

초고출력 안테나 시스템 급전용 좁은 빔폭의 다중모드 혼 안테나 설계에 관한 연구

이상훈^{0*}, 안지환^{*}, 윤영중^{*}, 소준호^{**}

연세대학교 전기전자공학과^{*}

국방과학연구소^{**}

saintfighter@yonsei.ac.kr

A Study on Design of Narrow Beamwidth Multimode Feed Horn Antenna for High Power Microwave Antenna System

Sang Heun Lee^{0*}, Jihwan Ahn^{*}, Young Joong Yoon^{*} and Joon Ho So^{**}

^{*}Department of Electrical & Electronic Engineering, Yonsei University, Korea

^{**}Agency for Defense Development, Korea

Abstract

In this paper, a modified multimode horn antenna is designed to have 142 mm horn aperture radius and 921 mm length in order to be safe under 100 MW peak pulse power at 3 cm wave length through breakdown phenomenon study that threshold field strengths for the air breakdown phenomena is decided to be 3.78 MV/m. The proposed antenna is measured gain over 27 dBi and the -25 dB beam width of 29° in vertical plane.

Key words : Multimode, Horn, Breakdown phenomenon, maximum directivity

1. 서 론

초고출력 응용 시스템에서는 대개, 100 MW 이상 높은 전력의 펄스 파를 이용하여 마이크로파 신호를 전송하기 때문에 정전파괴(breakdown) 문제를 해결하여야만 한다. 따라서, 한계 문턱 전계값 이하에서 동작하도록 혼 안테나의 개구 크기를 설정하여야 하며, 이러한 정전파괴 현상의 방지를 위해 자유공간에서의 RF 정전파괴 및 도체의 표면 정전파괴에 대한 고찰이 필요하다.

일반적으로 자유공간에서 DC 및 저주파 AC는 3 MV/m 이상의 전압(전계)을 갖을 경우에 절연체 파괴 현상이 일어나는 것으로 알려져 있으며, 이는 대기압의 조건에 따라 파셴 곡선(Paschen's curve)의 특징을 갖는다. 이러한 파셴 곡선의 정전파괴 문턱 전계값은 주파수 대역의 상승과 주변 기압의 변화에 따라 변화하는데, 전송하는 환경에 맞춰 문턱 전계값

의 1/3이 되는(안전도 3) 최대 전계가 개구 안테나의 개구상에 여기되도록 하는 것이 일반적이다[1].

따라서 이와같은 기준을 만족하는 최대이득의 원형 혼 안테나를 설계하여 HPM 급전 시스템으로 사용한다[2]. 하지만 전형적인 원형 혼 안테나를 사용할 경우 반사판의 크기가 5m가 되어 매우 크므로 소형화 방안에 대한 급전 시스템의 연구가 필요하다[3].

그러므로, 본 논문에서는 100 MW의 입력전력에서 효율적이고 안전한 방사를 위하여 우선적으로 3 cm의 파장과 100 ns의 펄스 폭을 갖는 RF 신호에서 정전파괴를 일으키지 않는 혼 안테나의 개구 반지름을 설정한다. 이후에 기존의 혼 안테나와 동일한 수준의 이득을 가지면서 원치 않는 방향으로의 방사되는 에너지 수준을 낮추기 위해 -25 dB 빔폭을 줄인 좁은 빔폭의 다중모드 혼 안테나를 모드 변환기의 출력을 고려하여 설계하고 제작하여 그 특성을 고찰한다.

2. 원형 혼 안테나 설계

2-1. 초고출력 급전 시스템의 구조

초고출력 안테나 시스템은 모드 변환기, 급전 혼 안테나, 반사판 안테나로 구성된다. 이때 모드 변환기의 입력은 초고출력용 전원부의 출력에 해당하며 모드의 형태는 TM_{01} 모드이다. 이러한 TM_{01} 모드는 직접 방사시 도우넛 형태의 패턴을 가지게 되어 이득이 감소하고 한 방향으로 에너지를 집중할 수 없게 된다. 따라서 모드 변환기를 통해 TM_{01} 모드에서 TE_{11} 모드로 변환하게 되고 이러한 모드 변환기의 출력은 혼 안테나의 입력이 되어 초고출력의 마이크로파를 반사판을 향해 방사하게 된다. 모드 변환기와 혼 안테나는 함께 급전 시스템을 구성하고 이러한 급전시스템의 방사패턴이 전체 초고출력용 안테나 시스템의 크기와 형태의 중요한 결정 요소가 된다. 안테나 시스템의 구성은 그림 1에 나타나 있다.

2-2. 급전 혼 안테나의 개구 크기

2-1. 절에서 언급한 급전 시스템은 초고출력의 마이크로파를 전송하는 과정에서 정전파괴 현상을 방지해야 한다. 정전 파괴 현상은 기압이 높을수록, 입력 전원 펄스의 폭이 클수록, 주파수가 낮을수록 발생하는 문턱 전계값이 낮아지기 때문에 잘 일어나게 된다. 입력 전원의 펄스 폭과 주파수의 크기는 전원부에 의해 결정되는 요소로 일반적으로 정전파괴 현상을 방지하기 위해서는 기압을 낮추는 진공처리 방식을 사용하게 된다. 따라서 정전파괴 현상을 방지하기 위해 초고출력 시스템에서는 전송되는 도파관과 모드 변환기, 혼 안테나의 내부를 진공처리하는 과정이 필요하다. 이러한 내부의 진공특성은 혼 안테나의 개구면에 RF 윈도우를 사용함으로써 얻을 수 있고 그 형태는 그림 2와 같이 구성된다[2].

급전 시스템의 내부 정전파괴 현상은 RF 윈도우를 사용함으로써 방지할 수 있으나 혼 안테나의 개구면에서 공기중으로 방사될때의 정전파괴 현상은 개구면의 크기를 조절함으로써 방지할 수 있게 된다. 이러한 개구의 크기 결정은 공기중의 정전파괴 값보다 작은 전계가 개구면에 걸릴 수 있도록 개구면의 크기를 키워주는 것을 의미한다. 먼저 공기중의 정전파괴현상이 일어나는 문턱 전계값을 구하는 과정이 필요한데 이 값은 파장이 3cm, 펄스폭이 100 ns, 그리고 표준대기압이 1 atm인 경우에 3.78 MV/m가 된다[2]. 따라서 자유공간으로 초고출력의 마이크로파 에너지가 전파할 경우 이보다 낮은 전계에서 동작하

도록 혼 안테나의 개구를 설정해야 한다.

혼 안테나의 개구면에 걸리는 전계의 세기를 구하는 방법은 다음과 같다. 먼저 TE_{11} 모드일 경우에 도파관내에 최대 전계의 크기는 다음과 같은 식으로 나타난다[1].

$$E_{WG_{peak}} = \sqrt{\frac{2P_{peak}Z_{TE_{11}}}{r}} \quad [V/m] \quad (1)$$

$$\text{여기서, } Z_{TE_{11}} = \eta_0 \frac{k}{\sqrt{k^2 - k_c^2}}, \quad k_c = \frac{P'_{mn}}{r},$$

$P'_{11} = 1.841$ 이다.

이때, 100 MW를 입력하면 $E_{WG_{peak}}$ 는 약 10.59 MV/m가 된다. 이것을 바탕으로 식 (2)에 의해 혼 안테나의 개구에서 최대 전계를 계산할 수 있다.

$$E_{horn-exit_{peak}} = E_{WG_{peak}} \sqrt{\frac{A}{A'}} \quad (2)$$

입력 전력의 값이 100 MW일 때 개구면에서 정전파괴가 일어나지 않으려면 $E_{horn-exit_{peak}}$ 값이 3.78 MW/m 보다 작도록 개구 크기인 A' 와 개구 반지름인 r' 을 결정해야 한다. 이러한 사양을 고려하여 r' 의 값을 구하면 140 mm 이상이 되어 최대 이득의 원형 혼 안테나를 설계하면 그림 3과 같은 형태를 얻을 수 있다[2].

2-3. 초고출력 원형 혼 안테나의 방사특성

그림 3과 같은 정전파괴를 고려한 최대 이득의 원형 혼 안테나는 모드 변환기와 연결되어 급전 시스템을 구성한다. 이때 사용된 모드 변환기는 변환효율이 높으며 정전파괴에도 견딜 수 있는 곡선형 직접 변환 방식의 모드 변환기를 사용한다[4]. 이렇게 구성된 급전 시스템에 TM_{01} 모드의 입력을 인가하면 약 95%의 전력 변환 효율을 가지는 모드 변환기에 의해 주로 TE_{11} 모드가 발생하며 그 이외에 고차모드인 TM_{01} 모드, 그리고 TE_{21} 모드가 함께 발생하게 된다. 이때 TM_{01} 모드 급전의 경우 모드 변환기와 혼 안테나를 연결한 급전 시스템에서 FIM 시뮬레이션 수행결과 나타난 반사 손실은 -24.82 dB, 방사 특성은 이득이 27.29 dBi이고 -25 dB 빔폭은 수직평면이 37.4° , 수평평면이 29.78° 가 되어 반사판 안테나의 부반사판은 가장자리 조사수준을 -25 dB로 하기 위해 38° 의 각도를 커버할 수 있는 크기가 되어야 함을 알 수 있다.

3. 다중모드 혼 안테나의 설계

3-1. 다중모드 혼 안테나

앞 절에서는 HPM용 반사판 급전 안테나로 사용하기 위해 설계한 원형 혼 안테나의 방사패턴에 대하여 분석해 보았다. 그러나 수직평면의 부엽 레벨이 높아서 전체적인 -25 dB 빔폭이 증가하게 되므로 전체적인 안테나 시스템이 커지는 단점이 발생한다. 이를 극복하기 위해서는 높은 이득을 유지하면서 부엽 레벨을 줄여 -25 dB 빔폭을 감소시키는 급전 안테나가 반드시 필요하다. 이때 방사패턴을 조절하기 위해 개구면에서 형성되는 모드의 비율을 조절하여 개구면 분포의 세기를 조절하는 방법이 있다. 이렇게 단일 모드가 아닌 다중모드를 사용하여 방사패턴을 조절하는 혼 안테나를 다중모드 혼 안테나라 한다 [5]. 본 절에서는 다중모드 혼 안테나를 이용하여 줄어든 -25 dB 빔폭의 방사패턴을 형성할 수 있음을 확인하고 이를 바탕으로 설계하여 방사 패턴을 분석해 본다. 또한 모드 변환기와의 연결을 통해 그 특성을 확인해 본다.

혼 안테나의 개구면에서 테이퍼된 전개 분포를 얻으면 방사되는 주빔의 빔폭은 증가하지만 부엽레벨의 빔폭이 줄어들어 전체적인 -25 dB 빔폭이 줄어들게 된다. 따라서 개구면에 테이퍼된 전개분포를 얻는 것이 중요한데 이는 TE_{11} 모드와 TM_{11} 모드의 조합으로 얻을 수 있다[5]. 이러한 조합은 혼 안테나의 입력부에 다중모드 발생부와 위상보정부를 두어 입력으로 TE_{11} 모드가 들어올 때 다중모드 발생부에서 TM_{11} 모드를 발생시키고 위상보정부를 통해 두 모드의 위상을 보정하여 개구면에서 동위상이 되도록 한다. 다중모드 혼 안테나의 구조는 그림 4와 같다. 이러한 이론을 바탕으로 정전파괴 현상을 방지하는 개구 반지름을 갖으며 가장 좁은 -25 dB 빔폭을 갖는 다중모드 혼 안테나를 그림 5와 같이 설계하였다. 이때 가장 좁은 -25 dB 빔폭을 가지는 혼 안테나의 개구면에서 발생된 최적의 모드 비율은 $TE_{11} : TM_{11} : TE_{12} = 71.2 : 23.3 : 5.5$ 이다. 여기서 TE_{12} 모드는 다중모드 발생부와 혼 안테나의 열림각에서 발생하는 모드로 그 값은 작지만 최적의 모드 비율을 찾기 위해 고려해야 할 모드이다.

설계한 다중모드 혼 안테나에 TE_{11} 급전을 넣으면 원형 혼 안테나보다 -25 dB 빔폭이 좁아지는 특성을 얻을 수 있다. FIM 시뮬레이션 수행결과 나타난 방사 특성은 이득이 27.92 dBi이고 -25 dB 빔폭은 수직평면이 17.96° , 수평평면이 28.88° 가 되어 반사판

안테나의 부반사판은 가장자리 조사수준을 -25 dB로 하기 위해 29° 의 각도를 커버할 수 있는 크기가 되어야 한다. 이 값은 원형 혼 안테나를 사용할 경우의 값보다 약 10° 가량 줄어든 값이 된다.

실제 초고출력 안테나 시스템의 경우 급전 시스템을 구성하여야 하므로 모드 변환기와 혼 안테나를 연결한 후 TM_{01} 모드 급전을 하였을 때의 방사패턴을 분석하여야 한다. 이때 TM_{01} 모드는 모드 변환기를 지나면서 약 95%의 TE_{11} 모드를 발생시키고 이외의 고차모드인 TM_{01} 모드와 TE_{21} 모드가 생성됨을 언급하였다. 이러한 고차모드들은 원형 혼 안테나로 방사시 개구면에서 큰 비율을 가지지 않지만, 다중모드 혼 안테나를 사용할 경우 다중모드 발생부에서 증폭되어 개구면에서는 그 값이 증가하여 전체적인 급전 시스템의 방사특성을 좋지 않게 하는 원인이 된다. 즉, 이득을 낮추고 부엽레벨을 증가시켜 전체적인 -25 dB 빔폭을 증가시킨다. 이러한 급전 시스템의 방사패턴을 FIM 시뮬레이션으로 분석한 결과 반사손실은 -28.80 dB, 이득이 26.78 dBi이고 -25 dB 빔폭은 수직평면이 38.52° , 수평평면이 41.80° 가 되어 반사판 안테나의 부반사판은 가장자리 조사수준을 -25 dB로 하기 위해 42° 의 각도를 커버할 수 있는 크기가 되어야 한다. 즉 원형 혼 안테나를 사용한 급전 시스템보다 성능이 더욱 떨어짐을 알 수 있다.

3-2. 좁은 빔폭의 다중모드 혼 안테나

앞절에서 설계한 다중모드 혼 안테나의 경우 불안정한 모드 변환기의 출력으로 인해 모드 변환기와 연결된 급전 시스템에서 TM_{01} 모드의 급전을 할 경우 실제 개구면에서는 원하는 형태의 테이퍼된 전개 분포를 얻을 수 없게 된다. 따라서 부엽레벨이 증가하고 결과적으로 전체적인 -25 dB 빔폭이 증가하게 된다. 이는 모드 변환기의 출력에 포함된 고차모드인 TM_{01} 모드와 TE_{21} 모드 때문에 발생하는 현상으로 이러한 고차모드를 제거하여 보다 높은 비율의 TE_{11} 모드가 혼 안테나로 유입될 수 있도록하는 추가적인 구조 변형이 요구된다. 이는 도파관의 반지름에 따른 고차모드의 차단효과를 이용하여 구현할 수 있는데 표 1에 나타난 것처럼 8.8 mm 이상 11.5 mm 이하의 반지름으로 TE_{11} 모드만 전송할 수 있음을 확인할 수 있다. 정전파괴현상을 방지하기 위해 허용범위 안에서 반지름이 클수록 좋으므로 반지름 11mm를 혼 안테나의 입력단에 추가한다. 그 결과 반지름 혼 안테나 입력단에 그림 6의 확대한 부분과 같은 구조를 삽입하여 변형된 형태의 다중모드 혼 안테나를

설계한다.

이러한 급전 시스템의 방사패턴을 FIM 시뮬레이션으로 분석한 결과 반사 손실이 -26.27 dB, 이득이 27.97 dBi이고 -25 dB 빔폭은 수직평면이 18.38° 수평평면이 28.94° 가 되어 반사판 안테나의 부반사판은 가장자리 조사수준을 -25 dB로 하기 위해 29°의 각도를 커버할 수 있는 크기가 되어야 한다. 이는 원형 혼 안테나를 사용한 급전 시스템과 입구에 변형을 주지 않은 다중모드 혼 안테나를 사용한 급전 시스템의 결과보다 개선된 결과임을 알 수 있다.

4. 측정 결과

앞서 분석한 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 비교하도록 한다. 구성된 급전 시스템의 방사패턴은 근거리 측정 시스템을 이용하여 측정하고 결과를 확인하였다. 측정은 먼저 원형 혼 안테나를 사용한 급전 시스템의 방사패턴을 측정하였고 이후에 다중모드 혼 안테나를 사용한 급전 시스템, 변형된 다중모드 혼 안테나를 이용한 급전 시스템의 방사패턴 결과를 측정하였다. 측정 결과는 그림 7, 8, 9에 나타나 있다. 방사패턴을 보면 전체적인 시뮬레이션 결과와 측정결과가 유사한 특성을 나타냄을 알 수 있다. 측정 결과를 정리하면 표 2의 결과와 같다. 측정 결과를 보면 수직평면과 수평평면에서 넓은 -25 dB 빔폭을 기준으로 부반사판을 설계하므로 넓은 -25 dB 빔폭의 값을 비교한다. 이때 변형된 다중모드 혼 안테나가 가장 좁은 28.94°의 빔폭을 가지고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 초고출력 안테나 시스템의 소형화를 위해 모드 변환기의 출력을 고려한 최적화된 다중모드 혼 안테나를 제안하고 그 특성을 고찰하였다. 제작된 원형 혼 안테나는 100 MW 첨두 전력 전송이 가능하며, 높은 지향성 패턴과 이득을 가짐으로써 초고출력 에너지 전송에 합당함을 보였다. 또한 일반적으로 사용되는 원형 혼 안테나에 비해 약 10° 가량의 좁은 -25 dB 빔폭을 갖는 특성을 가지므로 전체적인 안테나 시스템의 소형화를 이룰 수 있다. 이는 초고출력 반사판 안테나 시스템의 급전부로 사용되기에 가장 적합한 형태이며 이동성을 고려한 소형화된 안테나 시스템의 구성을 가능케 하는 방향으로 응용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] C. Taylor, and D. Giri, *High-Power Microwave Systems and Effects*, Taylor & Francis, London, 1994.
- [2] 이상훈, 이병무, 이우상, 윤영중, 소준호, "초고출력 안테나 시스템 설계에 관한 연구 II 최대 지향 특성의 원형 혼 안테나," 2004년도 한국전자파학회 종합학술대회 논문집, Vol.14, No.1, pp. 263-266, 2004.11.
- [3] 이우상, 이병무, 이상훈, 윤영중, 소준호, "초고출력 안테나 시스템 설계에 관한 연구 III spill-over 억제제를 위한 카세그레인 안테나 설계 시뮬레이션," 2004년도 한국전자파학회 종합학술대회 논문집, Vol.14, No.1, pp. 267-270, 2004.11.
- [4] Byoung Moo Lee, Woo Sang Lee, Young Joong Yoon, and Joon Ho So, "X-band TM₀₁-TE₁₁ mode converter with short length for high power," *IEE Electronics Letters*, Vol.40, No.18, pp.1126-1128, Sep., 2004.
- [5] AD Olver, PJB Clarricoats AA Kishk and L Shafai, "Microwave Horns and Feeds", IEEE Press, 1988

표 1. 각 모드별 전송 가능한 도파관의 크기

모드	TE ₁₁	TM ₀₁	TE ₂₁	TE ₀₁ TM ₁₁	TM ₂₁	TE ₁₂	TM ₀₂
반지름	0.293 λ	0.383 λ	0.486 λ	0.610 λ	0.817 λ	0.849 λ	0.879 λ
	8.8mm	11.5mm	14.6mm	18.3mm	24.5mm	25.5mm	26.4mm

표 2. 급전 시스템의 방사 특성

		수직평면	수평평면
원형 혼 안테나	이득	27.29 dBi	27.29 dBi
	-25 dB 빔폭	37.40°	28.79°
	반사손실	-24.82 dB	
다중모드 혼 안테나	이득	26.78 dBi	26.78 dBi
	-25 dB 빔폭	38.52°	41.80°
	반사손실	-28.80 dB	
변형된 다중모드 혼	이득	27.97 dBi	27.97 dBi
	-25 dB 빔폭	18.38°	28.94°
	반사손실	-26.27	

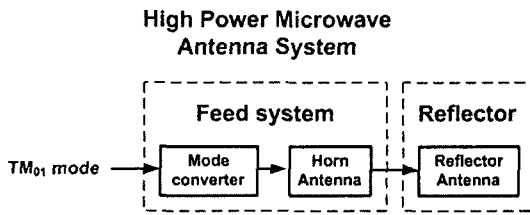


그림 1. 초고출력 안테나 시스템의 구성도

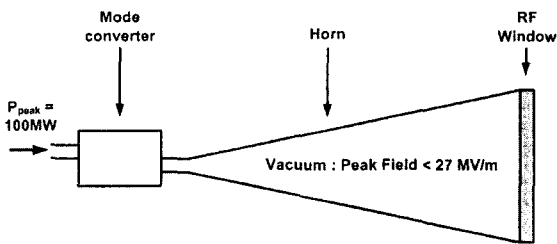


그림 2. X-band 초고출력 급전 시스템의 구조

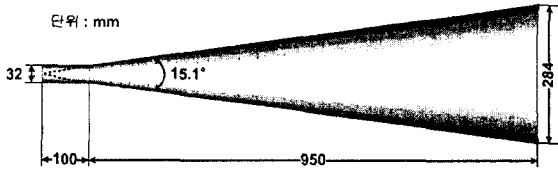


그림 3. 최대 이득의 원형 혼 안테나의 단면도

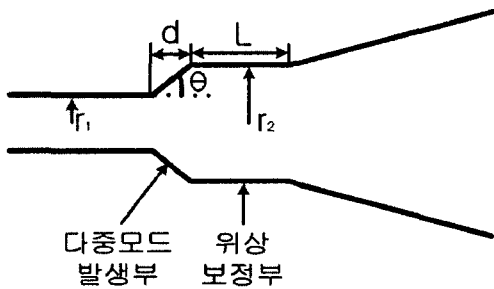


그림 4. 다중모드 혼 안테나의 고차모드 형성

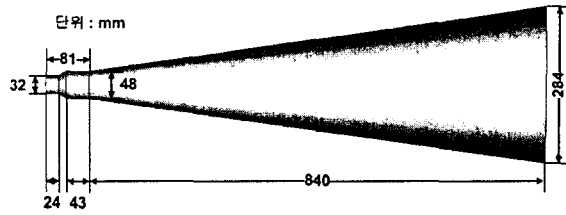


그림 5. 다중모드 혼 안테나의 단면도

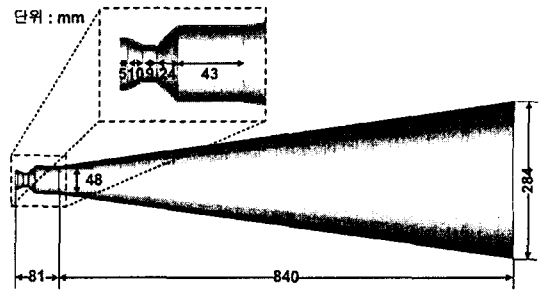


그림 6. 제안된 안테나 단면도

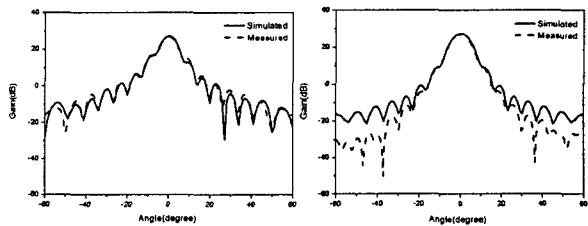


그림 7. 혼 안테나를 이용한 급전 시스템의 방사패턴

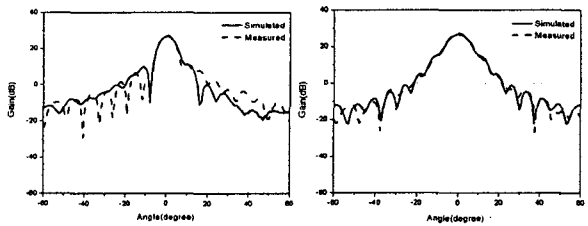


그림 8. 다중모드 혼을 이용한 급전 시스템의 방사패턴

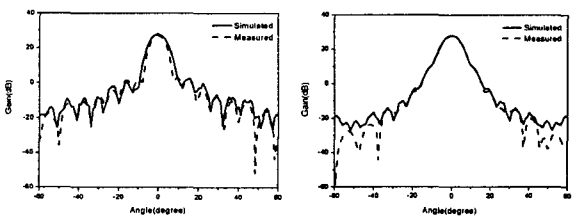


그림 9. 변형된 다중모드 혼을 이용한 급전 시스템의 방사패턴

M E M O