공 학 석 사 학 위 논 문

유도초음파를 이용한 FRP 부착 콘크리트에서의 부착 박리 손상 탐지

2012 년 2 월

부 경 대 학 교 대 학 원

안 전 공 학 과

이 용 주

공 학 석 사 학 위 논 문

유도초음파를 이용한 FRP 부착 콘크리트에서의 부착 박리 손상 탐지

지도교수 신 성 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2012 년 2 월

부 경 대 학 교 대 학 원

안 전 공 학 과

이 용 주

이용주 공학석사 학위논문을 인준함.

2012 년 2 월 24 일

주 심 공학박사 권 오 헌 (인)

부 심 공학박사 오 창 보 (인)

부 심 공학박사 신 성 우 (인)

목　　차

List of Figures

Abstract

본연구에서는 다층 구조에서의 유도초음파 투과 손실에 의한 감쇠 현상을 이용하여, FRP 보강판 부착 박리 손상 탐지의 적용 가능성을 알아보고자 한다. 그러기 위해서는 우선 다층 구조에서의 유도초음파 모드 감쇠 특성을 파악하여야 한다. 따라서 상용프로그램인 DISPERSE 를 사용하여 FRP-콘크리트 다층 구조에서 존재하는 유도초음파 모드를 구하고, 각 모드에 대하여 주파수별 감쇠 분산 특성을 분석하여, 이로부터 감쇠 민감도가 가장 높은 모드와 주파수 대역을 결정하고자 한다. 한편, 모드 해석 연구를 통하여 결정된 모드를 이용하여 박리 손상 탐지에 적용하기 위해서는, 박리 손상에 따른 해당 모드의 감쇠 민감도 분석을 수행할 필요가 있다. 즉, 박리 손상 탐지에 유도초음파 감쇠 특성의 적용 가능성을 판단하기 위해서는, 박리 구간의 크기에 따라 해당 모드의 감쇠 발생 여부와 감쇠 정도를 알아 볼 필요성이 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 파동전파해석을 수행하고자 하며, 이로부터 특정 모드의 감쇠 민감도를 Law data, STFT 기법등을 사용하여 분석하였으며 최종적으로 유도초음파 감쇠 특성의 보강판 박리 손상 탐지 적용 가능성을 알아보고자 한다.

제 1 장 서 론

1.1 연구 목적

콘크리트 구조물은 공용 기간 동안 역학적/환경적 요인 등에 의하여 손상과 열화가 발생하게 되고, 이러한 손상과 열화는 콘크리트 구조물의 성능 저하로 이어져 경우에 따라서는 구조물의 급작스런 붕괴를 유발할 수 있다. 따라서, 이러한 손상과 열화를 조기에 발견하고, 이에 대한 적절한 보수/보강을 실시하는 것은 공용 기간 동안 콘크리트 구조물의 사용성과 안전성의 확보에 있어서 매우 중요한 문제이다. 콘크리트 구조 부재의 종류와 손상 및 열화의 유형에 따라 다양한 보수/보강 공법이 제시되었으며, 특히 바닥판이나 보와 같은 휨 부재의 모멘트 저항 성능 저하에 대한 효과적인 보수/보강 공법으로는 보강판 부착 공법이 많이 사용된다 [1]. 보강판 재료로는 주로 강 (Steel)과 섬유강화플라스틱 (Fiber Reinforced Plastic : FRP)이 많이 사용되며, FRP 판을 이용한 보강판 부착 공법의 경우 강판에 비하여 높은 강도 대 중량비를 가지고 있어서 시공성과 경제성이 우수할 뿐만 아니라, 또한 부식에 대한 염려가 없어 외부 노출 환경 하에서도 높은 내구성 향상을 기대할 수 있다는 장점이 있다 [1]. FRP 판을 이용한 보강판 부착 공법은 FRP 판을 휨 부재의 바닥면에 고강도 접착제 등을 이용하여 부착하는 방식이며, 이때 보강판과 콘크리트 부재의 부착 상태가 양호할 경우 우수한 보강 성능을 기대할 수 있다. 그러나, FRP 판과 콘크리트 부재의 부착 공정에서 부착 불량 구간이 존재하거나, 또는 공용 과정에서 부착 구간에 박리가 발생하는 경우에는 보강판과 콘크리트 부재의 합성 거동을

기대할 수 없기 때문에 보강 부위의 성능 저하가 발생하게 되며, 결론적으로 보강판 부착 공법에 의한 콘크리트 구조물 보강 성능은 보강판과 콘크리트 부재의 부착 계면 상태에 의존하게 된다. 이에 따라 FRP 판과 콘크리트 부재의 부착 계면 상태를 평가할 수 있는 다양한 비파괴검사 기법이 제안되었다. FRP 보강판과 콘크리트 부재의 부착상태를 평가할 수 있는 비파괴검사 기법에는 전자기파를 이용한 Radar 법 [2], 압전체를 이용한 임피던스 기법 [4], 그리고 유도초음파를 이용하는 기법 [3, 5]들이 제안되었으며, 그 중에서도 측정 장비의 구성이 간단하고, 또한 한번에 넓은 영역의 검사가 가능한 유도초음파 기법이 최근에 큰 각광을 받고 있다. 유도초음파란 P 파나 S 파와 같은 체적파가 특정 경계면을 가진 매질에서 전파되는 과정에서 경계면에서의 반사파가 매질 내에서 연속적으로 합성되어 전파되는 독특한 파동을 말하며, 경계면 조건과 형상에 따라 각각 다른 전파 특성을 가지는 파동이다. 유도초음파의 최대 장점은 전파되는 과정에서 기하학적 감쇠에 의한 파동의 손실이 거의 없기 때문에 장거리를 전파할 수 있다는 것에 있으며, 이에 따라 검사 대상의 크기가 큰 경우 넓은 영역을 한번에 검사할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 유도초음파는 파동의 위상 및 군속도, 감쇠가 주파수에 따라 다르게 나타나는 분산 특성이 있고, 또한 유도초음파의 가진 주파수에 따라 여러 개의 모드가 동시에 나타날 수 있기 때문에, 손상 탐지 등에 적용하고자 할 때 이러한 특성에 대한 고려가 필요하다. Castaings et al. [3] 은 박리 구간의 크기에 따라 특정 유도초음파 모드의 전파 속도가 차이가 나는 것에 착안하여, 이를 바탕으로 박리 구간의 크기를 결정하는 방법을 제안하였다. 그러나, 속도 차이를 이용하는 방법의 경우 실제

측정 과정에서 잡음 등의 영향으로 미세한 속도 차이를 구분하기 어려운 단점이 있어 실용성에 제한이 있다. 또한, Jacobs et al. 은 박리에 의한 유도초음파의 모드변환 (Mode Conversion)을 이용하여, 박리 손상의 유무를 탐지하는 기법을 제안하였다. [5] 그러나, 모드 변환을 이용하는 방법의 경우도, 다중 모드가 존재할 경우 박리에 의한 모드 변환 만을 구분하기가 현실적으로 불가능하여 실제 적용은 어려운 문제점이 있다. 본 논문에서는 FRP 보강판 부착 박리 손상 탐지에 있어서 기존의 유도초음파 전파 속도 탐지법이나 모드 변환법에 대한 대안으로 유도초음파의 감쇠 특성을 이용하는 방법의 적용 가능성을 알아보고자 한다. 유도초음파 전파 구조의 관점에서 FRP 보강판이 부착된 콘크리트 부재는 다층구조 (Multi-layered Structure)로 볼 수 있다. 다층 구조에서의 유도초음파 전파는 경계층 외부로 투과 현상이 없는 단층 구조와는 달리 Fig. 1 과 같이 경계층 외부로 투과되는 성분이 있으며, 이에 따라 유도초음파가 전파되는 과정에서 에너지 손실이 발생할 수 있다. 따라서, 본 연구의 목적은 이러한 다층 구조에서의 유도초음파 전파 특성에 착안하여, 유도초음파의 투과 손실에 의한 감쇠 변화가 FRP 보강판 부착 박리 손상 탐지에 적용 가능성을 평가하는 것이다.

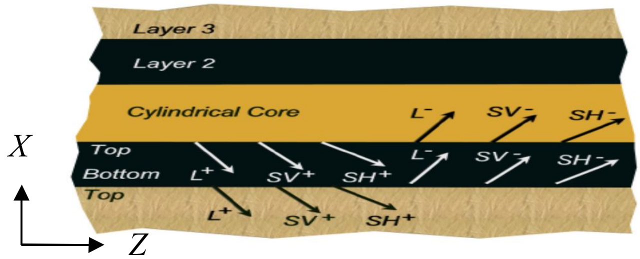


Fig. 1.1 Guided Wave propagation of Mulyilayer System

1.2 연구 내용 및 방법

다층 구조에서의 유도초음파 투과 손실에 의한 감쇠 현상을 이용하여, FRP 보강판 부착 박리 손상 탐지의 적용 가능성을 알아보기 위해서는, 우선 다층 구조에서의 유도초음파 모드 감쇠 특성을 파악하여야 한다. 유도초음파는 전파 매질의 기하학적 구조, 재료적 특성 뿐만 아니라 주파수에 따라서 여러 개의 전파 모드가 존재하고, 또한 각 모드 별로 주파수에 따라 감쇠의 정도가 다른 특성이 있다. 즉, 다층 구조의 기하학적 특성 (두께 등) 과 재료적 특성을 알고 있다고 할지라도, 유도초음파의 모드에 따라 경계면 외부로 투과하지 않는 모드가 존재할 수 있으며, 또한 경계면 외부로 투과하더라도 모드별로 투과되는 정도가 차이가 발생하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 FRP-콘크리트 다층 구조에서 존재하는 유도초음파 모드를 구하고, 각 모드에 대하여 주파수별 감쇠 분산 특성을 분석하여, 이로부터 감쇠 민감도가 가장 높은 모드와 주파수 대역을 결정하고자 하며, 이를 위해 유도초음파 모드 해석 연구를 우선 수행하고자 한다. 한편, 모드 해석 연구를 통하여 결정된 모드를 이용하여 박리 손상 탐지에 적용하기 위해서는, 박리 손상에 따른 해당 모드의 감쇠 민감도 분석을 수행할 필요가 있다. 즉, 박리 손상 탐지에 유도초음파 감쇠 특성의 적용 가능성을 판단하기 위해서는, 박리 구간의 크기에 따라 해당 모드의 감쇠 발생 여부와 감쇠 정도를 알아 볼 필요성이 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 파동전파해석을 수행하고자 하며, 이로부터 특정 모드의 감쇠 민감도를

분석하여 최종적으로 유도초음파 감쇠 특성의 보강판 박리 손상 탐지 적용 가능성을 알아보고자 한다.

제 2 장 유도초음파 이론

2.1 파동방정식

층을 갖는 매질의 거동을 묘사하는 방정식을 유도하기 전에 무한 매질에서의 파동전파 형상을 이해하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 재료의 미소요소 에 적용되는 Newton 의 제 2 법칙과 탄성체의 임의의 체적 내에서 성립하는 질량보존법칙을 이용하여 Euler 운동방정식을 유도할 수 있다. Euler 운동방정식은 위치 r 과 시간 t 의 함수인 입자 변위장 $u(r,t)$ 과 응력 다이아딕(dyadic) $\vec{\sigma}$ (2 차원 벡터장) 사이의 관계식으로 다음과 같이 기술된다.

$$\rho\left(\partial^2 u/\partial t^2\right) = \nabla \cdot \vec{\sigma} \tag{2.1}$$

여기서 ρ 는 층의 밀도로 일정하다고 가정한다. 또 재료는 선형 탄성이고 체적력 즉 중력은 무시한다. 그러면 일반적인 Hook 의 법칙을 이용하여 응력 다이아딕 $\vec{\sigma}$ 와 재료 탄성상수의 관계를 표현 할수 있다. 탄성론을 이용하여 균일, 등방성 재료의 탄성 강성텐서를 구성하는 21 개의 요소를 Lame 상수라 불리는 두 개의 재료상수 λ, μ 로 감소시킬 수 있다. 그러면 Hook 의 법칙은 다음과 같이 간단히 표현된다.

$$\vec{\sigma} = \lambda I \nabla \cdot u + \mu\left(\nabla u + u \nabla\right) \tag{2.2}$$

여기서 I 는 단위행렬이다. 앞의 두 식 (2.1), (2.2)를 결합하면 등방성 탄성 매질에 대한 Navier 변위방정식을 유도할 수 있다.

$$\left(\lambda + \mu\right) \nabla \nabla \cdot u + \mu \nabla^2 u = \rho\left(\partial^2 u/\partial t^2\right) \tag{2.3}$$

이식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$(\lambda+2\mu)\nabla(\nabla\cdot u)+\mu\nabla\times(\nabla\times u)=\rho\left(\partial^2 u/\partial t^2\right) \tag{2.4}$$

여기서 u 는 변위벡터, ρ는 밀도, λ,μ는 Lame 상수이고 ∇^2은 3 차원 Laplace 연산자이다. 식 (2.4)에서 $(\lambda+2\mu)\nabla(\nabla\cdot u)$는 해의 팽창부분이고 $\mu\nabla\times(\nabla\times u)$는 회전부분이다.

재료의 감쇠를 시스템에 도입하는 방법에는 몇 가지가 있다. 일반적인 NDE 의 경우 진행파장 당 변위의 크기의 일정 손실을 표시하는 감쇠 모델에 의해 재료의 거동을 적절하게 표현할 수 있다. 재료의 감쇠를 도입하면 Lame 상수 λ,μ는 다음과 같은 연산자로 대치된다.

$$\lambda\rightarrow\lambda+\frac{\lambda'}{\omega}\frac{\partial}{\partial t},\ \mu\rightarrow\mu+\frac{\mu'}{\omega}\frac{\partial}{\partial t} \tag{2.5}$$

여기서 상수 λ' 와 μ' 는 점탄성재료의 상수이고 ω 는 주파수 이다. 점탄성상수가 0 이면 점탄성 모델은 탄성모델이 된다. 따라서 변위방정식 (2.3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$(\lambda+\mu)\nabla(\nabla\cdot u)+\mu\nabla^2 u+\left(\frac{\lambda^2+\mu^2}{\omega}\right)\nabla\left(\nabla\cdot\frac{\partial u}{\partial t}\right)+\left(\frac{\mu^2}{\omega}\right)\nabla^2\frac{\partial u}{\partial t}=\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{2.6}$$

Helmholtz 분해법을 이용하면 유한하고 균일하며 연속적이고 무한대에서 그 값이 소멸하는 식 (2.3)의 3 차원 변위 벡터 u 를 압축 스칼라포텐셜 ϕ와 등가체적 H의 합으로 표현할 수 있다.

$$u=\nabla\phi+\nabla\times H \tag{2.7}$$

여기서

$$\nabla \cdot H = F(r,t)$$

이고 F 는 좌표벡터 r 과 시간 t 의 함수이다. 함수 F 는 필드변환의 측정불변 법칙에 의해 임의로 선택할 수 있다. 즉 필드와 포텐셜 사이의 관계는 유일하지 않다. χ 가 적절한 경계조건을 만족하면 스칼라포텐셜 ϕ 는 $\phi' + (1/c)(\partial\chi/\partial t)$ 로, 벡터포텐셜 H 는 $H' - \nabla\chi$ 로 치환될 수 있다. 새로운 포텐셜은 동일한 필드를 나타낸다 이와 같은 방법으로 전체 필드를 표현하기 위해 함수들을 조합할 수 있다. 여기서 $F(r,t)$ 를 0 으로 설정하면 등가체적 벡터 포텐셜은 제로발산 벡터가 되어 필드가 솔레노이드화 된다. 즉 영역 내에 에너지의 근원이나 싱크(sink)가 존재하지 않게 된다. 발산조건을 규정하면 Helmholtz 분해법에 의해 도입된 두 개의 포텐셜에 의해 나타나는 네개의 성분으로 u 의 세 성분을 유일하게 결정할 수 있는 필수조건을 구할 수 있다.

변위벡터 u 에 대한 표현을 Navier 운동 방정식 (2.3)에 대입하면 다음의 결과식을 얻을 수 있다.

$$\nabla\left((\lambda+2\mu)\nabla^2\phi - \rho\left(\partial^2\phi/\partial t^2\right)\right) + \nabla\times\left(\mu\nabla^2 H - \rho\left(\partial^2\phi/\partial t^2\right)\right) \qquad (2.8)$$

이때 다음과 같은 항등식을 이용하였다.

$$\nabla\cdot\nabla\phi = \nabla^2\phi,\ \nabla^2(\nabla\phi) = \nabla\left(\nabla^2\phi\right),\ \nabla\cdot\nabla\times H = 0$$

식(2.8)의 조건을 만족하기 위해서는 두 괄호 안의 항이 0 이 되어야하고 이로부터 다음과 같은 표준방정식을 유도할 수 있다.

$$c_1^2\nabla^2\phi = \partial^2\phi/\partial t^2,\ c_2^2\nabla^2 H = \partial^2 H/\partial t^2 \qquad (2.9)$$

여기서

$$c_1 = \left(\frac{\lambda + 2\mu - i\left(\lambda' + 2\mu'\right)}{\rho} \right)^{1/2}, \quad c_2 = \left(\frac{\mu - i\mu'}{\rho} \right)^{1/2} \tag{2.10}$$

이다. 만약 매질이 탄성이면

$$c_1 = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{1/2}, \quad c_2 = \left(\frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2} \tag{2.11}$$

이 된다. 즉 재료가 탄성이면 상수 c_1, c_2는 실수 값을 갖게 되고 각각 종방향, 전단방향 입체파 속도와 같아지는 것을 알 수 있다. 재료가 감쇠를 가지면 상수 c_1 , c_2 는 복소수가 되지만 감쇠가 적을 경우 실수부는 입체파 속도를 근사적으로 나타낸다는 사실을 명심할 필요가 있다.

2.2 등방성 평판의 파동전파

편평한 등방성, 탄성, 고체 층의 변위와 응력장에 대한 방정식은 층 내에 존재하는 4 개의 입체파를 중첩하여 표현할 수 있다. 따라서 방정식을 유도하기 위해서는 먼저 무한 매질 내에서의 파동운동에 대한 해가 되는 입체파에 대한 방정식을 유도하고, 다음으로 두 층 사이의 계면에서의 경계조건을 도입하여, 층 사이의 결합법칙과 입체파의 중첩조건을 규정해야 한다. 각 층에서의 해석을 수행할 때 2 차원 운동 즉, 평면 내에서 발생하는 평면 변혈률과 운동 에 대해서만 해석을 수행한다. 이러한 평면운동과 비연성되어 있는 SH 모드는 따로 다루기로 한다.

2.2.1 무한, 탄성 고체의 평면파

무한 탄성 고체의 운동을 기술하는 방정식의 일반적인 방법은 밀도를 갖는 무한, 등방성, 탄성 고체의 미소 입방요소로 부터 유도를 시작하는 방법이다. 이를 위해 직교좌표계를 도입하고 좌표계 $x(x_1,\ x_2,\ x_3)$ 방향의 변위 $u(u_1,\ u_2,\ u_3)$ 를 정의한다. Newton 의 제 2 법칙을 적용하면 동적 평형에 대한 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
\rho\frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} &= \frac{\partial\sigma_{11}}{\sigma x_1}+\frac{\partial\sigma_{12}}{\sigma x_2}+\frac{\partial\sigma_{13}}{\sigma x_3}\\
\rho\frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} &= \frac{\partial\sigma_{21}}{\sigma x_1}+\frac{\partial\sigma_{22}}{\sigma x_2}+\frac{\partial\sigma_{23}}{\sigma x_3}\\
\rho\frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} &= \frac{\partial\sigma_{31}}{\sigma x_1}+\frac{\partial\sigma_{32}}{\sigma x_2}+\frac{\partial\sigma_{33}}{\sigma x_3}
\end{aligned} \tag{2.12}$$

여기서 $\sigma_{11},\sigma_{12},\ \cdots$ 는 입방체 표면에서 작용하는 응력 성분이고 t 는 시간을 나타낸다. 식 (2.12)는 매질의 운동을 표현하는 가장 기본적인 응력방정식이다. 위 식에 응력-변형률, 변형률-변위 관계식을 도입하면 변위에 관련된 항들로 방정식을 재구성할 수 있다. 응력과 변형률, 변형률과 변위 사이의 관계식은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
&\sigma_{11}=\lambda\nabla+2\mu\varepsilon_{11} && \sigma_{22}=\lambda\nabla+2\mu\varepsilon_{22} && \sigma_{33}=\lambda\nabla+2\mu\varepsilon_{33}\\
&\sigma_{12}=\mu\varepsilon_{12} && \sigma_{23}=\mu\varepsilon_{23} && \sigma_{13}=\mu\varepsilon_{13}\\
&\varepsilon_{22}=\frac{\partial u_2}{\partial x_2} && \varepsilon_{11}=\frac{\partial u_1}{\partial x_1} && \varepsilon_{33}=\frac{\partial u_3}{\partial x_3}\\
&\varepsilon_{12}=\frac{\partial u_1}{\partial x_2}+\frac{\partial u_2}{\partial x_1} && \varepsilon_{22}=\frac{\partial u_2}{\partial x_3}+\frac{\partial u_3}{\partial x_2} && \varepsilon_{13}=\frac{\partial u_1}{\partial x_3}+\frac{\partial u_3}{\partial x_1}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

여기서 λ, μ 는 Lame 상수의 탄성 강성상수이고 $\Delta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ 는 미소요소의 체적화(팽창)를 나타낸다.

식 (2.13)을 (2.12)에 대입하면 변위에 대한 방정식이 얻게되고

$$\rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} \right) + \mu \nabla^2 \partial u_1$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} \right) + \mu \nabla^2 \partial u_2 \tag{2.14}$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_3} \right) + \mu \nabla^2 \partial u_3$$

이를 벡터형태로 표현하면 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \nabla (\nabla \cdot u) + \mu \nabla^2 u \tag{2.15}$$

여기서 ∇ 는 벡터 연산자, ∇^2 은 스칼라 연산자로 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\nabla = \left(\hat{x}_1 \frac{\partial}{\partial x_1},\ \hat{x}_2 \frac{\partial}{\partial x_2},\ \hat{x}_3 \frac{\partial}{\partial x_3} \right) \qquad \nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^{\,2}},\ \frac{\partial^2}{\partial x_2^{\,2}},\ \frac{\partial^2}{\partial x_3^{\,2}} \right)$$

위 식은 직접 적분 할수 없는 식이다. 즉 해의 형태를 가정하고 미분과 대입을 통해 해의 적합성을 검토 해야한다. 여기서는 파면(wave front)이 파동 진행방향과 수직한 무한 평면이라 가정한다. 또한 파동 진행방향의 임의의 위치, 임의의 시간에서 모든 변위는 파면을 구성하는 평면 내에서 균일하다고 가정한다. 이로부터 균일 평면파를 정의할 수 있다. 위의 가정들에 의해 두 개의 해 즉 종파와 전단파(입체파)에 대한 해가 존재하게 된다. 종파의 입자운동은 파동의 진행 방향으로만 발생하고 파동은 체적의 변화에 의해서만 생성된다. 전단파의 입자운동은 파동 진행방향에 수직하고 파동은 체적 변화가 없는

매질의 회전에 의해서만 생성된다. 이에 대한 해를 벡터 형태로 나타낼수 있는 편리한 방법은 Helmholtz 방법을 도입하는 것이다. Helmholtz 방법에서는 종파를 스칼라함수 ϕ 로 나타내고 전단파는 벡터함수 H 로 나타내는데, 이때 H 의 방향은 파동의 전파방향, 입자의 운동방향 모두에 수직하다.

$$\phi = A_L e^{i(k\cdot x - \omega t)}$$
$$H = A_S e^{i(k\cdot x - \omega t)} \tag{2.16}$$

여기서 A_L 과 A_S 는 각각 종파, 전단파의 크기이고, k 는 파동수벡터, ω 는 주파수이다. 파동수벡터의 방향은 파동의 진행 방향과 동일하고 파동의 파장과 속도를 나타낸다.

$$Wavelength = \frac{2\pi}{|k|} \qquad Speed = c = \frac{\omega}{|k|} \tag{2.17}$$

식(2.16)을 일반화하기 위해 복소수 개념을 도입하여 파동의 크기 를 $A_L e^{i\varphi}$, $A_S e^{i\varphi}$ 로 표현할 수 있다. 여기서 φ 는 $x=0$, $t=0$ 에서의 파동의 위상이다. 변위장에 대한 식은 연산자를 도입하여 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$u = u_L \nabla\phi + u_S \nabla\times H \tag{2.18}$$

여기서 $\times$는 벡터적(vector cross product)을 나타내고, $\nabla\phi$ 는 팽창(종방향)운동, $\nabla\times H$ 는 균일체적(전단) 운동에 해당된다. 식 (2.18)을 식 (2.15)에 대입하면 파동 속도 c_1, c_2를 재료 특성으로 표현할 수 있다.

$$c_1 = \left(\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}\right)^{1/2} = \left[\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}\right]^{1/2} \tag{2.19}$$

$$c_2 = \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^{1/2} = \left[\frac{E}{2\rho(1+\nu)}\right]^{1/2} \tag{2.20}$$

여기서 E 는 영계수, ν 는 포아송비이다.

2.2.2 2 차원 공간의 평면파

다중 층을 갖는 평판 모델에서 파장은 평판과 파동장의폭보다 매우 작기 때문에 대부분 평면 응력해석이 타당하다고 가정한다. 따라서 좌표계는 파동 진행방향과 평판에 수직한 방향에 의해 규정되는 평면으로 축소될 수 있다. 해석의 편의를 위해 평판에 평행한 x_1 과 평판에 수직한 x_3 에 의해 평면을 정의 한다. 그림 1 에 편판의 좌표계를 X, Y, Z 로 나타내었다. 이로부터 x_1, x_2, x_3 는 각각 X, Y, Z 에 대응됨을 알 수 있다. 그림에 나타낸 층의 계면과 평판의 계면은 고려하지 않는다 $(\partial/\partial x_2 = 0)$. 또 해석을 간단히 하기 위해 모든 입자운동이 평면 내에서만 발생하는 $(u_2 = 0)$ 파동에 대한 모델만을 수립하고자 한다.

식 (2.18)로부터 종파와 전단파에 대한 변위를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$u_L = \nabla\phi = \begin{bmatrix} k_1 \\ 0 \\ k_3 \end{bmatrix} A_L e^{(k\cdot x - \omega t)} \tag{2.21}$$

$$u_S = \nabla \times H = \begin{bmatrix} \partial/\partial x_1 \\ \partial/\partial x_2 \\ \partial/\partial x_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ H_3 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_3 \\ 0 \\ k_1 \end{bmatrix} A_S e^{(k\cdot x - \omega t)} \tag{2.22}$$

여기서 벡터포텐셜 H 의 방향은 x_2 방향이므로 모든 입자운동은 평면 x_1, x_2 내에서 발생하게 된다.

2.2.3 평판 층의 평면파 중첩

종파와 전단 입체파를 중첩하고 각 층 사이의 계면에서 경계조건을 설정하면 적층평판의 파동운동에 대한 모델을 전개할 수 있다. 각 계면에는 8 개의 파동이 존재한다고 가정한다. 즉 계면의 상부로부터 들어와서 계면 하부에서 나가는 종파(팽창파)와 전단파(균일체적파)로 구성되는 4 개의 파동 $(L+,\ S+)$ 과, 계면의 하부로부터 들어와서계면 상부에서 나가는 파동으로 구성되는 4 개의 파동 $(L-,\ S-)$ 이 존재 한다. 따라서 각 층에는 4 개의 파동이 존재한다. Snell 의 법칙으로부터 파동이 상호작용하기 위해서는 각 계면에서 x_3 방향으로 동일한 주파수와 공간 특성을 갖는 것이 요구된다. 따라서 모든 변위, 응력방정식은 동일한 주파수와 동일한 파동수 $k_3(=\xi)$ 를 갖게 된다. 여기서 파동수 k_3 를 특별히 평판파동수 (plate wave number)라 하는데 이는 입체파의 파동수를 계면에 투영한 파동수 이다. 따라서 모든 층의, 위치에서의 방정식은 다음과 같은 인자 F 를 포함하게 되는데 이 인자는 시스템 내에서 불변이다.

$$F = e^{\xi x_3 - \omega t} \tag{2.23}$$

위식에 의해 입사각, 층 내에서의 균일 입체파의 투과와 반사는 입체파 속도에 따라 제한조건을 갖게 된다.

$$\frac{\xi}{\omega} = \frac{1}{c_{ph}} = \frac{\sin(\theta_L)}{c_1} = \frac{\sin(\theta_S)}{c_2} \tag{2.24}$$

여기서 θ_L 와 θ_S 는 종방향, 전단방향 입체파가 전파될 때 층의 수직방향 (x_1) 과 이루는 각도를 나타낸다. 불변 속도 c_{ph} 는 입체파 속도를 x_3 방향으로 투영한 속도로 전파되는 파동의 위상 속도에 해당된다. 각 층에서 입체파의 k_1 성분은 평판파동수 $(\xi = k_3)$ 와 재료의 입체파 속도 c_1, c_2 의 함수로 표현할 수 있다.

$$k_{1L\pm} = \pm\left(\frac{\omega^2}{c_1{}^2} - \xi^2\right)^{1/2}, \quad k_{1S\pm} = \pm\left(\frac{\omega^2}{c_2{}^2} - \xi^2\right)^{1/2} \tag{2.25}$$

위식에서 $+$ 와 $-$ 는 각각 양(+)의 방향(아래방향), 음(-)의 방향으로 진행하는 파동을 나타낸다. 만약 $\omega^2/c_1{}^2$ 이 ξ^2 보다 크면 k_1 은 허수가 되고 파동은 x_3 방향으로 불균일 또는 소멸 파동이 되어 x_1 방향의 크기가 점차 감소하게 된다. 따라서 어떤 층의 임의의 위치에서의 변위와 응력은 입체파의 크기로부터 구할 수 있다. 즉 입체 종파의 경우 관계식은

$$u_1 = \pm\zeta_1 A_{L\pm} F e^{\pm i\zeta_1 x}$$

$$u_3 = \xi A_{L\pm} F e^{\pm i\zeta_1 x}$$

$$\sigma_{11} = i\rho\left(\omega^2 - 2c_2^2\xi^2\right) A_{L\pm} F e^{\pm i\zeta_1 x}$$

$$\sigma_{22} = i\rho\omega^2\left(1 - 2c_2^2 / c_1^2\right) A_{L\pm} F e^{\pm i\zeta_1 x}$$

$$\sigma_{33} = i\rho\left(\omega^2 - 2c_2^2\zeta_1^2\right) A_{L\pm} F e^{\pm i\zeta_1 x}$$

$$\sigma_{13} = 2i\rho c_2^2 \xi\zeta_1 A_L F e^{i\zeta_1 x}$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{23} = 0$$

이고 여기서 $\zeta_1 = \left(\omega^2/c_1^2 - \xi^2\right)^{1/2}$ 이다.

입체 전단파의 경우

$$u_1 = -\zeta A_{S\pm} F e^{\pm i\zeta_2 x}$$

$$u_3 = \pm\zeta_2 A_{S\pm} F e^{\pm i\zeta_2 x}$$

$$\sigma_{11} = \mp 2i\rho c_2^2 \xi \zeta_2 A_S F e^{i\zeta_2 x}$$

$$\sigma_{22} = 0$$

$$\sigma_{33} = -\sigma_{11}$$

$$\sigma_{13} = i\rho\left(\omega_2{}^2 - 2c_2^2\xi\right) A_{S\pm} F e^{\pm i\zeta_2 x}$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{23} = 0 \qquad (2.26)$$

이고 여기서 $\zeta_2 = \left(\omega^2/c_2^2 - \xi^2\right)^{1/2}$ 이다.

따라서 어떤 층의 임의의 위치에서의 변위와 응력은 그 층에 존재하는 4 개의 파동성분을 합하여 구할 수 있다. 다중 층의 경우 관심 있는 물리량은 계면에서 반드시 연속이어야 한다. 즉 두 변위 성분 $u_{1,}\ u_3$ 와 수직응력 σ_{11} , 전단응력 σ_{13} 는 반드시 연속성을 가져야 한다. 해석의 편의를 위해 다음과 같은 대체 변수를

$$g_{\zeta_1} = e^{i\zeta_1 x_1} \qquad g_{\zeta_2} = e^{i\zeta_2 x_1} \qquad (2.27)$$

도입하고 인자 F 를 제거하면 임의의 층에서 변위와 응력을 다음과 같은 행렬 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ u_3 \\ \sigma_{11} \\ \sigma_{13} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_1 g_{\zeta_1} & -\zeta_1/g_{\zeta_1} & -\xi g_{\zeta_2} & -\xi/g_{\zeta_2} \\ \xi g_{\zeta_1} & \xi/g_{\zeta_1} & \zeta_2 g_{\zeta_2} & -\zeta_2/g_{\zeta_2} \\ i\rho\left(\omega^2 - 2c_2^2\xi^2\right) g_{\zeta_1} & i\rho\left(\omega^2 - 2c_2^2\xi^2\right)/g_{\zeta_1} & -2i\rho\xi c_2^2\zeta_2 g_{\zeta_2} & 2i\rho\xi c_2^2\zeta_2/g_{\zeta_2} \\ 2i\rho\xi c_2^2\zeta_1 g_{\zeta_1} & -2i\rho\xi c_2^2\zeta_1/g_{\zeta_1} & i\rho\left(\omega^2 - 2c_2^2\xi^2\right) g_{\zeta_2} & i\rho\left(\omega^2 - 2c_2^2\xi^2\right)/g_{\zeta_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_{L+} \\ A_{L-} \\ A_{S+} \\ A_{S-} \end{Bmatrix} \qquad (2.28)$$

식 (2.28)은 임의의 층에서의 파동의 크기와 변위, 응력 사이의 관계를 규명하면 식이다. 형렬의 계수는 평판의 x_1 방향(두께 방향) 위치와 층을 구성하는 재료의 성질 $\left(\rho,\ c_1\ ,\ c_2\right)$, 주파수 $\left(\omega\right)$ 그리고 불변의 평판파동수 $\left(\xi = k_3\right)$에 따라 달라 달라진다. 여기서 x_1 좌표의 원점은 임의의 위치에 지정할 수 있고 각 층마다 달리 설정할 수 있는데 그이유는 각 층 사이의 위상차는 복소수 파동 진폭의 위상에 의해 보상 될 수 있기 때문이다. 식 (2.28)의 행렬을 기호$\left[D\right]$로 표시하기로 한다.

2.2.4 다층 구조에서의 유도초음파 해석을 위한 전역행렬 모델

각 재료 층과 각 계면의 경계 조건을 만족하는 전체시스템을 묘사하기 위해 전역행렬법을 사용한다. 이방법은 1964 년에 Knopoff 에 의해 처음 제안되었고 [11] 그 뒤 Randall [12]과 Schmidt [13]등에 의해 다중 층 시스템에 적용되기 시작하였다. 일반적으로 사용되는 Thomson-Haskel 전달행렬 기법과 비교해 볼 때 [14, xx]이 방법은 주파수-두께의 곱이 커져도 해가 안정해지는 장점을 갖고 있다. 또한 전역행렬 방법은 실수, 복소수 파동수, 공기, 유체, 또는 고체 반공간, 모드 또는 응답 해에 대해 동일한 기저행렬을 사용할 수 있다. 장점으로는 시스템을 구성하는 층의 수가 많아지면 전역행렬이 커지게 되고 해를 구하는 속도가 느려지는 점을 들 수 있다. [6]

제 3 장 FRP-콘크리트 다층 구조에서의 유도초음파 모드 감쇠 분석

본연구에서는 전역행렬을 이용한 다층구조 모델링을 하였으며 이로부터 구한 분산곡선을 비교 분석하여 유도초음파의 모드감쇠 분석을 하였다. 결과를 바탕으로 FRP-콘크리트의 박리 손상 탐지에 유리한 모드와 유효 주파수를 선정하고자 한다.

3.1 FRP-콘크리트 다층구조의 전역행렬 모델링

본 연구에서는 유도초음파의 모드 해석을 위해 수치해석적 방법을 이용하여 모드의 특성을 분석하고자 한다. 이를 위하여 FRP-Epoxy-Concrete 로 구성된 다층 파동 전파 시스템으로 고려하여 모델링을 하였다. 한편, FRP 부착 공법에서 Epoxy 와 같은 접착제를 사용하여 FRP 판을 부착하는 과정에서 Epoxy 의 도포량은 통상 0.1mm 에서 0.3mm 정도로 도포하는 것이 적당하다고 알려져 있으나[3], 실제 시공 과정에서 정확하게 도포 두께를 조절하기가 어렵다. 본 연구에서는 박리 발생시 부착 상태에 영향이 큰 부분인 Epoxy 의 영향을 고려하고자 Epoxy 의 두께가 모드 감쇠에 미치는 영향을 분석 하였으며, 이를 위하여 해석 과정에서 Epoxy 의 두께를 0mm, 0.1mm, 0.2mm, 0.3mm 로 변화를 주었다.

또한 시스템을 구성하고 있는 각각의 재료의 물성치는 Table 3.1 에 표기하였으며 다층시스템에서 유도초음파가 감쇠되는 요인에는 사용 재료의 재료감쇠 (Material damping)에 의한 요인과 유도초음파의 투과 손실 (Transmission loss or Leakage loss)에 의한 감쇠 요인으로 나뉘어서 생각할 수 있다. 특히 유도초음파 투과 손실은, 경계조건의 변화에 따라서 손실 정도(즉, 감쇠 정도)가 달라지는 특성이 있으며, 이러한 특성을 이용한 박리 탐지 기술을 개발하고자 한다. 이에 따라 재료감쇠가 유도초음파의 감쇠에 미치는 영향을 배제하고, 투과 손실에 의한 감쇠만을 순수하게 분석하기 위해 모델링 과정에서 재료감쇠는 고려하지 않았다. 마지막으로 유도초음파 중 상하면이 자유 경계 조건을 가지는 판에서 발생하는 파를 Lamb 파라 하며, 판전체의 변형형상을 나타내는 대칭 및 역대칭 모드를 가진다. 또한, 자유 경계면에서 무수한 반사를 통해 일정한 파군 형성하면서 진행하게 되는 것이 특징이며, 본 연구에서는 다양한 모드 중에서, 일반적으로 비파괴검사 시에 많이 사용하는 Lamb 파의 최저차 모드인 A0 (Anti-symmetry), S0 (Symmetry) 모드 만을 해석 대상 모드로 고려하였다.

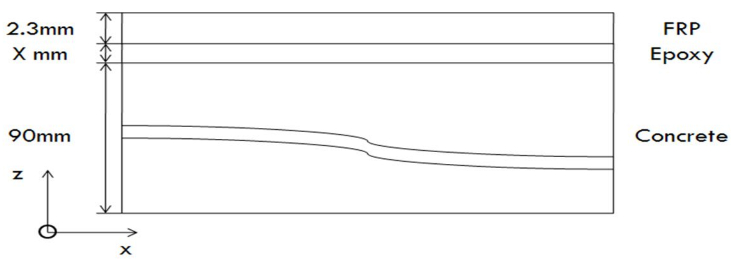


Fig. 3.1 FRP-Epoxy-Concrete Model

Table 3.1 Material property			
	ρ (kg/m^3)	ν	E (GPa)
GFRP	**1500**	**0.25**	**9.9**
Epoxy	**1100**	**0.39**	**6.3**
Concrete	**2300**	**0.3**	**43.8**

FRP-Epoxy-Concrete 다층구조 시스템의 유도초음파 모드 해석을 위하여 본 연구에서는 전역행렬법을 이용하였다. 다층 시스템의 각 층마다 변위장과 응력장에 대한 식을 이용하여 부분파 크기에 대한 6 x 6 인 행렬 방정식을 구성할 수 있다. 이 행렬 방정식을 다층구조시스템에 각 층마다 적용시켜 주며, 각 층의 계면에서의 경계조건을 만족을 시켜주어 전체시스템 모든 물리적 특성을 하나의 행렬식으로 구현하면 다음과 같다.

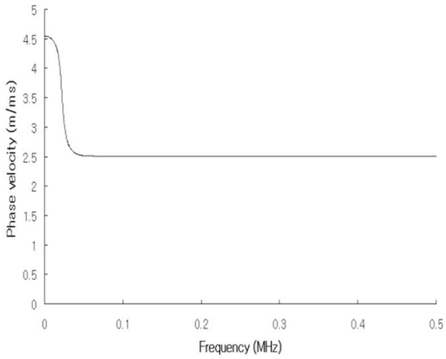
$$[\mathrm{G}]\{\mathrm{A}\} = 0 \qquad 식(3.1)$$

여기서 [G]는 전역행렬이고 {A}는 부분파 크기로 구성되는 벡터이다. 식(3.1)을 만족 시키기 위해서는 전역행렬의 행렬식 (determinant)이 0 인 조건이 만족하는 주파수, 파수, 감쇠의 값들을 찾는다. 본연구에서는전역행렬식의 해를 찾기 위해서 상용해석프로그램인 DISPERS를 이용하였다.[6]

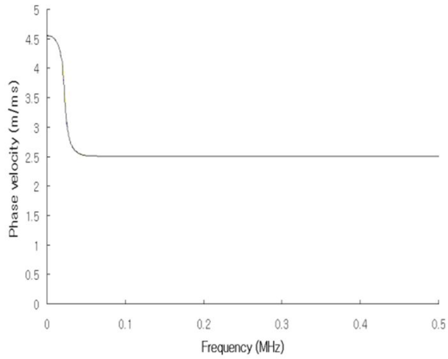
3.2 유도초음파 모드 해석 결과 및 분석

3.2.1 FRP의 두께에 따른 특성

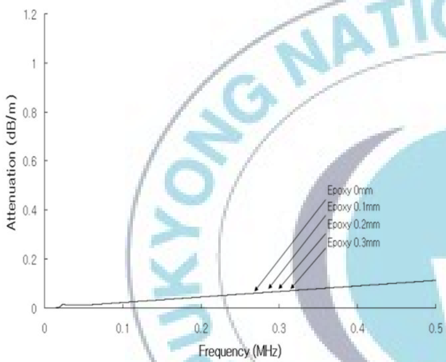
GFRP 의 두께에 따라 변화하는 모드의 특성을 알아보기 위하여 FRP 의 두께를 각각 2.3mm, 1.6mm 로 구분하여 해석 케이스를 나누었다.



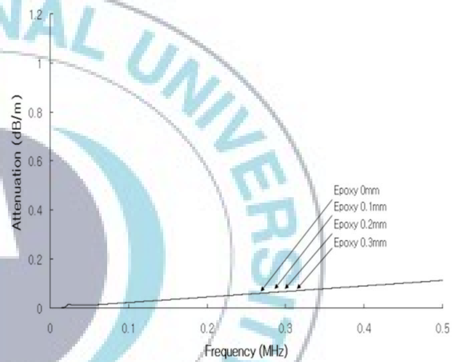
Phase velocity



Phase velocity



Attenuation

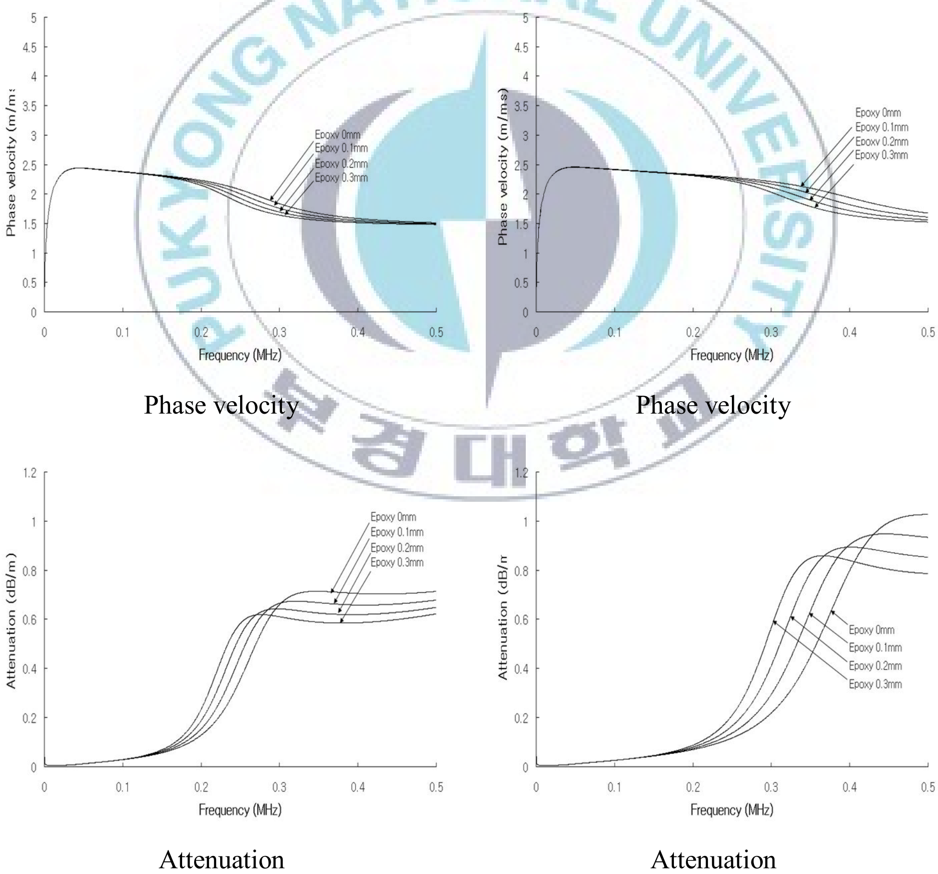


Attenuation

Fig . 3.2 Dispersion Curves of S0 mode (left: FRP tickness:2.3mm, right: 1.6mm)

Fig 3.2 는 다양한 Epoxy 두께에 대한 FRP- Epoxy-Concrete 시스템의 S0 모드 해석 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, S0 모드는 주파수가 증가할 때, 감쇠도 점진적으로 증가하는 경향이 있음을 확인할 수 있으며, 또한 Epoxy 두께가 S0 모드의 감쇠에 미치는 영향은 거의 없다는 것을 확인할 수 있다 또한, 300kHz 까지의 주파수 대역에서 S0 모드의 최대 감쇠 값은 0.1 dB/m 정도로 매우 낮은 감쇠를 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 FRP 판에서 전파되는 S0 모드가 에폭시층과 콘크리트 층으로 투과되는 정도가 크지 않고, 대부분의

파동에너지가 FRP 층으로 전달된다는 것을 의미한다. 따라서, 파동에너지의 대부분이 FRP 판으로 전파가 되기 때문에, FRP 보강판이 콘크리트에서 박리가 되더라도, 투과손실에 의한 감쇠의 차이는 크지 않을 것을 예상할 수 있으며, 이로부터 박리 손상에 대한 민감도 측면에서 S0 모드가 박리 손상 탐지에 적당하지 않을 수 있다는 추측이 가능하다. 또한 FRP 판 두께에 변화에 따른 감쇠의 크기 차이가 나타나지 않으며 각각의 값들이 일치 하는 것으로 보아 FRP 의 두께는 S0 모드에 영향을 끼치지 않는 것을 확인 할 수 있었다.



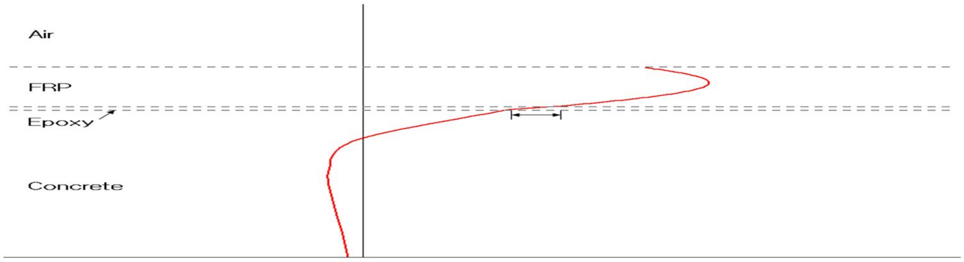
Phase velocity　　Phase velocity

Attenuation　　Attenuation

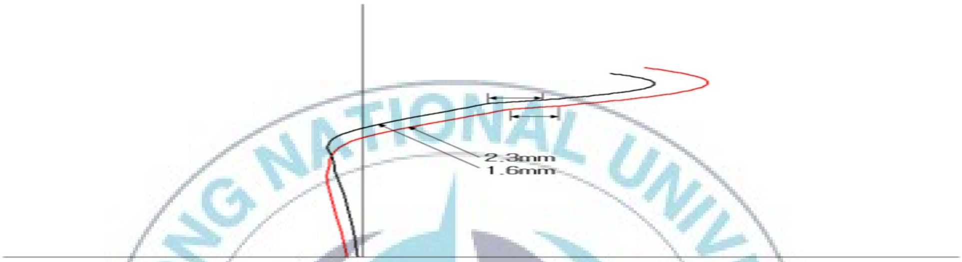
Fig . 3.3 Dispersion Curves of A0 mode (left: FRP tickness:2.3mm, right: 1.6mm)

Fig . 3.3 은 다양한 Epoxy 두께에 대한 FRP- Epoxy-Concrete 시스템의 A0 모드 해석 결과이다. A0 모드의 경우 S0 모드와는 다르게 Epoxy 의 두께 변화에 따른 위상속도, 감쇠, 군속도의 차이가 나타나는 것을 확인 할 수 있다. A0 모드의 경우 Epoxy 의 두께와 상관없이 저주파수 대역에서는 주파수의 증가에 따른 감쇠의 증가율이 높지 않으나, 100kHz~200kHz 부근에서 감쇠가 매우 급격하게 증가하다가, 고주파 대역에서 매우 완만한 변화를 보이는 것을 알 수 있다. 특히, A0 모드의 경우 100kHz 보다 큰 주파수 대역에서는 S0 모드에 비하여 감쇠가 매우 커지며, 이는 파동에너지의 투과가 FRP 층에서 콘크리트 층으로 매우 활발하게 일어난다는 것을 의미한다. 따라서 FRP 층이 박리되었을 경우 감쇠의 차이가 S0 모드에 비하여 많이 발생할 것으로 예상할 수 있으며, 이는 박리 손상 탐지의 민감도 측면에서 A0 모드가 S0 모드에 비하여 유리하다는 것을 의미한다. 한편, A0 모드의 감쇠에는 Epoxy 층의 두께가 매우 큰 영향이 있다. 즉, 저주파수 대역에서는 Epoxy 층의 두께 차이가 감쇠에 미치는 영향은 거의 없으나, 고주파대역으로 주파수가 증가할수록 감쇠에 미치는 영향이 매우 커지는 것을 알 수 있다. 또한 Fig 3.3 의 감쇠분산 곡선을 비교해 보면 FRP 의 두께가 작을수록 감쇠의 크기는 커지며 최대 감쇠가 나타나는 주파수대역이 높아지는것을 확인 할 수 있었다. 따라서 FRP 의 두께는 Concrete 층보다 상대적으로 작은 두께를 가졌으며 이러한 파동 전달 시스템에서는 FRP 의 두께가 작을수록 A0 모드는 Epoxy-Concrete 층의 영향을 더 많이 받으며 또한, FRP 층에서 손실되는 파동에너지가 더 커진다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 A0 모드를 박리 탐지에 적용할 경우, 유도초음파의 가진주파수 선정

시에 Epoxy 두께와 FRP 의 두께에 대한 고려가 필요하다는 것을 의미한다. 그러나, 아래 감쇠 그래프를 보면 300kHz 에서 500kHz 사이의 주파수 대역에서는 주파수에 따른 감쇠의 변화가 심하지 않기 때문에, 가진 주파수 선정 과정에서 Epoxy 의 두께를 알 수 없는 경우에는, 이 대역의 주파수를 사용하는 것이 감쇠 측정에 있어서 상대적으로 안정적일 것이라고 판단 된다. 한가지 유의해야 할 점은 300kHz-500kHz 주파수 대역의 경우, 투과에 의한 감쇠가 GFRP 두께가 2.3mm 경우 평균 약 0.65 dB/m 이며, FRP 두께가 1.6mm 경우 평균 약 0.93 dB/m 로 다른 대역에 비하여 상대적으로 큰 감쇠를 나타내므로, 유도초음파의 전파거리가 상대적으로 짧아질 수 있으며, 이는 탐지 가능 영역의 크기에 제한이 다른 주파수 대역에 비하여 클 수 있다는 것이다.

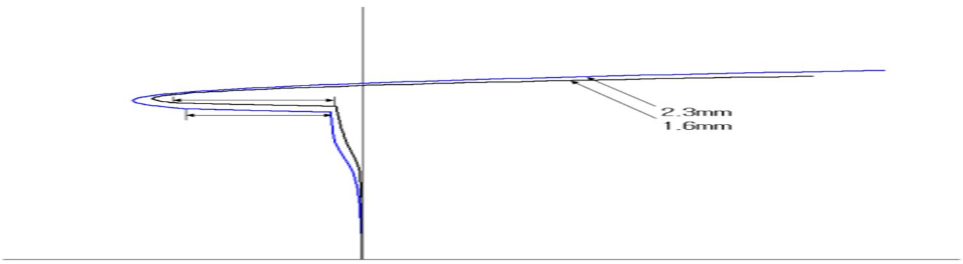


S0 Mode shape of FRP thickness : 2.3mm



S0 Mode shape of FRP tickness 2.3mm VS 1.6mm

A0 Mode shape of FRP thikness : 2.3mm



A0 Mode shape of FRP tickness 2.3mm VS 1.6mm

Fig. 3.4 Mode shape in frequency 300 kHz

Fig 3.4 는 각 모드들의 모드 형상을 나타낸 그림이다. Fig 3.4 위의 그래프는 GFRP 두께가 2.3mm 일 때 최대감쇠가 일어나는 약 300kHz 대역에서 두께방향의 S0 의 모드 형상이며, Epoxy 층에서의 상대 변위를 표시하였다. FRP 층에서 파동 에너지 전달이 이루어 지며, Epoxy 층으로 투과되는 에너지가 적은 것을 볼 수 있다. Fig. 3.4 아래 그래프는 FRP 두께가 1.6mm 일 때 최대감쇠가 나타나는 400kHz 대역에서의 두께방향의 모드형상과 FRP 두께가 2.3mm 일 때의 모드형상 비교이다. 2.3mm 때와 마찬가지로 Epoxy 에서 나타나는 상대 변위가 적으며 또한 상대 변위 차이도 적게 나타나는 것을 알 수 있다 여기서, S0 모드의 감쇠가 FRP 의 두께에 대한 영향을 받지 않음을 알 수 있다. FRP 두께가 2.3mm 일 때의 A0 모드형상과 비교 하여 보았을 때 1.6mm 일 때의 A0 모드형상에서 Epoxy 에서의 상대 변위는 2.3mm 보다 크게 나왔으며 FRP 두께가 작을수록 Epoxy 층으로 빠져나가는 투과 에너지가 많으며 또한, S0 모드 모드 형상과 비교하였을 때도 A0 모드가 S0 모드보다 빠져나가는 투과 에너지가 더 큰 것을 확인 할 수 있었다.

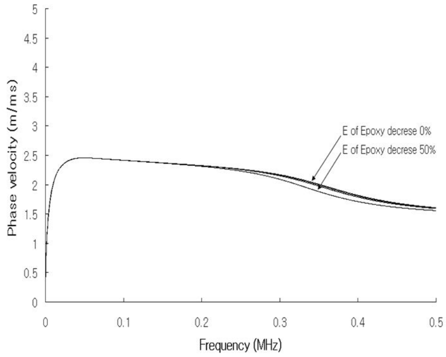
3.2.2 FRP 의 물성 변화에 따른 특성

FRP 판을 Concrete 표면에 부착시키기 위해서는 Epoxy 와 같은 접착제를 이용하여 부착시킨다. Epoxy 는 보통 온도의 영향에 따라 역학적 특성이 달라지는 것으로 알려져 있다. 이는 외부 환경조건에 따라 Epoxy 의 역학적 특성이 달리짐을 의미하며 또한 Epoxy 는 반응성이 매우 좋기 때문에 현장에서 시공 할 때 Epoxy 의 사용성을 높이기 위해선 경화제를 함께 사용 하여야 한다.

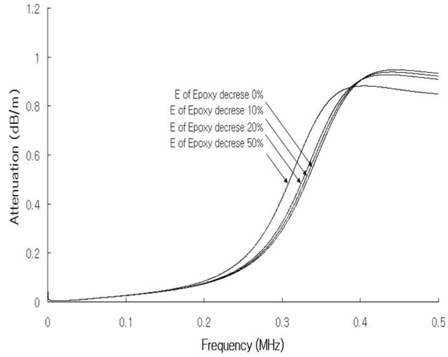
사용하는 경화제의 종류, 배합비에 따라 Epoxy 의 역학적 성질도 다양하게 변한다. 따라서, Epoxy 의 탄성계수에 대한 정확한 값을 알기 어려울 경우 Epoxy 의 탄성계수 변화에 따른 모드 특성을 고려해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 Epoxy 의 탄성계수를 0%, 10%, 20%, 50% 감소시켜 해석을 수행하였으며, 자세한 사항은 Table 3.2 에 표기하였다.

Table 3.2 Case of Analysis

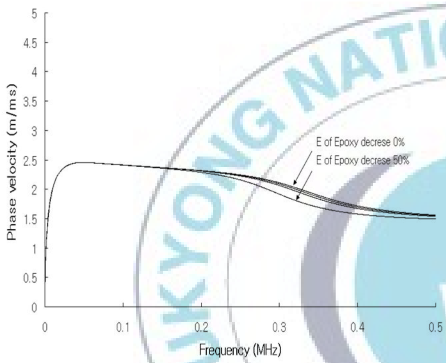
<table>
<tr><th>GFRP Thickness</th><th>Case</th><th>Epoxy thickness (Xmm)</th><th>Decrease ratio</th><th>E (GPa)</th></tr>
<tr><td rowspan="12">1.6mm</td><td rowspan="4">1</td><td rowspan="4">0.1mm</td><td>0%</td><td>6.3</td></tr>
<tr><td>10%</td><td>5.67</td></tr>
<tr><td>20%</td><td>5.04</td></tr>
<tr><td>50%</td><td>3.15</td></tr>
<tr><td rowspan="4">2</td><td rowspan="4">0.2mm</td><td>0%</td><td>6.3</td></tr>
<tr><td>10%</td><td>5.67</td></tr>
<tr><td>20%</td><td>5.04</td></tr>
<tr><td>50%</td><td>3.15</td></tr>
<tr><td rowspan="4">3</td><td rowspan="4">0.3mm</td><td>0%</td><td>6.3</td></tr>
<tr><td>10%</td><td>5.67</td></tr>
<tr><td>20%</td><td>5.04</td></tr>
<tr><td>50%</td><td>3.15</td></tr>
</table>



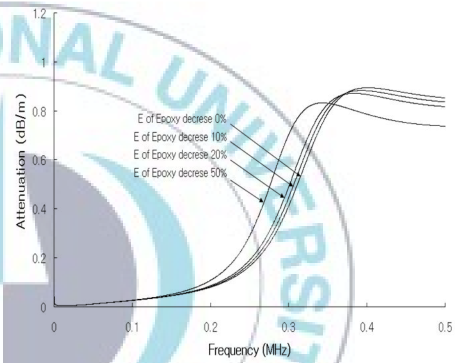
Phase velocity Epoxy tickness: 0.1mm



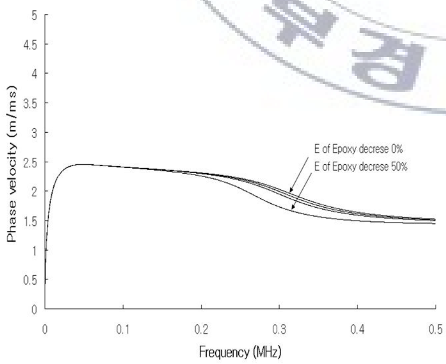
Attenuation Epoxy tickness: 0.1mm



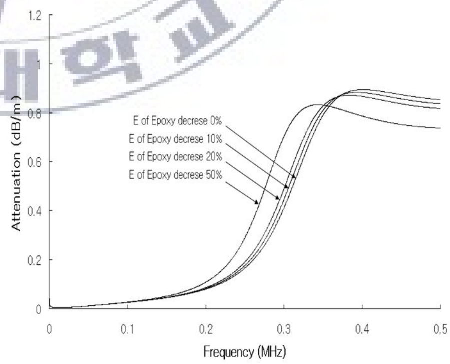
Phase velocity Epoxy tickness: 0.2mm



Attenuation Epoxy tickness: 0.2mm



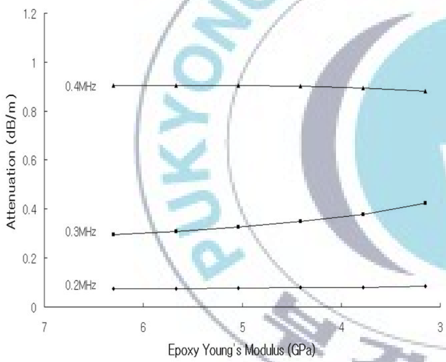
Phase velocity Epoxy tickness: 0.3mm



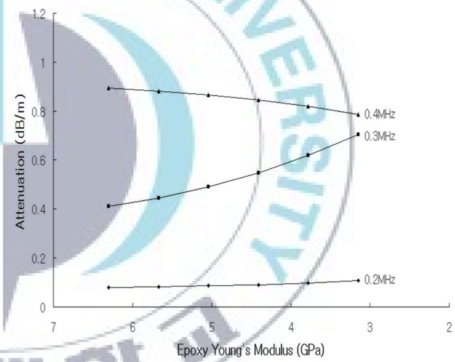
Attenuation Epoxy tickness: 0.3mm

Fig. 3.5 A0 mode dispersion curves (Up: Epoxy tickness: 0.1mm, Middle: 0.2mm, Down: 0.3mm)

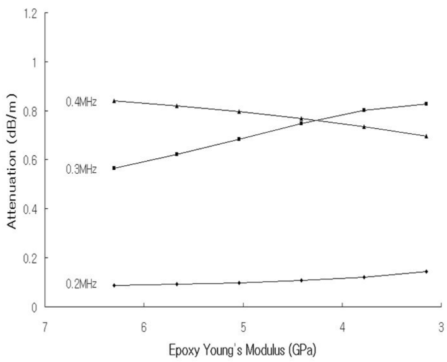
Fig . 3.5 는 Epoxy 탄성계수 변화에 따른 A0 모드의 위상 속도, 감쇠 분산 곡선을 나타내었다. Epoxy 의 두께가 두꺼울수록 Epoxy 의 탄성계수 변화에 따른 감쇠의 변화량이 민감한 것을 알 수 있으며 또한 탄성계수가 줄어들 수록 최대 감쇠는 커지는 것을 알 수 있다. 이처럼 Epoxy 의 탄성계수의 변화에 따라 모드의 감쇠가 다르게 나타난다. Epoxy 의 탄성계수의 정확한 값을 알지 못한다면 같은 조건의 실험라도 서로 다른 데이터 결과 값을 얻을 수 있다는 의미이다. 따라서 Epoxy 의 탄성계수 변화에 대한 영향이 비교적 적은 주파수 대역을 선정하는 것이 박리탐지 하기에 유리할 것으로 판단된다.



Epoxy thickness is 0.1mm



Epoxy thickness is 0.2mm



Epoxy thickness is 0.3mm

Fig. 3.6 Epoxy Yong's modulus vs attenuation in epoxy thickness

Fig. 3.6 은 다양한 Epoxy 두께에 대한 Epoxy 탄성계수 별 감쇠 크기를 나타었다. 감쇠의 차이가 나나타는 약 200kHz~ 400kHz 대역까지 100kHz 단위로 나누어 동일한 주파수에서의 감쇠 크기를 나타 내었다. Epoxy 두께에 따라 서로 다른 감쇠율을 가지게 되며 선형적이지 않다. 또한 Epoxy 두께와는 상관 없이 200kHz 대역에서 감쇠의 크기차이가 가장 낮으며, 반면 300kHz 와 400kHz 의 경우 Epoxy 의 두께가 두꺼울 수록 탄성계수의 변화가 감쇠율에 미치는 영향이 더 큰 것으로 판단 된다. 한편 Epoxy 탄성계수 변화에 영향이 비교적 200kHz 대역이 박리탐지에 유리하나 200kHz 대역의 경우 감쇠가 증가하는 대역이기 때문에 박리탐지에 불리하다. 따라서 중심 주파수 선정시 최대 감쇠가 일어나며 감쇠의 크기 차이가 다른 대역에 비해 일정한 400kHz 대역 구간이 Epoxy 탄성계수 변화에 따른 모드 특성이 300kHz 대역보다 유리하다.

3.2.3 FRP의 재질 변화에 따른 특성

FRP 의 경우 어떠한 섬유를 혼합하여 만드느냐에 따라 역학적 특성이 달라지며 보통 유리계열 섬유를 혼합하여 만든 GFRP 와 탄소계열 섬유를 혼합하여만든 CFRP 로 구분된다. CFRP 는 GFRP 복합재료에 비하면 우수한 특성을 가지고 있다. 다만 가격면에서 GFRP 가 상대적으로 저렴하다. 아래의 Table. 3.3 는 Meier 와 Winstorfer (1995) 에 의한 제시한 GFRP 와 CFRP 의 특성을 나타내고 있다.[15] Table 3.4 을 보면 알 수 있듯이 CFRP 의 경우 GFRP 보다 가격면을 제외하곤 물리적 특성이 GFRP 보다 상대적으로 뛰어나다는 것을 알 수 있다. 그 중 탄성계수의 경우 10 배 이상의 차이를 가지고 있으며 알칼리

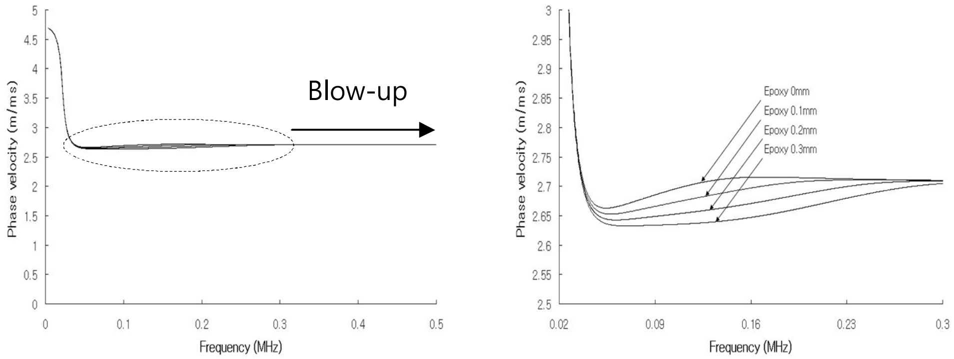
저항성이 뛰어나 알칼리성인 Concrete 구조물에 대해 보다 높은 보강성능을 기대할 수 있다. 시스템을 구성하고 있는 각각의 재료의 물성치는 Table. 3.4 에 나타내었다. 해석 방법 및 Epoxy 와 Concrete 물성치는 GFRP 해석과 동일하다.

Table 3.3 Material property

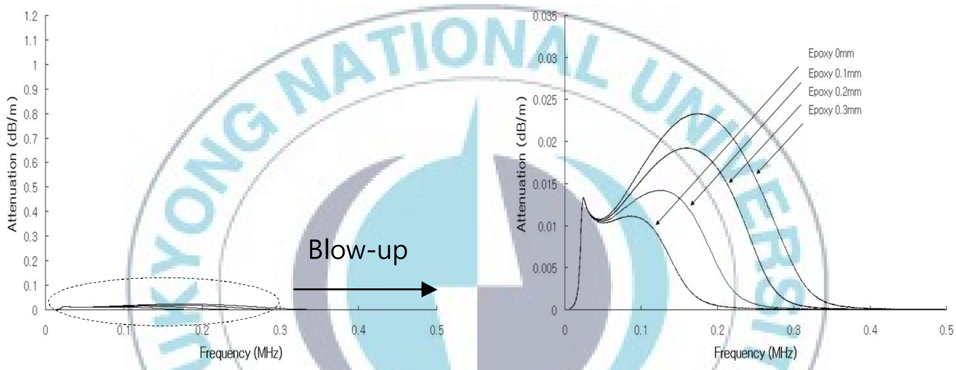
Material property			
	ρ (kg/m^3)	ν	E (GPa)
CFRP	**1571**	**0.38**	**157.6**
Epoxy	**1100**	**0.39**	**6.3**
Concrete	**2300**	**0.3**	**43.8**

Table 3.4 E-glass fiber VS Carbon fiber

Criterion	**Fibre composite sheets made of**	
	E-glass fiber	**Carbon fiber**
Tensile strength	Very good	Very good
Compressive strength	Good	Very good
Young's modulus	Adequate	Very good
Long-term behaviour	Adequate	Very good
Fatigue behaviour	Adequate	Excellent
Bulk dencity	Adequate	Good
Alkaline resistance	Inadequate	Very good
Price	Very good	Adequate



Phase velocity

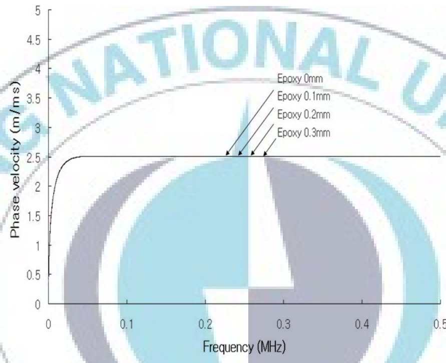


Attenuation

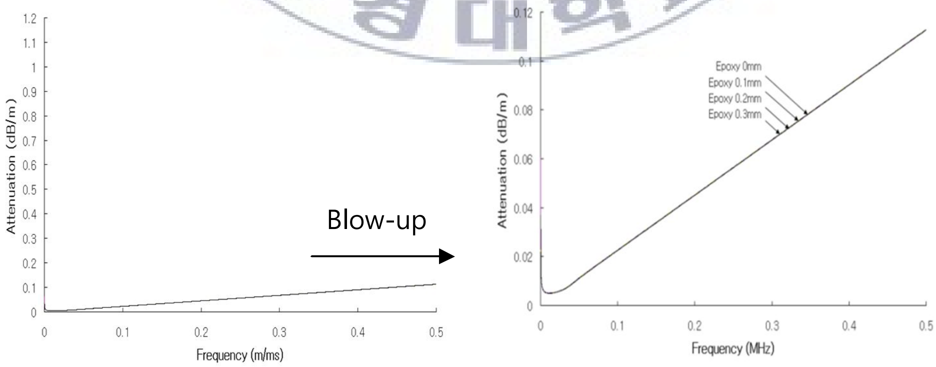
Fig. 3.7 Dispersion curves of S0 mode

Fig 3.7 은 다양한 Epoxy 두께에 대한 CFRP- Epoxy-Concrete 시스템의 S0 모드의 분산 곡선이다. Fig 3.7 를 살펴 보게되면 S0 모드는 주파수가 증가함에 따라 Epoxy 두께에 따른 차이가 0.3 MHz 대역까지 나타나는 것을 알 수 있으며, 주파수가 0.3 MHz 이상 증가하면 위상속도가 약 2.70 m/ms 인 Concrete 체적파 속도로 수렴하여 Epoxy 의 두께에 대한 차이가 없다. 0.1~0.3MHz 대역에서 Epoxy 두께 변화는 S0 모드의 감쇠에 영향을 준다. Epoxy 의 두께가 두꺼울수록 감쇠의 크기가 커지며 최대 감쇠가 나타나는 주파수 대역이 높은 것을 확인 할 수 있다.

또한 Epoxy 두께의 영향으로 발생되는 감쇠의 차이는 박리가 발생 하였을 경우 S0 모드의 감쇠 민감도를 높여준다. 또한 감쇠의 크기가 A0 모드보다 상대적으로 낮아 장거리 전파의 이점도 가질 수 있다. 반면, 0.3MHz 이후 주파수 대역에서는 Concrete 체적파에 수렴하면서 감쇠가 일어나지 않으며, 따라서, 보강판 박리 탐지에 S0 모드를 사용 할 경우 0.1~0.3MHz 의 대역을 사용하는 것이 박리 탐지에 유리할 것으로 판단된다.



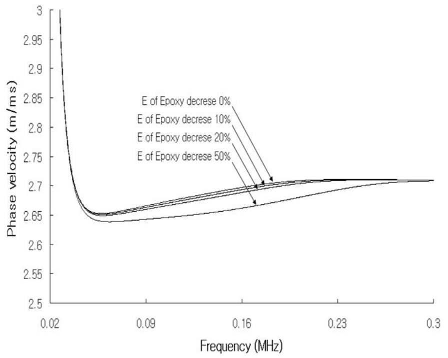
Phase velocity

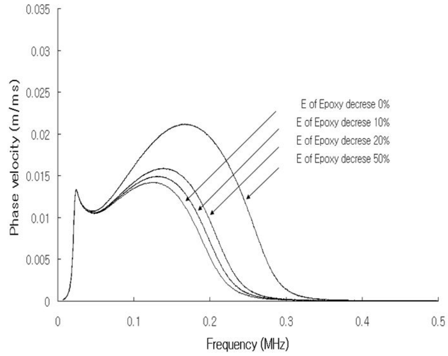


Attenuation

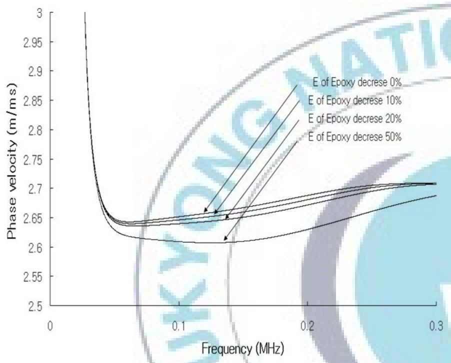
Fig .3.8 Dispersion curves of A0 mode

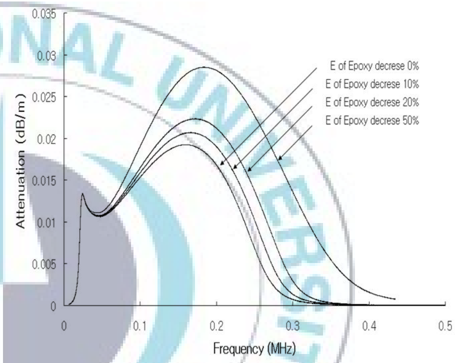
Fig 3.8 은 다양한 Epoxy 두께에 대한 CFRP- Epoxy-Concrete 시스템의 A0 모드 분산 곡선이다. Fig 3.8 위의 그래프는 A0 모드의 위상 속도 분산 곡선이며 A0 모드는 주파수가 증가할 때, 위상속도가 Concrete Rayleigh 파 속도인 약 2.50m/ms 로 수렴하며, Epoxy 두께에 대해 일정한 위상 속도 값을 가진다. Fig 3.8 아래 그래프는 A0 모드의 감쇠 분산 곡선이다. 주파수가 증가함에 따라 A0 모드의 감쇠는 저주파수 대역부터 점진적으로 증가를 하며, 이는 누설 Rayleigh 파의 특징과 같다. 0.5MHz 까지의 주파수 대역에서 A0 모드의 최대 감쇠 값은 0.11 dB/m 의 감쇠를 나타낸다. 또한, Epoxy 두께에 따른 감쇠 크기가 같으므로 Epoxy 두께는 A0 모드의 감쇠에 영향을 주지 않는다. 따라서, FRP 보강판이 콘크리트에서 박리가 되더라도, A0 모드는 투과손실에 의한 감쇠의 차이가 크지 않을 것을 예상할 수 있으며, 이로부터 박리 손상에 대한 감쇠 민감도 측면에서 A0 모드가 박리 손상 탐지에 적당하지 않을 수 있다. 이와 같이 FRP 부착 콘크리트의 유도초음파 모드 특징은 GFRP 와는 다른 특징을 가진다. GFRP 의 경우 Epoxy 의 두께 변화가 S0 모드에 미치는 영향은 적고 A0 모드에 미치는 영향이 많은 것으로 나타났지만 Fig 3.7~3.8 을 살펴보게 되면 S0 모드가 Epoxy 의 두께에 따라 영향을 받으며 A0 모드는 두께에 따라 영향을 받지 않는 것으로 나타난다.



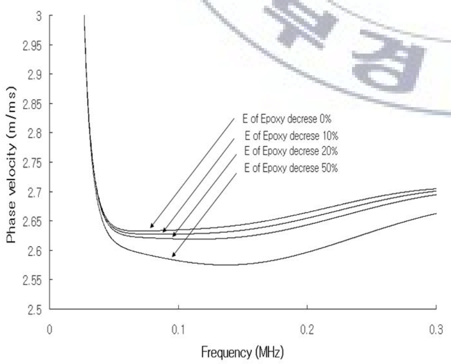


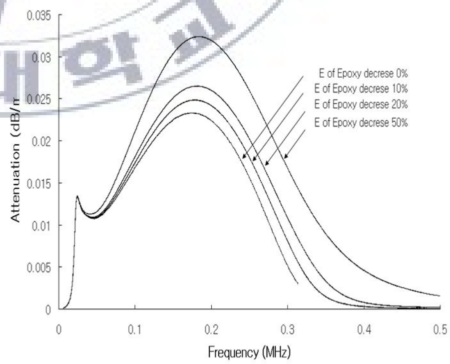
Phase velocity Attenuation





Phase velocity Attenuation

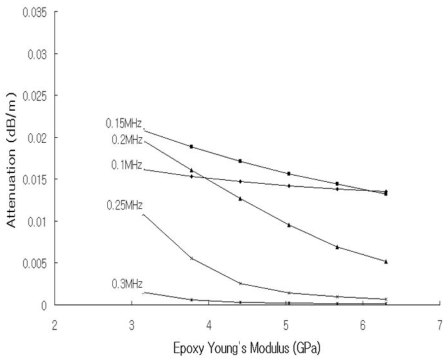




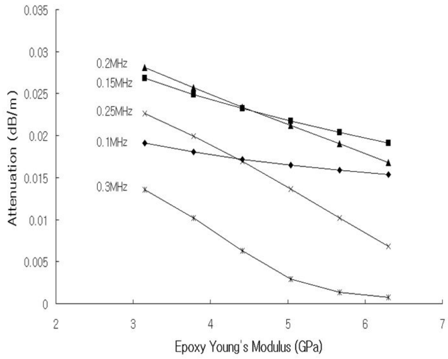
Phase velocity Attenuation

Fig. 3.9 Dispersion curves of S0 mode (Up: Epoxy tickness: 0.1mm, Middle: 0.2mm, Down: 0.3mm

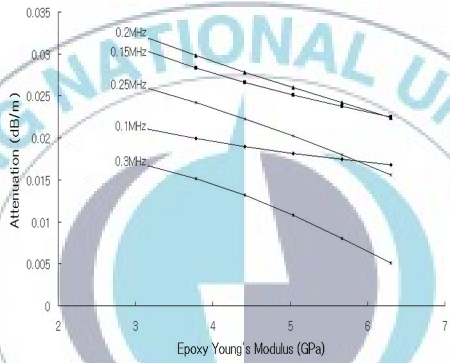
한편, Fig 3.9 는 Epoxy 의 탄성계수 감소율에 따른 S0 모드의 감쇠 해석 결과를 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이, S0 모드의 감쇠는 저주파수 대역에서는 탄성계수의 감소가 감쇠에 미치는 영향이 크지 않지만, 고주파 대역에서는 탄성계수의 변화가 감쇠에 미치는 영향이 매우 커지게 된다. 특히, 100kHz 이상의 고주파 대역에서는 탄성계수가 작아질수록, 즉 강성이 감소할수록 S0 모드의 감쇠가 증가하는 경향이 나타나게 된다. 또한 Epoxy 두께가 두꺼울수록 감쇠의 크기는 증가를 하게 되며 Concrete 의 체적파로 수렴하는 주파수 대역이 점점 더 고주파 대역에서 수렴하므로 감쇠의 차이가 나타나는 부분의 주파수 대역이 고주파 대역에서 나타나는 경향을 보인다.



Epoxy tickness 0.1mm



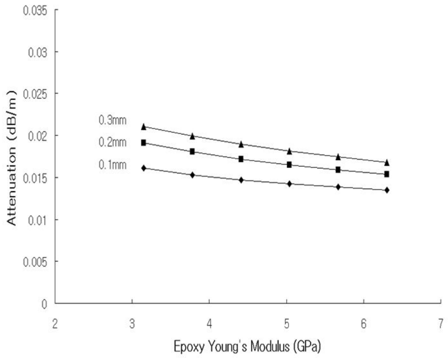
Epoxy tickness 0.2mm



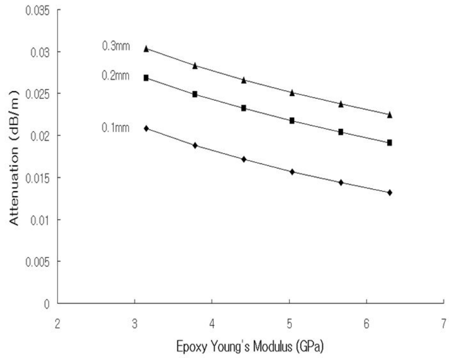
Epoxy tickness 0.3mm

Fig. 3.10 Epoxy Yong's Modulus VS Attenuation in Frquency

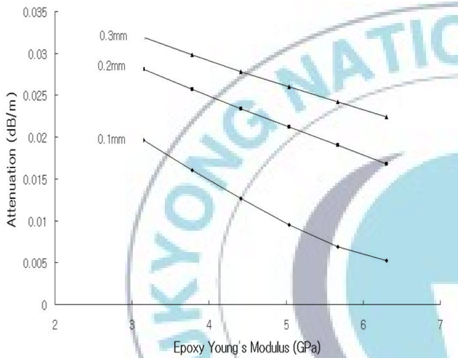
Fig 3.10 은 다양한 두께에 대한 Epoxy 탄성계수 별 감쇠 비를 주파수별로 나타낸 그래프이다. Epoxy 강성의 증가에 따라 감쇠는 주파수에 관계없이 전반적으로 감소하는 경향을 나타내지만, 감쇠율은 주파수에 따라 서로 다를 뿐만 아니라, 선형적이지 않다. 이는 동일 주파수로 유도초음파를 가진한다고 하더라도 FRP 층을 따라 전파하는 S0 모드의 감쇠는 Epoxy 층의 강성에 따라서 다르게 나타남을 의미한다. 따라서 강성 변화에 영향이 적은 주파수 대역을 선정하는 것이 박리탐지에 유리하다.



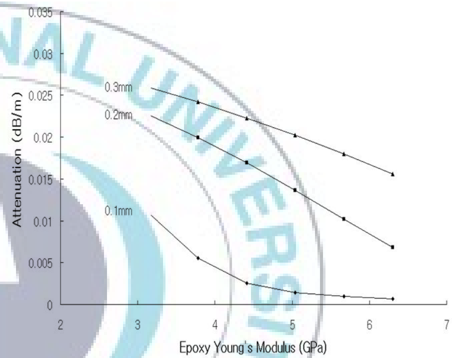
100kHz



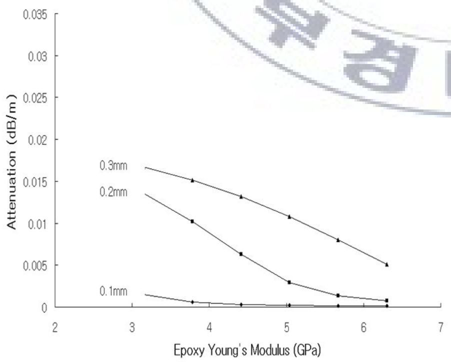
150kHz



200kHz



250kHz



300kHz

Fig. 3.11 Epoxy Yong's Modulus VS Attenuation in Epoxy thickness

Fig. 3.11 은 다양한 주파수 대역에서 Epoxy 탄성계수 별 감쇠비를 두께별로 나타낸 그래프이다. 각각의 주파수를 비교해 보았을 때 Epoxy 탄성계수의 변화에 상대적으로 영향이 적은 주파수 대역은 100kHz 대역이다.

따라서, FRP 층의 박리 또는 부착 탈락을 탐지하는 것을 목적으로 할 때, 상대적으로 Epoxy 두께와 물성변화 따른 감쇠의 변화가 다른 주파수들에 비해 상대적으로 적은 100kHz 미만의 S0 모드를 사용하는 것이 유리하다.

3.3 소결

GFRP 의 경우 감쇠민감도 측면에서 A0 가 S0 보드보다 유리하다. A0 모드는 같은 FRP 의 경우라도 두께에 따라 감쇠의 크기는 달라진다. 두께가 작을수록 감쇠의 크기는 커진다. 이는 콘크리트에 비해 FRP Epoxy 의 층에 비해 상대적으로 콘크리트의 크기가 크기 때문에 두께가 얇을수록 콘크리트의 영향을 더 많이 받는다는 의미이다.

또한 A0 모드는 Epoxy 두께의 변화에도 감쇠의 크기 차이가 있으며 FRP 가 1.6mm 일 경우 300~500kHz 의 대역에서 최대 감쇠가 나오며 감쇠의 크기 변화가 적어 다른 주파수 대역보다 안정적인 감쇠 측정이 가능하지만, 이 경우 손상 탐지 영역에 대한 제한이 클 수 있다는 것에 유의하여야 한다.

Epoxy 물성에 따른 감쇠의 변화가 다른 주파수들에 비해 상대적으로 적은 400kHz 미만의 S0 모드를 사용하는 것이 박리 탐지에 유리하다.

CFRP 의 경우 GFRP 와 역학적특성이 서로 다르기 때문에 모드의 감쇠의 특징도 달라진다. 보강판의 종류가 GFRP 의 경우 감쇠민감도 측면에서 A0 모드가 유리하나 CFRP 의 경우 S0 모드가 A0 모드 보다 유리하다.

S0 모드는 0.1~0.3MHz 대역에서 Epoxy 두께 변화에 대해 S0 모드의 감쇠 크기 차이를 준다. Epoxy 의 두께가 두꺼울수록 감쇠의 크기가 커지며 최대 감쇠가 나타나는 주파수 대역이 높다.

Epoxy 의 강성이 낮아질수록 S0 모드의 감쇠는 저주파 대역에서는 큰 변화가 없으나, 100 kHz 이상의 고주파 대역에서는 강성의 변화에 따른 감쇠 크기의 변화가 상대적으로 커지며 강성이 감소할 때 감쇠의 크기는 증가한다. Epoxy 의 강성변화에 따른 감쇠 크기 변화가 적은 100kHz 미만의 S0 모드를 사용하는 것이 박리 탐지에 유리하다.

제 4 장 FRP 박리에 따른 유도초음파 감쇠 특성 분석

유한요소를 이용한 수치해석을 통해 박리의 크기와 위치에 따른 유효 유도초음파 모드의 응답 특성을 분석하여 박리 손상 탐지에 적합한 손상 탐지 알고리즘을 제안하고자 한다.

4.1 유한요소모델링 및 해석조건

Fig 4.1 은 FRP-Epoxy-Concrete 로 구성된 모델의 사이즈를 나타내었다. 각각의 두께는 FRP 는 1.6mm, Epoxy 는 0.2.mm, Concrete 는 250mm 이며, 너비는 250mm 로 정하였다. 또한 2 차원으로서 너비 방향을 x 축 두께방향을 y 축으로 하였으며 Plain stain 상태로 모델링하였다.[3] 2 차원 해석을 하는 것이 해석시간과 분석 등에 장점을 가지고 있으며 또한 본연구에서의 모델은 plain strain 상태라는 앞선 연구를 참고하였다. 본연구는 . Table. 4.1 는 시스템을 구성하고 있는 재료의 각각의 물성치 들이며 이는 유도초음파 모드 분석 때 사용된 수치와 같은 값이다.

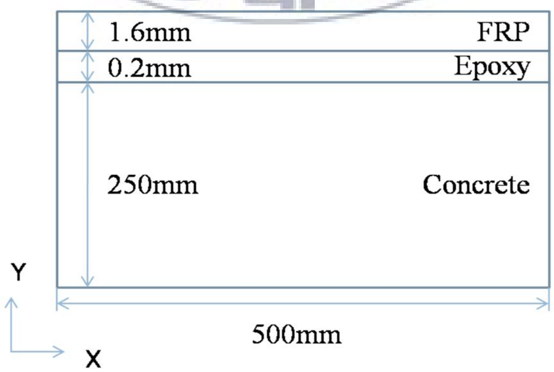


Fig. 4.1 Size of Model

Table 4.1 Property of Material

Material property			
	ρ (kg/m^3)	ν	E (GPa)
CFRP	**1571**	**0.38**	**157.6**
Epoxy	**1100**	**0.39**	**6.3**
Concrete	**2300**	**0.3**	**43.8**

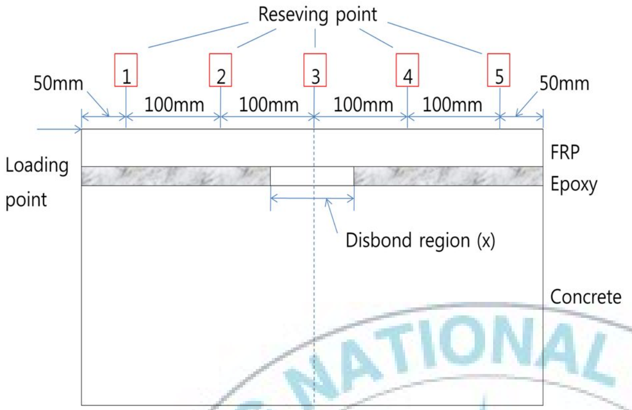
한편, 유한요소의 크기는 공간적으로 해의 정밀도에 영향을 미치는 주 인자로 입력파의 파장과 관련이 있으며 다음과 같이 경험적인 기준이 알려져 있다.[10]

$$l_e = \frac{\lambda_{\min}}{20} \tag{4.1}$$

여기서 l_e 는 유한요소 한변의 길이이며 $\lambda_{\min}$ 은 최소 파장으로 가진 주파수 100kHz 와 그때 S0 모드의 군속도 파속인 2678.52 m/s 을 $\lambda = C/f$ 란 식에 대입하면 약 26.8mm 가 나오며 이를 식(4.1)에 적용하면 최소로 요구되는 유한요소 한 변의 길이 l_e 는 약 1.3mm 이다. 본 연구에서는 동적 해석과 Plane strain 이 동시에 고려가 가능한 4 절점 요소인 Plane 162 요소를 각 층에 사용하였으며 Mesh 는 Map mesh 를 이용하여 요소 분할을 간편하게 하였으며. 각층의 Mesh 는 한변의 최소 요소 길이인 l_e 보다 작은 값으로 정하여 정밀도를 높였다.

Mesh size : FRP : 1 x 1mm, Epoxy : 1 x 0.2mm, Concrete :1 x 0.8mm

또한 가진 및 수신을 위한 위치를 Fig. 4.2 에 나타내었다. x 축 방향으로 동적 하중을 가진하는 Actuating point 를 0 번으로 정하고 0 번을 기준으로 50mm, 150mm, 250mm, 350mm, 450mm 떨어진 점을 파동 응답을 받는 Reseiving point 점으로 설정하였다.



Case No.	Disbonded Region (x)
1	0 mm
2	30 mm
3	60 mm
4	90 mm
5	120 mm

Fig .4.2 Location of Gained Data

또한 박리구간의 크기는 0mm, 30mm 60mm, 90mm 120mm 로 임의로 정하였으며 구조물의 너비의 중심인 250mm 에서 박리구간이 좌우 크기가 같게 반으로 나누어는 위치로 설정하였다.

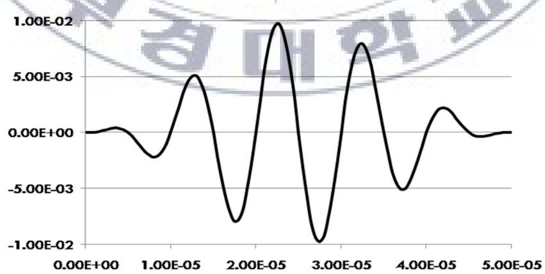


Fig .4.3 Tone Bursrt Wave on Load Signal

가진을 위한 입력 파는 Fig . 4.3 처럼 파의 응답주파수 대역이 좁은 입력신호로 이에 따른 출력신호도 동일한 형상을 유지하는 특성을 가지며 파 전달 문제에서 발생하는 파의 분산효과를 줄여 파형의 식별을 용이하고자 하는 목적으로

비파괴검사 분야에서 주로 사용하는 협대협 Tone burst 신호를 적용하였다. 5cycle 의 Tone burst 신호를 만들기 위하여 여러개의 $\sin$ 파를 이용하여 만든 식 (4.2) 에 적용하였으며, 이때 F_0 를 너무 큰 값을 넣어 주게되면 시스템을 구성하고 있는 재료들이 강성 너무 큰 하중을 견디지 못해 응답 결과에 오류가 나는것을 유의 해야 된다. 따라서 F_0 를 0.001 값으로 지정하였으며, 시간 간격 Δt 는 식 (4.3)로부터 구할수 있다. l_c 는 요소의 최소 길이인 약 0.00134m, c_l 종파속도 이지만 종파속도 대신 S0 모드의 군속도인 2678.52 m/s 을 식 (4.3)에 적용하면 $5.003\times10^{-7}s$ 이다. 만약 Δt 가 Δt_c 보다 크면 해답이 발산하는 불안정한 해답을 가지게 된다.

$$F(t) = F_0 \sin(\omega t)\cdot\left(\sin\left(\frac{\omega t}{10}\right)\right)^2 \tag{4.2}$$

$$\Delta t \le \Delta t_c = \frac{l_c}{c_l} \tag{4.3}$$

참고로 Epoxy 박리 크기와 위치에 대한 유효 유도초음파 응답 차이만을 순수히 보기위하여 감쇠에 대한 고려는 하지 않았다. 한편, 실제 Concrete 구조물의 보, 기둥, 슬래브 등에 보강된 FRP 부착 Concrete 와 유사한 경계조건 (Boundary condition)을 만들기 위하여 Conceret 경계조건에만 x 축, y 축 동시에 구속시켜 시스템을 고정시켰다.

이와 같은 모델링 과정과 해석은 유한요소 해석 프로그램중 하나인 ANSYS 11.0 으로 수행하였으며 여러 Licencse 중 ANSYS Multiphysics/LS-DYNA 이용하여 해석을 수행하였다. [7]

4.2 박리 크기에 따른 유도초음파 감쇠 특성 분석

아래의 Fig. 4.4~8 은 Reseiving point 가 50mm, 150mm, 250mm, 350mm, 450mm 일 때 다양한 박리구간 크기에 대한 각각 Reseiving point 에서의 변위-시간 응답 그래프에서 응답신호를 나타내었다. 박리구간을 통과하지 않는 50mm 의 경우 박리구간의 변화에 따른 Y 축 변위의 값이 일치하는 것을 알 수 있으며, 150mm 경우도 박리구간의 변화에 따른 Y 축 변위의 값의 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다. 반면 박리구간 위에 위치하고 있는 250mm 에서는 박리된 부분에 역학적 특성들의 값이 0 이기 때문에 거의 진공상태 혹은 유체 상태와 가깝다. 따라서 박리 부분에서 FRP 층으로 전달된 파동 에너지는 박리 구간에서 전반사를 일으키게 되며 분산이 심해지는것을 알 수 있다. 또한 박리구간에서 끝나는 지점에서 반사되어 다시 FRP 층으로 전달되는 반사파가 생겨 파의 순서를 알기에도 어려운 점이 있다. 따라서 박리 손상 진단시 응답 데이터가 난반사를 일으키는 형태로 패턴을 알 수 없을 경우 박리구간 위에 수신센서가 부착 되어 있을 가능성이 높다. 한편 350mm 와 450mm 의 경우 최대 Peak 점이 나타나는 시간이 박리크기가 작을수록 빠르다.

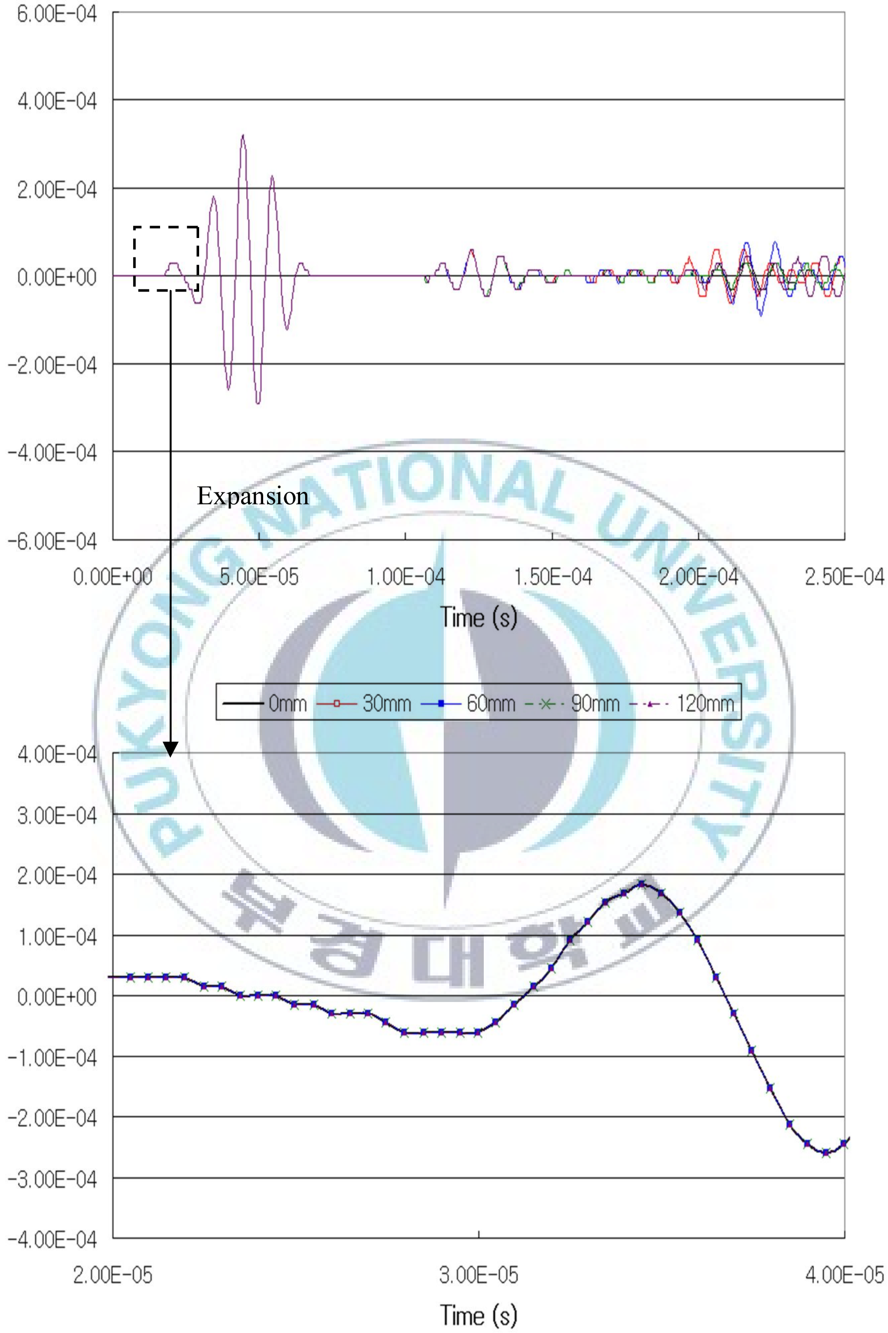


Fig. 4.4 Y-displacement-Time Curve in Reseiving point is 50mm

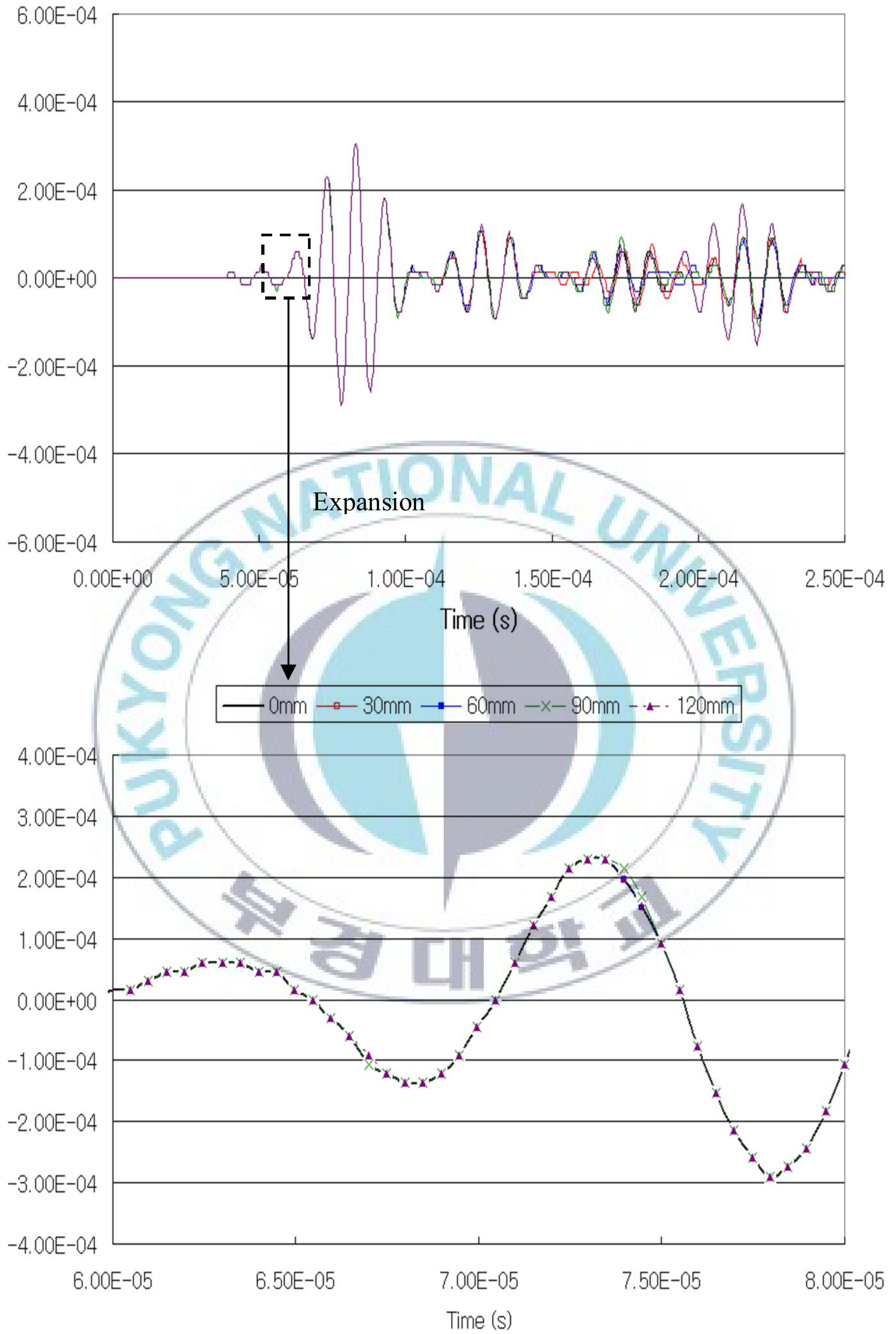


Fig. 4.5 Y-displacement-Time Curve in Reseiving point is 150mm

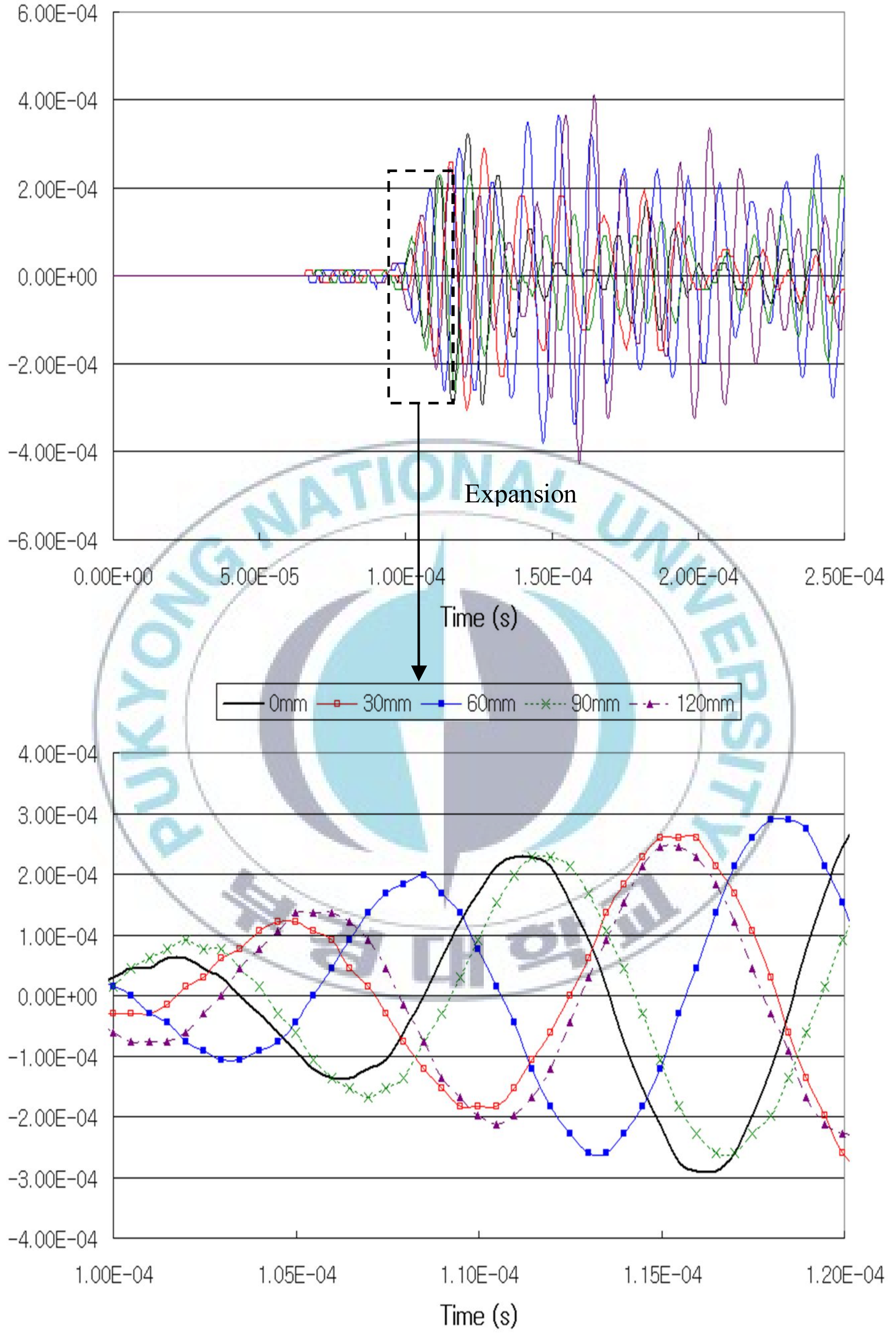


Fig .4.6 Y-displacement-Time Curve　in Reseiving point : 250mm

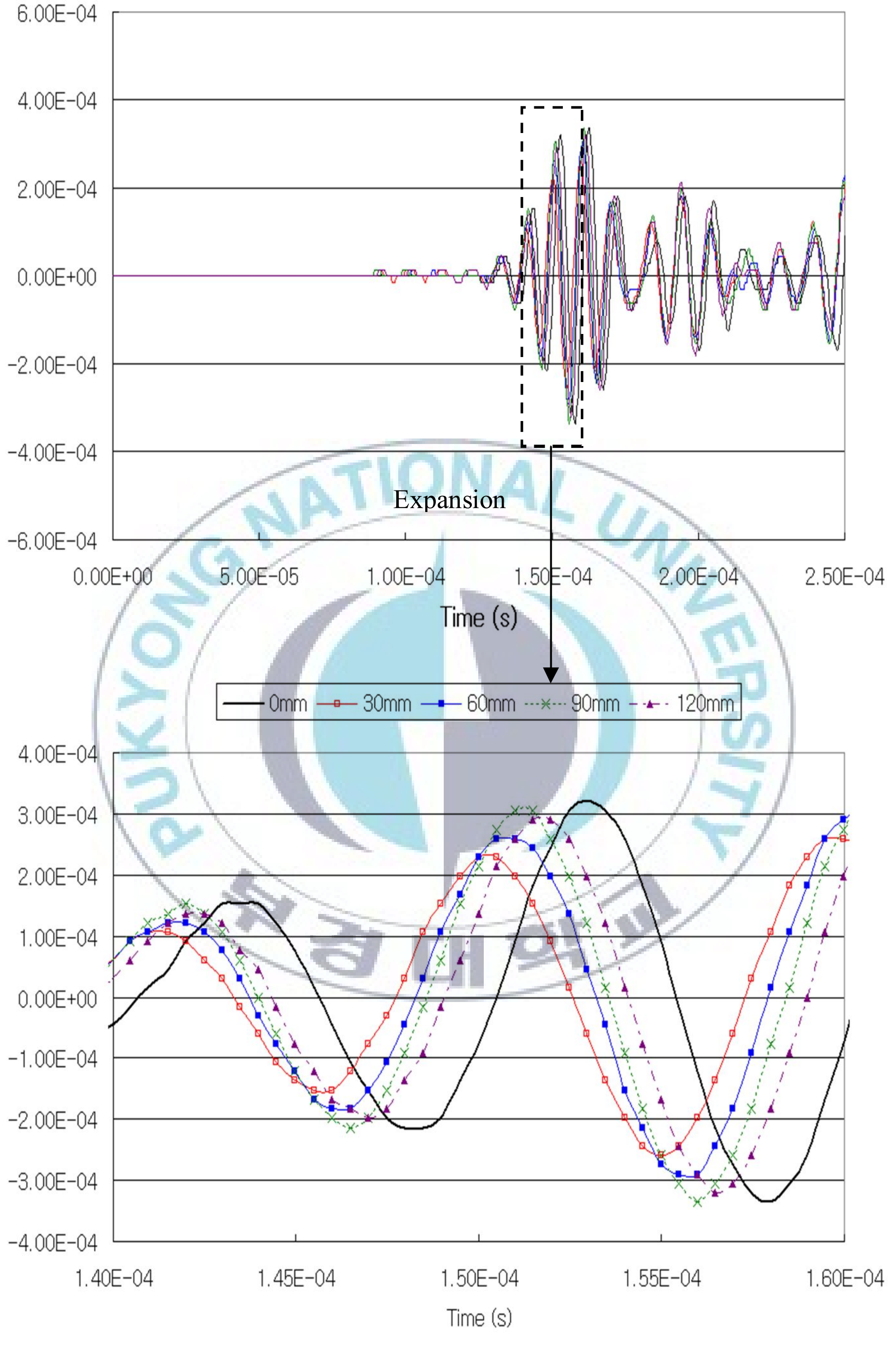


Fig . 4.7 Y-displacement-Time Curve in Reseiving point : 350mm

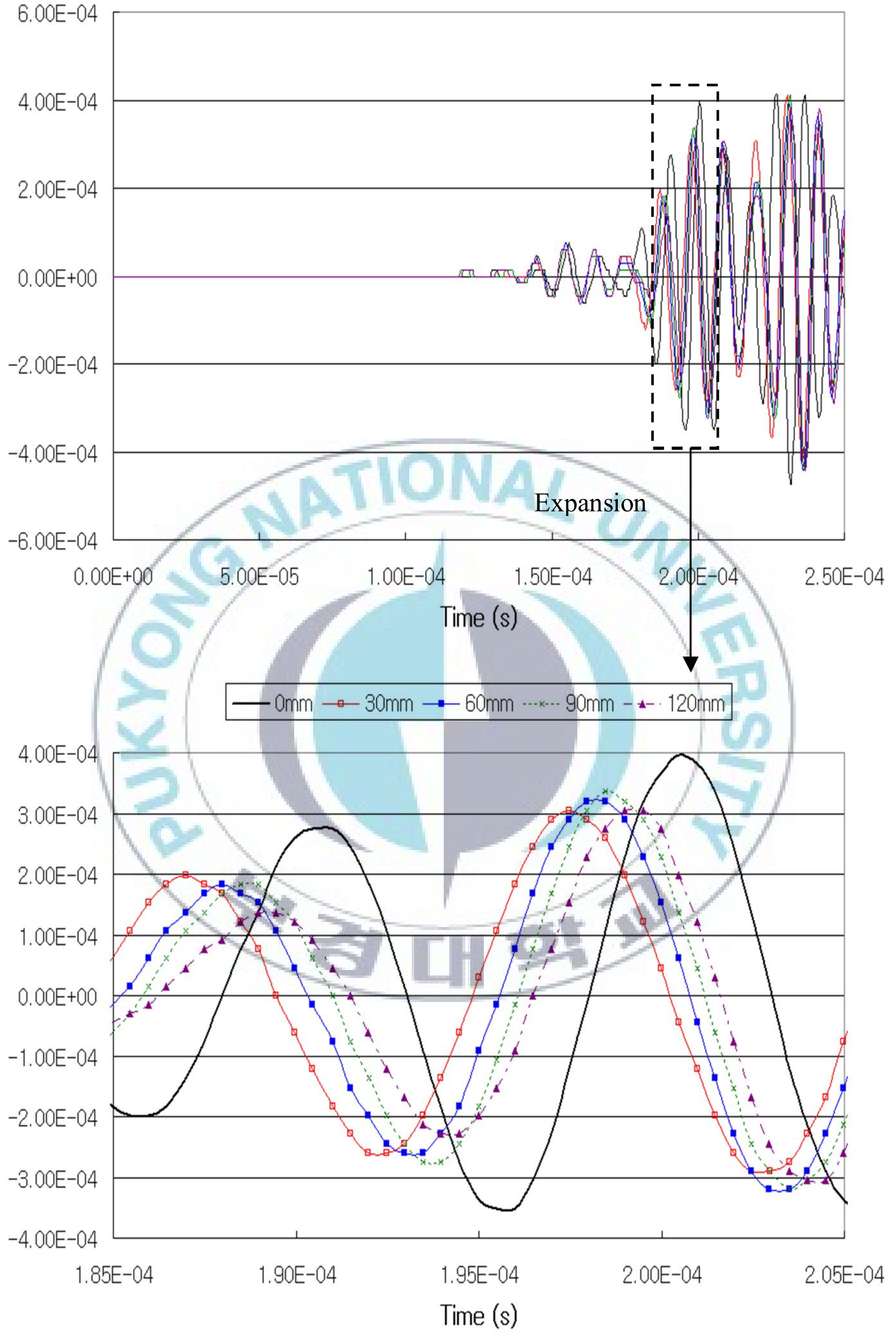
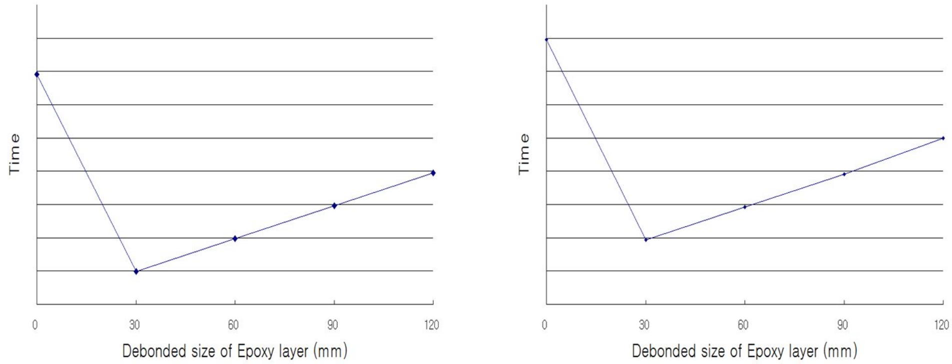


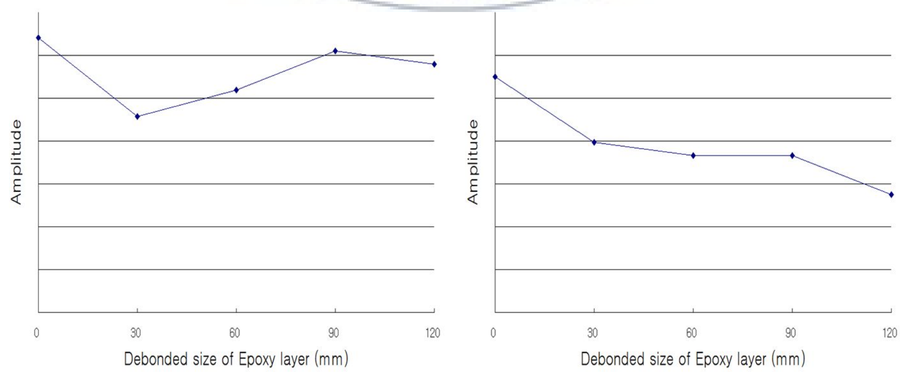
Fig . 4.8 Y-displacement-Time Curve in Reseiving point is 450mm



Reseiving point : 350mm Reseiving point :450mm

Fig. 4.9 Time- Debonded size of Epoxy layer curve

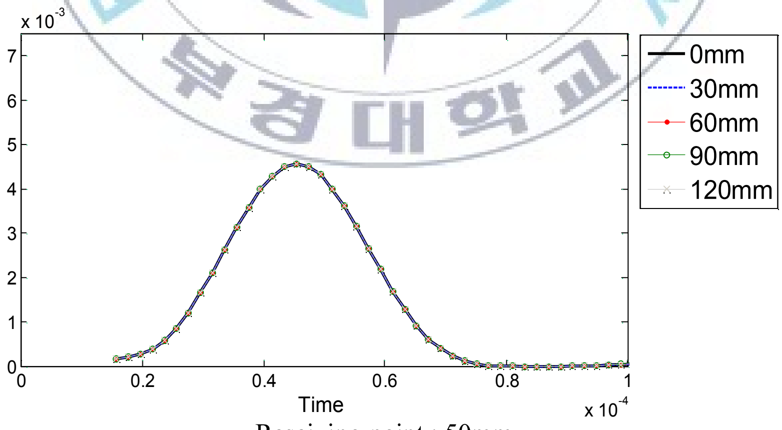
Fig. 4.9 은 Reseiving point 가 350mm, 450mm 일때 Y 축 변위 중 최대 Peak 가 나타나는 시간을 나타낸 그래프이다. 시간은 각각의 박리 크기마다 최대 Y 축 변위 값을 가지는 지점의 시간 값이다. Reseiving point 가 박리구간에 멀수록 시간차가 많이 나게되며 350mm 구간과 450mm 에서는 박리크기에 변화에 따라 최대 Y 축 변위값이 나타나는 지점의 발생순서가 박리구간의 크기가 작을수록 빨리 나타나는 것을 알 수 있다. 박리의 크기와 Peak 발생시간은 선형적이다.



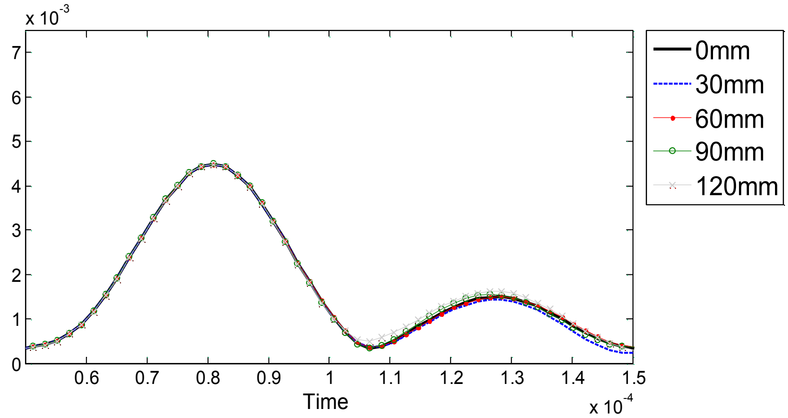
Reseiving point : 350mm Reseiving point : 450mm

Fig. 4.10 Amplitude-Debonded size of Epoxy layer curve

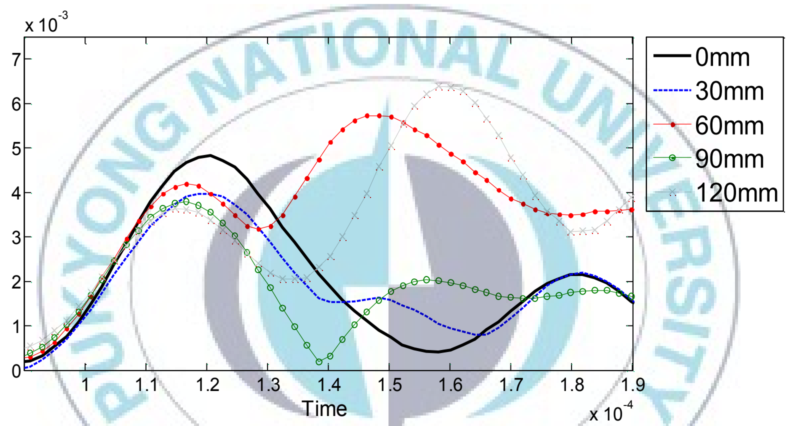
본연구에서는 진폭의 감쇠를 이용한 탐리 탐지기법을 알아 보고자 하기 때문에 진폭의 크기를 비교하였다. Fig. 4.10 은 다양한 박리구간 크기에 대한 각각의 최대 Peak 의 진폭 크기를 나타낸 그래프이다. 박리구간이 지난 350mm, 450mm 를 보시다시피 박리가 일어 나지 않는 상태 보다 진폭의 크기는 줄어든다. 이는 박리가 발생시 파동에너지의 크기가 박리구간 크기에 따라 변화하는 것을 의미한다. 하지만 시간과는 다르게 진폭 크기의 경우 박리구간 크기와는 상관없이 진폭 크기가 서로 다르게 나타난다. 이는 응답 신호인 Law data 만으로 박리크기에 대해 감쇠의 크기차이를 구분하지 힘들다는 것을 의미한다. 이러한 Low data 에선 다양한 주파수 대역을 가진 모드의 합으로 단일 주파수 대역의 신호의 크기를 짐작하기 어려움이 있어 시간 주파수 해석을 통해 중심주파수 100kHz 대역인 신호의 크기를 비교 분석하고자 하였다.



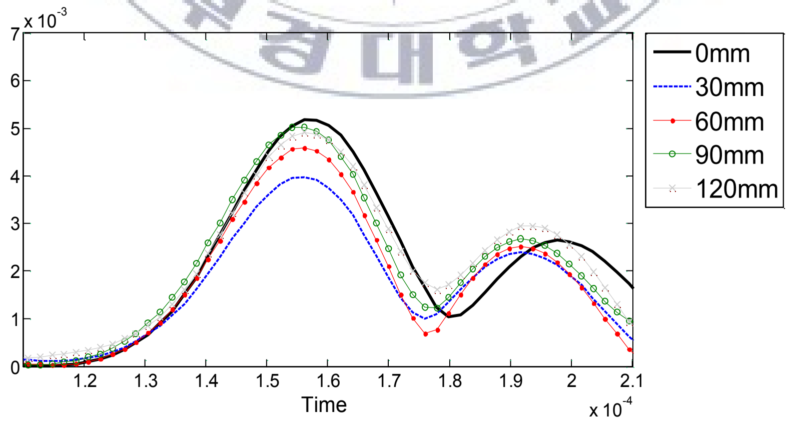
Reseiving point : 50mm



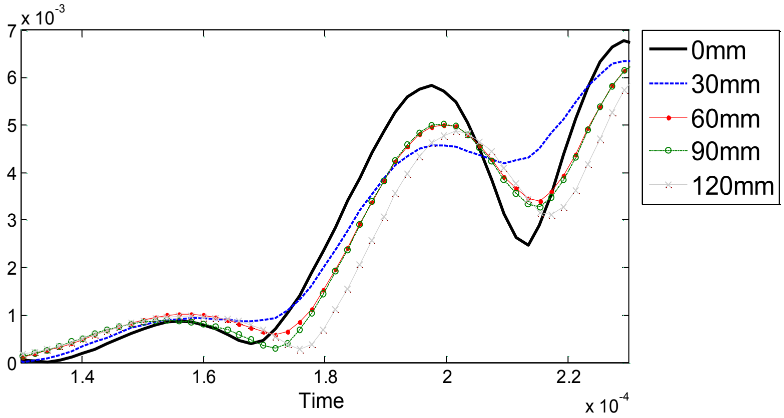
Reseiving point : 150mm



Reseiving point : 250mm



Reseiving point : 350mm



Reseiving point : 450mm

Fig .4.11 Data for Frequency of 100kHz in Spectrogram

Fig. 4.11 는 Short-time Fourier Transform(STFT)을 수행하여, 주파수 100kHz 에 성분에 대한 시간이력을 추출한 결과이다. 박리구간을 통과하지 않은 수신점인 50mm 에서는 박리 구간의 크기와는 상관없이 첫번째 peak 가 전부 일정하다. 150mm 도 역시 첫번째 peak 는 박리 크기와는 상관없이 응답신호가 같다. 수신점이 250mm 에서는 박리 구간 위에 존재하기 때문에 100kHz 대역을 가진 성분을 구분하기가 어렵다. 수신점 350mm, 450mm 의 경우 파동 에너지가 박리구간을 통과하는 지점부터 첫번째 peak 의 Y 축 변위 성분 크기가 박리 발생이 없을 때 보다 낮게 나타난다. FRP 부착 콘크리트에 박리 손상이 발생하였을 경우 응답데이터의 중심 주파수 대역의 Y 축 성분비 만으로도 박리 발생의 유무 만을 판단할 가능성이 있다.

또한 Fig. 4.11 의 수신점이 350mm 인 경우 두번째 Peak 가 나타나는 구간인 $1.6\times10^{-4} \sim 2.0\times10^{-4}s$ 의 구간에서 차이가 나타난다 이때 나타나는 Peak 는 Fig. 4. 12 에 보는 바와 같이 콘크리트 체적파가 내부에서 반사되어 돌아오는 반사파

이다. 여기서 Node 884 는 수신점 350mm 지점이다. 350mm 지점에서 나타난 콘크리트 내부에서 전달된 체적파 돌아온 반사파는 박리가 발생하면 박리가 없는 경우보다 나타나는 시간이 빠르며, 박리 크기가 클수록 더 큰 값을 가진다. 박리의 크기는 콘크리트 내부로 전달되는 체적파 에너지 양에 영향을 준다는 것을 의미하며 대략적인 박리크기를 알 수 있는 방법이다.

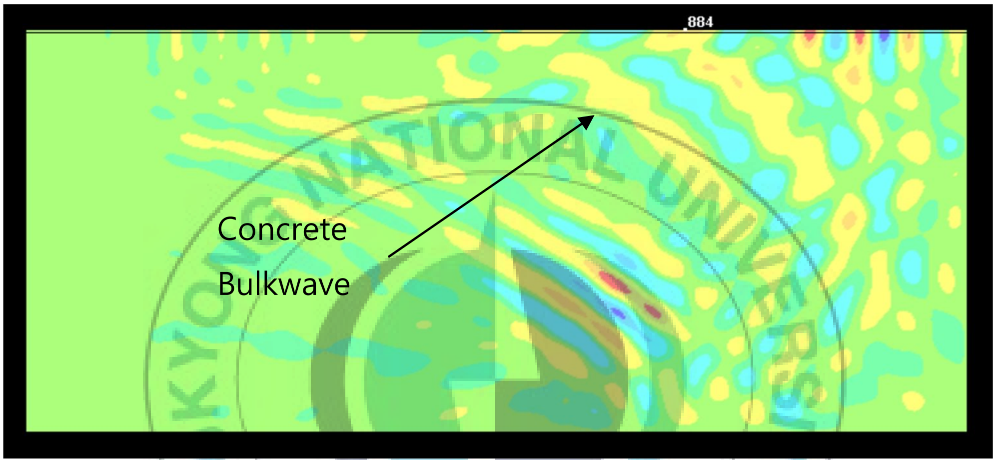


Fig.4.12 Wave propagation (debonded size : 30mm , time : $1.9\times10^{-4}s$)

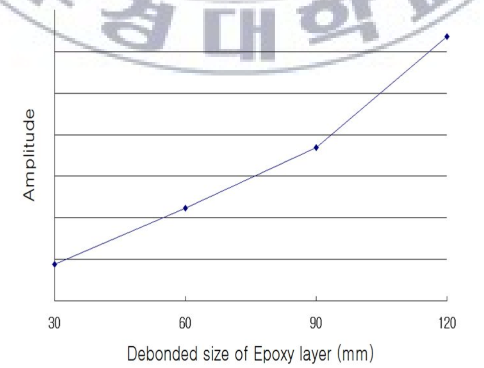


Fig 4.13 Amplitude-Debonded Size of Epoxy layer Curve

(Second Peak of Reseiving Point 350mm)

Fig. 4.13 은 수신점이 350mm 일 때 두번째 peak 의 박리 크기별 진폭을 나타낸 그래프이다. 박리 크기가 30mm 에서 90mm 까지는 진폭의 증가율이 선형적인 관계를 가진다. 30~90mm 사이의 박리 크기는 콘크리트 내부에서 돌아오는 반사파의 진폭으로 박리크기를 알 수 있다. 한편 콘크리트 내부에 전달된 체적파가 반사되어 돌아온 반사파는 $1.25 \times 10^{-4} s$ 일때 FRP 표면으로 돌아오며 박리구간 전인 수신점 150mm 에 나타난다. 이 반사파는 다시 FRP 층을 따라 전달하게 되며 이때 파동에너지와 수신점이 350mm 구간으로 반사되어 돌아오는 콘크리트 체적파의 에너지가 합쳐져 진폭의 증가율이 커진다. 따라서 진폭의 크기만으로 박리의 크기를 알아 낼 수가 없다.

4.3 소결

파동에너지가 박리구간을 통과한 350mm 구간과 450mm 에서는 최대 Y 축 변위값이 나타나는 발생순서가 박리구간 크기가 작을수록 빨리 나타나며 선형적인 관계를 가진다. 이로부터 박리의 크기를 알 수 있다. 감쇠의 측면에서 박리구간을 통과하는 지점부터 첫번째 peak 의 크기가 박리가 없을때 보다 낮아진다. 하지만 박리의 크기와는 상관없이 파동의 진폭 크기가 선형적인 관계를 가지지 않으며 불규칙하다. 따라서 감쇠를 이용한 박리 크기 탐지는 쉽지 않을 것으로 판단된다. 하지만 장거리 전파가 가능한 유도초음파의 특성과 본연구의 파동의 진폭의 감쇠 특성을 이용하여 FRP 보강판의 박리 발생 유무를 진단하기에는 적합하다. 반면, 두번째 peak 의 크기는 박리크기의 순서대로

나타나지만 콘크리트 내부에 되돌아온 반사파의 영향으로 인해 박리크기를 알 수 있는 것은 제한적이다.

제 5 장 결론

유도초음파모드 특성 분석을 통해 FRP 부착콘크리트 박리 손상 탐지에 효율적인 유효 주파수 대역과 모드를 제안하였다.

GFRP 의 경우 감쇠민감도 측면에서 A0 가 S0 보드보다 유리하다. A0 모드는 같은 FRP 의 경우라도 FRP 두께에 따라 감쇠의 크기는 달라진다. 두께가 작을수록 감쇠의 크기는 커진다. 또한 A0 모드는 Epoxy 두께의 변화에도 감쇠의 크기 차이가 있으며 FRP 가 1.6mm 일 경우 300~500kHz 의 대역에서 최대 감쇠가 나오며 감쇠의 크기 변화가 적어 다른 주파수 대역보다 안정적인 감쇠 측정이 가능하지만, 이 경우 손상 탐지 영역에 대한 제한이 클 수 있다는 것에 유의하여야 한다. GFRP 의 경우 Epoxy 물성에 따른 감쇠의 변화가 다른 주파수들에 비해 상대적으로 적은 400kHz 미만의 S0 모드를 사용하는 것이 박리 탐지에 유리하다.

유도초음파 모드 응답 특징 분석을 하여 유도 초음파 를 이용한 FRP 부착 콘크리트 박리 탐지 적용 가능성을 알아 보았다.

CFRP 의 경우 GFRP 와 역학적특성이 서로 다르기 때문에 모드의 감쇠의 특징도 달라진다. CFRP 의 경우 S0 모드가 A0 모드 보다 유리하다. S0 모드는 0.1~0.3MHz 대역에서 Epoxy 두께 변화에 대해 S0 모드의 감쇠 크기 차이를 준다. Epoxy 의 두께가 두꺼울수록 감쇠의 크기가 커지며 강성이 감소할 때 감쇠의 크기는 증가한다. CFRP 의 경우 Epoxy 의 강성변화에 따른 감쇠 크기 변화가 적은 100kHz 미만의 S0 모드를 사용하는 것이 박리 탐지에 유리하다.

파동에너지가 박리구간을 통과한 350mm 구간과 450mm 에서는 최대 Y 축 변위값이 나타나는 발생순서가 박리구간 크기가 작을수록 빨리 나타나며 선형적인 관계를 가진다. 감쇠의 측면에서 박리구간을 통과하는 지점부터 박리가 없을때 보다 첫번째 peak 의 크기가 낮아진다. 하지만 박리의 크기와는 상관없이 파동의 진폭 크기가 선형적인 관계를 가지지 않으며 불규칙하다. 따라서 감쇠를 이용한 박리 크기 탐지는 쉽지 않을 것으로 판단된다. 하지만 장거리 전파가 가능한 유도초음파의 특성과 본연구의 파동의 진폭의 감쇠 특성을 이용하여 FRP 보강판의 박리 발생 유무를 진단하기에는 적합하다. 반면, 두번째 peak 의 크기는 박리크기의 순서대로 나타나지만 콘크리트 내부에 되돌아온 반사파의 영향으로 인해 박리크기를 알 수 있는 것은 제한적이다.

참고문헌

[1] Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T., and Lam, L., "FRP-Strengthened RC structures", John Wiley & Sons, Ltd, USA, 2002.

[2] Büyüköztürk, O. and Yu, T., “A Far-field Airborne Radar NDT Technique for Detecting Debonding in GFRP–retrofitted Concrete Structures,” NDT & E International, Vol. 41(1), pp. 10-24, 2008.

[3] Castaings, M., Hosten, B., and Francois, D., “The Sensitivity of Surface Guided Modes to the Bond Quality between a Concrete Block and a Composite Plate”, Ultrasonics, Vol. 42, pp.1067-1071, 2004.

[4] Giurgiutiu, V., Harries, K., Petrou, M., Bost, J., Quattlebaum, J.B., “Disbond Detection with Piezoelectric Wafer Active Sensors in RC Structures Strengthened with FRP Composite Overlays,” Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol. 2(2), pp. 1-11, 2003

[5] Kritsakorn Luangvilai, Wonsiri Punurai, and Laurence J. Jacobs, M.ASCE, “Guided Lamb Wave Propagation in Composite PlateÕConcrete Component” Journal of Engineering Mechanics, Vol.128 pp. 1137-1341, DECEMBER 2002

[6] Pavlakovic, B., Lowe, M.J.S., DISPERSE USER MANUAL : A system for generating dispersion curves, Department of Mechanical Engineering, Imperial College, University of London, 2003

[7] JinHo Woo, WON-BAE NA, JEONG-KIM, AND HYUNAN CHO, "Finite Element Simulation of Elastic Wave Propagation in a Concrete plate - Modeling and Damage Detection" 한국해양공학회지 제 21 권 제 6 호, pp. 26-33, 2007

[8] Rose, J.L, "Ultrasonic Waves in Solid Media", Cambridge University Press, 1999

[9] J.H. Nieuwenhuis. etc "Simulation and Testing of Transducers for Lamb Wave Generation" In *Proceedings of the 23rd International Modal Analysis Conference (IMAC XXIII)*, Orlando, Florida, USA, paper no. 216, 2005.

[10]Petr Hora, Jiri Michalek, "Numerical Modeling of Dispersion Phenomena in Thick Plate", research project(pp4/76C1)report, 2000

[11] L. Knopoff, "A matrix method for elastic wave problems", Bulletiin of the Seismological Society of America, 54: 431-438, 1964

[12] M.J. Randall, Fast programs for half-space problems, Bulletiin of the Seismological Society of America, 57: 1299-1315, 1967

[13] H. Schmidt and F.B. Jensen, A full wave solution for propagation in multi-layered viscoelastix media with application to Gaussian beam reflection at liquid-solid interfaces, J. Acoust. Soc.Amer., 77: 813-825, 1985.

[14] W.T. Thomson, Transmission of elastic waves though a stratified solid medium, J. Applied Physics, 21: 89-93, 1950

[15] Meier,U. and Winistorfer, A. "retrofitting of structures though external bonding of CFRP sheet", *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Second International RILEM Symposium*, GHent, Belgium, edied by L. Taerwe, pp. 509-516, E & FN Spon, London, UK, 1995.

[16] 김 용 한 "Defect Detection of a Thick Plate Using Elastic Wave Propagation", 공학박사학위 논문, 서울대학교 2007