

무선전력전송기기의 전자파 인체노출량 분석 연구

2016. 11. 25



국립전파연구원

National Radio Research Agency

전남대학교 산학협력단

제 출 문

본 보고서를 「무선전력전송기기의 전자파 인체노출량 분석 연구」 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 11. 25

연구책임자 : 임 영 석 (전남대학교)

연구보조원 : 윤 석 (전남대학교)
정 현 중 (전남대학교)

요 약 문

1. 과 제 명 :무선전력전송기기의 전자파 인체노출량 분석 연구
2. 연구 기간 : 계약일 ~ 2016.11.25
3. 연구책임자 : 임영석
4. 계획 대 진도

가. 월별 추진내용

세부연구내용	연구자	월별 추진일정									비 고
		4	5	6	7	8	9	10	11		
국내외 전자기파와 주파수 대역별 크기 및 출력에 따른 인체영향 관련 논문 및 서적 참고	임영석	○	○	○	○						
무선전력전송기기에 따른 인체영향 시뮬레이션 <HFSS 활용>				○	○	○					
자기공진 방식에 따른 무선전력전송기기 시제품 제작						○	○	○			
무선전력전송기기 시제품을 사용한 실제 전자파 인체영향 측정							○	○	○		
측정과 Simulation 비교분석									○	○	
분기별 수행진도 (%)		40			40			20			

나. 세부 과제별 추진사항

- (1) 국내외 전자기파와 주파수 대역별 크기 및 출력에 따른 인체영향성 관련 자료조사
 - 가. 자기공진 방식에 따른 무선전력전송기기 연구 현황 조사
 - 나. 자기공진 방식에 따른 무선전력전송기기의 기본 원리 연구

- (2) 무선전력전송기기에 따른 인체영향 시뮬레이션 <HFSS 활용>
 - 가. 급전 Coil에 대한 저항(Resistance) / 인덕턴스(Inductance) / 커패시턴스(Capacitance) 해석
 - 나. 공진 Loop에 대한 소자해석 및 자기장 해석

- (3) 자기공진 방식에 따른 무선전력전송기기 시제품 제작
 - 가. 시제품 제작
 - 나. 시제품의 전력 전송특성 측정

- (4) 무선전력전송기기 시제품을 사용한 실제 전자파 인체영향 측정
 - 가. 근역장 영역의 자기장(H-Field) 측정
 - 나. 근역장 영역의 전기장(E-Field) 측정

- (5) Sim4life 해석 툴을 이용한 인체 모델의 SAR 분포 분석을 위한 분석: 시제품과 동일한 규격의 무선전력전송 모델에 의한 SAR 분석

5. 연구 결과

- 1) 시제품제작 : 공진 코일의 권선수(N)가 다른(자기 인덕턴스가 다
른) 두 모델의 공진형 무선전력전송 시제품 제작
- 2) 근역장 영역의 전자기장 측정: 두 시제품에 대한 전기장과 자기장
분포를 측정
- 3) 인체 모델에 대한 SAR 분포 시뮬레이션
- 4) 측정과 시뮬레이션을 통한 WPT 시스템의 인체 영향 효과를 분석

6. 기대효과

6.78MHz의 비교적 낮은 전자파를 발생시키는 공진형 무선전력전송 장치의 사용자 부근의 전자기장을 시뮬레이션과 측정을 통하여 인체 영향을 평가하는 기준을 마련하는 기초 연구의 일환으로 활용될 수 있다.

7. 기자재 사용 내역

시설.장비명	규격	수량	용도	보유현황	확보방안	비고
Digital Oscilloscope		1	전력전송시스템 효율 측정	보유		
전기장 및 자기장 측정 시스템		1	전기장 및 자기장 측정	미보유	전파연구원	
WorkStation		1	무선전력전송시스템 시뮬레이션	보유		
가속세트		2	무선전력전송 인체영향에 대한 시뮬레이션	보유		

8. 기타사항

최종보고서 초록

국문 초록		
<p>무선전력전송 방식으로 활용되고 또 연구되고 있는 방식들로는 고효율이지만 전송거리가 짧은 자기유도, 자기공진 방식과 효율은 낮지만 장거리 전송이 가능한 마이크로파를 이용한 전력 전송방식으로 구분 지을 수 있다.</p> <p>그 중에서 공진현상을 활용하는 공진형 무선전력전송장치는 수십cm에서 수 m에 이르는 거리까지 무선으로 고효율의 고전력 전송이 가능하지만, 송수신 시스템이 위치하는 공간에 전송전력에 비례하는 전자장이 분포하기 때문에 인체에 미치는 영향을 무시하기 어려울 뿐더러, 인체에 의해 전송 효율에도 영향을 받게 된다. 그러한 이유로, 활발한 연구에 비하여 실제 응용은 극히 제한적이다.</p> <p>본 연구에서는 공진형 전력전송시스템에 의해 발생하는 전자파에 의한 인체 노출량 분석을 위하여 기본적인 전력 송수신시스템을 구현하여, 자기장 및 전기장 분포를 측정하는 한편, 전산 모사를 통하여 생체와의 상호 영향을 관찰하여 인체에의 전자파 노출량을 분석한다.</p>		
영문 초록		
<p>Methods that are being utilized and studied as WPT(Wireless Power Transfer) method include high efficiency but low magnetic distance induction and self resonance method and Power transmission method using microwave which has low efficiency but can transmit long distance.</p> <p>Among them, the Resonance type WPT(Wireless Power Transfer) apparatus utilizing the resonance phenomenon can perform high efficiency and high power transmission wirelessly from a distance of several tens cm to several meters, but the electromagnetic field proportional to the transmission power is distributed in the space where the Transmission (TX) / Receiving (RX) systems is located. It is difficult to ignore the influence on the human body, and it is influenced by the Transmission Efficiency by the human body. For that reason, practical applications are extremely limited compared to active research.</p> <p>In this study, We implemented two prototypes of basic Power Transmission(TX) / Receiving (RX) systems for analyzing human body exposure by electromagnetic waves generated by a resonant power transmission system, and measured the magnetic field and electric field distribution, and observed the mutual influence with the living body through computer simulation, and the amount of electromagnetic waves is analyzed.</p>		
색 인 어	한글	공진형, 무선 전력전송, 전자파 노출량
	영문	Resonant type, wireless power transmission, electromagnetic wave exposure

SUMMARY

제 1장. 서론

- 전자파 노출 기준과 6.78MHz 대역의 전자파 인체 영향 연구 동향

제 2장 공진형 무선전력전송 이론

- 자기 종진 현상을 이용하여 전력을 전송하는 개념의 이론적인 해석
- 전력 전송 효율에 영향을 미치는 요인
- 하나 이상의 수신기에 전력을 전송하는 경우의 전송 효율
- 공진 코일의 저항 성분에 의한 전력 전송 효율의 저하

제 3장 공진형 무선전력전송 시스템의 Prototype 제작

- 공진 코일의 권선 수가 서로 다른 두 개의 Prototype 제작
- 제작된 코일들의 등가 회로모델 완성
- 제작된 두 모델의 전력 전송 효율 측정
- 제작된 두 모델의 근역장 영역 전자기장 분포 측정

제 4장 WPT 시스템의 전자파 노출량 Simulation

- 제작된 두 모델과 동일한 규격으로 simulation 모델 완성
- 두 모델의 근역장 영역 전자기장 분포 simulation
- 인체 모델을 적용하여 SAR 분포 simulation

제 5장 결론

- 결과 분석: WPT에 의한 자기장, 전기장 및 SAR 분포에 대한 분석
- 문제점: 본 연구 과정에서 도출된 문제점과 향후 연구 방향

목 차

표 목 차	8
그림목차	9
제 1 장 무선전력전송과 전자파의 인체영향.....	12
제 1 절 전자파 노출 기준	12
제 2 절 코일 전류에 의한 근역장 영역의 전자장 분포.....	15
제 3 절 무선전력전송 시스템에 의한 인체영향평가 연구현황.....	16
제 2 장 공진형 무선전력전송 이론.....	17
제 1 절 코일의 회로 모델링.....	17
제 2 절 무선전력전송의 회로해석.....	19
제 3 장 공진형 무선전력전송시스템 시제품.....	26
제 1 절 송/수신부(TX/RX) 시스템.....	26
제 2 절 무선전력전송 시스템 구현.....	32
제 3 절 무선전력전송 시스템에 따른 근역장 분포.....	35
제 4 장 무선전력전송시스템 전자파 노출량 시뮬레이션.....	50
제 1 절 송/수신부(TX/RX) 시스템 구현.....	50
제 2 절 무선전력전송 시스템 구현 및 인체모델(Duke Model).....	52
제 3 절 근역장 영역 전자기장 분포	53

표 목 차

- 표 1-1. 국제적인 SAR 기준 (괄호안은 일반인기준임)
- 표 1-2. 일반인에 대한 전자파강도기준
- 표 3-1. 유도코일(Induction Coil) Parameter
- 표 3-2. 공진코일(Resonance Coil) Parameter
- 표 3-3. Type 1. 공진 코일에 연결한 커패시턴스(Capacitance)와 그에 따른 공진 주파수(f_0)
- 표 3-4. Type 2 공진 코일에 연결한 커패시턴스(Capacitance)와 그에 따른 공진 주파수(f_0)
- 표 4-1. 공진코일 규격
- 표 4-2. 공진 코일의 등가회로 정수
- 표 4-3. 인체모델(Duke Model) 규격

그림 목 차

그림 1-1. 소형 루프안테나

그림 2-1. 공진형 무선전력전송 시스템의 Prototype

그림 2-2. (a) 원형 코일과 C_{ext} , (b) (a)의 등가회로

그림 2-3. (a) 코일 임피던스의 실수부, (b) 코일 임피던스의 허수부

그림 2-4. 무선전력전송(Wireless Power Transfer) 시스템의 등가회로 모델

그림 2-5. (a) $|S_{21}|$, (b) k_{23} 에 따른 $|S_{21}|$, (c) 입력임피던스

그림 2-6. 1 송신부 (TX) - 2 수신부 (RX) 시스템

그림 2-7. (a) V_a/V_G , (b) k_{23} 에 따른 V_a/V_G , (c) 입력임피던스

그림 2-8. R_{coil} 의 영향

그림 2-9. R_{coil} 에 따른 전송 특성의 변화

그림 3-1. 유도코일(Induction Coil)의 특성 측정

(a) 측정모습 (b) 스미스차트(SmithChart) S(1,1)

그림 3-2. 공진주파수 설정을 위한 측정

(a) 외부 캐패시터(Capacitor)를 연결한 유도코일(Induction Coil)

(b) dB(S(1,1)) (C) 스미스차트(SmithChart) S(1,1)

그림 3-3. (a) 공진코일(Resonance coil) 특성 측정,

(b) 공진코일(Resonance coil) 등가 회로

그림 3-4. ADS Modeling 및 Network Analyzer 측정 값의 비교(1)

그림 3-5. ADS Modeling 및 Network Analyzer 측정 값의 비교(2)

그림 3-6. ADS Modeling 및 Network Analyzer 측정 값의 비교(3)

그림 3-7. ADS Modeling 및 Network Analyzer 측정 값의 비교(4)

그림 3-8. Type 1. 송신부(TX) 시스템의 특성 측정

(a) 측정값에 의한 ADS 회로, (b) 스미스차트(SmithChart) S(1,1), (c) dB(S(1,1))

그림 3-9. Type1. 거리에 따른 (a) dB(S(1,1)), (b) dB(S(2,1)) 결과

그림 3-10. Type 2. 송신부(TX) 시스템의 특성 측정
(a) 측정값에 의한 ADS 회로, (b) 스미스차트(SmithChart) S(1,1), (c) dB(S(1,1))

그림 3-11. Type2. (a) 거리에 따른 전송특성 (b) 거리에 따른 반사특성

그림 3-12. (a) 자기장(H-Field) 중심부 측정, (b) 자기장(H-Field) 외곽 측정, (c) 전기장(E-Field) 중심부 측정

그림 3-13. 근역장 영역 전자기장 표현을 위한 좌표계

그림 3-14. 송신부(TX) 시스템의 등가회로

그림 3-15. $z=\text{constant}$ 인 평면상의 자기장(H-Field) 분포(단위 : A/m)

그림 3-16. $y=\text{constant}$ 인 평면상의 자기장(H-Field) 분포(단위 : A/m)

그림 3-17. $z=\text{constant}$ 인 평면상의 전기장(E-Field) 분포(단위 : V/m)

그림 3-18. $y=\text{constant}$ 인 평면상의 전기장(E-Field) 분포(단위 : A/m)

그림 3-19. $z=\text{constant}$ 인 평면상의 자기장(H-Field) 분포(단위 : A/m)

그림 3-20. $y=\text{constant}$ 인 평면상의 자기장(H-field) 분포(단위 : A/m)

그림 3-21. $z=\text{constant}$ 인 평면상의 전기장(E-Field) 분포(단위 : V/m)

그림 3-22. $y=\text{constant}$ 인 평면상의 전기장(E-Field) 분포(단위 : V/m)

그림 3-23. 송수신부(TX-RX) 시스템의 등가회로

그림 3-24. $z=\text{constant}$ 인 평면상의 자기장(H-Field) 분포(단위 : A/m)

그림 3-25. $y=\text{constant}$ 인 평면상의 자기장(H-Field) 분포(단위 : A/m)

그림 3-26. $z=\text{constant}$ 인 평면상의 전기장(E-Field) 분포(단위 : V/m)

그림 3-27. $y=\text{constant}$ 인 평면상의 전기장(E-Field) 분포(단위 : V/m)

그림 4-1. 유도 코일(Induction Coil)

그림 4-2. 공진 코일(Resonance Coil)

그림 4-3. [그림 4-2] 의 등가회로

그림 4-4 송수신부(TX-RX) 시스템 모델링

그림 4-5. 인체모델(Duke Model) (a) 전면, (b) 측면

그림 4-6. Type 1-송신부(TX) 의 자기장(H-Field) 분포(단위 : A/m)

그림 4-7. Type 1-TX의 전기장 분포(단위 : V/m)

- 그림 4-8. Type 2-TX의 자기장 분포(단위 : A/m)
- 그림 4-9. Type 2-TX의 전기장(E-Field) 분포(단위 : V/m)
- 그림 4-10. 송신부(TX)와 인체 모델
- 그림 4-11. Type 1의 1g-SAR 분포(단위 : W/kg)
- 그림 4-12. Type 2의 1g-SAR 분포(단위 : W/kg)
- 그림 4-13. 송수신(TX-RX) 시스템의 자기장(H-Field) 분포(Type 2)
- 그림 4-14. 송수신(TX-RX) 시스템의 전기장(E-Field) 분포(Type 2)
- 그림 4-15. Type 2의 전력 전송이 이루어지는 경우의 1g-SAR 분포
(단위 : W/kg)

제 1 장 무선전력전송과 전자파의 인체영향

무선전력전송 방식으로 활용되고 또 연구되고 있는 방식들로는 고효율이지만 전송거리가 짧은 자기유도, 자기공진 방식과 효율은 낮지만 장거리 전송이 가능한 마이크로파를 이용한 전력 전송방식으로 구분 지을 수 있다.

자기유도방식은 송신과 수신기기가 상대적으로 낮은 주파수(수백 khz)에서, 거의 밀착되어 운용되고 송수신시스템 주변의 전자장 분포가 매우 작기 때문에 인체영향은 물론이고 EMI의 우려도 매우 적기 때문에 현재 많은 응용이 이루어지고 있다. 다만, 송수신 가능 거리가 너무 짧다는 단점이 있다. 이와 같은 거리의 제한을 극복하는 방식으로 공진현상을 이용한 전력전송 시스템이 연구되고 있다.[1] 고효율의 고전력 전송이 가능하지만, 송수신시스템이 위치하는 공간에 전송 전력에 비례하는 전자장이 분포하기 때문에 인체에 미치는 영향을 무시하기 어렵다. 오히려, 인체에 의해 전송 효율에도 영향을 받게 된다. 그러한 이유로, 활발한 연구에 비하여 실제 응용은 극히 제한적이다. 위의 두 방식이 근역장에서의 전력 전송이 이루어지는 반면, 고이득 안테나를 이용한 마이크로파 전력 전송 시스템은 원역장 전력전송 시스템이다. 따라서 송신과 수신시스템 사이의 공간에 매우 넓게 마이크로파 전력이 분포하면서 전송되므로 EMI 및 인체 영향의 가능성이 매우 커서 실제 응용이 이루어지기 위해서는, 전송전력의 제한이 필연적이다. 따라서 현재 연구되는 응용범위로는 저전력 센서 또는 드론과 같은 원거리에 위치한 기기들에 낮은 수준으로 전력을 전송하는 경우들에 국한되고 있다. 이 방식은 고이득의 안테나를 이용하여, 생체 또는 다른 전자기기들이 없는 공간을 활용하여 전력전송을 실행할 수 있다.

본 연구에서는 공진형 전력전송시스템에 의해 발생하는 전자파에 의한 인체 노출량 분석을 위하여 기본적인 전력 송수신시스템을 구현하여, 자기장 및 전기장 분포를 측정하는 한편, 전산 모사를 통하여 생체와의 상호 영향을 관찰하여 인체에의 전자파 노출량을 분석한다.

먼저, 공진형 전력 송수신 시스템은 코일에 흐르는 전류에 의해 발생하는 자기장에 의한 코일간의 유도 결합현상에 공진특성을 이용하는 것이므로, 간단하게 코일에 의해 발생하는 전자기장의 분포를 살펴본다.

제 1절. 전자파 노출 기준

전자파에 의한 인체 유해성은 주파수 대역에 따라 판단 기준이 달라진다. 즉,

상대적으로 낮은 주파수의 전자파(100kHz 이하)는 비열적인 영향을 주기 때문에, 인체에 비열적인 영향을 미치는 메카니즘에 따라, 자기장 혹은 전기장의 세기를 노출 기준으로 평가하게 된다. 반면에 높은 주파수(10MHz 이상)의 전자파는 주로 열적인 영향을 미치기 때문에 SAR 값으로 노출 기준을 정하여 규제하고 있다. 현재까지의 연구에 의하면 두 주파수 대역의 사이 (100kHz ~ 10MHz)는 비열적인 작용과 열적인 작용이 공존하는 것으로 알려져 있고, 두 경우의 기준이 모두 적용될 수 있다. 다만, 전파의 파장이 길어 인체 내(혹은 팬텀) SAR의 측정이 매우 어렵기 때문에 표준화된 측정 규범이 아직 없는 실정이다.

[표 1-1]은 국제적으로 통용되는 SAR 노출 기준치를 보인 것이다.

규제되는 전파의 주파수 범위 등이 기관에 따라 약간 차이는 있지만, SAR 기준 값은 거의 동일함을 볼 수 있다.

구 분	ICNIRP	CENELEC	IEEE	JAPAN	FCC
노출안전기준의 주파수 범위 (Hz)	0~3×10 ¹¹	0~3×10 ¹¹	3×10 ³ ~3×10 ¹¹	10 ⁴ ~3×10 ⁷	3×10 ⁵ ~10 ¹¹
SAR이 기본적인계치인 주파수 범위 (Hz)	10 ⁵ ~10 ¹⁰	10 ⁴ ~3×10 ¹¹	10 ⁵ ~6×10 ⁹	10 ⁵ ~3×10 ⁹	3×10 ⁵ ~6×10 ⁹
전신평균 (W/kg)	0.4(0.08)	0.4(0.08)	0.4(0.08)	0.4(0.08)	0.4(0.08)
국부(손목, 발목) (W/kg)	20(4)	20(4)	20(4)	20(4)	20(4)
국부(머리, 몸통) (W/kg)	10(2)	10(2)	8(1.6)	10(2)	8(1.6)
국부치 계산을 위한 조직 질량(g)	10	10	1(머리, 몸통) 10(손목, 발목)	10(국부흡수 지침) 1(기초지침)	1(머리, 몸통) 10(손목, 발목)

표 1-1. 국제적인 SAR 기준 (괄호안은 일반인기준임)

전파 발생원에 따라, 또한 발생원으로 부터의 거리에 따라 전기장과 자기장 분포가 크게 달라진다. 참고문헌[3]의 고주파접착기(RF Sealer)의 경우 기기 부근(과장에 비하여 충분히 가까운)에서는 전기장은 큰 값으로 나타나지만, 상대적으로 자기장은 약하다. 반면에, 공진형 코일에 흐르는 전류에 의한 자기 유도 방식을 이용하는 WPT의 경우는 기기 부근(과장에 비하여 충분히 가까운)에서는 자기장은 큰 값으로 나타나지만, 상대적으로 전기장은 약하다.

따라서 근역장의 전파의 경우 전자파 강도에 따른 규제가 합리적일 수 있다. 표 2.는 일반인에 대한 국내 전자파 강도 기준을 보인 것이다.

주파수 범위	전기장강도 (V/m)	자기장강도 (A/m)	자속밀도 (μT)	전력밀도 (W/m^2)
1 Hz 이하	-	3.2×10^4	4×10^4	
1 Hz 이상 ~ 8 Hz 미만	10,000	$3.2 \times 10^4 / f^2$	$4 \times 10^4 / f^2$	
8 Hz 이상 ~ 25 Hz 미만	10,000	$4,000 / f$	$5,000 / f$	
0.025 kHz 이상 ~ 0.8 kHz 미만	$250 / f$	$4 / f$	$5 / f$	
0.8 kHz 이상 ~ 3 kHz 미만	$250 / f$	5	6.25	
3 kHz 이상 ~ 150 kHz 미만	87	5	6.25	
0.15 MHz 이상 ~ 1 MHz 미만	87	$0.73 / f$	$0.92 / f$	
1 MHz 이상 ~ 10 MHz 미만	$87 / f^{1/2}$	$0.73 / f$	$0.92 / f$	
10 MHz 이상 ~ 400 MHz 미만	28	0.073	0.092	
400 MHz 이상 ~ 2000 MHz 미만	$1.375 f^{1/2}$	$0.0037 f^{1/2}$	$0.0046 f^{1/2}$	$f / 200$
2 GHz 이상 ~ 300 GHz 미만	61	0.16	0.20	10

표 1-2. 일반인에 대한 전자파강도기준

제 2 절. 코일 전류에 의한 근역장 영역의 전자장 분포

코일의 반경 a 가 파장에 비하여 작은 경우, 코일에 흐르는 전류 I_0 에 의하여 형성되고 공기 중으로 전파되어 가는 전자파의 분포에 관한 정확한 해는 매우 복잡하기 때문에 간단한 소형 루프 안테나이론을 적용하여, $r \gg a$ 의 영역에서 다음 식들과 같이 정리될 수 있다.

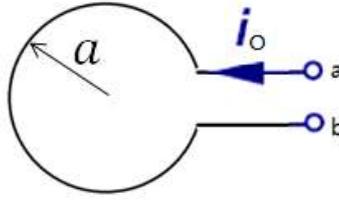


그림 1-1. 소형 루프안테나

$$\begin{aligned}
 H_r &= j \frac{ka^2 I_0 \cos\theta}{2r^2} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} & E_r = E_\theta = 0 & \quad \text{--(8)} \\
 H_\theta &= - \frac{(ka)^2 I_0 \sin\theta}{4r} \left[1 + \frac{1}{jkr} - \frac{1}{(kr)^2} \right] e^{-jkr} & E_\phi &= \eta \frac{(ka)^2 I_0 \sin\theta}{4r} \left[1 + \frac{1}{jkr} \right] e^{-jkr} \\
 H_\phi &= 0
 \end{aligned}$$

본 연구의 공진형 무선전력전송의 경우는 근역장의 전력 결합현상을 이용하는 것으로, 송신 코일과 수신 코일 간의 거리 또한 동작신호의 주파수(6.78MHz)의 파장에 비하여 매우 짧다. 따라서 관심 영역 즉 근역장(특히 reactive near field region)에서의 장 분포는 $kr \ll 1$ 인 조건을 식 (8)에 부가하여, 다음 식 (9)와 같이 전기장과 자기장분포를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 H_r &= \frac{a^2 I_0}{2r^3} \cos\theta e^{-jkr} & E_r = E_\theta = 0 & \quad \text{--(9)} \\
 H_\theta &= \frac{a^2 I_0}{4r^3} \sin\theta e^{-jkr} & E_\phi &= -j\eta \frac{ka^2 I_0}{4r^2} \sin\theta e^{-jkr} = -j\omega\mu \frac{a^2 I_0}{4r^2} \sin\theta e^{-jkr} \\
 H_\phi &= 0
 \end{aligned}$$

원역장에서는 TEM wave로 전기장과 자기장의 관계가 주파수와 관계없이 매질의 고유 임피던스(공기중에서는 $120\pi\Omega$)로 주어지는 사실에 비교하면, 식 (9)로

부터 알 수 있듯이, 코일에 흐르는 전류 I_0 에 의하여 형성되는 근역장 영역의 전기장의 세기는 주파수에 비례한다.

물론 식 (9)는 $ka \ll kr \ll 1$ 인 영역, 즉 근역장 영역이면서 코일 반경보다는 훨씬 큰 영역에서의 전자장 분포이지만, 코일 부근의 정확한 전자장 분포에 관한 해석에서도 자기장(H-Field)와 자기장(E-field) 사이의 관계는 유사하다.[2]

근역장 전자기 유도 현상을 이용하는 무선 전력전송 시스템 주변의 전자기장의 분포와 이에 따른 EMI나 인체 영향의 측면에서 전기장과 유도 전류 그리고 SAR의 문제는 주파수에 비례하여 증가하게 될 것임을 알 수 있다.

제 3절. 무선전력전송 시스템에 의한 인체영향평가 연구현황

송신부(TX)와 수신부(RX)가 서로 얼마간의 거리를 두고, 또 임의 방향으로 배치되는 경우에도 결합이 가능하도록 하기 위해서는 k_{12} 와 k_{34} 의 값이 크지 않도록 할 필요가 있다. 이 경우 발생하는 근역장의 필드 분포는 유도형 전력 충전시스템의 경우와 달리, 공간에 상당한 크기로(전달하고자 하는 전력의 양에 비례하여) 분포하게 된다. 이 근역장 영역의 전자장 분포에 의한 인체 영향의 문제점으로 인하여 많은 연구에도 불구하고 아직 실용화 단계에 접어들지 못하고 있다.

공진형 무선전력전송 시스템에 주로 연구되는 주파수의 대역이 수 MHz로 RF로는 비교적 파장이 길고, 또한 충전 시스템의 운용환경 또한 다양하게 변할 수 있어, 인체영향평가 기준 설정이 쉽지 않다.

WPT 동작주파수로 주로 연구되고 있는 6.78MHz 대역의 전기장과 자기장에 의한 인체 영향에 대한 조사는 100kHz이하에서의 비열적 효과에 대한 연구들이나, 10MHz 이상에서의 열적 효과들에 대한 연구들에 비하면 거의 다루어지지 않고 있는 실정이다.

연구동향을 살펴보면, 6.78MHz로 충전 패드 상에서 휴대폰을 충전하는 5W 시스템에서 패드 상의 손 모델에 유기되는 전기장과 SAR를 측정하여, 기준에 충족됨을 입증하기 위한 연구[1]와 TX와 RX의 물리적 배치 관계에 따라 SAR 기준 값을 초과하게 되는 전류 값들을 구하여 인체 영향 평가를 행하는 연구[2] 및 한국인 모델을 이용한 Multi Phone충전기 모델에 대한 SAR해석 연구[3] 등이 이루어지고 있으나, 아직 체계적이고 신뢰성이 있는 평가 기준 및 방법은 확립되지 않은 실정이다.

본 연구와 유사한 연구 사례로는 고주파접착기(RF Sealer)의 누설 고주파에 의한 근역장 영역에서의 유도 전류와 SAR의 관계를 밝힌 사례가 있는데, 이 경우는 자기장보다는 전기장이 우세한 경우이다.[3]

제 2 장 공진형 무선전력전송 이론

통신기기를 포함하여 다양한 가전기기들의 이동성이 강조되면서 무선 방식의 전력 충전 시스템의 연구가 매우 다양하게 전개되고 있다. 자기 유도방식의 무선 충전 시스템은 비교적 소 전력이며, 전력의 송신측과 수신기기가 거의 접촉한 상태에서 전력송수신이 이루어지기 때문에 전파환경에 미치는 영향이 크지 않다. 이에 비해, 송수신 기기들이 얼마간 간격을 두고 동작하는 방식인 공진형 무선전력 전송시스템은 공진주파수에서 매우 높은 효율로 송수신 기기들이 서로 이격되어 있는 상태에서 충전이 가능하다는 장점이 있지만, 이에 수반되는 전파환경의 문제로 인하여 아직까지 실제 응용되는 경우는 매우 제한적이다.

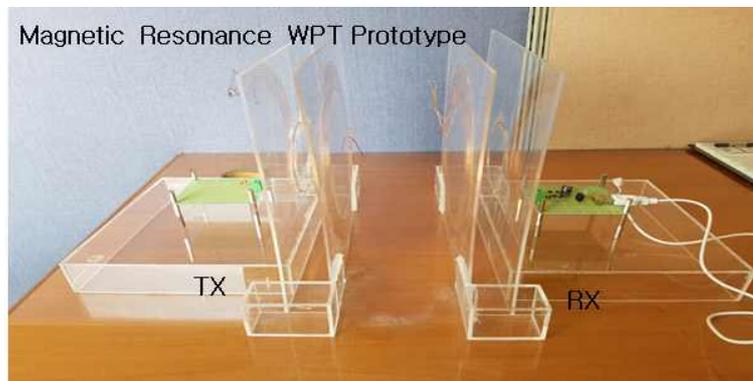


그림 2-1. 공진형 무선전력전송 시스템의 Prototype

[그림 2-1]은 기본적인 공진형 무선전력전송 시스템은 코일 간의 자기유도 현상과 코일의 공진 현상을 이용한 시스템으로 전력 송신부(TX)와 수신부(RX)로 나누어 볼 수 있다. 송신부(TX)와 수신부(RX)는 별개의 부분으로 구성이 가능하겠지만, 본 연구에서는 동일한 규격으로 구성하는 것으로 한다. 송신부(TX)는 공진 코일과, 공진 코일에 전원 전력을 전달하기 위한 유도코일로 구성된다. 유도코일과 공진코일 간의 결합계수(상호 인덕턴스)는 무선전력전송(Wireless Power Transfer) 시스템의 효율적인 전력전송 거리를 결정하는데 주요한 파라미터로 작용한다.

제 1 절. 코일의 회로 모델링

다양한 형태의 코일들이 무선전력전송 시스템에 활용될 수 있지만, 본 연구에

서는 평면형의 원형 코일을 선정하였다. 코일의 가장 기본적인 형태이며, 제작이 쉽고, WPT 시스템에 적용할 때, 코일 간의 상호 결합계수의 추정도 비교적 용이하다. [그림2-2.(a)]와 같은 원형 코일은 코일의 내외반경, 권선 수 그리고 도선의 반경과 도전율 등에 의해 그 특성이 결정된다. 코일의 임피던스 특성을 살펴보면, 낮은 주파수에서는 작은 저항 값을 갖는 인덕터(Inductor)의 특성을 나타내지만, 주파수가 높아질수록 권선들간의 전기적 결합에 의한 커패시턴스(Capacitance)의 영향이 나타나게 되고, 저항이 0인 경우, 자기공진주파수(SRF : Self-Resonance Frequency)에서 임피던스는 무한대가 된다. 따라서, 코일의 낮은 주파수에서의 거동과 SRF를 측정함으로써 코일의 간략한 등가회로를 [그림2-2.(b)]와 같이 표현할 수 있다.

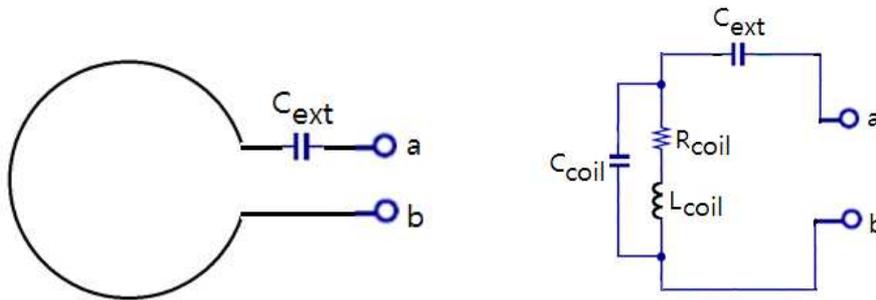


그림 2-2. (a) 원형 코일과 C_{ext} , (b) (a)의 등가회로

그림에서 코일의 임피던스는

$$Z_{coil} = (R_{coil} + j\omega L_{coil}) \parallel \frac{1}{j\omega C_{coil}} = \frac{R_{coil} + j\omega L_{coil}}{1 - \omega^2 L_{coil} C_{coil} + j\omega R_{coil} C_{coil}}$$

와 같이 표현됨을 알 수 있다. SRF 는 $f_{sr} = \frac{1}{2\pi} \times \frac{1}{\sqrt{L_{coil} C_{coil}}}$ 이다.

유도코일은 낮은 Q(Quality Factor) 를 구현하기 위해, 인덕턴스가 작게 구현하여 저항도 무시할 수 있을 정도로 작고, 또한 커패시턴스(Capacitance) 도 매우 작다. 다시 말하면, SRF가 아주 높기 때문에, 관심 주파수(본 연구에서는 6.78MHz)에서는 순수한 인덕터(Inductor)로 볼 수 있다. 공진 코일은 권선수가 많아 도선의 길이가 매우 길기 때문에 저항을 무시할 수 없고, 자기공진 또한 상대적으로 낮은

주파수에서 발생한다. 이 현상은 3장의 제작 과정에서 다시 살펴보기로 한다. 요구되는 주파수에서 공진을 유도하기 위해 별도의 집중소자(Capacitor)를 직렬로 추가하여야한다. 이 때 공진 주파수는 $f_o = \frac{1}{2\pi} \times \frac{1}{\sqrt{L_{coil}(C_{coil} + C_{ext})}}$ 와 같이 결정된다.

[그림 2-3] 은 $L_{coil} = 35\mu H, R_{coil} = 3.5\Omega, C_{coil} = 8.8pF$ 그리고 $C_{ext} = 7.0pF$ 일 때의 코일의 임피던스를 그린 것이다. [그림 2-3]에서 볼 수 있듯이

$$f_{sr} \approx \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_{coil}C_{coil}}} = 9.07MHz \text{이고, } f_o \approx \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{L_{coil}(C_{coil} + C_{ext})}} = 6.78MHz \text{이다.}$$

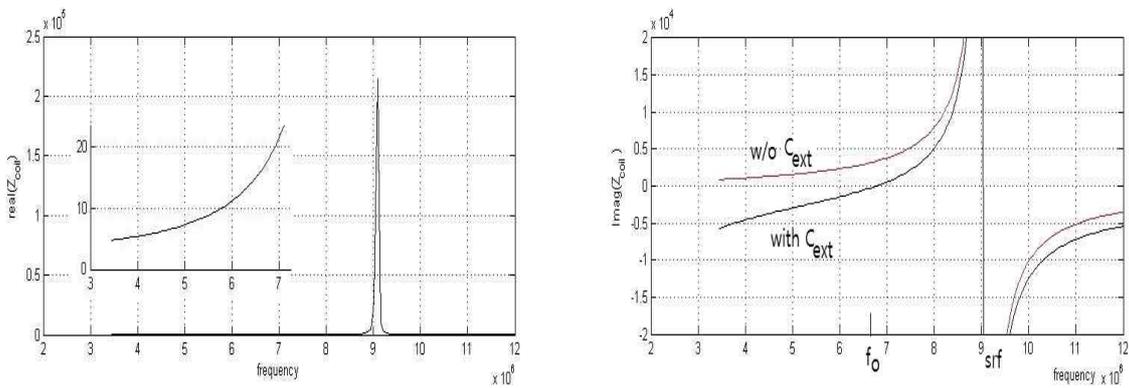


그림 2-3. (a) 코일 임피던스의 실수부, (b) 코일 임피던스의 허수부

제 2 절. 무선전력전송의 회로해석

1. 단일기기 충전의 경우($R_2 \ll R_G, R_3 \ll R_L$ 인 경우)

[그림 2-4]는 [그림 2-2]의 코일 등가회로를 이용하여 기본적인 공진형 무선전력송신시스템의 등가회로 모델을 나타낸 것이다. 송신부(TX)의 유도코일과 공진코일사이의 상호인덕턴스(Mutual Inductance)는 M_{12} 이고, 송신부(TX)-공진코일과 수신부(RX)-공진코일 사이의 상호인덕턴스(Mutual Inductance)는 M_{23} , 수신부(RX)-공진코일과 수신부(RX)-유도코일 사이의 상호인덕턴스(Mutual Inductance)는 M_{34} 이며, 이외의 상호 결합은 무시한 간략한 모델이다.

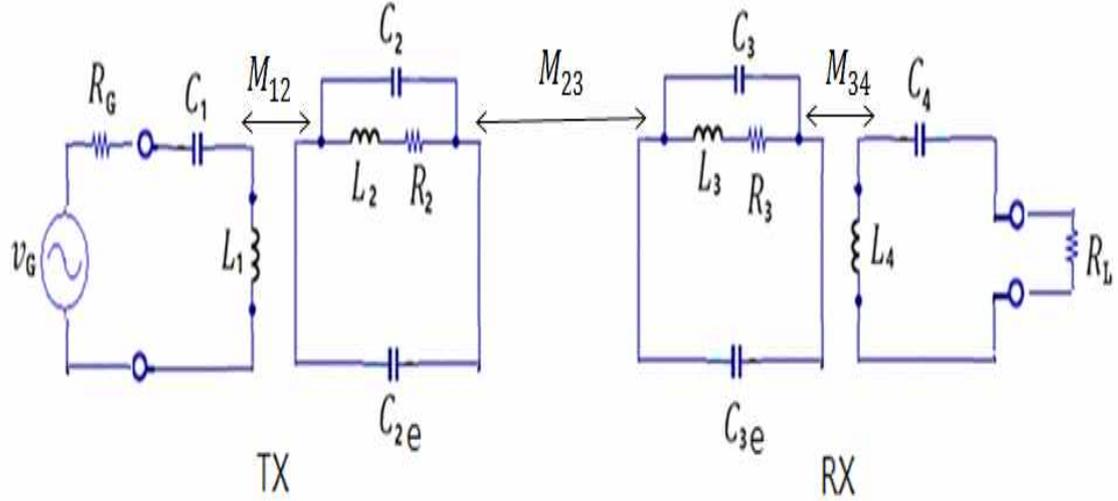


그림 2-4. 무선전력전송(Wireless Power Transfer) 시스템의 등가회로 모델

회로에서, $Z_G = R_G + \frac{1}{j\omega C_1}$, $Z_L = R_L + \frac{1}{j\omega C_4}$, $Z_1 = Z_G + j\omega L_1$, $Z_4 = sL_4 + R_L + \frac{1}{sC_4}$,
 $Z_2 = (R_2 + j\omega L_2) \parallel \frac{1}{j\omega C_2} + \frac{1}{j\omega C_{2e}}$ 그리고 $Z_3 = (R_3 + j\omega L_3) \parallel \frac{1}{j\omega C_3} + \frac{1}{j\omega C_{3e}}$ 이며,
 각 코일의 인덕턴스와 캐패시턴스들은 원하는 주파수에서 공진이 발생하도록 결정된다. 즉, $L_1 C_1 = L_2 (C_2 + C_{2e}) = L_3 (C_3 + C_{3e}) = L_4 C_4 = \frac{1}{\omega_0^2}$ 이다.

회로의 동작특성을 살펴보기 위해 간단한 회로 해석방법을 활용하면,

$$Z_{in} = sL_1 + \frac{1}{sC_1} + \frac{-s^2 M_{12}^2 (Z_3 Z_4 - s^2 M_{34}^2)}{Z_2 Z_3 Z_4 - s^2 M_{23}^2 Z_4 - s^2 M_{34}^2 Z_2}, \quad (1)$$

$$v_L = \frac{s^3 M_{12} M_{23} M_{34} R_L v_G}{Z_1 Z_2 Z_3 Z_4 - s^2 (M_{23}^2 Z_1 Z_4 + M_{12}^2 Z_3 Z_4 + M_{34}^2 Z_1 Z_2) + s^4 M_{12}^2 M_{34}^2} \quad (2)$$

을 얻을 수 있는데, 여기서 $s = j\omega$ 이다. 이 값들로부터 다음과 같은 산란행렬 파라미터 (Scattering Parameter)를 얻을 수 있다.

$$S_{11} = \frac{Z_{in} - R_G}{Z_{in} + R_G}, \quad |S_{21}|^2 = \frac{P_L}{P_{avl}} = 2 \frac{|v_L|^2}{|v_G|^2} \frac{R_G}{R_L}.$$

공진주파수에서의 전력전달 특성을 살펴보면, $s = j\omega_0$ 일 때, $R_2 \ll R_G, R_3 \ll R_L$ 이므로, $M_{ij} = k_{ij}\sqrt{L_i L_j}$ 의 관계식을 이용하면, 상호결합계수들의 관계식으로 다음의 입력 임피던스 표현식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{in} &= \frac{\omega_0^2 M_{12}^2 (R_3' R_L + \omega_0^2 M_{34}^2)}{R_2' R_3' R_L + \omega_0^2 M_{23}^2 R_L + \omega_0^2 M_{34}^2 R_2} \approx \frac{\omega_0^2 M_{12}^2 M_{34}^2}{M_{23}^2 R_L} = \frac{\omega_0^2 k_{12}^2 k_{34}^2}{k_{23}^2 R_L} L_1 L_4 \quad -(3) \\ &= \frac{k_{12}^2 k_{34}^2}{k_{23}^2} \frac{\omega_0 L_1}{R_G} \frac{\omega_0 L_4}{R_L} R_G = \frac{k_{12}^2 k_{34}^2}{k_{23}^2} Q_G Q_L R_G \end{aligned}$$

(단, $R_2' = \text{real}(Z_2)_{at f_0}, R_3' = \text{real}(Z_3)_{at f_0}$ 이다.)

여기서, 입력측 임피던스 정합 조건을 얻을 수 있다.
즉, $Z_{in} = R_G$ 가 되기 위한 조건은

$$k_{23}^2 = k_{12}^2 k_{34}^2 Q_G Q_L \Rightarrow k_{23critical} = k_{12} k_{34} \sqrt{Q_G Q_L} \quad -(4)$$

[그림 2-5] 은 $R_G = R_L = 50\Omega, R_2 = R_3 = 0.1\Omega, Q_G = Q_L, k_{12} = k_{34} = 0.4$ 일 때, k_{23} 의 변화에 따른 전력전송 특성을 보인 것으로 $k_{23critical} = 0.096$ 이다. 그림 2-5a는 S_{21} 으로, 주파수의 변화에 따른, 그리고 결합계수의 변화에 따른 전송 효율이다. 그림 2-5b는 k_{23} 의 세 가지 경우에 따른 전송효율을 보인 것으로 k_{23} 가 $k_{23critical}$ 과 같을 때, 클 때, 그리고 보다 작을 때 세 가지 경우를 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 k_{23} 가 $k_{23critical}$ 와 같을 때, 100%에 가까운 전력 전송효율을 얻을 수 있으나, k_{23} 가 $k_{23critical}$ 보다 작아지면 급격하게 효율이 감소함을 알 수 있다. 물론 k_{23} 가 $k_{23critical}$ 보다 커질 때도 효율이 감소하나 크게 변화하지는 않는다. 그림 2-5.(c)는 $k_{23} = k_{23critical}$ 인 경우의 임피던스 정합특성을 보인 것이다.

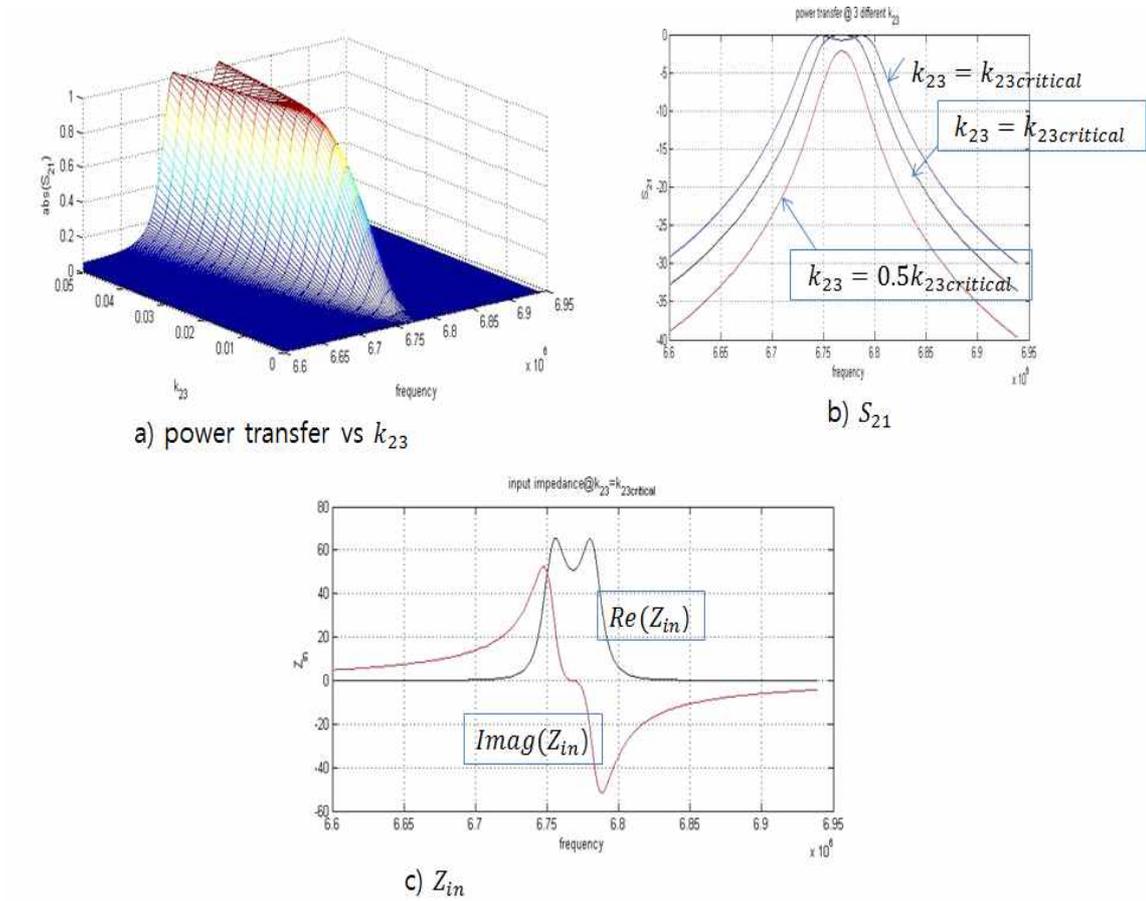


그림 2-5. (a) $|S_{21}|$, (b) k_{23} 에 따른 $|S_{21}|$, (c) 입력임피던스 Z_{in}

2. 복수 기기 충전의 경우($R_2 \ll R_G, R_3 \ll R_L$ 인 경우)

[그림 2-6]은 동일한 규격의 수신부(RX)를 동시에 충전하는 경우에 대한 등가 회로 모델이다. 두 수신부(RX) 간의 결합은 무시한다.

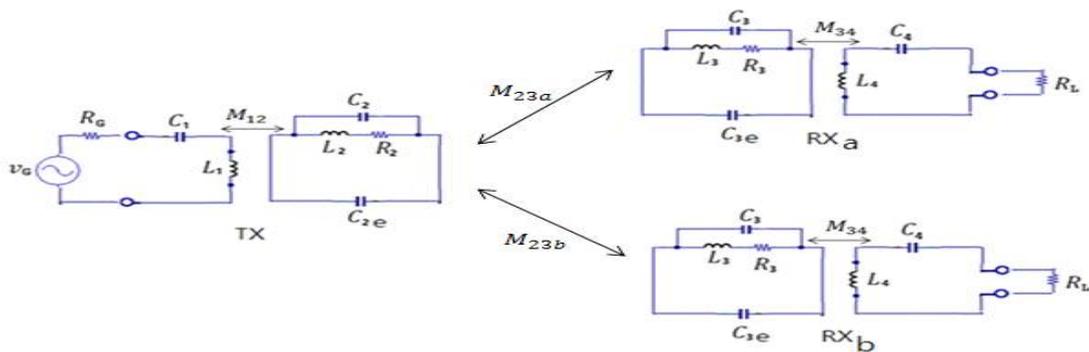


그림 2-6. 1 송신부 (TX) - 2 수신부 (RX) 시스템

입력 임피던스와 출력전압은

$$Z_{ina} = \frac{-s^2 M_{2a}^2 Z_L}{Z_r Z_L - s^2 M_{a1}}, \quad Z_{inb} = \frac{-s^2 M_{2b}^2 Z_L}{Z_r Z_L - s^2 M_{b1}},$$

$$Z_{in} = sL_1 + \frac{1}{sC_1} + \frac{-s^2 M_{12}^2}{Z_2 + Z_{ina} + Z_{inb}}, \quad -(5)$$

$$v_{aL} = \frac{s^3 M_{12} M_{2a}^2 R_L}{Z_1 Z_2 Z_r Z_L - s^2 M_{12}^2 Z_r Z_L - s^2 M_{r1}^2 Z_1 Z_2 + s^2 (M_{2a}^2 + M_{2b}^2) Z_L - s^4 M_{12}^2 M_{r1}^2}$$

$$v_{bL} = \frac{s^3 M_{12} M_{2b}^2 R_L}{Z_1 Z_2 Z_r Z_L - s^2 M_{12}^2 Z_r Z_L - s^2 M_{r1}^2 Z_1 Z_2 + s^2 (M_{2b}^2 + M_{2a}^2) Z_L - s^4 M_{12}^2 M_{r1}^2} \quad -(6)$$

을 얻을 수 있다.

[그림 2-7]은 $R_G = R_L = 50\Omega$, $Q_G = Q_L$, $k_{12} = k_{34} = 0.2$ 이고, $k_{23a} = k_{23critical} = 0.024$ 인 경우, k_{23b} 의 변화에 따른 전력전송 특성을 보인 것으로 a)는 k_{23b} 의 변화에 따른 a-기기의 수신 효율을 나타낸 것으로, k_{23b} 가 0에서 증가할수록 전력 전달 효율이 감소함을 알 수 있다. <그림 1-4> (c)의 입력임피던스는 $k_{23a} = k_{23b} = k_{23critical}$ 일 때, 공진주파수에서 $R_G/2$ 가 됨을 알 수 있다.

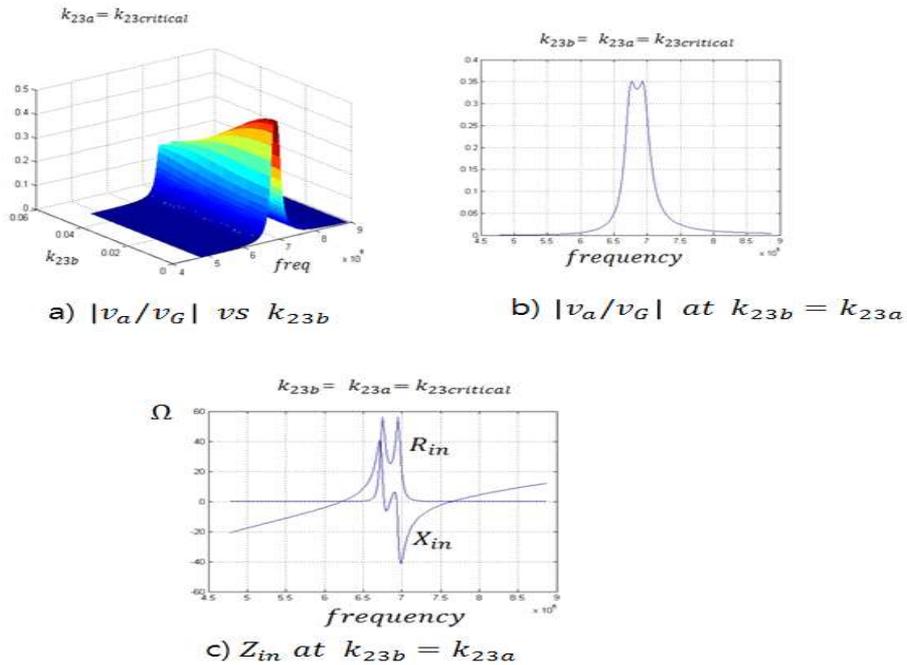


그림 2-7. (a) V_a/V_G , (b) k_{23} 에 따른 V_a/V_G , (c) 입력임피던스

3. R_{coil} 의 영향 (삽입손실)

공진코일은 큰 인덕턴스를 얻기 위해 다중 권선을 이용하게 되는 데, 이 영향으로 코일의 저항 및 커패시턴스가 증가하게 된다. [그림 2-2]의 등가회로의 임피던스는

$$\begin{aligned} Z_{a-b} &= (R_{coil} + j\omega L_{coil}) \parallel \frac{1}{j\omega C_{coil}} + \frac{1}{j\omega C_{ext}} \quad -(7) \\ &= R(\omega) + jX(\omega) + \frac{1}{j\omega C_{ext}} = Z_{coil}(\omega) + \frac{1}{j\omega C_{ext}} \end{aligned}$$

이므로, [그림 2-4]의 회로를 [그림 2-8]와 같이 표현할 수 있다.

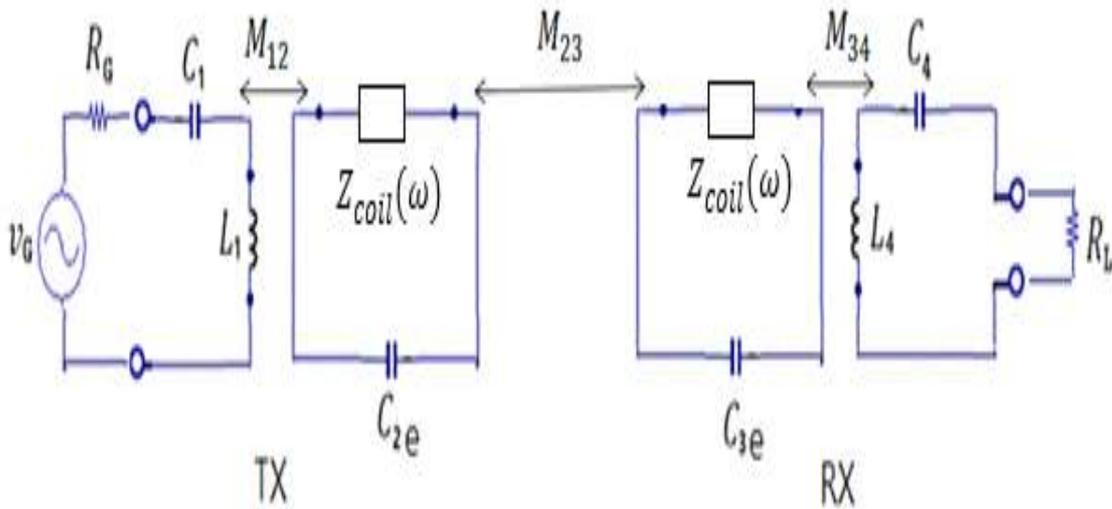
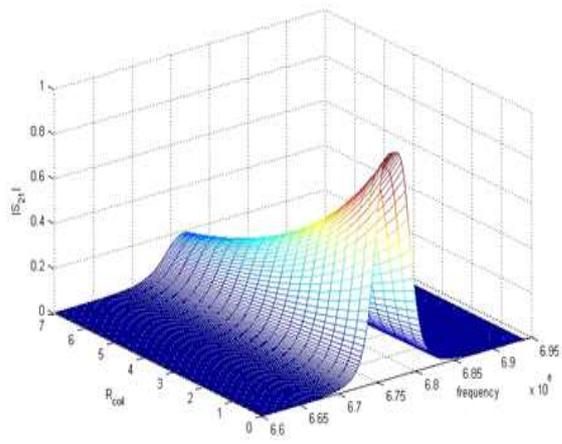


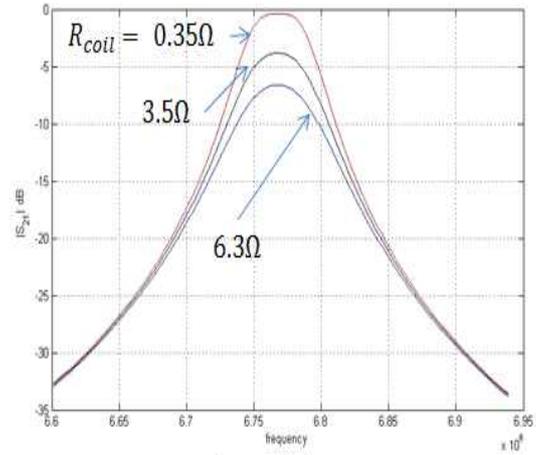
그림 2-8. R_{coil} 의 영향

$L_{coil} = 35\mu H$, $R_{coil} = 3.5\Omega$, $C_{coil} = 8.8pF$ 그리고 $C_{ext} = 7.0pF$ 일 때, 그림 4-a에서 볼 수 있듯이 공진주파수 $f_o = 6.78MHz$ 에서 $R(f_o) \approx 15\Omega$ 에 이르게 된다. 따라서 코일에서의 전력 손실을 무시할 수 없게 된다.

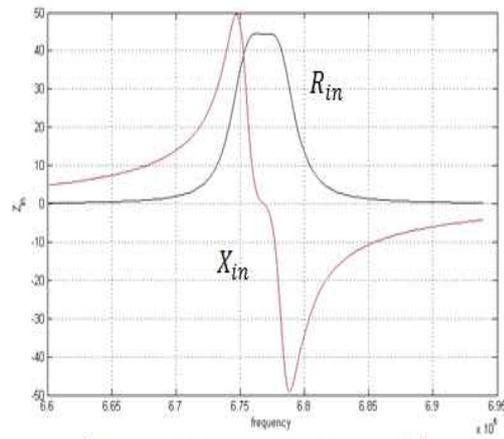
$k_{23} = k_{23critical}$ 일 때의 전송 특성을 그린 [그림 2-9]에서 코일의 저항에 따른 무선 전력전송시스템의 전력전송 효율의 변화, 즉 R_{coil} 의 증가에 따른 삽입손실의 증가를 살펴볼 수 있다. 삽입 손실의 요인으로는 방사전력에 의한 손실도 고려해야 하지만, 회로 해석으로는 그 값을 추출할 수 없다.



a) Power transfer vs R_{coil}



b) $|S_{21}|$ dB



c) input impedance @ $R_{coil} = 3.5\Omega$

그림 2-9. R_{coil} 에 따른 전송 특성의 변화

제 3 장. 공진형 무선전력전송시스템 시제품

제 1 절. 송 / 수신부 (Tx / Rx) 시스템

본 연구에서는 전자파 노출량 분석에 목표가 있기 때문에 송신부(TX)와 수신부(RX)를 동일한 형태로 구현하였다. 공진코일이 서로 다른 두 가지 형태를 제작하여 전력 전송 특성과 무선전력전송 시스템 주변의 전자기장 분포를 측정하였다.

1. 유도코일(Induction Coil)

두 모델의 TX 및 RX에 공통으로 사용될 유도 코일의 제원은 다음 표와 같다.

Parameter	Value
Coil Radius	50mm
Wire Radius	1mm
Turn	1
Coil Material	Copper

표 3-1. 유도코일(Induction Coil) Parameter

제작된 코일 특성을 회로분석기로 측정한 결과는 그림 3-1과 같다.

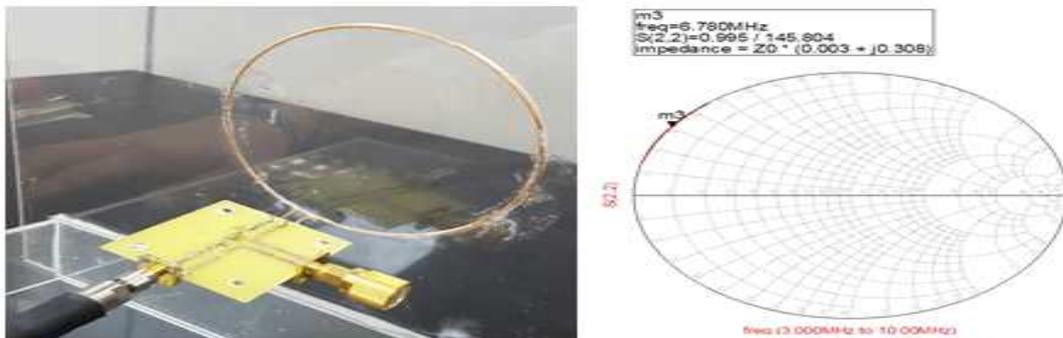


그림 3-1. 유도코일(Induction Coil) 의 특성 측정
(a) 측정모습 (b) 스미스차트(SmithChart) S(1,1)

[그림 3-1]의 (a)는 유도코일(Induction Coil)의 측정 모습이다. 특정 주파수에서 공진을 유도하기 위한 커패시터(Capacitor(C_{ext}))를 달지 않고 코일에 Short Port를 연결한 후 코일이 가지고 있는 저항(Resistance)과 인덕턴스(Inductance)를 측정하였다. [그림 3-1]의 (b)의 스미스 차트에서 주파수에 따른 입력 임피던스를 알 수 있으므로 코일의 저항(Resistance)과 인덕턴스(Inductance)를 구할 수 있다.

$f = 6.78 \times 10^6$ 이고, $Z = 50 \times (0.003 + j0.308)$ 이므로 $R + j\omega L = 50 \times (0.003 + j0.308)$ 을 통해 $R = 0.15\Omega$, $L = 0.361\mu H$ 를 구할 수 있다. 코일을 구성하는 도선의 길이가 짧아 저항 값이 매우 작음을 알 수 있다. 권선 수가 1(turn)이기 때문에 코일 간에 발생하는 커패시턴스(Capacitance)는 배제하였다.

코일의 공진주파수(f_0)를 특정 주파수(6.78MHz)로 설정하기 위하여 공진 주파수(f_0)를 맞추기 위해 2.2nF 과 5.6nF의 커패시턴스(Capacitance)를 연결하고 정합을 위해 50Ω Port를 연결하여 측정한 사진이다.

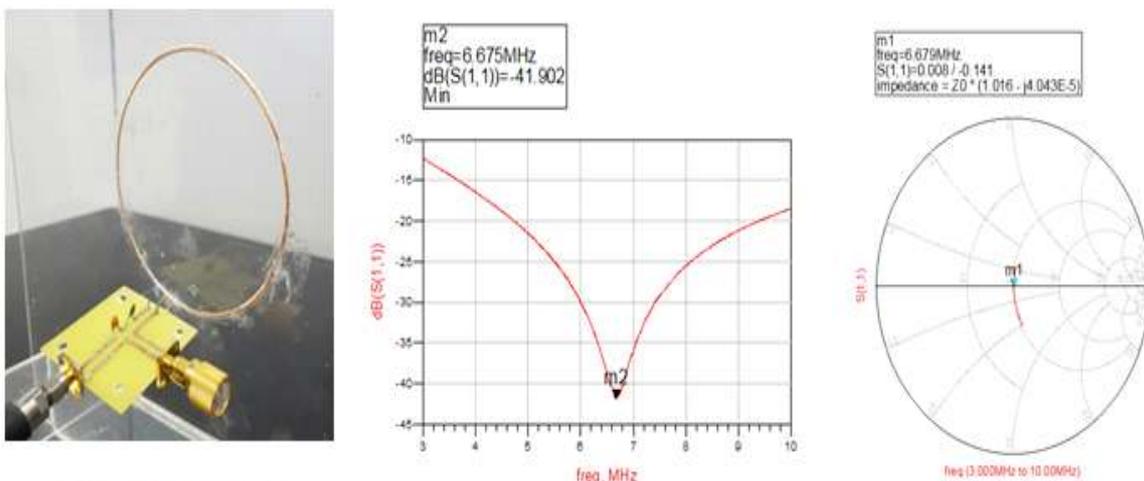


그림 3-2. 공진주파수 설정을 위한 측정

- (a) 외부 커패시터(Capacitor)를 연결한 유도코일(Induction Coil)
- (b) $\text{dB}(S(1,1))$ (C) 스미스차트(SmithChart) $S(1,1)$

목표로 하는 공진주파수(f_0)는 6.78MHz이지만, 인덕턴스(Inductance) 값이 매우 작아 nF 단위의 Capacitor를 사용할 수밖에 없었고, 그 종류가 많지 않아 최대한 근접한 값을 사용하였다. 공진형 무선전력전송 시스템에서 공진주파수는 공진

코일의 값에 수렴하기 때문에 6.679MHz를 사용하였다.

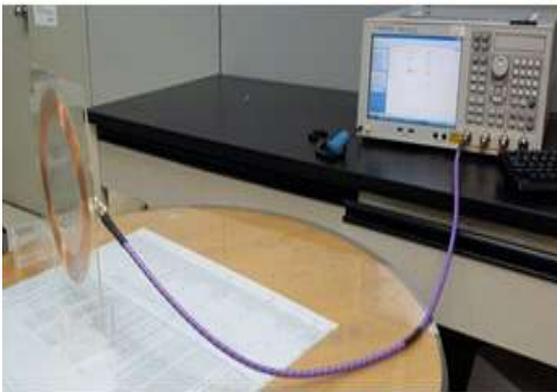
2. 공진코일(Resonance Coil)

가. 공진코일(Resonance Coil) 규격

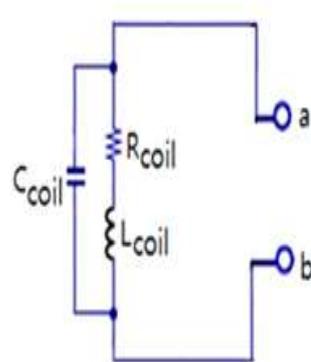
Parameter	Type 1	Type 2
코일반지름 (Coil Radius)	65mm	65mm
도선지름 (Wire Diameter)	1mm	1mm
권선수 (Turn)	10	12
코일 물질 (Coil Material)	Copper	Copper

표 3-2. 공진코일(Resonance Coil) Parameter

나. 코일 특성



(a)



(b)

그림 3-3. (a) 공진코일(Resonance coil) 특성 측정,
(b) 공진코일(Resonance coil) 등가 회로

공진 코일(Resonance Coil)의 경우, 권선수가 많기 때문에 코일 간의 커패시턴스(Capacitance)를 고려해 주어야 한다. 공진코일(Resonance Coil)의 인덕턴스

(Inductance)를 알기 위해 5가지의 커패시터(Capacitor)를 연결하고, 공진주파수 (f_0) 를 측정하여 코일의 커패시턴스(Capacitance)와 인덕턴스(Inductance)를 계산 하였다.

(1) Type 1. 공진 코일(Resonance coil)

공진 코일에 직렬로 표 3-3.와 같은 커패시턴스(Capacitance)를 연결하여 공진 주파수를 측정함으로써 공진 코일의 등가 회로를 완성할 수 있다.

Capacitance	공진주파수
10pF	7.927MHz
15pF	6.865MHz
15.652pF	16.765MHz
16.071pF	6.7MHz
18pF	6.415MHz

표 3-3. Type 1. 공진 코일에 연결한 커패시턴스(Capacitance) 와 그에 따른 공진 주파수(f_0)

[표 3-3] 의 결과로부터 수식을 통해 Coil의 L과 C 값을 구한 결과 $L_{coil} = 26\mu H$, $C_{coil} = 5.7pF$ 의 값을 얻을 수 있다.

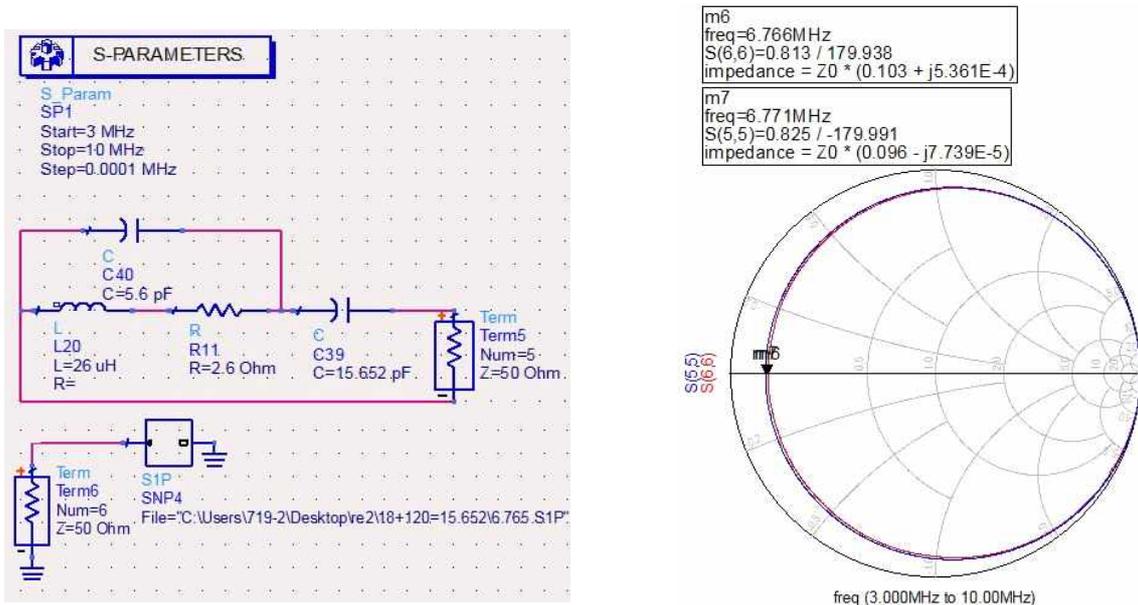


그림 3-4 ADS Modeling 및 Network Analyzer 측정값의 비교(1)

계산결과 구한 L과 C값을 통해 Modeling한 회로와 실제 측정된 공진주파수(f_0)를 비교하면 0.005MHz의 근소한 오차가 있는 것을 알 수 있다.

(2) Type 2 공진 코일

표 3-4. 과 같이 Type 2 공진 코일에 5가지 종류의 Capacitance를 연결하고 공진주파수(f_0)를 측정하였다.

커패시턴스(Capacitance)	공진주파수(f_0)
5 pF	7.848MHz
6 pF	7.545MHz
7 pF	7.231MHz
10 pF	6.533MHz
14 pF	5.996MHz

표 3-4. Type 2 공진 코일에 연결한 캐패시턴스(Capacitance)와 그에 따른 공진 주파수(f_0)

수식을 통해 Coil의 인덕턴스(Inductance) 과 캐패시턴스(Capacitance) 값을 구한 결과 $L_{coil} = 34.4\mu H$, $C_{coil} = 7.2pF$ 의 값을 얻을 수 있다.

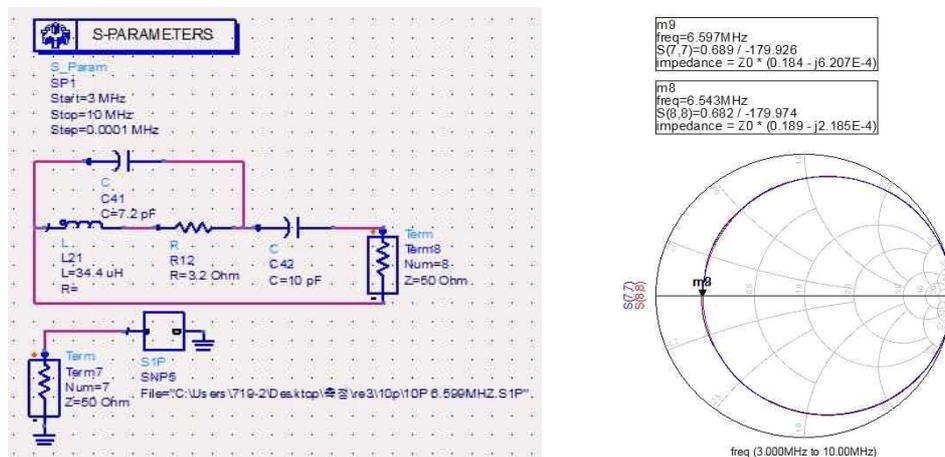


그림 3-5. ADS Modeling 및 Network Analyzer 측정값의 비교(2)

Type 1. 공진 코일(Resonance Coil)에서와 같은 방법으로 [그림 3-5]와 같이 Modeling한 회로와 실제 측정된 값을 비교할 경우 0.054MHz의 오차가 있는 것을 알 수 있다.

다. 코일의 공진 주파수(f_0)

공진 코일이 6.78MHz에서 공진하도록 C_{ext} 를 코일에 연결하였다.

(1) Type 1. 공진 코일

[그림 3-6]과 같이 Resonance Coil에 15.652 pF의 커패시터(Capacitor)를 붙인 결과 약 6.766MHz의 공진 주파수를 얻을 수 있었고 Modeling한 결과와 0.005MHz의 오차가 있었다.

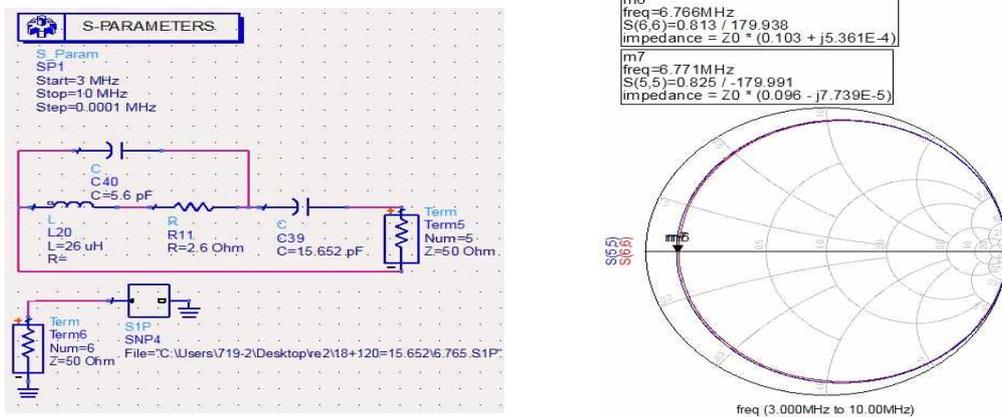


그림 3-6. ADS Modeling 및 Network Analyzer 측정값의 비교(3)

(2) Type 2. 공진 코일

[그림 3-7]과 같이 공진코일에 8.92pF의 커패시터를 붙인 결과 약 6.787MHz의 공진 주파수를 얻을 수 있었고 Modeling한 결과와 0.28MHz의 오차가 있었다.

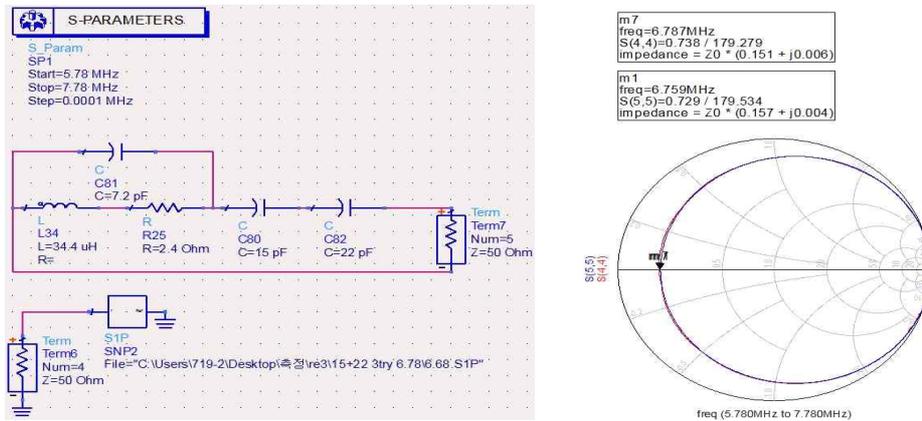


그림 3-7. ADS Modeling 및 Network Analyzer 측정값의 비교(4)

제 2 절 무선전력전송 시스템 구현

1. Type 1. 시스템의 전력전송 특성

가. 송신부(TX) 시스템

[그림 3-8]은 제작한 Type 1. 송신부(TX) 시스템의 특성을 측정한 것으로, RX가 없이 TX만 단독으로 동작하고 있는 경우이다. 목표주파수는 6.78MHz이지만, 정확한 값의 캐패시터를 연결하지 못하여 30MHz 정도의 오차를 보이고 있다.

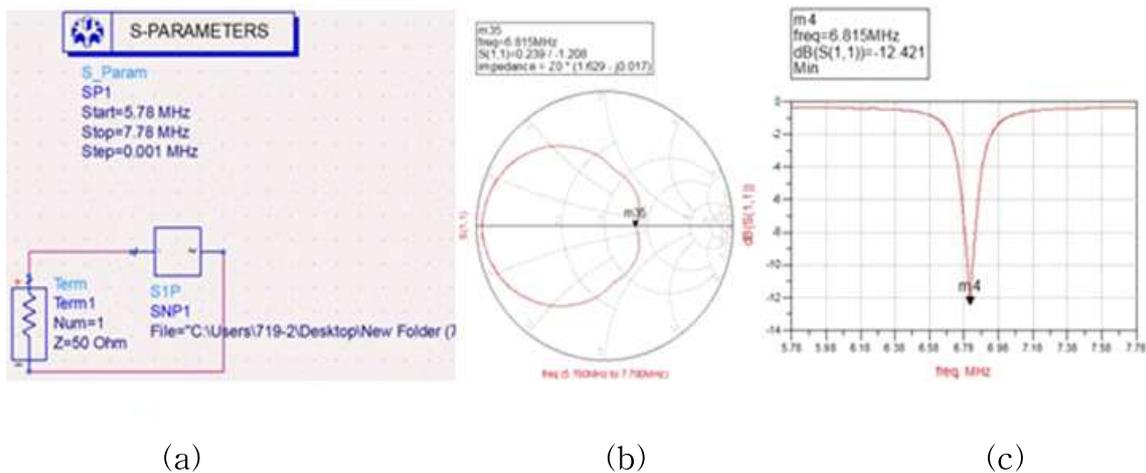
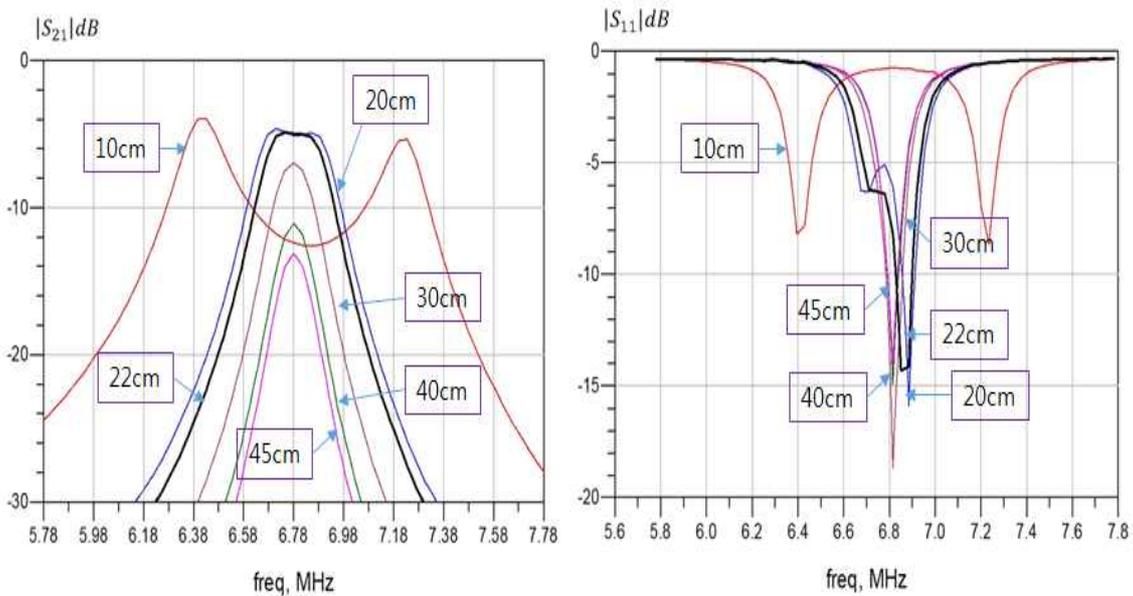


그림 3-8. Type 1. 송신부(TX) 시스템의 특성 측정
 (a) 측정값에 의한 ADS 회로,
 (b) 스미스차트(SmithChart) S(1,1), (c) dB(S(1,1))

나. 송수신부(TX-RX) 시스템

[그림 3-9]는 제작한 Type 1. 무선전력전송(Wireless Power Transfer) 모델의 송신부(TX)와 수신부(RX) 사이의 거리(R_{TX-RX})에 따른, 즉 송신부(TX) 공진 코일(Resonance coil)과 수신부(RX) 공진코일(Resonance Coil)과의 상호결합계수(K, Coupling Coefficient)에 따른 전력전송 특성을 보인 그림이다. 제 2장 [그림 2-6.(b)]의 k_{23} 에 따른 $|S_{21}|$ 의 변화와 같은 경향이지만, [그림 2-9.(b)]의 R_{coil} 의 영향을 고려하면 회로 해석의 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. $k_{23} = k_{23critical}$ 는 $R_{TX-RX} = 29cm$ 일 때임을 알 수 있다.



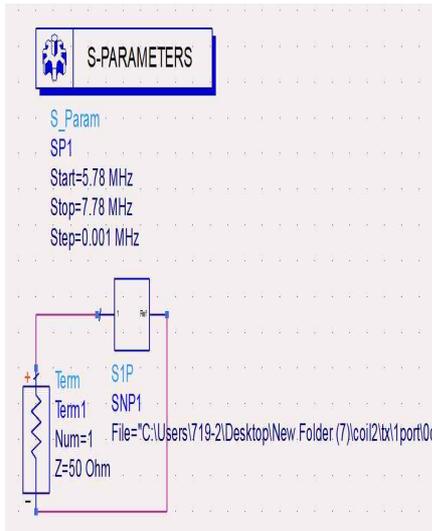
(a) 거리에 따른 전송특성

(b) 거리에 따른 반사특성

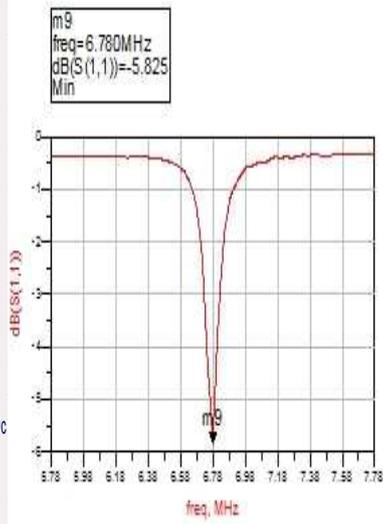
그림 3-9. Type1. (a) 거리에 따른 전송특성 (b) 거리에 따른 반사특성

2. Type 2 시스템의 전력전송 특성

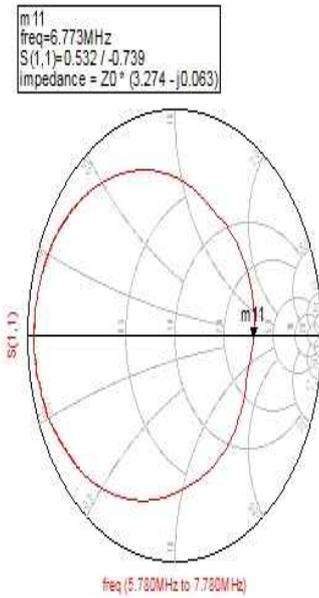
가. 송신부(TX) 시스템



(a)



(b)



(c)

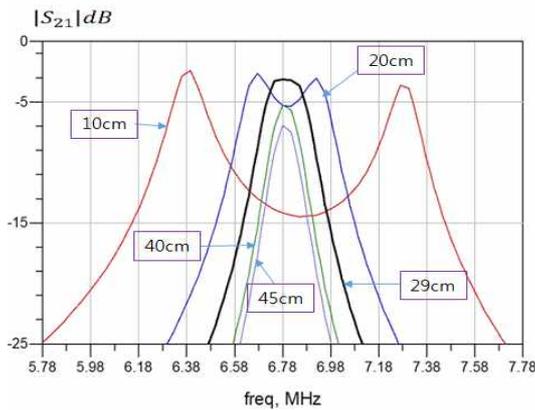
그림 3-10. Type 2. 송신부(TX) 시스템의 특성 측정

(a) 송신부(TX) 측정값 시뮬레이션

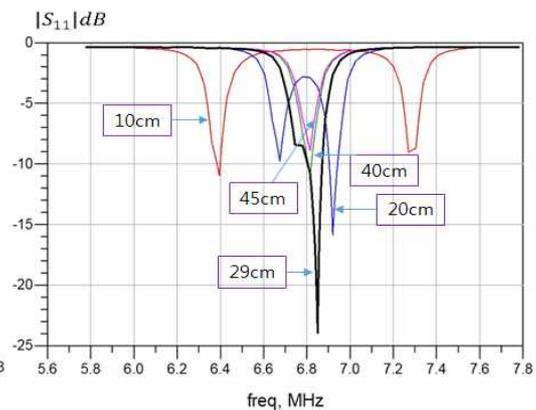
(b) S-Parameter S(1,1) (c) 스미스차트(Smith Chart) S(1,1)

나. 송수신부(TX-RX System)

[그림 3-11]은 제작한 Type 1 무선전력전송(Wireless Power Transfer) 모델의 TX와 RX사이의 거리(R_{TX-RX})에 따른, 즉 송신부(TX) 공진 코일과 수신부(RX) 공진코일과의 상호결합계수에 따른 전력 전송 특성을 보인 그림이다. $k_{23} = k_{23critical}$ 는 $R_{TX-RX} = 29cm$ 일 때임을 알 수 있다.



(a) 거리에 따른 전송 효율



(b) 거리에 따른 반사 특성

그림 3-11. Type2. (a) 거리에 따른 전송특성 (b) 거리에 따른 반사특성

제 3 절 무선전력전송 시스템에 따른 근역장 분포

무선전력전송(Wireless Power Transfer) 시스템의 근역장 영역의 전자기장(EM Field) 분포를 제작한 두 타입에 대한 송신부(TX) 시스템에 대하여 측정하였다. [그림 3-12] 는 자기장(H-Field) 및 전기장(E-Field) 측정을 위한 측정 환경을 보인 것이다. 공급전원으로는 $20 V_{p-p}$ 의 6.78MHz 정현파 신호를 이용하였고, 전원의 내부저항은 50Ω 이다.

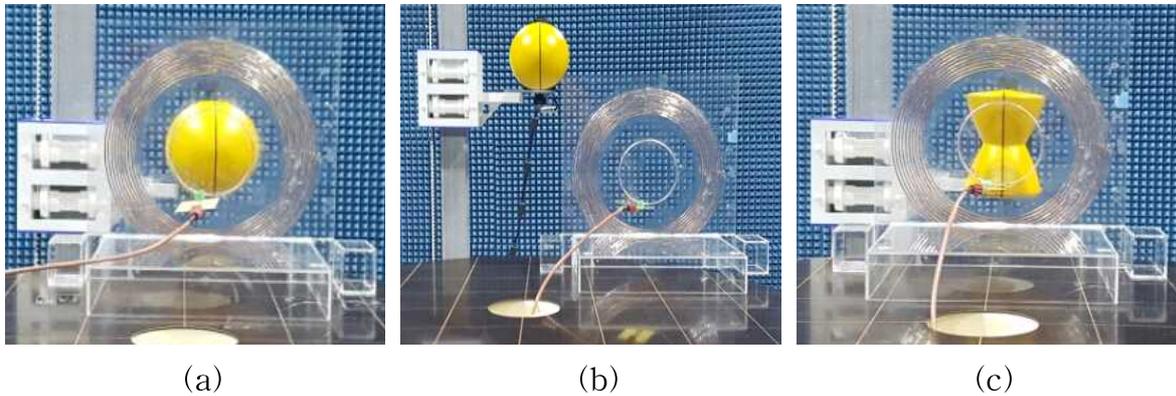


그림 3-12. (a) 자기장(H-Field) 중심부 측정, (b) 자기장(H-Field) 외곽 측정, (c) 전기장(E-Field) 중심부 측정

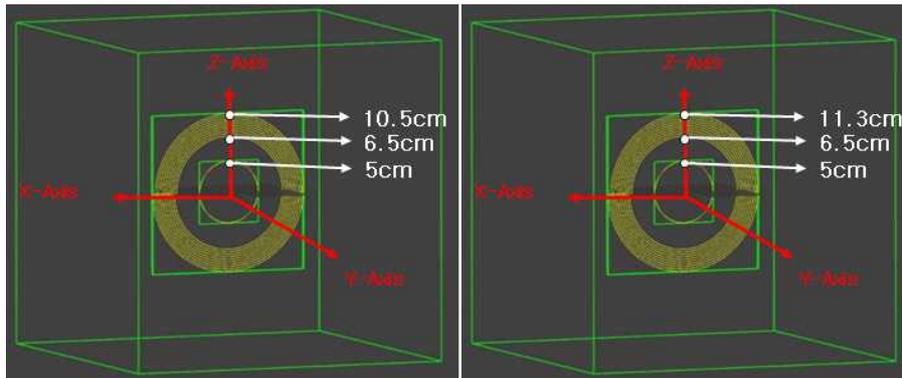


그림 3-13. 근역장 영역 전자기장 표현을 위한 좌표계

1. 송신부(Tx) 시스템

수신부(RX) 시스템으로 전력 전송이 이루어지지 않고, 송신부(TX) 시스템에만 전원이 공급되는 경우의 전자기장 분포를 코일 반경의 두배 이상의 영역에서 측정하였다.

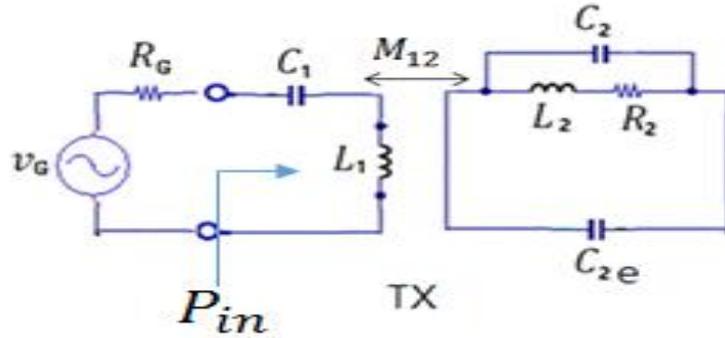


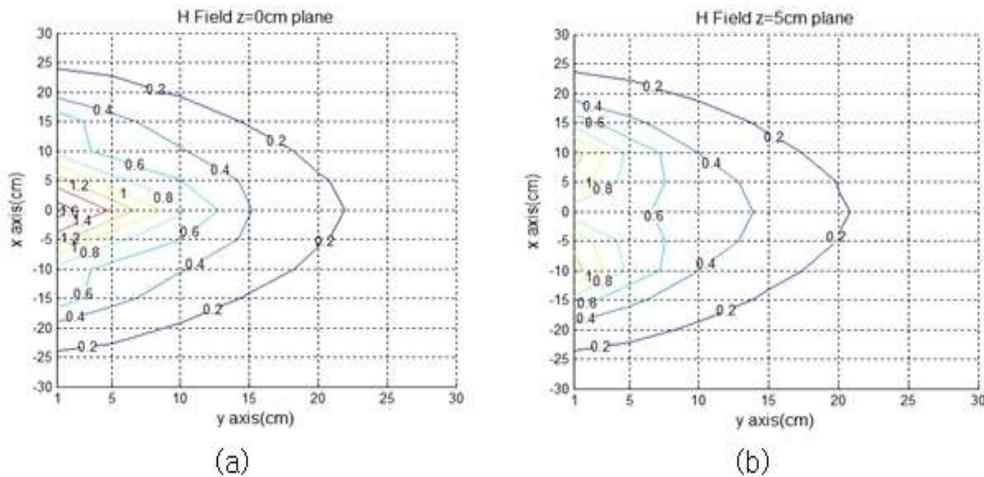
그림 3-14. 송신부(TX) 시스템의 등가회로

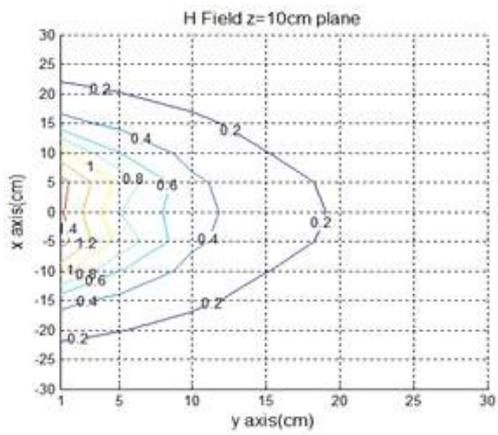
가. Type1. 송신부(TX) 시스템

송신부(TX) 시스템에 공급되는 평균전력은 $P_{in} = 0.411 W$ 이다.

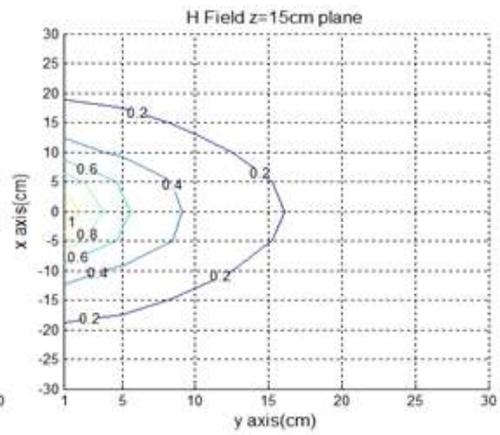
(1) 자기장 (H-Field) 분포

자기장의 세기의 최대치는 코일의 중심부근에서 $1.6A/m$ 이상으로 측정되고 있지만, 코일 중심에서 $20cm$ 반경에서의 자기장의 세기는 $0.2A/m$ 부근의 값을 보여주고 있다.

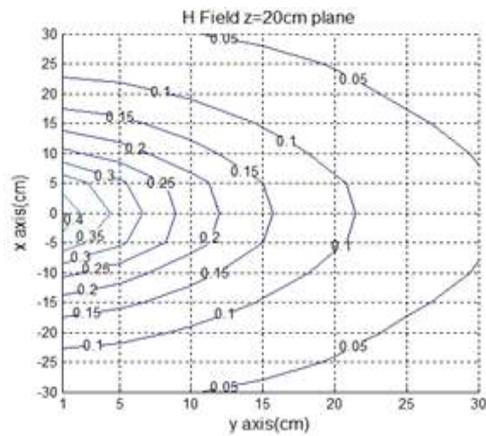




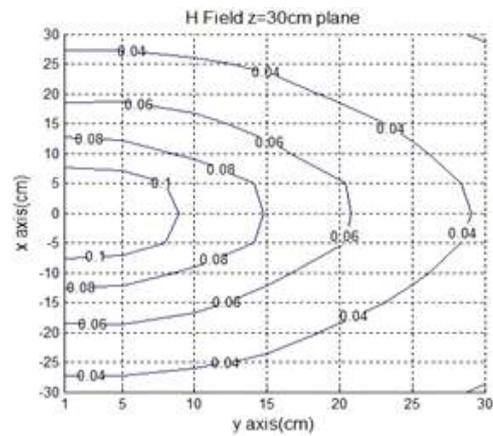
(c)



(d)

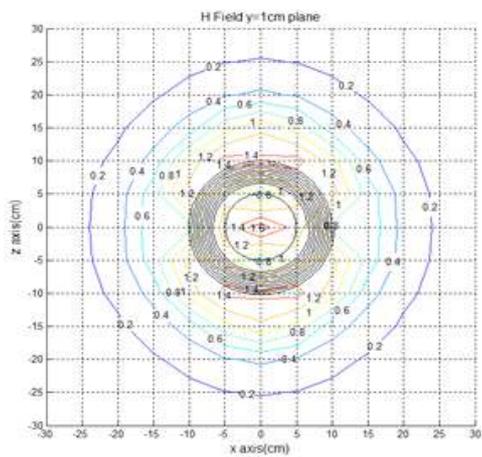


(e)

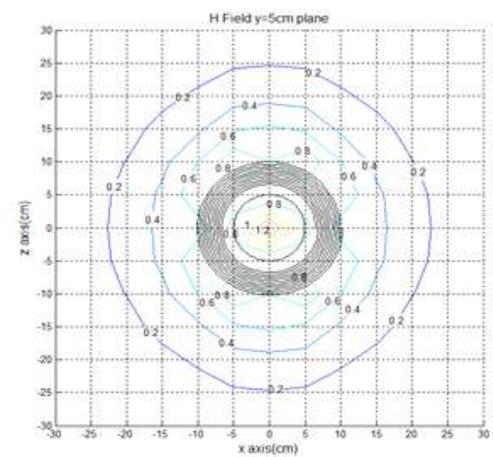


(f)

그림 3-15. $z=\text{constant}$ 인 평면상의 자기장(H-Field) 분포(단위 : A/m)



(a)



(b)

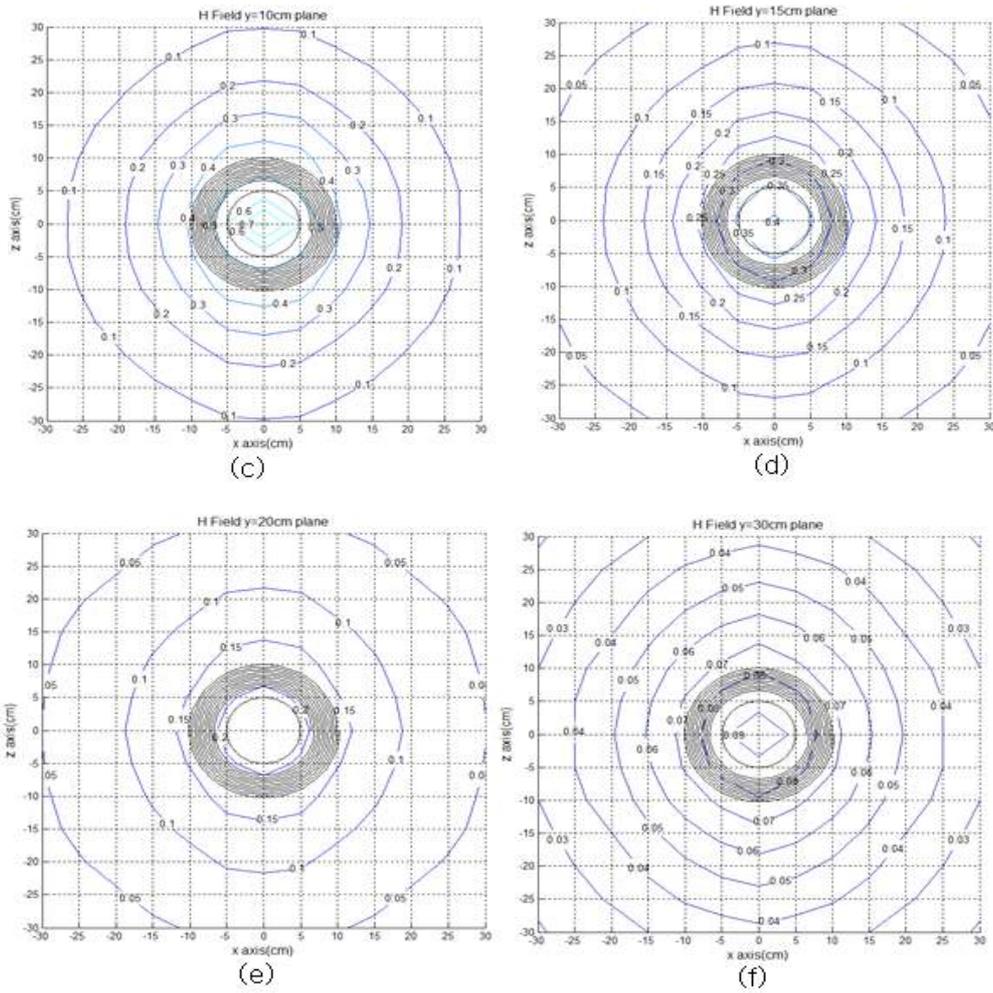


그림 3-16. $y=\text{constant}$ 인 평면상의 자기장(H-Field) 분포(단위 : A/m)

(2) 전기장(E-Field) 분포

$z=5\text{cm}$ 인 평면과 $z=10\text{cm}$ 인 평면에서 $y=0$ 부근에서 전기장이 강하게 분포하고 있음을 볼 수 있다. 코일로부터 멀어질수록, 즉 y 가 증가할수록 전기장의 세기가 약해진다. 코일 중심으로부터 20cm 정도 떨어진 지점들에서의 전기장의 세기는 대략 10V/m 이하임을 알 수 있다.

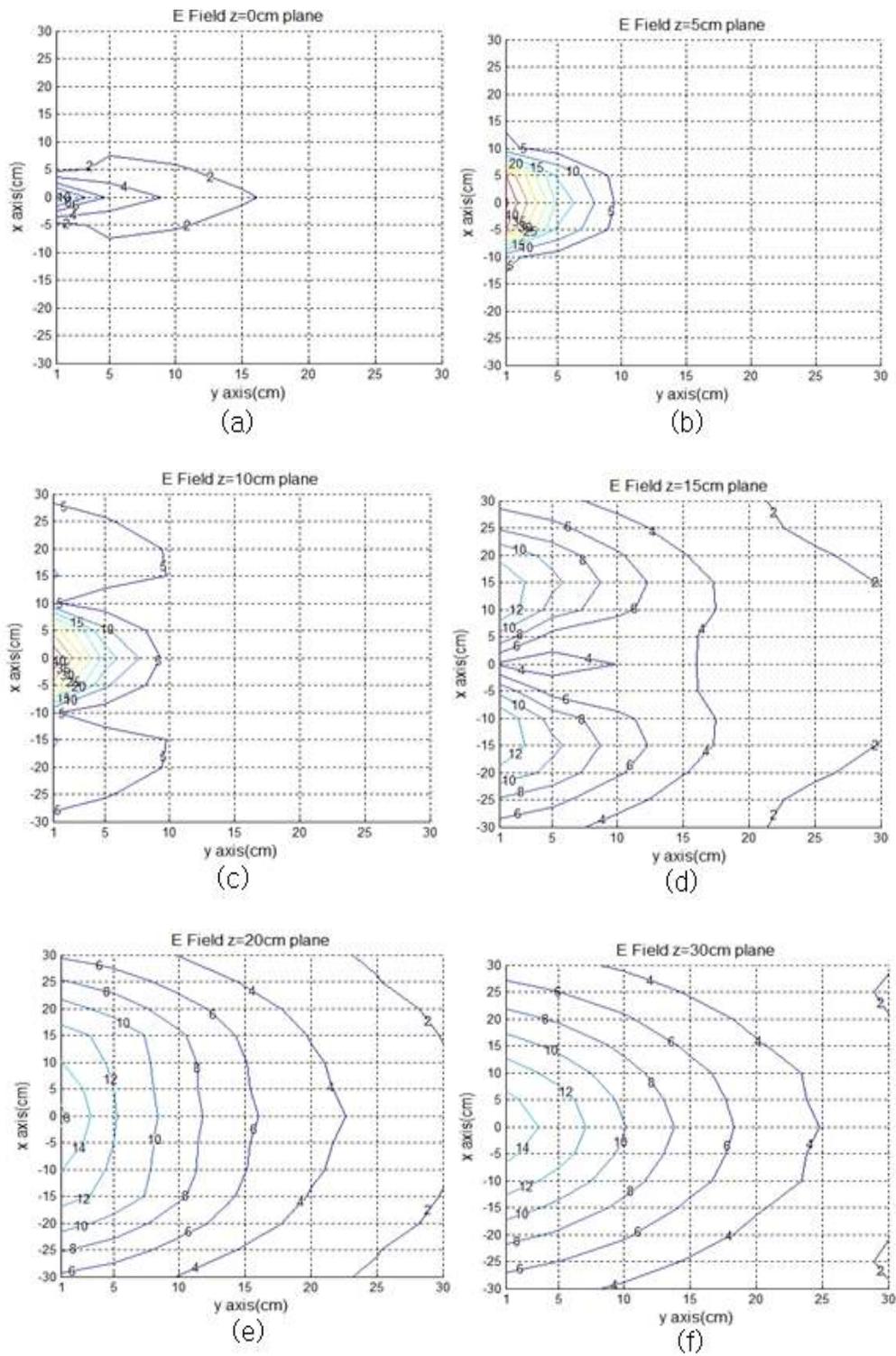


그림 3-17. $z=\text{constant}$ 인 평면상의 전기장(E-Field) 분포(단위 : V/m)

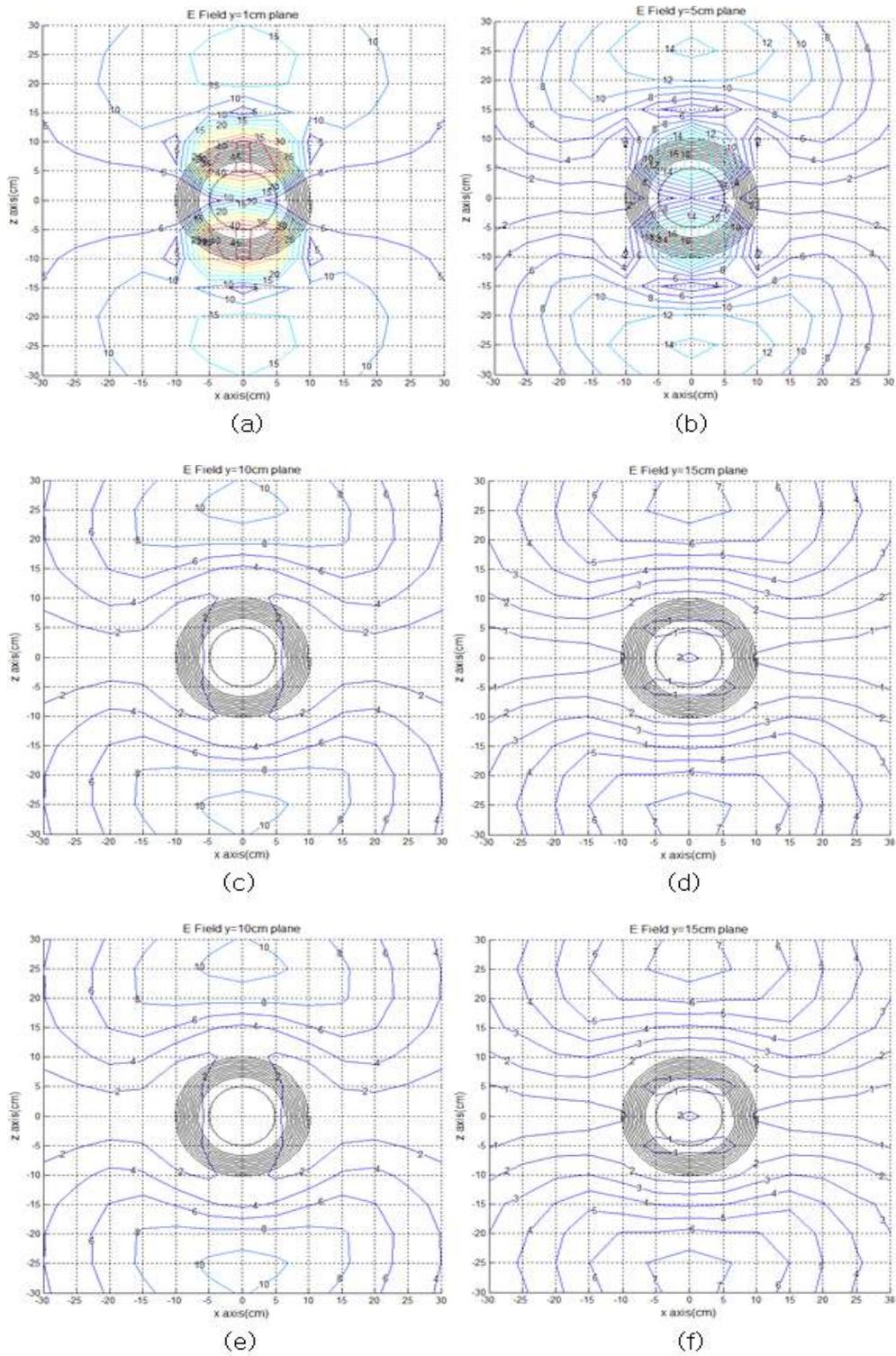


그림 3-18. $y=\text{constant}$ 인 평면상의 전기장(E-Field) 분포(단위 : A/m)

나. Type2. 송신부(TX) 시스템

송신부(TX) 시스템에 공급되는 평균전력은 $P_{in} = 0.369 W$ 이다.

전자기장 분포는 Type 1의 경우와 유사하다.

(1) 자기장(H-Field) 분포

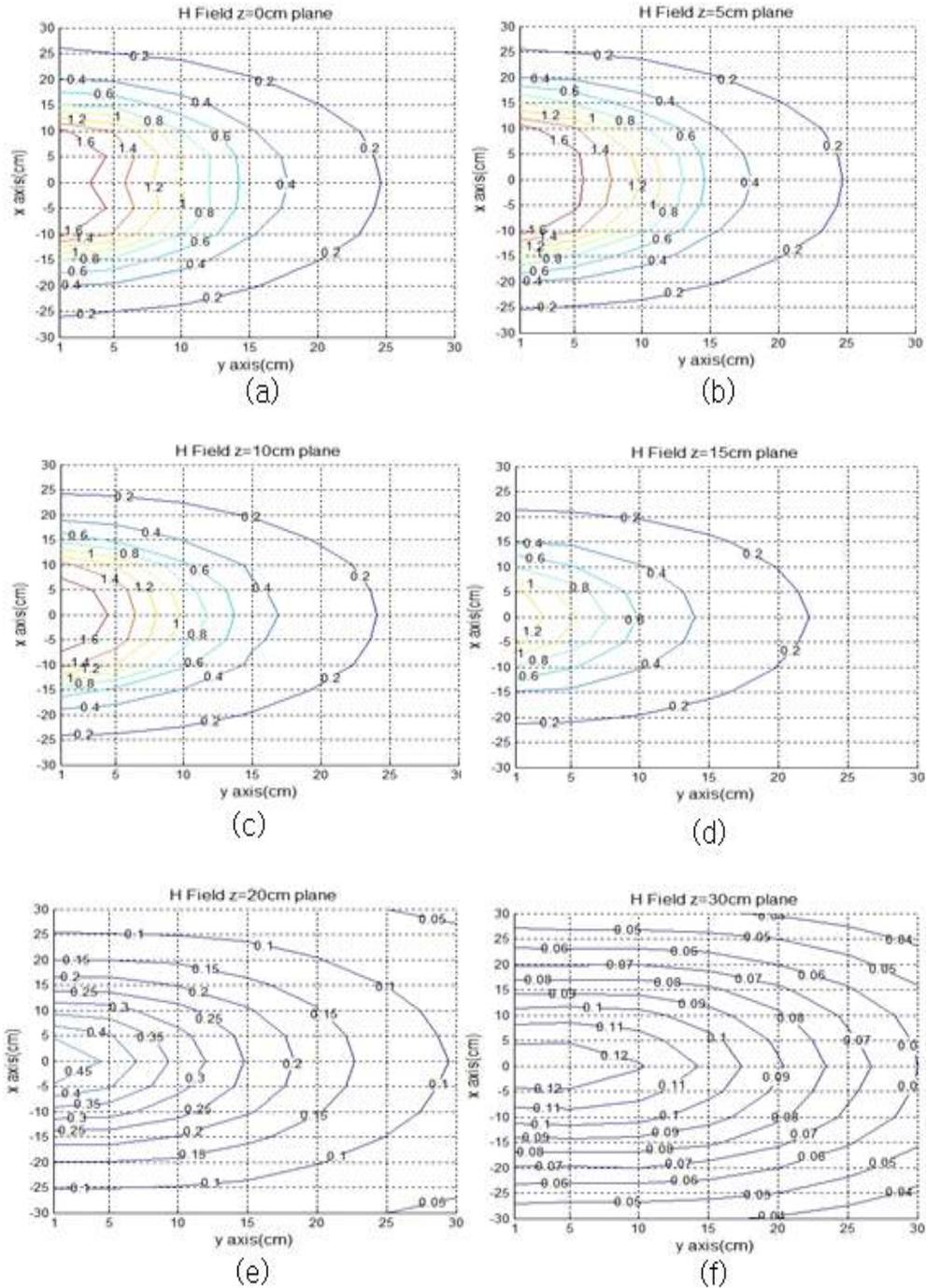


그림 3-19. z=constant인 평면상의 자기장(H-Field) 분포(단위 : A/m)

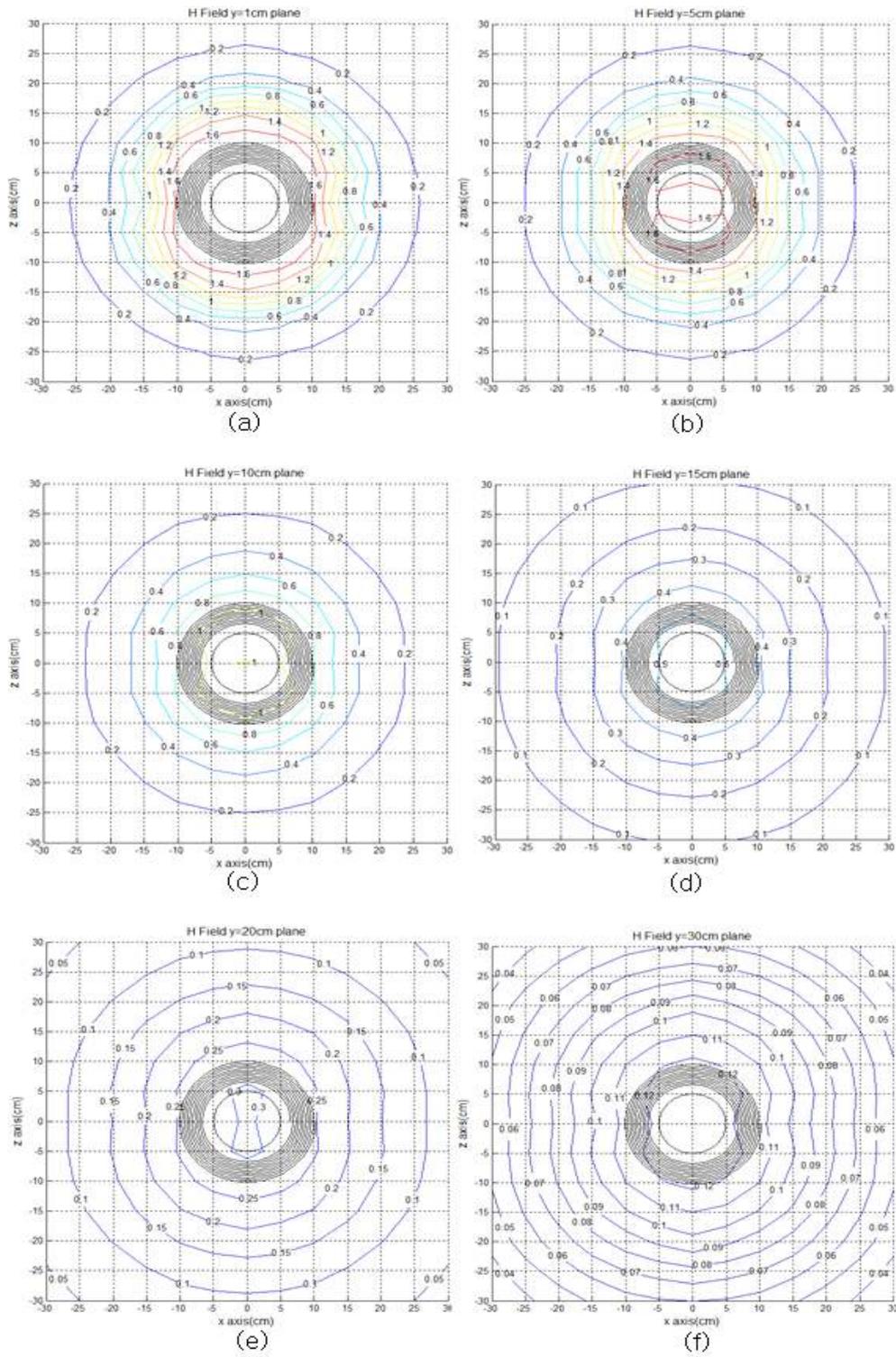


그림 3-20. $y=\text{constant}$ 인 평면상의 자기장(H-field) 분포(단위 : A/m)

(2) 전기장(E-Field) 분포

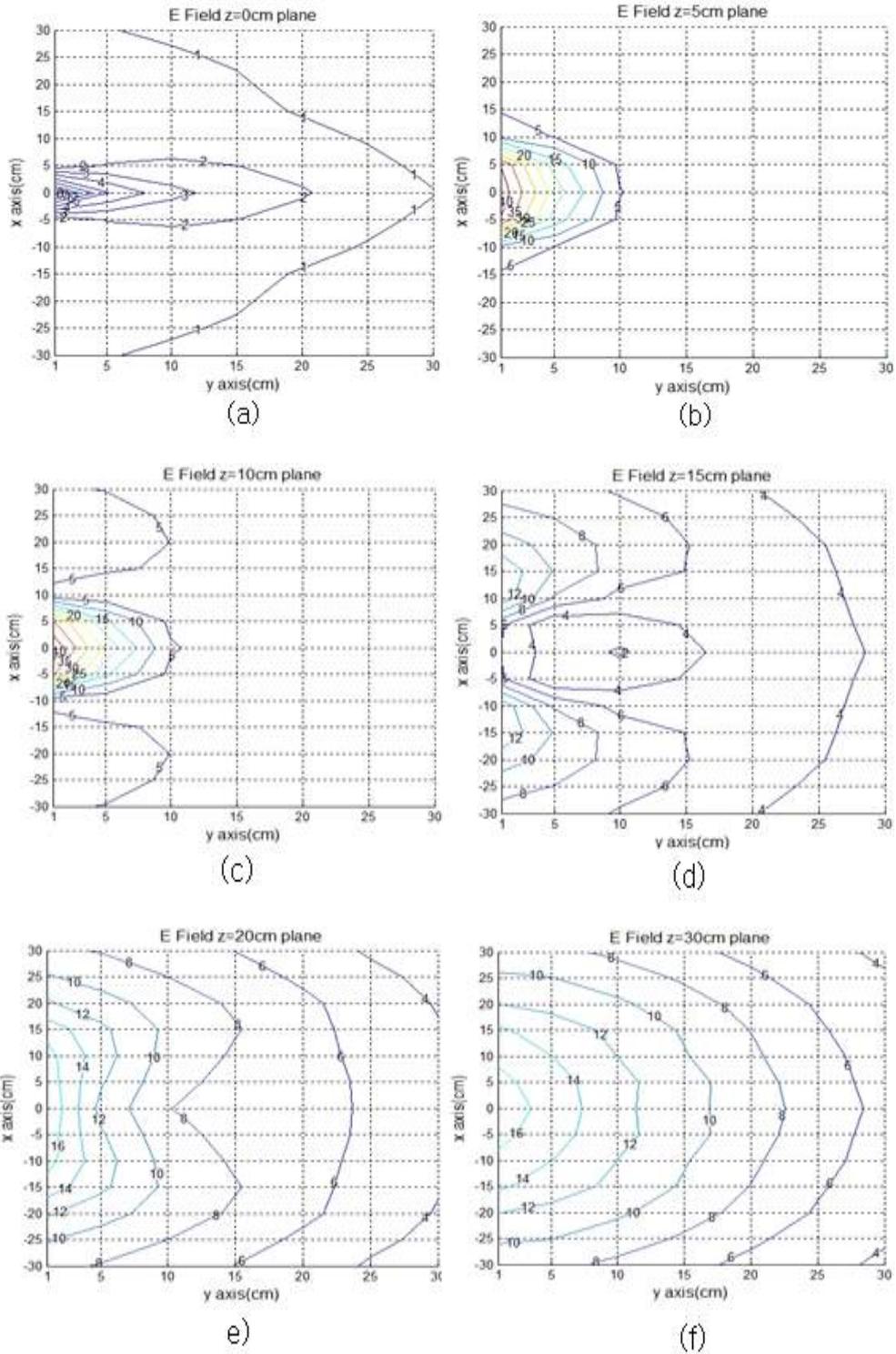


그림 3-21. z=constant인 평면상의 전기장(E-Field) 분포(단위 : V/m)

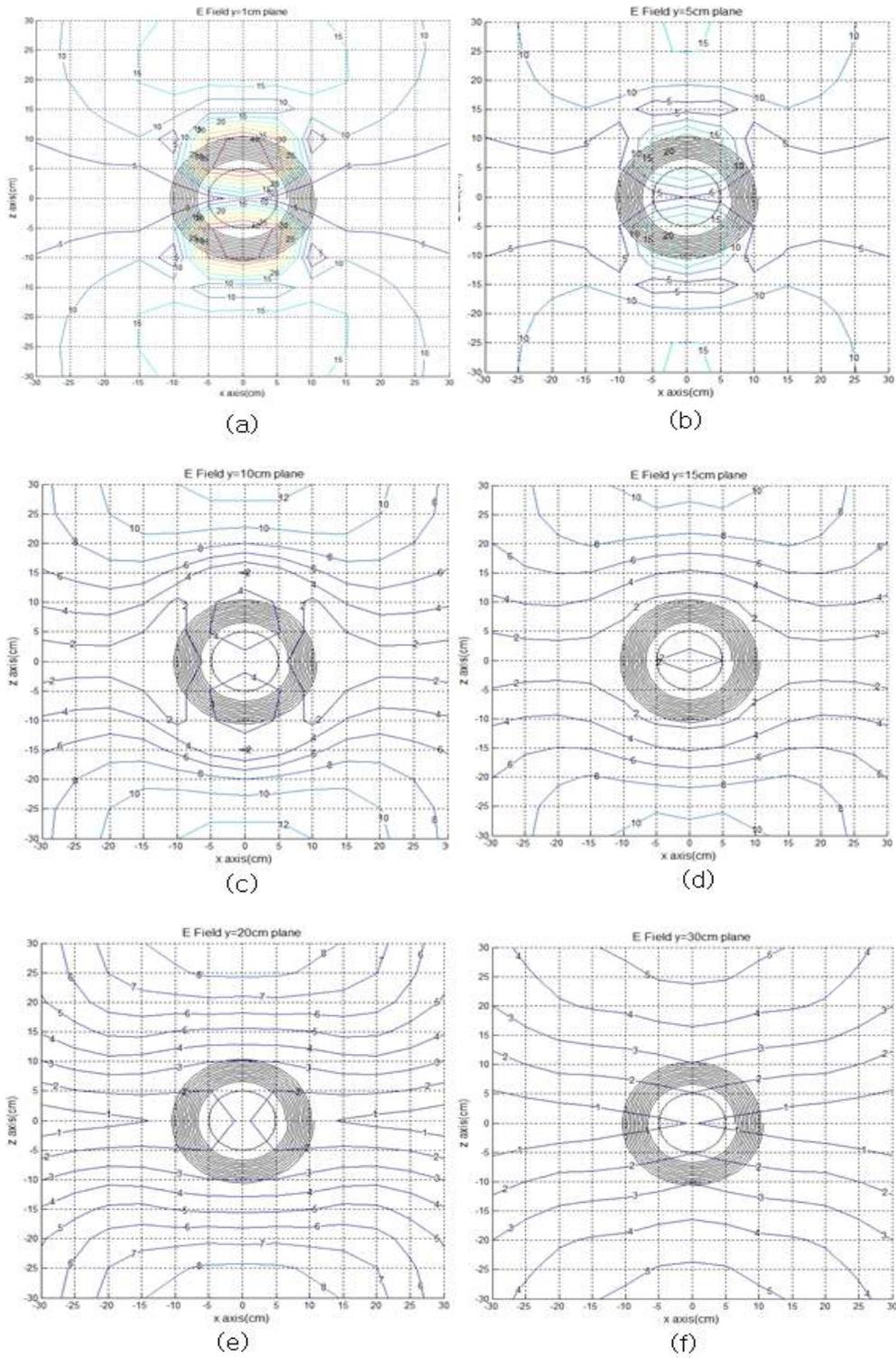


그림 3-22. $y=\text{constant}$ 인 평면상의 전기장(E-Field) 분포(단위 : V/m)

2. Tx-Rx System

TX system에 공급되는 평균전력은 $P_{in} = 0.45 W$ 이고, 부하저항 R_L 에 공급되는 전력 $P_L = 0.24 W$ 이다.

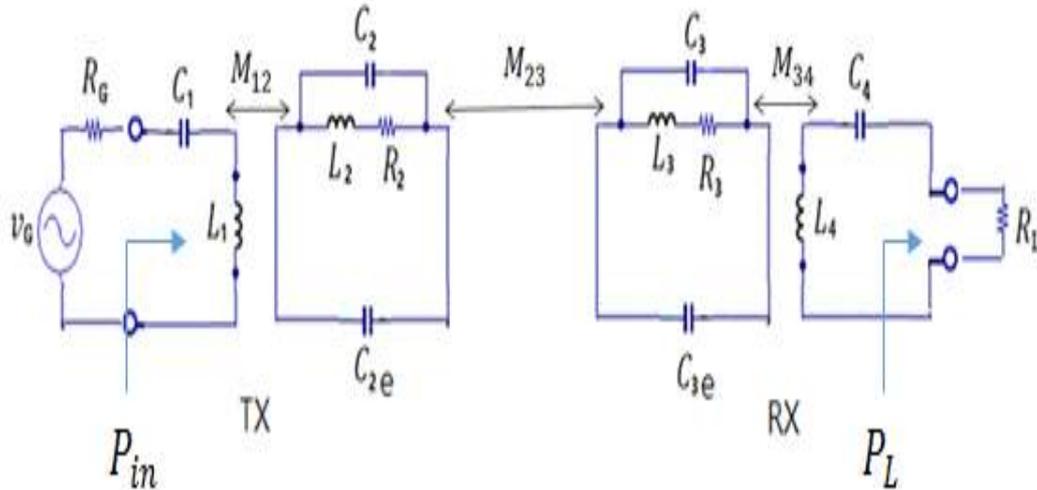
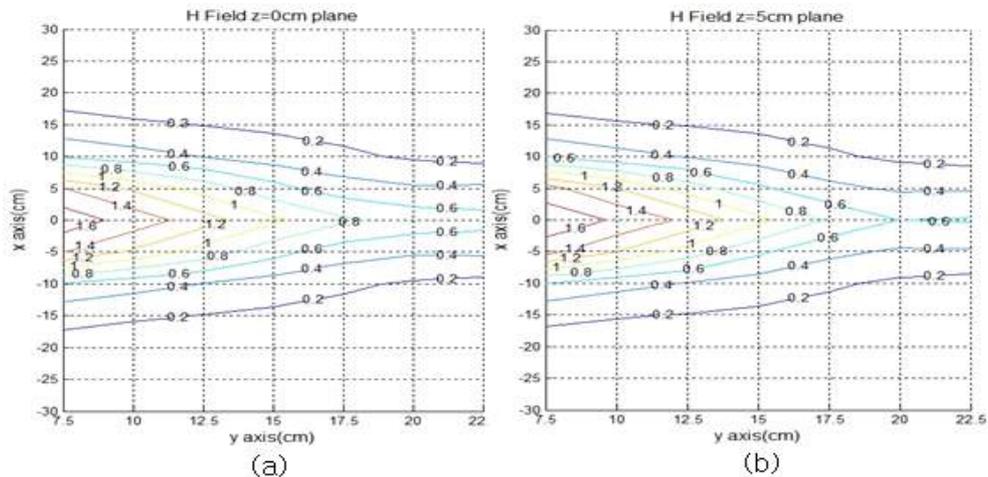
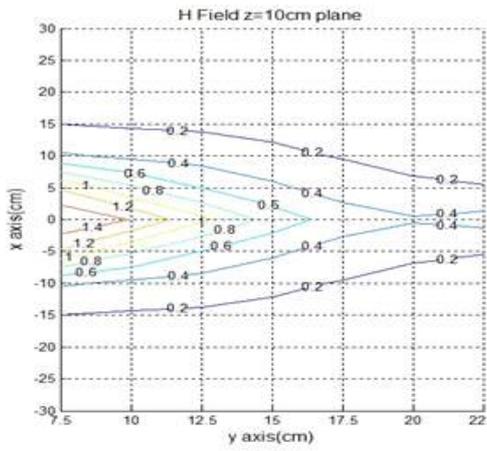


그림 3-23. 송수신부(TX-RX) 시스템의 등가회로

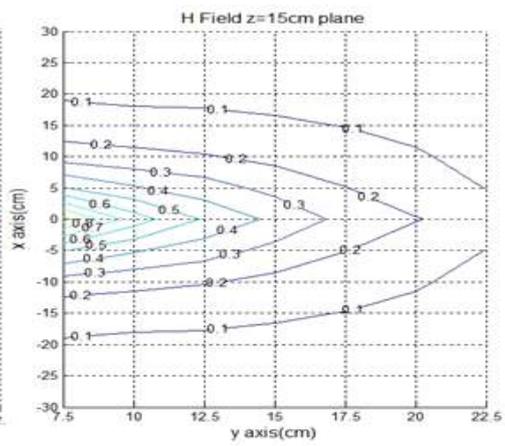
가. 자기장(H-Field) 분포

TX 코일이 놓여있는 $z=0$ 평면에서 다른 면들 보다 높은 자기장 세기를 보여 주고 있다. 코일 중심으로부터 20cm 떨어진 위치에서의 자기장의 최고치는 $x=z=0$ 일 때 $0.7A/m$ 의 값을 나타냄을 알 수 있다. TX만 동작시키는 경우(무부하 상태)와 비교하여 3.5배 이상의 크기를 갖는다.

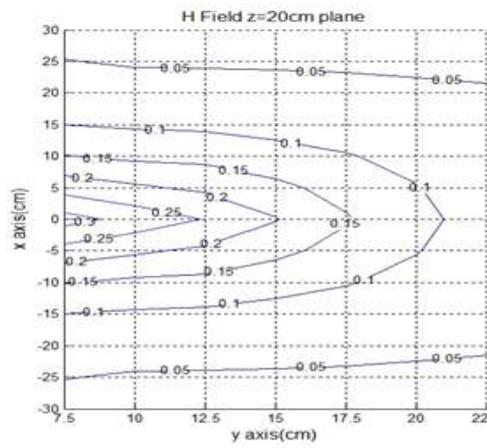




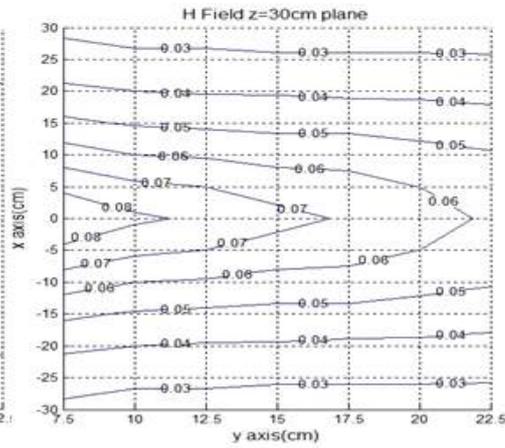
(c)



(d)

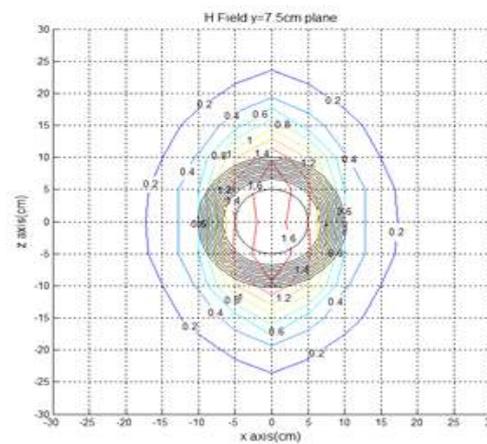


(c)

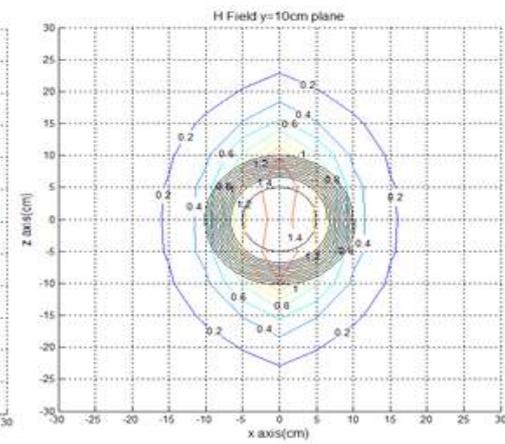


(d)

그림 3-24. $z=\text{constant}$ 인 평면상의 자기장(H-Field) 분포(단위 : A/m)



(a)



(b)

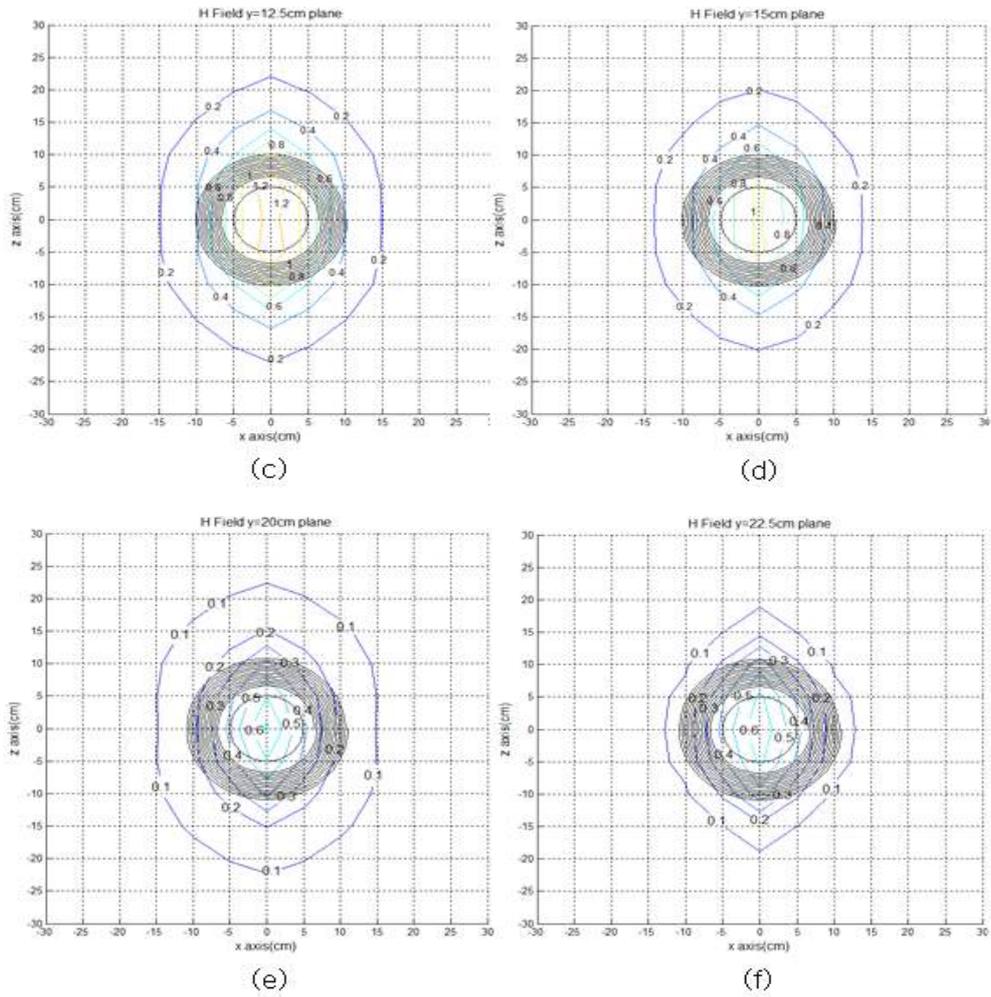


그림 3-25. $y=\text{constant}$ 인 평면상의 자기장(H-Field) 분포(단위 : A/m)

나. 전기장(E-Field) 분포

전송부(TX)와 수신부(RX) 코일(Coil) 사이에서 전기장 분포가 비교적 강하다. 두 코일 외부이면서 중심으로부터 20cm 떨어진 위치에서의 전기장의 최고치는 전송부(TX) 코일이 놓여 있는 면에서 가장 크면서 그 값은 15V/m를 상회함을 볼 수 있다.

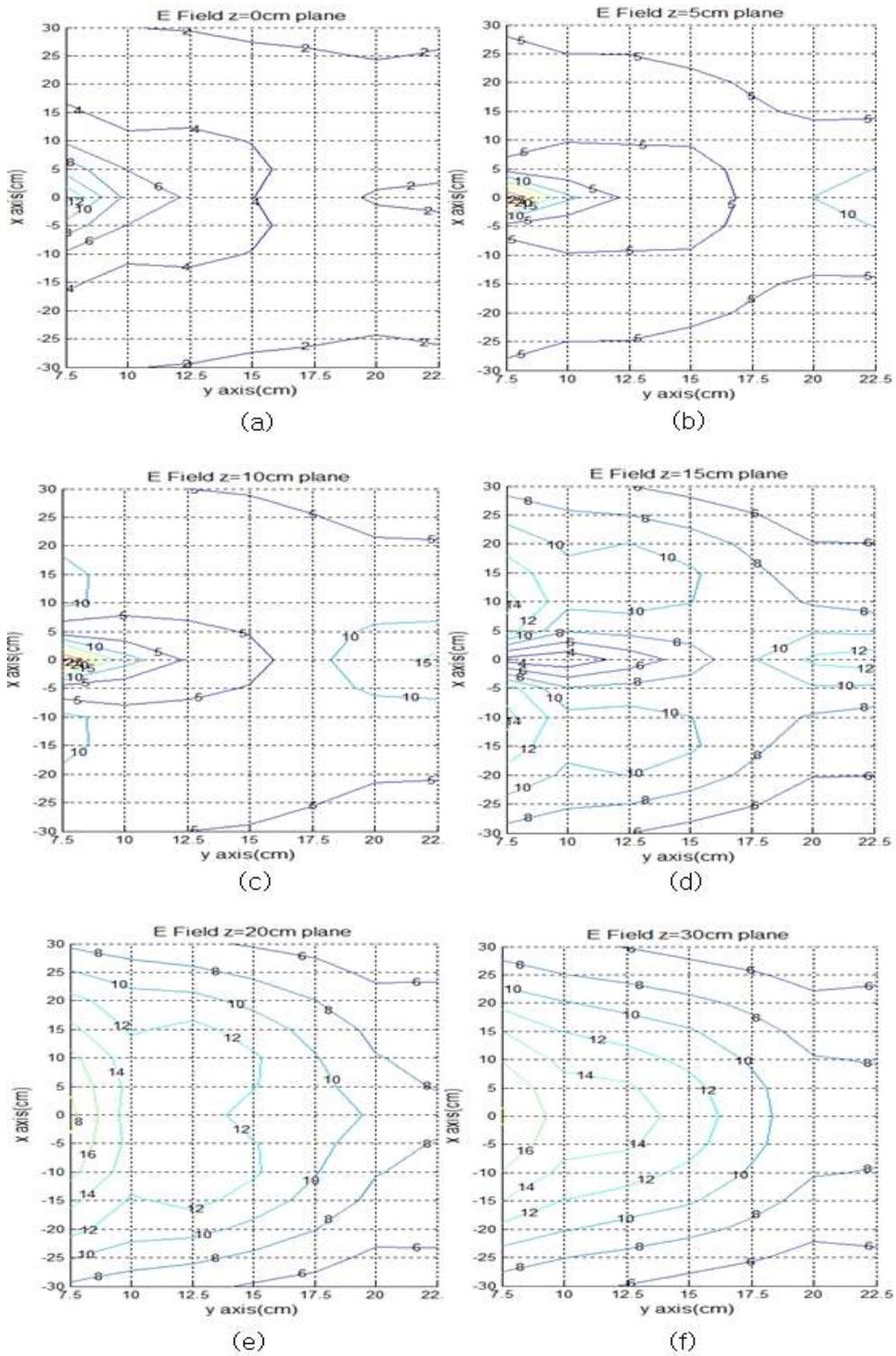


그림 3-26. $z=\text{constant}$ 인 평면상의 전기장(E-Field) 분포(단위 : V/m)

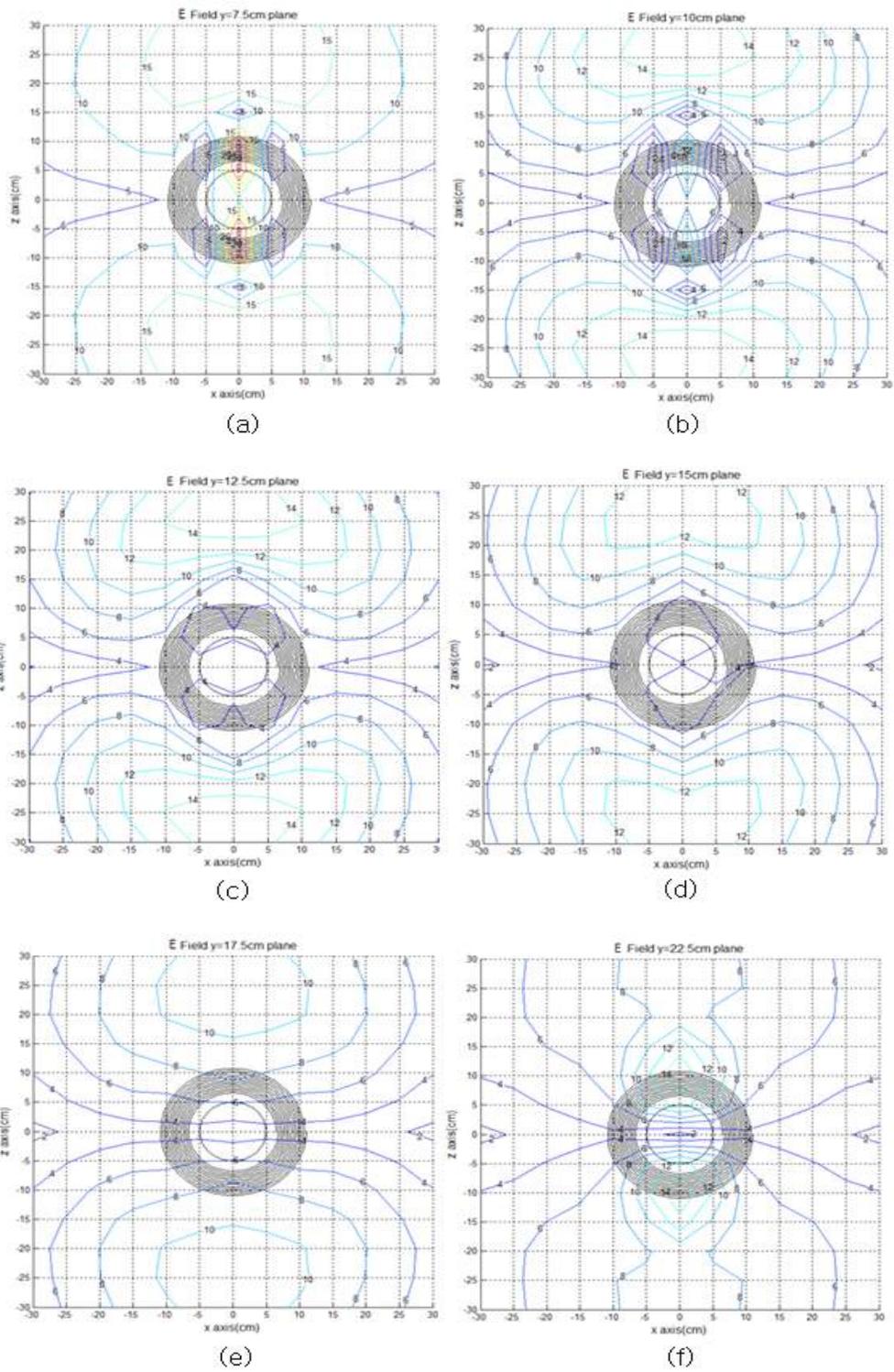


그림 3-27. $y=\text{constant}$ 인 평면상의 전기장(E-Field) 분포(단위 : V/m)

제 4 장. 무선전력전송시스템 전자파 노출량 시뮬레이션

제 3 장 에서 제작한 무선전력전송(Wireless Power Transfer) Prototype 들에 대한 전자파 노출량을 전산 무의 실험을 통하여 분석하기 위해 HFSS(High Frequency Structure Simulator) 및 Sim4Life 해석 Tool 등을 사용하였다. 시뮬레이션(Simulation)을 위한 송수신부 모델은 제 3 장 에서의 규격과 동일하다.

제 1 절 송/수신부(TX/RX) 시스템 구현

1. 유도코일의 설계

유도코일은 직경 1mm의 도선으로 반경 50mm의 원형 루프형태로 [그림 4-1]과 같다.

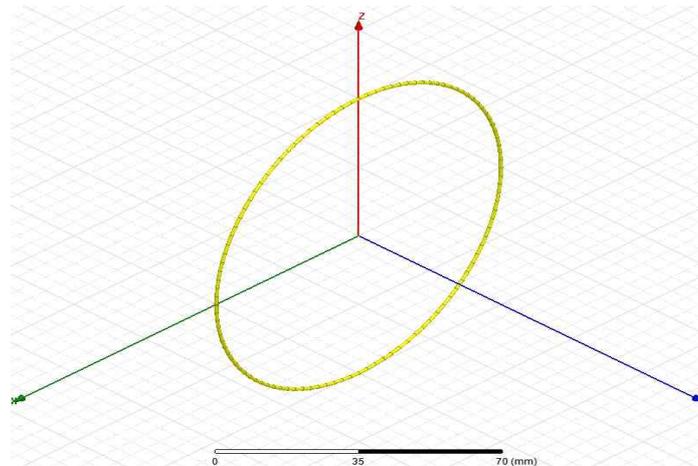


그림 4-1. 유도코일(Induction Coil)

[그림 4-1]과 같은 유도코일에 대한 HFSS 해석을 통하여 구한 유도코일의 등가회로 저항값은 0.082Ω 이고 인덕턴스 값은 $0.230nH$ 이다. 6.78MHz에서 공진을 유도하기 위해 집중소자 커패시터(Capacitor)를 연결한다.

2. 공진코일(Resonance Coil)의 설계

가. 공진 코일의 설계

제 3 장에서와 같이 [그림 4-2]와 같은 형태로 두 개의 공진 코일 모델을 설계한다. 각 공진 코일의 규격은 [표. 4-2] 와 같다.

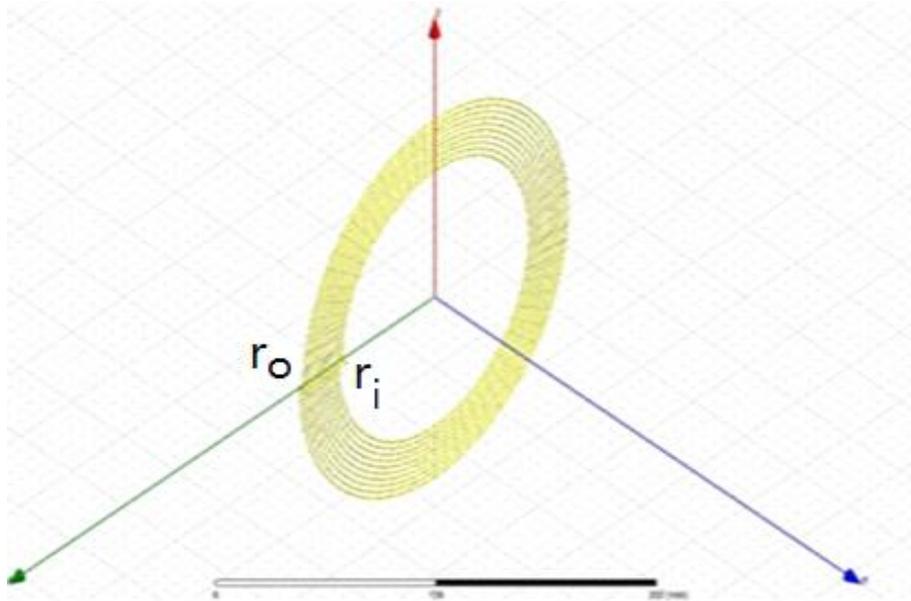


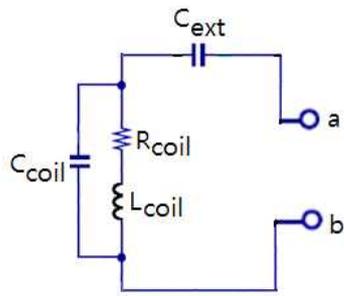
그림 4-2. 공진코일(Resonance Coil)

Parameter	Type 1	Type 2
Inner Radius	65mm	65mm
N(Turns)	10	12
Wire Diameter	1mm	1mm
Spacing	3mm	3mm

표 4-1. 공진코일 규격

나. 공진코일(Resonance Coil)의 등가 회로 정수

시뮬레이션을 통하여 얻은 복소 임피던스 특성으로부터 제 3장에서 언급한 방법을 이용하여 등가회로 정수를 구할 수 있다.



Parameter	Type 1	Type 2
R_{coil} (Ohm)	4.3775	10.7133
L_{coil} (μ H)	17.648	36.214
C_{coil} (pF)	5.8	4.4
C_{ext}	6.77	6.72

그림 4-3. [그림 4-2]의 등가회로

표 4-2. 공진 코일의 등가회로 정수

제 2 절 무선전력전송 시스템 구현 및 인체 모델(Duke Model)

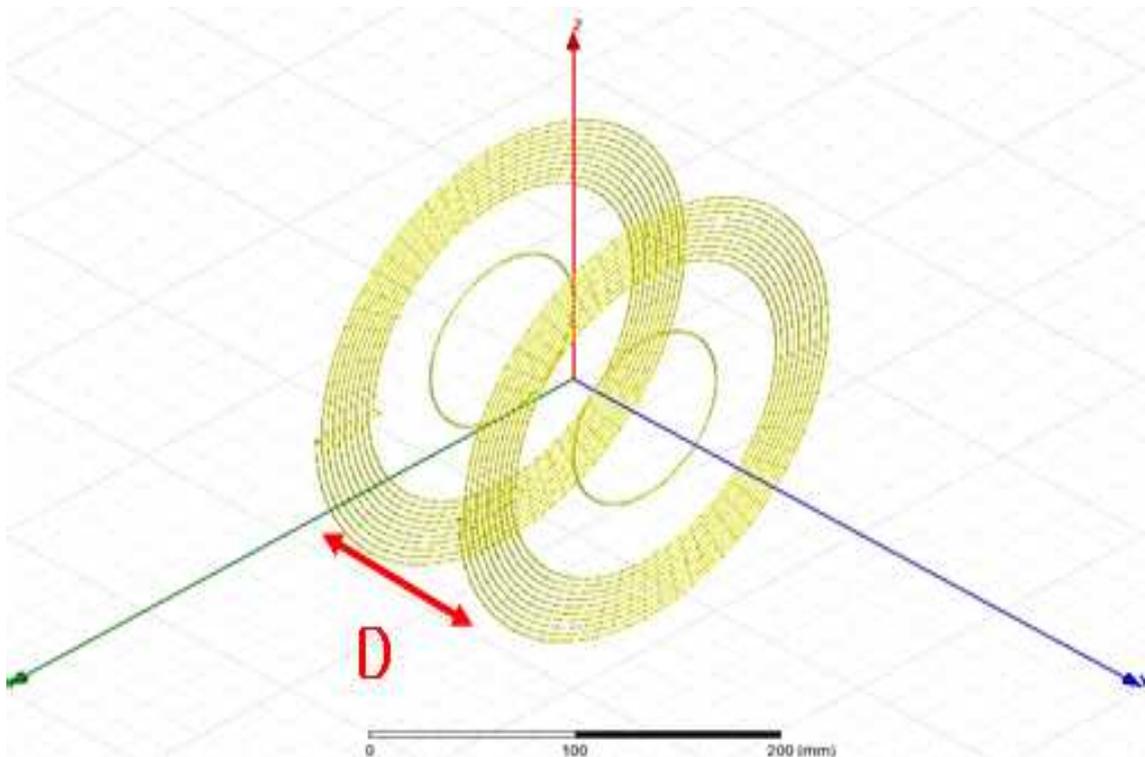


그림 4-4 송수신부(TX-RX) 시스템 모델링

- a) Type 1. 공진 코일 규격 65mm 10turn
송신부(TX)와 수신부(RX) 사이의 거리 $D=220$ mm
- b) Type 2. 공진 코일 규격 65mm 12turn
송신부(TX)와 수신부(RX) 사이의 거리 $D=290$ mm
- c) SAR 분석을 위한 인체 모델 (Duke Model) [그림 4-4(a), (b)]

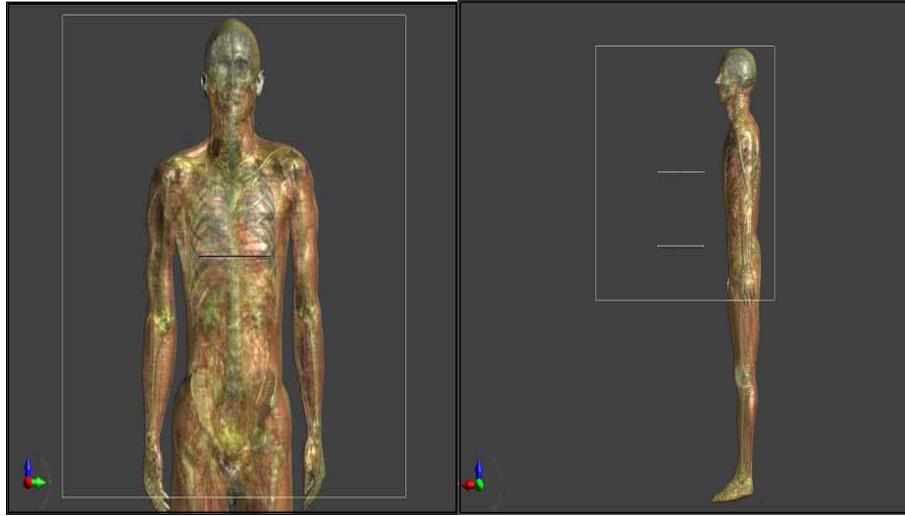


그림 4-5. 인체모델(Duke Model) (a) 전면, (b) 측면

Parameter	Value
Total Volume	7.25778e+007 [mm ³]
Total Area	2.16209e+009 [mm ³]
Bounding Box Size	X : 379.504 [mm] Y : 637.142 [mm] Z : 1893.75 [mm]

표 4-3. 인체모델(Duke Model) 규격

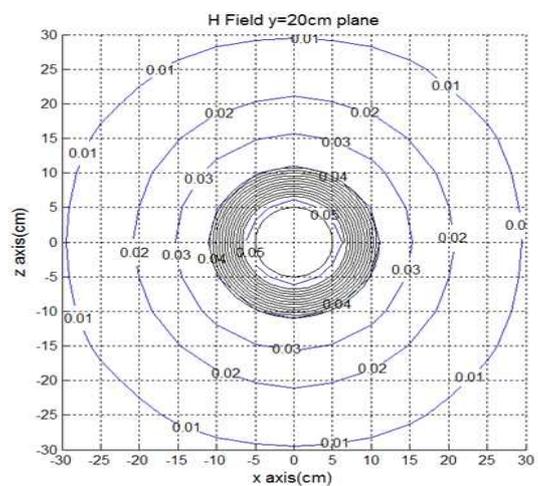
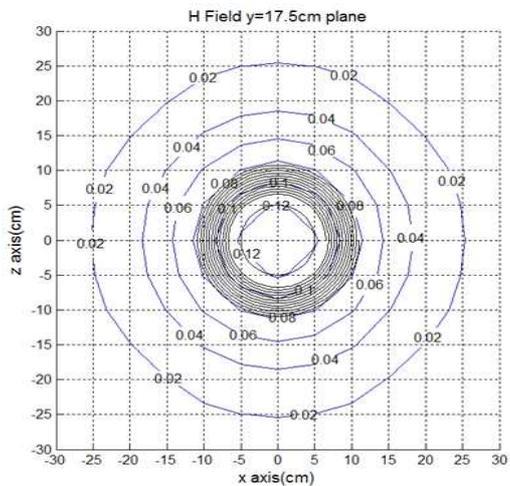
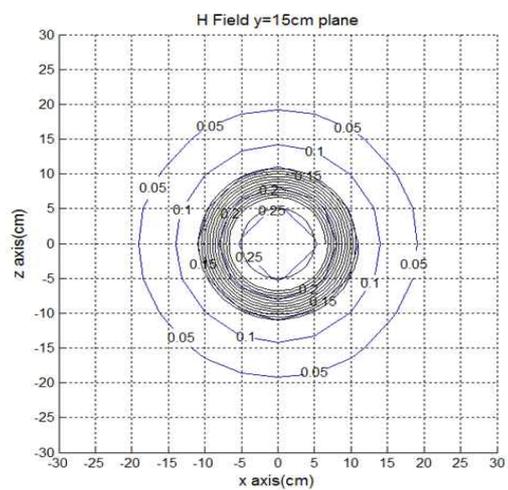
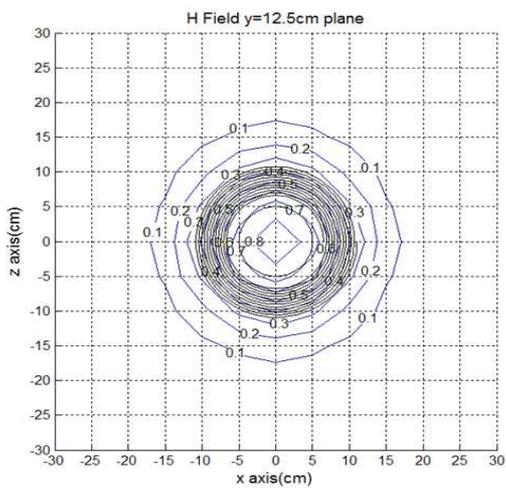
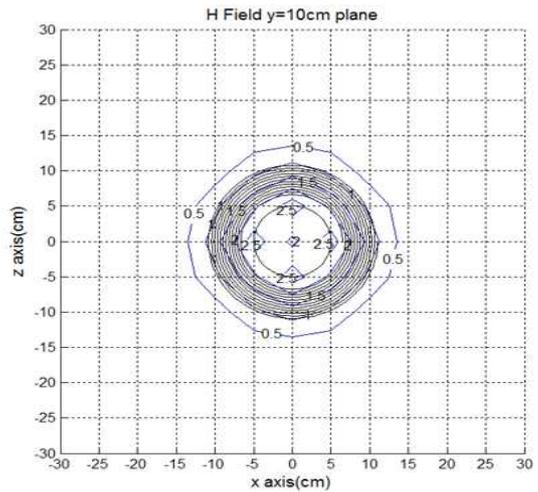
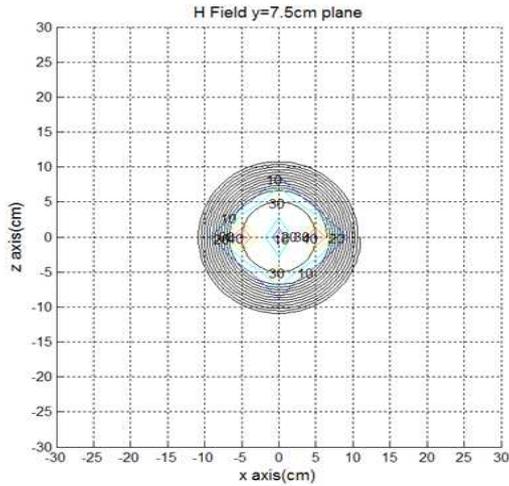
제 3 절 근역장 영역 전자기장 분포

1. 송신부(TX) 시스템

무부하 상태에서 동작하는 시스템의 경우를 살펴보기 위해 TX만 있을 때의 근역장 영역 자기장과 전기장의 분포를 Type 1에 대해 [그림 4-6]와 [그림 4-7], 그리고 Type 2에 대해 [그림 4-8]과 [그림 4-9]에 나타내었다.

가. 인체 모델이 없는 경우

(1) Type 1. 자기장(H-Field) 분포



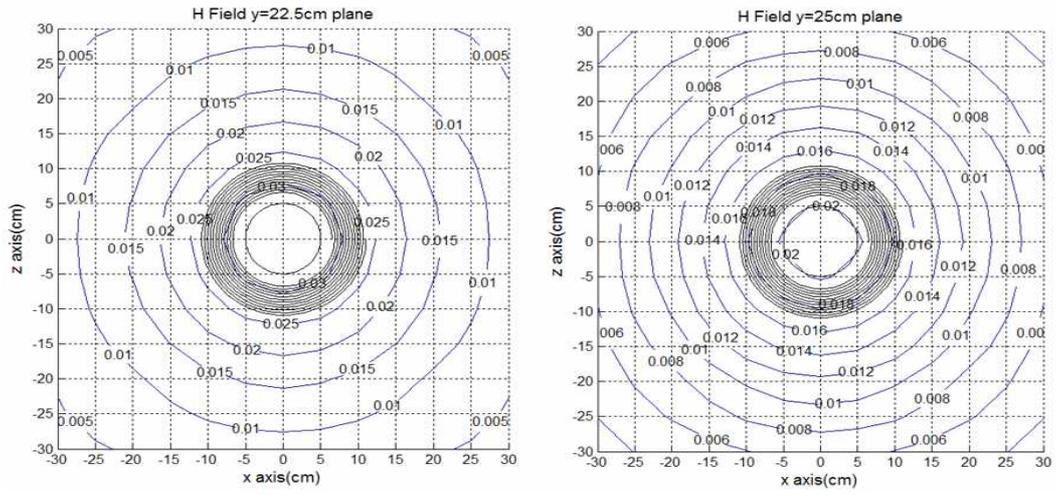
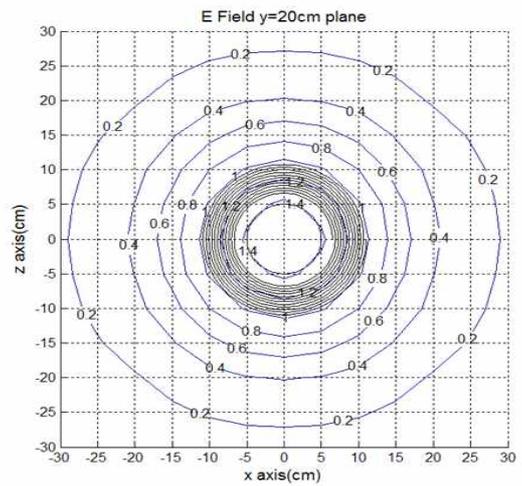
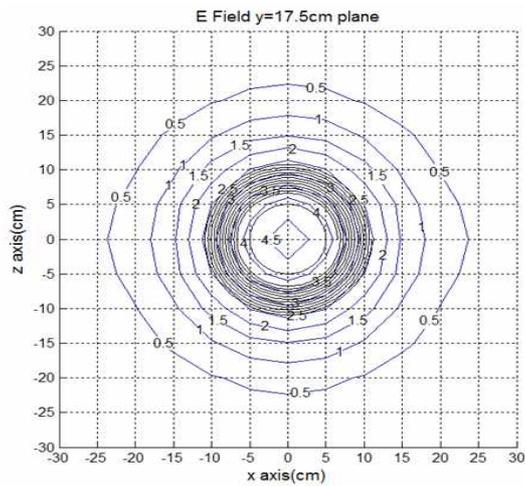
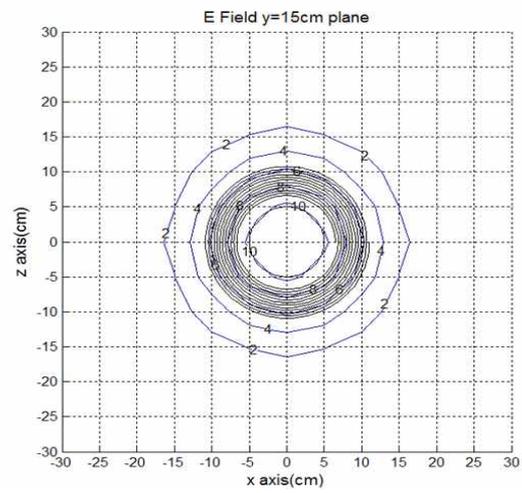
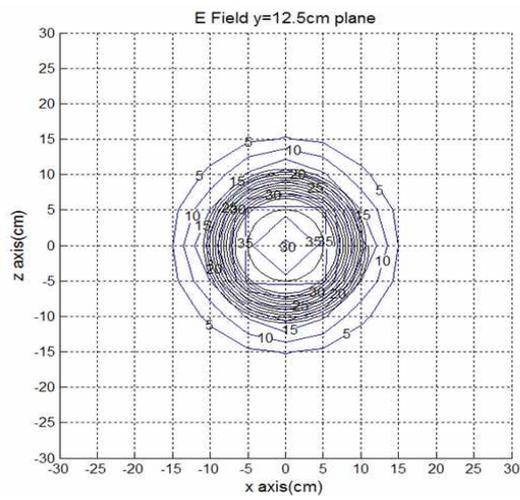
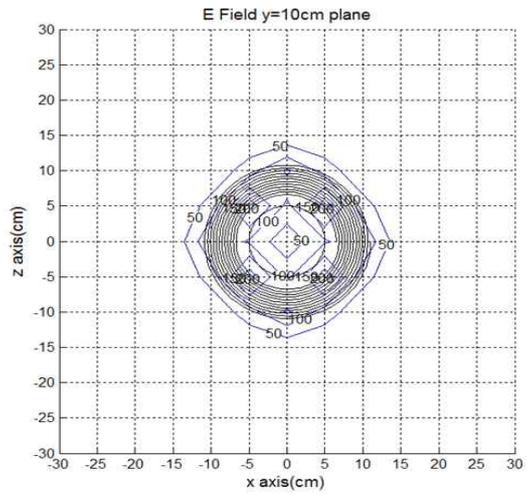
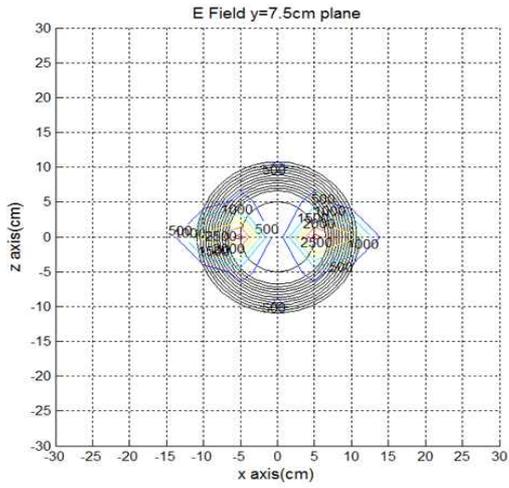


그림 4-6. Type 1-송신부(TX) 의 자기장(H-Field) 분포(단위 : A/m)

(2) Type 1 전기장(E-Field) 분포



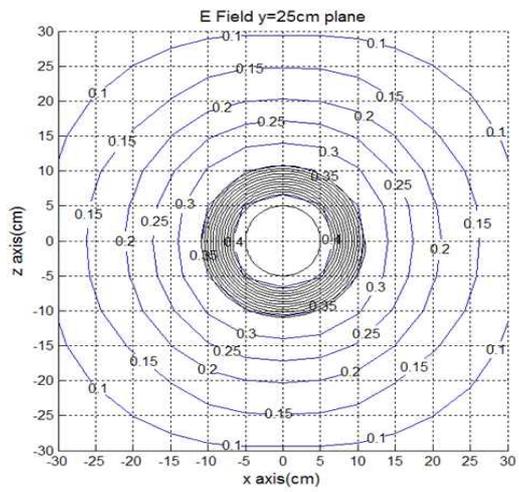
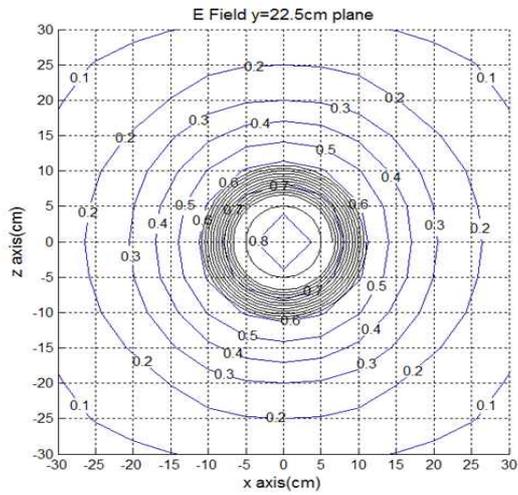
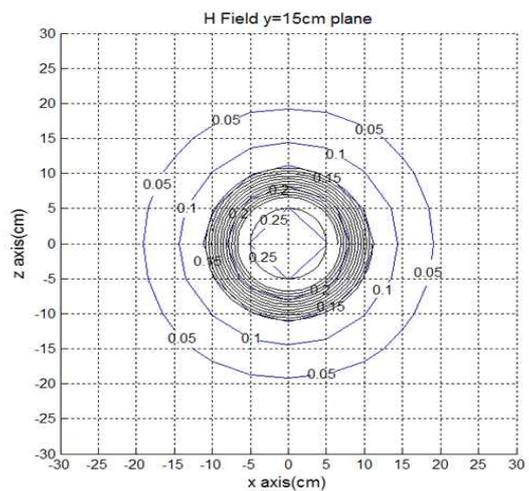
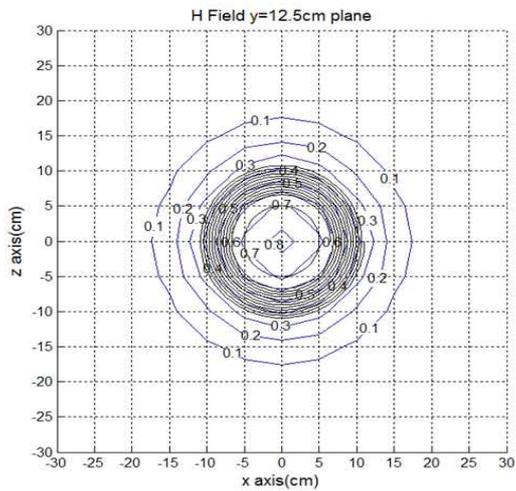
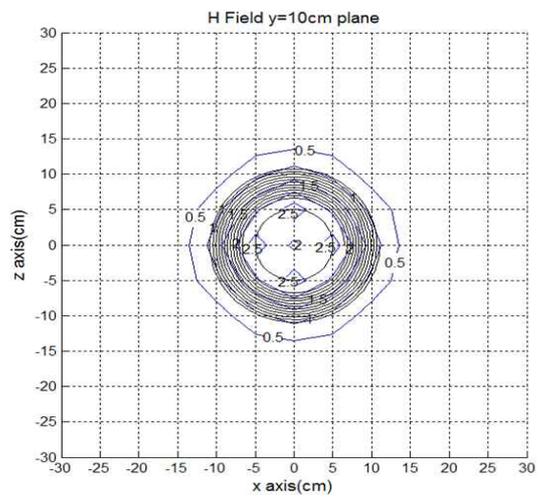
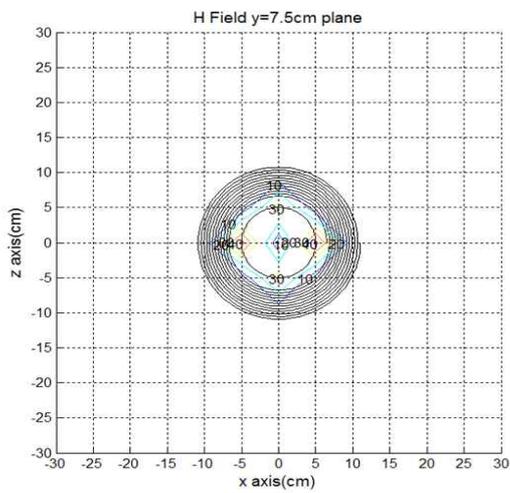


그림 4-7. Type 1-TX의 전기장 분포(단위 : V/m)

(3) Type 2 자기장(H-Field) 분포



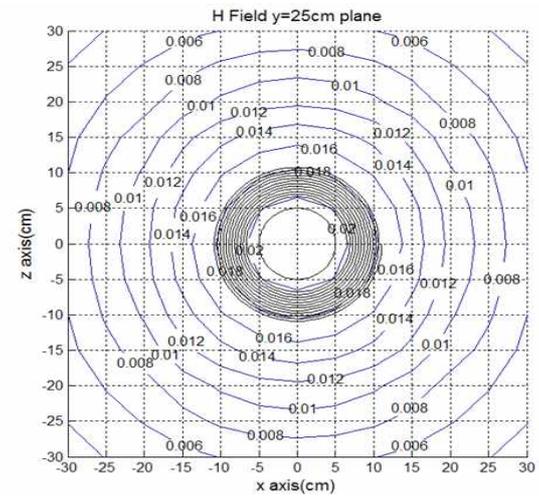
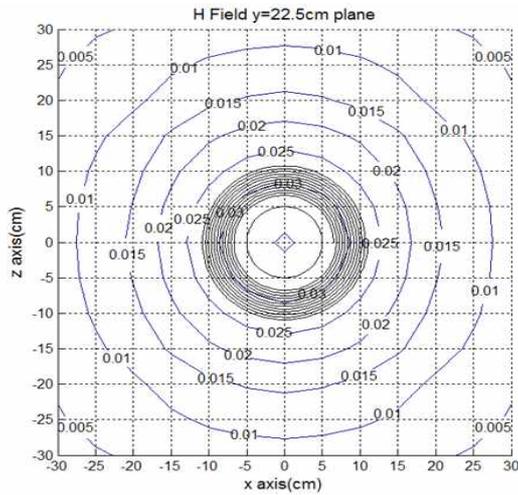
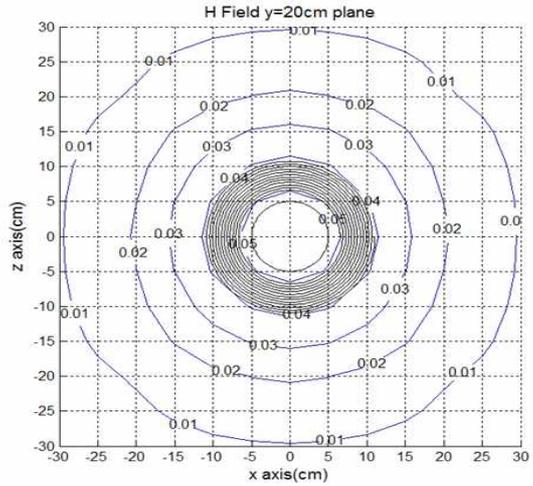
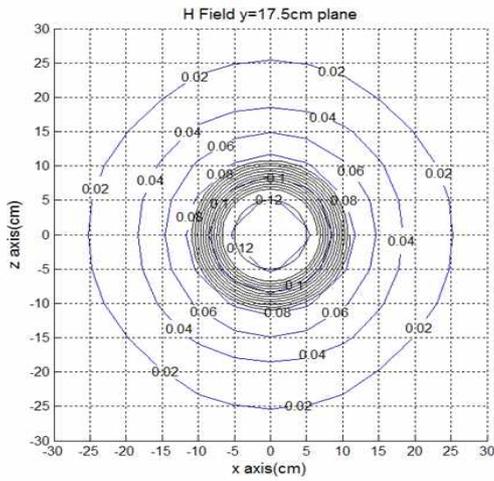
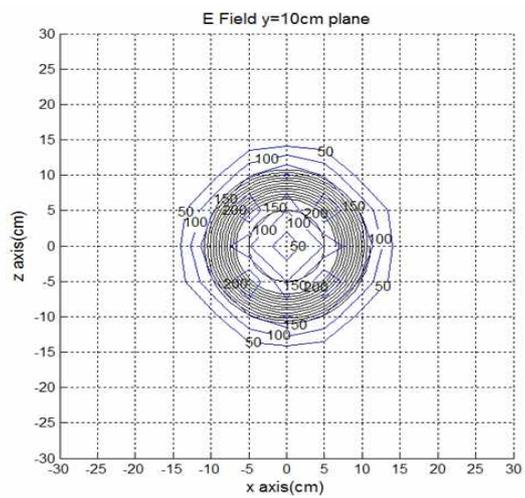
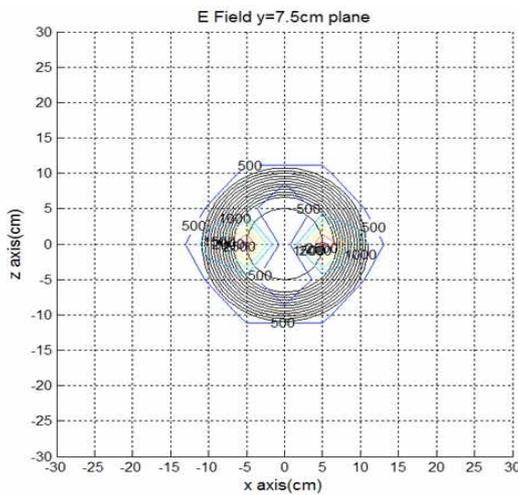


그림 4-8. Type 2-TX의 자기장 분포(단위 : A/m)

(4) Type 2 전기장(E-Field) 분포



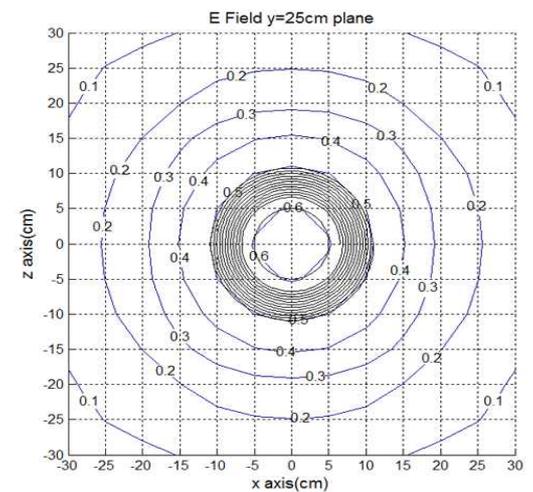
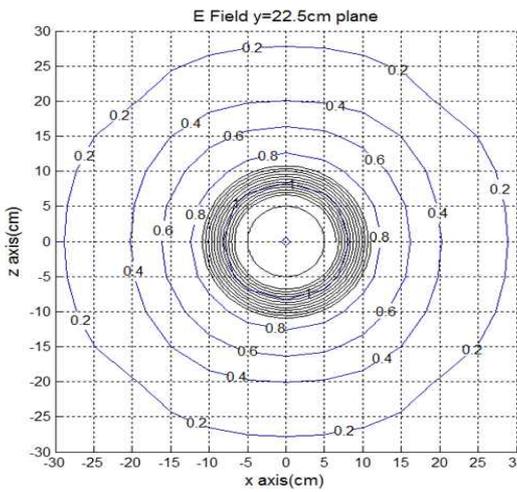
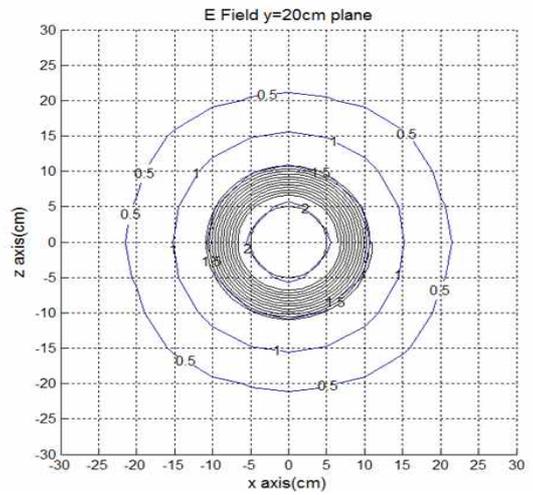
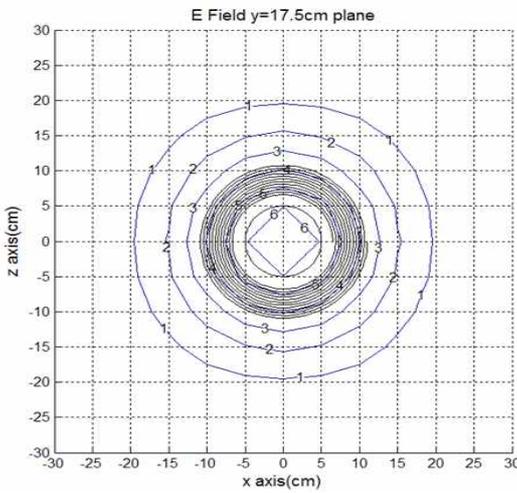
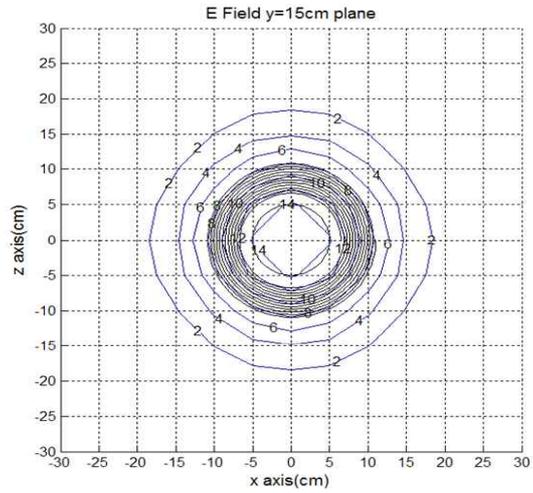
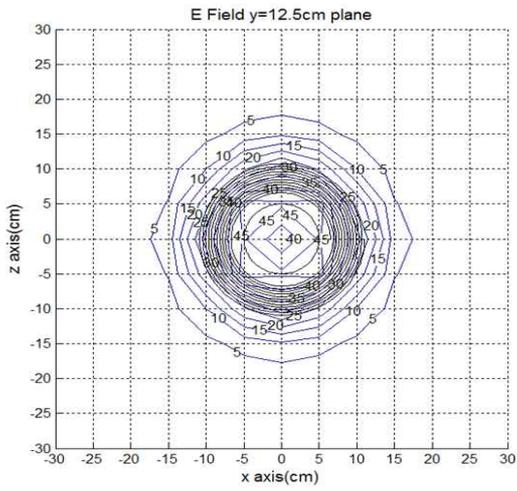


그림 4-9. Type 2-TX의 전기장(E-Field) 분포(단위 : V/m)

나. 인체 모델이 있는 경우

[그림 4-10]은 인체 노출량 분석을 위해 TX 부근에 인체 모델을 배치한 그림이다. 송신부(TX) 공진 코일과 인체사이의 최단 거리는 100mm이다.

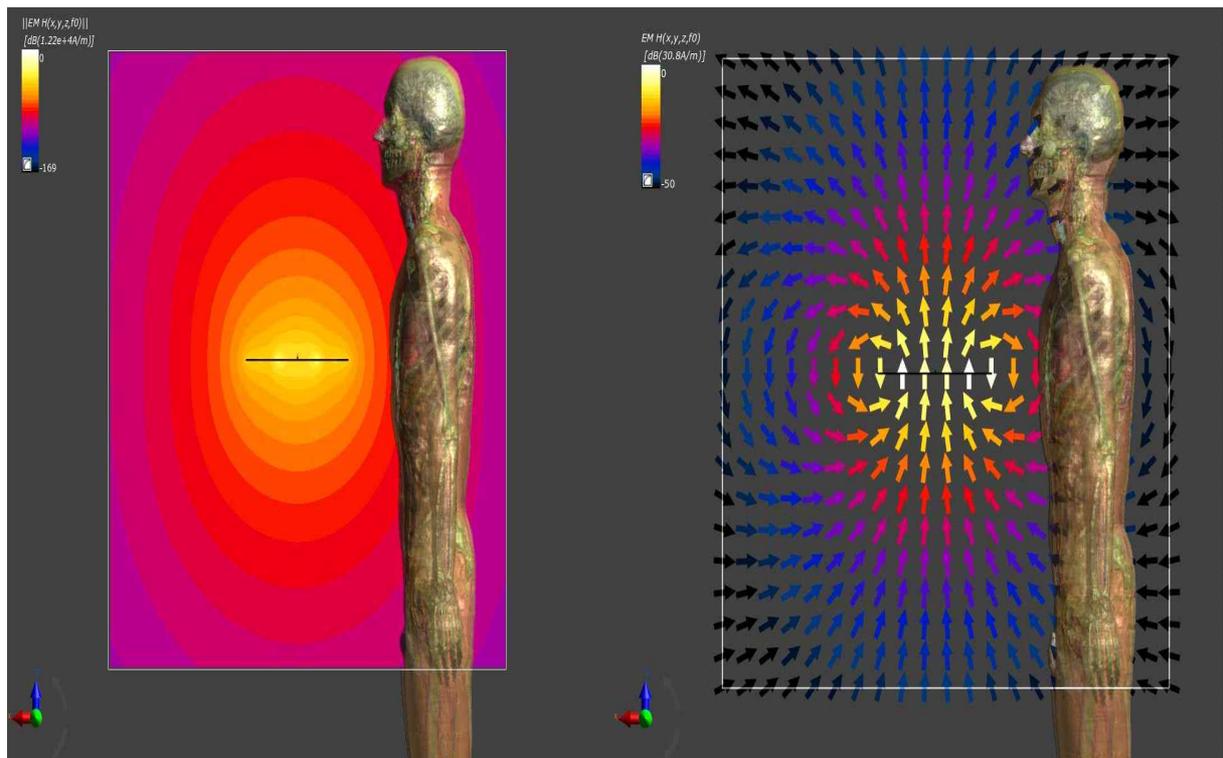


그림 4-10. 송신부(TX)와 인체 모델

[그림 4-11]과 [그림 4-12]는 공진 코일이 놓여 있는 면과 인체의 두부 방향으로 10cm, 20cm, 25cm 그리고 40cm 떨어진 면에서 y축 방향으로 SAR 분포를 나타낸 그림이다. 두 Type 모두 매우 비슷한 경향을 보이고 있다. 코일이 놓여 있는 위치(z=0)에서 최대치를 보이고 있다. 시스템이 놓여 있는 위치(z=0)에서 최대치를 보이고 있다.

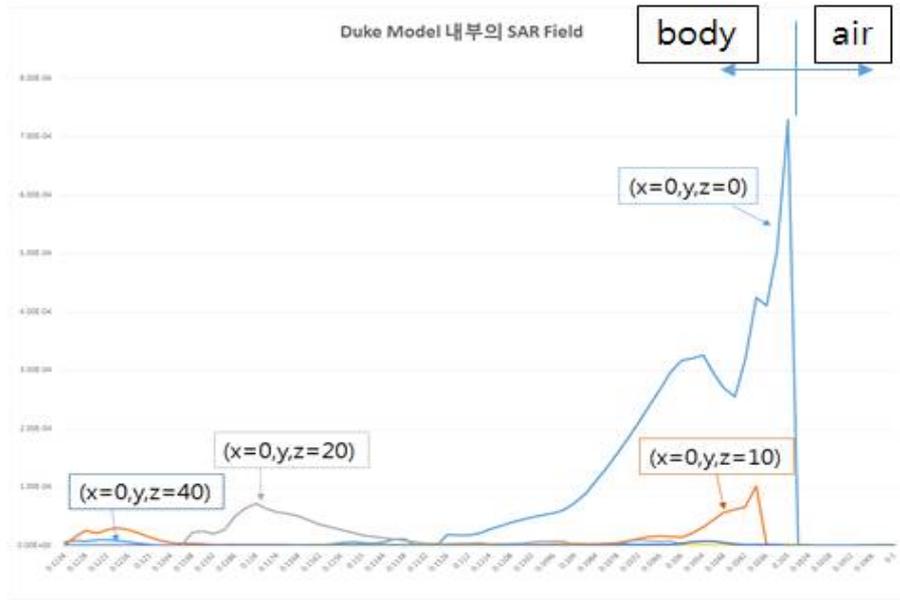


그림 4-11 Type 1의 1g-SAR 분포(단위 : W/kg)

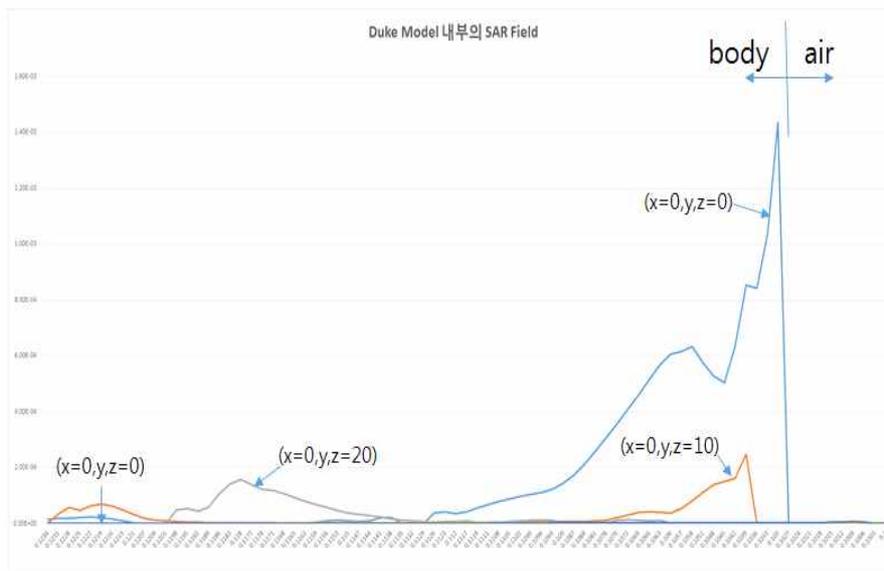


그림 4-12. Type 2의 1g-SAR 분포(단위 : W/kg)

2. 송수신(TX-RX) System

TX 코일 시스템에서 RX 코일 시스템으로의 전력 전송이 효율적으로 이루어지는 상황에서의 근역장 영역 자기장과 전기장의 분포를 그림 4-13과 그림 4-14에 나타내었다. 인체 모델이 없을 때와 있는 경우의 근역장 영역의 전자기장 분포의 변화를 비교하여 살펴볼 수 있도록 하였다. [그림 4-13]에서 볼 수 있듯이 자기장 분포는 인체 모델의 유무와 크게 관계 없어 보이지만, [그림 4-14]의 전기장

분포는 인체 모델 주위에서 상당한 변화를 보임을 알 수 있다.

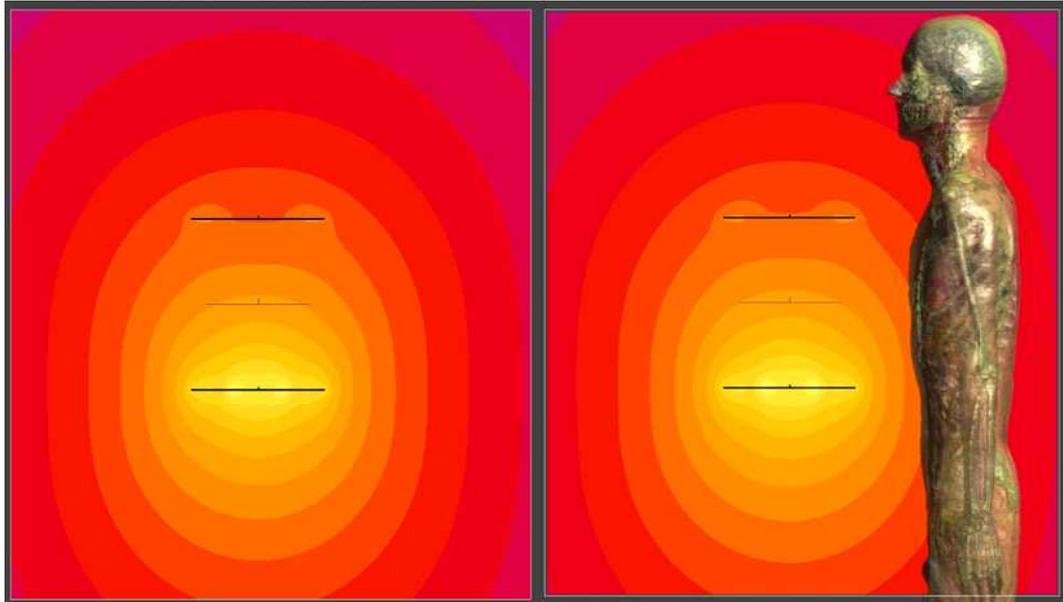


그림 4-13. 송수신(TX-RX) 시스템의 자기장(H-Field) 분포(Type 2)

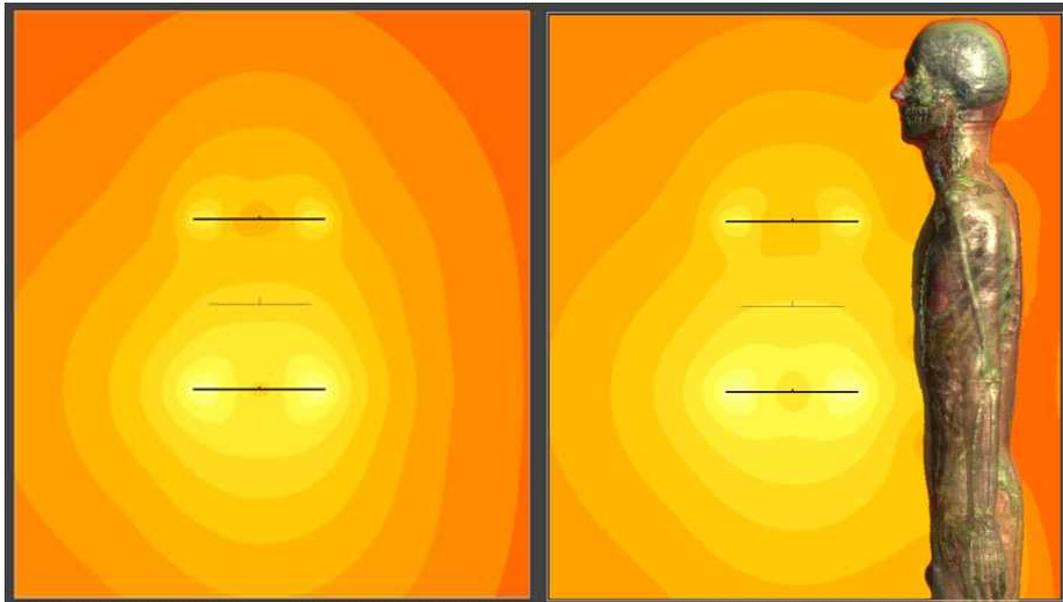


그림 4-14. 송수신(TX-RX) 시스템의 전기장(E-Field) 분포(Type 2)

[그림 4-15]는 TX의 공진 코일의 축을 따라서($z=0$)와 TX의 공진 코일로부터 수신부(RX) 공진코일의 방향으로 $z=10cm$, $z=20cm$, $z=25cm$ 그리고 $z=40cm$ 떨어진 면에서 y축 방향으로 SAR 분포를 나타낸 그림이다.

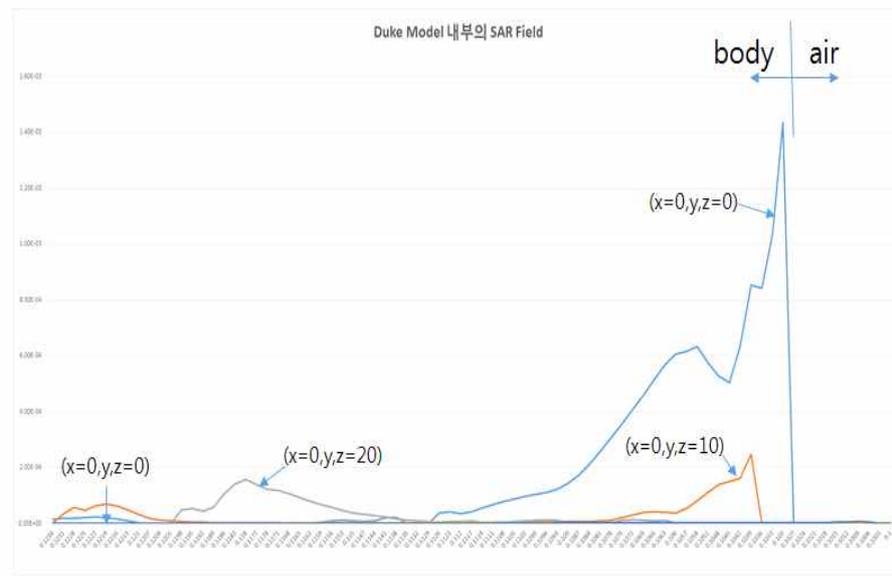


그림 4-15. Type 2의 전력 전송이 이루어지는 경우의 1g-SAR 분포
(단위 : W/kg)

제 5 장 결 론

제 1 절 결과 분석

가. 자기장(H-Field)

제 3장의 시제품제작 및 측정의 결과에 따르면, 무선 전력 전송 시스템의 송신 부만 동작시키는 경우나 최대 효율로 전력이 전송되도록 동작되는 경우에서나 무선전력전송 시스템 주위에 분포하는 자기장의 세기는 $P_{in} = 0.4 W$ 에서 $0.45 W$ 인 경우 코일 중심에서 20cm정도의 거리에서 $0.2A/m \sim 0.7A/m$ 의 값이 측정되었고 시뮬레이션 결과도 유사함을 확인하였다.

국내 일반인에 대한 자기장 강도 기준이 6.78MHz에서 $0.73/6.78 = 0.1077 A/m$ 이므로 어느 경우에서나 기준치를 넘어서고 있다는 것을 알 수 있다. 물론, 이 값들은 무선전력전송시스템으로써 요구되는 전송전력에 매우 미치지 못 할 만큼 작은 입력전력의 경우에 대한 자기장 수치로, 입력 전력이 수 십W 단위로 증가 된다면 자기장 또한 따라서 큰 비율로 증가하게 된다.

일예로 $P_{in} = 0.4 W$ 에서 $P_{in} = 40 W$ 로 100배 증가한다면, 자기장의 세기는 대략 10배 증가하게 되어, $2A/m \sim 7A/m$ 로 크게 증가하게 된다.

나. 전기장(E-field)

WPT 시스템 주위에 분포하는 전기장의 세기는 $P_{in} = 0.4 W$ 에서 $0.45 W$ 인 경우 코일 중심에서 20cm정도의 거리에서 $10V/m$ 에서 $15V/m$ 의 값이 측정되었고 시뮬레이션 결과도 유사함을 확인하였다.

국내 일반인에 대한 자기장 강도 기준이 6.78MHz에서 $87/\sqrt{6.78} = 33.4 V/m$ 에 비교하면 기준에 미치지 못하는 값이지만, 입력전력이 매우 낮은 시제품의 경우라는 점을 고려하면 실제 응용 가능할 정도의 전력을 공급하게 되면 기준치를 쉽게 상회할 수 있을 것이다.

다. SAR(Specific Absorption Rate)

인체 내의 SAR분포는 측정이 불가능하여 인체 노출량 분석 툴인 Sim4Life를 이용하여 시뮬레이션하였다. 그 결과는 [그림 4-11,12 그리고 그림 4-15와 같다. 비교적 낮은 주파수로 인하여, 인체 내에 유도되는 전계도 작고 따라서 SAR 값은 매우 작은 값으로 산출되고 있다.

제 2 절 문제점

1) 시제품(Prototype)

무선전력전송 시스템에 의한 자기장 노출량을 제 1절에서 언급하였다. 다만, 다양한 규격의 무선전력전송 시스템들에 대하여 충분히 검토하지 못하였기 때문에 모든 무선전력전송 시스템의 향후 연구 개발 방향에 따라 인체에 영향을 미칠 것으로 예측되는 전자기장 분포도 조절이 가능할 수 있다고 판단된다.

따라서 다양한 형태와 크기의 공진형 무선전력전송 시스템의 전자기장 분석이 요구된다고 판단된다.

2) SAR 분포의 분석

연구 종료 시점까지 충분한 시뮬레이션과 분석이 이루어지지 못하였기 때문에, 인체 내의 SAR 분포에 대한 정확한 결론을 내리는 것은 부적절하다고 판단된다.

인체 노출량 분석 툴인 Sim4Life에 대한 완전한 운용 능력이 부재하여 향후 더 많은 분석 결과들을 토대로 무선전력전송 시스템의 SAR 측면에서의 안전성을 검증하여야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] “Highly Resonant Wireless Power Transfer: Safe, Efficient, and over Distance”, WiTricity Corporation, 2013
- [2] D. H. Werner, “An Exact Integration Procedure for Vector Potentials of Thin Circular Loop Antenna”, *IEEE Trans. AP.*, vol.44 no.2 pp.157-165, 1996.
- [3] O. P. Gandhi, J. Y. Chen, and A. Riazi, Currents Induced in a Human Being for Plane-Wave Exposure Conditions 0 ~ 50 MHz and for RF Sealers, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 33, no. 3, pp. 757-767, 1986.
- [4] “Evaluation of Wireless Resonant Power Transfer System with Human Electromagnetic Exposure Limits”, A. Christ, et. al, *IEEE Trans. Electromagnetic Compatability*, 2012
- [5] “Exposure assessment for a wireless multi-phone charger”, Woo-Geun Kang, et. al., *EMC'14, IEICE*, 2014
- [6] 주영준, “100kHz 대역의 자기 공진형 무선전력전달 시스템 및 전자기적 인체 안정성연구”, 단국대학교, 2012
- [7] 박종민, “무선전력전송시스템을 구현하기 위한 실질적인 문제에 관한 연구”, 서울대학교, 2014
- [8] 박희수, “릴레이 코일을 포함한 자기공명 방식 기반 무선전력전송 시스템의 분석 및 설계”, 건국대학교, 2014
- [9] 배윤식, “자기공명 기반 무선전력전송 시스템 및 전력변환 회로 설계”, 경북대학교, 2014
- [10] 최재성, “자기공진무선전력전송시스템의 설계 및 분석”, 경북대학교, 2013
- [11] 강재현, “자기공진방식의 무선전력전송을 위한 공진 코일의 최적설계”, 동아대학교, 2014
- [12] “공진형 무선전력전송 기반의 무선 통신 융합 시스템 원천 기술 개발”, 한국전기연구원, 산업기술연구회
- [13] 유재원, “이동단말기의 몸통 전자파 흡수율 측정방법”, 한양대학교, 2008
- [14] 김승민, “Wireless Power Transfer System with Power Control Scheme for Human Safety from EM Field Exposure”, 경북대학교, 2015
- [15] 신한수, 송혜진, 변진규, “공진형 무선전력전송 대역의 100kHz~10MHz 자기장에 의한 인체유도전류계산과 전자기장 인체보호기준 분석”, *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers* 110 ~119, 2013
- [16] 이철원, “셀룰러 휴대폰의 전자파가 인체두부에 미치는 영향에 관한 연구”, 연세대학교, 2003

- [17] 박지만, “안테나의 위치가 호 절단율 및 전자파 흡수율에 미치는 영향”, 한양대학교, 2010
- [18] Bumsoo Lee, “Analysis of coupling Effects in Wireless Power Transfer System”, 고려대학교, 2013
- [19] 신용희, “공명을 이용한 무선전력전송 특성에 관한 연구”, 목포대학교, 2009
- [20] 김승경, “다중 코일방식을 이용한 무선전력전송 기술”, 선문대학교, 2014
- [21] 박대길, “자기공진형 무선전력전송 송신효율 증대에 관한 연구”, 인천대학교, 2016
- [22] Park Sungha, “A Study on Circuit Analysis of Resonance Wireless Power Transmission System”, 고려대학교, 2012
- [23] 김명수, “Analysis of Power Transfer Characteristics of Series Resonant Wireless Power Transfer Circuitry”, 경상대학교, 2014

연구결과 활용계획서

연구과제명	무선전력전송기기의 전자파 인체노출량 분석 연구					
연구분야						
연구구분						
연구책임자1	소 속	전남대학교	직위.직급	교수	성 명	임영석
연구책임자2	소 속		직위.직급		성 명	
연구기간	계약일 ~ 2016.11.25					
주요활용 분야	향후 무선전력전송기기의 전자파 인체보호기준 적용 제도 도입시 정책에 참고한다.					
국내외 공업소유권	구 분	명 칭	출원일	등록일	기타	
학술지발표 현 황	구분	학술지명	신청일	게재일	기 타	
타 연구로 활용계획						
기타활용 계 획						

무선전력전송기기의 전자파
인체노출량 분석 연구



520-350 전남 나주시 빛가람로 767
발행일 : 2016. 11
발행인 : 유 대 선
발행처 : 미래창조과학부 국립전파연구원
전화 : 061) 338-4416
인쇄 : 흥길동인쇄소
Tel. 02) 123-1234

ISBN : 979-11-5820-054-1

주 의

1. 이 연구보고서는 국립전파연구원에서 수행한 연구결과입니다.
2. 이 보고서의 내용을 인용하거나 발표할 때에는 반드시 국립전파연구원 연구결과임을 밝혀야 합니다.