

## 전남 무안 해안 대수층에서의 지하수위 예측을 위한 자기교차회귀모형 구축

김현정 · 여인욱\*

전남대학교 지구환경과학부

### Development of the Autoregressive and Cross-Regressive Model for Groundwater Level Prediction at Muan Coastal Aquifer in Korea

Hyun Jung Kim · In Wook Yeo\*

Department of Earth and Environmental Sciences, Chonnam National University

#### ABSTRACT

Coastal aquifer in Muan, Jeonnam, has experienced heavy seawater intrusion caused by the extraction of a substantial amount of groundwater for the agricultural purpose throughout the year. It was observed that groundwater level dropped below sea level due to heavy pumping during a dry season, which could accelerate seawater intrusion. Therefore, water level needs to be monitored and managed to prevent further seawater intrusion. The purpose of this study is to develop the autoregressive-cross-regressive (ARCR) models that can predict the present or future groundwater level using its own previous values and pumping events. The ARCR model with pumping and water level data of the proceeding five hours (i.e., the model order of five) predicted groundwater level better than that of the model orders of ten and twenty. This was contrary to expectation that higher orders do increase the coefficient of determination ( $R^2$ ) as a measure of the model's goodness. It was found that the ARCR model with order five was found to make a good prediction of next 48 hour groundwater levels after the start of pumping with  $R^2$  higher than 0.9.

**Key words :** Groundwater level prediction, Multivariate time series model, Autoregressive-cross-regressive model, Seawater intrusion, Coastal aquifer

#### 1. 서 론

제주도를 비롯한 서·남해의 연안 및 도서지역에서의 가장 큰 지하수 장애 요인은 해수침투이다. 해수침투는 지하수와 해수의 밀도 차에 의해 발생하기 때문에 지하수위의 변화는 해수침투와 밀접하게 관련된다. 연안지역에서의 지하수위의 변화는 조석, 강수, 양수에 의해 유발되며, 이 중 양수가 가장 큰 영향을 미칠 수 있다. 해수침투를 방지하기 위해서 양수정의 위치변경 또는 양수량을 감소시키는 방법, 인공주입을 통해 수위를 높여주는 방법, 해수침투 방지벽을 만들어 해수의 유입을 방지하고 담수유출을 차단하는 방법 등이 있다(Ministry of Agriculture and Forestry, 2005). 이 방법들 중에서도 해수침투의 진행을 막기 위해서는 양수량의 조절이 가장 필수적이다

(Abarca et al., 2006).

연구지역인 전라남도 무안은 지하수 관정개발밀도가 높고 사계절 발농사를 짓는 지역적인 특성으로 인해 많은 양수가 이뤄지고 있는 대표적인 지역이다. 이러한 대수층의 무분별한 개발과 지하수의 과다사용으로 인해 지속적으로 해수침투가 진행되고 있다(Korea Rural Community Corporation, 2005). 본 연구지역의 지하수 관정을 대상으로 2006년 3월부터 2007년 8월까지 지하수위를 모니터링한 결과, 양수에 의해 지하수위가 빈번하게 변하며 그 변화량은 조석이나 강수에 의한 요인보다 큰 것으로 나타났다(Park et al., 2012). 더욱이 갈수기에는 지하수위가 해수면이하로 내려가기도 한다. 따라서 해수침투로 인한 지하수 오염을 방지하기 위해 양수에 의한 지하수위 변동을 모니터링하고 관리할 필요가 있다.

\*Corresponding author : iwyeo@chonnam.ac.kr

Received : 2014. 3. 17 Reviewed : 2014. 6. 23 Accepted : 2014. 6. 23

Discussion until : 2014. 10. 31

양수에 따른 지하수위 변화는 해석적인 방법, 수치모델링 방법, 또는 시계열모델링을 통해 예측될 수 있다. 대수층 수리시험을 통해 얻어진 수리적 매개변수가 필요한 해석적인 방법이나 수치모델링 방법과 달리, 시계열 모델링은 지하수위 자체가 대수층의 복잡한 수리적 특성을 이미 반영하여 나타난 결과이기 때문에, 대수층의 수리적 매개변수에 대한 정보 없이 과거 지하수위에 대한 시계열 자료를 통계적, 수학적으로 분석하여 지하수위를 예측할 수 있는 유용한 방법이다(Knotters and Van Walsum, 1997). 따라서 시계열모델링은 대수층 시험이 용이하지 않거나 곤란한 경우에 특히 효율적일 수 있다. 시계열모형은 다른 시계열자료 없이 단일 시계열 자료(예, 지하수위)만을 이용하여 예측하는 자기회귀(auto-regressive)모형, 이동평균모형, 자기회귀이동평균(auto-regressive moving average)모형, 자기회귀이동평균(auto-regressive integrated moving average)모형과 다른 시계열자료(예, 강수)와 같은 변수를 입력변수로 사용하는 전이함수잡음(transfer function-noise)모형과 자기교차회귀(auto-regressive and cross-regressive model) 등이 있다(Box and Jenkins, 1976; Salas et al., 1982; Bierkens et al., 1999; Yi and Lee, 2004).

본 연구에서는 해수침투로 인한 지하수의 장애가 발생하고 있는 무안 연안대수층에서 회귀분석(regression analysis)을 이용하여 양수에 따른 지하수위 변동을 예측하고자 하였다. 회귀분석은 어떤 현상이 변수들의 인과관계에 의하여 나타날 때 그 관계를 수학적으로 설명하기 위하여 사용되는 통계적 방법 중 하나이다(Yeom, 2005). 변수들의 관측된 값을 이용하여 모형을 추정한 다음 추정된 모형에 의해 변수들 간의 관계를 설명하거나 예측할 수 있어(Kim and Kang, 2010), 홍수 예측, 강의 수위, 지하수위를 예측하는데 이용되고 있다(Knotters and Walsum, 1997; Kim and An, 2011; Choi et al., 2012).

회귀분석모형은 자기회귀, 자기교차회귀모형으로 나눌 수 있다(Kresic, 1997). 자기교차회귀모형은 향후 편의상 ARCR모형으로 표기하였다. 모형의 결정은 자기상관 또는 교차상관성분석을 통해 결정할 수 있다. 자기상관은 지하수위 자신, 교차상관성분석은 지하수위와 강수, 전기전도도, 하천수위, 조석과 같은 다른 영향 요인들 간의 연관성을 밝히는데 주로 사용된다(Wittenberg, 1999; Lee and Lee, 2002; Kim et al., 2005; Ha et al., 2006; Choi et al., 2011). 예측하고자 하는 자료의 자기상관성이 좋은 경우 자기 자료만을 가지고 예측 가능하기 때문에 자기회귀모형이 적합하며, 예측하고자하는 자료가 다른 요인에 의해 변동을 받는다면 ARCR모형이 더 적합하다.

지하수위 시계열자료만을 이용하는 자기회귀모형을 본 연구에서 수행하였으나, 양수와 같은 이벤트성 자료에 영향을 받는 지하수위 예측에 적합하지 않은 것으로 나타났다. 결과가 예측이 되고 또한 지면 관계 상 본 논문에서는 자기회귀모형 결과를 포함시키지 않았다. Park(2008)과 Park et al.(2012)은 강수, 조석, 양수와 지하수위에 대한 교차상관을 분석하여 해수침투에 미치는 영향요인을 연구하였다. 이 연구결과에 따르면, 양수에 의한 지하수위 하강이 해수침투의 직접적인 원인인 것으로 나타났다. 반면 연구 관정이 연안으로부터 약 200 m 떨어져 있어 조석에 의한 영향은 미미한 것으로 나타났다. 연구 관정의 지하수위 변동을 예측하기 위해서는 지하수위뿐만이 아니라 양수나 강수와 같은 이벤트성 요인을 독립변수로 고려하는 ARCR모형 또는 양수와 강수를 모두 고려하는 중회귀모형(multiple regression analysis)이 적합할 것으로 판단된다. 또한 이 지역은 갈수기 때 이른 아침부터 저녁까지 지하수를 양수하는 농업 특성으로 인해 양수에 따른 지하수위 변동을 예측하기 위해서는 이전 몇 시간(즉, 차수)전의 지하수위와 양수 자료가 입력 값으로 필요한지 최적의 차수를 결정할 필요가 있다. 따라서 무안 연안 지역의 양수 패턴과 지하수변동 특성을 반영한 최적의 차수를 결정하여 이 지역에 적합한 시계열모형을 구축하고자 하였다.

## 2. 연구지역

본 연구지역은 전라남도 무안군 운남면 해안가 연안 일대로 선착장으로부터 약 200 m 떨어진 곳에 위치한다. 연구 관정은 해안으로부터 동쪽으로 950 m, 서쪽으로 780 m, 남쪽으로 200 m 떨어져 있으며 농업용으로 사용되는 양수정과 관측정은 밭에 위치한다(Fig. 1). 연구관정을 대상으로 실시한 대수성시험에서 수리전도도는  $1.77 \times 10^{-5}$  m/s로 산출되었다(Park et al., 2012). 또한 이 지역은 연구 관정 외에 다수의 지하수 관정들이 개발되어 있고, 사계절에 걸쳐 작물을 재배하고 있기 때문에 우기를 제외하고 지하수 사용이 지속적으로 이뤄지고 있다. 지하수의 전기전도도는 염분의 농도와 비례하기 때문에 해수침투의 지표로서 흔히 사용된다(Park et al., 2012). 농업용수의 전기전도도 값이 2 mS/cm 미만이면 모든 생물이 생육이 가능하나, 그 이상에서는 염분에 민감한 작물은 생육이 불량하다(Korea Rural Community Corporation, 2005). 연구지역의 관측정 OW2에서 측정한 심도별 전기전도도 결과에 의하면, 2 mS/cm를 초과하지 않는 지하수의 깊이는 2006년 11월에 약 37 m인 반면 2011년 11월에는 10 m

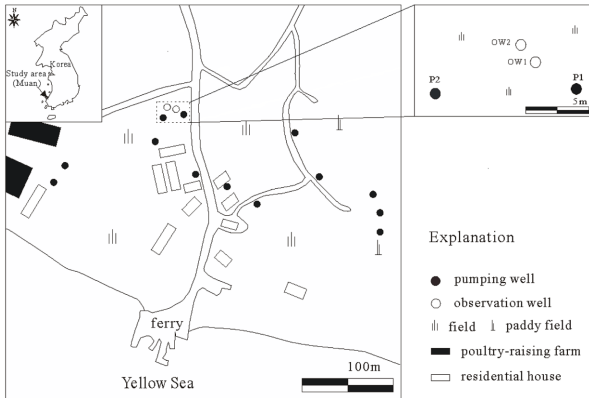


Fig. 1. Well configuration at the study area in Muan. OW1 and OW2 were used for groundwater level measurement, and pumping wells, P1 and P2, were used for agricultural purpose.

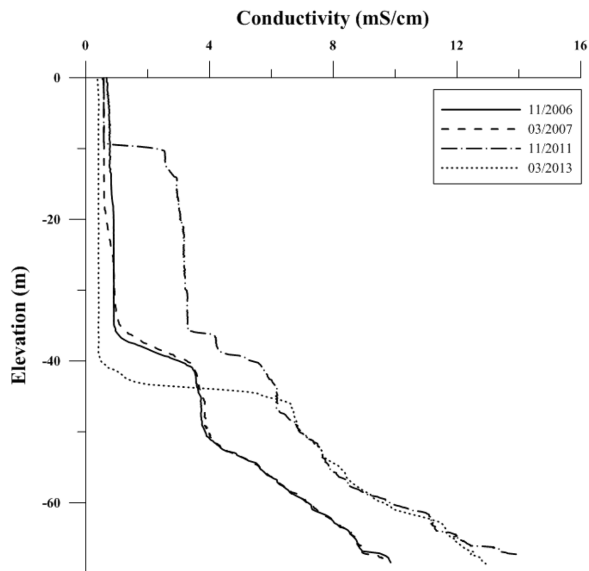


Fig. 2. Vertical profiles of EC (electrical conductivity) measured at OW2.

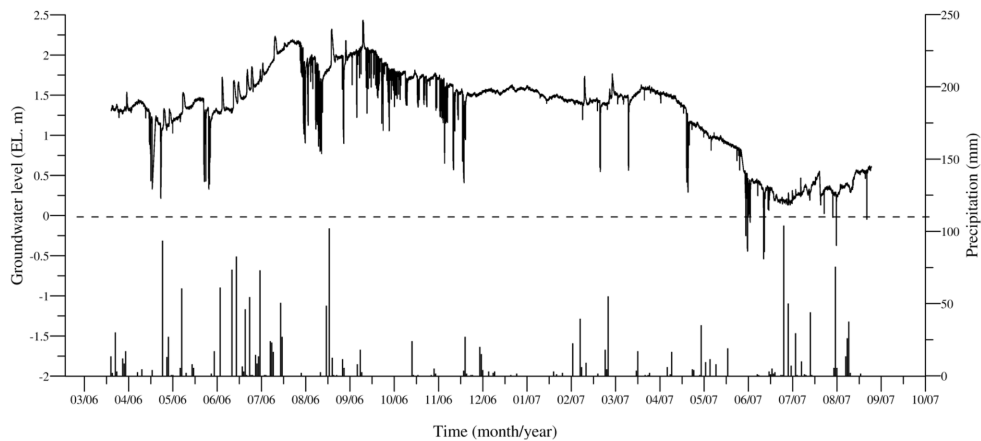


Fig. 3. Groundwater level measured at OW2 and precipitation from March 2006 to August 2007 (Park et al., 2012).

로 크게 감소한 것으로 나타났다(Fig. 2). 이는 2010년 1335 mm의 연강수량에 비해 2011년 연강수량이 982 mm로서 크게 감소하여 지하수 사용량이 증가했기 때문인 것으로 판단된다. 2013년 3월 측정된 심도별 전기전도도는 2006년 11월, 2007년 3월보다 보다 상부지하수층에서는 감소하였으나, EL. -45 m 하부 지하수의 전기전도도는 매우 크게 증가하여 이 지역의 해수침투가 지속적으로 진행되고 있음을 시사한다.

Fig. 3은 2006년 3월부터 2007년 8월까지 한 시간 간격으로 측정된 지하수위 자료로서 이 지역의 지하수위 변화 양상을 보여준다(Park et al., 2012). 풍수기인 5월부터 8월까지 강수에 의해 지속적으로 지하수위가 상승하고, 갈수기인 9월부터 12월까지 부족한 강수로 인해 빈번하게 양수가 이루어져 지하수위가 점진적으로 하강하는 특징을 보인다. Fig. 3에서 약 0.5 m의 순간적인 지하수위 하강은 양수정 P1, P2 중 하나의 양수정에서 양수가 일어난 것을 의미하며, 약 1 m의 지하수위 하강은 양수정 P1과 P2에서 동시에 양수를 실시한 경우이다. 특히 2007년 5월과 6월은 양수로 인해 지하수위가 EL. 0 m 아래로 떨어졌다. 이러한 지하수위 하강 원인은 2006년 12월부터 강수량이 적어 지하수위가 꾸준히 하강한 것과 더불어 용수의 부족으로 인해 이 지역에서 전체적으로 지하수를 많이 사용하였기 때문인 것으로 추정된다. 갈수기 때 지하수위가 많이 하강한 상황에서 한 번의 양수만으로도 지하수위가 해수면 아래로 떨어질 수 있음을 시사한다. 따라서 갈수기 동안 과도한 양수에 의한 지하수위 하강은 가용 대수층의 두께를 감소시키고(Fig. 2의 2011년 11월의 전기전도도 자료 참조), 또한 해수와 담수의 평형상태가 깨짐에 따라 이 지역의 해수침투를 지속적으로 유발시킬 수 있다.

### 3. 시계열 분석 및 모형

#### 3.1. ARCR모형

ARCR모형은 자기회귀모형과 교차회귀모형이 합쳐진 형태이다. 예측하고자 하는 시간  $t$ 에서의 지하수위  $h_t$ 를 구하기 위해 자기 자신의 과거 값뿐만 아니라, 이벤트성 요소인 양수자료까지 고려된 모형이다. 모형의 식을 일반적인 차수  $p, q$ 로 나타내면 식 (1)과 같다(Kresic, 1997).

$$h_t = a + b_1h_{t-1} + b_2h_{t-2} + \dots + b_ph_{t-p} + c_1P_t + c_2P_{t-1} + c_3P_{t-2} + \dots + c_qP_{t-q} + \varepsilon_t \quad (1)$$

여기서  $p, q$ 는 과거의 자료를 몇 개까지 이용하는지를 나타내는 차수이며,  $\varepsilon_t$ 는 측정값과 예측값의 오류(잔차),  $a$ 는 상수항,  $b_i$ 와  $c_i$ 는 회귀계수로 모형의 변수이며,  $P$ 는 양수량을 나타낸다. 본 연구지역은 약 67.7 m<sup>3</sup>/day로 일정한 양으로 양수가 이루어지기 때문에, 양수가 이루어질 때는 1, 양수가 없을 때는 0으로 시계열자료를 형성하였다. 이와 같은 식을 이용하여 과거 지하수위와 양수의 시계열 자료를 이용하여 계수를 추정한 다음, 양수에 의한 지하수위를 예측할 수 있다.

#### 3.2. 중회귀모형

연구지역의 지하수위는 양수뿐만 아니라 강수에 의해서도 변한다. 위의 ARCR모형은 하나의 독립변수로 구성되기 때문에, 단일 이벤트성 요인에 의해서 결정되는 현상이 아닌 경우에는 ARCR모형으로 정확한 분석과 예측이 어려울 수 있다. 두 개 이상의 이벤트가 영향을 끼치는 경우, 독립변수를 두 개 이상 적용시키는 중회귀분석을 이용하여 예측오차를 줄일 수 있고, 각각의 독립변수를 독립적으로 적용하여 예측할 수 있다(Kim and Kang, 2008).

본 연구에서는 지하수위를 종속변수로 하는 자기회귀모형과 양수와 강수의 독립변수로 이루어진 교차회귀모형을 합한 중회귀모형을 구축하였다. 두 개의 독립변수가 적용된 시계열모형이기 때문에, 본 논문에서는 편의상 ARCR모형과 다르게 ARCRCR모형으로 표기하였다.  $h_t$ 를 예측하는데 있어서  $h_{t-1}$  등과 같은 과거의 지하수위뿐만 아니라 이벤트성 요소인 강수와 양수를 반영하는 ARCRCR ( $p, q, r$ )의 일반식은 다음과 같다.

$$h_t = a + b_1h_{t-1} + b_2h_{t-2} + \dots + b_ph_{t-p} + c_1P_t + c_2P_{t-1} + c_3P_{t-2} + \dots + c_qP_{t-q} + d_1R_t + d_2R_{t-1} + d_3R_{t-2} + \dots + d_rR_{t-r} + \varepsilon_t \quad (2)$$

여기서  $p, q, r$ 은 각각 변수에 대한 차수를 의미하며,  $d_i$

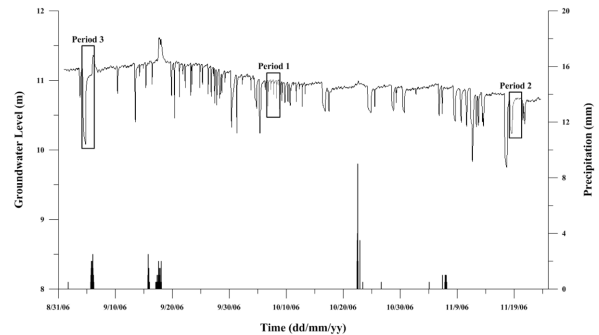


Fig. 4. Prediction periods selected for testing the regressive model to predict groundwater level subject to pumping.

는 회귀계수,  $R$ 은 강수량을 나타낸다.

결정계수(coefficient of determination,  $R^2$ )를 사용하여 ARCR과 ARCRCR모형의 적합성과 최적의 차수를 결정하였다. 결정계수란 표본으로부터 구축된 회귀모형이 얼마나 적합한가를 나타내는 척도가 된다(Yeom, 2005). 결정계수의 값이 1에 가까울수록 선정한 독립변수의 설명력이 크고 추정된 회귀모형의 적합도가 높은 것으로 평가할 수 있으며, 반대로 0에 가까워질수록 설명력이 약화되어 모형의 적합도는 떨어지게 된다(Davis, 1986; Kim and Kang, 2008).

#### 3.3. 모형검증을 위한 예측기간 선정

양수에 의한 지하수위 하강이 해수침투의 직접적인 원인이기 때문에, 양수의 가동시간과 강도의 차이가 나는 세 개의 구간을 선정하여 모형을 검증하고자 하였다.

먼저 예측기간 1은 2006년 10월 7일 17시부터 48시간 후인 10월 9일 16시까지로서, 이 기간은 아침과 저녁으로 2~3시간의 단기양수 패턴을 보이는 구간이다(Fig. 4). 10월 6일 5시부터 3시간, 10월 7일 5시부터 2시간 동안 양수가 이루어졌다. 2006년 4월 1일 0시부터 2006년 10월 7일 16시까지의 지하수위와 양수자료를 이용하여 ARCR과 ARCRCR모형을 구축하였다. 모든 자료는 1시간 간격으로 측정된 자료를 사용하였다. 차수는 5, 10, 20으로 변화시키며 각 차수에 대한 모형을 구축하였다.

예측기간 2는 11월 18일 7시부터 20일 6시까지로서, 예측기간 1과 달리 예측기간 동안 단 한 번의 양수 이벤트가 일어났으며 약 10시간 동안 지속되었다. 양수강도는 양수정 P1, P2 중 한 개가 가동된 기간이다(Fig. 4). 예측기간 전 13일부터 17일 7시까지 양수가 없었으며, 하루 전 17일 7시부터 18시까지 두 개의 양수정에서 11시간 동안 양수가 실시되었다. 2006년 4월 1일 0시부터 2006

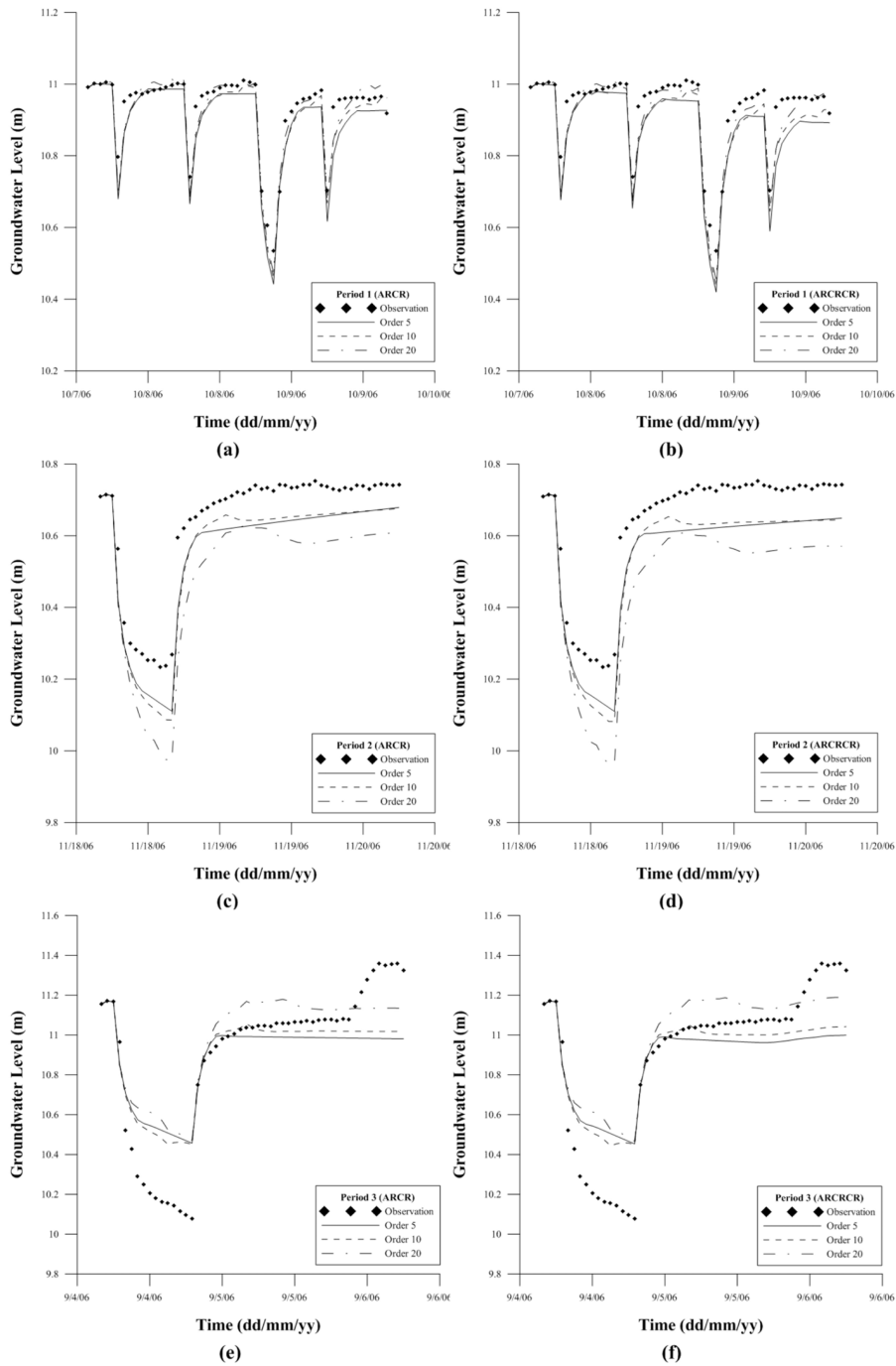


Fig. 5. Comparison of measured groundwater level with predicted level estimated by *ARCR* and *ARCRCR* models: (a) *ARCR* model for period 1, (b) *ARCRCR* model for period 1, (c) *ARCR* model for period 2, (d) *ARCRCR* model for period 2, (e) *ARCR* model for period 3, and (f) *ARCRCR* model for period 3.

년 11월 18일 6시까지의 지하수위자료와 양수자료를 이용하여 차수 5, 10, 20에 대한 *ARCR*과 *ARCRCR*모형을 구축하였다.

예측기간 3은 2006년 9월 4일 7시부터 6월 6시까지로서, 특징적으로 두 양수정의 양수로 인해 약 1 m 이상의

지하수위 하강이 나타난 기간이다(Fig. 4). 양수 종료(9월 4일 19시)된 후 21시간이 경과한 시점에서 강수이벤트(9월 5일 16시)가 발생하였으며, 강수에 의한 지하수위 상승은 그 이후 6시간이 경과한 시점부터 나타나기 시작했다. 예측시작 전날인 9월 3일 16시부터 21시까지 한 개

의 관정에서 양수가 실시되었다. 2006년 4월 1일 0시부터 9월 4일 6시까지의 자료를 이용하여 차수 5, 10, 20에 대한 회귀계수를 결정하여 *ARCRCR*과 *ARCRCR*모형을 구축하였다.

### 4. 결 과

#### 4.1. *ARCRCR*모형

양수의 영향을 반영하는 *ARCRCR*모형의 검증을 위해 양수가 포함된 예측기간 1, 2, 3을 이용하였다. Fig. 5(a)는 예측기간 1에 대한 차수별 예측 지하수위와 실제 지하수위를 도시한 그래프이다. *ARCRCR*모형을 이용하여 예측기간 1의 지하수위를 예측한 결과, 양수 초기에는 예측된 지하수위가 더 크며, 양수 종료 후 지하수위가 회복되는 부분에서는 다소 작게 예측되었다. 전체적으로 실제 지하수위와 예측 지하수위간의 그래프 개형은 유사하게 나타났다. 전체 48시간에 대한 예측 지하수위와 실제 지하수위간의 결정계수는 약 0.9이상을 보였다(Fig. 6a). 차수에 따른 결정계수 값은 유의미한 차이를 보이지 않았다. 이는 예측기간과 그 전에 양수가 2~3시간 이내로 매우 단기간 동안 이루어져 차수에 의한 영향이 최소화되기 때문인 것으로 판단된다. 예측기간 2에 대해서도 차수 5, 10, 20을 이용하여 지하수위를 예측하였다. 실제 지하수위와 예측 지하수위의 그래프의 개형은 비슷하게 보이지만, 차수가 커질수록 예측기간 1과 달리 예측된 수위하강이 실제보다 크게 나타났다(Fig. 5c). 이는 예측기간 2의 하루 전날 11시간 동안 지속된 양수의 영향 때문인 것으로 판단된다. 식 (1)에서 알 수 있듯이, 차수가 커질수록 지하수위를 예측하기 위해서는 더 많은 이전 시간의 자료가 입력 값으로 필요하다. 예를 들어, 차수 20의 경우 어떤 시점의 지하수위를 예측하기 위해서는 그 이전 20시간 동안의 지하수위 자료와 양수자료가 필요하다. 이 지역 갈수기의 양수패턴은 아침부터 저녁까지 약 10~12시간 동안 양수를 실시하고, 밤사이 지하수위가 회복된 후 아침에 다시 양수를 시작하는 패턴이다. 따라서 이 지역의 양수패턴과 대수층의 특성을 고려하면, 차수 20은 적절치 않으며 지하수위 회복에 소요되는 시간에 해당하는 차수 10이하가 오히려 적절한 것으로 판단된다. 예측 지하수위와 실제 지하수위간의 결정계수를 보여주는 Fig. 6(b)에서도 잘 나타난다. 차수가 증가할수록 결정계수 값도 작아져 모형의 적합도가 떨어진다.

예측기간 3에 대해서 예측된 지하수위는 오히려 실제 지하수위 보다 더 작게 예측되었다(Fig. 5e). Fig. 3에서 보

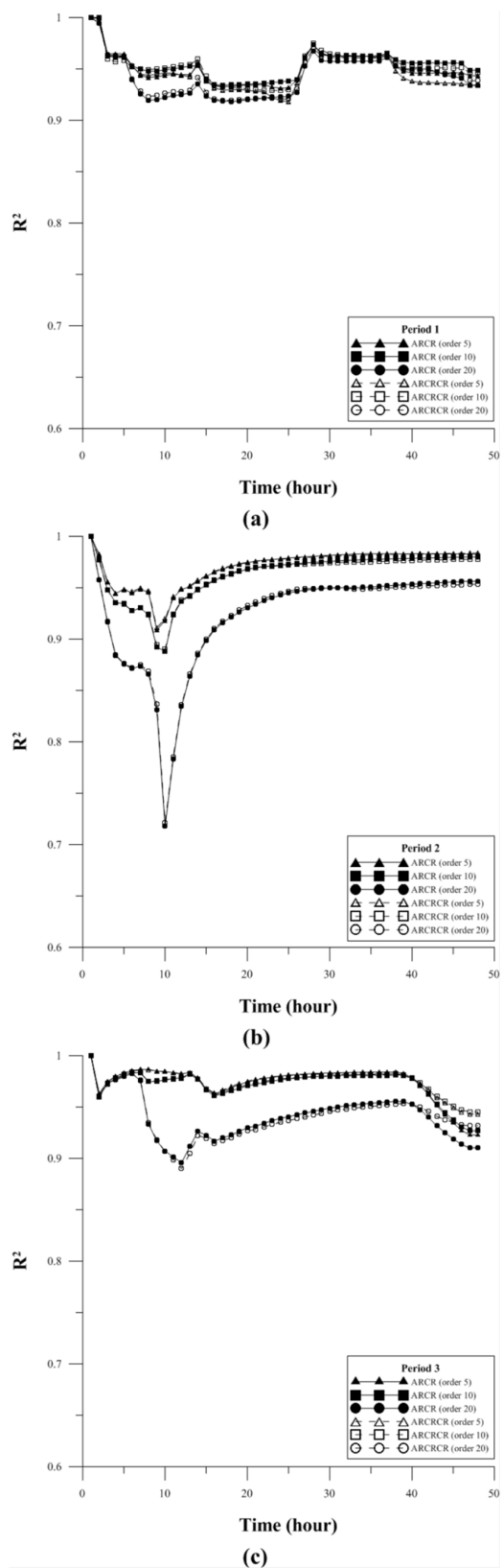


Fig. 6. Fitness of *ARCRCR* and *ARCRCR* models with different orders for (a) period 1, (b) period 2, and (c) period 3.

듯이 지하수위 시계열자료가 한 개의 양수정이 가동될 때와 두 개 모두 가동될 때의 수위 하강을 모두 포함하고 있기 때문에, 그 자료에 근거한 모형의 회귀계수 역시 두 영향의 평균을 반영하는 계수 값을 갖게 된다. 따라서 한 개의 양수정이 가동된 예측기간 2에서는 예측 값이 더 크고, 예측기간 3처럼 두 개의 양수정이 가동된 경우는 오히려 예측 값이 작게 나타나는 특성을 보이는 것으로 판단된다. 반면 차수에 의한 영향은 크지 않았다. 이는 예측기간 3의 전날 양수가 오랫동안 지속되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4.2. ARCR모형

본 연구지역의 지하수위는 양수뿐만 아니라 강수와의 상관성을 보인다(Fig. 3). 이러한 상관성을 반영하기 위하여 양수와 강수가 독립변수로 이용되는 ARCR모형을 구축한 후 그 적용성을 검토하였다. 앞서 기술한바와 같이, 예측기간 1, 2는 강수이벤트가 없고 예측기간 3은 강수이벤트가 있는 구간이다. 따라서 예측기간 1, 2에 대해서는 ARCR과 ARCR모형 간의 큰 유의미한 차이를 보이지 않았다(Fig. 5). 강수이벤트가 포함된 예측기간 3에서 ARCR모형은 예측기간 후반의 강수이벤트에 의한 지하수위 상승을 미미하게 예측하였지만(Fig. 5f), 전체적으로 ARCR모형과 큰 유의미한 차이를 주지 못했다. 이러한 결과는 양수와 강수가 지하수위에 미치는 비중이 서로 다르기 때문이다. 연구지역에서 양수는 지하수위를 약 0.5~1 m 하강시키는 반면, 강수에 의한 지하수위 상승은 상대적으로 작다(Fig. 3). 따라서 이를 반영한 모형의 회귀계수 역시 양수에 의한 지하수위 변동에는 민감한 반면, 강수이벤트에 의한 지하수위 변동은 상대적으로 크기 반영하지 못했다.

#### 4.3. 적합성 평가

무안 연안지역의 수리지질학적 특성과 양수패턴에 대한 ARCR과 ARCR모형의 적합성을 평가하기 위해서 결정계수를 이용하였다. 결정계수는 그 의미가 명확하고 해석이 쉽기 때문에 회귀분석의 적합성을 평가하기 위한 척도들 중에서 가장 많이 사용된다(Kim and Kang, 2010). Fig. 6은 예측 시간에 따른 결정계수의 변화를 나타낸 것이다. 차수 20을 사용하는 예측기간 2의 일부구간을 제외하고, 예측기간 1, 2, 3에 대한 ARCR, ARCR모형의 결정계수의 값이 전체적으로 0.9 이상으로서, 예측 지하수위와 실제 측정된 지하수위가 서로 잘 부합되는 것으로 평가된다. 예측기간 2에서 차수 20을 이용하는 ARCR과

ARCR모형의 결정계수 값이 예측시간 10시간 경과시점에서 0.7까지 떨어져, 예측 지하수위의 신뢰도가 크게 떨어지는 것으로 나타났다.

일반적으로 예측 모형에서 차수가 높을수록 예측의 적합도가 증가할 것이라 예상하지만, 차수가 커질수록 그 이전의 양수이벤트까지 다 고려되므로 오히려 적합도를 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다(Fig. 6). 따라서 시계열 모형의 차수는 해당 지역의 양수패턴을 고려하여 차수를 결정할 필요가 있다. 무안 연안지역 갈수기의 양수패턴은 아침에 양수를 시작해서 저녁에 종료하는 양상을 보이며, 밤사이에 지하수위는 안정화된다. 이러한 양수패턴을 고려했을 때 차수 20의 모형을 이용하여 양수이벤트에 의한 지하수위를 예측하는 경우, 전날 양수이벤트에 의한 영향이 포함될 수 있다. 즉 과거 양수이벤트가 포함되는 차수를 사용하여 수위를 예측하는 경우 실제 지하수위 하강보다 더 큰 수위강하를 예측하는 것으로 나타났다. 본 연구지역인 무안 연안대수층의 경우, 효율적인 예측을 위해서 차수 20의 모형보다는 10이하의 차수를 사용하는 모형이 더 적합할 것으로 판단된다. 또한 결정계수를 사용하여 최적의 모형을 찾을 때는 차수가 증가해도 결정계수의 증가폭이 크지 않은 시점을 선택하는 것이 바람직하다(Kim and Kang, 2010). 따라서 차수가 증가함에 따라 결정계수의 차이가 크지 않고 강수에 의한 영향이 크지 않은 차수 5를 사용하는 ARCR모형이 이 지역에 가장 적합할 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

전남 무안 연안지역의 대수층은 과도한 지하수 양수에 의해 지하수위가 하강하고, 그로인해 해수침투가 지속적으로 진행되고 있다. 따라서 지속가능한 지하수 사용을 위해서는 양수에 의한 지하수위 하강을 관리할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 시계열분석 중 회귀분석을 이용하여 이 지역의 양수패턴과 대수층의 특성을 반영한 지하수위 예측모형을 구축하고, 그 적용가능성을 연구하고자 하였다. 또한 무안연안지역 농촌의 양수패턴을 고려하였을 때 가장 적합한 모형의 차수를 제시하고자 하였다.

지하수위를 종속변수로 양수를 독립변수로 고려하는 ARCR모형과 양수와 강수 모두를 독립변수로 포함하는 ARCR모형을 구축하였다. 양수이벤트의 강도와 시간이 서로 다른 세 개의 예측기간에 대해 ARCR과 ARCR모형의 적합성을 검토하였다. 두 모형은 양수에 의한 지하수위 변동(수위 강하와 회복)을 비교적 잘 예측하였으

며, 차수 20을 사용하는 예측기간 2의 일부구간을 제외하고 예측 지하수위에 대한 결정계수도 0.9이상으로 나타났다. 예측된 지하수위에 있어서 ARCR모형과 ARCR모형 간에 유의미한 차이를 보이지 않았으며, 결정계수의 값 또한 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 본 연구 지역의 지하수위 변동이 강수보다는 양수에 의해 더 크게 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 예측 지하수위는 모형의 차수에 의해 더 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 차수가 커질수록 전날의 양수 이벤트가 포함되기 때문에 실제 지하수위 하강보다 더 크게 예측되는 것으로 나타났다. 갈수기에 매일 아침에 양수를 시작하고 저녁에 종료하는 우리나라 농업 양수 패턴을 고려했을 때, 예측 전날 양수 이벤트에 의한 영향을 받지 않는 차수 5(시간)를 이용하여 구축한 모형이 가장 적합한 것으로 나타났다. 따라서 차수 5의 양수이벤트만을 고려한 ARCR모형이 본 연구지역에 가장 적합할 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.20123040110010).

## References

- Abarca, E., Vázquez-Suñé, E., Carrera, J., Capino B., Gámez, D., and Battle, F., 2006, Optimal design of measures to correct seawater intrusion, *Water Resour. Res.*, **42**(9), W09415. doi: 10.1029/2005WR004524.
- Bierkens, M.E.P., Knotters, M., and van Geer, F.C., 1999, Calibration of transfer function-noise models to sparsely or irregularly observed time series, *Water Resour. Res.*, **35**(6), 1741-1750.
- Box, G.E.P. and Jenkins, G.M., 1976, *Time Series Analysis Forecasting and Control*, Holden-Day, Oakland, California, 579 p.
- Choi, H.M., Lee, J.Y., Ha, K.C., and Kim, G.P., 2011, The study on time series analysis of groundwater data and groundwater recharge in Jeju island, *J. Eng. Geol.*, **21**(4), 337-348.
- Choi, S.Y., Han, K.Y., and Kim, B.H., 2012, Comparison of different multiple linear regression models for real-time flood stage forecasting, *J. Kor. Soc. Civil Eng.*, **32**(1), 9-20.
- Davis, C.D., 1986, *Statistics and Data Analysis in Geology*, John Wiley & Sons, New York, 646 p.
- Ha, K.C., Ko, K.S., Koh, D.C., Yum, B.W., and Lee, K.K., 2006, Time series analysis of the responses of the groundwater levels at multi-depth wells according to the river stage fluctuations, *Econ. Environ. Geol.*, **39**(3), 269-284.
- Kim, C.R. and Kang, K.S., 2010, *Recession Analysis*, Kyowoo Press, Seoul, 505 p.
- Kim, D.S. and Kang, N.J., 2008, *Recession Analysis: Basic and Application*, Nanam Press, Paju, Gyeonggi-do, 409 p.
- Kim, J.H., Lee, J.H., Cheong, T.J., Kim, R.H., Koh, D.C., Ryu, J.S., and Chang, H.W., 2005, Use of time series analysis for the identification of tidal effect on groundwater in the coastal area of Kimje, Korea, *J. Hydrol.*, **300**(1), 188-198.
- Kim, S.M. and An, B.I., 2011, Estimation of the change water level using regression analysis, *J. Kor. Soc. Agri. Eng.*, **53**(6), 51-58.
- Knotters, M., and Van Walsum, P.E.V., 1997, Estimating fluctuation quantities from time series of water-table depths using models with a stochastic component, *J. Hydrol.*, **197**(1), 25-46.
- Korea Rural Community Corporation, 2005, *A Study on Use of Data Obtained from Monitoring Network for Groundwater Management*, 271 p.
- Kresic, N., 1997, *Quantitative Solutions in Hydrogeology and Groundwater Modeling*, Lewis Publishers, New York, 461 p.
- Lee, J.Y. and Lee, K.K., 2002, A comparative study on characteristics of water level responses to rainfall in the two aquifer systems, *J. Soil Groundw. Environ.*, **7**(1), 3-14.
- Ministry of Agriculture and Forestry, 2005, *A Report on Rural Area's Groundwater Management at Muan-gun, Jeonnam*, 386 p.
- Park, H.Y., 2008, *A Study on Seawater Intrusion in Coastal Fractured Rock Aquifer using Time Series Analysis, Geophysical Logging and Flowmeter Test in Muan, Jeonnam*, M.Sc. dissertation, Chonnam National University, 66 p.
- Park, H.Y., Jang, K.Y., Ju, J.W., and Yeo, I.W., 2012, Hydrogeological characterization of seawater intrusion in tidally-forced coastal fractured bedrock aquifer, *J. Hydrol.*, **446-447**, 77-89.
- Salas, J.D. and Obeysekera, J.T.B., 1982, ARMA model identification of hydrologic time series, *Water Resour. Res.*, **18**(4), 2011-202.
- Wittenberg, H., 1999, Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation, *J. Hydrol.*, **219**(1), 20-33.
- Yeom, J.G., 2005, *Linear Regression Analysis*, Free Academy, Paju, Gyeonggi-do, 503 p.
- Yi, M.J. and Lee, K.K., 2004, Transfer function-noise modeling of irregularly observed groundwater heads using precipitation data, *J. Hydrol.*, **288**(3-4), 272-287.