

한반도 내의 전도성 구조를 고려한 3차원 지자기 모델링 및 차이 지시자의 적용

양준모^{1,*} · 오석훈¹ · 이덕기¹ · 권병두² · 윤용훈¹

¹기상연구소 해양기상지진연구실, 156-720 서울특별시 동작구 신대방 2동 460-18

²서울대학교 지구과학교육과, 151-748 서울특별시 관악구 신림9동 산 56-1

The 3-D Geomagnetic Induction Modeling and the Application of Difference Arrow Considering with Conductivity Structures on the Korean Peninsula

Junmo Yang^{1,*} · Seokhoon Oh¹ · Duk-kee Lee¹
Byung-Doo Kwon² · Yong-Hoon Youn¹

¹Marine Meteorology & Earthquake Res. Lab., Meteorological Research Institute,
460-18, Shindaebang-Dong, Dongjak-Gu, Seoul 156-720, Korea

²Department of Earth Science Education, Seoul National University,
Shinlim 9-Dong, Gwanak-Gu, Seoul 151-748, Korea

Abstract: We have performed 3-D geomagnetic induction modeling considering with anomalous conductive structures to interpret the conductive anomaly proposed by previous studies on the Korean Peninsula. The results of modeling coincide well with the observed induction arrow, we confirm the fact that Imjin River Belt and Ogcheon Belt presumed in the model are reasonable. In the western-middle area of the peninsula (YIN, ICHN) the induction arrows seem to reflect the existence of the Imjin River Belt and the induction arrows in western-south area (HNS, CHY, DZN, MWN) is likely to reflect the effect of the Ogcheon Belt. The difference arrows, calculated by subtracting the sea effect from observed induction arrow in the western area of the peninsula at the period of 60-minutes, show little difference with the observed induction arrows. Especially, the difference arrows in YIN, ICHN also show a similar pattern to those at the periods longer than 10-minutes. These results strongly suggest that the Imjin River Belt and the Ogcheon Belt extend down to the deep part of the crust in spite of the limitations of our model.

Keywords: Geomagnetic induction modeling, induction arrow, difference arrow, Imjin River Belt, Ogcheon Belt

요약: 기존의 연구에서 제안된 한반도내의 전도성 구조를 정량적으로 해석하기 위해 전도성 구조를 고려한 3차원 지자기 모델링을 수행하였다. 모델링 결과는 관측 유도 지시자를 잘 설명하며, 모델에서 설정된 임진강 벨트와 옥천대의 전도도 구조에 대한 가정이 유의미함을 보여주고 있다. 한반도의 서중부 관측점들(YIN, ICHN)은 임진강 벨트의 영향을 반영하는 것으로 보이며, 한반도 서남부의 관측점들(HNS, CHY, DZN, MWN)은 옥천대의 영향을 반영하는 것으로 보인다. 관측 유도 지시자로부터 해양효과를 제거한 차이 지시자를 계산하였는데, 한반도 서부의 관측점들은 주기 60분에서 관측 유도 지시자와 큰 차이를 보이지 않았고 특히 YIN, ICHN은 주기 10분부터 동일한 양상을 보여 주고 있는데 이러한 결과는 옥천대와 임진강 벨트가 심부까지 확장된 전도성 구조라는 가설을 지지한다.

주요어: 지자기 모델링, 유도 지시자, 차이 지시자, 임진강 벨트, 옥천대

*Corresponding author: yjm@metri.re.kr

Tel: 82-2-847-2495

Fax: 82-2-847-2496

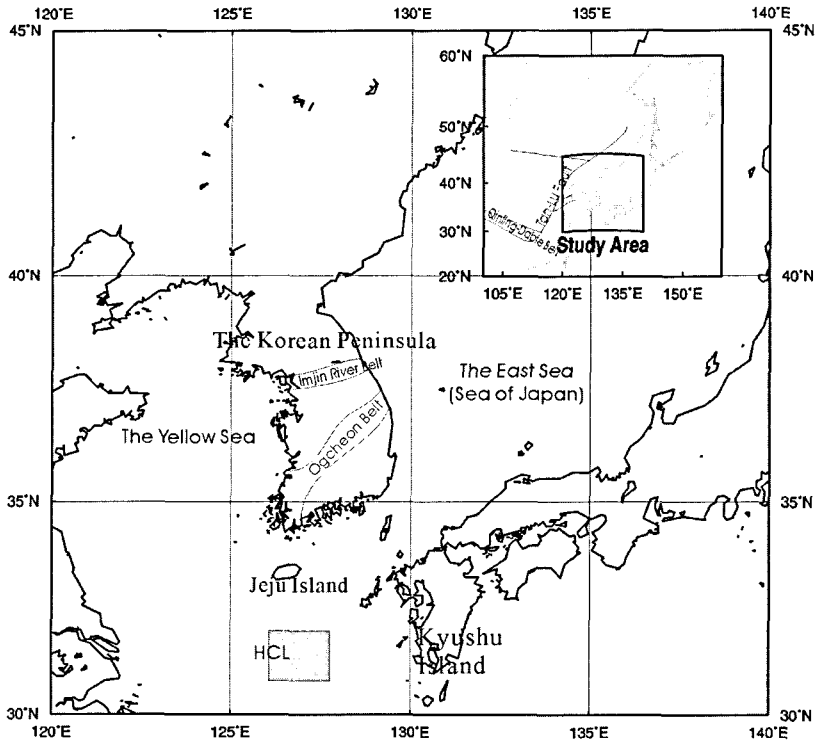


Fig. 1. Tectonic map showing the tectonic characteristics in and around the Korean Peninsula (after Oh *et al.*, 2002). The box map represents the Qinling-Dabie belt and Tan-Lu fault in China. The two belts in the peninsula and the highly conductive layer (HCL) (shimoizumi *et al.*, 1997) in the west of Kyushu Island are included in the geomagnetic modeling. Compiled from the tectonic map of Cho *et al.* (1995), Kim (1970), and Shimoizumi *et al.* (1997).

서론

지진활동이 활발한 중국과 일본에 비해 한국은 상대적으로 지진에서 안전하다고 인식되고 있다. 그러나 한반도와 그 주변의 지구조 및 그 성인은 매우 복잡하며, 이에 대한 명확한 설명이 이루어지지 않고 있다. 그럼에도 불구하고 한반도의 광역적인 심부 구조 규명을 위한 지구물리적 연구 및 자료는 매우 부족한 실정이다. 한반도의 심부 전기구조에 대한 첫 연구는 지자기수직탐사를 이용하여 민경덕(2001), 오석훈 외(2002)에 의해 수행되었다. 그들은 한반도 및 주변에서 관측된 유도 지시자(induction arrow)는 크게 세 가지 전도성 구조, 즉 임진강 벨트, 옥천대, 제주도 와 규슈섬 사이에 존재할 것으로 추정되는 고전도성층(HCL; Highly Conductive Layer)과 관련되어 있다고 보고하였다(Fig. 1). 그러나 그들의 연구는 관측 자료의 정성적 해석에 초점을 맞추었으며 모델링을 통한 정량적인 접근은 이루어지지 않았다. 또한

각각의 관측 결과를 개별적으로 분석하였기 때문에 관측 결과의 통합이 필요하며 본 연구에서는 두 연구의 관측 결과를 모두 고려하였다(Fig. 2).

본 연구에서는 기존의 연구에서 제한한 전도성 구조를 정량적으로 해석하기 위해서 한반도 및 주변 지역에 대한 수치 모델링을 수행하였다. 한반도는 삼면이 바다로 둘러 쌓여 있어 해양효과를 반드시 고려하여야 하며, 계산된 해양효과와 관측 유도 지시자의 비교는 육지 내의 전도성 구조 탐지에 중요하다. 이와 더불어 추정된 전도성 구조를 고려한 모델링이 관측 유도 지시자를 잘 설명할 수 있는지 조사하였다. 한편 한반도와 같이 해양에 둘러쌓여 있는 환경에서 해양은 육지 내의 전도성 구조의 탐지를 어렵게 하는 방해 요소로 전도성 구조의 독립된 반응을 획득하기 위해서는 해양 효과가 제거된 되어야 한다. 본 연구에서는 마지막 단계로서 전도성 구조의 독립적인 반응인 차이 지시자(difference arrow)를 계산하였다 (양준모 외, 2002; Pringle *et al.*, 2000; Shimoizumi *et al.*, 1997).

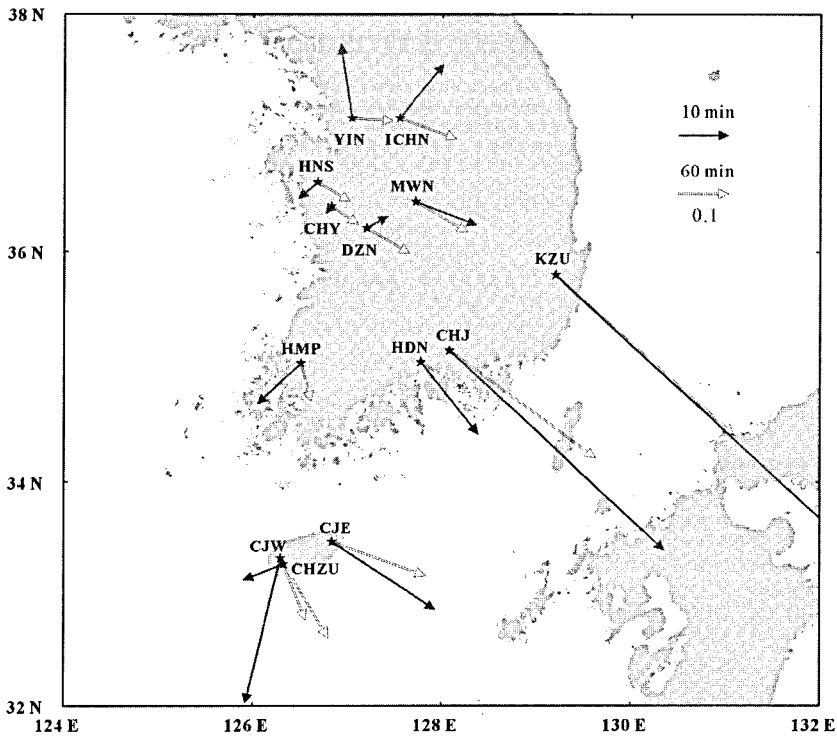


Fig. 2. Observed real induction arrows for 10- and 60-minute periods at thirteen sites. YIN: Yongin, ICHN: Icheon, HNS: Hongsung, CHY: Cheongyang, DZN: Daejeon, MWN: Miwon, HMP: Hampyeong, HDN: Hadong, CHJ: Chinju, KZU: Kyeon-gju, CJW: Jeju west, CJE: Jeju east, CHZU: Jeju

해양효과 및 전도성 구조를 고려한 모델링

해양효과 모델링

유도 지시자의 특성 상, 해양이 인접한 곳에서는 매우 좋은 전도체인 해양의 영향이 지배적이다. 한반도와 같이 삼면이 바다로 둘러싸인 환경에서 해양효과에 대한 고려는 육지 내의 전기전도도 분포를 해석하기 위해 매우 중요하다고 하겠다. 본 연구에서는 Mackie *et al.*(1993)의 3차원 MT 모델링 코드를 이용하여 해양효과를 계산하였다. 해양효과를 계산하기 위한 해양 모델(S)은 Fig. 4의 모델에서 두 벨트와 제주도 하부의 전도성층을 제외하고 동일하다. Fig. 3의 등고선은 한반도 주변의 수심을 보여주는데 동해와 황해의 수심은 약 10배의 현격한 차이를 보여준다(Chu *et al.*, 2001).

3차원 모델링 결과 Fig. 3은 주기 10분과 60분에서 모델 S에 의한 해양효과를 보여주는데, 황해와 동해의 수심차이에서 예상했던 바와 같이 유도 지시자의

전체적인 패턴은 동쪽 성분이 강하게 나타나고 주기 60분의 경우 주기 10분보다 동해의 효과가 더 넓은 범위에 영향을 미친다. 한반도의 중남부에서는 남해의 영향으로 유도 지시자의 방향이 벡터적으로 조정되었음을 확인할 수 있다.

전도성 구조를 고려한 모델링

Fig. 4는 세 개의 전도성 구조를 고려한 모델(SC)로서 오석훈 외(2002)가 제안한 임진강 벨트, 옥천대, 제주도 남부의 고전도성층을 각각 묘사하였다. 모델 SC에 대한 결과는 주기 60분과 10분에 대하여 Fig. 5에 도시하였다. 모델 SC의 크기는 $70(x) \times 60(y) \times 27(z)$, 공기층 10개 포함이며 사용된 주파수는 3분부터 60분까지이다. 격자의 크기는 최고 주파수의 표피심도를 고려하여 한반도를 포함하는 중심 격자(60^*50)의 경우는 25km로 결정하였고($1000\Omega \cdot m$ 의 배경 매질에서 3분일 때 표피심도는 약 212km), 중심 격자 외부는 주기 60분일 때의 표피심도를 고려하여 2차원 확장하였다. 해양은 서해의 경우 두께

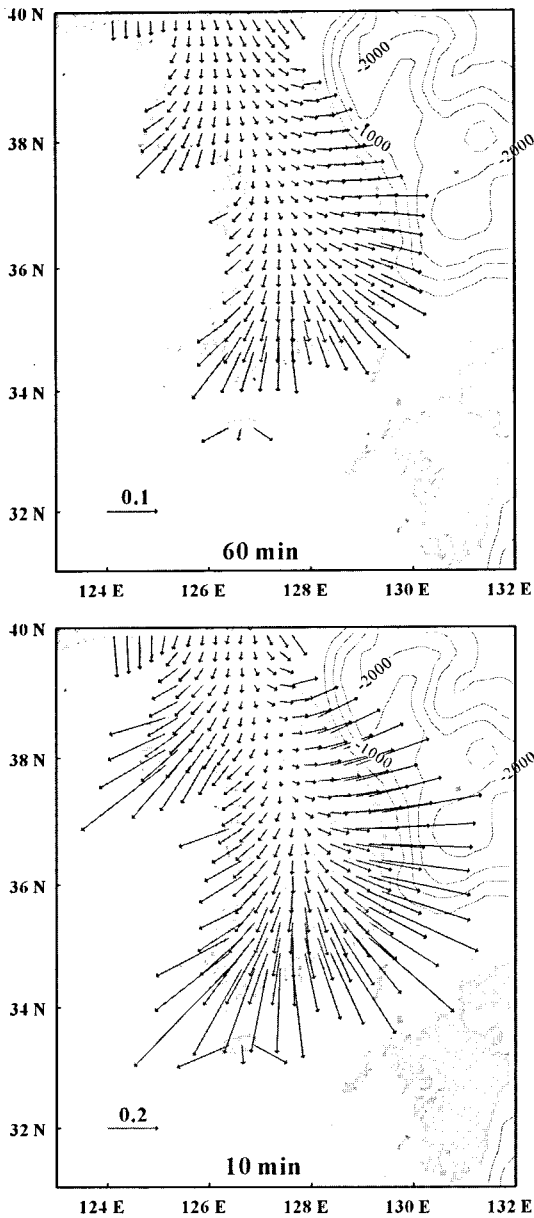


Fig. 3. The real induction arrow of sea model (S) for 10- and 60-minutes periods by 3-D geomagnetic induction modeling. The contour line represents the bathymetry around the Korean Peninsula. The average bathymetry of the Yellow Sea is about 200m (Chu *et al.*, 2001).

200m, 동해의 경우 2km이며 전기비저항은 Mackie *et al.*(1993)가 추천하는 $0.33\Omega \cdot m$ 를 가정하였다. 일본 및 한반도의 내륙의 전기비저항은 모델의 복잡함을 피하기 위해 동일하게 $1000\Omega \cdot m$ 로 하였다. 모델

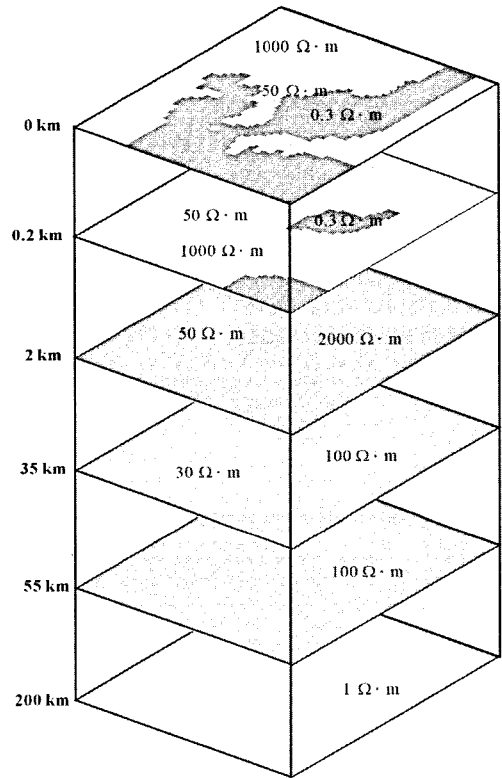


Fig. 4. The input parameters of 3-D MT model SC suggested for GDS induction arrow modeling in this study. The resistivity and depth values are adjusted to reflect the result of previous studies.

의 층서 구조는 사전정보로서 사용할 수 있는 한반도에 대한 심부 MT 탐사 자료가 없어 Shimoizumi *et al.*(1997)과 Pringle *et al.*(2000)의 모델의 구조를 고려하여 결정하였다. 지표부터 2km까지는 $1000\Omega \cdot m$ 의 지표, 35km까지는 $2000\Omega \cdot m$ 의 지각, 약 200km까지는 $100\Omega \cdot m$ 의 연약권, 그 하부는 $1\Omega \cdot m$ 의 전기비저항을 갖는 전도성 반무한 공간을 묘사하였다. 또한 임진강 벨트, 옥천대는 $50\Omega \cdot m$ 의 전기비저항을 가지며 지표로부터 깊이 35km까지 확장하였으며, 제주도 남부의 고전도성층은 Handa *et al.*(1992), Shimoizumi *et al.*(1997)가 제안한 모델과 동일하게 깊이 35km에 두께 20km, 전기비저항 $30\Omega \cdot m$ 로 설정하였다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 모델링 결과와 Fig. 2의 관측 유도 지시자는 비교적 유사한 패턴을 보여준다. 또한 모델 SC에서 가정한 전도성 구조의 효과를 조사하기 위해 모델 S의 결과와 비교하였다. Fig. 6은

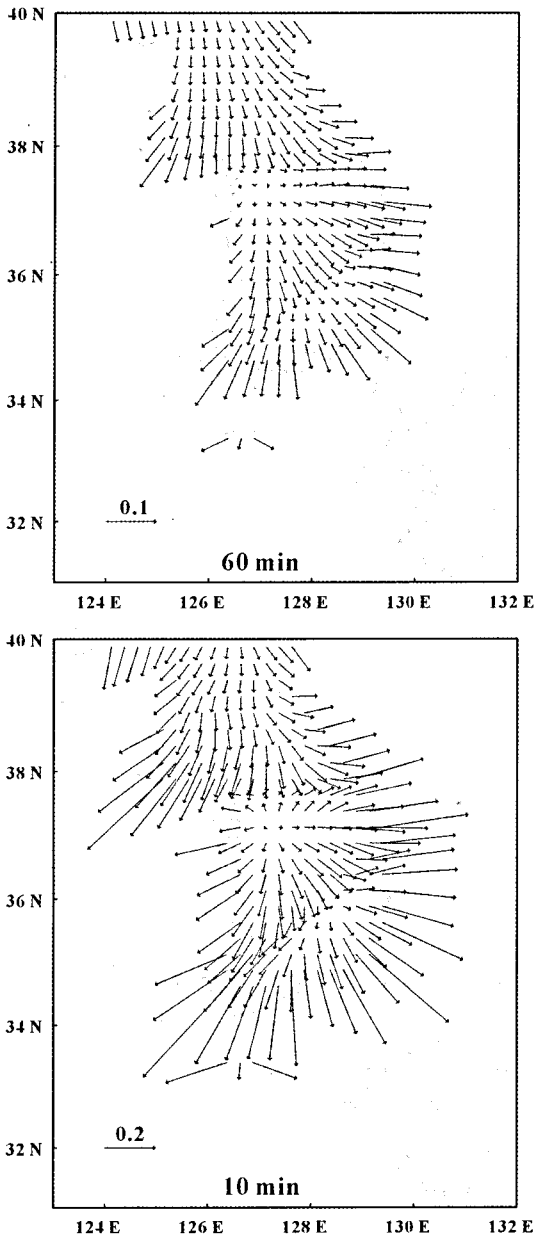


Fig. 5. The real induction arrow of model (SC) for 10-minute and 60-minute periods by 3-D geomagnetic induction modeling. The model SC includes two conductive belts and HCL. The modeling results coincide well with the observations and reflect the geological structure.

모델 SC와 S에 대한 유도 지시자의 방향 차이를 나타낸 것인데, 임진강 벨트 남쪽은 두 주기 모두에서 상당히 큰 방향 차이를 보여주고 있다. 이는 이 지역의 유도 지시자가 임진강 벨트의 존재를 충분히 반

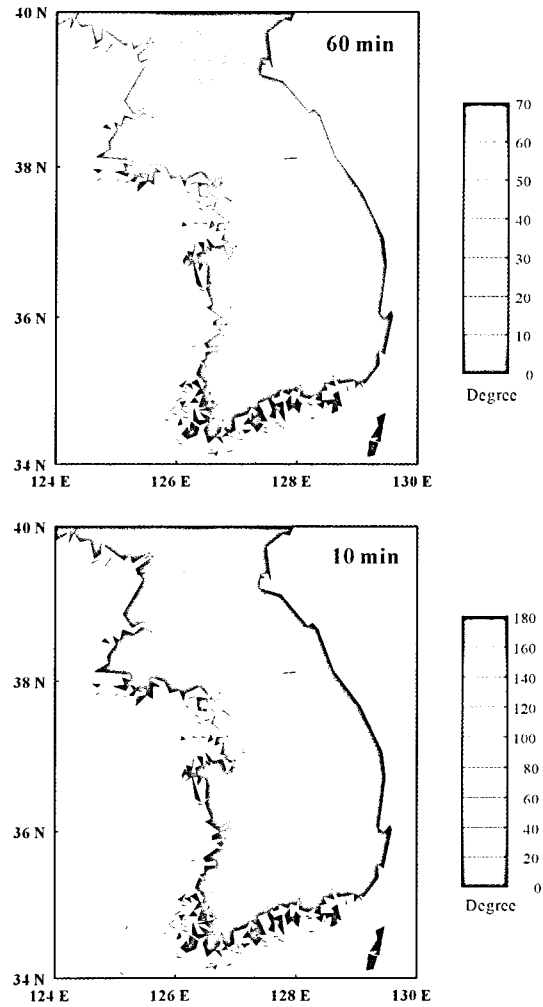


Fig. 6. The phase difference maps showing directional difference of arrows between the model SC and S results for 10- and 60-minute periods.

영할 수 있음 의미한다. Fig. 7은 임진강 벨트 및 옥천대 주변의 관측점에서 관측 유도 지시자, 해양 모델 S와 전도성 구조를 고려한 모델 SC의 결과를 함께 도시한 것이다. YIN과 ICHN에서의 모델 SC의 결과는 관측 유도 지시자와 그 방향이 거의 일치함을 확인할 수 있다. 이는 모델 SC에서 가정된 전도성 구조가 타당성을 갖는다는 것을 뜻한다. YIN과 ICHN에서 주기 10분의 유도 지시자는 임진강 벨트의 영향을 반영하나 주기 60분에서는 한반도의 남부를 관통하는 옥천대의 효과가 결합되어 유도 지시자가 동쪽을 향하는 것으로 보인다.

옥천대를 포함한 중남부의 경우 임진강 벨트 주변

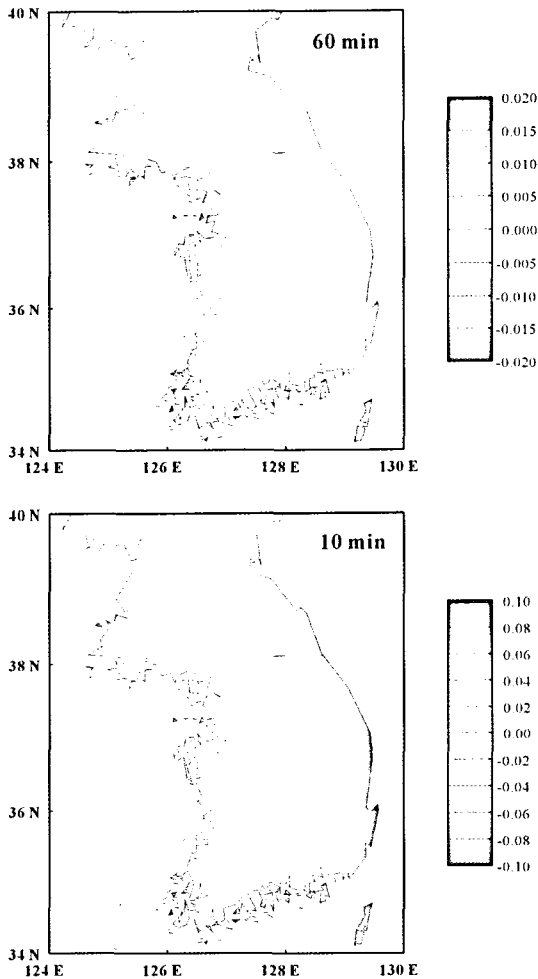


Fig. 7. The induction arrows by model SC, S and observations at six sites for 10- and 60-minute periods.

에 비해 큰 방향 차이를 보이진 않는다. 그러나 주기 60분에서 DZN, MWN, CHY의 경우는 대규모 전도성 구조의 존재를 시사하는 비교적 유의미한 차이를 나타낸다. Fig. 7의 주기 60분의 경우, DZN, CHY, MWN에서 모델 SC의 결과는 해양 모델과 관측 결과의 중간에 위치하고 있으나 이는 옥천대의 존재를 추정할 수 있는 충분한 근거라 생각된다. 그러나 HNS, CHY에서 주기 10분의 유도 지시자는 해양효과가 지배적이므로 추가적인 정보를 얻기 어렵다. 한편 Fig. 8은 모델 SC와 S에 대한 유도 지시자의 크기 차이를 나타낸 것이다. 옥천대 주변 관측점의 경우 옥천대에 의해서 유도 지시자의 크기가 최대 0.1 정도 증가할 수 있다는 것을 보여주며, Fig. 7의

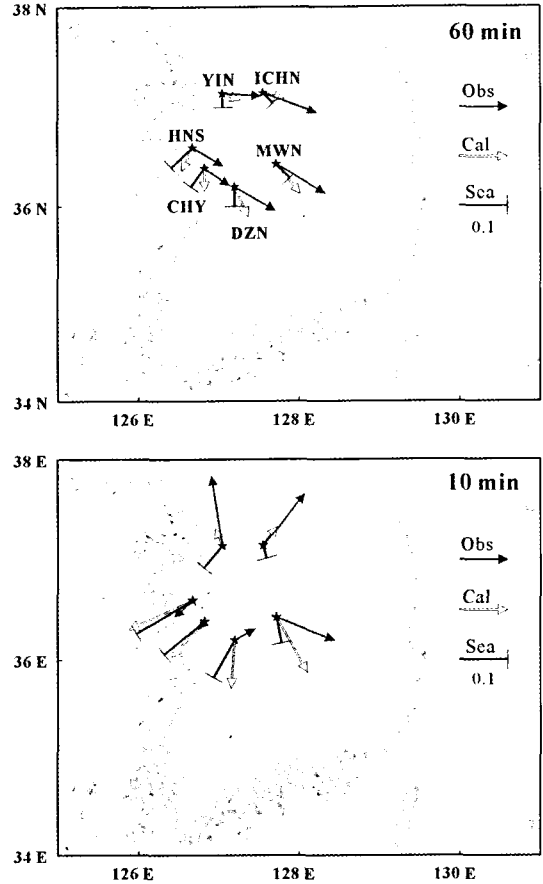


Fig. 8. The length difference maps showing magnitude difference of arrows between the model SC and S results for 10- and 60-minute periods.

MWN은 이를 잘 반영하고 있다. 옥천대에 의한 효과를 보다 정량적으로 해석하기 위해서는 옥천대를 가로지는 축선의 설계와 보다 조밀한 모델링이 요구되나 본 연구 결과는 옥천대가 충분히 탐지될 수 있다는 가능성을 보여준다.

그럼으로 도시하지 않았지만, 제주도 서부(CHZU, CJW)에서 주기 60분의 관측 유도 지시자는 제주도 남부의 고전도성층의 존재를 시사하는데, 모델링 결과 해양 모델 S와 모델 SC의 결과가 거의 차이가 없었다. 이는 모델에서 고려한 제주도의 크기가 매우 작아(격자 3개) 해양 효과가 지배적이었기 때문이다. 본 연구에서는 한반도의 광역적인 전기적 구조가 주 대상이므로, 제주도 남부의 고전도성층에 대한 보다 정밀한 해석을 위해서는 향후 제주도 인근과 일본 규수섬 부근에 대한 조밀한 모델링과 추가적인 관측

자료가 필요할 것으로 사료된다. 따라서 이후의 논의에서 제주도 남부의 고전도성층에 관한 부분은 제외하기로 한다.

차이 지시자

두 개 이상의 전도성 이상체에 의해 유도 지시자가 영향을 받을 때 각 이상체의 효과를 백터적으로 취급할 수 있는가라는 의문에 많은 연구들이 수행되었다(Weaver and Agarwal, 1991; Dosso *et al.*, 1996; Chen and Dosso, 1997). 이러한 연구들의 전형적인 예는 해양이 존재하는 지역에서 관측된 유도 지시자로부터 해양만 존재하였을 때 수치적 혹은 물리적 실험에 의해 계산된 해양 효과를 제거하는 것이다(Bapat *et al.*, 1993; Shimoizumi *et al.*, 1997; Pringle *et al.*, 2000). 위의 과정을 통해 계산되는 유도 지시자는 차이 지시자(difference arrow)라 하며, 육지 내의 전도성 구조에 보다 민감하다. Weaver and Agarwal(1991), Wolf(1983), 양준모 외(2002)에 의하면 해양과 전도성 구조사이에는 전하의 재분포와 전도체 사이의 상호 유도(mutual induction)로 인해 상호결합(mutual coupling)이 존재한다. 따라서 상호결합이 무시할 정도로 약할 경우에만 관측 유도 지시자에서 해양효과를 백터적으로 제거할 수 있고 차이 지시자가 물리적 의미를 갖는다.

본 연구에서도 기존의 연구와 동일하게 모델 SC에서 가정된 전도성 구조들과 주변 해양과의 상호결합 정도를 조사하였다. 상호결합 정도는 Weaver and Agarwal(1991)과 Pringle *et al.*(2000)을 참고하여 모델 SC의 결과에서 해양 모델 S와 전도체 모델의 독립적인 결과를 백터적으로 제거하여 생성되는 지시자의 크기로 정의하였다. 여기서 전도체 모델은 본 연구에서 가정한 세 전도성 구조만 고려된 모델을 의미한다. 따라서 해양과 전도성 구조사이의 상호결합이 매우 작다면 생성되는 지시자는 0에 근접할 것이다. 또한 상호결합을 무시할 수 있는 기준은 유도 지시자 추정 시 통계학적 오차를 고려하여 상호결합 정도가 관측 유도 지시자 크기의 10%이상이면 차이 지시자의 방향에 왜곡이 있을 것이라 판단하였다(Pringle *et al.*, 2000).

Fig. 9는 주기 60분과 10분에서 상호결합 정도를 보여주는데, 임진강 벨트와 옥천대 주변 지역에서의 최대의 상호결합이 나타나고 있다. Fig. 9의 별표는

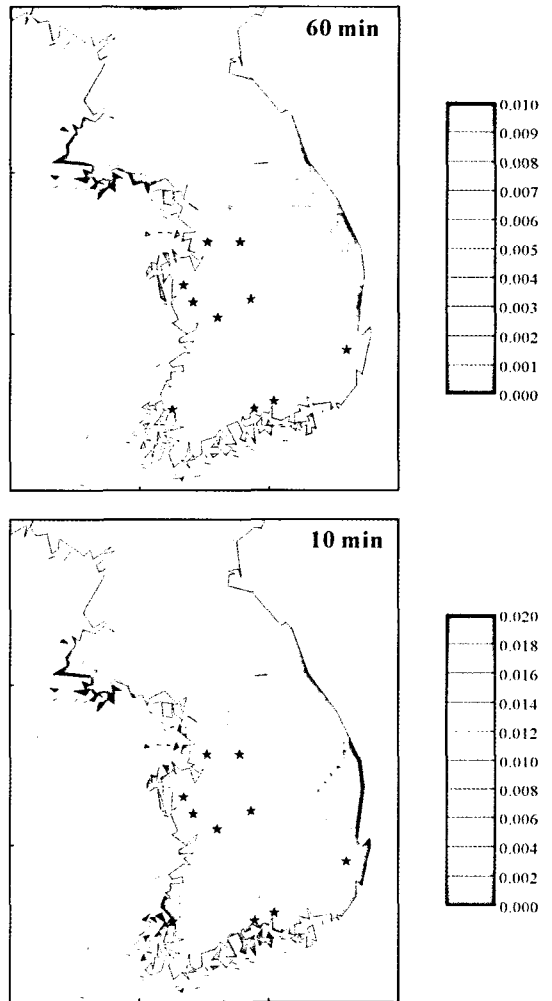


Fig. 9. The difference map which shows the magnitude of mutual coupling between the sea and two conductive belts for the periods of 10- and 60-minutes. The star (★) represents the observed sites in this study.

본 연구의 관측점들을 나타내는데 그 주변은 매우 작은 상호결합 정도를 보여준다. Fig. 2에서 알 수 있듯이, HSN, CHY, DZN의 주기 10분을 제외하고 평균적으로 관측되는 유도 지시자의 크기는 0.1이상 이므로, 상호결합의 크기가 0.01이하면 상호결합을 무시할 수 있다. 위의 기준을 바탕으로 주기 10분의 HSN, CHY, DZN을 제외한 모든 관측점에서 두 주기의 차이 지시자가 유의미함을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 임진강 벨트와 옥천대 주변의 관측점에서 차이 지시자를 나타내는데, HNS, CHY, DZN에서 주기 10분 경우 관측 유도 지시자의 크기가 매우 작

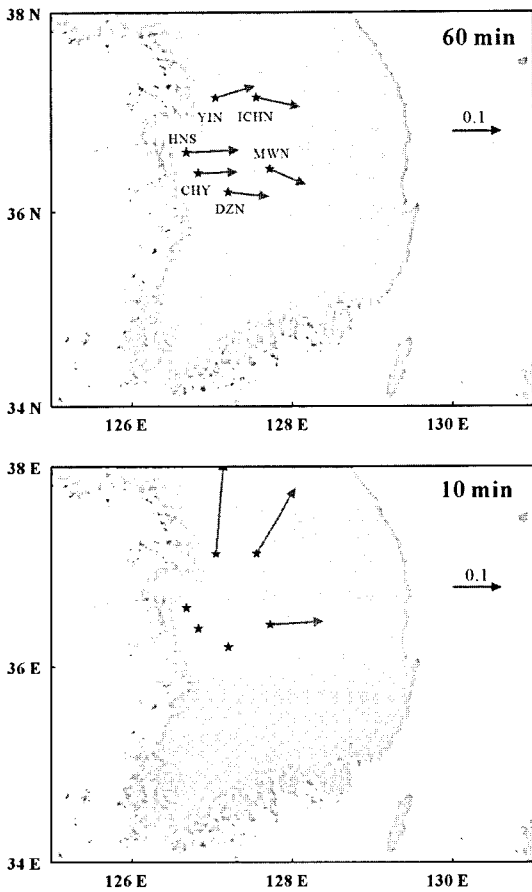


Fig. 10. The difference arrows for the periods of 10- and 60-minutes.

고 해양효과가 지배적이어서 차이 지시자의 계산과정에서 고려하지 않았다. 또한 해양에 인접한 관측점들(KZU, HMP, CHJ, HDN)도 해양효과가 지배적이므로 차이 지시자를 계산하지 않았다.

Fig. 10에서 볼 수 있듯이, HNS, CHY, DZN, MWN에서 주기 60분의 차이 지시자는 옥천대의 영향을 잘 반영하고 있고, YIN과 ICHN의 경우는 임진강 벨트와 옥천대의 영향을 모두 받고 있어 두 구조의 효과가 복합적으로 작용하는 것으로 보인다. 그러나 주기 10분의 경우 YIN과 ICHN의 차이 지시자는 옥천대보다 공간적인 거리가 가까운 임진강 벨트에 의한 영향을 잘 반영하고 있다. 주목할 만한 점은 YIN, ICHN의 두 주기에서 차이 지시자는 관측 유도 지시자와 방향이 거의 일치한다는 것이다. 이는 주기가 10분 이상인 경우 두 지역에서 해양효과보다 전도성 구조의 효과가 지배적이며, 임진강 벨트가 지각

심부까지 확장되어 있다는 의미이다. 또한 HNS, CHY, DZN, MWN에서 주기 60분의 차이 지시자는 관측 유도 지시자와 비교했을 때 보다 동쪽을 향하는데 이는 부정확한 해양효과 계산에 기인한 것인지 임진강 벨트와 관련된 효과에 의한 것인지 현재로서는 확신할 수 없다. 한 가지 의문스러운 것은 HNS, CHY에서 주기 60분의 관측 유도 지시자가 해양효과에도 불구하고 차이 지시자와 큰 차이를 보이지 않는 것이다. 이는 황해가 동해에 비해 매우 얇고 중국대륙에 막힌 좁은 바다이므로 60분 정도의 장주기에서는 황해보다 지각 심부까지 발달한 옥천대의 영향이 더 크기 때문이라고 생각된다.

토의 및 결론

본 연구에서는 민경덕(2001)과 오석훈 외(2002)의 연구를 연장하여 그들이 제안한 전도성 구조에 대한 3차원 지자기 모델링을 수행하였고, 전도성 구조의 독립적인 반응을 의미하는 차이 지시자를 계산하였다. 세 개의 전도성 구조를 고려한 모델링 결과는 관측 유도 지시자를 잘 설명하는 것으로 보인다.

한반도에서는 해양효과에도 불구하고 한반도 서부 관측점의 경우, 주기 60분의 유도 지시자는 차이 지시자와 큰 차이를 보이지 않았고, 특히 YIN, ICHN에서는 주기 10분 이상부터 큰 차이를 보이지 않았다. 위의 사실은 임진강 벨트와 옥천대가 황해의 효과를 상쇄할 정도로 대규모로 지각 심부까지 확장되어 있음을 의미한다. 또한 관측점이 황해로부터 충분히 떨어지고, 주기 10분 이상의 정보를 사용한다면 광역적인 전도성 구조의 탐지가 가능하다는 의미이다. 따라서 지자기수직탐사는 한반도의 대규모 지각 구조의 특성과 공간적 분포를 파악하는 데 효과적임을 알 수 있었다.

한편 본 연구에서 사용한 모델링은 실제 지질학적 환경을 묘사하는 데 명확한 한계를 가진다. 예를 들어 정확한 옥천대나 임진강 벨트의 전기비저항, 공간적인 범위, 지각의 수직 일차원 구조 등은 일정 수준의 임의성을 내재하고 있다. 또한 전자장 계산 방법이 유한 차분법 기반이므로 3차원 환경을 묘사함에 있어서 격자구성이 복잡하며 계산시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 위와 같은 한계는 모델 SC의 유도 지시자가 관측 유도 지시자와 특히 크기에서 차이를 보이는 원인을 제공한다. 그럼에도 불구하고 본 연구

에서 제시한 모델은 관측 지시자를 잘 설명하는 것으로 보이며, 추가적인 관측 자료 획득과 대상 지역에 대한 조밀한 모델링은 본 연구에서 제시한 모델을 수정하고 보완하는 역할을 할 것이라 기대된다. 이와 더불어 한반도에 대한 심부 MT탐사가 광역적으로 수행된다면 한반도의 심부 전기구조와 그 지구조적인 성인을 정량적으로 규명하는 데 큰 기여를 할 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 기상청 기상연구소 기상지진기술개발 사업의 「지진예지 및 지진해일 예측기술 개발」의 지원으로 수행되었으며 이에 사의를 표합니다.

참고문헌

김옥준, 1970, 남한 중부지역의 지질과 지구조, 광산지질학회, 2(4), 73-90.
 민경덕, 2001, 한반도와 일본 구주사이 연변해저의 맨틀 다이나미스에 관한 연구, 한국과학재단, 996-0400-001-2.
 오석훈, 양준모, 이덕기, 남재철, 2002, 지자기 수직 탐사에 의한 한반도 주변의 전기전도도 구조, 자원환경지질학회, 35(5), 437-444.
 양준모, 오석훈, 이덕기, 권병두, 윤용훈, 2002, 3차원 전도체의 공간적 위치 및 크기에 따른 차이 지시자의 특성, 대한지구물리학회, 5(4), 305-319.
 조문섭, 권성택, 이진한, Nakamura, 1995, 연천-전곡 지역에 분포하는 임진강대의 고압 각섬암, 광물학회, 4(1), 1-19.
 Bapat, V. J., Segawa, J., Honkura, Y., and Tarits, P., 1993, Numerical estimations of the sea effect on the distribution of induction arrows in the Japanese island arc,

Physics of the Earth Planetary Interiors, 81, 215-229.
 Chen, J. and Dosso, H. W., 1997, EM responses of an elongated conductor near an ocean-analogue model studies, Physics of the Earth Planetary Interiors, 99, 83-89.
 Chu, P. C., Lan J., and Fan C., 2001, Japan Sea thermohaline structure and circulation. Part I: Climatology, Journal of Physical Oceanography, 31, 244-271
 Dosso, H. W., Chen, J., Chamalaun, F. H., and McKnight, J. D., 1996, Difference electromagnetic induction arrow responses in New Zealand, Physics of the Earth Planetary Interiors, 97, 219-229.
 Handa, S., Y. Tanaka, and A. Suzuki, 1992, The Electrical High Conductivity beneath the Northern Okinawa Trough, Inferred from Geomagnetic Depth Sounding in Northern and Central Kyushu, Japan, Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, 44, 505-520.
 Mackie, R. L., Madden, T. R., and Wannamaker, P. E., 1993, Three-dimensional magnetotelluric modeling using difference equations-Theory and comparisons to integral equation solutions. Geophysics, 58, 215-226.
 Pringle, D., Ingham, M., McKnight, D., and Chamalaun F., 2000, Magnetovariational soundings across the South Island of New Zealand: difference arrows and the Southern Alps conductor, Physics of the Earth Planetary Interiors, 119, 285-298.
 Shimoizumi, M., Mogi, T., Nakada, M., Yukutake, T., Handa, S., Tanaka, Y., and Uchida, H., 1997, Electrical conductivity anomalies beneath the western sea of Kyushu, Japan. Geophysical Research Letters, 24, 1551-1554.
 Weaver, J. T. and Agarwal, A. K., 1991, Is addition of induction vectors meaningful?, Physics of the Earth Planetary Interiors, 65, 163-181.
 Wolf, D., 1983, Inductive coupling between idealized conductors and its significance for the geomagnetic coast effect, Journal of Geophysics, 52, 22-33.

2003년 5월 15일 원고 접수
 2003년 7월 1일 수정원고 접수
 2003년 7월 25일 원고 채택