경복궁 소방방재시스템 구축을 위한 GPR탐사 활용성 연구

Study on GPR Prospecting Utilization for Fire-Prevention System of Gyeongbok Palace

신종우* · 오현덕** · 김대연***

Shin, Jong Woo · Oh, Hyun Dok · Kim, Dae Yeon

Abstract

The fire-prevention system of the four major palaces, at which a considerable portion of the major architectures are concentrated, might be rated to be very inadequate. At present, the fire-extinguishing facilities at each structure are equipped with only a few extinguishers, so they're in acute need of the establishment of a systematic fire-prevention system. Accordingly, this study understood the installation risk consequent on the distribution scope of the buried cultural properties by each path on the basis of the design for fire-extinguishing piping paths which is in progress as a part of the establishment of the fire-prevention system of Gyeongbok Palace among the four major palaces. In this study, GPR(Ground Penetrating Radar)-prospecting was used for the distribution of the buried cultural properties at major areas of Gyeongbok Palace. And we analyzed the buried cultural properties for risk of potentially damaging the historical site in time of installing fire-extinguishing piping through GPR survey results. The characteristic of this study is noteworthy in that it was done by linking up the establishment of the fire-prevention system of Gyeongbok Palace with GPR-prospecting of the buried cultural properties. This research hopes that GPR-prospecting method of buried cultural properties will be aggressively made the best use of an minimization damage of theirs through the further establishment of fire-prevention system for the structures in historical sites.

Key words : GPR(Ground Penetrating Radar) prospecting, buried cultural properties, fire-prevention system

요 지

주요 건축문화재가 상당부분 밀집해 있는 4대궁 소방방재시스템은 열악한 편에 속한다. 이에 문화재청은 2010년부터 4대궁 건축문화재 소방방재를 위한 시스템을 구축 중에 있다. 본 연구는 4대궁 중에서 경복궁 소방방재시스템 구축의 일환으로 진행되고 있는 소화배관 경로 설계(안)를 기본으로 각 경로별 매장문화재 분포범위에 따른 설치위험도를 파악하기 위해 실시되었다. 경복궁 주요지역의 매장문화재 분포를 유적탐사(물리탐사)법 중 지하투시레이다(GPR, Ground Penetrating Radar) 탐사 방법을 사용하여 파악하였다. 지하 수평적인 탐사결과를 분석하여 소화배관 설치 시 유구 훼손 가능성에 대한 위험도를 파악, 이를 바탕으로 경로별 설치 위험도를 제시하였다. 또한 소화배관 설치 위험도에 따른 소화배관 경로의 수정 · 보완 뿐 아니라 지하 하부에 대한 매장문화재 고 분해능 영상을 제공함으로써 경복궁 주요지역 건물지 배치상황 등을 확인할 수 있었다. 특히 이번 연구로 얻어진 매장문화재 분포 결과는 향후 경복궁 복원정비 시에 좋은 참조자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 이번 연구에서 유적탐사가 유적지(예 : 4대궁 및 국가사적지 등)의 건축문화재 소방방재시스템 구축과 관련된 연계성을 확인할 수 있었으며 향후에 문화재방재 및 매장문화재 훼손 최소화의 일환으로 유적탐사의 활용성이 높아지길 기대해 본다.

핵심용어 : GPR탐사, 매장문화재, 소방방재시스템

1. 서 론

이번 조사는 경복궁내의 건축문화재 소방방재시스템 구축의 일환으로 소화배관 경로설계 수정보완을 위해 지하투시레이다(GPR, Ground Penetrating Radar)탐사를 실시하였다. 소화배관 경로주변에 존재 할 가능성이 있는 매장문화재 분포를 확인하고 소화배관 설치 시 매장문화재 훼손을 최소화

하기 위해 경로의 수정보완을 위해서 조사가 실시되었다.

탐사는 경복궁 주요지역 중에서 문화재청이 설계(안)으로 제출된 도면을 중심으로 실시하였다. 조사지역이 궁궐이라는 지역적 특성상 지하에 많은 문화재관련 유구가 존재할 가능성이 있었다. 이번 GPR 탐사를 통해 지하의 매장문화재 분포에 대한 정보를 얻어 그 결과를 바탕으로 소화배관 경로의 위험도를 파악하고, 위험도가 높을 경우 유구가 존재할 가능

*정회원, 국립문화재연구소 고고연구실 학예연구사 (Email : 21jwshin@gmail.com)

**국립부여문화재연구소 학예연구실 학예연구사

***국립문화재연구소 고고연구실 연구원

그림 1. 경복궁 위성사진과 흥례문 주변 탐사 전경

표 1. 유전상수(ϵ_r) 및 레이더 파의 속도(Reynolds, 1997)

물질	ϵ_r	v (mm/ns)	물질	ϵ_p	v (mm/ns)
공기	1	300	일반토양	16	75
담수	81	33	화강암	5~8	106~120
해수	81	33	석회암	7~9	100~113
얼음	3.2	167	돌로마이트	6.8~8	106~115
마른 해안모래	10	95	젖은 현무암	8	106
마른 모래	36	120~170	젖은 셰일	7	113
젖은 모래	25~30	55~60	젖은 사암	6	112
젖은 실트	10	95	석탄	4~5	134~150
젖은 점토	8~15	86~110	석영	4.3	145
마른 점토	3	173	콘크리트	6~30	55~112
늪지	12	86	아스팔트	3~5	134~173
농경지역	15	77	PVC,에폭시	3	173

성이 낮은 곳으로 소화배관 예상경로를 수정하는데 목적이 있다.

조사지역인 경복궁은 조선 왕조의 법궁으로 1395년 태조 이성계가 창건하였고 1867년 고종때 중건되었다. 궁궐은 왕과 관리들의 정무 시설, 왕족들의 생활공간, 휴식을 위한 후원 공간이 그림 1처럼 구성되어 있다.

지하에 관한 정보를 얻기 위해서 여러 가지 방법을 사용할 수 있다. 그 중에서도 가장 좋은 방법은 지하의 구조를 직접 눈으로 확인하는 것이나 자연적, 인공적인 이유로 직접 확인하기는 쉽지 않다. 이러한 이유로 유적탐사를 이용하여 지하의 매장문화재를 포함한 유구나 지하구조 등을 유추한다. 지하 매질의 물성(physical properties) 변화를 측정하여 측정 결과가 나타나도록 하는 원인물질의 성질과 분포를 유추하는 것이다. 예를 들어 지하매질의 밀도가 변하면 탄성파(elastic waves)의 전파속도, 전기전도도, 겔보기 비저항 및 기타 전자파 반사 세기 등이 변하게 된다.

이에 유적탐사는 매장문화재 유적분포 등을 확인하기 위하여 발굴이나 시굴 등의 방법을 통해 직접 확인하지 않아도 대략적인 분포범위를 유추해 볼 수 있어 매우 유용하다. 유적탐사의 종류는 매질의 전기적 성질을 이용하는 전기비저항 탐사, 매질의 자기적 특성을 파악하여 조사하는 자력탐사 및 지하투시레이다(GPR) 탐사 등이 활용된다. 특히, 유적탐사 방법 중 지하투시레이다(ground penetrating radar, GPR)는 10 MHz~1 GHz의 주파수대역의 전자기 펄스를 이용하기 때문에 다른 탐사법에 비해 상당히 천부의 지하구조를 파악할 수 있어 매장문화재 탐사에 활용도가 높다.

2. 연구방법

2.1 지하투시레이다(GPR, Ground Penetrating Radar) 탐사

2.1.1 Radar 파의 전파

GPR탐사는 다른 탐사법에 비해 상대적으로 얇은 심도 깊이 지하구조를 확인하는데 매우 유용하다. 이는 상대적으로 짧은 파장의 전자기파를 사용함으로 분해능이 높으며 매질간(일반토양과 유구)의 유전율의 차이에 의한 전자기파의 반사와 회절현상 등을 측정하여 해석하는 방법이 활용되기 때문이다. GPR 탐사는 얇은 지역에서 실시하는 천부 탄성과 탐사와 매우 유사하지만 지하매질의 물성에 따른 탐사원리의 차이로 구분된다. 탄성과 탐사는 매질에 진동을 일으켜 매질이 가지고 있는 탄성(또는 탄성계수)에 기반한 탐사방법으로 매질의 전기전도도 및 유전율(또는 유전상수) 변화에 기인한 GPR 탐사와는 구분된다. 레이더 파의 전파는 표 1과 같이 전기전도도, 유전율 및 투자율에 의해 감쇠상수와 위상상수가 결정된다. 매질은 식(1)과 같이 전도도가 클수록, 유전율이 작을수록 레이더 파의 감쇠가 심하다.

$$\lambda_f = \frac{1}{f_c} \times 10^9 (ns), \quad \lambda_l = \frac{\lambda_f \times c}{10^9 \times \epsilon_r} (cm) \quad (1)$$

λ_f : 전자기파의 1파장(ns)

λ_l : 땅속에서의 1파장의 길이(cm), 토양에 따라 달라짐

f : 주파수(Hz)

c : 빛의 속도 = $3 \times 10^{10} (cm/ns)$

ϵ_r : 유전상수

2.1.2 GPR 탐사의 분해능

GPR탐사 분해능(resolution)은 시간적으로 인접한 두 반사 신호를 구분하는 능력이다. 따라서 분해능은 주파수의 함수이다. GPR탐사에 사용되는 송수신 안테나는 일정 주파수 대역 내의 신호만을 방사 또는 수신하도록 제작되어 있으며, 이러한 주파수 대역을 안테나의 대역폭(bandwidth)이라 한다. 또한 최대반응을 나타내는 주파수를 안테나의 중심 주파수(center frequency, f_c)라 한다. 따라서 안테나마다 고유의 중심 주파수가 있으며, 일반적으로 400 MHz 안테나라는 말은 안테나의 중심 주파수가 400 MHz 임을 의미한다.

대부분의 레이더 탐사기는 중심 주파수와 대역폭이 같도록 설계되어 있으며, 펄스의 폭(pulse width)은 대역폭, 즉 중심 주파수에 반비례한다(Davis and Annan, 1989). 한편 레이더파(pulse wave)의 파장은 레이더파의 속도와 주기의 곱이며($\lambda = v/f_c$), 분해능은 파장의 1/4이므로, 분해능을 향상시키기 위해서는 중심 주파수(대역폭)가 커야 한다.

레이더파의 속도는 매질의 유전율의 함수이므로 분해능은 매질에 따라 달라짐에 유의해야 한다. 그러나 중심 주파수가 높아지면 분해능은 향상 되지만 파의 감쇠가 커져 가탐심도가 작아진다는 양면성이 있다. 실제적으로 GRP탐사에서 매장물의 개략적인 심도 및 매질의 유전율에 대한 정보가 있을 경우에는 가탐심도 및 분해능을 고려하여 안테나를 선정해야 하며, 그렇지 못할 경우에는 분해능보다는 가탐심도를 우선 고려하여 안테나를 선정하는 것이 유리하다.

2.1.3 장비의 구성

일반적으로 GPR탐사장비는 그림 3과 같이 컴퓨터가 내장된 본체(Control장치), 안테나(송수신안테나)로 구성된다. 본체는 각종 측정 변수의 설정, 자료처리, 저장, 화면 출력 및 송신신호의 제어와 정확한 수신신호의 도달시간을 측정하기 위한 복잡한 전자회로로 구성된다. 안테나는 본체에서 보내준 송신신호를 고전압 펄스로 변형시켜 신호를 방사한다. 또한 반사되어 도달한 신호를 받아 증폭하고, 샘플러 및 A/D 변환을 통하여 디지털 신호로 변환하여 본체에 전송한다. GPR 탐사에서 주파수 및 주파수 대역폭은 레이더파의 침투심도 및 분해능을 결정하는 중요한 요소이다. GPR탐사장비에서 중심 주파수 및 대역폭은 주로 송수신 안테나의 특성에 좌우되므로, 대부분의 레이더탐사 장비는 중심 주파수가 다른 여러 개의 안테나를 갖추고 있다.

2.1.4 GPR탐사의 분류와 측정방법

GPR탐사에서 사용되는 송수신 배열은 크게 반사법, 공중점(共中點, 共通中點, common mid-point, CMP)법 및 토모그래피법의 3가지로 분류할 수 있다. 지표 GPR탐사에서 가장 널리 사용되는 방법은 반사법으로 일정한 송수신 간격을 유지한 상태에서 측선을 따라 일정 간격으로 자료를 획득하는 방법이다. 공중점은 측정점 하부의 레이더파의 속도분포를 구하기 위하여 사용된다. 마지막으로 주로 두 시추공 사이의 영상을 얻기 위하여 수행되는 토모그래피법은 송신기를 송신 시추공의 일점에 고정시키고, 수신기를 수신 시추공을 따라

일정 간격으로 이동하면서 자료를 획득한다. 그 다음 송신기를 다음 위치로 이동시키면서 앞의 과정을 반복하여 자료를 획득하는 방법이다. 이번 조사에서는 레이더 탐사법 중 반사법을 이용하여 데이터를 취득하였다. 또한 현장데이터를 취득함에 있어 여러 가지 유의해야 할 점이 있다. 이는 보다 양질의 데이터를 취득하기 위함이며 현장작업을 실시하기 전에 유의해야 할 점은 다음과 같다.

- 매장물의 심도 : 매장물의 심도가 너무 깊어서 레이더파가 매장물까지 전파하지 못하는 경우에 탐사는 의미를 잃게 된다.
 - 매장물의 크기 및 형상 : 매장물의 크기가 너무 작아서 레이더탐사의 분해능(resolving power)을 넘어서는 경우는 좋은 결과를 기대하기 어렵다.
 - 매장물의 전기적 성질 : 매장물과 주변 매질 사이에 유전율 차이가 있어야 레이더파의 반사나 회절이 일어난다.
 - 탐사 주변 여건 : 탐사의 적용을 어렵게 하는 것에는 대형 금속 구조물이나, 탐사에서 사용하는 주파수를 송출하는 송신소이다. 또한 조사 지역에 쉽고 안전하게 접근할 수 있는가 하는 점 등은 다른 물리탐사에서와 동일하다.
- 매장문화재 탐사에서 가장 관심사항의 하나가 매장물의 정확한 깊이와 크기이다. 비교적 정확한 결과를 위해 GPR탐사에 활용하는 중심 주파수를 변경하여 사용한다. 주파수가 높을수록 작은 매장물까지 감지할 수 있으나 투과깊이는 얕아진다. 반면에 주파수가 낮을수록 투과깊이는 깊어지나 물체를 감지하는 능력은 떨어진다. 이러한 이유로 문화재탐사를 실행하기 전에 탐사의 명확한 목적을 가지고 실시하는 것이 좋은 결과를 이루는 방법이다.

2. 2 현장 탐사 - 데이터 취득 및 분석

경복궁 현장에서 파악할 수 있는 탐사 대상물은 비교적 1~2 m 깊이에 존재하는 유구로 추정된다. 이번 GPR 탐사는 탐사법 중 그림 2에서와 같이 반사법을 사용하였으며 사용된 장비는 그림 3과 같은 미국의 GSSI (Geophysical Survey System Inc)의 Sir-3000이다. 안테나의 주파수는 탐사 대상물의 크기와 깊이를 고려하여 400 MHz로 사용하였다. 탐사는 넓은 지역, 인력 및 작업의 편의성을 위하여 카트(cart)에 장

그림 2. 레이더의 파선 및 파장 크기변화

그림 3. GPR장비 (SIR-3000, GSSI)

그림 4. GPR탐사 축선(0.5 m 간격)

그림 5. 수직데이터에서 수평데이터 추출

착하여 사용하였다. 축선의 설계는 현장마다 조건이 다르지만 이번 경복궁 주요지역은 탐사환경과 편의성을 고려하여 그림 4처럼 축선간격 0.5 m으로 설계하였다. 또한 현장취득 기록시간(time window)는 70 ns(nanosecond, 10^{-9})초로 결정하였다. 탐사범위는 소화배관 경로를 중심으로 하였으며 지하의 매장 문화재 분포범위 등을 고려하여 주변지역까지 범위를 확대하였다.

데이터 분석은 GPR-Slice v.7.0(Dean Goodman, USA) 프로그램을 사용하였으며 자료처리는 반사법 지표처리과정과 거의 유사하게 이득분석 및 보정, 밴드 필터, 속도분석, NMO보정, 구조보정 등을 수행하였다. 데이터 분석결과 표시는 그림 5와 같이 각 축선별로 얻은 수직데이터의 조합에서 분석한 수평데이터(Time-Slice)로 추출하였다.

3. 결 과

경복궁 근정전 주변의 GPR 탐사 결과는 그림 6과 같다.

그림 6. 근정전 일대 GPR 탐사결과

그림 7. 홍례문 주변 GPR 탐사결과

GPR탐사결과는 레이더 파의 반사강도가 강하면 붉은색으로 표현하고 반사강도가 상대적으로 약하면 푸른색으로 표현하였다. 이는 경복궁이 연속된 문화층의 유구가 중첩되는 환경에서 레이더 파의 반사강도가 크다는 것은 유구가 존재할 가능성이 크다는 의미가 된다. 근정전 주변으로 그림 6(a)에서 적십 등의 기초부분으로 의심되는 레이더 반응결과를 보이고 있으며 이는 석축 등에서 나오는 노이즈와 함께 유구에 대한 신호로 추정된다. 그림 6(b)은 근정문 뒤편으로 건물지의 초석으로 추정되는 반응이 3~4 m 간격으로 나타나고 있다. 홍례문 정면의 반응들은 근대 건물지의 기초의 반응으로 지하에 교란되어진 상태로 존재하며 동서쪽의 담장을 따라 보이는 그림 6(c) 반응들도 담장의 기초유구로 보여진다. 또한 사정전, 만춘전 주변 탐사결과는 건물들의 담장기초, 석축기초 및 노이즈 등의 복합적인 결과로 추정된다.

경복궁 홍례문 주변의 GPR 탐사 결과는 그림 7과 같다. 홍례문 정면의 그림 7(e,g) 반응들은 일제시대 조선총독부 건물지의 반응으로 지하에 교란되어진 상태로 남아있는 것으로 파악되며 동서쪽의 담장을 따라 보이는 그림 7(d,f) 반응들은 어구유구 등으로 추정된다.

경복궁과 민속박물관이 접하고 있는 지역과 소주방지 주변의 GPR 탐사결과는 그림 8과 같다. 민속박물관 출입구 쪽으로 이어지는 도로의 그림 8(h) 반응은 정확한 파악이 어려운 매장물 등으로 보이며 그림 8(i,j) 반응들은 현재 존재하지 않는 옛 소주방지 건물 기초로 파악된다.

그림 9(l)는 경복궁의 함화당, 집경당 주변의 GPR 탐사결

그림 8. 민속박물관 입구 및 소주방지 주변 GPR 탐사결과

그림 9. 함화당, 집경당 주변의 GPR 탐사결과

과로서 2005년도 발굴조사가 완료된 곳이다. 발굴조사와 탐사결과는 건물지 기초부분 등이 거의 일치함을 알 수 있었으며 그림 9(k)는 향원정 위쪽으로 유구가 의심되는 반응들이 보이고 있다.

그림 10은 경복궁 전체소화배관 평면도에 이번조사를 통해 얻은 GPR 탐사결과를 중첩(overlay) 한 결과이다.

4. 결 론

그림 11은 경복궁 전체의 GPR 탐사를 바탕으로 소화배관 경로의 위험도를 3가지 유형으로 분리한 결과이다. 유형은 아래와 같다.

- — : 소화배관 경로와 그 주변으로 매장된 유구의 존재 가능성이 낮아 배관공사시 큰 부담이 없는 경로
- ↔ : 소화배관 경로 주변으로 매장된 유구 존재가능성이 있어 배관공사시 유의할 필요가 있는 경로
- : 소화배관 경로와 그 주변에 매장된 유구가 존재하여 배관경로를 변경할 필요가 있는 경로

본 연구는 경복궁 주변 소화배관 설치에 따른 설치 경로 보안을 위해 실시하였다. 하지만 단순히 소화배관 설치경로 위험도에 따른 수정보완 뿐만이 아니라 지하 하부에 대한 매장문화재 고 분해능 영상을 제공함으로써 경복궁 주요지역의 건물지의 배치상황 등을 확인할 수 있었다. 특히 이번 연구로 얻어진 결과는 향후 경복궁 복원정비 시에 좋은 참조자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 이번 연구는 유적탐사가 유적지(예 : 4대궁 및 국가사적지 등)의 건축문화재 소방방재시스템 구축과의 연계성을 확인할 수 있었으며 이후에 문화재 방재와 관련된 물리탐사의 활용성이 높아지길 기대해 본다. 또한 본 연구는 경복궁 내 건축문화재의 경우에 한정해서 조사하였다. 향후 문화재 소방방재시스템 구축을 위해서는 국보, 사적 및 기타 지정문화재의 현황(소방방재 관련 현황 등)을 조사하여 방재인력, 예산, 소화시스템 및 시민보호활동

그림 10. 경복궁 전체 주요지역 GPR 탐사결과

그림 11. GPR 탐사결과를 기초로한 소화배관 경로 유형별 위험도 분류결과

등 여러 방면에서 효율적 대응체재방안 마련이 필요하다고 본다.

참고문헌

민경덕, 서정희, 권병두 (1986) **응용지구물리학**, 우성
손호웅 외 8명 (2000) **지반환경물리탐사**, 시그마프레스.
Goodman, D., Nishimura, Y., Uno, T. and Yamamoto, T. (1994) A
ground radar survey of medieval kiln sites in Suzu city, western
Japan, *Archaeometry*, Vol. 36, No. 2, pp. 317-326.
Goodman, D. (1994) Ground-penetrating radar simulation in engi-
neering and archaeology, *Geophysics*, Vol. 59, Vol. 2, pp. 224-
232.
Goodman, D., Nishimura, Y. and Rogers, J.D. (1995) GPR time
slices in archaeological prospection, *Archaeological Prospec-
tion*, Vol. 2, pp. 85-89.
Ciminale, M. and Mitchell, M. (2001) Investigation of fire ash resi-
dues using mineral magnetism, *Archaeological Prospection*,
Wiley, Vol. 8, No. 4, pp. 227-237.

Linford, N.T. and Canti, M.G. (2001) Geophysical evidence for fires
in Antiquity: Preliminary results from an experimental study,
Paper given at the EGXXXIV general assembly in the Hague,
April 1999, *Archaeological Prospection*, Wiley, Vol. 8, No. 4,
pp. 211-225.
Nishimura, Y. (1998) Joint Research Project: The Agency of Cul-
tural Affairs, Japan/Cambodia, Abstract of the 63rd Annual
Meeting, *Society for American Archaeology*, pp. 225.
Nishimura, Y. and Goodman, D. (2000) Ground Penetrating Radar
Survey at Wroxeter, *Archaeological Prospection*, Vol. 7, pp.
101-105.
Oh, H.D. (2001) Archaeological GPR Survey at Burial Unmounded
Area in Pubchonri Wonju, Korea, *Proceedings of International
Conference on GPR in Archaeology*, Nara, Japan, pp. 40-41.

◎ 논문접수일 : 11년 08월 22일
◎ 심사의뢰일 : 11년 08월 25일
◎ 심사완료일 : 11년 09월 21일