헬리컬 코일을 이용하는 자기 공진형 무선 전력 전송 시스템에서 새로운 상호 인덕턴스의 계산식 제안

Novel Mutual Inductance Formula for the Magnetic Resonance Wireless Power Transmission System Using Helical Coils

장 주 엽 · 허 정 · 김 용 남

Ju-Yeop Jang · Jung Hur · Yong-Nam Kim

요 약

본 논문에서는 헬리컬 코일을 이용하는 공진형 무선 전력 전송 시스템에서 새로운 상호 인덕턴스 계산식을 이용한 해석적 계산을 제안한다. 상호 인덕턴스 계산 과정 중에 중요한 변수의 look-up table을 수식화 하였다. 송 · 수신이 대칭인 구조에서 두 헬리컬 코일 간의 거리를 53 mm부터 500 mm까지 10 mm 간격으로 거리를 증가 시키며, 공진 주파수와 삽입 손실에 대한 계산 결과와 실험 결과를 비교하였다. 실험 결과와 계산 결과의 공진 주파는 평균적으로 5.63 %의 차이를 보였다. 삽입 손실은 실험 결과와 290 mm에서 0.33 dB의 가장 작은 차이를 보였고, 평균적으로 2.25 dB의 차이를 보였다. 발룬을 사용하지 않았을 때의 실험 결과가 계산 결과와 더 근접한 결과를 보이는 것을 확인했다.

Abstract

In this paper, analytical calculations using a novel mutual inductance formula for a resonant wireless power transmission system using helical coils. The look-up table of critical variables during the mutual inductance calculation process was formulated. The calculation results for resonant frequency and insertion loss were compared with experimental results when the distance between the two helical coils in a structure where the transmission and reception is symmetrical was varied with 10 mm increments from 53 mm to 500 mm. On average, the resonant frequency showed a difference of 5.63 % between the experimental results and the calculation results. The insertion loss had an average difference 2.25 dB where the smallest difference of 0.33 dB occurred with 290 mm. It was found that the experimental results without using a balun were in greater agreement with the calculation results.

Key words : Wireless Power Transmission, Mutual Inductance, Helical Coil

I. 서 론

자기 공진을 이용한 무선 전력 전송 기술^[1]은 기존의 자기 유도 방식보다 먼 거리에서 전력 전송이 가능하고, 마이크로파 방식보다 더 높은 효율로 전

력을 전달할 수 있다. 이 기술은 비방사형이며, 자기장을 기반으로 하고 있으므로 같은 공진 주파수를 가진 기기가 존재할 때에만 직접 전달된다. 사용되지 않는 부분은 공기 중으로 퍼지는 대신 전자장으로 재흡수되기 때문에 주변의 다른 기기나 신체에는

건국대학교 전자정보통신공학과(Department of Electronic, Information & Communication Engineering, Konkuk University)

· Manuscript received January 17, 2012 ; Revised May 4, 2012 ; Accepted May 8, 2012. (ID No. 20120117-007)

· Corresponding Author : Jung Hur (e-mail : jjhawk@hanmail.net)

그림 1. 자기 공진 방식의 무선 전력 전송 시스템
Fig. 1. Magnetic resonance wireless power transmission system.

영향을 미치지 않을 것으로 보고 있다. 전달거리가 수 m의 경우, 수 MHz 대역을 사용하고, 50~80 %의 효율을 가진다^[2]. 이러한 무선 전력 전송 기술은 개발이 초기 단계이지만 국내외로 많은 연구가 진행되고 있다. 공진형 무선 전력 전송 시스템의 전형적인 구성은 그림 1과 같다. 송신측 루프 코일과 헬리컬 코일, 수신측 헬리컬 코일과 루프 코일, 이렇게 네 개의 코일이 기본 구성 요소이다.

여러 가지 변수들이 취하는 값에 따라 나타내는 결과를 수치 해석적인 HFSS와 같은 툴을 이용해 구할 수도 있는데, 한 번의 시뮬레이션에 보통 몇 시간 이상이 소요된다. 이는 헬리컬 코일의 감은 수가 늘어날수록 구조가 더 복잡해지기 때문에 시간 소요가 늘어난다. 따라서 해석적 계산이 가능한 계산식이 있다면 이러한 시간 소요를 대폭 줄일 수 있다. 그런데 이러한 무선 전력 전송 시스템에 대한 계산식은 Kim et al.^[3]이 제안한 바 있다.

Kim et al.^[3]은 헬리컬 코일과 헬리컬 코일 사이의 상호 인덕턴스 계산식을 식 (1)과 같이 제안하고 있다.

$$M = \frac{N^2 \mu_0 \pi r^4}{2(D^2 + r^2)^{3/2}} \quad (1)$$

이 수식은 루프 코일과 루프 코일 사이의 상호 인덕턴스 계산식을 변형한 것으로서 헬리컬 코일을 다수의 동일한 루프 코일로 가정하여 제안한 것이다. 따라서 실제의 상호 인덕턴스 값과는 차이가 날 수 있다. Frederick W. Grover^[4]도 헬리컬 코일과 헬리컬 코일 간 상호 인덕턴스 계산식을 제시하였다. 그러나 Frederick W. Grover^[4]은 계산 과정의 중요한 변수를 look-up table 형태로 저술하였기 때문에, 계산을 진행해 나가는 과정에 있어서의 어려움이 있었다. 본 논문에서는 상호 인덕턴스 계산을 쉽게 하기 위

하여 이 look-up table을 하나의 다항식으로 만들었다. 제안한 다항식을 이용하면 각 look-up table에 나타난 값들뿐만 아니라 별도의 내삽(Interpolation)으로 구해야 하는 사이사이의 모든 경우의 값을 바로 계산할 수 있다. Park^[5]이 정의한 계산 과정에 본 논문에서 제안하는 상호 인덕턴스 계산식을 이용한다면 최종 결과가 더 정확해질 것으로 예상할 수 있다.

Kim et al.^[3]이 제안한 상호 인덕턴스 계산식을 이용한 계산 결과의 공진 주파수와 삽입 손실을 비교하였고, 실험 결과와도 비교하여 본 논문에서 제안한 상호 인덕턴스 계산식의 유효함을 검증한다.

II. 자기 공진형 무선 전력 전송 시스템의 해석적 계산

2-1 자기 공진형 시스템의 등가 회로

루프 코일과 헬리컬 코일을 이용한 자기 공진 방식의 무선 전력 전송 시스템의 등가 회로는 그림 2와 같다. M_1 , M_2 , M_3 은 각 코일 간의 상호 인덕턴스를 말한다. 전력은 루프 코일 (A)에서 헬리컬 코일 (B)로 M_1 을 통하여 전력이 전달되고, M_2 와 M_3 를 통하여 루프 코일 (D)까지 전력이 전달된다.

그림 2와 같이 루프 코일은 L 과 R 로서 표현되고, 헬리컬 코일은 L , C , R 로 표현할 수 있다^[5].

루프 코일의 반지름이 r , 도선의 지름이 $2a$ 라고 할 때, 인덕턴스 L ^[3], 내부저항 R_0 ^[3], 복사저항 R_r ^[3]은 각각 식 (2)~(4)로 나타낸다.

$$L = r \mu_0 \mu_r \left(\ln \left[\frac{8r}{a} \right] - 2 \right) \quad (2)$$

그림 2. 헬리컬 코일을 이용한 자기 공진 방식 시스템 등가 회로

Fig. 2. Magnetic resonance system equivalent circuit using helical coils.

그림 3. 헬리컬 코일의 파라미터
Fig. 3. Parameter of helical coil.

$$R_0 = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \mu_r}{2\sigma}} \frac{r}{a} \quad (3)$$

$$R_r = 20 \left(\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \cdot \pi r^2 \right)^2 \quad (4)$$

그림 3에서처럼 헬리컬 코일의 파라미터는 지름 D , 높이 H , Pitch p , 도선의 직경은 d , 감은 횟수 N 이라 할 때 헬리컬 코일의 $L^{[3]}$, $C^{[3]}$, $R^{[3]}$ 에 대한 수식은 식 (5)~(8)로 나타낸다. 이때의 식 (5), (6)의 계산 단위는 mm이고, 식 (7), (8)의 계산 단위는 m 이다.

그 외의 파라미터들은 헬리컬 코일의 전체 길이 l 과 진공에서의 빛의 속도 c 가 있다^[3].

$$L(nH) = \frac{D^2 n^2}{0.45D + H} \quad (5)$$

$$C(\text{pF}) = \frac{D\epsilon_r}{11.45 \cosh^{-1} \left[\frac{(n-1)(p-d)}{d} \right]} \quad (6)$$

$$R_0 = \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2\sigma}} \frac{l}{4\pi d} \quad (7)$$

$$R_r = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \left[\frac{\pi}{12} n^2 \left(\frac{\omega r}{c} \right)^4 + \frac{2}{3\pi^2} \left(\frac{\omega H}{c} \right)^2 \right] \quad (8)$$

2-2 해석적 계산에서의 S_{11} 과 S_{21}

그림 2의 등가 회로를 연립방정식^[5]으로 나타내면 식 (9)~(12)로 나타낸다.

$$V_s = I_1 Z_1 - I_2 \cdot j\omega M_1 \quad (9)$$

$$0 = I_2 Z_2 - I_1 \cdot j\omega M_1 - I_3 \cdot j\omega M_2 \quad (10)$$

$$0 = I_3 Z_3 - I_2 \cdot j\omega M_2 - I_4 \cdot j\omega M_3 \quad (11)$$

$$0 = I_4 Z_4 - I_3 \cdot j\omega M_3 \quad (12)$$

식 (9)에서의 $j\omega M_1$ 은 소스 루프 코일과 헬리컬 코일의 상호 인덕턴스를 말한다. Z_1 은 소스 임피던스와 루프 코일의 임피던스를 합한 결과이다. Z_2 , Z_3 , Z_4 도 마찬가지로 각각의 루프 코일과 헬리컬 코일의 임피던스를 합한 결과이다. 이렇게 연립방정식으로 변환한 값들을 행렬식^[5]으로 표현할 수 있고, 식 (13), (14)와 같다.

$$|A_1| \equiv \begin{bmatrix} V_s - j\omega M_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & -j\omega M_2 & 0 \\ 0 & -j\omega M_2 & Z_3 & -j\omega M_3 \\ 0 & 0 & -j\omega M_3 & Z_4 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$|A_4| \equiv \begin{bmatrix} Z_1 & -j\omega M_1 & 0 & V_s \\ -j\omega M_1 & Z_2 & -j\omega M_2 & 0 \\ 0 & -j\omega M_2 & Z_3 & 0 \\ 0 & 0 & -j\omega M_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

행렬식으로부터 회로에 흐르는 전류 I_1 과 I_4 를 구할 수 있고, 계산식은 식 (15), (16)과 같다.

$$I_1 = \frac{|A_1|}{|A|} \quad (15)$$

$$I_4 = \frac{|A_4|}{|A|} \quad (16)$$

임의의 입력전압 V_s 와 소스 임피던스 Z_s 를 결정 한 후에 식 (15)로부터 Z_{in} 을 구할 수 있다.

$$Z_{in} = \frac{V_s - I_1 Z_s}{I_1} \quad (17)$$

$$V_L = I_4 \cdot Z_L \quad (18)$$

$$V_{in} = \frac{Z_{in}}{Z_{in} + Z_s} V_s \quad (19)$$

Z_{in} 과 Z_s 가 같다면 식 (19)는 $V_s/2$ 가 된다. Z_{in} , V_{in} , V_L 의 계산 결과의 절대 값으로 S_{11} 과 S_{21} 을 알 수 있고, 식 (20), (21)으로 나타낸다^[5].

$$S_{11} = \left| \frac{Z_{in} - Z_s}{Z_{in} + Z_s} \right| \quad (20)$$

$$S_{21} = \left| \frac{V_L}{V_{in}} \right| \quad (21)$$

III. 상호 인덕턴스 계산

3-1 루프 코일과 헬리컬 코일 간의 상호 인덕턴스 계산식

그림 4에 있는 헬리컬 코일의 반지름은 A , 높이는 x , 도선의 감은 수는 N 이다. 헬리컬 코일의 높이와 도선의 감은 수와의 관계는 $N = n_1 x$ 이다. n_1 은 헬리컬 코일의 높이에 대한 단위길이 당 도선의 감은 수이다(winding density). 이때의 루프 코일의 반지름은 a 로 나타내고, 헬리컬 코일과의 거리는 D 만큼 떨어져 있다^[4].

a 와 A 의 반지름 중에 항상 더 큰 변수가 분모가 되어 파라미터 α 를 계산할 수 있다^[4].

$$\alpha = \frac{a}{A} \quad (22)$$

α 와 같이 Q_0 를 결정하는 파라미터 ρ^2 은 식 (23)으로 나타낸다.

$$\rho^2 = \frac{A^2}{A^2 + (x + D)^2} \quad (23)$$

$$M = 0.002\pi^2 a \alpha \rho N Q_0 \quad (24)$$

3-2 헬리컬 코일 간의 상호 인덕턴스

그림 5에서의 A 와 x_1, x_2, x_3, x_4 사이의 대각선의 길이는 파라미터 r_n 이라 하고 식 (25)~(28)로 나타낸다^[4].

$$r_1 = \sqrt{A^2 + x_1^2} \quad (25)$$

그림 4. 헬리컬 코일과 루프 코일 간의 상호 인덕턴스 계산식 파라미터

Fig. 4. Formula parameter for the mutual inductance between the helical coil and loop coil.

그림 5. 헬리컬 코일과 헬리컬 코일의 상호 인덕턴스 계산식 파라미터

Fig. 5. Formula parameter for the mutual inductance between the helical coils.

$$r_2 = \sqrt{A^2 + x_2^2} \quad (26)$$

$$r_3 = \sqrt{A^2 + x_3^2} \quad (27)$$

$$r_4 = \sqrt{A^2 + x_4^2} \quad (28)$$

α 는 식 (22)를 이용하고 ρ_n^2 은 식 (29)로 나타낸다. 여기서의 ρ_n^2 은 식 (30)에서의 변수 B_n 을 결정할 때의 파라미터이다.

$$\rho_n^2 = \frac{A^2}{r_n^2} \quad (29)$$

$$M = 0.002\pi^2 a^2 n_1 n_2 [r_1 B_1 - r_2 B_2 - r_3 B_3 + r_4 B_4] \quad (30)$$

루프 코일과 헬리컬 코일 사이 또는 두 헬리컬 코일 간의 상호 인덕턴스를 계산하는 과정에서의 중요한 변수인 $Q_0(\alpha, \rho^2)$ 와 $B_n(\alpha, \rho^2)$ 은 Frederick W. Grover et al.^[4]으로부터 look-up table로 주어져 있다. 그리고 주어진 데이터는 discrete하게 나타내어져 있다. 이 경우, 코일의 반지름, 거리 등 여러 변수들이 변하게 되면 이에 해당하는 값을 찾아서 매번 입력해야 하는 번거로움이 있다. 그리고 look-up table에서의 주어진 값들보다 내삽으로 구해야 하는 경우가 더 많기 때문에, $Q_0(\alpha, \rho^2)$ 와 $B_n(\alpha, \rho^2)$ 의 데이터와 사이 값들을 한 번에 구할 수 있도록 수학 프로그램을 사용하여 각각 하나의 다항식으로 curve fitting했다. 이때의 결과와 look-up table의 데이터 비교를 표 1에 나타냈다. $Q_0(\alpha, \rho^2)$ 는 평균 0.0026 %의 차이가 발생하고, $B_n(\alpha, \rho^2)$ 은 0.0001 %이다. 그림 6은 표 1에서 $Q_0(\alpha, \rho^2)$ 의 α 값이 0.2, 0.4, 0.6, 0.8일 때의

그림 6. Q_0 table과 Q_0 curve fitting의 비교

Fig. 6. Comparison of the Q_0 table and Q_0 curve fitting.

표 1. Q_0 , B_n 의 look-up table과 계산식의 비교

Table 1. Comparison of the look-up table of Q_0 , B_n and formula.

Q_0 _lookup table	계산식과 차이(%)	B_n _lookup table	계산식과 차이(%)
$\alpha = 0$	0.0000	$\rho^2 = 0$	0.0000
$\alpha = 0.05$	0.0017	$\rho^2 = 0.05$	0.0001
$\alpha = 0.10$	0.0005	$\rho^2 = 0.10$	0.0000
$\alpha = 0.15$	0.0015	$\rho^2 = 0.15$	0.0001
$\alpha = 0.20$	0.0010	$\rho^2 = 0.20$	0.0001
$\alpha = 0.25$	0.0017	$\rho^2 = 0.25$	0.0001
$\alpha = 0.30$	0.0007	$\rho^2 = 0.30$	0.0001
$\alpha = 0.35$	0.0020	$\rho^2 = 0.35$	0.0001
$\alpha = 0.40$	0.0014	$\rho^2 = 0.40$	0.0001
$\alpha = 0.45$	0.0019	$\rho^2 = 0.45$	0.0000
$\alpha = 0.50$	0.0013	$\rho^2 = 0.50$	0.0001
$\alpha = 0.55$	0.0017	$\rho^2 = 0.55$	0.0001
$\alpha = 0.60$	0.0021	$\rho^2 = 0.60$	0.0001
$\alpha = 0.65$	0.0027	$\rho^2 = 0.65$	0.0000
$\alpha = 0.70$	0.0045	$\rho^2 = 0.70$	0.0000
$\alpha = 0.75$	0.0013	$\rho^2 = 0.75$	0.0002
$\alpha = 0.80$	0.0025	$\rho^2 = 0.80$	0.0000
$\alpha = 0.85$	0.0025	$\rho^2 = 0.85$	0.0001
$\alpha = 0.90$	0.0043	$\rho^2 = 0.90$	0.0001
$\alpha = 0.95$	0.0150	$\rho^2 = 0.95$	0.0000
$\alpha = 1.00$	0.0056	$\rho^2 = 1.00$	0.0001
평균	0.0026	평균	0.0001

표 2. Look-up table과 계산식의 상호 인덕턴스 비교

Table 2. Comparison of mutual inductance of look-up table and formula.

α, ρ^2	Lookup table	계산식	차이 (%)
$\alpha = 0.2, \rho^2 = 0.2$	8.8329×10^{-7}	8.8328×10^{-7}	0.0009
$\alpha = 0.3, \rho^2 = 0.5$	2.1112×10^{-6}	2.1109×10^{-6}	0.0131
$\alpha = 0.5, \rho^2 = 0.7$	4.3240×10^{-6}	4.3235×10^{-6}	0.0109
$\alpha = 0.6, \rho^2 = 0.9$	6.3420×10^{-6}	6.3414×10^{-6}	0.0088
평균			0.0084

그림 7. B_n table과 B_n curve fitting의 비교

Fig. 7. Comparison of the B_n table and B_n curve fitting.

look-up table과 수식의 비교를 나타냈고, 그림 7은 $B_n(\alpha, \rho^2)$ 의 ρ^2 값이 0.2, 0.4, 0.6, 0.8일 때를 나타냈다. 그림 6과 7에서 curve fitting한 결과가 look-up table의 데이터뿐만 아니라 내삽으로 구해야 하는 사이 값들을 포함하고 있다는 것을 알 수 있다. 표 2는 수식의 유효함을 검증하기 위해 그림 4의 구조에서 임의의 α , ρ^2 값으로 look-up table과 수식으로 계산한 상호 인덕턴스를 비교했다. Look-up table과 수식은 0.0084 %의 차이를 보였다. 부록 1, 2에서는 $Q_0(\alpha, \rho^2)$ 와 $B_n(\alpha, \rho^2)$ 의 대한 각각의 look-up table을 나타내고, 수식으로 만든 결과를 소수점 넷째자리까지 나타냈다.

IV. 실험 결과

4-1 실험 결과와 계산 결과 비교

그림 8에서의 헬리컬 코일과 루프 코일은 도선의

그림 8. 헬리컬 코일을 이용한 자기 공진 방식의 무선 전력 전송 시스템

Fig. 8. Magnetic resonance wireless power transmission system using helical coils.

직경이 1 mm인 에나멜선을 사용하여 제작하였다. 헬리컬 코일은 지름이 130 mm이고, 높이가 40 mm인 아크릴 원통을 사용하여 제작하였으며, Pitch는 1 mm, 총 25회 감았다. 루프 코일은 같은 지름의 아크릴 원통을 사용하였고, 송·수신의 헬리컬 코일과 루프는 대칭으로 제작하였다. 헬리컬 코일과 루프 코일은 아크릴판을 사이에 두고 떨어져 있으며, 헬리컬 코일 간의 최소 거리는 53 mm이다. 실험 진행은 루프 코일과 헬리컬 코일의 거리를 7 mm로 고정시킨 후 헬리컬 코일 간의 거리를 증가시키며, 공진 주파수와 삽입 손실을 측정하였다. 그리고 실험 결과와 본 논문에서 제안하고 있는 상호 인덕턴스 계산식을 이용한 해석적 계산 결과를 비교하였다.

그림 9~11은 송·수신 루프에 발룬(Balun)을 사용한 상태의 실험 결과와 계산 결과와의 비교 그래

그림 9. 헬리컬 코일 간의 거리가 53 mm일 때의 계산 결과 실험 결과의 S_{21} 비교

Fig. 9. Comparison of S_{21} between the calculation and experiment results when the distance between the helical coils is 53 mm.

그림 10. 헬리컬 코일 간의 거리가 230 mm일 때의 계산 결과 실험 결과의 S_{21} 비교

Fig. 10. Comparison of S_{21} between the calculation and experiment results when the distance between the helical coils is 230 mm.

그림 11. 헬리컬 코일 간의 거리가 500 mm일 때의 계산 결과 실험 결과의 S_{21} 비교

Fig. 11. Comparison of S_{21} between the calculation and experiment results when the distance between the helical coils is 500 mm.

프이며, 표 3의 53 mm, 230 mm, 500 mm일 때의 결과와 같다. 실험 결과와의 차이는 각각 3.46 %, 5.73 %, 6.07 %이고, 평균 5.63 %이다. 그리고 실험 결과와 Kim et al.이 제안한 계산식의 결과는 7.32 %, 7.13 %, 6.96 %로 평균 7.32 %이다. M_1 과 M_3 의 상호 인덕턴스는 Kim et al.이 제안한 계산식으로는 계산을 할 수가 없기 때문에 본 논문의 계산식을 적용하였다.

그림 12는 헬리컬 코일 간의 거리가 53 mm에서 500 mm까지, 10 mm씩 증가할 때의 실험 결과와 계산 결과의 공진 주파수 비교를 나타냈다. 발룬을 사용하지 않았을 때의 실험 결과에서 헬리컬 코일 간의 거리가 53 mm일 때 공진 주파수는 4.71 MHz로

그림 12. 모든 실험 결과와 제안한 계산식, Kim's의 계산식의 공진 주파수 비교

Fig. 12. Comparison of the resonant frequency of all experimental results with the proposed formula.

사용하였을 때의 공진 주파수 4.92 MHz보다 낮았다. 그림 13은 거리 변화에 따른 S_{21} 의 실험 결과와 계산 결과의 비교를 나타낸 그래프이다. S_{21} 의 경우, 발룬을 사용하였을 때의 실험 결과가 사용하지 않았을 때보다 헬리컬 코일 간의 거리 증가에 따라 더 많이 감소하는 것을 확인하였다. 그리고 계산식의 경우, Kim et al.의 상호 인덕턴스 계산식보다 본 논문의 상호 인덕턴스 계산식이 실험 결과에 더 근접하고 있음을 알 수 있다.

표 3은 송신용 헬리컬 코일과 수신용 헬리컬 코일 사이 거리를 53 mm에서 500 mm까지 변화시키면서 실험 결과와 계산 결과의 공진 주파수와 S_{21} 의 비교를 나타냈다. 헬리컬 코일 간의 거리가 달라지면 공진 주파수와 그 주파수에서의 삽입 손실이 변하는데, 계산식으로 추정한 값들과 실험을 통해 얻은 값들을 비교했을 때 공진 주파수는 평균 5.63 %의 차이를 보이고, S_{21} 은 2.25 dB의 차이를 보인다.

삽입 손실에 대한 실험 결과가 계산 값과 2 dB 이상 차이가 났기 때문에 발룬을 사용하였다. 측정을 위해 사용하는 동축 케이블은 불평형 회로이고, 송신 루프와 수신 루프는 평형 회로이기 때문에 둘 사이에 발룬을 삽입하여 삽입 손실 특성을 개선시키려 했다. 그러나 발룬을 삽입하여 구성된 후 측정한 결과가 예상과 달리 오히려 삽입 손실 특성이 악화되는 결과를 얻었다. 또한 발룬을 사용하였을 때 실험 결과와 계산 결과의 공진 주파수는 5.63 %의 차이를

표 3. 실험 결과와 계산 결과의 공진 주파수와 S_{21} 비교

Table 3. Comparison of S_{21} and resonant frequency of the experiment and calculation results.

거리	공진 주파수			S_{21}		
	실험	계산	차이	실험	계산	차이
mm	MHz	MHz	%	dB	dB	dB
53	4.92	4.75	3.46	-2.18	-0.03	2.15
60	5.05	4.82	4.56	-2.20	-0.03	2.17
70	5.13	4.91	4.29	-2.25	-0.03	2.22
80	5.26	4.99	5.13	-2.36	-0.03	2.33
90	5.33	5.06	5.07	-2.48	-0.03	2.45
100	5.38	5.12	4.83	-2.62	-0.03	2.59
110	5.44	5.20	4.41	-2.83	-0.03	2.80
120	5.48	5.25	4.20	-3.09	-0.10	2.99
130	5.52	5.25	4.89	-3.43	-0.42	3.01
140	5.56	5.25	5.58	-3.95	-0.89	3.06
150	5.57	5.25	5.75	-4.41	-1.66	2.75
160	5.58	5.26	5.73	-5.20	-2.39	2.81
170	5.58	5.26	5.73	-6.03	-3.08	2.95
180	5.58	5.26	5.73	-7.11	-4.00	3.11
190	5.58	5.26	5.73	-8.16	-5.30	2.86
200	5.58	5.26	5.73	-8.70	-6.61	2.09
210	5.60	5.26	6.07	-9.70	-7.17	2.53
220	5.60	5.26	6.07	-10.24	-7.60	2.64
230	5.58	5.26	5.73	-11.12	-8.32	2.80
240	5.60	5.26	6.07	-11.99	-9.29	2.70
250	5.58	5.26	5.73	-12.88	-10.24	2.64
260	5.60	5.26	6.07	-13.69	-11.28	2.41
270	5.60	5.26	6.07	-13.59	-12.86	0.73
280	5.60	5.26	6.07	-15.17	-14.64	0.53
290	5.60	5.26	6.07	-16.07	-15.74	0.33
300	5.60	5.26	6.07	-16.90	-15.68	1.22
310	5.60	5.26	6.07	-17.59	-15.54	2.05
320	5.58	5.26	5.73	-18.37	-16.03	2.34
330	5.60	5.26	6.07	-19.00	-16.80	2.20
340	5.58	5.26	5.73	-19.86	-17.54	2.32
350	5.60	5.26	6.07	-20.58	-18.27	2.31
360	5.60	5.26	6.07	-21.19	-18.98	2.21
370	5.58	5.26	5.73	-21.85	-19.67	2.18
380	5.60	5.26	6.07	-22.42	-20.34	2.08
390	5.60	5.26	6.07	-23.08	-21.00	2.08
400	5.60	5.26	6.07	-23.66	-21.64	2.02
420	5.60	5.26	6.07	-24.80	-22.88	1.92
440	5.60	5.26	6.07	-26.27	-24.10	2.17
460	5.60	5.26	6.07	-27.20	-25.20	2.00
480	5.60	5.26	6.07	-28.08	-26.29	1.79
500	5.60	5.26	6.07	-29.12	-27.34	1.78
Total			5.63			2.25

그림 13. 모든 실험 결과와 제안한 계산식, Kim's의 계산식의 S_{21} 비교

Fig. 13. Comparison of the S_{21} of all experimental results with the proposed formula and Kim's formula.

그림 14. 발룬을 사용한 실험과 사용하지 않은 실험의 공진 주파수와 S_{21} 비교

Fig. 14. Comparison of S_{21} and resonant frequency between the experiment results with and without the use of a balun.

보이지만, 사용하지 않았을 때의 실험 결과와는 3.39 %의 더 작은 차이를 보인다. 두 경우의 결과를 비교하여 그림 14에 나타냈다.

V. 결 론

본 논문에서는 헬리컬 코일을 이용하는 공진형 무선 전력 전송의 연구를 진행함에 있어 해석적 계산을 위한 새로운 상호 인덕턴스 계산식을 제안하였다. 실험 결과와의 차이를 줄이기 위해 상호 인덕턴스 계산 과정의 look-up table로 주어진 중요한 변수 $Q_0(\alpha, \rho^2)$ 와 $B_n(\alpha, \rho^2)$ 을 하나의 수식으로 변환하였다. 검증을 위해 루프 코일과 헬리컬 코일의 거리는 고정시킨 후 헬리컬 코일 간의 거리를 53 mm부터 400 mm까지 10 mm씩 변화시켜 가며 총 500 mm까지의 공진 주파수와 삽입 손실을 계산하여 실험 결과와 비교하였다. 이때의 공진 주파수의 차이는 평균적으로 5.63 %의 차이를 보였고, 삽입 손실의 경우 평균 2.25 dB의 차이를 보였다. 발룬을 사용하지 않았을 때와의 공진 주파수 차이는 3.39 %로 더 작은 차이를 보였다. 발룬이 필요 없는 구조인지 아니면 다른 요인 때문인지, 추가적인 연구가 필요하다.

그리고 Kim et al.^[3]이 제안한 상호 인덕턴스 계산식을 이용한 계산 결과와 비교를 하였다. 공진 주파수는 1.78 %의 차이를 보였지만 Kim et al.^[3]의 계산 결과는 실험 결과와는 달리 계속해서 변하는 것을 확인하였다. 본 논문에서의 제안한 계산식과 실험 결과의 차이는 제작할 때의 송·수신의 헬리컬 코일의 pitch 간격의 차이와 측정할 때의 주변 환경의 영향을 최소화 시킨다면 좀 더 실험 결과와의 차이가 줄어들 것이라 생각한다. 삽입 손실의 차이의 경우 헬리컬 코일을 고정시키기 위한 아크릴 원통이나 테이프 등이 손실로 작용했을 거라는 생각을 한다. 실험 결과와의 차이를 줄이기 위해 손실이 적은 매체를 이용한 실험이나, Loss tangent 등의 손실 성분의 계산식 적용으로 인한 실험 결과, 값과의 차이를 줄이기 위한 연구가 앞으로 진행되어야 한다.

부 록

표 1. $Q_0(\alpha, \rho^2)$ 값

Table 1. $Q_0(\alpha, \rho^2)$ values.

ρ^2	$\alpha = 0$	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	ρ^2
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0.05	1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0001	1.0001	1.0001	1.0001	1.0002	1.0002	1.0002	0.05
0.10	1	1.0000	1.0000	1.0001	1.0002	1.0002	1.0003	1.0004	1.0006	1.0008	1.0009	0.10
0.15	1	1.0000	1.0001	1.0002	1.0004	1.0006	1.0008	1.0010	1.0013	1.0016	1.0020	0.15
0.20	1	1.0000	1.0002	1.0004	1.0006	1.0010	1.0014	1.0018	1.0024	1.0030	1.0036	0.20
0.25	1	1.0001	1.0003	1.0005	1.0009	1.0014	1.0021	1.0029	1.0038	1.0046	1.0057	0.25
0.30	1	1.0001	1.0004	1.0007	1.0013	1.0021	1.0030	1.0041	1.0053	1.0067	1.0082	0.30
0.35	1	1.0001	1.0005	1.0010	1.0018	1.0029	1.0041	1.0056	1.0072	1.0091	1.0111	0.35
0.40	1	1.0002	1.0006	1.0014	1.0024	1.0037	1.0054	1.0072	1.0094	1.0119	1.0146	0.40
0.45	1	1.0002	1.0008	1.0017	1.0030	1.0047	1.0068	1.0092	1.0120	1.0152	1.0186	0.45
0.50	1	1.0002	1.0010	1.0021	1.0037	1.0058	1.0084	1.0114	1.0148	1.0183	1.0231	0.50
0.55	1	1.0003	1.0012	1.0026	1.0045	1.0071	1.0102	1.0138	1.0180	1.0228	1.0282	0.55
0.60	1	1.0003	1.0014	1.0031	1.0054	1.0084	1.0122	1.0166	1.0216	1.0274	1.0338	0.60
0.65	1	1.0004	1.0016	1.0036	1.0064	1.0100	1.0144	1.0196	1.0256	1.0325	1.0402	0.65
0.70	1	1.0004	1.0018	1.0042	1.0074	1.0116	1.0167	1.0228	1.0300	1.0382	1.0473	0.70
0.75	1	1.0005	1.0021	1.0048	1.0085	1.0133	1.0193	1.0264	1.0348	1.0444	1.0552	0.75
0.80	1	1.0006	1.0024	1.0054	1.0097	1.0152	1.0221	1.0303	1.0400	1.0512	1.0640	0.80
0.85	1	1.0006	1.0027	1.0061	1.0110	1.0173	1.0251	1.0345	1.0458	1.0588	1.0739	0.85
0.90	1	1.0007	1.0030	1.0069	1.0124	1.0195	1.0284	1.0392	1.0522	1.0673	1.0850	0.90
0.95	1	1.0008	1.0034	1.0077	1.0139	1.0218	1.0320	1.0442	1.0592	1.0768	1.0976	0.95
1.00	1	1.0009	1.0038	1.0086	1.0154	1.0244	1.0358	1.0498	1.0668	1.0873	1.1117	1.00
ρ^2	$\alpha = 0.50$	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	ρ^2
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0.05	1.0002	1.0002	1.0003	1.0004	1.0005	1.0005	1.0006	1.0007	1.0008	1.0008	1.0009	0.05
0.10	1.0009	1.0011	1.0013	1.0016	1.0018	1.0020	1.0023	1.0026	1.0029	1.0032	1.0035	0.10
0.15	1.0020	1.0024	1.0029	1.0034	1.0040	1.0046	1.0051	1.0057	1.0063	1.0070	1.0077	0.15
0.20	1.0036	1.0044	1.0052	1.0061	1.0070	1.0080	1.0090	1.0101	1.0112	1.0123	1.0135	0.20
0.25	1.0057	1.0068	1.0081	1.0094	1.0108	1.0124	1.0140	1.0156	1.0172	1.0190	1.0208	0.25
0.30	1.0082	1.0098	1.0116	1.0136	1.0156	1.0178	1.0200	1.0224	1.0248	1.0273	1.0299	0.30
0.35	1.0111	1.0134	1.0158	1.0185	1.0213	1.0242	1.0272	1.0304	1.0337	1.0372	1.0406	0.35
0.40	1.0146	1.0176	1.0208	1.0242	1.0279	1.0317	1.0358	1.0400	1.0443	1.0488	1.0534	0.40
0.45	1.0186	1.0224	1.0264	1.0308	1.0355	1.0404	1.0456	1.0510	1.0566	1.0623	1.0683	0.45
0.50	1.0231	1.0278	1.0330	1.0384	1.0444	1.0506	1.0571	1.0640	1.0710	1.0784	1.0858	0.50
0.55	1.0282	1.0340	1.0404	1.0471	1.0544	1.0622	1.0704	1.0790	1.0878	1.0970	1.1064	0.55
0.60	1.0338	1.0410	1.0487	1.0570	1.0660	1.0756	1.0857	1.0964	1.1076	1.1189	1.1305	0.60
0.65	1.0402	1.0488	1.0582	1.0683	1.0792	1.0910	1.1036	1.1168	1.1304	1.1446	1.1593	0.65
0.70	1.0473	1.0575	1.0688	1.0812	1.0945	1.1089	1.1242	1.1405	1.1576	1.1754	1.1941	0.70
0.75	1.0552	1.0674	1.0810	1.0960	1.1124	1.1301	1.1491	1.1693	1.1908	1.2134	1.2372	0.75
0.80	1.0640	1.0785	1.0947	1.1126	1.1324	1.1545	1.1786	1.2044	1.2320	1.2612	1.2922	0.80
0.85	1.0739	1.0911	1.1106	1.1324	1.1568	1.1843	1.2150	1.2490	1.2864			0.85
0.90	1.0850	1.1054	1.1289	1.1558	1.1866	1.2220	1.2623	1.3080	1.3589	1.4150	1.4763	0.90
0.95	1.0976	1.1216	1.1502	1.1842	1.2245							0.95
1.00	1.1117	1.1403	1.1752	1.2157	1.2733	1.3630	1.4978		1.7430		∞	1.00

$Q_0(\alpha, \rho^2)$ Table 수식화

$$\begin{aligned}
& \delta(0, x) \\
& + (1.0000 + 3.8276 \times 10^{-6}y + 0.0021y^2 - 0.0128y^3 - 0.7165y^4 + 8.5 \\
& 199y^5 - 18.6391y^6 - 187.0662y^7 + 1553.9844y^8 - 5708.5023y^9 + 1281 \\
& 4.8001y^{10} - 19119.3343y^{11} + 19430.7084y^{12} - 13347.3073y^{13} + 5950. \\
& 2318y^{14} - 1562.3620y^{15} + 187.2093y^{16} - 1.5144y^{17})\delta(1, x) \\
& + (1.0000 + 0.0013y^2 - 0.2580y^3 + 4.9521y^4 - 35.6611y^5 + 135.4498 \\
& y^6 - 303.4742y^7 + 415.5575y^8 - 342.2703y^9 + 155.9086y^{10} - 30.2019y \\
& ^{11})\delta(2, x) \\
& + (0.9999 + 0.0020y - 0.1191y^2 + 2.4131y^3 - 21.3022y^4 + 105.0617 \\
& y^5 - 316.2915y^6 + 604.9555y^7 - 738.9491y^8 + 558.5536y^9 - 238.0622 \\
& y^{10} + 43.7467y^{11})\delta(3, x) \\
& + (1.0000 + 0.0027y - 0.0497y^2 + 0.9823y^3 - 8.9411y^4 + 47.4916y^5 \\
& - 153.5436y^6 + 311.9133y^7 - 400.1737y^8 + 314.6716y^9 - 138.4213y^{10} \\
& + 26.0832y^{11})\delta(4, x) \\
& + (1.0000 + 0.0194y - 0.7861y^2 + 13.0632y^3 - 110.6676y^4 + 562.13 \\
& 26y^5 - 1835.1873y^6 + 3988.2049y^7 - 5832.6916y^8 + 5672.6407y^9 - 35 \\
& 16.9619y^{10} + 1257.5946y^{11} - 197.3364y^{12})\delta(5, x) \\
& + (0.9999 + 0.0173y - 0.7197y^2 + 12.4269y^3 - 107.4233y^4 + 557.80 \\
& 11y^5 - 1866.1428y^6 + 4166.1881y^7 - 6274.5581y^8 + 6299.3248y^9 - 40 \\
& 41.0817y^{10} + 1498.6422y^{11} - 244.4391y^{12})\delta(6, x) \\
& + (1.0000 - 0.0012y + 0.1068y^2 - 1.4840y^3 + 16.6269y^4 - 101.674 \\
& 4y^5 + 378.5423y^6 - 910.9680y^7 + 1453.4600y^8 - 1531.7600y^9 + 1026.6 \\
& 898y^{10} - 396.8733y^{11} + 67.3849y^{12})\delta(7, x) \\
& + (0.9999 + 0.0007y + 0.1648y^2 - 3.5447y^3 + 44.0610y^4 - 289.9006 \\
& y^5 + 1150.7390y^6 - 2929.6246y^7 + 4901.2287y^8 - 5364.8505y^9 + 3699. \\
& 9682y^{10} - 1458.9187y^{11} + 250.7435y^{12})\delta(8, x) \\
& + (0.9999 - 0.0101y + 0.5786y^2 - 9.1120y^3 + 85.2647y^4 - 476.933 \\
& 2y^5 + 1711.4445y^6 - 4078.1420y^7 + 6519.9768y^8 - 6908.5954y^9 + 4650. \\
& 4437y^{10} - 1799.4032y^{11} + 304.5749y^{12})\delta(9, x) \\
& + (0.9999 - 0.0114y + 0.5885y^2 - 8.6165y^3 + 78.5941y^4 - 428.420 \\
& 7y^5 + 1492.7370y^6 - 3442.8951y^7 + 5318.6013y^8 - 5442.9682y^9 + 3540. \\
& 3278y^{10} - 1325.0835y^{11} + 217.2584y^{12})\delta(10, x) \\
& + (0.9999 - 0.0048y + 0.2182y^2 - 0.9597y^3 + 4.0395y^4 - 7.3052y^5 \\
& - 3.7018y^6 + 43.7348y^7 - 87.2491y^8 + 83.0399y^9 - 36.5297y^{10} + 3.077 \\
& 6y^{11} + 1.7806y^{12})\delta(11, x) \\
& + (0.9999 - 0.0055y + 0.3568y^2 - 3.8833y^3 + 36.0519y^4 - 202.029 \\
& 1y^5 + 723.2568y^6 - 1708.7153y^7 + 2697.3405y^8 - 2816.6939y^9 + 1868. \\
& 2535y^{10} - 712.9671y^{11} + 119.2099y^{12})\delta(12, x) \\
& + (0.9999 - 0.0072y + 0.4869y^2 - 5.3366y^3 + 43.6899y^4 - 213.434 \\
& 7y^5 + 665.9359y^6 - 1369.1388y^7 + 1864.8054y^8 - 1646.4877y^9 + 888.6 \\
& 747y^{10} - 257.2930y^{11} + 28.3208y^{12})\delta(13, x) \\
& + (1.0000 - 0.0069y + 0.5654y^2 - 7.2824y^3 + 70.1352y^4 - 404.722 \\
& 9y^5 + 1493.6033y^6 - 3638.9147y^7 + 5909.9145y^8 - 6319.9306y^9 + 4266. \\
& 8009y^{10} - 1646.4018y^{11} + 276.5135y^{12})\delta(14, x) \\
& + (0.9999999279631352 + 0.031955415497864265y - 0.9682359
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& 692955232y^2 + 6.286190932053348y^3 + 270.46067169324186y^4 - 58 \\
& 84.840904332025y^5 + 58822.79521950396y^6 - 364888.3881057458 \\
& y^7 + 1546390.6811989383y^8 - 4681547.361304352y^9 + 10347212.84 \\
& 8012125y^{10} - 16823835.95583025y^{11} + 20042343.740119264y^{12} - 1 \\
& 7209447.0491268y^{13} + 10303962.649112638y^{14} - 4047637.1956749 \\
& 633y^{15} + 925705.7331862656y^{16} - 91473.1034842418y^{17})\delta(15, x) \\
& + (0.9999998783359408 + 0.03385959141826758y - 1.08444670 \\
& 56673543y^2 + 9.77502203334128y^3 + 275.2323776931315y^4 - 7056 \\
& .436993080494y^5 + 77011.44706960434y^6 - 507086.0962230155y^7 \\
& + 2220505.401009302y^8 - 6707160.623599064y^9 + 14001997.95124 \\
& 6092y^{10} - 19348390.90388704y^{11} + 14704949.78384827y^{12} + 134853 \\
& 3.2485085835y^{13} - 17502782.453027714y^{14} + 21092150.35930419y \\
& ^{15} - 13192691.84595198y^{16} + 4471410.49969867y^{17} - 651673.79001 \\
& 52772y^{18})\delta(16, x) \\
& + (0.999999910432103 - 0.007699372728092966y + 0.59693776 \\
& 91451058y^2 - 1.377868494196694y^3 - 112.88383661311885y^4 + 24 \\
& 55.170703352615y^5 - 25889.003748699022y^6 + 172743.223074340 \\
& 87y^7 - 799976.0725581907y^8 + 2687513.1485583736y^9 - 6694501.6 \\
& 62822217y^{10} + 12463012.676317206y^{11} - 17284384.28311151y^{12} + 1 \\
& 7594653.161903176y^{13} - 12756214.445890022y^{14} + 6230101.91861 \\
& 0144y^{15} - 1835773.911972371y^{16} + 246374.37380322753y^{17})\delta(17, x) \\
& + (0.9999994601089416 + 0.09763106255904307y - 3.56990713 \\
& 71069087y^2 + 30.711950551814155y^3 + 801.6519239872453y^4 - 219 \\
& 27.151814448298y^5 + 254110.34183224675y^6 - 1801499.96075174 \\
& 3y^7 + 8681679.037201393y^8 - 29840922.933767665y^9 + 74957949.3 \\
& 073458y^{10} - 139011035.39584345y^{11} + 190134209.15420827y^{12} - 1 \\
& 89376269.07799363y^{13} + 133527345.96281156y^{14} - 63139135.4858 \\
& 1839y^{15} + 17955229.93892378y^{16} - 2320561.884931749y^{17})\delta(18, x) \\
& + (0.9999947236912206 + 0.12188721380105141y - 3.25913607 \\
& 59116554y^2 - 12.236295210184645y^3 + 1368.5906661054184y^4 - 1 \\
& 6034.246863579949y^5 + 29167.840966816904y^6 + 938467.71650525 \\
& 7y^7 - 1.0787848128452502y^8 + 62194267.220633164y^9 - 22975901 \\
& 6.28184807y^{10} + 580001655.4577982y^{11} - 1005806432.530212y^{12} + 1 \\
& 13063389.71204176y^{13} - 615410025.5996368y^{14} - 320616459.254 \\
& 50367y^{15} + 972817191.9479924y^{16} - 934193005.9932249y^{17} + 49833 \\
& 5290.80019903y^{18} - 1.47300737.84162748y^{19} + 18938269.0697411 \\
& 22y^{20})\delta(19, x) \\
& + (1.0000010903265615 - 0.1054289792485816y + 3.587375719 \\
& 5753044y^2 + 9.9558807654426y^3 - 1321.4482054922792y^4 + 16955. \\
& 13022478185y^5 - 47491.81503236889y^6 - 869310.3181923074y^7 + \\
& 11528819.906572776y^8 - 72290161.85898268y^9 + 287637382.7803 \\
& 743y^{10} - 780720521.7638627y^{11} + 1457978439.747451y^{12} - 177565 \\
& 7462.7658143y^{13} + 1080695082.960365y^{14} + 482579201.0728329y^{15} \\
& - 1770157258.9684033y^{16} + 1856733630.0355139y^{17} - 107225283 \\
& 4.524026y^{18} + 342331492.05436724y^{19} - 47504651.66301315y^{20})\delta(
\end{aligned}$$

표 2. $B_n(\alpha, \rho^2)$ 값

Table 2. $B_n(\alpha, \rho^2)$ values.

α	$\rho^2 = 0$	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	ρ^2
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0.05	1	1.00000	1.00000	0.99999	0.99999	0.99998	0.99997	0.99996	0.99995	0.99994	0.99992	0.05
0.10	1	1.00000	0.99999	0.99997	0.99995	0.99992	0.99989	0.99985	0.99980	0.99975	0.99969	0.10
0.15	1	0.99999	0.99997	0.99994	0.99989	0.99982	0.99975	0.99966	0.99955	0.99943	0.99930	0.15
0.20	1	0.99999	0.99995	0.99989	0.99980	0.99969	0.99955	0.99939	0.99920	0.99899	0.99875	0.20
0.25	1	0.99998	0.99992	0.99982	0.99969	0.99952	0.99930	0.99905	0.99876	0.99843	0.99806	0.25
0.30	1	0.99997	0.99989	0.99975	0.99953	0.99930	0.99900	0.99864	0.99822	0.99774	0.99721	0.30
0.35	1	0.99996	0.99985	0.99966	0.99939	0.99905	0.99846	0.99815	0.99758	0.99694	0.99622	0.35
0.40	1	0.99995	0.99980	0.99955	0.99921	0.99877	0.99823	0.99759	0.99685	0.99601	0.99508	0.40
0.45	1	0.99994	0.99975	0.99944	0.99900	0.99844	0.99776	0.99696	0.99603	0.99498	0.99379	0.45
0.50	1	0.99992	0.99969	0.99931	0.99877	0.99809	0.99725	0.99626	0.99512	0.99383	0.99237	0.50
0.55	1	0.99990	0.99963	0.99916	0.99852	0.99770	0.99669	0.99550	0.99413	0.99257	0.99082	0.55
0.60	1	0.99989	0.99956	0.99901	0.99825	0.99727	0.99608	0.99467	0.99306	0.99121	0.98913	0.60
0.65	1	0.99987	0.99948	0.99884	0.99795	0.99682	0.99543	0.99380	0.99190	0.98975	0.98732	0.65
0.70	1	0.99985	0.99940	0.99886	0.99764	0.99633	0.99473	0.99285	0.99068	0.98820	0.98541	0.70
0.75	1	0.99983	0.99931	0.99847	0.99730	0.99581	0.99399	0.99185	0.98938	0.98656	0.98338	0.75
0.80	1	0.99980	0.99922	0.99827	0.99695	0.99526	0.99322	0.99080	0.98801	0.98483	0.98124	0.80
0.85	1	0.99978	0.99912	0.99805	0.99657	0.99469	0.99240	0.98970	0.98658	0.98302	0.97901	0.85
0.90	1	0.99975	0.99902	0.99783	0.99618	0.99409	0.99155	0.98855	0.98509	0.98114	0.97668	0.90
0.95	1	0.99972	0.99891	0.99759	0.99577	0.99346	0.99066	0.98736	0.98354	0.97919	0.97428	0.95
1.00	1	0.99969	0.99880	0.99735	0.99535	0.99282	0.98974	0.98612	0.98194	0.97718	0.97180	1.00
α	$\rho^2 = 0.50$	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1.00	ρ^2
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0.05	0.99992	0.99991	0.99989	0.99987	0.99985	0.99982	0.99980	0.99977	0.99975	0.99972	0.99969	0.05
0.10	0.99969	0.99962	0.99955	0.99947	0.99939	0.99930	0.99920	0.99910	0.99899	0.99887	0.99875	0.10
0.15	0.99930	0.99915	0.99899	0.99881	0.99862	0.99842	0.99820	0.99797	0.99772	0.99746	0.99718	0.15
0.20	0.99875	0.99849	0.99821	0.99789	0.99755	0.99719	0.99680	0.99638	0.99594	0.99547	0.99498	0.20
0.25	0.99806	0.99765	0.99720	0.99671	0.99618	0.99561	0.99500	0.99435	0.99365	0.99291	0.99212	0.25
0.30	0.99721	0.99662	0.99598	0.99527	0.99451	0.99369	0.99280	0.99186	0.99084	0.98976	0.98862	0.30
0.35	0.99622	0.99542	0.99454	0.99358	0.99254	0.99142	0.99020	0.98890	0.98751	0.98603	0.98444	0.35
0.40	0.99508	0.99404	0.99289	0.99164	0.99028	0.98880	0.98721	0.98550	0.98366	0.98169	0.97958	0.40
0.45	0.99379	0.99248	0.99103	0.98945	0.98772	0.98584	0.98382	0.98163	0.97927	0.97673	0.97400	0.45
0.50	0.99237	0.99076	0.98897	0.98702	0.98488	0.98256	0.98003	0.97730	0.97434	0.97115	0.96769	0.50
0.55	0.99082	0.98887	0.98672	0.98435	0.98176	0.97894	0.97586	0.97252	0.96888	0.96492	0.96060	0.55
0.60	0.98913	0.98683	0.98427	0.98146	0.97837	0.97499	0.97130	0.96727	0.96286	0.95803	0.95270	0.60
0.65	0.98732	0.98464	0.98164	0.97835	0.97472	0.97074	0.96637	0.96157	0.95629	0.95045	0.94394	0.65
0.70	0.98541	0.98230	0.97884	0.97503	0.97082	0.96618	0.96107	0.95543	0.94917	0.94217	0.93426	0.70
0.75	0.98338	0.97983	0.97588	0.97151	0.96668	0.96132	0.95542	0.94885	0.94150	0.93318	0.92356	0.75
0.80	0.98124	0.97723	0.97276	0.96781	0.96231	0.95622	0.94944	0.94185	0.93329	0.92344	0.91176	0.80
0.85	0.97901	0.97452	0.96951	0.96393	0.95774	0.95085	0.94314	0.93444	0.92456	0.91296	0.89870	0.85
0.90	0.97668	0.97169	0.96612	0.95990	0.95298	0.94524	0.93655	0.92666	0.91531	0.90175	0.88418	0.90
0.95	0.97428	0.96877	0.96261	0.95573	0.94805	0.93944	0.92971	0.91859	0.90561	0.88982	0.86783	0.95
1.00	0.97180	0.96576	0.95900	0.95144	0.94298	0.93345	0.92264	0.91020	0.89552	0.87727	0.84833	1.00

$B_n(\alpha, \rho^2)$ Table 수식화

$$\begin{aligned}
& \delta(0, g) \\
& + (0.9999 + 0.0023h^2 - 0.0368h^3 - 0.0160h^4 + 3.0585h^5 - 18.9347h^6 + 1.4085h^7 + 498.1069h^8 - 2873.5665h^9 + 8855.9202h^{10} \\
& - 17614.3580h^{11} + 23925.1361h^{12} - 22496.1797h^{13} + 14441.2031h^{14} - 6048.3487h^{15} + 1490.5802h^{16} - 163.9758h^{17})\delta(1, g) \\
& + (0.9999 - 0.0005h + 0.0343h^2 - 0.7934h^3 + 9.4396h^4 - 70.0921h^5 + 349.8473h^6 - 1218.3472h^7 + 3012.6266h^8 - 5310.4900h^9 + 6615.8188h^{10} - 5682.9049h^{11} + 3198.8136h^{12} - 1061.1050h^{13} + 157.1519h^{14})\delta(2, g) \\
& + (1.0000 + 0.0015h - 0.0855h^2 + 1.6562h^3 - 17.4394h^4 + 111.5443h^5 - 467.3590h^6 + 1337.4269h^7 - 2668.5600h^8 + 3728.5073h^9 - 3604.6234h^{10} + 2333.6456h^{11} - 946.2870h^{12} + 209.0880h^{13} - 17.5181h^{14})\delta(3, g) \\
& + (1.0000 - 0.0006h + 0.0409h^2 - 1.1434h^3 + 14.9233h^4 - 117.8072h^5 + 607.1412h^6 - 2135.9252h^7 + 5258.5439h^8 - 9148.7455h^9 + 11195.6764h^{10} - 9425.9871h^{11} + 5197.1891h^{12} - 1689.2438h^{13} + 245.3333h^{14})\delta(4, g) \\
& + (0.9999 - 0.0018h + 0.0904h^2 - 2.0133h^3 + 21.9751h^4 - 146.0801h^5 + 637.4585h^6 - 1908.3036h^7 + 4015.7059h^8 - 5995.1501h^9 + 6317.1839h^{10} - 4593.5158h^{11} + 2193.3287h^{12} - 618.9067h^{13} + 78.2216h^{14})\delta(5, g) \\
& + (1.0000 - 0.0001h - 0.0104h^2 + 0.0523h^3 - 0.6505h^4 + 1.1311h^5 + 22.8265h^6 - 188.0905h^7 + 719.5257h^8 - 1661.6552h^9 + 2481.0845h^{10} - 2419.5820h^{11} + 1492.3763h^{12} - 529.4520h^{13} + 82.4339h^{14})\delta(6, g) \\
& + (1.0000 + 0.0012h - 0.0948h^2 + 1.8862h^3 - 23.6002h^4 + 179.5840h^5 - 898.1632h^6 + 3088.4034h^7 - 7481.6979h^8 + 12882.3497h^9 - 15676.2454h^{10} + 13173.3620h^{11} - 7270.2290h^{12} + 2370.271h^{13} - 345.7971h^{14})\delta(7, g) \\
& + (1.0000 + 0.0006h - 0.0582h^2 + 0.8785h^3 - 10.8582h^4 + 81.5864h^5 - 399.2568h^6 + 1328.8073h^7 - 3084.3918h^8 + 5045.5288h^9 - 5793.3341h^{10} + 4569.1932h^{11} - 2356.9884h^{12} + 715.9527h^{13} - 97.0783h^{14})\delta(8, g) \\
& + (0.9999 - 0.0005h + 0.0053h^2 - 0.5715h^3 + 5.3446h^4 - 29.2328h^5 + 100.8210h^6 - 226.2362h^7 + 329.8839h^8 - 298.2325h^9 + 140.1572h^{10} - 1.7413h^{11} - 32.2155h^{12} + 13.5703h^{13} - 1.5746h^{14})\delta(9, g) \\
& + (0.9999 + 0.0019h - 0.1424h^2 + 2.5135h^3 - 30.2012h^4 + 221.0260h^5 - 1061.9050h^6 + 3500.9713h^7 - 8116.6723h^8 + 13356.8136h^9 - 15522.6933h^{10} + 12457.1116h^{11} - 6569.1464h^{12} + 2048.6086h^{13} - 286.3141h^{14})\delta(10, g)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (1.0000 + 0.0012h - 0.0870h^2 + 0.8388h^3 - 8.2207h^4 + 52.7847h^5 - 237.3529h^6 + 774.0495h^7 - 1853.4872h^8 + 3247.4898h^9 - 4095.4992h^{10} + 3603.0198h^{11} - 2091.0403h^{12} + 717.4992h^{13} - 110.0300h^{14})\delta(11, g) \\
& + (0.9999 + 0.0014h - 0.1128h^2 + 1.2508h^3 - 12.6439h^4 + 79.6753h^5 - 334.6433h^6 + 973.5156h^7 - 2001.2830h^8 + 2925.1471h^9 - 3017.3644h^{10} + 2143.5737h^{11} - 996.1608h^{12} + 271.9925h^{13} - 32.9893h^{14})\delta(12, g) \\
& + (1.0000 - 0.0012h + 0.0198h^2 - 1.6543h^3 + 19.8854h^4 - 145.3816h^5 + 698.0809h^6 - 2300.2919h^7 + 5329.7263h^8 - 8764.4177h^9 + 10178.3603h^{10} - 8163.0311h^{11} + 4302.4699h^{12} - 1341.1989h^{13} + 187.3855h^{14})\delta(13, g) \\
& + (0.9999 - 0.0003h - 0.0407h^2 - 0.3868h^3 + 3.6163h^4 - 19.8629h^5 + 69.2508h^6 - 156.2259h^7 + 219.8462h^8 - 159.1207h^9 - 20.2721h^{10} + 159.5627h^{11} - 149.3628h^{12} + 63.8833h^{13} - 10.9439h^{14})\delta(14, g) \\
& + (0.9999 + 0.0021h - 0.1996h^2 + 3.0271h^3 - 37.3713h^4 + 280.5052h^5 - 1383.0440h^6 + 4686.3997h^7 - 11187.8338h^8 + 18995.5189h^9 - 22819.8991h^{10} + 18961.2266h^{11} - 10365.8239h^{12} + 3353.9586h^{13} - 486.5330h^{14})\delta(15, g) \\
& + (1.0000 - 0.0014h - 0.0038h^2 - 1.6066h^3 + 18.3638h^4 - 129.2903h^5 + 600.9732h^6 - 1920.6713h^7 + 4316.2003h^8 - 6876.1976h^9 + 7721.4108h^{10} - 5972.8981h^{11} + 3027.6189h^{12} - 904.7127h^{13} + 120.7377h^{14})\delta(16, g) \\
& + (1.0000 + 0.0001h - 0.1190h^2 + 0.9704h^3 - 14.4324h^4 + 121.0546h^5 - 641.3064h^6 + 2279.3178h^7 - 5616.9293h^8 + 9735.3853h^9 - 11845.1102h^{10} + 9913.1578h^{11} - 5438.0257h^{12} + 1761.3979h^{13} - 255.4505h^{14})\delta(17, g) \\
& + (0.9999 - 0.0002h - 0.0822h^2 - 0.3904h^3 + 4.0679h^4 - 25.2027h^5 + 98.4344h^6 - 245.5769h^7 + 371.9738h^8 - 259.7382h^9 - 141.3520h^{10} + 495.7369h^{11} - 476.1824h^{12} + 219.1491h^{13} - 40.9414h^{14})\delta(18, g) \\
& + (1.0000 + 0.0204h - 1.3409h^2 + 30.9381h^3 - 442.7978h^4 + 4084.2176h^5 - 25992.1038h^6 + 118913.4520h^7 - 401238.2218h^8 + 1013900h^9 - 1933000h^{10} + 2780800h^{11} - 2995700h^{12} + 2375000h^{13} - 1342400h^{14} + 511077.3972h^{15} - 117231.3005h^{16} + 12216.1745h^{17})\delta(19, g) \\
& + (0.9999 + 0.0014h - 0.1976h^2 + 1.4926h^3 - 17.2216h^4 + 125.8855h^5 - 623.5885h^6 + 2165.4104h^7 - 5361.5041h^8 + 9502.0876h^9 - 11948.9324h^{10} + 10399.4626h^{11} - 5951.9354h^{12} + 2014.1373h^{13} - 305.2495h^{14})\delta(20, g)
\end{aligned}$$

참 고 문 헌

- [1] Andre Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, J. D. Joannopoulos, Peter Fisher, and Marin Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances", *Science*, vol. 317, Jul. 2007.
- [2] 강승열, 김용해, "무선 에너지 전송 기술", 전자통신동향분석, 23(6), pp. 59-69, 2008년 12월.
- [3] 김진욱, 지현호, "자기 공명 무선 전력 전송 시스템에서 공진 코일의 배열에 관한 연구", 한국전자과학회논문지, 21(6), pp. 564-572, 2010년 6월.
- [4] Frederick W. Grover, *Inductance Calculations Working Formulas and Tables*, D, van Nostrand, pp. 114-141, 1946.
- [5] 박영진, "자기 공명 방식의 기초", 무선 전력 전송 기술동향, 한국과학기술원 전자부품·재료설계인력교육센터, 워크샵, pp. 59-90, 2010년 8월.

장 주 엽

2010년 2월: 대림대학교 정보통신공학과 (공학사)
 2010년 3월~현재: 건국대학교 전자공학과 (공학석사)
 [주 관심분야] 무선 전력 전송

김 용 남

1994년 2월: 경원대학교 전자공학과 (공학사)
 1996년 2월: 건국대학교 전자공학과 (공학석사)
 [주 관심분야] 안테나, 무선 전력 전송

허 정

1981년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1983년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1991년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
 현재: 건국대학교 전자정보통신공학과 교수

[주 관심분야] 안테나, 무선 전력 전송