



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권으로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

碩士學位論文

시계열모형을 이용한 전남 무안
암반대수층의 해수침투 경향성
분석 및 예측

全南大學校 大學院

地球環境科學科

朱 廷 雄

指導教授 呂 寅 昱

2008年 8月

碩士學位論文

시계열모형을 이용한 전남 무안
암반대수층의 해수침투 경향성
분석 및 예측

全南大學校 大學院
地球環境科學科

朱 廷 雄

指導教授 呂 寅 昱

2008年 8月

시계열모형을 이용한 전남 무안 암반대수층의 해수침투 경향성 분석 및 예측

全南大學校 大學院
地球環境科學科

朱 廷 雄

上記者의 碩士學博士 學位論文을 認准함

	所 屬	職 位	學 位	姓 名
審 查 委 員 長	전남대학교	교수	이학박사	허 민
審 查 委 員	전남대학교	교수	이학박사	여 인 옥
審 查 委 員	한국지질자원 연구원	연구원	이학박사	김 태 희

2008年 8月

목 차

그림 목차.....	iii
표 목차	v
국문초록	vi
1. 서 론	1
2. 시계열분석 방법론	4
2.1. 자기상관함수 및 교차상관함수	4
2.2. 시계열모형의 개요	6
2.2.1. 시계열모형	7
2.2.2. 전이함수 잡음 모형(Transfer Function-Noise model) ·	11
2.3. 시계열모형 구축	13
3. 연구방법	17
3.1. 연구지역	17
3.2. 대수층 시험 및 결과	22
4. 시계열자료 분석 및 결과	23
4.1. 관측자료 분석	23
4.1.1. 관측자료 기본 통계분석	28
4.2. 관측자료 상관분석	30
4.2.1. 관측자료 자기상관성분석	30

4.2.2. 관측자료 교차상관성분석	35
4.2.2.1. 강우와 지하수위, 전기전도도 상관성 분석	35
4.2.2.2. 지하수위와 전기전도도 상관성분석	38
4.2.2.3. 조석과 지하수위, 전기전도도 상관성분석	42
4.3. 관측자료 경향성 분석	46
4.3.1. 선형 추세분석(Linear trend analysis)	46
5. 시계열모형을 통한 경향성 판단	50
5.1. 시계열모형	50
5.2. 시계열모형 적용	52
5.2.1. 시계열모형을 이용한 지하수위 예측 및 진단	56
5.2.2. 시계열모형을 이용한 전기전도도 예측 및 진단	61
6. 결론	70
7. 참고문헌	74

ABSTRACT

감사의 글

그림 목차

그림 1. 비정상 시계열의 예(2006년 11월 27일~2007 2월 8일)	9
그림 2. 전이함수 잡음 모형 모식도 (Box and Jenkins 1976)	12
그림 3. 전남 해안가에 위치한 연구지역과 연구 지역 내 관정 위치: (a) 연구 지역 위성사진, (b) 연구지역 전경사진	18
그림 4. 연구지역 지질도(최승오와 고중배, 1971)	19
그림 5. 관측정 W1, W2에서 심도별 전기전도도 logging 자료(2006년 5월)	20
그림 6. 관측기간 동안 강우와 지하수위 변동양상	21
그림 7. W2 관정에서 심도별 전기전도도 변동 양상(2006.4.1~2006.12.31)	25
그림 8. 심도별 전기전도도 변동 양상(2007년 1월 1일~2007년 8월 26일)	27
그림 9. 지하수위, 전기전도도 Box-Whisker plot	29
그림 10. 지하수위와 강우 관측자료의 자기상관도	32
그림 11. 55m, 70m 전기전도도 관측자료 자기상관도	34
그림 12. W2 관측정에서 강우와 지하수위, 전기전도도 교차상관도	37
그림 13. W2 관측정에서 지하수위와 55m, 70m 전기전도도 교차상관도 ·	39
그림 14. 양수구간에서 지하수위와 55m, 70m 전기전도도 교차상관도	41
그림 15. 2006년 12월 1일~2007년 1월 31일 까지 조석과 지하수위 시계 열도(1시간 간격)	42
그림 16. 조석과 지하수위 교차상관도 관측기간 2006년 12월 1일~2007년 1월 31일 1시간 자료	44
그림 17. 일 관측자료를 이용한 선형 추세분석 결과:	49
그림 18. 관측기간 중 지속적인 양수로 인한 지하수위 변동 시계열도	52
그림 19. 강우의 영향을 받는 지하수위 관측자료 시계열도	53
그림 20. 심도별 전기전도도 시계열도	54

그림 21. 지하수위 관측자료 자기상관함수와 편자기상관함수	56
그림 22. ARIMA(1,1,1) 모형의 잔차 자기상관함수와 편자기상관함수	57
그림 23. ARIMA(1,1,1) 모형의 적용과 지하수위 예측	59
그림 24. 강우와 지하수위 교차상관도: 관측기간 2006월 3월 26일~2006년 4월 26일 (1시간 자료)	61
그림 25. TFN 모형을 이용한 지하수위 예측	62
그림 26. 2006년 6월 16일~2006년 7월 16일 강우에 의한 지하수위 변동 예측; TFN 모형 이용	66
그림 27. 55m와 70m 심도 전기전도도 시계열 모형의 잔차 자기상관도 ...	67
그림 28. ARIMA(0,1,1)(0,1,1) _{s=24} 모형 적용과 55m 전기전도도 예측 ...	67
그림 29. ARIMA(0,1,1)(0,1,1) _{s=7} 모형의 적용과 70m 전기전도도 예측 ·	68

표 목차

표 1. 시계열모형에서 자기상관함수와 편자기상관함수의 이론적 특성(박성현 외, 2005)	14
표 2. 연구지역 내 관측정 제원 및 지하수위	19
표 3. 관측정 W1, W2의 수리상수 결과	22
표 4. 심도에 따른 전기전도도 변화(2006년)	24
표 5. 심도별 전기전도도 변화(2007년)	26
표 6. W2 관측정에서 지하수위, 전기전도도 통계 결과 값	29
표 7. 지하수위, 전기전도도 관측자료 자기상관계수	33
표 8. 지하수위와 심도별 전기전도도 교차상관 분석 결과	40
표 9. 관측자료 교차상관 분석 결과	45
표 10. 관측자료 선형추세분석 결과	47
표 11. 시계열모형의 적합성 판단 통계량	57
표 12. ARIMA(1,1,1) 모형의 모수 추정	58
표 13. TFN 모형의 모수 추정	60
표 14. 전기전도도 시계열모형의 모수 추정	63

시계열모형을 이용한 전남 무안 암반대수층의 해수 침투 경향성 분석 및 예측

주 정 응

전남대학교대학원 지구환경과학과

(지도교수 : 여인옥)

(국문초록)

최근 전남 해안가 일대에서 지하수의 사용이 늘어나면서 해수침입으로 인한 지하수오염이 심각해지고 있다. 전남 무안지역 암반대수층에서 측정한 연속지하수위와 전기전도도자료에 대한 시계열분석을 통해 암반대수층에서의 해수침투 특성을 해석하고, 자기회귀누적이동평균(ARIMA model), 전이함수잡음 모형(TFN model) 등의 시계열예측모형을 적용하여 지하수위 변동과 해수침투에 의한 전기전도도의 변화를 예측하고자 하였다.

본 연구지역의 양수시험결과 투수량 계수는 3.63×10^{-4} m²/sec, 수리전도도는 7.36×10^{-6} m/sec, 저류계수는 0.047~0.05로 나타났다. 기초통계분석결과, 전기전도도의 변동 폭은 최대 400~600 μ S/cm로 높게 나타나고 있어 해수침투의 영향을 받고 있는 것으로 나타났으며, 지하수위는 인위적인 양수와 강우에 의한 영향을 받는 것으로 나타났으며, 양수에 의한 지하수위 변동 폭은 최대 2.3m 까지 나타났다.

시계열특성함수인 자기상관함수(Autocorrelation function), 교차상관함수(Crosscorrelation function)를 이용하여 상관 분석을 실시하였다. 상관분석결과 지하수위와 전기전도도는 자기상관성이 강하고 긴 기억효과를 가지는 것으로 나타났다. 교차상관분석결과 지하수위는 강우에 영향을 받고 있으며, 전기전도도의 경우 55m 심도는 지연시간(delay time) 1일, 최대교차상관계수

-0.46으로 강한 음의 상관관계를 보이고 있으며, 70m 심도의 경우 지연시간(delay time)은 1일, 최대교차상관계수 -0.64로 나타나고 있어 지하수위 하강으로 인해 전기전도도가 상승함을 보여주고 있다.

지하수위 하강으로 인한 전기전도도의 변동 양상을 좀 더 연구하기 위해 지속적인 양수가 이루어진 2006년 9월부터 2006년 11월 구간의 지하수위 자료와 70m 심도위 전기전도도 간의 교차상관 분석 결과, 최대 교차상관계수는 -0.61로 나타나 높은 음의 상관관계를 보여준다. 이는 지속적인 양수로 인한 지하수위 하강이 해수침투의 원인이 됨을 시사한다. 상대적으로 조석과 전기전도도, 조석과 지하수위의 교차상관계수는 해안가로 부터의 관측정까지의 거리로 인해 조석의 스트레스가 전파되는 동안 약화되어 0.1 이하의 낮은 상관계수를 보인다.

시계열분석 결과를 토대로 시계열모형을 선정하여 지하수위 변동 및 전기전도도 변동양상을 예측하였다. 관측자료의 불규칙적인 변동과 추세를 제거하기 위해 시계열모형 중 자기회귀누적이동평균모형(ARIMA model)과 시계열자료 변동에 영향을 주는 인자들을 고려 할 수 있는 전이함수잡음모형(TFN model)을 이용하였다. 지하수위의 경우 강우의 영향을 고려 할 수 있는 전이함수잡음모형(TFN model)을 선정하여 지하수위 변동을 예측하였으며, 전기전도도의 경우 변동 특성을 고려하여 계절형 자기회귀누적이동평균모형(SARIMA model)을 선정하여 전기전도도 변동 양상을 예측하였다. 또한 적용된 시계열모형의 적합성 여부를 판단하기 위해 실제 관측값과 예측값을 비교하였다.

시계열분석과 시계열모형은 암반 대수층에서 해수침투의 원인이 되는 주요한 요소를 분석하고, 해수침투로 인하 지속적인 전기전도도 상승을 예측하는데 효율적이다.

주제어 : 해수침투, 시계열분석, 시계열모델링, 암반대수층

1. 서론

해안가 대수층은 지하수를 공급해서는 주요한 공급원 이지만, 해수 침투로 인해 지하수 사용에 있어서 제약을 받고 있다(Bear et al., 1999). 최근 들어 국내 해안지역 및 도서지역에서는 해수 침투로 인해 지하수 장애가 발생하고 있다(Park et al., 2005). 따라서 해안가 대수층에서의 지하수 흐름 및 염수의 유동은 해안가 지하수 개발과 보전에 중요한 역할을 한다.

해안가 대수층의 해수침투현상은 해안지역에서 다량의 지하수를 양수함으로써 인해, 지하수위가 줄어들면서 밀도차로 인해 해수가 담수로 침투하여 담수와 해수가 혼합하는 과정에서 발생한다(Todd, 1980). 이러한 해수와 담수의 밀도차에 의해 발생하는 연안지역의 해수침투 현상에 관한 많은 연구들이 수행되었다(Lee et al., 2007; Park et al., 2002; Richter and Kreidler, 1993). 국내에서는 지하수의 염수화 문제는 주로 서해안 일대 간척지나 제주도를 중심으로 이루어지고 있다(Choi and Kim, 1989; Kim et al., 2003). 제주도의 경우 해수침투로 인해 지하수와 해수의 경계가 해안가로 최대 8km 까지 내륙으로 들어오면서 인근 지역의 지하수 장애를 일으키고 있다(Kim et al., 2006). 제주도에서의 해수침투연구는 주로 화산퇴적암에서 수행되었으며, 국내 서해안 지역에서는 주로 간척지 일대나 퇴적암으로 구성된 해안가에서 연구가 수행되었다(Kim et al., 2005; Kim et al., 2006).

제주도 및 서해안을 중심으로 이루어진 해수침투 연구는 시계열분석법을 이용하여 관측자료의 변동특성을 파악하고 관측자료 상호간의 연관성을 주로 파악 하였다. 시계열 분석법(time series)은 일반적으로 온도, 유출, 강수, 지하수위 변동 등의 시간적 자료에 대해 특징적으로 감소하거나 증가하는 경향(trend), 계절적 변화, 연 변화등과 같은 주기적 변동(periodicity), 그 외 폭풍이나 지역적인 호우 등의 불규칙적인 변화를 해석하는 기법으로 널리 이용되고 있다. 시계열 분석을 이용하여 서해안 간척지 일대에서 조석에 의한 해수 침투특성을 연구하였다(Kim. et al., 2005). 이 연구를 통해 서해안 일대의 간척지의 지하수위 변동 양상과 전기전도도 변동양상은 조석과 매우 밀접한 관

련이 있음을 밝혀냈다.

지하수위 시계열 자료를 이용하여 대상 지하수 시스템의 변동 양상을 분석하는 방법은 초기에 주로 카르스트 지형에서 많이 적용 되었다(Padilla and Pulido-Bosch, 1995; Larocque et al., 1998). 지하수위 시계열 분석법은 대수층 자체의 수리 지질학적 특성이나 물리적 상수 없이 시간에 따라 얻어지는 자료를 가지고 대수층의 특성을 쉽게 파악 할 수 있는 장점이 있다. 이런 특성을 이용하여 강우에 대한 지하수위 반응 양상을 통해 지하수위 함양 기작을 파악하는 연구가 이루어졌다(이진용·이강근, 2002). 시계열 분석법은 단열암반 대수층까지 확대되어 단열 암반 대수층의 수위변동 양상과 대상 지하수시스템을 해석하는데 활용되기도 하였다(Lee and Lee, 2000; Lee. et al., 2005). 또한 저수지일대에서 강우에 의한 지하수위 반응, 함양과 배출지역에 따른 지하수위 반응 양상을 시계열분석을 통해 비교연구 하였다(Lee. et al., 2005).

위와 같이 기존의 시계열 분석 연구는 시계열 특성 함수인 자기상관함수와 교차상관함수를 통해 대상 지하수시스템에서 함양, 강우나 조석의 영향에 의해서 지하수위의 변동 양상을 비교해 보는데 초점이 맞추어 졌다. 최근 들어 이러한 연구를 바탕으로 국가 지하수관측소 지하수위 자료를 이용하여 시계열 예측모델을 적용 지하수위 예측을 실시한 연구가 이루어졌다. 이 연구는 기존에 금융경제나 마케팅에서 실시하던 시계열 예측의 개념을 적용하여 지하수위 예측에 적합한 시계열 모형(time series model)을 선정하고 예측을 실시하였다(이명재 외, 2004). 또한 Yi and Lee(2004)는 강우자료와 같은 외부 인자를 입력 자료로 사용할 수 있는 전이함수모형(transfer function -noise model)을 이용하여 불규칙한 관측 주기를 갖는 지하수위 변동을 효과적으로 예측하였다. 위와 같이 시계열모형은 시간에 따른 지하수위 변동유형 분석에 유용함이 많은 연구에서 밝혀졌다(Salas et al., 1982; van Geer et al., 1997; Bierkens et al., 1999; Knotters et al., 1999).

최근 해안가 대수층은 무분별한 개발로 인해 지하수 장애 우려 지역이 늘어나고 있는 실정이다. 특히 본 연구 지역에 해당하는 전남 지역은 광역 지자체 단체 중 지하수 사용량이 두 번째로 많은 지역으로 전체 사용량인 3,749백만 톤 중 498백만 톤으로 전체 사용량의 13%에 해당하며 지하수 장애 우려

지역으로 분류 되어 있다(건설교통부, 2005). 특히 전남 해안가 일대 지역 중 본 연구 지역인 무안 지역은 16백만 톤으로 전남 해안가 일대 지하수 사용량 중 높은 비율을 차지하고 있어 염수로 인한 지하수 장애가 우려 되는 지역이다(한국농촌공사, 2005b; 한국 수자원 공사, 2007). 이로 인해 한국농촌공사는 해안가 대수층의 해수침투현상을 모니터링하기 위해 해수침투 관측망을 설치하여 해안가 일대 지하수위 변동 및 전기전도도의 변화를 관측하고 있으며, 전라남도 지역에는 총 55개소 중 21개소의 해수침투 관측망이 설치되어 있다(한국농촌공사, 2005a, b).

제주도와 서해안 간척지에 해당하는 김제 일대에서 해수침투 현황과 조석에 의한 해수침투 연구가 활발히 진행 되었으나, 전남 해안가는 높은 지하수 사용량으로 인한 해안가 대수층의 염수에 의한 피해가 우려되는 지역임에도 불구하고 해수 침투에 관한 연구는 미비하다. 또한 암반대수층으로 이루어진 전남 서해안 일대는 다공질 매체로 이루어진 제주도와 충적층에 해당하는 간척지에서 발생하는 해수침투 경향과 다를 수 있음에도 불구하고 이에 대한 체계적인 연구가 아주 미비하다.

본 연구는 기존의 연구와 달리 해안가 암반 대수층에서 일어나는 해수침투에 영향을 주는 요인들을 시계열 교차상관분석을 통해 밝히고, 시계열 예측 모델(ARIMA, TFN model)을 이용하여 지하수위 및 전기전도도 변동 예측 및 경향성 판단을 통해 암반 대수층 시스템의 이해와 해수침투 양상을 파악하고, 시계열예측 모형의 암반 대수층에서의 해수침투 현상에 적용 가능성을 연구하였다.

2. 시계열분석 방법론

2.1. 자기상관함수 및 교차상관함수

일반적으로 연속적으로 측정된 수리 수문 자료는 각지 특징적인 시계열적 특성을 보인다(이진용와 이강근, 2002). 본 연구에서 자기상관함수(Auto-Correlation Function: ACF)와 교차상관함수(Cross-Correlation Function: CCF)을 이용하여 시계열자료의 특성을 파악하였다. 자기상관함수는 다음과 같다.

$$c_k = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \mu)(x_{t+k} - \mu) \quad (1)$$

$$\gamma_k = \frac{c_k}{c_0} \quad (2)$$

여기서 x_t 는 시계열자료, k 는 시차(time lag; $k=0 \sim K$), n 은 시계열 길이, μ_x 시계열 x 의 평균, c_k 는 자기공분산 함수, γ_k 는 자기상관계수를 나타낸다.

자기상관함수는 주어진 시계열 자료의 자기 선형성과 기억효과를 나타낸다. 즉 시계열 자료가 짧은 지연시간(time lag)에 0의 값에 수렴하게 되면 자기선형성이 약하고 반대로 자기 선형성이 강하면 자기상관함수는 천천히 감소하는 양상을 보이고 긴 지연시간(time lag)에 0 이상의 값을 갖게 될 것이다.

교차상관함수는 다음과 같다.

$$c_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \mu_x)(y_{t+k} - \mu_y) \quad (3)$$

$$\gamma_{xy}(k) = \frac{c_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (4)$$

여기서 y_t 는 시계열자료, μ_y 는 시계열 y 의 평균, σ_x, σ_y 는 x, y 의 표준편차이며 $\gamma_{xy}(k)$ 는 시차 k 에서 교차상관계수를 나타낸다(Box and Jenkins, 1976).

교차상관함수는 입력값과 출력값의 상호의존성을 나타낸다. 지체시간(delay time)은 지연시간 $k=0$ 에서 최대 교차상관계수까지의 시간을 의미하며, 입력값이 출력값에 반응하는 시간차를 나타내고 그 시스템의 반응 속도를 나타낸다(Lee and Lee, 2002; Larocque et al., 1998). 일반적으로 두 시계열 특성함수에 사용되는 시차 k 는 시계열 길이 n 의 1/4값 이상을 사용한다.

95% 신뢰구간에서 상관도를 평가하는 유의수준(significance level)은 표준오차(standard error)로 $\sim \pm 2/\sqrt{n}$ 이며, 여기서 n 은 시계열자료의 길이에 해당한다.

2.2. 시계열모형의 개요

시계열 자료란 시간의 흐름에 따라 변하는 현상을 관찰함으로써 얻어지는 일련의 자료들을 말한다. 일정한 시간을 통해 얻어지는 모든 자료는 시계열 자료라고 할 수 있다. 일정한 시간을 두고 측정되는 지하수위, 조석자료, 전기전도도 자료들을 시계열 분석에 이용할 수 있다.

시계열분석의 주요 목적은 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 모형의 수립이고, 수립된 모형을 이용 예측을 하는 것이다(이명제 외, 2004). 모형 수립은 관측된 시계열 자료의 여러 성질들을 조사 분석하고, 해당 시계열의 확률적 특성을 체계화하여 적합한 시계열 모형을 찾는 것이고, 예측은 수립된 모형을 가지고 미래의 값을 제시하는 것이다.

시계열모형 수립에 있어서 Box와 Jenkins(1976)는 시계열 자료를 대상으로 확률적 성질을 만족하는가를 조사하고 통계적 추정 및 검정을 통해 시계열 모형을 수립하는 방법으로 일정한 시간 간격으로 연속적인 불규칙적인 변동 값을 선형으로 표현하였다.

$$Z_t = \mu + a_t + \phi_1 a_{t-1} + \phi_2 a_{t-2} + \dots \quad (5)$$

여기서 Z_t 는 t 시점에서 관측 값을 말하고, μ 는 관측 값의 평균이며, a_t 는 평균 0, 분산 σ^2 인 서로 독립적으로 분포하는 확률변수(independent identically distributed)로 백색잡음(white noise)라 한다. ϕ_t 는 각 시점에서 백색 잡음에 영향을 주는 가중치(weight)에 해당하는 선형계수 이다.

2.2.1. 시계열모형

Box and Jenkins의 시계열 모형은 식 (5)와 같이 ϕ_t 와 백색잡음의 선형 결합으로 이루어지며 형태에 따라 자기회귀모형(Autoregressive model), 이동평균모형(Moving Average model), 두 모형의 혼합 모형인 자기회귀이동평균모형(Autoregressive-Moving Average model)으로 불리며, 이들은 모두 정상 시계열모형에 해당한다. 여기서 정상성(stationarity)은 시계열자료의 확률적 성질이 시간에 따라 변하지 않는 것을 의미 하며, 시계열자료의 평균과 분산이 시간의 흐름에 따라 일정함을 의미한다(Box and Jenkins, 1976; 조신섭 외, 2002). 각 모형에 관한 설명은 다음과 같다.

(1) 자기회귀모형(Autoregressive model):

자기회귀모형은 $AR(p)$ 으로 표현한다. 여기서 p 는 유한개의 과거의 관측값들을 나타낸다. 시계열 Z_t 에서 가장 간단한 $AR(p)$ 모형은 차수 $p=1$ 인 $AR(1)$ 모형이다.

$$AR(1): \quad Z_t = \phi Z_{t-1} + a_t \quad (8)$$

여기서 a_t 항은 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르는 잡음항(White noise)이다. 시계열 Z_t 에 대해서 1차 회귀식으로 표현된 형태이며 $AR(1)$ 을 일반적으로 차수 p 로 나타내면 다음과 같다.

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \phi_3 Z_{t-3} + \cdots + \phi_p Z_{t-p} + a_t \quad (9)$$

여기서 $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \cdots \phi_p$ 는 시계열자료로부터 추정해야 할 모수(parameter)에 해당된다. 자기상관성을 갖기 위해서 $|\phi| < 1$ 이어야 한다.

(2) 이동평균모형(Moving average):

이동평균모형은 $MA(q)$ 으로 나타내며, q 개의 백색잡음 a_t 의 선형결합으로 이루어진다. 시계열 Z_t 에서 가장 간단한 $MA(q)$ 모형은 차수 $q=1$ 인 $MA(1)$ 모형이다.

$$MA(1) \quad Z_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} \quad (10)$$

여기서 식(10)은 시계열 Z_t 에 대해서 1차 회귀식으로 표현된 형태이며, $MA(1)$ 을 일반적으로 차수 q 로 나타면 다음과 같다.

$$Z_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \theta_3 a_{t-3} - \cdots - \theta_q a_{t-q} \quad (11)$$

여기서 $\theta_1, \theta_2, \theta_3 \cdots \theta_q$ 는 시계열자료로부터 추정해야 할 모수(parameter)에 해당된다.

(3) 자기회귀이동평균(Autoregressive-Moving Average model):

자기회귀이동평균모형은 AR 모형과 MA 모형의 장점을 이용한 혼합모형으로 다음과 같이 표현된다.

ARMA(p, q) 모형

$$Z_t = \phi_1 Z_{t-1} + \phi_2 Z_{t-2} + \cdots + \phi_p Z_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \cdots - \theta_q a_{t-q} \quad (12)$$

위에서 설명한 시계열모형은 정상시계열모형에 해당한다. 관측된 시계열이 시간에 따라 추세가 있거나, 그림 1과 같이 부분적인 평균값과 분산이 시간에 따라 변화하는 경우에는 적용하기가 곤란하다. 이러한 시계열을 비정상(non stationary) 시계열이라 한다. 비정상 시계열의 특징은 시간에 따라 평균과 분산이 변한다는 것이다. 이러한 변동은 선형이나 지수적으로 변하기도 하지만, 시간에 따라 서로 다르게 변할 수도 있어 확률적인 요인을 포함하고 있다(김원

형, 1991). 이러한 비정상 시계열은 차분을 통해 정상화가 가능하다.

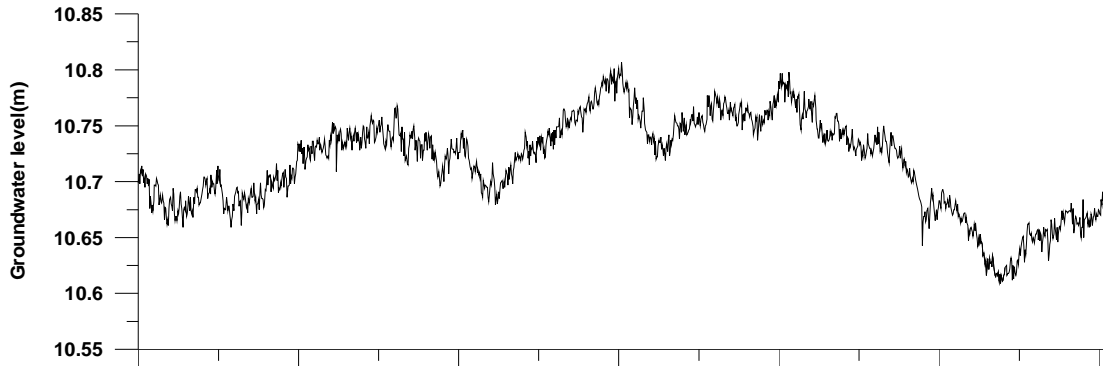


그림 1. 비정상 시계열의 예(2006년 11월 27일~2007 2월 8일)

비정상 시계열모형의 대표적인 시계열 모형은 Box and Jenkins(1976)에 의해 제안되어진 자기회귀누적이동평균모형(Autoregressive -Integrated Moving Average model)으로 현재 활용도가 가장 높은 시계열모형 중의 하나이다.

(4) 자기회귀누적이동평균모형(ARIMA model):

분석대상 시계열 $\{Z_t\}_{t=1}^T$ 가 어떤 추세를 가질 경우 다음과 같은 차분(difference)을 통해 추세를 제거한다.

$$\nabla Z_t = (1 - B)Z_t = Z_t - Z_{t-1} \quad (13)$$

여기서 ∇ 은 차분연산자로 $(1 - B)$ 을 의미하며 B 는 후향연산자로 $B^k Z_t = Z_{t-k}$ k 는 시차를 의미한다. 차분의 차수 표현은 d 로 나타낸다.

일반적으로 상수항을 갖는 ARIMA(p, d, q)모형은 식 (9)와 식 (11)의 혼합 모형으로 표현 할 수가 있다.

$$\phi(B) = (1 - B)^d Z_t = \delta + \theta(B)a_t \quad (12)$$

여기서 δ 는 상수항이며, $\phi(B)$, $\theta(B)$ 는 다음과 같이 정의 된다.

$$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p \quad \text{AR 모형의 연산자}$$

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q \quad \text{MA 모형의 연산자}$$

만약 시계열 자료가 일정한 주기를 가지거나, 계절적인 요인을 가질 경우 ARIMA모형에 계절적인 요소를 포함하는 계절형 ARIMA모형을 사용 할 수 있다.

(5) 계절형 ARIMA 모형(Seasonal ARIMA model):

관측된 비정상 시계열에 대하여 일반차분 및 계절차분을 통해서 정상 시계열로 변환 후 적용한 시계열모형을 계절형 ARIMA 모형이라 한다. 계절형 ARIMA 모형 역시 ARIMA 모형에 기반을 둔 시계열 모형이므로 잔차들 역시 백색잡음을 만족한다. 이를 토대로 일반화 시키면 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\Phi(B)(1-B^s)^D Z_t = \Theta(B)e_t \quad (21)$$

잔차 e_t 의 모형이 ARIMA(p, d, q)을 따르므로 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\phi(B)(1-B)^d e_t = \theta(B)a_t \quad (22)$$

이 두 모형을 결합하면 일반화 된 계절형 ARIMA모형이 된다.

$$\phi(B)\Phi(B)(1-B)^d(1-B^s)^D Z_t = \theta(B)\Theta(B)a_t \quad (23)$$

$$\Phi(B^s) = 1 - \phi_1 B^s - \phi_2 B^{2s} - \dots - \phi_p B^{ps} \quad \text{계절형 AR 연산자}$$

$$\Theta(B) = 1 - \theta_1 B^s - \theta_2 B^{2s} - \dots - \theta_q B^{qs} \quad \text{계절형 MA 연산자}$$

계절형 ARIMA 모형은 일반적으로 $\text{SARIMA}(p, d, q)(P, D, Q)_s$ 로 표현한다. 여기서 D 는 계절 차분이고, s 는 주기를 나타내며, P 와 Q 는 계절성분의 AR 모형 차수와 MA 모형 차수를 나타낸다.

2.2.2. 전이함수 잡음 모형(Transfer Function-Noise model)

TFN 모형은 시계열과 밀접한 관계가 있어 시계열자료 해석에 도움이 되는 다른 변수(시계열 변수)를 입력변수로 사용하는 시계열모형 중의 하나이다 (그림 2). 지하수 시스템에서는 TFN 모형 적용에 있어서 입력 변수를 강우량으로 사용하는 경우가 많이 있다. 이는 지하수위 변동은 강우량과 직접적인 연관이 있기 때문이다.

일반적인 TFN 모형은 Box-Jenkins(1976)에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$Y_t = \delta^{-1}(B)\omega(B)X_{t-b} + N_t \quad (23)$$

여기서, N_t 는 잡음(noise)으로 백색 잡음 형태로 표현된다.

$$N_t = \theta^{-1}(B)\phi(B)a_t \quad (24)$$

위의 두식을 결합하여 정리하면 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$Y_t = \frac{\omega(B)}{\delta(B)}X_{t-b} + \frac{\theta(B)}{\phi(B)}a_t \quad (25)$$

위 식에서 b 는 입력 시계열과 출력 시계열 사이의 지체시간을 의미하며 나머지 변수들은 다음과 같이 표현된다.

$$\omega(B) = \omega_0 - \omega_1 B - \omega_2 B^2 - \dots - \omega_s B^s \quad \text{TFN 모형의 추정 모수 분자}$$

$$\delta(B) = 1 + \delta_1 B + \delta_2 B^2 + \dots + \delta_r B^r \quad \text{TFN 모형의 추정 모수 분모}$$

$$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \dots - \phi_p B^p \quad \text{AR 모형의 연산자}$$

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \dots - \theta_q B^q \quad \text{MA 모형의 연산자}$$

위식에서 보면 일반적으로 ARIMA 모형에 가중함수를 추가하여 나타낸 것을 알 수 있다. 여기서 가중함수는 출력 시계열에 작용하는 입력 시계열이라고 할 수 있다.

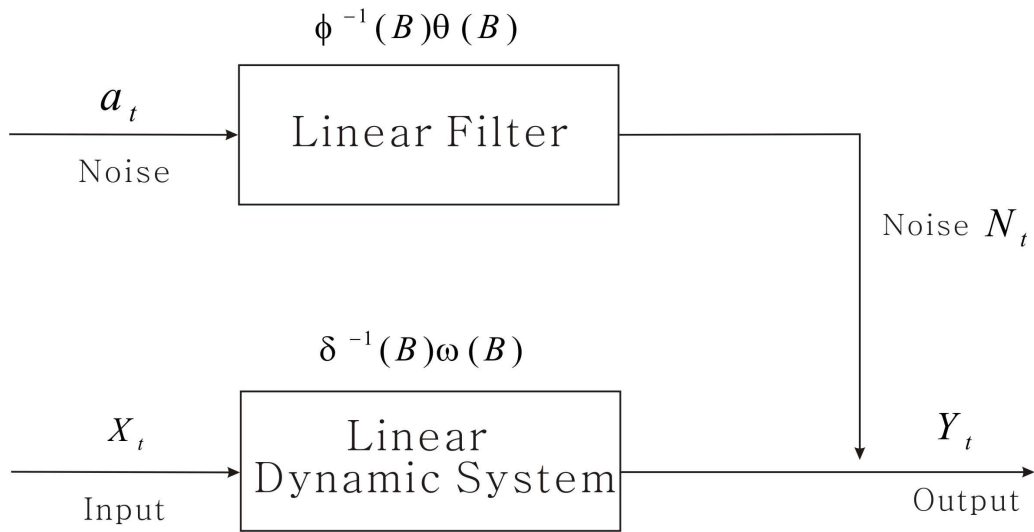


그림 2. 전이함수 잡음 모형 모식도 (Box and Jenkins 1976)

2.3. 시계열모형 구축

Box-Jenkins 시계열모형의 적용은 모형의 식별(model identification), 모형의 추정(model estimation), 모형의 진단(model diagnostic checking)으로 3단계의 과정을 거쳐 이루어진다.

모형의 식별(model identification) 단계: 관측된 시계열자료를 시계열도를 그려 추세가 있는지를 판단하고 비정상성을 가질 경우 차분을 통해 평균과 분산이 일정하도록 만들어 주어야 한다. 시계열자료의 정상성 여부를 판단한 후 자기상관함수(ACF)와 편자기상관함수(Partial autocorrelation function)를 통해 시계열모형의 차수를 정한다. 이 단계에서 하나 이상의 잠정적인 모형을 선택 할 수 있다. 만약 시계열자료가 비정상으로 판단될 경우 적절한 차수를 이용 차분을 통해 평균과 분산을 일정하게 해준다.

편자기상관함수(PACF)는 시계열 $Z_{t-1}, Z_{t-2}, \dots, Z_{t-k-1}$ 의 상관관계를 제거한 후 순수하게 Z_t 와 Z_{t-k} 간의 상관관계를 나타 내어준다. 편자기상관함수(PACF)는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\phi_{kk} = \frac{Cov[(Z_t - \hat{Z}_t)(Z_{t-k} - \hat{Z}_{t-k})]}{\sqrt{Var(Z_t - \hat{Z}_t)} \sqrt{Var(Z_{t-k} - \hat{Z}_{t-k})}} \quad (13)$$

여기서 Cov, Var 은 각각 공분산과 분산을 나타낸다.

Box and Jenkins 모형에서 관측된 시계열자료의 시계열도와 자기상관함수, 편자기상관함수의 특징을 이용하면 모형의 차수를 정하는데 도움이 된다 (표 1). 이와 같은 과정을 거쳐 식별된 모형은 하나의 시험적인 모형으로 추정과 적합성 진단을 통해 보다 적절한 모형으로 개선해 나아가게 된다.

모형 선정에 있어서 주의할 점이 있는데, 소위 모수 절약(principle of parsimony)의 원칙에 의해 관측된 자료를 잘 표현하면서 모수가 작은 모형을

선정하여 단순화 시켜 일반적으로 만들어야 한다(이명재 외., 2004; Box et al., 1976).

표 1. 시계열모형에서 자기상관함수와 편자기상관함수의 이론적 특성(박성현외, 2005)

Time series model	ACF	PACF
AR(p)	Exponentially decreasing or increasing	Truncated at Lag p
MA(q)	Truncated at Lag p	Exponentially decreasing or increasing
ARMA(p, q)	decrdasing after Lag($q-p$)	decrdasing after Lag($q-p$)

모형의 추정(model estimation)은 적률법(method of moment), 최우추정법(maximum likelihood estimation), 조건부최소제곱법(conditional least square estimation), 비조건부최소제곱법(unconditional least square estimation)이 있다.

적률법은 ARMA 모형의 모수를 추정하는 가장 간단한 방법이다. 이는 ACF와 PACF와 함께 놓고 이를 풀어서 모수를 추정한다. 최우추정법은 시계열 Z_n 의 결합밀도함수(k)인 우도함수(likelihood function)를 최대화 시키는 모수를 구하는 것으로 먼저 잡음항 a_t 를 가정하여야 한다. 일반적으로 잡음항은 정규를 분포를 따르는 잡음항 a_t 의 결합밀도함수는 다음과 같이 표현된다.

$$k(a_2, a_3, \dots, a_n) = (2\pi\sigma_a^2)^{\frac{(n-1)}{2}} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma_a^2} \sum_{t=2}^n a_t^2\right) \quad (14)$$

최소제곱추정법은 모형을 통해 계산된 오차의 제곱의합을 최소화시켜 모수를 추정하는 방법으로 초기상태에 대한 가정에 따라 조건부 최소제곱추정과 비조건부 최소제곱추정으로 나누어진다.

모형의 진단(model diagnostic checking)은 모형의 모수가 추정되어 모형이 만들어지면 모형이 최적화가 되었는지 확인해야한다. ARIMA모형은 서로 독립적으로 분포하는 잡음항 즉 백색잡음(white noise)들의 선형결합을 가정하기 때문에 잔차의 확률적 특징도 이를 반영하여야 한다. 백색잡음의 가정은 위의 2.2절에서 설명 하였다. 잔차(residual)란 실제 값에서 예측 값을 뺀 값으로 관측된 시계열에 대해 모형이 바르게 식별되고 예측 값과 실제 값, 즉 참값과 비슷하다면 같은 성질을 가져야한다. 또한 잔차의 시계열도는 정상성을 띠고, ACF와 PACF 역시 같은 성질을 보일 것이다(조신섭 외., 2002). 주어진 시계열모형으로부터 잔차에 대한 ACF와 PACF에서 처음 몇 시차에서 유의한 상관이 발견되거나 Box-Ljung 의 Q 통계량이 유의하게 크게 나오면 모형의 차수는 잘못 정해진 것이다(허명희, 2005). 이와 같이 모형과 관측자료 사이에 잔차에서 유의한 상관성이 발견되면 다시 모형 식별 단계로 돌아가야 한다.

Box-Ljung Q 통계량 검정은 잔차의 우연성을 검증하는 통계량으로서

$$Q = n(n+2) \sum_{i=1}^k r_i^2 / (n-1) \quad (15)$$

으로 정의된다. Q 가 자유도 $k-p-q$ 인 χ^2 (카이제곱) 분포를 따른다는 것을 잔차의 백색 잡음 여부를 판단한다. 또한 잔차의 자기상관함수(RACF)와 편자기상관함수(RPACF)를 도식한 후 유의한 값이 있는지 확인하고, 잔차의 통계적 분포가 정규분포를 따르는지를 살펴야한다.

이와 같이 잔차의 ACF와 PACF를 통해서 모형을 식별하더라도 선정된 시계열모형이 적합하지 않기 때문에 정보기준을 사용해야 하는데, 주로 가장 많이 사용하는 정보기준은 Akaike Information Criterion(AIC)와 Schwartz Bayesian Criterion(SBC or BIC)가 있으며, 여러 가지 모형 후보 중 AIC와

BIC 값이 작은 모형을 선택한다(Lee and Lee, 2004; 허명희, 2005).

Akaike Information Criterion(AIC)

$$-2\ln(L) + 2k \quad (16)$$

Schwartz Bayesian Criterion(SBC or BIC)

$$-2\ln(L) + \ln(N)k \quad (17)$$

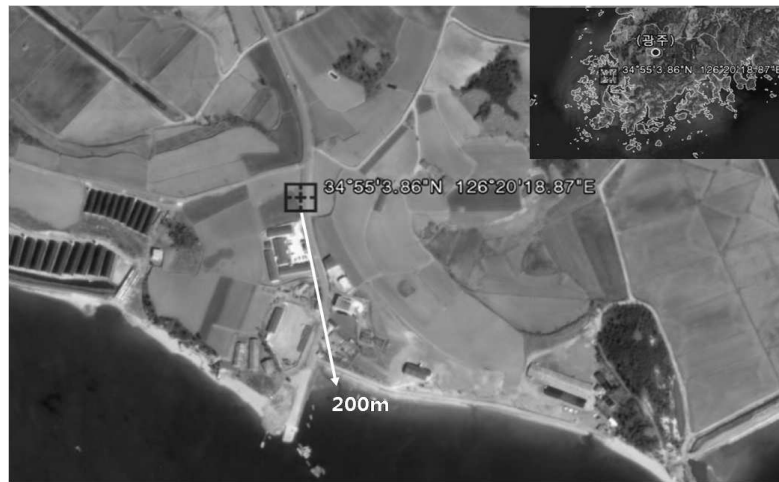
여기서 L 은 최대우도함수, k 는 추정될 모수의 개수, 그리고 N 은 관측치의 개수이다. 정보기준은 최소모수의 법칙에 따라 선정된 모형의 모수가 많을수록 일정한 벌칙을 부여하는 방법으로 시계열모형의 모수가 많을수록 정보기준 값이 커지게 된다. 이와 같이 적합성을 판단하는 방법은 다양하다. 이런 방법을 이용해 선정된 모형의 적합성을 판단하고 여러 모형이 선택될 경우 모수 절약의 원칙에 의해서 가장 간단한 모형으로 선정하는 것이 바람직하다.

3. 연구방법

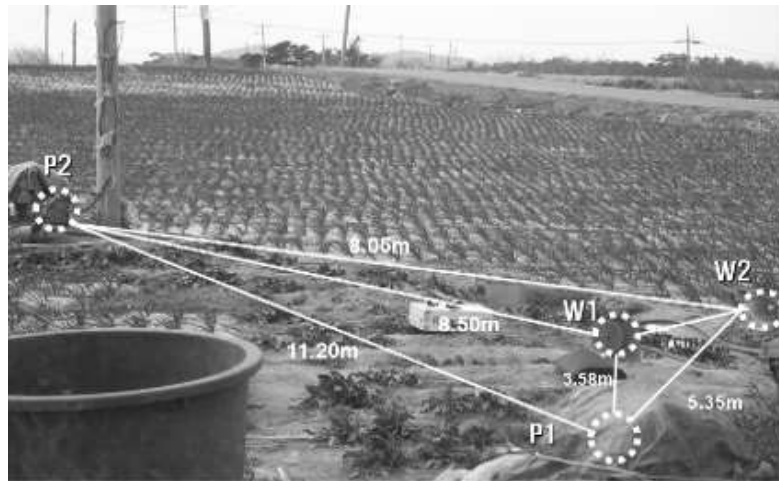
3.1. 연구지역

본 연구 지역은 전남 무안군 운남면 해안가 일대로 해안가에서 200m 떨어진 곳에 위치해 있다. 해안가를 따라 간척지로 개발된 논경지가 있고, 연구 지역 주변으로 일반농가 및 축산 농가가 위치해 있다(그림 3a). 연구지역인 망운반도 일대는 시대 미상의 화강암질 편마암이 넓게 분포하고 있으며, 중생대 백악기 규암장으로 구성된 산성암맥이 연구지역에 분포하는 화강암질 편마암을 북서 방향으로 관입 하고 있다(최승오와 고중배, 1971). 지표는 암석이 풍화되어 모래와 황토로 이루어져 있다. 연구지역의 주요 재배 작물은 밭작물이 주를 이루고 있다. 이 지역은 지하수 사용은 주로 8월부터 11월 까지 지속적으로 증가하고 있고, 본 연구지역인 무안군에는 한국농촌공사가 관리하는 4개소(운남면 성내리, 무안읍 성남리, 청계면 송현리, 해제면 덕산리 각각 1개소)가 존재하고 있어 해수침투에 의한 지하수 오염이 의심되는 지역이다. 운남면 성내리에 위치하는 해수침투관측망은 본 연구지역에서 약 2km 내외의 거리 위치하고 있다.

연구 대상 관정은 농업용으로 사용되는 양수정(P1, P2)과 모니터링 관정(W1, W2)으로 밭에 위치해 있다(그림 3b). 연구 지역의 모니터링 관정은 나공인 상태로 존재하는데 W1, W2 관정 사이에 거리는 0.87m, 관정의 직경은 0.15m, 각 관정의 지하수위는 지표면을 기준으로 TOC(Top of casing)로부터 W1번 관정은 9.27m, W2 관정은 9.18m에 위치하고 있다(표 2). Casing 각각 24m와 25m 까지 설치되어 있으며 casing 아래 구간은 암반으로 이루어져 있다.



(a)



(b)

그림 3. 전남 해안가에 위치한 연구지역과 연구 지역 내 관정 위치: (a) 연구지역 위성사진, (b) 연구지역 전경사진

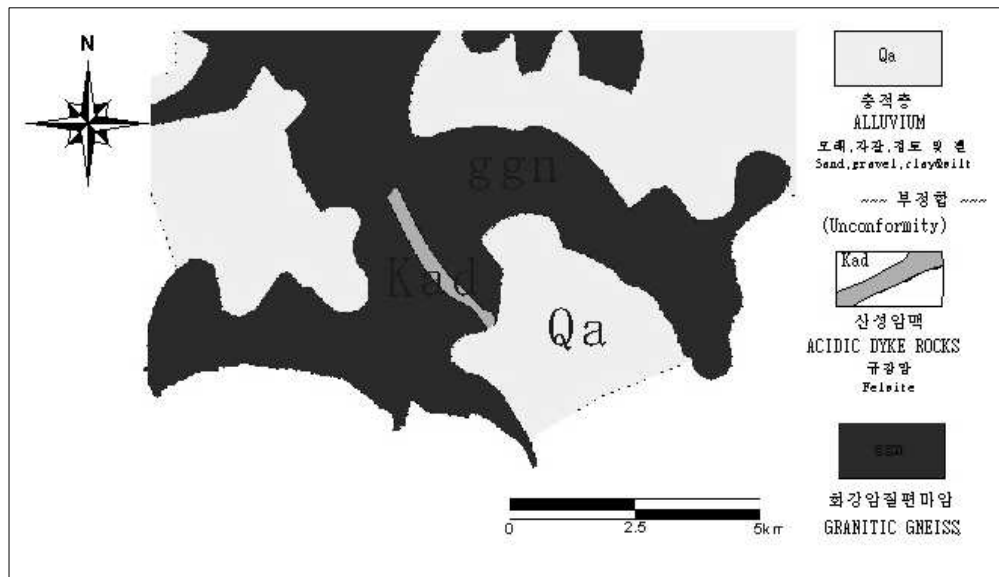


그림 4. 연구지역 지질도(최승오와 고중배, 1971)

표 2. 연구지역 내 관측정 제원 및 지하수위

Well	Diameter	Height of TOC from	Groundwaterlevel
		surface	(TOC)
W1	0.15	0.415	9.27
W2	0.15	0.270	9.18

W1, W2 관정의 심도별 전기전도도(electrical conductivity)변화 양상은 W1 관정에서 최대 3,000 μ S/cm, W2 관정에서 10,000 μ S/cm 까지 심도에 따라 전기전도도 값이 증가하고 있다. W1 관정에서는 TOC로부터 30~60m 구간과 W2 관정에서는 TOC로부터 약 40m 까지는 변화가 크지 않지만, 약 48~55m와 60~78m 구간에서 갑작스런 증가를 보이고 있다(그림 5).

그림 6은 연구기간 동안 관측한 지하수위 시계열도를 나타내며, 장기양수로 인한 지하수위의 변동이 심하게 나타나는 것을 볼 수 가있다. 특히 2006년 8월 10일 부터 2006년 12월 10일 사이에 장기 양수에 의해 지하수위 하강이 나타나고 있다. 이에 반해 2007년 3월 말까지의 지하수위 변동은 비교적 안정적인 양상을 보여 주고 있다.

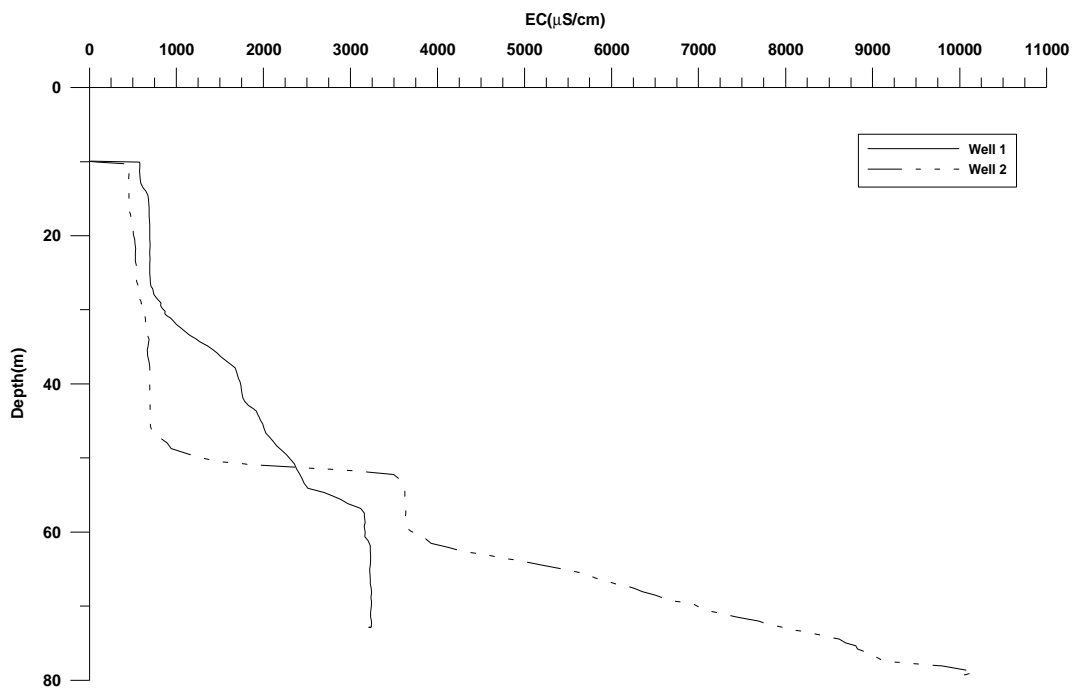
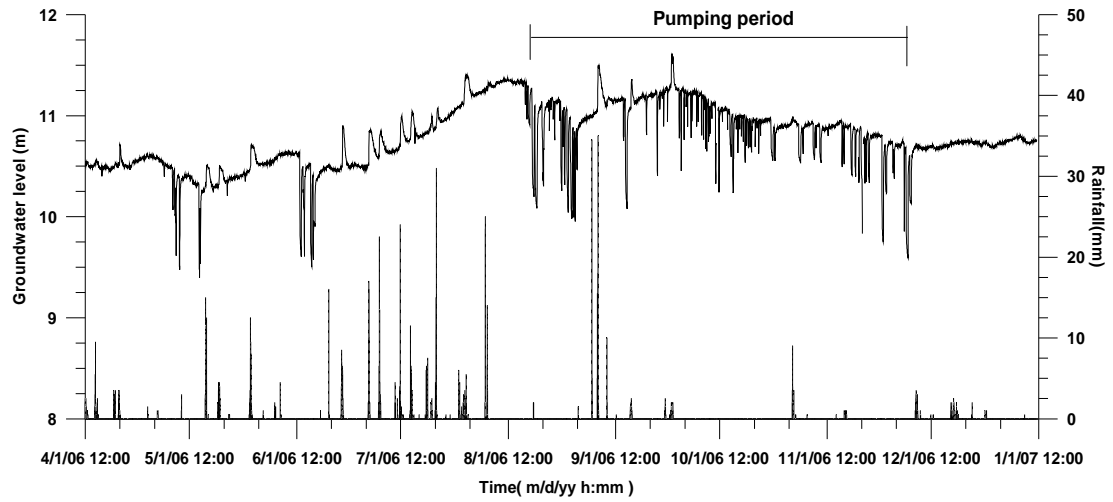
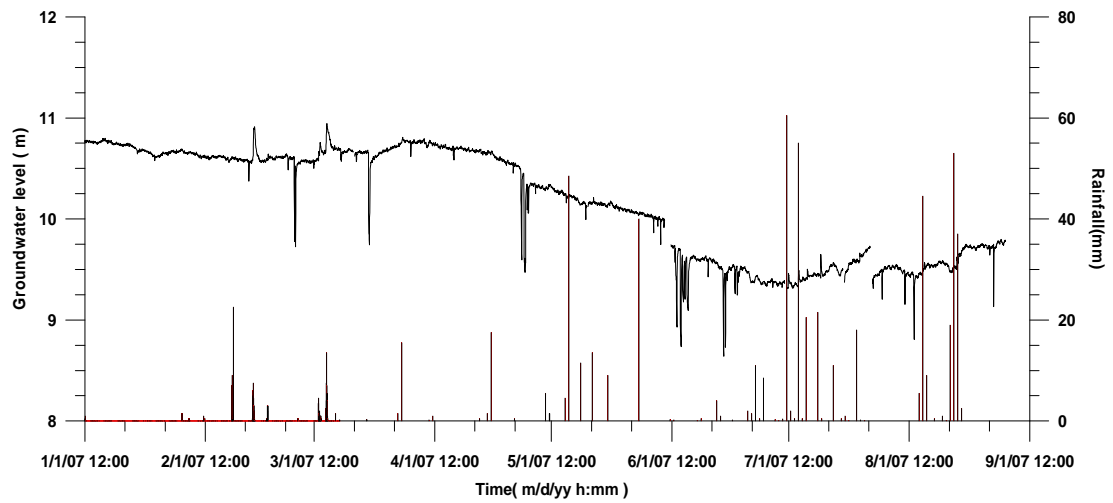


그림 5. 관측정 W1, W2에서 심도별 전기전도도 logging 자료(2006년 5월)



(a) 2006/4/1~2006/12/31



(b) 2007/1/1~2007/8/26

그림 6. 관측기간 동안 강우와 지하수위 변동양상

3.2. 대수층 시험 및 결과

수리적 특성을 파악하기 위해서 실시하는 대수층 시험 중 순간 충격시험(slug test) 및 양수시험(pumping test)은 현장에서 수리상수를 구하기 위해서 널리 수행되는 수리 시험이다(이진용 외, 1999; Fetter, 2003). 이 중 본 연구 지역에서는 양수시험(pumping test)를 통하여 수리상수를 산출 하였다. 현장 시험은 2006년 11월 10일에 실시하였다. 먼저 현장에서 BHTV(Bore Hall TV)를 이용 대수층의 깊이를 알아낸 후 P1 관정에서 41.6ℓ/min으로 양수를 하였으며, W1과 W2 관정에서 자동수위계(miniTROLL)을 이용하여 수위 변화를 측정하였다.

측정한 수위하강 자료들을 Neuman(1975)의 방법에 따라 AQTESOLV 프로그램을 이용하여 연구 지역의 투수량 계수를 산출 하였다. 산출된 투수량 계수는 식(18)을 이용하여 수리전도도를 계산 하였다.

$$T = Kb \quad (18)$$

여기서 K 는 수리전도도, b 는 대수층의 두께를 나타낸다. W1 관정의 수리전도도는 8.97×10^{-6} m/sec, W2 관정은 5.92×10^{-6} m/sec를 보이고 있다(표 3). 비산출률(S_y)은 0.047~0.05로 나타났으며 자유면대수층의 특성을 보인다.

표 3. 관측정 W1, W2의 수리상수 결과

Monitoring well	Thickness b (m)	Transmissivity T (m^2/sec)	Hydraulic conductivity K (m/sec)	Specific yield S_y
W1	47.3	4.16×10^{-4}	8.97×10^{-6}	0.047
W2	52.4	3.10×10^{-4}	5.92×10^{-6}	0.050

4. 시계열자료 분석 및 결과

시계열 자료를 얻기 위해 CTD-diver(DI265/ 네덜란드 Van Essen사, 사용범위 0~100m 측정오차 $\pm 0.1\%$)를 이용 W2 관정에서 심도에 따른 전기전도도 변화 자료(그림 5)를 바탕으로 W2 관정에 TOC로부터 20m, 55m, 70m에 CTD-diver를 설치하여 2006년 4월 1일부터 2007년 8월 26일 까지 1시간 간격으로 지하수위, 전기전도도를 측정하였다. 연구지역 강우 자료는 광주 지방 기상청에 무안 지역 시강수량을 요청하여 사용하였다.

기본 통계분석, 자기상관 및 교차상관 분석 등을 통한 대수층의 특성 파악, 추세분석을 통하여 관측자료의 경향성을 파악 하였다. 장기 관측자료는 자연재해로 인한 관측센서나 로거의 기계적인 오작동 또는 인위적인 실수로 인하여 관측범위를 벗어나는 이상값이 발생하거나 결측이 되는 경우가 많이 발생한다. 또한 관측자료의 로딩 과정에서 로거의 제세팅 과정 중 부득이 하게 결측값이 발생하기도 한다. 통계분석을 위하여 유효한 관측값을 사용하였으며, 결측값과 이상값은 제외 하였다. 관측자료 분석에는 SPSS 통계프로그램을 이용하여 실시하였다.

4.1. 관측자료 분석

그림 5에 의하면 W1 관정에서는 40~60m, W2 관정에서는 45~50m, 60~70m 구간에서 전기전도도 값이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 심도별 전기전도도 변화를 바탕으로 W1 관정은 40~60m 구간, W2 관정은 48~55m, 60~78m 구간에 절리나 파쇄대가 발달되어 이를 통해서 해수가 침투할 가능성이 있다.

관측된 지하수위와 강수량 자료를 보면 2006년 4월 1일부터 2006년 7월 31일 까지는 일부 양수 구간이 존재 하지만 지하수위 변동은 강수에 의한 영향을 받고 있으며, 2006년 7월 이후부터 2007년 12월 중순에 해당하는 구간은 양수에 의한 영향을 받고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 강수량이 감소하는 2006년 9월 이후 부터는 지속적인 양수로 인해 점진적으로 지하수위가 감소

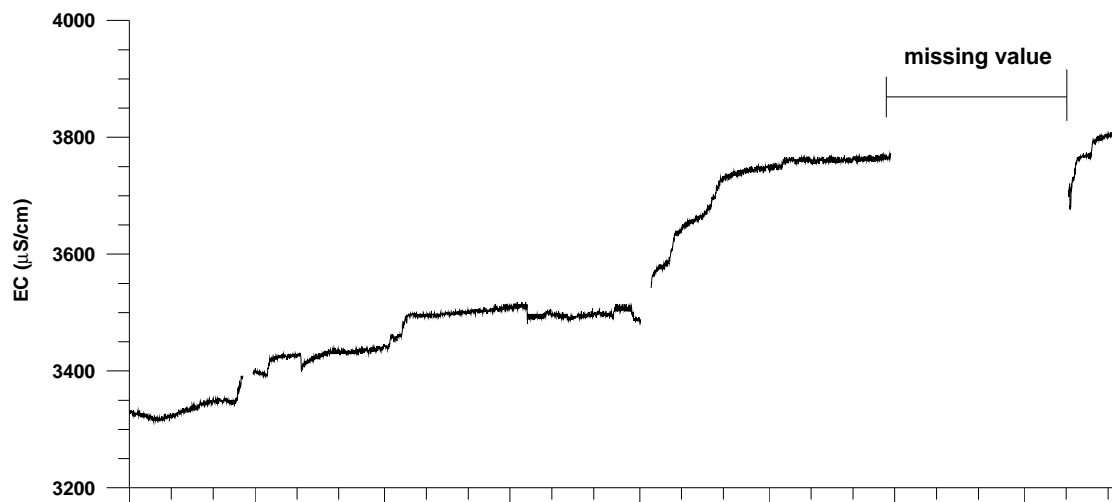
하는 양상을 보인다(그림 6). 이 지역은 강수에 영향 보다는 양수에 의한 영향을 심하게 받는 것을 볼 수 있다. 2007년 3월까지는 지하수위 변동이 비교적 안정적인 것으로 보아, 이 기간은 비교적 농번기가 지난 휴식기에 해당하여 양수의 빈도가 줄어들기 때문이다. 2007년 4월 이후에는 지속적으로 지하수위가 줄어들고 있는 양상을 보인다.

그림 7(a)는 2006년 측정된 55m 심도의 전기전도도 변화 양상을 나타내고 있다. 55m 심도의 전기전도도 변화 양상은 관측 시작이후 2006년 7월까지는 점진적으로 증가하다가 2006년 8월 이후 양수에 의해 급격히 증가하고 있고, 전기전도도가 3,000 μ S/cm 이상으로 높게 나타나고 있어 이 부근에 절리나 파쇄대를 통해 직접적으로 해수가 유입될 가능성이 있다. 70m의 전기전도도의 경우 측정값이 7,000 μ S/cm 이상으로 55m 전기전도도와는 달리 큰 진폭을 보이면서 증가와 감소를 반복하는 것을 볼 수 있다. 이는 조석의 변화 주기와 관련성이 있는 것으로 파악 된다(그림 7b). 55m와 70m의 전기전도도는 변동 폭은 다르지만 증가하는 변화양상은 동일하게 나타나고 있다. 관측기간 중 발생한 결측구간(missing value)은 장비 교체 시기와 기계적 결함으로 인해서 발생되었다.

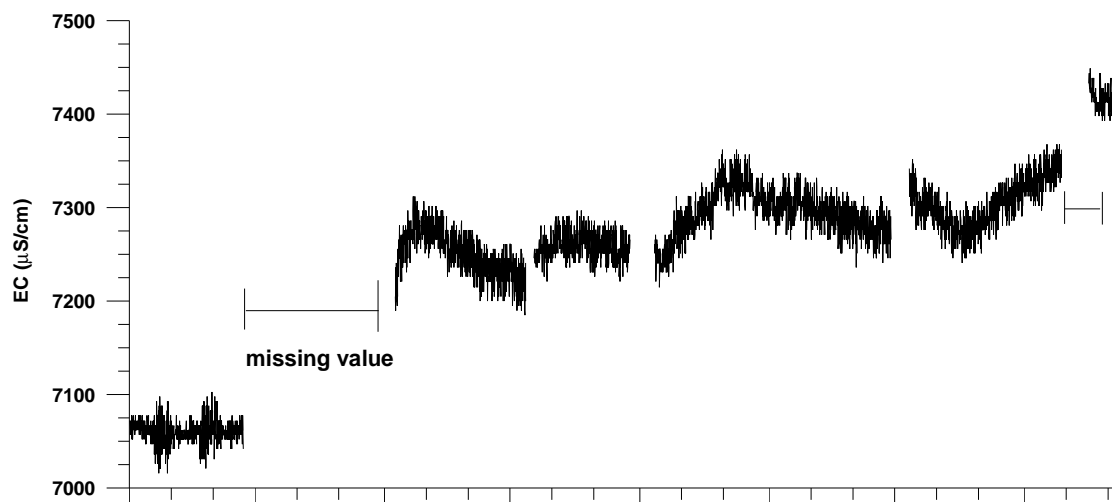
심도가 증가함에 따라 전기전도도가 지속적으로 증가하고(그림 5), 55m와 70m 구간에서의 높은 EC 값을 보이며(표 4), 내륙 지방의 지하수에 비해 연구지역의 전기전도도가 높게 나타나고 있어, 이 지역이 해수 침투에 의해 지하수가 오염 되었을 가능성을 보여준다. 55m와 70m 심도의 전기전도도가 점진적으로 증가하고 있어 지속적인 관찰을 필요로 한다.

표 4. 심도에 따른 전기전도도 변화(2006년)

Depth(m)	Electrical conductivity(μ S/cm)
55	3,550~3,850
70	7,200~7,450



(a) 55m



(b) 70m

그림 7. W2 관정에서 심도별 전기전도도 변동 양상(2006.4.1~2006.12.31)

2007년 심도별 전기전도도의 변화를 보면(그림 8), 55m 구간은 2006년과 동일하게 꾸준히 증가 하는 것을 볼 수 있다(그림 8b). 변동 범위는 3,700~최대 3,882 μ S/cm로 변동하고 있으며, 2006년 전기전도도 변동에 비해 비교적 안정적인 양상을 보이는데 이는 지하수위 변동이 2006년에 비해 비교적 안정적이기 때문으로 판단된다.

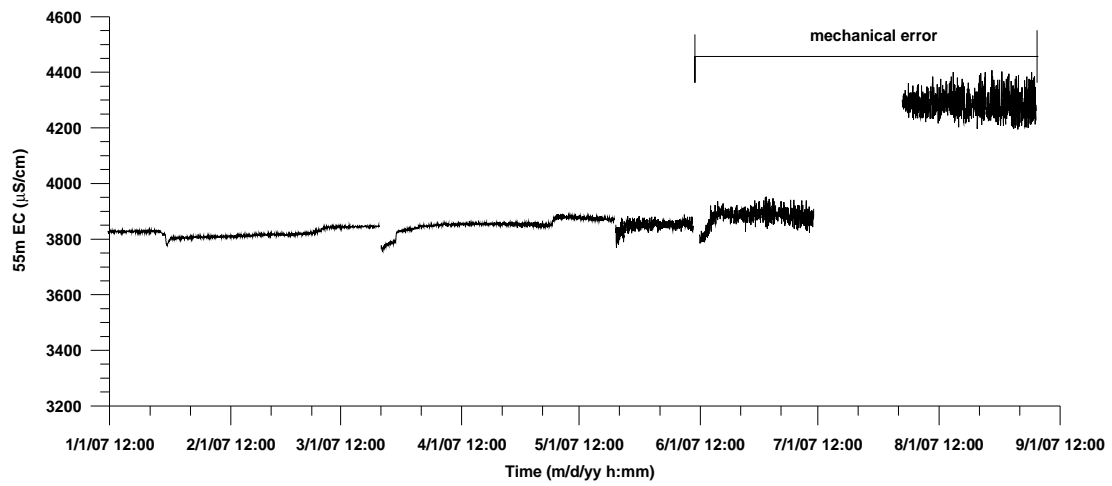
70m 전기전도도의 변화 양상을 보면 지속적으로 증가하는 양상을 볼 수 있다. 55m와 달리 시 단위 변동 폭이 크게 나타나는 이유는 조석의 영향으로 인한 것으로 판단된다. 2006년 12월 이후부터 2007년 3월 중순 까지 비교적 안정적인 변화 양상을 보이다가, 2007년 4월부터 지속적으로 증가하여 최대 7,510 μ S/cm 까지 증가 한 것을 볼 수 있다(그림 8b).

2006년과 2007년에 측정된 전기전도도 변화 양상을 비교해 보면 2006년의 경우 전기전도도가 큰 변동 폭을 보이며, 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있으며, 2007년 측정된 자료에서는 2007년 5월 30일 까지 안정된 양상을 보이고 있다. 전체적으로 2006년과 2007년의 관측 자료를 종합 하면 55m와 70m 전기전도도의 지속적인 증가는 지하수의 사용량과 연관성을 보임을 알 수 있다.

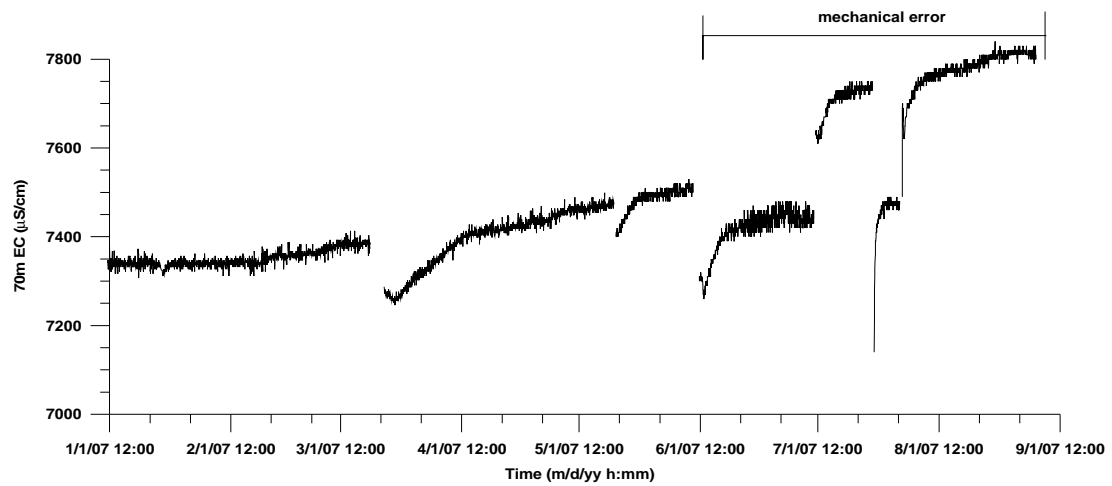
2007년 6월 1일 이후 55m와 70m 심도의 전기전도도 변동은 관측장비의 오류로 인한 이상값으로 판단되어 관측자료 분석에서 제외 하였다.

표 5. 심도별 전기전도도 변화(2007년)

Depth(m)	Electrical conductivity(μ S/cm)
55	3750~4000
70	7350~7510



(a) 55m



(b) 70m

그림 8. 심도별 전기전도도 변동 양상(2007년 1월 1일~2007년 8월 26일);
2007년 6월 1일 이후 관측장비의 기계적 오류로 인해 분석에서 제외

4.1.1. 관측자료 기본 통계분석

지하수위, 수온 및 전기전도도 등의 장기관측자료는 시간적 연속성을 가지고 있는 시계열 변동자료로 대수층의 특징에 따라 변동 유형이 다양하게 나타나며, 특히 지하수위의 경우 대수층의 물리적 특성을 반영하는 중요한 요소로 활발히 연구되고 있다(이명재 외 2004; 이명재 외 2005; 이진용 외 2006; 송성호 외 2007).

본 연구에서는 관측자료의 통계적 특성을 파악하기 위해 2006년 4월부터 2007년 5월까지의 지하수위, 55m, 70m의 각 심도별 전기전도도자료에 대하여 기본 통계분석을 실시하였으며, 통계분석을 실시하기 위해 관측자료는 매 12시 정시에 측정된 자료를 이용하였다.

지하수위 변동에 영향을 미치는 가장 큰 요소는 강우로, 강우량에 따라 지하수위의 변동 폭은 크게 달라진다. 그러나 자연적인 요소에 해당하는 강우와 달리 대부분의 지하수관정의 위치는 거주지역이나 공장지대에 분포하고 있어 강우 보다는 인위적인 요소에 영향을 많이 받고 있다. 특히 해안가 일대의 지하수관정의 경우 조석이라는 자연적 요소의 영향을 받을 수 있으며, 인위적인 양수로 인해 지하수위 강하가 발생하기도 한다. 관측자료 분석결과 시계열도에서도 나타나듯이(그림 6), 연구지역의 경우 양수에 의한 지하수위 강하가 지배적으로 나타나고 있다. 측정기간 중 평균 지하수위는 TOC를 기준으로 10.486m, 최고 수위는 11.48m, 최저는 9.15m 이며 지하수위 변동 범위는 2.33m로 크게 변동하는 것으로 나타났다. 이는 측정 기간 중 발생하는 양수에 의해 인위적인 영향을 받아 지하수위가 순간적으로 하강하고, 양수가 종료 되면 다시 회복하기 때문이다.

전기전도도는 지하수위변동에 비해 변동 폭이 크고 불규칙적인 특징을 보인다. 각 심도별 전기전도도의 변동 폭을 보면 450 μ S/cm 이상을 나타내고 있으며, 55m은 612 μ S/cm, 70m은 494 μ S/cm의 변동 폭을 보이며, 지속적으로 상승하고 있다(그림 8). 그림 9는 지하수위와 각 심도별 전기전도도의 변화를 상자도표(box-whisker plot)로 나타낸 것으로 변동범위와 중앙값, 빈도 등을

한눈에 볼 수 있는 장점을 가지고 있다.

표 6. W2 관측점에서 지하수위, 전기전도도 통계 결과 값

	waterlevel ¹⁾	55m EC ²⁾	70m EC
Mean	10.49	3690.09	7,319.70
Std.	0.52	181.63	101.67
Max	11.49	3882.00	7,510.00
Min	9.15	3316.00	7,016.00
Range	2.34	566.00	494.00
Med.	10.62	3793.00	7,327.00

1) 단위: m, TOC를 기준으로 depth

2) 단위: $\mu\text{S}/\text{cm}$

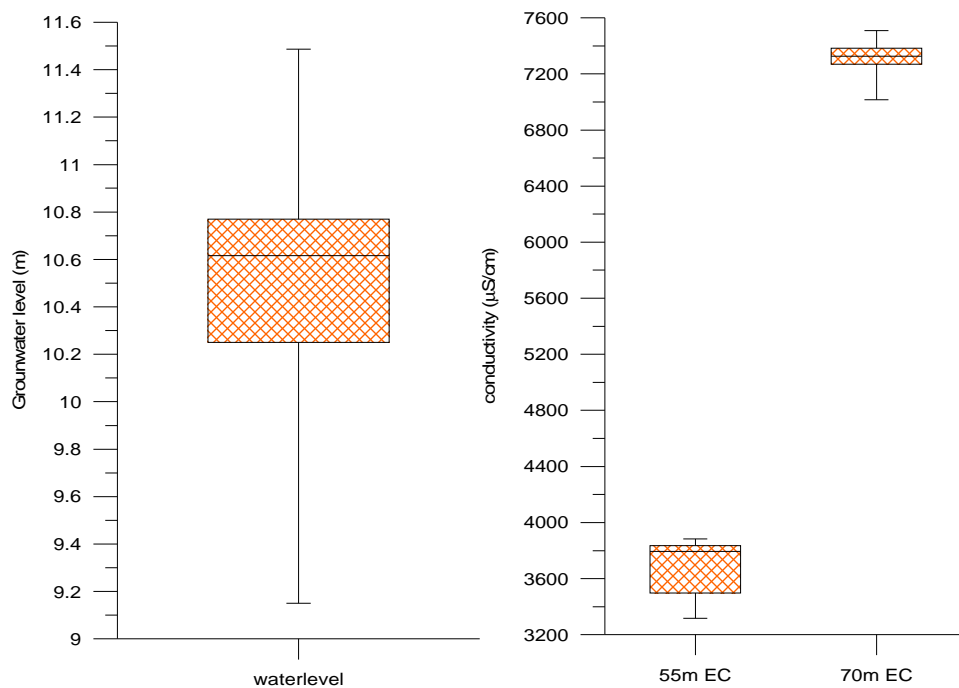


그림 9. 지하수위, 전기전도도 Box-Whisker plot

4.2. 관측자료 상관분석

시계열자료와 같이 일정한 연속적으로 관측된 자료에서는 상관분석을 위해서 자기상관분석을 수행한다. 자기상관분석은 관측시점별로 관측자료가 어느 정도 관련이 되어 있는지를 나타낸다. 교차상관분석은 두 시계열 자료 사이의 상관도를 알아보기 위한 시계열분석 방법이다. 교차상관함수는 두 시계열 자료들 사이의 어떤 특정한 관계에 대한 정보를 제공하여 시스템 내부의 상태를 파악하는데 유용하게 쓰인다. 교차상관분석은 연속된 관측자료를 이용해야 하기 때문에 관측자료 중 결측값이 존재하지 않아야 한다. 관측자료의 상관분석을 위해 기본통계자료 분석에서 이용한 매 12시 정시 자료와 6시간 간격 자료를 이용하여 상관분석을 실시하였다.

4.2.1. 관측자료 자기상관성분석

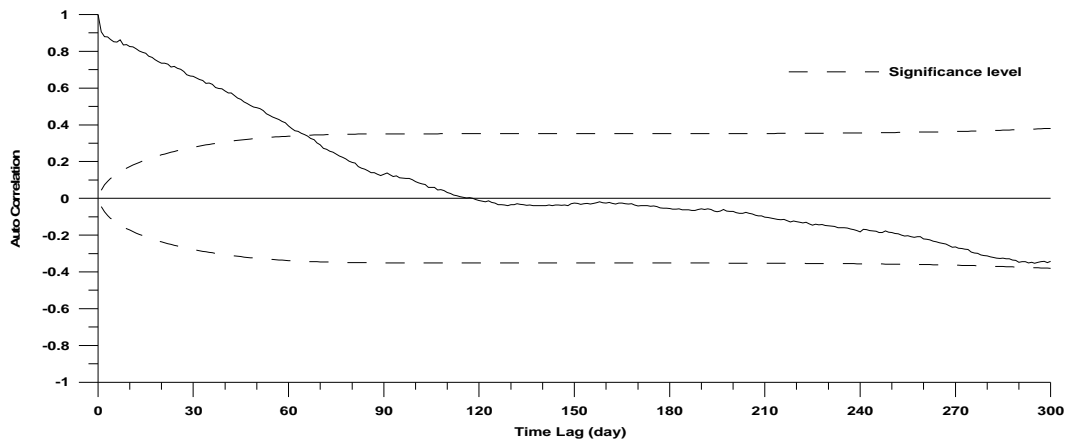
자기상관분석은 시계열특성 함수인 자기상관함수(ACF)을 이용하여 실시하며 자기상관도를 통해 표현된다. 시계열자료가 강한 자기상관성과 긴 기억효과를 가진다면 자기상관함수는 천천히 감소하는 경향을 보일 것이다. 이와 반대의 경우는 자기상관함수는 급격히 감소하는 경향을 보일 것이다(이진용와 이강근, 2002). 즉 시계열 자료가 시차(Lag time)별로 서로 어떤 상관성을 가지고 있는지를 나타내는 것으로 관측자료가 변동 주기를 가지고 있는지를 파악하는데 유리하고 시차에 따라 상관성이 없다면 낮은 상관도를 가진다.

강우, 지하수위, 전기전도도 자기 상관분석 결과는 그림 10과 같다. 강우의 자기상관함수는 급격하게 0에 수렴하고 있어 자기 선형성과 기억효과가 약하다. 이는 서로간의 상관성이 없고 강우는 사건성이 강하다는 것을 의미한다. 지하수위 자기상관계수는 시간지연(time lag)이 118일로 비교적 길지만 급격하게 감소하고 있다. 긴 시간지연에 지하수위는 자기 자신에 대해서 서로 상관성을 가지고 있고, 지속성을 가지고 있음을 의미한다. 해안가에 위치한 관정에도 불구하고 특별한 주기적인 변동이 보이고 있지 않다. 이는 지속적인 양수

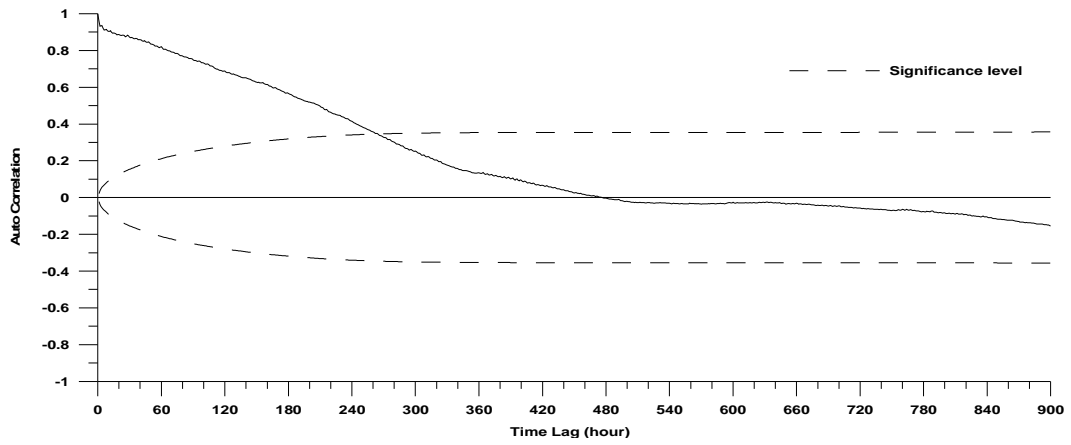
에 의한 급격한 지하수위의 하강과 회복과정으로 인한 대수층의 교란으로 인한 영향으로 보여 진다.

시 자료를 이용한 자기상관도(그림 10b)는 일 자료와 동일한 양상을 보이고 있다. 시간지연은 476시간으로 일로 환산하면 119일이 된다. 일 자료와 시 자료의 시간 지연은 1일차로 이는 매 12시 정시자료와 6시간 간격자료사이의 측정치 오차와 결측값 보정에 따른 오차로 인한 것으로 판단된다. 이처럼 자기상관함수를 이용하면 관측자료가 자기상관성을 가지고 있는지에 대해 정성적으로 판단 할 수 있다.

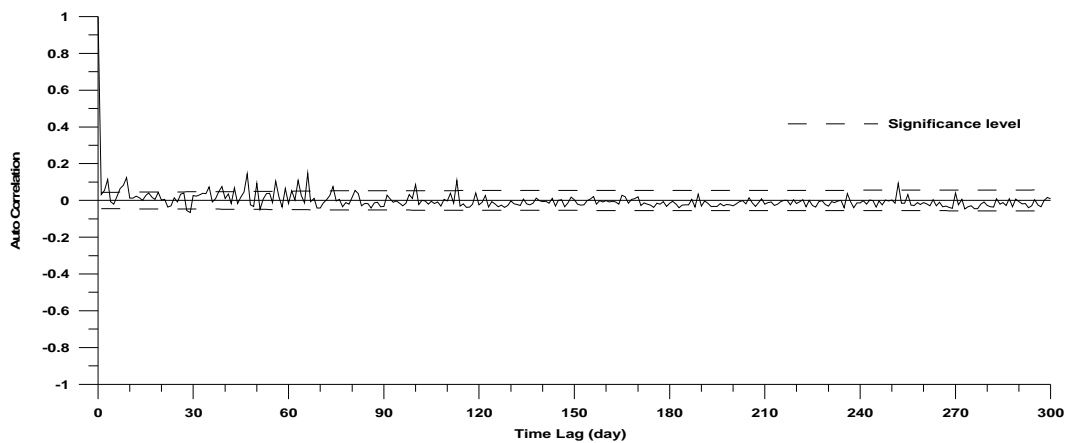
그림 11은 전기전도도의 자기상관도를 나타낸다. 55m 전기전도도는 180일의 시간 지연(time lag)을 보이며 완만한 곡선을 그리며 감소하고 있다. 이는 55m 전기전도도의 시계열도를 살펴보면 불규칙적인 변동 보다는 지속적인 변동양상을 보여 주고 있어 인접한 관측 값들의 상관성이 높게 된 경우이다(그림 7a). 시차 약 35일, 140일에서 변곡점이 존재 하는데 이는 양수 등 외부적인 요인으로 인한 전기전도도의 갑작스런 상승과 연관이 있는 것으로 판단된다. 그림 11(b)는 6시간 자료를 이용한 자기상관도이다. 일 자료와 동일한 변동 양상을 보이며 일 자료와 비교 시 좀 더 완만한 곡선을 그리며 감소하고 있다. 이는 매 12시 정시 자료와 달리 6시간 자료는 관측값들의 사이의 시차간격이 작기 때문에 관측값들 사이의 연관성이 강하게 나타나기 때문이다. 또한 시간 지연(time lag) 737시간으로 일로 환산 하면 약 184일이 된다. 일 자료에 비해 약 4일 정도의 차이를 보이는데 이는 측정치 오차와 결측구간의 보정으로 인한 오차로 인해 시간지연이 길어진 것으로 판단된다.



(a) 지하수위(일 간격 관측자료)



(b) 지하수위(6시간 간격 관측자료)



(c) 강우

그림 10. 지하수위와 강우 관측자료의 자기상관도; 점선은 유의수준(significance level) $\pm 2/\sqrt{n}$ 으로 표현되며, n은 시계열자료의 길이)

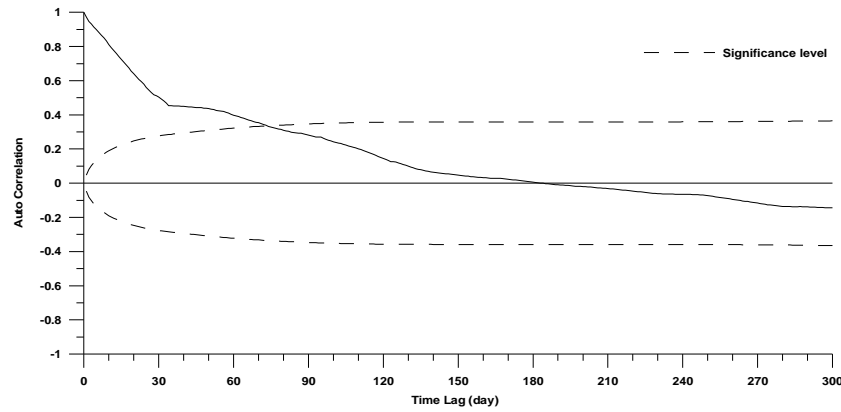
70m 전기전도도는 200일의 시간 지연(time lag)을 보이고 있다(그림 11c). 시차 35일, 55일, 90일 경에 변곡점이 나타나는데 이는 시계열도와 비교 해보면 이 기간 중에 전기전도도가 급격하게 변하는 것을 알 수 있다(그림 7b). 70m 전기전도도 역시 55m 와 동일하게 양수 등 외부적인 요인에 영향을 받는 것으로 보여진다. 또한 지하수위와 강우의 시계열도와 비교를 해보면 양수 시기와 대략적으로 일치함을 보여준다. 시 자료와 일 자료 모두 동일한 양상을 보이고 있으며 시간 지연은 792시간으로 일로 환산하면 198일로 일 자료와 2일 차이를 보이고 있다. 이는 앞에서 설명한바 있는 관측자료의 시간간격과 측정치의 오차, 결측값 보정으로 인한 오차로 인해 차이를 보이는 것으로 자기상관함수는 시차에 따라 측정치 상호간의 상관관계를 나타내기 때문에 이런 오차를 줄이기 위해서는 측정시간을 잘 고려해야 한다. 또한 결측구간을 최소화하여 결측치 보정에 의한 오차를 줄여야한다. 이 때문에 관측자료를 매 12시 정시에 관측한 자료와 6시간 간격으로 측정한 자료를 사용 하였으며, 이동평균법을 이용하여 결측치를 보정하였다.

지하수위와 전기전도도의 일 간격과 시 간격의 자기상관도는 특별한 주기성을 보이고 있지 않다. 특별히 조석에 의한 조차가 나타나고 있지는 않다. 이는 조석보다는 양수의 영향이 크게 나타난 것으로 보이며, 해안가에서 200m 이상 떨어져 있고 이 지역이 암반층으로 이루어져 있어 조석의 영향이 상대적으로 약하게 작용하고 있기 때문이다.

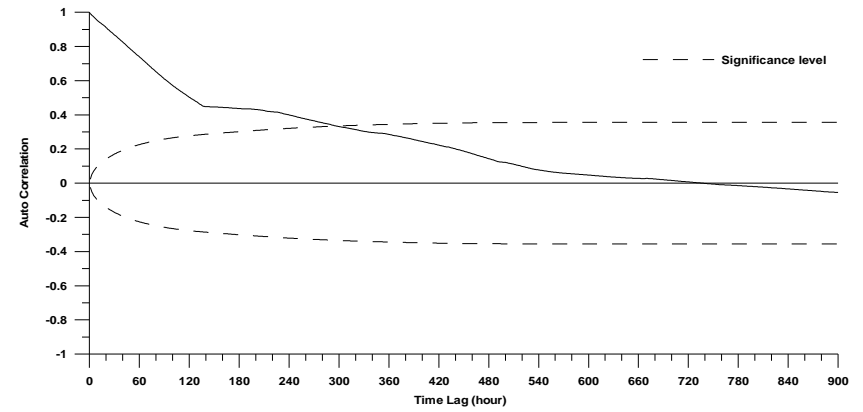
표 7. 지하수위, 전기전도도 관측자료 자기상관계수

	Time lag(day)	Time lag(hour)*
Waterlevel	118	476
55m EC	184	737
70m EC	197	792

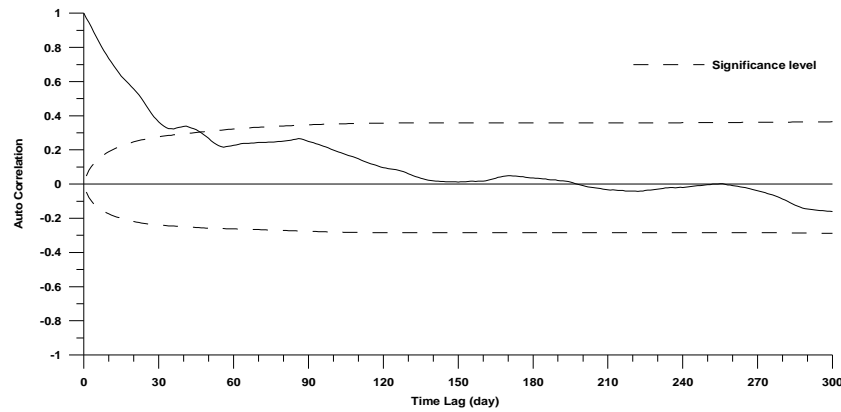
* 6 시간 간격 관측자료



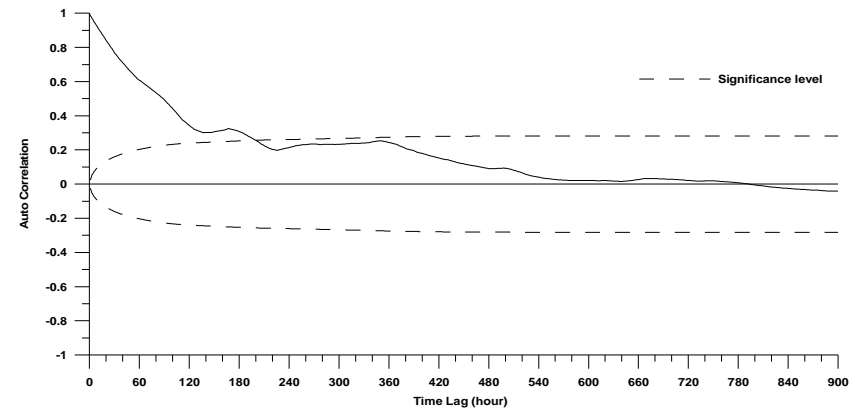
(a) 55m EC(일 간격 관측자료)



(b) 55m EC(6시간 간격 관측자료)



(c) 70m EC(일 간격 관측자료)



(d) 70m EC(6시간 간격 관측자료)

그림 11. 55m, 70m 전기전도도 관측자료 자기상관도

4.2.2. 관측자료 교차상관성분석

교차상관분석은 식(3)과 (4)를 이용하여 계산 하였다. 일반적으로 교차상관함수는 시간에 따라 연속된 두 매개변수 사이의 관계를 지시한다(Kim et al., 2000). 식 (3)과 (4)를 통해서 구해지는 교차상관계수는 입력 시계열(x_t)와 출력 시계열(y_{t+k})사이의 관계를 나타내며 주로 지하수 시스템에 가장 큰 영향을 주는 강우를 입력 시계열, 지하수위 변동을 출력 시계열로 선정하여 교차상관 분석을 통해 대상 시스템의 이해관계를 해석한다. 즉 두 확률변수간의 관련성의 정도와 방향에 대한 유용한 척도가 되므로 입력 시계열이 출력 시계열에 얼마나 선행하는지를 보여준다(김규범 외 2006). 교차상관계수는 $-1.0 \sim +1.0$ 사이의 범위를 나타내고 있으며 상관도가 높을수록 최고점(peak)에서의 교차상관계수 값이 크게 나타난다. 최대 교차상관계수에 도달하는 시간, 지체시간(delay time)은 입력 시계열이 출력 시계열에 최대로 영향을 끼칠 때의 시간을 의미한다.

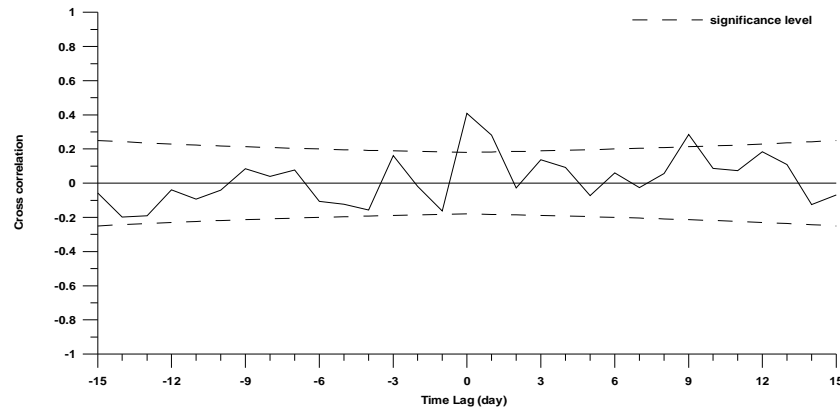
교차상관분석은 매 12시 정시를 기준으로 만들어진 일 자료와 6시간 간격으로 측정된 자료를 이용하여 강우와 지하수위, 전기전도도, 지하수위와 전기전도도 각각에 대하여 수행 하였다. 이중 강우와 지하수위의 경우 양수의 영향을 배제하기 위해 양수가 없는 구간인 2006년 6월부터 7월 한 달간의 자료를 이용하여 실시하였다.

4.2.2.1. 강우와 지하수위, 전기전도도 상관성 분석

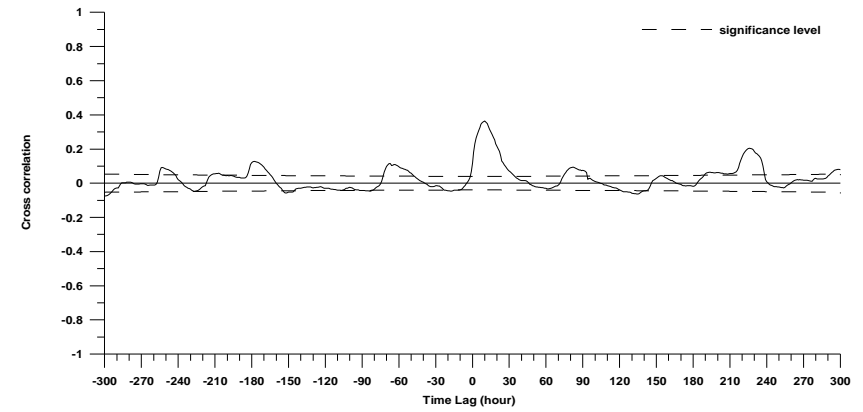
강우는 지하수위 변동에 자연적으로 영향을 주는 인자 중 가장 큰 인자이다. 지하수위와 강우의 시계열도를 보면 강우가 발생한 후 지하수위 변동은 급격히 증가한 후 점차 안정되는 양상을 보이고 있다. 전체 관측 기간 중 양수가 없는 2006년 6월부터 7월 구간은 강우로 인해 지하수위가 상승하는 양상을 보여주고 있다(그림 6a). 그림 12는 강우와 지하수위와 전기전도도의 상관관계를 보여주는 교차상관도이다. 강우와 지하수위의 경우 일 자료는 지체시간

(delay time)이 1일, 최대 교차상관계수는 0.40이며 1시간 자료에서는 9시간에 0.36으로 나타나 강우가 지하수위에 최대로 영향을 주는 시간은 1일 이내로 강우가 지표층을 통해 대수층으로 빠르게 유입됨을 알 수 있다. 일 자료와 시 자료의 교차상관계수의 차이는 매 12시 정시 자료와 1시간 자료의 측정치 오차와 결측구간의 보정과 관련 오차로 인해 차이가 나는 것으로 판단된다. 전체 관측자료를 살펴보면 본 연구지역은 지속적인 양수가 이루어지고 있으며, 부분적으로 결측구간이 존재하여 전체 관측기간 중 양수와 결측구간이 없고 강우의 영향만을 고려한 상대적으로 적은 기간에 대한 상관도를 나타낸 것으로 전체 관측기간에 대하여 일반화하기 어렵다. 그렇지만 이러한 강우와 지하수위의 교차상관도는 강우에 의하여 지하수위가 변동하고 있음을 지시하고 있다.

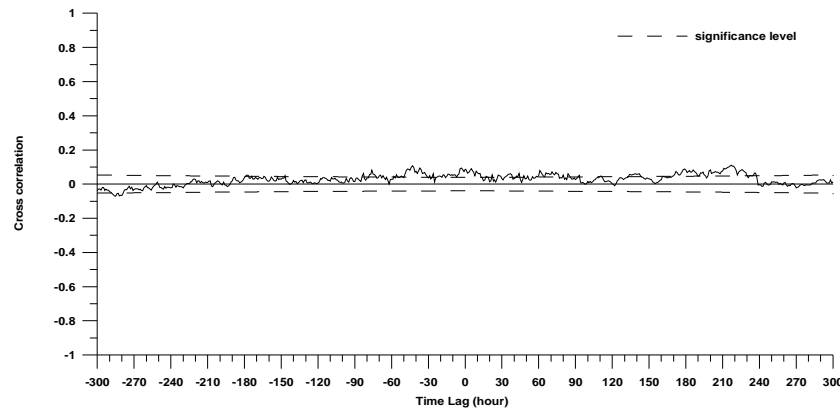
강우와 전기전도도의 교차상관도를 보면(그림 12c, 12d) 교차상관계수가 유의 수준보다 작으므로 강우와 55m, 70m 심도의 전기전도도 사이에 교차상관계수는 유의하지 않아 서로 상관관계가 없음을 지시한다. 그렇지만 강우의 경우 지하수위와 교차상관분석 결과에서 알 수 있듯이 casing 구간인 지표 하 24m 내외의 불포화대를 따라 빠르게 유입 되므로 암반으로 이루어진 55m와 70m 심도까지 도달하는데 걸리는 시간 즉 불포화대 아래 존재하는 암반 절리를 통해 이동하는 시간, 즉 강우스트레스의 전파거리가 증가하여 시계열 특성 신호 전달이 느려졌고 또한 이동하는 동안 스트레스가 감소되어 나타나는 현상으로 파악된다. 그리고 심도별 전기전도도 변화 양상(그림 5)을 보면 55m와 70m 구간에 전기전도도의 증가는 이 구간에 절리를 따라 해수 침투가 이루어지면서 해수의 유입량이 강우 침투량보다 상대적으로 크기 때문에 강우의 영향이 작아 질 수 있다.



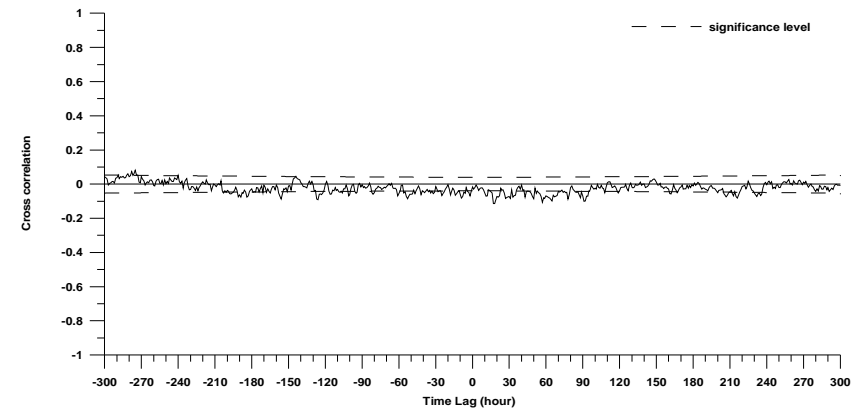
(a) 강우와 지하수위 (일 자료)



(b) 강우와 지하수위 (시 자료)



(c) 강우와 55m 전기전도도(시 자료)



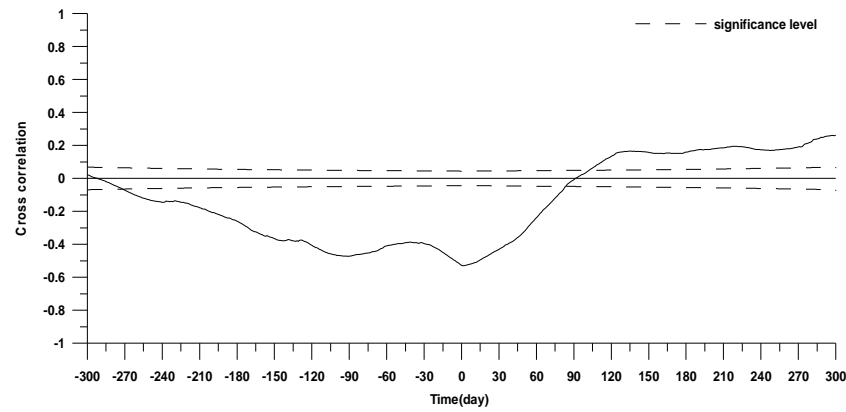
(d) 강우와 70m 전기전도도(시 자료)

그림 12. W2 관측점에서 강우와 지하수위, 전기전도도 교차상관도

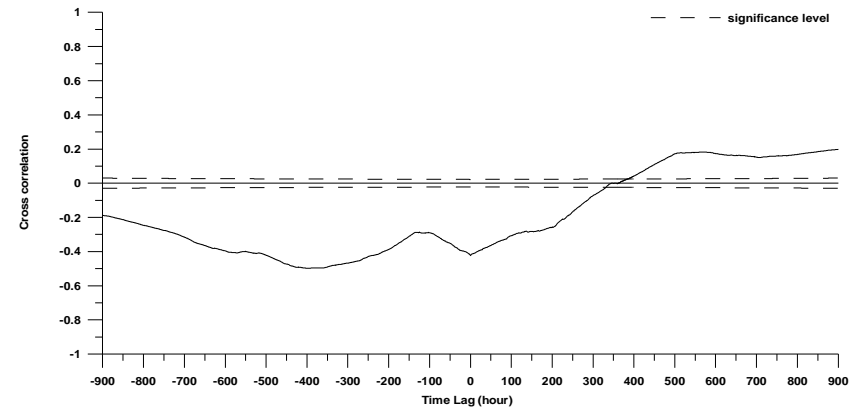
4.2.2.2. 지하수위와 전기전도도 상관성분석

인위적인 요인인 양수에 의한 지하수위 변동이 전기전도도에 미치는 영향을 알아보기 위해 지하수위를 input, 전기전도도를 output으로 하여 교차상관 분석을 시행 하였다. 정확한 양수주기와 양수량 파악이 불가능하기 때문에 지하수위 변동 양상 시계열도를 이용하여 양수여부를 판단 후 양수가 전기전도도에 미치는 영향을 파악 하였다. 단순히 지하수위 시계열도와 전기전도도 시계열도를 비교해보면 지하수위의 경우 지속적인 양수로 인해 지하수위가 강하가 일어나고 있는 것을 볼 수 있다(그림 6). 전기전도도 역시 양수가 일어나는 구간에서 급격히 상승하는 양상을 보이고 있어 전기전도도 변동 양상은 지하수위 변동 양상과 관련이 있을 가능성이 있다(그림 7). 지하수위와 전기전도도의 상관관계를 알아보기 위해 1시간 간격으로 관측한 시계열 자료 중 매 12시 정시에 관측한 자료와 6시간 간격 자료를 이용하여 분석을 시행 하였다.

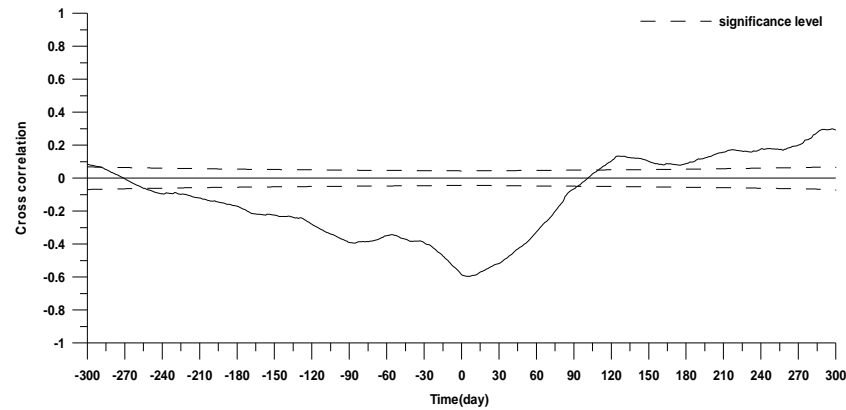
그림 13은 전체 관측기간에 대한 지하수위와 전기전도도 교차상관도를 나타내고 있다. 교차상관도를 보면 음의 상관관계를 나타내고 있다. 교차상관도가 음의 상관관계는 두 변수의 추세 방향이 다른 것을 의미한다. 지하수위와 전기전도도의 시계열도를 보면 지하수위는 하강 추세를 가지고 있고 전기전도도는 지속적인 상승 추세를 가지고 있다. 이러한 이유로 인해 지하수위와 전기전도도는 음의 상관을 보이며, 교차상관도에서 유의 수준을 넘어서고 있어 지하수위와 유의미한 상관관계를 보이고 있어 전기전도도는 지하수위 하강과 관련이 있는 것으로 보인다. 이는 인위적인 요인인 양수로 인한 지하수위 하강으로 인해 전기전도도가 상승했음을 설명 할 수 있으며, 이를 통해서 양수로 인한 해수침투 여부를 판단 할 수 있다. 시 자료와 일 자료의 교차상관도는 동일한 변동 양상을 보이고 있다.



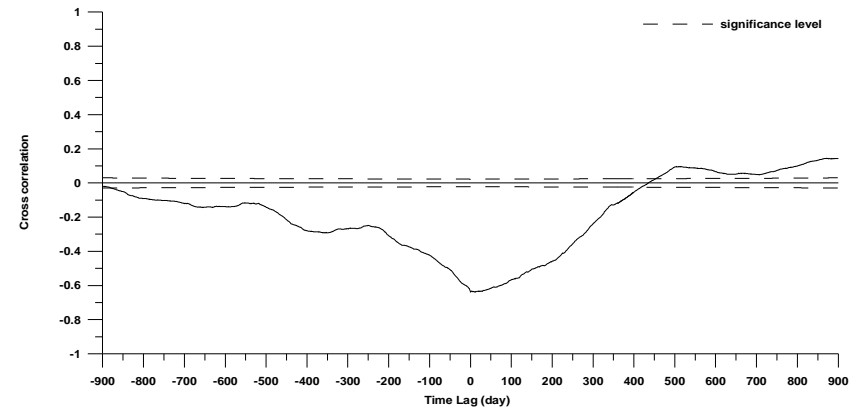
(a) 지하수위와 55m EC(일 자료)



(b) 지하수위와 55m EC(6시간 자료)



(c) 지하수위와 70m EC(일 자료)



(d) 지하수위와 70m EC(6시간 자료)

그림 13. W2 관측점에서 지하수위와 55m, 70m 전기전도도 교차상관도

양수에 의한 영향과 해수침투와의 상관성에 대해 좀 더 분석을 하기위해 양수에 의한 지하수 하강이 집중된 구간인 2006년 9월 19일부터 11월 26일까지 구간의 자료를 이용 교차상관 분석을 실시하였다. 양수의 의한 지하수 하강이 일어나는 구간은 양수에 의한 지하수위 하강을 관찰하기 위해 1시간 간격의 자료를 이용하였다(그림 14).

매 12시에 관측된 정시 자료와 동일하게 음의 상관관계를 보이고 있으며 최대 교차상관계수는 55m의 경우 지연 시간 29시간에 -0.25, 70m의 경우 지연 시간 11시간에 -0.61을 보이고 있다. 70m와 55m의 교차상관계수를 비교해 보면 70m에서 지하수위에 따른 해수의 영향이 높게 나타나고 있으며 지연 시간도 55m에 비해 18시간이상 빠르게 나타나고 있다. 지하수위와 전기전도도 사이의 최대교차상관계수와 지연시간은 표 8에 정리 하였다.

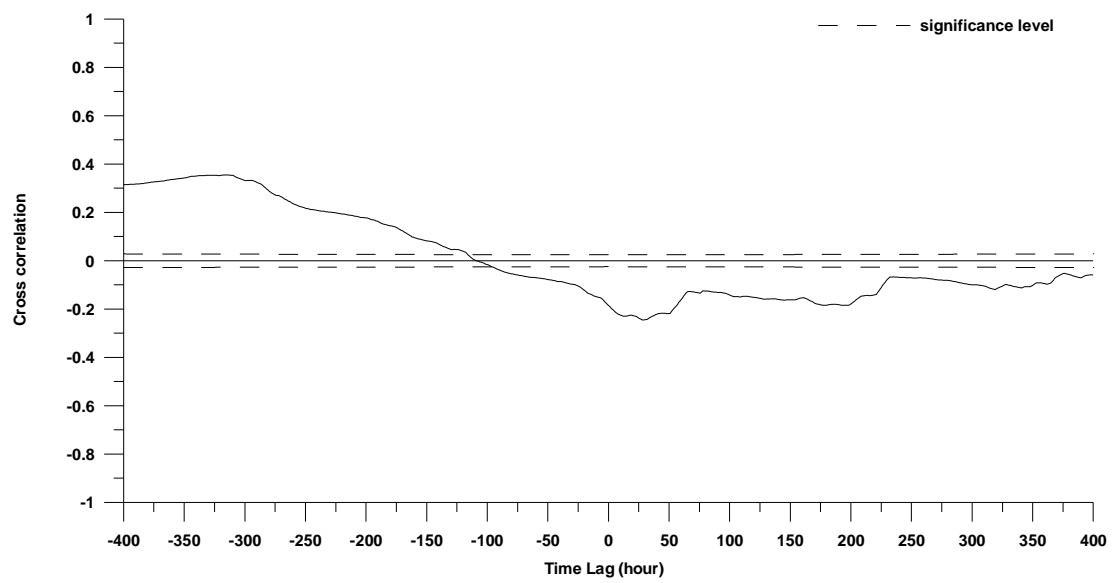
표 8. 지하수위와 심도별 전기전도도 교차상관 분석 결과

	Groundwater level ¹⁾		Geoundwater level ²⁾	
	Time lag (day)	Crossco. ³⁾ Coeff.	Time lag (hour)	Crossco. Coeff.
55m EC	1	-0.46	28	-0.25
70m EC	1	-0.64	11	-0.61

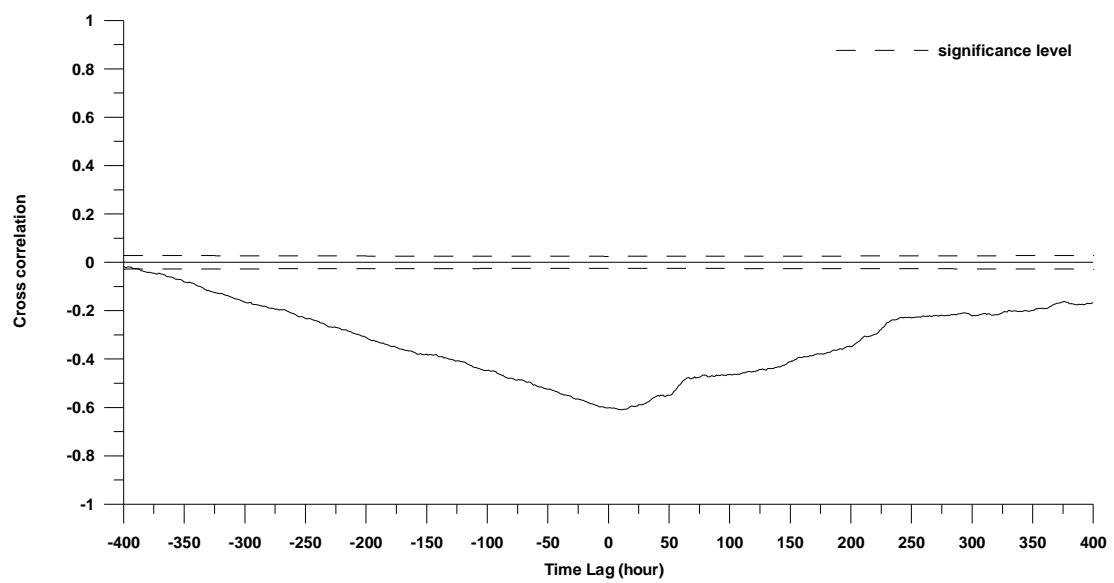
1) 일 자료

2) 양수기간(2006년 9월 19일~2006년 11월 26일) 1시간 관측자료

3) 교차상관계수(crosscorrelation coefficient)



(a) 지하수위와 55m 전기전도도



(b) 지하수위와 70m 전기전도도

그림 14. 양수구간에서 지하수위와 55m, 70m 전기전도도 교차상관도

4.2.2.3. 조석과 지하수위, 전기전도도 상관성분석

조석은 달, 태양 등 지구 주변에 존재하는 천체의 인력작용에 의해 해수면이 주기적으로 상승, 하강하며 바닷물이 해안가로 밀려오고(밀물) 나가는(썰물) 하는 현상을 말한다. 조석현상으로 해수면이 상승하는 상태를 만조, 하강하는 상태를 간조라 하며 만조에서 만조, 간조에서 간조 사이의 시간을 조석 주기라고 한다. 일반적으로 반일주조의 경우 약 12시간 25분의 주기를 갖는다(한국농촌공사, 2005a).

연구지역인 서해안 일대는 평균적으로 3~7m의 조차를 보이고 있으며, 연구지역의 경우는 약 5~6m 정도의 조차를 보이고 있다. 그림 15는 지하수위와 조석의 변동양상을 비교하기위해 양수와 강우의 영향이 없는 2006년 12월 1일부터 2007년 1월 31일 까지 관측 자료를 이용하여 나타낸 시계열도이다.

조석 자료는 전남 목포시 위치한 목포조위관측소(34-46-36N, 126-22-39E)에서 제공하는 1시간 자료를 사용 하였다.

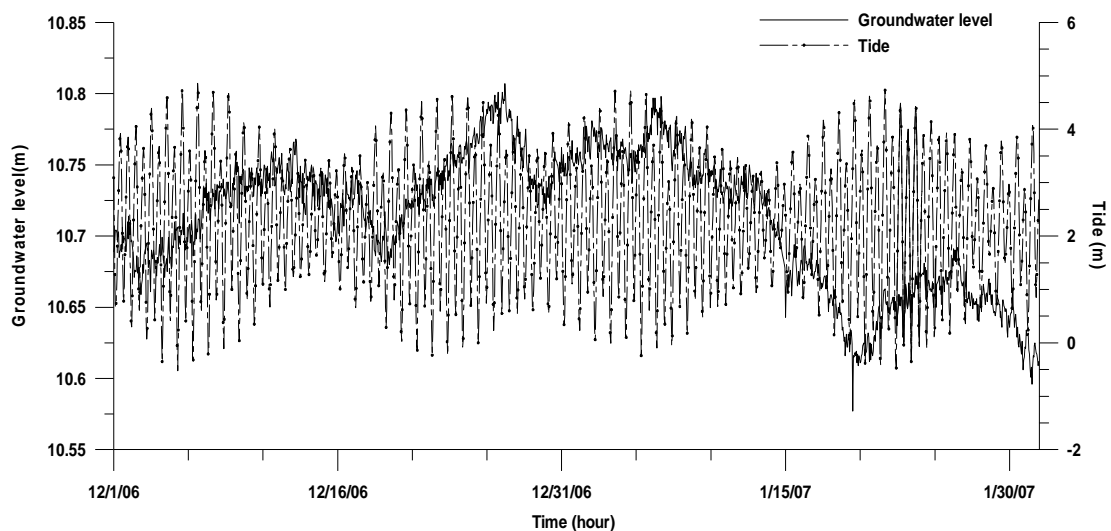
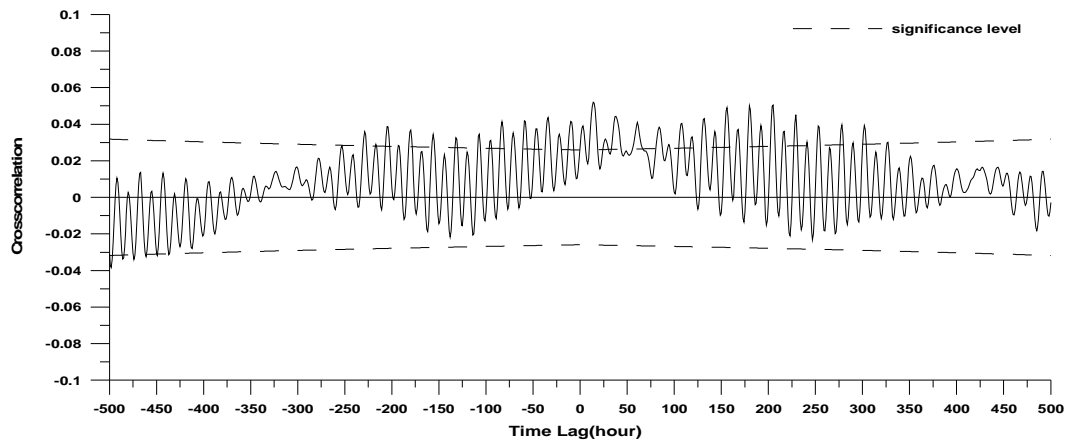


그림 15. 2006년 12월 1일~2007년 1월 31일 까지 조석과 지하수위 시계열도
(1시간 간격)

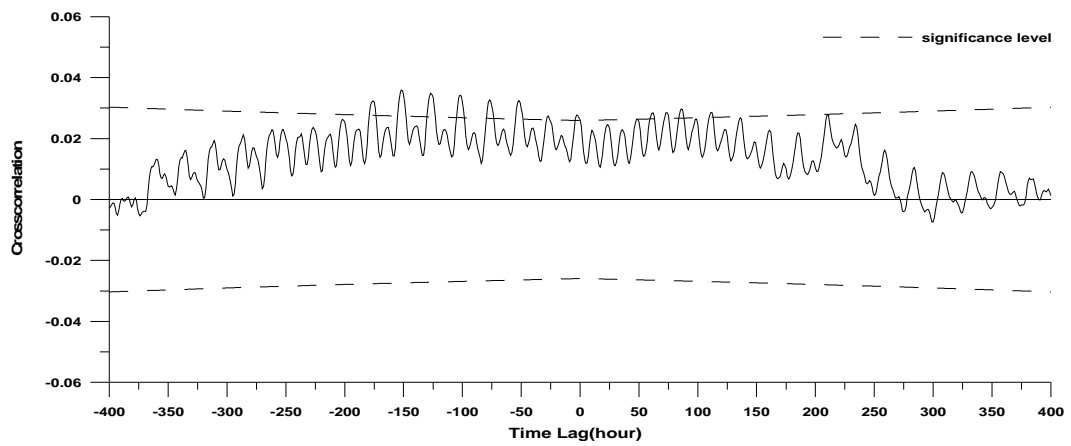
해안가 대수층은 조석에 상당한 영향을 받고 있기 때문에 조석에 의한 지하수위 변동에 관한 연구가 이루어졌으며, 특히 조석반응 분석법(tidal response technique)을 통해 대수층의 수리인자를 산정하는 연구가 행하여졌으며, 이런 연구들에서 시계열 분석법 중의 하나인 교차상관함수가 이용되었다(김구영 외 2005; 심병완 외 2004). 본 연구 지역 역시 조석과 지하수위, 전기전도도의 상관성을 파악하기 위해 양수의 영향이 나타나지 않는 2006년 12월 1일부터 2007년 1월 31일 까지 1시간 간격 관측 자료를 이용하여 교차상관분석을 실시하였다.

1시간 간격으로 관측된 지하수위와 조석의 시계열도를 보면 지하수위의 변동이 조석의 변동 폭에 비해 작게 나타나고 있어 어느 정도 상관성은 보이지만, 큰 상관성은 없어 보인다(그림 15). 이는 교차상관도를 통해 잘 나타나고 있다(그림 16). 교차상관분석결과 최대 교차상관계수가 0.1을 넘지 않고 있어 매우 낮은 상관성을 보이고 있다. 그러나 주기는 다소 불규칙하나 조석의 변동 주기와 대체로 일치하고 있다. 조석의 변동 주기와 일치하고 있으나 상관계수 값이 매우 작게 나오는 이유는 해안가와 거리가 200m 이상 떨어져 있으며, 타 지역의 해안가 대수층과 달리 암반으로 이루어져 있어 절리를 통해 이동하는 과정에서 조석의 압력파의 속도, 진폭, 파장의 감쇠가 일어나기 때문인 것으로 판단된다. 해안가 대수층의 경우 지하수는 조석의 영향을 받아 상승과 하강을 반복하는데 이런 현상은 조석변화에 의한 압력파(pressure wave)의 전달에 의해 생성되며, 이러한 압력파는 특히 자유면 대수층의 경우 대수층의 공급 내 물이 채워지거나 빠지는 현상에 의해 저유량의 변화에 의해 생성되고, 피압대수층의 경우 유체압(fluid pressure)의 변화에 의해 생성된다. 이러한 특성을 지니고 있는 압력파의 속도, 진폭, 파장 및 감쇠는 조석의 주기, 진폭, 대수층의 특성, 해안가의 거리등에 의해 영향을 받는다(Ferris, 1951; 김구영 외 2005; 심병완 외 2004).

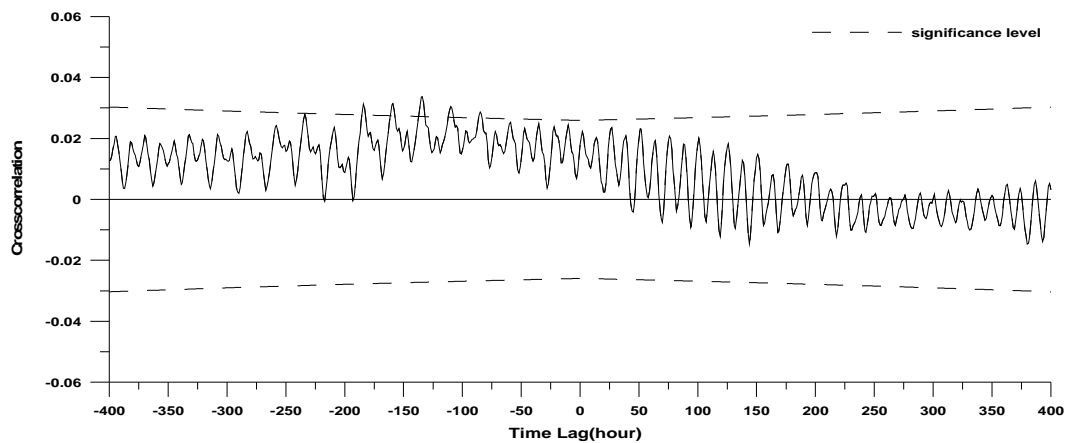
본 연구지역은 화강편마암으로 구성 되어 있으며, 대수층 시험에서 수리전도도와 저류계수 또한 암반대수층과 자유면대수층의 특성을 보이고 있으며(표 3), 해안가의 거리차로 인해 조석의 압력파가 상대적으로 작아져 상관계수가 높지 않은 것으로 판단된다.



(a) 조석과 지하수위



(b) 조석과 55m 전기전도도



(c) 조석과 70m 전기전도도

그림 16. 조석과 지하수위 교차상관도 관측기간 2006년 12월 1일~2007년 1월 31일 1시간 자료

김제와 제주도 지역에서 행해진 연구와 비교해 보면, 김제 지역은 간척지에 해당하며 대수층이 존재하는 구간의 매질은 조립질 모래(coarse sand)로 구성되어 있어 수리전도도가 크게 나타나고 있으며($1.1 \times 10^{-3} \sim 2.6 \times 10^{-5}$ m/sec), 해안가에서 약 60m 떨어진 곳에 위치하고 있어 본 연구지역과 달리 교차상관계수 0.3이상의 높은 상관관계수 값을 보이고 있다(Kim et al. 2005). 제주도의 경우 기존의 연구에서 제주도 동부 지역의 경우 해안가에서 약 3~5km 이상까지 조석의 영향이 나타나고 있으며 해수침투의 영향이 약 8km 지역까지 나타나고 있음이 밝혀졌다. 이는 제주도의 경우 다공질 매체인 현무암으로 이루어져 있고 섬이라는 특수한 환경으로 인한 것으로 판단된다(김구영 외 2005; Kim et al. 2006).

전체적으로 본 연구지역의 전기전도도의 변동 양상은 조석의 영향보다는 지하수위의 변화 즉 외부적인 요인인 양수의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 또한 다른 해안가 대수층과 달리 암반 대수층으로 이루어져 있어 기존의 연구결과와 다른 양상을 보이고 있음을 알 수 있다. 표 9는 모든 교차상관 분석 결과를 정리하였다.

표 9. 관측자료 교차상관 분석 결과

	Rainfall		Groundwater level		Tidal	
	Time lag (hour)	Crossco. Coeff.	Time lag (day)	Crossco. Coeff.	Time lag (hour)	Crossco. Coeff.
Groundwater level	10	0.36	-	-	24	0.06
55m EC	-	-	1	-0.46	24	0.03
70m EC	-	-	1	-0.64	-	-

4.3. 관측자료 경향성 분석

관측자료의 경향성 분석을 위해 모수적 통계 방법인 선형 추세분석(linear trend analysis)을 이용하여 지하수위와 전기전도도 일 자료에 경향성을 파악 하였다. 추세분석은 시계열 모형 중의 하나로 관측자료의 변동 유형 판단과 변동률지시에 이용되며 일반적인 시계열 예측을 가능하게 한다(한국농촌공사, 2005c). 이러한 이유로 시계열 모형을 적용한 예측과정에서 유용한 정보를 제공 한다.

4.3.1. 선형 추세분석(linear trend analysis)

일반적으로 시계열 예측(forecasting)은 일정 기간 동안 자료의 시계열 특성을 반영한다. 즉 시계열 자료들의 통계적 추세를 반영한다. 어떤 관측자료가 증가하거나 감소하는지에 대한 경향성을 판단하기 위해 적절한 직선 식을 부합하여 기울기를 보고 평가한다(이진용 외, 2006).

선형 추세 또는 선형회귀(linear regression)분석의 개념은 통계적으로 최소자승법(least square)을 이용하여 관측 시계열에 직선식을 적합한 것으로 이 직선식을 추세선이라고 부르며, 이때 추세선이 잘 부합하는지의 판단은 결정계수(R^2)로 나타낸다. 결정계수는 회귀제곱합을 총제곱합으로 나눈 값으로 다음과 같이 표현된다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (18)$$

$$SST(\text{총제곱합}) = \sum (y_i - \bar{y})^2$$

$$SSE(\text{오차제곱합}) = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$SSR(\text{회귀제곱합}) = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$$

여기서 총제곱합(SST)는 오차제곱합(SSE)와 회귀제곱합(SSR)의 합이다. y_i 는

관측값, x_i 는 시간, a 는 y절편, b 는 기울기, e_i 는 백색잡음 과정, \bar{y} 는 관측값의 평균, \hat{y}_i 는 선형식으로 추정한 값이다.

선형회귀식은 다음과 같이 표현된다.

$$y_i = a + bx_i + e_i \quad (19)$$

$$y_i = a + bx_i \quad (20)$$

식(19)는 단순회귀모형을 나타내며, 식(20)은 단순회귀모형을 회귀식으로 표현한 것이다. 선형회귀분석은 식(20)을 이용하여 실시한다. 추세분석에는 매 12시 정시 자료를 이용하였다.

표 10은 관측된 자료에 대하여 선형추세를 적용한 결과이다. 대체적으로 지하수위는 초기에는 상승을 하지만 전반적으로 하강 경향을 전기전도도는 지속적인 상승 경향을 보이고 있다.

표 10. 관측자료 선형추세분석 결과

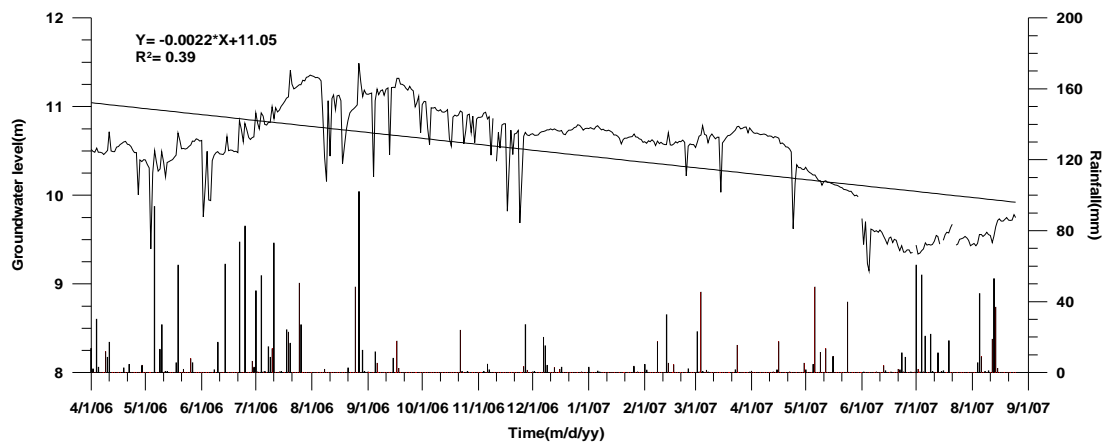
	Slop a (m/day)	Intercept b	R ²	yearly fluctuation (m/year)	Estimation
Groundwater level	-0.0022	11.05	0.390	-0.803	Down
55m EC	1.21	3422.4	0.837	441.65	Up
70m EC	0.74	7150.0	0.745	270.10	Up

그림 17은 지하수위 및 55m, 70m 전기전도도의 선형추세선을 나타내고 있다. 지하수위는 관측 초기 2006년 4월부터 9월 중순까지는 지속적인 강우의 영향으로 인해 상승 하고 있지만, 양수량이 증가는 2006년 9월 중순 이후에는 양수로 인한 지하수위 변동 폭이 커져 지하수위가 하강하고 있음을 볼 수 있다. 2006년 9월부터 12월 까지 지속적인 양수와 강수량의 감소로 인해 전체적인 변동 양상은 하강 추세를 보이고 있다. 지하수위 추세식의 기울기는 -0.0022로 음의 기울기를 가지며, 결정계수(determination coefficient R²)는

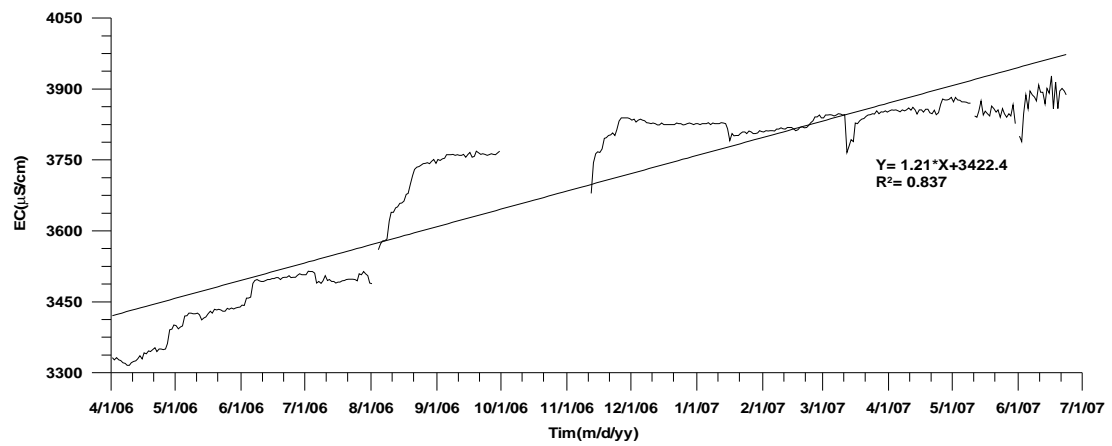
0.390으로 비교적은 작은 값을 나타내고 있다. 지하수위는 연간변동률이 -0.803m/year 로 연간 약 80cm 정도 지하수위가 하강하는 것으로 나타났다.

전기전도도는 지속적인 상승 추세 경향을 보이고 있으며, 결정계수가 0.5이상으로 높은 적합성을 보이고 있다. 전반적으로 지하수위의 영향으로 인해 전기전도도가 상승한다고 판단된다. 이는 앞 절에서 설명한 교차상관 분석 결과에서 잘 나타나고 있다. 55m 전기전도도의 추세선의 기울기는 1.21로 양의 기울기를 보이며, 결정계수는 0.837로 높은 값을 보이고 있다. 70m 전기전도도의 경우 기울기는 0.74, 결정계수는 0.745로 나타났다. 연간변동률은 55m의 경우 $441.65\mu\text{S/cm/year}$, 70m의 경우 $270.10\mu\text{S/cm/year}$ 로 나타났다. 전기전도도와 지하수위의 기울기를 비교해 보면 기울기가 클수록 결정계수가 높은 것을 볼 수 있다.

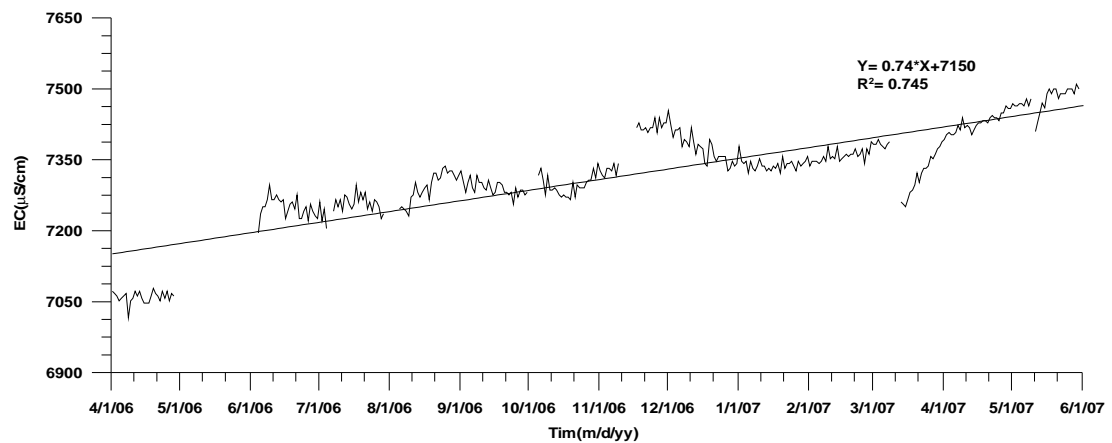
또한 지하수위와 같이 인위적인 원인 보다는 자연적인 원인에 의해서 시간에 따라 천천히 변동이 일어나므로 그 기울기는 작을 수 있다. 본 연구 지역의 경우 자연적인 원인과 양수로 인한 인위적인 요인의 복합으로 인해 지하수위 변동이 일어나고 있어 추세식의 기울기가 작고 결정계수 또한 작다. 반면 전기전도도의 경우 기울기가 크고 결정계수 또한 크게 나오고 있어 양수에 의한 인위적인 요인으로 인해 전기전도도의 변동이 상승하고 있음을 나타낸다.



(a) 지하수위



(b) 55m EC



(c) 70m EC

그림 17. 일 관측자료를 이용한 선형 추세분석 결과

5. 시계열모형을 통한 경향성 판단

시계열모형이란 시간의 흐름에 따라 일정한 순서대로 관측되는 관측자료인 시계열 자료(time series data)에 대한 통계적인 분석을 통해 시계열 자료의 모형을 만드는 것을 의미한다. 이러한 시계열 모형은 종종 지하수위 자료를 평가하기 위한 물리적 모형으로 활용되며, 불확실한 대상 시스템의 통계적인 시뮬레이션이나 예측(forecasting)을 위한 경험적 모형이다(Kim et al., 2005).

시계열모형을 이용하여 지하수위변동과 전기전도도의 변화를 예측하였다. 모형선정 및 ACF, PACF, 모수추정, 모형의 적합성 분석은 SPSS 통계패키지를 사용하여 모형을 선정하고 선정된 모형을 가지고 예측을 수행 하였다. 시계열모형 적용을 위해 결측값이 없는 구간을 선택하였다.

5.1. 시계열모형

대표적인 시계열모형인 ARIMA 모형은 단변량 시계열모형으로 하나의 변수만을 사용한다. 또한 관측된 시계열 자료가 주기성을 가지고 있거나 계절적인 변동이 나타나면 계절형 ARIMA 모형을 적용한다.

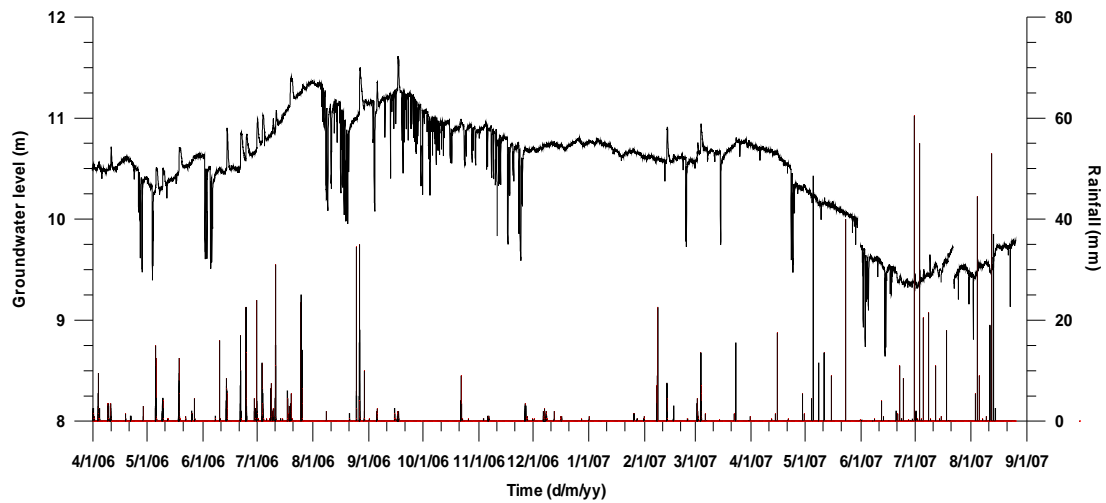
관측된 시계열자료는 여러 외부적인 요인에 영향을 받게 되는데 이러한 외부적인 요인을 고려한 시계열 모형으로는 전이함수 잡음 모형(transfer-function noise model)으로 이는 다변량 시계열모형에 해당한다. 특히 TFN 모형은 지하수 시스템에서는 강우 등 외부적 요인으로 인해 지하수위 변동이 영향을 받기 때문에 지하수위 변동을 평가하는데 유용한 시계열모형 중에 하나이다(Kim et al., 2005; Van Geer et al., 1997; Yi, 2001; Yi and Lee, 2004).

5.2. 시계열모형 적용

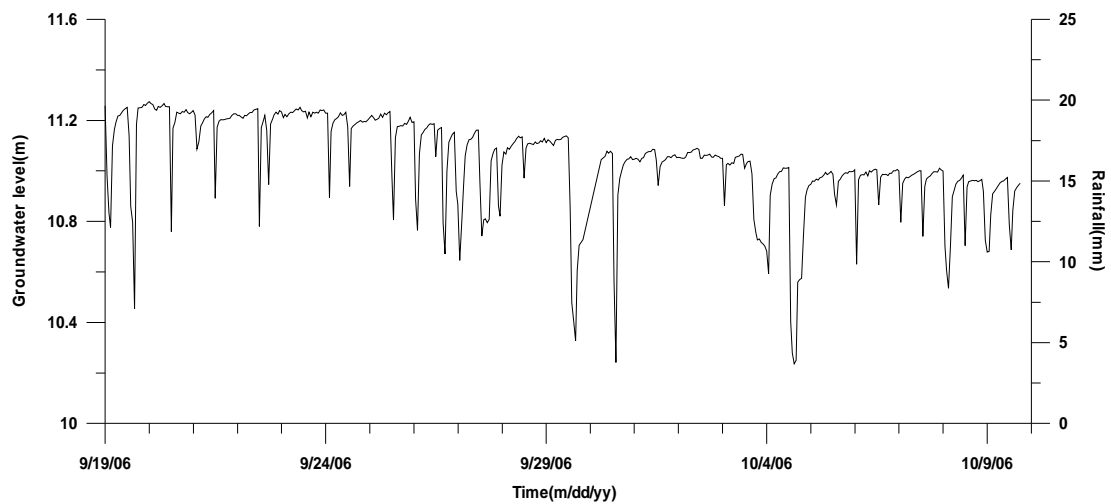
시계열분석과 같은 통계분석의 기본적인 전제는 과거의 추세적인 변동 패턴이 현재, 미래에도 유지되는 것이다. 이는 시계열모형에서도 적용된다. 그러나 지하수위 변동에서 인위적인 양수로 인하여 지하수위가 변동된 경우에는 이러한 기본 가정이 위배된다(그림 18). 하지만 양수량에 대한 정확한 현장 정보가 있다면 TFN 모형을 이용하여 양수량에 대한 지하수위 변동을 예측할 수 있을 것이다. 그러나 일반적으로 농업이나 현장에서 사용하는 양수량은 그 주기가 불분명하고 양수량 또한 불분명하므로 정확한 현장 정보를 얻기가 어렵다.

또 다른 지하수위변동에 원인인 강우의 경우는 강우를 입력 시계열, 지하수위를 출력 시계열로 하여 TFN 모형을 적용할 수 있다(그림 19). 전체 관측자료 중 지하수위변동의 경우 강우의 영향을 받는 구간을 선정 하였으며, 전기전도도의 경우 비교적 규칙적인 변동양상을 보이므로 시계열모형의 기본적인 조건을 만족하는 구간을 선택하여 시계열 모형을 적용하였다.

본 연구지역의 경우 1시간 간격으로 자료를 측정하였기 때문에 1시간 주기, 1일 주기, 일평균 등 원하는 다양한 형태로 관측자료를 조합할 수 있다. 관측자료의 조합은 시계열분석의 목적에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어 장기간의 변동자료를 분석할 경우 1일 주거나, 일평균을 사용하는 것이 유리하다. 이는 불필요한 계산이나 전체적인 자료의 경향성을 분석하는데 유리하기 때문이다. 하지만 관측자료가 시 단위로 크게 변동을 하거나 단기간의 관측자료를 분석하거나 예측할 경우 1시간 주기로 분석할 필요가 있다. 이런 자료들을 일평균을 이용하면 자료들이 lump 되는 현상 때문에 오차가 커질 수 있다(한국농촌 공사, 2005c; 이진용·이강근, 2002).



(a) 지하수위 장기관측자료 시계열도



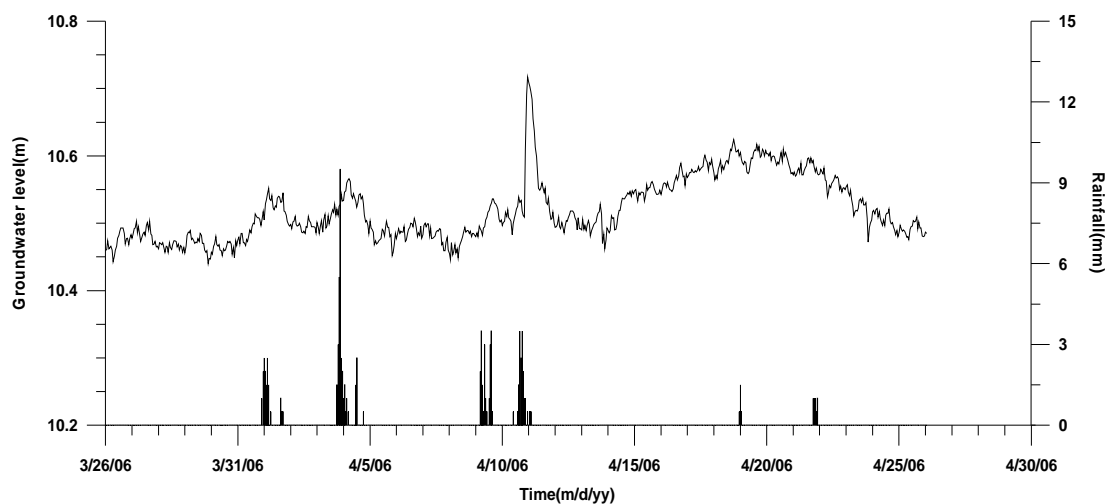
(b) 2006년 9월 19일~2006년 10월 12일 양수구간 지하수위 변동

그림 18. 관측기간 중 지속적인 양수로 인한 지하수위 변동 시계열도

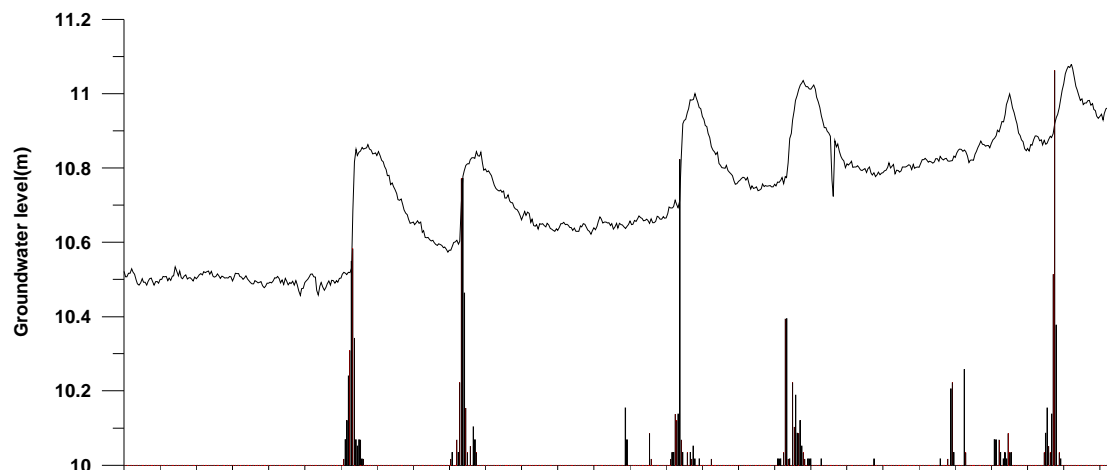
일반적으로 양수에 의한 지하수위 하강은 정확한 양수량과 양수 시간을 알아야 시계열모형에 적용할 수 있으나, 본 연구 지역의 경우 정확한 양수량과 양수시간을 알 수 없고 매우 불규칙적이기 때문에 양수에 의한 영향은 시계열 모형 선정에서 제외하였다.

본 연구에서는 시계열모형을 적용하기 위해 관측자료 중 시계열모형의

가정에 부합하는 구간을 선정하여 시계열모형을 적용하였다. 지하수위의 경우 시계열도와 교차상관분석 결과를 바탕으로 강우의 영향을 받는 구간(그림 19), 전기전도도의 경우 결측값의 영향과 변동 특성을 고려하여 모델적용구간을 선정하였다(그림 20).

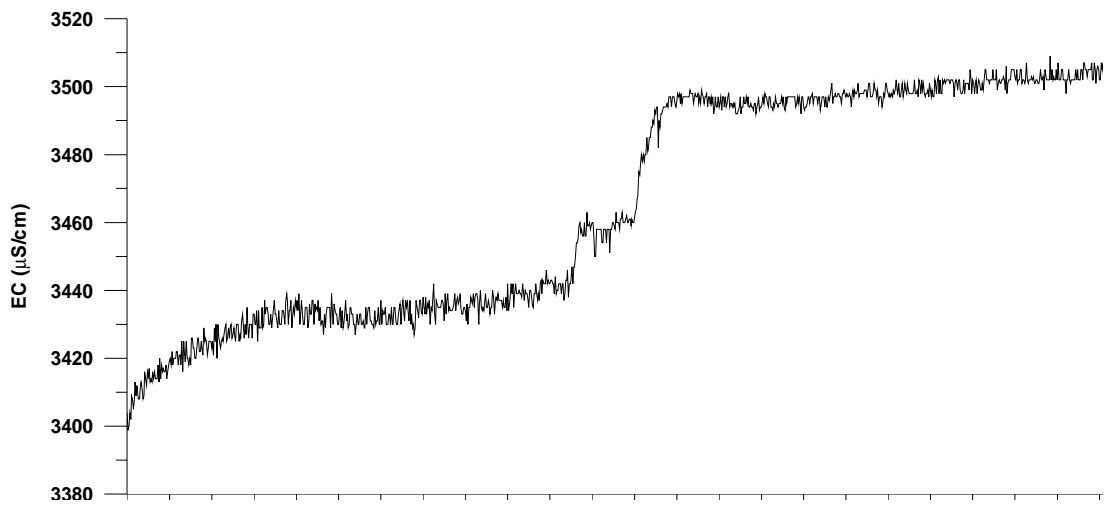


(a) 2006년 3월 26~2006년 4월 30일

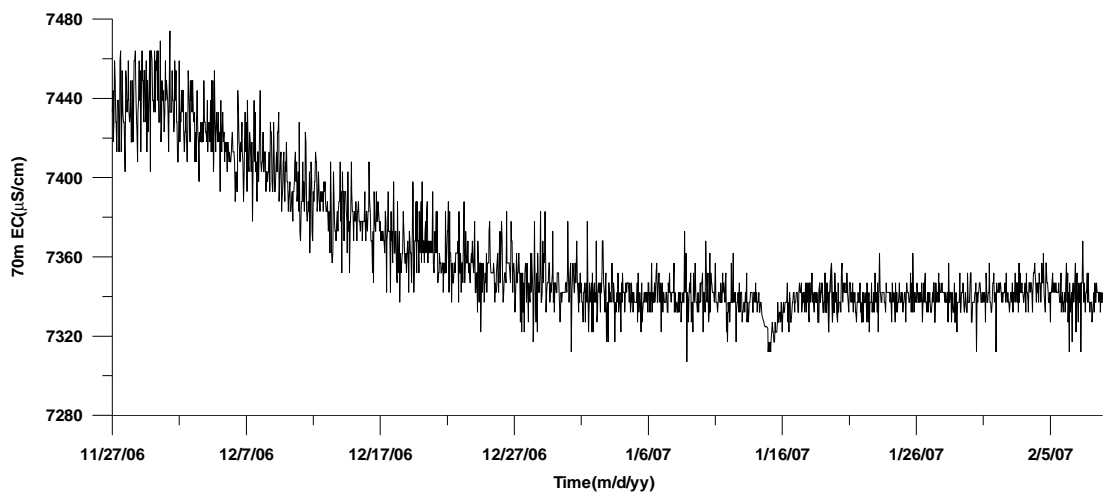


(b) 2006년 6월 16일~2006년 7월 16일

그림 19. 강우의 영향을 받는 지하수위 관측 자료 시계열도



(a) 2006년 5월 12일~2006년 7월 5일 1시간 간격 55m 전기전도도



(b) 2006년 11월 27일~2007년 2월 7일 1시간 간격 70m 전기전도도

그림 20. 심도별 전기전도도 시계열도

그림 19와 그림 20에서와 같이 시계열모형 적용을 위한 지하수위와 전기전도도 관측자료 구간을 선정 하였다. 대체로 결측값이 없고 전체 관측자료 중 변동 패턴이 양호한 구간을 선택 하였으며, 선정된 구간이 짧고, 시 단위 변동이 크기 때문에 시계열분석에 1시간 단위로 측정된 자료를 사용하였다.

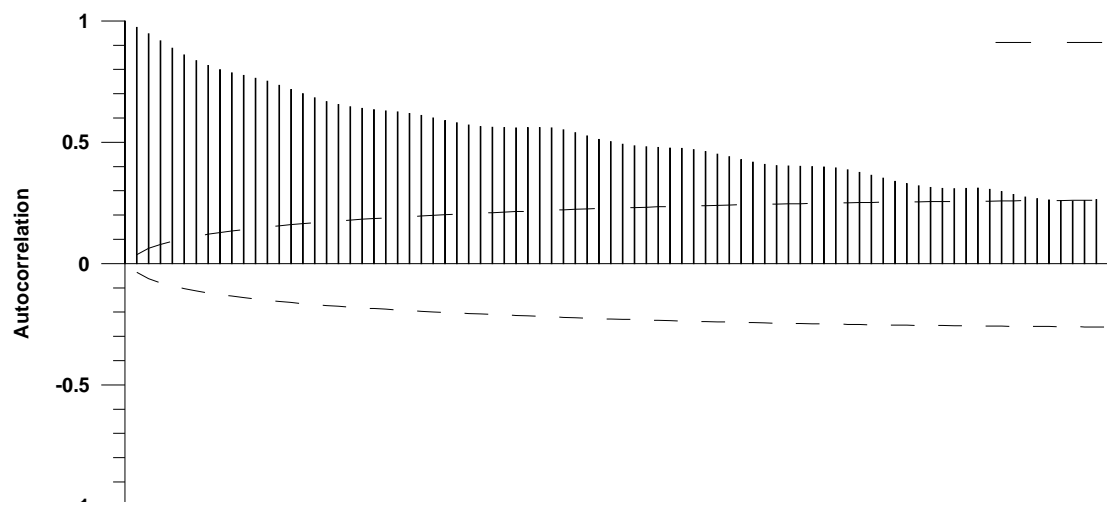
5.2.1. 시계열모형을 이용한 지하수위 예측 및 진단

시계열모형을 적용하여 지하수위를 예측하기 위해 결측구간이 없는 2006년 3월 26일부터 2006년 4월 26일 까지 지하수위 관측자료를 선택하여 시계열모형을 적용 하였다(그림 19a). 이 구간의 지하수위 변동은 전체적으로 비교적 변동이 작게 일어나고 있으며, 강수의 영향을 받고 있어 강수에 의한 지하수 변동의 특성을 잘 보여준다. 이 경우 앞서 기술한바 있는 ARIMA모형, SARIMA모형, TFN 모형으로 식별될 가능성이 있다.

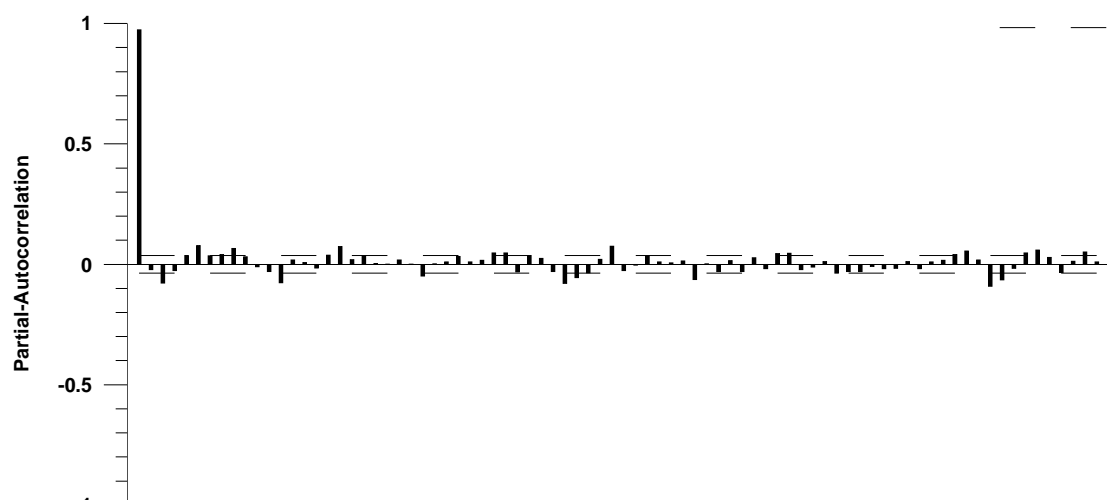
우선 시계열모형 식별을 위해 시계열자료의 자기상관함수와 편자기상관함수를 통하여 적용할 ARIMA(p, d, q)모형의 차수를 결정하였다. 그림 21의 자기상관함수(ACF)를 보면 자기상관도가 느리게 감소하고 있어 비정상 시계열로 판단되며, 편자기상관함수(PACF)는 시차 1에서 유의한값을 보이며 시차1 이후에서 절단된 형태(cut off)를 보여주고 있어 ARIMA모형의 차수인 p 와 q 는 각각 1로 선택 하였으며, 비정상을 해결하기 위해 차분을 실시하여($d=1$) 최종 모형으로 ARIMA(1,1,1)을 선정 하였다.

그림 22는 ARIMA(1,1,1) 모형의 예측값과 실제값의 차이인 잔차(residual)에 대한 자기상관함수(RACF)와 편자기상관함수(RPACF)를 나타내고 있다. 앞서 설명한 것처럼 ARIMA 모형은 일반적으로 백색잡음을 가정하고 있기 때문에 잔차 역시 같은 성질을 가져야한다. 잔차의 자기상관도와 편자기상관도는 유의한 값을 가지고 있지 않아 자기상관성이 없는 것으로 판정 되었고, 잔차가 정규성을 따르고 있어 적합성 검증을 통과 하였다.

이외에 차분을 시행한 ARIMA(1,1,0)모형 추정을 실시하였다. 표 11은 ARIMA(1,1,1)과 ARIMA(1,1,0)모형의 정보기준(AIC, SBC) 및 우도함수(log likelihood), 표준오차 등을 나타내었다. 두 모형 모두 잔차의 ACF와 PACF 모두 유의성이 없는 것으로 나타나 ARIMA 모형의 가정인 백색잡음(white noise)을 만족하고 있으나, 상대적으로 ARIMA(1,1,1) 모형이 정보기준(AIC, SBC)과 표준오차 작고, 우도 함수(log likelihood)가 크게 나타나 최종 모형으로 ARIMA(1,1,1)모형을 선정 하였다.

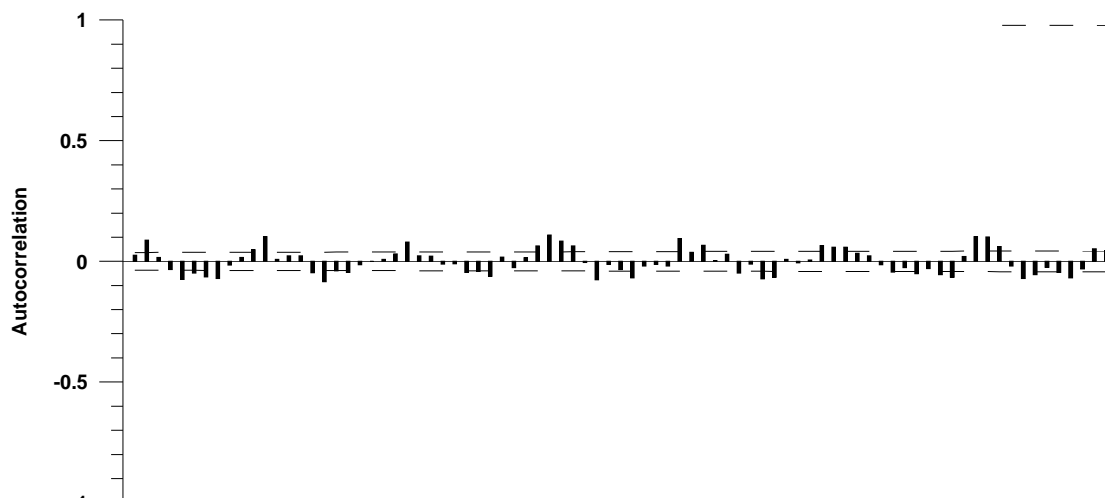


(a) ACF



(b) PACF

그림 21. 지하수위 관측자료 자기상관함수와 편자기상관함수



(a) 잔차 ACF



(b) 잔차 PACF

그림 22. ARIMA(1,1,1) 모형의 잔차 자기상관함수와 편자기상관함수

표 11. 시계열모형의 적합성 판단 통계량

	ARIMA(1,1,1)	ARIMA(1,1,0)
Standard error	0.01025	0.01029
Log likelihood	2356.47	2352.72
AIC	-4706.95	-4701.45
SBC	-4693.11	-4692.22

최종적으로 선정된 ARIMA(1,1,1)모형의 추정된 모수는 다음과 같다(표 12).

표 12. ARIMA(1,1,1) 모형의 모수 추정

	Estimate ¹⁾	SEB ²⁾	T ³⁾
AR1	0.975124	0.017697	55.1009
MA1	0.995312	0.013393	74.31491
CONSTANT	0.0000892	0.0000942	0.949335

1) B: 추정된 모수

2) SE: 추정된 모수의 표준오차

3) T-검정 통계량

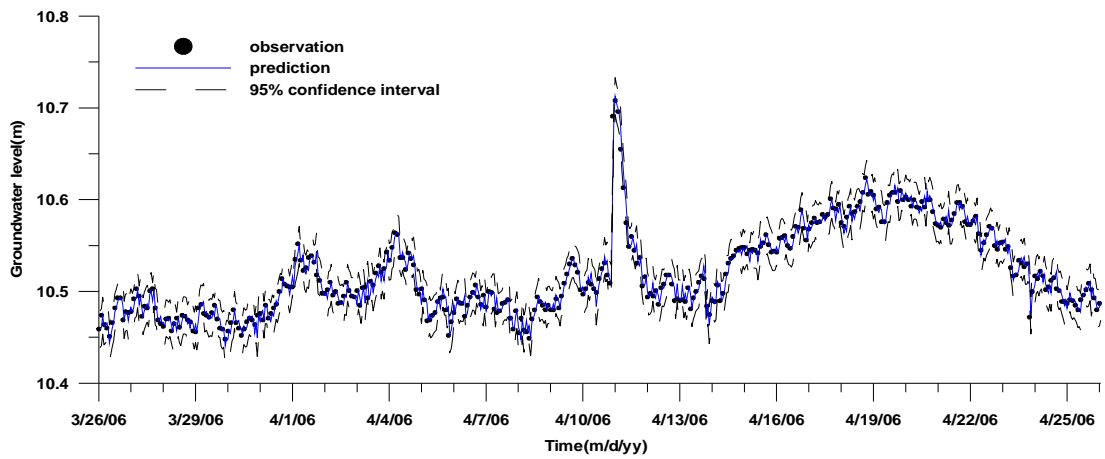
위 결과를 바탕으로 ARIMA(1,1,1)모형으로 표현하면 다음과 같다.

$$(1 - 0.975124B)(1 - B)Z_t = 0.0000892 + (1 - 0.995312B)a_t \quad (26)$$

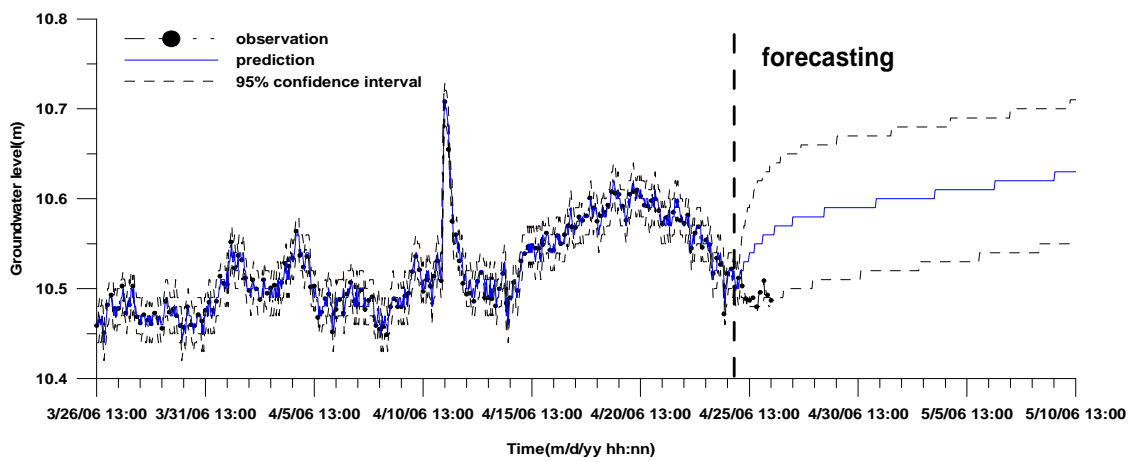
$$Z_t = 0.0000892 + 1.97512Z_{t-1} - 0.975124Z_{t-2} + a_t - 0.995312a_{t-1}$$

그림 23(a)는 ARIMA(1,1,1)모형으로 총 30일간 1시간 간격으로 측정한 지하수위 관측자료를 이용하여 예측값과 실제 관측값을 비교한 시계열도이다. 예측값과 실제값과 비교하기 위하여 95% 신뢰구간의 상하한 값도 함께 표현하였다. 잔차의 평균 값은 0.0011m, 분산은 0.0001058m 로 나타났다. 또한 식별된 모형을 통해 향후 15일까지 예측해 보았다.

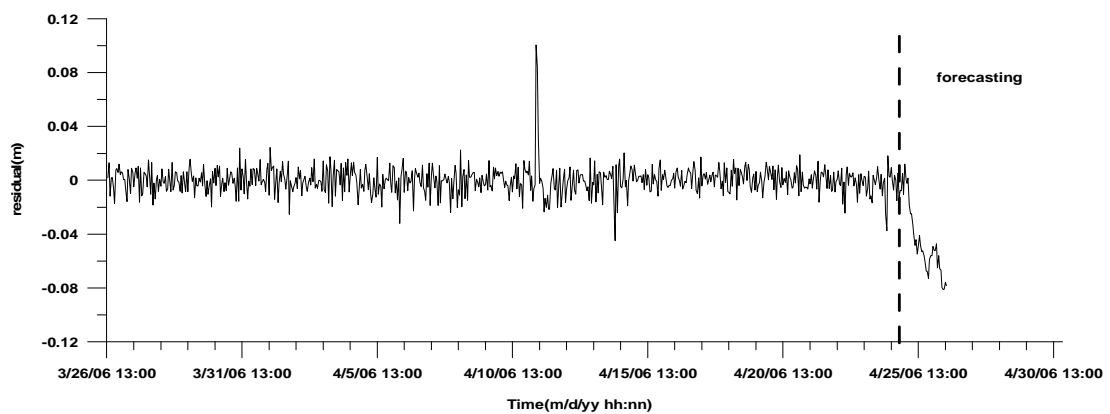
그림 23(b)는 향후 15일 예측 결과를 95% 신뢰구간과 함께 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 예측에 사용된 초기 값에서 멀어질수록 예측의 정확도가 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 23(c)의 잔차도에서도 예측값과 실제값의 오차가 크게 나타나고 있어 ARIMA 모형을 이용한 장기예측은 오차가 커짐을 알 수 있다. 이는 ARIMA 모형의 경우 강우나 양수로 인한 외부적인 조건을 반영하는 것 보다는 관측자료의 통계적인 특성을 이용하여 예측을 수행하기 때문으로 판단된다.



(a) 관측값과 ARIMA(1,1,1) 모형 적용 후 예측값 비교



(b) ARIMA(1,1,1) 모형을 이용한 향후 15일 예측



(c) 실제값과 예측값의 잔차 시계열도

그림 23. ARIMA(1,1,1) 모형의 적용과 지하수위 예측

ARIMA 모형의 경우 강우의 변동양상을 고려하지 않기 때문에 강우의 영향을 고려 할 수 있는 TFN 모형을 이용하여 같은 구간에 대해 지하수위 변동을 예측해 보았다. 그림 19(a)는 강우에 의해 지하수위가 변동하는 구간(2006년 3월 26일부터 2006년 4월 26일)으로 강우를 입력자료로 지하수위 변동을 출력자료로는 TFN 모형을 적용 할 수 있다. TFN 모형을 적용하기 위해서는 우선 입력 자료인 강우가 지하수위변동에 영향을 미치는 시차를 고려해야 되기 때문에 교차상관함수를 통해 강우와 지하수위변동 상호간의 시계열 자료를 평가 하여야 한다(그림 24). 교차상관도를 보면 지연시간(delay time) 6hour에 최대교차상관계수 0.28을 보이고 있으며 특별한 주기성이 나타나지 않는다. 강우를 입력자료로 포함시켜 최종모형으로 TFN(1,1,2,1,1) 모형을 선정 하였다.

선정된 TFN 모형의 추정된 모수는 다음과 같다(표 13).

표 13. TFN 모형의 모수 추정

			Estimate	SEB	T
TFN model	waterlevel	Constant	0.001	0.001	0.956
		AR1	-0.027	0.614	-0.044
		AR2	0.064	0.043	1.473
		Difference	1		
		MA1	0.001	0.615	0.002
	Rainfall	Delay	6		
		Numerator ω_0	0.003	0.001	3.230
		Numerator ω_1	0.004	0.001	3.679
		Denominator δ_1	0.893	0.047	18.887

추정된 모수를 통해 TFN 모형을 표현을 하면 다음과 같다.

$$Y_t = -0.001 + \frac{(0.003 - 0.004B)}{(1 - 0.893B)} X_{t-6} + \frac{(1 + 0.027B - 0.064B^2)}{(1 - 0.001B)} a_t \quad (27)$$

여기서 Y_t 는 지하수위를 X_{t-6} 는 지연시간 6시간의 강우 반응을 나타낸다.

추정된 TFN 모형을 통해 지하수위 변동을 예측해 보았다(그림 25). 총

관측자료 중 2006년 4월 23일 13시까지 관측자료를 보정기간(calibration period), 나머지 기간을 평가기간으로 선정 하였다.

그림 25(a)를 보면 예측값과 관측값이 비교적 잘 일치하고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 ARIMA 모형과 달리 입력 변수인 강우 자료를 이용하여 외부적인 요인을 고려하여 예측을 수행하였기 때문이다. 또한 잔차도에서도 오차가 비교적 작게 나타나고 있어 입력 변수를 고려한 TFN 모형이 관측자료의 통계적 특성만을 고려한 ARIMA 모형 보다는 예측의 질이 높은 것을 알 수 있다.

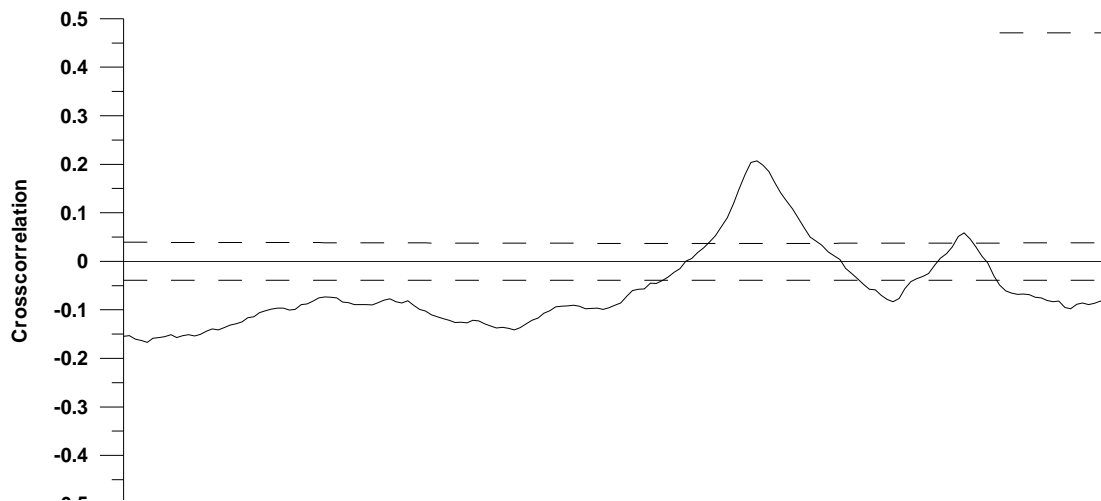
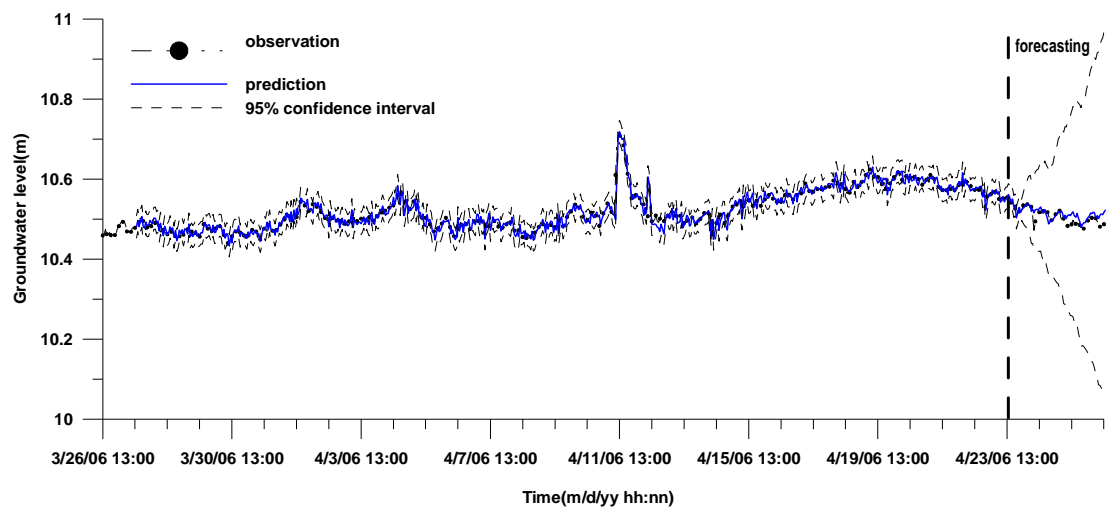
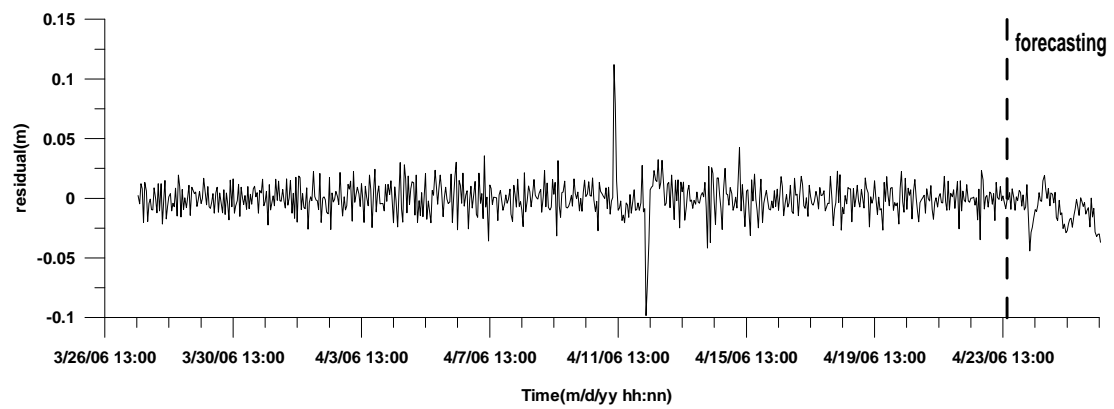


그림 24. 강우와 지하수위 교차상관도: 관측기간 2006년 3월 26일~2006년 4월 26일 (1시간 자료)

TFN 모형을 이용하여 강우의 영향을 받는 구간인 2006년 6월 16일부터 2006년 7월 16일 까지 지하수위 변동 구간에 대해서 예측을 수행 하였다. 예측 수행 결과 입력 자료로 이용한 강우의 영향을 잘 나타내고 있으며, 미래의 강우에 대한 지하수위 변동을 잘 나타내고 있다(그림 26).

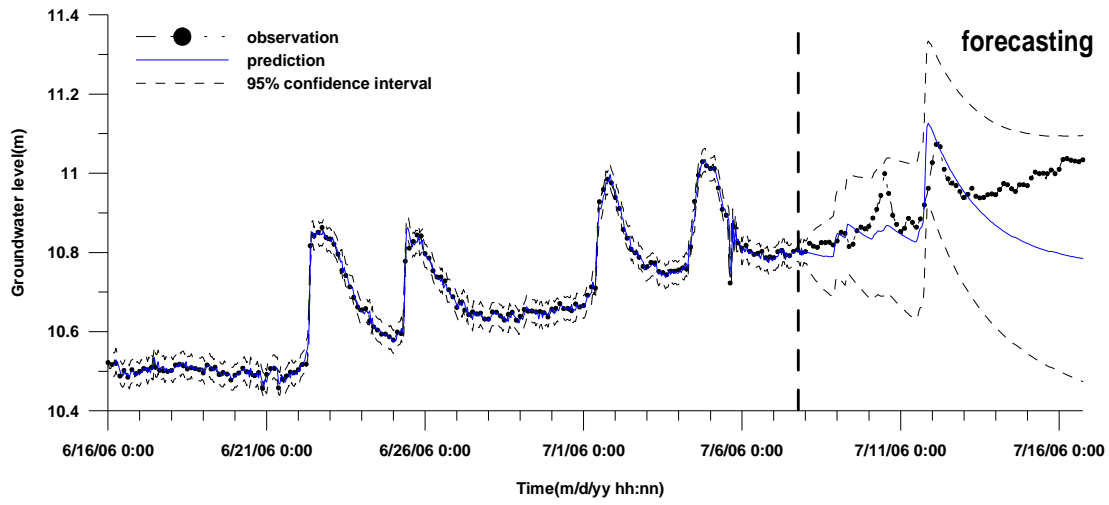


(a) 지하수위 예측 시계열도

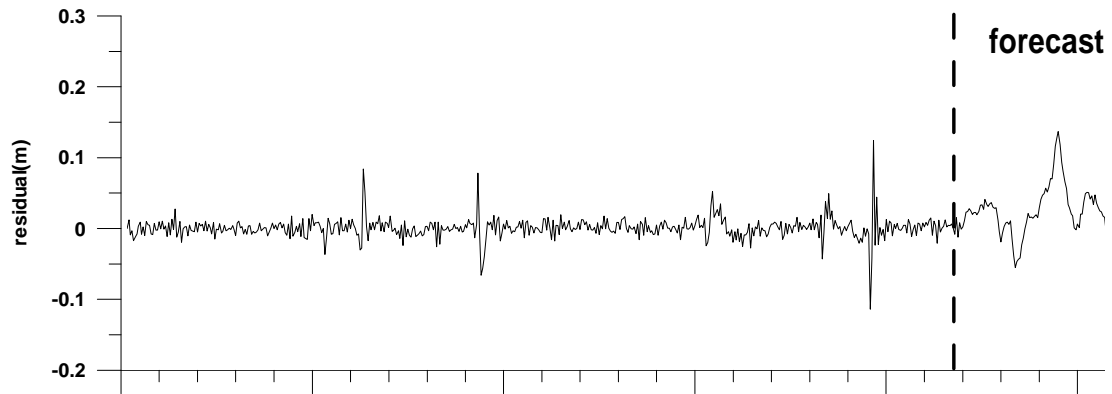


(b) 실제값과 예측값 사이의 잔차도

그림 25. TFN 모델을 이용한 지하수위 예측



(a) 지하수위 변동 예측 모형



(b) 지하수위 변동 예측 모형 잔차도

그림 26. 2006년 6월 16일~2006년 7월 16일 강우에 의한 지하수 변동 예측;
TFN 모형 이용

그림 26의 TFN 모형은 다음과 같이 표현된다.

$$Y_t = \frac{(0.003 + 0.005B + 0.001B^2)}{(1 + 0.952B^2)} X_{t-6} + \frac{1}{(1 - 2.61B^2)} a_t \quad (28)$$

5.2.2. 시계열모형을 이용한 전기전도도 예측 및 진단

55m와 70m 심도의 전기전도도 관측자료를 이용하여 시계열모형을 적용해 보았다. 55m 전기전도도 관측자료는 2006년 5월 12일부터 2006년 7월 5일 까지 1시간 간격으로 관측한 자료를 이용하였으며, 70m 전기전도도의 경우 2006년 11월 26일부터 2007년 2월 28일 까지의 관측자료를 이용하였다. 70m의 경우 55m에 비해 변동 폭이 크고 분산이 크기 때문에 이를 제거하기 위해서 일평균자료를 이용하여 시계열모형을 적용하였다.

최종 모형선정은 계절형 ARIMA모형으로 선정 하였다. 표 14는 선정된 계절형 ARIMA모형의 추정된 모수와 통계량을 나타내고 있다. 이를 통해 55m와 70m 전기전도도에 적용된 시계열모형을 각각 수식으로 표현 하면 다음과 같다.

55m 전기전도도 ARIMA(0,1,1)(0,1,1)s=24

$$(1-B)(1-B^{24})Z_t = (1-\theta_1 B)(1-\Theta_1 B^{24})a_t \quad (29)$$

$$Z_t = -0.00248 - Z_{t-1} + Z_{t-24} - Z_{t-25} - 0.6679a_{t-1} - 0.9794a_{t-24} \\ + 0.6539a_{t-25} + a_t$$

70m 전기전도도 ARIMA(0,1,1)(0,2,1)s=7

$$(1-B)(1-B^7)^2 Z_t = (1-\theta_1 B)(1-\Theta_1 B^7)a_t \quad (30)$$

$$Z_t = -0.000053 - Z_{t-1} + 2Z_{t-7} + 2Z_{t-8} + Z_{t-14} - Z_{t-15} - 0.999a_{t-1} \\ - 0.997a_{t-7} + 0.996a_{t-7} + a_t$$

표 14. 전기전도도 시계열모형의 모수 추정

EC	ARIMA model	Order	Estimate	SEB	T	AIC /BIC	Standard error
55m	SARIMA (0,1,1)(0,1,1) _{s=24}	MA1	0.6676	0.002	-1.123	3465 /3483	2.530
		SMA1	0.9794	0.024	28.095		
		CONSTANT	-0.00248	0.040	24.281		
70m	SARIMA (0,1,1)(0,2,1) _{s=7}	MA1	0.999	36.280	0.027	-209/ -204	0.022
		SMA1	0.997	22.752	0.043		
		CONSTANT	-0.000058	0.000168	-0.349		

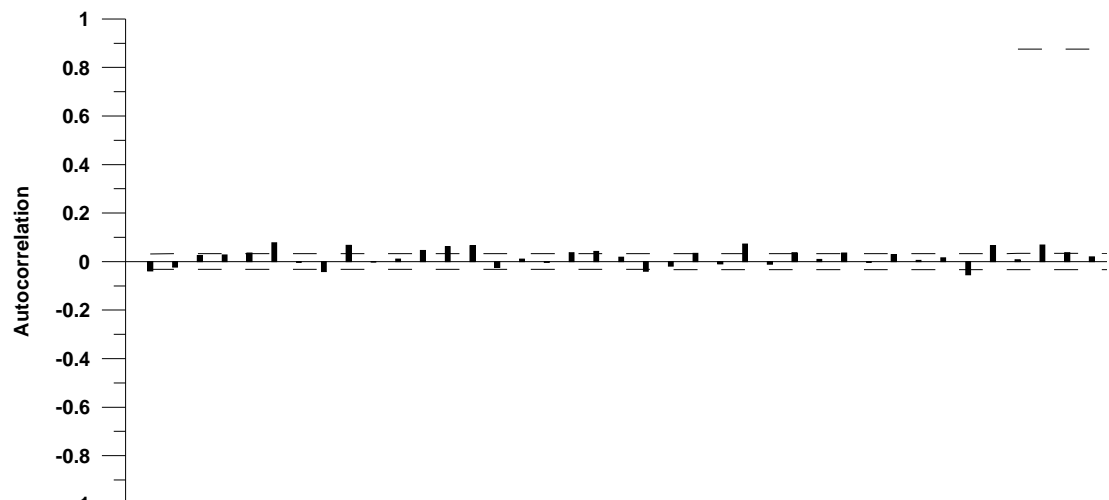
잠정적으로 선정한 모형을 토대로 예측을 수행하고 잠정 모형의 적합성을 판단하였다. 예측에 앞서 선정한 시계열모형이 적합한지를 판단하기 위해 잔차의 자기상관도를 이용하여 적합성을 판별하였다. 잔차의 자기상관도를 보면 시차에서 유의한 값들이 발견되지 않아 통계적으로 백색잡음을 만족하므로 선정한 시계열모형은 적합하다고 판단된다(그림 27).

55m 심도 전기전도도의 경우 총 예측 수행 및 평가 기간은 2006년 6월 16일 14시부터 2006년 6월 23일 14시까지이며, 이후 7월 5일 14시까지 예측을 실시하여 실제값과 비교해 보았다. 70m 전기전도도의 경우 총 관측 자료 96일 중 71일(2007년 11월 26일부터 2007년 2월 4일)자료를 시계열모형에 적용한 후 향후 25일간(2007년 2월 4일~2007년 2월 28일) 예측을 수행하고 실제값과 평가를 하였다.

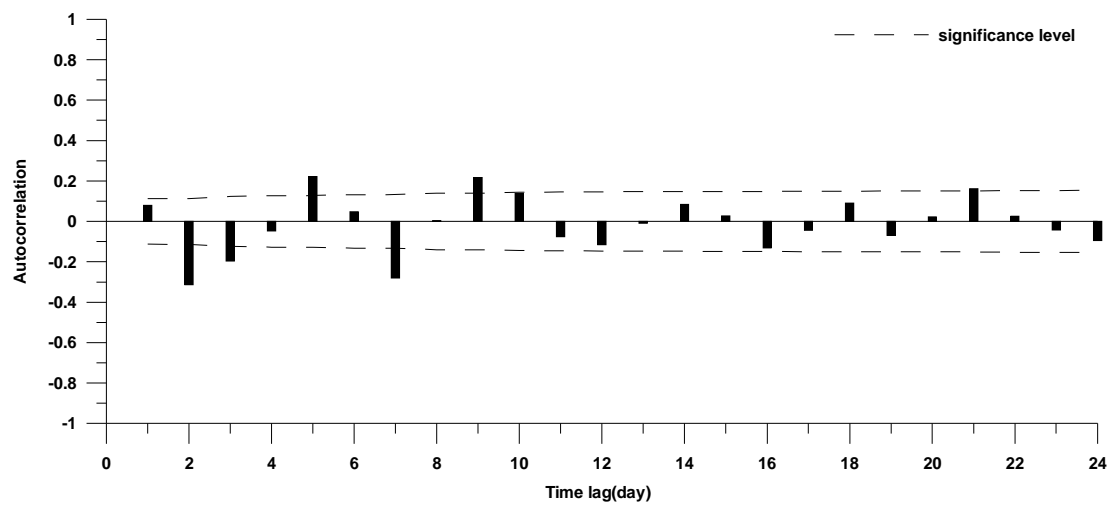
그림 28은 55m 심도 전기전도도의 시계열모형 그래프를 나타낸 것이다. 95% 신뢰 구간 내에서 예측값과 실제값 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 전기전도도 변동이 일정한 추세를 가지고 변동하기 때문이고, 이 기간 중 양수나 강우에 의한 통계적 추세에서 벗어나는 변동이 없기 때문이다. 70m 전기전도도 변동 예측의 경우 예측값과 실제값의 비교에서 실제값이 95% 신뢰 구간 내에서 비교적 잘 일치 하는 것을 볼 수 있다(그림 29). 이는 선정된 계절형 ARIMA 모형이 70m 심도의 전기전도도 변동 특성을 잘 반영함을 나타낸다.

지하수위와 전기전도도에 대해 시계열모형을 적용하고 예측을 수행 하였다. 위에서 적용한 시계열모형은 지하수위의 경우 강우를 입력 자료로 이용한 TFN 모형, 전기전도도의 경우 계절형 ARIMA 모형으로 관측자료의 변동 특성을 잘 반영하고 있다.

지하수위의 경우 단순히 지하수위 변동 양상의 통계적 측면을 고려하는 ARIMA 모형 보다는 강우를 입력자료로 활용한 TFN 모형이 지하수위 변동을 예측을 하는데 있어 예측값과 실제값의 오차를 줄 일 수 있었으며 예측의 질 또한 높게 나타나고 있고 연구지역의 지하수위 변동 특성을 잘 나타냈다. 55m 와 70m 각 심도별 전기전도도의 변동 예측은 전기전도도의 변동 주기성을 고려한 계절형 ARIMA 모형이 변동 양상을 잘 반영하고 있다. 지하수위의 경우 강우 자료를 이용한 TFN 모형이 단순한 관측자료의 통계적 특성을 반영한 ARIMA 모형 보다는 예측의 질이 높았으며, 전기전도도의 경우 계절형 ARIMA 모형이 전기전도도 변동 양상을 잘 반영하고 있으며, 예측에 있어서 높은 적합성을 보였다.

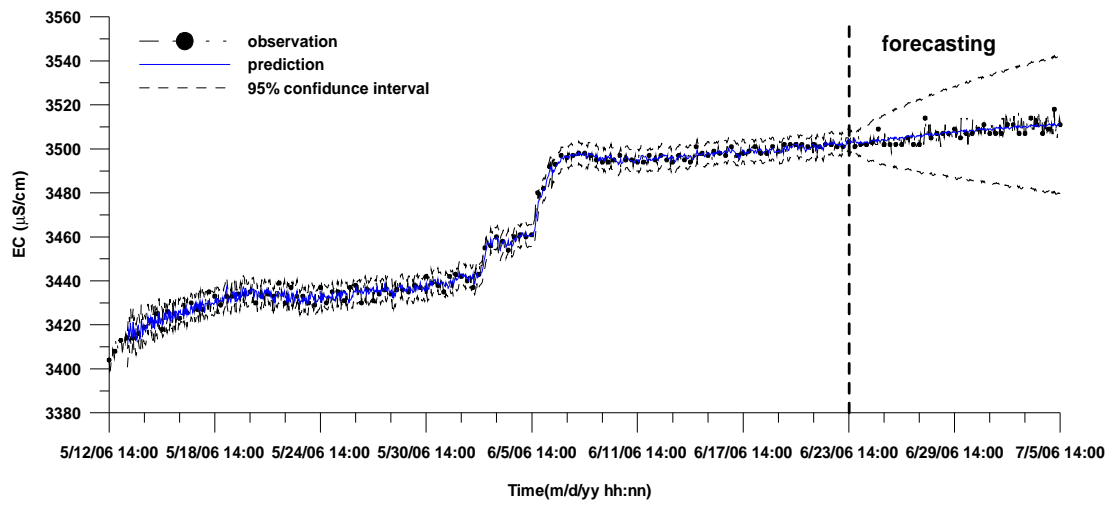


(a) 55m EC 잔차 ACF

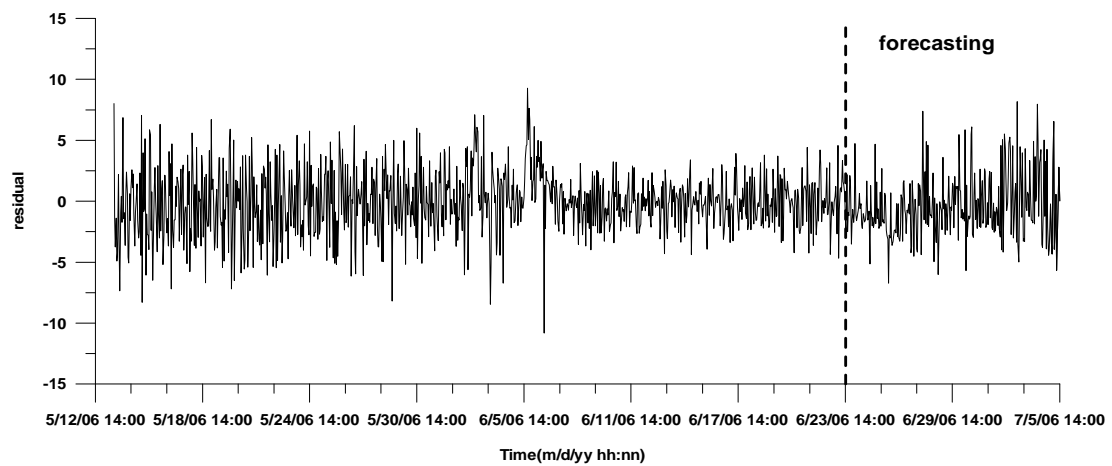


(b) 70m EC 잔차 ACF

그림 27. 55m와 70m 심도 전기전도도 시계열 모형의 잔차 자기상관도

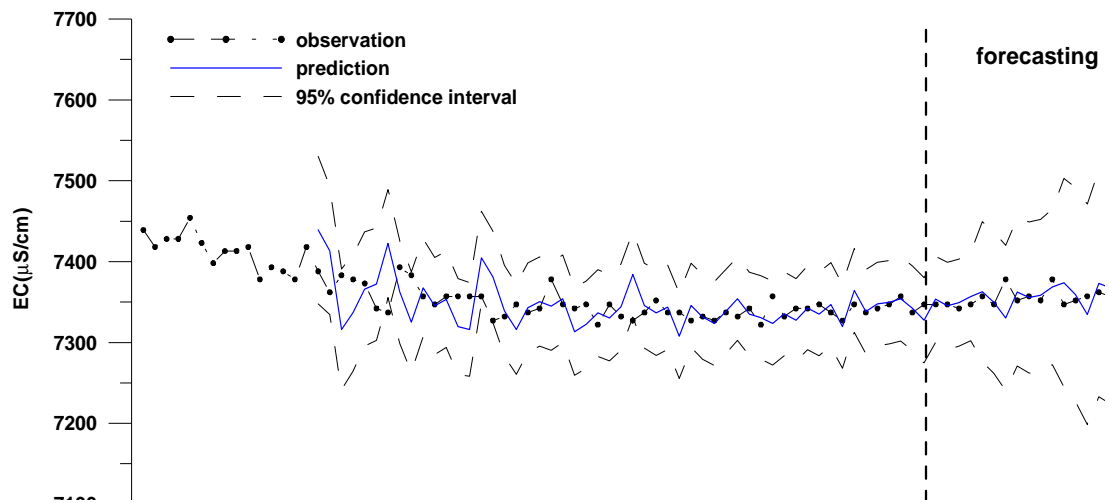


(a) ARIMA(0,1,1)(0,1,1)_{s=24} 모델을 이용한 55m EC 예측

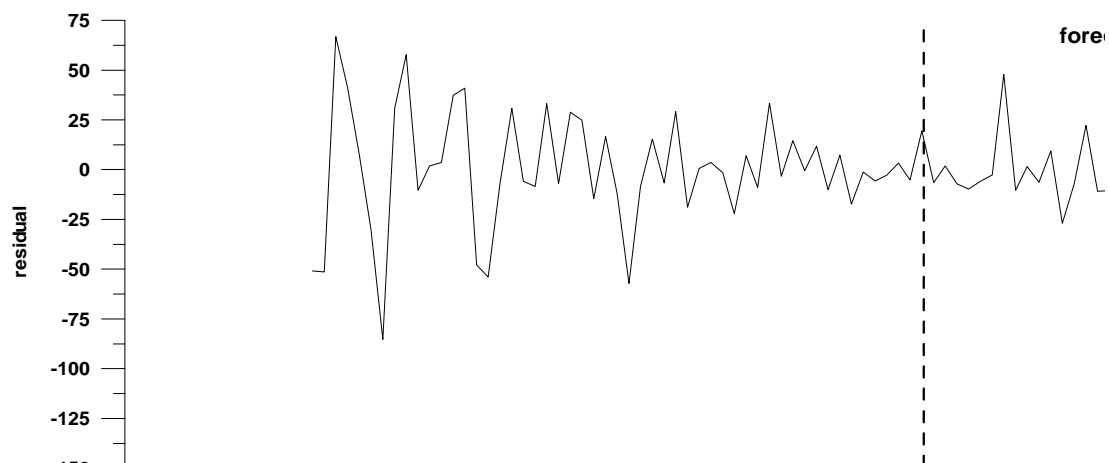


(b) 55m EC ARIMA(0,1,1)(0,1,1)_{s=24} 모델의 잔차

그림 28. ARIMA(0,1,1)(0,1,1)_{s=24} 모델 적용과 55m 전기전도도 예측



(a) ARIMA(0,1,1)(0,2,1)s=7 모델을 이용한 70 EC 예측



(b) ARIMA(0,1,1)(0,2,1)s=7 모델 잔차도

그림 29. ARIMA(0,1,1)(0,2,1)s=7 모형의 적용과 70m 전기전도도 예측

6. 결론

본 연구는 전남 무안 지역의 해안가 암반 대수층을 대상으로 수리적 특성을 연구하고, 해안가 암반 대수층에서 해수 침투의 양상을 파악하였다. 또 시계열분석을 통해 전기전도도에 영향을 주는 원인을 분석 하였으며, 시계열모형을 통해 해안가 암반 대수층에서의 지하수위 변동 및 전기전도도 변동 경향성을 파악하고 예측을 실시하였다.

연구 지역의 수리적 특성을 파악하기 위해 두 관측정에 대하여 2006년 4월 1일부터 2007년 8월 26일 까지 약 1년 5개월 동안 W2 관측정에 CTD-diver를 설치하여 시계열 자료를 축적 하였다. 연구지역의 수리지질학적 특성을 파악하기 위해 2006년 11월 10일에 W1, W2 관측정에 대한 양수시험을 실시하였다. 양수시험 결과 평균 투수량 계수 $3.63 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{sec}$, 비산출률 0.047~0.05, 평균 투수계수 $7.36 \times 10^{-6} \text{ m/sec}$ 로 나타났다.

W1 관정과 W2 관측기간 동안 1개월 간격의 정기적인 전기전도도 검증을 통해 심도별 전기전도도의 변동 양상을 파악 하였다. W1 관정과 W2 관정 사이의 거리가 약 1m 내외로 가까이 존재하지만 관정내 전기전도도의 변동 양상은 매우 다르게 나타나고 있다. W1 관정의 경우 심도 약 24m 아래 구간부터 지속적으로 증가하여 최대 $3,000\mu\text{S/cm}$ 까지 증가하는데 반해 W2 관측정의 경우 두 개의 전기전도도 변동 구간이 존재 하고 60m 이상 구간에서는 최대 약 $10,000\mu\text{S/cm}$ 까지 증가하는 것으로 나타났다. 또한 장기 관측자료에서 나타난 것처럼 55m와 70m의 구간의 전기전도도는 불규칙적인 변동을 보이지만 대체로 지속적인 증가 양상을 보여 주고 있다. 관측자료 수집기간 동안 전기전도도 변동 양상은 55m의 경우 $556\mu\text{S/cm}$, 70m의 경우 $494\mu\text{S/cm}$ 으로 높게 나타났다. 지하수위의 경우는 인위적인 양수로 인해 지하수위 하강과 자연적인 요소인 강우의 영향이 복합적으로 나타나 불규칙적인 변동 양상을 보여주고 있다.

지하수위와 전기전도도 시계열자료들의 자기상관분석을 실시하였다. 시계열 분석은 1시간 간격으로 관측한 시계열자료를 1일 자료와 일평균 자료, 6

시간 간격 자료로 조합하여 시행 하였다. 지하수위의 자기상관분석 결과 지하수위는 강한 자기상관성과 기억 효과를 가지고 있는 것으로 나타났다. 55m와 70m 전기전도도의 자기상관분석 결과 역시 지하수위와 동일하게 강한 자기상관성을 가지고 있었다. 또한 일 자료와 시 자료 역시 같은 변동 양상을 보여주고 있으며, 자기상관함수의 변동 양상이 지하수위 변동 패턴과 전기전도도의 변동 패턴이 비슷하게 나오고 있으며, 지하수위와 전기전도도 자기상관분석 결과 주기적인 변화는 나타나지 않았다.

해수침투의 영향을 주는 인자들을 알아보기 위해서 교차상관분석을 실시하였다. 지하수위의 경우 강우와 인위적인 양수에 의해 변동의 영향을 많이 받는다. 관측자료 중 강우에 의해 지하수위가 영향을 받는 구간(2006년 6월 8일부터 2006년 7월 5일)에서 강우와 지하수위의 교차상관분석 결과 일 자료에서 지연시간 1일, 최대 교차상관 계수 0.4, 시 자료에서는 지연시간 9시간에 0.36으로 강우에 영향을 받고 있음이 나타났다.

인위적인 요인인 양수로 인한 지하수위 하강과 전기전도도의 상관관계를 파악하였다. 실제로 현장에서 사용하는 양수의 주기와 양수량 판단이 불가능하여 지하수위 변동 양상(전체 관측기간)과 전기전도도의 상관분석을 실시하였다. 지하수위와 전기전도도의 상관관계는 음의 상관관계를 지시하고 있다. 또한 양수의 직접적인 영향을 알아보기 위해 양수가 집중되는 구간인 2006년 9월부터 11월 까지의 지하수위 변동 자료와 전기전도도 자료를 교차상관분석한 결과, 70m의 경우 지연시간 11시간에 최대 교차상관계수 -0.61 로 높은 음의 상관관계를 가지고 있다. 양수에 의한 지하수위 변동이 전기전도도의 영향을 줄 가능성이 높은 것으로 나타났다. 반면, 강우와 55m, 70m 전기전도도의 상관관계는 유의 하지 않은 것으로 나타나 강우가 심부 지하수의 EC변동에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

조석과 지하수위, 조석과 전기전도도의 경우 0.1이하의 낮은 상관관계수 값을 보이거나 변동 주기는 조석의 변동 주기와 비슷한 양상을 보이고 있다. 상대적으로 해안가에서 멀리 떨어져 있어 암반절리를 따라 이동하면서 조석의 스트레스의 전파가 약해져 낮은 상관관계수 값을 보이는 것으로 판단된다.

관측자료의 경향성 파악을 위해 시계열모형 중에 하나인 선형추세모형을

사용하여 추세 분석을 실시하였다. 전반적으로 높은 결정계수 값을 가지고 있으며, 이에 따라 높은 기울기를 보이고 있다. 지하수위의 경우 양수로 인해 음의 기울기를 가지며 지속적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 양수로 인한 지하수위의 하강이 지속되고 있음을 말한다. 전기전도도의 경우 전반적으로 높은 직선식의 부합을 보이고 있으며 양의 기울기로 크게 증가함을 볼 수 있다. 지하수위의 경우 양수로 인해 지속적으로 감소하고 있지만, 55m와 70m의 전기전도도는 반대의 양상으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 양수로 인한 지하수위 하강으로 인해 전기전도도가 상승함을 나타낸다. 이는 지하수위 변동과 각 심도에서의 전기전도도 변동의 교차상관분석 결과에서도 잘 나타나고 있다.

관측된 시계열자료와 시계열분석을 통해 얻어진 분석결과를 바탕으로 연구지역에 시계열모형을 적용하였다. 시계열모형을 통해 관측자료의 경향성을 파악하고 통계적인 추세를 이용해 예측도 가능하다. 시계열모형 선정을 위해 시계열모형의 가정에 부합하며, 시간적으로 연속되고 결측값이 존재하지 않는 구간을 선정하였다. 지하수위의 경우 ARIMA 모형과 TFN 모형을 적용하였으며, 전기전도도의 경우 계절형 ARIMA 모형(즉 SARIMA)을 적용하였다. 지하수위 ARIMA 모형의 경우 양수에 의한 인위적인 변동양상과 강우 등에 의해 나타나는 자연적인 변동양상을 파악하는데 어려웠다. 이는 단순히 관측시계열의 통계적인 추세를 가지고 예측을 실시하기 때문에 예측 오차가 증가하는 것이다. 반면에 TFN 모형의 강우에 의해 나타나는 자연적인 변동양상을 입력자료로서 반영할 수 있기 때문에 ARIMA 모형에 비해 예측오차를 줄일 수가 있다.

전기전도도 시계열모형의 경우 관측자료의 결측구간과 불규칙적인 변동등으로 인해 예측오차가 크게 나타나고 있다. 그러나 계절형 ARIMA 모형은 이런 불규칙적인 변동을 계절차분을 통해 줄여 상대적으로 ARIMA 모형에 비해 예측의 질을 높일 수가 있다.

본 연구 결과, 연구지역은 해수침투의 영향을 받고 있으며, 또한 전기전도도의 지속적인 상승으로 인해 해수의 피해가 증가할 것으로 예상되며 지하수위와 전기전도도의 교차상관분석결과 지하수위 하강이 전기전도도의 상승에

영향을 주고 있으며, 추세분석 결과 지하수위는 지속적인 양수와 강우량의 감소로 인해 하강하는 경향을 보이고 있으며, 반대로 전기전도도는 상승 추세를 보이고 있어 지하수위의 하강이 전기전도도 증가의 원인임을 보여 주고 있다. 또한 심도에 따른 EC 단면도에서 나타나듯이 55m와 70m 부근에서 전기전도도가 증가하고 있어 55m와 70m 부근에서 해수의 침입이 심화되고 있음을 알 수 있다. 시계열 모형 결과 강우를 입력 자료로 이용한 TFN 모형이 지하수위의 변동 특성을 잘 반영하고 있으며, 전기전도도의 경우 계절형 ARIMA 모형이 변동 특성을 잘 반영하며 예측 수행 결과 95% 신뢰 구간 내에서 관측자료에 잘 부합하고 있음을 보여 주고 있다. 이러한 시계열 분석은 암반 대수층에서 해수침투의 다양한 원인들의 상호관계를 파악하는데 유용한 것으로 나타났다.

7. 참고문헌

김원형, 1991, 시계열분석, 경문사, 296, p.

김구영, 심병완, 박기화, 김태희, 성현정, 박윤석, 고기원, 우남철, 2005, 제주도 동부지역 해안대수층의 조석에 의한 수리경사 변화 연구, 자원환경지질학회지, **38**(1), 79-89

이명재, 김규범, 손영철, 이진용, 이강근, 2004, 국가 지하수관측소 지하수위 자료에 대한 시계열분석 연구, 지질학회지, **40**(3), 305-329

이명재, 이진용, 이재명, 원종호, 2005, 국가 지하수관측소 측정자료의 이상값 분석, 지하수토양환경학회지, **10**(1), 65-74

이진용, 이강근, 1999, 순간수위변화 및 양수시험을 통한 수리상수 추정 문제점 분석, 한국지하수토양환경학회지, **6**(1), 4-21

이진용, 이강근, 2002, 강우에 대한 지하수위 반응양상 비교분석 : 강원도 원주지역과 경기도 의왕지역. 지하수토양환경학회지, **7**(1), 3-13

이진용, 이명재, 이재명, 안경환, 원종호, 문상호, 조민조, 2006, 국가 지하수 관측소 지하수위, 전기전도도 및 수온 자료에 대한 모수적 및 비모수적 변동 경향성 분석, 지하수토양환경학회지, **11**(2), 56-67

박성현, 조신섭, 김성수, 2005, 한글SPSS ver. 12K, (주)데이터솔루션, 519, p.

- 송성호, 이진용, 이명재, 2007, 변동유형 분석법을 이용한 해수침투 관측망 자료 평가, 지구과학학회지, **28**(4), 478-490
- 심병완, 정상용, 2004, 단열압반 대수층에서 조석분석법을 이용한 수리상수 추정, 한국지하수토양환경학회지, **9**(3), 27-32
- 조신섭, 손영숙, 2002, SAS/ETS를 이용한 시계열분석, 율곡출판사, 430, p
- 한국농촌공사, 2005a, 해수침투확산방지법 및 지하수인공함양에 관한 연구 3-19
- 한국농촌공사, 2005b, 해수침투조사 보고서, 461, p
- 한국농촌공사, 2005c, 관측망 자료를 이용한 지하수자원 관리 및 활용도 증대 방안연구 - 해수침투 관측망을 중심으로 - , 246, p
- 한국수자원공사, 2007, 지하수조사연보2007, 593, p
- 허명희, 2005, SPSS 시계열 분석과 결측값 분석, SPSS Korea, 49, p
- Bear, J., Cheng, A.H.-D., Soreek, S., Quazar, D., Herrera, I., 1999, Seawater Intrusion in Coastal Aquifers-Concepts, Methods, and Practices, Kluwer Academic Publishers, p. 625
- Bierkens, M.E.P., Knotters, M., van Geer, F.C., 1999, Calibration of transfer function-noise models to sparsely or irregularly observed time series, *Water Resource Research*, **35**, 1741-1750

- Box, G.E.P., Jenkins, G.M., 1976, Time series analysis forecasting and control, Holden day, 579, p
- Choi, S.H and Kim, Y.K., 1989. Geochemical characteristics of ground-water in Cheju Island, Journal of the Geological Society of Korea, **25**, 230-238
- Kim, J.H., Yum, B.W., Kim, R.K., Koh, D.C., Cheong, T.J., Lee, J., Chang, H.W., 2003b. Application of cluster analysis for the hydrogeochemical factors of saline groundwater in Kimje, Korea, *Geosciences Journal* **7**(4), 313-320.
- Kim, J.H., Lee, J.H., Cheong, T.J., Kim, R.H., Koh, D.C., Ryu, J.S., Chang, H.W., 2005, Use of the time series analysis for the identification of tidal effect on groundwater in the coastal area of Kimjae, Korea, *Journal of Hydrology*, **300**, 188-198.
- Kim, K.Y., Seoung, H.J., Kim, T.H., Park, K.H., Woo, N.C., Park, Y.S., Koh, G.W., Park W.B., 2006, Tidal effects on variations of fresh saltwater interface and groundwater flow in multilayered coastal aquifer on a volcanic island[Jeju island, Korea], *Journal of Hydrology*, **330**, 525-542.
- Knotters, M., van Walsum, P.E.V., 1997, Estimating fluctuation quantities from time series of water-table depth using models with a stochastic component, *Journal of Hydrology*, **197**, 25-46
- Salas, J.D., Obeysekera, J.T.B., 1982, ARMA model identification of hydrological time series, *Water Resource Research*, **29**, 2011-2026

- Sung-Joon Kim, Yunjung Hyun, Kang-Kun Lee, 2005, Time series modeling for evaluation of groundwater discharge rates into an urban subway system, *Geosciences Journal*, **Vol. 9**, No. 1, 15-22
- Larocque, M., Mangin, A., Razack, M., and Banton, O. 1998, Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a karst aquifer (Charente, France), *Journal of Hydrology*, **205**, 217-231
- Lee, J.Y., Lee, K.K., 2000. Use of hydrologic time series data for identification of recharge mechanism in a fractured bedrock aquifer system, *Journal of Hydrology*, **229**, 190-201.
- Lee, J.Y., Yi, M.J., Daekyoo Hwang, 2005. Dependency of hydrologic responses and recharge estimates on water-level monitoring locations within a small catchment, *Geosciences Journal* **9**(3), 277-286
- Feter, C.W., 2003, 지하 수학, 시그마프레스, 676, p
- Freeze, R.A., and Cherry, J.A. 1979, Groundwater, Prentice Hall, 640, p
- Neuman, S.P., 1975, Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers considering delayed gravity response, *Water resources Research*, **11**, 329-342

- Padilla, A., Pulido-Bosch, A., 1995, Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis, *Journal of Hydrology*, **168**, 73-89
- T. Kim., K.-K. Lee., K.S. Ko., H.W. Chang., 2000, Groundwater flow system inferred from hydraulic stress and head at an underground LPG storage cavern site, *Journal of Hydrology*, **236**, 165-184
- Tood, D.k, 1980, Groundwater Hydrology. (2nd de), John Wiley and Sons, Inc., 535, p
- Yi, M.J., Lee, K.K., 2004. Transfer function-nose modelling of irregularly observed groundwater heads using precipitation data, *Journal of Hydrology*, **288**, 272-287

ABSTRACT

Time series analysis and modeling for the investigation of seawater intrusion into fractured rock aquifer in Muan, Korea

Jeong Woung Ju

Department of Earth and Environmental Science

Graduate School, Chonnam National University

(Directed by Professor In Wook Yeo)

(Abstract)

Seawater intrusion into coastal fractured rock aquifer, resulting in groundwater contamination, is of serious concern in the province of Jeolla Namdo, Korea, which heavily depends on groundwater resources. In order to investigate and predict seawater intrusion into coastal fractured rock aquifer in Muan, Jeolla Namdo. Pumping test and time series analysis and modeling were conducted using groundwater level and electrical conductivity (EC) monitored from April, 2006 to August, 2007. Pumping tests conducted at the site yield transmissivity of 3.63×10^{-4} m²/sec, hydraulic conductivity of 7.36×10^{-6} m/sec, and specific yield of 0.047~0.05. EC higher than 10,000 μ S/cm is detected at depth

of 70m, which indicates seawater intrusion. Groundwater level was affected by both artificial pumping and rainfall.

The correlation analysis using autocorrelation and cross-correlation functions was conducted to investigate seawater intrusion. Autocorrelation analysis shows that groundwater level and EC are well-autocorrelated and have a long memory effect. Cross-correlation analysis indicates that groundwater level is influenced by rainfall, and EC measured at the depth of 55m and 70m have the highest cross-correlation coefficient of -0.46 and -0.64 with delay time of 1 day, respectively. The negative correlation coefficient with relatively high values indicates that the decline of groundwater level by pumping causes seawater intrusion in this area. Cross-correlation coefficients of tide with EC and groundwater level are lower than 0.1. The overall result of cross-correlation analyses indicates that pumping plays a major role in accelerating seawater intrusion rather than tide.

Time series model was selected on the basis of time series analysis, and the time series modeling was conducted to predict groundwater level and EC. Transfer function-noise (TFN) model that which can consider rainfall as an input data was adopted to predict groundwater level that is affected by rainfall, which agrees well with the observed data. Seasonal autoregressive integrated moving average (SARIMA) model was used to predict EC, which yields a reasonable match with the observed EC data.

Time series analysis and modeling is found to be effective for analyzing the major factors causing seawater intrusion and predicting EC, consequently seawater intrusion in fractured rock aquifer.

Keywords: seawater intrusion, time series analysis, time series model, fractured rock aquifer.

감사의 글

어느덧 시간이 흘러 대학원 2년 6개월 동안의 노력과 결실이 한권의 책으로 나오게 되었습니다. 지금도 많이 부족하지만 한권의 책을 만들고 보니 지난 2년 6개월 시간 동안 좀 더 노력하지 않았나 하는 생각이 많이 듭니다. 이렇게 많이 부족한 저에게 연구란 무엇인지 가르쳐 주신 제 지도교수님 여인옥 교수님께 감사의 마음을 전합니다. 항상 저의 편에서 생각해 주시고 연구하는데 있어 부족함 없이 지원해 주시며, 한동안 방황으로 힘들어 할 때 따뜻하게 웃으면서 감싸주신 점 너무 고맙게 생각하고 있습니다.

처음으로 지질학을 접하면서 지질학이란 무엇인지 가르쳐 주신 허민 교수님, 지질필드란 이런 것이다 하고 방향을 제시 해주신 김용준 교수님, 항상 학생들과 함께 하며 지질학에 대한 많은 이야기를 들려주신 김성균 교수님, 첫 필드를 함께 해주신 박배영 교수님, 퇴적학과 지형학에 많은 가르침을 주신 전승수 교수님, 항상 밝게 웃으시며 친절하게 대해주신 노열 교수님 진심으로 감사드립니다.

대학원 생활을 하면서 학문적으로 부족한 수학을 공부하기 위해 찾게 되었던 공대 공업수학 강의에서 만나게 된 윤왕중 교수님께 배운 공업 수학이 제 연구에 많은 도움이 되었습니다. 또한 시계열분석을 공부하기 위해 찾았던 수학통계학부 교수님, 시계열분석에 대해서 많은 조언을 해주신 김태희 박사님 진심으로 감사드립니다.

대학 생활 8년 동안 함께 해준 내 소중한 친구들 중환이, 루지, 형진이, 근홍이, 치훈이, 재훈이 항상 내 옆에서 내 버팀목이 되준 친구들 같은 연구실 생활 하면서 밤새워 같이 공부하고 토론하고 다투기도 많이 했던 기영이와 학윤이 같은 동네 살면서 학교 끝나고 집에 돌아가는 길에 많은 대화를 나누었던 성훈이, 친구들아 항상 내 옆에 있어서 고맙고 나 힘들 때 고민도 들어주고 술에 취해 한 소리도 다 들어줘서 너무 고맙다. 그리고 내 사랑하는 후배들 선배라고 별로 해준것도 없는데 친형처럼 잘 따라준 대형이, 동철이, 범수, 병노, 종민이, 동진이 모두들 고맙다. 학기 중에 서울에 올라와서 직장 생활로 인해

많은 도움을 주지 못했던 우리 학부방 꼬맹이들 슬기, 보아, 숙연이 미안하고
한번씩 광주 내려가면 항상 따뜻하게 대해준거 잊지 않을게 고맙다.

연구실에 꽃이 되어준 은영이, 지나 아마 이 두 친구들이 없었다면 연구
실이 무척 상막했을지도 모른다. 그리고 나에게 많은 추억들을 준 사람이기도
하다. 대학원생활에 지침이 되었던 대학원 선배님들 우리 연구실 바로 옆에서
생활한 종관이형, 영숙이 누나는 학교생활에 항상 어려운 일이 있으면 먼저 찾
아가는 퇴직환경연구실 형 누나, 술을 무척 좋아하는 재열이 형 학교생활에 있
어서 많은 도움 주신 거 감사드립니다.

대학원 학기 중 선택한 첫 직장 지오그린²¹ 이제는 이곳이 나의 또 다른
연구실이 되어 버렸다. 회사 업무를 하면서 논문을 쓰기란 조금은 부담스러운
일이었지만, 천정용 팀장님, 이명재 팀장님, 김정우 차장님, 전성천 과장님, 최
미정 과장님 많은 관심과 배려 속에서 논문을 마무리 할 수 있었습니다. 그리
고 서울 생활과 직장생활에 많은 도움을 준 회사 동료들 너무 감사합니다.

마지막으로 우리 부모님, 처음 대학원 간다고 했을 때 반대로 무척이나
부모님에게 가슴 아픈 소리를 많이 했던 것 죄송합니다. 하지만 이제는 아들이
대학원을 나왔다며 자랑스러워하시며 언제나 주변 분들에게 자랑하시는 어머
니, 아버지께 감사 인사드리며 이 논문을 드립니다. 앞으로는 더욱더 발전하
는 아들의 모습을 기대해 주세요. 그리고 우리 동생, 항상 형이라고 잘 해준
것도 없는데 형을 잘 따르며 이해해주고, 믿어준거 너무 고맙고 늦게 시작한
공부 어려움이 많겠지만 잘 이겨내고 네 꿈을 이룰거라 이 형은 믿는다. 또한
할머니와 지금은 돌아가신 할아버지께 이 논문을 드립니다. 내 소중한 가족들
항상 고맙게 생각하고 있습니다. 아마 가족이 없었다면 지금의 저는 없었을 겁
니다.

학업의 결과가 한 권의 책으로 나오기 까지 많은 조언과 관심 아끼지 않
고 보내주신 많은 사람들에게 감사 인사드리며 그 많은 분들께 항상 최선을 다
하고 발전하는 모습 보여드릴 것을 약속드립니다.