

# 포화된 다공성매체에서 파동의 전파특성

## II. 파라미터 연구

### Wave Propagation Characteristics in Saturated Porous Media II. Parametric Studies

김 선 훈<sup>†</sup>

김 광 진<sup>\*</sup>

Kim, Sun-Hoon

Kim, Kwang-Jin

(논문접수일 : 2006년 9월 27일 ; 심사종료일 : 2007년 4월 2일)

#### 요 지

본 연구의 I부에서 유도된 포화된 다공성매체의 파동 전파속도와 감쇠에 대한 이론해를 전산코드화 하였다. 본 논문에서는 작성된 전산코드를 사용하여 파동의 전파속도와 감쇠에 미치는 외력 주파수의 영향과 재료특성치의 변화의 영향을 파악하기 위한 파라미터연구를 수행하였다. 첫 번째 형태의 파동에 대한 압축성 파동 속도는 주파수-투수성 곱이 증가함에 따라 파동속도가 하한치로부터 상한치로 변이하는 영역에서는 주파수-투수성 곱의 함수로써 변화함을 보여주었다. 또한 파동의 전파속도 변화율이 가장 클 때 감쇠값이 최대가 됨을 알 수 있었다. 두 번째 형태의 파동에서 파동의 전파속도는 주파수-투수성 곱이 작은 값을 가질 때 거의 0 값을 나타내며, 주파수-투수성 곱이 큰 값을 가질 때 상한값을 나타냄을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 파동 속도, 포화된 다공성 매체, 파라미터연구, 압축파

#### Abstract

The general theoretical solutions for the wavespeed and damping derived in Part 1 of this work, are incorporated into the computer code. In this paper the code is used in a parametric study of the influence of excitation frequency and variations in material properties on propagation velocity and damping. Compressional wave velocity for waves of the first kind is shown to vary as a function of the frequency-permeability product, with a zone where wavespeed transitions from a lower bound value to a higher bound value with increasing values of the product. Damping is seen to be a maximum where the rate of change in wavespeed is greatest. Waves of the second kind also show a transition in wavespeed from near zero at low values of the frequency-permeability product to an upper bound value at higher values of the product.

**Keywords** : *wavespeed, saturated porous media, parametric study, compression wave*

#### 1. 서 론

본 논문에서는 본 연구의 I부에서 유도한 파동속도와 감쇠에 대한 이론적 수식(김선훈 등, 2007)을 활용하고자 이들의 일반해를 컴퓨터 코드화하였으며, 이를 사용하여 지반체의 물성치 변화와 이단계 매체(two-phase media)에서 파동속도에 미치는 외력주파수의 영향을 각각 평가하였다.

파라미터 연구를 통하여 수행한 주요 연구내용은 다음과 같다.

- 첫 번째 형태의 파동과 두 번째 형태의 파동의 속도와 감쇠, 투수성과 주파수의 곱의 함수로서 속도와 감쇠의 변화
- 파동의 전파특성에 미치는 간극형상과 유체마찰의 영향
- 파동의 전파특성에 미치는 간극수의 특성(바닷물과 담수), 간극, 입자특성(포와송비, 체적계수) 등의 영향
- 유체마찰에 대한 근사식의 적합성 검토

본 연구의 수행을 통하여 얻어진 연구결과는 실제로 다양

<sup>†</sup> 책임저자, 정회원 · 영동대학교 토목환경공학과 부교수

Tel: 043-740-1171 ; Fax: 043-740-1179

E-mail: kimsh@youngdong.ac.kr

<sup>\*</sup> COMTEC RESEARCH, Principal Engineer

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2007년 8월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

한 지반체에서 파동의 전파특성과 감쇠(attenuation)에 대한 정량적인 평가와 판단을 하는데 기초가 될 것으로 기대된다(김선훈 등, 2001; 박대호 등, 2003). 따라서 이들 자료는 파동의 전파현상을 이해하는데 중요한 기초 자료가 될 것으로 판단된다.

2. 파동속도와 감쇠에서 간극과 입자성질의 영향

2.1 Parametric Study에 사용된 재료특성값

포화된 다공성 매체에서 파동속도에 대한 수식(김선훈 등, 2007의 식 (79) 참조)은 다음 식과 같이 나타낸 바 있다.

$$(c')^2 = d_3 + id_4 \quad (1)$$

위 식을 보면 2가지 형태의 파동을 표시하는 2개의 해를 발생시키고 있다. 첫 번째 형태의 파동은 다공성 입자-유체 matrix를 통하는 일반적인 압축파를 나타내고, 두 번째 형태의 파동은 matrix를 통하는 간극수의 흐름에 관계있다 (Kim 등, 1986; Loret 등, 1992).

본 장에서는 전산코드(그림 1 참조)를 사용하여 대부분의 포화된 다공성 토사와 암석의 특성을 나타내는 다양한 재료 특성에 대한 주파수-투수성 곱의 함수로서 파동속도와 감쇠를 그림으로 나타내 보았다. 이들 매개변수 값들의 범위는 표 1에 나타내었다.

매개변수에 대한 계산결과는 주파수와 투수성의 곱의 함수로서 파동속도와 감쇠의 형태로 나타내었다. 본 논문의 1부 연구결과(김선훈 등, 2007)에서 제시되었던 해의 분석은 파동속도와 특정한 감쇠는 주파수-투수성 곱의 함수라는 사실

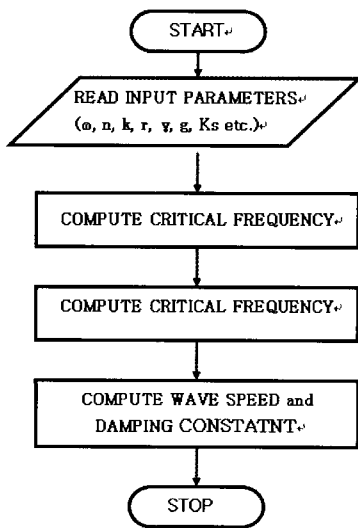


그림 1 전산코드의 흐름도

표 1 파라미터 해석에 사용된 재료특성값

고정 상수값	밀도	$\gamma_w = 0.001 \text{ kgf/cm}^3$	
	중력 가속도	$g = 980 \text{ cm/sec}^2$	
	입자체적계수	$K_g = 351,504 \text{ kgf/cm}^2$	
	입자비중	2.67	
흐름경로계수		$\bar{r} = 0, \sqrt{2/3}, 1, 2$	
간극수 특성값	<del>체적계수</del>	담수	해수
	체적계수	$K_f = 20,387.2 \text{ kgf/cm}^2$	$K_f = 24,605.3 \text{ kgf/cm}^2$
	비중	1.0	1.026
다공성입자 특성값	체적계수	$K_s = 70.3, 703, 70,300 \text{ kgf/cm}^2$	
	포와손비	$\nu = 0.2, 0.3, 0.4$	
간극률		n = 0.2, 0.4, 0.6	

표 2 해석결과 그림목록 요약

다공성 입자계수	<del>체적계수</del>	n = 0.2	n = 0.4	n = 0.6
	$K_s = 70.3 \text{ kgf/cm}^2$	그림 1,2	그림 7,8	그림 13,14
	$K_s = 703 \text{ kgf/cm}^2$	그림 3,4	그림 9,10	그림 15,16
	$K_s = 70,300 \text{ kgf/cm}^2$	그림 5,6	그림 11,12	그림 17,18
고정 상수값	간극수 체적계수	$K_f = 20,387.2 \text{ kgf/cm}^2$		
	포와손비	$\nu = 0.3$		
	흐름경로상수	$\bar{r} = 0, \sqrt{2/3}, 1, 2$		

을 보여주었다. 두 값의 곱이 변화하지 않는다면 특정한 감쇠 또는 파동속도도 변하지 않을 것임을 나타내고 있다. 따라서 이들 두개의 매개값의 곱은 그림으로 나타내는데 매우 편리할 것이다.

감쇠계수  $\alpha$ 는 외력주파수  $\omega$ 로 정규화되었고, 특정한 감쇠항으로 나타내었다. 그 값은 깊이 증가에 따른 파동길이당 운동과 응력감쇠의 비율을 평가하는 척도이다.

전산코드를 사용하여 담수에 포화된 지반체에 대한 Parametric 계산을 수행하였다. 입자계수는  $70.3 \text{ kgf/cm}^2$ 에서부터  $70,300 \text{ kgf/cm}^2$ 까지 변화시켰으며, 입자의 포와손비는 0.3으로 고정시켰다. 간극률은 0.2, 0.4, 0.6로 가정하였으며, 정확한 해의 계산을 위해 흐름경로상수값  $\bar{r}$ 은  $0, \sqrt{2/3}, 1, 2$ 를 사용하였다.

수치자료는 표 2에 나타낸 바와 같이 4종류의 입자계수에 대해 3종류의 간극률 별로 구성하였다. 해석결과는 그림 2부터 그림 19까지에 나타내었다.

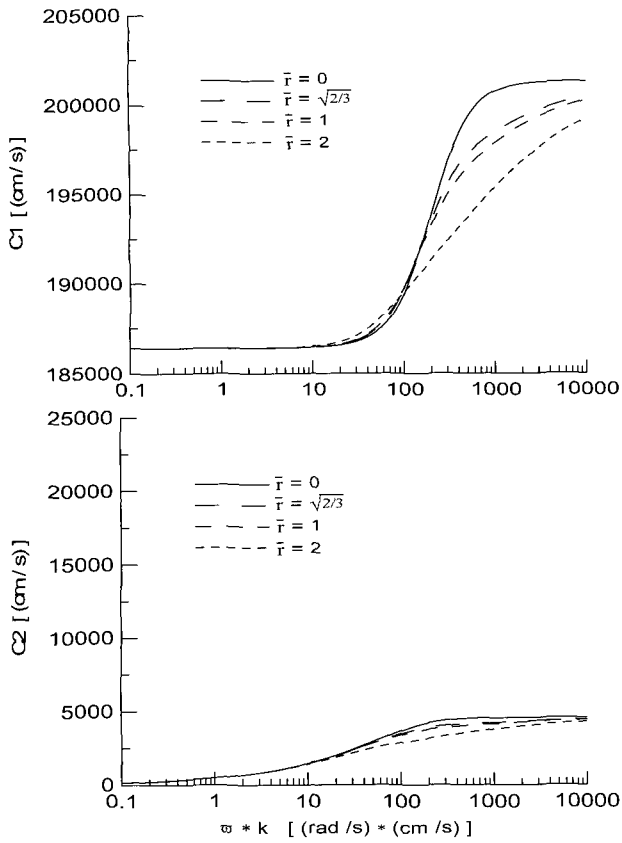


그림 2 파동속도 ( $n = 0.2, K_s = 70.3 \text{ kgf/cm}^2$ ).

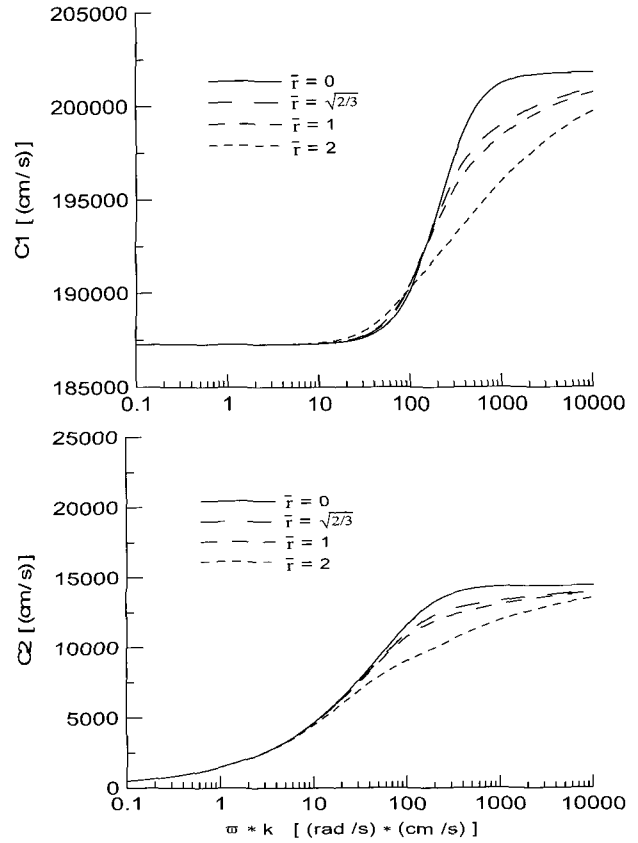


그림 4 파동속도 ( $n = 0.2, K_s = 703 \text{ kgf/cm}^2$ ).

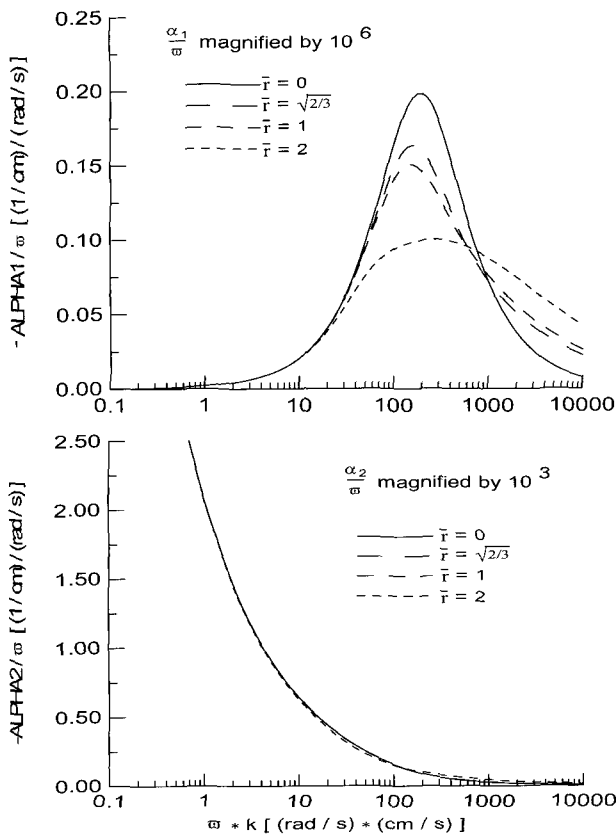


그림 3 감쇠 ( $n = 0.2, K_s = 70.3 \text{ kgf/cm}^2$ ).

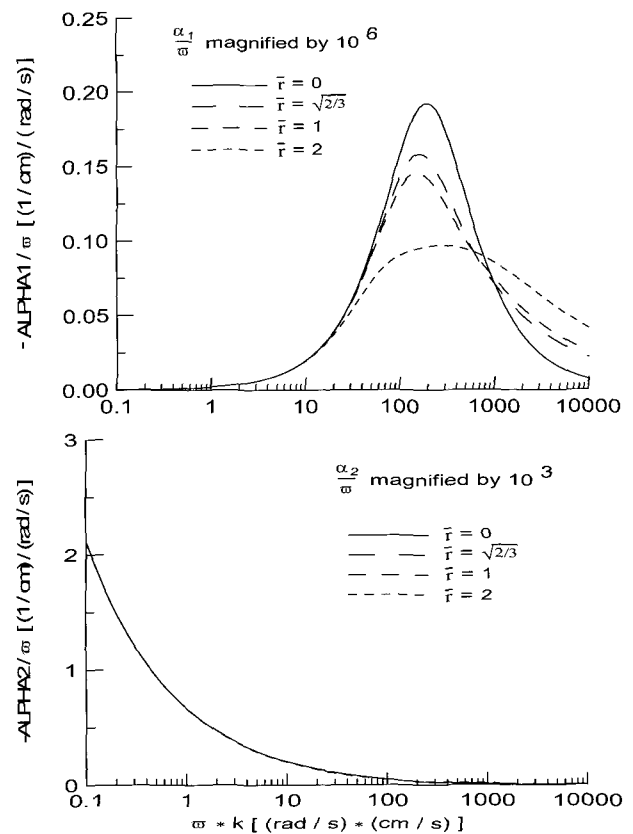


그림 5 감쇠 ( $n = 0.2, K_s = 703 \text{ kgf/cm}^2$ ).

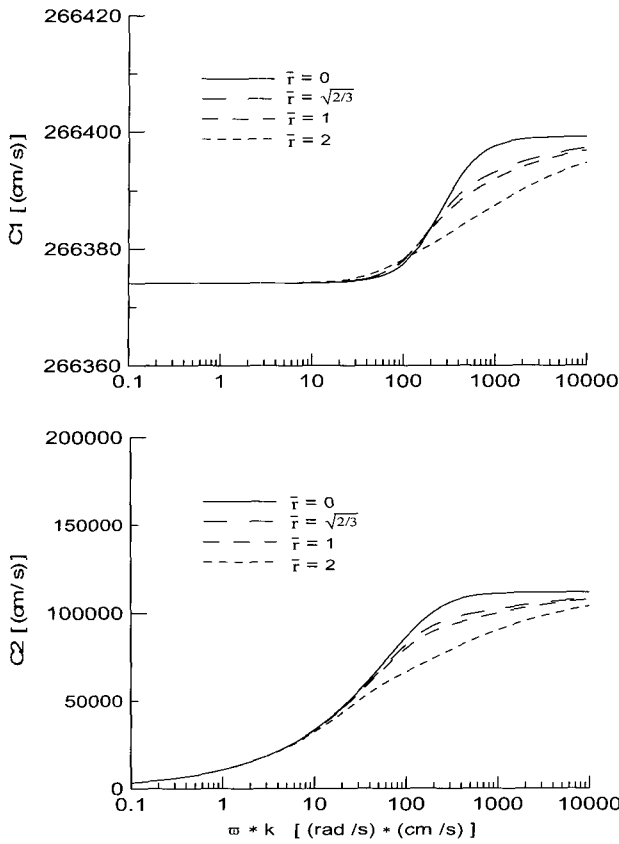


그림 6 파동속도 ( $n = 0.2$ ,  $K_s = 70,300 \text{ kgf/cm}^2$ ).

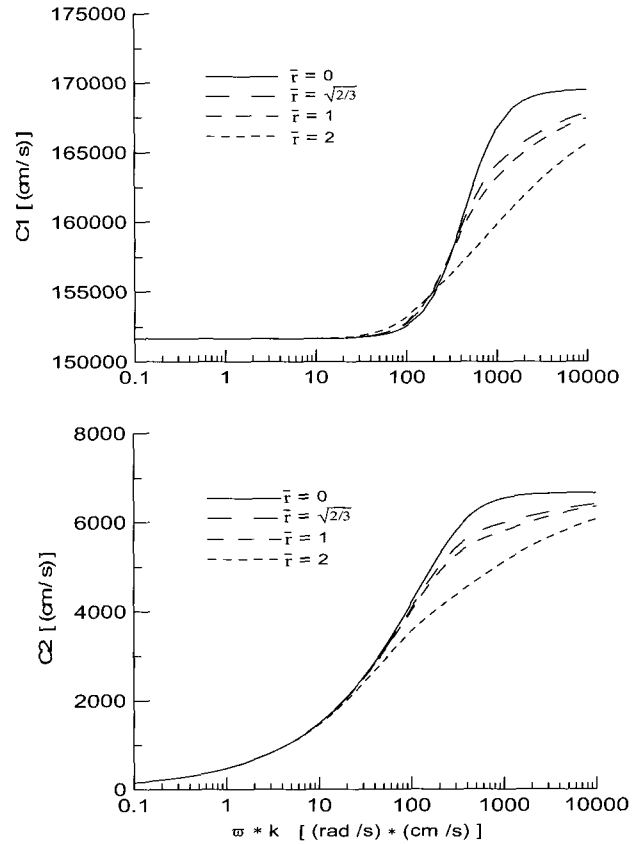


그림 8 파동속도 ( $n = 0.4$ ,  $K_s = 70.3 \text{ kgf/cm}^2$ ).

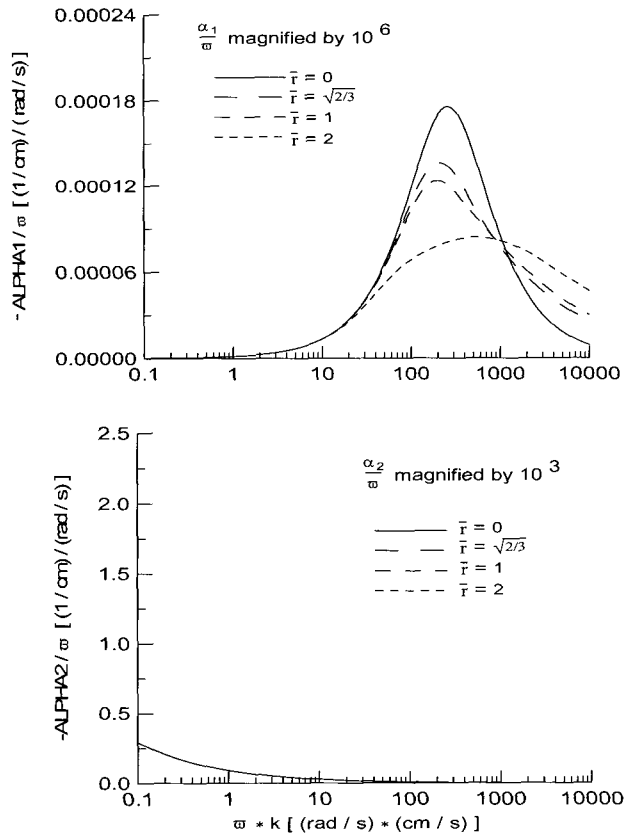


그림 7 감쇠 ( $n = 0.2$ ,  $K_s = 70,300 \text{ kgf/cm}^2$ ).

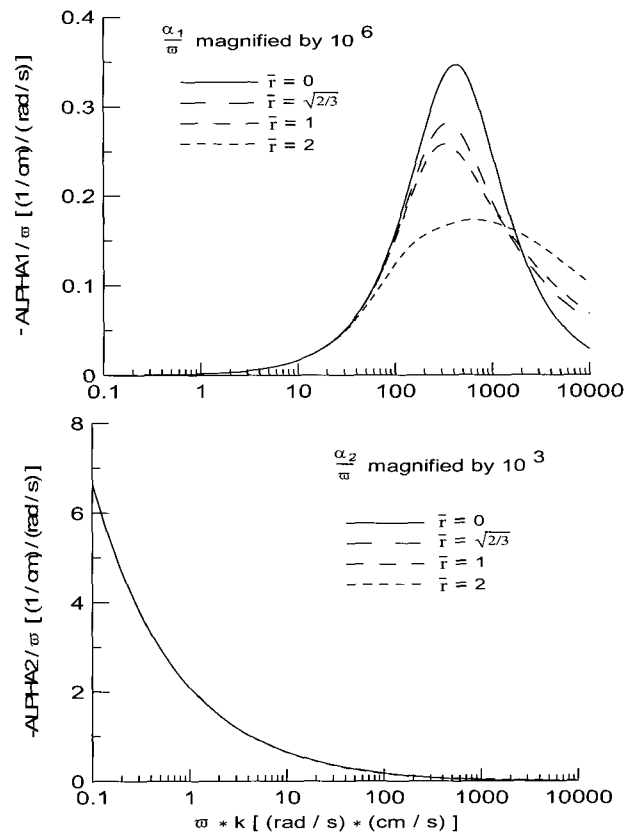


그림 9 감쇠 ( $n = 0.4$ ,  $K_s = 70.3 \text{ kgf/cm}^2$ ).

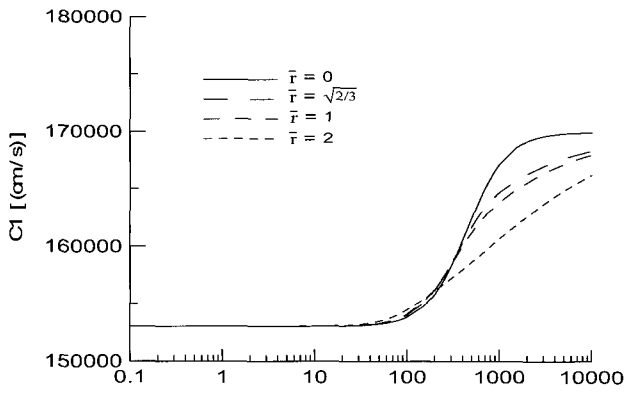


그림 10 파동속도 ( $n = 0.4, K_s = 703 \text{ kgf/cm}^2$ ).

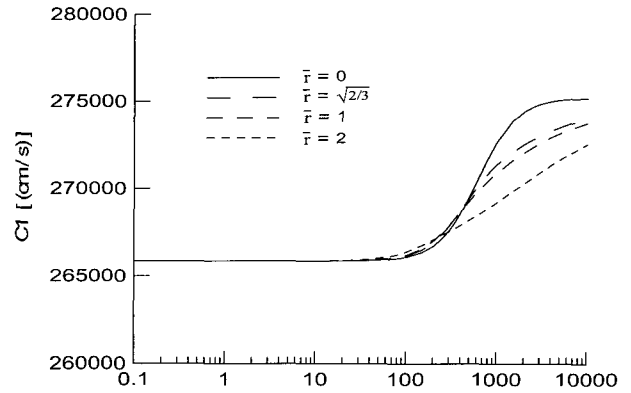


그림 12 파동속도 ( $n = 0.4, K_s = 70,300 \text{ kgf/cm}^2$ ).

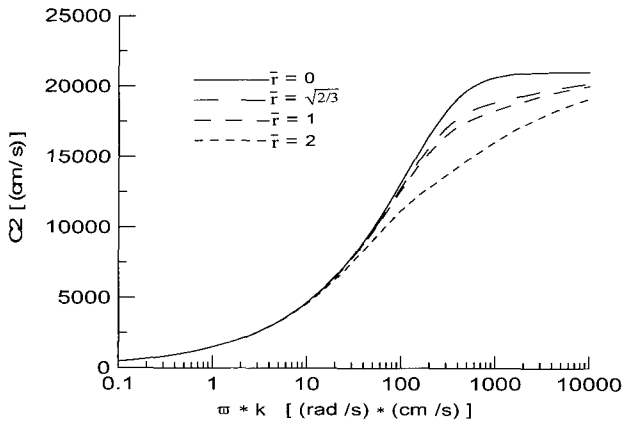


그림 11 감쇠 ( $n = 0.4, K_s = 703 \text{ kgf/cm}^2$ ).

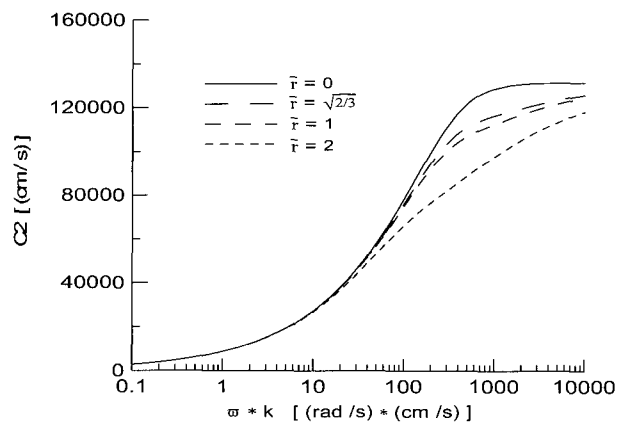
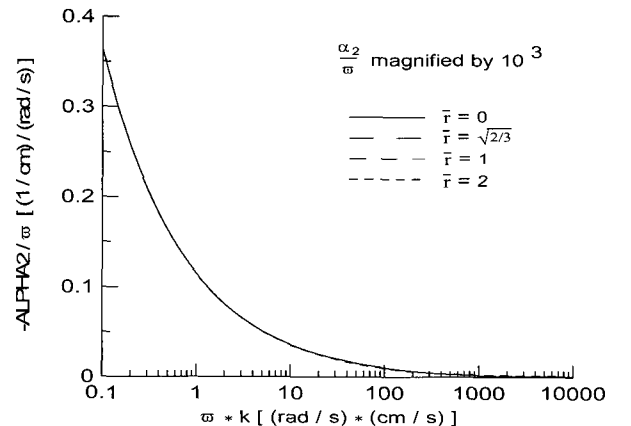
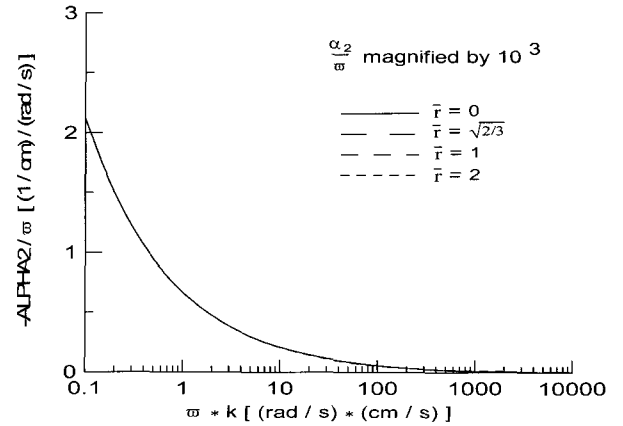
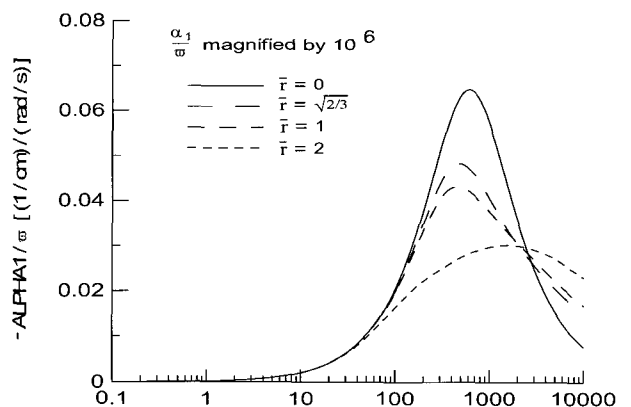
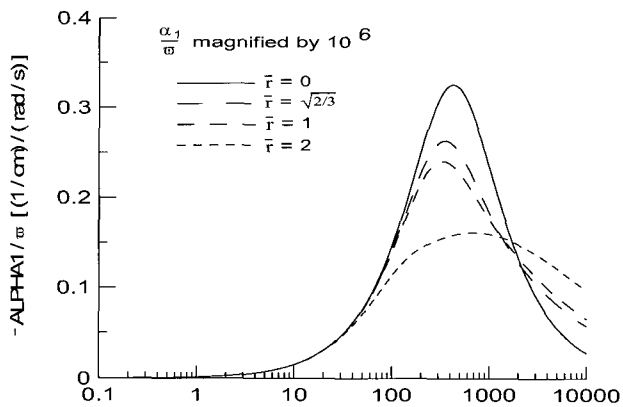


그림 13 감쇠 ( $n = 0.4, K_s = 70,300 \text{ kgf/cm}^2$ ).



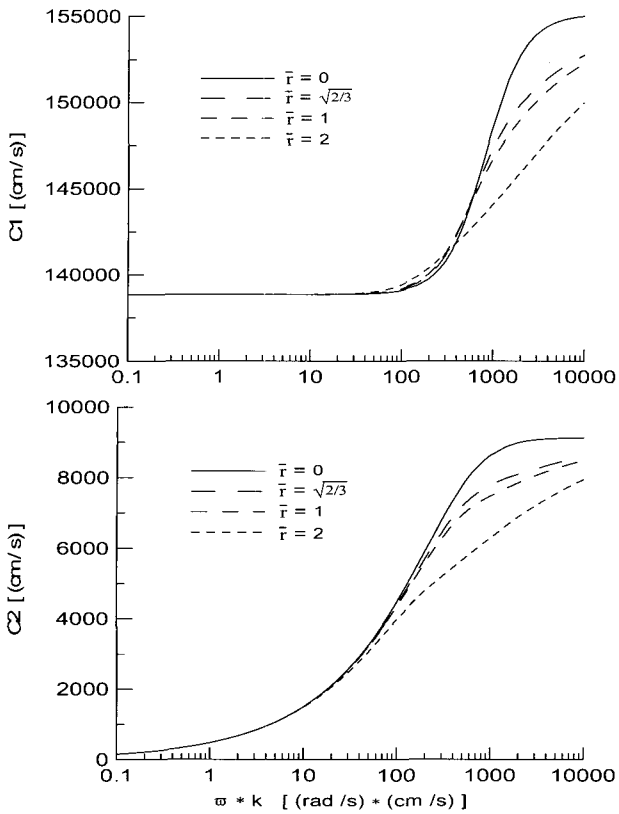


그림 14 담수에 포화된 다공성매체의 파동속도  
( $n = 0.6, K_s = 70.3 \text{ kgf/cm}^2$ ).

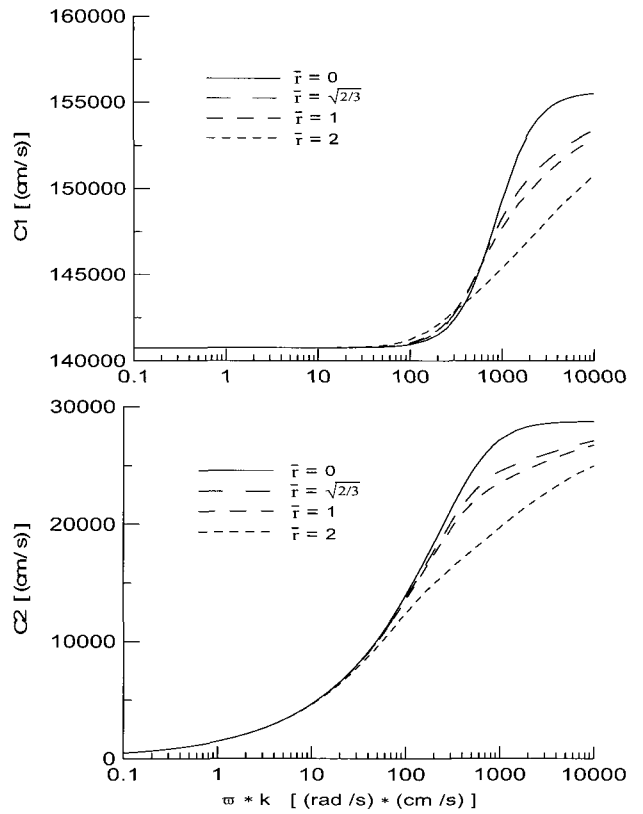


그림 16 담수에 포화된 다공성매체의 파동속도  
( $n = 0.6, K_s = 703 \text{ kgf/cm}^2$ ).

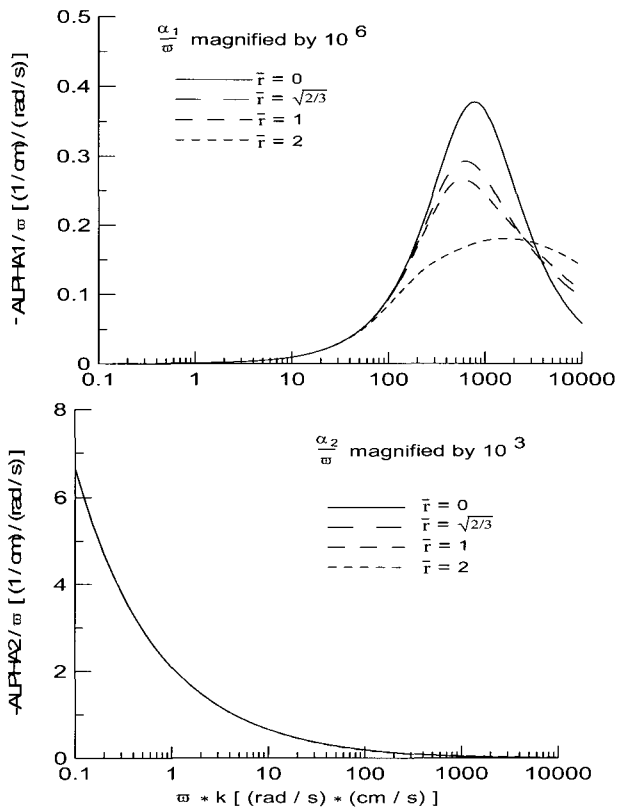


그림 15 담수에 포화된 다공성매체의 감쇠  
( $n = 0.6, K_s = 70.3 \text{ kgf/cm}^2$ ).

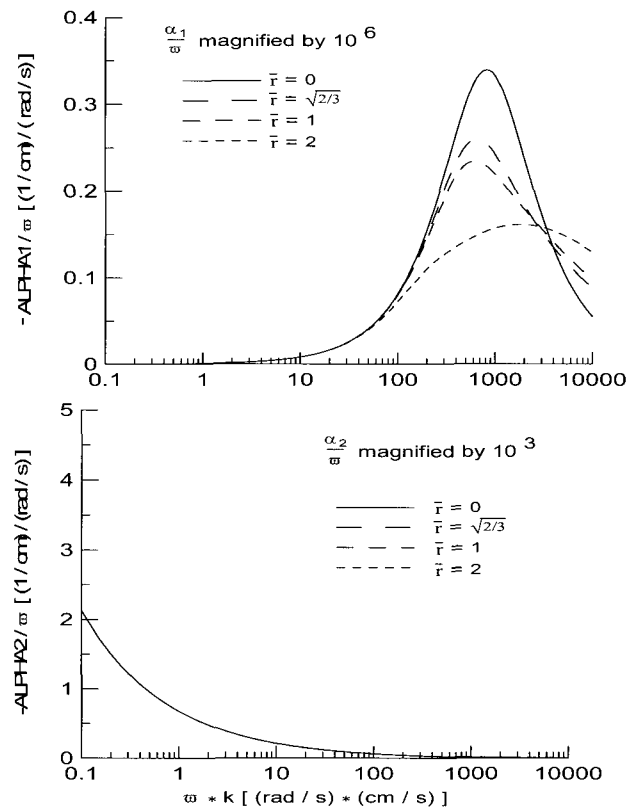


그림 17 담수에 포화된 다공성매체의 감쇠  
( $n = 0.6, K_s = 703 \text{ kgf/cm}^2$ ).

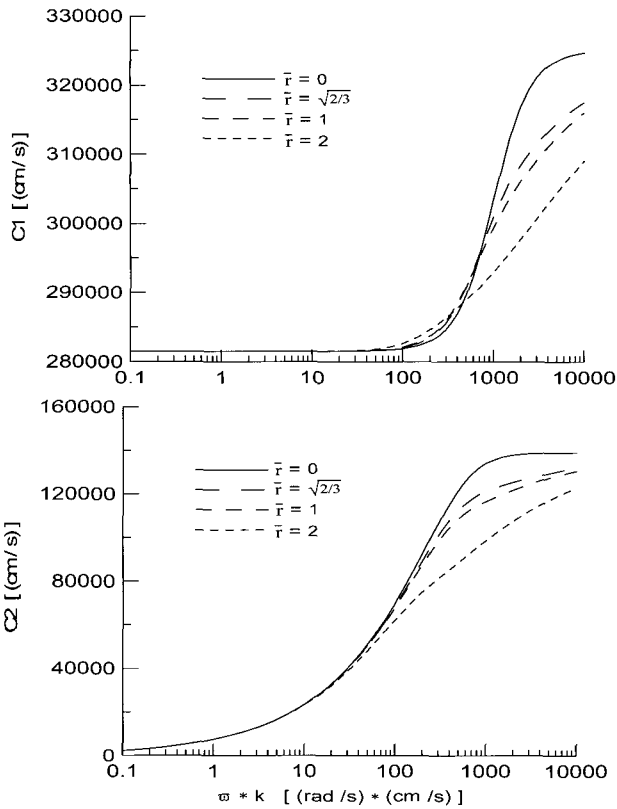


그림 18 담수에 포함된 다공성매체의 파동속도  
( $n = 0.6, K_s = 70,300 \text{ kgf/cm}^2$ ).

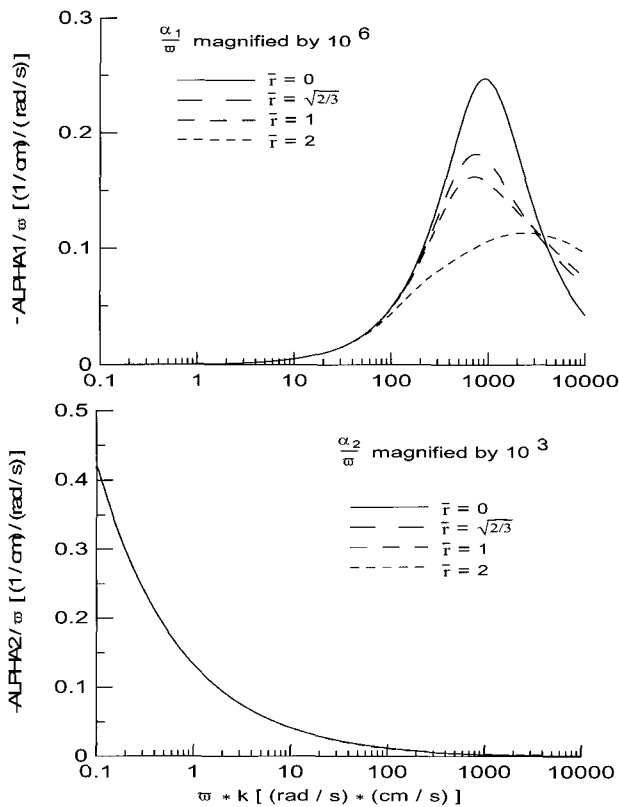


그림 19 담수에 포함된 다공성매체의 감쇠  
( $n = 0.6, K_s = 70,300 \text{ kgf/cm}^2$ ).

### 2.2 첫 번째 형태 파동의 속도

- 증가하는  $\omega k$ 에 대해 파동속도를 하한선에서 상한선까지 이동하면서 나타내었다. 하한치의 파동속도는 다음 식에 의해 비배수제한계수로부터 계산된 파동속도와 동일하다.

$$M = \rho_0 c_L^2 \tag{2}$$

여기서  $\sigma_p$ 는 최대축응력,  $\rho_0$ 는 초기재료밀도, 그리고  $M$ 은 다음 식에 의해 정의되는 Constrained secant계수이다.

$$M = \frac{\sigma_p}{\epsilon_p} \tag{3}$$

여기서  $\epsilon_p$ 는 최대축응력  $\sigma_p$ 에 대응하는 최대축변형도를 의미한다.

$\omega k$ 의 하한치에서는 간극수와 다공성입자 사이에 상대운동은 중요하지 않다.  $\omega k$ 의 큰값에서 파동속도는 앞에서 논의된 상한치에 근접한다. 이동은 50이 넘는 10,000 발생하며, 대표적인 모래의 간극률 0.254cm/s는 초당 약 8에서 1600 cycle 범위의 주파수와 일치한다.

- 파동속도 이동은 유체마찰이 작은 값(최소의  $\bar{r}$ )을 갖는 간극에서 더욱 날카롭게 발생한다.
- 파동속도는 입자계수의 증가에 따라 증가하고 있으나, 상한경계 파동속도와 하한경계 파동속도 사이의 차이점의 규모는 계수값이 증가하여도 일정하게 변화하지는 않는다.
- 연약한 입자에서는 파동속도 증가에 간극률의 영향은 거의 나타나지 않고 있으나, 강한 입자를 갖는 간극률이 큰 지반체에서는 파동속도에 큰 증가가 있으며 강한 입자를 갖는 간극률이 적은 지반체에서는 파동속도에 증가가 거의 없다.

### 2.3 두 번째 형태 파동의 속도

- $\omega k$ 값의 증가에 따라 거의 0에서부터 상한경계 속도에 이르기 까지 파동속도 이동이 발생한다. 하한경계는 점차적으로 0에 수렴하고 있다.
- 이동은 낮은 마찰저항을 갖는 간극에서 더욱 날카롭게 발생하고, 첫 번째 종류의 파동들에 대한 이동보다는 어느 정도 낮은  $\omega k$ 에서 발생한다.
- 파동속도 증가의 규모는 입자강성의 증가에 따라 증가한다.

- 간극률의 영향은 입자강성에는 큰 영향을 미치나, 파동 속도 증가에는 상대적으로 작은 영향을 미친다.

2.4 첫 번째 형태 파동들의 감쇠

- 특정한 감쇠는 파동속도에서 급경사로 증가하는 점에서 최고점을 나타낸다.
- 간극수와 입자 사이에 상대속도가 없는  $\omega k$ 의 낮은 값에서는 감쇠는 없다.  $\omega k$ 의 높은 값에서는 감쇠는 0으로 감소하는 경향을 나타낸다.
- 감쇠 최고점에서는 적은 마찰저항력을 갖는 간극은 많은 마찰저항력을 갖는 간극에 비하여 더 높은 특정 감쇠를 가진다.  $\omega k$ 의 높은 값에서는 이러한 경향은 반대로 되며, 더 높은 마찰 간극은 대부분 감쇠를 가진다.  $\omega k$ 의 낮은 값에서는 감쇠가 대부분 동일하다.
- 특정한 감쇠는 입자계수에 크게 영향을 받지만 어떤 계수-간극률 조합에서는 감쇠가 0으로 떨어진다.
- 간극률은 특정한 감쇠에 영향을 거의 미치지 않은 것으로 나타났다.

2.5 두 번째 형태 파동들의 감쇠

- 두 번째 종류의 파동들의 특정한 감쇠는  $\omega k$ 의 작은 값에서 아주 강력하고 더 높은  $\omega k$ 값에서는 0으로 급격하게 떨어진다. 높은  $\omega k$ 값에서는 감쇠는 거의 0에 가깝다. 파동속도가 상한값의 극한에 근접하게 되면 감쇠는 거의 0이 되지만, 파동속도가 이동영역 아래로 떨어지게 되면 감쇠는 매우 강력해진다. 따라서 두 번째 종류의 파동은 상한경계 속도 아래에서 찾아내는 것이 매우 어렵다는 것을 알 수 있었다. 두 번째 종류의 파동들의 감쇠값 규모는 첫 번째 종류의 파동들의 감쇠값 규모에 비해 약 3배 정도 크게 나타났다.
- 흐름경로계수  $\gamma$ 이 특정한 감쇠에 미치는 영향은 거의 없다.
- 입자계수의 증가는 특정한 감쇠를 감소시킨다.
- 간극률은 특정한 감쇠에 영향을 거의 미치지 않는다.

3. 담수(Fresh water)와 해수(Sea water)의 비교

다공성 지반체가 해수에 의해 포화되는 경우가 많기 때문에 해수에 의해 포화된 대표적인 모래질 토사에 대한 파동속도와 감쇠를 계산하여 담수에 의해 포화된 모래질 토사에 대

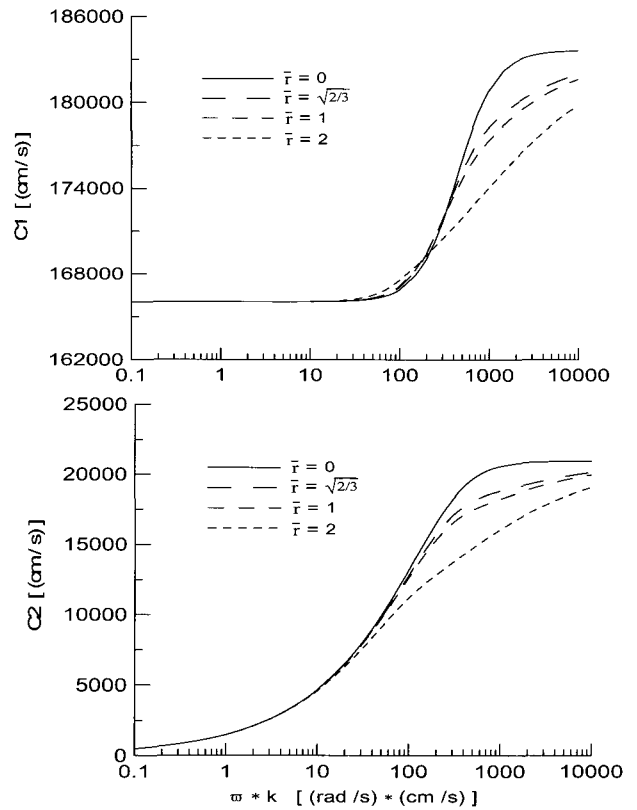


그림 20 해수에 포화된 다공성매체의 파동속도 ( $n = 0.4, K_s = 703 \text{ kgf/cm}^2$ ).

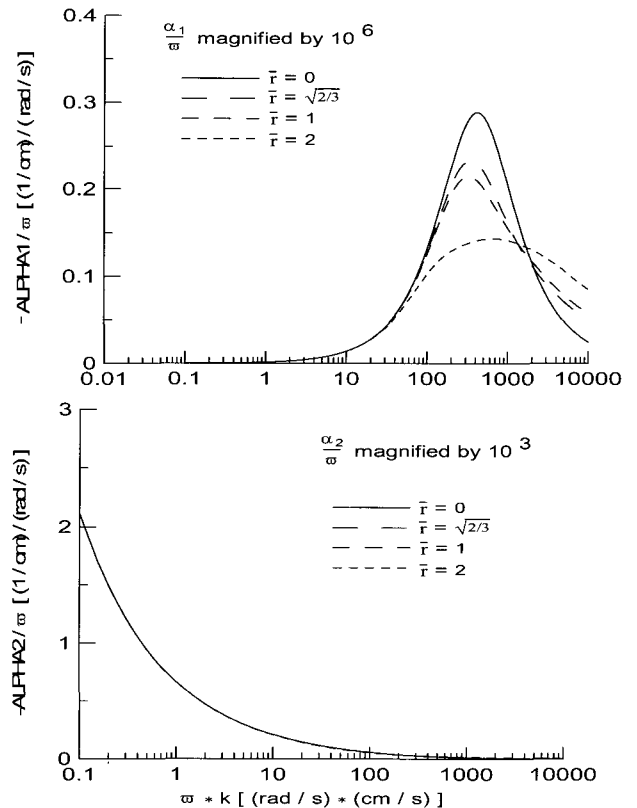


그림 21 해수에 포화된 다공성매체의 감쇠 ( $n = 0.4, K_s = 703 \text{ kgf/cm}^2$ ).



한 동일한 특성치들과 비교해 보았다. 표 2에 나타난 특성과  $n=0.4$ 와  $K_s=703\text{kgf/cm}^2$  값을 가지고 있는 모래질 토사가  $24,605.3\text{kgf/cm}^2$ 의 체적계수를 가지는 해수에 의해 포화된 경우에 대한 해석을 수행하여 그림 20과 그림 21에 각각 나타내었다. 이들 결과는 이미 앞에서 수행하여 그림 10과 그림 11에 나타난 바 있는 담수의 경우와 비교하였다. 비교결과를 요약하면 다음과 같다.

- 첫 번째 종류의 파동들의 파동속도는 해수에 의해 포화된 지반체의 경우 해수의 체적계수가 더 크기 때문에 혼합체의 체적계수가 크게 되어 더 크게 나타났다.
  - 두 번째 종류의 파동들의 파동속도는 간극수의 계수에 의해 크게 영향을 받지 않는다.
  - 첫 번째 종류의 파동들의 특정한 감쇠는 해수에 의해 포화된 지반체의 경우 더 낮게 나타났다.
  - 그러나 두 번째 종류의 파동들의 특정한 감쇠는 해수에 의해 포화된 지반체의 경우 더 높게 나타났다.
- 위의 사항들 중에서 마지막 3가지 사항은 현 단계에서 정확하게 이해할 수 없다.

4. 속도와 감쇠에 미치는 포와슨비의 영향

입자의 포와슨비가 미치는 영향을 파악하기 위하여 표2에 표시된 특성을 가지고 있으며  $n=0.4$ 와  $K_s=703\text{kgf/cm}^2$  값을 가지는 대표적인 포화된 모래질 토사에 대한 파동속도와 감쇠를 계산하였다. 포와슨비는 0.2와 0.4에 대해 검토하였다.

제한 입자계수(Constrained skeleton modulus)는 다음과 같다(Kim 등, 1984).

$$M_s = \frac{3(1-\nu)}{(1+\nu)} K_s \tag{4}$$

여기서  $\nu$ 는 포와슨비이고,  $K_s$ 는 입자체적계수를 의미한다.

식 (4)가 나타내는 바와 같이 포와슨비의 증가는 제한 입자계수의 감소를 의미한다. 해석결과는 그림 22과 그림 23에 각각  $\nu=0.2$ 인 경우, 그림 24와 그림 25에 각각  $\nu=0.4$ 인 경우를 각각 나타내었다. 이 결과들은 그림 10과 그림 11에 나타난  $\nu=0.3$ 인 경우에 대해 비교해 보았다. 비교결과 포와슨비의 변화는 속도와 감쇠에 약간의 영향을 줄 수 있었다. 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

- 첫 번째 종류와 두 번째 종류의 파동 모두 파동속도는 포와슨비가 작을 때 약간 크게 나타났다.
- 두 파동의 형태 모두 특정한 감쇠는 포와슨비가 작으면 약간 작게 나타났다.

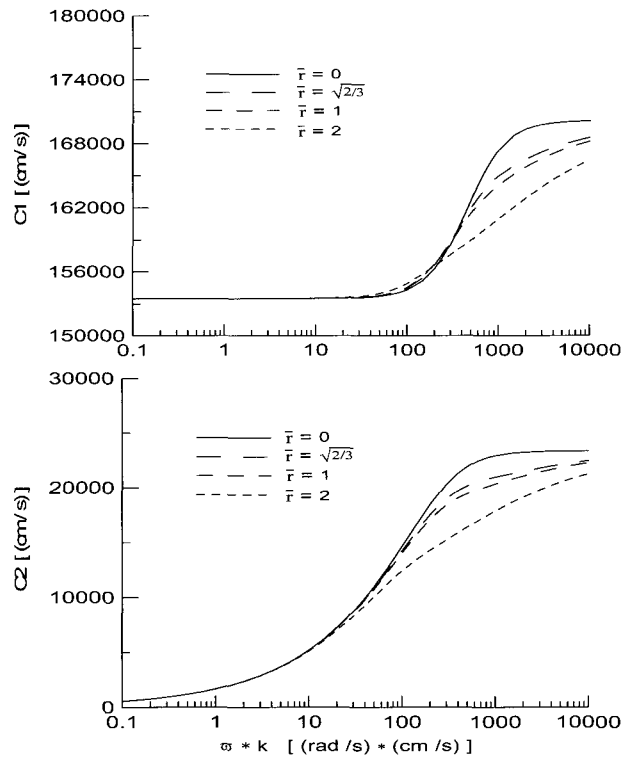


그림 22 파동속도 ( $\nu = 0.2, n = 0.4, K_s = 703 \text{ kgf/cm}^2$ ).

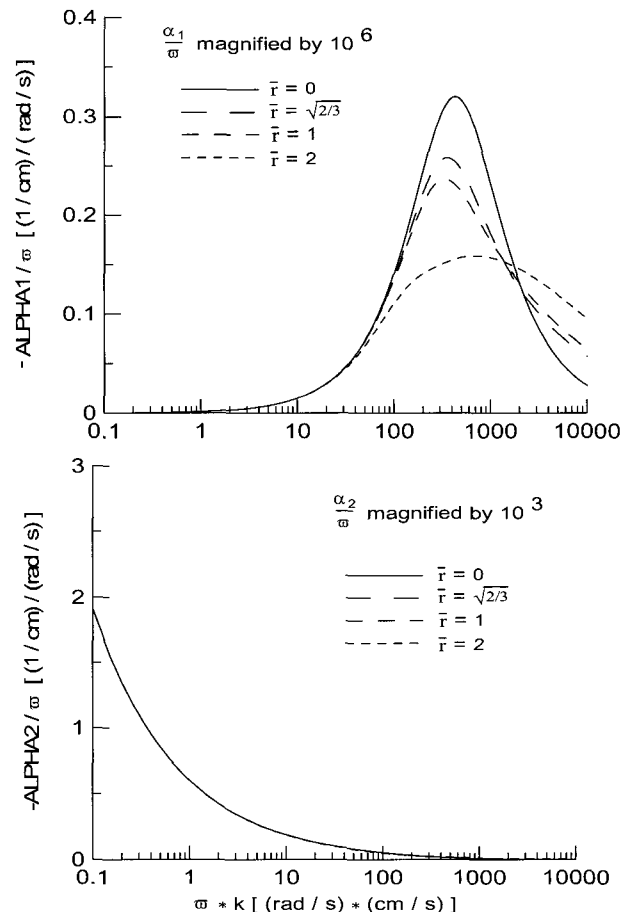


그림 23 감쇠 ( $\nu = 0.2, n = 0.4, K_s = 703 \text{ kgf/cm}^2$ ).

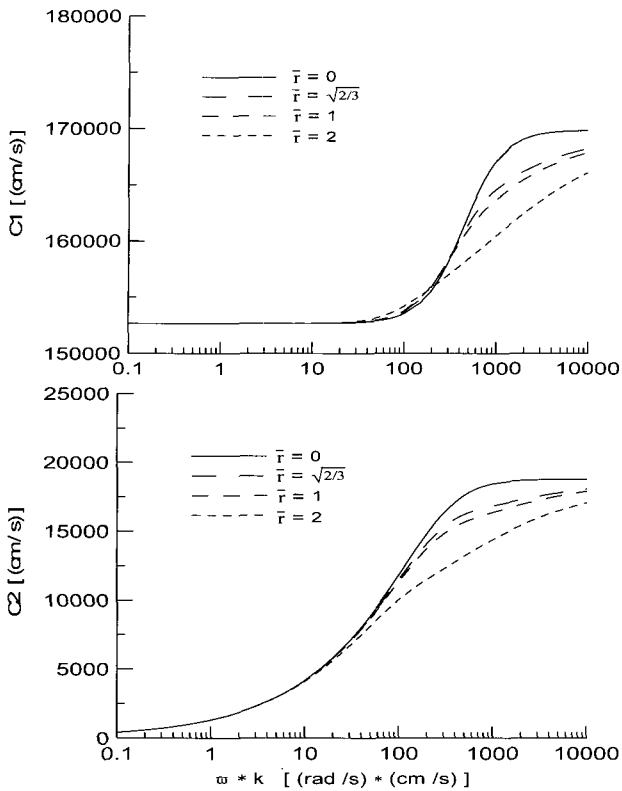


그림 24 파동속도 ( $\nu = 0.4, n = 0.4, K_s = 703 \text{ kgf/cm}^2$ ).

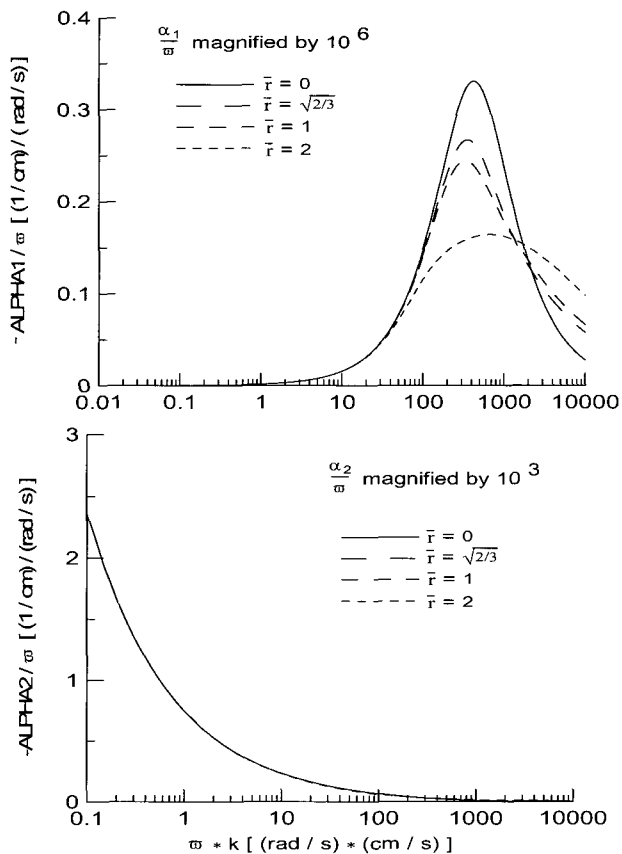


그림 25 감쇠 ( $\nu = 0.4, n = 0.4, K_s = 703 \text{ kgf/cm}^2$ ).

### 5. 유체마찰에 대한 정확한 수식과 근사식의 비교

질량증가계수(Mass increment factor)는 유체마찰로부터 얻어지는 흐름저항과 관계가 되는 주파수이다(Kim 등, 1986). 이것은 추가의 관성질량항으로 취급된다. Darcy흐름의 단순화를 위해 일반화된 Darcy흐름이 되도록  $r = 0$ 로 하였다. 층류(Laminar flow)조건에 기초를 둔 Biot의 이론식에서 간극기하에 좌우되도록 질량증가계수를 도입하였다. 이상화된 간극기하에 대해서 질량증가계수는 원형관로과 Flat 관로에 각각 1/3과 1/5을 가진다(Biot, 1956).  $r$ 값을 사용하는 근사식이 사용될 때, 흐름경로상수  $\bar{r}$ 은 0을 사용하여야 한다.

흐름경로상수  $\bar{r}$ 는 층류에서 유체마찰에 관련된 주파수에 대한 Biot의 정확한 표현을 의미한다. 근사적인 해를 가지고 수행하는 경우 Darcy흐름, 원형관로, Flat 관로에 대한 값은 각각 0, 1,  $\sqrt{2/3}$ 이다.  $\bar{r}$ 를 사용하는 정확한 해가 이용될 때 마다 근사값  $r = 0$ 을 사용하여야 한다.

유체마찰항이 주파수에 관련되어 있고 주파수는 앞에서 알려져 있지 않기 때문에 이러한 근사는 필수적이다. 그러므로 위와 같이 반복적인 과정 또는 근사방법은 반드시 반영되어야 한다. 반복적인 과정은 대부분의 경우 너무 많은 시간이 소비되는 문제점이 있다.

유체마찰에 대한 질량증가 근사의 적정성을 검토하기 위하여 표 2에 표시된 특성을 가지는 표준의 포화된 지반체에 대한 계산을 수행하였다. 계산수행과정에서 간극률  $n$ 은 0.4를 사용하였다. 입자계수의 값 범위를  $70.3 \text{ kgf/cm}^2$ 에서부터  $70,300 \text{ kgf/cm}^2$ 까지 변화시켜 가면서 수행한 해석결과를 그림 26에서부터 그림 31까지 나타내었다. 이들 그림에서 원형관로에서 유체마찰에 대한 정확한 표현 ( $\bar{r} = 1$ )을 근사 표현 ( $r = 1/3$ )과 비교하였다. 또한 일반화된 Darcy 흐름마찰 근사표현 ( $r = \bar{r} = 1$ )과도 비교하였다. 비교검토를 통하여 얻어진 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

- 질량증가 근사표현은 감쇠와 파동속도에서의 변화가 최대가 되는  $\omega k$ 의 한계값에 이르기까지 파동속도와 감쇠값을 아주 잘 나타내고 있다.
- 임계값 이상의  $\omega k$ 에 대한 질량증가근사표현은 두 종류의 파동속도와 첫 번째 종류의 파동에 대한 감쇠값을 낮게 평가하고 있다. 두 번째 종류의 파동의 감쇠는 유체마찰항과는 무관하다. 상한경계 파동속도는 흐름경로상수  $\bar{r}$ 과 무관하고, 파동속도는 Darcy흐름으로 수렴한다. 그러나 근사표현에서 질량증가계수는 아직도  $\omega k$ 의

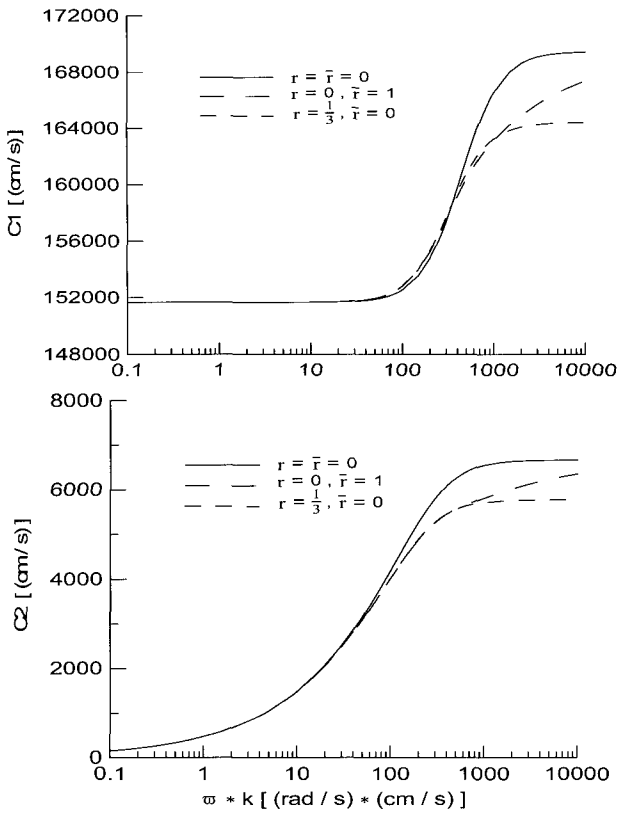


그림 26 유체마찰에 대한 근사식과 정확해의 비교  
- 파동속도 ( $n = 0.4, K_s = 70.3 \text{ kgf/cm}^2$ ).

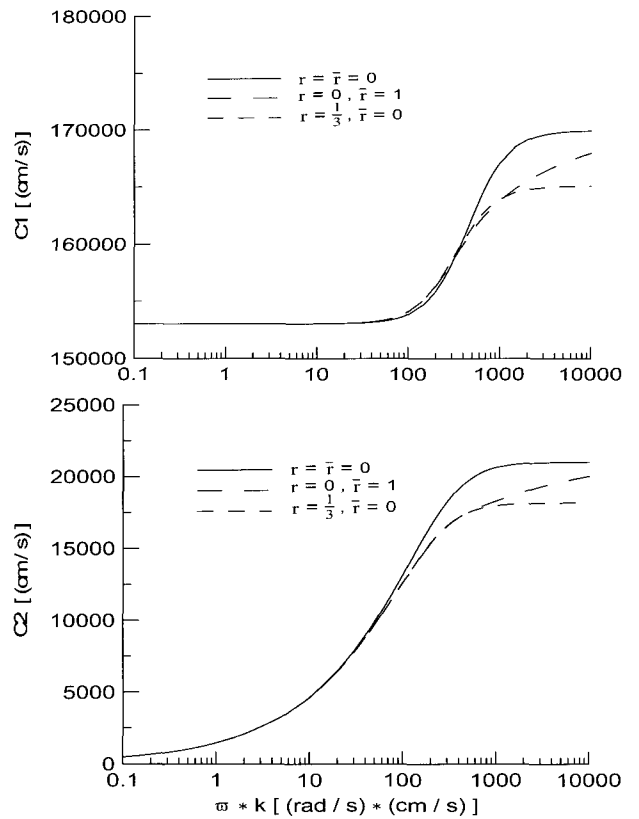


그림 28 유체마찰에 대한 근사식과 정확해의 비교  
- 파동속도 ( $n = 0.4, K_s = 703 \text{ kgf/cm}^2$ ).

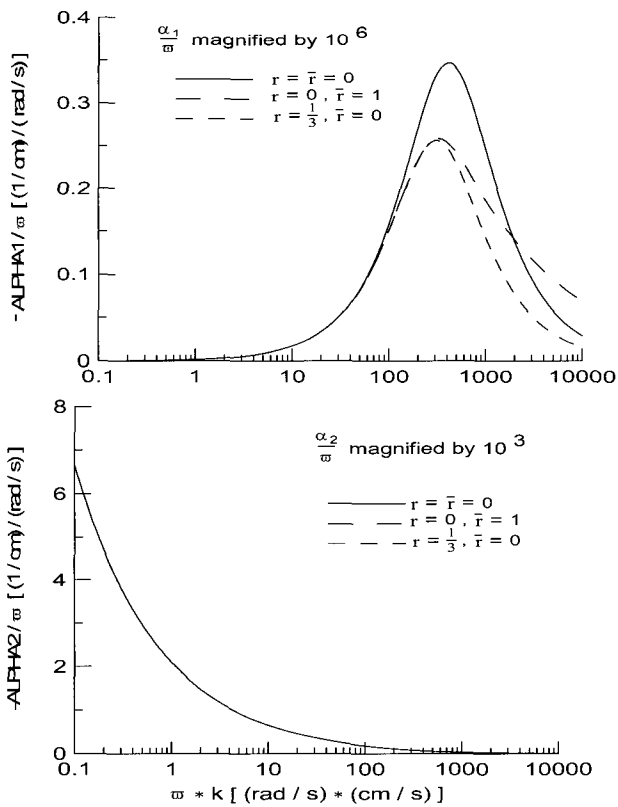


그림 27 유체마찰에 대한 근사식과 정확해의 비교  
- 감쇠 ( $n = 0.4, K_s = 70.3 \text{ kgf/cm}^2$ ).

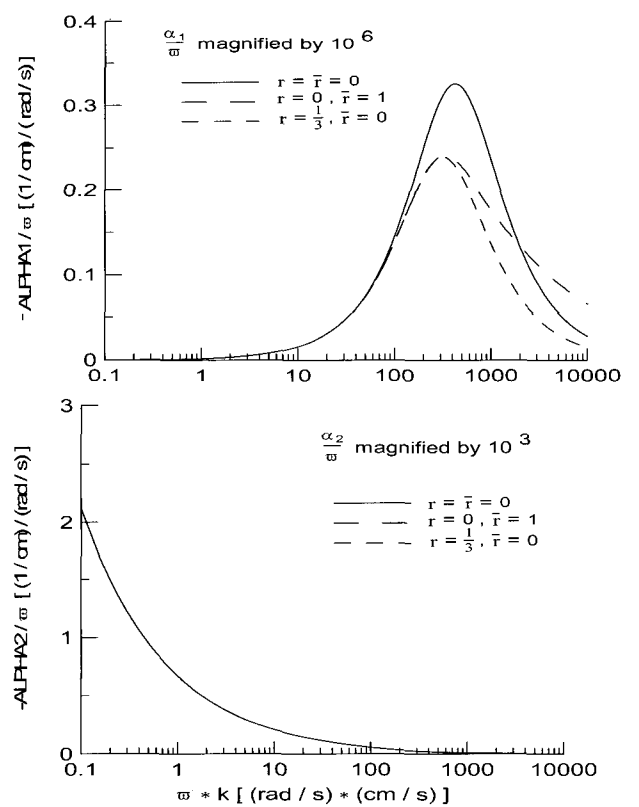


그림 29 유체마찰에 대한 근사식과 정확해의 비교  
- 감쇠 ( $n = 0.4, K_s = 703 \text{ kgf/cm}^2$ ).

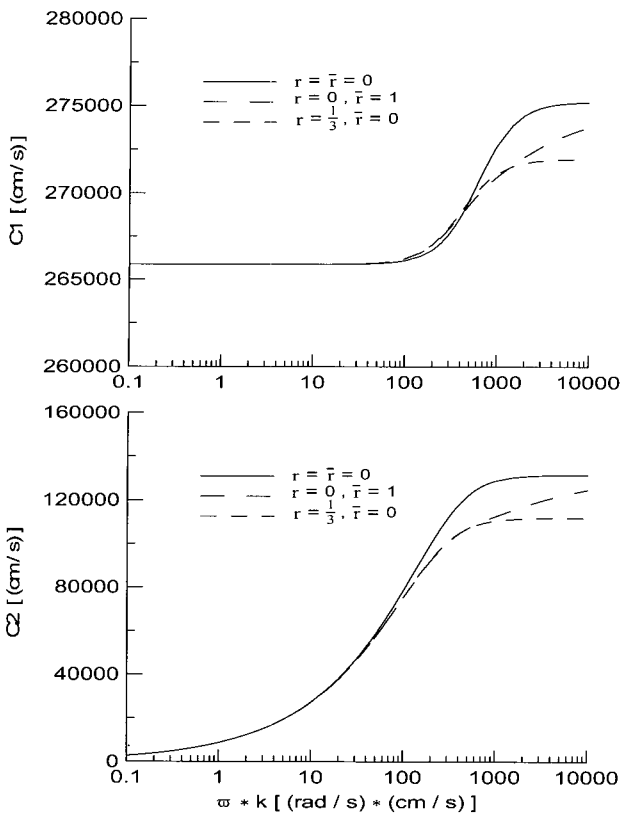


그림 30 유체마찰에 대한 근사식과 정확해의 비교  
- 파동속도 ( $n = 0.4, K_s = 70,300 \text{ kgf/cm}^2$ ).

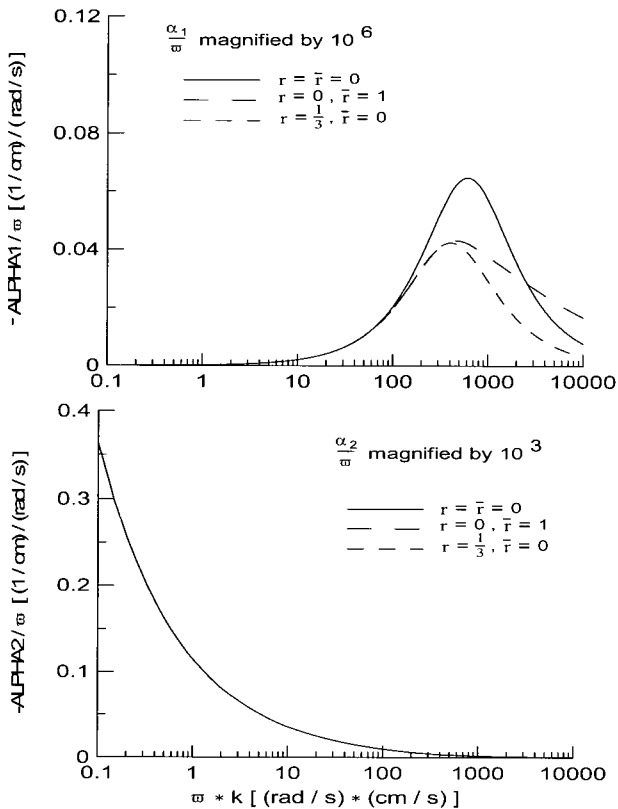
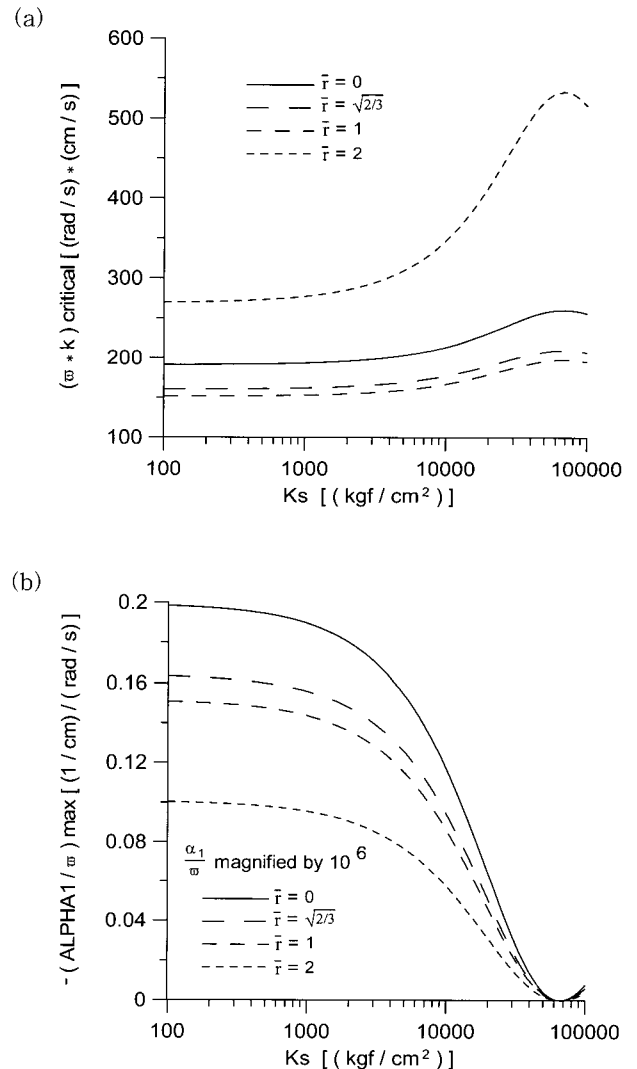


그림 31 유체마찰에 대한 근사식과 정확해의 비교  
- 감쇠 ( $n = 0.4, K_s = 70,300 \text{ kgf/cm}^2$ ).

큰 값에서 전달되고 있다.

### 6. 감쇠와 파동속도에 간극률과 입자계수가 미치는 영향

본 절에서는 입자체적계수의 함수로서 파동속도와 감쇠를 평가하고자 한다. 본 논문에서 사용한 재료특성값은 표 2에 나타난 것과 동일하다. 각 간극률에 대하여 흐름상수와 무관한 상한경계와 하한경계의 파동속도를 평가하고자 한다. 게다가 첫 번째 종류의 파동의 특정한 감쇠가 최대값에 도달하는 주파수-투수성 곱의 한계값을 평가하고자 한다. 주파수-투수성 한계값에서 첫 번째 종류의 파동의 속도와 두 종류의 파동의 특정한 감쇠를 계산하였다.  $n = 0.2, 0.4, 0.6$ 에 대해 수행한 해석결과를 그림 32에서 그림 34까지 나타내었다.



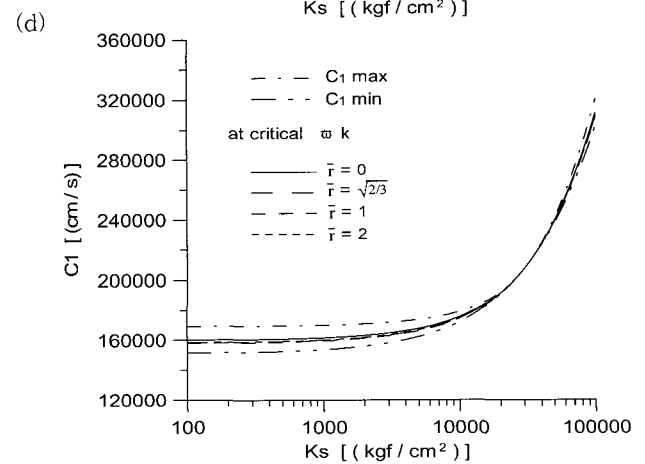
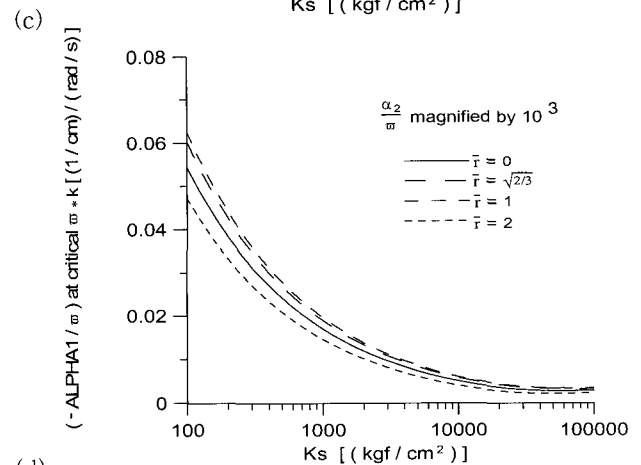
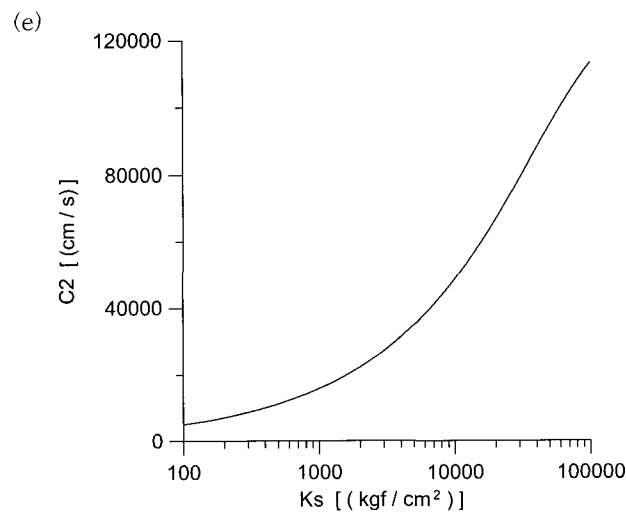
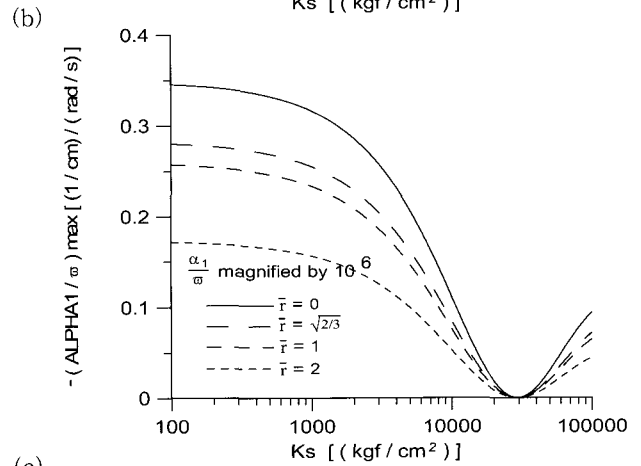
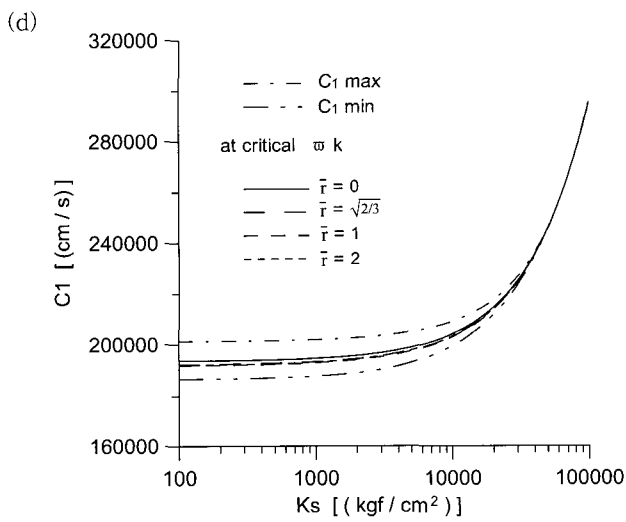
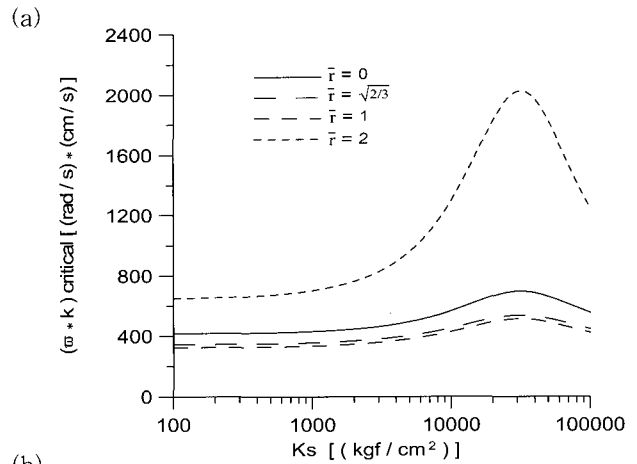
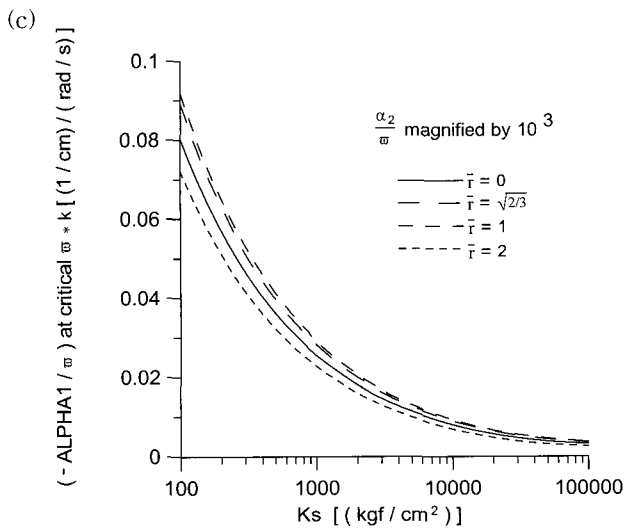


그림 32  $n=0.2$ 에서 해석 결과

(a)  $\omega k$ 의 임계값. (b) 첫 번째 형태 파동의 최대 감쇠값. (c) 임계값  $\omega k$ 에서 두 번째 형태 파동의 감쇠. (d) 첫 번째 형태 파동의 속도. (e) 두 번째 형태 파동의 최대 속도.

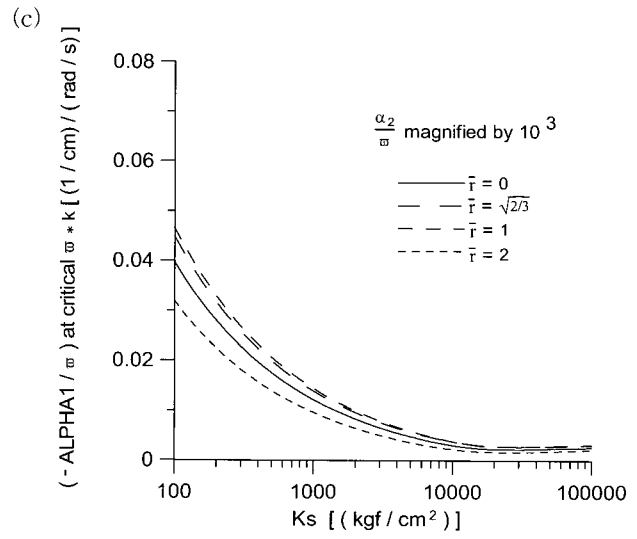
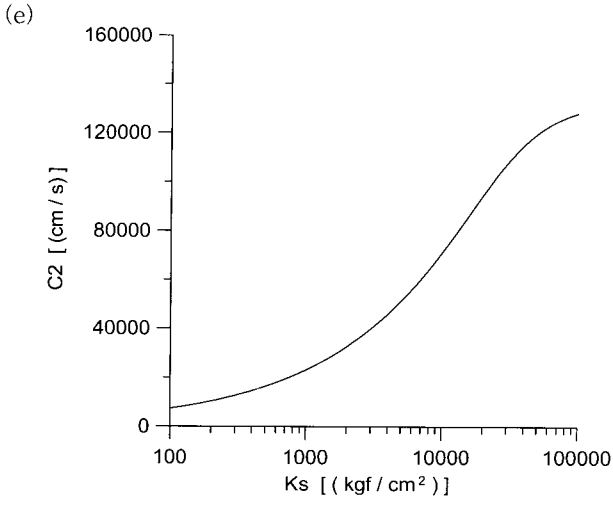


그림 33 n=0.4에서 해석 결과

(a)  $\omega k$ 의 임계값. (b) 첫 번째 형태 파동의 최대 감쇠값. (c) 임계값  $\omega k$ 에서 두 번째 형태 파동의 감쇠. (d) 첫 번째 형태 파동의 속도. (e) 두 번째 형태 파동의 최대 속도.

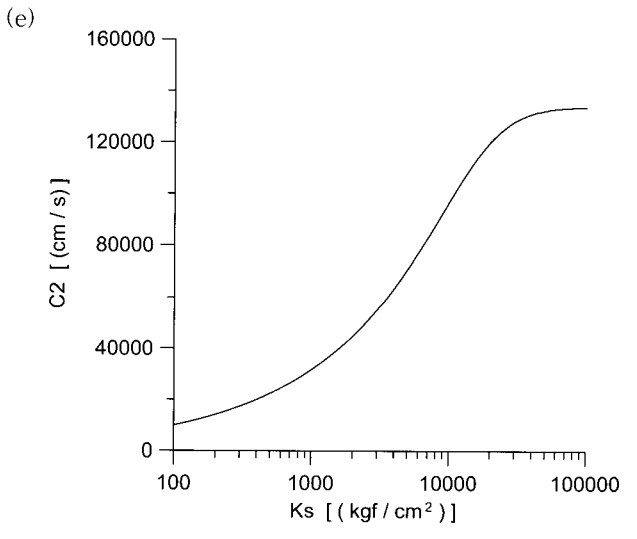
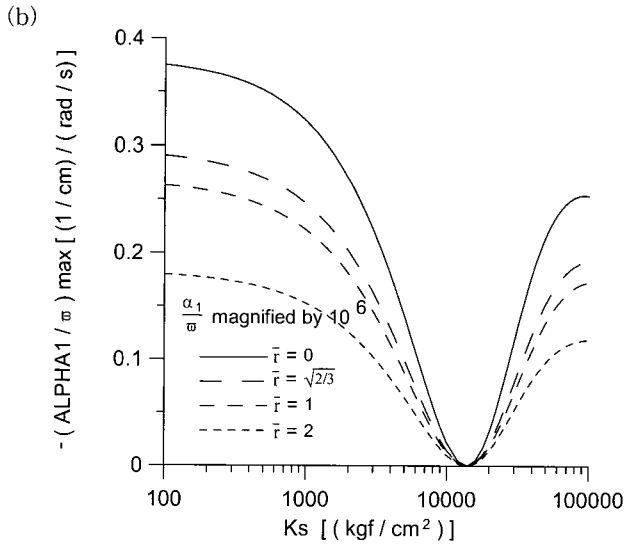
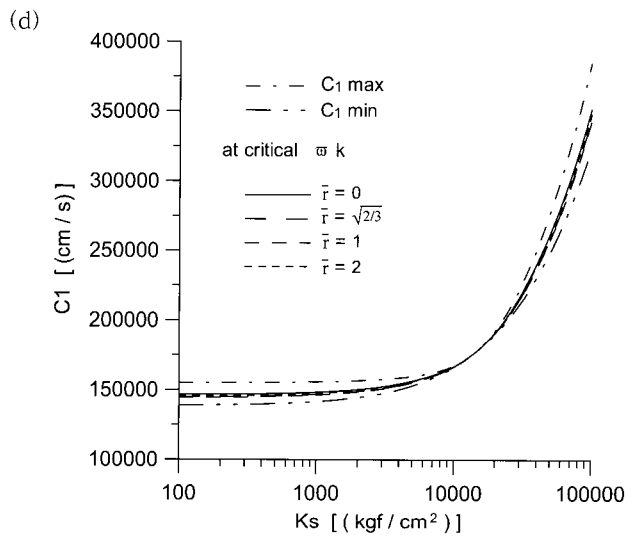
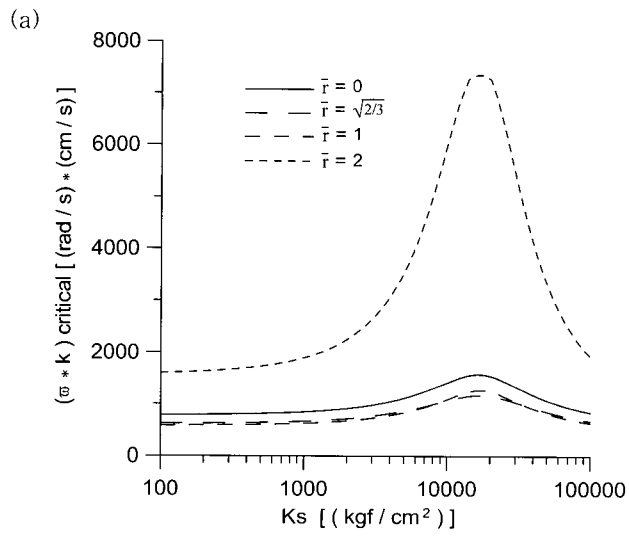


그림 34 n=0.6에서 해석 결과

(a)  $\omega k$ 의 임계값. (b) 첫 번째 형태 파동의 최대 감쇠값. (c) 임계값  $\omega k$ 에서 두 번째 형태 파동의 감쇠. (d) 첫 번째 형태 파동의 속도. (e) 두 번째 형태 파동의 최대 속도.

### 6.1 임계 주파수-투수성

- $\omega k$ 의 임계값은 입자체적계수가 클 때 ( $K_S > 7030 \text{ kgf/cm}^2$ )최고를 보여주었다. 최고값을 보여주는  $K_S$ 값은 간극률이 증가함에 따라 감소한다.
- $\omega k$ 의 임계값 규모이 간극률이 증가함에 따라 증가한다.
- 그러나  $\omega k$ 의 임계값은 유체마찰의 변화에 따라 변화하지는 않는다.  $\omega k$ 의 가장 적은 값은  $\bar{r}$ 값이 1인 경우에 발생한다.  $\bar{r}$ 값이 1보다 크거나 적은 경우에는  $\omega k$ 의 임계값의 큰값을 보여준다.

### 6.2 첫 번째 종류의 파동들의 최대 감쇠

- $\omega k$ 의 임계값이 최고점에 이르는 입자체적계수에서 특정감쇠곡선은 감쇠가 0이 된다.
- 특정감쇠의 규모는 간극률이 증가함에 따라 증가한다.
- 특정감쇠의 규모는 유체마찰의 감소 ( $\bar{r}$ 의 감소)에 따라 증가한다.

### 6.3 $\omega k$ 의 임계값에서 첫 번째 종류의 파동들의 특정 감쇠

- $\omega k$ 의 임계값에서 특정 감쇠는 입자체적계수의 증가에 따라 기하급수적으로 감소한다.
- 특정감쇠의 규모는 간극률이 증가함에 따라 감소한다.
- 특정감쇠의 규모는 흐름경로상수 ( $\bar{r}$ )이 2.0일 때 지반체에서 가장 작다.

### 6.4 첫 번째 종류의 파동의 속도

- 입자계수  $K_S$ 의 값이  $703 \text{ kgf/cm}^2$ 이 될 때까지 파동속도는 계수가 증가함에 따라 점차적으로 증가한다. 속도는 간극률이 작은 지반체에서 더 크다.  $\omega k$ 의 임계값이 최대에 이르는  $K_S$ 의 값 부근에서 파동속도는 기하급수로 증가하고 있으며,  $\omega k$ 의 임계값이 최대가 되는 단일 값에 수렴한다.
- 흐름경로상수  $\bar{r} = 2$ 일 때 임계점에서 파동속도는 근사적으로 최대값과 최소값의 평균값과 같다. 흐름경로상수가 다른 값을 보이는 경우 ( $\bar{r} = 0, \sqrt{2/3}, 1$ ),  $\omega k$ 의 임계값에서 파동속도는 최대값과 최소값의 평균보다 약간 작다.

### 6.5 두 번째 종류의 파동의 최대속도

- 일반적으로 파동속도는 입자체적계수가 증가함에 따라 증가하고, 파동속도의 규모는 간극률이 큰 지반체에서 더 크게 나타난다.
- 최대파동속도는 유체마찰에 영향을 받지 않는다.

## 7. 결 론

본 논문에서는 “포화된 다공성매체에서 파동의 전파특성. I. 이론해 유도”(김선훈 등, 2007)에서 유도한 이론해를 컴퓨터 코드로 작성하고, 이를 활용하여 Parametric study로서 전파속도와 감쇠에 대해 다공성매체에서 외력주파수의 영향과 체계적인 변화를 평가하였다. Parametric study를 통하여 수행한 주요 연구내용은 다음과 같다.

- 첫 번째 파동과 두 번째 파동의 속도와 감쇠, 투수성과 주파수의 곱의 함수로서 속도와 감쇠의 변화
- 파동의 전파특성에 미치는 간극형상과 유체마찰의 영향
- 파동의 전파특성에 미치는 간극수의 특성(바닷물과 담수), 간극, 입자특성(포와스비, 체적계수) 등의 영향
- 유체마찰에 대한 근사식의 적합성 검토

본 연구에서 수행하여 얻어진 해석결과는 다양한 지반체에서 파동의 속도특성과 공간의 감쇠에 대한 정량적인 검토와 판단에 대한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구의 결과는 파동의 전파현상을 이해하는데 중요한 길잡이가 될 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 논문은 교육인적자원부 재원으로 한국학술진흥재단 2004년도 지역대학우수과학자지원사업(과제번호: D00666)에서 수행된 연구내용의 일부임을 밝힙니다. 첫 번째 저자는 연구비 지원에 깊은 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

- 김선훈, 김광진 (2007) 포화된 다공성매체에서 파동의 전파특성. I. 이론해 유도, 한국전산구조공학회논문집, 20(2), pp.191~206.
- 김선훈, 김광진 (2001) 지하수의 영향을 고려한 지하공동구조체의 동적 응답, 한국전산구조공학회논문집, 14(3), pp. 391~399.
- 박대효, 정소찬 (2003) 포화다공질매체의 Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 정식화, 한국전산구조공학회

2003년도 봄학술발표회 논문집.

- Biot, M.A.** (1956) Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid, I, II, *Journal of Acoustical Society of America*, 28, pp.168~191.
- Kim, K.J., Blouin, S.E.** (1984), Response of saturated porous nonlinear materials to dynamics loadings, Report to Air Force Office of Scientific Research, F49620-81-C-0014.
- Kim, K.J., Blouin, S.E., Timian, D.A.** (1986), Experimental and theoretical response of multi-phase porous media to dynamic loads, Report to Air Force Office of Scientific Research, F49620-85-C-0102.
- Loret, B., Prevost, J.H.** (1992) Dynamic strain localization in fluid-saturated porous media, *Journal of Engineering Mechanics*, 11, pp.907~922.