

일본 동부지역 지진에 따른 지각변동 모니터링

박준규¹, 김민규^{2*}

¹서일대학교 토목과, ²GGSEN지니어링 기술연구소

Monitoring about Crustal Deformation by Earthquake in the East of Japan

Joon-Kyu Park¹ and Min-Gyu Kim^{2*}

¹Dept. of Civil engineering, Seoil College

²Research Institute, GGS Engineering

요약 지진의 영향으로 인한 지각변동 모니터링은 지구물리 및 측지학 분야에서 중요한 연구대상이다. 본 연구에서는 지난 3월 11일 오후 2시 46분 경 발생한 일본 지진에 따른 지각변동 영향을 분석하기 위해 일본지역의 9개 IGS 상시관측소를 대상으로 지진 발생 전·후의 자료를 정밀절대측위로 처리하고, 상시관측소의 위치 해석을 통해 지진으로 인한 일본지역의 지각변동을 분석하였다. 지각변동 모니터링 결과, 일본지역의 지진 범위량과 지진 전·후 지각변동의 변화를 정량적으로 제시할 수 있었다. 지진 전·후 일본지역의 지각변동이 기존과 다른 양상을 나타내고 있음을 볼 때, GPS 관측자료 해석을 통한 지속적인 지각변동 모니터링이 필요할 것이다.

Abstract Monitoring of crustal movement by earthquake is an important line of study in geophysics and geodesy. In this Study, before and after the earthquake data about nine IGS permanent stations were processed by Precise Positioning System to analysis the influence area about Japanese earthquake in March 11 at 2:46pm. As the result of crustal deformation monitoring, the quantitative earthquake displacement and change of crustal movement was presented. Crustal movement monitoring using continuous GPS data processing is necessary for crustal research and predicting earthquake because crustal movement assumed a new aspect before and after the earthquake in Japan.

Key Words : GPS, Earthquake, CORS, Crustal Movement, Monitoring

1. 서론

최근 전세계적으로 지각변동에 따른 지진의 발생빈도가 증가하면서 지각변동과 재해탐지에 대한 중요성이 증대되고 있다. 2010년 2월 칠레 제2의 수도인 콘셉시온 동북쪽 115km 지점에서 리히터 규모 8.8의 강진으로 수 백명에 이르는 사상자와 이재민이 발생하였다. 또한 지난 2011년 3월 11일 일본 동부지역 해저에서 리히터 규모 9에 육박하는 지진이 일어나 2만 7천명이 넘는 사망자와 실종자가 발생하는 대참사가 일어났다[1].

과거 지각변동에 관한 연구는 지질학 및 지체구조학적 본 논문은 2011년도 서일대학 학술연구비에 의해 연구되었음.

*Corresponding Author : Min-Gyu Kim

Tel: +82-10-3373-6033 email: kmgtpq@paran.com

접수일 12년 02월 07일

수정일 12년 03월 07일

인 측면에서 접근하여 왔지만 오늘날에는 과학기술의 발달로 VLBI, SLR, GPS와 같은 우주측지 기술을 적용함에 따라 지각변동에 대한 측지학적 접근이 이루어지고 있다. 특히, GPS를 이용한 고정밀측위기술은 세계기준좌표계의 설정, 지구자전축의 회전계수 결정의 우주측지 분야에서 그 역할과 비중이 점점 증가하는 추세이며, 저가의 구축비용과 정밀한 위치 결정이 가능하기 때문에 고가의 VLBI나 SLR을 대신해 지각운동의 검출 및 지각변동 감시 등과 같은 지구과학 분야에 다양하게 활용되고 있다[2-3].

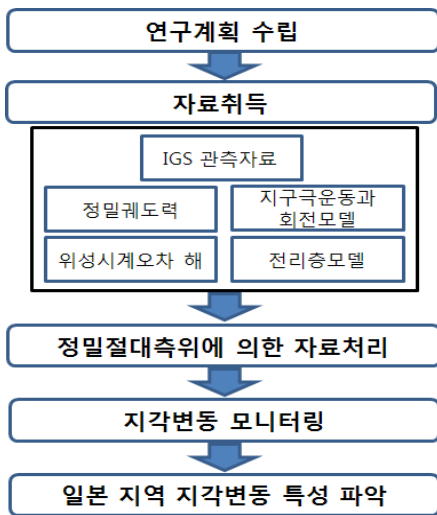
국내의 경우, 원전부지와 한반도 주요지역의 mm급 지각변위 측정과 측지학적 특성을 분석하고, 원전부지의 지

게재확정일 12년 05월 10일

진 안정성평가 기술개발을 위해 GPS를 이용한 측지학적 정보 제공 연구가 수행되었으며[4], 지진예지 및 지각변동 감지와 같이 정밀 위치 해석이 요구되는 분야에 GPS의 활용가능성을 입증하기 위하여 GPS 관측자료 해석을 통해 지각변동 속도를 산출한 연구가 이루어졌다[5].

국외의 경우, Chi-Chi 지진을 대상으로 지표면 아래 단층의 기하학적 구조와 등진파선상(等震波線上) 경사분포를 GPS 측정값을 통해 산출한 연구가 이루어졌으며[6], GPS를 이용하여 2004년에 발생한 Sumatra-Andaman 지진과 관련된 지반 이동량을 추정하는 연구가 수행되었다[7].

본 연구에서는 지난 3월 발생한 일본 지진에 따른 지각변동 모니터링을 위해 일본지역의 9개 IGS 상시관측소를 대상으로 지진 발생 전후 관측자료를 정밀절대측위로 처리하여 지진으로 인한 지각변동 속도를 산출하고, 지각변동 모니터링 결과를 통해 일본지역의 지각변동 특성을 파악하고자 하였다. 그림 1에 연구흐름도를 나타내었다.



[그림 1] 연구흐름도
[Fig. 1] Flow chart

2. 관측자료 취득 및 처리

2.1 관측자료 취득

지진에 의한 지각변동 모니터링을 위해 IGS 상시관측소 중 일본에 위치한 MIZU, STK2, TSKB, TSK2, USUD, KSMV, MTKA, SMST 및 AIRA의 GPS 관측자료를 취득하였다. 관측자료는 지진 발생 전인 2010년 1월 1일부터 지진 발생 후인 2011년 12월 31일까지의 자료를 이용하였다. 그림 2에 지진의 진앙지와 IGS 상시관측소의 위치를 나타낸다.



[그림 2] 연구대상지
[Fig. 2] Study area

2.2 관측자료 처리

GPS 관측자료는 Bernese GPS S/W를 이용하여 처리하였으며, 정밀절대측위 방법으로 상시관측소의 위치 해석을 실시하였다. Bernese GPS S/W는 스위스 베른대학의 천문연구소에서 개발한 프로그램으로 두 수신기 사이의 직선거리에 대해 20 ppb(part per billion)의 정밀도로 위치를 측정할 수 있다[8]. 지진 발생 전 2010년 1월 1일에서 지진 발생 후인 2011년 12월 31일까지의 관측자료를 일주일 간격으로 처리하였다. 표 1에 자료처리와 관련된 Parameter를 정리하였다.

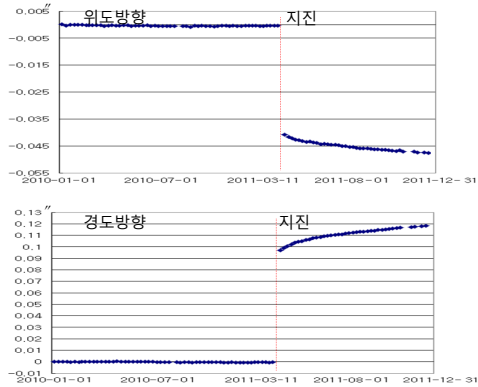
[표 1] 자료처리와 관련된 Parameter
[Table 1] Parameter for data processing

Parameters	Description
Satellite Ephemeris	Precise Ephemeris
Tropospheric Correction	Dry and Wet Niell Model
Earth Gravity Potential	JGM3
Sub-daily Earth rotation parameters	IERS2000
Nutation	IAU2000
Solar System Ephemeris	JPL DE200

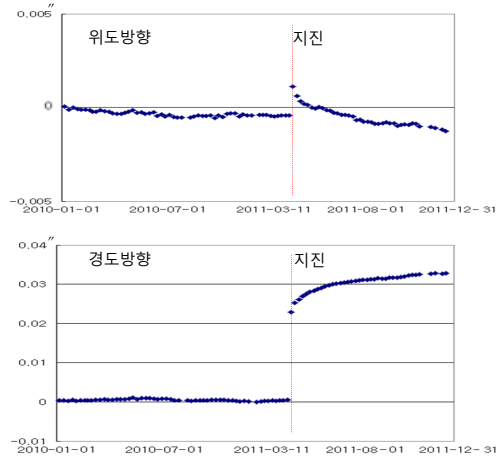
3. 지각변동 모니터링

3.1 지진변위 해석

본 연구에서는 지각변동 모니터링을 위해 정밀절대측위를 이용하여 상시관측소의 위치를 해석하였다. 그림 3~그림 11은 상시관측소의 위치 해석 결과를 나타낸다. 그래프는 2010년 1월 1일의 위치를 기준으로 나타낸 것이며, 가로축은 시간, 세로축은 변화량(")이다.



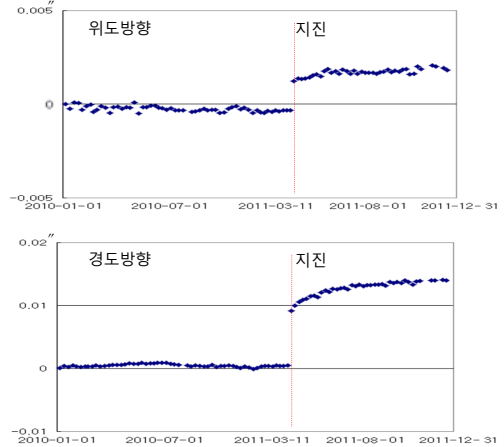
[그림 3] MIZU 상시관측소
[Fig. 3] MIZU CORS



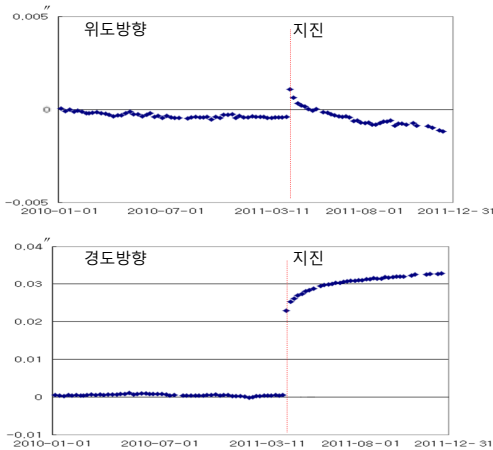
[그림 6] TSK2 상시관측소
[Fig. 6] TSK2 CORS



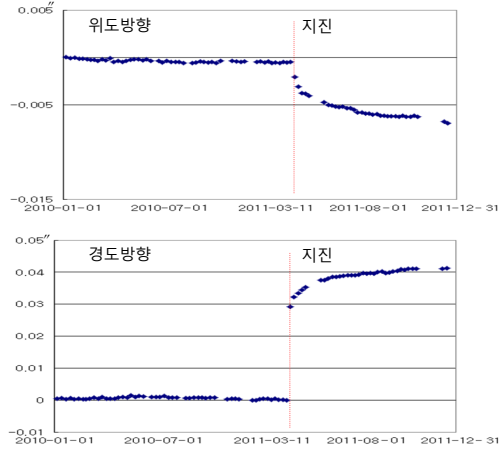
[그림 4] STK2 상시관측소
[Fig. 4] STK2 CORS



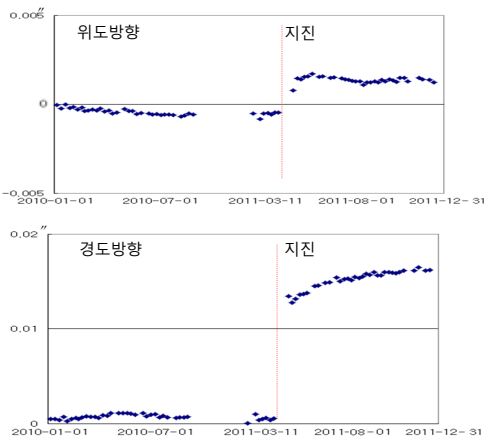
[그림 7] USUD 상시관측소
[Fig. 7] USUD CORS



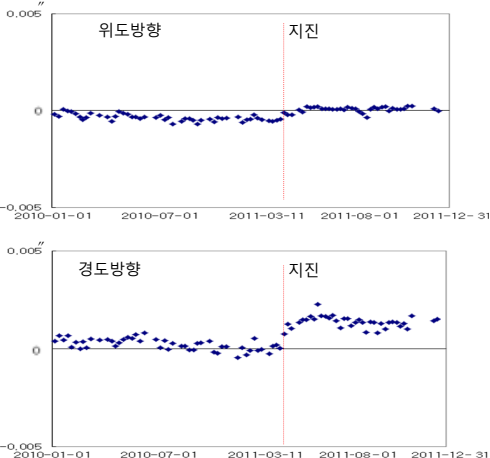
[그림 5] TSKB 상시관측소
[Fig. 5] TSKB CORS



[그림 8] KSMV 상시관측소
[Fig. 8] KSMV CORS



[그림 9] MTKA 상시관측소
[Fig. 9] MTKA CORS



[그림 10] SMST 상시관측소
[Fig. 10] SMST CORS



[그림 11] AIRA 상시관측소
[Fig. 11] AIRA CORS

위 그림들에서 보는 바와 같이 지진 이전의 위치 해석 결과는 일반적인 미소변위를 보였으나, 진앙지 주변의 상시관측소는 3월 지진 전·후로 급격한 변위가 발생한 것을 알 수 있다. 진앙지와 가장 가까운 MIZU에서 약 2.7m의 큰 변위가 발생했으며, TSKB, TSK2, USUD, KSMV, MTKA에서도 약 0.2m~0.8m의 변위가 나타났다. 진앙지와 거리가 먼 STK2, SMST, AIRA는 0.01m~0.03m의 미소한 지진변위가 발생하였다. 표 2는 지진으로 인한 변위를 나타낸 것이며[9], 그림 12는 지진변위의 크기와 방향을 제시한 것이다.

[표 2] 지진변위
[Table 2] Displacement by earthquake

상시관측소	지진변위				진앙지에서의 거리(km)
	위도방향 (m)	경도방향 (m)	방위각 (°)	총변위 (m)	
MIZU	-1.262	2.358	118.2	2.67	138.6
STK2	-0.028	0.015	152.1	0.03	577.9
TSKB	0.034	0.608	86.8	0.61	317.8
TSK2	0.035	0.607	86.7	0.61	317.8
USUD	0.051	0.237	77.9	0.24	430.2
KSMV	-0.077	0.789	95.6	0.79	302.5
MTKA	0.063	0.406	81.1	0.41	384.5
SMST	0.01	0.023	66.0	0.03	782.5
AIRA	0.004	0.012	71.6	0.01	1288.3



[그림 12] 지진변위의 크기와 방향
[Fig. 12] Dimension and direction of displacement

3.2 지진 전·후 지각변동 모니터링

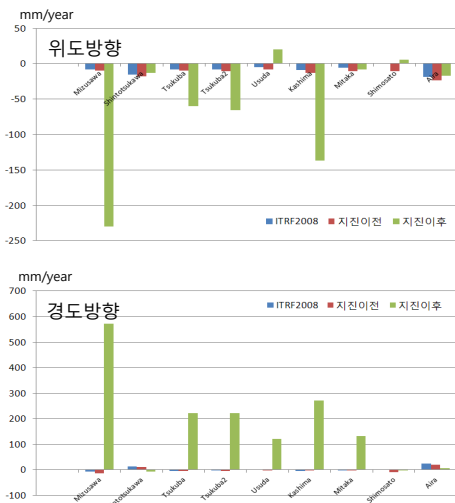
지각변동 속도는 상시관측소의 위치 해석 결과를 바탕으로 산출하였으며, 산출된 결과의 검증에 위해 국제지구 기준프레임(The International Terrestrial Reference Frame)에서 발표한 성과와 비교하였다.

표 3은 ITRF2008과 지진 전·후의 상시관측소별 지각변동 속도를 나타낸 것이다[10]. 지진 전 속도는 2010년 1월 1일~2011년 3월 11일의 위치 해석 결과로부터 계산된 것이며, 지진 후 속도는 2011년 3월 12일~2011년 12

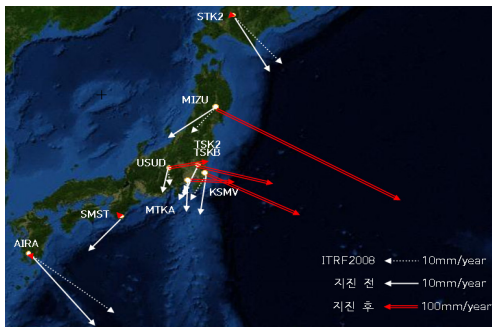
월 31일의 위치 해석 결과를 이용하여 산출하였다. 그림 13은 ITRF2008 및 지진 전·후의 위도 및 경도방향 지각변동 속도를 비교한 것이며, 그림 14는 각 상시관측소 별 지각변동 속도 벡터를 도시한 것이다.

[표 3] 상시관측소별 지각변동 속도
[Table 3] Velocity of CORS

상시관측소	ITRF2008		지진 전		지진 후	
	N (mm/yr)	E (mm/yr)	N (mm/yr)	E (mm/yr)	N (mm/yr)	E (mm/yr)
MIZU	-8.0	-6.6	-9.9	-13.5	-20.1	571.7
STK2	-15.1	13.4	-17.6	10.1	-13.0	-5.8
TSKB	-7.8	-3.9	-10.2	-4.7	-60.2	222.8
TSK2	-8.2	-2.3	-10.7	-3.5	-65.6	222.8
USUD	-4.7	0.4	-7.9	-1.7	20.0	120.3
KSMV	-8.7	-4.9	-13.1	-1.9	-137.2	270.4
MTKA	-5.6	-2.4	-10.3	-0.7	-7.8	131.9
SMST	-	-	-10.5	-9.5	5.8	-3.1
AIRA	-18.8	24.3	-23.6	19	-16.8	7.3



[그림 13] 지각변동 속도 비교
[Fig. 13] Comparison of crustal movement velocity



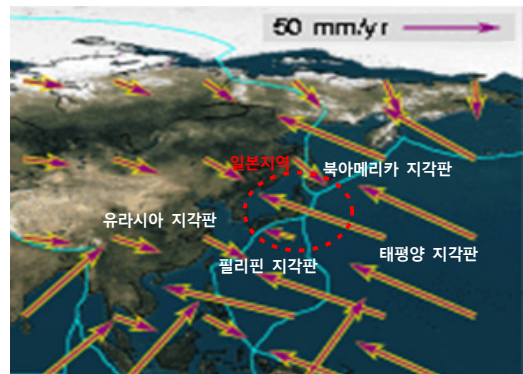
[그림 14] 상시관측소 별 지각변동 속도 벡터
[Fig. 14] Velocity Vector of the CORS

표 3에서 ITRF2008과 지진 전 해석 결과를 비교하면 각 상시관측소 별로 약간의 차이를 보이지만, 이는 ITRF(30년)와 본 연구에 사용된 자료의 관측기간(1.3년)이 상이하기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 대부분의 상시관측소에서 ITRF2008과 비슷한 지각변동 방향과 크기를 나타내고 있으므로 지진 전 해석 결과를 바탕으로 지진 후 지각변동을 모니터링하였다.

지진 후 지각변동은 AIRA를 제외한 나머지 상시관측소에서 기존의 지각변동과는 다른 양상을 나타내고 있다. 특히, 진앙지 주변 MIZU, TSKB, TSK2, USUD, KSMV 및 MTKA 상시관측소에서 동쪽방향으로 기존 지각변동 속도의 10배 이상인 120mm/year~ 571mm/year의 매우 빠른 속도를 나타내고 있다. 표 4는 지진 전·후 상시관측소별 지각변동 방향이며, 그림 15에 UNAVCO에서 발표한 기존의 지각변동 벡터를 나타내었다[11].

[표 4] 상시관측소별 지각변동 방향
[Table 4] Crustal movement direction of the CORS

상시관측소	지진 전	지진 후
MIZU	↙	↘
STK2	↘	↘
TSKB	↘	↘
TSK2	↘	↘
USUD	↘	↘
KSMV	↘	↘
MTKA	↘	↘
SMST	↘	↘
AIRA	↘	↘



[그림 15] 일본 주변 지각판의 지각변동 벡터
[Fig. 15] Crustal movement vector around Japan

지진 후, STK2와 SMST 상시관측소는 각각 남서쪽과

북서쪽으로의 이동이 나타났다. 이는 주변 태평양 및 필리핀 지각판과 비슷한 방향으로 이 지각판들의 지각변동에 영향을 받는 것으로 판단된다.

MIZU, TSKB, TSK2, USUD, KSMV 및 MTKA 상시 관측소의 경우, 이동방향이 남쪽에서 동쪽방향으로 변화하였으며, 주변 태평양 및 필리핀 지각판의 거동과 반대방향을 나타내었다. 이처럼 지각변동이 서로 반대방향으로 진행되면 지각판 경계에서 지진의 원인이 되는 탄성 에너지가 축적되게 된다. 연구를 통해 산출된 지각변동 속도와 방향으로 볼 때, 향후 일본 동부지역에 대규모의 지진이 발생할 위험성이 있다. 따라서 지진예측 및 지각변동 연구를 위해 일본지역 주변에 대한 지속적인 지각변동 모니터링이 필요하다.

4. 결론

본 연구는 IGS 상시관측소의 정밀 위치 해석을 통해 일본 지진에 따른 지각변동 변화를 모니터링한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 2010년 1월에서 2011년 12월의 IGS 관측자료 해석을 통해 지진 전·후 일본지역 지각변동 변화를 효과적으로 모니터링 할 수 있었다.
2. 지진으로 인한 변위량을 산출하였으며, 지각변동 모니터링 결과 지진 이후 일본지역의 지각변동 방향과 크기를 정량적으로 제시할 수 있었다.
3. 지진 전·후 지각변동 변화와 주변 지각판의 움직임이 서로 반대방향을 볼 때, 일본 동부지역에서 지각변동으로 인한 탄성변형 에너지가 축적되고 있는 것으로 판단된다.

향후, 일본지역의 지진예측 및 지각변동 연구를 위해 GPS를 이용한 지속적인 지각변동 모니터링이 필요하다.

References

[1] <http://en.wikipedia.org/>
 [2] H. S. Kim, "Crustal deformation of Parkfield earthquake from GPS data", Proceeding of the Spring Meeting of KMS, pp.116-117, 2005.
 [3] D. S. Song, H. S. Yun, "Crustal Deformation Velocities Estimated from GPS and Comparison of Plate Motion Models", KSCE journal, Vol.26, No.5D, pp.877-884, 2006.
 [4] Ministry of Science and Technology, "GPS Data Analysis for Active Fault Evaluation", 2006.
 [5] J. M. Cho, "Deformation analysis from permanent GPS

station in Korean peninsula, PhD thesis, Sungkyunkwan University, 2006.

[6] K. M. Johnson, Y. J. Hsu, P. Segall, S. B. Yu, "Fault geometry and slip distribution of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake imaged from inversion of GPS data", Geophys. Res. Lett. Vol.28, No.11, pp.2285-2288, 2001.
 [7] C. Subarya, M. Chlieh, L. Prawirodirdjo, J. P. Avouac, Y. Bock, K. Sieh, A. J. Meltzner, D. H. Natawidjaja, R. McCaffrey, "Plate-boundary deformation associated with the great Sumatra-Andaman earthquake", Nature, Vol.440, pp.46-51, 2005.
 [8] <http://www.aiub.unibe.ch/>
 [9] J. K. Park, "Analysis of Influence Area about Japanese Tohoku Earthquake Using IGS Data", Journal of the Korean Cadastre Information Association, Vol.13, No.2, pp.27-34, 2011.
 [10] <http://itrf.ensg.ign.fr/>
 [11] <http://www.unavco.org/>

박 준 규(Joon-Kyu Park)

[종신회원]



- 2001년 2월 : 충남대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 2003년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (석사)
- 2008년 8월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (박사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 서일대학교 토목과 전임강사

<관심분야>
공간정보공학

김 민 규(Min-Gyu Kim)

[정회원]



- 2006년 2월 : 충남대학교 공과대학 토목공학과 (공학사)
- 2008년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (석사)
- 2008년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (박사과정)
- 2011년 3월 ~ 현재 : (주)GGS엔지니어링 기술연구소 소장

<관심분야>
공간정보공학