

# Triaxial Method의 구조적 특성을 고려한 단일 편조 RF 케이블의 차폐 모델에 대한 연구

## Shielding Model of Single-Braided RF Cable Considering Structural Characteristics of Triaxial Method

양지현 · 박현호\* · 김지성\*\* · 나완수

Jihyun Yang · Hyun Ho Park\* · Jiseong Kim\*\* · Wansoo Nah

### 요 약

RF 케이블은 전기 자동차, 항공 우주, 방위 산업 분야에서 케이블 어셈블리로서 다양하게 사용되고 있다. 많은 EMC 테스트 결과 복사성 방출(RE, radiated emission) 문제가 주로 상호 연결된 전원 케이블과 케이블 커넥터에 집중되는 것으로 나타났고, 케이블 차폐의 정도를 판단할 수 있는 매개변수인 전달 임피던스의 측정이 중요해지고 있다. 전달 임피던스를 측정하는 Triaxial 방법으로는 유럽 전기 표준화 위원회(CENELEC, European Committee For Electrotechnical Standardization)에서 규정한 EN 50289와 전기 기술 위원회(IEC, International Electrotechnical Commission)에서 규정한 IEC 62153이 있다. 그러나 Triaxial 방법으로 측정한 전달 임피던스 결과와 이론 수식이 주파수 영역에 대해서 완전히 일치하지 않는 문제점이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 Triaxial 방법의 종단 조건, 셋업, 그리고 등가 회로를 제시 후 RF RG402 단일 편조 케이블을 대상으로 측정과 이론 수식을 비교하고자 한다. 그리고 Triaxial 방법의 구조적 특성을 고려하여 수정된 이론적 수식 해석 결과가 측정과의 정합성이 더 좋은 것을 오차를 통해 확인하였다.

### Abstract

Radiofrequency (RF) cables are widely used in the automotive, aerospace, and defense industries as cable assemblies. Several electromagnetic compatibility (EMC) tests have shown that the issue of radiated emissions (RE) primarily affects interconnected power cables and cable connectors. Consequently, measuring transfer impedance, a parameter that indicates the effectiveness of cable shielding, has become increasingly important. The triaxial method for measuring transfer impedance is defined by the European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC) under EN 50289 and by the International Electrotechnical Commission (IEC) under IEC 62153. However, discrepancies have been noted between the transfer impedance results measured using the triaxial method and the theoretical calculations. Therefore, this paper presents the termination conditions, setup, and equivalent circuit of the triaxial method. Further, the measurements are compared with theoretical calculations by using an RF RG402 single-braided cable. Moreover, an error analysis reveals that a modified theoretical formula, which considers the structural characteristics of the triaxial method, better conforms with the measurements.

Key words: Transfer Impedance, Single Braided Shielded Cable, Triaxial Method, VNA, EMI

「이 연구는 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2023R1A2C2008116).」

성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

\*수원대학교 전기전자공학부(School of Electric & Electronic Engineering, The University of Suwon)

\*\*한국과학기술원 조천식모빌리티대학원(CCS Graduate School of Mobility, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

· Manuscript received July 15, 2024 ; Revised July 24, 2024 ; Accepted September 6, 2024. (ID No. 20240715-068)

· Corresponding Author: Wansoo Nah (e-mail: wsnah@skku.edu)

## I. 서 론

RF 케이블은 전기 자동차, 항공 우주, 방위 산업 분야에서 케이블 어셈블리로서 다양하게 사용되고 있다. 이는 고전압, 고출력 시스템에 사용되고 필연적으로 전자기 간섭(EMI)을 발생시켜 전자파 적합 테스트(EMC)에 민감한 결과를 초래한다. 유럽 전기 표준화 위원회(CENELEC, European Committee For Electrotechnical Standardization)에서 규정한 EN55022/032, MIL-STD-461G 그리고 기타 관련 표준의 복사 방출(radiation emission) 임계값을 초과하는 것이 주로 상호 연결된 전원 케이블과 케이블의 커넥터에 집중되어 있다고 나타났다. 따라서 케이블의 차폐 정도를 판단하는 매개변수인 전달 임피던스의 측정이 중요해지고 있다<sup>[1]~[3]</sup>.

케이블의 전달 임피던스를 측정할 수 있는 Triaxial 방법의 표준으로는 유럽 전기 표준화 위원회에서 규정한 EN 50289와 전기 기술 위원회(IEC, International Electrotechnical Commission)에서 규정한 IEC 62153가 있다<sup>[4],[5]</sup>.

Triaxial 방법을 사용하기 위해서는 외부 튜브로 사용되는 구리 파이프를 사용해야하여 무겁고, 케이블의 크기와 테스트 구조를 재구성하는 것이 필요하다는 단점이 존재한다. 셋업을 재현하여 측정하더라도 Triaxial 방법의 구조적 특성을 고려하지 않았기 때문에 Demoulin의 전달 임피던스 이론 수식과 비교하는 것은 적절하지 않다.

따라서 본 논문에서는 Triaxial 방법의 구조적 특성을 고려하여 수정된 Demoulin 이론 수식을 제안하고자 한다. II 장에서는 제작한 Triaxial 구조 및 회로도를 제시하여 측정되는 S 파라미터를 이용해 유도된 전달 임피던스 수식을 기술한다. III 장에서는 Demoulin 전달 임피던스 이론 수식을 이루고 있는 각 항을 케이블의 등가 회로를 통해 설명하고, 주파수에 따른 각 항의 지배적인 구간을 설명한다. 그리고 Triaxial 방법으로 측정 시 쉴드와 외부 튜브가 맞닿아 있는 구조적 특성을 고려하여 수정된 Demoulin 이론 수식 및 등가 회로를 제안하고자 한다. IV 장에서는 II 장에서 제작한 Triaxial을 통해 측정된 전달 임피던스와 III 장의 Demoulin 이론 수식, 그리고 수정된 Demoulin 이론 수식을 비교한다. 오차를 통해 Triaxial 방법의 구조적 특성을 고려하여 수정된 이론 수식 해석 결

과가 측정과의 정합성이 더 좋은 것을 확인하고자 한다.

## II. 전달 임피던스 측정 방법

### 2-1 단위 길이당 전달 임피던스

케이블의 단위 길이당 전달 임피던스는 표면 전달 임피던스로 알려져 있으며, 전기적으로 커플링 되는 짧은 길이  $L_c$ 의 케이블의 경우 공급 전류  $I_1$ 을 쉴드층에 흘려주었을 때 케이블 쉴드 기준 외부 도체로 전압  $V_2$ 가 유도된다. 이때 유도된 전압을 단위 길이당 케이블 쉴드층에 흐르는 전류로 나눈 값을 의미한다. 수식은 식 (1)과 같고, 수식에 대한 케이블의 구조는 그림 1과 같다.

$$Z_T = \frac{V_2}{I_1 \times L_c} \quad (1)$$

전압, 전류비로 구한 단위 길이당 전달 임피던스로 케이블의 차폐 정도를 판단할 수 있다. 케이블 쉴드층에 흐르는 전류는 공급 전류로 일정하며, 외부 도체로 유도되는 전압이 작을수록 단위 길이당 전달 임피던스가 작아진다. 이는 케이블의 차폐가 잘 되고 있다는 것으로 해석할 수 있다.

#### 2-1-1 Triaxial 방법의 등가 회로

Triaxial 방법은 케이블의 중심 도체, 쉴드, 외부 튜브로 이루어져 있고, 전체 모양이 케이블을 포함한 케이블의

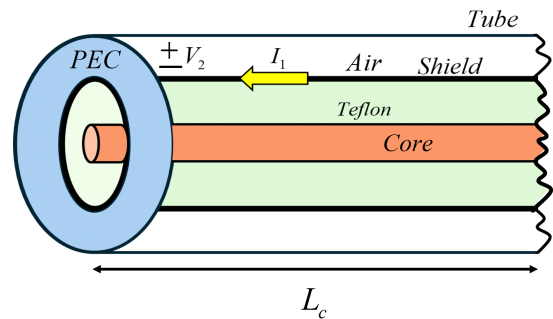


그림 1. 단일 편조 케이블을 포함한 triaxial 케이블의 구조  
Fig. 1. Structure of triaxial cable including single braided cable.

형태와 모양이 비슷하여 삼축 방법이라고 부르며 케이블의 쉘드층과 측정 장치의 외부 도체 사이에 페루프를 형성시켜 전달 임피던스를 측정하는 방법이다. EN 50289와 IEC 62153은 공통적으로 Triaxial 방법을 이용하지만 EN 50289는 케이블 내부에 전류를 흘려주어 외부 도체로 유도되는 전압을 측정하는 방식이고, IEC 62153은 케이블 쉘드를 기준으로 내부 도체로 유도되는 전압을 측정하여 전달 임피던스를 구하는 방식의 차이가 존재한다. EN 50289와 IEC 62153은 전류 소스의 위치 차이가 반대인 것으로 정리할 수 있다. 그리고 IEC 62153의 경우 외부 튜브 구조의 특성 임피던스를 고려해야 하지만 EN 50289의 경우 외부 도체의 크기에 상관없이 설계/제작이 가능하다.

본 연구에서는 EN 50289를 기반으로 케이블의 전달 임피던스를 측정하는 장치를 설계/제작하였다. 사용한 RF 케이블은 RG 402이고, 측정 장치는 그림 2와 같다. EN 50289 규격에서 커플링 되는 단위 길이당 전달 임피던스를 집중 소자로 표현하기 위해 결합 길이를 파장의 1/10 정도로 작게 하였다. 이에 따라 파장과 주파수의 관계에 의해 최대 주파수 100 MHz에 대한 측정 결합 길이는 0.3 m이다. 그림 2의 측정 구성도는 참고문헌 [6]을 참고하여 재구성하였다. Triaxial 방법의 전달 임피던스를 구하기 위해 측정 구성의 등가 회로는 그림 3으로 표현할 수 있으며, 사용된 변수에 대한 설명은 아래와 같다. 변수 표기에서 N(near)과 F(far)는 측정 포인트를 기준으로 산정하였다.

$V_{1N}$ : 내부 회로의 입력전압

$V_{2N}$ : 케이블 쉘드를 기준으로 외부 도체로 유도되는 전압

$R_{1F}$ : 내부 회로의 종단 저항

$R_{2F}$ : 외부 회로의 로드 저항

$R_{1N}, R_{2N}$ : 회로망 분배기 내부 저항 50  $\Omega$

그림 3(a)는 테스트 셋업의 등가 회로이고, 그림 3(b)는 재구성된 등가 회로로 그림 3(a)와 구성은 같지만 간단하게 전압원  $V_{2F}$ 를 통해 단위 길이당 전달 임피던스 수식을 유도할 수 있다. 해당 수식은 내부 회로와 외부 회로에서 사용한 변수들의 간단한 회로 수식과 그림 4를 통해 측정되는  $S$  파라미터를 포함하여 식 (2), 식 (3) 및 식 (4)를 얻을 수 있다<sup>[6]</sup>.

$$V_{2F} = \frac{R_{2N} + R_{2F}}{R_{2N}} V_{2N} \quad (2)$$

$$I_1 = \frac{V_{1N}}{R_{1F}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Z_T &= \frac{V_{2F}}{I_1 L_c} = \frac{\frac{R_{2N} + R_{2F}}{R_{2N}} V_{2N}}{\frac{V_{1N}}{R_{1F}} L_c} \\ &= \frac{R_{1F}(R_{2N} + R_{2F})}{R_{2N} L_c} \frac{V_{2N}}{V_{1N}} \\ &= \frac{R_{1F}(R_{2N} + R_{2F})}{R_{2N} L_c} 10^{\left[ \frac{S_{21}(dB)}{20} \right]} \end{aligned} \quad (4)$$

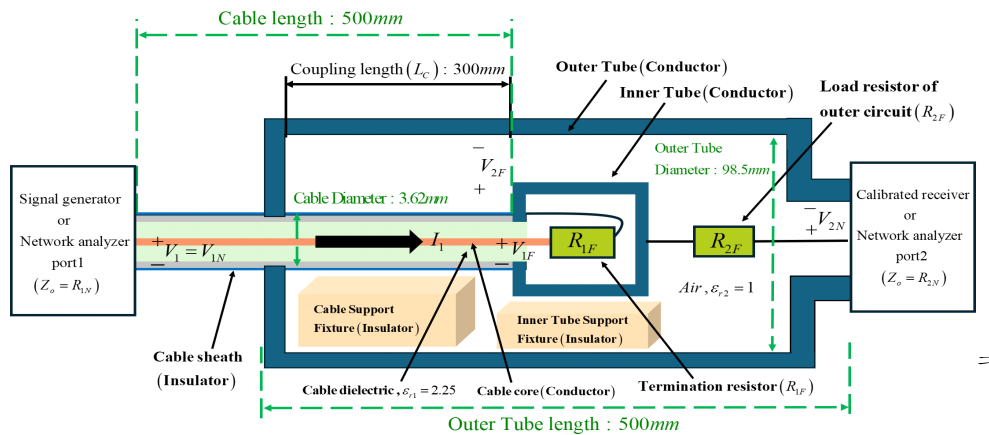
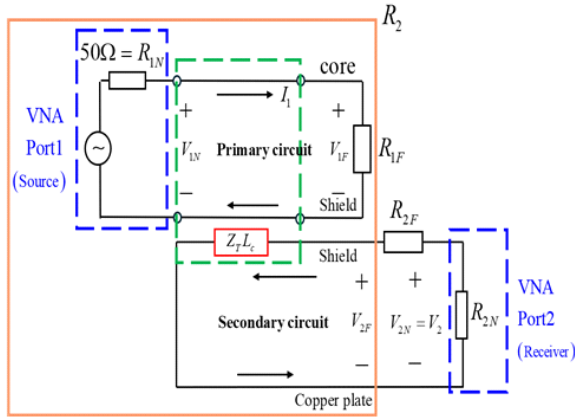
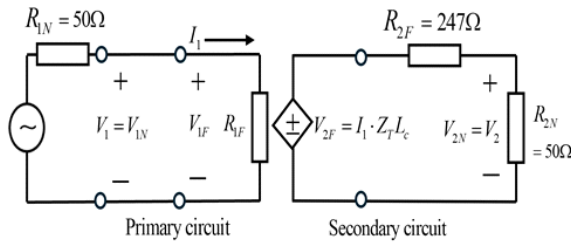


그림 2. Triaxial 방법의 구조

Fig. 2. Structure of triaxial method.



(a) 각 변수로 세분화한 Triaxial 방법의 등가 회로  
(a) Equivalent circuit of Triaxial method subdivided into each parameter



(b) 재구성한 등가 회로  
(b) Restructured equivalent circuit

그림 3. Triaxial 방법의 등가 회로  
Fig. 3. Equivalent circuit of triaxial method.

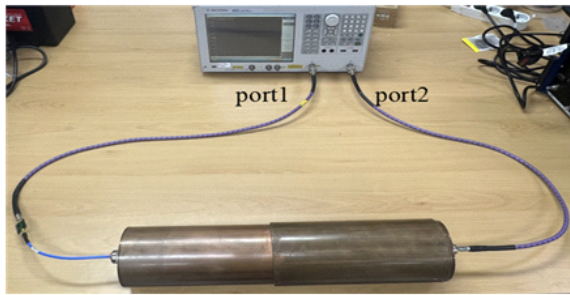


그림 4. Triaxial 방법의 측정 셋업  
Fig. 4. Measurement setup of triaxial method.

측정 전압  $V_1 = V_1^+(\text{입사}) + V_1^-(\text{반사})$ 로 정의되고, 포트 1에서 회로를 바라본 입력 임피던스는 50 Ω으로 정합되어 있어 포트 1에서  $V_1^- = 0$ 으로  $V_1 = V_1^+$ 으로 수 있다.

따라서 전달 임피던스는  $S$  파라미터를 사용하여 계산할 수 있다.

## 2-1-2 Triaxial 방법 구성도의 변수값

광대역으로 사용 가능한 일반 케이블의 경우 내부 중단 저항  $R_{1F}$ 는 50 Ω이지만, 전력용 케이블의 경우 참고 문헌 [4] 및 참고문헌 [5]와 같이 식 (5)으로 측정을 통해 구할 수 있다.

$$R_{1F} = \sqrt{Z_{open} \times Z_{short}} \quad (5)$$

케이블과 외부 도체의 로드 저항  $R_{2F}$ 은 참고문헌 [6]과 같이 식 (6) 및 식 (7)로 구할 수 있다.

$$R_2 = 1.4 \times 60 \ln \left( \frac{d_o}{d_s} \right) \quad (6)$$

$$R_{2F} = R_2 - 50 \quad (7)$$

Triaxial 방법 구성도의 변수값은 표 1과 같이 정리할 수 있다.

## Ⅲ. 전달 임피던스 이론 수식

전달 임피던스는 케이블의 구조에서 파생되며 차폐 전류, 외부 자기파, 케이블 내부에서 전파되는 TEM파 (transverse electromagnetic wave) 사이의 결합으로 유도성 결합이다. 따라서 Demoulin의 전달 임피던스 수식은 저항과 인덕터로 구성되며, 표 2의 사용된 케이블의 변수값들

표 1. Triaxial 방법 구성도의 변수값  
Table 1. Parameters of the Triaxial method.

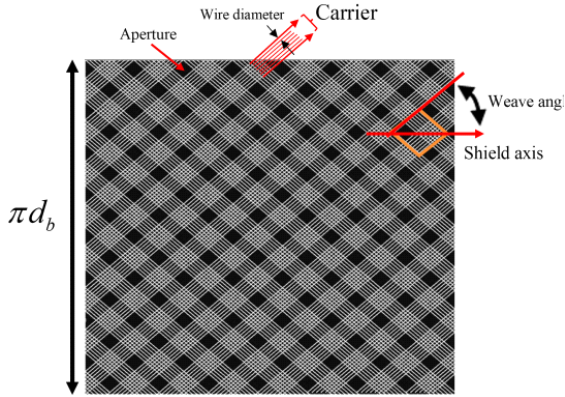
Geometrical parameter	Symbol	Value
Diameter of cable shield	$d_s$	3.62 mm
Diameter of outer tube	$d_o$	98.5 mm
Termination resistor	$R_{1F}$	50 Ω
Load resistor of shield	$R_{2F}$	247 Ω
Cable length	$L$	0.5 m
Coupling length	$L_c$	0.3 m

표 2. RF 케이블의 구성 요소

Table 2. Parameters of RF cable.

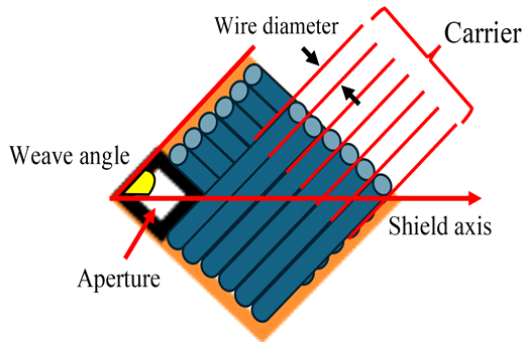
Geometrical parameter	Symbol	Value
Number of carriers	$C$	16
Number of wires in each carrier	$N$	6
Wire diameter	$d$	0.1 mm
Diameter under the braid	$d_b$	2.95 mm
Weave angle	$\alpha$	40°
Conductivity	$\sigma$	$5.8 \times 10^7$ S/m

로 임피던스와 인덕턴스가 계산된다. 그림 5는 사용한 케이블의 편조선 단면으로 그림 5(a)는 사용한 케이블 편조선의 짜임 변수이고, 그림 5(b)는 확대된 케이블 편조선의



(a) 케이블 편조선의 짜임 변수

(a) Weave parameters of the braided shield



(b) 확대된 케이블 편조선의 짜임 변수

(b) Enlarged weave parameters of the braided shield

그림 5. RF RG402 케이블의 편조선 단면

Fig. 5. Cross-section of the braided shield of the RF RG 402 cable.

짜임 변수이다. 표 2는 그림 5의 변수값을 정리한 표이다.

### 3-1 Demoulin의 모델

참고문헌 [7] 및 참고문헌 [8]에 따르면 Demoulin의 전달 임피던스 수식은 네 가지 항으로 식 (8)과 같이 구성되어 있고, 이론 수식에 대한 케이블의 회로도에는 그림 6과 같다.

$$Z_{T, Demoulin} = Z_{diffusion} + j\omega(L_{hole} + L_{braid}) + k\sqrt{\omega}e^{j\frac{\pi}{4}} \quad (8)$$

주파수에 따라 각 항의 지배적인 영역이 다르기에 10 ~1 GHz까지의 전달 임피던스 크기의 그래프로 세 가지 영역으로 나누어 분석을 진행하였으며 그림 7과 같다. 영역 A는  $Z_{diffusion}$  수식에 의해  $R_{dc}$ 와 표면 효과를 고려한  $Z_{diffusion}$  두 부분으로 나뉘어진다. 먼저 200 kHz 전까지는 저주파로 전류 밀도가 고르게 분포하기 때문에 쉴드의 DC 저항값으로 존재한다. 200 kHz~1 MHz는 표면 효과

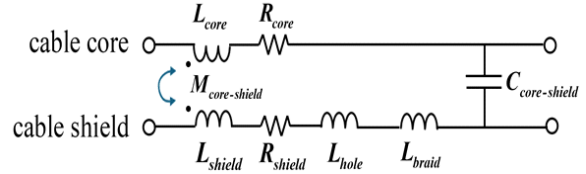


그림 6. 케이블의 단위 길이당 등가 회로

Fig. 6. Equivalent circuit per unit length of the cable.

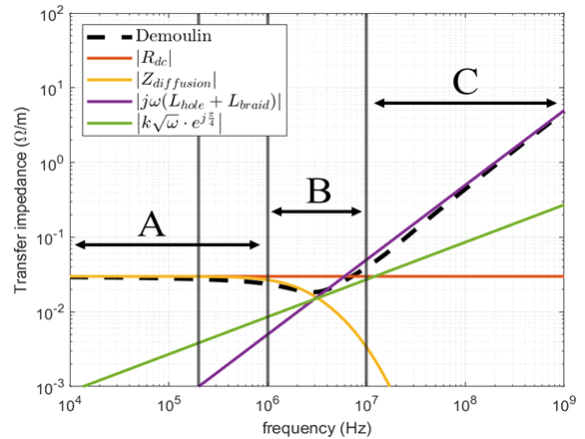


그림 7. Demoulin 이론 수식 모델 구성 요소

Fig. 7. Components of Demoulin equation model.



과의 영향으로 주파수가 증가할수록 전달 임피던스가 감소하는 경향을 가진다. 영역 *B*의 주파수 대역인 1 MHz~10 MHz는 쉴드의 와전류 효과로 인해 생기는 Demoulin이 제시한 추가항의 효과가 포함되어 있다.  $\sqrt{\omega}$ 에 비례하는 추가항과 나머지 세 개의 항으로 인해 변곡점이 만들어져 전달 임피던스가 증가하기 시작한다. 영역 *C*의 주파수 대역인 10 MHz 이후는 hole 인덕턴스와 braid 인덕턴스가 지배적이다.

$$\begin{aligned} \text{Region A } (\sim 1 \text{ MHz}) : & |Z_{diffusion}| \\ \text{Region B } (1 \sim 10 \text{ MHz}) : & \left| Z_{diffusion} + j\omega(L_{hole} + L_{braid}) + k\sqrt{\omega}e^{j\frac{\pi}{4}} \right| \\ \text{Region C } (10 \text{ MHz} \sim) : & |j\omega(L_{hole} + L_{braid})| \end{aligned}$$

### 3-2 구조적 특성이 고려되어 수정된 Demoulin의 모델

기존의 Demoulin 이론 모델은 케이블 자체의 전달 임피던스에 대한 수식이며 측정 시 사용되는 외부 튜브가 고려되지 않았다. 그리고 Triaxial 방법으로 케이블의 전달 임피던스를 측정 시 정확한 측정을 위해서는 쉴드와 외부 튜브가 빈틈없이 맞닿아 있어야 한다. 이를 다시 해석하면 쉴드와 외부 튜브가 맞닿은 부분은 전위차가 존재하는 하나의 접지로 볼 수 있고, 전체적인 형상은 쉴드 위에 구리로 된 접지가 둘러 쌓여있는 형상이다. 쉴드는 변수값 *C*인 캐리어가 두 개 교차되어 케이블의 유전체를 나선형 방향으로 감싸는데, 이때 교차된 캐리어들로 인해 아주 작은 다이아몬드 hole이 생성된다. 이 hole을 통해 자기장이 침투되면서 생기는 효과가  $L_{hole}$  인데, 쉴드 위에 구리 접지로 빈틈없이 붙어있으므로 hole로 침투되는 자기장의 영향력은 없다고 볼 수 있다. 그리고  $L_{braid}$  항의 경우 쉴드가 케이블 길이에 걸쳐 외부 튜브 내 노출되어 있으므로 무시할 수 없을 것이다. 따라서 구조적 특성의 영향을 많이 받는다고 추측한  $L_{hole}$  항의 영향을 제외한 단위 길이당 Demoulin의 이론 수식의 수치 해석 결과는 영역 *B*와 *C*에서 변화가 생길 것이며,  $L_{hole}$ 의 영향보다  $L_{braid}$ 의 영향이 더 크다면  $L_{braid}$  항이 지배적인 영역 *C*가 다른 항의 간섭을 받는 영역 *B*보다 변동이 적은 것으로 예상된다. 참고문헌 [9]에 의하면  $\alpha$ 가  $45^\circ$  이하일 때, 20 k~10 MHz에서 침투하는 자기장의 영향력이 매우 작아 무시할 수 있다고 되어있으며, 일반적인 RF 케이블의 경

우 가장 이상적인 각도가  $45^\circ$ 이며,  $45^\circ$  이하의 각도로 제작되므로  $L_{hole}$ 의 영향을 무시할 수 있다.

그림 8은 단위 길이당 Demoulin의 전달 임피던스 이론 수식과  $j\omega L_{hole}$  항을 제외한 이론 수식의 수치 해석 결과이다. 검은색 점선이 Demoulin 이론 수식이고, 파란색 실선이 Demoulin 이론 수식에서  $j\omega L_{hole}$  항을 제외한 수식이다. 두 수식은  $L_{hole}$  항이 포함된 영역 *B*와 *C*에서 차이가 나고, 오차는 각 영역의 주파수 포인트에 대한 평균값을 구하여 Demoulin 이론 수식을 기준으로 표 3과 같이 정리하였다. 영역 *B*에서 약 60.9 %의 차이가 발생하였고, 영역 *C*에서 12.2 %의 차이가 발생하였다. 예측한대로 영역 *C*가 *B*보다 변동이 적은 것을 확인할 수 있다.

구리 접지에 해당하는 형상은 그림 9와 같고, 표 1의 변수값인 커플링 되는 길이  $L_C$ , 쉴드의 직경  $d_S$ , 그리고 측정에 사용된 외부 튜브의 두께 0.2 mm를 사용하여 ANSYS Q3D를 통해 4 mΩ에 해당하는  $R_{tube}$  값을 추출하였다. 이때 주파수 범위는 10~1 GHz까지 100 포인트에 대하여 인터플레이팅을 진행하였다. 수정된 모델은  $j\omega L_{hole}$ 의 항이 제거되고  $R_{tube}$  항이 추가되어 Triaxial 방법으로 측정 시 구조적 특성이 고려된 케이블의 단위 길이당 전달 임피던스 수식은 식 (9)과 같다.

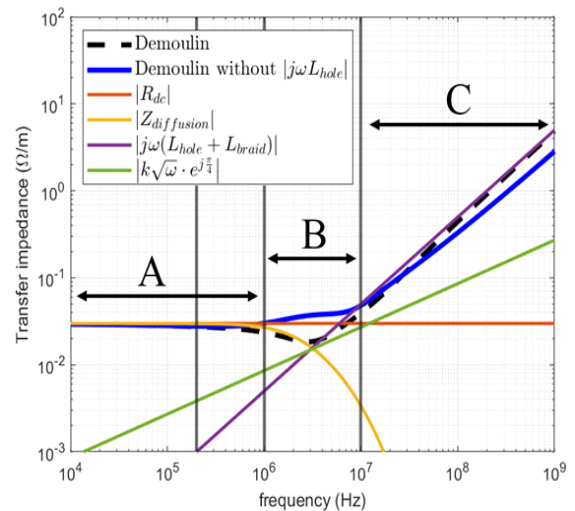


그림 8. Demoulin 이론 수식에서  $L_{hole}$  항을 제외한 결과  
Fig. 8. The result after excluding the  $L_{hole}$  term from the Demoulin equation.

표 3.  $L_{hole}$  항을 제외한 Demoulin 이론 수식, Demoulin 이론 수식, 수정된 이론 수식, Triaxial 방법 측정의 오차 비교Table 3. Comparison of error rates between demoulin theory equation without the  $L_{hole}$  term, demoulin theory equation, revised theory equation, and triaxial method measurement.

	Region A (%)	Region B (%)	Region C (%)
The error between the theoretical value excluding $L_{hole}$ and the theoretical value	0	60.87	12.2
The error between the theoretical value and the measured value	30	34.29	24.24
The error between the revised theoretical value and the measured value	20	2.86	8.33
Error improvement rate	10	31.43	15.91

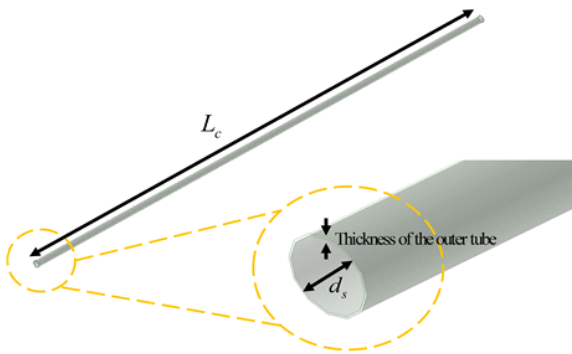


그림 9. 외부 튜브를 Q3D로 모델링한 형상

Fig. 9. Shape of the outer tube modelde in Q3D.

$$Z_{T, revised} = Z_{diffusion} + R_{tube} + j\omega L_{braid} + k\sqrt{\omega} e^{j\frac{\pi}{4}} \quad (9)$$

#### IV. 측정 및 이론 수식 비교

Triaxial 방법의 측정 셋업인 그림 4와 식 (4)를 통해 측정된 Demoulin 이론 수식을 비교한 결과는 그림 10과 같다. 자주색 실선은 Triaxial 방법의 측정값이고, 검은색 점선은 Demoulin의 이론 수식의 수치 해석값, 파란색 실선은 제시한 수정된 Demoulin의 이론 수식의 수치 해석값이다. 전달 임피던스의 값이 매우 작아 각 영역의 주파수 포인트에 대한 평균값을 구하여 측정값을 기준으로 표 3과 같이 오차를 비교하였다. Demoulin 이론 수식은 영역 A는 약 30 %, 영역 B는 34.3 %, 영역 C는 24.2 %의 차이가 존재한다. 수정된 Demoulin 이론 수식은 영역 A는 약 20 %, 영역 B는 2.9 %, 영역 C는 8.3 %로 오차가 감소한다. 따라서 수정된 Demoulin 이론 수식이 전체 영역에서 Triaxial 방법의 구조적 특성이 고려됨을 확인하였다.

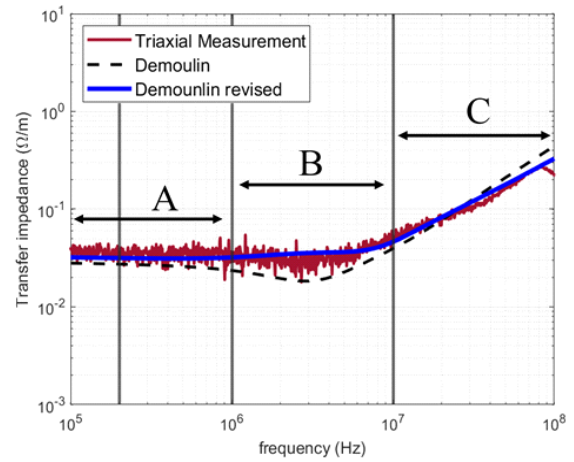


그림 10. Triaxial 방법 측정, Demoulin 이론 수식, 수정된 이론 수식의 단위 길이당 전달 임피던스

Fig. 10. Per unit length transfer impedance results from triaxial method measurement, Demoulin's theory equation, and the revised theory equation.

#### V. 결 론

본 논문은 케이블의 차폐 정도를 판단하는 매개변수인 전달 임피던스가 이론 수식과 측정이 상당 부분 차이가 발생하여 Triaxial 방법의 구조적 특성을 고려하여 이론 수식을 수정하였다. Triaxial 방법을 사용하기 위해 종단 조건, 셋업, 그리고 등가 회로를 제시 후 RF RG402 단일 편조 케이블을 대상으로 전달 임피던스를 측정하였다. Demoulin의 전달 임피던스 이론 수식은 주파수 영역에 대해 분석 후 참고문헌 [9]와 Triaxial의 구조적 특성을 시뮬레이션을 통해 수식을 제한하였다. 그 결과 측정값을 기준으로 수정된 이론적 수식 해석 결과의 오차가 기존의 Demoulin 수식에 비해 영역 A는 약 10 %, 영역 B는

31.4 %, 영역 C는 15.9 % 개선되었다.

결론적으로, 본 논문에서 제시한 수정된 Demoulin의 전달 임피던스 모델은 무겁고 재구성하기 번거로우며 쉘드와 외부 튜브의 접촉이 빈틈없이 이루어져야 하는 Triaxial 방법으로 케이블 전달 임피던스를 측정하지 않고도 수정된 이론 수식 모델을 통해 정확한 전달 임피던스 결과를 예측 가능할 것으로 기대된다.

향후 Triaxial 방법과 비슷한 line injection 및 ground plate 방법에도 하나의 이론 수식으로 비교하는 것은 측정 환경에 대한 구조적 특성을 고려하지 않았기 때문에 측도 수정된 이론 수식 모델을 통해 정확한 전달 임피던스 결과를 예측 가능할 것으로 기대된다.

## References

- [1] A. Mushtaq, "Direct methods to measure transfer impedance of shielded cables at frequencies below 50 MHz," in *2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, Rome, Sep. 2020, pp. 1-6.
- [2] P. Hu, Z. Zhou, J. Li, X. Zhou, M. Sheng, and P. Li, et al., "Measurement techniques for electromagnetic shielding behavior of braided-shield power cables: An overview and comparative study," *Journal of the Institute of Measurement Science Review*, vol. 19, no. 5, pp. 213-221, Oct. 2019.
- [3] H. Kim, T. H. Jang, "Comparison of measurement results on the transfer impedance of a coaxial cable," in *2017 Asia Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility(APEMC)*, Seoul, Jun. 2017, pp. 134-136.
- [4] *Communication Cables-Specification for Test Methods Part 1 ~6 of EN50289 Test Methods of Part 1 ~6 Electromagnetic Performance*, EN 50289-1:-6:2002, Mar. 2002.
- [5] *Metallic communication cable test methods - Part 4-3: Electromagnetic compatibility(EMC) - Surface transfer impedance - Triaxial method*, IEC 62153-4-3:2013, Oct. 2013.
- [6] K. Lee, N. Zhang, J. Jeon, S. Song, and W. Nah, "Shielding effect analysis of communication cables using EN50289 for transfer impedance measurement of coaxial cable," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 25, no. 11, pp. 1156-1163, Nov. 2014.
- [7] A. Mushtaq, S. Frei, K. Siebert, and J. Bärenfänger, "Analysis of shielding effectiveness of HV cable and connector systems used for electric vehicles," in *2013 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Brugge, Sep. 2013, pp. 241-246.
- [8] A. Mushtaq, S. Frei, "Transfer impedance simulation and measurement methods to analyse shielding behaviour of HV cables used in electric-vehicles and hybrid-electric-vehicles," *Advances in Radio Science*, vol. 14, pp. 139-145, Sep. 2016.
- [9] F. M. Tesche, M. Ianoz, and T. Karlsson, *EMC Analysis Methods and Computational Models*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, pp. 468-477, 1996.



양 지 현 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0003-1342-8559>



2023년 2월: 수원대학교 전자공학과 (공학사)  
2023년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정  
[주 관심분야] SI/PI, EMI/EMC

김 지 성 [한국과학기술원/초빙교수]

<https://orcid.org/0000-0001-7333-6427>



1993년 2월: 홍익대학교 전기제어공학과 (공학사)  
1997년 8월: The University of Texas at Austin, Electrical & Computer Engineering (공학석사)  
2000년 8월: The University of Texas at Austin, Electrical & Computer Engineering (공학박사)  
2000년~2006년: 삼성전자 수석연구원  
2007년~2014년: 한국과학기술원 전기전자공학과 연구교수  
2015년~2022년: 수원과학대학교 전자정보통신공학과 교수  
2022년~현재: 한국과학기술원 조천식모빌리티대학원 초빙교수  
[주 관심분야] EMI/EMC, Signal/Power Integrity, 고속신호 인터커넥트 및 시스템 설계, 무선전력전송

박 현 호 [수원대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-8518-1151>



1999년 8월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)  
1999년 9월: 한국전자통신연구원(ETRI) 선임연구원  
2006년 6월: 삼성전자 글로벌기술센터 수석연구원  
2012년 9월~현재: 수원대학교 전기전자

공학부 교수

[주 관심분야] EMI/EMC 대책 기술, 전자파 차폐 기술, 전자파 해석 기술, SI/PI 설계 기술

나 완 수 [성균관대학교/전임교수]

<https://orcid.org/0000-0002-0315-3294>



1984년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)  
1986년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학석사)  
1991년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학박사)  
1991년~1993년: SSCL Guest Collaborator  
1993년~1995년: 한국전기연구원 선임연구원  
1995년~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 전임교수  
[주 관심분야] SI/PI, EMI/EMC