

# 運動媒質內에서의 Circula Loop Antenna 의 放射特性 (Ⅱ)

(Radiation Characteristics of a Circular Loop Antenna  
in Moving Media.)

崔 炳 河

(Choe, Byung Ha)

## 要 約

本論文에서는 運動媒質內에서 크기가 波長과 同等程度이거나 그 以上인 circular loop antenna 의 放射特性을 電流分布가 正弦波의인 경우에 對하여 考察하였다.

考察結果로는 放射特性이 媒質速度의 영향을 받는다는 사실과 그 영향으로는 靜止媒質의 radiation pattern 과 比較하여 放射指向性이 loop antenna 面에 平行인 媒質速度成分에만 영향을 받고 수직成分速度에는 無關하며 radiation pattern 의 最大指向性은 loop 面에 平行인 速度成分方向으로 移動하고 이와 反對方向으로는 pattern 의 크기가 增加하게 된다. 또 이와 같은 運動媒質의 영향은 媒質速度가 크고 電流周波數가 높을수록 antenna 의 직경이 클수록 더욱 현저하게 된다는 사실을 알게 되었다.

## Abstract

In this paper, the radiation characteristics of a large circular loop antenna with sinusoidal current distribution is studied in a moving media with a constant velocity much less than the speed of light.

The diameter of the circular loop antenna is comparable with or larger than wave length.

In studing the radiation characteristics, vector potential for the antenna is derived and relative field pattern is plotted from the vector potentials. Finally the field patterns are compared with those of stationary media.

It is found that maximum directivities are shifted to the direction of the velocity of the media, and the field intensities are decreased in that direction and increased in opposite direction by the velocity component parallel to the loop plane. It is also found that the deviations for the pattern are proportional to the velocity of the media, the frequency of the distributed current, the diameter of the loop antenna, and the deviation depends only upon the parallel component of the velocity to the loop plane.

## 1. 序 論

媒質이 高速度로 運動하고 있는 경우는 人工衛星 Rocket 等과 같은 高速度飛行體와 주위媒質 즉 공기 電離層등과의 關係이며 最近 우주開發 위성通信등과 關係가 있으므로 問題視된다.

이경우에 對한 電磁波放射에 關한 Compton 과

Tai<sup>1,2)</sup>에 依한 研究가 있는데 이들의 연구結果에 依하면 光速에 比하여 充分히 낮은 高速의 線形 等方均質인 媒質內에서 微少振動電氣雙極子の 方射特性은 靜止媒質에서와 다름이 없고 다만 位相速度가 變化할 뿐이라고 結論지었다.

그러나 鹽澤俊之와 熊谷信昭<sup>3)</sup>에 依하면 Antenna 의 길이가 波長과 同等程度이거나 그以上인 때의 線狀 Antenna 對하여는 微少雙極子와는 달리 Field pattern 과 放射抵抗이 媒質速度의 영향을 받아 相當히 變化하고 있음을 밝혔다. 즉 線狀

\* 仁荷大學校 工科大學 電子工學科

Dept. of Electronics Eng., College of Eng. In Ha University.

Antenna 인 경우는 Antenna 에 平行한 媒質速度 成分에만 영향을 받으며 pattern 에서 最大指向性 方向이 Antenna 에 平行한 媒質速度의 方向으로 移動되고 이速度成分과 反對方向으로 pattern 의 크기가 增加함을 밝혔다. 또 本論文에 앞서 筆者가 Circular loop Antenna 의 電流가 均一한 경우에 對하여 考察한 結果<sup>12)</sup> loop 面에 平行한 媒質速度成分에만 영향을 받고 pattern 의 크기에 는 영향이 없었다.

本論文에서는 運動媒質內에서 Circular loop Antenna 의 電流分布가 正弦波이고 Antenna 의 크기가 波長과 같은 정도이거나 그以上인 경우에 關하여 考察하기로 한다.

考察에 있어서 먼저 이에 해당하는 Vector potential 式을 求하여 電磁界의 式을 유도하고 이들 式에 例로써 定數를 代入하여 電子計算機로 計算하고 Field pattern 을 圖示한다음, 靜止媒質의 경우와 比較검토 한다.

### 2. 運動媒質內에서의 電磁波方程式

本研究에서 媒質은 線形 等方 均質이며 媒質速度  $v$  는 光速에 比하여 大단히 낮은 경우를 생각한다.

이때 Minkowski 의 理論에 依하면 Lorentz Transformation 을 적용하고  $(\frac{v}{c})^2$  을 무시하는 조건을 代入하면 다음과 같은 Maxwell-Minkowski 의 方程式이 얻어진다. <sup>1, 3, 5)</sup>

$$D \simeq \epsilon E + A \times H \tag{1}$$

$$B \simeq \mu H - A \times E \tag{2}$$

$$J \simeq \rho V + \sigma(E + v \times B) \tag{3}$$

여기서  $A = (\epsilon\mu - \epsilon_0\mu_0)v$

$\epsilon, \mu$ : 媒質의 誘電率 및 透磁率

$v$ : 媒質의 速度

$C$ : 媒質內에서의 光速

$J$ : 印加電流密度

$\rho$ : 電流에 수반하는 電荷

(1) (2) (3)式으로부터 正弦波인 경우에 해당 하는  $e^{j\omega t}$  를 代入하면 다음式으로 된다.

$$(\nabla - jwA) \times H = jw\mu H + J \tag{4}$$

$$(\nabla - jwA) \cdot H = 0 \tag{5}$$

$$(\nabla - jwA) \times E = -jw\mu H \tag{6}$$

$$(\nabla - jwA) \cdot E = \frac{\rho + A \cdot J}{\epsilon} \tag{7}$$

(4)(5)(6)(7)式으로 부터 運動媒質內에서의 變形된 Helmholtz equation 을 求해 보면 다음과

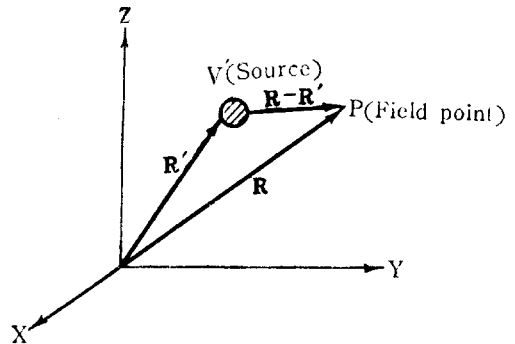


그림 1. 位置 Vector 關係  
Fig 1. Vectors for Ractiation field

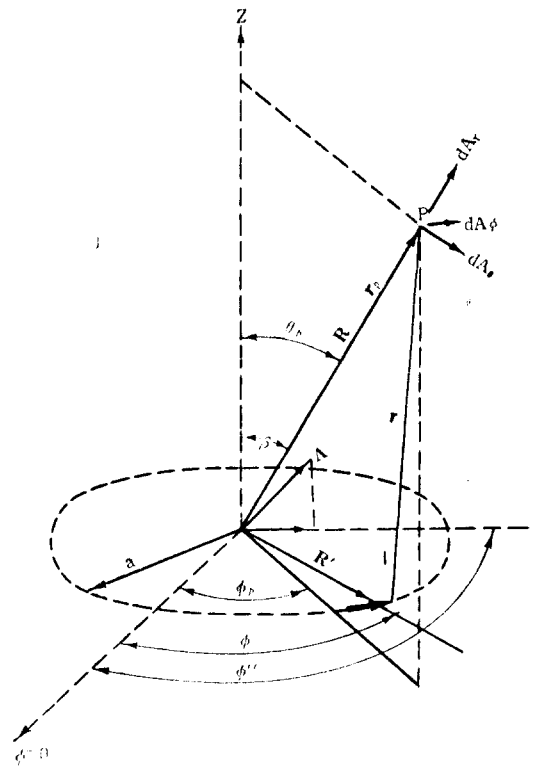


그림 2. 圓形루우프 안테나  
Fig 2. Circular Loop Antenna

같다.

$$(\mathbf{A} - j\omega\mathbf{A}) \times (\mathbf{A} - j\omega\mathbf{A}) \times \mathbf{E} + k^2\mathbf{E} = -j\omega\mu\mathbf{J} \quad (8)$$

$$\text{但 } k = \omega\sqrt{\mu\varepsilon}$$

(8)式的 解는 다음式으로 주어진다. 2, 3, 4)

$$\mathbf{E}(\mathbf{R}) = -j\omega e^{j\omega\mathbf{A}\cdot\mathbf{R}} \left( \mathbf{A} + \frac{\mathbf{V}\mathbf{V}\cdot\mathbf{A}}{k^2} \right) \quad (9)$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{R}) = \frac{e^{j\omega\mathbf{A}\cdot\mathbf{R}}}{\mu} \mathbf{V} \times \mathbf{A} \quad (10)$$

여기서  $\mathbf{A}$ 는 運動媒質內에서의 Vector potential 이며 다음과 같다.

$$\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \frac{e^{-j\omega\mathbf{A}\cdot\mathbf{R}'} \mathbf{J}(\mathbf{R}') e^{-jk|\mathbf{R}-\mathbf{R}'|}}{|\mathbf{R}-\mathbf{R}'|} dV' \quad (11)$$

여기서  $v'$ 는 Current Source 의 空間分布體積 이다.

### 3. 運動媒質內에서 Circular loop Antenna 의 電磁界式 유도

loop Antenna 의 電流分布로  $I(\phi) = I \sin n\phi$  인 경우에 對하여 電磁界  $\mathbf{E}$  및  $\mathbf{H}$  를 求하기로 한다  
그림 2에서 ※ ↗

式 (12)(14)(15)(16)부터  $dA, dA_\theta, dA_\phi$  는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} dA_\phi &= \frac{\mu a}{4\pi r_p} \cos \phi' I(\phi) e^{j(\omega t - kr_p)} e^{j r' \cos \phi'} e^{-j\mathbf{A}\cdot\mathbf{R}'} d\phi' \\ &= \frac{\mu a I}{j16\pi r_p} e^{j(\omega t - kr_p)} [e^{jn\phi_p} \{e^{j(n+1)\phi'} + e^{j(n-1)\phi'}\} - e^{-jn\phi_p} \{e^{-j(n-1)\phi'} + e^{-j(n+1)\phi'}\}] \\ &\quad e^{j(r' \cos \phi' - \omega\mathbf{A}\cdot\mathbf{R}')} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{但 } r' = ka \sin \theta_p$$

$$\begin{aligned} dA_r &= -\frac{\mu a}{4\pi r_p \sin \theta_p} I(\phi) \sin \phi' e^{j(\omega t - kr_p)} e^{j r' \cos \phi'} e^{-j\mathbf{A}\cdot\mathbf{R}'} d\phi' \\ &= -\frac{\mu a I}{16\pi r_p \sin \theta_p} e^{j(\omega t - kr_p)} [e^{jn\phi_p} \{e^{j(n-1)\phi'} - e^{j(n+1)\phi'}\} + e^{-jn\phi_p} \{e^{-(n-1)\phi'} - e^{-j(n+1)\phi'}\}] \\ &\quad e^{j(r' \cos \phi' - \omega\mathbf{A}\cdot\mathbf{R}')} \end{aligned} \quad (18)$$

$$dA_\theta = -\frac{\mu a \cos \theta_p}{4\pi r_p} \sin \phi' I(\phi) e^{j(\omega t - kr_p)} e^{j r' \cos \phi'} e^{-j\mathbf{A}\cdot\mathbf{R}'} d\phi' \quad (19)$$

따라서 全 loop 電流에 依한  $P$  點의 Vector potential 은 (17) (18) (19)式을 積분하면 다음과 같이 求할 수 있다.

$$\begin{aligned} A_\phi &= \int_{-\pi}^{\pi} dA_\phi \\ &= \frac{j^{(n+1)} \mu a I}{4r_p} e^{j(\omega t - kr_p)} [J_{n+1}(z) \sin \{n\phi_p + (n+1)\alpha\} - J_{n-1}(z) \sin \{n\phi_p + (n-1)\alpha\}] \end{aligned} \quad (20)$$

$$A_r = \int_{-\pi}^{\pi} dA_r = -\frac{j^{(n-1)} \mu a I}{4r_p \sin \theta_p} e^{j(\omega t - kr_p)} [J_{n-1}(z) \cos \{n\phi_p + (n-1)\alpha\} + J_{n+1}(z) \cos \{n\phi_p + (n+1)\alpha\}] \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \nearrow \phi' &= \phi - \phi_p, \quad \phi = \phi' + \phi_p \\ I(\phi) &= I \sin n\phi = I \sin n(\phi' + \phi_p) \end{aligned} \quad (12)$$

媒質速度를 表示하는 Vector  $\mathbf{A}$  는 다음과 같이 loop 面에 수직인 成分과 수평인 成分으로 分離하여 表示한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{A} &= (\varepsilon\mu - \varepsilon_0\mu_0)\mathbf{v} = (\Lambda\beta\phi'') \\ &= k\mathbf{A} \cos \beta + i\mathbf{A} \sin \beta \end{aligned} \quad (13)$$

但  $k\mathbf{i}$  는 loop 面에 수직 및 수평인 成分의 unit vector 이다.

그림 2에서 微少電流素  $I(\phi)dl$  에 依한  $P$  點의 Vector potential 은 (11)式으로부터

$$d\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{e^{-j\omega\mathbf{A}\cdot\mathbf{R}'} I(\phi) a e^{-jk|\mathbf{R}-\mathbf{R}'|}}{|\mathbf{R}-\mathbf{R}'|} d\phi' \quad (14)$$

그림에서  $|\mathbf{R}-\mathbf{R}'| = r = r_p - a \sin \theta_p \cos(\phi - \phi_p)$  電流分布가 全 loop 를 通하여 均一하지 않으므로 球座表로 表示하면  $d\mathbf{A}$  는 다음과 같다. 즉

$$d\mathbf{A} = a_r dA_r + a_\theta dA_\theta + a_\phi dA_\phi \quad (15)$$

但  $a_r, a_\theta, a_\phi$  는 各各 球座表의 unit vector 이다.

$$= |d\mathbf{A}| \left( -a_r \frac{\sin \phi'}{\sin \theta_p} - a_\theta \sin \phi' + a_\phi \cos \phi' \right) \quad (16)$$

$$A_\theta = \int_{-\pi}^{+\pi} dA_\theta = - \frac{j^{(n-1)} \mu a I \cos \theta_p}{4r_p} e^{j(\omega t - kr_p)} [J_{n-1}(z) \cos\{n\phi_p + (n-1)\alpha\} + J_{n+1}(z) \cos\{n\phi_p + (n+1)\alpha\}] \tag{22}$$

여기서  $J_{n+1}(z)$ ,  $J_{n-1}(z)$ , 는 第一種 Bessel 函數  $z$ , 및  $\alpha$  는 다음과 같다.

$$e^{j(r' \cos \phi' - w\Lambda R')} = e^{j\{\sqrt{A^2 + B^2} \cos(\phi' - \alpha)\}} \tag{23}$$

但  $A = r' - w\Lambda r \cos(\phi_p - \phi'')$

$B = w\Lambda r \sin(\phi_p - \phi'')$

$\alpha = \tan^{-1} \frac{B}{A}$

$r' = ka \sin \theta_p, r = a \sin \beta$

(23)式의  $\Lambda \cdot R'$ 에서  $R'$ 는 loop 面內에 位置한 Vector 이므로  $\Lambda$  를 loop 面에 수직인 성분과 平行인 성분으로 分離하면 (13)式부터  $A = i\Lambda \sin \beta + K\Lambda \cos \beta$

$\Lambda \cdot R' = i\Lambda \sin \beta \cdot R', \Lambda K \cos \beta \cdot R' = 0$  이다.

따라서 媒質의 速度成分中 loop 面에 수직인 速度成分에는 無關하고 平行成分에만 關係된다.

運動媒內에서의 Vector potential 式으로 求한 (20) (21) (22)로부터 媒質速  $v=0$  즉  $\Lambda=0$ 를 代入하여 靜止媒質에 對한 Vector potential 式을 유도해 보면 다음과 같다. 즉

$$A_\theta = \frac{j^{(n+1)} \mu a I}{4r_p} e^{j(\omega t - kr_p)} \{J_{n+1}(z) - J_{n-1}(z)\} \sin n\phi_p \tag{24}$$

$$A_r = - \frac{j^{(n+1)} \mu a I}{4r_p \sin \theta_p} e^{j(\omega t - kr_p)} \frac{2n \cos n\phi_p}{z} J_n(z) \tag{25}$$

$$A_\phi = - \frac{j^{(n+1)} \mu a I \cos \theta_p}{4r_p} e^{j(\omega t - kr_p)} \frac{2n \cos n\phi_p}{z} J_n(z) \tag{26}$$

이들 (24) (25) (26)式은 靜止媒質에 關해서만 求한 論文 (10)의 結果와 일치한다.

(20) (21) (22)式으로 求해진 運動媒質內에서의 Vector potential 을 (9) (10)式에 代入하면 運動媒質內의 電磁界式을 求할 수 있다. Far Field 에 對하여 電界의 式을 求해보면 다음과 같다.

$$E_\phi = -jw \frac{j^{(n+1)} \mu a I}{4r_p} e^{j\omega t} e^{jKr_p} [J_{n+1}(z) \sin\{n\phi_p + (n+1)\alpha\} - J_{n-1}(z) \sin\{n\phi_p + (n-1)\alpha\}] \tag{27}$$

$$E_\theta = jw \frac{j^{(n+1)} \mu a I \cos \theta_p}{4r_p} e^{j\omega t} e^{jKr_p} [J_{n-1}(z) \cos\{n\phi_p + (n-1)\alpha\} + J_{n+1}(z) \cos\{n\phi_p + (n+1)\alpha\}] \tag{28}$$

但  $K = W\Lambda \cos \varphi - k$   $\varphi$  는  $R$  와  $\Lambda$  와의 角임

$E_r$  도 같은 方法으로 求해진다.

### 4. 數值計算例와 Field pattern

(27) (28)式에 例로써 擇한定數를 代入하고 電子計算機 FACOM 230-15 로 數值計算을 한다. 數個의 수직 斷面에 對한 Field pattern 을 作圖하고저 한다.

媒質速度에 關係된定數  $wr\Lambda = w\Lambda a \sin \beta = ka \frac{w\Lambda}{k}$   $\sin \beta$  는 0.5와 0.3을 擇하였다. <sup>4, 6, 8, 14</sup>

또 Circular loop Antenna 의 直徑과 印加電源의 波長이 對等한 程度를 考察하기 위하여

$ka = \pi$  로 놓았다.

媒質速度方向은 例로써 그림 2에서  $\phi'' = 45^\circ$  方向으로 잡고,  $n=2$  때  $\phi_p$  의 여러값에 해하는 수직斷面內의 Field intensity 를 計算하였으나 여기서는 代表的으로  $\phi_p = 45^\circ, \phi_p = 90^\circ$  의 수직斷面에 해당하는 Field pattern 만을 作圖하기로 한다. 그림 3에서  $W$  는

$W = w\Lambda r = w\Lambda a \sin \beta = ka \frac{w\Lambda}{R} \sin \beta$  로써 값은

前述한 바와 같이 0.5, 0.3, 0, 0로 擇하였다. 그림 3(a)는  $\phi'' = 45^\circ, \phi_p = 45^\circ$  인 경우 즉 媒質速度와 같은 方向의 수직斷面內에서의  $E_\phi$  의 Re-

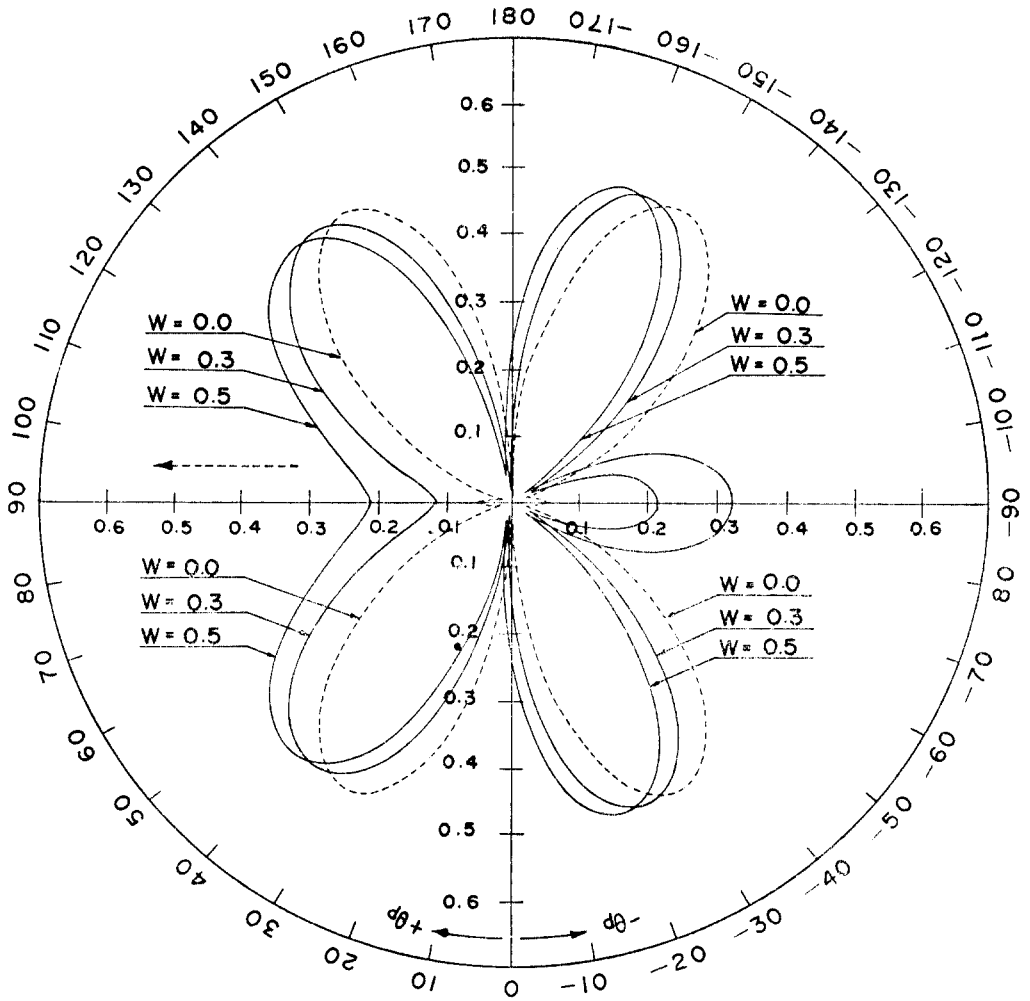


Fig 3(a)  $E_{\phi}$

그림 3(a) 수직면 ( $\phi_p=45^\circ$ )內的  $E_{\phi}$ -Field pattern  
 Fig 3(a) Relative Field pattern for  $E_{\phi}$  ( $\phi_p=45^\circ$ )

relative Field pattern 이다. 이 pattern 을 考察해 보면 最大放射指向性方向이 媒質速度方向으로 移動되고 速度方向과 反對方向으로는 Field intensity 가 증가된것을 볼 수 있다.

그림 3(b)는  $\phi''=45^\circ$ ,  $\phi_p=90^\circ$ 인 경우 즉 媒質速度方向과 수직斷面이  $45^\circ$ 角을 유지하는  $\phi_p=90^\circ$ 에 해당하는 수직斷面內에서  $E_{\phi}$ 에 對한 Relative Field patten 이다.

여기서도 最大放射指向性의 方向이 媒質速度方向 쪽으로 移動되고 Field pattern 의 最大値는 速

度方向쪽에서 감소하고 反對方向에서 증가하는 현상을 볼 수 있다.

### 5. 結 論

本論文에서는 運動媒質內에서 Circular loop Antenna 의 크기가 波長과 同等程度이거나 그 이상인 때의 放射指向性을 電流分布가 正弦波 standing wave 인 경우에 對하여 考察하였다.

考察結果로는 放射特性이 媒質速度의 影響을 받는다는 사실과 그 影響으로는 靜止媒質의 Ra-

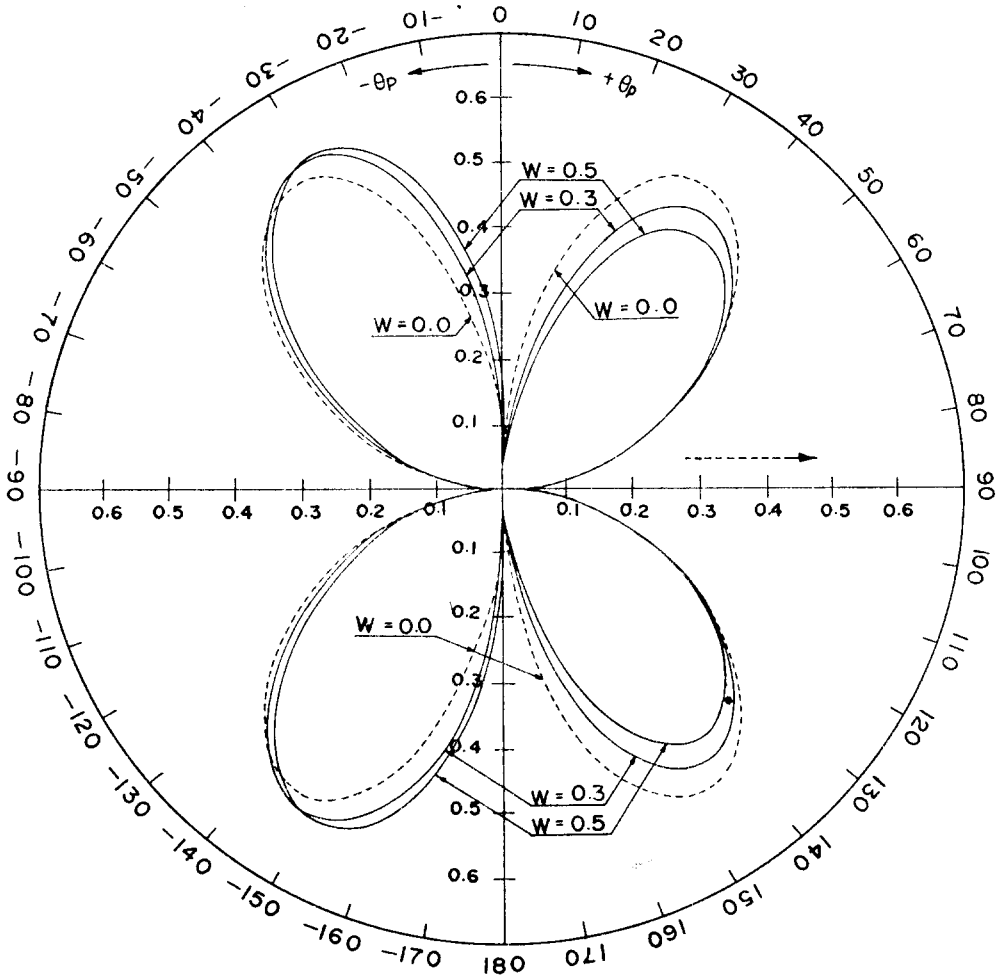


Fig 3(b)  $E_{\theta}$

그림 3(b) 수직면 ( $\phi_p=90^\circ$ )內的  $E_{\theta}$ -Field pattern

Fig 3(b) Relative Field pattern for  $E_{\theta}$  ( $\phi_p=90^\circ$ )

radiation pattern 과 比較하여 放射指向性은 媒質速度의 Antenna 平面에 平行인 速度成分에만 影響을 받고 수직성분에는 無關하며 Field pattern 의 最大指向性方向은 수평속도 成分方向으로 移動한다.

pattern의 크기는 媒質速度와 같은 方向에서 줄어 들고 反對方向에서 증가하게 된다. 또 이와 같은 運動媒質의 影響은 媒質速度가 높을수록 周波數가 높을수록 Antenna 의 직경이 클수록 더욱 현저하게 된다는 사실을 確認하였다.

끝으로 本論文은 仁荷大學校附設 産業科學技術

研究所 1971年度 研究計劃에 의한 것임.

### 參 考 文 獻

- 1) J.R. Collier and C. T. TAI: "Guided waves in moving media" IEEE Trans, MTT-13(July 1965)
- 2) R. T. Compton, and C. T. TAI: "Radiation from Harmonic Source a uniformly moving media" IEE Trans. AP-B (July 1965)
- 3) C. T. TAI: "The Dyadic Green's Function for a moving Isotropic medium" IEEE Trans. AP-B (March 1965)

- 4) 鹽澤俊之, 熊谷信昭, “運動媒質中における線状  
| | 의 放射特性” 電子通信學會誌 Vol. 50 No. 10  
(Oct, 1967)
- 5) Sommerfeld, : “Electrodynamics NY Academic  
1952 p. 280~283
- 6) 藤岡弘, 中川紀美雄: “運動している圓柱状プラズマ  
中のダイポールによる放射” 電子通信學會誌 Vol. 49  
(May, 1970)
- 7) Charles Hearch Papus: “Theory of Electroma-  
gnetic wave propagation” McGraw-Hill 1965
- 8) 藤岡弘, 熊谷信昭: “運動媒質中におけるアンテナア  
レイの放射特性” Vol. 49 (Aug 1966)
- 9) C. T. TAI: “A Study of Electrodynamics of mo-  
ving Media” Proc, IEEE Vol. 52 (June 1964) p.  
685~689.
- 10) E. J. MARTIN “Radiation Fields of Circular loop  
Antennas by a Direct Integration Process” IRE,  
Trans, AP Jann 1960
- 11) 鹽澤俊之, 河野啓生: “軸方向に運動している無限長  
丹柱による平面電磁波の散亂” 電子通信學會誌(1970  
7) Vol 53-B
- 12) 崔炳河: “運動媒質内에서의 Circular loop Antenna  
의 放射特性” 電子工學會誌 第7卷 第3號(1970. 11)