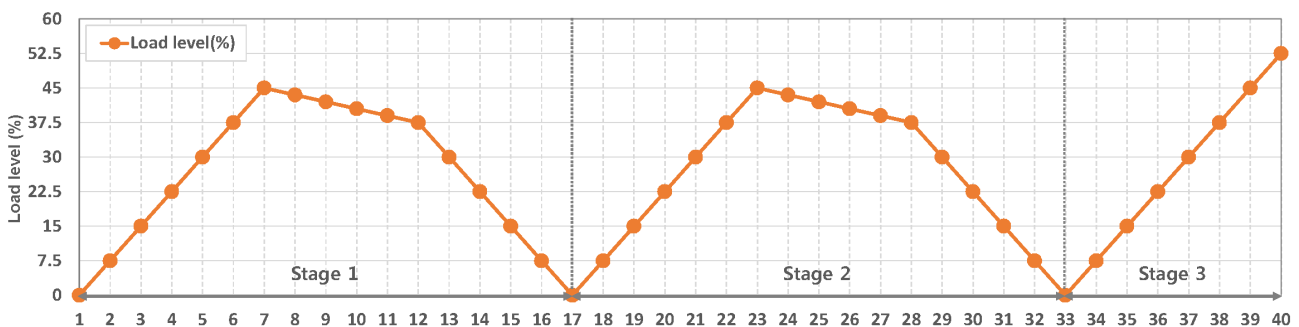


Fig. 6 Repetitive load cycle

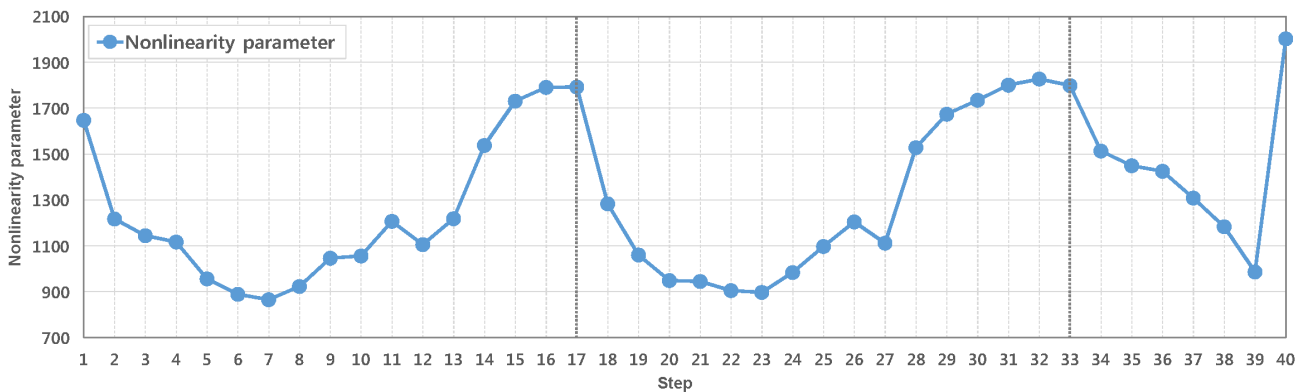


Fig. 7 Result of experiment

리트에 하중이 가해지면서 추가적인 미세균열이 형성되며, 이에 따른 결과는 하중이 제거되었을 때에 나타나는 것으로 생각된다. 이 때 응력 기억 효과가 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 첫 번째 최고 하중(단계 7) 이후에 측정되는 비선형 인자의 최대 값은 단계 17과 단계 32에서의 1793, 1827으로 거의 비슷한 수준이나, 초기 값은 1650으로 10% 가량 차이가 난다.

또한, 미세한 수준의 응력 변화, 즉 압축 강도를 기준으로 약 1.5% 수준의 하중 변화를 주었을 때에도 비선형 인자의 측정 결과가 구분 가능한 수준에서 변화하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 몇몇의 단계는 예외적인 결과를 보이고 있는데, 이는 실험 수행 과정에서 발생한 오차에 의한 것으로 생각된다. 특히, 마지막 단계에서의 측정 결과는 약 2002로, 일정 수준 이상의 하중이 가해지는 경우 미세균열의 연결 및 전파가 가속되어 나타나는 결과로 보인다.

비선형 초음파 공진 기법을 도입하여 측정한 비선형 인자와 하중의 관계로부터, 프리스트레스트 보에서 비선형 인자의 측정을 통한 외부 하중 수준의 파악과, 이에 따른 콘크리트의 응력 상태 평가에 대한 가능성을 확인할 수 있었다. 반복적인 하중이 작용할 때에는 비선형 인자의 값이 크게 변화하지 않으나, 기존의 최고 하중보다 높은 하중이 가해지는 경우 비선형 인자는 변화하는 것으로 보인다. 특히, 낮은 수준의 하중이 가해지는 경우와 하중이 미세하게 변화할 때에도 측정 값이 민감하게 변화하는 것을 알 수 있는데, 이는 보의 초기 상태 평가에 있어 기존의 선형 초음파 기반 기법들과 차별화되는 장점이다. 이로 부터 비선형 초음파 공진 기법이 프리스트레스트 보의 응력 수준 평가에 적합하다는 결론을 내릴 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 비선형 초음파 공진 기법을 활용한 비선형 인자의 측정을 통해, 프리스트레스트 보 내 콘크리트의 응력 상태 평가에 대한 방법을 제안하였다. 외부 하중의 작용에 따른

비선형 인자의 변화를 확인하였으며, 기존 선형 초음파 속도법의 측정 결과와 민감도 비교 검증을 수행하였다. 추가적으로, 초기 하중 상태를 포함한 반복적인 하중 이력의 적용을 통해 이러한 하중이 비선형 인자에 미치는 영향을 분석하였다. 이러한 실험 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

먼저, 콘크리트 응력 상태 평가에 있어 비선형 초음파 공진 기법이 적합한 방법이라는 것을 확인하였다. 초기 하중 수준에서의 측정 결과를 포함하여, 일정 수준의 하중이 작용함에 따라 공진 주파수의 천이가 발생하며 이에 따라 비선형 인자의 값이 변화한다. 추가적으로, 선형 초음파 속도법과의 민감도 비교를 수행하였는데, 초기 값을 기준으로 한 변화량은 10% 하중 수준에서 각각 0.16%와 26.1%, 그리고 40% 하중 수준에서는 각각 0.37%와 42%로 월등한 차이를 보였다.

다음으로 전체 하중 이력 적용에 따른 비선형 인자의 변화를 확인하였다. 일정 수준 이하의 하중이 작용하는 경우 비선형 인자는 하중 이력에 반비례하는 경향을 따르는데, 이는 콘크리트 내의 미세균열이 하중 작용에 의해 닫히고 다시 열리는 현상에 의한 것으로 생각된다. 또한, 반복적인 하중이 작용하는 경우에도 비선형 인자의 변화는 비슷한 경향을 보이지만, 이전보다 높은 수준의 하중이 작용했을 때에는 측정 값이 크게 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 콘크리트의 응력 기억 효과에 따른 것으로 보인다. 더불어, 보다 미세한 수준에서 하중이 차이가 나는 경우에도 비선형 인자는 구분 가능한 수준에서 변화하며, 이를 통해 비선형 초음파 공진 기법의 높은 민감도를 다시 확인할 수 있었다.

실험 결과를 통해, 실험실 규모의 프리스트레스트 보에 대하여 비선형 초음파 공진 기법의 적용 가능성을 확인하였으며, 기존 선형 초음파 기법 대비 월등히 높은 민감도를 검증하였다. 특히, 낮은 수준의 하중을 받는 콘크리트에 대한 비선형 인자의 측정 결과는 본 기법을 이용한 구조물의 초기 상태 평가에 대한 적합성을 보여주며, 추가적인 실험 수행을 통해 보다 정확한 콘크리트 응력 상태 평가 기법으로서의 발전 가능할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 미래창조과학부(MSIP)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며(No. 2014R1A2A2A01002487) 국토교통부의 U-City 석·박사 지원사업을 통해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- ASTM International** (2009) Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete, ASTM C 597-09, *American Society for Testing and Materials*, p.4.
- Aparicio, A.C., Ramos, G., Casas J.R.** (2001) Testing of Externally Prestressed Concrete Beams, *Eng. Struct.*, 24, pp.73~84.
- Atienza, J.M., Elices, M.** (2009), Behavior of Prestressing Steels after a Simulated Fire: Fire-induced Damages, *Constr. & Build. Mater.*, 23(8), pp.2932~2940.
- Buck, O., Morris, W.L., Richardson, J.M.** (1978) Acoustic Harmonic Generation at Unbonded Interfaces and Fatigue Cracks, *Applied Physics Letters*, 33(371).
- Chen, J., Jayapalan, A.R., Kim, J.Y., Kurtis, K.E., Jacobs, L.J.** (2010) Rapid Evaluation of Alkali-Silica Reactivity of Aggregates Using a Nonlinear Resonance Spectroscopy Technique, *Cement & Concr. Res.*, 40(6), pp.914~923.
- Daponte, P., Maceri, F., Olivito, R.S.** (1995) Ultrasonic Signal-processing Techniques for the Measurement of Damage Growth in Structural Materials, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 44(6), pp.1003~1008.
- Donskoy, D., Sutin, A., Ekimov, A.** (2001) Nonlinear Acoustic Interaction on Contact Interfaces and Its Use for Nondestructive Testing, *NDT&E Int.*, 34(4), pp.231~238.
- Guyer, R.A., Johnson, P.A.** (1999) Nonlinear Mesoscopic Elasticity: Evidence for a New Class of Materials, *Phys. Today*, 52(4), pp.30~36.
- Hikata, A., Chick, B.B., Elbaum, C.** (1965) Dislocation Contribution to the Second Harmonic Generation of Ultrasonic Waves, *J. Appl. Phys.*, 36(1), pp.229~236.
- Holcomb, D.J.** (1984) Discrete Memory in Rock: A Review, *J. Rheol.*, 28(6), pp.725~728.
- Jhang, K.-Y.** (2009) Nonlinear Ultrasonic Techniques for Non-destructive Assessment of Micro Damage in Material: A Review, *Int. J. Precis. Eng. & Manuf.*, 10(1), pp.123~135.
- Kim, G.-J., Park, S.-J., Kwak, H.-G.** (2016) Application of Nonlinear Ultrasonic Method for Monitoring of Stress State in Concrete, *J. Korean Soc. Nondestruct. Test.*, 36(2), pp.121~129.
- Korea Concrete Institute** (1993) Nondestructive Testing and Risk Assessment of Concrete Structures, The 2nd Technical Seminar.
- Lee, J.-Y.** (2013) Prestressed Concrete Structure, *DongHwa Technology Publishing*, pp.22~30.
- Naaman, A.E.** (1982) Prestressed Concrete Analysis and Design, *McGraw-Hill*, p.670.
- Parisa, S., Andreas, J., Herbert, W., Gregor, F.** (2012) Surface Wave Velocity-Stress Relationship in Uniaxially Loaded Concrete, *ACI Mater. J.*, 109(2), pp.141~148.
- Park, S.-J., Yim, H.J., Kwak, H.-G.** (2012) "Evaluation of Microcracks in Thermal Damaged Concrete using Nonlinear Ultrasonic Modulation Technique, *J. Korea Concr. Inst.*, 24(6), pp.651~658.
- Rabbat B. G., Sowlat K.** (1990) Behavior of 1/5 scale segmental concrete girders with external and internal tendons, *ACI External Prestressing in Bridges (SP-12)*, 305-15.
- Santamarina, J.C., Fratta, D.** (2005) Discrete Signals and Inverse Problems: an Introduction for Engineers and Scientists, *John Wiley & Sons*.
- Shah, A.A., Ribakov, Y.** (2009) Non-linear Ultrasonic Evaluation of Damaged Concrete Based on Higher Order Harmonic Generation, *Mater. & Des.*, 30(10), pp.4095~4102.
- Van Den Abeele, K.E.-A., Johnson, P.A., Sutin, A.** (2000) Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy (NEWS) Techniques to Discern Material Damage, Part I: Nonlinear Wave Modulation Spectroscopy (NWMS), *Res. Nondestruct. Evaluation*, 12(1), pp.17~30.
- Van Den Abeele, K.E.-A., Sutin, A., Carmeliet, J., Johnson, P.A.** (2001) Micro-Damage Diagnostics using Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy, *NDT&E Int.*, 34(1), pp.239~248.
- Warnemuende, K., Wu H.-C.** (2004) Actively Modulated Acoustic Nondestructive Evaluation of Concrete, *Cem. & Concr. Res.*, 34(4), pp.563~570.

Yi, N.-H., Lee, S.-W., Kim, J.H., Kim, J.H. (2012) Experimental Evaluation of Bi-directionally Prestressed Concrete Panel Behavior under Impact and Impact-Fire Combined Loadings, *KCI 2012 Convention*.

Zumpano, G., Meo, M. (2008) Damage Localization using Transient Non-Linear Elastic Wave Spectroscopy on Composite Structures, *Int. J. Non-Linear Mech.*, 43(3), pp.217~230.

요 지

프리스트레스트 보의 인장력 변화에 따른 콘크리트 응력 수준을 평가하기 위하여, 초음파를 이용하는 기존의 방법보다 개선된 비선형 초음파 공진 기법의 도입을 제안하였다. 이는 동일하게 초음파를 사용하는 선형의 기법보다 월등히 높은 민감도를 보이므로 초기 상태의 응력 평가에도 유리하다. 비선형 초음파 공진 기법은 초음파 통과시 매질 상태에 따른 공진 주파수의 변화의 정도로부터 계산되는 비선형 인자의 값을 측정하며, 측정 결과는 콘크리트의 응력 상태와도 밀접한 연관을 갖는다. 본 연구에서는 유압 펌프를 통한 인장력 작용에 따른 비선형 인자의 측정을 수행함으로써 두 인자 사이에 밀접한 연관성이 있음을 확인하고, 반복적인 하중 이력의 작용이 비선형 인자의 변화에 미치는 영향을 분석하였다. 추가적으로, 선형 초음파 전파 속도 측정 결과를 비교하여 제안한 방법의 민감도를 검증하였다. 측정 결과를 통해 프리스트레스트 보의 콘크리트 응력 수준 평가를 위한 비선형 초음파 공진 기법의 적용 가능성을 확인하였다.

핵심용어 : 프리스트레스트 보, 콘크리트 응력 수준 평가, 비선형 초음파 공진 기법, 초음파 전파 속도법, 민감도