

## 발전소 해안구조물에 의한 해안선의 변화 Shoreline Change due to Coastal Structures of Power Plants

강금석, 이대수  
한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

김영인  
한국전력공사 원자력발전처  
서울특별시 강남구 삼성동 167

### 요 약

동해안에 위치하고 있는 원자력발전소에 대하여 원격탐사 자료로부터 인근 해안의 해안선을 추출하여 발전소 건설 이전과 이후의 해안선 변화 양상을 분석하였다. 발전소 건설에 따른 해안매립과 해안구조물에 의하여 인근해역 해안선의 전진/후퇴가 확인되었다. 또한, 방파제, 안벽, 돌제, 이안제 등 해안구조물의 건설에 따른 사질해안의 해안선 변형을 모의할 수 있는 1-line 수치모형을 수립하여 배수구조물의 연장에 따른 해안선의 변화를 예측하였고, 이러한 해안선의 변형을 제어할 수 있는 구조물로서 돌제, 이안제 설치시의 해안선의 반응에 대하여 수치적인 실험을 수행하였다.

### Abstract

Characteristics of shoreline change at the coastal area near power plant were analyzed. For a nuclear power plant located in the east coast of Korean peninsula, remote-sensing data, i.e. airborne images and satellite images are acquired and shoreline data were extracted. Recession and advance of shoreline due to coastal structures of power plant and land reclamation was showed. 1-line numerical shoreline change model was established for simulating the response of shoreline to construction of coastal structures. The model uses curvilinear coordinates that follow the shoreline and is capable of handling the formation of tombolos as well as the growth of salients in the vicinity of coastal structures. The model predicted significant erosion of beach in case breakwaters were extended. Offshore breakwaters were suggested as a countermeasure to shoreline change.

### 1. 서 론

발전소는 대량의 냉각수가 필요하여 대부분 해안에 위치하고 있으며, 용지 확보, 해수의 취배수, 발전소 보호를 위해 해안을 매립하거나 방파제, 도류제, 돌제 등 해안구조물을 축조한다. 또한, 최근 전력수요가 급증하고 신규 발전소의 부지선정이 어려워짐에 따라 기존 발전소의 부지활용이 적극 추진되고 있는 실정으로 발전소의 단위기 용량이 대형화되고 있으며, 1개 지점에 4~6개의 설비용량을 갖추는 발전소 단지화 추세로 인해 막대한 양의 해수가 이용되고 있다. 이에 따라 해안매립과 해안구조물의 규모가 더욱 증가하고 있는 추세이다.

동해안에 일반적으로 형성되어 있는 사질 해안은 육지로부터 하천을 따라 또는 침식이 이루어지고 있는 다른 해안으로부터 지속적으로 유사의 공급을 받고, 해수유동, 파랑, 바람 등의 작용을

받아 연안방향, 외해방향으로 끊임없이 이동하는 과정의 결과물이다. 그러나, 해안에 발전소와 같은 인공구조물을 건설할 경우 주변 해역의 해수유동과 파랑의 형성 양상, 유사의 이동경로 등이 변하게 되고, 이에 따라 주변 해안지형의 변화가 일어난다.

본 연구는 동해안에 위치하고 있는 원자력발전소에 대하여 원격탐사 자료로부터 인근 해안의 해안선을 추출하여 발전소 건설 이전과 이후의 해안선 변화 양상을 분석하였다. 또한, 방파제, 안벽, 돌제, 이안제 등 해안구조물의 건설에 따른 사질해안의 해안선 변형을 모의할 수 있는 1-line 수치모형을 수립하여 배수구조물의 연장에 따른 해안선의 변화를 예측하였고, 이러한 해안선의 변형을 제어할 수 있는 구조물로서 돌제, 이안제 설치시의 해안선의 반응에 대하여 수치적인 실험을 수행하였다. 본 연구의 대상지역은 해안선 부근 퇴적물이 모래로 이루어진 조립질이고 조류 및 해류의 유속이 아주 작기 때문에 해안선 변형은 주로 파랑에 의한 연안류의 지배를 받는다. 따라서 본 연구지역은 구조물 축조로 인한 파랑의 변화에 의한 해안선 변형이 지배적이다.

## 2. 해안선변화 분석

### 2.1 연구대상지역

연구대상 지역은 동해안에 위치하고 있는 원자력발전소 인근으로 발전소로부터 남쪽 약 4.5 km 내외의 해안선이다. 그림 1에서 좌측 암초의 북서쪽에 발전소가 건설되었으며, 암초가 있는 지역에 배수구조물이 설치되었다. 이 해안은 북서쪽으로는 발전소 해안구조물, 남동쪽으로는 암초에 의하여 유사의 이동이 차단되고 있으며, 중앙부에 소하천이 존재한다.

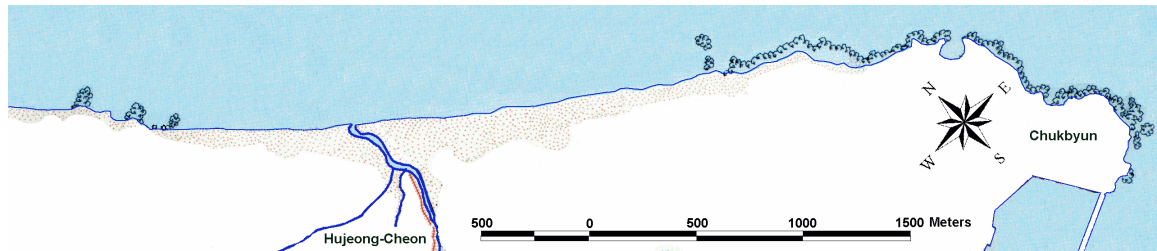


그림 1 발전소 건설 이전의 해안선

### 2.2 원격탐사기술을 이용한 해안선 변화 분석

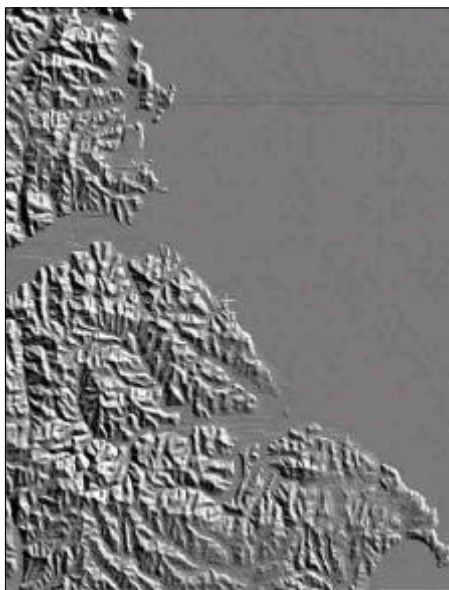


그림 2 대상지역의 지형분석

발전소 건설 이전과 이후에 촬영된 항공사진(1980, 1988, 1997), AMS영상(Airborne Multi-Spectral Image), 위성영상(Landsat), 종이지형도 및 수치지형도를 이용하여 발전소 건설 전후의 해안선 변화를 분석하였다.

항공사진을 비롯한 AMS 영상, 위성영상의 촬영 당시 플랫폼의 위치 및 자세에 의해 발생하는 기하학적 왜곡을 GPS 자료 및 수치지형도를 이용하여 정밀하게 보정하였으며, 보정된 영상을 같은 축척으로 정규화를 시키고, 해안선을 추출하였다. 추출된 해안선을 GIS 중첩분석 기법을 통하여 해안선 변위량을 산정하였다.

항공사진은 국립지리원으로부터 입수하였으며, 축척은 1:20,000이고 해상도는 1 m이다. 해안선 현장관측 간격이 25 m이고 인공위성의 해상도가 10 m~30 m임을 감안할 때 항공사진의 결과가 현재까지 입수가 가능한 가장 정확한 해안선 자료로 판단된다. 그림 2에 추출된 해안선을 나타내었으며, x-축은 남동방향(SE), y-축은 북동방향(NE)을

나타낸다. 1980년은 발전소 건설이전이고, 1988년은 해안구조물 건설 2년 후, 1997년은 11년 이후이다.

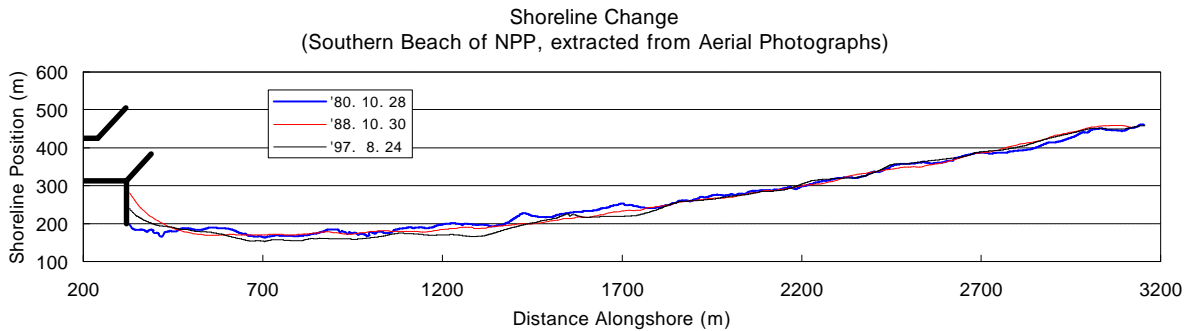
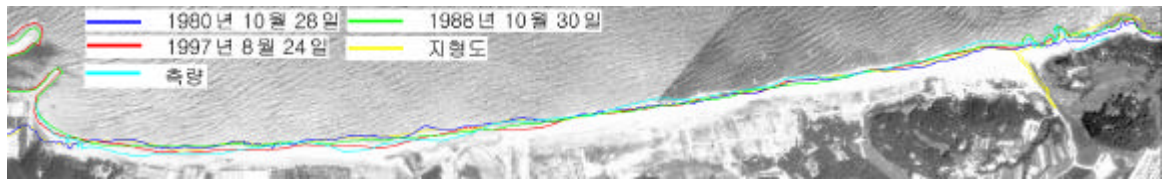


그림 3 항공사진으로부터 추출한 해안선

### 2.3 해안선 변화 특성

발전소 건설 이전인 1980년 10월의 자료를 살펴보면 해안선의 굴곡이 매우 크게 나타나고 있는데, 항공사진에 쇄파되는 파랑이 나타나고 있음을 볼 때 파랑의 영향 때문으로 판단된다. 1980년부터 1988년 사이의 해안선 변화는 배수구 배후 약 150 m 지점까지는 약 32 m가 전진하였으며, 이후 배수구로부터 남쪽으로 약 1.5 km 지점까지는 전진과 후퇴가 반복되고 있지만 전체적으로 약 7 m의 해안선 후퇴가 일어났고, 이후 약 1 km는 국부적으로 침식/퇴적이 반복되고 전체적으로는 2 m ~ 3 m의 후퇴가 일어났고, 이후는 약 12 m정도 해안선이 전진하였다. 전체적으로 약 60 cm의 해안선 후퇴가 일어났다. 1988년부터 1997년 사이의 해안선 변화는 배수구 배후 약 140 m 지점까지 약 15 m의 해안선 후퇴가 일어났고 이후 전진/후퇴가 반복되나 배수구로부터 남쪽으로 약 1.5 km 지점까지는 전체적으로 약 8 m 후퇴가 일어나다 이후는 국부적으로 5 m ~ 8 m의 전진후퇴가 일어나지만 전체적으로는 평형상태로 판단된다. 전체 해안선은 약 5 m의 해안선 후퇴가 일어났다. 1980년부터 1997년까지의 해안선 변화를 살펴보면(표 1), 배수구 배후 약 185 m 지점까지는 약 19 m가 전진하였으며, 이후 배수구로부터 남쪽으로 약 1.5 km 지점까지는 약 15 m의 후퇴가 일어났고, 이후 약 1 km는 국부적으로 침식/퇴적이 일어나지만 전체적으로 평형상태이며, 이후는 약 7 m정도 해안선이 전진하였다. 전체 해안선은 약 5 m의 해안선 후퇴가 일어났다.

항공측량 결과에서 발전소 해안구조물의 설치에 따라 배수구 배후에는 해안선의 전진이, 이후 후정천 인근까지는 해안선 후퇴가 일어났고, 이후 약 1 km는 평형상태를 이루고 있으며, 남쪽해안 끝부분에서는 1980년부터 1988년 기간에 전진이 이루어졌으나 이후에는 변화가 없는 것으로 나타났다. 관측 결과로부터 이 지역의 해안선 변화에 대하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

첫째, 발전소 해안구조물 설치 이후 소하천 입구를 기점으로 북쪽으로 배수구까지는 침식이 되었고, 남쪽 해안에서는 퇴적 혹은 평형상태인 것으로 나타났다. 둘째, 소하천으로부터 하계에 표사공급이 이루어져 이 표사가 북쪽과 남쪽으로 이동하기 때문에 배수구와 소하천 사이의 해안선 변화가 특히 심하게 나타나고 있으며, 상대적으로 소하천으로부터 남동쪽 해안은 해안선의 변화가 미미하다. 셋째, 80년 이후 지속적으로 배수구와 소하천 사이가 침식되는 것으로 나타나고 있는데, 이 지역으로의 표사공급량이 지속적으로 감소하였을 가능성이 있는 것으로 추정된다. 즉,

표 1 80년부터 97년까지의 해안선 변화

위치(m)	길이(m)	폭(m)	넓이( $m^2$ )	비 고	
469.3	185.1	18.9	3,501.9	약 19m 퇴적	
1827.1	1420.2	-15.6	-22,126.0	약 15m 침식	
1835.1	8.6	0.5	4.4	전체적으로 평 형상태	
1849.1	15.0	-1.0	-14.4		
1851.1	2.4	0.2	0.4		
1886.1	36.6	-1.7	-63.7		
1892.1	6.2	0.4	2.4		
2173.1	292.8	-4.5	-1,315.1		
2293.0	125.4	5.2	652.0		
2344.0	51.4	-1.2	-60.3		
2380.0	37.1	0.5	18.9		
2406.0	28.5	-1.9	-54.8		
2480.0	78.7	2.8	219.3		
2486.0	6.0	-0.1	-0.3		
2629.0	148.7	4.1	608.5		
2677.0	49.4	-1.0	-47.1		
3029.9	364.7	8.6	3,133.2		약 7m 퇴적
3033.9	4.1	-0.2	-0.7		
3135.9	105.0	2.5	261.9		
3153.9	19.5	-2.3	-44.4		

이 지역에 발전소가 들어서기 이전에는 발전소 북쪽 하천으로부터 유사가 공급되어 평형 상태를 이루었을 것으로 추정되는데, 발전소가 건설되면서 북쪽의 하천으로부터 공급되는 유사가 더 이상 남쪽으로 공급되지 않으면서 배수구 남쪽해안이 지속적으로 침식되고 있는 것으로 판단되었다.

### 3. 해안선 변형 예측 모형의 수립

해안선의 변화를 예측하기 위해서는 과거의 일정기간 동안 관측 또는 예보된 파랑자료 및 해저퇴적물 자료와 같은 기간동안의 해안선 변화자료를 이용하여 현 상태의 해안선을 초기조건으로 하여 향후 일정

기간 동안 해안선 변화를 계산하여야 한다. 본 연구에서는 과거의 항공관측 자료와 위성자료, 항공탐사 자료를 입수, 분석하고, 춘계, 하계, 추계 3계절 동안 해안선 관측을 직접 수행하여 연간, 계절별 해안선 변화의 이력을 파악하고자 하였고, 과거의 같은 기간동안의 파랑자료를 수치모형을 이용, 추정하여 해안선 변화 예측에 사용하였다.

#### 3.1 수치모형

본 연구에서 사용한 모형은 사질해안의 변형에 대한 수치모형으로 개발한 곡선좌표계 해안선 변형 모델로서 돌제, 이안제, 안벽 등의 연안구조물이 해안선 변형에 미치는 영향을 고려할 수 있다(한국해양연구소, 1991). 또한, 이 모형은 돌제 배후에서의 해안선의 용기 및 톱블로의 형성을 계산할 수 있는 모형으로서 Suh and Hardaway(1994)에 의해 미국 버지니아주 칩폭스 주립공원에 건설된 돌제군 배후에서의 해안선 변화과정을 계산함으로써 그 효용성이 입증된 바 있다. 본 모형은 GENESIS 등 일반적인 해안선 변형 수치모형에서 사용한 직교좌표계를 사용하지 않고 해안선을 따라가는 곡선좌표계를 사용함으로써 직교좌표계를 사용할 경우 해안선이 기준축과 이루는 각도가 커지는 경우 발생하는 오차를 감소시킬 수 있는 장점이 있다.

본 모형에서 연안표사이동을 산정공식은 Ozasa and Brampton(1980)가 제안한, 해안선에 나란한 방향으로 파고의 변화가 심한 경우 그 영향을 고려할 수 있는 다음과 같은 식을 이용하였다.

$$Q = \Gamma H_b^{5/2} \left\{ K_1 \sin(2\delta_b) - K_2 \frac{\partial H_b}{\partial s} \cos \beta \cos \delta_b \right\} \quad (1)$$

여기서,

$$\Gamma = \frac{\sqrt{g}}{16(s_s - 1)(1 - p)\sqrt{x}} \quad (2)$$

이며,  $\delta_b$ 는 쇄파선이 해안선과 나란하다는 가정하에 계산되는 해안선에 대한 쇄파의 각을 나타낸

다.  $Q$ 는 부피로 나타난 연안표사 이동율이며,  $g$ 는 중력가속도,  $s_s$ 는 해수에 대한 모래의 비중,  $p$ 는 모래의 공극율,  $\alpha$ 는 쇄파고의 쇄파수심에 대한 비,  $H_b$ 는 쇄파고,  $\tan\beta$ 는 해저면 기울기,  $K_1, K_2$ 는 연안표사이동에 대한 경험계수들이다. 식(1)의 첫번째 항은 파랑이 해안선에 비스듬히 입사하는 경우 이에 의한 연안표사이동을 나타내며, 둘째항은 회절현상이 심한 경우 해안선에 나란한 방향으로의 쇄파고의 차이에 의해 발생하는 표사이동을 나타낸다.

### 3.2 파랑자료

본 연구에서 이용한 파랑자료는 해양수산부 심해파랑자료(해양수산부, 1997) 중 1979년부터 1998년까지 20년간의 자료를 입수하여 본 연구지역에 영향을 미칠 수 있는 파향을 갖는 파랑만을 사용하였다. 이 자료를 살펴보면 파랑의 계절적 특성이 분명하게 나타나고 있다. 동계(10월~3월)에는 북서계절풍의 영향으로 상대적으로 큰 파고와 긴주기를 가지는 북쪽계열의 파랑이 주로 영향을 주며, 하계(4월~9월)에는 상대적으로 작은 파고와 짧은 주기의 남쪽계열의 파랑이 지배적이다. 또한, 본 연구 지역과 같은 동해안은 북쪽계열의 파랑이 우세한 경향을 보이고 있다.

표 2 대상해역의 파랑출현율(%)

Direction	NW	N	NE	E	SE
Summer(Apr. - Sep.)	18	29	43	6	4
Winter(Oct. - Mar.)	4	12	41	9	34

발전소 부근에서의 천해파랑은 심해파랑으로부터 천수 및 굴절효과, 수심에 따른 쇄파 한계조건 등을 고려하여 유도되어야 한다. 본 연구에서는 RCP Wave Model를 이용하여 해안선 변형 수치모형의 입력 파랑조건으로서 천해파랑을 계산하였다. 한편 방파제 등 구조물에 의한 파랑변형은 해안선 변형 수치모형 내에서 별도로 계산된다.

### 3.3 수치모형의 수립

해양관측 결과 본 조사지역의 해안선 퇴적물은 Fine Sand에서 Very Coarse Sand까지 전부 모래질이 분포하며, 해안선 부근에서 평균  $0.34 \phi(0.79 \text{ mm})$ 로 Coarse Sand에 속하고 외해측은 평균  $1.78 \phi(0.29 \text{ mm})$ 로 Medium Sand에 속하여, 해안선에서 외해로 갈수록 세립해지는 특성을 보였다. 해안선 변형 수치모형에서 파랑에 의한 퇴적물의 이동은 해안선부터 표사이동 한계수심까지 사이에서 발생한다고 가정하므로 퇴적물의 평균입경은 해안선 퇴적물과 해저 퇴적물의 값에서 취하여 사용한다. 본 연구에서의 평균입경,  $D_{50}$ 은 배수구 남측해안에서  $0.79 \text{ mm}$ 를 이용하였으며, 이러한 평균입경에 대하여 계산된 계수  $K_1$ 은 0.19이다. 선행연구(1991)에서는 0.2를 사용한 바 있다. 계수  $K_2$ 는 Hanson and Kraus(1989)가 제안한 바와 같이  $K_2=0.5K_1$  을 사용하였다.

표사이동 한계수심을 계산하기 위하여 파랑자료를 정리한 결과 수심 10 m에서 파고가 7.3 m이었고, 이때 표사이동 한계수심은 11.3 m로 계산되며 이를 수치모형의 입력자료로 사용하였다.

계산 영역의 북쪽 끝과 남쪽 끝에서 각각 배수구 방파제 및 암초에 의해 표사의 이동이 차단되므로 경계조건은 계산 구간의 양끝에서 동일하게 표사의 불투과 경계조건을 사용하였다. 계산 격자 간격은 20 m이다.

### 3.4 수치모형의 검증

현재의 배수구 방파제 및 도류제가 1986년 7월에 준공되었으므로, 1980년의 해안선을 배수구 방파제 준공 당시인 1986년 7월의 해안선으로 가정하고, 1986년 7월부터 1988년 10월까지 약 2년간의 파랑자료를 이용하여 모형의 보정을 수행하였다. 북측 도류제의 표현은 매립부분을 감안하여 방파제로 표현하였다. 계산결과(그림 4), 발전소 배수구 배후에서  $x=1,200 \text{ m}$  지점까지는 침식

이 이후 약 1.5 km는 퇴적이 발생하였다.

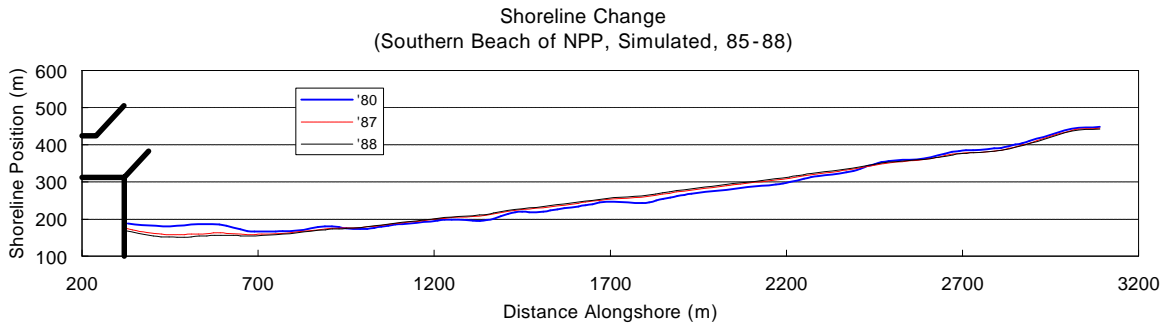


그림 4. 수치모형의 검증 결과

본 수치모형의 결과가 관측결과와 정확하게 일치하지는 않았다. 이는 해안선 관측결과가 전반적인 해안선 후퇴로 나타났으나, 본 연구의 수치모형은 전반적인 해안선의 침식을 표현하지 못하고 구조물 주변에서의 침식퇴적 양상만을 모의할 수 있기 때문이다. 관측결과 해안이 지속적으로 침식하였으므로 정확한 모의를 위해서 육지, 해양으로부터의 유사공급량도 모의 조건에 포함하여야 하지만 본 연구에서는 해안구조물에 의한 영향이 주요 관심사이다. 따라서, 본 수치모형이 배수구 인근에서의 해안선 변화 양상은 의미있게 재현하고 있기 때문에 배수로 연장에 따른 해안선 변화 양상과 이의 대책을 설계하는 목적에는 유용하게 이용할 수 있을 것으로 판단되었다.

### 3.5 해안구조물에 의한 해안선의 변화

1997년의 관측결과를 초기 해안선으로 가정하고, 이 지역의 파랑특성을 대표할 수 있는 1983년 10월부터 1984년 9월, 1985년 10월부터 1986년 10월까지 약 2년의 파랑자료를 이용하여 발전소 해안구조물로서 방파제가 약 100 m 연장되었을 때의 해안선 변화를 예측하였다.

모의 결과, 구조물 설치 전후 모두 배수구로부터 x=1,000 m 지점까지는 침식이, 이후 약 1.5 km에서는 퇴적이 발생하였다. 배수구로부터 소하천 사이와 해안 중앙부는 구조물 설치 후에 침식/퇴적량이 미세하게 감소하였으며, 특기할 사항은 남쪽 해안 끝에서 우려할만한 침식이 일어날 것으로 예측되었다. 이는 배수구를 연장함에 따라 배수구 배후에 퇴적량이 증가하기 때문이다. 즉, 남쪽 해안 끝에서 유사 침식되어 배수구 배후 및 해안 중앙부에 퇴적되기 때문으로 판단된다.

수치실험에서 남쪽 해안끝의 암초들을 이안제로 모의할 수 있으나, 이 경우 이안제 배후는 해안선 변형이 억제되지만, 이안제 끝에서는 침식이 일어나 고려하지 않는 경우와 유사한 경향을 보여 본 연구에서는 이안제를 고려하지 않았다. 또한, 본 모형은 1-line 모델로서 해안 전체의 저질특성, 한계수심 등에 있어서 하나의 대표값을 이용하기 때문에 해안의 국부적인 특성을 반영하기 어려워 모의 결과 또한 국부적인 해안 특성이 무시되며 해안전체가 평활화되는 경향을 보이고 있다.

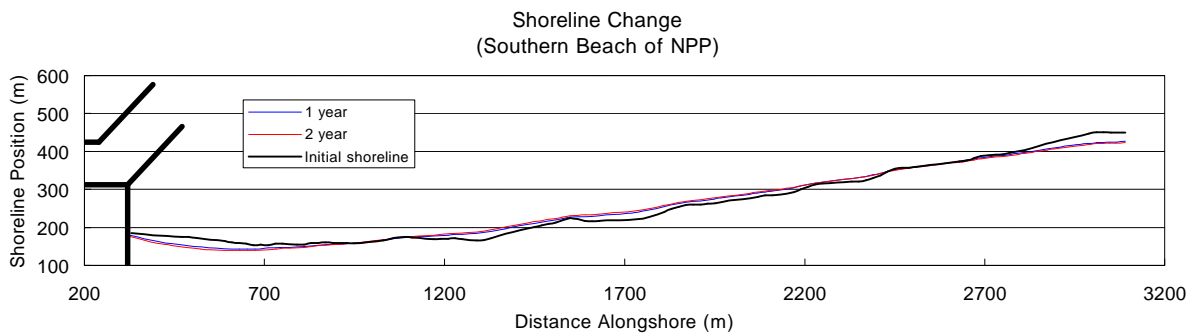


그림 5 해안구조물 연장 설치에 따른 해안선 변형

#### 4. 해안선 변형 제어구조물의 설계

해안선 변형 대책으로는 해안선 방향 유사의 이동을 차단하기 위하여 돌제(Groin)가 이용되고, 해안선 방향 및 외해방향의 유사이동 제어에는 이안제(Offshore Breakwater)가 이용되고 있다. 외국의 해안선 변형 대책을 살펴보면 최근에는 주로 이안제가 이용되고 있다. 본 연구지역에 적용할 수 있는 해안선 변형 제어 대책으로서 돌제와 이안제의 효과를 수치모델을 통하여 살펴본다.

##### 4.1 해안선 변화 제어 구조물

배수구조물 연장 설치시 예측된 해안선 변화에서 침식과 퇴적이 바뀌는 지점과 침식이 일어난 지점에 돌제를 설치하여 해안선 방향 유사이동을 차단하는 방안에 대하여 수치실험을 수행하였다. 수치모형에서 돌제는 외해 방향으로 직각이며 연안 방향의 유사의 이동을 100 % 차단하는 것으로 모의하였다.

배수구와 소하천 사이에서 발생하는 침식을 제어하기 위하여 침식과 퇴적양상이 바뀌는  $x=1,000$  m 지점에 돌제를 1개 설치하는 경우, 배수구와 소하천의 사이의 침식과 해안 중앙부의 퇴적이 매우 양호하게 제어되었지만 해안 남쪽 끝의 침식은 여전히 나타났다. 해안 남쪽 끝의 침식을 제어할 목적으로 침식과 퇴적양상이 바뀌는  $x=2,500$  m 지점에 돌제를 1개 설치하는 경우에는 배수구와 소하천 사이의 침식뿐만 아니라 해안 남쪽 끝의 해안선 변화도 제어하지 못하는 것으로 나타났다. 또한, 돌제의 전후단의 해안선 차가 매우 커서 해안선 제어에 큰 효과가 없었다.  $x=1,000$  m 지점의 돌제는 매우 양호하게 해안선 변형을 제어하므로 그대로 이용하고 해안 남쪽 끝의 침식을 제어하기 위하여  $x=2,700$  m ~  $3,020$  m 지점에 돌제군을 설치하는 경우에는 배수구와 소하천 사이, 해안 중앙부에서는 해안선 변형 제어 효과가 양호하고, 돌제군 설치 지역도 해안선 변형이 억제되지만 돌제군 북쪽끝에서는 여전히 큰 침식이 발생하였다(그림 6).

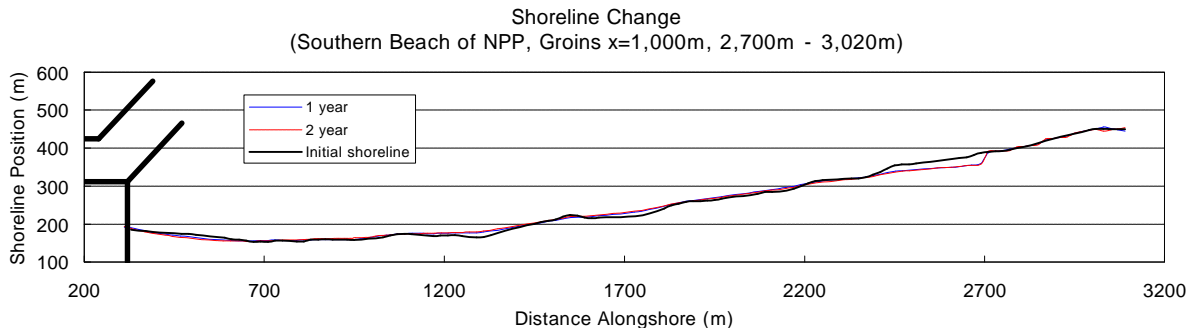


그림 6 돌제에 의한 해안선 변화 제어

침식이 발생하는 해안 남쪽지역  $x=2,770$  m ~  $3,040$  m에 체체의 길이가 각각 70 m 이고 체체 사이의 거리가 30 m인 3개의 이안제를 약 100 m 외해에 설치하는 경우에는 남쪽 해안의 침식이 억제되어 이안제 배후의 해안보호 효과를 확인하였다(그림 7). 그러나 이안제 끝에서 여전히 침식이 일어나고 있으며, 배수구에서 소하천 사이와 해안의 중앙부의 양상은 변하지 않았다.

배수구와 소하천 사이의 해안선 변화를 제어하기 위하여  $x=650$  m ~  $860$  m에 체체의 길이가 각각 50 m이고 체체 사이의 거리가 30 m인 3개의 이안제를 약 150 m 외해에 설치하는 경우(그림 7), 배수구 배후에서 퇴적, 배수구와 이안제 사이에서는 침식이 일어나지만, 이안제 배후에서는 해안선이 보호되며, 남쪽 해안 또한 침식이 억제되었다. 이안제가 없을 경우에는 남쪽 해안의 유사가 침식되어 배수구 배후 및 북측해안에 쌓이는 양상을 띠었으나, 이안제가 이러한 유사이동을 차단하여 남쪽 해안의 침식 제어 효과를 나타내는 것으로 나타났다.

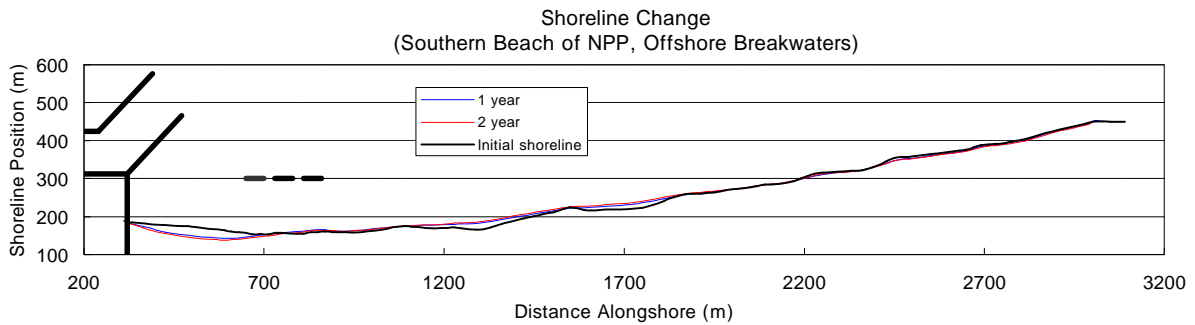
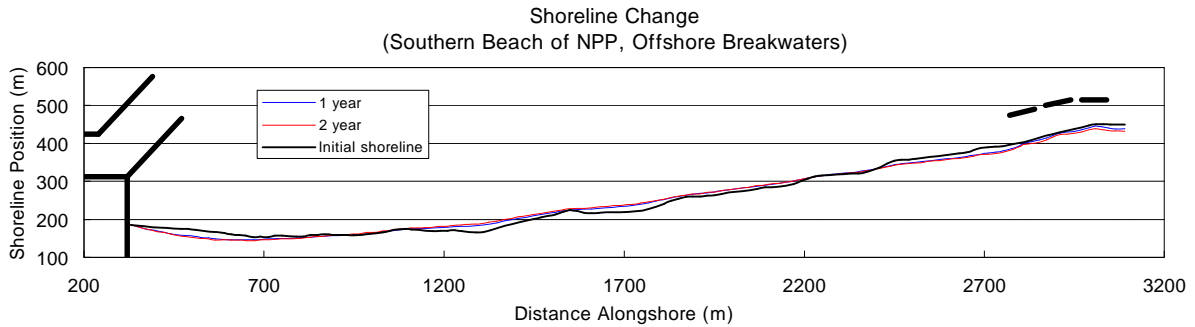


그림 7 이안제에 의한 해안선 변화 제어

#### 4.2 이안제 설계

미국, 일본 등에서의 현장 경험은 이안제가 해안선 안정을 위해 효과적인 대안임을 보여주고 있다. 이안제와 돌제 등 해안선 안정 구조물은 안벽 등과 같이 해안선을 특정위치에 유지하거나 보호하는 구조물과 달리 해안선의 용기를 통하여 백사장을 새로이 만들거나 유지할 수 있다. 게다가 이안제는 연안표사이동을 허용하면서 해당지역을 보호할 수 있다. 이안제 시스템의 주요한 목적은 양빈한 표사의 지속기간을 증가시키고, 넓은 해안을 조성하여 인간의 활용공간을 제공할 수 있으며 파랑이나 홍수로부터 육지를 보호하는 역할을 한다.

이안제는 해안선에서 약간 떨어져서 평행하게 설치된 구조물이며, 제체에 의한 회절로서 배후의 파랑을 약하게 하여 톱블로를 형성시키고, 이것에 토사를 퇴적시키는 기능을 갖는다. 또, 배후의 해안에 작용하는 파력을 약하게 하여 해안의 침식을 감소시키는 기능을 갖는다.

이안제는 형식에 의해 연속제와 도제(鳥堤)로 분류된다. 이 중에 연속제는 일본에서 전체 시공 연장의 38%를 차지하나 오래된 것이 많고, 최근 시공되는 것은 대부분이 도제이다. 도제의 경우는 그 연장 및 간격이 문제가 되지만 현재는 실적과 경험에 따르는 실정이기 때문에 과거의 시공 실적을 충분히 조사하고 관련된 수리모형 실험을 실시하여 검토할 필요가 있다. 또한, 설치수심에 의해 해안선앞방식, 소수심방식, 중수심방식, 대수심방식으로 분류된다. 해안선앞방식은 근고공, 소파고의 변형이며, 해안선의 바로 앞에 설치하는 소규모 구조이다. 소수심 방식은 시공시의 수심이 1 m 이하의 장소에 설치하는 경우이다. 중수심 방식은 쇄파대의 안쪽에서 수심이 2 m 이상의 장소에 설치하는 경우이다. 대수심 방식은 쇄파대의 바다쪽에 설치하는 경우이다.

해안선과 평행하게 외해에 설치하는 방파제는 배후 수면과 해안지역에 도달하는 파랑에너지의 양을 감소시킴으로서 이 지역을 보호하는 역할을 한다. 이안제의 건설에 따른 해안선의 반응은 연안표사 이동량의 변화와 이안제 근처에서의 Onshore-offshore 표사 이동량에 따라 결정된다.

본 연구 지역의 설계 목표는 침식이 진행되고 있는 배수구와 소하천 사이 지역의 파랑에너지를 감소시켜 해안선의 후퇴를 막는데 있다. 파랑에너지의 차단이 심할 경우에는 톱블로가 형성되는데 톱블로가 형성될 경우 중국에는 연안표사이동을 차단하게 되므로 해안보호에 있어서 오히려 역효과를 나타낼 가능성이 커서 톱블로의 형성은 지양하고 있다.

이안제 배후의 해안선 변화는 해안에 도달하는 파랑에너지량의 직접적 결과로서 다음과 같이



분류하고 있다. 이안제 배후에 가장 적은 파랑에너지가 도달할 경우 톱볼로가 형성되고, 많은 양의 파랑에너지가 도달할 경우에는 해안선이 약간 변화하거나 거의 변화하지 않는다. 이러한 분류 방법에 따른 5가지 형태의 해안반응 모양은 표 3과 같다. 또한, 이안제 형상에 따른 해안선 반응 지표로서  $L_s/X$ 을 이용하기도 한다. 여기에서,  $L_s$ 는 이안제의 길이,  $X$ 는 이안거리이다.

표 3 이안제와 해안선의 반응

분류	해안선 도달 파랑에너지의 크기	해안선의 형태	$\frac{L_s}{X}$
1. Permanent Tombolos	아주 낮음	· 안정적인 톱볼로 형성	>1.5~2.0
2. Periodic Tombolos	낮음	· 주기적으로 이안제의 일부에서 톱볼로 형성됨	
3. Well-developed Salients	약간 높음	· 돌출부 형성 · 연안유사이동량 평형 이룸	<0.5~1.5
4. Subdued Salients	높음	· 아주 미약한 돌출부 형성 · 돌출부의 높이가 아주 낮음	
5. No Sinuosity	아주 높음	· 해안선 변화 거의 없음	$\leq 0.125\sim 0.33$

적용지역 해안선 보호를 최대한 하고 연안표사이동을 유지하기 위하여 해안선 모양은 Subdued Salients에서 Well-developed Salients 사이가 바람직하다. 표 4에는 이러한 조건을 만족하는 적용 가능한 규모의 제체길이와 이안제를 나타내었다. 일반적으로 해안선 변형 제어 목적의 이안제는 수심 1 m ~ 8 m 사이에 건설되는데, 대상해역은 이안거리가 100 m일 때 수심이 약 2 m, 150 m일 때 약 3 m, 200 m일 때 약 3.5 m이다.

표 4 제체길이와 이안거리

Ls	X	Ls	X	Ls	X	Ls/X
50	100	75	150	100	200	0.5
75	100	112.5	150	150	200	0.75
100	100	150	150	200	200	1
125	100	187.5	150	250	200	1.25
150	100	225	150	300	200	1.5

이안제중 단일 이안제는 선박의 항행 지역을 보호하기 위한 목적으로 지어져 왔고, 해안보호나 안정대책으로서는 주로 이안제군(Segmented Offshore Breakwater)이 이용되어 왔다. 본 과업의 대상지역과 같이 해안선의 길이가 길고, 톱볼로의 형성이 바람직하지 않은 곳은 사이에 틈새를 갖고 분할되어 있는 이안제군이 바람

직하다. 단일의 긴 이안제는 하나 혹은 두 개의 톱볼로를 형성할 가능성이 있는데 톱볼로는 연안 방향의 표사이동을 차단하여 역효과가 나타날 가능성이 있기 때문에 지양되어야 하고, 일정 정도의 연안 표사이동을 허용하며 해안을 보호할 수 있는 이안제군 형식이 적절할 것이다. 각각의 방파제와 개방부(Gap)가 길고 넓을수록 큰 돌출부를 갖는 곡선형 해안이 형성될 것이고 짧은 길이의 방파제와 개방부일 때는 돌출부가 작게 나타나며 전반적으로 해안선이 전진하게 된다.

이안제 설계에 있어서 주요한 관심사는 개방부의 배후에서 회절파의 크기이다. 파랑이 이안제의 개방부로 입사하여 이안제의 뒤에서 회절되어 해안으로 향하게 된다. 이안제 개방부의 크기는 어떤 형태의 해안선을 형성할 것인가에 따라 결정된다. 입사파장에 대한 개방부 넓이의 비가 매우 작지 않으면, 이안제 배후에서 파고 저감효과가 나타나지 않을 것이다. 일반적으로 평균적인 유사이동을 유발하는 파랑에 대하여 적어도 입사파장의 2배만큼 넓어야 한다.

Exposure Ratio는 제체와 개방부 전체길이에 대한 개방부 넓이의 비로서 지금까지 건설된 이안제를 살펴보면 0.25~0.66의 값을 갖는다. Exposure Ratio가 작을수록 해안선이 많이 돌출하여 톱볼로가 형성되고 있으며 반대일 경우 해안선의 변화가 적다.

제체길이와 이안거리, Exposure ratio, 제체의 길이, 개방부의 길이 등을 고려하고, 일본 등 의

국의 건설 경험을 참고하여 다음과 같은 이안제에 대하여 수치실험을 수행하였다.

표 5 이안제의 제원

Case	Project Length	Number of Segments	Segment Length	Gap Length	Distance Offshore	Water Depth	Beach Response*	비고
I	145	3	35	20	100	약 2.0m	3	*1-permanent tombolos 2-periodic tombolos 3-well developed salients 4-subdued salients 5-no sinuosity
II	210	3	50	30	150	약 3.0m	3	
III	210	1	210	-	150	약 3.0m	1	
IV	210	1	210	-	100	약 2.0m	1	

수치실험 결과, 모든 이안제 방안이 남쪽 해안을 보호하는 효과가 있었다. Case I과 Case II안은 해안선의 전진이 일어나지 않고 현재의 해안선을 유지하고 있으나, Case III과 Case IV는 해안선의 전진이 일어나고 있다. 따라서 Case I과 Case II의 경우가 적용할 수 있는 안으로 판단된다.

수치해석 결과의 경향과 외국의 이안제의 설치 경험, 현장 조건을 고려하여 이안제의 설치 위치는 배수구와 소하천 사이 배수구로부터 남쪽해안을 따라 약 730 m 지점으로 결정하고, CASE II의 제원을 선택하여 이안거리에 따른 해안선의 반응을 해석하였다(그림 8). 이안거리가 200 m 이상일 경우에는 남쪽 해안에서 침식이 발생하고, 반대로 100 m 이하일 경우에는 퇴적이 발생할 것으로 해석되었다. 따라서, 이안거리는 150 m가 적절할 것으로 판단되었다. 최적의 이안제의 제원으로, 설치 위치는  $x=1,050$  m~1,260 m, 이안제의 길이는 210 m, 제체의 개수는 3개, 각 제체의 길이는 50 m, 제체간의 거리는 30 m, 이안거리는 150 m, 설치수심은 약 3.0 m가 제안되었다.

## 5. 결론 및 향후 연구방향

해양관측과 항공측량, 인공위성 자료를 이용하여 발전소 인근해안의 해안선 변화 특성을 파악하였다. 발전소 해안구조물 설치 이후의 해안선 변화는 배수구 배후에는 퇴적이 발생하였으며, 소하천을 기점으로 북쪽으로 배수구까지는 침식이 되었고, 남쪽 해안에서는 퇴적 혹은 평형상태인 것으로 나타났다. 또한, 소하천으로부터 하계에 표사공급이 이루어져 이 표사가 북쪽과 남쪽으로 이동하기 때문에 배수구와 소하천 사이의 해안선 변화가 특히 심하게 나타나고 있으며, 상대적으로 소하천으로부터 남쪽 해안은 해안선의 변화가 미미하였다.

배수구조물을 연장할 경우 남쪽 해안 끝에서 우려할 만한 침식이 발생할 것으로 예측되었다. 이에 따라 해안선 변형 최소화 대책으로서 돌제, 이안제를 설치하는 경우에 대하여 검토하였다. 돌제를 1개 혹은 2개를 설치하는 경우에는 침식/퇴적 제어효과가 일부 있으나 돌제 전후단에서 해안선의 차가 매우 크게 발생하는 단점이 있었으며, 돌제군을 설치하는 경우 설치지점에서의 해안선 변화는 거의 일어나지 않았으나 양끝단에서 여전히 상당한 양의 침식 및 퇴적이 발생하였다. 해안선 변형 대책으로는 이안제가 가장 양호하였다. 침식이 예상되는 남쪽 해안과 해안중양부에 이안제를 설치하는 안 모두 남쪽 해안의 침식 억제 효과가 있었다.

해안선 자료의 미세한 변화에 따라 수치실험 결과가 매우 민감하게 변화하였으며, 부족한 관측자료로는 예측에 있어서 한계가 있다. 본 연구에서 이용한 모형은 1-line 모형로서 해안 전체의 저질특성, 한계수심 등에 있어서 하나의 대표값을 이용하기 때문에 해안의 국부적인 특성을 반영하기 어려워 모의 결과 또한 국부적인 해안 특성이 무시되었다. 또한, 1-line 해안선 변화 모형은 연안류에 의한 연안방향에 평행하게 이동하는 유사만을 재현하므로 계절별 파랑특성에 따른 해안선과 연직방향의 해빈변화는 평형상태를 이루었다고 가정하는 것이다. 따라서, 향후 n-line 모형, 3차원 모형 등 더욱 정교하고, 상세한 수치모형을 이용한 검토와 해안선 및 해저지형 변화 제어 기술에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

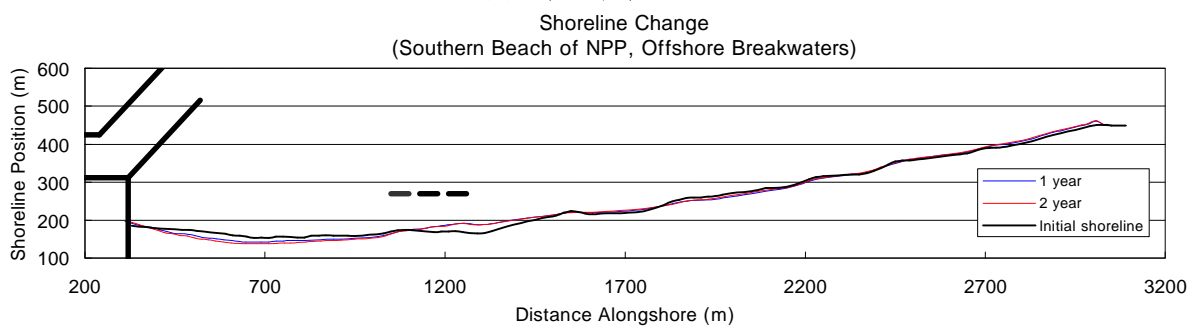
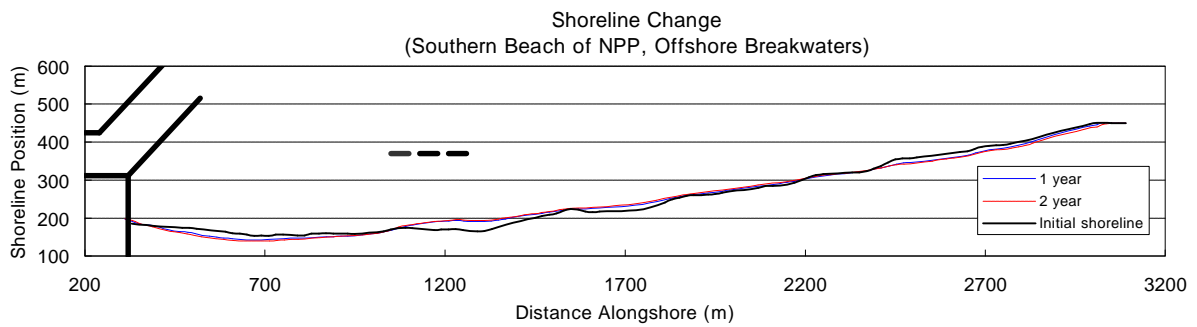
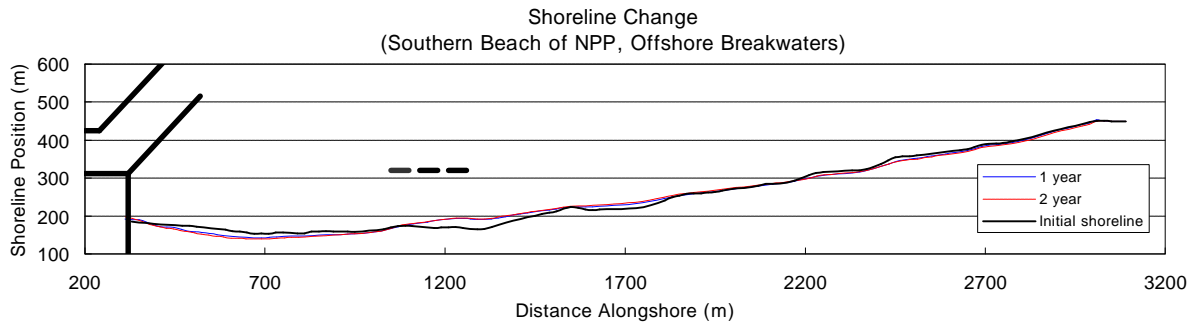


그림 8 최적의 이안제 결정

## 6. 참고문헌

- Chasten, M.A., Rosati, J.D., McCormick, J.W. and R.E. Randall (1993). **Engineering Design Guidance for Detached Breakwaters as Shoreline Stabilization Structures**. Technical Report CERC-93-19, U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC.
- Daedalus Enterprise, Inc. (1990). **Technical proposal AMS Airborne Multispectral Scanner System**.
- Gonzalez, R.C. and R.E. Woods (1992). **Digital Image Processing**. Addison Wesley.
- Lillesand, T.M. and R.W. Kiefer (1994). **Remote Sensing and Image Interpretation**. John Wiley & Sons, Inc.
- Suh, K.D. and C.S. Hardaway (1994). "Calculation of Tombolo in Shoreline Numerical Model." Coastal Engineering 1994 Proceedings, 24th International Conference Coastal Engineering Research Council/ASCE, 2653-2667.
- Toni Schenk (1999). **Digital Photogrammetry**. TerraScience.
- U.S. Army Corps of Engineers (1992). **Coastal Groins and Nearshore Breakwaters**. Engineer Manual 1110-2-1617, Washington, DC.
- U.S. Army Corps of Engineers (1992). **Coastal Littoral Transport**. Engineer Manual 1110-2-1502, Washington, DC.
- 한국해양연구소 (1991). **툼볼로 형성에 관한 수치모델**. BSPE 00223-371-2.
- 해양수산부 (1997). **장기파랑산출 자료집**.