

완전도체구의 산란특성

Bistatic Scattering Cross-Section of a Spherical Conductor

우 종 명

Jong-Myung Woo

요 약

천정에 부착한 구상 리플렉터와 송수신 공용 양선 원편파 안테나를 조합하여 옥내무선통신망을 실현하려 한다. 먼저, 시스템 실현에 앞서, 본 논문에서는 도체구의 산란패턴을 벡터 구파동함수를 이용한 계산 및 실측한 결과 후방산란영역(이하 명영역이라 칭함)에서 안정한 전(全)방향 산란레벨 유지를 확인하였으며 13 dB 이상의 편파분리도도 확보되었다. 따라서 완전도체구의 명영역 전(全)방향 산란특성을 기반으로 구상 리플렉터가 제안한 옥내무선통신시스템에 유효함을 확인했다.

Abstract

In-Building communication network is realized by spherical reflector installed on the ceiling and a pair of circularly polarized antennas. Before realizing the system, the scattering characteristics of a spherical conductor is computed and experimented.

In this paper, the computational results using vector spherical wave equation and experimental results of the scattering characteristics of a spherical conductor are discussed. From the results, the omnidirectional scattering level is confirmed and polarity difference over 13 dB is ensured in light region. With the base on omnidirectional scattering pattern of spherical conductor in light region, spherical reflector is effectable in as Wireless In-Building communication network.

I. 서 론

최근 Building 옥내 무선 LAN(Local Area Network) 시스템이 주목받고 있다. 전송의 직진성, 광대역화의 면에서 사용주파수를 마이크로파대로 한정했을 시 통신로가 되는 전반상의 사람 이동이나 집기 등에 의한 차폐가 계의 안정성을 방해하게 된다. 먼저 그림 1에 나타난 바와 같이 직접파

에 의한 통신을 확보하기 위해 벽면(천정)에 설치한 구상 리플렉터, 송수신 공용 양선 원편파 안테나를 도입한 옥내통신용 안테나 시스템(주파수 : 9.375 GHz)을 실현하고자 한다. 위와같은 시스템을 실현하기 위해 완전도체구의 산란특성을 벡터 구파동함수에 의한 완전해를 이용하여 계산하였다. 따라서, 본 논문에서는 벡터 구파동함수에 의한 완전도체구의 산란특성 계산시 필요한 함수의 수렴성을 조사하고, 실험시스템의 정확성을 확보하기 위해

충남대학교 전파공학과(Dept. of Radio Sciences and Engineering, Chungnam Nat'l Univ.)

· 논문 번호 : 980108-003

· 수정완료일자 : 1998년 5월 12일

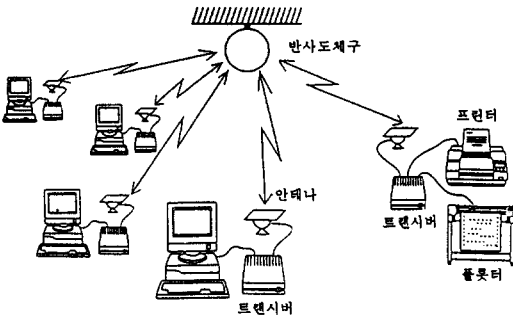


그림 1. 옥내무선통신시스템

Fig. 1. Wireless in-building communication system.

레이다산란단면적을 계산, 실측, 비교했으며 직선편파 및 원편파에 대한 산란전계 계산치 및 실측치를 비교하였다.

II. 본 론

2-1 벡터 구파동함수에 의한 산란전계

그림 2에 나타낸 바와 같이 일정의 평면파가 x축

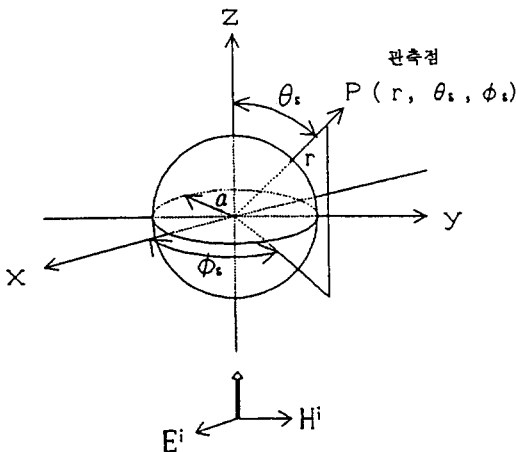


그림 2. 좌 표 계

Fig. 2. Uniform plane wave incident on a conducting sphere.

으로 편파되어져 z축으로 진행한다고 가정한다. 입사파의 전계 E^i 는

$$E^i = \hat{a}_x E^i = \hat{a}_x E_0 e^{-j\beta z} = \hat{a}_x E_0 e^{-j\beta r \cos\theta_s} \quad (1)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 β 는 위상정수이다.

완전도체구의 경계조건을 만족하는 입사파에 의한 원방계 산란전계는 다음 식으로 표현된다^[1].

$$E_{\theta}^s = jE_0 \frac{e^{-j\beta r}}{\beta r} \cos\phi_s \sum_{n=1}^{\infty} j^n \left[b_n \sin\theta_s P_n^1(\cos\theta_s) - c_n \frac{P_n^1(\cos\theta_s)}{\sin\theta_s} \right] \quad (2a)$$

$$E_{\phi}^s = jE_0 \frac{e^{-j\beta r}}{\beta r} \sin\phi_s \sum_{n=1}^{\infty} j^n \left[b_n \frac{P_n^1(\cos\theta_s)}{\sin\theta_s} - c_n \sin\theta_s P_n^1(\cos\theta_s) \right] \quad (2b)$$

여기서,

$$a_n = j^{-n} \frac{(2n+1)}{n(n+1)}, \quad b_n = -a_n \frac{\hat{J}_n'(\beta a)}{\hat{H}_n^{(2)'}(\beta a)},$$

$$c_n = -a_n \frac{\hat{J}_n(\beta a)}{\hat{H}_n^{(2)}(\beta a)},$$

$$\hat{J}_n(\beta a) = \beta a j_n(\beta a)$$

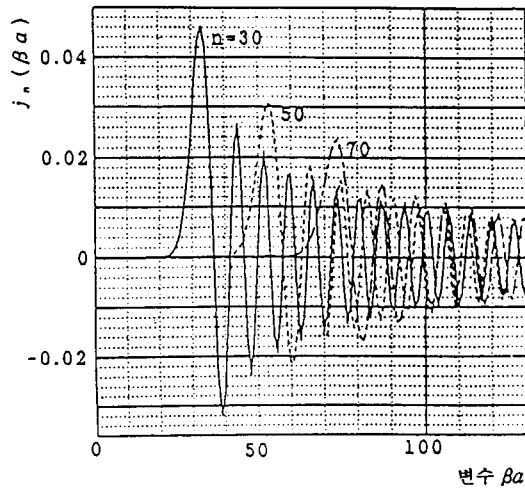
$$\hat{H}_n^{(2)}(\beta a) = \beta a h_n^{(2)}(\beta a)$$

λ : 파장, β : 위상정수, j_n : Spherical Bessel 함수
 h_n : Spherical Hankel 함수,
 P_n^1 : Associated Legendre 함수, ' : 변수에 관한 미분이다.

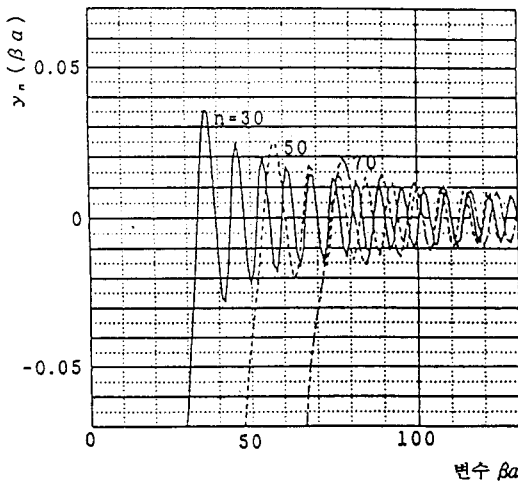
2-2 벡터 구파동함수에 있어서 급수의 수렴성

본 시스템에서 전술한 바와 같이 직경이 파장보다 큰 도체구에 의한 산란계를 수치 계산할 시, 먼저 Spherical Bessel 함수, Spherical Neumann 함수의 수렴성과 Associated Legendre 함수의 값

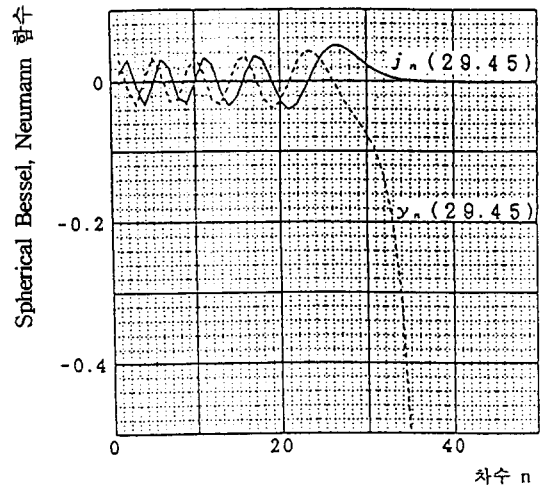
이 바르게 얻어졌는가를 확인할 필요가 있다. 그림 3(a), (b)에 표시한 바와 같이 차수 n 이 30, 50, 70 일 때, 변수 βa 의 변화에 의한 Spherical Bessel 함수, Spherical Neumann 함수의 계산^[2]을 했다. 계산결과 Spherical Bessel 함수의 경우, 각각 차수 n 에 있어서 변수 βa 가 변화했을 시 $n > \beta a$ 에서는 $j_n(\beta a) \doteq 0$ 을 유지하지만 $n < \beta a$ 에서 $j_n(\beta a)$ 가 진동 파형을 갖게 되는 특성이 인정된다. Spherical Neumann 함수의 경우, $n > \beta a$ 에서는 큰 -값을 취하지만 $n < \beta a$ 에서 진동 파형을 나타낸다. 이들의 특징을 토대로 그림 3(c)에 나타낸 바와 같이



(a)



(b)



(c)

그림 3. Spherical Bessel, Neumann 함수의 수렴성
Fig. 3. Convergence of the Spherical Bessel, Neumann function.

본 시스템에서 채용하고자 하는 반경 15cm인 완전 도체구에 대하여 차수 n 을 변화시키면서 Spherical Bessel, Spherical Neumann 함수의 계산을 했다. 그 결과 차수 n 이 변수 βa 보다 크게됨에 따라 Spherical Bessel 함수는 0으로, Spherical Neumann 함수는 $-\infty$ 로 근접하는 것을 확인했다. 예를 들어 차수 $n=50$, 변수 $\beta a=29.45$ 일 때, Spherical Bessel, Spherical Neumann 함수의 값은 각각 1.27×10^{-9} , -3.25×10^5 이 된다. 한편 계수 $|b_n|$, $|c_n|$ 의 수렴성(그림 4)은 진동을 계속 반복하고 그들의 절대치는 절감하며, 변수 βa 보다 큰 범위에 있어서 0으로 수렴한다. 그 결과 도체구에 의한 산란계를 계산할 경우 Spherical Bessel, Spherical Neumann 함수로 구성되어져 있는 계수 b_n , c_n 에 대하여, 급수합 $n > \beta a$ 를 필요로 하는 것을 알 수 있다. 예를 들어 $n=50$, $\beta a=30$ 일 때 $|b_n|$, $|c_n|$ 은 각각 7.26×10^{-16} , 6.98×10^{-16} 이 된다.

Associated Legendre 함수의 계산에는 당초 문헌^[3]의 Subroutine을 이용했지만 이 경우, 차수 $n > 20$ 에서는 변수에 따라 바르지 못한 값이 얻어지

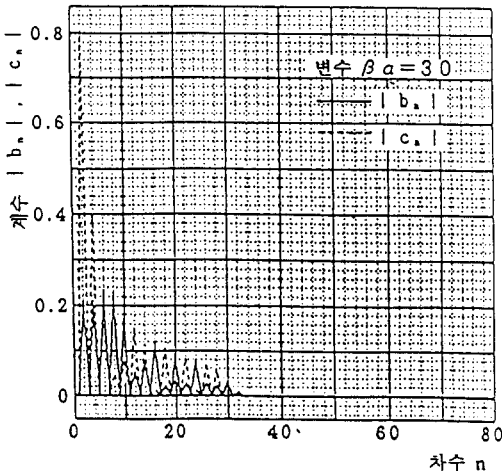


그림 4. 계수 $|b_n|$, $|c_n|$ 의 수렴성

Fig. 4. Convergence of the coefficients $|b_n|$ and $|c_n|$.

는 경우가 생겼다. 예를 들어 $P_n^1(0.0001)$ 은 0이 출력되고 $P_n^1(0.5)$ 및 $P_n^1(0.9999)$ 는 $-\infty$ 가 되어 본래의 Associated Legendre 함수의 특성이 얻어지지 않았다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 계수 b_n , c_n 의 수렴성을 확보하기 위해 차수를 변수보다 충분히 크게 취하지 않으면 안된다. 이와 같은 조건에서 정확한 Associated Legendre 함수를 계산하기 위해 Associated Legendre 함수를 다음과 같이 점화식으로 전개하여 이 계산에서 필요로 하는 $P_n^1(\cos\theta)$ Subroutine을 작성했다.

$$x = \cos\theta \quad (3a)$$

$$\frac{P_0^1(x)}{\sin\theta} = 0.0 \quad (3b)$$

$$\frac{P_1^1(x)}{\sin\theta} = 1.0 \quad (3c)$$

$$\frac{P_2^1(x)}{\sin\theta} = 3x \quad (3d)$$

$$\frac{P_n^1(x)}{\sin\theta} = \frac{(2n-1)x \left[\frac{P_{n-1}^1(x)}{\sin\theta} \right] - n \left[\frac{P_{n-2}^1(x)}{\sin\theta} \right]}{n-1} \quad (3e)$$

또한 식 (2a), (2b) 중의 Legendre 관련 식을

$$\sin\theta \frac{dP_n^1(x)}{dx} = (n+1) \frac{P_{n-1}^1(x)}{\sin\theta} - nx \frac{P_n^1(x)}{\sin\theta} \quad (4)$$

로 하여 계산에 이용했다.

Associated Legendre 함수의 계산결과를 그림 5에 나타냈다. 이 함수의 특징은 0축을 중심으로 진동하고, $\cos\theta$ 가 1근처의 극대치 진폭이 최대를 나타낸다. 또한 n 이 크게됨에 따라 진동횟수는 $n/2$ 에서 증가하고, 극대치도 증가한다. 이 결과로부터 Associated Legendre 함수의 진동을 이해할 수 있다.

이상의 결과를 이용하여 파장보다 큰 구도체에 의한 산란계를 수치 계산할 수 있고, 구반경 15 cm인 실제의 계산에 있어서는 차수 n 을 80까지 했다.

계산결과를 그림 6에 나타낸다. 여기서 각도 θ 는 후술할 실험시 이용한 각도설정과의 정합 때문에 입사각도를 0° 표시했다. 그림은 전방산란레벨 최대치로 정규화했다. 그림에 나타낸바와 같이 산란레벨은 명영역에 있어서 균등한 산란레벨을 유지하지만 전방산란영역(이하 음영역이라 칭함)으로 감에

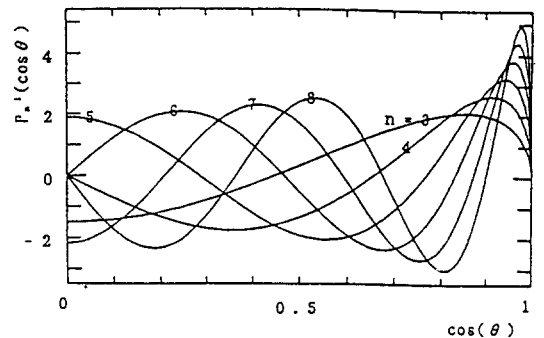


그림 5. Associated Legendre 함수

Fig. 5. Characteristics of the associated Legendre function.

따라 산란레벨이 높고, 입사와 정반대방향 즉, 180° 방향에서 최대산란레벨을 나타내고 있다. 이것은 도체구의 각 미소 면적상에서 유기하는 $e^{jk\cos\theta}$ 되는 위상분포에 의해 여진된 구 각상 개구면 안테나의 방사패턴과 동일하다고 생각할 수 있다. 즉, 전방산란에 대해서는 면상분포의 위상이 전부 일치하고, πa^2 의 면적을 갖는 개구면 안테나의 방사패턴이 되고, 후방산란에 대해서는 구면상에 분포한 위상분포가 거의 반파장마다 서로 소멸되어 평균되어진 저 레벨의 Backlobe가 되어 나타난다고 해석할 수 있다.

E_θ^s (그림 6(a))는 산란각도가 크게됨에 따라 $\pm 90^\circ$ 부근에서 Ripple 변동(약 ± 0.4 dB)가 생기기 시작하고, 음영영역으로 감에 따라 크게되지만 E_ϕ^s (그림 6(b))는 명영역에서는 안정한 산란레벨을 유지하고, 음영영역에서 약간 Ripple 변동이 생겨 E_θ^s 보다 Ripple 변동이 작다.

다음으로 그림 7에 원편파 산란패턴을 나타낸다. 정선원편파(정선이란 우선으로 송신해서 좌선으로 수신한 경우이고, 역선이란 우선으로 송신, 우선으로 수신)의 경우(그림 7(a))도 $\pm 90^\circ$ 부근에서 약간 Ripple 변동(± 0.2 dB)이 나타나고 있지만, 명

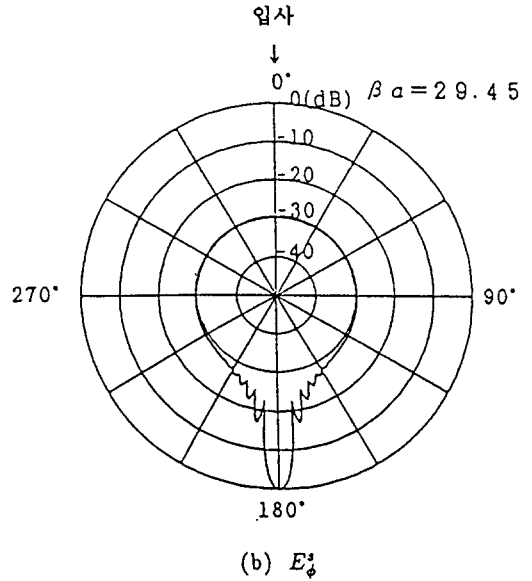


그림 6. 도체구에 의한 직선편파 산란패턴

Fig. 6. Scattering pattern of a linearly polarized wave from a conducting sphere.

영역에 있어서 안정한 산란레벨을 유지하고 있다. 그 결과 E_θ^s , E_ϕ^s 의 레벨 차에 기인하는 명영역에서 역선원편파 산란레벨(그림 7(b))은 거의 나타나지 않고, 도체구의 경우 -60° 로부터 60° 사이에서 20 dB 이상의 편파분리를 확보하고 있다. 음영영역으로 감에 따라 역선원편파 산란레벨이 증가하지만 이것은 E_θ^s , E_ϕ^s 의 Ripple 차에 기인한 것이다.

2-3 레이다산란단면적

도체구에 의한 Bistatic 산란특성 측정에 앞서, 실험계의 측정정밀도 평가를 하였다. 기본이 되는 레이다산란단면적 이론계산은 식 (5)

$$\sigma_{sph} = \lim_{r \rightarrow \infty} \left[4\pi r^2 \frac{|E^s|^2}{|E^i|^2} \right] = \frac{\lambda^2}{4\pi} \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (2n+1)}{\hat{H}_n^{(2)'}(\beta a) \hat{H}_n^{(2)}(\beta a)} \right|^2 \quad (5)$$

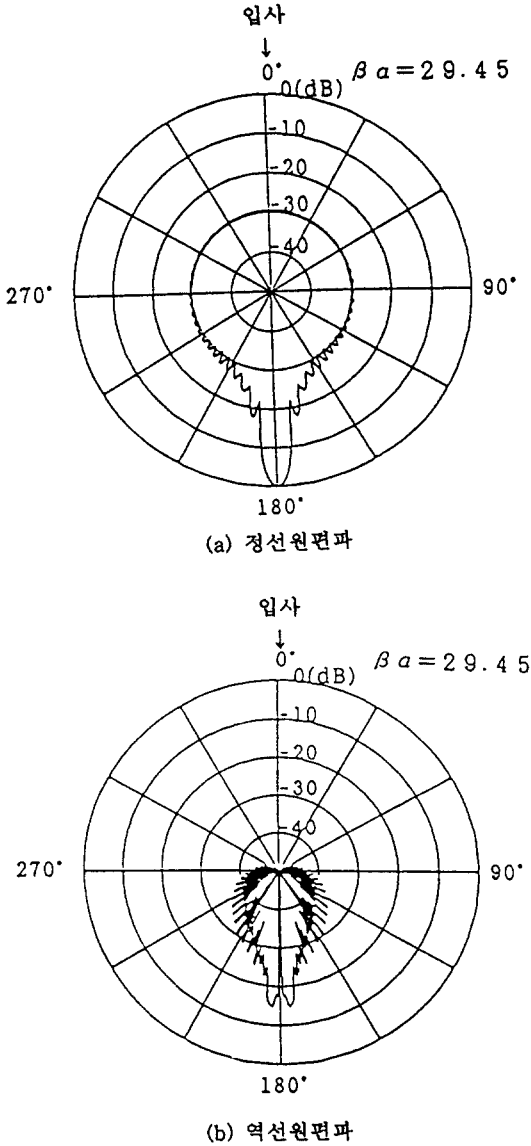


그림 7. 도체구에 의한 원편파 산란패턴
 Fig. 7. Scattering pattern of a circularly polarized wave from a conducting sphere.

을 이용하여 하고, 실측은 그림 8에 표시한 측정계로 하였다. 측정주파수는 9.375 GHz(파장 3.2 cm)이다. Signal generator로부터의 출력은 방향

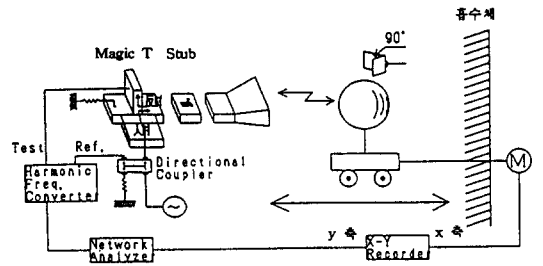


그림 8. 레이더 산란단면적 측정계
 Fig. 8. Measurement system for the monostatic radar cross section of a conducting sphere.

성결합기를 거쳐 Magic T 및 Network analyzer의 Harmonic coupler 기준단자에 입력하고, 산란체로 향해 안테나로부터 방사된다. 목표물로부터의 반사파는 Magic T의 E분기 출력단으로부터 출력되어 Harmonic coupler의 Test 단자를 거쳐 2개의 파가 Network analyzer로 입력된다. 그 진폭(dB linear)을 X-Y record의 y축에, 목표물을 이동했을 시의 이동거리(0~30 cm 또는, 0~9.4 λ)를 x축에 대응시켜 data를 기록한다. 이것은 측정시에 혼입하는 주위방사의 영향을 분리 식별기 위해서이다^[4]. 이때 안테나, 도파관 접합부에서 생기는 반사를 최대 억제키 위해 data를 취하기 전에 목표물을 제거한 상태에서 Stub를 조정하고, 공간에 대한 계의 정합을 취한다.

측정시, 레이더단면적의 기준으로써 도체평판(2.2λ × 2.2λ)를 채용했다. 측정치와 계산치를 그림 9에 나타낸다. 그림으로부터 계산치와 실측치는 양호하게 일치하고 측정계의 타당성 및 그 정도가 충분히 확보되어 있다고 판단된다.

2-4 Bistatic 산란단면적

산란패턴 측정계를 그림 10에 나타낸다. 구반경은 15 cm, 측정주파수는 9.375 GHz이고, 송수신안테나는 원편파 코니칼 혼 안테나를 채용했다.

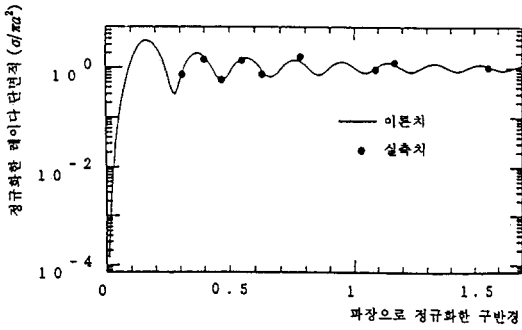


그림 9. 레이다산란단면적

Fig. 9. Normalized monostatic radar cross section of a conducting sphere as a function of its radius.

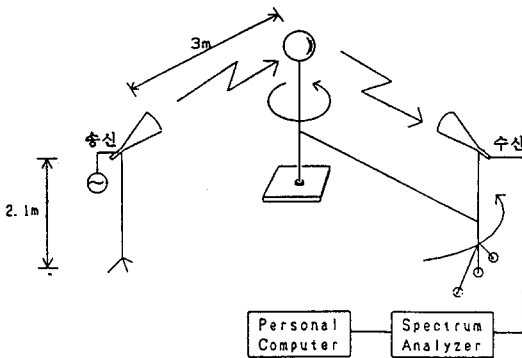


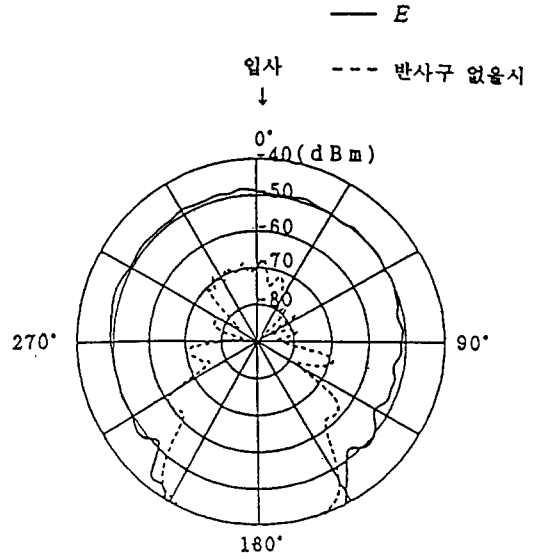
그림 10. 산란패턴 측정계

Fig. 10. Measurement system for a scattering pattern.

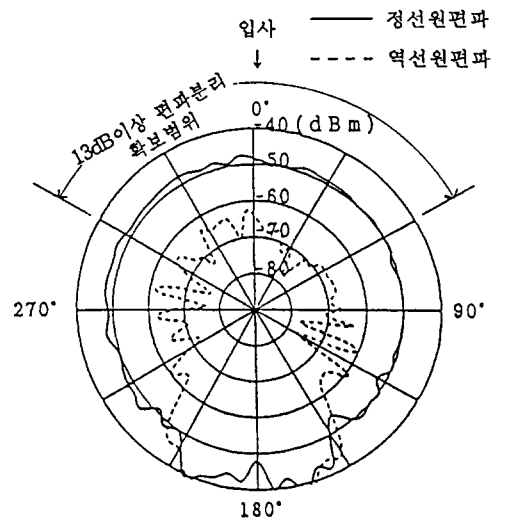
측정은 송신안테나(빔폭 10°)를 고정하고, 수신안테나를 반시계 방향으로 5°씩 회전시키면서 data를 취했다. 이때, 송수신안테나와 도체구간의 거리는 3 m, 송신전력은 직선편파(E_{θ}^s) 0.5 dBm, 원편파(정선, 역선) 1.6 dBm 이고 안테나이득은 약 22 dB였다. 측정결과를 그림 11에 나타낸다. 여기서 입사방향을 0°로 설정하고, 이론치는 명영역에서의 정선원편파 실측평균치로 정규화한 결과이고, 실측

치와 입사방향을 일치시키기 위해 180° 회전한 결과가 된다.

E_{θ}^s (그림 11(a))는 이론치(그림 6(b))와 동일하게 전영역에서 안정한 산란레벨을 유지하고, 명영역에 있어서 노이즈레벨에 대하여 약 20 dB Dynamic range를 확보하고 있다. 그림의 점선은 반



(a) E_{θ}^s



(b) 정선원편파

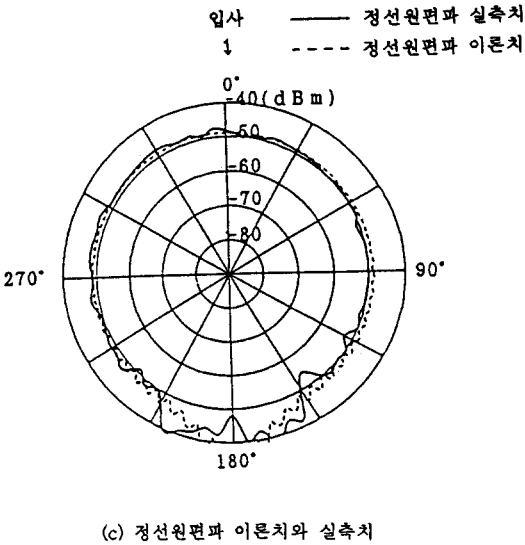


그림 11. 도체구에 의한 실측치 산란패턴
Fig. 11. Scattering pattern of a conducting sphere.

사구를 설치하지 않았을 시 송·수신 안테나간의 결합을 나타내고, $\theta=180^\circ$ 일때는 측정에서 송신안테나와 수신안테나가 서로 마주보게 되어, $R=2 \times 3$ m에서의 직접파 레벨을 나타내고 있다. 음영영역에서의 산란패턴이 넓어진 것은 반사구를 설치하지 않았을 때의 수신레벨과 비교한 결과 직접파와 산란파의 합성으로 생긴 것이라 판단된다. 정선원편파의 경우(그림 11(b)), 명영역에서 약간의 Ripple 변동이 인정되지만 이 영역 전체에 걸쳐 안정한 산란레벨을 유지하고 또한 역선 원편파 산란레벨과 13 dB 이상의 편파분리도를 확보($-60^\circ \sim 60^\circ$) 하고 있다. 음영영역에서 180° 방향의 정선원편파 산란레벨이 낮고, 역선원편파 산란레벨이 높게 된 것은 역시 직접파에 기인한다고 생각되어지며 오히려 이 레벨 차가 송수신 안테나의 편파식별을 나타내고 있다. 정선원편파에 대하여 실측치와 이론치를 비교(그림 11(c)) 한 결과 명영역에서 실측치가 이론치보다 약 ± 2 dB 정도 큰 Ripple 변동이 인정되지만, 실측치와 이론치 공히 이 영역에서 안정한 전

(全)방향 산란특성을 갖는다는 것이 확인됐다. 또한, 본 실험 시스템으로서는 180° 방향에서의 직접파 영향을 피할 수 없게 됐다.

III. 결 론

본 논문에서는 구상 리플렉터를 이용한 옥내무선 시스템을 제안하고, 완전도체구에 대한 산란특성 계산 및 실측을 하였다. 산란패턴 계산시 차수가 변수보다 크게됨에 따라 Spherical Bessel 함수는 0으로, Spherical Neumann 함수는 $-\infty$ 에 근접하며 따라서 계수 $|b_n|$, $|c_n|$ 는 0으로 수렴하는 것을 확인했다. 이와 같은 결과를 이용하여 구한 이론패턴은 명영역에서의 산란레벨차는 없고, 약 90° 이상으로부터 간섭무늬가 생겨 180° 에서 최대치가 되었다. 또한 실측패턴을 구하기 위해 앞서 실험계의 측정정밀도 평가를 위해 구한 레이다산란단면적은 벡터구과동함수에 의한 이론계산 및 실측치를 비교한 결과 잘 일치하며 측정계가 이상 없음을 보였다.

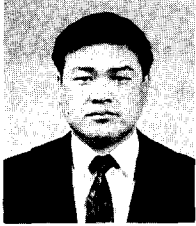
역에서의 산란레벨은 이 영역 전체에 걸쳐 안정한 산란레벨을 유지하며 역선원편파 산란레벨과 13 dB 이상의 편파분리도를 확보하고 있음이 확인됐다. 따라서 완전도체구의 명영역 산란특성은 제안한 무선통신시스템에서 천정에 부착한 구상 리플렉터를 이용하면 명영역인 옥내 전(全)방향에 균등한 산란레벨을 유지시킬 수 있다는 것이 확인됐다.

참 고 문 헌

- [1] Contantine A. Balanis, "Advanced engineering electromagnetics", Wie Wiley, pp. 650-658, 1989.
- [2] 小野寺嘉孝 외 2인, "Fortran77타よる數值計算ソフトウェア", 九善株式會社, pp. 30-32, 1989.
- [3] 酒卷恒一, "Fortranによる數值計算ハンドブック", 오ーム社, pp. 508-514, 1982.
- [4] 長谷部望, 清水富士未, 小林弘明, 三枝健二,

“UHFテレビ電波を用いた位相合成法による
材料の反射特性測定”, 信學論, vol. J69-13,
no. 5, 1986.

우 종 명



1985년 2월 : 건국대학교 전자공학과
공학사

1990년 2월 : 건국대학교 대학원 전
자공학과 공학석사

1993년 3월 : 일본, 니혼대학 전자공
학과 공학석사

1996년 3월 : 일본, 니혼대학 전자공학과 공학박사

1996년 9월~현재 : 충남대학교 전파공학과 전임강사

[주 관심분야] 안테나 및 전자파산란