

낮은 삽입 손실을 갖는 음의 군 지연 회로 설계

이희원*, 윤원상**

A Design of a Negative Group Delay Circuit with Low Insertion Loss

Hee-Won Lee*, Won-Sang Yoon**

본 연구는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임
(No. NRF-2019R1F1A1062822)

요 약

본 논문에서는 낮은 삽입손실을 갖는 분산 소자 형태의 음의 군 지연 회로(NGDC, Negative Group Delay Circuit)를 제안하였다. 제안한 NGDC는 마이크로스트립 전송선과 그에 인접한 커플링 라인으로 구성되어 구조가 간단하며, 마이크로스트립 전송선에 집중 정수 소자를 사용하지 않아 낮은 삽입손실 특성을 갖는다. 본 논문에서는 공진 회로의 물리적 길이의 변화에 따라 음의 군 지연(NGD)이 발생하는 동작 주파수와 군 지연 값이 변경되는 것을 시뮬레이션과 prototype을 제작하여 확인하였다. 제작된 prototype 회로는 실험을 통해 동작 주파수 2.475GHz에서 군 지연 -1.722ns , 삽입 손실 3.30dB의 특성을 갖는 것으로 나타났으며, 측정 결과가 시뮬레이션 결과와 유사함을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we propose a negative group delay circuit(NGDC) with low insertion loss using a distributed elements. The proposed NGDC has a simple structure consisting of a microstrip transmission line(TRL) with a coupling line and has low insertion loss characteristics due to utilizing no lumped element in the TRL. In this paper, we show that the operating frequency and group delay value can be changed with respect to the dimension of the proposed circuit by simulation and experimental results of the prototype. The experimental results show that the prototype has group delay of -1.722ns and insertion loss of 3.30dB at 2.475GHz and has a good agreements with the simulated results.

Keywords

negative group delay, passive negative group delay network, distributed element, low insertion loss

* 호서대학교 전자디스플레이공학과 석사과정
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9188-5382>
** 호서대학교 전자융합공학부(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1125-384X>

· Received: Aug. 15, 2022, Revised: Jan. 14, 2023, Accepted: Jan. 17, 2023
· Corresponding Author: Won-Sang Yoon
Division of Electronic Convergence Engineering, Hoseo University, 20,
Hoseo-ro 79 beon-gil, Baebang-eup, Asan-si, Chungcheongnam-do, Korea
Tel.: +82-41-540-5661, Email: wsyoon@hoseo.edu

I. 서 론

5G 시스템과 커넥티드 카를 포함하는 연계 지능형 교통시스템(C-ITS, Connected Intelligent Transport System)의 큰 요구사항 가운데 하나는 전체 시스템에 대한 전송지연을 최소화하는 것이다. 기존의 4G 시스템이 수십 msec의 전송지연을 갖는 것에 비해 5G 시스템에서는 실시간성의 향상을 위해 지연시간을 0sec에 가깝게 줄이는 것을 기술적 목표로 내세우고 있으며, 구체적으로 최대 수 ms 이내의 전송지연을 얻는 것을 목표로 하고 있다[1]. 또한, 완전한 자율 주행을 목표로 하는 C-ITS에서는 주행 중 주변 교통상황, 급정거, 낙하물 등의 사고 위험 정보 제공을 위해 차량과 도로 인프라 간(V2I), 차량과 차량 간(V2V), 차량과 보행자/개인단말(V2P) 간에 정보교환이 끊임없이 이루어져야 하며, 주행 안전성의 확보를 위해 이러한 정보들이 실시간으로 제공될 필요가 있다[2][3]. 이러한 실시간 통신을 위해서 무선 고주파 회로에서 개별 부품의 군 지연저감을 통해 송수신 시스템 간 전송지연을 단축시키는 것이 필요하다.

한편, 초고주파 공학 분야의 여러 이론 및 실험을 통해 특정 수동 회로 형태에서 군 지연 값이 음수로 나타나는 NGD 현상이 발생하는 것을 확인하였다[4][5]. 이러한 현상은 식 (1)을 통해 알 수 있듯이 선형 회로 또는 전송선로의 위상 응답(ϕ)을 주파수 함수로 나타냈을 때, 위상 응답의 변화율이 양의 값을 갖는 경우, 군 지연(τ_g)이 음수를 가질 수 있음을 확인 할 수 있다.

$$\tau_g(\omega) = -\frac{\partial \phi(\omega)}{\partial \omega} = -\frac{\partial \angle S_{21}(\omega)}{\partial \omega} \quad (1)$$

이러한 NGD 현상은 1960년대 Brillouin의 연구와 이를 바탕으로 한 후속 연구들에 의해 공진 회로의 공진 주파수 근처에서 발생하는 것으로 확인되었다[6]-[8]. 여러 연구를 통해 메타물질 기반의 수동 회로 형태의 대역 저지 구조에서 군 지연이 음수로 나타나는 것이 확인되었으나, 높은 전송 손실로 인해 실제 송수신 시스템 설계에 적용시 손실을 상쇄하기 위하여 증폭기를 추가하여야 하며 이로 인해

추가적인 전력소모 발생 및 크기 증가 등의 문제가 발생하게 된다[9]-[14]. 이에 본 논문에서는 설계 난이도를 낮추고, 신호 감쇠 특성을 향상시킨 분포 정수 소자 형태의 전송선을 이용한 수동형 NGD 회로를 제안하였다. II장에서는 전송선형 NGD 회로를 제안하고, 회로의 설계 파라미터에 따른 NGD 회로의 삽입손실과 군 지연 특성의 변화를 시뮬레이션한 결과를 제시하였다. III장에서는 II장의 설계 결과를 바탕으로 NGD 회로의 prototype을 제작하여 측정된 결과를 나타내고, IV장에 결론을 제시하였다.

II. NGD 회로 설계

제안된 전송선형 NGD 회로의 구조를 그림 1에 나타내었다. 제안된 회로는 마이크로스트립 전송선과 g_0 만큼 이격되어 있는 말발굽 형태의 커플링 라인에 의해 동작하는 공진기 형태로 구성된다. 제안된 회로에서 커플링 라인의 길이가 특정 신호의 유효 반 파장 길이($\lambda_g/2$)를 만족할 경우 식 (2)와 같이 중심 주파수 f_0 에서 공진이 발생한다[8].

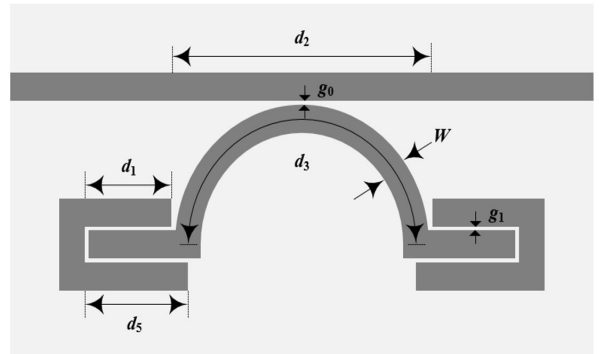
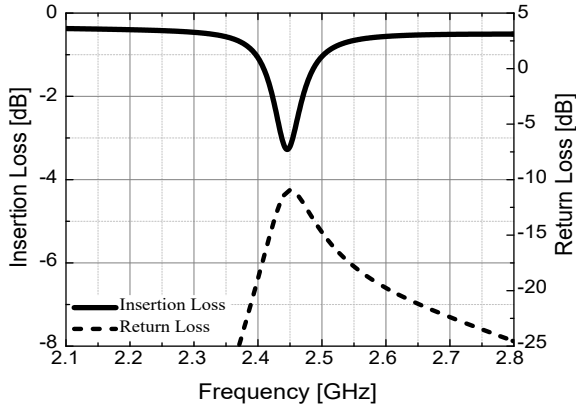


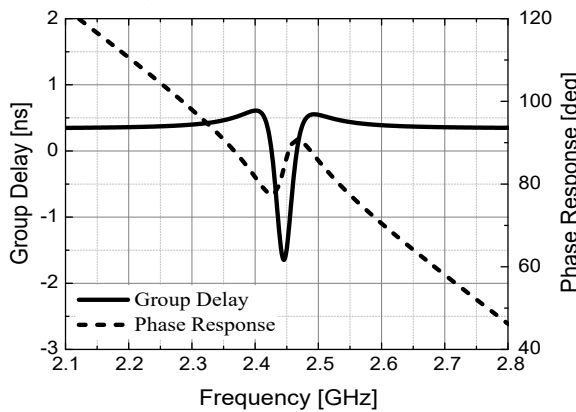
그림 1. 제안된 전송선형 NGDC 구조
Fig. 1. Configuration of the proposed NGDC

$$f_0 = \frac{c_0}{\lambda_g \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (2)$$

제안된 회로 구조를 적용하여 2.45GHz 대역에서의 공진 회로를 설계하고, HFSS를 이용하여 시뮬레이션한 결과를 그림 2에 나타내었다. 커플링 라인의 길이($2d_1+d_3$)를 31.5mm로 적용할 경우 그림 2(a)에 나타난 것과 같이 2.446GHz에서 공진이 발생하며,



(a) 삽입 손실 및 반사 손실
(a) Insertion loss and return loss



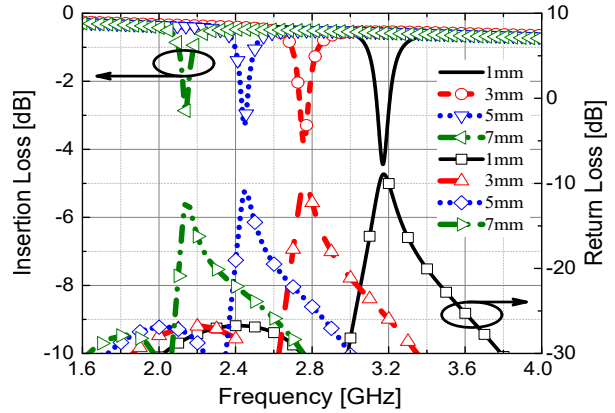
(b) 위상 응답 및 군 지연
(b) Phase response and group delay

그림 2. 제안된 전송선형 NGDC의 동작 특성
Fig. 2. Simulated results of the proposed NGDC

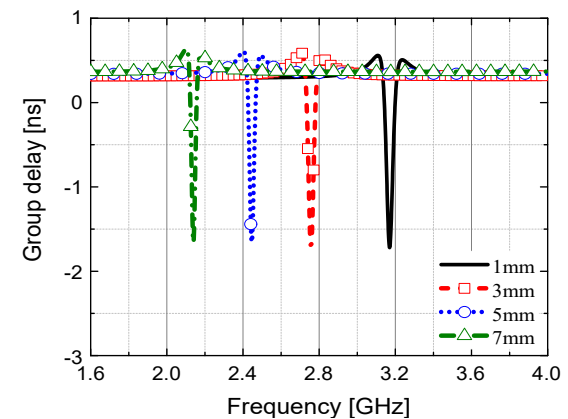
공진 주파수 부근에서 위상 응답의 변화율이 양의 값을 갖게 되므로 식 (1)에 의해 군 지연 값이 음수로 나타나는 것을 그림 2(b)를 통해 확인할 수 있다. 일반적으로 NGD와 삽입 손실은 트레이드 오프 관계이며, 제안된 회로의 설계 파라미터 변화에 따른 군 지연 특성의 변화를 확인하기 위해 설계 파라미터에 따른 동작특성에 대한 분석을 진행하였다.

2.1 커플링 라인 길이에 따른 NGD 동작 특성변화

커플링 라인의 길이에 따른 NGD 특성 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 3, 4에 나타내었다. 말발굽 형태의 커플링 라인과 부가로 붙은 커플링 라인이 겹쳐지는 부분의 길이 d_1 을 1mm부터 7mm까지 2mm 간격으로 변화시킨 결과를 그림 3에 나타내었다.



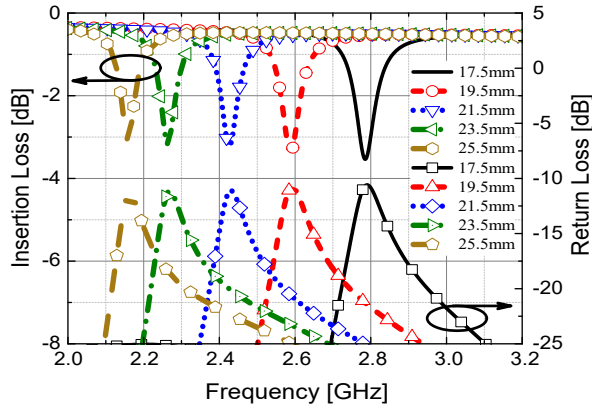
(a) 삽입 손실 및 반사 손실
(a) Insertion loss and return loss



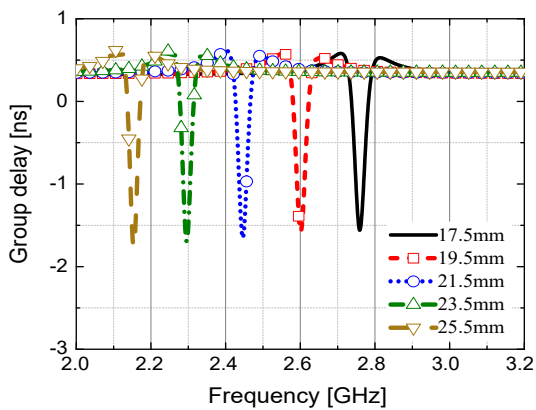
(b) 군 지연
(b) Group delay

그림 3. d_1 변화에 따른 NGDC 동작특성 시뮬레이션
Fig. 3. Parametric study of the proposed NGDC with respect to d_1

그림 3(a)에서 볼 수 있듯이 d_1 의 길이가 1mm부터 7mm까지 증가함에 따라 동작 주파수는 3.17GHz에서 2.14GHz로 낮아지게 된다. 한편, 그림 3(b)에 나타난 것과 같이 군 지연은 -1.72ns에서 -1.66ns로 변화하는 것을 볼 수 있다. 그림 4는 커플링 라인의 반원형 부분인 d_3 의 길이를 17.5mm부터 25.5mm까지 2mm 간격으로 변경하였을 때의 군 지연 특성을 나타내고 있다. 그림 4(a)의 결과에서 볼 수 있듯이, d_3 의 길이가 17.5mm부터 25.5mm까지 증가함에 따라 동작 주파수는 2.76GHz에서 2.15GHz로 낮아지게 되며, 동작 주파수가 올라갈 경우 삽입손실이 증가하는 것을 볼 수 있으며, 그림 4(b)에 나타난 것과 같이 동작 주파수 증가에 따라 군 지연은 -1.56ns에서 -1.77ns로 변화하는 것을 볼 수 있다.



(a) 삽입 손실 및 반사손실
(a) Insertion loss and return loss



(b) 군 지연
(b) Group delay

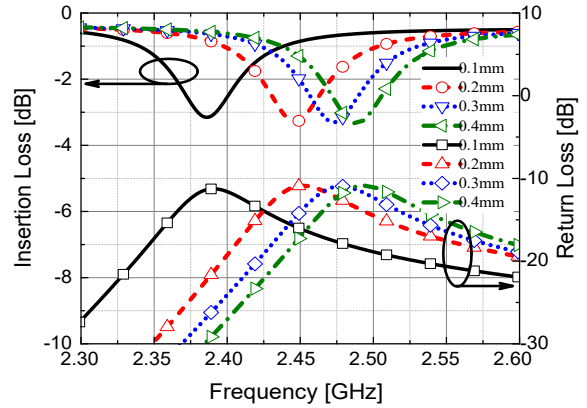
그림 4. d_3 변화에 따른 NGDC 동작특성 시뮬레이션 결과

Fig. 4. Parametric study of the proposed NGDC with respect to d_3

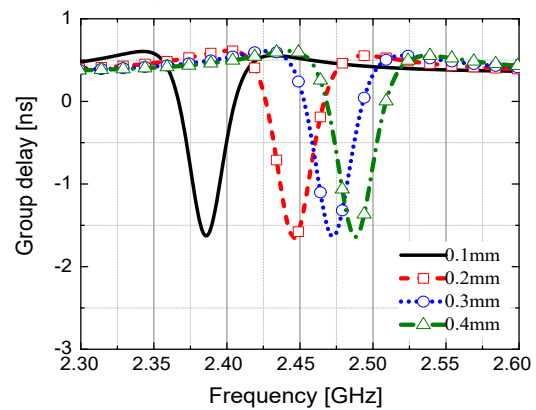
그림 3, 4의 시뮬레이션 결과를 통해 커플링 라인의 길이가 증가함에 따라 식 (2)에서 공진 주파수의 파장 길이 λ_g 가 증가하여 NGD 동작 주파수가 낮은 주파수 대역으로 이동하는 것을 확인할 수 있다.

2.2 커플링 라인과 부가로 붙은 커플링 라인간 이격거리에 따른 NGD 동작 특성 변화

식 (2)에서 상대 유효 유전율 ϵ_{eff} 는 전송선 옆에 위치한 커플링 라인에 의해 영향을 받게 된다[8]. 따라서, 말발굽 형태의 커플링 라인에 추가적인 커플링 라인을 적용할 경우 추가적인 결합 요소를 제공하게 되며, 이에 따라 상대 유효 유전율 ϵ_{eff} 에 변화를 줄 수 있게 된다. 이를 통해 이격거리 g_1 값을



(a) 삽입 손실 및 반사손실
(a) Insertion loss and return loss



(b) 군 지연
(b) Group delay

그림 5. g_1 변화에 따른 NGDC 동작특성 시뮬레이션 결과

Fig. 5. Parametric study of the proposed NGDC with respect to g_1

변화시킴으로써 동작 주파수를 가변할 수 있는 특성을 얻을 수 있게 된다.

커플링 라인과 부가로 붙은 커플링 라인 간의 이격거리 g_1 을 변경하면서 시뮬레이션을 수행한 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5를 통해 알 수 있듯이 g_1 값이 증가할수록 공진 주파수가 높아지며, 공진 주파수가 올라가더라도 군 지연과 삽입손실, 반사손실이 일정하게 유지되는 것을 알 수 있다. 이는 g_1 값의 변화가 상대 유효 유전율 변화에만 영향을 주는 것이며, 이로 인해 공진 회로의 동작 주파수 변화를 초래하나, 전체 삽입손실에는 영향을 주지 않는 것을 알 수 있다. g_1 값이 0.1mm에서 0.4mm로 변경될 때, 공진 주파수의 변화는 2.386GHz에서 2.501GHz로 115MHz 가변되며, 군 지연은 -1.63ns 로 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다.

III. NGDC prototype 제작 및 측정

II 장에서의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 제안된 구조의 NGDC prototype을 2.45GHz 대역에서 동작하도록 설계하였다. prototype의 설계를 위해 비유전율 4.4, 두께가 0.8mm인 FR4-epoxy 기판을 이용하였고, 각 설계 파라미터를 표 1에 나타내었으며, 그림 6에 제작된 prototype 회로의 사진을 나타내었다.

표 1. NGDC prototype 설계 파라미터
Table 1. Design parameters of the prototype of the proposed NGDC

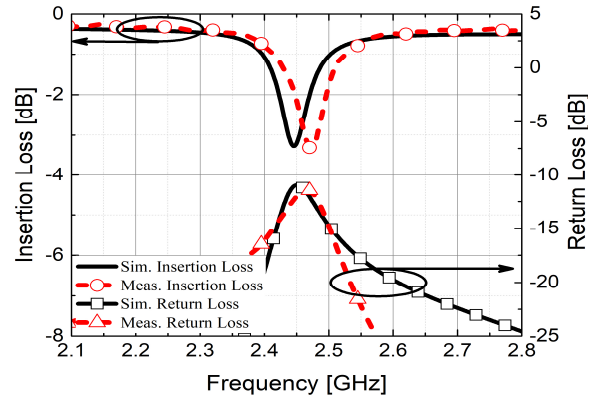
Parameters	Values
W	1.48mm
g_0, g_1	0.2mm
d_1	5mm
d_2	15.16mm
d_3	21.5mm
d_5	5.94mm



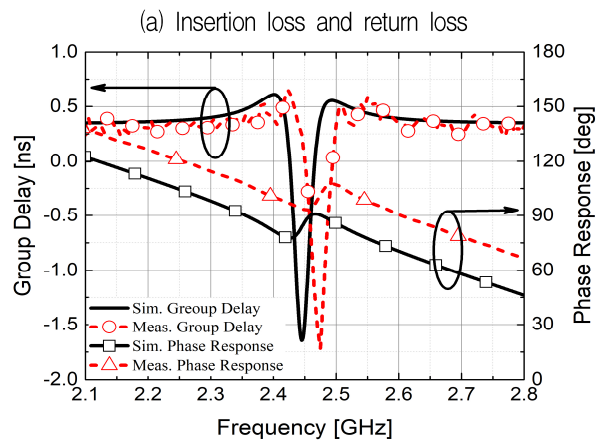
그림 6. 제작된 NGDC prototype 사진
Fig. 6. Photo of the fabricated NGDC prototype

제작된 prototype 회로의 동작 특성은 Keysight사의 Network Analyzer 8753ES를 사용하여 측정하였다. prototype의 시뮬레이션 결과와 측정 결과를 그림 7에 나타내었다. 제작된 prototype의 동작 주파수는 2.475GHz로 2.446GHz인 시뮬레이션 결과와 약 1.18%의 차이를 보였고, 군 지연, 삽입손실, 반사손실 측정값은 각각 -1.722ns, -3.30dB, -11.69dB로 나타났으며, 시뮬레이션 결과와 유사한 동작 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 또한, 위상 응답의 측정 결과는 실제로 동작 주파수 부근에서 위상 변화율이 양의 값을 갖는 것으로 나타났으며, 기울기 특성이 음의 군 지연 크기에 비례하고 대역폭의 반비례 관계인 것을 확인하였다. 측정된 결과를 바탕으로 제안된 전송선형 NGDC와 선행 연구된 분포 정수 소

자형 NGDC의 성능을 비교하여 표 2에 나타내었다. [9]에 제시된 결과와 비교하였을 때, 본 논문의 결과가 삽입손실이 0.52dB 낮으면서도 군지연은 0.69ns가 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한, [10]-[14]의 결과들은 군지연이 -4.20 ~ -6.85ns로 큰 NGD를 얻을 수 있으나, -15dB 이상의 높은 삽입손실이 발생하는 것을 알 수 있다.



(a) 삽입 손실 및 반사손실



(b) 위상 응답 및 군 지연

(b) Phase response and group delay

그림 7. NGDC prototype 실험결과

Fig. 7. Experimental Results of the NGDC prototype

표 2. NGDC 성능 비교

Table 2. NGDC performance comparison

Ref.	f_0 [GHz]	GD_{MAX} [ns]	IL_{MAX} [dB]
[9]	2.140	-1.03	-3.82
[10]	3.5,	-4.54,	-26.65,
	5.15	-4.20	-28.56
[11]	2.140	-6.33	-20.7
[12]	2.140	-6.85	-15.4
[13]	3.506	-4.60	-22.7
[14]	1.962	-6.50	-21.2
This work	2.475	-1.72	-3.30

IV. 결 론

본 논문에서는 낮은 삽입손실 특성을 갖는 전송선형 NGDC를 제안하였다. 제안된 NGDC는 분포정수 소자로 구성되어 구조가 간단하며, 집중정수 소자를 사용하지 않아 낮은 삽입손실 특성을 갖는다. 제안한 구조를 이용하여 NGDC prototype을 설계 및 제작하였으며, 제작된 회로의 측정 결과가 2.475GHz에서 -1.72ns 의 전송지연과 3.3dB의 전송손실을 얻어 시뮬레이션 결과와 유사한 것을 확인하였다. 또한, 회로의 물리적 크기를 변경하여 군지연이 발생하는 주파수와 군 지연 크기 등을 조절할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 향후 이를 활용하여 재구성 특성을 갖는 NGDC를 설계할 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] N. Yang, L. Wang, G. Geraci, M. Elakashlan, J. Yuan, and M. D. Renzo, "Safeguarding 5G wireless communication networks using physical layer security", *IEEE Communications Magazine*, Vol. 53, No. 4, pp. 20-27, Apr. 2015. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7081071>.
- [2] S.-M. Heo and S.-J. Yoo, "Multi-channel MAC protocol based on V2I/V2V collaboration in VANET", *Journal of KICS*, Vol. 40, No. 01, pp. 96-107, Jan. 2015. <https://doi.org/10.7840/kics.2015.40.1.96>.
- [3] V. Charpentier, N. Slamnik-Krijestorac, and J. Marquez-Barja, "Latency-aware C-ITS application for improving the road safety with CAM messages on the Smart Highway testbed," *IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, New York, NY, USA, pp. 1-6, 2022. <https://doi.org/10.1109/INFOCOMWKSHPS54753.2022.9798350>.
- [4] G. V. Eleftheriades, O. Siddiqui, and A. K. Iyer, "Transmission line models for negative refractive index media and associated implementations without excess resonators", *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, Vol. 13, No. 2, pp. 51-53, Feb. 2003. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2003.808719>.
- [5] O. F. Siddiqui, S. J. Erickson, G. V. Eleftheriades, and M. Mojahedi, "Time-domain measurement of negative group delay in negative-refractive-index transmission-line metamaterials", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 52, No. 5, pp. 1449-1454, May 2004. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2004.827018>.
- [6] L. Brillouin, "Wave Propagation and Group Velocity", Academic Press, New York, 1960.
- [7] S. Chu and S. Wong, "Linear Pules Propagation in an Absorbing Medium", *Physical Review Letters*, Vol. 48, pp. 738-741, 1982. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.48.738>.
- [8] B. Ravelo, L. Wu, F. Wan, W. Rahajandraibe, and N. M. Murad, "Negative Group Delay Theory on Li Topology", *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 47596-47606, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2979453>.
- [9] G. Chaudhary and Y. Jeong, "Negative Group Delay Phenomenon Analysis in Power Divider: Coupling Matrix Approach", in *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, Vol. 7, No. 9, pp. 1543-1551, Sep. 2017. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2017.2696972>.
- [10] G. Chaudhary, Y. Jeong, and J. Lim, "Miniaturized Dual-Band Negative Group Delay Circuit Using Dual-Plane Defected Structures", *IEEE Microwave and Wire3less Components Letters*, Vol. 24, No. 8, pp. 521-523, Aug. 2014. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2014.2322445>.
- [11] Yongchae Jeong and Girdhari Chaudhary, "Transmission-type negative group delay networks using coupled line doublet structure", *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, Vol. 9, No. 8, pp. 748-754, Feb. 2015. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2014.0351>.

- [12] G. Chaudhary and Y. Jeong, "Low Signal-Attenuation Negative Group-Delay Network Topologies Using Coupled Lines", in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 62, No. 10, pp. 2316-2324, Oct. 2014. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2014.2345352>.
- [13] G. Chaudhary, J. Jeong, P. Kim, Y. Jeong, and J. Lim, "Compact negative group delay circuit using defected ground structure", 2013 Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings(APMC), Seoul, Korea(South), pp. 22-24, Nov. 2013. <https://doi.org/10.1109/APMC.2013.6695178>.
- [14] G. Chaudhary, Y. Jeong, and J. Lim, "Microstrip Line Negative Group Delay Filters for Microwave Circuits", in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 62, No. 2, pp. 234-243, Feb. 2014. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2013.2295555>.

저자소개

이 희 원 (Hee-Won Lee)



2022년 2월 : 호서대학교
전자디스플레이공학부(공학사)
2022년 3월 ~ 현재 : 호서대학교
전자디스플레이공학과 석사과정
관심분야 : 초고주파 능동·수동
회로, 재구성 회로

윤 원 상 (Won-Sang Yoon)



1997년 2월 : 고려대 전파공학과
(공학사)
1999년 2월 : 고려대 대학원
통신시스템공학과(공학석사)
2010년 8월 : 고려대 대학원
컴퓨터·전파통신공학과(공학박사)
1999년 3월 ~ 2015년 8월 :
한화탈레스(現 한화시스템) 통신연구소 수석연구원
2015년 9월 ~ 현재 : 호서대학교 전자융합공학부 부교수
관심분야 : RF & Microwave transceivers and sensor
systems, Reconfigurable RF & Microwave system
and antennas