

여수구항 인근해역에서의 실계파고 산정에 관한 연구 - 확장 Boussinesq 식을 중심으로

조용준*, 유하상**, 이재일***

서론

먼바다에서 발달한 파랑이 연안역으로 접근하면 파속의 파수에 대한 종속은 점차 미약해지면서 성분파랑간의 비선형 상호작용은 파랑의 전체적인 성격을 결정하는 중요한 기작으로 떠오르게 된다. 이러한 비선형성, 약분산성의 파랑은 Boussinesq 계열의 식으로 정확히 기술될 수 있으나 천수식이라는 대생적 한계로 심해에 적용하는 경우 분산성을 적절히 재현하지 못하는 단점이 있다. 90년대 들어 전술한 Boussinesq 식의 분산특성을 개선하려는 노력이 활발히 진행되어 상당한 성과를 거둔 것으로 보여진다. 고전적인 Boussinesq 식 중 운동량 방정식에 보정항을 추가하여 얻어지는 분산관계가 선형 Stokes파 이론과 거의 일치하도록 한 것이 하나의 큰 흐름을 형성하게 된다 (Madsen et al. 1991; Madsen and Sorensen, 1992). 반면에 Nwogu (1993) 등은 수심방향으로 적분된 유속을 대표변량으로 하는 전통적인 해석 방법에서 벗어나 임의의 위치에서의 수평방향 유속을 사용하고 여기에서 유도되는 분산관계가 선형 Stokes 파 이론의 분산관계에 수렴하도록 근사화시킨 바 있다. 이 후에도 심해로의 확장 노력은 계속되어 분산관계의 추가적인 개선 (Schäffer and Madsen, 1995) 혹은 비선형의 정도를 높이는 (Wei et al, 1995) 방향으로 진행되어 왔다.

확장 Boussinesq 식에 기초하여 파랑을 해석하는 경우 파수에 비해 상당히 넓은 계산영역을 취급하게 되므로 효과적인 수치기법의 선택은 필수적이다. 현재 우리 나라에서는 세역 입사파랑 산출을 위한 광역 파랑 모형으로는 일반적으로 선형 계열의 파랑 모형이 사용되고 있는 실정이다. 확장 Boussinesq 식의 차용시 수반되는 과도한 계산량이 비선형 파랑모형의 사용을 어렵게 하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 이러한 선형 계열의 파랑 모형은 섬 배후, 수심의 변화가 큰 지역에서는 한계를 가질 수밖에 없어 신중한 검토가 필요한 것으로 보인다.

본 연구에서는 해저지형의 변화가 심한 여수해역과 여수구항을 대상으로 확장 Boussinesq 식을 이용하여 광역 파 세역에서의 파랑변형 특성을 규명하고자 한다.

기본방정식

수심방향으로 적분된 평균유속 $\widehat{u}_i = \int_{\zeta}^{-h} u_i dz / (h + \zeta)$, ($i=1, 2$) 으로 기술한 확장 Boussinesq 식은 다음과 같이 주어진다.

$$\zeta_t + P_x + Q_y = 0 \tag{1}$$

$$P_t + \left(\frac{P^2}{H}\right)_x + \left(\frac{PQ}{H}\right)_y + gH\zeta_x - (B + \frac{1}{3})h^2(P_{xxt} + Q_{xyt}) - Bgh^3(\zeta_{xxx} + \zeta_{xyy}) + \tau_x H = 0 \tag{2}$$

$$Q_t + \left(\frac{Q^2}{H}\right)_y + \left(\frac{PQ}{H}\right)_x + gH\zeta_y - (B + \frac{1}{3})h^2(Q_{yyt} + P_{xyt}) - Bgh^3(\zeta_{yyy} + \zeta_{yxx}) + \tau_y H = 0 \tag{3}$$

식 (1), (2), (3)에서 아래 첨자는 미분 연산자, h 는 수심, ζ 는 파동으로 인한 해수면 변위, H 는 $h + \zeta$ 로 주어지는 총 수심, g 는 중력가속도, $P (= H \widehat{u})$ 와 $Q (= H \widehat{v})$ 는 각각 파랑 진행방향 (x)과 파 진행방향의 직각방향 (y)으로의 단위폭당 유량을 나타낸다. 해저면 마찰력 τ_x, τ_y 는 Chezy 계수 C 를 이용하면 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_x = \frac{g}{C^2 H^3} P \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad \tau_y = \frac{g}{C^2 H^3} Q \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{4}$$

식 (1), (2), (3)에 주어진 확장 Boussinesq 식의 선형 분산특성은 다음과 같다.

$$\frac{\omega^2}{gk} = \frac{kh(1 + Bk^2 h^2)}{1 + (B + \frac{1}{3})k^2 h^2} \tag{5}$$

*서울시립대 토목공학과 부교수 ** (주) 세일종합기술공사 ***서울시립대 토목공학과 대학원

여기서 B 는 심해에서도 분산성이 정확히 유지되도록 조정되는 분산계수로서 Pade의 근사기법을 적용할 경우 1/15의 값을 갖으며 ω 는 주파수, k 는 파수를 나타낸다. 확장 Boussinesq 식은 분산특성이 개선됨에 따라 수심에 대한 제약으로부터 비교적 자유로워 $h/L_0 = 0.5$ 정도의 심해에서 천해로 이동하는 불규칙 파열의 전파를 모의하는 것이 가능하다. 심해에서 확장 Boussinesq 식은 효과적으로 선형화되어 위상속도는 Stokes 1차 이론과 동일한 결과를 보이며 천해에서는 쇄파파고의 75%까지 고전 Boussinesq 방정식과 동일한 결과를 제공한다.

여수인근해역의 지형적 특성 및 계산영역의 선정

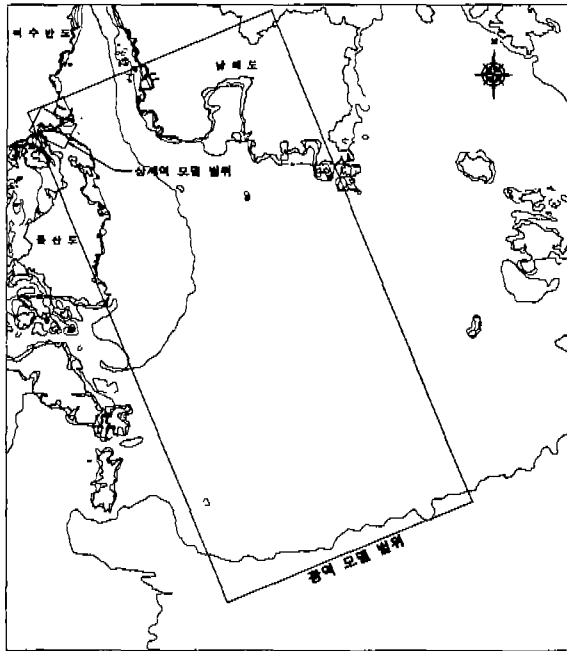


그림 1 파랑변형실험 영역

대상해역은 동쪽에 위치한 남해도의 망기산(340m), 응봉산(473m)의 연봉이 동풍을 차단하고 남쪽으로는 돌산도의 우두산(192m)의 절벽이 해역의 인근까지 뻗어 있어 남풍을 차단하고 있다. 전술한 지형적 특성으로 인해 대상지역에 미치는 주된 파랑은 남동방향으로부터의 심해파로 추정된다. 기존자료의 분석을 통하여 여수해역에 가장 크게 영향을 미칠 것으로 판단되는 심해파랑 조건으로는 SSE 파향의 파고 9.8m, 주기 13초를 선정하였다(해운항만청, 1988). 계산영역은 입사파와 이루는 각도를 최소한 작도록 유지하면서 심해역까지 가능한 확장하여 선정하였다 ($h/L_0 = 0.2165$). 측면경계는 경계조건을 부과하는 과정에서 생기는 수치적 오차를 최소화 하고자 측면경계와 직각되는 방향으로의 수심변화가 가능한 작도록 선정하였다. 상세역은 광역 수치실험 결과를 토대로 선정 하였다(그림 1, 4 참조).

경계조건 및 수치모의

안정적인 수치모의가 가능하도록 시간 영역에서의 격자크기(0.52 sec)를 고려하여 공간 영역에서의 격자간격은 광역의 경우 70m 등방격자로 총 절점수 249,900개, 세역의 경

우 5m 등방격자로 총 절점수 280,000개로 구성된 후 격자망은 ADI 기법을 이용한 효과적인 수치모의가 가능하도록 시간 영역

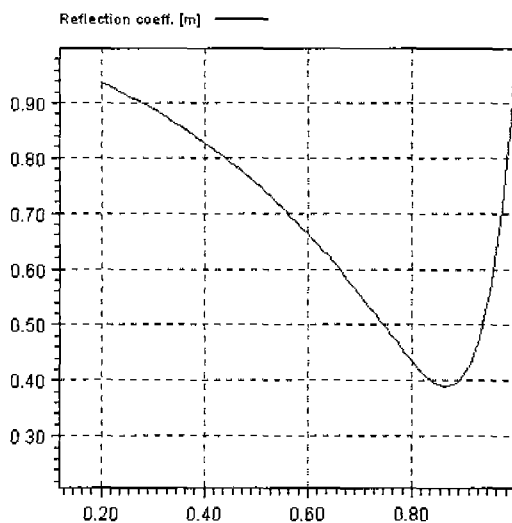


그림 3 투과율에 따른 반사계수

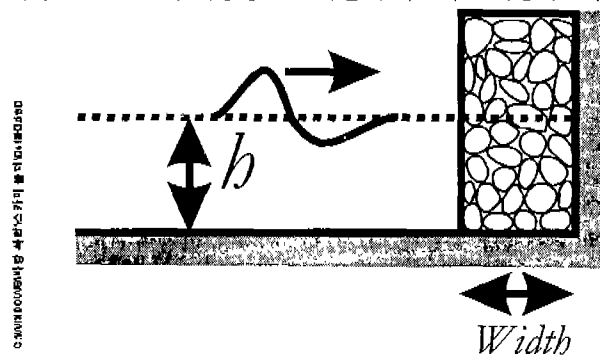


그림 2 부분 반사의 재현을 위한 투과층의 정의

를 분할하여 서로 엇갈리게 배치하였다. 기존 해면은 최악의 조건을 산정하여 약 최고 만조위로 가정하였으며 광역과 세역에서 수행된 파랑변형 수치실험의 개요는 표 1에 수록하였다.

심해파랑은 심해방향 개방경계에 인근한 비교적 수심이 일정한 지역을 선정하여 내부조파기법을 이용하여

조파하였다 (Wei et al., 1999). 심해방향과 연안 개방경계에서는 가상의 sponge 층을 설치하여 radiation 경계조건 (Israeli et al., 1981) 을 부과하였으며 측면경계에서는 측면으로의 유동 변화는 없는 것으로 간주하였다. 전술한 심해 파랑 조건의 경우 천수과정에 바닥마찰이 영향을 미치는 것으로 판단되어 전 계산영역에 저면 마찰 ($C = 50 m^{1/2}/sec$)을 포함하였다. 해안구조물과 해안에서 예상되는 파랑의 부분반사는 수리모형 결과와 Goda (2000)의 경험식을 토대로 예측한 반사율을 근간으로 그림 2에 정의된 가상의 사석층을 이용하여 재현하였다. 반사율은 투과층의 폭과 설치되는 지점의 수심, 사석의 직경, 입자저항계수와 파고에 따른 공극율에 따라 결정된다 (Madsen, 1983). 그림 3에는 입경이 0.2 m 인 사석으로 폭이 15 m인 사석층을 수심이 5 m인 해역에 설치한 경우 사석층에 파고가 1 m, 주기가 13 sec인 파랑이 내습하는 경우 투과율에 따라 산출된 반사계수를 도시하였다.

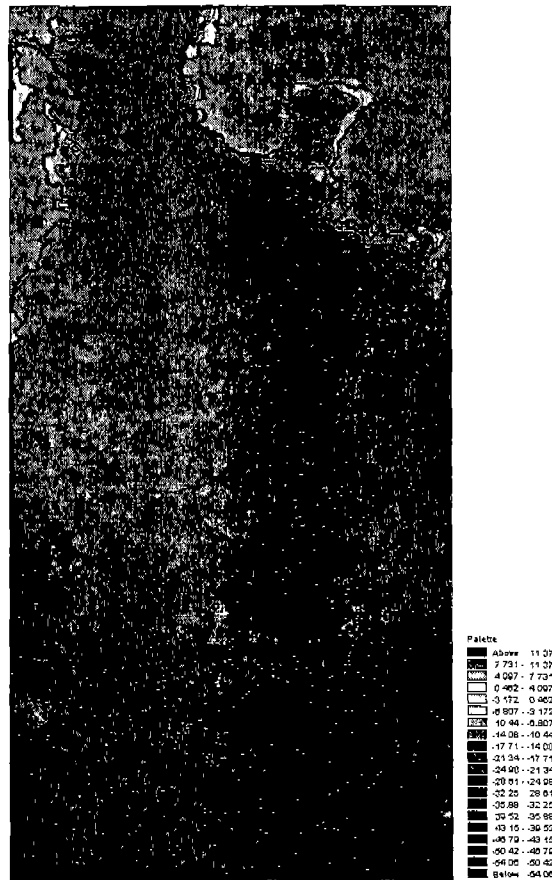


그림 4 광역 등수심 선도

표 1 광역 파랑변형 실험의 개요

항 목		광 역	세 역
계산 영역		- 계산 영역 : 24,990m×49,980m - 격자 간격 : 70m 등방격자, - 격자 수 : 350×714= 249,900개 - 시간 간격 = 0.52 sec	- 계산 영역 : 2,800m×2,500m - 격자 간격 : 5m 등방격자 - 격자 수 : 560×500= 280,000개 - 시간 간격 = 0.25 sec
입사 파랑	파 향	SSE	S 56° E
	파 고(m)	9.8	5.0
	주기(sec)	13.0	13.0
기준 조 위		- 여수항의 약최고단조위(APP. H. H. W) 3.62m	

수치 모의 결과

광역파랑 수치모의를 위한 계산영역의 지형은 그림 4에 도시하였고 광역에서의 수치모의된 파고는 그림 5에 도시하였다. 수치모의는 조파선에서 내부조파가 시작된 이후 조파된 파랑이 연안에 도달하여 반사로 인한 영향이 충분히 반영되었다고 판단되는 7800 sec 경과 후 종료하였다. 해저지형에서 어느 정도 예상할 수 있듯이 입사된 심해파랑은 해저지형에 따라 돌산도와 여수 반도 쪽으로 굴절되어 진행되는 것을 볼 수 있다. 돌산도 전면에 위치한 천퇴부에서 파랑은 국지적으로 집중되며 순차적으로 집중된 파랑으로 인해 회절이 진행되는 양상을 보인다.

광역에서 산출된 세역 경계 유입부에서의 파고 추정치는 그림 6, 7과 같다. 오동도 서방파제와 돌산도 사이에서 파고는 4~6.5m까지 분포하고 있다. 이러한 결과를 토대로 세역으로 입사되는 파랑의 파고는 5.0m로 선정하였고 파향은 S56° E로 결정하였다. 세역의 지형은 그림 8에 도시하였고 수치모의된 파고분포는 그림 9, 10에 도시하였다. 파랑은 여수구항 전면에 위치한 협곡으로 인해 굴절, 반사등의 다양한 파랑현상을 보인다. 그림 9, 10에서 알 수 있듯이 협곡에서 양안으로 발생하는 굴절로 인해 항내로 진입하는 파랑은 매우 적은 것으로 판단된다.

결론

현재 우리나라에서는 세역 입사파랑 산출을 위한 광역 파랑 모형으로는 확장 Boussinesq 식과 같은 비선형 모형보다는 선형 계열의 파랑 모형이 일반적으로 사용되고 있는 실정이다. 그러나 이러한 선형 계열의 파랑 모형은 섬배후, 수심의 변화가 큰 지역에서는 한계를 가질 수밖에 없어 신중한 검토가 필요한 것으로 보인다.

본 연구에서는 해저지형의 변화가 심한 여수해역과 여수구항을 대상으로 천수, 회절, 반사등을 설명할 수 있는 확장 Boussinesq 식을 이용하여 광역과 세역에서의 파랑변형 특성을 규명하였다.

수치모의결과 오동도 방파제와 돌산도 사이에서 파고는 4~6.5m 사이에 분포하였으며, 여수구항 입구 협곡 부근에서 양안으로 진행되는 굴절과 반사로 인해 항내로 진입하는 파랑은 매우 작은 것으로 보인다. 여수 해역의 파랑 변형실험에서 확장 Boussinesq 방정식은 심해역에서 천해역까지 파랑 전파 특성이 비교적 상세히 모의할 수 있었다. 여수해역의 복잡한 지형으로 인한 국부적인 비선형적 거동을 충분히 반영함으로써 신뢰성 있는 결과를 주는 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 해운항만청, 1988. 전국항만 설계과 추산 보고서.
- Abbott, M. B., Petersen, H. M. and Skovgaard, O., 1978. Numerical modelling of short waves in shallow water, *J. Hydraul. Resour.*, 16(3): pp. 173-203.
- Chen, Q., Madsen, P. A., Schäffer, H. A. and Basco, D. R., 1998. Wave-current interaction based on an enhanced Boussinesq approach, *Coastal Engineering*, 33: pp. 11-39.
- Goda, Y., 2000. Random seas and design of maritime structures, World Scientific, pp. 98-100.
- Israeli, M. and Orszag, S. A., 1981. Approximation of radiation boundary conditions, *J. comp. Phys.*, 41, pp. 115-13
- Madsen, P. A., 1983. Wave reflection from a vertical permeable wave absorber, *Coastal Engineering*, 7, pp. 381-396.
- Madsen, P. A., Murray, R. and Sorensen, O. R., 1991. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics, *Coastal Engineering*, 15: pp. 371-388.
- Madsen, P. A. and Sorensen, O. R., 1992. A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part 2. A slowly-varying bathymetry, *Coastal Engineering*, 18: pp. 183-204.
- Nwogu, O., 1993. Alternative form of Boussinesq equations of nearshore wave propagation, *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119, pp. 618-638.
- Peregrine, D. H., 1967. Long waves on a beach, *J. Fluid Mech.*, 27(4): pp. 815-827.
- Schäffer, H. A. and Madsen, P. A., 1995, Further enhancements of Boussinesq-type equations, *Coastal Engineering*, 26, pp. 1-15
- Wei, G., Kirby, J. T., Grilli, S.T., and Subramanya, R., 1995. A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves, Part 1. Highly nonlinear unsteady waves, *J. Fluid Mech.*, 294, pp. 71-92.

Wei, G. Kirby, J. T. and Sinha, A., 1999. Generation of waves in Boussinesq models using a source function method
Coastal Engineering, Volume 36, Issue 4, pp. 271-299

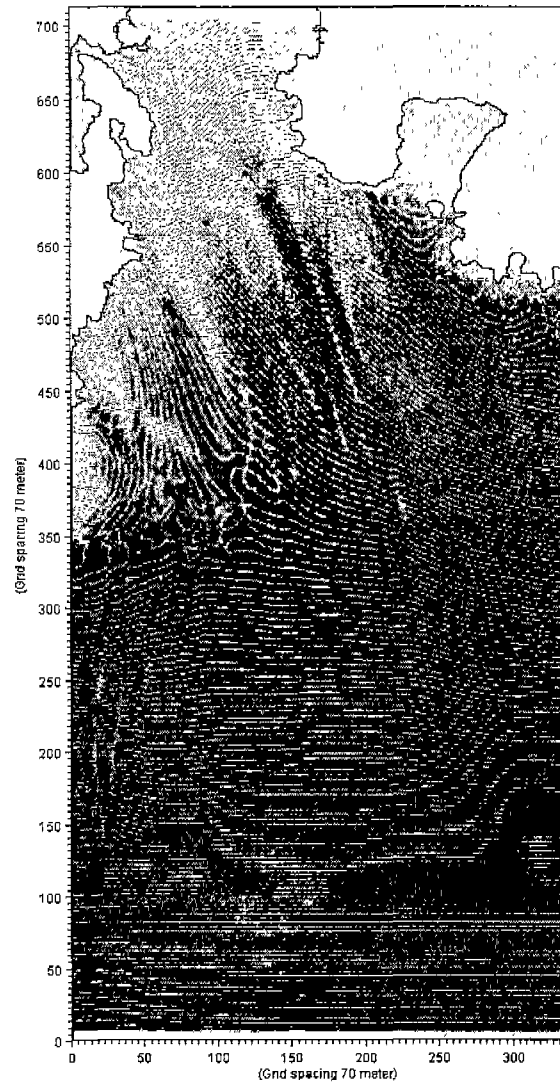


그림 5 여수 인근해역에서의 파고분포

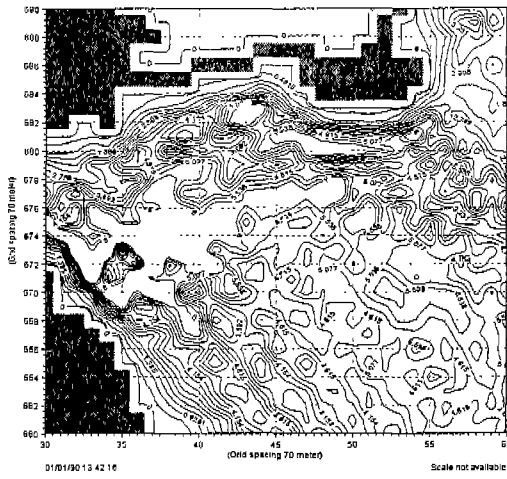


그림 6 오동도 방파제 부근에서 파고분포도

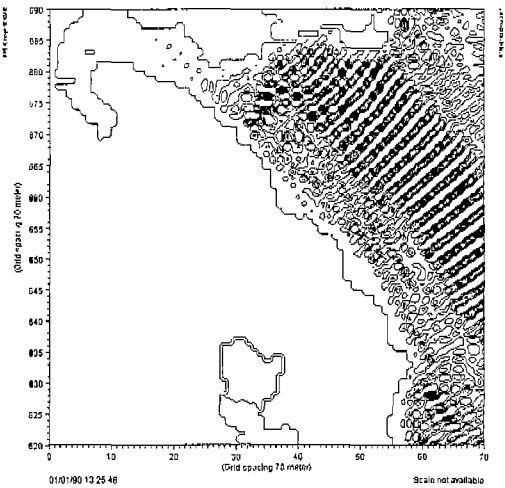


그림 7 상세역 유입부에서의 파고분포

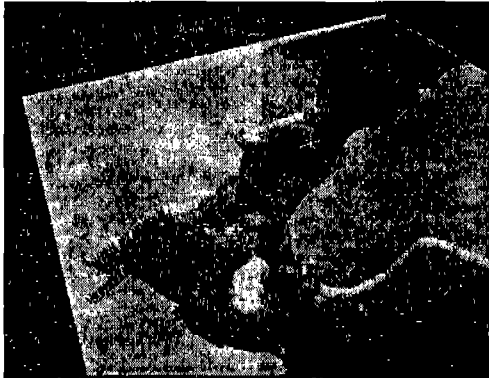


그림 8 상세역 지형도

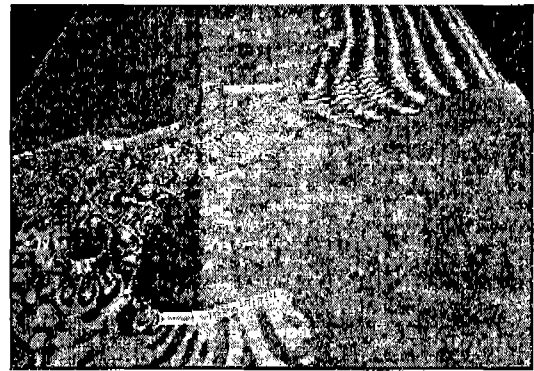


그림 9 상세역 파형도

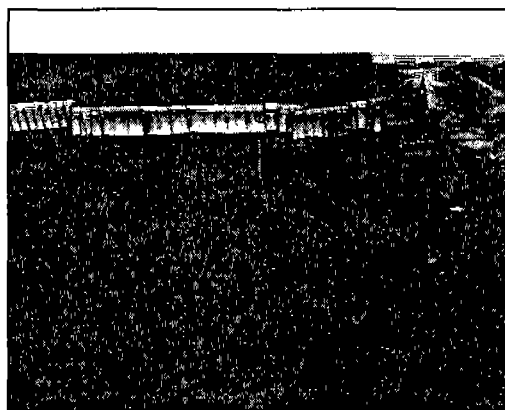


그림 10 상세역 파형도