

고화현상에 wave velocity 적용

張 元 一*

The application of wave velocity in the consolidation

Won - Yil Jang

목 차	
Abstract	Ⅲ. 결 론
Ⅰ. 서 론	참고문헌
Ⅱ. 본 론	

Abstract

Algorithms which describe the sediment transport processes of redispersion, resuspension, dispersive transport, settling and bed consolidation have been developed and incorporated in a two-dimensional transport model which solves the depth-averaged advection-dispersion equation using the finite element method.

In general, the consolidation algorithm accounts for the consolidation of a stationary suspension and partially consolidated bed by increasing the bed density and bed shear strength and decreasing the bed thickness with time. And the effects of over consolidation ratio can be taken into account through an empirical relationships.

In this paper presented shear wave velocity for the variations of bulk modulus and confining pressure which effect velocity propagation and applied in the consolidation algorithm.

* 한국해양대학교 교양과정부 부교수(물리학 전공)

I. 서 론

해양 및 estuary등에서 퇴적물 이동에 관한 모델화 작업시 퇴적물 이동을 지배하는 분산, 재부유, 확산, 침강, 퇴적, 고화 등 다양한 물리적인 과정에 대한 수학적인 표현이 요구된다.

일반적인 모델은 depth-averaged advection-dispersion equation을 finite element method를 사용하여 해석하며, 특히 새로이 퇴적되는 부분의 해석은 재부유와 고화영역에 대한 인식없이 불가능하다고 볼 수 있다. 재부유는 보통 일시적인 가속 흐름동안 바닥 전단응력과 전단강도 값을 시간적 변화에 대해 simulation함으로써 예측하고, 고화는 바닥 전단강도 및 공간에서 퇴적물의 밀도 증가와 시간에 따른 바닥 두께의 감소에 의한 점진적인 부유와 국부고화에 의한 algorithm을 도입함으로써 예측이 가능하다. 또한 고화는 바닥형성 과정이 완료되는 시점부터 시작하는 것으로 간주하며, 고화 algorithm에 대표적으로 사용된 것은 수심 평균 퇴적물 밀도 ρ 와 일정량의 고화시간 T 와의 일반화된 다음의 관계를 사용한다.

$$\rho/\rho_{\infty} = 1 - a \exp(-\lambda T/T_{\infty}) \quad (1)$$

상기식에서 ρ_{∞} 는 시간 T_{∞} 후 완전고화된 상태의 바다 평균밀도를 표시하며 a 와 λ 는 최소자승법에 의하여 0.845와 6.58로 계산되어지는 상수이다.

또한 바다의 두께는 고화기간 동안 배제되는 공극수로 산출하므로 고화에 있어 공극수를 포함하는 공극률은 무시할 수 없는 인자이고, 또한 공극률은 퇴적물에서의 shear wave 전파와 밀접하므로, 퇴적물에서의 shear wave 전파특성을 활용하여 고화 algorithm에 도입하고자 한다.

실험으로 밝혀진 공극률과 confining press에 대한 shear modulus 관계식을 활용하여 주어진 조건에 대한 shear modulus 값의 변화를 파악하고, 동일한 조건에서 파의 전파속도를 결정한 다음 전파속도와 shear modulus 관계를 검토하였다.

또한 이 결과를 기초로 하여 고화 algorithm에 파의 전파속도를 인자로 적용하였을 때의 가능성을 검토하여 퇴적물의 이동에 따른 고화현상 예측에 퇴적물 shear wave의 적용여부에 대해 고찰하였다.

II. 본 론

일반적으로 soil에서의 고화효과는 비교적 적으나, fine grained sand, silty sand 등 퇴적물 이동과 밀접한 관련이 있는 입자에서 고화효과는 대단히 중요하다고 할 수 있다.

Hardin & Blank에 의한 실험적인 관계에 의하면, over consolidation ratio(OCR)는 일반적인 전단응력과 전단변형 관계에서 G_o 혹은 G_{max} 로 표현되는 초기 접선계수와는 아래 (2)식으로 표현된다.

$$G_{max} = 1230[(2.97 - e)^2 / (1 + e)] (OCR)^k (\sigma_o)^{0.5} \quad (2)$$

상기식에서 k 는 성형력에 관계되는 값으로 수치적으로 언급된 것은 없으나 공극이 큰 퇴적물에서는 매우 중요한 값으로 알려져 있으며, e 는 공극률로 porosity ψ 와 $e = [\psi / (1 - \psi)]$ 의 관계를 가지는 값이다. 또한 shear modulus G_o 와 confining pressure q 와의 관계는 입자 형태에 따라 다음식으로 주어진다

$$G_o = 2630(2.17 - e)^2 / (1 + e)(\sigma_o)^{0.5} \quad (3)$$

$$G_o = 1230(2.97 - e)^2 / (1 + e)(\sigma_o)^{0.5} \quad (4)$$

위의 두식에서 (3)식은 입자형태가 둥근 경우의 G_o 와 q 관계식이고, (4)식은 모난 경우의 관계를 나타낸다. 이러한 관계식들은 공극률이 soil의 shear modulus와 shear wave velocity의 특성을 위한 packing parameter에 사용될 수 있다는 것을 보여주고 있다.

Soil에서 파의 전파현상은 shear modulus와 감쇄현상이 지배적이며, 초기적인 전단응력과 변형과의 관계에서 initial tangent modulus, secant modulus등은 유용하게 사용된다. 그러나 넓은 범위의 변형에서 secant modulus는 initial tangent modulus(G_o)와 10³%에 해당하는 변형에 대한 shear modulus 등에 대한 분석 기법이 개발되어 왔으며, initial tangent modulus는 매우 낮은 값의 전단응력에서는 동적계수로 간주되기도 한다.

여러가지 퇴적물에서의 전단파 속도와 공극률에 관한 모델은 공극형태, 점토입자 존재 여부, 입자간의 접촉 등이 고려되어야 하며, 이러한 내용을 포함한 접합상태에서의 속도-공극률 관계는 다음 (5)식으로 표현된다.

$$V = a - b \times \psi - d \times C \quad (5)$$

(5)식에서 V 는 전단파 속도 a , b , d 는 실험적인 상수이고 C 는 점토입자의 양을 나타내며,

<표 1> Porosity에 따른 Shear modulus(1Mpa confining pressure)

porosity ψ	.010	.020	.050	.100	.150	.200	.250	.300	.350	.400
void ratio e	.010	.020	.053	.111	.176	.250	.333	.429	.538	.667
V_p (km/s)	4.431	4.361	4.154	3.807	3.461	3.114	2.768	2.421	2.075	1.728
V_s (km/s)	2.526	2.477	2.329	2.084	1.839	1.593	1.348	1.102	.857	.611
ROUND G	1008.25	988.57	929.79	832.87	737.45	643.81	552.32	463.42	377.73	296.03
ANGUL G	885.54	870.50	825.51	751.03	677.24	604.29	532.34	461.61	392.37	325.00

Mpa의 confing press에서 (5)식의 최적식은 실험에 의해 다음과 같이 밝혀졌다.

$$V_p = 5.59 - 6.93 \times \psi - 2.18 \times C \quad (6)$$

$$V_s = 3.52 - 4.91 \times \psi - 1.89 \times C \quad (7)$$

점토함유 0.5에 대한 porosity ψ 값에 따른 V_p , V_s 와 동일한 porosity에 대해 1Mpa confining pressure하에서 shear modulus 값을 계산한 결과는 <표 1>과 같다.

점토입자가 공극을 채우는 물질의 일부로 공극 내 혼합된 물질에 대한 공극률이 점토함유에 선형적으로 비례하는 비점합상태에서 속도-공극률 관계는 속도가 공극내 혼합물의 계수 증가에 따라 증가한다는 사실을 근거로 다음과 같이 알려져 있다.

$$V_p = [(k + 4G/3) / \rho]^{0.5} \quad (8)$$

$$V_s = [G / \rho]^{0.5} \quad (9)$$

상기식은 보다 단순화하기 위해 점토 및 사질의 혼합정도에 따른 변화값은 생략된 식이고, k 는 bulk modulus, G 는 shear modulus, ρ 는 sand와 clay 혼합물 밀도이다.

일반적으로 퇴적과정에서의 고화는 비점합상태로 볼 수 있으므로, 고화과정에서의 V_p , V_s 적용문제를 고찰하기 위해 <표 1>의 shear modulus 계산 결과를 <표 1>의 계산과정과 동일한 조건하에서 bulk modulus $B_k = 1 \times 10^9$ 일 경우에 (8), (9)식에 의한 V_p , V_s 를 계산한 결과는 아래 <표 2>와 같다.

(6), (7)식을 이용한 V_p , V_s 계산 결과(a, b)와 동일한 조건하에서 shear modulus 값을 이용

<표 2> V_p , V_s (bulk modulus 1×10^9)

POROSITY ψ		.010	.020	.050	.100	.150	.200	.250	.300	.350	.400
ROUND G	V_p	633.084	623.179	593.605	544.839	493.830	449.718	403.683	358.955	315.837	274.730
	V_s	.617	.611	.592	.561	.528	.493	.457	.418	.378	.334
ANGULAR G	V_p	571.339	563.772	541.138	503.660	466.536	429.831	393.630	358.041	323.204	289.308
	V_s	.578	.573	.558	.532	.506	.478	.448	.417	.385	.350

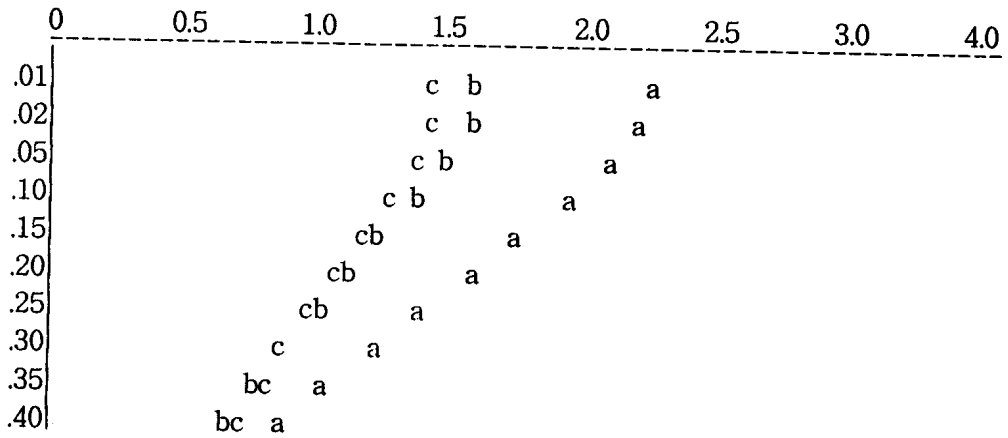
<표 3> Porosity에 따른 OCR 계산값

POROSITY ψ		.010	.020	.050	.100	.150	.200	.250	.300	.350	.400
OCR	ROUND	.00784	.00782	.00776	.00764	.00750	.00734	.00715	.00692	.00663	.00628
	ANGUR	.00689	.00689	.00689	.00689	.00689	.00689	.00689	.00689	.00689	.00689

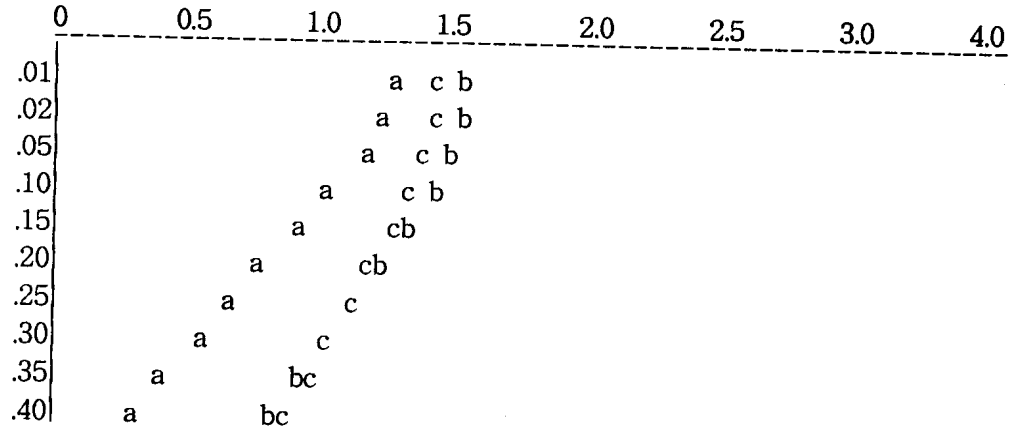
<표 4> $k=1$ 에서 OCR

POROSITY ψ		.010	.020	.050	.100	.150	.200	.250	.300	.350	.400
OCR	ROUND	.883	.860	.792	.678	.565	.454	.349	.251	.165	.948

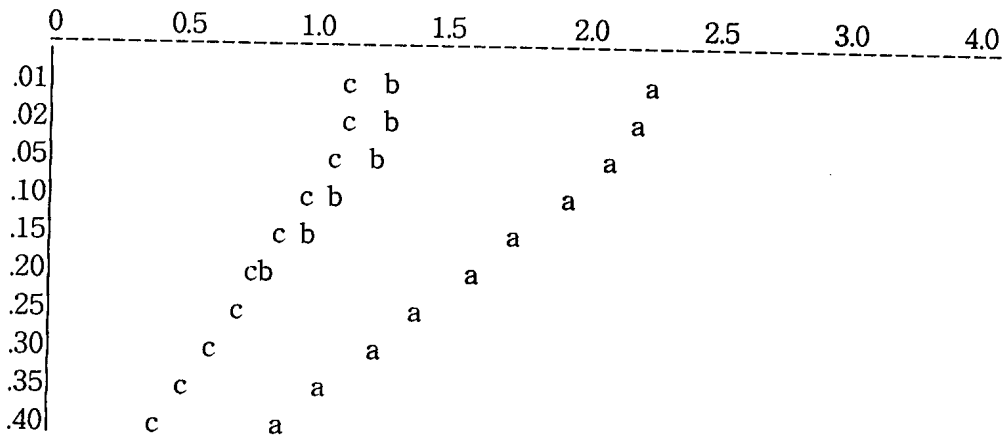
고화현상에 wave velocity 적용



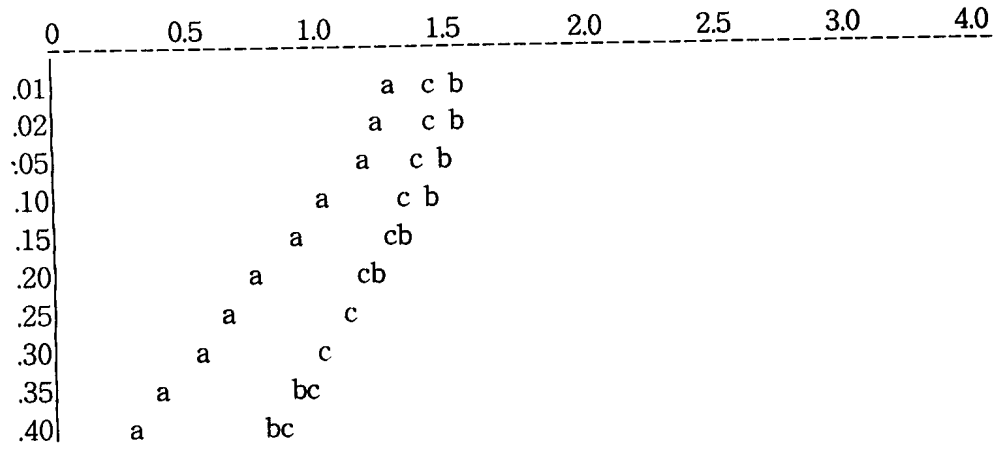
<그림 1> V_p - POROSITY CURVE($B_k=10^9$, $\sigma_0=1\text{Mpa}$)



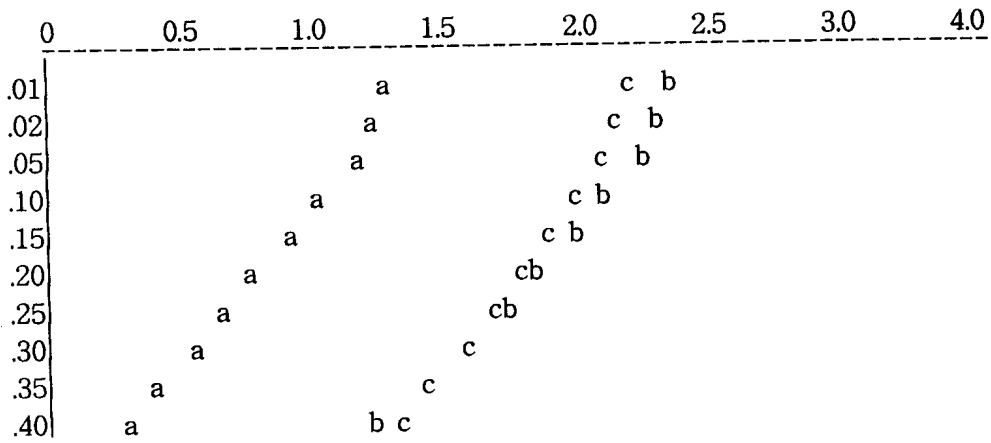
<그림 2> V_p - POROSITY CURVE($B_k=10^9$, $\sigma_0=1\text{Mpa}$)



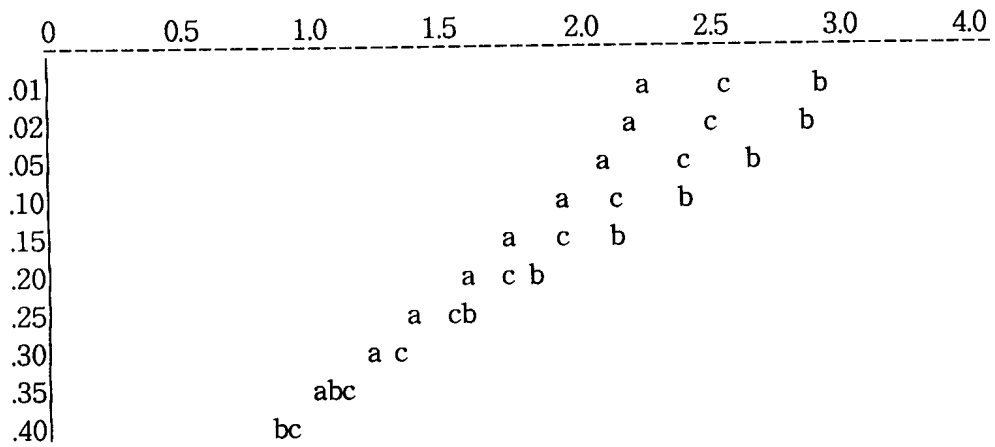
<그림 3> V_p - POROSITY CURVE($B_k=10^8$, $\sigma_0=1\text{Mpa}$)



<그림 4> V_v - POROSITY CURVE ($B_k=10^{10}$, $\sigma_0=1\text{Mpa}$)

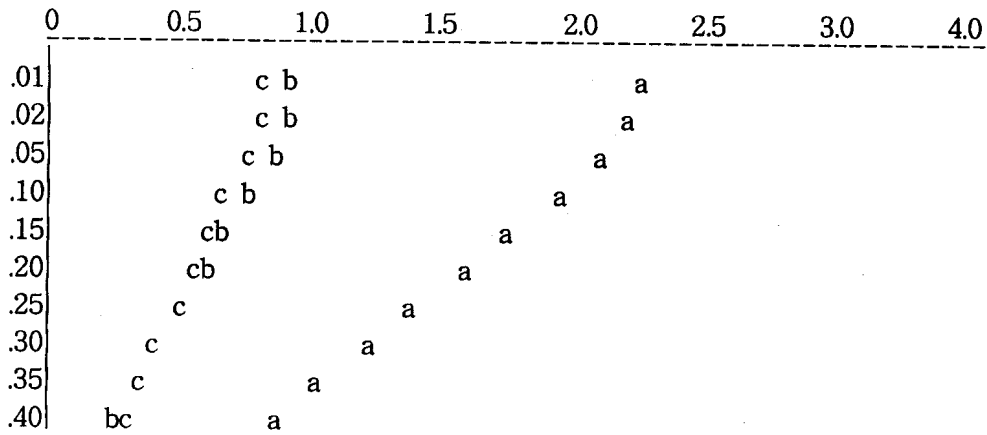


<그림 5> V_v - POROSITY CURVE ($B_k=10^{10}$, $\sigma_0=5\text{Mpa}$)

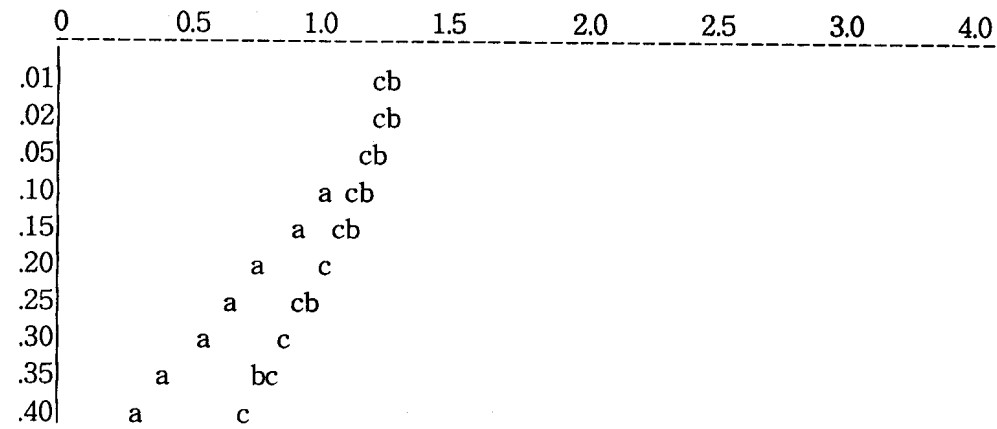


<그림 6> V_p - POROSITY CURVE ($B_k=10^8$, $\sigma_0=5\text{Mpa}$)

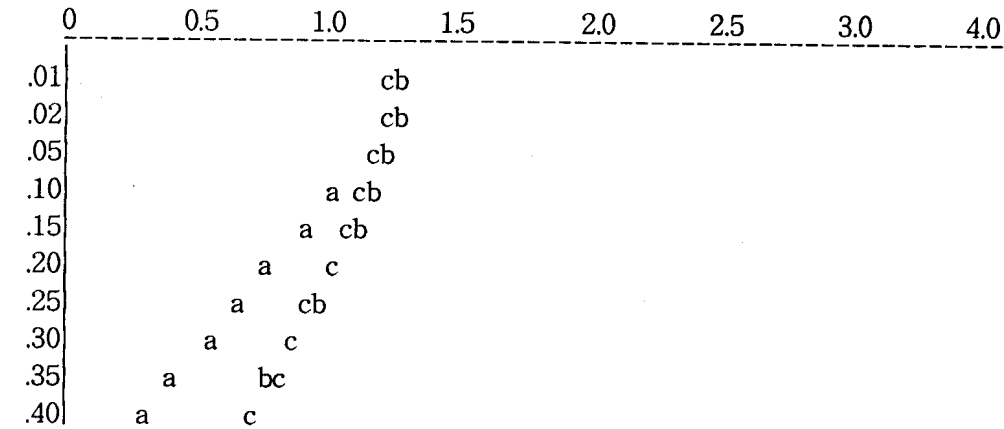
고화현상에 wave velocity 적용



<그림 7> V_p - POROSITY CURVE ($B_k=10^8, \sigma_0=0.5\text{Mpa}$)



<그림 8> V_v - POROSITY CURVE ($B_k=10^8, \sigma_0=0.5\text{Mpa}$)



<그림 9> V_v - POROSITY CURVE ($B_k=10^{10}, \sigma_0=0.5\text{Mpa}$)

하여 무차원적으로 전파속도를 계산(c)하여 결과치를 비교하면 <그림 1>, <그림 2>와 같다.

수치만으로 비교하면 <그림 1>의 V_p 의 경우 porosity 0.25-0.40에서는 거의 일치하나 0.25이하에서는 차이가 나며, <그림 2>의 V_s 의 경우는 반대로 porosity 0.10 이하에서는 거의 일치하나 0.20-0.40에서는 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 전체적인 변화의 경향은 V_p , V_s 의 두 경우 모두 동일하게 나타나고 있다.

Bulk modulus와 confining pressure의 값을 변화시켜 <그림 1>, <그림 2>와 동일한 방법으로 계산된 profile인 <그림 3>, <그림 4>에서는, 1Mpa에서 bulk modulus를 변화시켰을 때 수치상의 변화는 물론 <그림 1>에 비해 <그림 3>이 변화의 폭은 넓으나 <그림 3>, <그림 4> 모두 동일한 경향을 나타내고 있다.

Confining pressure가 5Mpa로 높아 졌을 때 $B_s=10^{10}$ 과 10^8 에서의 V_p , V_s 는 <그림 5>, <그림 6> 처럼 $B_s=10^{10}$ 일 경우는 V_s 값에서 a, b, c점의 상대적인 폭은 점차 커지고 있으나, 변화의 경향은 <그림 3>, <그림 4>에 비해서는 변화를 거의 무시할 수 있을 정도로 일치하고 있다. 또한 confining pressure를 0.5Mpa로 하였을때의 <그림 7>, <그림 8>은 1Mpa의 경우와 동일한 변화를 보여주고 있다.

이와같은 결과를 볼 때 전체적인 변화의 경향은 거의 동일하다고 볼 수 있다. 이것은 V_p , V_s 값으로 shear modulus 값을 산출하여도 오차가 거의 없다는 것으로 해석할 수 있다.

이러한 결과를 기초로 V_p , V_s 값으로 shear modulus를 산출하여 고화 algorithm에의 적용 여부를 판단하기 위해 계산한 결과는 <표 3>과 같으며 상수 $k=0.1$ 에서 무차원 해석한 OCR은 <표 4>와 같이 나타난다.

Ⅲ. 결 론

퇴적물 이동 모델화 작업시 중간과정에서 반드시 고려되어야 할 고화 algorithm에 대하여, 퇴적물의 V_p , V_s 적용여부에 관한 고찰 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Bulk modulus, confining pressure 값의 변화에 따른 V_p , V_s 값은 수치상의 변화는 있으나 공극에 따른 변화경향은 일치한다.

(2) 그러므로 V_p , V_s 값으로 confining pressure를 산출하여 고화 algorithm에 적용하면 보다 간편하고 정확한 방법이 될 것으로 사료된다.

(3) 1Mpa confining pressure에 대해 OCR을 무차원 해석한 결과는 <표 4>와 같다.

참 고 문 헌

- 1) A.D.Heathershaw and D.N.Langhorne, Observations of Near-bed Velocity Profiles and Seabed

- Roughness in Tidal Currents Flowing over Sandy Gravels, Coastal and Shelf Science, 1988
- 2) Althausen, J.D. and Kjerfve, B.J., Distribution of suspended Sediment in a Partially Mixed Estuary, Charleston Harbor, South Carolina, U.S.A., Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 35, No.4, October, 1992
 - 3) A.Nur, D.Marion, H.Yin, Wave Velocities in sediments, Shear Waves in Marine Sediments, 1990
 - 4) Dyer, K.R., Estuary Hydrography and Sediment, Cambridge University Press, 1979
 - 5) Dyer, K.R., Current Velocity Profiles in a Tidal Channel, Geophys. J.roy. Astronom. Soc.22, 1970
 - 6) E.J.Hayter, A.J.Mehta, Modeling Estuarial Cohesive Sediment Transport, Coastal Engineering, 1994
 - 7) Norman, L.Jones and David R.Richards, Mesh Generation for Estuarine Flow Modeling, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 118, No.6, 1992
 - 8) R.A.Stephen, Finite difference modeling of shear Waves, Shear Waves in Marine Sediments, 1990
 - 9) R.D.Woods, Soil Properties for Shear Wave Propagation, Shear Waves in Marine sediments 29-39, 1991
 - 10) V.A.Ern and M.D.Smooke, Vorticity-Velocity Formulation for Three-Dimensional Steady Compressible Flows, Journal of Computational Physics, Vol.105, No.1, March, 1993
 - 11) Wright, L.D., Boon, J.D., Xu, J.P. and Kim, S.C., The Bottom Boundary Layer of the Bay Stem Plains Environment of Lower Chesapeake Bay, Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol.35, No.1, July, 1992

