



Characteristics of the Magnetotelluric response functions

Batmagnai Erdenechmeg^{1*}

¹Institute of Astronomy and Geophysics, Mongolian Academy of Sciences, 13343, Ulaanbaatar, Mongolia

Received: 2025-10-19, Accepted: 2025-11-10, <https://doi.org/10.5564/mjag.v12i1.5205>

*Corresponding author: batmagnai@iag.ac.mn 0000-0002-1924-182X

Abstract

The interpretation of electrical resistivity and conductivity structures derived from magnetotelluric data is fundamentally influenced by galvanic distortion caused by small-scale near-surface heterogeneities. These distortions modify the observed electric fields without significantly affecting the magnetic fields, thereby biasing the impedance tensor and introducing ambiguity in subsurface imaging. A rigorous understanding of the intrinsic characteristics of MT response functions under such conditions is therefore essential for reliable interpretation. In this study, a synthetic three-dimensional Earth model incorporating localized near-surface conductivity anomalies is developed to investigate the fundamental behaviour of MT transfer functions. Through controlled forward modelling, broadband electromagnetic fields are simulated, and the full impedance tensor is evaluated over a wide period range. This framework enables a clear separation between inductive and galvanic effects, allowing systematic analysis of their influence on MT response characteristics. From a theoretical perspective, galvanic distortion is described as a frequency-independent, real-valued transformation of the impedance tensor that preserves key invariants, including phase relationships and dimensionality indicators. Particular attention is given to the behaviour of principal MT observables—apparent resistivity, phase, tipper response, and rotational invariants under varying structural complexity. The results demonstrate that although galvanic distortion can significantly alter apparent resistivity and induce tensor anisotropy, invariant quantities such as phase tensor parameters remain stable and provide robust indicators of subsurface structure. These findings highlight the importance of invariant-based interpretation and physically consistent modelling. This work establishes a comprehensive theoretical framework for understanding the characteristics of MT response functions in the presence of near-surface distortion, providing a foundation for improved interpretation strategies and the development of advanced correction methodologies, including both physics-based and data-driven approaches.

Keywords: Transfer functions, Tipper, Galvanic Distortion

1. Удиртгал

Геофизикийн цахилгаан соронзон судалгаа нь дэлхийн цахилгаан дамжуулах чадварын шинж чанарыг ойлгох үндсэн зорилготой. Соронзон мандал, цэнэгт мандал, агаар ман-

далд үүсгүүр бүхий хугацаанаас хамааран өөрчлөгдөх соронзон орон дэлхий рүү нэвтрэн ороход индукцлэгдэн бий болох газрын гүйдлийг теллурикийн гүйдэл гэдэг (Vozoff, 1972). Конрад Шлумберг нар 1930 оноос

эхлэн байгалийн цахилгаан соронзон (ЦС) индукцийн улмаар бий болох теллурикийн гүйдлийг хос электродоор бүртгэн авч гүний үе давхаргуудыг судлах ЦС хэмжилтийн арга зүйг үндэслэсэн (Schlumberger, 1939) нь геоцахилгаан соронзон судалгааны хувьд дэвшил авчирсан. Анхны теллурикийн хэмжилт нь цахилгаан орны байгуулагчдын суурин ба нүүдлийн цэгүүд дээр нэгэн зэрэг бүртгэгдэх зарчим дээр тулгуурлаж байсан. Тухайн үед суурин ба нүүдлийн цэгүүдийн цахилгаан орны хүчлэгийн хоорондох зөрүүгээр орчны цахилгаан дэмжуулах чадварын зүй тогтлыг ойлгох нь энэ төрлийн хэмжилтийн үндсэн даалгавар байсан.

Үүнээс хойш 20 жилийн дараагаар Магнетотеллурик (МТ) аргын үндэс тавигдсан. МТ арга нь дэлхийн гадарга дээр бүртгэгдэх байгалийн үзэгдэлээс бий болох хугацаанаас хамааран өөрчлөгдөх цахилгаан (E) ба соронзон орны (H) ортогналь хэвтээ байгуулагчдын хэмжилт дээр тулгуурладаг ба уг аргын талаарх анхны ажлууд нь дэлхийн дамжуулах чадвар нь зөвхөн гүний дагуу өөрчлөгдөх буюу 1-D орчин гэж үзсэн байдаг (Tikhonov, 1950; Cagniard, 1953). Энд E ба H орнуудын харьцаа нь хэмжилтийн координатын системээс үл хамаарах ба зөвхөн гүний үе давхаргуудын цахилгаан дамжуулах чадварын түгэлтээс хамаардаг. Гэвч бодит дэлхийн хувьд цахилгаан дамжуулах чадварын загвар нь орон зайн бүх чиглэлд өөрчлөгдөх бөгөөд цахилгаан ба соронзон орнууд нь координатын системээс хамааран өөр өөр шинж чанартай байдаг. Өнөөдөр, цахилгаан дамжуулах чадварын бүх чиглэлтэй харгалзах өөрчлөлтийн мэдээллийг E ба H орны хэвтээ байгуулагчдын хамаарлаар олдох хоёрдугаар рангийн комплекс тензор болох импеданс тензороор тодорхойлогдог (Berdichevsky & Dmitriev, 2008; Chave & Jones, 2012; Simpson & Bahr, 2005).

1950-аад оны үеийн багаж техникийн нарийвчлалтай уяалдан соронзон орны хэмжилтүүдэд агуулагдах сигнал шумын харьцаа бага байх зөвхөн хэдэн долоон хоногийн тасралтгүй хэмжилтийн утгаас сонгон авсан хугацааны цонхны сонголтоор үүнийг сайжруулдаг байсан. Уг механик хэмжилт ба боловсруулалтын процесс нь 1960-аад

оны дунд хүртэл буюу Теллурик тандалтын (ТТ) арга зүй нэвтрэх (Berdichevsky, 1965; Yungul, 1966) хүртэл үргэлжилсэн. ТТ-ийн хувьд суурин цэг дээрх цахилгаан ба соронзон орон ба нүүдлийн цэг дээрх цахилгаан орны хэмжилтэд суурилах ба суурин ба нүүдлийн цэгийн хэвтээ цахилгаан орнуудын хамаарлаар тодорхойлогдох цахилгаан тензор нь уг арга зүйн тандалтын үндсэн хэмжигдэхүүн болдог. ТТ арга нь өртөг хямд, хэмжилт хийхэд хялбар байдал зэргээс байх тул 1970-аад оны турш өргөн хэрэглэгдэж байсан ба судалгааны ажлын үр дүнд гарган авах эффе́ктив цахилгаан хүчлэгийн ижил шугамын утгад тулгуурлан үе давхаргын цахилгаан дамжуулах чадварын загварыг тайлбарладаг байсан (Berdichevsky & Dmitriev, 2008; Liceto & Santarato, 1986) бол зөвхөн суурин цэг дэх соронзон ба цахилгаан орны хэмжилтийн үр дүнгээр тоон тайлал хийх боломжтой байв (Yungul, 1966).

Hermance & Thayer (1975) нар Теллурик-Магнетотеллурик (Т-МТ) аргыг танилцуулсан бөгөөд энэ аргын хувьд суурин цэгийн соронзон орныг нүүдлийн цэгийн цахилгаан хэмжилтийн өгөгдөлтэй харьцуулан тооцоо хийхэд оршидог. Эдгээр орнуудын хоорондох хамаарлыг илтгэх респонс функцийг квази-цахилгаан тензор гэж нэрлэдэг. Квази-цахилгаан тензор нь импеданс тензортэй ижил мэдээлэл агуулдаг болохыг Hermance & Thayer (1975) тогтоосон нь МТ хэмжилтийн арга зүйг ихээхэн хялбарчилсан. Гэвч Т-МТ аргыг сүүлийн 25 жилд ихээр ашиглаагүй, учир нь технологийн хөгжлийг даган соронзон метрийн бүртгэх чадвар өнөөгийн түвшинтэй ижил болтол сайжирсан нь МТ-ийн судалгаанд ямар нэгэн хязгаарлалт үгүй болсон ба цахилгаан орны байгуулагчид нь газрын гадааргад ойр орших нэгэн төрлийн локал биетээс шалтгаалан хуримтлагдах цэнэгийн (гальваник дисторшн гэж нэрлэдэг) нөлөөнд автдаг болохыг илрүүлсэн (Jiracek, 1990) зэрэг нь цахилгаанд суурилсан МТ аргуудын хэрэглээг хязгаарлаж байсан. ТТ, Т-МТ цаашлаад МТ аргууд нь гальваник дисторшныг шууд засварлах боломжгүй боловч МТ аргын хувьд соронзон байгуулагч нь локал

биетээс үл хамаардаг тул бусад аргуудаас илүү давуу талтай юм. МТ хэмжилт, судалгааны уг урт хугацаанд орших асуудлыг шийдвэрлэх нь МТ арга зүйн нэгэн чухал даалгавруудын нэг юм.

Энэхүү арга зүйн тойм өгүүлэлд, Цахилгаан соронзон индукцийн аргад ашиглагдаж буй респонс функцүүдийн шинж чанар, тэдгээрийн математик томъёолол, физик үндэслэлийг тоймлон авч үзсэн бөгөөд Архангай аймгийн Цэнхэр суманд хийсэн МТ хэмжилтийн өгөгдөл (Erdenechimeg, 2023) дээр үзүүлсэн жишээгээр тайлбарласан.

2. Стандарт респонс функцийн тодорхойлолтууд

2.1. МТ респонс функцууд

Энэ хэсэгт МТ-н стандарт респонс функц гэж газрын гадарга дээрх хэмжилтийн нэг цэгт бүртгэгдэх цахилгаан ба соронзон орны хэмжилтийн зэрэгцээ хэмжилтээр тодорхойлогдох респонс функцууд болох Импеданс тензор, Фаз тензор ба Типперийн талаар авч үзсэн.

2.1.1. Импеданс тензор

Импеданс тензор (ИТ) нь дэлхийн гадарга дээр ажиглагдах цахилгаан ба соронзон орнуудын хоорондох шугаман хамааралаар тодорхойлогдох 2×2 комплекс утга бүхий тензор байна. ИТ нь дэлхийн үе давхаргуудын 3-D цахилгаан дамжуулах чадварын түгэлтийн мэдээллийг агуулдаг (г.м. Chave & Jones, 2012). ИТ-н математик ба физик шинж чанарыг тайлбарлахын тулд гадаад үүсгүүр бүхий квази нэгэн төрлийн \mathbf{H}_0 соронзон орныг үүсгэх гадарга z -с дээш z_s метр бүхий байрлал дахь цахилгаан гүйдэлийг

$$\mathbf{j}_{ext} = \hat{k} \times \mathbf{H}_0 \delta(z - z_s), \quad (1)$$

байдлаар авч үзье. Энд гадаад гүйлийн систем \mathbf{j}_{ext} -нь нарны салхи ба дэлхийн соронзон орны харилцан үйлчлэл, глобал цахилгаан ниргэлэг зэрэг дэлхий ба түүнийг хүрээлэн буй орчинд явагдах цахилгаан соронзон индукцийн үзэгдлээр тайлбарлагдах ба δ -нь Диракийн дельта функц байна. Иймээс цахилгаан ба соронзон орны $\mathbf{E}_h(\mathbf{r}_0, \omega, \sigma)$ $\mathbf{H}_h(\mathbf{r}_0, \omega, \sigma)$ хэвтээ байгуулагчид нь дэлхийн гадаргын дурын цэгт components $\mathbf{r}_0(x, y, z)$ \mathbf{H}_0 -той шугаман хамааралтай байна.

$$\mathbf{E}_h(\mathbf{r}_0, \omega, \sigma) = \hat{\mathbf{K}}^e(\mathbf{r}_0, \omega, \sigma) \cdot \mathbf{H}_0(\mathbf{r}_0, \omega) \quad (2)$$

$$\mathbf{H}_h(\mathbf{r}_0, \omega, \sigma) = \hat{\mathbf{K}}^m(\mathbf{r}_0, \omega, \sigma) \cdot \mathbf{H}_0(\mathbf{r}_0, \omega). \quad (3)$$

Эдгээр шугаман хамаарлыг Максвеллын тэгшитгэлд тулгуурлан 1-D, 2-D эсвэл 3-D цахилгаан дамжуулагч дэлхийн хувьд биеэлдэг болохыг [Berdichevsky & Dmitriev \(2008\)](#) нар баталсан. Цаашлаад, гадаад орон нь шугаман, гэвч харилцан үл хамаарах хэвтээ орнууд \mathbf{H}_h ба \mathbf{E}_h -г үүсгэх (Тэг. 2-3) тул $\hat{\mathbf{K}}^m$ -нь урвуу ба $\det|\hat{\mathbf{K}}^m| \neq 0$ байна. Иймд гадаад соронзон орон нь \mathbf{H}_0 :

$$\mathbf{H}_0(\mathbf{r}_0, \omega) = \hat{\mathbf{K}}^m(\mathbf{r}_0, \omega, \sigma)^{-1} \cdot \mathbf{H}_h(\mathbf{r}_0, \omega, \sigma). \quad (4)$$

Тэг. 4-г Тэг. 2-д орлуулбал,

$$\mathbf{E}_h = \hat{\mathbf{K}}^e(\hat{\mathbf{K}}^m)^{-1} \cdot \mathbf{H}_h = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{H}_h \quad (5)$$

болно. Энд \mathbf{Z} -нь МТ-ийн импеданс тензор бөгөөд тэгш өнцөгт координатын системд -нь хойд y -нь зүүн ба z -нь доош чиглэсэн байх бөгөөд тензорын элементүүд нь

$$\mathbf{Z}(\mathbf{r}_0, \omega, \sigma) = \begin{pmatrix} Z_{xx}(\mathbf{r}_0, \omega, \sigma) & Z_{xy}(\mathbf{r}_0, \omega, \sigma) \\ Z_{yx}(\mathbf{r}_0, \omega, \sigma) & Z_{yy}(\mathbf{r}_0, \omega, \sigma) \end{pmatrix} \quad (6)$$

байна. Тэг. 6-г авч үзвэл ИТ нь зөвхөн дэлхийн гүний үе давхаргуудын цахилгаан шинж чанарын талаарх мэдээллийг агуулна. Учир нь Хавсралтад үзүүлснээр үүсгүүр орны талаарх мэдээлэл нь нормчлол хийгдэх үед тэгшитгэлээс арилдаг. Мөн ИТ нь бүртгэгдсэн сигналын давтамж, хэмжилтийн цэг болон орчны цахилгаан дамжуулах чадвараас хамаарсан комплекс утгатай байна.

ИТ-нь дэлхийн гүний үе давхаргын геоцахилгаан тогтцын мэдээллүүдийг агуулж байдаг. Үүнд:

- Төлөөллийн эсэргүүцэл
ИТ-г өөр өөр мөн тандалтын параметр гэж нэрлэх тохиолдолууд байдаг нь ИТ-с үнэлэх төлөөллийн эсэргүүцэл ба импедансийн тензорын агуулгатай уяалддаг.

$$\rho_{a,ij} = \frac{|Z_{ij}|^2}{\omega \mu_0}, \quad i, j \in [x, y]. \quad (7)$$

СИ системд, төлөөллийн эсэргүүцэл нь материалын хувийн эсэргүүцэлтэй нэгэн адил Ω -м -ээр хэмжигддэг. Энд төлөөллийн эсэргүүцэл нь материалын хувийн эсэргүүцлүүдийн жинэлсэн нийлбэр байх тул зөвхөн нэгэн төрлийн орчинд төлөөллийн ба хувийн эсэргүүцэл нар тэнцүү байна.

- Импедансийн фаз
Тэг. 6-д авч үзснээр ИТ -нь комплекс

хавтгай дээр тодорхойлогдох тул түүний фазийг дараах байдлаар тодорхойлодог,

$$\phi_{ij} = \arctan\left(\frac{\text{Im}(Z_{ij})}{\text{Re}(Z_{ij})}\right), \quad i, j \in [x, y]. \quad (8)$$

- Хэмжээс

ИТ -нь мөн гүний үе давхаргуудын хувьд давамгайлах геоцахилгаан чиглэлийн хэмжээсийн талаарх мэдээллийг агуулдаг. 1-D орчинд цахилгаан эсэргүүцэл нь зөвхөн гүн z -ий дагуу өөрчлөгдөх тул импеданс тензор (Тэг. 6)-ийн үндсэн диагоналийн элементүүд тэгтэй тэнцүү ба хажуугын диагоналийн элементүүд тэнцүү боловч эсрэгч чиглэлтэй байна

$$Z_{xx} = Z_{yy} = 0, \quad Z_{xy} = -Z_{yx} \quad 1\text{-D орчинд.} \quad (9)$$

2-D орчинд цахилгаан эсэргүүцэл нь аль нэг чиглэл мөн гүний дагуу өөрчлөгдөх тул үндсэн диагоналийн элементүүд нь геоцахилгаан координатын системд мөн тэгтэй тэнцүү байх бөгөөд хажуугын диагоналийн элементүүд харилцан адилгүй байна

$$Z_{xx} = Z_{yy} = 0, \quad Z_{xy} \neq -Z_{yx} \quad 2\text{-D орчинд.} \quad (10)$$

Энд геоцахилгаан координатын систем нь тухайн орчинд давамгайлж буй геоцахилгаан чиглэлийн дагуу хойд тохируулсан тооллын эхтэй байдаг. Иймд хажуугийн диагоналийн элементүүдийн зөрүүтэй байдал нь уг системд цахилгаан соронзон долгионы туйлширалын чиглэлээр тайлбарлагддаг.

Харин 3-D орчинд ИТ-ийн бүх элементүүд нь тэгээс ялгаатай байх буюу цахилгаан эсэргүүцэл бүх чиглэлийн дагуу өөрчлөгддөг.

Төлөөллийн эсэргүүцэл фаз нь МТ тандалтын үндсэн хэмжигдэхүүнүүд бөгөөд тэдгээрийг үе $T = 2\pi\omega^{-1}$ -ийн функц хэлбэрээр дүрслэх муруйг тандалтын муруй гэж нэрлэнэ. ρ_a ба ϕ -нь харилцан хамаарал нь Крамер-Кроеингийн дүрмээр тайлбарлагддаг,

$$\Phi(\omega) = \frac{\pi}{4} - \frac{\omega}{\pi} \int_0^{\infty} \log\left(\frac{\rho_a(\omega)}{\rho_0}\right) \frac{d\omega}{\omega^2 - \omega_0^2}, \quad (11)$$

Энд $\rho_0 = \rho(\omega = 0)$ (e.g. [Berdichevsky & Dmitriev, 2008](#)) болно.

2.1.2. Типпер

МТ судалгаанд ашиглагддаг өөр нэгэн респонс функц бол соронзон орны хэвтээ ба босоо байгуулагчдын хоорондох комплекс хамаарлыг илэрхийлэх Типпер юм (г.м. [Simpson & Bahr, 2005](#)). Хавтгай долгионы дөхөлтөд авч үзснээр босоо соронзон орон нь дэлхийн үе давхаргуудын хэвтээ чиглэлийн дагуу цахилгаан эсэргүүцлийн градиентаас хамааран өөрчлөгддөг. Иймд типпер T -нь зөвхөн $>1\text{-D}$ цахилгаан эсэргүүцлийн түгэлт бүхий бус орчны хувьд ажиглагддаг. Типпер (\mathbf{T})-нь мөн ИТ-н адил комплекс утга бүхий давтамж ω , цэгийн байрлал (\mathbf{r})-с хамаарсан вектор байна.

$$H_z = T_x H_x + T_y H_y \quad (12)$$

Типпер нь цахилгаан эсэргүүцлийн хөндлөн чиглэлийн өөрчлөлтийг илэрхийлэх вектоор хэлбэрээр дүрслэгдэх тул зарим тохиолдолд индукцийн вектор гэж мөн нэрлэдэг. Энд индукцийн векторын магнитуд нь

$$L = \sqrt{(\text{Re}(T_x))^2 + (\text{Re}(T_y))^2}, \quad (13)$$

байх ба түүний чиглэл нь

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\text{Re}(T_y)}{\text{Re}(T_x)}\right) \quad (14)$$

бодит хэсгүүдийн хувьд тодорхойлогдох бөгөөд хуурмаг хэсэгт мөн дээрх томъёоллыг ашигладаг. Физик тайлбарын хувьд дээр авч үзсэн α -нь тэнхлэгээс эерэг чиглэлийн дагуу тоологдох азимут. Типперийн магнитуд нь гүйдлийн концентрацийн утгад пропорциональ тул хөндлөн чиглэлийн цахилгаан эсэргүүцлийн градиентийн (жишээлбэл литологийн хил зааг, хагарал гэх мэт) хэмжээг илэрхийлдэг. [Jupp & Vozoff \(1977\)](#) -ийн нөхцлийг авч үзвэл индукцийн векторын урт нь гүйдлийн концентраци өндөртэй орчноос хүчтэй холдох утгыг үзүүлдэг.

2.2. Цахилгаан респонс функцууд

2.2.1. Цахилгаан тензор

Цахилгаан эсвэл теллурикийн тандалт нь суурин \mathbf{r}_b ба нүүдлийн \mathbf{r}_f цэгүүд дээр нэгэн зэрэг бүртгэгдэж буй цахилгаан орны хугацааны өөрчлөлтөөр тодорхойлогддог Цахилгаан Тензор (ЦТ) T -р илэрхийлэгддэг (Тэг. 15).

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}_f) = T(\mathbf{r}_b, \mathbf{r}_f) \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}_b), \quad T(\mathbf{r}_f, \mathbf{r}_b) = \begin{pmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{pmatrix} \quad (15)$$

ЦТ-ээс үнэлэгдэх эффектив цахилгаан хүчлэг нь дэлхийн үе давхагуудын цахилгаан дамжуулах чадварын мэдээллийг агуулдаг. Уг эффектив цахилгаан хүчлэг нь орчны цахилгаан дамжуулах чадварын утгын чанар тайлал хийхэд ашиглагддаг ижил шугамын утгаар илэрхийлэгддэг.

$$T_{\text{eff}}(\mathbf{r}) = \sqrt{|\det[\mathbf{T}(\mathbf{r}_f, \mathbf{r}_b)]|} \quad (16)$$

ЦТ-ын хувьд зөвхөн суурин цэгийн утгаар үе давхаргын талаарх цахилгаан дамжуулах чадварын 1-D тоон мэдээллийг олж авах боломжтой (Yungul, 1966).

2.2.2. Квази-цахилгаан тензор

Квази-цахилгаан буюу Теллурик Магнетотеллурикийн (Т-МТ) тензорийн үндсэн санааг [Hernance & Thayer \(1975\)](#) анх үндэслэлсэн боловч төдийлөн судалгаанд өргөн ашиглаагүй байсаар 2010 оны хоёрдугаар хагаст хүрсэн. Учир нь уг тензор нь МТ аргыг хөнгөвчилсөн зөвхөн теллурикийн орны талбайн хэмжилт дээр тулгуурлан, суурин цэг дээр параллель хэмжигдэх соронзон орны хэвтээ байгуулагчтай нэгтгэн үнэлдэг. Энэ нь цахилгаан гүйдлийн статик шилжилт болон 3-D эффекттэй холбоотой нөлөөг тооцоолон загварчилах шийдэлийг бүрэн тайлбарлаагүй байсантай холбоотой. Квази-цахилгаан тензор \mathbf{Z}_f нь дараах байдлаар бичигдэх

$$E_f = \mathbf{Z}_f \cdot \mathbf{H}, \quad (17)$$

энд $\mathbf{Z}_f(r_f, r_b, \omega, \sigma)$ хамаарсан функц байна. Харин сүүлийн жилүүдэд квази-цахилгаан тензорийг 2-D ба 3-D загварчлалын ажилд ашиглах бүрэн боломжтой болсон бөгөөд уг төрлийн тензорын шинж чанарыг загварчлалаар тайлбарласан. Энэ нь МТ хээрийн ажлыг ихээр хөнгөвчилсөн тул локал төдийгүй региональ судалгаанд ихээр ашиглаж байна ([Rigaud et al., 2023](#)).

3. Гальваник дисторшны тодорхойлолт ба түүний респонс функц дэх нөлөө

Гальваник дисторшн нь орчноор урсах цахилгаан гүйдэл бага гүний нэгэн төрлийн бус тархалттай локал масштабын биетүүд дээр тасрах үзэгдлийн үр дүнд үүсдэг ([Berdichevsky, 1965](#); [Groom & Bailey, 1989](#)). Ийм төрлийн гетероген бүтэц нь га-

даргын ойролцоо цэнэг хуримтлагдах нөхцөлийг бүрдүүлж, улмаар цахилгаан орны далайц болон чиглэлд нөлөөлөх боловч фазад нөлөөлдөггүй ([Jiracek, 1990](#); [Chave & Jones, 2012](#)).

Иймээс гальваник дисторшны нөлөөг агуулсан ажиглагдах цахилгаан орон \mathbf{E} нь бодит (дисторшнгүй) цахилгаан орон \mathbf{E}^{true} болон дисторшны матриц $\mathbf{\Lambda}$ -ийн хоорондын шугаман хамаарлаар илэрхийлэгдэнэ:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \mathbf{\Lambda} \mathbf{E}^{true}(\mathbf{r}), \quad \mathbf{\Lambda} = \mathbf{\Lambda}(\mathbf{r}) = \begin{pmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} \end{pmatrix}, \quad (18)$$

энд $\mathbf{\Lambda}$ нь үл мэдэх, бодит утгатай бөгөөд давтамжаас үл хамаарах матриц гэж үздэг ([Groom & Bailey, 1989](#); [Chave & Jones, 2012](#)). Энэ шинж чанар нь гальваник дисторшныг индукцийн нөлөөллөөс ялгах чухал үндэслэл болдог.

Цаашилбал, энэхүү дисторшн нь импедансын тензорт шууд нөлөөлж, ажиглагдах импеданс \mathbf{Z} нь бодит импеданс \mathbf{Z}^{true} болон дисторшны матрицын үржвэр хэлбэрээр бичигдэнэ:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{\Lambda} \mathbf{Z}^{true}. \quad (19)$$

Ингэснээр apparent resistivity-д масштабын алдаа үүсэх боловч фазын утгууд хадгалагддаг.

3.1. Groom–Bailey задаргаа

Гальваник дисторшны матриц $\mathbf{\Lambda}$ -ийг физик утгатай параметруудад задлан илэрхийлэх зорилгоор [Groom & Bailey \(1989\)](#) нь дараах задаргааг санал болгосон. Энэ нь дисторшныг өгөгдсөн геометр нөхцөлийн хүрээнд эргүүлэх, хазайлгах, масштабыг өсгөх болон анизотроп бүрэлдэхүүнүүдэд салгаж тайлбарлах боломжыг анх олгосон. Дисторшны матрицыг дараах хэлбэрээр бичиж болно:

$$\mathbf{\Lambda} = g \mathbf{T}(\phi_t) \mathbf{S}(\phi_s) \mathbf{A}(\alpha), \quad (20)$$

энд g — скаляр масштаб, $\mathbf{T}(\phi_t)$ — эргүүлэлтийн матриц, $\mathbf{S}(\phi_s)$ — хазайлтын матриц, $\mathbf{A}(\alpha)$ — анизотроп эффект.

эргүүлэлтийн матриц

$$\mathbf{T}(\phi_t) = \begin{pmatrix} \cos \phi_t & \sin \phi_t \\ -\sin \phi_t & \cos \phi_t \end{pmatrix} \quad (21)$$

хазайлтын матриц

$$\mathbf{S}(\phi_s) = \begin{pmatrix} 1 & \tan \phi_s \\ \tan \phi_s & 1 \end{pmatrix} \quad (22)$$

Анизотроп

$$\mathbf{A}(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 + \alpha & 0 \\ 0 & 1 - \alpha \end{pmatrix} \quad (23)$$

зэрэг байна.

Энэхүү задаргаа нь гальваник дисторшны физик эх үүсвэрийг ойлгоход чухал ач холбогдолтой. Эргүүлэлт нь координатын эргэлттэй төстэй нөлөө үзүүлдэг бол Хазайлт нь цахилгаан орны бүрэлдэхүүнүүдийг хооронд нь нэгдмэл байдлаар авч үзэх зэрэг ач холбогдол олгосон. Харин өсгөлт нь төлөөллийн эсэргүүцэлд скаляр өөрчлөлт оруулах зорилготой байв.

Иймд ажиглагдсан импеданс \mathbf{Z} -ийг задлан шинжлэх замаар дисторшны нөлөөг бууруулж, бодит геоэлектрик бүтцийг илүү зөв тодорхойлох боломжтой. Ялангуяа 2-D болон 3-D орчинд энэ арга нь страйк чиглэлийг тодорхойлох, ТЕ/ТМ горимуудаар салгах, мөн өгөгдлийн чанарыг үнэлэхэд өргөн хэрэглэгддэг (Groom & Bailey, 1989; McNeice & Jones, 2001).

3.2. Фаз тензор

Гальваник дисторшны нөлөөнд үл автагдах параметруудийн нэг нь фазын тензор юм (Caldwell et al., 2004). Импедансын тензорыг бодит ба хуурмаг хэсгүүдэд задлан бичвэл:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{X} + i\mathbf{Y}, \quad (24)$$

энд $\mathbf{X} = \Re(\mathbf{Z})$, $\mathbf{Y} = \Im(\mathbf{Z})$.

Эндээс Caldwell et al. (2004) Фаз тензорыг дараах байдлаар тодорхойлсон:

$$\Phi = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{Y}. \quad (25)$$

Φ нь гальваник дисторшноос үл хамаарах тул гүний геоэлектрик бүтцийн үнэмлэхүй шинж чанарыг тодорхойлоход давуу талтай байдаг. Фаз тензор нь геоцахилгаан тогтцын хэмжээс, чиглэл зэргийг тодорхойлоход өндөр үр дүнтэй. Учир нь фаз тензор нь зөвхөн фазын мэдээллийг агуулах тул гальваник дисторшны матриц \mathbf{A} -ийн нөлөөлд өртдөггүй. Үүнийг дараах байдлаар баталж болно:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{AZ}^t \Rightarrow \Phi = (\mathbf{AX}^t)^{-1}(\mathbf{AY}^t) = (\mathbf{X}^t)^{-1}\mathbf{Y}^t. \quad (26)$$

Иймээс фаз тензор нь зөвхөн гүний геоэлектрик бүтцийн мэдээллийг агуулах бөгөөд бага гүний локал тогтцтой холбоотой гальваник дисторшны нөлөөнөөс үл хамаарна.

Дараах дэд бүлгээр фаз тензорийн үндсэн шинж чанаруудыг авч үзье.

3.2.1. Фаз тензорын шинж чанар

Фазын тензор нь 2×2 бодит матриц хэлбэрээр бичигддэг:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi_{xx} & \phi_{xy} \\ \phi_{yx} & \phi_{yy} \end{pmatrix}. \quad (27)$$

Энэхүү тензорыг геометрийн хувьд эллипс хэлбэрээр дүрслэх боломжтой бөгөөд үүнийг *фаз тензорын эллипс* гэж нэрлэдэг (Caldwell et al., 2004). Эллипс нь фаз тензорын тэгш хэмт хэсгээс үүсэх ба гол тэнхлэгүүд нь орчны геоэлектрик анизотроп болон хэмжээсийн шинжийг илэрхийлдэг.

Фаз тензорыг тэгш хэмт ба тэгши хэмт бус хэсгүүдэд задлавал:

$$\Phi = \Phi_s + \Phi_a, \quad (28)$$

энд

$$\Phi_s = \frac{1}{2}(\Phi + \Phi^T), \quad \Phi_a = \frac{1}{2}(\Phi - \Phi^T). \quad (29)$$

Энд Φ_s нь эллипсийн хэлбэрийг, харин Φ_a нь 3-D эффектийг тодорхойлдог.

Үндсэн фазууд Эллипсийн гол тэнхлэгүүд нь Φ_s -ийн хувийн утгуудаар тодорхойлогдоно:

$$\phi_{1,2} = \frac{1}{2} \left[(\phi_{xx} + \phi_{yy}) \pm \sqrt{(\phi_{xx} - \phi_{yy})^2 + (\phi_{xy} + \phi_{yx})^2} \right]. \quad (30)$$

Энд ϕ_1 ба ϕ_2 нь тус бүр эллипсийн их болон бага тэнхлэгийн фазуудыг илэрхийлнэ.

- Хэрэв $\phi_1 \approx \phi_2$ бол эллипс дугуй хэлбэртэй \rightarrow **1-D орчин**
- Хэрэв $\phi_1 \neq \phi_2$ боловч $\beta \approx 0$ бол \rightarrow **2-D орчин**
- Хэрэв $\beta \neq 0$ бол \rightarrow **3-D орчин**

Дундаж фаз

$$\phi_{avg} = \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \quad (31)$$

Дундаж фаз нь тухайн давтамжид гүний дундаж дамжуулалтын шинжийг илэрхийлдэг бөгөөд эсэргүүцлийн ерөнхий суурь утгуудтай уялддаг.

Эллипс Фаз тензорын анизотроп шинжийг илэрхийлэх нэг чухал параметр бол:

$$\epsilon = \frac{\phi_1 - \phi_2}{\phi_1 + \phi_2}. \quad (32)$$

- $\epsilon \approx 0 \rightarrow$ изотроп буюу 1-D
- ϵ ихсэх \rightarrow 2-D эсвэл анизотроп бүтэц

Хэмжээсийн параметр (3-D эффект)

$$\beta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\phi_{xy} - \phi_{yx}}{\phi_{xx} + \phi_{yy}} \right). \quad (33)$$

β нь фаз тензорын тэгши хэмт бус хэсгийг илэрхийлэх ба дараах утгатай:

- $\beta \approx 0 \rightarrow$ 2-D эсвэл 1-D
- $|\beta| > 3^\circ \sim 5^\circ \rightarrow$ 3-D эффект илэрхий

Strike чиглэл Фазын тензорын гол тэнхлэгийн чиглэл нь:

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\phi_{xy} + \phi_{yx}}{\phi_{xx} - \phi_{yy}} \right). \quad (34)$$

Энэ өнцөг нь геоэлектрик бүтцийн үндсэн буюу цахилгаан гүйдэл урсах тохиромжтой дамжуулагчийн чиглэлийг илэрхийлнэ. 2-D орчинд энэ нь ТЕ/ТМ горимуудыг тодорхойлох үндсэн параметр болдог.

Фаз тензорын эллипс нь тухайн орчны цахилгаан дамжуулалтын тархалтын фаз-д үзүүлэх респонсийг илэрхийлдэг.

- Эллипсийн **их тэнхлэг** \rightarrow хамгийн их фазын өөрчлөлт (их дамжуулагч чиглэл)
- Эллипсийн **бага тэнхлэг** \rightarrow бага фазын өөрчлөлт (их эсэргүүцэлтэй чиглэл)

Иймээс:

- Суналт ихтэй эллипс \rightarrow хүчтэй анизотроп эсвэл 2-D бүтэц (жишээ: хагарлын бүс)
- Эргэлдсэн эллипс \rightarrow страйк өөрчлөгдөж буйг илтгэнэ
- Эргэлттэй эллипс \rightarrow 3-D өөрчлөлт (жишээ: интрузив, комплекс бүтэц)

Фазын тензорын эллипсийг зураг дээр дүрслэхэд дараах геологийн мэдээллийг олж авах боломжтой:

- Fault болон shear zone \rightarrow сунасан, нэг чиглэлд зэрэгцсэн эллипсүүд
- Магмын биет \rightarrow локал 3-D (өндөр β)
- Давхаргат бүтэц \rightarrow тогтвортой strike, бага β

Мөн давтамжаар нь харахад:

- Өндөр давтамж \rightarrow гадаргын бүтэц
- Бага давтамж \rightarrow гүний бүтэц

Иймээс фазын тензор нь МТ өгөгдлийг дисторшноос үл хамааран шууд геологийн тайлбар хийх хамгийн хүчирхэг аргачлалудын нэг юм.

3.3. Цахилгаан фаз тензор

Сүүлийн жилүүдэд фазын тензорын ойлголтыг өргөтгөн, цахилгаан орны суурьтай цахилгаан фаз тензор (ЦФТ) ойлголтыг хөгжүүлсэн (?Bakker et al., 2015). Энэ нь уламжлалт импеданс дээр суурилсан фаз тензортой төстэй боловч зөвхөн цахилгаан орны хэмжилтэд тулгуурладгаараа онцлог юм.

Цахилгаан орныг комплекс хэлбэрээр илэрхийлбэл:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_r + i\mathbf{E}_i, \quad (35)$$

энд $\mathbf{E}_r = \Re(\mathbf{E})$, $\mathbf{E}_i = \Im(\mathbf{E})$.

ЦФТ-ийг дараах байдлаар тодорхойлно:

$$\Phi_E = \mathbf{E}_r^{-1} \mathbf{E}_i. \quad (36)$$

Энэхүү тодорхойлолт нь импедансын фазын тензортой аналог бүтэцтэй бөгөөд зөвхөн цахилгаан орны бодит ба хуурмаг бүрэлдэхүүнүүдийг ашиглан тодорхойлогдоно.

3.3.1. ЦФТ-ийн шинж чанар

Хэрэв ажиглагдсан цахилгаан орон нь гальваник дисторшнд өртсөн байвал:

$$\mathbf{E} = \Lambda \mathbf{E}^{true}, \quad (37)$$

тэгвэл:

$$\Phi_E = (\Lambda \mathbf{E}_r^{true})^{-1} (\Lambda \mathbf{E}_i^{true}) = (\mathbf{E}_r^{true})^{-1} \mathbf{E}_i^{true}. \quad (38)$$

Иймээс Φ_E нь мөн гальваник дисторшноос үл хамаарах шинж чанартай байна. Энэ нь phase tensor-тэй адил хамгийн чухал давуу тал юм.

ЕРТ-ийг мөн 2×2 бодит матриц хэлбэрээр илэрхийлнэ:

$$\Phi_E = \begin{pmatrix} \phi_{xx}^E & \phi_{xy}^E \\ \phi_{yx}^E & \phi_{yy}^E \end{pmatrix}. \quad (39)$$

Энэ матрицыг эллипс хэлбэрээр дүрсэлж болох бөгөөд үүнийг цахилгаан фаз тензорын эллипс гэж нэрлэнэ. Үндсэн параметрууд нь фаз тензортэй ижил бүтэцтэй:

Үндсэн тэнхлэгүүд

$$\phi_{1,2}^E = \frac{1}{2} \left[(\phi_{xx}^E + \phi_{yy}^E) \pm \sqrt{(\phi_{xx}^E - \phi_{yy}^E)^2 + (\phi_{xy}^E + \phi_{yx}^E)^2} \right] \quad (40)$$

эргэлтийн параметрууд

$$\beta_E = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\phi_{xy}^E - \phi_{yx}^E}{\phi_{xx}^E + \phi_{yy}^E} \right) \quad (41)$$

Страйк чиглэл

$$\theta_E = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{\phi_{xy}^E + \phi_{yx}^E}{\phi_{xx}^E - \phi_{yy}^E} \right) \quad (42)$$

Фаз тензор ба ЦФТ-ийн ялгаа нь

- **Фаз тензор (Φ):** Импедансын тензороос (E/H) тодорхойлогдоно
- **ЦФТ (Φ_E):** Зөвхөн цахилгаан орноос тодорхойлогдоно
- $\Phi \rightarrow$ илүү өргөн хэрэглээтэй, стандарт МТ анализ
- $\Phi_E \rightarrow$ соронзон өгөгдөл муу үед ашиглах боломжтой

Давуу тал

- Гальваник дисторшноос үл хамаарна
- Зөвхөн цахилгаан орны өгөгдлөөр тодорхойлогдоно
- Шум ихтэй H-field үед ашиглах боломжтой

Хязгаарлалт

- Импеданс шиг шууд геоэлектрик параметрууд өгөхгүй
- Зарим нөхцөлд физик тайлбар нь илүү төвөгтэй

ЦФТ-нь дараах нөхцөлд онцгой ач холбогдолтой:

- Соронзон мэдрэгчийн чанар муу үед
- Хот суурин газрын цахилгаан соронзон шум ихтэй үед
- МТ болон цахилгаан орон суурьтай аргуудыг хослуулахад

Мөн Φ болон Φ_E -ийг хамтад нь ашигласнаар өгөгдлийн чанарыг үнэлэх, 3-D эффект илрүүлэх, болон геологийн бүтцийг илүү найдвартай тодорхойлох боломжтой.

3.4. МТ респонсуудад тайлал хийх

МТ өгөгдөлд тайлал хийж орчны геологийн шинж чанарыг ойлгох нь зөвхөн нэг төрлийн параметрт тулгуурлах бус, харин импедансын тензор \mathbf{Z} , фазын тензор Φ болон соронзон индукцийн вектор (типпер) \mathbf{T} -ийг хамтад нь ашиглахад оршино. Эдгээр нь тус бүр өөр өөр физик мэдээлэл агуулдаг бөгөөд харилцан нөхөх шинж чанартай.

3.4.1. Параметруудийн үүрэг

- **Импедансын тензор \mathbf{Z} :** Геоэлектрик орчны абсолют шинж чанарыг (төлөөллийн эсэргүүцэл, фаз) илэрхийлнэ. Гэвч гальваник дисторшнд мэдрэмтгий.
- **Фаз тензор/ЦФТ Φ :** Дисторшноос үл хамааран геометр хэлбэр, хэмжээс болон страйк чиглэлийг илэрхийлнэ.
- **Типпер \mathbf{T} :** Соронзон орны босоо ба хэвтээ бүрэлдэхүүнүүдийн хамаарлыг илэрхийлж, орчны хэвтээ чиглэл болон 3-D бүтцэд мэдрэмтгий.

3.4.2. Дамжуулагч болон орчны хэмжээс

Эдгээр параметруудийг хамтад нь ашиглан орчны болон дамжуулагчын хэмжээсийн мэдээллийг дараах байдлаар үнэлнэ:

- **1-D орчин:**

- $\phi_1 \approx \phi_2$ (дугуй эллипс)
- $\beta \approx 0$
- $T \approx 0$

- **2-D орчин:**

- $\phi_1 \neq \phi_2$
- $\beta \approx 0$
- типпер нэг чиглэлд давамгайл

- **3-D орчин:**

- $\beta \neq 0$
- типпер хоёр бүрэлдэхүүн хоёулаа тэгээс ялгаатай
- эллипс эргэлттэй, тогтворгүй страйк

3.4.3. Страйк чиглэлийн үнэлгээ

Фаз тензороос тодорхойлсон страйк (θ) нь ихэвчлэн хамгийн найдвартай байдаг. Үүнийг типперийн чиглэлтэй харьцуулснаар:

- фаз тензор страйк тогтвортой + типпер перпендикуляр → **цэвэр 2-D бүтэц**
- Страйк өөрчлөгдөх + Типпер өөрчлөгдөх → **3-D орчин**
- **Z** өөрчлөгдсөн боловч **Φ** тогтвортой → **гальваник дисторшн**
- **Φ** болон **T** хоёулаа өөрчлөгдөх → **бодит геологийн өөрчлөлт**

Иймээс фазын тензор ба tipper нь импедансын өгөгдлийг баталгаажуулах (validation) хэрэгсэл болдог.

3.4.4. Геологийн тайлалд

Дээрх ойлголтуудыг нэгтгэн суалгааны талбайн геологийн мэдлэгийг нэмэгдүүлэх боломжтой бөгөөд үүнийг дараах байдлаар тайлбарлана:

- **Хагарал / Шэйр бүс:**

- Суналттай фаз тензор эллипс
- Тогтвортой страйк
- Типпер хүчтэй, дамжуулагч руу чиглэсэн

- **Дамжуулагч биет (жишээ: флюид хайлмаг):**

- Бага фазын градиент
- Типпер төвлөрсөн
- β өсөх (3-D эффект)

- **Үеэлсэн бүтэц:**

- $\beta \approx 0$
- Эллипс тогтвортой
- Типпер сул

- **Комплекс 3-D (интрузив, бүтэц холилдсон):**

- β их
- Эллипс эргэлдсэн
- Типпер чиглэл өөрчлөгдөх

3.4.5. Давтамжаас хамаарах нөхцөлүүд

- Өндөр давтамж → гадаргын жигд бус шинж чанар их тул, гальваник нөлөө
- Дунд давтамж → дунд гүний бүтэц
- Бага давтамж → гүний том масштабын бүтэц

Иймээс **Z**, **Φ** болон **T**-ийн давтамжаар өөрчлөгдөх төлөвийг хамтад нь шинжилснээр орчны босоо ба хэвтээ өөрчлөлтийг ялган тодорхойлох боломжтой.

Импедансын тензор нь орчны абсолют цахилгаан шинжийг өгдөг бол фазын тензор болон типпер нь геометр ба хэмжээсийн талаарх мэдээллийг өгдөг. Эдгээрийг хамтад нь ашигласнаар гальваник дисторшны нөлөөг ялган, бодит геоэлектрик бүтцийг илүү өндөр итгэлтэйгээр тодорхойлох боломж бүрдэнэ.

3.5. Цэнхэрийн хэмжилт дээр ажиглагдсан МТ респонсууд ба тэдгээрийн шинж чанар

Зураг 1-д МТ хэмжилтийн GTL6B ба GTL3T цэгүүдийн хэмжилтээс үнэлсэн төлөөллийн эсэргүүцэл ба болон фазын муруйнууд харуулсан. Энд GTL6B -цэг дээр цахилгаан ба соронзон орны хугацааны өөрчлөлтийг бүртгэн авсан бол GTL3T цэг дээр зөвхөн Теллурикийн хэмжилтийг хийсэн тул GTL6B -н импеданс тензор, GTL3T -кваса-цахилгаан тензоруудаас тус тус үнэлсэн физик хэмжигдэхүүнүүд болно. Цэгүүдийн хоорондох зай 6км бөгөөд теллурикийн цэгийн хувьд хэмжилтийн орчны нөлөөгөөс хамаарсан сигналын чанар алдагдал нь урт үе дээр ажиглагдаж байна. Гэсэн хэдий ч эдгээр цэгүүдийн төлөөллийн эсэргүүцлийн далайц нь ойролцоогоор ижил хамгийн их утга агуулж буй тул орчны нэгэн төрлийн орчин дээр хэмжигдсэн байна. Энд төлөөллийн эсэргүүцэл нь давтамжаас хамааран буурч байгаа нь гүн рүү дамжуулалт нэмэгдэж байгааг илтгэнэ.

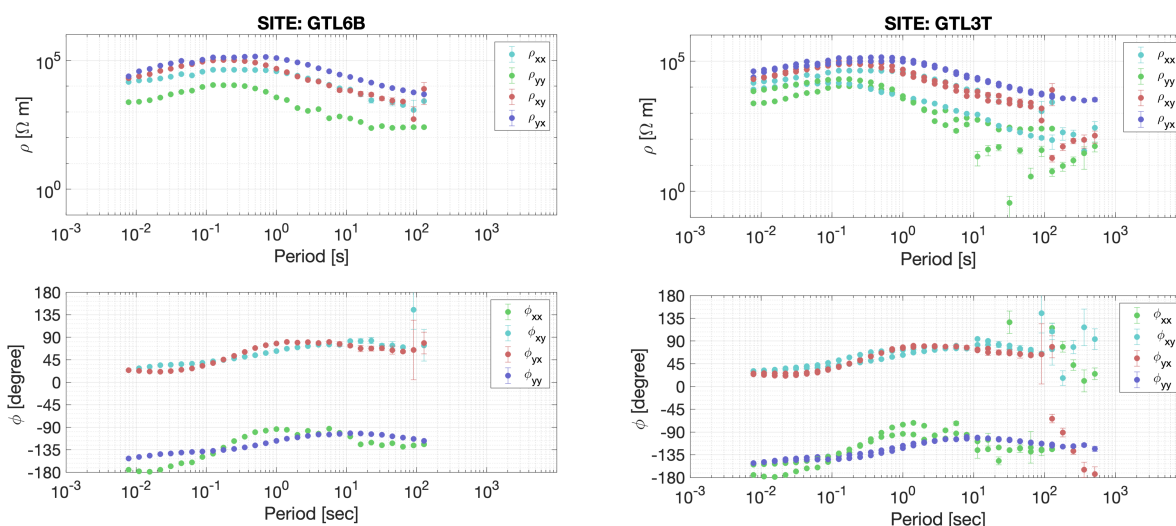
Цэнхэрийн МТ судалгаа-ны үр дүнг харуулсан Зураг 2-д судалгааны талбайн хэмжээнд хэмжигдсэн цэгүүдийн фаз тензорын эллипс болон типпер векторуудыг 32Гц, 1с, 8с болон 64с гэсэн өргөн хүрээний давтамжийн мужид харьцуулан дүрсэлсэн нь гүний цахилгаан дамжуулалтын бүтэц болон түүний жигд бус шинж чанарыг олон шатлалд тайлбарлах боломжийг бүрдүүлж байна. Фаз тензорын эллипсүүд нь орчны анизотроп шинж чанар болон үндсэн гео-цахилгаан чиглэлийг илэрхийлдэг бол типпер векторууд нь босоо соронзон орны респонсыг дамжуулалтын хажуугийн өөрчлөлттэй холбон, ихэвчлэн илүү дамжуулагч бүс рүү чиглэх хандлагатай байдаг. Үүнээс гадна нормчилсон $|\psi|$ параметрийг өнгөөр илэрхийлсэн нь тухайн цэг дээрх 3-D жигд бус байдлын хүчийг илэрхийлэх бөгөөд $|\psi| \approx 0$ үед 1-D эсвэл 2-D орчин давамгайлж, харин $|\psi|$ утга өсөх тусам гурван хэмжээст бүтэц зонхилж байгааг харуулдаг.

Өндөр давтамжийн муж болох 32 Гц дээрх дүрслэл нь судалгааны талбайн гадаргуу орчмын цахилгаан шинж чанар маш комплекс, жижиг масштабын жигд бус бү-

тэц давамгайлж байгааг тодорхой илэрхийлж байна. Энэ үед типпер векторуудын чиглэл ихээхэн сарнисан, жигд бус бөгөөд тодорхой нэг давамгайл чиглэлд төвлөрөхгүй байгаа нь орчны дамжуулалт локал шинжтэй, олон жижиг биетүүдийн нийлбэр нөлөөнд захирагдаж байгааг харуулна. Фаз тензорын эллипсүүдийн хувьд ихэнх нь суналттай, зууван хэлбэртэй байгаа нь хүчтэй анизотропи болон хажуугийн огцом өөрчлөлтүүд оршин байгааг илтгэнэ. Энэ төрлийн эллипс нь ихэвчлэн гадаргуу орчмын хагарал, ан цавын сүлжээ, гидротермаль өөрчлөлт, өгөршлийн бүс болон жижиг хэмжээний дамжуулагч биетүүдтэй холбоотой байдаг. Өөрөөр хэлбэл, 32 Гц-ийн өгөгдөл нь гүний бүс, харьцангуй бага гүнд орших олон фазын, өндөр жигд бус орчныг илрүүлж байна.

Дунд давтамжийн муж болох 1 секундийн үе дээр зураглал мэдэгдэхүйц өөрчлөгдөж, типпер векторууд илүү зохион байгуулалттай болж, тодорхой чиглэлд төвлөрөх хандлага ажиглагдаж байна. Мөн тэдгээрийн урт богиносж байгаа нь босоо соронзон орны хариу харьцангуй тогтвортой болж, орчны хажуугийн өөрчлөлтүүд илүү том масштабтай, нэгтгэгдсэн шинжтэй болж байгааг илтгэнэ. Фаз тензорын эллипсүүд энэ үед харьцангуй тогтворжиж, зарим бүсэд суналт багассан нь анизотроп шинж тодорхой чиглэлд төвлөрч байгааг харуулна. Энэ бүх шинж тэмдгүүдийг нэгтгэн үзвэл ойролцоогоор 3-5 км гүнд илүү том хэмжээний, харьцангуй тасралтгүй дамжуулагч бүтэц оршин байж болох бөгөөд энэ нь тектоник хагарал дагуух шингэний хуримтлал, эсвэл магмын гаралтай бүсүүдтэй холбоотой байж болзошгүй юм.

Цаашид 8 секундийн үе дээр нормчилсон $|\psi|$ -ийн тархалт болон фаз тензорын хэлбэрүүдийг авч үзвэл судалгааны талбайд хүчтэй 3-D жигд бус байдал дахин тод илэрч байна. Олон цэгүүдэд нормчилсон $|\psi|$ -ийн абсолют утга өндөр (улаан болон хөх өнгөөр илэрхийлэгдсэн) байгаа нь цахилгаан дамжуулалтын хажуугийн огцом өөрчлөлтүүд, өөрөөр хэлбэл 3-D бүтэц давамгайлж байгааг илтгэнэ. Фаз тензорын эллипсүүд энэ үед мөн тодорхой суналттай хэвээр байгаа



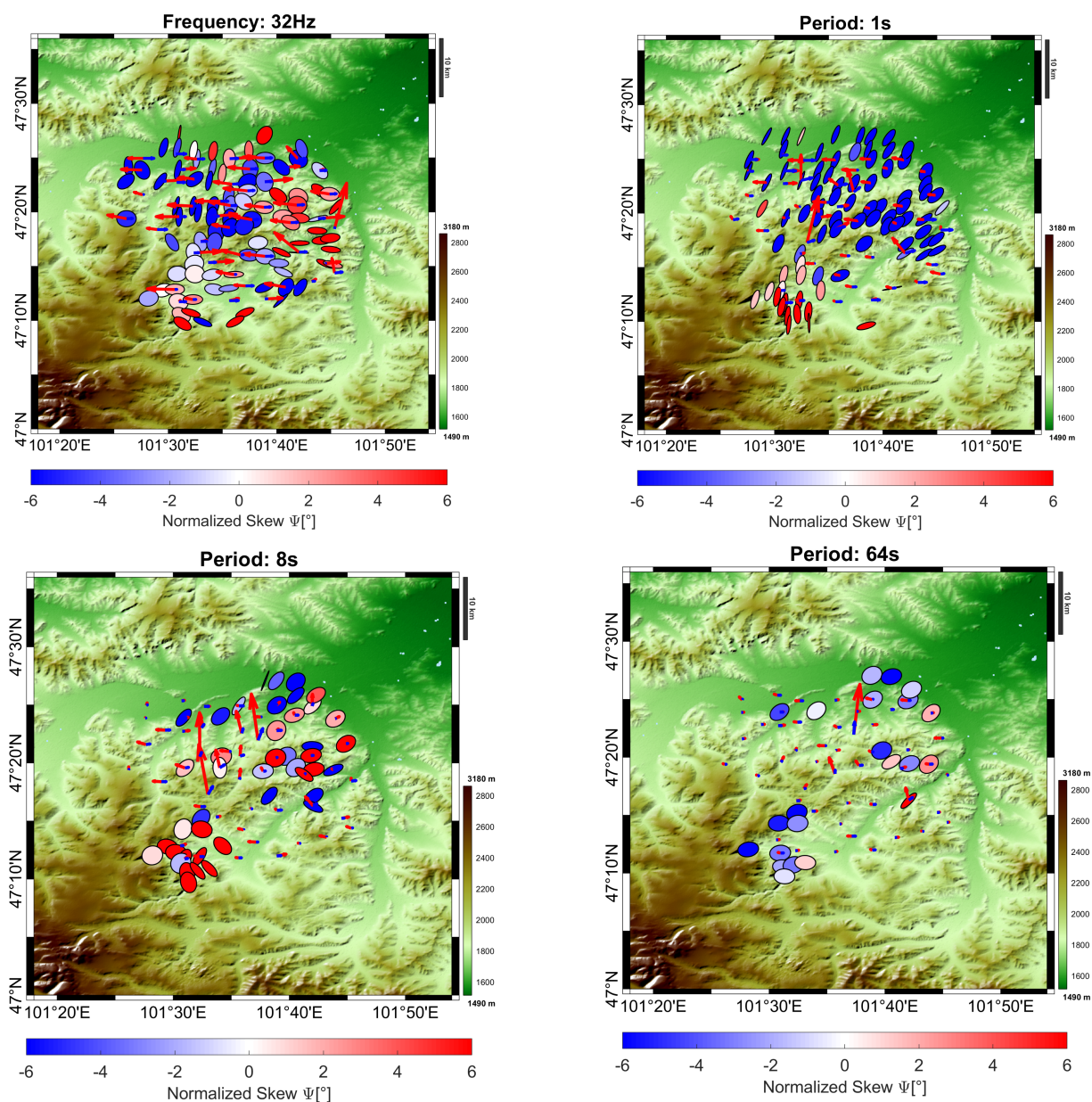
Зураг 1. GTL6B, GTL3T цэгүүд дээр ажигласан төлөөллийн эсэргүүцэл ба фазууд.

нь анизотроп шинж хадгалагдаж байгааг харуулна. Типпер векторуудын чиглэлүүд тодорхой бүсүүд рүү төвлөрөх нь тухайн хэсгүүдэд илүү өндөр дамжуулалттай биетүүд оршин байгааг илтгэж, эдгээр нь гүний шингэн эсвэл хэсэгчилсэн хайлалттай холбоотой материал бүхий бүсүүд байж болохыг санал болгодог. Ийм шинж чанар нь тектоник идэвхтэй бүсэд түгээмэл ажиглагддаг бөгөөд гүний эх үүсвэртэй шингэний урсгал гадаргуу орчимд олон салаалсан, төвөгтэй бүтэц үүсгэдэгтэй нийцдэг.

Харин 64 секундийн урт үе дээрх дүрслэл нь гүн рүү орох тусам орчны цахилгаан шинж чанар илүү жигд болж байгааг харуулж байна. Ихэнх цэгүүдэд нормчилсон $|\psi|$ -ийн утга багасч, $|\psi| \approx 0$ -д ойртож байгаа нь орчин 2-D-д ойртсон, эсвэл 3-D нөлөө харьцангуй сул байгааг илтгэнэ. Гэсэн хэдий ч зарим локал бүсүүдэд $|\psi|$ -ийн утга өндөр хэвээр хадгалагдаж, ялангуяа сөрөг (хөх) аномалиуд илэрч байгаа нь гүн хэсэгт орших тусгаарлагдсан дамжуулагч биетүүдийг зааж байна. Фаз тензорын эллипсүүд энэ үед илүү дугуйрсан, бага суналттай болсон нь анизотроп шинж буурч байгааг харуулна. Харин типпер векторууд эдгээр үлдсэн аномали бүсүүд рүү чиглэж байгаа нь гүн хэсэгт төвлөрсөн дамжуулагч сувгууд, магадгүй литосферийн түвшний

дамжуулагчийн суваг эсвэл магмын гаралтай систем оршин байж болохыг илтгэнэ.

Эдгээр дөрвөн өөр давтамж-үе мужийн нэгтгэсэн дүгнэлт нь судалгааны талбайн гео-цахилгаан бүтцийн шаталсан зохион байгуулалтыг тодорхой харуулж байна. Гадаргуу орчимд (32Гц) жижиг масштабын, маш хүчтэй жигд бус бүтэц давамгайлж байхад, дунд гүнд (1с) илүү том, зохион байгуулалттай дамжуулагч бүсүүд илэрч, улмаар гүн хэсэгт (8–64с) тодорхой чиглэлтэй, локалчлагдсан дамжуулагчууд хадгалагдаж байна. Энэ нь гүний эх үүсвэртэй (жишээлбэл, магмын эсвэл шингэний урсгал) систем гадаргуу руу ойртох тусам олон салаалж, тектоник хагарал болон структурын дагуу тархаж байгааг илтгэж байна. Иймд фаз тензор, нормчилсон $|\psi|$ болон типпер параметруудийн хамтарсан анализ нь зөвхөн 3-D жигд бус байдлыг илрүүлэхээс гадна гүний шингэний миграци, магматик процесс, тектоник хяналттай дамжуулагч сувгуудын байршил, чиглэлийг тодорхойлох өндөр ач холбогдолтой арга зүй болох нь энэхүү зураглалаас тодорхой харагдаж байна.



Зураг 2. Цэнхэрийн талбайд хийсэн хэмжилтийн өгөгдлөөр тодорхойлсон Фаз тензор ба типперүүд.

4. Дүгнэлт ба цаашдын чиглэл

Энэхүү судалгаанд МТ аргын үндсэн респонс функцууд болох импедансын тензор \mathbf{Z} , фазын тензор Φ , нормчилсон параметр $|\psi|$ болон соронзон индукцийн вектор буюу типпер \mathbf{T} -ийг нэгдсэн байдлаар ашиглан геоэлектрик орчны гүн болон хэвтээ чиглэлийн бүтэц, түүний хэмжээс (dimensionality), жигд бус шинж чанарыг олон давтамжийн мужид системтэйгээр тайлбарласан. Судалгааны үр дүн нь МТ өгөгдлийн физик агуулгыг зөв ойлгохын тулд эдгээр параметруу-

дийг тус тусад нь бус харин харилцан уялдаатайгаар ашиглах шаардлагатайг тодорхой харуулж байна. Ялангуяа фазын тензор болон типпер нь гальваник дисторшны нөлөөнд үл автагдах шинж чанартай тул геоэлектрик бүтцийн бодит дүр төрхийг илүү найдвартай илэрхийлдэг болох нь батлагдлаа.

Цэнхэрийн талбайн жишээ дээр хийсэн олон давтамжийн мужид хийсэн харьцуулсан анализ нь судалгааны талбайн геоэлектрик бүтэц шаталсан шинжтэй болохыг илтгэж байна. Өндөр давтамжийн мужид (32

Гц) фаз тензорын эллипсүүдийн хүчтэй суналт, Типпер векторуудын сарнисан байдал болон $|\psi|$ -ийн өндөр утгууд нь гадаргуу орчмын жижиг масштабын, хүчтэй жигд бус бүтэц давамгайлж байгааг харуулж байна. Энэ нь хагарал, ан цав, гидротермаль өөрчлөлт, өгөршлийн бүс зэрэг локал процессуудын нийлмэл нөлөөлөлтэй холбоотой гэж үзэх үндэслэлтэй. Харин дунд давтамжийн муж (1 с)-д орчны хариу илүү тогтворжиж, Типпер векторууд тодорхой чиглэлд төвлөрч, фаз тензорын хэлбэр жигдэрч байгаа нь гүн рүү шилжихэд илүү том масштабын, зохион байгуулалттай дамжуулагч бүтэц давамгайлж байгааг илтгэнэ. Энэ нь ойролцоогоор хэдэн километрийн гүнд орших тектоник хяналттай шингэний хуримтлал эсвэл магмын гаралтай системтэй холбоотой байж болох юм.

Урт периодын мужид (8–64с) нормчилсон $|\psi|$ -ийн тархалт зарим бүсэд өндөр хэвээр хадгалагдаж, типпер векторууд тодорхой чиглэлд төвлөрч байгаа нь гүн хэсэгт локалчлагдсан гурван хэмжээт дамжуулагч сувгууд оршин байгааг илтгэнэ. Гэсэн хэдий ч нийт талбайн хэмжээнд фаз тензорын эллипсүүд дугуйрч, $|\psi| \approx 0$ -д ойртож байгаа нь орчин гүн рүү орох тусам илүү 2-D шинж давамгайлж байгааг харуулж байна. Энэ нь гүний эх үүсвэртэй дамжуулагч системүүд гадаргуу руу ойртох тусам салаалж, илүү комплекс 3-D бүтэц үүсгэдэг гэсэн геологийн ойлголттой нийцэж байна.

Эдгээр үр дүнг нэгтгэн үзвэл МТ респонс функцуудын нийлмэл анализ нь геоэлектрик бүтцийг зөв тодорхойлох цорын ганц найдвартай арга болохыг харуулж байна. Импедансын тензор нь орчны абсолют цахилгаан шинжийг илэрхийлэх боловч гальваник дисторшнд мэдрэмтгий байдаг бол фаз тензор болон типпер нь геометр, хэмжээс болон хажуугийн өөрчлөлтийг илүү бодитой илэрхийлдэг. Харин нормчилсон параметр нь гурван хэмжээт жигд бус байдлын тоон хэмжүүр болж, орчны дименшнийг үнэлэхэд чухал үүрэгтэй. Иймээс эдгээр параметруудийг хамтад нь ашиглах нь МТ тайлалын найдвартай байдлыг эрс нэмэгдүүлдэг.

Арга зүйн хувьд энэхүү судалгаа нь МТ

өгөгдлийг тайлбарлах дараалсан логик дарааллыг тодорхой болгож байна. Юуны өмнө фаз тензор болон геометр параметруудийг ашиглан орчны хэмжээсийг тодорхойлох, дараа нь типпер-ийн чиглэлээр дамжуулагч бүсийн байрлал, чиглэлийг тогтоох, эцэст нь импедансын тензорыг ашиглан абсолют эсэргүүцлийн бүтэцтэй уялдуулах нь хамгийн үр дүнтэй арга болох нь тогтоогдлоо. Мөн давтамжаас хамаарсан анализ нь гадаргуу болон гүний нөлөөг ялган ойлгоход зайлшгүй шаардлагатай юм.

Цаашдын судалгааны нэг чухал чиглэл нь МТ өгөгдлийн тайлалыг автоматжуулах асуудал юм. Энэхүү ажлын үр дүнгээс харахад фазын тензорын параметрууд (ϕ_1, ϕ_2, β), skew ($|\psi|$), tipper-ийн магнитуд ба чиглэл зэрэг хэмжигдэхүүнүүдийг ашиглан орчны хэмжээс болон геологийн бүтцийг алгоритмын түвшинд ангилах боломж бүрэн байна. Үүнийг дүрэмд-суурилсан систем болон машин сургалтын аргуудтай хослуулан ашиглах замаар МТ өгөгдлийн автомат тайлал хийх боломжтой. Тухайлбал, $|\psi|$ болон β -д суурилсан хэмжээсийн ангилал, типперийн чиглэлд суурилсан дамжуулагчын зам илрүүлэх, фаз тензорын страйкт суурилсан структурын чиглэл тодорхойлох зэрэг нь автомат алгоритмын үндсэн бүрэлдэхүүн хэсэг байж болно.

Мөн физик суурьтай шууд бодлогын загварчлал болон өгөгдөлд суурилсан (data-driven) аргуудыг нэгтгэсэн хосолмол систем хөгжүүлэх нь ирээдүйн судалгааны чухал чиглэл юм. Энэ нь 3-D инверсийн хурдыг нэмэгдүүлэх, тайлалын тодорхойгүй байдлыг бууруулах, мөн геологийн илүү бодит загвар гаргахад чухал ач холбогдолтой. Ийм төрлийн хандлага нь зөвхөн МТ судалгаанд төдийгүй өргөн хүрээний геофизикийн өгөгдөл тайлбарлахад шинэ боломжуудыг нээх болно.

Иймд энэхүү тойм өгүүлэл нь магнитотеллурик өгөгдлийн респонс функцуудын физик утга, тэдгээрийн харилцан уялдаа, мөн гальваник дисторшны нөлөөг ялган таних онолын болон практик суурийг бүрдүүлж, цаашдын автомат тайлал болон дэвшилтэт загварчлалын судалгаанд чухал үндэс суурь болно гэж дүгнэж байна.

Ашигласан номзүй (References)

- Bakker, J., Kuvshinov, A., Samrock, F., Geraskin, A., & Pankratov, O., 2015. Introducing inter-site phase tensors to suppress galvanic distortion in the telluric method, *Earth, Planets and Space*, **67**(1), 160, , <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0327-7>.
- Berdichevsky, M., 1965. Electrical prospecting with the telluric current method, *Colorado School of Mines Quarterly*, **60**(1), 1–216.
- Berdichevsky, M. N. & Dmitriev, V. I., 2008. *Models and Methods of Magnetotellurics*, Springer, , <https://doi.org/10.1007/978-3-540-77814-1>.
- Cagniard, L., 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting, *Geophysics*, **18**(3), 605–635, , <https://doi.org/10.1190/1.1437915>.
- Caldwell, T. G., Bibby, H. M., & Brown, C., 2004. The magnetotelluric phase tensor, *Geophysical Journal International*, **158**(2), 457–469, , <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02281.x>.
- Chave, A. D. & Jones, A. G., 2012. *The Magnetotelluric Method: Theory and Practice*, Cambridge University Press, , <https://doi.org/10.1017/CBO9781139020138>.
- Erdenechimeg, B., 2023. *Magnetotelluric exploration of intermediate temperature geothermal systems and mineral resources in central Mongolia*, Ph.D. thesis, ETH Zurich, , <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000623203>.
- Groom, R. W. & Bailey, R. C., 1989. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **94**(B2), 1913–1925, , <https://doi.org/10.1029/JB094iB02p01913>.
- Hermance, J. F. & Thayer, R. E., 1975. The telluric-magnetotelluric method, *Geophysics*, **40**(4), 664–668, , <https://doi.org/10.1190/1.1440557>.
- Iliceto, V. & Santarato, G., 1986. On the possibility of the telluric method: Some results on faulted structures, *Geophysical Prospecting*, **34**(7), 1082–1098, , <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1986.tb00506.x>.
- Jiracek, G. R., 1990. Near-surface and topographic distortions in electromagnetic induction, *Surveys in Geophysics*, **11**(2), 163–203, , <https://doi.org/10.1007/BF01901662>.
- Jupp, D. L. & Vozoff, K., 1977. Two-dimensional magnetotelluric inversion, *Geophysical Journal International*, **50**(2), 333–352, , <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1977.tb01346.x>.
- McNeice, G. W. & Jones, A. G., 2001. Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data, *Geophysics*, **66**(1), 158–173, , <https://doi.org/10.1190/1.1444891>.
- Rigaud, R., Comeau, M. J., Becken, M., Kuvshinov, A. V., Tserendug, S., Batmagnai, E., & Demberel, S., 2023. Magnetotelluric data across mongolia: Implications for intracontinental deformation and intraplate volcanism—report on new measurements, *Abstracts for the European geosciences union (EGU) general assembly 2023*, pp. EGU23–9485.
- Schlumberger, M., 1939. The application of telluric currents to surface prospecting, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **20**(3), 271–277, , <https://doi.org/10.1029/TR020i003p00271>.
- Simpson, F. & Bahr, K., 2005. *Practical Magnetotellurics*, Cambridge University Press, , <https://doi.org/10.1017/CBO9780511614095>.
- Tikhonov, A. N., 1950. On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust, *Doklady Akademii Nauk SSSR*, **73**, 295–297.
- Vozoff, K., 1972. The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins, *Geophysics*, **37**(1), 98–141, , <https://doi.org/10.1190/1.1440273>.
- Yungul, S. H., 1966. Telluric sounding: A magnetotelluric method without magnetic measurements, *Geophysics*, **31**(1), 185–191, , <https://doi.org/10.1190/1.1439777>.

А. Магнетотеллурик үүсгүүр орны математик загварчлал

А.1. Үндсэн тэгшитгэлүүд

Магнетотеллурик (МТ) арга нь дэлхийн гадарга дээрх цахилгаан (\mathbf{E}) ба соронзон (\mathbf{H}) орны харилцан хамаарлыг ашиглан гүний цахилгаан дамжуулах чадварын (σ) тархалтыг тодорхойлох үндсэн дээр оршино. Эдгээр орнууд нь Максвеллийн тэгшитгэлүүдээр дараах байдлаар тодорхойлогдоно:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (43)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (44)$$

энд $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ нь дамжуулалтын гүйдэл, μ_0 нь соронзон нэвтрүүлэх чадвар, ε_0 нь диэлектрик тогтмол байна.

МТ аргын давтамжийн мужид ($\omega \ll 10^6$ Hz) шилжилтийн гүйдлийг үл тооцох (*quasi-static approximation*) боломжтой тул:

$$\nabla \times \mathbf{H} \approx \sigma \mathbf{E} \quad (45)$$

болно.

А.2. Давтамжийн мужид хувиргах

Цагийн функцыг гармоник хэлбэрт шилжүүлбэл:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \Re [\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) e^{i\omega t}] \quad (46)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \Re [\mathbf{H}(\mathbf{r}, \omega) e^{i\omega t}] \quad (47)$$

Ингэснээр Максвеллийн тэгшитгэлүүд:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\omega \mu_0 \mathbf{H} \quad (48)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} \quad (49)$$

хэлбэрт орно.

А.3. Долгионы тэгшитгэл

Дээрх хоёр тэгшитгэлийг нэгтгэн:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -i\omega \mu_0 \nabla \times \mathbf{H} \quad (50)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -i\omega \mu_0 \sigma \mathbf{E} \quad (51)$$

Вектор адилтгал:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} \quad (52)$$

МТ орчинд $\nabla \cdot \mathbf{E} \approx 0$ гэж үзвэл:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = i\omega \mu_0 \sigma \mathbf{E} \quad (53)$$

Энэ нь нэвчилтийн тэгшитгэл болно.

A.4. Хавтгай долгион үүсгүүрийн загвар

МТ аргын гол дөхөлт нь гадаад үүсгүүрийг **хавтгай долгион (plane wave)** гэж үзэх явдал юм. Иймд:

$$\mathbf{E}(z) = \mathbf{E}_0 e^{-kz} \quad (54)$$

энд комплекс долгионы тоо:

$$k = (1 + i) \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \sigma}{2}} \quad (55)$$

Энэ нь diffusion ба attenuation хоёрыг агуулна.

A.5. Нэвтрэх гүн

Долгионы унтралтын гүнийг:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}} \quad (56)$$

гэж тодорхойлно.

Иймээс:

- Өндөр давтамж \rightarrow бага гүн
- Бага давтамж \rightarrow их гүн

A.6. Гадаад үүсгүүрийн загвар

МТ үүсгүүр нь ионосфер болон магнитосферийн гүйдлээс үүсдэг бөгөөд түүнийг гадаргаас дээш байрлах эквивалент гүйдлийн давхарга байдлаар загварчилна:

$$\mathbf{J}_{ext}(\mathbf{r}) = \hat{k} \times \mathbf{H}_0 \delta(z - z_s) \quad (57)$$

Энд:

- δ — Диракийн дельта функц
- z_s — үүсгүүрийн өндөр

A.7. Захын нөхцөл

Гадаргын зааг дээр:

$$\mathbf{E}_t^{air} = \mathbf{E}_t^{earth} \quad (58)$$

$$\mathbf{H}_t^{air} = \mathbf{H}_t^{earth} \quad (59)$$

Энэ нь МТ хэмжилт боломжтой болгодог.

A.8. Импеданс тодорхойлолт

Хавтгай долгионы нөхцөлд:

$$Z = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{i\omega\mu_0}{\sigma}} \quad (60)$$

А.9. 1-D орчны аналитик шийд

1-D орчинд:

$$Z(\omega) = \sqrt{i\omega\mu_0\rho} \quad (61)$$

$$\rho_a = \frac{|Z|^2}{\omega\mu_0} \quad (62)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\Im Z}{\Re Z} \right) \quad (63)$$