한반도 조력자원 개발타당성

이광수
한국해양연구원

요 약

우리나라 서해안 중부, 경기만 일대는 강한 조석과 잘 발달된 해만으로 인해 천혜의 조력자원 보고로 알려져 있으나, 1980년대부터 서·남해 연안역에 대한 대규모 매립과 항만개발 등으로 조력개발입지 자체가 상실되고, 조석체계도 변화되고 있다. 한편 조력에너지는 기존의 화석연료를 대체할 수 있는 개발가능한 신·재생에너지 중에서 거의 유일하게 대규모로 개발이 가능한 것으로 평가되고 있어 개발시 기대효과는 매우 클 것이다. 이에 우리나라 서해안의 조력자원 부존량을 파악하고 주요 후보지에 대한 개발타당성 검토를 통하여 주요 조력자원 후보지를 타 개발로부터 보호하고, 민간참여를 유도하여 조력에너지 개발을 활성화하고자 본 조사를 추진하였다.

한반도 조력자원 개발타당성 검토를 위하여 1) 서해안의 주요 지점에 대한 조석특성을 조사하였고, 2) 주요 조력자원 후보지 위치 및 영역을 설정하였으며, 3) 조석체계변화예측 수치모형실험을 실시하였고, 4) 후보지별 발전소 평면배치계획을 수립하였으며, 5) 후보지별 연간발전량과 개략공사비를 산출하여 6) 후보지별 개략타당성 검토를 수행하였다.

검토결과 우리나라 서해안의 조력개발 가능규모는 215만kW 정도이며, 주요 후보지를 모두 개발할 경우 연간 3,826GWh의 전기를 생산할 수 있을 것으로 조사되었다. 또한 연간발전량 대비 순공사비 비율에 따르면 만 입구가 좁아 개발 경제성 확보가 유리한 가로림만을 우선 추진하고, 이후 인천만, 천수만 순으로 개발하는 것이 유리한 것으로 나타났다.

1. 서 론

조력발전의 기본원리는 저낙차 수력발전과 유사하며 해수의 조석간만 차, 즉 밀물과 썰물의 수위 차를 이용하여 해수를 인공적으로 조성된 저수지(일반적으로 潮池라함)에 출입시키면서 발전하는 방식으로 조력에너지는 기존의 화석연료를 대체할 수 있는 개발가능한 신·재생에너지 중에서 거의 유일하게 대규모로 개발

이 가능하다. 또한 무공해 에너지로서 일단 개발이 되면 반영구적으로 활용이 가능한 비고갈성 에너지라는 이점과 함께 전력생산과 더불어 조지 내의 수산생물 생성조건의 향상에 따른 수산양식효과, 댐 축조에 따른 교량효과, 관광자원효과, 간석지 개발효과 등 다목적 개발효과를 얻을 수 있다(한국전력공사, 1993).

조력자원의 개발입지 조건으로는 우선 발생하는 조석간만 차가 커야하고, 조지 면적이 넓어야하며, 조성되는 조력발전소의 만 입구, 즉 댐을 설치하는 곳의 폭이 좁아야 공사비 측면에서 유리하다.

우리나라 서해안 중부, 경기만 일대는 강한 조석과 잘 발달된 해만으로 세계적인 조력발전 적지로 널리 알려져 왔으며(Bernshtein, 1997), 이를 개발하기 위한 관심은 과거 일제 강점기하 인천만 조력발전 방안에 대한 조사를 실시한 이래부터 보여왔고, 1970년대 1, 2차 석유파동을 겪으면서 조력자원 개발 필요성이 대두되었다. 이후 1980년대에는 원유의 저유가 유지와 안정적인 공급으로 신·재생에너지 개발에 대한 인식 저감으로 조력자원의 개발 필요성이 감소하였으며, 저유가로 인하여 조력발전의 개발경제성도 미흡하였다. 1978년에 실시된 '서해안 조력부존자원조사'(한국전력공사, 1978)를 통하여 서해안 중부 일대에 선정된 조력자원 개발 입지 10개 지점에 대해 약 650만 kW의 부존 조력자원량이 확인되었다. 이 중 충남 서산군 소재 가로림만의 경우, 개발타당성이 매우 높은 것으로 평가된 바 있어 수차례에 걸쳐 개발을 위한 시도가 있었으나 아직 개발되지 않고 있다(한국해양연구소, 1981; 한국전력공사, 1986, 1993).

한편 우리나라의 협소한 국토 확장 및 식량안보 차원에서 1980년대부터 서·남해 연안역에 대한 대규모 간척·매립 사업이 진행되면서 유력한 조력발전 후보지들이 상실되고, 조석체계도 변화되고 있는 실정이다(해양수산부, 2001b). 또한 최근 국제유가가 50불/Bbl을 상회하는 등 화석연료 가격이 급상승하고, 지구온난화 방지를 위한 국제적인 대응방안이 활발하게 전개되고 있으며, 이의 일환으로 자원개발 분야에서 지속가능한 개발(sustainable development) 방안을 강구하고 있다. 결과적으로 적절한 대안으로 평가되고 있는 신·재생에너지 분야의 개발, 보급 및 확대 정책이 적극적으로 추진되고 있는 여건변화를 맞이하고 있다. 현재 신·재생에너지 중에서 거의 유일하게 대규모로 개발이 가능한 것으로 평가되고 있는 조력자원에 대한 개발 타당성 검토를 통하여 주요 후보지에 대한 보호 및 개발 방안 수립이 필요한 실정이다.

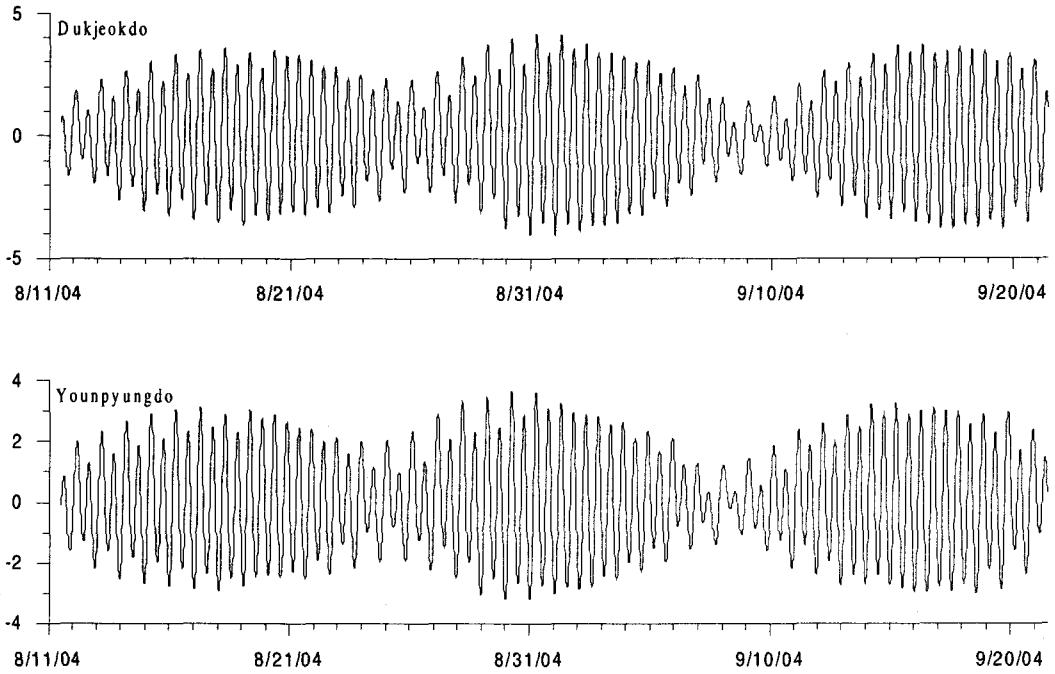
따라서 현 시점에서 한반도 조력자원의 부존 규모 파악 및 개발 타당성 검토는 조력자원 개발을 위한 기본단계로 향후 개발시 우선순위 선정 등 조력자원 개발의 기초자료로 활용이 가능할 것이다.

2. 본 론

가. 조석 관측·분석 및 조석체계변화 예측

1) 조위 분석 및 평가

서해해역의 주요 10개(인천, 안흥, 보령, 군산, 군산외항, 목포, 제주, 서귀포, 완도, 거문도) 검조소의 최근 20년간의 조위자료를 분석하여 수치모형에 활용하였고, 또한 해수유동 수치모형의 주요 검증점을 대상으로 서해안의 주요 2개(덕적도 및 연평도)지점에서 조석관측 및 분석을 실시하였다. 관측결과 덕적도에서의 주요 4개분조(M2, S2, K1, O1)의 진폭은 251.2cm, 102.2cm, 40.4cm, 31.5cm로서 M2의 경우 가로림만 보다 크고, 연평도에서의 주요 4개분조(M2, S2, K1, O1)의 진폭은 210.0cm, 85.2cm, 39.1cm, 30.4cm로서 M2와 S2 분조가 덕적도에 비해 작게 조사되었다(그림 1참조).

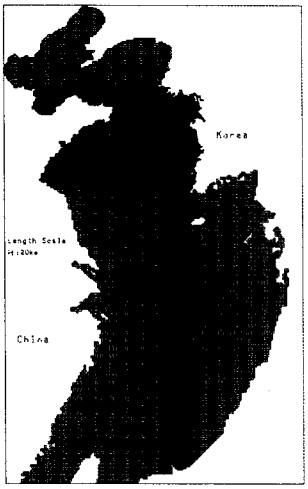


[그림 1 : 덕적도와 연평도 인근해역에서의 관측된 조위시계열]

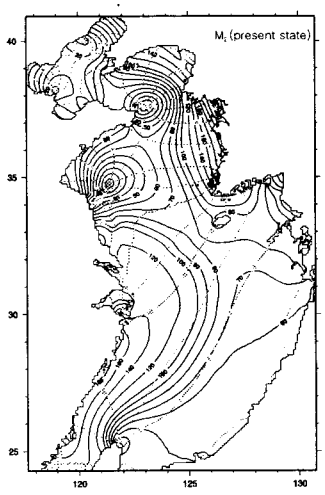
2) 조석체계변화 예측 수치실험

조력발전소 건설에 따른 조석체계변화를 예측하기 위하여 황동중국해를 대상으로 조석, 조류예측 수치모형의 격자망(그림2a)을 수립하였고, 관측결과를 이용하여 검증하였다. 모델의 검증은 기존 연구(Kang et al., 1998; Kang et al., 2002) 결과와 비슷한 정확도를 보였다. 모델계산으로부터 산정된 M2 분조의 조시도를 그림

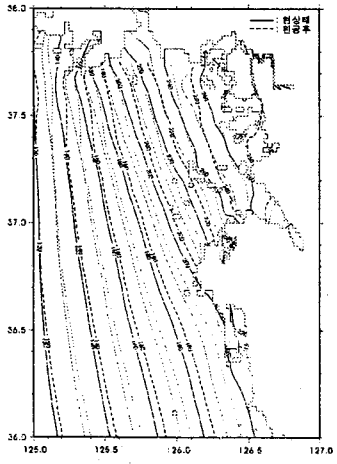
2b에 제시하였다. 검증된 모델을 이용하여, 경기만 해역에 방조제 완공전·후에 대하여 조위예측을 실시하였다. 이로부터 주요 후보지점에 대한 5개 분조에 대한 조화상수를 도출하였다. 수치모형실험 결과, 주목할만한 정량적인 변화로 경기만 입구에서 M2 진폭이 약 5cm 감소하며 경기만내에서 평균 약 10cm 감소하고, 경기만 북서측으로 갈수록 감소폭이 크게 나타났다(그림2c 및 그림2d). 반면, M2분조 이외의 변화는 상대적으로 매우 작다. M2 분조의 진폭 변화가 경기만 북동측에서 크게 나타나는 점은 M2 조석파가 옹진반도에 반사되는 특성변화와 관련이 있는 것으로 보이며, 조력에너지 산정에 유의해야 할 점이다. 향후 인천만 조력발전소 개발에 따른 영향 평가시 이에 대한 상세한 검토 및 분석이 필요할 것으로 판단된다.



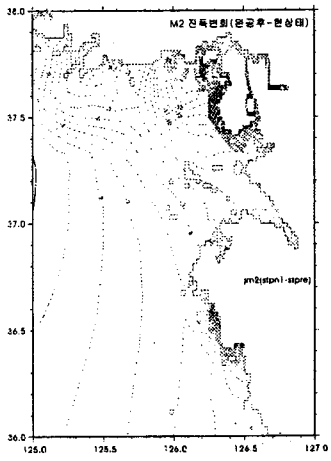
[그림 2a : 황동중국해 가변격자망]



[그림 2b : 계산된 현상태 M2 조석도]



[그림 2c : 인천만 조력발전에 따른 방조제 건설전·후 M2 등진폭도]

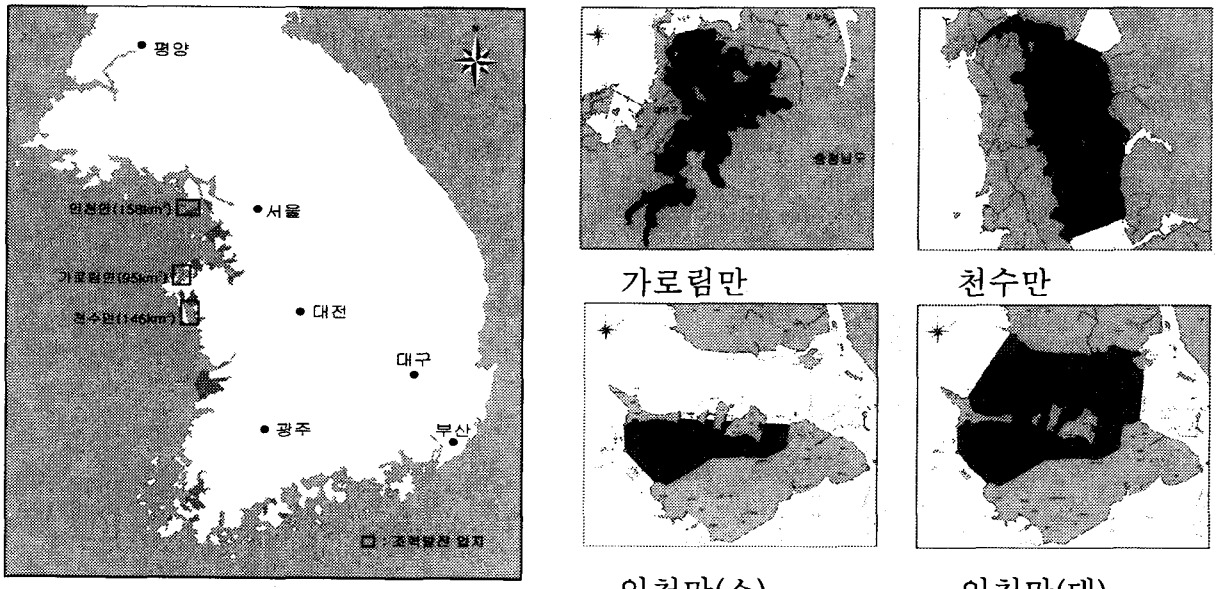


[그림 2d : 인천만 조력발전에 따른 방조제 건설전·후 M2 진폭차(완공후-현상태)]

나. 주요 후보지별 조력발전 개발규모

1) 주요 조력발전 후보지 선정

조석체계변화 예측 수치모형 결과와 도상에서 검토한 내용을 토대로 우리나라 서해안의 주요 4개 조력개발 후보지(가로림만, 천수만, 인천만(소) 및 인천만(대))를 선정하여 후보지별 평면배치계획을 수립하였다. 도상에서 추출된 가로림만, 천수만, 인천만(소) 및 인천만(대)의 수면적은 각각 95km2, 146km2, 57km2, 158km2 이다(그림 3 참조).

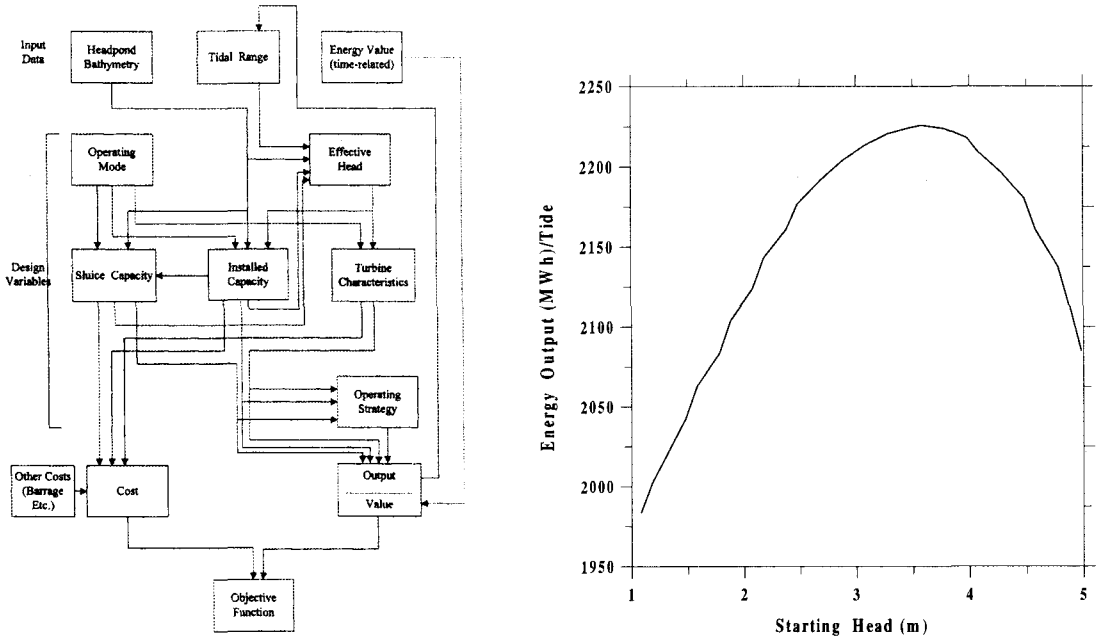


[그림 3 : 우리나라 조력발전 입지]

2) 조력발전 최적화

조력발전과 수력발전은 수역학, 기기특성, 설계 및 공법 등에서 차이가 있다. 즉 수력발전의 최적개발규모는 최저갈수위, 홍수위 및 저수용량 등 하천의 수문학적 특성에 의해 결되는 반면, 조력발전은 1)외해조석과 발전소운전에 따른 조지수위 변화에 따라 결정되는 가용수두, 2)조지면적, 3)수문용량, 4)발전기용량, 5)발전방식 등 서로 영향을 미치는 여러 가지 요소들에 의해 결정된다(Baker, 1991). 따라서 조력발전은 최적화가 필요하며, 최적화에 필요한 변수들 사이의 상관관계와 발전시작 수두에 따른 발전출력 변동곡선을 그림 3에 도시하였다. 발전최적화는 발전소 운전에 관계되는 변수(발전개시시간, 발전종료시간, 발전중 수차날개각도 수차의 유량조절수문 조정)와 공사비에 관계되는 변수(방조제 및 수문의 제원, 수차발전기 제원, 수차발전기 및 수문의 설치대수)들을 최적화하고 이들을 서로 비교

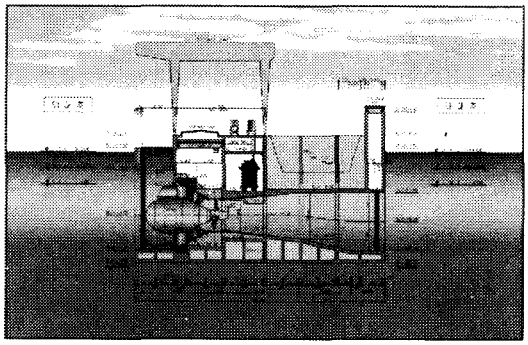
함으로서 최종적인 최적발전규모가 결정되어야 한다. 본 조사에서는 해양연구원이 자체개발하여 보유하고 있는 최적발전량 산출모형(TEGEN)을 이용하여 연간발전량을 산출하였고, 후보지별 개략공사비를 추정하여 최적발전규모를 결정하였다.

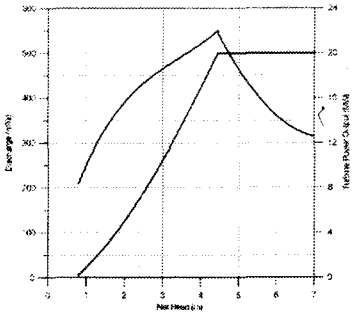


[그림 4 : 조력발전 최적화를 위하여 고려해야할 변수들의 상관관계(좌), 조력발전 시작 수두에 따른 발전량 변동곡선(우)]

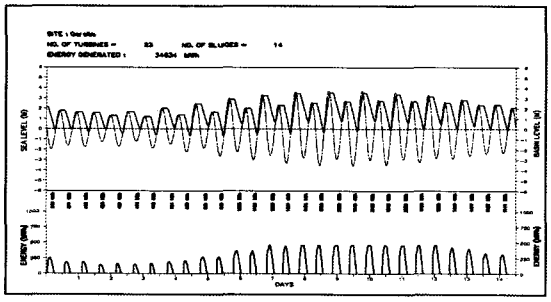
3) 연간발전량 산출 및 조력발전 개략타당성

발전량 산출을 위하여 조석체계변화예측 수치모형을 통하여 산정된 주요 5개 분조의 조화 상수, 도상에서 추출한 조위별 수면적 및 후보지 특성에 적합한 수차발전기 특성자료 등을 이용하여 조력발전출력 산정 모형을 구축하여 활용하였다. 본 조사에서 적용한 수차발전기는 Bulb 형 수차발전기로 가로림만과 천수만의 경우는 2만kW급, 인천만의 경우는 25.5만kW급 수차발전기 특성자료를 입수하여 특성을 분석한 후 발전출력산정 모형에 적용하였다(그림 5 참조). 한편 주요 조력발전 후보지에 적용한 조력발전방식은 조지내를 충분히 활용하여 발전량 측면에서 우수한 낙조식 발전방식을 선정하였으며, 이를 적용한 14.5일간의 발전량 산출 예를 그림 6에 도시하였다.

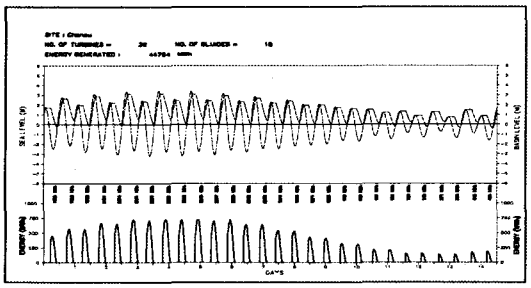




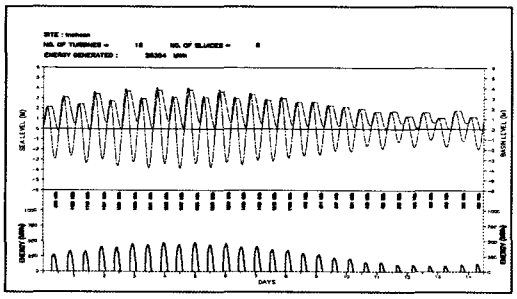
[그림 5 : 2만kW급 Bulb 형 수차발전기 및 발전구조물 단면도(좌), 특성곡선(우)]



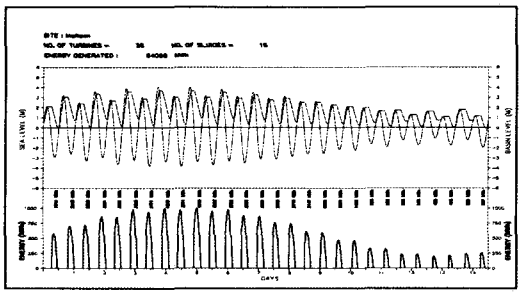
가로림만



천수만



인천만(소)



인천만(대)

[그림 6 : 주요 후보지별 대표 조석군(14.5일간)에 대한 발전량 산정결과]

천수만의 조력발전 적정개발규모 파악을 위하여 천수만 조력발전출력 산정 모형을 이용하여 수차발전기(2만kW급)는 30대(60만kW)에서 40대(80만kW)까지 2대 간격, 수문(12m×12m)은 14대에서 24대까지 2대 간격의 36개 조합에 대하여 2005년도의 천문인수를 적용하여 연간발전량을 산정하였다. 또한 천수만 조력발전 평면배치계획안을 기본으로 최근 물가자료 등을 참조하여 36개 개발안에 대한 개략공사비를 산출하였고, 이들 안에 대한 개략공사비 및 연간발전량과의 비교한 결과 수차발전기 36대(72만kW), 수문 18대로 나타났다.

인천만(소)와 인천만(대) 안에 대해서도 천수만과 같은 방법을 적용하여 연간발전량 및 개략공사비를 산정하여 적정개발규모를 파악한 결과, 인천만(소)는 수차

발전기(2.5만kW급) 18대(45만kW), 수문 8대이고, 인천만(대)는 수차발전기 38대(95만kW), 수문 18대로 나타났다.

한편 현재 적용한 방법이 가장 단순하게 적정용량을 산출한 것이므로 각 안에 대한 상세 경제성 분석을 수행하면 그 순위가 다소 변경될 가능성도 있으며, 환율변동에 따른 수차발전기 제작사의 가격 및 성능특성 등에 따라서도 변경될 가능성은 있다.

이상의 최적화 과정을 통하여 도출된 주요 조력발전 후보지별 적정개발규모와 해역특성을 표 1에 제시하였다. 가로림만의 경우 기존 조사자료를 활용하여 표에 함께 나타내었다. 이에 따르면 가로림만, 인천만(대), 천수만을 모두 합하면 개발가능규모는 215만kW 정도이며, 주요 후보지를 모두 개발할 경우 연간 3,826GWh의 전기를 생산할 수 있을 것으로 조사되었다. 또한 연간발전량 대비 순공사비 비율에 따르면 만 입구가 좁아 개발 경제성 확보가 유리한 가로림만을 우선 추진하고, 이후 인천만, 천수만 순으로 개발하는 것이 유리한 것으로 나타났다. 그러나 연간발전량 대비 순공사비 비율(원/kWh)은 상호비교를 위하여 사용된 단순지표로 향후 각 후보지별 정밀 타당성 조사를 통하여 경제성(B/C, IRR 등)분석을 수행하여야 보다 정확한 우선순위 도출이 가능할 것이다.

<표 1 : 주요 조력발전 후보지 특성 및 개략타당성>

후보지	평균대조차 (m)	수면적 (km^2)	시설용량 (만kW)	발전량 (GWh)	순공사비 /연간발전량 (원/kWh)
인천만(소)	7.25	57	45	768	1,220
인천만(대)	7.25	158	95	1,736	1,032
가로림만	6.44	95	48	883	864
천수만	5.91	146	72	1,207	1,068

3. 결 론

한반도 조력자원 개발 타당성 검토를 위하여 1) 서해안의 주요 지점에 대한 조석특성을 조사하였고, 2) 주요 조력자원 후보지 위치 및 영역을 설정하였으며, 3) 조석체계변화예측 수치모형실험을 실시하였고, 4) 후보지별 발전소 평면배치계획을 수립하였으며, 5) 후보지별 연간발전량과 개략공사비를 산출하여 6) 후보지별 개략타당성 검토를 수행하였다.

검토결과 우리나라 서해안의 조력개발 가능규모는 215만kW 정도이며, 주요 후보지를 모두 개발할 경우 연간 3,826GWh의 전기를 생산할 수 있을 것으로 조사

되었다. 또한 연간발전량 대비 순공사비 비율(원/kWh)에 따르면 만 입구가 좁아 개발 경제성 확보가 유리한 가로림만을 우선 추진하고, 이후 인천만, 천수만 순으로 개발하는 것이 유리한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

한국수자원공사. 2004. 시화호 조력발전소 건설공사 기본설계 보고서.

한국전력공사. 1978. 서해안 조력 부존자원조사.

한국전력공사. 1986. 가로림 조력발전 후속조사 및 우수영 조류발전 예비타당성 조사.

한국전력공사. 1993. 가로림 조력개발 타당성조사.

한국해양연구소. 1981. 가로림만 조력발전 타당성 조사.

해양수산부. 2001a. 해양에너지 실용화 기술개발(조력 · 조류에너지)

해양수산부. 2001b. 대규모 연안개발에 따른 조위예측 연구개발(해수범람해역의 조위 예측연구).

Baker. A.C. 1991. Tidal power. Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.

Kang, S.K., Chung, J-Y., Lee, S.-R., and K.D. Yum. 1995. Seasonal variability in M2 tide in the seas adjacent to Korea. Contin. Shelf Res., 15(9) : 1087-1113.

Sok Kuh Kang, M.G.G. Foreman, H.J. Lie, J.H. Lee, J. Cherniawsky, and K.D. Yum. 2002. Two-layer tidal modeling of the Yellow and East China Seas with application to seasonal variability of the M2 tide. Journal of Geophysical Research, 107(C3), 10.1029/2001JC000838.

L. B. Bernshtein, E. M. Wilson & W. O. Song. 1997. Tidal power plant.