

## 이방성 매질에서의 다성분 전자기유도 검층 반응

남명진<sup>1,2)</sup>, David Pardo<sup>3)</sup>, Carlos Torres-Verdín<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>세종대학교 에너지자원공학과, [nmj1203@gmail.com](mailto:nmj1203@gmail.com)

<sup>2)</sup>세종대학교 그린에너지연구소

<sup>3)</sup>Department of Applied Mathematics, Statistics, and Operational Research, University of the Basque Country (UPV/EHU), Leioa, Spain, and Basque Foundation for Science, Bilbao, Spain

<sup>4)</sup>Department of Petroleum and Geosystems Engineering, The University of Texas at Austin, Texas, USA

## Responses of Multi-Component Tri-Axial Induction Logging in an Anisotropic Formation

Myung Jin Nam<sup>1,2)</sup>, David Pardo<sup>3)</sup>, and Carlos Torres-Verdín<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Energy and Mineral Resources Engineering, Sejong University, Seoul, Korea

<sup>2)</sup>Green Energy Research Institute, Sejong University, Seoul, Korea

<sup>3)</sup>Department of Applied Mathematics, Statistics, and Operational Research, University of the Basque Country (UPV/EHU), Leioa, Spain, and Basque Foundation for Science, Bilbao, Spain

<sup>4)</sup>Department of Petroleum and Geosystems Engineering, The University of Texas at Austin, Texas, USA

Henry Doll이 1951년 처음 저류층 평가를 위해 전기 검층(normal (resistivity) logging)을 실시한 이후, 시추공 물리검층(well logging, borehole logging)은 석유가스 저류층 탐사 및 특성화에 매우 많이 이용되어 왔다. 석유가스 저류층 특성화를 위한 전통적 시추공 물리검층에는 크게 전기 검층, 전자기유도 검층(induction logging), 자연감마 검층(natural gamma logging), 감마-감마(밀도) 검층(gamma-gamma (density) logging), 중성자 검층(neutron logging), 음파 검층(sonic logging) 등이 있으며, 최근 들어 자기공명검층(nuclear magnetic resonance, NMR)에 대한 중요성이 높아지고 있다. 또한 치밀가스 등의 생산을 위한 방향성 시추나 수평정에서의 물리검층을 위해서 앞서 언급한 전통적인 wireline 물리검층 기법들을 시추 중에 수행하기 위한 logging-while-drilling (LWD)의 적용도 늘어나고 있다.

물리 검층 중 전기 검층을 이용한 시추공 주변 지층의 전기비저항 분포 파악은 물리검층 초기에 가장 많이 적용되었으며 이후 집중식 전기비저항 검층(focused resistivity logging)이 많이 개발되었다. 전자기검층은 전기 검층을 적용할 수 없는 유성이수(oil-based mud; OBM)을 이용한 시추공에서의 시추공 주변의 전기비저항/전기전도도 분포를 파악하기 위해 처음 개발되었으며 초기에는 수직 자기 모멘트 송신원( $M_z$ )에 의해 발생한 수직자기장( $H_z$ )을 측정하였다. 전자기유도 검층은 전기검층과 함께 시추공 주변의 전기전도도

분포를 위해 가장 널리 이용되었다. 비록 전자기유도 검층이 유성이수를 이용한 시추공에서의 적용을 위해 개발되었지만 추후에는 수성이수를 사용하는 시추공에까지 적용이 확장 되었다.

석유가 부존하는 층은 주로 수직 방향 전기비저항이 수평 방향 전기비저항 보다 큰 전기적 이방성을 많이 띄고 있는 반면, 전통적인 전자기유도 검층은 수직 자기 모멘트에 매질의 반응 중 수직 자기장인  $H_{zz}$ 를 측정하므로 전기적 이방성을 파악하지 못하고 수평방향 전기전도도만을 측정할 수 있어 석유 부존 층 파악에 실패하는 경우가 많이 발생하였다. 다성분 전자기유도 검층(multi-component induction logging) 혹은 삼축 전자기유도 검층(tri-axial induction logging)은 수평 뿐 아니라 수직 방향 전기전도도까지 측정하여 매질의 전기적 이방성을 파악함으로써 보다 효율적으로 석유 부존 층을 파악하기 위해 개발되었다.

다성분 전자기유도 검층에서는 수직, 수평 ( $x$ 와  $y$ 방향) 방향의 서로 수직인 세 자기 모멘트( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ )를 송신할 수 있으며, 각각의 송신원에 대해 수직, 수평 자기장을 측정할 수 있기 때문에 총 9개의 서로 다른 성분을 측정할 수 있기 때문에(즉,  $M_x$ 에 의한 ( $H_{xx}$ ,  $H_{yx}$ ,  $H_{zx}$ ),  $M_y$ 에 의한 ( $H_{xy}$ ,  $H_{yy}$ ,  $H_{zy}$ ),  $M_z$ 에 의한 ( $H_{xz}$ ,  $H_{yz}$ ,  $H_{zz}$ )), 매질의 전기적 이방성 파악에 용이하다.

이 연구에서는 이방성 매질에서의 다성분 전자기유도 검층의 반응과 초기의 전통적인 전자기 유도 검층을 목표지향적 자기적응 고차  $hp$  유한요소법(goal-oriented self-adaptive high-order  $hp$  finite element method)에 기초하여 수치 모델링을 수행하여 비교 분석하였다. 목표지향적 자기적응 고차  $hp$  유한요소법은 측정 위치에서의 에러를 최소로 (사용자가 원하는 오차 범위 내로) 할 수 있도록 하기 위하여, 반복적인 과정을 통해, 계산 영역 내의 메쉬를 자동적으로 분하여  $h$  개선( $h$  refinement)을 수행하거나 근사 차수를 높임으로써  $p$  개선( $p$  refinement)을 수행하여, 즉  $hp$  개선( $hp$  refinement)을 수행하여 최적의 메쉬를 구성할 수 있다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The work reported in this paper was funded by The University of Texas at Austin's Research Consortium on Formation Evaluation, jointly sponsored by Anadarko, Aramco, Baker-Hughes, BG, BHP Billiton, BP, Chevron, ConocoPhillips, ENI, ExxonMobil, Halliburton, Hess, Marathon, Mexican Institute for Petroleum, Nexen, Petrobras, Schlumberger, StatoilHydro, TOTAL, and Weatherford. The first author was supported by National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MEST) (No. 20110014684). The second author was partially funded under the Spanish Ministry of Sciences and Innovation project MTM2010-16511.