

ORIGINAL ARTICLE

## 제주도 동부 해안대수층의 수리특성 산정과 지하수위 예측

조시범 · 전병칠 · 박은규<sup>1)</sup> · 최광준<sup>2)</sup> · 송성호<sup>2)\*</sup> · 김기표<sup>3)</sup>

한국농어촌공사 제주지역본부, <sup>1)</sup>경북대학교 지질학과, <sup>2)</sup>한국농어촌공사 농어촌연구원, <sup>3)</sup>제주특별자치도 수자원본부

### Estimation of Hydraulic Characteristics and Prediction of Groundwater Level in the Eastern Coastal Aquifer of Jeju Island

Si-Beom Jo, Byung-Chil Jeon, Eun-Gyu Park<sup>1)</sup>, Kwang-Jun Choi<sup>2)</sup>, Sung-Ho Song<sup>2)\*</sup>, Gi-Pyo Kim<sup>3)</sup>

Jeju Regional Headquarters, Korea Rural Community Corporation, Jeju 2127-1, Korea

<sup>1)</sup>Department of Geology, KyungPook National University, Daegu 1370, Korea

<sup>2)</sup>Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan 426-170, Korea

<sup>3)</sup>Water Resources Office, Jeju 2651-2, Korea

#### Abstract

Due to tidal force, it is very difficult to estimate the hydraulic parameters of high permeable aquifer near coastal area in Jeju Island. Therefore, to eliminate the impact of tidal force from groundwater level and estimate the hydraulic properties, tidal response technique has been mainly studied. In this study we have extracted 38 tidal constituents from groundwater level and harmonic constants including frequency, amplitude, and phase of each constituent using T\_TIDE subroutine which is used to estimate oceanic tidal constituents, and then we have estimated hydraulic diffusivity associated with amplitude attenuation factor(that is the ratio of groundwater level amplitude to sea level amplitude for each tidal constituent) and phase lag(that is phase difference between groundwater level and sea level for each constituent). Also using harmonic constants for each constituent, we made the sinusoidal wave and then we constructed the synthesized wave which linearly combined sinusoidal wave. Finally, we could get residuals(net groundwater level) which was excluded most of tidal influences by eliminating synthesized wave from raw groundwater level. As a result of comparing statistics for synthesized level and net groundwater level, we found that the statistics for net groundwater level was more insignificant than those of synthesized wave. Moreover, in case of coastal aquifer which the impact of tidal force is even more than those of other environmental factors such as rainfall and groundwater yield, it is possible to predict groundwater level using synthesized wave and regression analysis of residuals.

**Key words** : Coastal aquifer, Harmonic constants, Tidal constituents, Hydraulic diffusivity, T\_TIDE

#### 1. 서론

제주도는 수십 차례의 화산활동에 의해 형성된 섬으로써 한라산을 중심으로 권역별로 지층형성이 제각

기 달라서 지하수의 산출특성을 명확히 규명하기는 매우 어려운 실정이다. 특히 동부지역은 서귀포층의 발달이 미약하여 내륙 수 km까지 염수가 침입하고 있어 지금까지 많은 학자들의 주된 관심지역으로 대두

Received 21 January, 2014; Revised 27 March, 2014;

Accepted 9 April, 2014

\*Corresponding author : Sung-Ho Song, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan 426-170, Korea

Phone: +82-31-400-1723

E-mail: shsong84@hanmail.net

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

되어 왔다. 2013년의 경우와 마찬가지로 90년만의 극심한 가뭄이 발생한 경우 제주도 해안지역에서의 염수 침입은 더욱 가중될 것으로 판단되기 때문에 해안지역 대수층 특성을 보다 세밀하게 연구할 필요가 있다.

외국에서는 수십 년 전부터 해안지하수의 수리특성(Serfes, 1991), 누수대수층에서의 조석에 의한 지하수위 반응해석(Jiao와 Tang, 1999), 해안대수층에서 조석반응 분석법(tidal response technique)을 통한 수리인자 산정(Jha 등, 2003) 등에 대한 연구를 해왔으며, 국내에서는 해안가에 발달된 단열암반 대수층에서 조석반응 분석법을 이용한 대수층 수리인자 추정(Shim과 Chung, 2004), 해안대수층의 조석에 의한 수리경사 변화(Kim 등, 2005), 제주 동부지역의 수리확산계수와 지하수 도관 유동 가능성(Lee 등, 2006) 등에 대한 연구가 진행되어 왔다.

본 연구의 첫 번째 목적은 지하수 산출특성이 매우 좋은 제주도 해안지역의 지하수 수리특성을 보다 객관적으로 분석하고자 함이다. 이를 위해 해안지역 조위 및 지하수위 자료를 이용하여 조화분석(harmonic analysis)을 통해 기조력 분조 및 조화상수를 최대한 추출한 후 분조별 수리확산계수를 유추하였으며, 기존의 수리특성 분석방법과 비교 서술하였다. 두 번째 목적은 조석의 영향을 최대한 제거한 보다 순수한 지

하수위를 유추하는 것이다. 일반적으로 해안대수층의 경우 조석의 영향으로 인해 양수시험에 따른 수위변동을 파악하기는 매우 어려운 실정이다. 그러나 이러한 조석의 영향(기조력)을 최대한으로 제거한다면 비록 주변 환경(강수량, 지하수이용량 등)에 의해 영향을 받을지라도 어느 정도 수리특성을 유추하는 것이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 조석의 영향을 파악하기 위해서 조화상수를 모두 조합한 합성파(synthesized wave)를 생성하였고, 원시 지하수위에서 합성파에 의해 유도된 수위를 제거함으로써 보다 순수한 지하수위를 유추하였다. 세 번째 목적은 기조력 및 잔차의 회귀방식에 근거한 지하수위를 예측하는 것이다. 만약 이러한 방법으로 해안지역에 대한 수위변동 양상을 예측할 수 있다면 향후 발생될 염수유입 시기, 염수유입량, 수질 등에 대한 정보를 사전에 예측할 수 있어 효율적인 지하수관리가 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 연구 절차

본 연구 수행절차는 우선 관측자료를 수집 및 가공한 후 조화분석을 통해 기조력 분조(tidal constituents) 및 분조별 조화상수(harmonic constants : 주파수, 진폭, 위상)를 추출하였다. 그리고 이를 이용하여 수리확산계수(hydraulic diffusivity)를 유추함으로써 해안대수

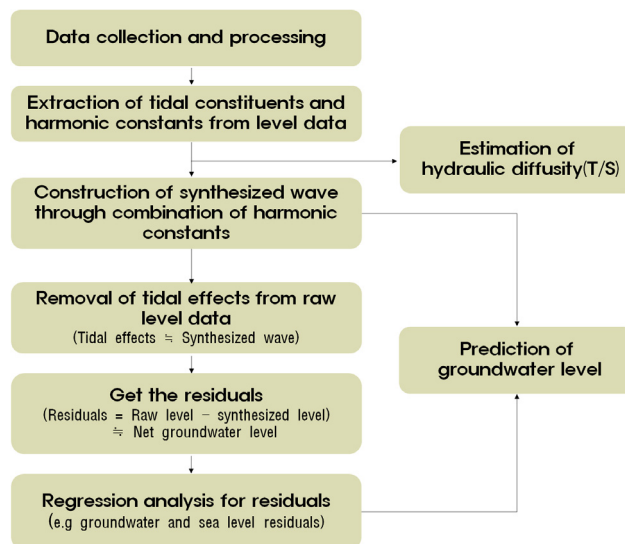


Fig. 1. Procedure of data processing.



Fig. 2. Study area.

층의 수리특성을 파악하고자 하였다. 또한, 분조별 조화상수를 이용하여 합성파를 생성한 후 지하수위 원시자료(raw data)에서 합성파에 의한 수위값을 빼 줌으로써 조석의 영향이 상당부분 제거된 보다 순수한 지하수위(residuals)를 얻고자 하였다. 최종적으로 잔차(순수한 지하수위)를 이용한 회귀방정식을 유도한 후 관심구간에 대한 수위를 예측하고 이를 동일 관심구간의 합성파 수위에 더해줌으로써 지하수위를 예측하였다.

### 3. 연구방법

본 연구는 제주특별자치도 수자원본부에서 운영 중인 한동1(HD1), 한동2(HD2) 해수침투감시 관측정과 국립해양조사원 성산포 조위관측소에서 2012년 1월 1일 정시부터 2012년 4월 15일 정시까지 1시간 단위로 측정된 지하수위 및 조위 자료를 이용하여 수행하였다(Fig. 2).

본 연구지역의 성산포 조위관측소와 해안가로부터 각각 약 812 m, 2,077 m 이격거리에 있는 한동1, 한동2 해수침투 관측정에서 측정된 해수면 기준(El.m) 평균 조위 및 지하수위는 각각 1.24 m, 1.07 m, 1.42 m이며, 표준편차는 0.57 m, 0.25 m, 0.13 m인 것으로

나타났다(Fig. 3). 한동1, 2 관측정에서의 시간 지연(time delay)을 파악하기 위해 교차 상관분석(cross correlation)을 실시한 결과, 각각 1시간, 2시간으로 나타났다(Fig. 4), 이는 해안가로부터 거리가 멀어질수록 기초력의 영향이 더 늦게 나타난다는 것을 의미한다.

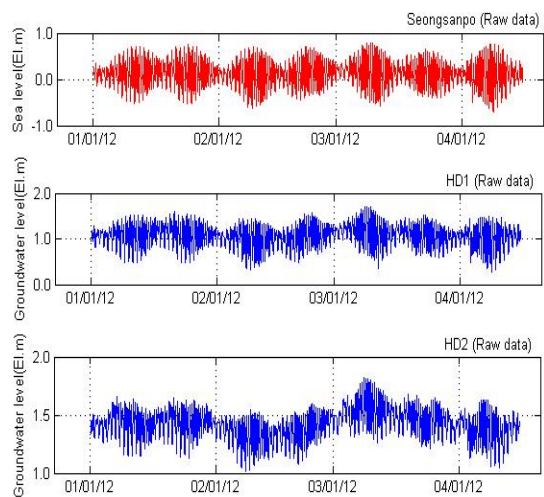


Fig. 3. Raw level for sea(Seongsanpo) and groundwater (HD1, HD2).

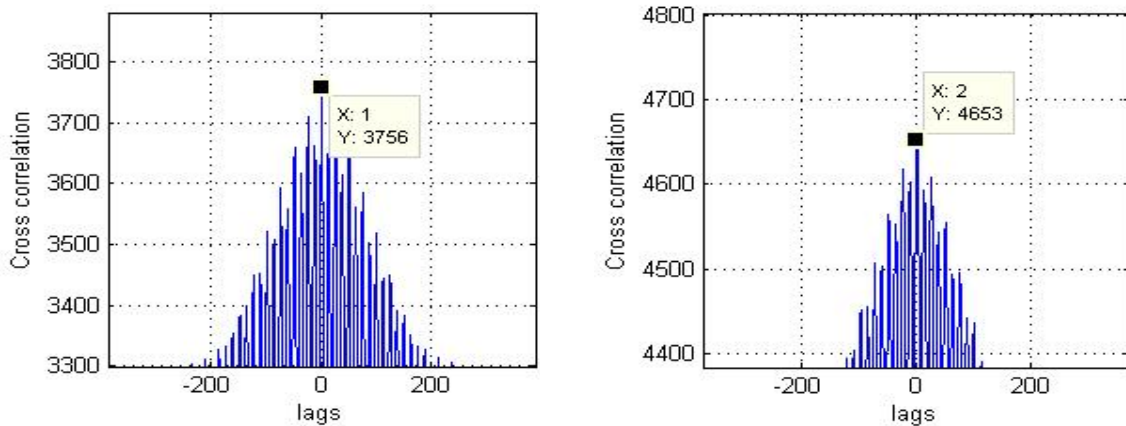


Fig. 4. Cross correlation for sea and groundwater level(left, HD1; right, HD2).

조위 및 해안지역 지하수에 영향을 주는 기조력 분조를 파악하기 위해 T\_TIDE 서브루틴을 이용하였다(Pawlowicz 등, 2002). T\_TIDE 서브루틴은 조화분석 방법을 이용하여 해양의 기조력 분조를 추출하고 조위를 예측하기 위해 만들어진 프로그램이다.

조화신호(harmonic signal)의 진폭은 대수층의 특성 및 해안으로부터의 거리에 따라 지수적으로 감쇠하고 위상지연(phase lag)은 선형적으로 증가한다(Jacob, 1950). 이러한 현상은 일차원적이고 단선 경계(sharp boundary)를 갖는 균질하고 등방성이면서 피압을 받는 반무한 길이의 대수층으로부터 유도되었다(Jacob, 1950; Ferris, 1951). 또한 균질하고 등방성이면서 유한길이의 자유면 대수층에 대해 이와 유사한 해가 산출되었다(Werner과 Noren, 1951). 그러나 Jacob-Ferris 방법은 조위 진폭범위가 포화 대수층 두께에 비해 작은 경우 자유면 대수층에서 적용할 수 있다고 제시하였다(Erskine, 1991).

본 연구지역과 같이 조석의 영향을 받는 해안대수층의 경우 순수한 지하수위를 얻기 위해서는 조석의 영향을 제거해야 하는데 이를 위해서는 우선적으로 기조력 분조성분을 파악해야 한다.

### 3.1. 기조력 분조 및 조화상수 추출

일반적으로 기조력 분조를 추출하기 위해서 스펙트럼 분석(spectral analysis)과 조화분석 방법이 많이 사용되고 있다. 표준적인 고주파수/저주파수/대역통과 필터링 기법도 사용될 수 있으나 상당히 좁은 대역

의 필터가 필요하기 때문에 비효율적이다(Pawlowicz 등, 2002). 또한, 스펙트럼 분석방법은 전체 기조력의 95% 이상을 차지하고 있는 5개 대표 분조(Hsieh 등, 1987)에 대해서는 쉽게 추출할 수 있으나 주파수가 작은 분조들을 추출하는 것은 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 다양한 주파수의 분조들을 유추하기 위해 T\_TIDE 서브루틴을 이용하였다. 성산포 조위관측소, 한동1, 2 관측정에서 추출된 기조력 분조는 총 38개로 각 지점에서의 진폭은 0.0~0.657 m, 0.0~0.273 m, 0.0~0.123 m 범위를 보이고 있으며  $M_2$  분조가 가장 진폭이 큰 것으로 나타났다(Table 1). 이들 중에서 95% 신뢰구간(신호대 잡음비  $S/N=1.0$ ) 이상의 분조성분은 22~24개로 추출되었다(Fig. 5).

### 3.2. 해안지역 수리특성 분석방법들간의 비교

해안대수층에서는 수리인자 산정을 위한 양수시험이 추천되고 있지 않다(Millham과 Howes, 1995). 해안대수층의 경우 양수시험에 의한 수리상수 산정은 매우 어려운 문제이다. 과거에는 대부분 대수층 수리상수 추정을 AQTESOLV 프로그램을 이용하였지만 지하수위가 비평형상태라는 가정에 근거하고 있기 때문에 해안지역 수리상수 산정 시 많은 어려움이 있었다. 따라서 이를 보완하기 위해 손쉽게 사용되었던 방법이 비양수량(specific capacity)과 투수량계수(transmissivity)를 이용한 회귀분석법이다. 그러나 이 방법도 현장에서 적용하는데 약간의 문제점이 있는데 수위강하량이 크지 않은 대수층에서는 투수량계수가 양수량에 의해

**Table 1.** Tidal force constituents and harmonic constants with 95% confidence interval

Tidal constituents	Freq* (cph)	Seongsanpo			HD1			HD2		
		Amp** (m)	Phase (deg.)	S/N	Amp. (m)	Phase (deg.)	S/N	Amp. (m)	Phase (deg.)	S/N
*MM	0.0015	0.016	153.50	0.1	0.011	161.3	0.0	0.011	213.6	0.0
*MSF	0.0028	0.037	248.43	0.3	0.030	252.8	0.3	0.004	310.5	0.0
*ALP1	0.0344	0.006	100.70	0.3	0.004	128.2	0.3	0.000	336.3	0.0
*2Q1	0.0357	0.007	138.85	0.4	0.004	170.7	0.5	0.002	178.4	0.6
<b>*Q1</b>	<b>0.0372</b>	<b>0.025</b>	<b>157.18</b>	<b>3.2</b>	<b>0.013</b>	<b>185.7</b>	<b>3.8</b>	<b>0.007</b>	<b>215.5</b>	<b>4.1</b>
<b>*O1</b>	<b>0.0387</b>	<b>0.148</b>	<b>179.77</b>	<b>97.0</b>	<b>0.077</b>	<b>209.4</b>	<b>150.0</b>	<b>0.042</b>	<b>236.8</b>	<b>150.0</b>
*NO1	0.0403	0.011	200.25	0.9	0.005	227.8	0.8	0.002	265.1	0.6
<b>*P1</b>	<b>0.0416</b>	<b>0.073</b>	<b>218.51</b>	<b>29.0</b>	<b>0.036</b>	<b>246.2</b>	<b>29.0</b>	<b>0.019</b>	<b>269.5</b>	<b>41.0</b>
<b>*K1</b>	<b>0.0418</b>	<b>0.220</b>	<b>211.44</b>	<b>250.0</b>	<b>0.110</b>	<b>239.1</b>	<b>290.0</b>	<b>0.059</b>	<b>262.4</b>	<b>300.0</b>
*J1	0.0433	0.009	201.59	0.8	0.004	221.6	0.6	0.002	263.6	0.4
*OO1	0.0448	0.013	280.42	0.9	0.006	306.3	0.9	0.003	345.3	0.6
*UPS1	0.0463	0.007	70.93	0.3	0.004	94.3	0.3	0.001	147.5	0.2
<b>*EPS2</b>	<b>0.0762</b>	<b>0.013</b>	<b>210.47</b>	<b>2.1</b>	<b>0.007</b>	<b>239.6</b>	<b>1.4</b>	<b>0.003</b>	<b>264.6</b>	<b>1.5</b>
<b>*MU2</b>	<b>0.0777</b>	<b>0.054</b>	<b>226.12</b>	<b>18.0</b>	<b>0.025</b>	<b>246.6</b>	<b>25.0</b>	<b>0.011</b>	<b>275.2</b>	<b>26.0</b>
<b>*N2</b>	<b>0.0790</b>	<b>0.141</b>	<b>277.60</b>	<b>180.0</b>	<b>0.060</b>	<b>312.5</b>	<b>170.0</b>	<b>0.027</b>	<b>348.7</b>	<b>210.0</b>
<b>*M2</b>	<b>0.0805</b>	<b>0.657</b>	<b>282.83</b>	<b>3000.0</b>	<b>0.273</b>	<b>319.9</b>	<b>2700.0</b>	<b>0.123</b>	<b>356.5</b>	<b>3300.0</b>
*L2	0.0820	0.007	329.75	0.5	<b>0.006</b>	<b>8.2</b>	<b>1.3</b>	<b>0.003</b>	<b>28.5</b>	<b>2.7</b>
<b>*S2</b>	<b>0.0833</b>	<b>0.321</b>	<b>313.56</b>	<b>860.0</b>	<b>0.129</b>	<b>349.7</b>	<b>790.0</b>	<b>0.058</b>	<b>19.7</b>	<b>710.0</b>
<b>*K2</b>	<b>0.0836</b>	<b>0.087</b>	<b>335.96</b>	<b>38.0</b>	<b>0.035</b>	<b>12.1</b>	<b>39.0</b>	<b>0.016</b>	<b>42.1</b>	<b>49.0</b>
*ETA2	0.0851	0.011	290.23	0.7	0.005	325.3	0.8	0.002	346.1	0.7
<b>*MO3</b>	<b>0.1192</b>	<b>0.004</b>	<b>205.21</b>	<b>3.4</b>	<b>0.004</b>	<b>293.3</b>	<b>6.1</b>	<b>0.003</b>	<b>327.8</b>	<b>7.6</b>
<b>*M3</b>	<b>0.1208</b>	<b>0.008</b>	<b>18.86</b>	<b>14.0</b>	<b>0.002</b>	<b>68.3</b>	<b>2.2</b>	<b>0.001</b>	<b>92.2</b>	<b>1.0</b>
<b>*MK3</b>	<b>0.1223</b>	<b>0.001</b>	<b>338.75</b>	<b>0.4</b>	<b>0.004</b>	<b>352.6</b>	<b>4.7</b>	<b>0.001</b>	<b>22.6</b>	<b>2.1</b>
<b>*SK3</b>	<b>0.1251</b>	<b>0.004</b>	<b>280.11</b>	<b>2.7</b>	<b>0.003</b>	<b>357.9</b>	<b>3.3</b>	<b>0.002</b>	<b>159.1</b>	<b>3.6</b>
<b>*MN4</b>	<b>0.1595</b>	<b>0.003</b>	<b>108.38</b>	<b>2.5</b>	<b>0.003</b>	<b>80.5</b>	<b>5.6</b>	<b>0.002</b>	<b>159.6</b>	<b>5.4</b>
<b>*M4</b>	<b>0.1610</b>	<b>0.007</b>	<b>151.09</b>	<b>15.0</b>	<b>0.009</b>	<b>100.9</b>	<b>37.0</b>	<b>0.003</b>	<b>162.0</b>	<b>14.0</b>
<b>*SN4</b>	<b>0.1623</b>	<b>0.002</b>	<b>133.43</b>	<b>1.7</b>	<b>0.002</b>	<b>109.7</b>	<b>3.1</b>	<b>0.001</b>	<b>250.8</b>	<b>2.4</b>
<b>*MS4</b>	<b>0.1638</b>	<b>0.006</b>	<b>226.14</b>	<b>14.0</b>	<b>0.006</b>	<b>133.5</b>	<b>15.0</b>	<b>0.002</b>	<b>240.2</b>	<b>7.3</b>
<b>*S4</b>	<b>0.1667</b>	<b>0.001</b>	<b>189.31</b>	<b>0.3</b>	<b>0.002</b>	<b>136.2</b>	<b>1.4</b>	<b>0.002</b>	<b>289.0</b>	<b>5.8</b>
*2MK5	0.2028	0.000	165.56	0.2	0.000	90.2	0.2	0.001	47.8	0.7
*2SK5	0.2084	0.000	206.82	0.5	0.000	56.9	0.1	0.000	309.0	0.1
*2MN6	<b>0.2400</b>	<b>0.002</b>	<b>223.21</b>	<b>5.4</b>	0.001	228.2	0.9	0.001	43.6	0.8
<b>*M6</b>	<b>0.2415</b>	<b>0.003</b>	<b>227.89</b>	<b>13.0</b>	<b>0.001</b>	<b>254.7</b>	<b>1.4</b>	0.000	115.9	0.3
<b>*2MS6</b>	<b>0.2444</b>	<b>0.005</b>	<b>291.59</b>	<b>31.0</b>	<b>0.003</b>	<b>321.0</b>	<b>7.7</b>	<b>0.000</b>	<b>169.7</b>	<b>1.0</b>
<b>*2SM6</b>	<b>0.2472</b>	<b>0.002</b>	<b>356.76</b>	<b>5.5</b>	<b>0.001</b>	<b>2.1</b>	<b>2.6</b>	<b>0.001</b>	<b>178.3</b>	<b>2.3</b>
*3MK7	0.2833	0.000	55.66	0.5	0.001	88.1	0.7	<b>0.001</b>	<b>90.4</b>	<b>1.0</b>
<b>*M8</b>	<b>0.3220</b>	<b>0.001</b>	<b>217.51</b>	<b>2.0</b>	0.000	78.0	0.1	<b>0.001</b>	<b>44.5</b>	<b>1.9</b>
*M10	0.4026	0.000	3.72	0.6	0.000	343.2	0.2	0.000	59.6	0.6

1. Freq\*: frequency, Amp\*\*: amplitude

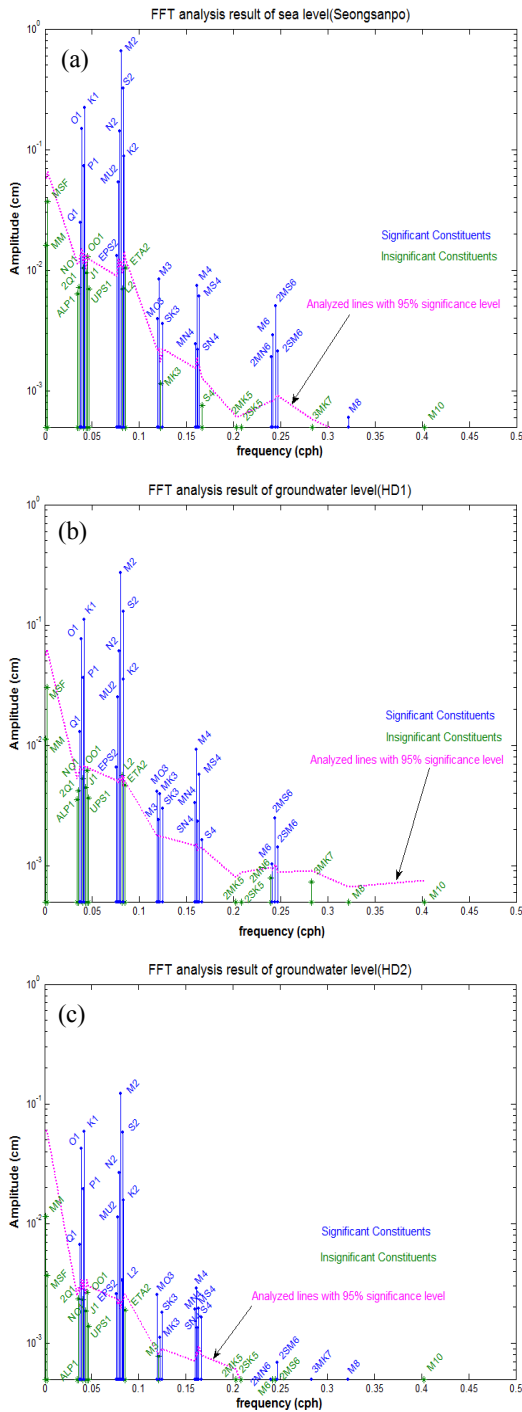


Fig. 5. FFT(Fast Fourier Transform) analysis result of sea and groundwater level((a)Seongsanpo, (b)HD1, (c)HD2).

지속적으로 증가한다는 점이다. 따라서 실제로 현장에서 시공 장비성능을 고려했을 때 투수량계수 산정의 한계점이 발생하여 정확한 투수량계수 산정이 어렵게 된다. 해안대수층에서 조석반응법은 대수층의 수리특성을 나타내는데 주로 사용되어진다(Erskine, 1991; Serfes, 1991). 해안대수층에서는 지하수위가 조석의 영향을 받는 특성을 이용하여 조석반응 분석법을 통해 수리인자를 산정할 수 있다(Jha 등, 2003).

Erskine(1991)은 조석반응법에서 수리확산계수 공식(1)의 시간지연과 식(2)의 조석 효율과 같은 2개의 정량적 요소에 의해 유추될 수 있음을 제시하였다.

$$\text{Time lag}(\tau) = x \sqrt{\frac{t_0 S}{4\pi T}} \quad (1)$$

$$\text{Tidal efficiency} = \exp\left(-x \sqrt{\frac{\pi S}{t_0 T}}\right) \quad (2)$$

여기서  $x$ 는 해안으로부터의 거리(m),  $t_0$ 는 조석의 주기,  $T$ 는 투수량계수,  $S$ 는 저류계수이다.

또 다른 수리확산계수 유추방법은 양방향 조석영향(dual-tide influence)에 대한 해(Townley, 1995)로부터 유추될 수 있는데, 이는 양방향 중에서 어느 한 방향의 거리  $x$ 를 무한히 크게 주면 기존의 Jacob-Ferris의 해(Jacob, 1950; Ferris, 1951)에 근거한 수리확산계수를 추정할 수 있다.

대수층에서 관측된 진폭감쇠와 위상지연은 피압대수층인 경우 저류계수에 대한 투수량계수의 비( $T/S$ ,  $m^2/d$ )로, 자유면대수층인 경우 비산출량에 대한 수리전도도의 비( $K/S_y$ ,  $m/d$ )로 정의되는 수리확산계수를 추정하는데 사용될 수 있다(Rotzoll, 2007).

섬지역의 대수층은 전체 해안으로부터 주기적인 조석의 영향을 받고 있으며, 중심부에서는 중첩효과(overlapping effects)를 보인다. 따라서 섬 내부지역에서 조석반응은 쌍곡선 형태의 진폭 감소와 비선형적인 위상지연을 반영하고 있다. 양방향 조석효과는 해안으로부터 수 km 떨어진 곳에서도 조석영향을 받는 투수성이 높고 작은 화산섬에 매우 중요하다. 따라서 각 분조에 대한 단방향의 진폭 감쇠에 근거한 수리확산계수는 식(3)에 의해 유추할 수 있다(Rotzoll, 2007).

$$D_{ampj} = \frac{x^2\pi}{t_0(\ln A_j)^2} \quad (3)$$

여기서  $D_{ampj}$ 는 j번째 조석성분의 진폭감소에 의한 수리확산계수( $m^2/d$ ),  $x$ 는 해안으로부터의 거리(m),  $t_0$ 는 조석의 주기,  $A_j$ 는 j번째 조석성분의 진폭 감쇠인자(amplitude attenuation factor, 무차원)로써 조위 진폭에 대한 지하수위 진폭의 비로 표현된다.

또한 각 분조에 대한 위상지연으로부터 수리확산계수를 식(4)와 같이 표현할 수 있다(Rotzoll, 2007).

$$D_{phaj} = \frac{x^2\pi}{t_0\phi_j^2} \quad (4)$$

여기서  $D_{phaj}$ 는 j번째 조석성분의 위상차에 의한 수리확산계수( $m^2/d$ ),  $\phi_j$ 는 j번째 조석성분에 대한 지하수위 위상과 조위 위상의 차(radian)이다.

#### 4. 결과 및 해석

##### 4.1. 수리특성 분석방법 비교

본 연구는 기존 논문에 발표된 제주도 해안대수층 수리특성 분석방법(①비양수량과 투수량계수를 이용한 회귀분석법, ②조석반응법에서 시간지연과 조석효율에 의한 수리확산계수 산정방법)과 ③해양조석법(ocean tide)에서 진폭감쇠비 및 위상지연에 의한 수리확산계수 산정방법을 비교·분석하였다(Table 2).

우선 비양수량과 투수량계수간의 회귀분석법을 살펴보면, Choi(1999)는 제주도 화산암지역에서 일정양수를 시험시 Cooper-Jacob의 방법에 의해 산출된 투수량계수를 이용하여 회귀분석을 하였고, 회귀분석식  $T = 0.448(Q/S_w)^{1.053}$  을 유도하였다. 반면에 Hamm 등(2005)은 일정양수를 시험시 누수대수층에 대한 Moench 방법을 적용하여 투수량계수를 산정하였으며, 회귀분석식  $T = 0.99(Q/S_w)^{0.89}$  를 유도하였다. 또한, Rotzoll(2007)는 하와이 화산암대수층에 대해서 회귀방정식을 이용하여 회귀분석식  $T = 1.537(Q/S_w)^{1.002}$  를 유도하였다. 이 방법들을 적용하여 제주도 해안지역에서 양수량  $Q=2,000 m^3/d$ , 수위강하량 1 m라고 가정했

을 때 투수량계수(T)는 각각 1,340.49  $m^2/d$ , 853.13  $m^2/d$ , 3,121.09  $m^2/d$  로 나타났다(Table 2). 그러나 이러한 방법은 대수층이 조석의 영향을 받을 경우 양수 시험에 따른 수위강하량을 정확히 산정하기가 매우 어려울뿐만 아니라 수량이 풍부하여 수위강하량이 아주 작을 경우에도 현장설치 펌프용량의 한계로 보다 정확한 투수량계수를 산정하기는 어려울 것으로 보인다. 단, 조석의 영향이 없고 수위강하량이 매우 작아 수리상수를 구하기 어려운 경우이거나 양수시험을 하지 않고 주변관정의 비양수량 값만을 이용하여 관심지역의 수리상수를 추정하는데 적용이 가능하리라 판단된다.

둘째로 조석반응법에서 삼각함수형은 정현파(sinusoidal wave)의 지하수위 변화양상과 지연시간에 관련된 항이며, 조석의 진폭과 지수함수형은 거리에 따른 진폭 감쇠정도와 관련되는 항으로써 공통적으로 대수층의 투수량계수 및 저류계수와 연관하여 유도된 방법이다. 이중 조석효율(TE : tidal efficiency)에 의한 수리특성 분석방법은 조석효율을 어떻게 결정하느냐에 따라 달라질 수 있으나, 본 연구에서는 조석효율을 Smith(1997)가 제시한 동일 주기 분조의 진폭비(조위 진폭에 대한 지하수위 진폭비)로 결정하였으며, 이는 세 번째 방법인 해양조석법에서의 진폭 감쇠인자에 의한 수리특성 산출방법과 동일한 방법이다.

본 연구지역인 한동1, 2 지점에서 주요 5개 분조 중 조석효율이 유효한 4개 분조에 대한 조석효율은 각각 0.42~0.52, 0.19~0.29의 범위를 보이고 있는데, Lee 등(2006)이 제시한 조석효율(한동1 0.45, 한동2 0.22)과는 다소 다르게 산정되었다. 수리확산계수 또한 서로 다른 값을 보이고 있는데, 이는 조석효율이 동일 관측지점일지라도 관측시점에 따라 또는 조석효율 산정 방법에 따라 달라질 수 있기 때문이다. 여기서  $S_2$  분조는 조석효율이 이상치(anomaly)로 나타나고 있어 분석대상에서 제외하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

본 연구지역에서 조석효율은 대체적으로 해안에서 가까울수록 높아지는 경향을 보이고 있으며, 수리확산계수는 해안에서 거리가 멀수록 커지는 경향을 보이고 있다.

조석반응법에서 시간지연에 따른 수리확산계수는 거리에 비례하고 시간지연에 반비례한다. 5개 분조에

Table 2. The analysis results of hydraulic property estimated

Method	Estimated through	Diffusivity (T/S, m <sup>2</sup> /d)		T, K (m <sup>2</sup> /d, m/d)	Remark	
① Specific capacity	Regression coefficients (by Choi, 1999)	$T = f_2 \left( \frac{Q}{S_w} \right)^c$			1,340.49 <sup>1)</sup>	f <sub>2</sub> = 0.448 c = 1.053
	Regression coefficients (by Ham 등, 2005)				858.13 <sup>1)</sup>	f <sub>2</sub> = 0.990 c = 0.890
	for Hawaii volcanic aquifers (by Rotzoll. K., 2007)				3,121.09 <sup>1)</sup>	f <sub>2</sub> = 1.537 c = 1.002
			HD1	HD2		
② Tidal response	O <sub>1</sub>	Time lag( $\tau$ ) = $x \sqrt{\frac{t_0 S}{4\pi T}}$	7.80x10 <sup>8</sup>	1.28x10 <sup>9</sup>		HD1( $\tau$ )=1  HD2( $\tau$ )=2
	K <sub>1</sub>		7.23x10 <sup>8</sup>	1.18x10 <sup>9</sup>		
	N <sub>2</sub>		3.83x10 <sup>8</sup>	6.26x10 <sup>8</sup>		
	M <sub>2</sub>		3.75x10 <sup>8</sup>	6.14x10 <sup>8</sup>		
	S <sub>2</sub>		3.63x10 <sup>8</sup>	5.93x10 <sup>8</sup>		
	O <sub>1</sub> (T <sub>E</sub> =0.52/0.29)	Tidal efficiency = $\exp\left(-x \sqrt{\frac{\pi S}{t_0 T}}\right)$	1.84x10 <sup>5</sup>	3.33x10 <sup>5</sup>		exception
	K <sub>1</sub> (T <sub>E</sub> =0.50/0.27)		1.80x10 <sup>5</sup>	3.24x10 <sup>5</sup>		
	N <sub>2</sub> (T <sub>E</sub> =0.43/0.19)		2.27x10 <sup>5</sup>	3.88x10 <sup>5</sup>		
	M <sub>2</sub> (T <sub>E</sub> =0.42/0.19)		2.16x10 <sup>5</sup>	3.87x10 <sup>5</sup>		
	S <sub>2</sub> (T <sub>E</sub> =9.92/4.42)		3.28x10 <sup>4</sup>	5.11x10 <sup>5</sup>		
③ Ocean tide	O <sub>1</sub> attenuation	$D_{amp,j} = \frac{x^2 \pi}{t_0 (\ln A_j)^2}$	1.84x10 <sup>5</sup>	3.33x10 <sup>5</sup>		exception
	K <sub>1</sub> attenuation		1.80x10 <sup>5</sup>	3.24x10 <sup>5</sup>		
	N <sub>2</sub> attenuation		2.27x10 <sup>5</sup>	3.88x10 <sup>5</sup>		
	M <sub>2</sub> attenuation		2.16x10 <sup>5</sup>	3.87x10 <sup>5</sup>		
	S <sub>2</sub> attenuation		3.28x10 <sup>4</sup>	5.11x10 <sup>5</sup>		
	O <sub>1</sub> phase lag	$D_{pha,j} = \frac{x^2 \pi}{t_0 \Phi_j^2}$	2.99x10 <sup>5</sup>	5.30x10 <sup>5</sup>		exception
	K <sub>1</sub> phase lag		3.71x10 <sup>5</sup>	7.16x10 <sup>5</sup>		
	N <sub>2</sub> phase lag		4.41x10 <sup>5</sup>	6.95x10 <sup>5</sup>		
	M <sub>2</sub> phase lag		3.99x10 <sup>5</sup>	6.60x10 <sup>5</sup>		
	S <sub>2</sub> phase lag		2.92x10 <sup>4</sup>	1.02x10 <sup>5</sup>		

※ <sup>1)</sup> Assumed Q = 2,000 m<sup>3</sup>/d, S<sub>w</sub> = 1 m

대해서 한동1의 경우 3.63×10<sup>8</sup>~7.80×10<sup>8</sup> m<sup>2</sup>/d, 한동2의 경우 5.93×10<sup>8</sup>~1.28×10<sup>9</sup> m<sup>2</sup>/d로 나타나고 있는데, 이는 한동2에서의 시간지연이 한동1에 비해 1시간 차이를 보이는 반면에 해안으로부터의 거리는 한동1에 비해 2.56배나 크기 때문인 것으로 보인다. 그러나 제주도의 경우 해안대수층이지만 지역별 수문지질특성으로 인해 조석의 영향이 상대적으로 많이 다르므로 주의를 기울일 필요가 있다.

셋째로 해양조석법에서 기초력 분조에 대한 조화상수(진폭, 위상)값을 이용하여 수리특성을 산출한 결과, 4개 대표 분조별 진폭감쇠비(A, 조위 진폭에 대한 지하수위 진폭비)를 적용할 경우 수리확산계수는 한

동1의 경우 1.8×10<sup>5</sup>~2.27×10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>/d, 한동2의 경우 3.24×10<sup>5</sup>~3.88×10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>/d 범위를 보였다(S<sub>2</sub>분조에 따른 수리확산계수는 제외함). 여기서 진폭감쇠에 의한 수리확산계수와 조석효율에 의한 수리확산계수가 동일한 것은 조석효율 산정시 동일한 방법(각 분조별 조위 진폭에 대한 지하수위 진폭)을 적용하였기 때문이다.

또한 위상차( $\Phi$ )에 의한 수리확산계수 산정 결과 한동1의 경우 2.99×10<sup>5</sup>~4.41×10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>/d, 한동2의 경우 5.3×10<sup>5</sup>~7.16×10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>/d 범위를 보였으며, 조석효율 및 진폭감쇠에 의해 산정된 수리확산계수보다는 다소 높게 나타났다. 위상 차이에 의한 수리특성 분석방법은 여러 가지 원인에 따라 달라질 수 있는데, 이는 어



느 한 지점에서 시간에 따른 강우빈도 및 강우강도와 기조력(만조/간조)간의 시간차에 따라 위상차이가 수시로 변동될 수 있기 때문이다.

결과적으로 비양수량법과 조석반응법(tidal response) 혹은 비양수량법과 해양조석법간의 비교는 지극히 어려운 부분이며, 조석반응법에서의 시간지연에 따른 수리확산계수는 전반적으로 다른 분석방법에 의해 산출된 수리확산계수보다 높게 나타났다. 또한, 조석효율을 이용한 수리확산계수나 해양조석법(진폭감쇠비, 위상차)에 의해 산출된 수리확산계수는 대체적으로  $10^5$ 의 값으로 나타났다.

4.2. 합성파 및 순수 지하수위 생성

Table 1의 분조별 조화상수를 모두 이용하여 조석의 영향만을 반영한 합성파를 생성하였고, 원시자료에서 합성파를 제거함으로써 상대적으로 순수한 지하수위를 추출하였다(Fig. 6).

Fig. 6(a)는 지하수위 추세(trend)의 영향을 줄이고 고유의 수위자료를 확보하기 위해 원시자료에서 연구 기간 평균값을 제거한 수위 그래프이다. Fig. 6(b)는 Table 1의 조화상수를 선형결합하여 생성한 합성파로써, 천체(태양, 달, 지구)의 운동에 기인한 기조력의 성분(조석 영향)만을 반영하고 있다. Fig. 6(c)는 원시 수위자료에서 합성파를 제거함으로써 조석의 영향을 상

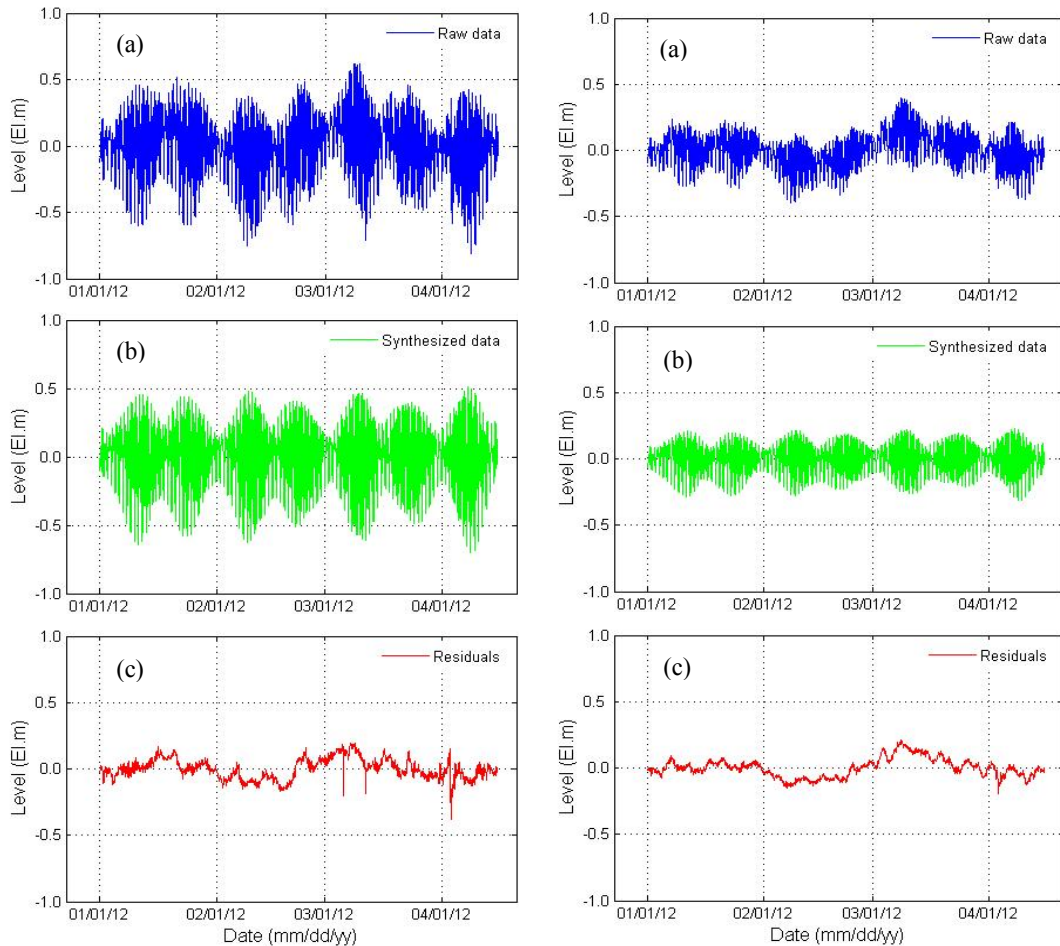


Fig. 6. (a) raw level removed mean, (b) synthesized wave, (c) residual(net level) (left : HD1, right : HD2).

Table 3. Statistics for raw, synthesized and net level

Region	Statistics	Raw level (m)	Raw level removed mean (m)	Synthesized wave (m)	Net level (m)
HD1	max	1.69	0.62	0.51	0.20
	min	0.19	-0.81	-0.70	-0.38
	diff.	1.50	1.43	1.21	0.58
	mean	1.07	0.00	0.00	0.00
	STD	0.25	0.25	0.24	0.08
HD2	max	1.82	0.40	0.23	0.21
	min	1.02	-0.40	-0.31	-0.20
	diff.	0.80	0.80	0.54	0.41
	mean	1.42	0.00	0.00	0.00
	STD	0.13	0.13	0.11	0.07

당부분 제거한 순수한 지하수위이다. 이때의 지하수위는 주변 환경영향에 대한 정보를 모두 내포하고 있는 것으로 볼 수 있다.

Table 3에서 통계량을 살펴보면, 평균값을 제거한 원시 수위에서 합성파를 제거했을 시 잔차인 순수한 지하수위 변동 값이 상당히 작게 나타나는 것을 알 수 있는데, 이는 강수량 등 주변 환경의 영향이 조석의 영향보다 상당히 작다는 것을 의미한다.

이러한 점을 고려했을 때 본 연구에서의 순수한 지하수위 추출방법은 매우 효과적이고 향후 해안지역의 수리·수문특성 분석에 매우 유용하리라 판단된다.

#### 4.3. 잔차 회귀분석 및 기초력을 통한 지하수위 예측

Xun 등(2006)는 주기항목(periodic term)과 선형항목(linear term)으로 구성된 수학적 모델을 조위와 지하수위 변동을 설명하는데 사용한 바 있다. 즉 해안대 수층에서 조위에 의해 유도된 지하수위를 개략적으로 푸리에 급수(Fourier's series)와 선형함수의 합으로 설명하였다.

본 연구에서는 해양 조위를 예측하기 위해 작성된 T\_PREDIC 서브루틴을 응용하여 일차적으로 지하수위(주기항목,  $Z(t)$ )를 예측하였으며, 또한 보다 정밀도를 높이고자 잔차들에 대한 회귀방정식을 통해 도출된 값을 정규화(normalization)함으로써 나타난 값( $N(t)$ )를 가감하는 방식을 통해 식(5)와 같이 최종적인 지하수위를 예측하였다.

$$P(t) = Z(t) \pm N(t) \quad (5)$$

여기서  $t$ 는 시간(time),  $P(t)$ 는 예측 지하수위(predicted groundwater level),  $Z(t)$ 는 푸리에 급수로 나타낸 기초량,  $N(t)$ 는 잔차에 대한 회귀방정식을 통해 산출된 결과를 평균값으로 정규화하여 나온 결과치이다.

만약 시계열  $Z(t)$ 가  $p$ 개의 조화파로 구성되어 있다면  $Z(t)$ 는 식(6)과 같이 유한 푸리에 급수로 설명될 수 있다(Xun 등, 2006).

$$Z(t) = a_0 + \sum_{p=1}^m a_p \cos 2\pi f_p t + \sum_{p=1}^m b_p \sin 2\pi f_p t \quad (6)$$

여기서  $f_p$ 는 각 분조별 주파수,  $m$ 는 기초력 분조수,  $a_0$ ,  $a_p$ ,  $b_p$ 는 푸리에 계수이다.

본 연구지역인 한동1, 2 관측정에서의 잔차에 대하여 회귀분석을 수행한 결과, 각각 식(7) 및 식(8)과 같이 산정되었다(Fig. 7).

$$R_{resid\_HD1}(t) = (3 \times 10^{-9})t^5 - 0.0006t^4 + 47.168t^3 - (2 \times 10^6)t^2 + (4 \times 10^{10})t - (3 \times 10^{14}) \quad (7)$$

$$R_{resid\_HD2}(t) = (2 \times 10^{-9})t^5 - 0.0005t^4 + 40.707t^3 - (2 \times 10^6)t^2 + (3 \times 10^{10}) - (3 \times 10^{14}) \quad (8)$$

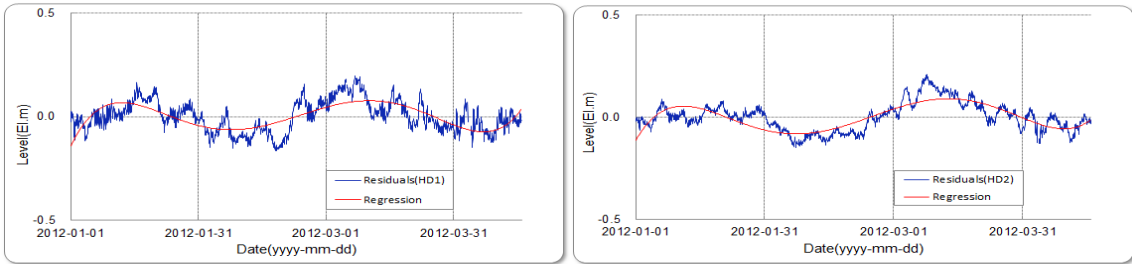


Fig. 7. Regression analysis of residuals at HD1(left) and HD2(right).

회귀분석은 5차함수로 최적화(curve fitting)를 하였고, 약 1개월(2012.4.16~5.15)간의 예측기간을 설정하여 산출한 정규화된 값( $N(t) = 1 - \frac{R_{resid}(t)}{R_{resid}(t)}$ )을 기조력(Z(t))에 더해줌으로써 지하수위 예측에 대한 정밀도를 높이고자 하였다(Fig. 8).

5. 결론

제주도 한동1, 2 해수침투관측정의 지하수위 및 성산포 조위관측소의 조위 자료를 이용하였으며, 두 자료간의 시간지연을 파악하고자 교차상관분석을 실시한 결과 시간지연은 각각 1시간, 2시간인 것으로 나타났다.

기조력 분조 및 분조별 조화상수를 추출하기 위해 T\_TIDE 서브루틴을 활용한 결과, 38개의 분조 정보를 얻을 수 있었고 그중에서 95% 신뢰구간 이상(S/N ≥ 1.0)인 분조는 22~24개에 해당되었다. 38개의 분조별 조화상수를 이용하여 합성파(기조력)를 생성하

고, 원시자료에서 조석의 영향인 합성파를 제거한 순수한 지하수위 추출방법은 매우 효과적이고 향후 해안지역의 수리특성 분석에 유용할 것으로 사료된다.

시간지연에 따른 수리확산계수(T/S)를 산정한 결과 한동1의 경우  $3.63 \times 10^8 \sim 7.8 \times 10^8 \text{ m}^2/\text{d}$ , 한동2의 경우  $5.93 \times 10^8 \sim 1.28 \times 10^9 \text{ m}^2/\text{d}$ 로 나타나고 있는데, 이는 두 지점간 시간지연 차이보다는 거리 차에 의해서 더 영향을 많이 받기 때문이다.

조석효율에 따른 수리확산계수는 여러 가지 조석효율 산정방법에 따라 달라질 수 있으며, 본 연구에서는 각 분조의 진폭비로 조석효율을 산정하였으며 이는 해양조석법의 진폭감쇠에 의한 수리확산계수 산정방법과 동일시된다. 따라서 한동1의 경우  $1.8 \times 10^5 \sim 2.27 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{d}$ , 한동2의 경우  $3.24 \times 10^5 \sim 3.88 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{d}$  범위로 나타났다.

위상차에 의한 수리확산계수는 한동1의 경우  $2.99 \times 10^5 \sim 4.41 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{d}$ , 한동2의 경우  $5.3 \times 10^5 \sim 7.16 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{d}$  범위를 보였으며, 조석효율 및 진폭감쇠에 의해 산정된 수리확산계수보다는 다소 크게 나타났다.

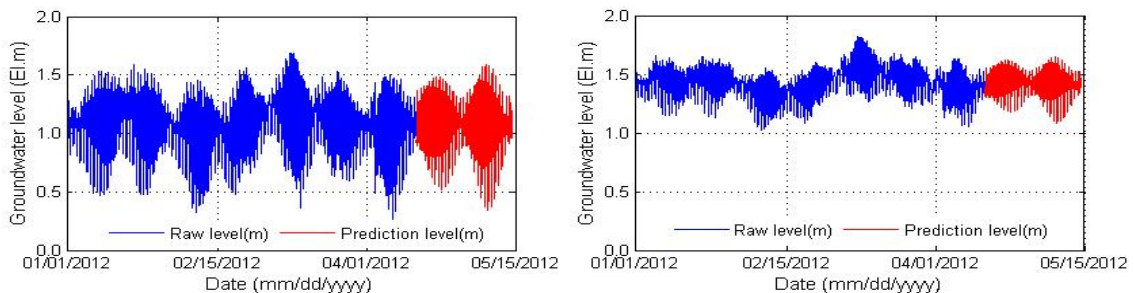


Fig. 8. Raw and prediction level(m) at HD1(left) and HD2(right).

본 연구에서의 지하수위 예측은 주변 환경에 의한 영향보다 조석의 영향을 더 크게 받고 있는 해안대수층에 적용하는 것이 보다 효율적이며, 이러한 예측을 통해 해수침투가 발생하는 지역 혹은 예상되는 지역에서 농작물 염해방지를 위한 염수의 유입 시간 혹은 수위변동에 따른 염수 유입량, 수질 등의 개략적인 정보를 지하수 관리자, 농어민 혹은 관계자에게 제공해 줄 수 있다. 따라서 향후 지하수위 예측에 대한 보다 세밀한 분석을 통해 정밀도를 높일 경우, 신뢰성 높은 지하수위 예측모델을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업 “제주 수자원 연구단(10지역기술혁신B02)”의 지원으로 수행되었으며, 본 연구에 많은 도움을 주신 국립해양조사원 및 제주특별자치도수자원본부 관계자분들께 감사드립니다.

### 참고 문헌

- Choi, B. S., 1999, Determination of aquifer characteristics from specific capacity data of wells in Cheju Island, *J. Groundwater Env.*, 6(4), 180-187.
- Erskine, A. D., 1991, The effect of tidal fluctuation on a coastal aquifer in the U.K., *Ground Water*, 29(4), 556-562.
- Ferris, J. G., 1951, Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissivity, *Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, 33, 148-155.
- Hamm, S. Y., Cheong, J. Y., Jang, S., Jung, C. Y., Kim, B. S., 2005, Relationship between transmissivity and specific capacity in the volcanic aquifers of Jeju Island, Korea, *J. Hydrol.*, 310, 111-121.
- Hsieh, P. A., Bredehoeft, J. D., Farr, J. M., 1987, Determination of aquifer transmissivity from Earth Tide analysis, *Water Res. Res.*, 23(10), 1824-1832.
- Jacob, C. E., 1950, Flow of groundwater, In *Engineering Hydraulics*, ed. H. Rouse. Hoboken, New Jersey, John Wiley, 321-386.
- Jha, M. K., Kamii, Y., Chikamori, K., 2003, On the estimation of phreatic aquifer parameters by the tidal response technique, *Water Res. Manage.*, 17, 69-88.
- Jiao, J. J., Tang, Z., 1999, An analytical solution of groundwater response to tidal fluctuation in a leaky confined layer, *Water Res. Res.*, 35(3), 747-751.
- Kim, K. Y., Shim, B. O., Park, K. H., Kim, T. H., Seong, H. J., Park, Y. S., Koh, G. W., Woo, N. C., 2005, Analysis of hydraulic gradient at coastal aquifers in eastern part of Jeju Island, *Econ. Env.*, 38(1), 79-89.
- Lee, B. J., Koo, M. H., Park, Y. S., Koh, G. W., Park, K. H., 2006, Hydraulic diffusivity and possibility of conduit-flow of groundwater in eastern part of Jeju island, *J. Geol. Soc. Korea*, 42(3), 439-454.
- Millham, N. P., Howes, B. L. 1995, A comparison of methods to determine K in a shallow coastal aquifer, *Ground Water*, 33, 49-57.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S., 2002, Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_Tide, *Comp. Geos.*, 28, 927-937.
- Rotzoll K., 2007, Hydraulic parameter estimation using aquifer test, specific capacity, ocean tide and wave setup for Hawaii aquifers, Ph. D. Dissertation, Hawaii University, Hawaii, USA.
- Serfes, M. E., 1991, Determining the mean hydraulic gradient of ground water affected by tidal fluctuations, *Ground water*, 29(4), 549-555.
- Shim, B. Y., Chung, S. Y., 2004, Hydrogeological parameter estimation by using tidal method in a fractured rock-aquifer, *J. Soil and Groundwater Env.*, 9(3), 27-32.
- Smith, S. W., 1997, *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*, California technical publishing, San Diego, California, 98p.
- Townley, L. R., 1995, The response of aquifers to periodic forcing, *Adv. Water Res.*, 18(3), 125-146.
- Werner, P. W., Noren, D., 1951, Progressive waves in non-artesian aquifer, *Ame. Geophys. Union Trans.*, 32(2), 238-244.
- Xun, Z., Chuanxia, R., Yanyan, Y., Bin, F., Yecheng, O., 2006, Tidal effects of groundwater levels in the coastal aquifers near Beihai, China, *Environ. Geol.*, 51, 517-525.