

원형 동축 선로에서 광대역 매칭 커넥터의 특성 연구

김 병 우*

울산대학교 전기공학부

A Study on the Characteristics of Wide Band Matching Connector in Round Coaxial Lines

Byeongwoo Kim*

Department of Electrical Engineering, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Korea

(Received 14 March 2012 / Revised 9 April 2012 / Accepted 19 April 2012)

Abstract : In this paper, smoothing plane connector have been proposed as the vehicle connector for the wireless access in vehicular environments (5.925GHz) communication. This smoothing plane connector is designed by considering the properties of critical parameter like smoothing distance of start to end point of contact area. The design simulation and results can be used to determine the most suitable smoothing plane wire dimensions for vehicle communication connector. The optimized WAVE connector inserted the smoothing plane wire has insertion loss less than - 0.17dB at 5.925GHz. It provides 20% of insertion loss with good performance. Therefore, the simulated results can be effectively used for optimum design of high frequency connector for vehicle communication.

Key words : FAKRA connector(파크라 커넥터), Bandwidth(밴드 폭), Insertion loss(삽입 손실), Impedance matching(임피던스 매칭), Vehicular communication(차량 통신)

1. 서 론

자동차로의 전기/ 전자장치가 급증함에 따라서 고주파 대역의 정보전송 장치가 증대되고 있다. 이의 대표적인 사례로서 자동차 안전도 및 편의성 증대를 위한 5.9GHz 대역의 주파수를 사용하는 WAVE 통신이 활발하게 연구되고 있다. 그 동안 5.9GHz 대역을 사용하는 WAVE 통신 연구는 통신 단말기 H/W 설계, 프로토콜 특성에 집중되어 왔다. 일반적으로 자동차에 적용되고 있는 고주파 대역의 주파수는 최대 4GHz까지 적용 가능한 FAKRA 커넥터가 주류를 이루고 있다. 이로 인하여, 5.9GHz 이상의 고주파 대역 주파수를 적용하는 단거리 협대역 통신 및 WAVE 통신용 커넥터는 노이즈 레벨이 증대되어 정확한 신호 전달에 장애물로

작용하고 있다.

자동차 커넥터와 관련된 기존 연구에서는 자동차 진동 및 열과 같은 내환경 조건에서 강인성을 해석하고 검증을 실시하였다.¹⁾ 또한, 커넥터 접합면에서 스크래치가 삽입손실에 미치는 영향에 대한 연구를 실시하였다.²⁾ 자동차 고전압용 커넥터인 경우에는 커넥터 하우징 재질에 의한 전자기 노이즈 방출을 해석하였다.³⁾

자동차에 적용되는 FAKRA 커넥터의 구조를 변형하여 신호전달 특성을 개선하고자 하는 연구도 진행되어 일정 이상의 특성 개선을 달성하였다. 그러나, 이 같은 커넥터는 압과 수의 커넥터 체결부위가 나선형으로 되어 있기 때문에 실제 상용화 가능성은 낮은 편이다.^{4,5)}

이 같은 문제를 해결하기 위해서는 광 섬유를 이용하는 것도 고려할 수 있으나 가격이 고가이고 진

*Corresponding author, E-mail: bywokim@ulsan.ac.kr

동에 취약한 특성을 지니고 있기 때문에 근본적이 해결책이 아니다. 따라서, 상기 문제를 해결하기 위해서는 기존 4GHz 대역의 커넥터를 기반으로 하여 5.9GHz 대역까지 활용 가능한 신 구조의 커넥터 설계 제작이 요구된다. 본 연구에서는 기존 상용화된 FAKRA 커넥터의 구조를 기존 돌출형 구조에서 평활형 구조로 변환하여 기생 정전용량 생성에 의한 신호 손실을 최소화할 수 있는 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 평활형 커넥터는 기존 FAKRA 커넥터와 비교할 때, 구조 자체가 복잡하지 않기 때문에 실용화 가능성을 극대화시킬 수 있을 것이다.

2. 광대역 커넥터 특징

전기 전자 시스템 간의 입/출력 신호를 원활하게 전송하기 위해서는 입/출력단의 임피던스에 의한 반사를 줄이기 위하여 임피던스 매칭을 실시하게 된다. 전기 부하 연결 부위에서 임피던스가 일치되지 않게 되면 신호의 반사가 발생되어 손실로 이어지기 때문에 임피던스 매칭은 필수적이다.

$$Z = R + jX = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (\omega = 2\pi f) \quad (1)$$

자동차 커넥터를 구성하고 있는 절연부, 전송선로부는 저항 R이 실수부, 인덕턴스 L과 커패시턴스 C가 허수부가 조합된 형태로 정의할 수 있다. 인덕턴스(Inductance)는 원래 자기장 성분으로 에너지를 축적하고 커패시턴스(Capacitance)는 전기장 성분으로 에너지를 축적한다. 자동차 커넥터 모듈의 입출력 도선에 흐르는 주파수 성분 에너지는 도선의 L과 C 성분에 의하여 축적되기 때문에 에너지의 일부가 소멸되게 된다.

일반적으로 임피던스는 복소수 형태로 나타낼 수 있고 이것을 특성 지표 S 파라미터로 표현한다. S 파라미터는 주파수 분포 상에서 입력 전압 대비 출력 전압의 비를 의미한다.

$$S_{ab} = \frac{V_{a-}}{V_{b+}} \quad S_{matrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \quad (2)$$

본 S 파라미터를 활용하여 커넥터의 에너지 손실을 정량적으로 나타내는 삽입손실(Insertion loss)과

반사손실(Return loss)을 정의할 수 있다. 삽입손실이 회로 구성 소자 내부의 손실을 의미한다면, 반사손실은 입력 단자에서 임피던스 매칭이 얼마나 잘 되어있느냐를 나타내는 지표이다. 아래 식 (3), (4)에서 알 수 있듯이, 반사손실은 감마(Γ)라고 불리는 반사계수(Reflection coefficient)에 의해서 정의되어지고 반사 계수는 특정 위치에서의 나오는 전압/들어오는 전압으로 표현된다.

$$RL = -20 \log |\Gamma| \quad (3)$$

$$\Gamma = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (4)$$

정재파비(VSWR)는 반사계수 S_{11} , S_{22} 를 다르게 표현한 값으로써, 반사에 의해 생성되는 정재파(Standing wave)의 높이 비율을 나타낸다. 정재파비는 반사가 전혀 발생하지 않는 경우에 1이 되어 최상의 전송 조건을 갖게 된다. 일반적으로 정재파비가 1.5 일 때, 신호출력은 96% 정도 전달되어 상용화가 가능한 기술수준이라 판단하고 있다. 이를 삽입손실 차원으로 표시하면 0.3 이상으로 정의할 수 있다. 따라서, 상기에 제시된 정량적인 값이 자동차용 커넥터 및 전자 장치로 사용할 수 있는 커넥터의 기준 값이라 할 수 있다.

3. 광대역 커넥터 특성 해석

3.1 기존 커넥터 특성

자동차 정보통신 장치에 적용되고 있는 1GHz에서 4GHz 대역의 자동차 커넥터는 독일 DIN 규격의 FAKRA(FAchKReis Automobil)를 들 수 있다. 고주파 대역에 적용되는 자동차용 FAKRA 커넥터는 전송 선로가 일반적인 와이어 형태를 취하고 있는데, 최대 4GHz 대역까지는 임피던스 매칭이 앞서 언급한 기준 특성을 만족하고 있다. 이에 대한 전송특성 검증을 위하여 아래 Fig. 1과 같은 기존 FAKRA 커넥터를 모델링하여 HFSS를 이용한 유한요소해석을 실시하였다.

Fig. 2는 기존 자동차에 적용되고 있는 FAKRA 커

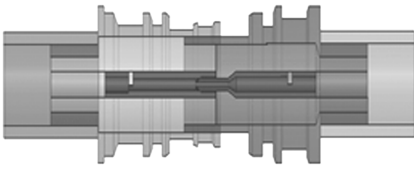
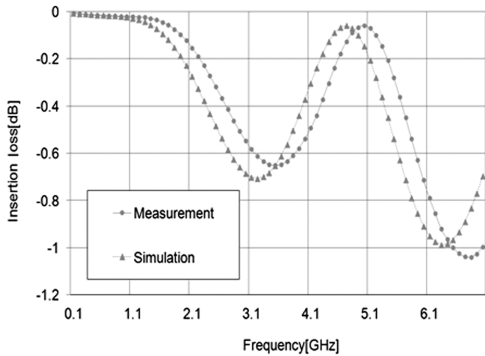
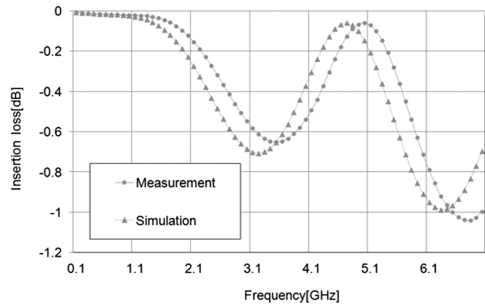


Fig. 1 Simulation model of conventional FAKRA connector



(a) Return loss



(b) Insertion loss

Fig. 2 Translation loss of conventional FAKRA connector

넥터의 반사 및 삽입손실에 대한 평가 및 해석 결과이다. 기존 자동차용 FAKRA 커넥터의 삽입손실은 주파수 2.4GHz 대역까지는 0.25dB 이하로서 만족스런 결과를 나타내고 있으나 5.9GHz 대역 이상에서는 -0.9dB로 크게 증대되어 기준 값을 상회하고 있다. 주파수 4.5GHz 대역에서 삽입손실 특성이 일시적으로 개선되는 것은 공진점에서 발생하는 최대 에너지 공급에 기인하는 현상이다.

이와 같이, 자동차용 FAKRA 커넥터에서 발생하는 전송손실 특성을 개선하기 위해서는 통신 와이어에 포함된 C, L 성분을 능동적으로 조정하여야 한다. 그러나, 기존 커넥터의 형상은 일직선이고 단조롭기 때문에 설계변경 및 성능 개선이 제한적이다.

기존 자동차용 FAKRA 커넥터의 임피던스 특성을 측정된 결과, 주파수 5.9GHz에서 $45+j11[\Omega]$ 을 나타냈다. 이 같은 임피던스 불일치에 의하여, 자동차 WAVE 통신 대역인 주파수 5.9GHz 대역의 삽입손실은 -0.9dB까지 저하되었다. 이 같은 삽입손실을 저감시키기 위해서는 스미스 차트를 이용한 등가회로를 구성하여 실시하였다.

본 연구에서 대상으로 한 커넥터인 경우, 이상적인 임피던스 저항이라 할 수 있는 $50+0j[\Omega]$ 이 되기 위해서는 커패시턴스 $C=2.5[pF]$, 인덕턴스 $L=1.1[nH]$ 이 필요하였다. 그러나, 커넥터 최적 설계는 자체 구조 변경의 제한성이 존재하기 때문에 어려움이 존재한다. 또한, 커넥터의 최적 설계가 되었다 하더라도 실제 대량생산 단계에서 미소한 하드웨어 규격 차이에 의한 특성변화가 심하게 발생된다.

상기 문제를 해결하기 위해서는 임피던스 매칭에 가장 큰 영향을 끼치는 C, L 성분을 커넥터 내부에 삽입할 수 있으나 경제성과 공간 제한성 때문에 현실적으로 불가능한 방법이다.

따라서, 본 연구에서는 커넥터의 임피던스 매칭 문제를 해결하기 위하여 기본적인 커넥터 구조를 유지하면서 불연속면이 최소화되는 구조를 도입하였다.

3.2 신개념 평활 커넥터 특성

자동차를 포함한 일반 산업용에 적용되고 커넥터는 아래 Fig. 3과 같이 신호를 전송하는 중앙부의 도선과 도선에서 발생하는 전자기 노이즈와 외부에서 유입되는 노이즈를 차단하는 실드부로 구성되어 있다. 신호 전송 도선부와 실드부 사이에는 테프론과 같은 유전체가 존재하게 된다. 본 실드부, 도선부, 유전체부의 구성 치수와 물성 값에 따라서 L과 C로

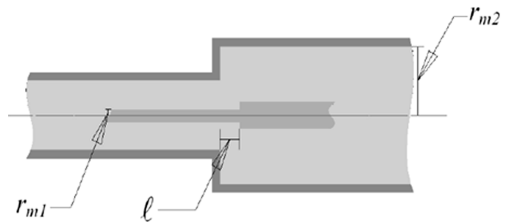


Fig. 3 Step discontinuities in coaxial lines

구성된 전기회로를 구성하게 되는데, 이를 수학적으로 표현하면 다음 식 (5), (6)과 같이 된다.

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{r_{m2}}{r_{m1}} \quad (5)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(r_{m1}/r_{m2})} \quad (6)$$

- r_{m1} : 중심선에서 외부 컨덕터까지의 거리
- r_{m2} : 중심선에서 내부 컨덕터까지의 거리
- ϵ : 물질의 유전율
- μ : 물질의 투자율
- l : 내부와 외부 컨덕터 곡면까지 거리

자동차용 FAKRA 커넥터는 암과 수로 구성되어 있는데, 암과 수로 구성된 커넥터의 접촉면에서 연직 방향의 불연속면이 존재하게 된다. 이 불연속면이 기생 정전용량으로 작용하여 신호 전송 에너지를 약화시키는 요인으로 작용하게 될 수 있다.

커넥터 암과 수의 접촉면이 균질하게 구성되어 있으면 도선에는 전체적으로 동일한 전위(Electric potential)를 갖게 되기 때문에 신호 전송에 장애요인으로 작용하지 않을 것이다. 그러나, 암과 수 커넥터 접촉면에 불연속면이 존재하게 되면 특정한 전위차가 발생되고 정전용량이 존재하기 때문에 신호 전송을 방해하는 저장 에너지로 작용하게 된다.

$$W_d = \frac{\epsilon}{2} \int (V - V^*) \nabla^2 V^* dU \quad (7)$$

$$C_d = 2 \frac{W_d}{V_o^2} \quad (8)$$

- W_d : 저장되는 에너지
- $V - V^*$: 전위차 분배
- C_d : 불연속 커패시턴스
- V_o : 불연속 지점에서의 전위

Fig. 4는 본 연구에서 제시한 불연속적인 면을 최소화시킨 커넥터 단면이다. 일반적으로 정전용량은 전하 분배에 의하여 생기는 전위보다 커넥터 특성에 나쁜 영향을 주기 때문에, 이를 저감하기 위해서는 정전용량에 의한 저장에너지를 최소화시키기 위한 커넥터 형상 설계가 필요하다. 이 같은 저장에너

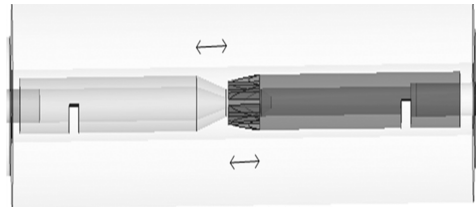
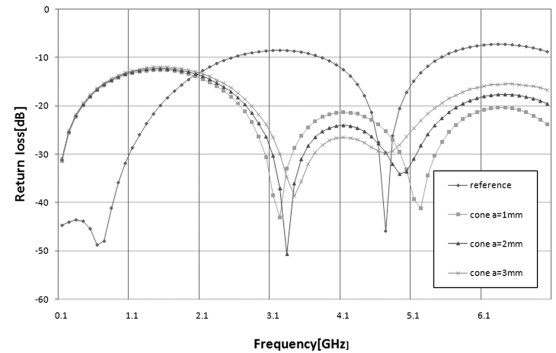
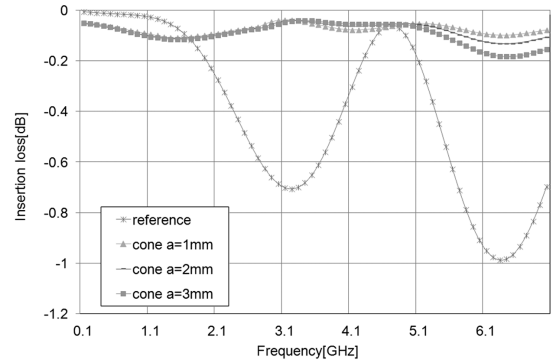


Fig. 4 Cross-sectional view of the connecting surface in smoothing plane connector



(a) Return loss

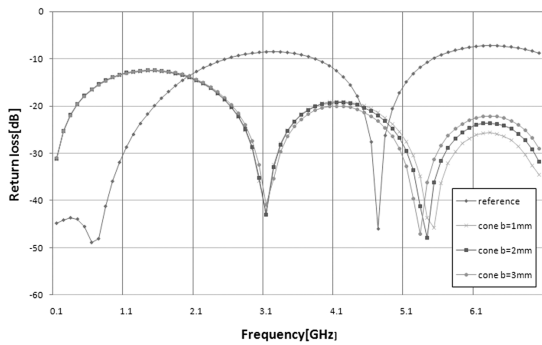


(b) Insertion loss

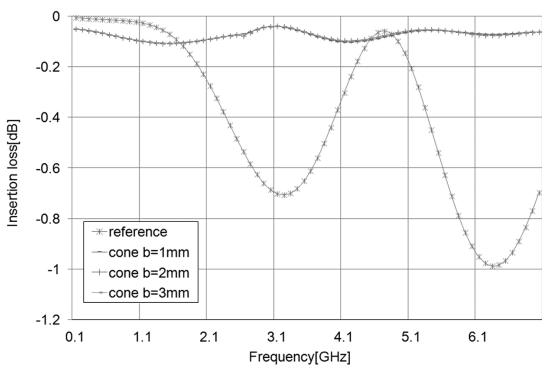
Fig. 5 Transmission loss of smoothing plane connector(male)

지 저감을 위해서는 암과 수 접촉부의 과도한 불연속 구간을 줄일 수 있는 평활면을 도입하였다. 커넥터의 암과 수 도선에 존재하는 평활면의 길이와 각도 변화에 따른 전송특성을 해석하였다.

위의 Fig. 5는 커넥터 암수에 대하여 평활처리를 실시하고 이로 인한 삽입손실 저감효과를 나타낸 것이다. 암과 수 도선의 접촉면에 평활화가 된 커넥터는 기존 커넥터에 비하여 삽입손실이 획기적으로 개선됨을 확인하였다. Fig. 5의 (a)는 평활면을 갖는 커넥터의 반사손실을 나타낸 것이다. 평활면을 갖



(a) Return loss



(b) Insertion loss

Fig. 6 Transmission loss of smoothing plane connector (female)

는 커넥터는 기존 일반 커넥터에 비하여 반사손실이 향상됨을 확인하였다. 또한, Fig. 5의 (b)에서 알 수 있듯이 기존 커넥터의 삽입손실이 5.9GHz 대역에서 -0.9dB인 것에 비하여 평활화된 커넥터는 -0.17dB를 나타냈다. 따라서, 암과 수 도선이 접촉하는 경계면을 평활화함으로써 기생 정전용량을 획기적으로 저감시킬 수 있었다. 그러나, Fig. 6과 같이 상대적으로 커넥터(수)는 평활에 의한 삽입손실의 변화 폭이 크게 발생되나 커넥터(암)은 삽입손실의 변화 폭이 작게 발생되었다. 커넥터(수)에서 삽입손실 변화가 크게 발생하는 것은 커넥터(수) 단자 부분에 존재하는 불연속면의 크기변화가 크기 때문에 이 불연속면의 평활 정도에 많은 영향을 주기 때문이라 판단된다.

커넥터(암)에서 발생하는 삽입손실은 저주파에서 고주파까지 일정하게 -0.07dB 정도를 유지하고 있었다. 반면, 커넥터(수)에서 발생하는 삽입손실은 고주파 대역에서 성능이 상대적으로 저하되는 현상

을 확인할 수 있었다. 이 같은 현상은 커넥터(수) 중간 부근에 존재하는 불연속면의 평활도 비율이 상대적으로 크기 때문에 발생하는 현상이라 판단된다.

4. 결론

자동차 정보통신용으로 사용되고 있는 파크라 커넥터의 최대 적용 주파수인 4GHz를 상회하고 WAVE 통신까지 적용 가능한 5.9 GHz 대역의 신 개념 평활형 커넥터를 제안하였다. 제안된 신 개념 평활형 커넥터의 삽입손실은 기존 파크라에 비하여 정확한 50Ω 매칭이 가능하였기 때문에 20% 성능향상이 가능하였다.

- 1) 대표적인 고주파 대역의 자동차 커넥터인 FAKRA 커넥터에 대하여 암 수 접촉면의 형상을 평활형으로 변환하여 삽입손실 및 반사손실을 20% 저감을 확인할 수 있었다.
- 2) 기존 암 수 커넥터 접촉면을 도출형 커넥터에서 평활형 커넥터로 변경함으로써 전위 차 분배 및 기생 정전용량을 저감시킬 수 있었기 때문에 적용 주파수 대역을 4GHz에서 5.9GHz 대역까지 확장시킬 수 있었다.
- 3) 평활형 FAKRA 커넥터에서 수 커넥터의 삽입손실은 암 커넥터에 비하여 크게 발생되었는데, 이 같은 현상은 커넥터 접촉부 이외의 부분에 존재하는 불연속면에 기인하는 현상이다.
- 4) 자동차 커넥터의 공진 주파수 대역을 확장시키기 위해서는 특정 주파수대비 상대적으로 저주파수 대역에서는 인덕턴스가 설계인자에 영향을 끼치고 고주파수 대역에서는 정전용량 영향이 크게 영향을 끼쳤다.

본 연구에서는 자동차 WAVE 통신에서 활용 가능한 신 개념의 파크라 커넥터를 제안하여 커넥터 자체의 통신 전달능력을 성공적으로 평가하였다. 향후, 연구에서는 본 연구에서 개발한 커넥터를 실제 WAVE 통신 응용 시스템에 적용하여 응용 차원의 성능을 검증하고자 한다.

후 기

본 연구는 울산대학교 교내 연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

References

- 1) K. Yasuda and N. Sugiura, "Advanced High Density Coaxial Printed Board Connector for High Speed Signal Transmission in Rack System," Proceedings of ASME/JSME Electronic Packaging, pp.15-21, 1992.
- 2) M. Kondo, Y. Sakuraba, T. Osaki, T. Kasai, Y. Sakuraba, Y. Sato, K. Hayashi and K. Akashi, "Membrane Circuit Connector," SAE 2009-01-1092, 2009.
- 3) M. Ohgren and S. Johnsson, Dual Frequency Quadrifilar Helix Antenna, US Patent 6421028, July 16, 2002.
- 4) V. Pachner, L. Roy and G. Costache, "EMI Measurement of Small System Using an Absorbing Clamp," IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Vol.1, pp.146-150, 1997.
- 5) H. L. Kim, J. W. Choi, S. W. Kim and N. J. Kang, "A Study of Electro Magnetic Shield Effectiveness for Automotive High Voltage Connector," Proceedings of KSPE Spring Conference, pp.1263-1264, 2010.