

## 응용 지구물리학 저널

저널 홈페이지: [www.elsevier.com/locate/jappgeo](http://www.elsevier.com/locate/jappgeo)

## 시간 및 주파수 영역에서 스펙트럼 유도 편광 필드 측정의 평가

티나 마틴<sup>a,\*</sup>, 토마스 권터<sup>b</sup>, 아드리안 플로레스 오로스코<sup>c</sup>, 토레이프 달린<sup>a</sup><sup>a</sup> 공학 지질학, 룰드 대학교(LU), 존 애리슨스 바그 1, SE-22363 룰드, 스웨덴<sup>b</sup> 라이프니츠 응용 지구물리학 연구소(LIAG), Stilleweg 2, D-30655 하노버, 독일<sup>c</sup> 빈 공과대학교(TU), Gußhausstrasse 27-29, A-1040 Vienna, 오스트리아ARTICLE in  
fo

## 글 기록:

2020년 3월 24일 접수

2020년 6월 24일 수정된 형태로 접수됨

2020년 7월 6일 수락

2020년 7월 14일 온라인 이용 가능

## 키워드:

유도 편광(IP) 시간 도메인

IP(TDIP) 주파수 도메인

IP(FDIP) 스펙트럼 대역폭

비교

그램토라이트 세일

## ABSTRACT

스펙트럼 유도 편광(SIP) 측정은 수문 지질학 및 환경 조사에서 중요한 파라미터와 상관관계가 있음이 입증되었습니다. SIP 측정은 종종 주파수 도메인(FDIP)에서 수집되었지만, 최근에는 시간 도메인(TDIP)에서 수집된 측정을 통해 복잡한 전도도의 주파수 의존성을 해결할 수 있는 기능이 개발되었습니다. 따라서 본 현장 조사의 목적은 FDIP와 TDIP를 통해 해결된 광범위한 주파수 범위에서 측정된 주파수 의존성을 비교하는 것입니다. 이전 연구와 달리, 우리는 FDIP와 TDIP 모두에 대해 서로 다른 기기와 측정 기술을 사용하여 측정을 수행했습니다. 이를 통해 서로 다른 측정의 견고성을 검증하고 다양한 오류의 원인을 평가하여 다양한 측정 기술의 장단점을 평가할 수 있습니다. 연구 결과는 서로 다른 기기를 통해 수집된 데이터가 일관성이 있음을 보여줍니다. 겉보기 저항 측정과 반전 결과는 모든 기기에 대해 정량적으로 동일한 값을 나타냈습니다. IP 효과의 측정값도 비교할 수 있으며, 특히 저주파수(10Hz 미만)의 FDIP 측정값은 서로 다른 기기에서 정량적으로 동일한 것으로 나타났습니다. 두 기기로 수집한 데이터에 대한 TDIP 측정값은 일관성이 있습니다. 예상대로 값의 공간 분포도 저주파 데이터(FDIP)와 TDIP의 늦은 시간 측정(0.1초 이상)에서도 일관성이 있습니다. 그러나 FDIP에서 더 높은 주파수(즉, TDIP의 초기 시간)의 데이터 품질은 더 큰 편차를 보이며, 이는 IP 데이터의 전자기 오염을 처리하는 기기 간의 차이를 반영합니다. 결론적으로, 다양한 계측기와 측정 기술은 다양한 신호 대 잡음비 및 측정 구성에 대해 일관된 재후원을 제공할 수 있습니다.

© 2020 The Authors. Elsevier B.V.에서 발행. 이 문서는 CC BY 라이선스에 따른 오픈 액세스 문서입니다(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. 소개

수 있게 되었습니다. 생물막(예: Davis et al., 2006), 뿌리(예: Weigand and Kemna, 2017) 및 목재와 같은 기타 생물학적 물질에 대한 추가 실험 실 조사도 진행 중입니다.

스펙트럼 유도 편광(SIP) 방법은 지표면의 저주파 전기적 특성을 수집하며, 시간 영역(TDIP)과 주파수 영역(FDIP)에서 측정할 수 있습니다. SIP는 지난 10년 동안 수문 지질학 및 환경 조사에 위한 중요한 기술로 부상했습니다(예: Kemna et al., 2012). 전자 도관에서 관찰되는 강한 편광 효과(예: Wong, 1979)를 기반으로 IP 방법은 처음에 황화물과 같은 광물 매장지의 탐사를 위해 개발되었습니다(예: Seigel et al., 2007 및 그 참고 문헌). 지난 수십 년 동안 기기의 발전으로 토양(Vanhala and Soininen, 1995) 또는 하이드로카본 오염물질(예: Vanhala et al., 1992)과 같은 다른 물질과 관련된 약한 신호도 검출할

\* 교신저자.

이메일 주소: tina.martin@tg.lth.se(T. Martin).

(예: Martin, 2012)는 생물지구물리학이라는 새로운 분야에서 생물학적 과정을 특성화하기 위해 FDIP를 적용할 수 있는 길을 열었습니다(예: Atekwana and Slater, 2009). 이 방법의 또 다른 장점은 실험실 조사에서 관찰되는 SIP 파라미터와 수리 전도도  $k$  사이의 강한 상관관계입니다(예: Binley et al., 2005; Zisser et al., 2010). 특히 점토 함량이 높은 시료의 경우, FDIP 방법은 벌크 전도도 측정에만 기반한 이전 접근법에 비해  $k$ 의 추정치가 개선되었음을 입증했습니다(예: Slater, 2007 및 참고 문헌]).

실험실 연구에서 FDIP를 통해 광범위한 공정과 재료를 특성화할 수 있다고 약속했지만, 현재까지 현장 규모의 영상 조사는 여전히 드뭅니다. Hördt 등(2007)은 유압 전도성을 특성화하기 위해 현장 규모에서 최초의 FDIP 이미징을 보고했습니다. 그러나 이들은 복잡한 전도도의 주파수 의존성을 무시하고 소위 정위상 모델을 가정했습니다. 윌리엄스 등(2009)은 두 가지 주파수(1 및 10Hz)에서의 데이터 비교를 기반으로 생물학적 정화 과정에 수반되는 과정을 모니터링하는 데 FDIP 방법의 적용 가능성을 입증했습니다.

<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104141>

0926-9851/© 2020 The Authors. 엘스비어 B.V.에서 발행. 이 문서는 CC BY 라이선스(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)에 따른 오픈 액세스 문서입니다.



우라늄 오염 기둥. 더 넓은 주파수 대역폭을 사용하여 Flores Orozco 등(2011)은 미생물 활동으로 인한 지표면의 산화 환원 조건 변화를 특성화하는 이 방법의 민감도를 입증했습니다. 또한 금속 광물의 축적을 관찰할 수 있었습니다(Flores Orozco 외., 2013). 생물지구물리학의 추가 응용을 통해 참나무의 곰팡이 감염을 감지할 수 있는 가능성에 밝혀졌습니다(Martin and Günther, 2013). 현장 특성화와 관련하여 탄화수소의 영향을 받은 현장에서 0.06Hz에서 1000Hz 사이에서 수집된 이미징 데이터(Flores Orozco 외, 2012a)는 FDIP 이미지를 사용하여 소스 구역의 형상과 용존 오염 물질의 기둥을 묘사할 수 있는 가능성을 보여주었습니다. 유사한 주파수 대역폭에서 주파수 정규화 체계를 사용하는 반전 전략과 함께 SIP 방법을 사용하면 수리 전도도를 특성화할 수 있었습니다(Kemna et al., 2012).

SIP 측정은 전통적으로 주파수 영역에서 수행되어 왔습니다. 최근에는 시간 도메인 측정도 주파수 의존성에 대한 정보를 얻는데 적합한 기술로 부상했습니다(예: Fiandaca et al., 2013). TDIP 측정을 기반으로 한 SIP 매개변수 도출은 수문 매개변수 추정(Maurya et al., 2018a)과 오염된 부지 평가(Johansson et al., 2014, 2015)를 위해 입증되었습니다. 또한 기존 TDIP 기기의 견고성으로 인해 CO<sub>2</sub> 주입 모니터링과 같은 새로운 연구 영역이 열렸습니다(예: Doetsch et al., 2015).

시간 및 주파수 영역에서 수집된 IP 측정값의 비교는 이 방법의 초기 개발 단계에서 연구 주제였습니다(예: Zonge et al., 1972; Voorhis et al., 1973). Zonge 등(1972)은 각각의 파라미터 정의에 내재된 차이로 인해 시간과 주파수 및 위상 측정 간에 유사하지만 동일하지는 않은 결과를 보여주었습니다. 최근 IP 데이터 수집, 데이터 처리 및 모델링의 발전은 TDIP 및 FDIP 조사에서 잠재적인 장점과 단점을 정의하기 위한 추가 투자의 문을 열었습니다. 플로레스 오로즈코 등(2012a)은 영상 결과의 비교를 바탕으로 TDIP, 단일 및 다중 주파수 FDIP가 지하수 내 탄화수소 오염물질의 정량화와 관련하여 일관된 결과를 제공한다는 사실을 입증했습니다. 그러나 이 연구에서는 TDIP의 적분 전하 측정값만 사용했으며 SIP 매개변수 추정을 위한 전체 파형을 기록하지 않았습니다. Maurya 등(2018b)의 최근 연구에 따르면 TDIP 측정은 FDIP 측정에 비해 수집 시간이 단축되고 깊이 침투가 증가하여 더 넓은 주파수 대역폭에서 SIP 정보를 제공할 수 있는 이점이 있음을 보여줍니다. 그러나 이 연구에서 얻은 대부분의 FDIP 관측 결과는 현장 규모에서 관찰된 이전 결과와 일치하지 않습니다(예: 큰 전극 분리(깊은) 측정 또는 더 높은 주파수(> 10Hz) 제거)(Flores Orozco 외, 2012a; Günther and Martin, 2016). 이러한 명백한 불일치는 FDIP 방법의 실제 한계와 이러한 한계가 측정 지침, 데이터 처리 또는 측정 기술 자체와 관련이 있는지 여부를 더 잘 이해하기 위한 추가 연구를 요구합니다.

이 연구의 목적은 IP의 품질을 조사하는 것입니다.

판독값과 주파수 대역폭을 TDIP와 FDIP 모두에 대해 두 가지 다른 지침을 사용하여 측정함으로써 이전 연구를 확장했습니다. 특정 장치에 편중되지 않도록 가능한 한 동일한 설정으로 쌍극자-쌍극자 어레이를 수집할 수 있도록 시중에서 구할 수 있고 잘 알려진 상용 기기 및 기술 4가지를 사용했습니다. 여기에 제시된 측정은 주로 얇은 편극성 지질 단위가 특징인 지역에서 전극 간격이 짧은 프로파일( $a = 1\text{m}$ )에서 수행되었으며, 이는 높은 신호 대 잡음비(S/N)로 판독할 수 있었습니다. 또한 전극 간격이 더 넓고( $a = 5\text{m}$ ) 더 깊은 침입을 위해 S/N이 낮은 프로파일의 결과도 논의합니다. IP 방법과 지질학적 배경에 사용된 설정에 대한 섹션을 소개한 후, 공간적 일관성과 관찰된 주파수 의존성을 조사합니다. 두 프로파일의 결과를 제시한 후 신호 강도를 고려하여 데이터 평가에 대해 자세히 설명합니다. 또한 최적의

## 2. 자료 및 방법

### 2.1. 유도 편광(IP) 방식

IP 기술은 4전극 어레이를 사용하는 직류(DC) 저항성 방법의 확장으로, 두 개의 전극을 사용하여 전류를 주입하고 두 번째 전극 쌍으로 결과 전압을 측정합니다. FDIP에서는 교류에 대한 위상변이 전압이 측정되며, 기록된 값은 전기 임피던스의 크기(즉, 전압 대 전류 비율에 따른 전달 저항)와 위상변이(전류와 전압 사이) 측면에서 제공됩니다. 서로 다른 주파수(일반적으로 1kHz 미만)에서 전류를 주입하면 임피던스 스펙트럼이 생성됩니다(예: Ward, 1990). 이와는 대조적으로 시중에서 판매되는 대부분의 기기는 구형파 주입을 기반으로 하는 시간 주기로 작동합니다. 따라서 전류 주입 중 전압 대 전류 비율을 통해 전송 저항을 측정할 수 있습니다. 전류를 차단한 후 전압 감쇠의 판독값은 IP 효과를 정량화하는 데 사용됩니다.

TDIP 측정의 반전은 최근까지 일반적으로 저항성과 적분 전하성에 대한 반전을 통해 수행되어 왔으며, 종종 저항성 반전을 먼저 수행하여 전하성 반전의 기반으로 사용합니다(Oldenburg and Li, 1994). 또 다른 접근 방식은 실제 및 가상의 구성 요소가 있는 복잡한 전도도 데이터로 취급하는 것입니다(Kemna et al., 2000). 데이터 수집 및 반전에서 IP를 적절히 고려하지 않으면 IP 모델에 영향을 미칠 뿐만 아니라, IP 측적이 진행 중인 상태에서 신호를 통합할 때 측정된 전위가 전체 크기에 도달하지 않았을 수 있으므로 DC 저항이 과소 추정될 수 있습니다(예: Olsson et al., 2019). 충분히 넓은 범위의 시간 창(IP 감쇠 적분 간격)에서 TDIP 데이터를 수집하여 상관관계가 있는 스펙트럼 범위를 반영하는 경우, 예를 들어 콜-콜 모델(Fiandaca et al., 2013) 또는 최대 위상각 모델(Fiandaca et al., 2018)을 사용하여 스펙트럼 프로파티에 대해 반전하는 것도 가능합니다. 그러나 실제 응용 분야에서 의미 있는 스펙트럼 반전을 허용할 만큼 충분히 넓은 시간 범위의 TDIP 데이터를 수집하는 것은 어렵고, 적절한 특성과 일치하는 신호 처리 알고리즘을 갖춘 계측기를 사용할 수 있게 된 것은 아주 최근의 일입니다(Olsson et al., 2016).

IP 측정값의 반전은 복합 전도도( $\sigma^* = \sigma' - i\sigma''$ )의 분포 또는 그 역인 복합 저항의 분포를 해결합니다.

$(\rho^* = \rho' + i\rho'')$ , 가상 단위  $i \sqrt{-1}$ 로 표현됩니다.  
의 복소 전도도( $\sigma^*$ )는 전기 전도를 나타냅니다.  
(즉, 에너지 손실) 특성을 나타내며, 이는 소홀한 금속 도체의 경우 이온 전도(즉, 다공성, 포화도 및 유체 전도도에 따라 달라짐)와 입자-유체 계면에서 일어나는 표면 전도 과정에 의해 제어되며, 미세 입자 재료의 경우 지배적일 수 있습니다. 가상 성분( $\sigma''$ )은 재료의 용량성(즉, 에너지 저장) 고유 관계를 나타냅니다. 자세한

바랍니다. 또한 FDIP 측정은 다음과 같은 주파수 의존성에 대한 정보도 제공합니다.

복소 전도도  $\sigma^*(\omega)$ , 여기서  $\omega$ 는 각 주파수입니다.  
최신 FDIP 기기는 광범위한 주파수로 데이터를 기록할 수 있습니다.  
대역폭(예: 단층 촬영) 데이터 세트에서 수천 개의 측정값을 수집하기 위해 수십에서 수백 개의 엘렉트로드를 배포하는 사례(예: Kemna et al., 2012)가 있습니다.

측정이 시간 또는 주파수 영역에서 수집되든 상관없이, 넓은 주파수/시간 대역폭에서 SIP 필드 데이터를 수집하는 것은 전극의 분극 및 전자기(EM) 결합과 같은 특정 오류 원인으로 인해 특히 까다로운데, 이는 SIP 데이터 품질에 영향을 미칠 수 있습니다. 이전에 전류 주입에 사용된 전극의 편광으로 인해 왜곡이 발생할 수 있습니다.

특히 저주파수(10Hz 미만)에서의 측정에 영향을 미치는 전압 판독값 (예: Dahlin, 2000; LaBrecque and Daily, 2008)의 영향을 받습니다. 반면에 고주파수 또는 초기 시간(FDIP: > 100Hz, TDIP: > 10ms)의 측정은 원치 않는 전자기 유도 또는 용량성 효과의 영향을 받을 수 있습니다. 전자는 전극과 기기를 연결하는 케이블을 따라 전류가 흐르는 동안 가까운 표면에서 EM 장의 자기 유도로 인해 발생하며 접지의 전도도, 주파수 및 케이블 길이의 제곱에 비례합니다(예: Hallof, 1974). 정전식 EM 효과는 전극 간, 전극과 지표면 사이의 전위차로 인해 발생하는 기생 전류에서 비롯됩니다(Zimmermann et al., 2008; Flores Orozco et al., 2013). 용량성 커플링의 또 다른 원인은 전류 주입에 사용되는 케이블(또는 전자 장치)과 전위 판독값 사이의 인덕턴스입니다(예: Zimmermann et al., 2008; Zhao et al., 2013, 2015).

전류 주입 및 전위 판독을 위해 분리된 케이블을 배치하거나 (Dahlin and Leroux, 2012), 차폐 케이블의 단일 처리 사용(예: Flores Orozco 외, 2013), EM 영향을 제거하기 위한 처리 기술을 적용하는 등 (예: Pelton 외, 1978; Kemna, 2000; Fiandaca, 2018) SIP 측정의 EM 오염을 최소화하는 다양한 접근법이 제안되었습니다.

## 2.2. 인스트루먼트

이 연구에서는 FDIP용 2개와 TDIP용 2개, 총 4개의 서로 다른 기기를 사용하여 SIP 측정값을 수집했습니다. FDIP 측정의 경우, Radic Research 기기 SIP256C와 데이터 수집 시스템 1(DAS-1)을 배포했습니다. TDIP의 경우 ABEM 테라미터 LS 2와 시스칼 프로 스위치 72를 사용했습니다. 사용된 계측기의 사진은 [그림 1에서](#) 확인할 수 있습니다.

SIP256C 기기는 60개 주파수(1MHz~1000Hz, 정현파)에서 전기 임피던스(진폭 및 위상)를 측정하는 멀티채널 기기입니다. 전류 주입은 전극을 상호 연결하는 케이블을 통해 이루어집니다. 용량성 케이블 효과를 피하기 위해 SIP256C는 각 전극에서 측정된 전위차를 디지털화하여 광섬유 케이블을 통해 데이터를 전송하는 여러 개의 수신기(RU - 리모트 유닛)를 사용합니다. 각 RU는 전류 주입에 사용할 수 있으며, 인접한 두 전극(또는 더 멀리 떨어진 전극) 사이의 전위차를 측정할 수 있습니다. SIP256C에는 최대 400V의 전압을 사용하여 최대 250mA의 전류를 전송할 수 있는 50W 고전압 소스가 내장되어 있습니다. 이 설문조사에서는 24개의 RU를 사용할 수 있었으므로 표시된 프로파일에 대해 률얼롱 방식을 사용해야 했습니다. 전극 사이의 케이블 길이는 1m 또는 10m로 조정할 수 있습니다.

DAS-1은 직류(DC) 저항을 위해 설계된 8채널 수집 시스템으로, TDIP와 FDIP 모두에서 작동할 수 있습니다. DAS-1은 두 가지 모드로 주파수 도메인을 획득할 수 있습니다. FDIP 모드에서는 시스템이 전류 중에 수행되는 짹수 간격으로 수집된 데이터 값의 실시간 푸리에 변환을 수행합니다.

주입 및 0.015~225Hz 사이의 17개 선택된 주파수를 따라 데이터를 수집할 수 있는 스펙트럼 IP 모드에서 사용할 수 있습니다. SIP256C와 달리 DAS-1은 제곱 파형만 사용합니다. 스펙트럼 IP 모드를 사용하고 멀티 코어 케이블을 사용하여 64개의 전극을 계측기에 연결했습니다. DAS-1에는 정전류(최대 2.5A) 또는 정전압(최대 475V)을 전송할 수 있는 250W 송신기가 내장되어 있습니다. 측정에서는 가능한 최대 전류로 주입을 요청했지만, 과부하를 방지하기 위해 각 전류 쌍극자에 대한 첫 번째 전위 쌍극자의 전압 측정을 기반으로 전송 전류의 자동 조정이 내부적으로 수행됩니다. 확인을 위해 동일한 멀티코어 케이블을 사용하여 DAS-1과 Syscal Pro Switch 72를 모두 연결했습니다.

Terrameter LS 2(테라미터)는 DC 저항 및 TDIP 데이터 수집을 위해 설계되었습니다. 이 기기는 이 연구에서 사용한 기존의 50% 듀티 사이클과 즉각적인 극성 변화가 있는 구형파가 전송 신호가 되는 100% 듀티 사이클의 데이터 수집을 지원합니다. 이 기기는 600V 전압 또는 250W 전력으로 제한되는 2.5A의 전류를 전송할 수 있는 정전류 송신기 용량을 내장하고 있습니다. 최대 12개 채널에서 유도 전위를 동시에 기록하고 최대 64개의 전극을 지원합니다. 전체 파형 데이터는 모든 입력 및 전류 트랜스미션 모니터링 채널에 대해 3750 샘플/s의 데이터 속도로 저장됩니다. 입력 채널에는 약 1500Hz 차단 주파수의 아날로그 저역 통과 필터가 있습니다. 이 연구에서 제시된 측정에는 1m 전극 분리 프로파일의 전극 연결을 위해 각각 21개의 출력(2m 간격)으로 제조된 2개의 멀티코어 케이블과 5m 전극 분리 프로파일을 위해 각각 21개의 출력(5m 간격)으로 제조된 4개의 멀티코어 케이블을 사용했습니다.

Syscal Pro 스위치 72(Syscal)는 저항률 및 TDIP 측정을 위해 설계된 10채널 수집 시스템입니다. 50% 듀티 사이클에서 20개의 전압 게이트(작업자가 정의한)로 감쇠 곡선의 TDIP 측정이 가능했습니다. 전파양 데이터는 10ms의 샘플링 속도로 수집되었지만 전압에 대해서만 수집되었습니다. 저역 통과 필터(10Hz 차단 주파수)가 아날로그-D지털(A/D) 컨버터에 통합되어 있습니다. 250W 내장형 송신기는 최대 2.5A의 전류에 대해 정전압을 전송할 수 있으며, 표준 멀티 케이블로 연결된 72개의 전극을 배치하고 전류 다이폴에 800V의 전압으로 인-잭션을 요청하여 가능한 전류를 생성합니다. 그러나 채널의 과부하를 피하기 위해 전류 쌍극자에 인접한 전압 측정값을 기반으로 전송 전류의 자동 조정이 기기에 의해 수행됩니다. 이 연구에서 제시된 측정에는 각각 36개의 테이크아웃(5m 간격)으로 제조된 두 개의 멀티코어 케이블을 사용했습니다.

## 2.3. 조사 영역 및 실험 설정

이 측정은 독일 동부 튜링겐 세일 산맥에서 수행되었습니다. 이 지

역에서 실시한 항공 전자기 조사에서 얇은 자저향에 페일링 헤드를 갖춘 저널 콜로나타가 놓았습니다.

5



그림 1. 사용된 모든 기기의 사진. 왼쪽에서 오른쪽으로: FDIP 계측기로 사용된 SIP256C 및 DAS-1, TDIP용 ABEM Terrameter LS 2 및 Syscal Pro Switch 72.

(<5-10 Ωm) 변칙이 발견되었는데, 이는 그랩토라이트 블랙세일에 해당하며, NW의 다이아베이스와 SE의 규암 사이에 매립되어 있습니다(그림 2 왼쪽). 이 블랙세일에는 일반적으로 높은 IP 효과와 관련이 있는 황철광이 포함되어 있는 것으로 알려져 있습니다(예: Pelton et al., 1978; Flores Orozco et al., 2011, 2013).

이 연구에서는 두 개의 프로파일을 따라 수집된 IP 데이터를 제시하며, 전극 간격이  $a = 1\text{m}$ (IP 1) 및  $a = 5\text{m}$ (IP 5)인 전극에서 TDIP 및 FDIP 측정을 수행했습니다. 프로파일의 위치, 길이 및 위치는 i) 전극 간 간격이 증가함에 따라 감소할 것으로 예상되는 다양한 신호 대답률비와 관련된 IP 응답의 변화를 조사하고 ii) 그랩토라이트 세일 상에서 다른 위치에서 가능한 IP 응답의 변화를 평가하기 위해 선택되었습니다. 모든 측정과 장치에 최대  $2\text{kΩ}$ 의 접촉 저항을 가진 동일한 전극을 사용했습니다. 스테인리스 스틸 전극을 선택한 이유는 이 블랙세일 지점에서 높은 편광 효과가 예상되고(따라서 측정 초기에 무극성 Ag-AgCl 전극으로 테스트한 전극 편광을 무시) 전극을 다루기 쉽기 때문입니다. 모든 전극의 위치는 DGPS 지침에 따라 기록되었습니다. 짧은 프로파일 IP 1은 고르게 담그기만 하는 반면, 긴 프로파일 IP 5는 상당한 지형을 보여줍니다.

프로파일 IP 1의 길이는 42개의 전극을 사용하여 41m였습니다. FDIP의 경우 0.156~1000Hz 범위의 14개 주파수(SIP256C)를 사용했습니다.

0.125~225Hz(DAS-1), TDIP에서는 두 계측기 모두에 각각 4초 필스(온-타임, 오프-타임)의 50% 듀티 사이클을 사용했습니다. 테라미터는 13개의 타임 게이트 윈도우에서 감쇠 곡선을 측정한 반면, Syscal은 20개의 타임 게이트 윈도우를 사용했습니다. 데이터를 직접 비교하기 위해 Syscal 데이터를 다시 테라미터 시간 게이트 윈도우로 게이팅했습니다. 또한 더 많은 수의 게이트가 커버하는 더 넓은 시간 범위를 확보하기 위해 Terrameter 계측기의 전체 파형 데이터를 처리했습니다. 전류 주입 횟수는 모든 계측기에서 동일합니다. 따라서 사용 가능한 채널 수와 자동으로 사용되는 채널 수에 따라 쿼드러풀의 수는 달라집니다. 특히 SIP256C는 룰얼롱 방식(7개의 전극이 겹치는 두 개의 세그먼트)으로 인해 그 수가 다양합니다. 특정 조건에 대해 가능한 가장 작은 수를 선택했기 때문에 스택(TDIP) 또는 기간(FDIP) 수는 계측기마다 다릅니다(2~4개 사이). 설정에 대한 전체 개요는 표 2에서도 확인할 수 있습니다.

프로파일 IP 5의 길이는 64개의 전극을 사용하여 315m였습니다. 이 프로파일은 테라미터와 Syscal을 사용하여 단일 프로파일로 측정했고, 룰얼롱 모드에서는 DAS-1과 SIP256C를 사용하여 측정했습니다. 이를 위해 프로파일은

14개의 전극이 겹치는 세 개의 세그먼트(DAS-1)와 사용 가능한 RU의 양이 제한되어 있어 SIP256C의 경우 6개의 전극으로 나눴습니다. 측정 설정은 프로파일 IP 1의 설정과 유사하며 표 3에서 확인할 수 있습니다.

일반적으로 측정은 쌍극자-쌍극자 스kip-0(의사 섹션에서 DD-n으로 표시) 및 스kip-3 어레이(DD 4-n으로 표시)를 사용하여 수집했습니다. 스kip은 전류(C) 및 전위(P) 모두에 대해 쌍극자 내에서 건너뛴 전극의 수를 나타냅니다(예: Slater et al., 2000; Flores Orozco et al., 2011, 2013). 따라서 스kip 0 측정은 인접한 전극(전극 분리 1개, 예: C1-C2-P1-P2 = 1-2-3-4 또는 1-2-8-9)을 사용한 쌍극자 측정을 의미하며, 스kip 3은 전극 거리 4개(예: C1-C2-P1-P2 = 1-5-9-13 또는 1-5-29-33)를 사용한 쌍극자 길이 측정을 나타냅니다.

DAS-1은 주어진 전류 쌍극자에 대해 8개의 전위 측정(채널)만 허용한다는 점을 고려하여 프로토콜은 8개의 쌍극자 분리로 제한되었습니다. SIP256C 측정의 경우에만 모든 RU를 병렬로 자동 기록하기 때문에 가능한 모든 22개의 쌍극자 분리에 대해 스kip-0 데이터를 측정했습니다. 스kip-3 측정은 전체 공간 분포를 얻기 위해 DAS-1, 테라미터 및 시스칼 계측기에 대해 가능한 모든 전류 쌍극자에 대해 수집되었습니다. RU 설정의 제한으로 인해 SIP256C에서는 네 번째 쌍극자(예: C1-C2 = 1-5, P1-P2 = 5-9, P1-P2 = 9-13, ...)만 측정할 수 있었습니다.

#### 2.4. E//O/E/ 처리

모든 계측기가 등록된 전압의 원시 시계열을 저장할 수 있지만, 두 FDIP 계측기는 스태킹에서 표준 편차와 함께 상호 처리된 진폭 및 위상 값을 직접 제공합니다. SIP256C 계측기의 경우 시계열은 몇 가지 기본 처리(50Hz 및

드리프트 필터)가 수행됩니다. 또한 DAS-1은 일련의 필터 기능을 사용하여 저주파 노이즈( $\leq 5\text{Hz}$ ) 및/또는 전력선 노이즈를 제거합니다. 이러한 필터에는 두 개의 전체 파형이 다시 필요합니다. 더 높은 주파수에서 수집된 데이터( $\geq 7.5\text{Hz}$ )를 4개의 전체 파형에 대한 평균을 사용하여 계산합니다.

FDIP에서는 자동 처리 프로토콜이 적용되어 인접한 데이터 포인트와 일치하지 않는 명백한 이상치 스펙트럼이 거의 제거되지 않았습니다. SIP256C 데이터 세트의 경우 프로파일 IP 1의 경우 526개 데이터 포인트 중 365개를, 프로파일 IP 5의 경우 759개 데이터 포인트 중 349개를 제거했습니다. DAS-1 데이터 세트의 경우 835개 데이터 포인트 중 644개를 프로파일 IP 1에서 제거했습니다.

시간 영역에서 파형은 계측기에 의해 게이트되어 데이터의 양을 제한된 시간 창으로 다시 줄입니다(일반적으로 다음과 같습니다).

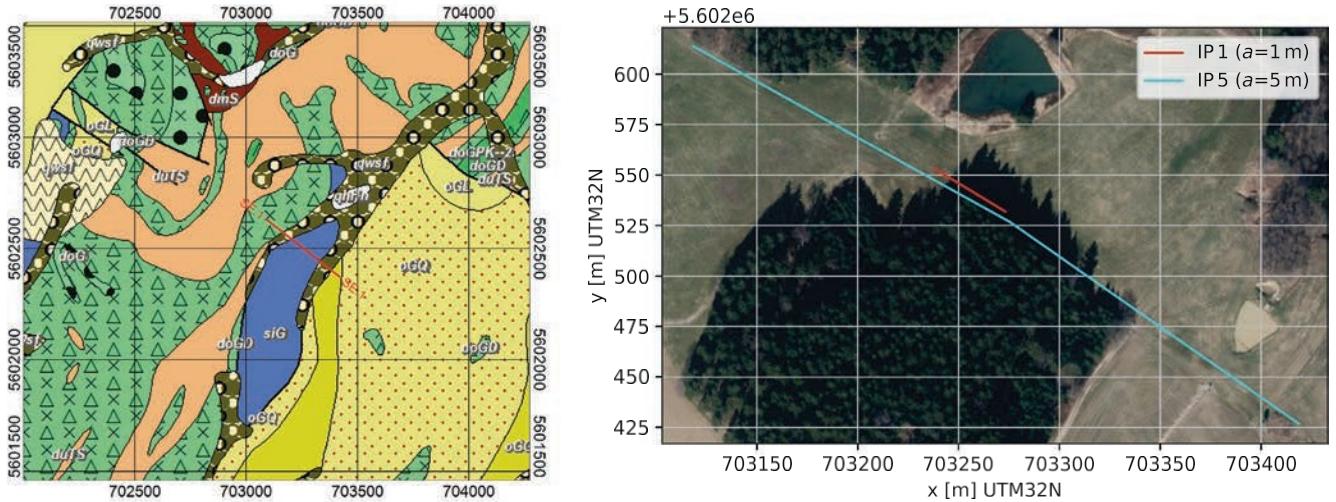


그림 2. 左: 프로파일 IP 5가 삽입된 연구 지역의 지질도. 오른쪽: 측정된 두 IP 프로파일의 위치. 약어: siG(파란색) = 하부 그랩토라이트 세일, oGQ(빨간색 사각형이 있는 노란색) = 주 규암, oGL(노란색) = 리더쉬퍼 지층, doG(녹색) = 고르크비츠 지층(다이아베이스), oWK(베이지색) = 쿠르트샤우 지층, qwfs(갈색 흰색) = 바이첼리안 빙기의 솔리플루이드층 퇴적물입니다.

전력선 및 열차 기간의 배수는 각각 20밀리초와 60밀리초입니다. 원도 우의 시간 길이는 다음에서 시작하여 증가하고 있습니다.

가장 빠른 시간은 0.06초부터 가장 늦은 시간은 0.84초까지입니다. 여기서는 원래 열차 교란을 피하기 위해 설계된 13개의 게이트를 사용하여 내부적으로 시계열을 처리했습니다. 비교를 위해 테라미터로 측정한 것과 동일한 시간 게이트로 계산된 Syscal 전체 파형 데이터를 사용했습니다.

#### 2.4.1. 전체/파형 처리

**그림 3은** 선택한 전류 쌍극자(26-27)와 서로 다른 전압(400mV/1mV/0.1mV)을 나타내는 세 가지 쌍극자 분리( $n = 1/4/7$ )에 대한 프로파일 IP 5의 테라미터 데이터에 대한 전체 파형 처리의 인상을 보여줍니다. 원시 데이터 외에도 저역 통과 필터링된 곡선(30Hz 코너 주파수)이 플롯되어 있습니다. 이 곡선은 6초의 리드인, 2초의 신호 간지연, 2초의 리드아웃으로 구성된 16초 길이의 두 개의 주기를 보여줍니다.  $n = 1$ 의 경우 전압이 크고 매우 깨끗한 반면, 쌍극자 분리가 증가함에 따라 진폭이 감소하므로 S/N 비율이 크게 감소합니다. 자발적인 전위 및 전극 충전 효과로 인해 발생할 수 있는 상당한 오프셋 및 저주파(배경) 드리프트가 있습니다.  $n = 4$ 의 경우 여전히 감쇠를 볼 수 있지만, 일부 불규칙한 동작이 관찰되는  $n = 7$ 에서는 거의 불가능합니다.

최신 후처리 기술은 Olsson 등(2016)이 설명한 절차에 따라 신호를 개선하고 TDIP 데이터의 스펙트럼 범위를 보정할 수 있습니다. 여기에는 (1) 드리프트 제거, (2) 고조파 잡음 제거, (3) 스파이크 제거 및 (4) 테이퍼 게이팅이 포함됩니다. 지금까지 설명한 알고리즘을 테라미터 계측기의 전체 파형 데이터에만 적용할 수 있었던 것은 주로 Syscal의 샘플링 속도(100Hz)와 내부 저역 통과 필터가 훨씬 낮았기 때문입니다. 또한 Syscal 계측기의 경우 정확한 전류 파형을 알 수 없습니다.

올슨 등(2016)이 대역폭을 늘리기 위해 사용한 후처리는 정교하지만, 위에서 설명한 유형의 불규칙한 저주파 노이즈는 처리하지 못합니다. 그 원인은 알려지지 않았지만, 인근 풍력발전소(1km 미만) 또는 전기로 구동되는 철도 교통(5~6km 거리)으로 인해 발생할 수 있습니다. 따라서 처리 루틴은 일반적으로 감쇠를 수동으로 검사하여 특히 초기에 불규칙한 데이터 포인트의 비활성화(그림 8과 그림 12, 회색 점 비교) 또는 (드물게) 반전에 대한 단일 쿼드루 극의 명백한 이상한 감쇠를 초래하는 결과로 이어집니다. 부분적으로 체계적인 추세를 따르지 않고 기하학적 효과로 설명할 수 없는 음의 데이터도 제거되었습니다. 다음에서는 사용 가능한 모든 데이터를 표시하고 테라미터의 TDIP 반전에 수동으로 처리된 데이터만 사용합니다. 여기에서는 프로파일 IP 1(6/835점)의 경우 아주 작은 쿼드러풀만 제거했지만 프로파일 IP 5(144/460점)의 경우 훨씬 더 많은 쿼드러풀

을 제거했습니다.

#### 2.4.2. 원시 데이터 시각화 및 반전

데이터 처리, 시각화 및 반전을 위해 파이썬 모델링 프레임워크 pyGIMLi를 기반으로 하는 무료 오픈소스 패키지 pyBERT를 사용했습니다(Rücker et al., 2017). 이 패키지는 FDIP 데이터에 특화된 모듈을 제공하며(Günther et al., 2016), 현재는 TDIP 데이터도 지원합니다. 두 모듈 모두 다양한 기기 형식의 가져오기, 데이터 전처리(필터링, 이상값 제거 및 하위 세트의 조합), 다양한 종류의 반전 및 데이터와 모델을 스펙트럼/감쇠 또는 (의사)섹션으로 시각화할 수 있습니다.

본 연구에서는 불규칙한 트라이안-굴러 메시에서 1차 평활도 정규화를 사용하는 가우스-뉴턴 미니화를 사용하여 반전을 수행했습니다 (Günther et al., 2006). FDIP 반전 절차는 단일 주파수 반전에 대해서는 Martin과 Günther(2013)에서, 다중 주파수 데이터의 동시 반전에 대해서는 Günther와 Martin(2016)에서 더 자세히 설명했습니다. 다른 저자와는 달리, 이들은 특정 동작(예: 일정한 위상 또는 콜-콜)을 미리 가정하지 않고 스펙트럼 제약 조건을 사용하여 주파수 축을 따라 개별 모델을 정규화합니다.

TDIP의 경우 유사한 접근 방식을 따르지만 저항 반전이 첫 번째 단계로 수행된다는 점만 다릅니다. 걸보기 충전 가능성은

의 접근 방식을 사용하여 표면 하전성으로 반전하면, 인접한 시간  
게이트에 대한 모델은 시간 축을 따라 제약되므로 모델 봉괴는 어  
떤 모델도 필요 없이 매끄러운 것으로 가정됩니다.

반전 후, 모델 스펙트럼 또는 봉괴는 각 모델 셀에 대해 미지의  
수를 4개로 줄이기 위해 콜-콜 모델을 사용하여 맞출 수 있습니다.  
데이터 및 모델 스펙트럼(FDIP)과 디케이(TDIP)는 모두 디바이 디  
컴포지션 Nordsiek and Weller(2008)에 의해 디바이 분포로 전송할  
수 있습니다. 고정된 수(여기서는 100)의 사전 정의된 이완 시간(대  
수적으로 1ms에서 4초 사이의 간격)에 대해 인접한 이완 시간 사이  
의 평활성 제약 조건을 사용하여 부분 충전성 분포가 계산됩니다.  
이렇게 하면 주파수와 시간 도메인 데이터 또는 모델 간의 비교가  
줄어듭니다.

### 3. 결과

#### 3.1. 프로필 IP 1

##### 3.1.1. 겉보기 저항

프로파일 IP 1을 따라 4개의 계측기로 수집한 데이터의 겉보기  
저항은 그림 4에 나와 있습니다. 위쪽 부분(DD n)은 다이폴-다이폴  
스킵-0 측정을 나타내고, 아래쪽 부분은 스kip-3 판독값(DD4-n)에  
해당합니다. DAS-1, Terrameter 및 Syscal의 측정 어레이에는 동일하  
지만(skip-0,  $n_{max} = 8$  및 전체 스kip-3), SIP256C는 전체 스kip-0 판  
독값을 (자동으로) 제공하지만 매우 제한된 수의 스kip-3 데이터만  
제공하므로 모든 기기 간에 상위 8개 행만 직접 비교할 수 있습  
니다.

데이터의 의사 섹션은 거의 동일하며, 이는 멀티코어 케이블을  
사용하는 세 기기의 스kip-3 데이터에도 적용됩니다. 일반적으로  
높은 피상 저항 값(>200Ωm)은 상층에서 발견되는 반면, 낮은 피상  
저항 값은 중간에서 약간 높은 값으로 단절되어 더 깊은 곳에서 제  
공됩니다. 또한 섹션은 프로파일의 끝으로 갈수록 높은 겉보기 저  
항 값이 감소하는 것을 보여줍니다.

##### 3.1.2. 공간 일관성 분석

FDIP 측정의 개별 주파수를 비교하기 위해 그림 5는 선택한 주  
파수  $f = 0.156\text{Hz}/0.125\text{Hz}$ ,  $f = 1.2\text{Hz}/1.0\text{Hz}$  및  $f =$   
 $80\text{Hz}/75\text{Hz}$ (SIP256C/ DAS-1)에 대해 최대 전극 간격이  $n = 8$ 인  
스kip-0 데이터의 겉보기 위상 의사 섹션을 보여 줍니다. 음수 값은  
밝은 회색으로, 눈금을 벗어난 값은 짙은 회색으로 표시됩니다. 흰색  
값은 누락된 데이터를 나타냅니다(예: SIP256C의 롤올림으로 인한  
것). 흰색 직사각형 상자는 다음 섹션에서 설명하는 선택된 데이터  
포인트를 나타냅니다.

가장 낮은 주파수(첫 번째 행)의 겉보기 위상은 거의 동일하고  
전체적으로 매우 매끄럽게 보이며 프로파일의 끝으로 갈수록 값이

*Martin S./윤윤.자구를리학 저널 높아지교 간격이 커집니다. SIP256C 데이터로 수집한 데이터의 의사  
섹션은 모든 주파수에서 매끄러운 상태를 유지하는 반면, DAS-1 데이터  
터는 공간 일관성을 잃고 더 높은 주파수(> 75Hz)에서 수집한 측정  
값의 이상값에 더 많은 영향을 받는 것으로 나타났습니다.*

TDIP의 경우, 그림 6은 그림 5와 유사하게 선택된 시간 게이트( $t = 0.03\text{-}0.04\text{초}$ (첫 번째 행, 오른쪽에만 해당),  $t = 0.07\text{-}0.13\text{초}$ (두  
번쩨 행),  $t = 0.31\text{-}0.43\text{초}$ (세 번째 행) 및  $t = 2.47\text{-}3.13\text{초}$ (네 번째  
행)에서 스kip-0 데이터( $n_{max} = 8$ )의 겉보기 충전성 의사 섹션을 표시  
합니다. 왼쪽(Syscal) 및 가운데(Terrameter) 열은 원래 계측기에서  
내보낸 데이터를 사용한 반면, 오른쪽 열의 의사 섹션은 Terrameter  
전체 파형 데이터에 대해 처리된 의사 섹션을 보여줍니다(Olsson et  
al., 2016에 따름). 따라서 초기 시간(0.03~0.04초, 첫 번째 행)의 의사  
섹션도 구현할 수 있습니다. 여기서 제거해야 할 이상값은 극소  
수에 불과했습니다. FDIP 데이터(그림 5)와 마찬가지로 모든 IP 의사  
섹션은 초기 및 후기 시간 모두에서 최대  $n = 8$ 까지 부드러운 패  
턴을 보입니다. 초기 시간대는 (테라미터에 비해) 시스칼이 조금 더  
매끄러운 것으로 보이는데, 이는 시스칼의 내부 저역 통과 필터 때  
문일 가능성이 높습니다.

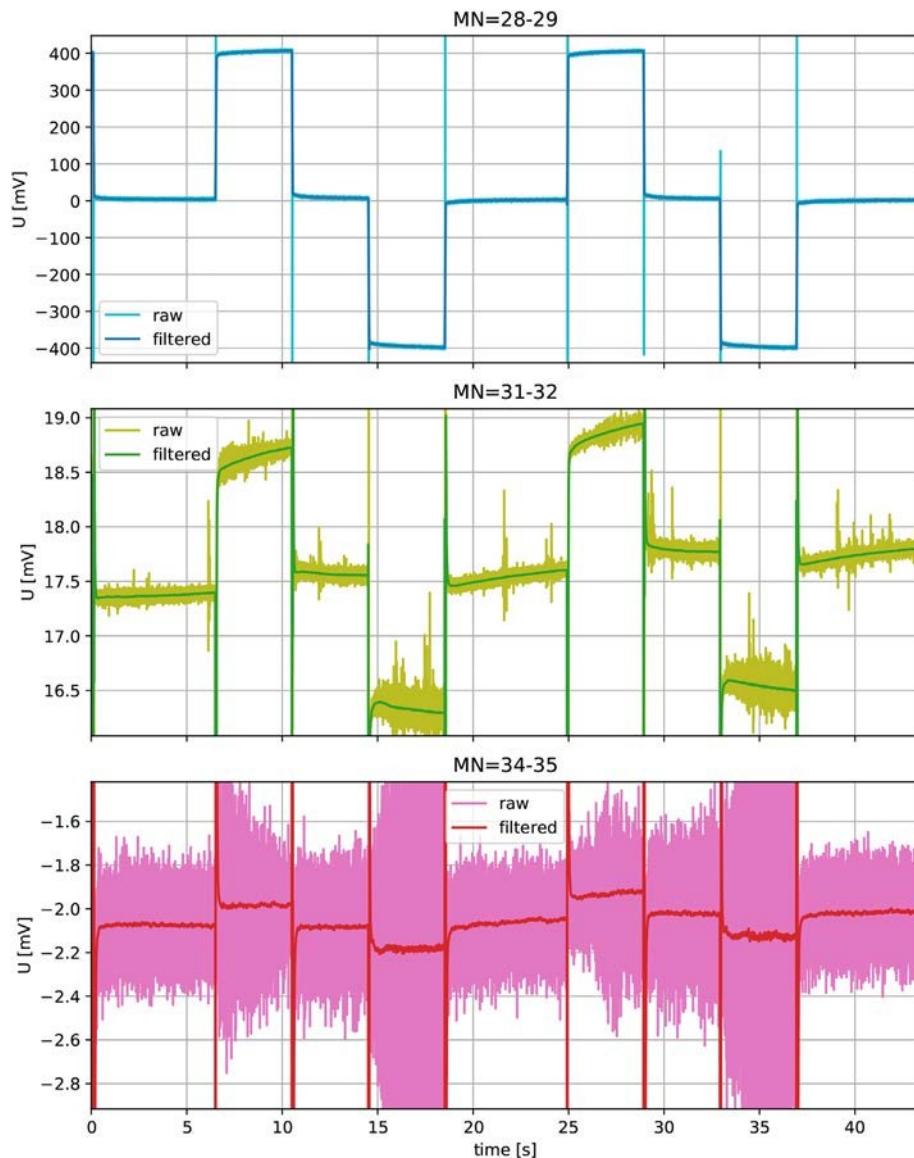


그림 3. 전류 쌍극자 A-B = 26-27에 대해 60밀리초 동안 측정된 원시 데이터와 신호의 평균을 보여주는 프로파일 IP 5의 테라미터 전체 파형 플롯: (위) n-인자 = 1(MN = 28-29), (가운데) n-인자 = 4(MN = 31-32), (아래) n-인자 = 7(MN = 34-35). 각 풀 펄스 후 오프 타임의 차이(2초 추가)는 테라미터 기기의 내부 배경 드리프트 측정으로 인한 것입니다.

### 3.1.3. 주파수 의존성 및 감쇠 곡선 분석

그림 7은 전극 분리 계수가  $n = 1, 4, 7$ 인 세 쌍극자를 따라 전류 주입 및 전기 임피던스를 위해 전극 26과 27을 사용하여 수집한 측정값의 겉보기 위상 스펙트럼(M-N 전극: 28-29, 31-32, 34-35)을 보여주며 신호 세기가 더 낮은 스펙트럼을 나타냅니다. 실선은 SIP256C 측정값, 점선은 DAS-1 데이터를 나타냅니다.

SIP256C 스펙트럼은 선택된 세 개의 4종극자 모두에 대해 처음 세 주파수(0.1-100Hz)에 걸쳐 매우 평탄하며, 분리 계수가 작은 경우 약 40Hz에서 약간의 위상 최대값이 있음을 알 수 있습니다. 더 높은 주파수에서 데이터는 여전히 매끄럽지만 약 50Hz에서 더 높은 전극 분리 계수( $n = 7$ )에 대해 더 일찍 시작되는 EM 결합의 양이온을 보여 줍니다.

DAS-1 스펙트럼은 30Hz 미만의 낮은 주파수에서 전극 분리 계수

( $n = 1, 4$ )가 작을 때 비슷합니다. 그 이상의 주파수에서는 데이터가 전자기 결합의 영향을 훨씬 일찍 받고 노이즈가 발생하기 시작합니다. 또한 전류 쌍극자와 전위 쌍극자 사이의 간격이 더 큰 측정의 경우(분홍색 선), 수집된 스펙트럼은

두 개의 계측기는 약 3Hz에서 시작되는 체계적인 변화와 체계적인 편차를 보여줍니다.

그림 7과 동일한 4중극자를 사용하여 두 기기에서 기록된 TD 감쇠 곡선은 그림 8에 나와 있습니다. 삼각형이 있는 점선은 테라 미터에서 처리되지 않은 데이터를, 삼각형이 있는 실선은 처리된 데이터를 나타냅니다. 원이 있는 강한 색상은 원본 Syscal 데이터를 나타냅니다. 회색 기호/선은 처리되었지만 스케일을 벗어난 데이터를 나타냅니다.

처리되지 않은 감쇠 곡선은 특히 이후 시간(> 0.1초)에 대해 일관된 형태를 보이지만, 약간 다른 파형(전송 파형, 지연 등)으로 인해 발생할 수 있는 Syscal과 Terrameter 사이의 크기에 작은 변화가 나타납니다. 또한, (위에서 설명한) 저역 통과 필터로 인해 Syscal의 첫 번째 게이트가 체계적으로 교란됩니다. 테라미터 데이터를 처리한 후 스펙트럼 범위가 조기에 현저하게 개선되는 것을 관찰할 수 있습니다. 특히 작은 전극 분리( $n = 1$ , 파란색 선)의 경우 약 0.005초부터 일관된 데이터를 얻을 수 있지만, 전극 분리/낮은 S/N 비율( $n = 4, 7$ )의 경우 처리 시간이 더 오래 걸립니다.

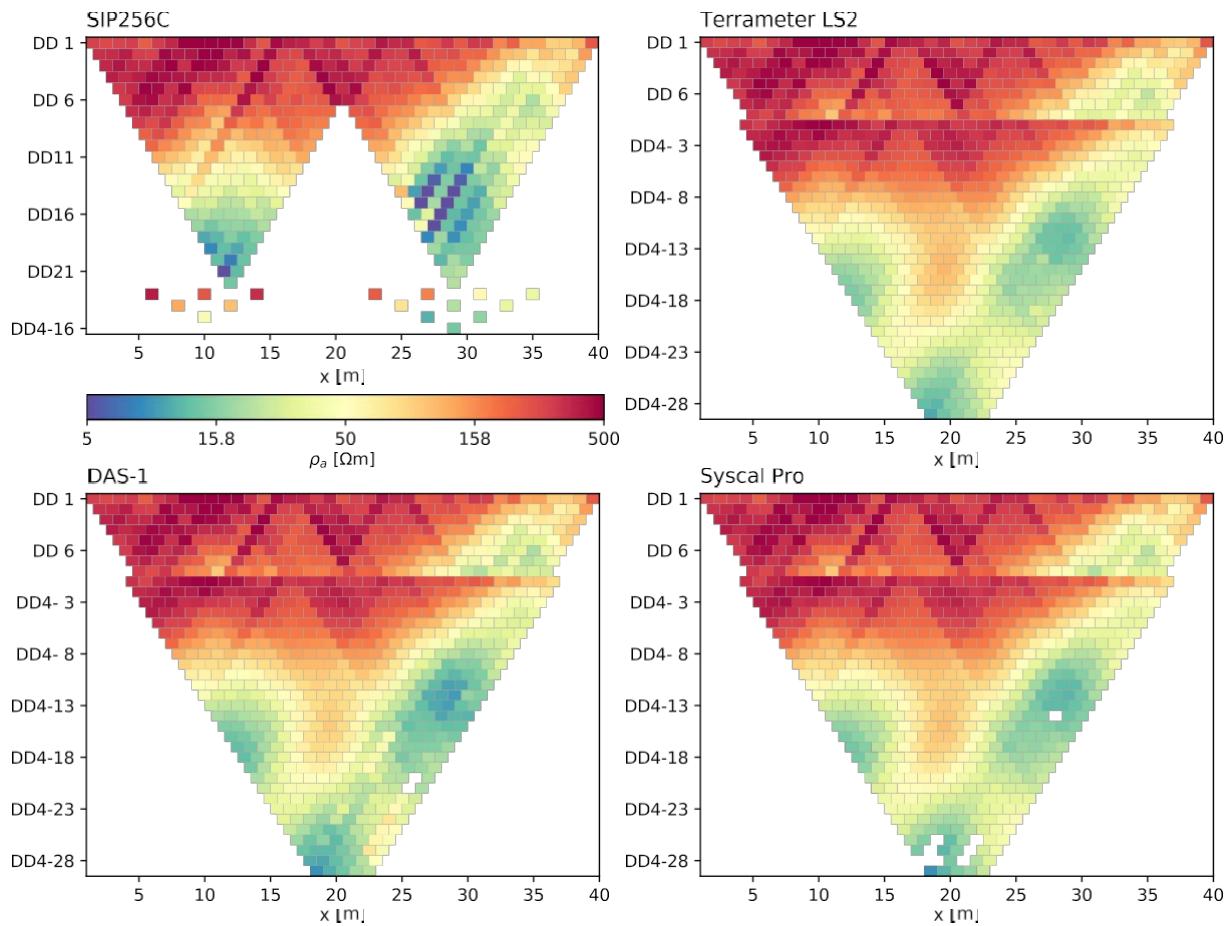


그림 4. 네 가지 계측기 모두에 대한 겉보기 저항률 의사 섹션(왼쪽 상단: SIP256C, 왼쪽 아래: DAS-1, 오른쪽 상단: 테라미터, 오른쪽 아래: Syscal), 스킵-0(DD n, 상단) 및 스킵-3(DD4-n, 하단) 데이터 결합.

는 이전 시간(> 0.05초)에 대해 매우 작거나 그럴듯한 데이터만 표시할 수 있습니다.

FDIP와 TDIP 측정을 직접 비교하기 위해 TD 전체 파형 데이터(테라미터)와 SIP256C 데이터에 대한 디바이 디컴포지션이 수행되었습니다. 그림 9에는 위에 표시된 4종극자(TDIP: 점선, FDIP: 실선)에 대한 이완 시간의 함수로서의 스펙트럼 전하 분포가 표시되어 있습니다.

일반적으로 일치하는 전극 간격( $n = 1/4/7$ )의 FDIP 및 TDIP 곡선은 동일한 범위에 있지만 곡선의 모양은 다양합니다.  $n = 7$ (빨간색/분홍색 선)의 경우 두 곡선(TD 및 FD)은 비슷한 이완 시간(약 0.5초)에서 최대치를 나타냅니다. 또한  $n = 1$ (파란색 선)의 경우 두 곡선은 거의 같은 값에서 시작하고 멈춥니다.  $n = 4$ (녹색 선)의 경우 충전성의 크기는 이완 시간의 중간 부분에서는 비슷하지만 최소 및 최대 이완 시간에서는 크게 달라집니다. 이 차이의 원인은 아직 밝혀지지 않았으며, 스펙트럼 내용이 약간 다르기 때문일 수 있습니다. 예를 들어 측정 방식에 의해 발생합니다. 또한, 반전의 평활도 제약으로 인해 디바이 분해에서 모호성이 발생할 수 있습니다.

프로파일 IP 1에 대한 스펙트럼 제약 반전 결과는 모든 계측기에 대해 스킵-0 및 스킵-3 데이터를 결합하여 그림 10에 표시되어 있습니다. 테라미터의 경우 처리된 데이터를 사용했습니다. 모든 데이터 세트에서 수동으로 제거해야 하는 값은 몇 개에 불과했습니다.

모든 겉보기 저항률 스펙트럼(TD 및 FD 모두)은 측정된 데이터와 모델링된 데이터 간의 상대적 제곱근 평균값에 대해 2% ~ 4% 범위 내에서 적합할 수 있습니다. IP 데이터 반전의 적합도가 다릅니다.

### 3.1.4. 반전 결과

에 대해 두 측정 방식 모두 쉽게 비교할 수 없습니다. FDIP 반전은 위 T. Martin 외 / 韩国 학술지 '코를리학' 저널 180 (2020) 104141

상 이미지에 대해 직접 반전하는 반면, TD 데이터의 경우 스펙트럼 전하성이 반전되어 제 한 되고 나중에 다른 피팅 프로세스, 즉 반전을 사용하여 최대 위상 모델로 전송된다는 점에 유의하십시오.

SIP256C 데이터(5.7mrad)에 대해 얻은 평균제곱근은 DAS-1(11.2mrad)보다 낮았습니다. 반면에 두 TDIP 기기의 데이터 적합도는 비슷했습니다(각각 8.2%, 8.8%(Syscal 및 Terrameter)).

왼쪽에는 저항률 섹션이 표시됩니다. 개별 계측기 간의 차이는 작으며, 큰 분리 데이터의 양이 적기 때문에 깊이에서 SIP256C만 약간 더 높은 값으로 표시되어 있습니다. 일반적으로 두께가 2~4m인 저항성( $200\sim 500\Omega m$ ) 과부하가 관찰되며,  $x = 30m$ 부터 얕아지는 것을 확인할 수 있습니다. 그 아래에서는 전도성( $<50 \Omega m$ ) 물질이 더 많이 발견되며, 측면 불연속성(예: 약 10m 및 25~30m 사이)이 있는 거의 층을 형성합니다. 부분적으로 약  $5\sim 10\Omega m$ 의 매우 낮은 값이 불연속성 사이에 나타납니다.

오른쪽에는 모든 계측기의 최대 위상 이동이 표시됩니다. 이것은 FD의 경우 단순한 최대 함수인 반면, TD의 경우 정위상 모델에 대한 적합도를 나타냅니다. 저항성 과부하 층과 일치하는 경우 첫 번째 미터는 낮은 위상이 특징입니다. 수심 3미터 이하에서는 위상이 최대 120mrad까지 크게 증가합니다. 흥미롭게도 고위상 층은 두 FDIP 계측기 모두에서 공통적으로 나타나지만 TDIP 측정의 경우 프로필의 오른쪽 부분에서만 뚜렷하게 나타납니다. 동일한 스펙트럼 정보를 기대할 수 있지만 측정된 감쇠와 스펙트럼에 다르게 포함되어 있으므로 반전 프로세스에 의해 하부 표면으로 투영됩니다.

. 다른 모델 매개변수화

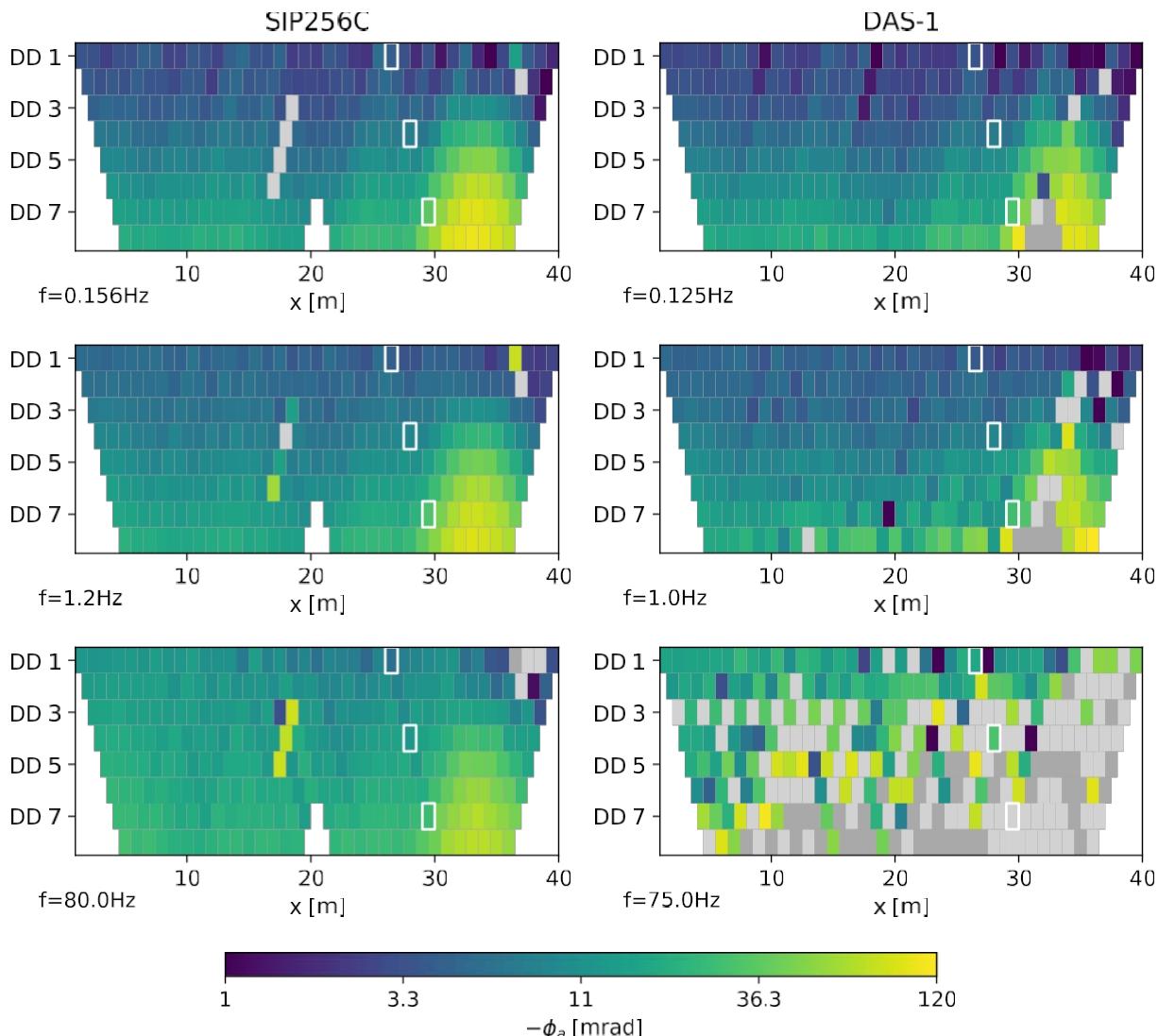


그림 5. FDIP 계측기(왼쪽: SIP 256C, 오른쪽: DAS-1)의 겉보기 위상(skip-0, 다른 주파수  $f = 0.156\text{Hz}/0.125\text{Hz}$ (첫 번째 줄),  $f = 1.2\text{Hz}/1.0\text{Hz}$ (두 번째 줄),  $f = 80\text{Hz}/75\text{Hz}$ (세 번째 줄)에 대한  $n_{max} = 8$ )에서 나타납니다. 흰색은 누락된 데이터(예: 를 얼룩으로 인해)를, 밝은 회색은 음수 값, 짙은 회색은 스케일을 벗어난 값을 나타냅니다. 흰색 직사각형 프레임은 그림 7에서 설명한 데이터를 나타냅니다.

(스펙트럼 위상 및 충전성)이 측정 정확도를 고려할 때 동등할 수 있는 다른 이미징 결과의 한 가지 원인일 수 있습니다.

과부하층은 모래와 양토로 이루어진 제4기 퇴적층으로 해석합니다. 분극성이 높은 좋은 전도체는 실루리안 그랩토라이트 블랙셰일로 해석됩니다(그림 2 참조). 해당 지역의 코어 시추 정보에 따르면, 이 셰일에는 황철광(예: 황철석)이 포함되어 있어 금속 광물과 관련된 전극 분극 메커니즘으로 인해 높은 IP 값을 설명할 수 있습니다.

### 3.2. 프로필/IP 5

다양한 신호 강도에 대한 영향을 논의하기 위해 프로파일 IP 5(전극 간격 5m)의 데이터에 대해서도 설명합니다. 여기서는 하나의 FDIP 계측기(SIP256C)와 하나의 TDIP 계측기(Terrameter)에만 초점을 맞춥니다. 그 이유는 (DAS-1과 달리) SIP256C 기기의 고주파수

에서 더 나은 성능과 Terrameter 전체 파형 데이터에 대한 처리 가능성 때문입니다.

### 3.2.1. 공간 일관성 분석

T. Martin 외 / 응용 지구물리학 저널 180 (2020) 104141

그림 11에는 8개의 간격 레벨( $n_{max} = 8$ )로 수집된 판독값에 대한 의사 섹션이 나와 있습니다. 왼쪽에는 걸보기 저항률(맨 윗줄)과 세 가지 선택된 주파수( $f = 0.156\text{Hz}/2.5\text{Hz}/40\text{Hz}$  - 행 2/3/4)에 대한 위상에 대한 SIP256C 기기의 결과가 표시되어 있습니다. 오른쪽에는 테라미터의 걸보기 저항이 세 가지 다른 시간 계이트의 의사 단면과 함께 표시됩니다( $t = 0.09\text{-}0.13\text{초}$ (두 번째 줄),  $t = 0.51\text{-}0.71\text{초}$ (세 번째 줄),  $t = 2.7\text{-}3.7\text{초}$ (네 번째 줄)). SIP256C 데이터에는 세 개의 룰-어롱 부분(100m와 200m에서 삼각형 모양)으로 인해 누락된 값이 있음을 유의하세요.

두 저항률 의사 섹션 모두 데이터는 일관된 패턴을 보여줍니다. 그러나 불규칙한 감쇠가 있는 데이터 포인트를 완전히 제거했기 때문에 테라미터 기기의 의사 섹션이 줄어듭니다. 또한 FDIP에서는 일부 전극에서 불규칙한 동작(의사 섹션의 흰색 선)으로 인해 판독값을 제거해야 하는 경우도 있었습니다.

TDIP에서 다른 시간 계이트 데이터는 프로파일 IP 1에 비해 이 프로파일을 따라 측정할 때 훨씬 더 노이즈가 많으며, 전극 분리가 증가함에 따라 데이터 일관성이 감소하고 귀에 걸리는 시간도 감소합니다. FDIP 위상 측정도 프로파일 IP 1에 비해 노이즈가 상당히 크지만  $n = 8$ 까지는 여전히 일관성이 있습니다. 그러나

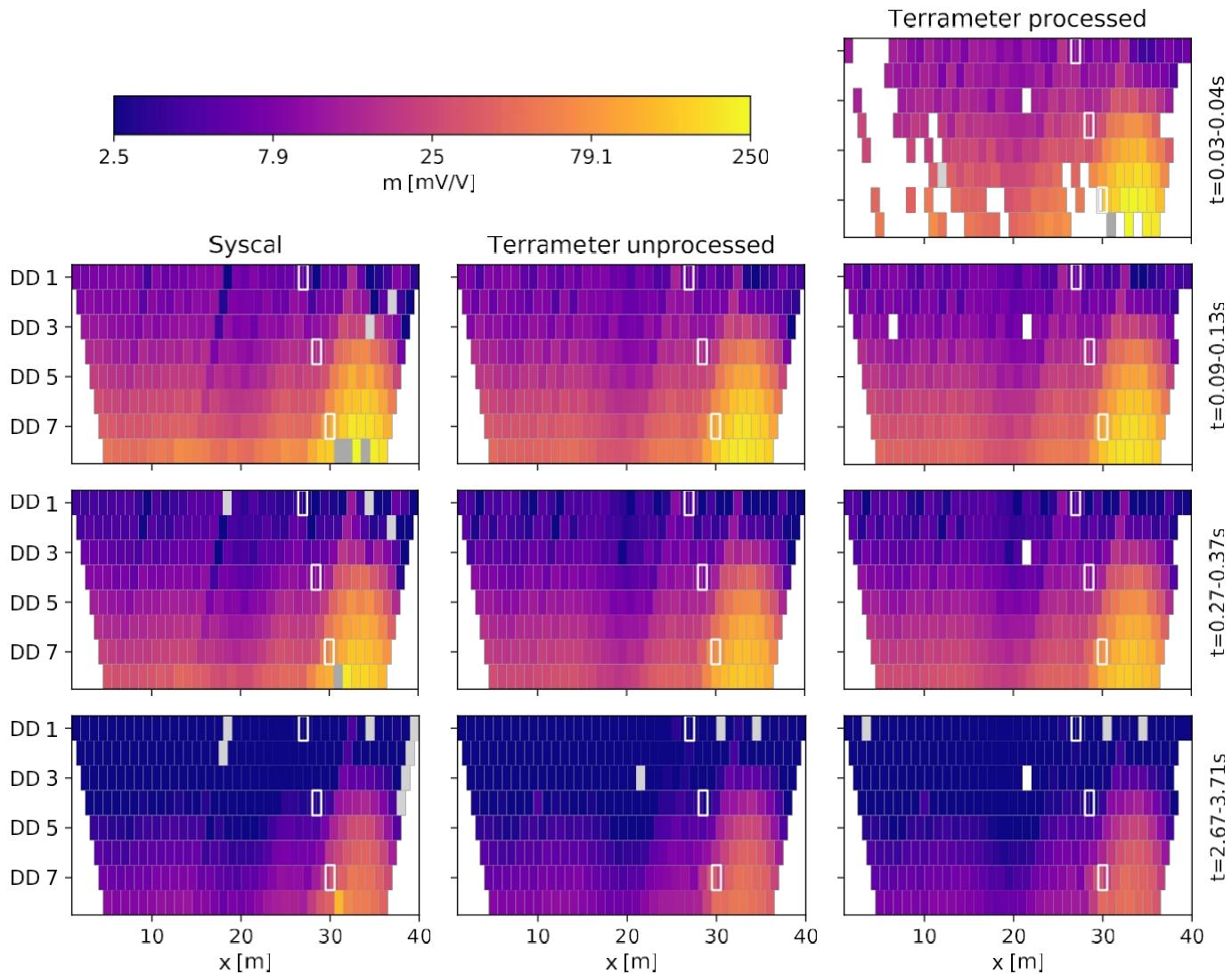


그림 6. 다양한 시간 케이트에서 TDIP 계측기(왼쪽: Syscal, 가운데: 처리되지 않은 테라미터, 오른쪽: 처리된 테라미터)의 겉보기 충전성 의사 섹션(skip-0):  $t = 0.03\text{-}0.04$ (첫째 줄),  $t = 0.07\text{-}0.13$ 초(둘째 줄),  $t = 0.31\text{-}0.43$ 초(셋째 줄),  $t = 2.47\text{-}3.13$ 초(넷째 줄). 흰색은 제거된 데이터(예: 이상값으로 인해)를 나타내고, 밝은 회색은 음수 값, 짙은 회색은 스케일을 벗어난 값을 나타냅니다. 흰색 직사각형은 그림 8의 뒷부분에서 설명하는 데이터를 나타냅니다.

개별 주파수 간의 차이는 이 프로파일에서 사소한 사양 내용만 나타냅니다.

### 3.2.2. 주파수 의존성 및 감쇠 곡선 분석

프로파일 IP 1과 유사하게 프로파일 IP 5에서 선택한 4종극자에 대한 스펙트럼(왼쪽)과 감쇠 곡선(오른쪽)이 그림 12에 나와 있습니다. 회색은 후속 분석 및 반전에 사용되지 않는 불량 데이터 포인트를 나타냅니다(아래 참조). 특히 높은 S/N 비율( $n = 1, 4$ )은 FD의 전체 주파수 범위에 걸쳐 매우 부드러운 곡선을 보여줍니다. 더 높은 전극 간격( $n = 7$ )만 노이즈가 더 심해 보이지만 여전히 최대 50Hz 까지 사용할 수 있습니다. TD에서 처리된 데이터는 높은 S/N 비( $n = 1$ , 파란색 선)에서 최대 30Hz까지 양호한 데이터를 보여줍니다. S/N 비가 감소하는 경우( $n = 4$  - 녹색 선,  $n = 7$  - 빨간색 선) 초기 시간 데이터는 계산할 수 있지만 유도 효과를 나타내는 비현실적이거나

나 나쁜 음의 데이터(검은 원)로 인해 추가 스펙트럼 분석/해석에 고려되지 않을 수 있습니다.

### 3.2.3. 반전 결과

비교를 위해 가장 낮은 주파수, 즉 약 0.1Hz에 대한 반전 결과를 보여줍니다(그림 13). 이를 위해 TDIP 데이터를 동시에 반전하고 그 결과 모델을 감쇠시켰습니다.

는 그림 12에서 볼 수 있는 다소 일정한 위상 거동을 반영하는 것은  $c$

값을 가정한 콜-콜 항을 사용하여 적합했습니다. 평균제곱근 오차는  
겉보기 지속성에서 5.8%(SIP256C) 및 7.4%(테라미터)로 IP 1에 비해  
상당히 높았고, 위상에서는 14.7mrad(SIP256C), 스펙트럼 전하 능력  
에서는 26.4mV/V(테라미터)로 나타났습니다.

프로파일 IP 1(이 프로파일의 작은 부분이며 180~221m 사이, 그  
림 2 참조)과 유사하게, 처음 2~3m는 더 높은 저항이 특징입니다. 높  
은 저항률 아래에는 전도성이 높은 물체( $<5\Omega m$  - 그랩토라이트 세  
일을 나타냄)가 프로파일의 중간(100~250m 사이)에 나타나며 더  
깊은 수심에 도달합니다. 또한 약  $x = 55m$ 에서 표면 근처 전도성  
구역을 인식할 수 있습니다. 두 영역 모두 저항률의 차이는 작습니  
다. 테라미터 데이터에서 170m에서 물체가 중단되는 부분만 약간  
의 차이를 나타냅니다.

대조적으로, 두 영역(TD 및 FD)의 위상 결과는 높은 쌍극자 거  
리에 대한 제한된 데이터 품질로 인해 더 높은 편차를 보입니다. 표면  
근처의 저위상 층 아래에서는 전체 프로파일을 따라 대부분 높은  
위상이 발생합니다. 그러나 FDIP에서는 층이 얕지만(5m), TDIP에  
서 보이는 고위상 이상은  $x = 30m, 100m$  및  $230m$ 의 확장된 치수  
를 가진 세 영역을 반영합니다.

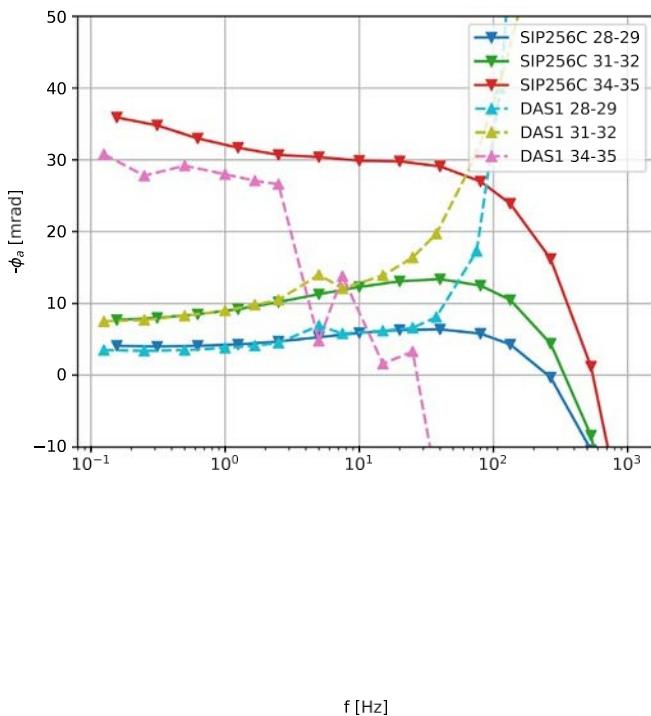


그림 7. 전류 쌍극자 A-B = 26-27 및 서로 다른 전위 쌍극자( $n = 1/4/7$ )에 대한 두 FDIP 계측기(SIP256C 및 DAS-1)의 겉보기 위상 스펙트럼. 실선은 SIP256C 측정값, 점선은 DAS-1 데이터를 나타냅니다.

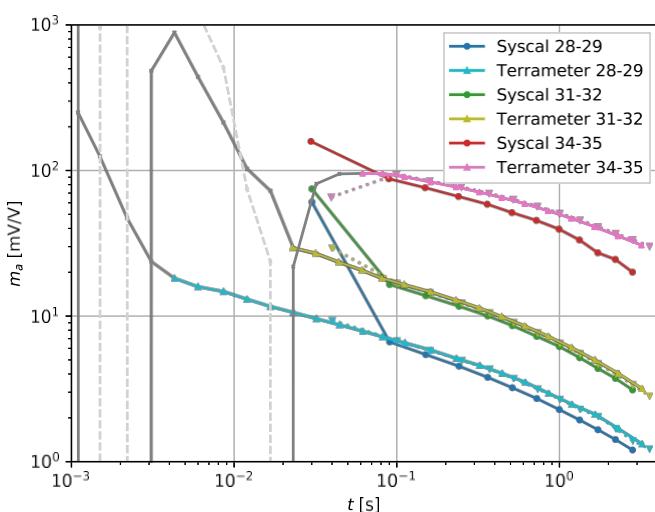


그림 8. 그림 7과 동일한 4종극자를 사용한 두 TDIP 기기(Terrameter 및 Syscal)의 케이티드 감쇠(A-B = 26-27,  $n = 1/4/7$ ). 점선은 처리되지 않은 Terrameter 데이터, 실선은 처리된 삼각형의 Terrameter 데이터, 실선은 원형의 Syscal 데이터를 나타냅니다. 회색 곡선은 처리 과정에서 유효하지 않은 것으로 표시됩니다(점선은 음수 값).

FDIP의 극성 가능한 얇은 층은 높은 값과 낮은 값 사이의 저항률의 전이 영역과 잘 일치합니다. 반면, TDIP의 고위상 영역은  $x = 150\text{m}$ 의 부분을 제외하고는 주로 저저항 영역과 일치합니다.

프로파일 IP 1의 해석에 따르면, 프로파일 중앙의 큰 고편광 영역은 실루리안 그랩토라이트 블랙세일로 해석할 수 있습니다(그림 2

저항률 영역의 깊이. 또한 IP 값은 비슷하며 부분적으로 높은 값을 보여줍니다. 낮은 저항률과 높은 IP 데이터는 블랙세일에 황화철이 존재하기 때문일 가능성이 높으며(Dill, 1986) 높은 신호 대 잡음비(S/N)로 이어집니다(예: Pelton et al., 1978; Flores Orozco et al., 2011, 2013). 이는 IP 비교에 유리하여 TDIP와 FDIP 모두에 대해 일관된 패턴을 가진 의사 선택을 생성합니다.

또한 반전 결과는 프로파일 IP 1과 IP 5 모두의 저항률 섹션에서 거의 동일한 결과를 보여줍니다. 일반적으로 최대 위상각 섹션도 비슷한 결과를 보이지만 프로파일 IP 1의 경우 TD에서 뚜렷하지 않은 고편극성 층과 IP 5에서 부분적으로 더 강한 편광 영역을 보여줌으로써 IP 도메인 간에 약간의 차이도 드러났습니다. 그 이유는 쌍극자 거리가 멀어질수록 데이터 품질이 제한되어 S/N비가 낮아지기 때문일 수 있습니다.

#### 4.1. 상세 데이터 평가

비교). 고분극 영역은 이 본체와 정확히 일치하지 않습니다. 실제로 가장 높은 위상 변화는 블랙 세일 본체의 양쪽 전이 영역에서 발생합니다. 분명히 대부분의 황화철은 여기에서 형성되었습니다.

#### 4. 토론

이 연구에 사용된 네 가지 기기로 측정한 겉보기 저항값은 거의 동일 하며 광범위하게 낮은 저항값을 나타냅니다.

저항률 데이터 외에도 저주파수에서의 FDIP 측정은 두 가지 (SIP256C와 DAS-1) 간에 정량적으로 비교할 수 있습니다. 그러나 DAS-1은 10Hz 이상의 주파수에서 측정값의 품질이 제한적인 것으로 보입니다. 이와 대조적으로, SIP256C는 처음 세 주파수 대역(0.1Hz~100Hz)의 공간 및 주파수 변화와 관련하여 일관된 데이터를 관찰할 수 있습니다. 더 높은 주파수(1000Hz까지)로 갈수록 곡선은 여전히 부드럽지만 EM 커플링의 영향을 많이 받습니다. 이 커플링을 고려하고 모델링하면 유용한 주파수 범위가 더 넓어질 수 있습니다. DAS-1에 비해 넓은 주파수 대역폭에서 SIP256C 판독값의 높은 일관성은 송신기와 수신기 사이의 결합을 피하기 위해 전극 옆에 배치된 RU에서 직접 전위차를 디지털화하기 때문에 설명할 수 있습니다. 또한 RU 기술은 케이블 간 누화를 최소화하여 고주파수에서 측정값을 크게 향상시킵니다(Radic, 2008; Schmutz et al., 2014). 이 연구에서 수행된 DAS-1을 사용한 측정은 다른 전선 사이의 차폐 없이 DC 저항률에 사용되는 것과 같은 일반적인 멀티코어 케이블을 사용하여 수행되었습니다. 따라서 측정은 케이블 내 누화 효과의 영향을 주로 받게 되며, 이는 10Hz 이상의 주파수에서 DAS-1 데이터의 공간적 일관성 부족을 설명합니다. 이 효과는 이전에도 다루어진 바 있지만(예: Flores Orozco 외, 2011), 본 연구에서는 10Hz 이상의 주파수에서 FDIP 데이터의 오염을 명확하게 제시하기 위해 이 설정을 해제했습니다. 그 결과, DAS-1로 수집된 저주파 데이터는 SIP256C로 수집된 데이터와 정량적으로 비교할 수 있어, DC 저항률에 사용되는 것과 같이 다루기 쉬운 멀티코어 케이블을 사용하여 높은 품질의 FDIP 측정을 수행할 수 있다는 가능성을 명확히 보여줍니다.

두 가지 TDIP 기기(Syscal 및 Terrameter)를 사용한 결과 다음과 같은 사실이 밝혀졌습니다.

넓은 시간 범위(>0.1초)에 걸쳐 감쇠 곡선 내에서 서로 다른 시간에 수집된 측정값에 대해 동일한 패턴을 가진 의사 섹션. 그러나 잘 일치하는 의사 단면(그림 6)은 실제 기록된 감쇠 곡선을 자세히 분석해야만 볼 수 있는 작은 체계적 변화를 가릴 수 있습니다(그림 8). 두 계측기 간의 감쇠를 직접 비교하는 것은 Syscal 장치에 통합된 저역 통과 필터의 영향을 받기도 합니다.

전체 파형 데이터를 사용하여 향상된 처리를 수행하면 TDIP 측정의 시간 범위를 확장할 수 있습니다. 여기서는 (Olsson et al., 2016)에 게시된 대로 Terrameter 지침의 전체 파형 데이터에 이 절차를 적용했습니다. 분명히 사용 가능한 스펙트럼 범위는 특히 높은 신호 대 잡음비의 경우 크게 확장될 수 있습니다. 프로파일 IP 5의 경우에도 거의 5ms의 초기 시간에 도달할 수 있습니다. S/N이 감소하면 초기 시간 데이터를 계산할 수 있지만 덕트 내 효과를 나타내는 비현실적이거나 신뢰할 수 없는 음수 데이터(검은색 원)로 인해 추가 스펙트럼 분석/해석에 고려되지 않을 수 있습니다. Syscal 전체 파형 데이터를 같은 방식으로 처리하면 입력

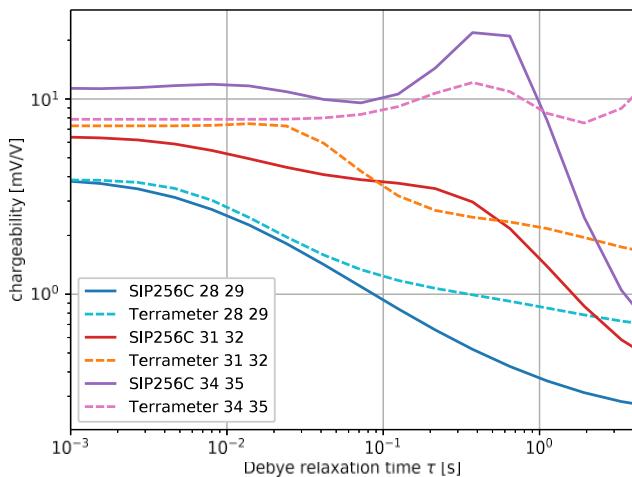


그림 9. 그림 7과 8의 4종극자를 사용한 SIP256C(FDIP, 실선) 및 테라미터(TDIP, 점선) 데이터의 디바이 분해 후 스펙트럼 전하성( $A-B = 26-27$ ,  $n = 1/4/7$ ).

TDIP와 FDIP 데이터의 대역폭을 비교하면, 낮은 S/N 비율의 경우에도 주파수 영역에서 최소 30개의 스펙트럼 범위에 도달할 수 있습니다(그림 7). 또한 측정된 최고 주파수( $f = 1000\text{Hz}$ )의 경우 공간적 일관성이 높고 이상값 발생이 최소화된 의사 섹션을 등록할 수 있습니다(SIP256C 사용, 부록 그림 14). 그럼에도 불구하고 고주파에서 발생하는 EM 효과는 모델링/반전을 위해 모델링하고 고려해야 하며, 이는 본 연구의 범위 밖에 있습니다.

TDIP 계측기는 붕괴 데이터에서 20 년의 대역폭을 달성했지만(그림 8) 저주파 대역폭은 다음을 가질 수 있습니다.

는 더 긴 전송 펄스를 사용하고 그에 상응하는 더 긴 시간 동안 감쇠를 측정함으로써 증가했습니다(계측기 소프트웨어의 GUI에서 설정한 제한에 따라 최대 반년). TDIP에서 상위 주파수/초기 시간 범위의 대역폭을 늘리는 것은 계측기 감쇠 데이터에서 직접 가능하지 않고 전체 파형을 처리해야 합니다(예: Fiandaca et al., 2013; Olsson et al., 2016). 이렇게 하면 스펙트럼 범위를 거의 크게 늘릴 수 있습니다. 높은 S/N 비율의 경우 10년입니다. 낮은 S/N( $n \geq 4$ )의 경우 데이터는 초기에는 믿기지 않아서 고려할 수 없었습니다.

를 사용하여 반전 프로세스를 진행합니다.

우리의 데이터는 동일한 기기(SIP256C 및 테라미터)를 사용한 Maurya 등(2018b)의 관찰 결과와 완전히 일치하지 않는데, FDIP에서 처리 후 20개의 스펙트럼 범위만 제공될 수 있고 TDIP의 경우 40개의 스펙트럼 범위만 제공될 수 있습니다. 보시다시피, TD에서는 프로세싱을 통해 상당한 개선이 이루어질 수 있지만 유도 결합으로 인해 최대 20년간의 고주파 FDIP 데이터를 제거할 이유를 찾지 못했습니다. 우리의 데이터에서 우리는 10Hz 이상의 명백한 무유도 데이터도 수집할 수 있었습니다. 또한, 이러한 효과를 고려하고 모델링하면 유도에 의해 오염된 데이터도 사용할 수 있습니다.

#### 4.2. 신호 강도

일반적으로 두 프로파일의 신호 강도를 비교하면(프로파일 IP 1의 경우  $a = 1\text{m}$ , 프로파일 IP 5의 경우  $a = 5\text{m}$ ), 전극 거리가 클수록 TDIP 및 FDIP 측정 모두에서 S/N 비율이 크게 악화되는 것을 알 수 있습니다. IP 5 테라미터 데이터의 경우 그림 3에서 볼 수 있듯이, 가장 짧은  $n$ -팩터( $n = 1$ )의 S/N 비율은 매우 양호하며  $n$ -팩터가 증가함에 따라 감소하여 측정된 원시 데이터 신호가 높은  $n$ -팩터( $n = 7$ )의 노이즈에 빠져들게 되는 결과를 초래합니다. FD에서는 전극 거리가 멀어질수록 IP 측정에 영향을 미치지만 주로 DAS-1 계측기의 경우, SIP256C의 경우 그 영향이 미미합니다. 반면 DAS-1

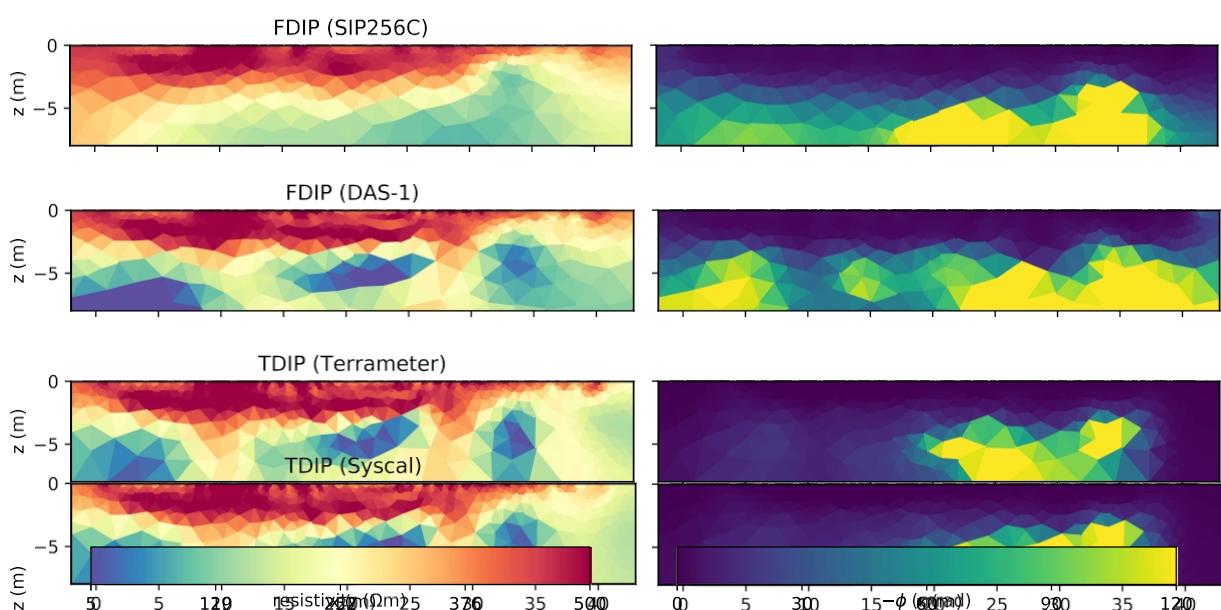


그림 10. 사용된 네 가지 계측기 모두에 대한 프로파일 IP 1의 반전 결과(위쪽부터: SIP256C/ DAS-1/ 테라미터/ 시스칼). 원쪽: 저항률( $\Omega\text{m}$ ), 오른쪽: 최대 위상 편이(mrad).

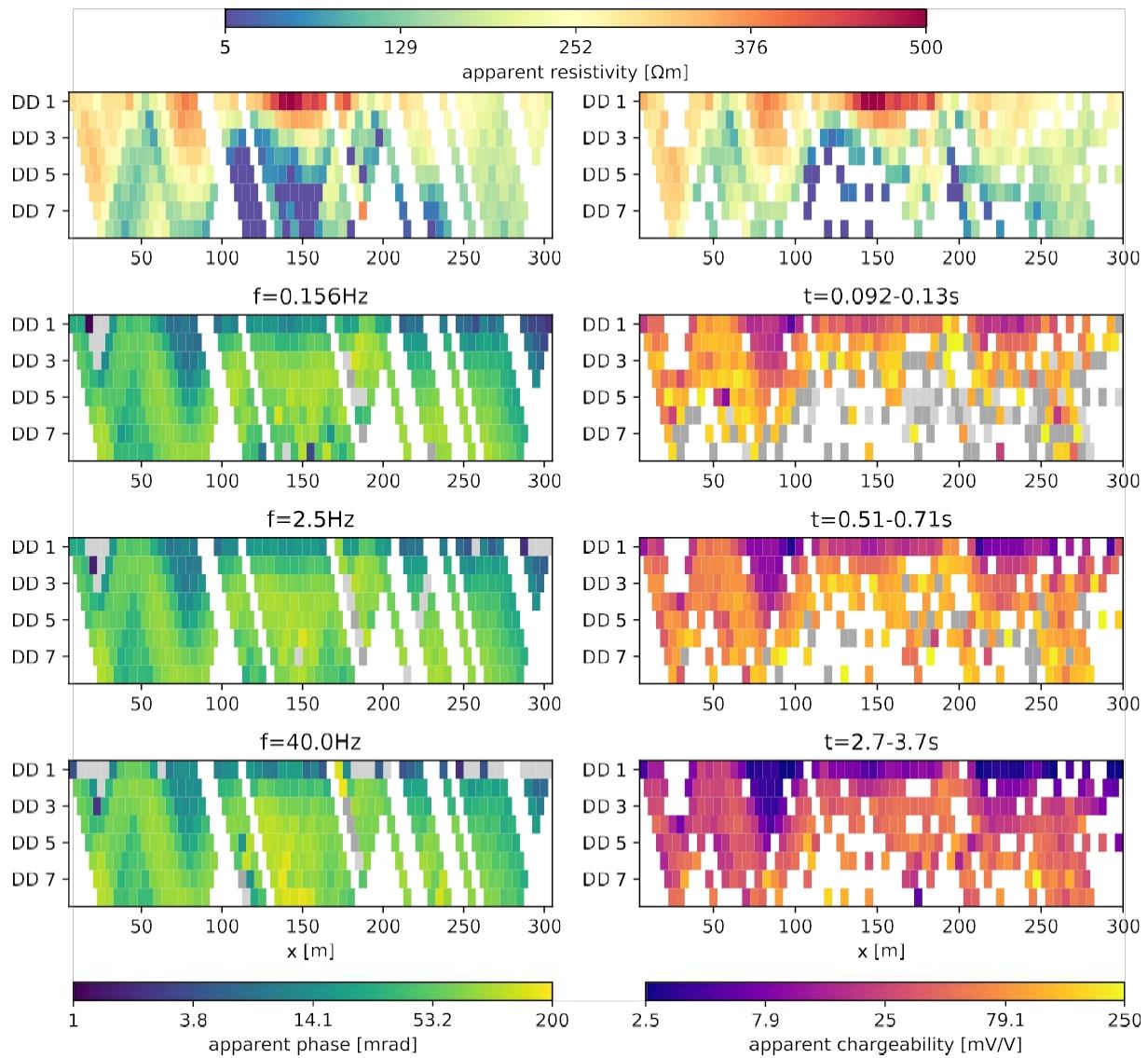


그림 11. 프로파일 IP 5의 의사 셕션(건너뛰기 0,  $n_{max} = 8$ ): 왼쪽 - SIP256C, 걸보기 저항(위쪽) 및 세 가지 주파수( $f = 0.156\text{Hz}/2.5\text{Hz}/40\text{Hz}$ )에서의 위상. 오른쪽: 걸보기 저항률에 대한 테라미터 데이터(위) 및 세 가지 다른 시간 창( $t = 0.09\text{-}0.13\text{s}/t = 0.51\text{-}0.71\text{s}/t = 2.7\text{-}3.7\text{s}$ ). 흰색은 누락된 데이터(예: 룰오버 또는 제거된 판독값)를 나타내고, 밝은 회색은 음수 값, 짙은 회색은 스케일을 벗어난 값입니다.

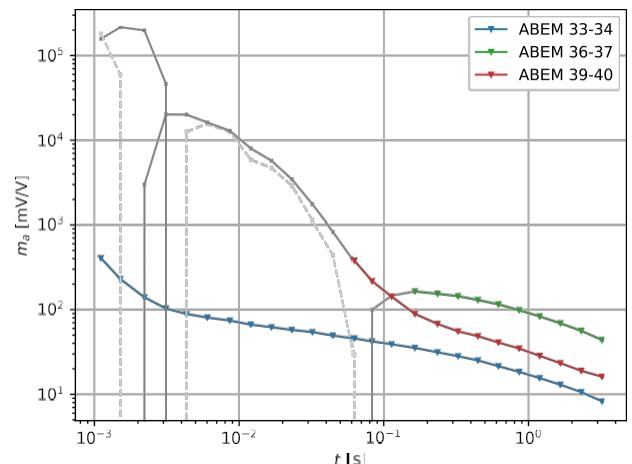
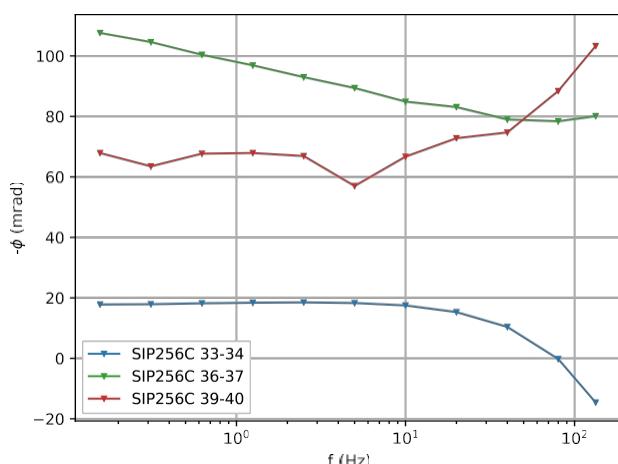


그림 12. 프로파일 IP 5 데이터: 세 개의 4중극자( $A-B = 31\text{-}32$ ,  $n = 1/4/7$ , 파란색/녹색/빨간색 선)에 대한 SIP256C(왼쪽)의 FDIP 위상 스펙트럼과 Terrameter(오른쪽)의 TDIP 감쇠. 회색은 반전에 사용되지 않은 데이터 포인트를 나타냅니다.

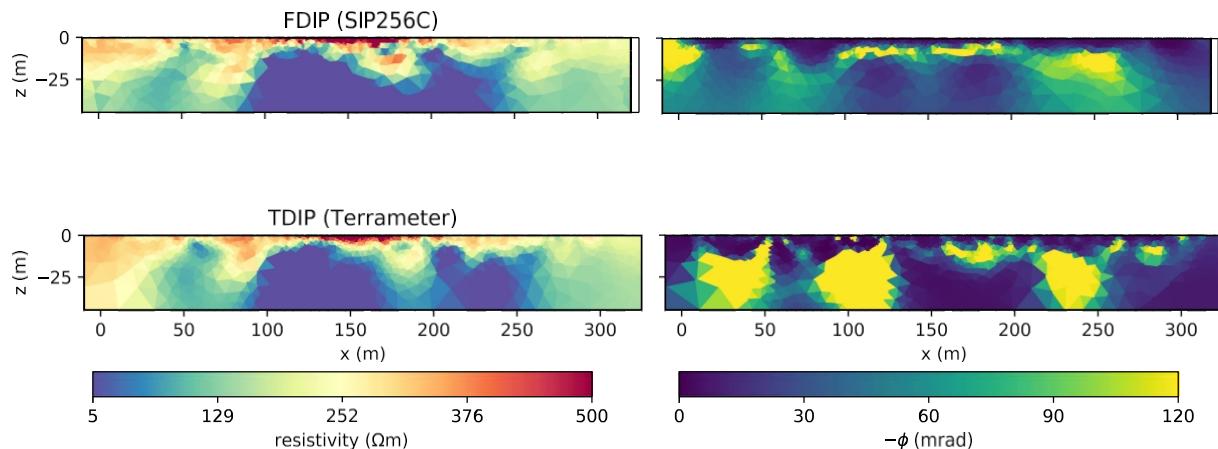


그림 13. 단일 주파수/시간 반전에 대한 SIP 256C(위) 및 테라미터(아래)에 대한 프로파일 IP 5의 반전 결과. 왼쪽: 저항률, 오른쪽: 가장 낮은 주파수, 즉 약 0.1Hz에서 최대 위상 편이.

는 두 TD 계측기와 유사한 결과와 대역폭을 제공하지만, SIP256C에 비해 고주파수(> 30Hz)에서의 차이가 큽니다. 쌍극자 분리가 크고 S/N비가 낮은 경우에도 SIP256C 데이터는 TD의 감쇠 곡선/타임 게이트와 대조적으로 더 넓은 주파수 범위에서 일관성을 유지합니다([그림 11 및 12, 오른쪽](#)). 다시 말하지만, 그 주된 이유는 위에서 언급한 원격 장치 기술을 사용하여 데이터 수집 케이블 내에서 EM 커플링을 최소화하는 SIP256C 계측기 때문입니다. 결과적으로 고주파수에서도 좋은 데이터를 측정할 수 있지만, 다른 한편으로는 현장에서 더 많은 시간이 소요된다는 단점이 있습니다.

#### 4.3. 촬영 시간 및 필드 설정 비교

계측기마다 사용되는 설정이 약간 다르기 때문에([표 2](#)), 프로파일 IP 1에 대해 동일한 설정으로 수집 시간을 계산하여 데이터 불균형성을 비교했습니다. 기준으로는 스택/주기가 2, 펄스 길이가 2인  $n_{max} = 8$ 에 대해 스kip 0 데이터만 사용했습니다. 0.25~225Hz(DAS-1)/0.3~266Hz(SIP256C) 주파수 범위에서 각각 4초. 또한 룰얼롱도 고려했습니다. [표 1](#)에서 각각의 획득 시간을 확인 할 수 있습니다. DAS-1의 시간이 SIP256C의 절반에도 미치지 못한다는 것을 알 수 있습니다. 그 이유 중 하나는 SIP256C의 시계열 전송이 더 많은 RU가 연결될수록 더 오래 걸리기 때문입니다(여기서는 24 RU). 이는 또한 각 전류 주입에 대해 자동으로 더 많은 쿼드러풀이 측정된다는 것을 의미합니다( $n_{max} = 24$  대신  $n_{max} = 8$ ). 또한 푸리에 변환 대신 실제 정현파를 사용하면 속도가 느려지지만 정확도도 향상됩니다.

TDIP의 획득 시간을 비교하면, 테라미터는 시스칼에 비해 거의 두 배의 시간이 필요합니다. 이 차이는 주로 수신기 채널(12채널 시스템의 경우에도)과 관련된 내장 릴레이 스위치의 하드웨어 설계의 한계로 인해 발생하며, 이는  $n$ -인자 1-8의 디아풀-디아풀 어레이에 불리합니다. 대부분의 경우 한 번의 전류 전송에 대해 7번의 측정이 이루

어지므로 스kip 0 측정을 위해 각 전류 전극 쌍에 대해 한 번의 추가 전류 전송이 필요합니다. 반면, 스kip-3 측정의 수집 시간은 두 계측기 모두에서 거의 동일합니다,

표 1

프로파일 IP 1(쌍극자-쌍극자, 스kip 0,  $n_{max} = 8$ , 스택 = 2, 펄스 길이 = 4초(시스칼/테라미터), 주파수 범위  $f = 0.25\text{--}225\text{Hz}(\text{DAS-1})/0.3\text{--}266\text{Hz}(\text{SIP256C})$ )의 비교 수집 시간.

	SIP256C	DAS-1	테라미터	Syscal
획득 시간 [hh:mm]	01:19	00:36	00:43	00:22

는 다른 파형(전체 신호의 길이)으로도 설명할 수 있습니다. Syscal과 달리, 테라미터는 정전류 트랜스미터가 있으며 각 측정 전에 테스트 펄스를 전송하여 사용된 전류 펄스 시퀀스를 정확하게 수집함으로써 전류 주입을 위한 최적의 설정을 확인합니다. 또한 각 측정 주기 전후에 배경 레벨(2초, [그림 3의](#) 신호 참조)을 측정하여 배경 드리프트를 계산하고 다시 추세화합니다.

물론 FDIP와 TDIP로 측정하면 비슷한 수집 시간에 도달할 수 있습니다. FDIP 필드 측정은 그 자체로 TDIP 측정보다 더 많은 시간이 소요되지 않습니다. 예를 들어, DAS-1(FDIP)과 테라미터(TDIP)로 수집한 측정은 유사한 수집 시간과 현장 절차를 필요로 하며([표 1](#)), 저 주파수/후기 시간(최대 10Hz, 0.1초)에서 일관된 의사 선택을 보여줍니다. 멀티코어 케이블을 사용하면 현장에 쉽게 배치할 수 있고 두 영역 모두에서 수집 시간을 절약할 수 있습니다. 그러나 고주파수 및 초기 시간에 수집된 데이터는 공간적 일관성이 떨어지며, 이는 크로스토크 및 전자기 결합에 의한 데이터의 오염을 반영합니다 ([Dahlin and Zhou, 2006; Flores Orozco 외., 2011, 2013; Kemna 외., 2012](#)). 전류 주입 및 전위 측정을 위해 분리된 멀티코어 케이블을 사용하면 전자기 효과를 최소화할 수 있습니다([Dahlin and Leroux, 2012](#)). 차폐 케이블은 데이터 품질도 향상시킬 수 있습니다 ([Flores Orozco 외., 2013](#)). 또한 멀티코어 케이블의 개별 전선의 형상을 고려하는 알고리즘을 사용하여 측정을 수행하여 고주파수에서 측정 시 데이터 품질을 향상시킬 수 있습니다([Zhao et al., 2013](#)). 이 연구에서 테라미터와 시스칼 계측기 간의 비교를 위해 사용한 표준 50% 듀티 사이클 대신 100% 듀티 사이클을 사용하면 TDIP 측정에서 수집 시간을 더 절약할 수 있습니다. [Olsson 등\(2015\)](#)은 측정 시간을 거의 두 배까지 줄일 수 있음을 입증했습니다. 이 연구에서는 쌍극자-쌍극자 어레이를 사용했습니다. 이전에는 전류 전극으로 사용되지 않았던 전극을 사용하여 전극의 편광 효과로 인한 데이터 오염을 최소화하여 전위 판독값을 제공합니다. 웨너 알파와 같은 다른 어레이의 전극에서 편광 효과가 발생합니다. 그러나 신호 강도는 쌍극자 분리가 증가함에 따라 급격히 감소하는 반면 다중 그라데이션 어레이의 향상된 S/N비를 제공할 수 있습니다. 또한 이러한 어레이의 수집 시간을 단축할 수도 있지만([Dahlin and Zhou, 2006](#)), 일부 연구에서는 다중 그라데이션 및 쌍극자-쌍극자 구성으로 수집한 데이터에 대해서도 유사한 결과가 나타났습니다([Flores Orozco et al., 2018b, 2018a](#)).

적절한 구성 시스템을 사용하면 접지 접촉 테스트 전류로 인한 (의도하지 않은) 충전 효과를 피할 수도 있습니다(최대

표 2

프로필 IP 1에 대한 데이터 수집 매개변수.

	SIP256C	DAS-1	테라미터	Syscal
	래디컬 연구	다단계 기술	가이드 라인 지역	IRIS 기기
스펙트럼 도메인	FD	FD	TD	TD
주파수 범위/시간 범위	0.156-1000Hz(14개 주파수)	0.125~225Hz(14 주파수)	4초(13개 IP 창)	4초(IP 창 20개)
사중극자(DD0)/사용 채널( $n$ )	$253 + 253/n = 24$ (DD0 + dd4 = 526)	$284/n = 8$ (DD0 + dd4 = 835)	$284/n = 8$ (DD0 + dd4 = 835)	$284/n = 8$ (DD0 + dd4 = 851)
전류 쌍극자(DD0)	44	40	54	40
전류 쌍극자(DD4)	7	126	164	126
스택/기간	4	3	2	2
최소 전류 최대	20mA	17 mA	71 mA	15mA
전류	75 mA	77 mA	240 mA	370 mA
획득 시간(DD0) 획득 시간 (DD0 + DD4)	4:32 h 5:20 h	1:28 h 4:15 h	0:43 h 1:42 h	0:22 h 1:37 h

표 3

프로파일 IP 5의 데이터 수집 매개변수.

	SIP256C	테라미터
	래디컬 연구	가이드라인 지역
스펙트럼 도메인	FD	TD
주파수 범위/시간 범위	0.156-1000Hz (14개 주파수)	4s (13개 IP 창)
사중극자(DD0) 사용 채널( $n$ )	759 (3 × 253) $n = 24$	460 $n = 8$
전류 쌍극자(DD0)/전류 쌍극자(DD4)	66 9	86 측정되지 않음
스택/주기 최소	4	2
전류 최대 전류	8mA	55 mA
수집 시간	100 mA 6:54 h	367 mA 1:09 h

## 5. 결론

FDIP와 TDIP 데이터 모두 서로 다른 기기로 수집한 측정값에 대해 일관된 결과를 제공합니다. DAS-1 데이터에 따르면 FDIP의 측정값은 TDIP와 동일한 방식으로 일상적으로 사용할 수 있지만 고주파수의 경우 데이터 품질에 유사한 제한이 있습니다. 일반적으로 TD 전체 파형 데이터에 최신 처리 알고리즘을 사용하여 주파수 도메인과 시간 도메인의 대역폭을 비교하면 작은 차이만 관찰할 수 있습니다. 본 연구에서는 FDIP(SIP256C)에서 더 높은 전극 분리와 낮은 S/N 비율에서도 뚜렷한 EM 노이즈 없이 최대 30년까지 측정할 수 있었습니다. TDIP 20년, 그리고 데이터 이후

20mA), 전극을 전위 주입에 사용한 직후 또는 이전 IP 측정으로 인해 전위를 측정합니다(Dahlin, 2000). 이러한 충전 효과는 일반적으로 이러한 계측기에 적용되는 선형 배경 추세 제거로 인해 후기 시간 감쇠 TDIP 데이터에 큰 오차를 초래할 수 있지만, Olsson 등(2016)이 제안한 것처럼 추세 제거를 위한 고차 함수를 사용하여 처리할 수 있습니다.

관찰 결과에 따르면, 현장 절차는 멀티코어 케이블을 사용하여 저 주파수에서 광범위한 매핑의 이점을 누릴 수 있으며, 더 넓은 주파수 범위에서 수집을 위해 특정 프로파일을 선택하는 것(예: 누화를 최소화하기 위해 RU 시스템 또는 정교한 케이블 셋업을 사용)이 좋습니다. 일반적으로 IP 필드 데이터의 품질은 양호한 접지 접촉(예: 전극에 물주기/젤 사용), 최적화된 어레이, 상호성의 통계적 분석을 통한 오류 모델 검색을 위한 정상 및 상호 데이터 측정 등 현장에서의 노력으로부터 많은 혜택을 받습니다(Flores Orozco 외, 2012b; Flores Orozco 외, 2018; Zhou and Dahlin, 2003). 최신 데이터 처리 및 반전 루틴과 함께 최신 지침 세대를 사용하면 스펙트럼 범위를 크게 늘릴 수 있으므로 일반적으로 IP 방법을 추가 응용 분야에 사용할 수 있습니다.

비율에 도달할 수 있습니다. 더 긴 필스를 사용하면 이보다 더 연장할 수 있습니다(최대 50년까지).

멀티코어 케이블 계측기(DAS-1, Syscal, Terrameter)로 고주파/초고주파 IP 데이터의 품질을 높이려면 전류 및 전위 측정을 위해 분리 및/또는 차폐 케이블을 사용하는 등 더 많은 노력이 필요합니다. SIP256C 데이터는 전극 간격이 넓고 S/N 비율이 낮은 조사에서도 현장 조건에서 광대역 SIP 스펙트럼 수집이 가능하다는 것을 보여줍니다. 그러나 최신 세대의 계측기를 사용하면 더 긴 수집 시간과 고급 필드 설정을 줄일 수 있습니다.

표준 IP 애플리케이션(예: 광물 탐사)의 경우 최첨단 기기 및 프로세싱이 항상 필요한 것은 아니지만, 극지성이 낮은 특정 대상에 대한 보다 상세한 조사(예: 수문 지질학적 애플리케이션)의 경우 최첨단 기기 및 프로세싱이 매우 중요할 수 있습니다.

## 경쟁 이해관계 선언

저자는 이 백서에 보고된 연구에 영향을 미칠 수 있는 것으로 보이는 경쟁적인 재정적 이해관계나 개인적 관계가 없음을 밝힙니다.

## 감사

이 프로젝트는 마리 스클로도프스카-퀴리 보조금 계약 번호 752671에 따라 유럽연합의 Hori-zon 2020 연구 및 혁신 프로그램으로부터 자금을 지원받았습니다. 저자는 공동 필드 트립에 자금을 지원해 준 스웨덴 ÅForsk 재단[계약 18-453]에도 감사를 표합니다. 또한 장비 지원을 해준 S. Kruschwitz(BAM Berlin), 현장 지원을 해준 스테판 블로흐버거와 루카스 아이그너(TU Vienna), 티노 라딕(Radic Research)에게도 감사를 표합니다. 저자들은 수치에 대해 논의하고 도움을 준 Annika Steuer(BGR 하노버)와 Per-Ivar Olsson(룬드 대학교)에게도 감사를 표합니다.

## 부록 A. 부록

**그림 14에는**  $f = 1000\text{Hz}$ (프로파일 IP 1)에서 측정된 최고 주파수에 대한 피상 저항과 위상이 표시되어 있습니다. 일관된 겉보기 저항 데이터 외에도 위상 의사 섹션은 약간의 이상값만 있는 데이터를 보여줍니다. 특히 더 높은 주파수의 경우, 이러한 데이터는 피할 수 없는 유도 전자기 효과의 영향을 받기 때문에 반전 시 모델링하고 고려해야 합니다. 이 연구에서 모델링을 목표로 하지 않은 경우에도(본 연구의 범위 밖이지만) 고주파수 데이터를 사용할 수 있으므로 좋은 데이터로 분류됩니다.

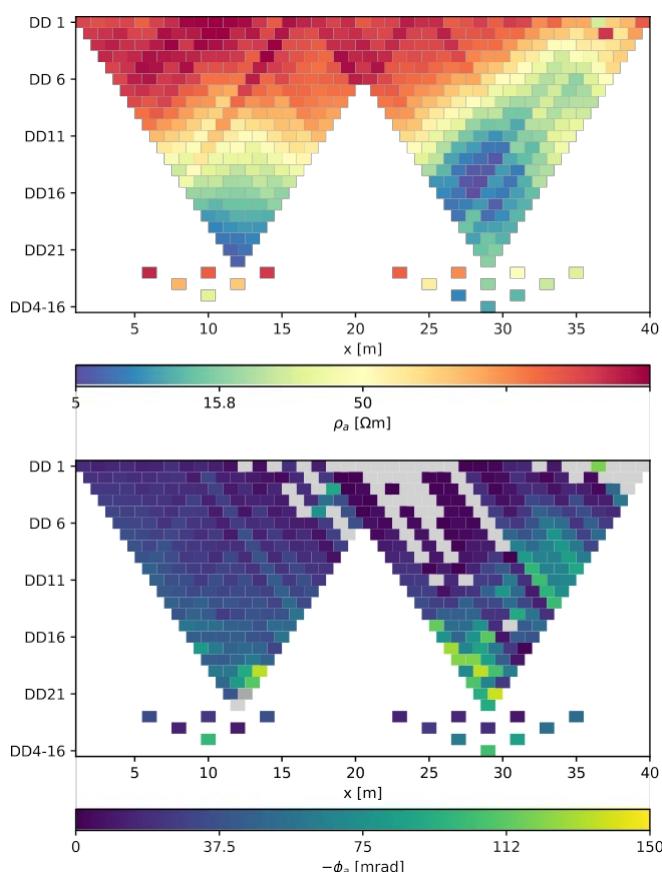


그림 14. 프로파일 IP 1( $f = 1000\text{Hz}$ )의 SIP256C 피상 저항(위쪽) 및 위상(아래쪽). 회색은 음수 또는 스케일을 벗어난 값을 나타냅니다.

## 참조

- 김나, A., 2000. 복합 저항의 단층 측정 반전. 박사 학위 논문. Ruhr- 독일 보훔 대학교 (ISSN: 3-934366-92-9).
- Radic, T., 2008. 도구 및 사용 방법론적 작업- stromgeoelektrik. 박사 학위 논문. 독일 베를린 공과대학교.
- Atekwana, E.A., Slater, L.D., 2009. 생물 지구 물리학 : 지구 과학 연구의 새로운 개척지. *Rev. Geophys.* 47 (4), RG4004.
- 빈리, A., 슬레이터, L.D., 후쿠스, M., 카시아니, G., 2005. 포화 및 불포화 사암의 스펙트럼 유도 편광과 수학적 특성 간의 관계. *Water Resour.* 41 (12), W12417.
- Dahlin, T., 2000. 다중 전극 어레이를 사용한 DC 저항 데이터 수집의 전극 충전 효과에 대한 간략한 참고 사항 . *Geophys. Prospect.* 48, 181-187.
- Dahlin, T., Leroux, V., 2012. 전류 및 전위 케이블을 분리하여 다중 전극 시스템으로 시간 도메인 유도 편광 데이터 품질 개선 . *near Surf. Geophys.* 10, 545-565.
- Dahlin, T., Zhou, B., 2006. 다중 채널 2D 재시스티시티 이미징을 위한 다중 그라데이션 어레이 측정 . *Near Surf. Geophys.* 4, 113-123.
- Davis, C.A., Atekwana, E., Atekwana, E., Slater, L.D., Rossbach, S., Mormile, M.R., 2006. Mi- 지질 매질에서의 세균 성장 및 생물학 형성은 복잡한 전도도 측정으로 감지됩니다 . *Geophys. Res. Lett.* 33 (18), L18403.
- Dill, H., 1986. 그라펜탈 호르스트(독일 북부 바이에른-연방 공화국)의 초기 고생대 그 립 톨라이트 세일의 금속 생성. *Econ. Geol.* 81, 889-903.
- Doetsch, J., Fiandaca, G., Auken, E., Christiansen, A., Cahill, A., Jakobsen, R., 2015. 얇은 대수층에서 주입 된  $\text{CO}_2$ 에 의해 유도 된 지구 화학적 변화 의 현장- 스케일 시간 도메인 스펙트럼 유도 편광 모니터링. *지구물리학* 80 (2), WA113-WA126.
- 피안다카, G., 2018. 현장 규모에서 스펙트럼 시간 및 주파수 도메인 유도 편광에서 유 도없는 획득 범위. *Geophys. J. Int.* <https://doi.org/10.1093/gji/ggy409>.
- Fiandaca, G., Ramm, J., Binley, A., Gazoty, A., Christiansen, A.V., Auken, E., 2013. 2-D 인버 터를 통해 시간 도메인 유도 편광 데이터에서 스펙트럼 정보 해결 . *Geophys. J. Int.* 192

- 피안다카, G., 매드슨, L.M., 마우리아, P.K., 2018. 유도 편광 데이터의 스펙트럼 반전 개선을 위한 콜콜 모델의 매개변수 재설정. *Near Surf. Geophys.* 16 (4), 385-399.
- 플로레스 오로즈코, A., 버커, M., 스타이너, M., 말레, J.-P., 2018a. 산사태 구조의 이해를 위한 복합 전도성 이미징. *Eng. Geol.* 243, 241-252.
- Flores Orozco, A., Williams, K.H., Long, P.E., Hubbard, S.S., Kemna, A., 2011. 우리늄 오염 대수층의 생물 정화와 관련된 생물 지구 화학적 과정을 추론하기 위해 복잡한 저항성 이미징을 사용합니다. *J. Geophys. Res.* 116 (G3), G03001.

- 28  
 플로레스 오로즈코, A., 캠나, A., 오버도르스터, C., 츠퍼트너, T., Martin, M., 그로바니, A., 보들레트, P., 블론델, A., 2014. 스펙트럼 유도 편광 연구에서 전자 결합 효과를 줄이기 위한 케이블 배열. *지구물리학* 79 (2), A1-A5.
- 이스, H., 2012a. 스펙트럼 유도 편광 이미징을 사용하여 이전 수력 발전소에서 지하 탄화수소 오염의 묘사. *J. Contam. Hydrol.* 136- 137, 131-144.
- 플로레스 오로즈코, A., 캠나, A., 짐머만, E., 2012b. 스펙트럼 유도 편광 이미징의 데이터 오류 정량화. *지구물리학* 77 (3), E227-E237.
- 플로레스 오로즈코, A., 윌리엄스, K., 캠나, A., 2013. 자극 된 우라늄 생체 정화의 시간 경과 스펙트럼 유도 편광 이미징. *Near Surf. Geophys.* 11 (1988), 531-544.
- Flores Orozco, A., Gallistl, J., Bücker, M., Williams, K.H., 2018b. 시간 영역 유도 편광 이미징에서 데이터 오류 정량화를 위한 감쇠 곡선 분석. *지구물리학* 83 (2), E75-E86.
- 귄터, T., 마틴, T., 2016. 채광 슬래그 더미에서 주파수 도메인 인덕션 편광 데이터의 스펙트럼 2차원 반전. *J. Appl. Geophys.* 135, 436-448.
- 귄터, T., 뤼커, C., 스피처, K., 2006. 지형을 통합 한 DC 저항률 데이터의 3 차원 모델링 및 반전 - 파트 II : 반전. *Geophys. J. Int.* 166 (2), 506-517.
- 귄터, T., 마틴, T., 뤼커, C., 2016. pyGIMLi / BERT를 사용한 SIP 필드 데이터의 스펙트럼 반전. 제4회 유도 편광에 관한 국제 워크숍, 오르후스/덴마크, p. 4 요약본.
- Hallof, P.G., 1974. IP 위상 측정 및 유도 결합. *지구물리학* 39 (5), 650-665.
- 회트, A., 블라센, R., 캠나, A., 지서, N., 2007. 현장 규모에서 유도 편광 데이터로부터의 유압 전도도 추정 - 크라우트하우젠 사례 기록. *J. Appl. Geophys.* 62 (1), 33-46.
- Johansson, S., Fiandaca, G., Dahlin, T., 2014. 자유상 PCE의 지구 전기적 시그니처를 조사하기 위한 저항률 및 스펙트럼 시간 도메인 IP의 현장 적용. 근표면 지구과학 2014-20차 유럽 환경 및 공학 지구물리학 회의(확장 초록).
- 요한슨, S., 피안다카, G., 달린, T., 2015. 유도 편광 매개 변수에 대한 비 수성 액체 구성의 영향 : 시간 도메인 필드 사례 연구에 적용된 개념적 모델. *J. Appl. Geophys.* 123, 295-309.
- 캠나, A., 빈리, A., 라미레즈, A., 데일리, W., 2000. 환경 응용 분야를 위한 복잡한 저항 단층 촬영. *Chem. Eng. J.* 77 (1), 11-18.
- Kemna, A., Binley, A., Cassiani, G., Niederleithinger, E., Revil, A., Slater, L., Williams, K.H., Orozco, A.F., Haegel, F.-H., Hördt, A., Kruschwitz, S., Leroux, V., Titov, K., Zimmermann, E., 2012. 표면 근처 애플리케이션을위한 스펙트럼 유도 편광 방법에 대한 개요. *Near Surf. Geophys.* 10, 453-468.
- LaBrecque, D., Daily, W., 2008. 다양한 구성의 갈바닉 저항 전극에 대한 측정 오류 평가. *지구물리학* 73 (2), F55-F64.
- Martin, T., 2012. 오크의 복잡한 저항률 측정. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 70 (1), 45-53.
- Martin, T., Günther, T., 2013. 서있는 떡갈 나무에서 곰팡이 탐지를위한 복합 저항 단층 촬영 (CRT). *Eur. J. For. Res.* 132, 765-776.
- Maurya, P.K., Balbarini, N., Möller, I., Ronde, V., Christiansen, A.V., Bjerg, P.L., Auken, E., Fiandaca, G., 2018a. 유도 편광에 의한 오염 된 부지의 물 전기 전도도, 수압 투과성 및 암석학의 지표면 이미징. *Geophys. J. 213 (2), 770-785.*
- 마우리아, P.K., 피안다카, G., 크리스티안센, A.V., 아우肯, E., 2018b. 주파수 및 시간 영역 스펙트럼 유도 편광의 필드 규모 비교. *Geophys. J. Int.* 214 (2), 1441-1466.
- 노드시크, S., 웨일러, A., 2008. 유도 편광 스펙트럼 피팅에 대한 새로운 접근 방식. *지구물리학* 73 (6), F235-F245.
- Oldenburg, D.W., Li, Y., 1994. 유도 편광 데이터의 반전. *지구물리학* 59 (9), 1327-1341.
- Olsson, P.-I., Dahlin, T., Fiandaca, G., Auken, E., 2015. 온 타임에서 시간 도메인 스펙트럼 인덕션 편광 측정 : 획득 시간 단축 및 신호 대 잡음비 증가. *J. Appl. Geophys.* 123, 316-321.
- Olsson, P.-I., Fiandaca, G., Larsen, J.J., Dahlin, T., Auken, E., 2016. 고조파 노이즈 제거, 드리프트 보정, 스파이크 재 이동, 테이퍼 게이팅 및 데이터 불확실성 추정을 통해 시간 도메인 유도 편광의 스펙트럼을 두 배로 늘리기. *Geophys. J. Int.* 207 (2), 774-784.
- 올슨, P.-I., 피안다카, G., 마우리아, P.K., 달린, T., 오肯, E., 2019. 시간 도메인 전체 응답 및 적분 전하 데이터에서 정량적 유도 편광 모델을 복구하는 데 전류 필스 지속 시간의 효과. *Geophys. J. Int.* 218 (3), 1739-1747.
- Pelton, W., Ward, S., Hallof, P., Sill, W., Nelson, P., 1978. 다중 주파수 IP를 사용한 광물 차별 및 유도 결합의 재 이동. *지구물리학* 43 (3), 588-609.
- Rücker, C., Günther, T., Wagner, F., 2017. pyGIMLi: 지구물리학의 모델링 및 반전을 위한 오픈 소스 라이브러리. *Comput. Geosci.* 109, 106-123.

- Voorhis, G.D.V., 넬슨, P.H., 드레이크, T.L., 1973. 반암 구리 광물화의 복잡한 비저항 스 펙트럼. *지구물리학* 38 (1), 49-60.
- Ward, S.H., 1990. 저항성 및 유도 편광 방법. *지질 공학 및 환경 지구 물리학*: 제 1권, 검토 및 퓨토리얼. 탐사 지구 물리학자 협회, 텔사 / 오클라호마, 147-190 쪽.
- Weigand, M., Kemna, A., 2017. 작물 뿌리 시스템을 특성화하고 모니터링하기 위한 비 침 습적 도구로서의 다중 주파수 전기 임피던스 단층 촬영. *생물 지구과학* 14 (4), 921-939.
- 윌리엄스, K.H., 켈나, A., 윌킨스, M.J., 드루한, J., 아른젠, E., 은구산, A.L., 롱, P.E., 허바드, S.S., 밴필드, J.F., 2009. 자극 된 지하 생물 정화 동안 결합 된 미생물 및 지구 화학적 과정 의 지구 물리학 적 모니터링. *Environ. Sci. Technol.* 43 (17), 6717-6723.
- Wong, J., 1979. 전파 된 활화물 광석에서 유도 분극 현상의 전기 화학적 모델. *지구물 리학* 44 (7), 1245-1265.
- Zhao, Y., Zimmermann, E., Huisman, J.A., Treichel, A., Wolters, B., van Waasen, S., Kemna, A., 2013. 높은 위상 정확도를 이용한 광대역 시추공 측정 전자기 결합 효과의 수치 보정. *Meas. Sci. Technol.* 24 (8), 085005.
- Zhao, Y., Zimmermann, E., Huisman, J.A., Treichel, A., Wolters, B., van Waasen, S., Kemna, A., 2015. 교차 시추공 eit 측정에서 전자기 결합 효과의 위상 보정. *Meas. Sci. Technol.* 26 (1), 015801.
- Zhou, B., Dahlin, T., 2003. 2D 저항률 영상 측량에 대한 측정 오류의 특성 및 영향. *Near Surf. Geophys.* 1 (3), 105-117.
- 짐머만, E., 켈나, A., 베워스, J., 글라아스, W., 베리켄, H., 2008. 토양 및 퇴적물의 스펙트 럼 유도 편광 특성 이미징을위한 높은 위상 정확도를 갖춘 EIT 측정 시스템. *Meas. Sci. Technol.* 19, 094010.
- Zisser, N., Kemna, A., Nover, G., 2010. 저주파 전기적 특성과 저 투과성 사암의 수압 투과 성 사이의 관계. *지구물리학* 75, E131-E141.
- Zonge, K., Sauck, W., Sumner, J., 1972. 유도 편광에서 시간, 주파수 및 위상 측정 의 비 교. *Geophys. Prospect.* 20 (3), 626-648.