



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

Coda Wave Interferometry 기법을
이용한 콘크리트 응력 상태에 따른
초음파 거동 특성 분석



2014년 02월

부 경 대 학 교 대 학 원

안 전 공 학 과

이 지 용

공학석사학위논문

Coda Wave Interferometry 기법을
이용한 콘크리트 응력 상태에 따른
초음파 거동 특성 분석

지도교수 : 신 성 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2014년 02월

부 경 대 학 교 대 학 원

안 전 공 학 과

이 지 용

이지용의 공학석사 학위논문을

인준함



주 심 공학박사 이 의 주 (인)

위 원 공학박사 권 오 현 (인)

위 원 공학박사 신 성 우 (인)

목 차

제 1 장 연구개요	6
1.1 연구배경 및 필요성	6
1.2 연구목적	8
제 2 장 이론적 배경	10
2.1 Acoustoelastic Effect	10
2.2 Coda Wave Interferometry	12
2.3 Doublet Technique	14
제 3 장 실험계획 및 방법	17
3.1 콘크리트의 제작	17
3.2 초음파 측정	19
제 4장 실험 결과 및 분석	23
4.1 물/시멘트비에 따른 초음파 응답 분석	23
4.2 잔골재율에 따른 초음파 응답 분석	36
제 5 장 응력 수준에 따른 초음파 거동 특성의 모니터링 적용성 검증	43

제 6 장 결론	50
참고문헌	52



**Characterization of Ultrasonic Wave Propagation in Stressed Concrete Using
Coda Wave Interferometry**

Jiyong Lee

Department of Safety Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

In this study, acoustoelastic effect of ultrasonic coda wave in concrete is analyzed using coda wave interferometry technique. Static stress state in concrete structures should be monitored for safety assessment as it can be changed due to physical and environmental actions during their service life. In current static stress monitoring techniques for concrete structures, reference stress should be reset with sensor replacement, which is problematic in quantitative assessment of static stress change. Coda wave means a reverberation components of ultrasonic waves appearing after large dominant wave component passed. The study did ultrasonic-measurements on a water cement ratio and find aggregate ratio depending on the state of static stress. It showed that time delay increased in the water cement ratio and rate of

increase of time delay was almost the same in the find aggregate ratio.

The result showed that it is applicable for the Coda wave iterferometry technique to find out behavioral characteristics for ultrasonic waves depending on the concrete stress state.



제 1 장 연구개요

1.1 연구의 배경

우리나라는 고도 성장기에 건설된 사회기반시설물들의 노후화가 현재 빠르게 진행되고 있으며, 특히 설계 당시 고려하지 못했던 기후 변화 요인 등으로 인해 앞으로 노후화가 더욱 가속화될 것으로 예상된다.



Fig. 1.1 콘크리트 구조물의 붕괴사고의 예

만약 이러한 콘크리트 교량에 Fig. 1.1과 같이 붕괴사고가 발생하게 되면 콘크리트 교량 기능성에 미치는 영향이 매우 크며, 경우에 따라서는 안전성에도 심각한 문제를 야기할 수 있다. 노후화된 사회기반시설물의 안전성을 확보하기 위한 시설물 유지 관리에 대한 수요가 국내/외에서 빠르게 증가하고 있으며 시장 규모도 해마다 증대되고 있다. 따라서 노후화되고 있

는 주요 사회기반시설물의 손상 및 붕괴 방지 등과 같이 재해대응력을 극대화할 수 있는 기술이 필요하다. 교량 구조물의 사용 목적과 기능에 지장이 없도록 유지관리하기 위한 판단근거로 활용되는 내하력 평가는 노후화된 구조물의 보수/보강에 대한 연구와 함께 유지관리에서 중요성이 매우 강조되고 있다. 따라서 지속 하중에 의한 교량의 정적 응력 산정이 정확한 내하력 평가를 위해 매우 중요하지만, 현행 내하력 평가에서는 부재에 작용하는 정적 응력을 실측으로 구하지 않고 이론적인 구조해석에 의해 구하고 있다. 특히 콘크리트 교량의 경우, 부재의 정적 응력은 (1) 균열/부식, (2) 구성 재료의 내구성 저하, (3) 크리프 및 건조수축 변형, (4) 설계 외의 추가 자중 부과 (5) 기초지반 침하 등과 같은 손상 요인에 의해서 사용 기간 동안 지속적으로 변화되며, 설계 자료를 이용하여 만들어진 구조해석 모델에는 이러한 손상 요인에 의한 정적 응력 변화를 합리적으로 반영하기 어렵기 때문에 구조물의 안전성이 정확하게 평가되지 않아 안전성 확보에 큰 문제가 되고 있다. 따라서, 콘크리트 교량의 내하력을 정확하게 평가하고 구조물의 안전성을 확보하기 위해서는 지속적으로 변화하는 부재의 정적 응력 상태를 모니터링 하는 것이 필요하다.

1.2 연구 목적

콘크리트의 정적 응력의 모니터링 시에 대부분 부착식 변형률 센서를 이용하고 있다. 부착식 변형률 센서가 정적 응력의 모니터링에 있어서 계측 정확성이 높은 장점은 있으나, 센서의 파손이나 수명종료 등으로 센서를 교체할 시에 기준 응력이 재설정된다는 것이 정적 응력 모니터링에 있어서 가장 큰 문제점으로 지적되어 부착식 센서를 이용하지 않고 응력을 측정할 수 있는 Acoustoelastic 계측 시스템을 이용하여 연구가 진행되고 있다. 비균질 재료인 콘크리트도 Acoustoelastic 효과가 있음이 밝혀졌으나, 응력 상태에 따른 초음파 전파 특성의 변화가 크지 않다는 것이 문제점으로 인식되고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서 초음파의 신호가 도착하는 시점을 이용한 Coda wave interferometry(CWI) 기법을 이용한다. Coda wave는 초기에 전달되는 파동 이후에 전달되는 잔향 성분을 의미하고 비균질 재료인 콘크리트의 경우 초음파는 매우 큰 산란이 일어나며, 산란특성은 매질 내부 상태에 따라 다르며, 또한 산란파 성분은 초기 전달 성분에 비해 매질의 내부 상태 변화에 더욱 민감한 특성이 있다. 현재 CWI 기법을 이용한 콘크리트 응력 상태 평가의 연구가 진행되고 있다. 하지만 기존연구에서는 CWI 기법을 이용하여 콘크리트 내부의 결함을 감지하는 연구만 진행되고 있을뿐 물/시멘트 비와 골재에 변수를 두고 수행한 연구는

아직 진행되고 있지 않다. 콘크리트가 물/시멘트 비에 따라서 재료의 역학적 특성이 변화하고, 초음파의 산란거동은 골재에 크게 영향을 받는 사실을 비추어 보면 물/시멘트 비와 골재를 변수를 두고 CWI기법을 적용하는 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 물/시멘트 비와 잔골재 비에 따른 콘크리트에 CWI기법을 적용하여 Coda wave의 Acoustoelastic effect를 알아보고자 한다.



제 2 장 이론적 배경

2.1 Acoustoelastic Effect

일반적인 선형 탄성 이론에서는 고체 매질을 전파하는 초음파의 속도는 고체의 응력 상태에 무관하고 오직 매질의 물성에 의해서 결정된다고 알려져 있다. 그러나 유한 변형과 같은 기하학적 비선형성을 고려하거나 재료 비선형을 고려할 경우 초음파의 속도가 응력에 의존적임이 이론적으로 규명되었으며, 이러한 초음파의 비선형적 응력 의존성을 음향탄성효과 (Acoustoelastic effect)라 일컫는다 [1]. 음향탄성효과를 이용하면 구조물의 정적 응력 상태를 초음파를 이용하여 비파괴적으로 측정 할 수 있기 때문에 강재의 잔류응력 측정과 같은 균질 재료의 정적 응력 측정 분야 등에 많이 이용되었으며, 최근에는 이를 비균질 재료의 정적 응력 측정에 응용하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다 [2].

$$\dot{u}_{\sigma} = \dot{u}_{\sigma_0} + \frac{\partial \dot{u}}{\partial \sigma} \Delta \sigma \quad (1)$$

비선형 탄성 이론에서 기준 응력(σ_0)으로부터 응력이 $\Delta \sigma$ 만큼 변화하였을 때 초음파 속도($\dot{u}$)와 응력과의 관계식은 이론적으로 식(1)과 같이 표

현된다 [1]. 식(1)에서 알 수 있듯이, 현재 응력 상태에서의 초음파 속도는 기준 응력 상태에서의 초음파 속도에 응력 변화에 따른 초음파 속도 변화량이 추가되므로, 따라서 기준 응력 상태에서의 초음파 속도와 응력에 따른 초음파 속도의 변화율을 알면, 현재 응력 상태의 초음파 속도로부터 응력의 변화량을 역산하여 구할 수 있다 [2]. 이러한 초음파의 응력 의존성을 이용하여 콘크리트의 응력을 초음파를 이용하여 측정하고자 한다.



2.2 Coda Wave Interferometry

Coda wave interferometry(CWI) 기법은 초음파 전체 신호에서 Coda wave 부분의 차이를 찾는 기술이다 [9]. Coda wave는 초기에 전달되는 파동 이후에 전달되는 잔향 성분을 의미한다. 비균질 재료일 경우 초음파는 매우 큰 산란이 일어나며, 이러한 산란파는 초기 전달 파동에 비해 전파 경로가 길기 때문에 Coda wave 성분에 포함된다. 초음파의 산란 특성은 매질 내부 상태에 따라 다르며, 또한 산란파 성분은 초기 전달 성분에 비해 매질의 내부 상태 변화에 더욱 민감한 특성이 있다. 비균질 재료에서의 초음파 산란은 random 현상이기 때문에 정량적으로 분석하기 어려운 단점이 있다.

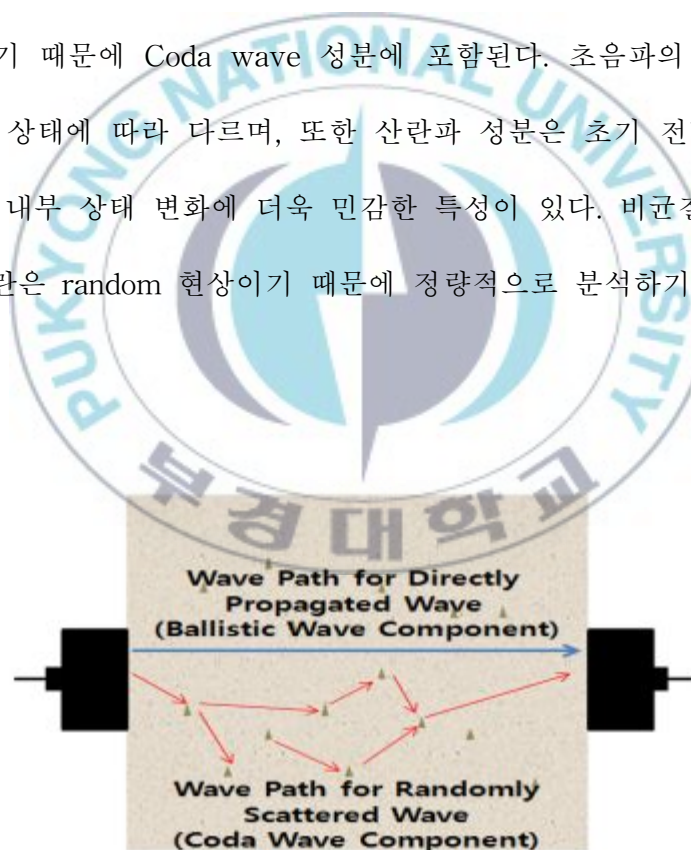


Fig. 2.1 콘크리트에서의 초음파의 전파 경로

Coda wave interferometry 기법은 지진관 분석 기법으로 개발되었으나, 최근에 탄성 초음파의 산란 특성 변화 분석에 효과적이라는 것이 입증되어 비균질 재료의 비파괴 손상 평가 등에 응용되고 있다. Fig. 2.1에서 콘크리트를 직선적으로 통과하는 초음파 성분을 Ballistic wave 라고 하고 골재에 의해 산란되어 통과하는 초음파 성분을 Coda wave 라고 한다. Coda wave 부분은 Ballistic wave 부분보다 콘크리트 내부에서 더 긴 경로를 거쳐서 오기 때문에 콘크리트 내부의 더 많은 정보를 가지고 있다.

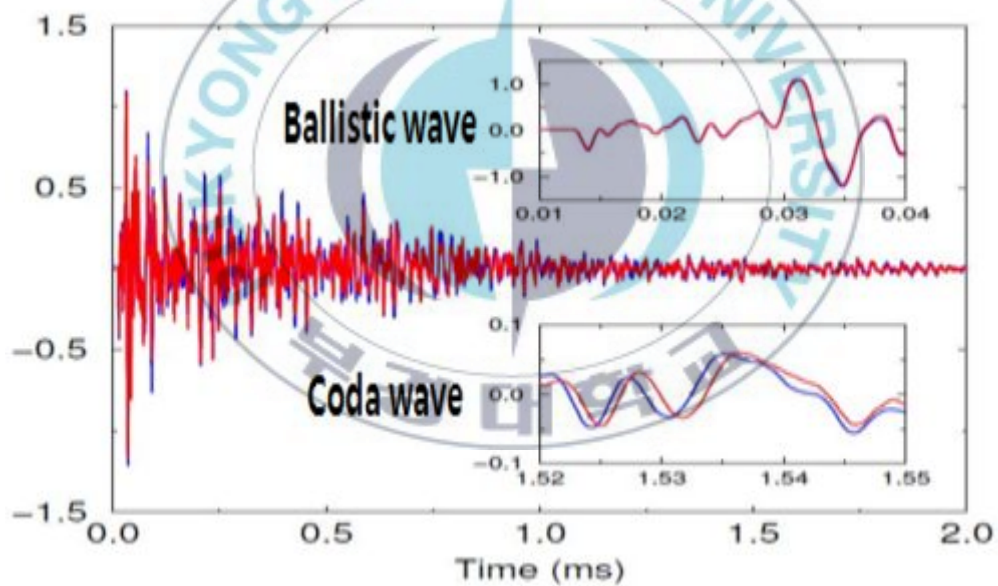


Fig. 2.2 서로 다른 응력 수준 에서의 콘크리트 신호 [10]

Fig. 2.2에서 Ballistic wave 부분을 확대해보면 두 신호간의 시간변화를

관찰하기 어렵지만 Coda wave 부분은 두 신호간의 시간변화가 생기는 것을 쉽게 확인할 수 있다. Coda wave 부분은 산란되면서 긴 경로를 거쳐서 오기 때문에 음향탄성효과(Acoustoelastic effect)의 민감도가 Ballistic wave 보다 높다 [10]. 이러한 CWI 기법을 이용하여 콘크리트 응력 상태에 따른 초음파 신호의 상대속도 변화의 상관관계를 알아내고 콘크리트에 CWI 기법 적용이 가능한지를 알아보고자 한다.

2.3 Doublet Technique

CWI 기법은 Coda wave 부분의 2개의 서로 다른 응력 수준의 신호를 서로 비교하는 기술이다. 그 중 Doublet Technique는 20년 전에 처음 소개되었다[12].

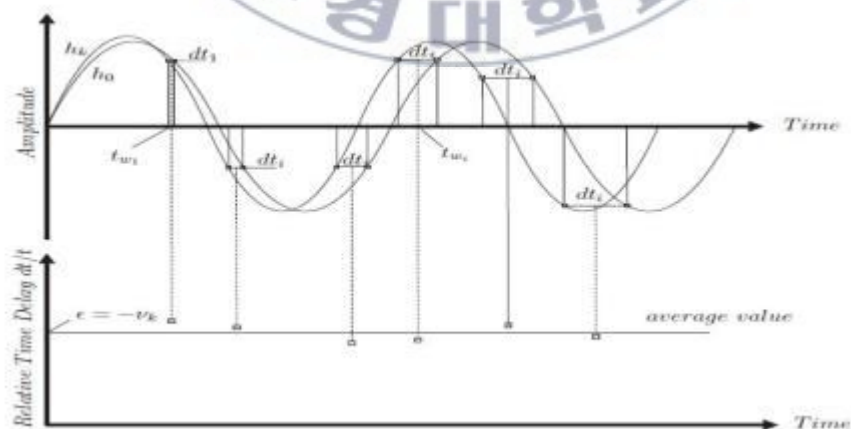


Fig. 2.3 Doublet technique [9]

서로 다른 두 신호간의 Time lag를 얻기 위해서 Coda wave 구간을 다수의 sub 구간으로 분해한 후, 각 sub 구간에 대해 cross correlation을 취하여 time lag($\epsilon_i = \frac{dt_i}{t_{\omega_i}}$)을 구하고, 각 sub 구간에서 구한 time lag 중 최대 time lag를 이용하여 시간변화를 평가한다. 그리고 모든 t 에 관해서 time lag를 도시킨 후 가장 안정적인 값 ϵ 을 결정한다.[9]

Coda wave 부분의 Time lag를 추정하기 위해 cross correlation의 값을 구해야 한다. correlation은 상관도로서 두 신호간의 값이 얼마나 상관관계가 있는지 알아보는 척도이다.

$$CC_{t_k}^K(\tau) = \frac{\int_{t_k-T/2}^{t_k+T/2} h'[t-\tau]h[t]dt}{\sqrt{\int_{t_k-T/2}^{t_k+T/2} h'^2[t-\tau]dt \int_{t_k-T/2}^{t_k+T/2} h^2[t]dt}} \quad (2)$$

cross correlation은 식 (2)와 같이 계산된다. 같은 주기 T를 가지는 본 신호 h와 같은 산란상태에서 응력을 받고 있는 h' 사이에서 Time lag인 τ' 가 $CC_{t_k}^K(\tau)$ 을 최대값을 만족하는 값을 가진다면 $CC_{\max}^K(\tau')$ 은 두 신호간의 Time lag 값이 강한 상관관계를 가진다. t_k 는 특성 sub 구간의 중심위치이다.

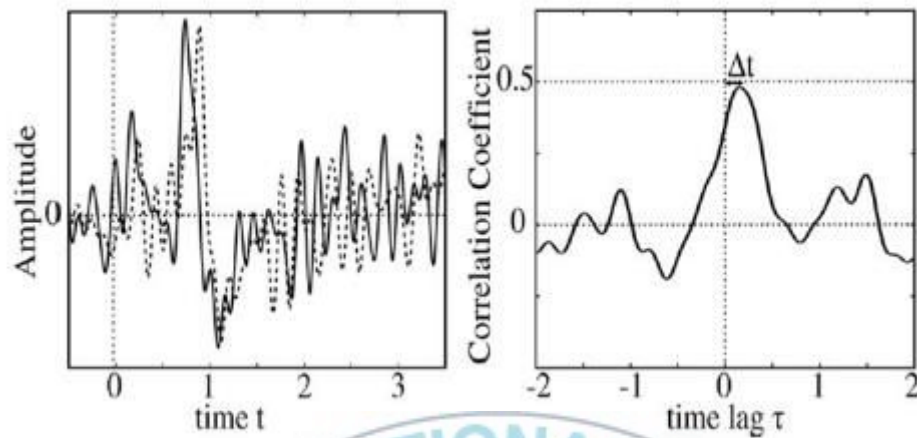


Fig. 2.4 cross correlation coefficient 이용한 time lag의 예 [14]

예를 들어 Fig. 2.4의 왼쪽 그림은 강한 상관관계를 가지고 있는 두 신호를 보여주고 있다. 두 신호간의 time lag를 곧바로 추정하기란 쉽지 않다. 하지만 두 신호간의 cross correlation의 값을 계산함으로써 두 신호간의 time lag 이 존재하는 것을 확인할 수 있고 $\tau_{\max}$ =time lag을 쉽게 찾을 수 있다.

제 3 장 실험계획 및 방법

3.1 콘크리트의 제작

본 연구에서는 초음파의 거동 특성을 세밀하게 분석하기 Table 3.1과 같이 콘크리트를 제작 하였다. 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 골재는 표면건조상태를 유지하기 위해서 12시간 이상 물에 두었고 4시간 자연건조를 하였다.



Fig. 3.1 골재 표면건조 및 콘크리트 혼합기



Fig. 3.2 콘크리트 양생 과정

콘크리트를 혼합 할 시 콘크리트 혼합기(T.S-60)를 이용하였다. 굳기 전 상태인 콘크리트를 몰드에 넣고 다짐기로 다짐을 하였고 비닐을 덮어 수화가 진행하면서 수분이 빠져나가지 않도록 하였다. 타설된 콘크리트는 28일간 수중양생을 하였다. 콘크리트는 20 x 20 x 40cm로 제작하였다.



Fig. 3.3 28일 수중양생 후 콘크리트

Table. 3.1 콘크리트 배합설계

	콘크리트	굵은골재	물-시멘트 비	잔골재율
	종류	최대치수(mm)		(%)
Case I	보통	25	0.4	50
			0.45	50
	콘크리트		0.5	50
Case II	보통	25	0.45	30
			0.45	40
	콘크리트		0.45	50

Table. 3.1과 같이 잔골재율이 50%로 일정하고 물/시멘트 비가 다른 Case I 과 물/시멘트 비는 0.45로 일정하고 잔골재율이 다른 Case II인 두 가지의 Case에 대해서 초음파 실험을 하였다..

3.2 초음파 측정

본 연구에서는 초음파 신호의 가진과 수신에는 중심주파수가 54kHz인 초음파 탐촉자를 사용하였으며, 초음파 가진은 Pulse를 주기가 54kHz인 사인 함수를 10cycle 을 생성하였고 여기에 hanning window을 적용하여 input wave를 Function Generator(wf1973) 로 생성하고 이를 power amp(HSA4014)로 증폭하였으며, 수신은 low-noise preamplifier (SR560)로 증폭한 뒤 1 μ s 간격으로 8ms동안 계측하였다.

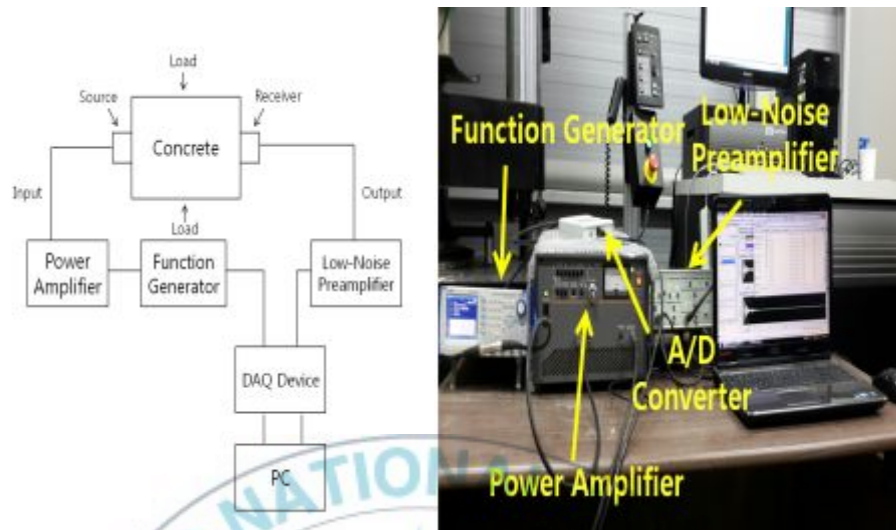


Fig. 3.4 초음파 측정 실험 구성

하중은 UTM(1500HDX hydraulic universal testing machine)을 이용하여 초음파의 전파 방향과 수직으로 일축 하중을 가하였으며, 하중은 3.0MPa부터부터 4.0MPa 까지 0.1MPa씩 증가하였다. 각 응력 수준에서 하중을 유지시킨 상태에서 초음파 계측 실험을 수행하였다.



Fig. 3.5 Test frame

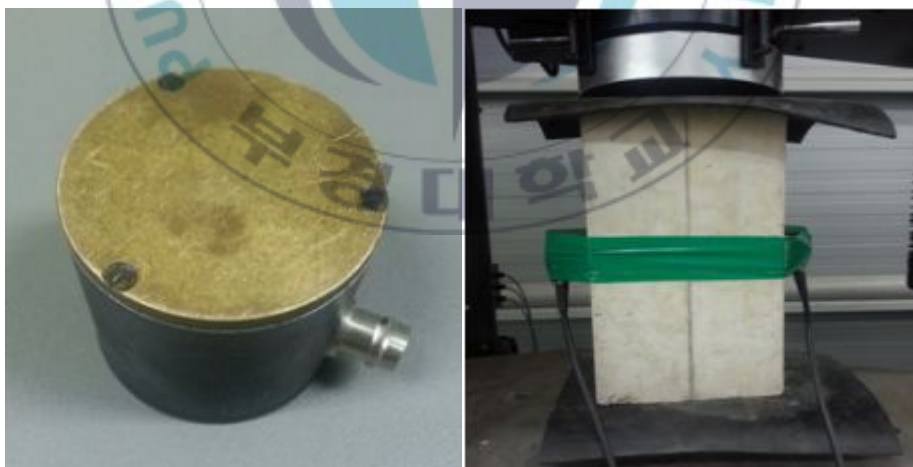


Fig. 3.6 초음파 탐촉자

Fig. 3.7 Stressed concrete

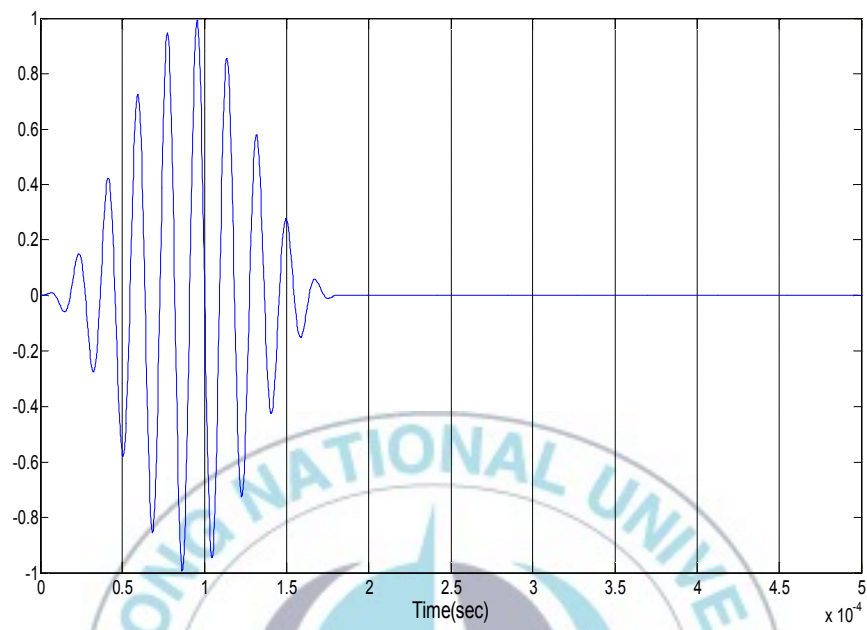


Fig. 3.8 Input waveform

제 4 장 실험 결과 및 분석

4.1 물/시멘트 비에 따른 초음파 응답 및 분석

앞장에서 설명한 것과 같이 물/시멘트 비 0.4, 0.45, 0.5인 콘크리트에 3.0MPa부터 4.0MPa까지 0.1MPa간격으로 측정 하였다. 각 하중마다 UTM을 제어하여 하중을 유지시킨 상태에서 초음파 측정을 실시하였다. Fig. 4.1과 같이 3.0MPa를 기준으로 각 응력 수준에 해당하는 계측된 신호를 비교분석 하였다.

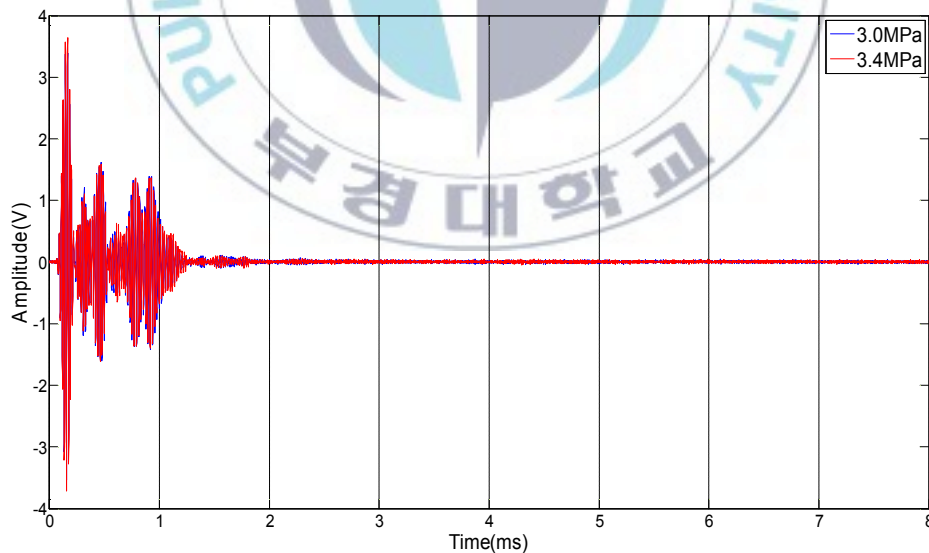


Fig. 4.1 3.0MPa과 3.4MPa 초음파 응답

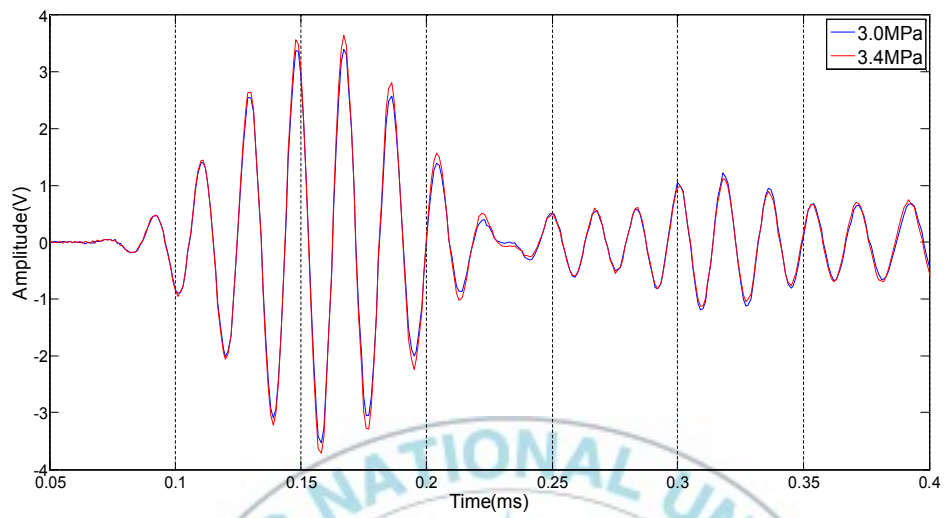


Fig. 4.2 3.0MPa, 3.4MPa의 구간 0.05-0.4ms

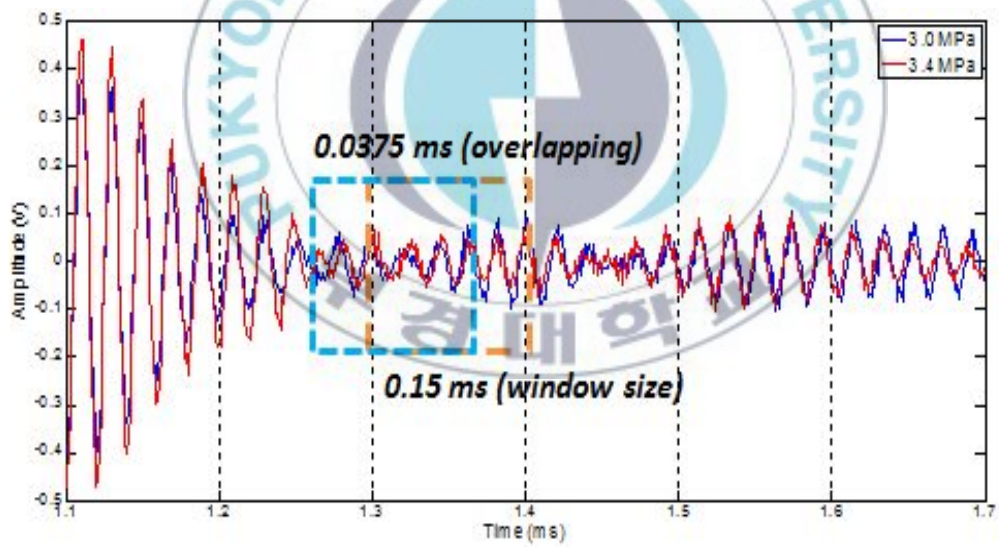


Fig. 4.3 3.0MPa, 3.4 MPa의 구간 1.1-1.7ms

Fig. 4.2 와 같이 구간 0.05-0.5ms의 Ballistic wave 부분은 2장에서도 언급 했듯이 압축 응력에도 불구하고 전파 시간의 변화를 관찰하기가 어렵기 때문에 Acoustoelastic effect의 민감도가 낮다. 그렇기 때문에 Fig. 4.3에서 처럼 Coda wave 부분은 신호의 뒷부분의 잔향성분인 1.1-1.7ms 구간으로 지정하였다. Coda wave 부분으로 지정한 구간에서 time lag 값을 계산할 sub를 0.15ms 크기로 설정하였고 overlap은 sub 의 1/4 크기만큼인 0.0375ms로 설정하여 Coda wave 구간의 time lag 값을 계산하여 측정된 데이터를 분석하였고 Fig. 4.3과 같이 그 값들을 도시하였다.

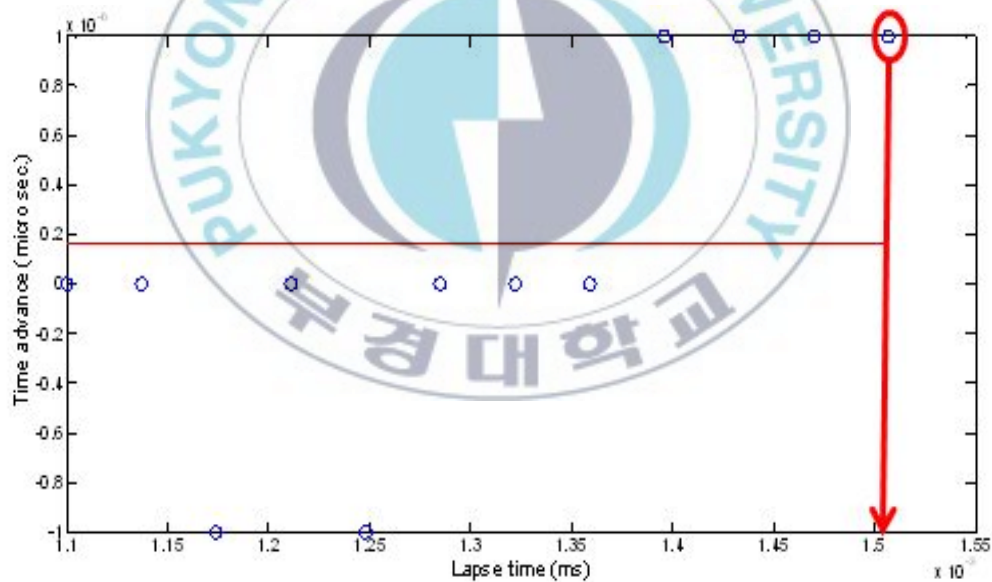


Fig. 4.4 3.0MPa, 3.4 MPa의 구간 1.1-1.7ms의 cross correlation

여러 값 중 본 연구에서는 Doublet Technique을 적용했을 때 1.507-1.657ms 구간의 time lag 값을 선정하였다. Fig. 4.5 에서 coda wave 부분의 신호를 살펴보면 기준응력인 3.0MPa보다 3.4MPa의 신호가 advance 되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이 때, cross correlation은 0이 아닌 양수 값을 가져야하고 4개의 양수 값 중에서 응력 수준에 따른 time advance의 값이 가장 안정적으로 나온 구간이 1.507-1.657m 이기 때문이다. 이 값들을 3.0MPa에서 4.0MPa까지 0.1MPa 간격으로 계속적으로 도식하여 비교분석 하였다.

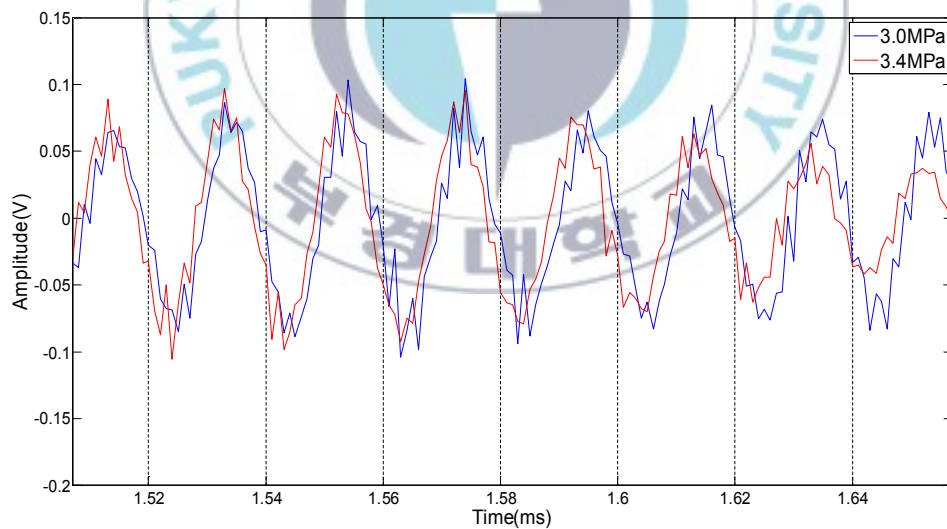


Fig. 4.5 3.0 MPa, 3.4 MPa의 Coda wave 부분

가. 물/시멘트 비 0.4

물/시멘트 비가 0.4인 콘크리트의 각 응력에 따른 Time advance 값은 Table. 4.1과 같고 그 값을 선형 회귀법을 이용하여 $y=ax+b$ 의 직선의 형태로 그래프를 도시하였다.

Table. 4.1 물/시멘트 비 0.4에 따른 응력 수준에 따른 Time advance

Stress(MPa)	Time advance(μs)
3.1	0
3.2	0
3.3	1
3.4	1
3.5	2
3.6	3
3.7	3
3.8	3
3.9	4
4.0	4

Table. 4.1에서 보듯이 응력이 3.2MPa까지는 기준응력인 3.0MPa과의 Time advance는 없지만 점차 응력 수준이 증가하면서 Time advance도 점차적으로 커지는 것을 확인할 수 있다. 그래서 Time advance의 증가 변화율을 자세히 알아보기 위해서 선형 회귀법을 이용하여 Fig. 4.6과 같이 도식 하였다. 이때 직선의 방정식은 Stress를 x로 하고 Time advance 값을 y라고 하였을 때 $y=4.624x-14.28$ 의 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이때 R-square은 0.9375 값을 가지기 때문에 선형회귀법을 적용한 직선의 방정식으로 Time advance의 증가변화율을 도식할 수 있다.

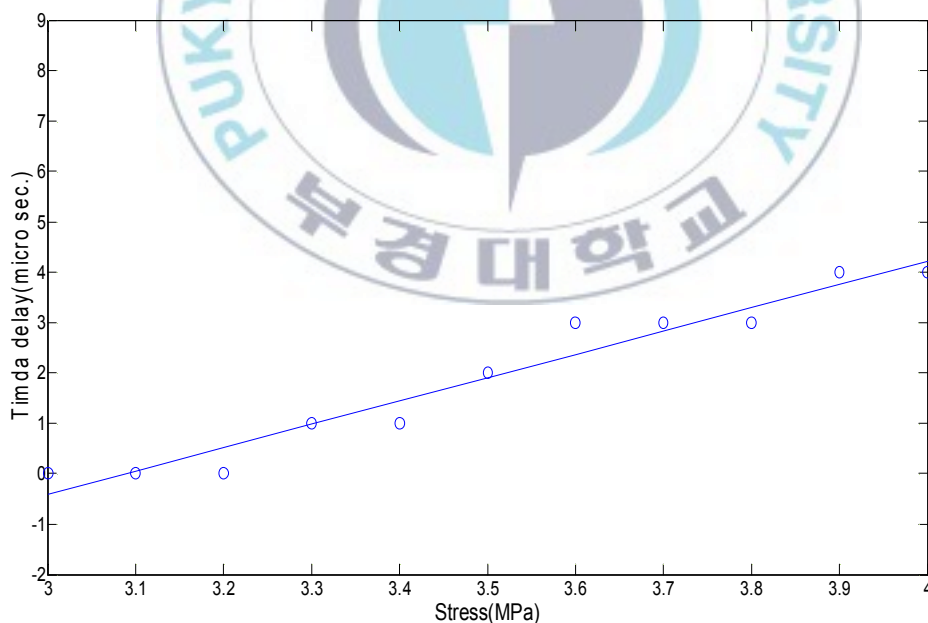


Fig. 4.6 물/시멘트 비 0.4의 advance의 선형회귀

나. 물/시멘트 비 0.45

물/시멘트 비가 0.45인 콘크리트의 각 응력에 따른 Time advance 값은 Table. 4.2 이고 선형 회귀법을 이용하여 $y=ax+b$ 의 직선의 형태로 그래프를 도시하였다.

Table. 4.2 물/시멘트 비 0.45 따른 응력 수준에 따른 Time advance

Stress(MPa)	Time advance(μs)
3.1	5
3.2	5
3.3	6
3.4	6
3.5	8
3.6	8
3.7	8
3.8	x
3.9	x
4.0	x

Table. 4.2에서 3.1MPa일 때 Time advance가 5라는 높은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 응력 수준이 낮은 곳에서 높은 Time advance값이 나오는 이유는 시편의 결함으로 인해 편심 등 외부적인 요인이 작용하였을 것으로 예상된다. 그러나 물/시멘트 비 0.4와 마찬가지로 응력 수준이 높아 질수록 Time advance가 증가하는 것을 볼 때 물/시멘트 비가 0.45의 신호에서도 acoustoelastic effect가 적용된다는 것을 알 수 있다. Time advance의 증가변화율을 알기 위해서 선형 회귀법을 이용하여 Fig. 4.7과 같이 도식 하였다. 이때 직선의 방정식은 $y=6.041x-13.98$ 의 값이 나왔다. 이때 R-square은 0.8925 값을 가지기 때문에 직선의 방정식으로 Time advance 의 변화율을 확인할 수 있다. 여기서 물/시멘트 비에 따른 Time advance 의 더 나은 비교를 위해 y축으로 -4.143 만큼 평행 이동 시켜 그래프로 나타내었다. 평행이동을 시키는 이유와 근거는 제5장에서 자세히 다루고 있다.

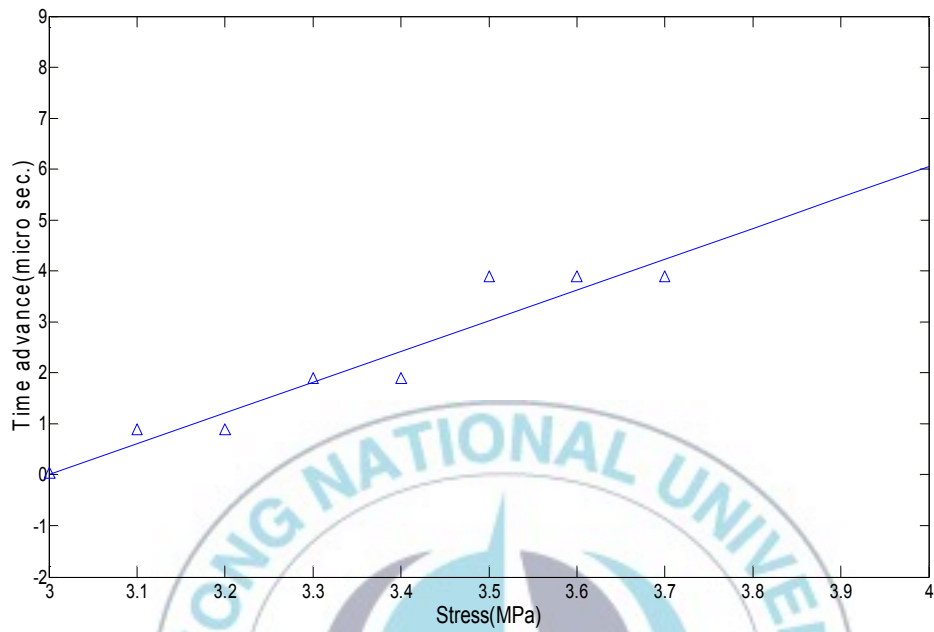


Fig. 4.7 물/시멘트 비 0.45 Time advance의 선형회귀

다. 물/시멘트 비 0.5

물/시멘트 비가 0.5인 콘크리트의 각 응력에 따른 Time advance 값은 Table. 4.3 이고 선형 회귀법을 이용하여 $y=ax+b$ 의 직선의 형태로 그래프를 도시하였다. 이때 R-square은 0.8791 이다.

Table. 4.3 물/시멘트 비 0.5 따른 응력 수준에 따른 Time advance

Stress(MPa)	Time advance(μ s)
3.1	2
3.2	2
3.3	3
3.4	2
3.5	5
3.6	5
3.7	6
3.8	6
3.9	x
4.0	x

물/시멘트 비 0.4, 0.45와 같이 응력 수준이 증가하면서 Time advance 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. Table 4.3에서 보이듯이 앞선 0.4, 0.45보다는 Time advance의 증가율이 더 크다는 것을 확인할 수 있다. 정확한 증가율을 구하기 위해 선형회귀법을 이용하였고 이 때 직선의 방정식은 $y=7.339x-21.47$ 의 값을 가졌다. R-square 값이 0.8791 이기 때문에 Fig. 4.8 에 도시된 그래프로 확인 가능하다. 물/시멘트 비가 증가할수록 Time advance의 증가율은 점차적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

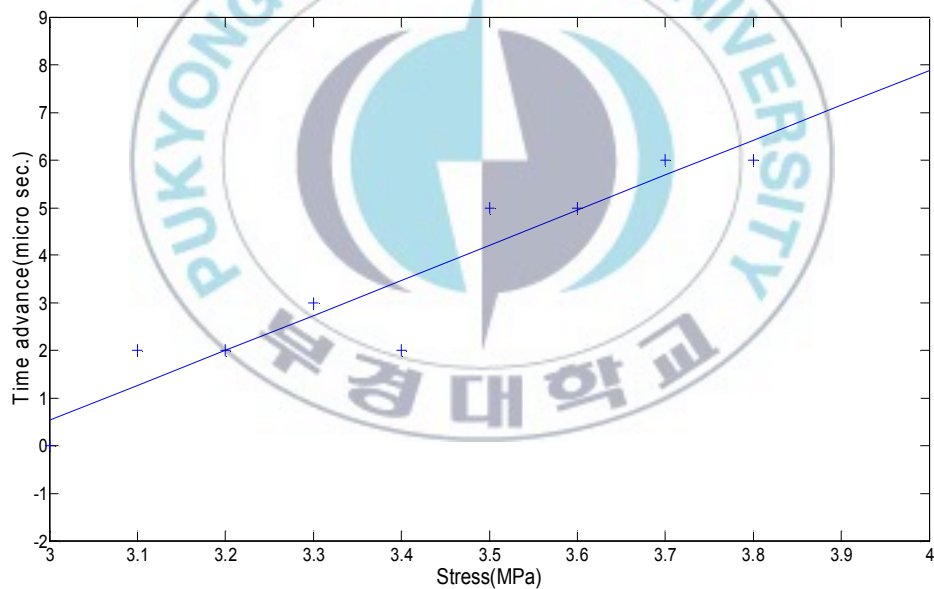


Fig. 4.8 물/시멘트 비 0.5 Time advance의 선형회귀

라. 분석

물/시멘트 비에 따라 변화하는 초음파의 특성을 알아보기 위하여 응력 수준을 달리하여 측정하였다. Fig. 4.9는 물/시멘트 비를 다르게 하였을 때 응력 수준에 따른 Time advance 값을 도시한 것이다. 물/시멘트 비와 상관없이 응력이 증가하면 coda wave 부분의 전파 속도가 기준에 비해 빨라진다. 그 증거로 앞서 보았듯이, 응력 수준이 기준응력과 차이가 많이 날수록 Time advance의 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 역으로 응력 수준이 낮을수록 기준신호와 거의 일치한다. 또한 물/시멘트 비에 따라 기울기는 차이가 있으며, 물/시멘트 비가 증가할수록 기울기도 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 기준응력과 비교했을 때 응력 수준에 따른 신호의 변화는 물/시멘트 비가 커질수록 증가하는 사실을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 물/시멘트 비가 높은 콘크리트가 상대적으로 공극의 양이 많으며, 응력을 받고 있는 콘크리트 내부의 공극의 크기에 영향을 미쳐 콘크리트의 밀도가 변화하기 때문에 물/시멘트 비가 높은 콘크리트 내부에서 초음파의 산란이 더 많은 영향을 주었을 것으로 추정된다. 하지만 이러한 사실은 사실이 아닌 가설이기 때문에 추후 공극률에 관한 연구를 통해 검증이 필요하다. 이러한 사실로 볼 때 CWI를 이용하여 콘크리트 응력을 추정하고자 할 경우, 물/시멘트 비에 대한 고려가 필요하다.

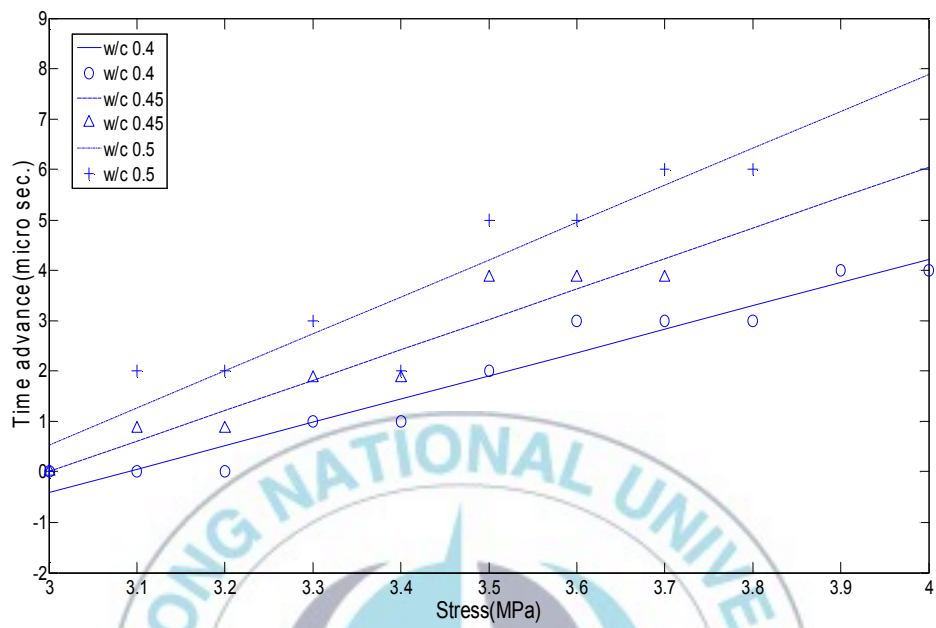


Fig 4.9 물/시멘트 비에 따른 Time advance의 선형회귀

4.2 잔골재에 따른 초음파 응답 및 분석

물/시멘트 비 0.45 인 콘크리트에 잔골재율을 30%, 40%, 50% 로 달리하여 3.0MPa부터 4.0MPa까지 0.1MPa간격으로 측정 하였다. 실험방법은 4.1장과 모두 동일하다. 잔골재율 50%는 4.1에서 실험했던 물/시멘트 비 0.45와 동일한 시편 이므로 4.1장에서 측정했던 데이터를 사용한다.

가. 잔골재율 30%

물/시멘트 비가 0.45이고 잔골재율이 30%인 콘크리트의 각 응력에 따른 Time advance 값은 Table. 4.4와 같고 선형 회귀법을 이용하여 $y=ax+b$ 의 직선의 형태로 그래프를 도시하였다. Table. 4.4에서 보듯이 응력이 3.1MPa일때는 기준신호인 3.0MPa 과의 Time advance는 없으나 응력 수준이 높아질수록 Time advance의 값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이때 Time advance의 증가변화율을 자세히 알아보기 위해서 선형 회귀법을 이용하였다.

Table. 4.4 잔골재율 30%에 따른 응력 수준에 따른 Time advance

Stress(MPa)	Time advance(μ s)
3.1	0
3.2	1
3.3	2
3.4	2
3.5	3
3.6	4
3.7	4
3.8	4
3.9	5
4.0	5

이 때 직선의 방정식은 Stress를 x로 하고 Time advance 값을 y라고 하였을 때 $y=5.443x-16.33$ 의 결과 값이 나왔다. R-square의 값은 0.9501을 가지기 때문에 Fig. 4.10 과 같이 선형 회귀법을 이용한 직선의 방정식으로 Time advance의 변화율을 판단할 수 있다.

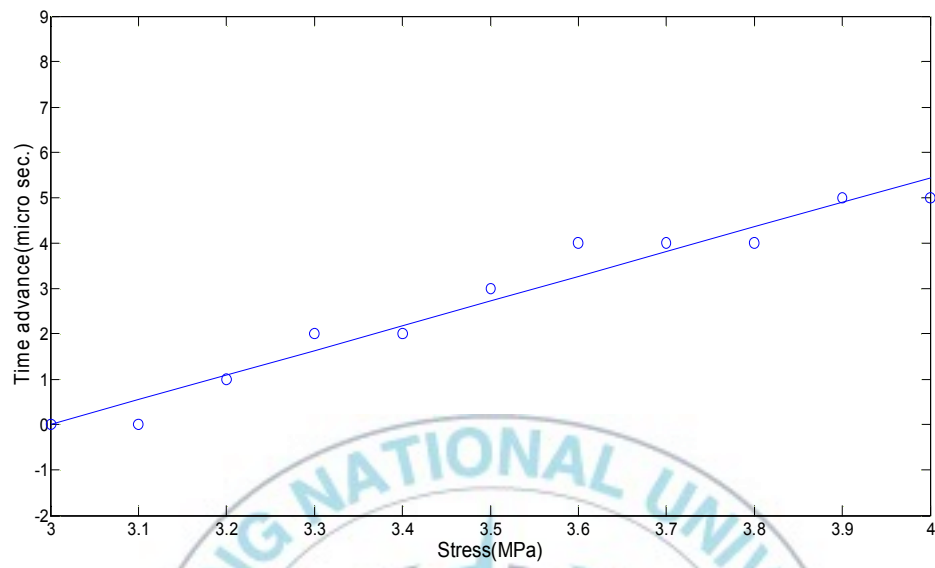


Fig. 4.10 잔골재율 30% Time advance의 선형회귀

나. 잔골재율 40%

물/시멘트 비가 0.45이고 잔골재율이 40%인 콘크리트의 각 응력에 따른 Time advance 값은 선형 회귀법을 이용하여 $y=ax+b$ 의 직선의 형태로 그래프를 도시하였다.

Table. 4.5 잔골재율 40%에 따른 응력 수준에 따른 Time advance

Stress(MPa)	Time advance(μs)
3.1	0
3.2	1
3.3	1
3.4	2
3.5	2
3.6	3
3.7	4
3.8	4
3.9	x
4.0	x

Table 4.5 에서 보듯이 앞에서 보았던 잔골재율 30%의 시편의 결과와 비슷한 Time advance 의 증가율을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 여러 앞에서 한 실험과 같이 응력 수준이 증가할수록 Time advance의 값이 커지는 것도 볼 수 있다. Time advance의 증가율을 확인하기 위해 선형 회귀법을 이용하여 직선의 방정식을 도출하였고 $y=5.487x-16.77$ 의 함수로 표현 하였다. 이때 R-square은 0.9537 이다.



Fig. 4.11 잔골재율 40% Time advance의 선형회귀

물/시멘트 비가 0.45이고 잔골재율이 서로 다른 콘크리트 시편을 측정 한 초음파는 응력 의존성을 가지고 있지만 Time advance의 증가율은 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다.

다. 분석

잔골재율에 따라 변화하는 초음파의 특성을 알아보기 위하여 응력 수준을 달리하여 측정하였다. 물/시멘트 비에 따른 콘크리트 시편과 마찬가지로 응력 수준이 높을수록 Time advance의 값도 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 사실로 볼 때 잔골재율에 따른 콘크리트의 시편에 초음파 실험을 하였을 때 응력이 증가할 경우 coda wave 성분의 전파 속도가 빨라지는 것을 알 수 있었다. 하지만 Fig. 4.12 에서 보듯이 Time advance의 증가율은 거의 변화가 없다는 것을 볼 수 있다. 이러한 사실은 응력 상태가 변화하더라도 골재에 의해 산란된 coda wave 성분의 전파 경로는 큰 변화가 없으며, Acoustoelastic effect에 따른 coda wave의 전파 속도만 변화하는 것을 알 수 있다.

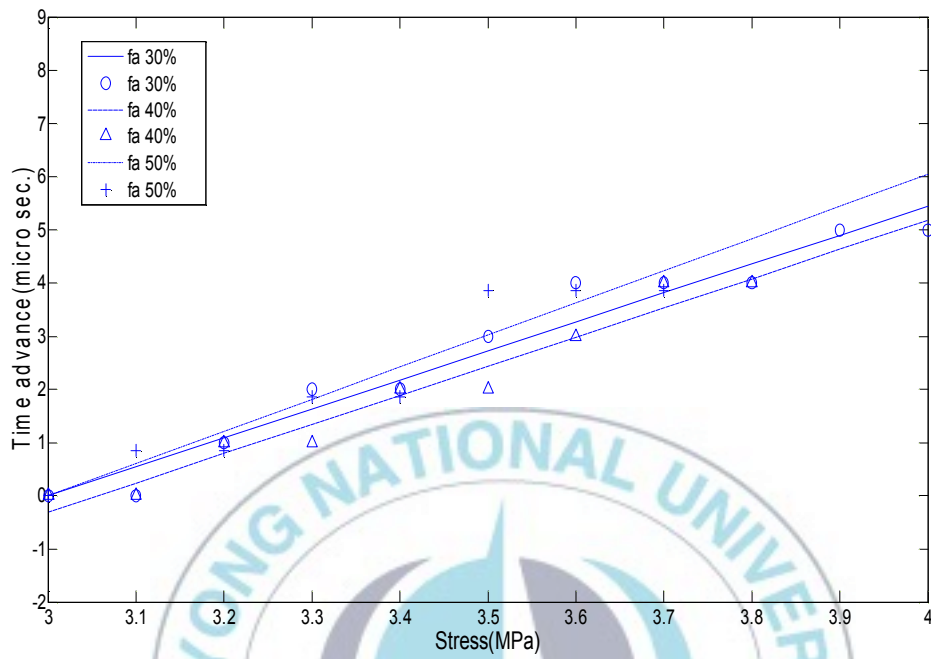


Fig 4.12 잔골재율에 따른 Time advance의 선형회귀

제 5 장 응력 수준에 따른 초음파 거동 특성의 모니터링

적용성 검증

본 연구에서는 응력 수준에 따른 초음파의 거동 특성을 파악하기 위해서 기준 응력을 3.0MPa로 설정하여 4.0MPa까지 0.1MPa씩 증가시켜 모니터링 하였다. 본 연구의 모니터링의 적용성을 검증하기 위해서 기준 응력을 3.5MPa로 설정하였고, 3.0MPa에서 4.0MPa까지 초음파 측정을 하여 앞에서 측정한 기준 응력이 3.0MPa로 하였을 때의 측정한 신호와 비교 분석하여서 적용성을 검증하려 한다. 검증실험에서는 물/시멘트 비가 0.4인 콘크리트 시편과 물/시멘트 비 0.45이고 잔골재율이 30%인 콘크리트의 시편, 2가지의 시편을 측정 하였다.

가. 물/시멘트 비 0.4

Table. 5.1 기준 응력이 3.5MPa 일 때 응력 수준에 따른 Time advance

Stress(MPa)	Time advance(μs)
3.0	-2
3.1	-2
3.2	-1
3.3	-1
3.4	0
3.6	0
3.7	1
3.8	1
3.9	2
4.0	2

기준응력이 3.5MPa일 때에도 본 실험과 같이 응력 수준에 따라서 Time advance가 증가하는 것을 보이기 때문에 초음파의 응력 의존성을 가지고 있다. 앞서 실험과 같이 선형 회귀법을 이용하여 Fig. 5.1과 같이 도시 하

였다.

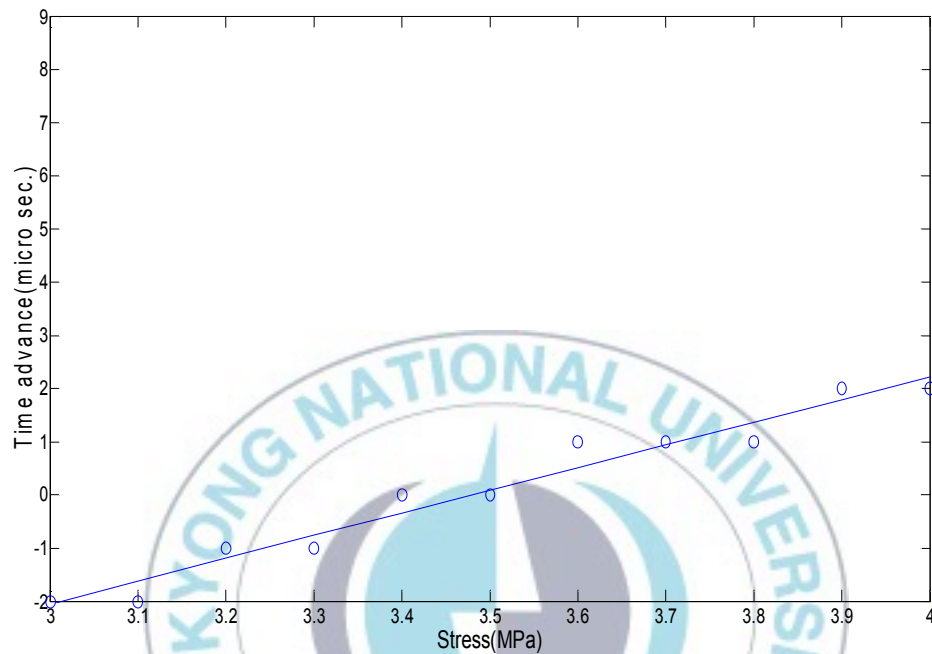


Fig. 5.1 기준 응력이 3.5MPa인 Time advance의 선형회귀

이 때 직선의 방정식은 $y=4.624x-14.83$ 이고 R-square은 0.9513 인 값을 가진다. Fig. 5.2는 기준 응력이 3.0MPa 일 때 직선의 방정식과 3.5MPa 일 때 직선의 방정식을 도식 했다. 그림에서 보듯이 거의 비슷한 직선의 형태를 가짐을 볼 수 있다. 실제로 기준응력이 3.0MPa일 때 기울기는 4.624이다. 기준응력이 3.5MPa일 때 구한 기울기 또한 4.624로 같은 결과 값이 나왔고 거의 변화가 없음을 확인할 수 있다.

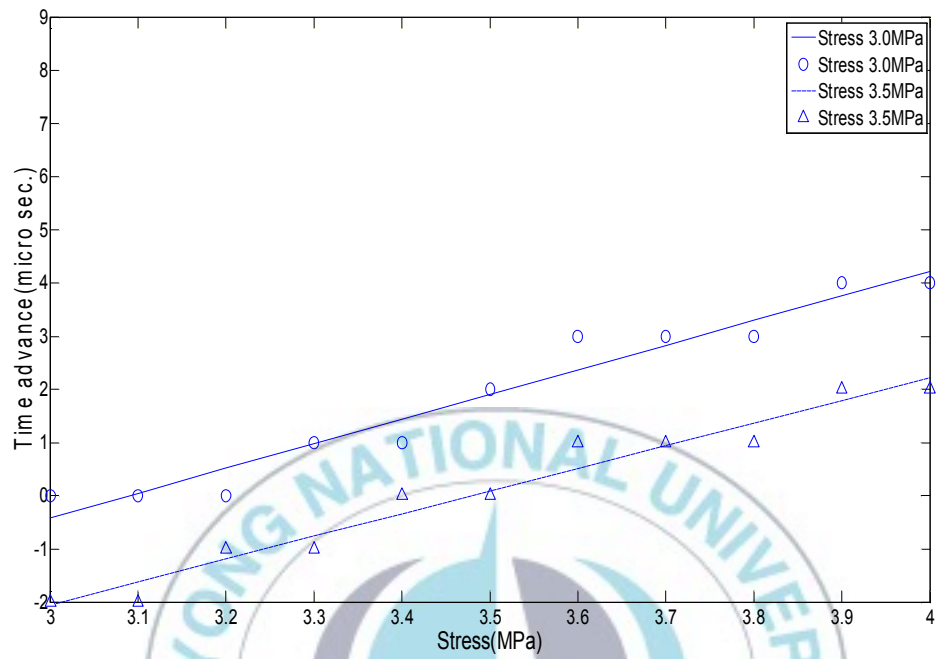


Fig. 5.2 기준응력 변화에 따른 Time advance의 선형회귀

나. 잔골재율 30%

Table. 5.2 기준 응력이 3.5MPa 일 때 응력 수준에 따른 Time advance

Stress(MPa)	Time advance(μ s)
3.0	-3
3.1	-3
3.2	-2
3.3	-1
3.4	-1
3.6	0
3.7	1
3.8	1
3.9	2
4.0	2

Table 5.2 에서 보듯이 잔골재율이 30%이고 기준응력이 3.5MPa일 때의 Time advance 역시 앞서 나온 실험과 같은 특징인 응력 의존성을 가지고 있다. Fig. 5.3은 선형회귀법을 이용한 Time advance의 증가율을 도시 하였다.

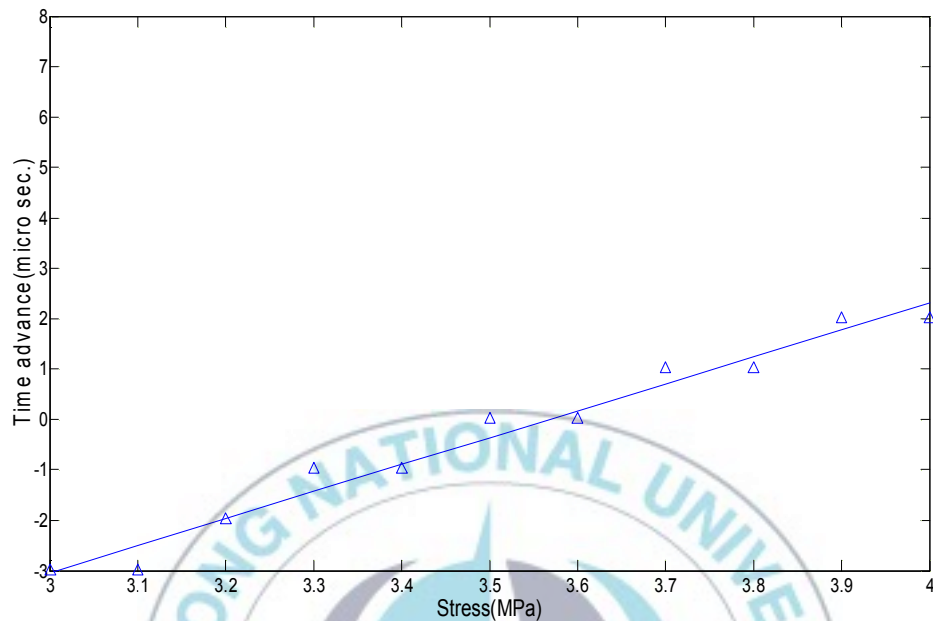


Fig. 5.3 기준 응력이 3.5MPa인 Time advance의 선형회귀

이 때 직선의 방정식은 $y=5.351x-19.09$ 이고 R-square은 0.9638 인 값을 가진다. Fig. 5.4는 기준 응력이 3.0MPa 일 때 직선의 방정식과 3.5MPa 일 때 직선의 방정식을 도식 하였다. Fig. 5.4 에서 보면 두 개의 직선이 거의 비슷한 것을 확인할 수 있다. 기준응력이 3.0MPa 일 때 기울기는 5.443이다. 기준응력이 3.5MPa 일 때 구한 기울기는 5.351의 값을 가진다. 기준응력이 변화하여도 응력 수준에 따른 Time advance의 직선방정식은 거의 차이가 없음을 확인할 수 있다. 응력 수준에 따른 초음파 거동 특성 모니터링의 적용성을 검증하기 위해서 기준응력을 변화하여 초음파 측정 하였다.

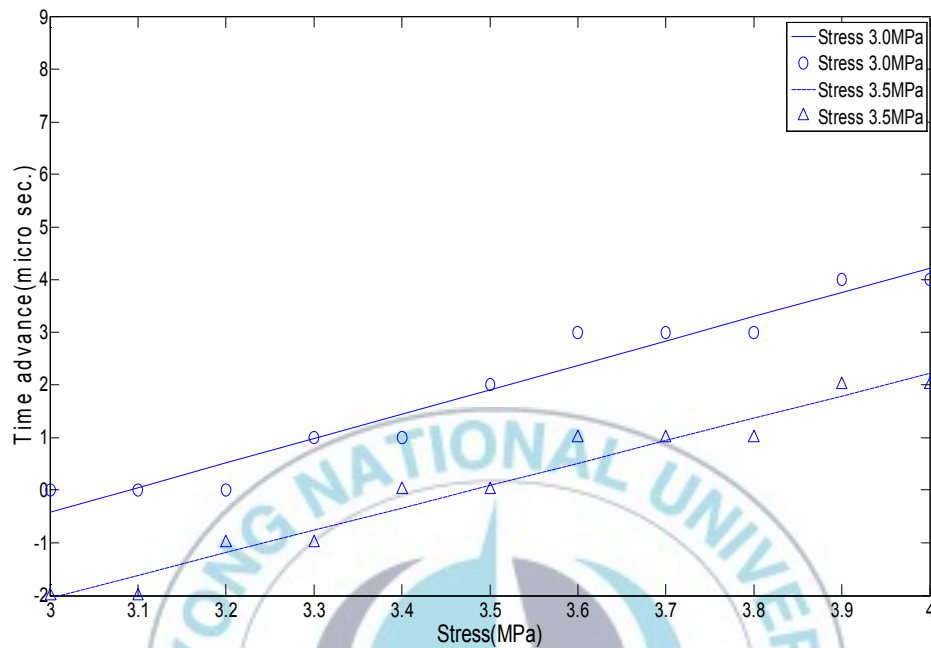


Fig. 5.4 기준응력 변화에 따른 Time advance의 선형회귀

검증의 목표는 기준 응력이 변화하여도 응력 수준에 따른 Time advance의 변화율이 일정한 값을 가짐으로써 4장에서 측정한 실험의 신뢰성을 가지게 하는 것이다. 검증 결과 물/시멘트 비와 잔골재율에 따른 시편 모두 Time advance의 변화율이 거의 일정하게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 응력 수준에 따른 초음파의 거동 특성을 분석할 경우에는 분석기준 신호는 상관이 없기 때문에 본 연구는 CWI를 적용하여 Acoustoelastic effect를 뚜렷하게 보여줄 수 있는 실험 결과라고 할 수 있다.

제 6 장 결 론

본 연구에서는 콘크리트 응력 상태에 따른 초음파의 거동 특성을 Coda wave interferometry 기법을 이용하여 적용성을 알아보았다. 응력수준에 따라서 콘크리트에 초음파 실험을 수행하여 coda wave 성분의 초음파 신호를 측정하였다. 실험 결과 초기에 직접 전달되는 Ballistic wave 성분은 압축응력의 변화에도 불구하고 전파 시간의 변화를 관찰하기 어려우나 coda wave 성분은 Acoustoelastic effect가 민감하게 반응 하였다. 그리고 초음파의 물/시멘트 비에 따라 초음파 속도는 차이가 있으며, 물/시멘트 비가 증가할수록 Acoustoelastic effect의 민감도가 증가하였다. 이러한 실험 결과는 콘크리트 내부의 공극상태를 이용하여 가설을 세울 수 있었다. 응력을 받고 있는 콘크리트가 공극의 크기에도 영향을 미쳐 콘크리트의 밀도가 변했을 가능성이 있다. 상대적으로 공극이 더 많은 물/시멘트의 비가 높은 콘크리트에 산란된 초음파가 응력수준에 따라서 더 많은 영향을 받기 때문에 Time advance의 변화율이 증가한다는 것이라 예상할 수 있다. 하지만 확인된 사실이 아닌 가설일 뿐이고 본 연구에서는 가설에 관한 내용을 다루고 있지는 않는다. 한편, 물/시멘트 비가 동일하고 잔골재율을 달리 하여 실험을 하였을 때는 Time advance의 증가율은 거의 변화가 없는 것으로 확인 할 수 있는데 이러한 사실은 초음파의 거동은 잔골재율에 따라

서는 무관하다는 사실을 알 수 있다. 이것은 응력 상태가 변화하더라도 골재에 의해 산란된 coda wave의 전파 경로는 큰 변화가 없다는 사실을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 초음파 거동은 잔골재율 보다는 물/시멘트 비가 다른 콘크리트의 coda wave 성분에 대해서 Acoustoelastic effect의 민감도가 높다는 사실을 확인하였으며 CWI를 이용하여 콘크리트 응력을 추정하고자 할 경우에는 잔골재율 보다는 물/시멘트 비에 대한 고려가 필요하다고 판단되었다. 이러한 결론을 토대로 초음파가 응력의존성을 가지고 있다는 것을 검증하기 위해 기준응력을 3.5MPa로 설정하여 물/시멘트 비가 0.4인 경우와 잔골재율이 30%인 시편에 대해 측정을 실시하여, 기준응력이 3.0MPa 일때의 신호와 비교 하였다. 그 결과 기준응력에 관계없이 응력 수준에 따른 Time advance의 변화율은 거의 변화가 없었다. 이러한 사실로 볼 때 기준응력에 상관없이 응력수준에 따른 초음파의 거동 특성은 일정하다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과들로부터 콘크리트의 응력 상태에 따른 초음파의 거동특성을 알아보기 위해 Acoustoelastic effect를 이용하여 CWI 기법이 효과적으로 적용가능하다는 결론을 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. Kino, G.S., Hunter, J.B., Johnson, G.C., Selfridge, A.R., Barnett, D.M., Hermann, G., Steele, C.R.(1979) "Acoustoelastic Imaging of Stress Fields," *Journal of Applied Physics*, Vol.50(4), pp. 2607-2613
2. Chaki, S. and Bourse, G. (2009) "Stress Level Measurement in Prestressed Steel Strands Using Acoustoelastic Effect," *Experimental Mechanics*, Vol. 49, pp. 673-6
3. Kurokawa, S., Sumitro, S., Shimano, K., Wang, M.L., "Long Term Stress Monitoring on PC Beam Using Elasto-Magnetic Sensor," Proceedings of the 1st fib Congress, pp. 239-246, 2002
4. Chaki, S. and Bourse, G., "Stress Level Measurement in Prestressed Steel Strands Using Acoustoelastic Effect," *Experimental Mechanics*, Vol. 49, pp. 673-681, 2009
5. Kino, G.S., Hunter, J.B., Johnson, G.C., Selfridge, A.R., Barnett, D.M., Hermann, G., Steele, C.R., "Acoustoelastic Imaging of Stress Fields," *Journal of Applied Physics*, Vol.50(4), pp. 2607-2613, 1979
6. Quirion, M. and Ballivy, G., "Concrete strain monitoring with Fabry-Perot Fiber-Optic Sensor," *Journal of Materials in Civil*

Engineering, Vol.12(3), pp. 254-261, 2000

7. Ansari, F., "Practical Implementation of Optical Fiber Sensors in Civil Structural Health Monitoring," Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 19, pp.1163-1172, 2008

8. Han, B. and Ou, J., "Embedded Piezoresistive Cement-based Stress/Strain Sensor," Sensors and Actuators A: Physicla, Vol. 138(2), pp. 294-298, 2007

9. Dennis Patrick Schurr (2010) Monitoring Damage In Concrete Using Diffuse Ultrasonic Coda Wave Interferometry, Georgia Institute of Technology

10. Alexandre A. Gret (2004) Time-Lapse Monitoring with Coda Wave Interferometry, Journal of Geophysics

11. LAROSE, E. and HALL, S., "Monitoring stress related velocity variation in concrete with a 2×10^{-5} relative resolution using diffuse ultrasound (I)," Journal of the acoustical Society of America, vol. 125, p.4, April 2009.

12. Hui Xiang, S. M. ASCE, Craing M. Newton, P.E., M.ASCE and Clinton Woodward, P. E., M. ASCE, "Optimization of Nonlinear Ultrasound Results to Determine Dynamic Properties of Concrete,

Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 20, No. 11, November 1, 2008

13. Saad A. Abo-Qudais, "Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves", Journal Construction and Building Materials, Vol. 19(2005) pp.257-263

14. Simon Christian Stahler and Christoph Sens-Schonfelder, "Monitoring stress changes in a concrete bridge with coda wave interferometry", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 129 pp4, April 2011) pp. 1945-1952

