

원전로봇에 적용 가능한 무선전력 송신기술



김 종 석
한국수력원자력(주) 중앙연구원 기기성능그룹장

1. 개 황

원자력발전소는 방사선이라는 특수한 환경으로 인해 방사선 구역현장에서 작업할 수 있는 여건 및 시간이

제한적이다. 후쿠시마 원전과 같은 중대 사고에 직면했을 때 고방사선 뿐만 아니라, 방사성가스, 고온고습 등의 극한환경에 처하기 때문에 사람이 접근하여 내부 상황을 모니터링하거나 작업을 수행하기가 매우 어려워진다.

후쿠시마 사고 때 일본 특유의 가미가제 특공대가 목숨을 걸고 원전내부로 투입된 적이 있으나, 이는 애국심이나 용감성을 떠나 미리 준비하지 못해 인명을 다치게 하는 안타까운 방책이라고 생각된다.

원자력발전소 사고와 같은 극한 환경에서 인간을 대신하여 작업을 수행할 수 있는 것이 무엇일까? 그것은 인간과 유사한 동작을 수행할 수 있는 자율형 로봇이다. 국방기술 분야에서 최근 자율형 로봇 개발에 투자를 확대하여 새로운 기술발전을 이루었다. 국방용으로 개발된 로봇을 원자력발전소에 즉시 투입하는 것이 가능할까? 원자력발전소에 투입되는 로봇은 국방용 로봇과는 달리 특수기능이 추가되어야 한다.

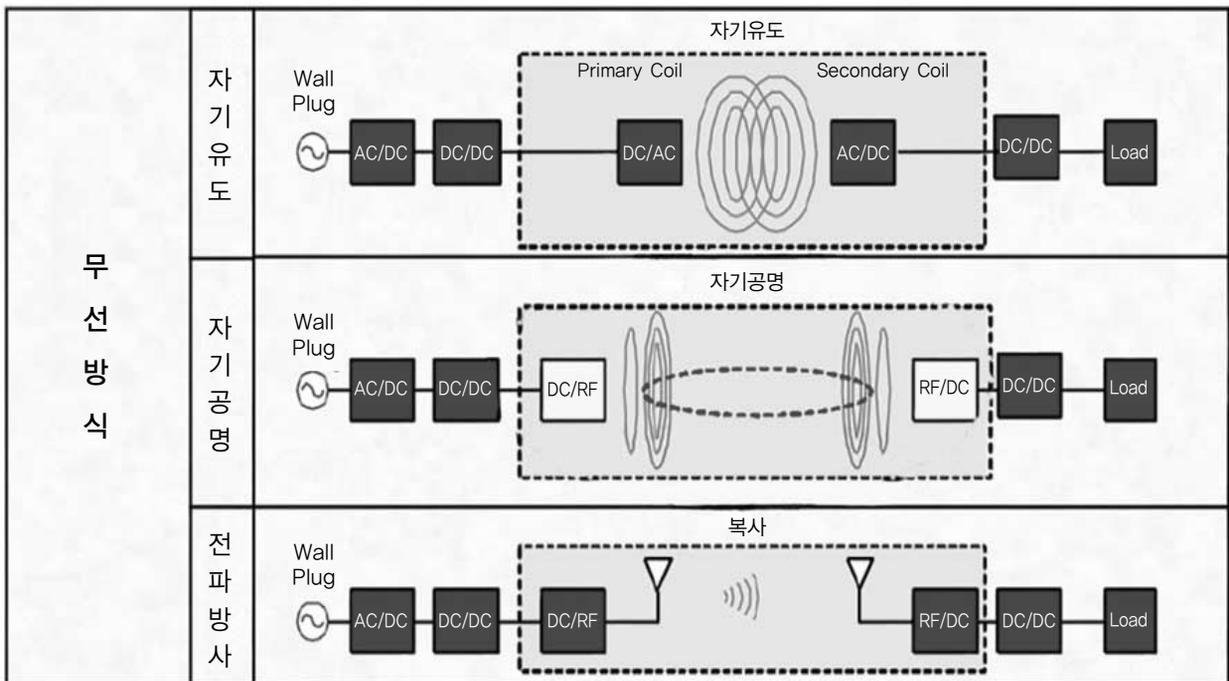
방사선에 강한 IC회로를 사용해야함은 물론 밀폐된 발전소 내부에서 GPS를 사용하지 못하는 상태로 현재 위치를 파악해야하며, 격벽 사이의 무선통신도 해결

되어야 한다. 특히, 원자로가 있는 격납건물 내부에서 장기간 작업하기 위해서는 에너지를 지속적으로 공급 받아야 하는 문제가 있다.

본고에서는 원전로봇이 해결해야할 여러가지 문제 중 격납건물 내부에서 에너지를 지속적으로 공급받을 수 있는 방안에 대해 검토한 결과를 소개하고자 한다.

2. 현황

로봇이 동력원으로 사용할 수 있는 것은 엔진이나 전기 모터이다. 가솔린 또는 가스를 사용하는 엔진의 경우 대형 연료통을 보유하면 장기간 사용할 수 있으나 격납용기 내부에 연료통을 보관할 수 없으며, 로봇이 연료통을 부착하고 다녀야 하는 관계로 그 크기가 제한적일 수밖에 없다. 연료를 절약하며 사용해도 몇 시간 이상을



[그림 1] 무선전력 전송방식

사용하기가 어렵고, 연료가 부족해지면 연료충전을 위해 로봇을 격납용기 밖으로 다시 인출해야하는 문제가 생긴다.

전기모터와 배터리를 이용할 경우에도 엔진을 사용하는 경우와 크게 다르지 않다. 다만 이 경우 격납용기 내부에 전원설비가 있어 현장에서 바로 충전을 할 수 있는 이점이 있다. 원전로봇의 배터리가 방전되면 충전대로 복귀하여 충전을 하고 다시 작업을 하는 일을 반복하기 때문에 배터리 충전을 위해 격납용기 밖으로 인출할 필요가 없다.

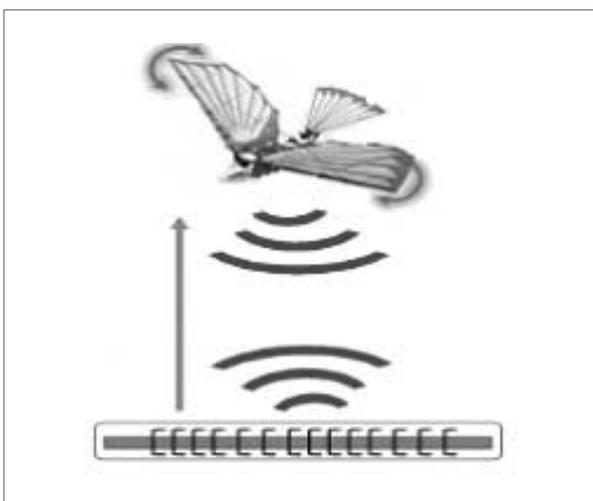
로봇이 전기콘센트로부터 전력을 공급받는 것은 간단한 문제일까? 격납용기 내부에서 사고가 발생하면 고방사선 뿐만 아니라 고습분의 증기가 분출될 수 있다. 고습환경에서 전원플러그가 접속되면 스파크가 발생될 수 있으며, 로봇이 사람처럼 전원플러그를 꽂아서 스스로 충전을 하는 것도 쉽지 않은 일이다. 소형 비행로봇의 경우에도 충전을 위해 스스로 전원콘센트에 접속하는 것이 불가능하다. 이에 대한 해결책이 무선전력이다.

무선전력에는 자기유도, 자기공명 및 전파방사 방식이

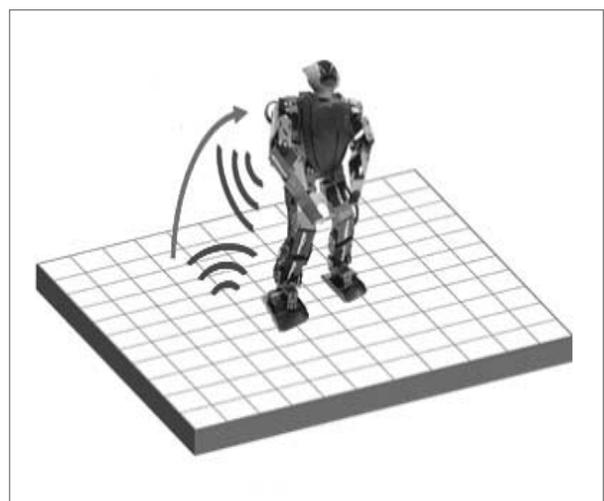
있다. 자기유도 방식은 송신코일과 수신코일사이의 자기유도에 의해 무선전력을 송신하는 방식이며, 코일 내부에 페라이트 코어를 장착하면 자기공명에 비해 다소 긴 거리의 전력전송이 가능하다. 자기공명 방식은 코일 간 공명을 통해 전력이 전송되는 방식으로 현재까지 알려진 전송거리는 2m정도이며, 공명조건을 잘 맞추어야 하는 어려움이 있다. 전파방사 방식은 복사에 의해 전력이 전송되는 방식으로 비교적 긴 전송거리를 가지며 지향성이 높다. 그림 1은 무선전력 전송방식을 표시한 것이다.

원전에 사용할 로봇에는 긴급 모니터링을 위한 비행 로봇과 사고조치 작업을 위한 지상로봇이 있다. 비행 로봇은 정찰비행 후 배터리 충전을 위해 충전소로 복귀한 뒤 공중에서 전력을 송신 받아야 하므로 충전효율이 다소 낮아도 전송거리가 어느 정도 확보되어야 한다.

반면에 지상로봇은 많은 전력을 소비해야 하므로 송신 거리는 짧아도 충전효율이 우수해야 한다. 이러한 두 가지 무선전력 전송을 만족시킬 수 있는 방식이 자기유도 방식이다. 비행로봇의 경우 다이폴형 무선전력 전송방식을 적용하고, 지상로봇의 경우 근접형 무선전력 전송방식을 고려할 수 있다.



[그림 2] 비행로봇 무선전력 전송 개념



[그림 3] 지상로봇 무선전력 전송 개념

그림 2는 비행로봇이 공중에서 무선으로 무선전력을 전송하는 개념도이다. 이 방식은 KAIST 연구결과 3~5m거리에서 36.9~9.2%의 전력전송 효율을 가지는 것으로 확인되었다.

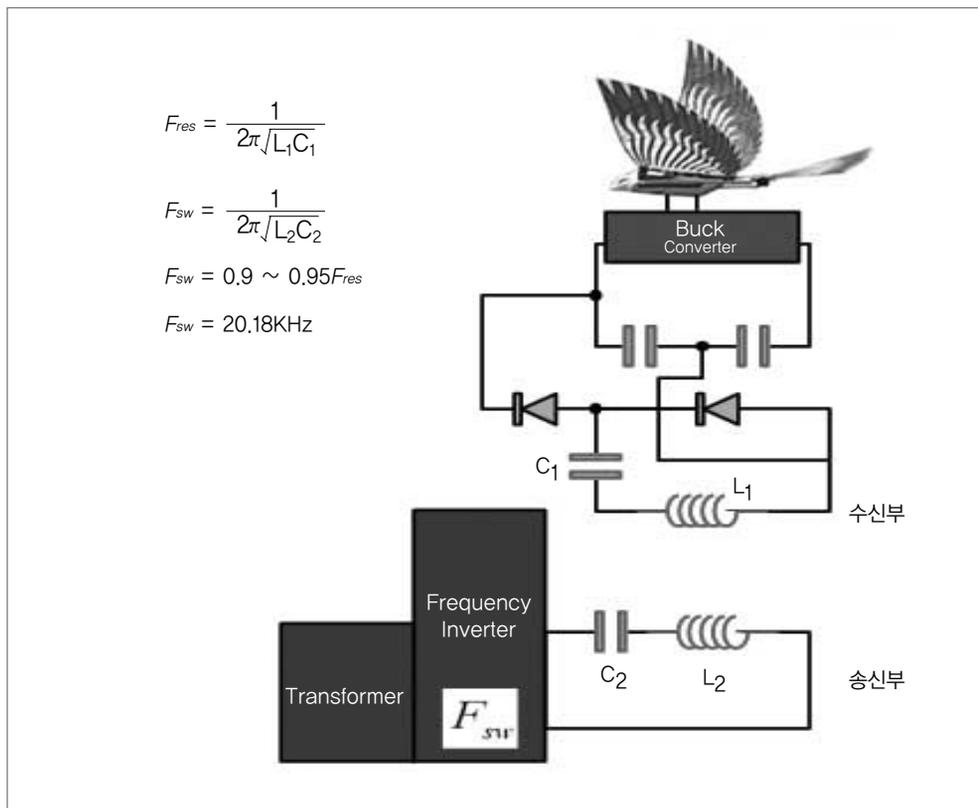
그림 3은 근접형 무선전력을 전송하는 개념도이며, 전원충전을 위해 별도의 플러깅 작업이 필요 없고, 유선 충전 대비 충전효율이 90%까지 가능하다.

한수원중앙연구원과 KAIST 모바일전력전자연구실은 비행로봇 및 지상로봇에 유도전력으로 전기충전이 가능한지를 확인하기 위해 몇 가지 실험을 수행하였다.

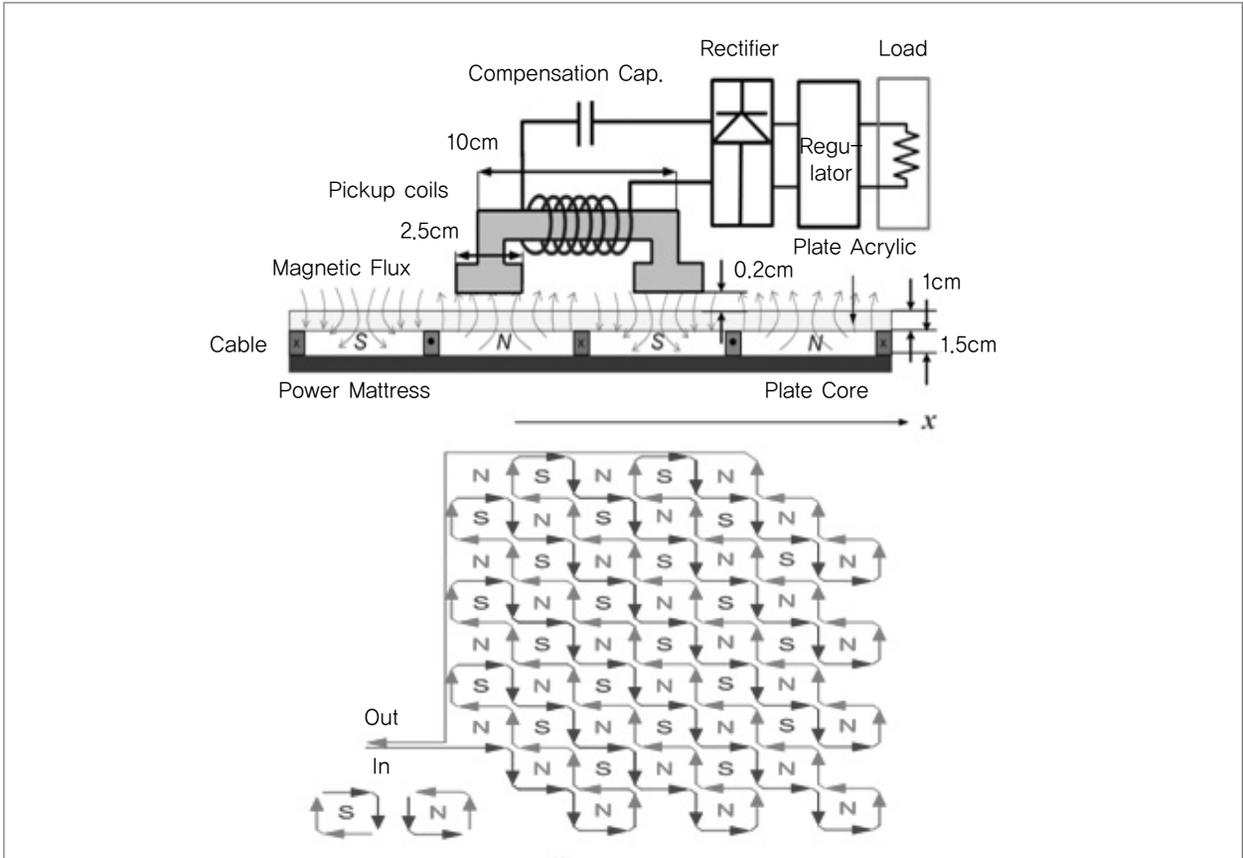
그림 4는 비행로봇에 유도코일을 부착한 무선전력 송신 장치 개념도이다. F_{res} 는 수신 주파수이며, F_{sw} 는

송신 주파수 이다. 그림 5는 근접형 매트에서 지상로봇으로 무선전력을 송신하는 개념도이다. 송신부와 수신부는 최대 0.2cm 간격 이하를 유지한 상태로 유도전력이 전송된다. 근접형 매트는 여러 개의 영구자석 주위에 코일을 감아 전기가 통전되면 N극과 S극이 교차로 생성되도록 구성되었다.

비행로봇과 지상로봇이 무선전력에 의해 작동하기 위해서는 무선전력 송신부와 수신부의 제작이 필요하다. 비행로봇을 위한 무선전력 송신부는 코어내장형 직선수평형 코일로 제작하였으며, 전력전송 효율을 향상시키기 위해 코일 내부에 5m 페라이트 코어를 설치하였다. 페라이트 코어는 무선전력 전송 효율을 높이기 위해 필요하다. 주변 물체에 간섭을 받지 않고 유도전력을 전송하기 위해 송신부 받침은 나무로 제작하였다.



[그림 4] 비행로봇 무선전력 송신 장치 개념도



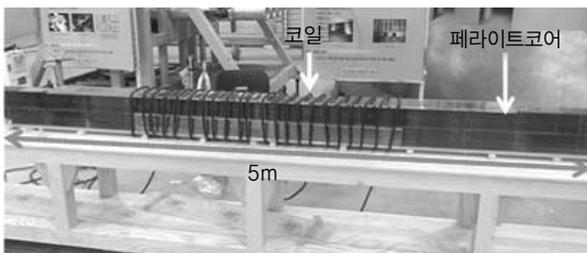
[그림 5] 매트형 무선전력 권선구조

그림 6은 무선전력 송신부로서 비행로봇의 무선전력 송신부를 최적화하기 위해 설계요건을 구분하고, 표 1과 같은 장단점 분석 및 표 2의 Pugh Matrix를 통해 '직선 수평코일'로 선정하였다.

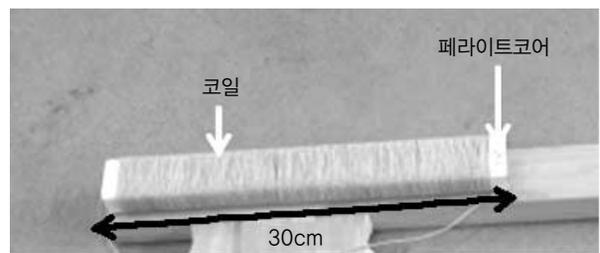
비행로봇 수신부는 소형 코어 내장형 직선 수평형으로 제작하였다. 수신부의 크기는 30cm로 하고 수신효율을 높이기 위해 코일 감김 수를 약 210회로 하였다. 실험에

사용된 싸이버드 로봇새의 모터구동에 필요한 최소전력은 7.4V 18W로 계산되었다.

그림 7은 무선전력 수신부의 코일 및 전력변환장치이다. 비행로봇 무선전력 수신부를 최적화하기 위한 설계요건을 구분하고 표 3과 같은 장단점 분석 및 표 4와 같은 Pugh Matrix를 통해 '코어 내장형 수신모듈'로 선정하였다.



[그림 6] 무선전력 송신부



[그림 7] 무선전력 수신부

[표 1] 비행로봇 전력 송신부 형상 검토

구 분	장 점	단 점
 직선수평 코일	기구적 안정성	설치 공간 증가
 직선수직 코일	설치 공간 감소	기구적 안전성 약화
 원호형 코일	설치 공간 감소	코아 제작이 어려움

[표 2] 송신코일 선정 Pugh Matrix

평가기준	가중치	1차 수행			검 증		
		설계(안)			설계(안)		
		1	2	3	1	2	3
기구적안정성	5	++	--	S	S	--	--
송신성능	4	++	++	+	S	S	-
구현용이성	2	++	--	--	S	--	--
개발일정	1	S	-	--	S	-	--
설치용이성	3	++	--	--	S	--	--
Sum of Positives		28	8	4	0	0	0
Sum of Negatives		0	21	10	0	21	24
Sum of Sames		1	0	1	5	1	-
Sum of Positiveness & Negatives		28	-13	-6	0	-21	-24

[표 3] 비행로봇 전력 송신부 형상 검토

구 분	장 점	단 점
 코어내장형	자속밀도 증가로 수신효율 최대	무게 증가
 코일형	무게 감소	수신효율이 적고 코일지름이 커짐

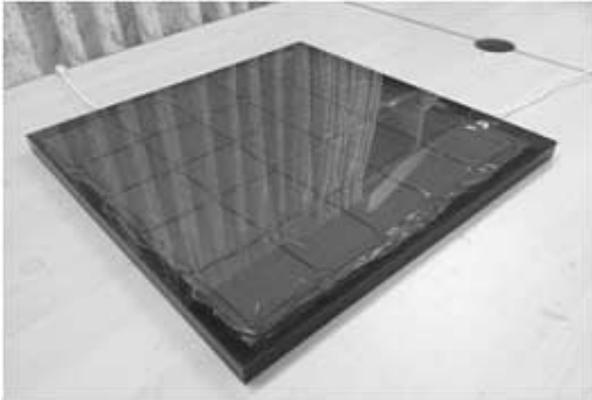
[표 4] 수신코일 선정 Pugh Matrix

평가기준	가중치	1차 수행		검 증	
		설계(안)		설계(안)	
		1	2	1	2
수신성능	5	++	--	S	--
서송량	4	-	S	S	+
구현용이성	2	S	S	S	S
개발일정	1	S	S	S	S
설치용이성	3	S	-	S	-
Sum of Positives		10	0	0	4
Sum of Negatives		4	13	0	13
Sum of Sames		3	3	5	2
Sum of Positiveness & Negatives		6	-13	0	-9

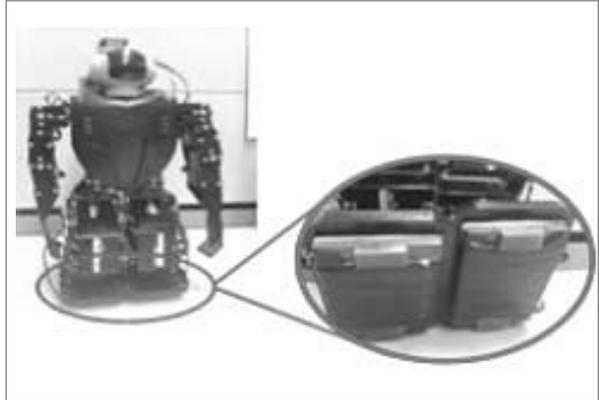
지상로봇을 위한 무선전력 송신부는 영구자석에 코일이 감겨진 매트 구조로 제작되었다. 매트 코일의 간격은 수신부 위치에 따른 영향을 최소화하기 위해 5cm로 제작되었다. 매트코일위에는 아크릴판을 설치하여 로봇이 안정되게 설수 있도록 하였다. 그림 8은 근접형 무선전력 송신부이다. 근접형 무선전력 수송부를 최적화하기 위한 설계요건을 구분하고 표 5와 같은 장단점 분석 및 표 6과 같은 Pugh Matrix를 통해 '매트형 송신장치'를 선정하였다.

실험용 이족로봇은 '(주)미니로봇'이 제작한 '메탈과

이트'라는 미니로봇을 사용하였으며, 수신부는 로봇 발바닥에 부착하는 형태로 제작하였다. 이족로봇의 구동에 필요한 전력은 5V 18W로 계산되었다. 매트형 무선 전력장치는 높은 전력을 전송할 수 있으나 본 실험에서는 이족로봇의 구동에 필요한 규격으로 매트를 제작하였다. 그림 9는 미니 이족로봇의 발바닥에 무선전력 수신부를 설치한 그림이다. 이족로봇 무선전력 수신부를 최적화하기 위한 설계요건을 구분하고 표 7과 같은 장단점 분석 및 표 8과 같은 Pugh Matrix를 통해 '로봇 발바닥 부착형'을 선정하였다.



[그림 8] 매트형 무선전력 송신부



[그림 9] 이족로봇 발바닥 수신부

[표 5] 이족로봇 전력 송신부 형상 검토

구분	장점	단점
 매트형	위치여유도 우수 다중 충전가능	송신부 면적 증가
 레일형	로봇이동 경로중 지속 충전가능	충전장치 관리 어려움
 슬롯형	송신부 면적최소	로봇의 정확한 위치조작 요구

[표 6] 송신부 선정 Pugh Matrix

평가기준	가중치	1차 수행			검증		
		설계(안)			설계(안)		
		1	2	3	1	2	3
충전용이성	5	++	-	--	S	--	--
송신성능	4	+	S	++	S	-	++
구현용이성	2	++	--	-	S	--	--
개발일정	1	S	-	-	S	-	-
설치용이성	3	++	--	-	S	--	--
Sum of Positives		34	0	8	0	0	8
Sum of Negatives		0	16	16	0	25	21
Sum of Sames		1	1	0	5	0	0
Sum of Positiveness & Negatives		34	-16	-8	0	-25	-13

[표 7] 이족로봇 전력 수신부 형상 검토

구분	장점	단점
 발바닥부착	전력전송거리 최소화 및 효율최대	수신부 접촉면적 제한 및 다리거동 하중 증가
 코일장착수레	대형수신코일 장착 가능	이동성 나쁨
 로봇몸체부착	로봇 이동성 향상	전력전송거리 최대로 전송효율감소

[표 8] 수신부 선정 Pugh Matrix

평가기준	가중치	1차 수행			검증		
		설계(안)			설계(안)		
		1	2	3	1	2	3
충전용이성	5	++	-	--	S	--	-
로봇이동성	4	++	--	+	S	--	-
자체안정성	2	++	-	--	S	--	--
개발일정	1	S	-	-	S	-	-
설치용이성	3	++	S	-	S	--	--
Sum of Positives		34	0	8	0	0	0
Sum of Negatives		0	21	19	0	29	20
Sum of Sames		1	4	0	5	0	0
Sum of Positiveness & Negatives		34	-21	-11	0	-29	-20

그림 10은 비행로봇 실험장치의 완성품이다. 무선 전력 전송부와 수신부가 4.3m 떨어진 거리에서 100W의 전력을 전송한 결과 약 18W의 전력이 수신되었으며, 싸이버드 로봇새가 날개짓을 분당 약 60회 정도 수행을 할 수 있었다. 2m 떨어진 거리에서는 100W의 전력이 송신되어 약 46W의 전력이 수신되었으며, 싸이버드 로봇새가 분당 약 140회의 날개짓을 할 수 있었다. 거리가 가까우면 가까울수록 전력전송 효율은 늘어나고, 거리가 멀어지면 전력전송 효율이 줄어들었다. 본 실험에 사용된 다이폴형 무선전력 송신부는 일정한 지향성 없이 전력이 사방으로 퍼져나가기 때문에 전력전송 효율이 낮았다.

그림 11은 바닥매트를 통해 무선전력을 송신하는 실험 장치이다.

바닥매트를 통한 이족로봇 전력전송 실험결과 20W를 전송하여 약 18.6W의 전력이 로봇 발바닥의 수신부에 전송되었으며, 이 전력으로 미니로봇이 약 1시간 정도

연속적으로 동작하는 것을 확인하였다. 1시간 이상 연속적으로 동작이 가능하지만 실험시간은 1시간으로 제한하였다.

3. 전망

실험을 통해 자기유도형 무선전력 전송방식으로 로봇 구동에 필요한 전력전송이 가능함을 확인하였다.

본 실험에 사용된 송신전력은 장비 여건상 100W를 최대로 하였으나, 필요규격에 따라 장비를 제작하면 전력 전송량은 증가시킬 수 있다.

비행로봇의 경우 무게가 매우 중요한 요소이므로 패라이트 코어가 아닌 매우 가벼운 소재로 대체하는 것이 필요하며, 전력을 한 방향으로만 송신하여 송신효율을 증대시킬 수 있도록 송신부 후면에 반사체를 설치하는 방법을 연구하는 것이 필요하다.



[그림 10] 비행로봇 실험장치



[그림 11] 매트형 무선전력 실험장치

지상로봇의 경우 이중로봇의 이동 중 전력수신을 위해 다중코일 내장형 매트 사용하였으나, 지상로봇이 매트위에 정지하여 전력을 충전하는 방식으로 개념을 바꾸면 전력전송 효율성이 좋아질 것이다. 매트형 전력송신방식은 KAIST가 개발한 온라인 전기자동차와 유사한 원리로 1kW 정도의 대용량 무선충전이 가능하다.

무선전력이 기존의 기기에 미치는 EMI영향은 본 실험에서 검증하지 못하였다. 다이폴형 무선전력전송은 거리가 제한적이므로 주변 기기와의 거리를 적절히 유지할 경우 큰 문제가 없을 것으로 판단되며, 바닥 매트형 무선전력 전송은 전송거리가 매우 짧아 주변에 미치는 EMI 영향이 거의 없다고 볼 수 있다.

한수원 중앙연구원은 원전사고 모니터링 및 긴급조치용 로봇에 무선전력 기술을 접목하여 격납용기 내부에서 로봇 스스로 전기 충전을 하면서 장시간 모니터링과 작업을 할 수 있는 로봇을 개발할 계획이다. 원전로봇에 무선전력기술을 적용해 본 사례는 세계적으로 전무하여 어려움이 예상되지만 현재까지 개발된 기술들을 잘 융합하고 추가적인 기술을 연구한다면 신개념의 원전 로봇이 탄생될 수 있을 것이라 확신한다. KEA

[참고문헌]

1. 문준철, 국립전파연구원, 무선전력전송 활성화를 위한 제도개선방안, '무선전력전송/충전시스템의 기술개발과 제품 상용화를 위한 시장분석 (2012)
2. C. B. Park, KAIST, '5m-off-Long Distance Inductive Power Transfer System Using Optimum Shaped Dipole Coils', IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference(2012)
3. J. Huh, KAIST, 'Narrow-width Inductive power transfer system for online electrical vehicles', IEEE transactions on power electronics, 페이지 . 26, No. 12, December(2011)