



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

博士學位論文

협대역 LTCC 듀플렉서 기반 이동
통신용 쿼드플렉서 구현

濟州大學校 大學院

通信工學科

徐 守 德

2017年 2月

목 차

Abstract	1
I. 서론	3
II. 메타 구조 이론을 이용한 필터 연구	7
1. 메타 구조 기본 이론	7
2. 공진기 간의 유도성 결합을 이용한 통과대역 특성	8
3. 임피던스 정합을 위해 양 끝 단의 공진 회로의 수정	9
4. 격리도 개선을 위한 필터링 기법 추가	9
5. DNG 구조와 ENG 구조의 필터링 특성 비교	10
6. 송수신 사이 격리도 향상을 위한 노치 구조	20
III. LTCC 대역통과 필터 설계	26
1. 공진기 이론	26
2. 공진기 구조	29
3. 대역통과 필터 설계	32
4. 격리도 향상을 위한 노치 구조 추가 설계	40
5. 듀플렉서 설계	49
1) 셀룰러 대역 듀플렉서 설계	49
2) WCDMA 대역 듀플렉서 설계	52
IV. 광대역 다이플렉서 설계	55

1. 광대역 다이플렉서 설계.....	55
1) 셀룰러 대역 설계.....	56
2) WCDMA band 설계.....	60
3) 광대역 다이플렉서 설계.....	64
V. LTCC 제작 공정	68
1. 유전체 및 전극재료.....	68
2. LTCC 적층필터 제조공정.....	69
1) 원료 성형 공정.....	69
1-1) 분쇄 및 분산.....	70
1-2) 탈포 및 에이징.....	70
1-3) 그린시트 성형.....	71
2) 인쇄 및 적층 공정.....	71
2-1) 편칭.....	72
2-2) 비아충진.....	72
2-3) 스크린 인쇄.....	72
2-4) 적층.....	72
2-5) 가압접착.....	73
2-6) 절단.....	73
2-7) 탈바인더.....	73
3) 소성.....	73
3. 저온 소성용 Ag계 전극 페이스트 설정 및 수축거동 분석	74
VI. LTCC 듀플렉서 및 다이플렉서, 쿼드플렉서 제작	79
1. 셀룰러 대역 LTCC 듀플렉서 제작 결과.....	80

1) 셀룰러 대역 LTCC 대역통과 필터 제작 결과.....	80
2) 셀룰러 대역 LTCC 듀플렉서 제작 결과.....	85
2. WCDMA 대역 LTCC 듀플렉서 제작	88
1) WCDMA 대역 LTCC 대역통과 필터 제작 결과.....	88
2) WCDMA 대역 LTCC 듀플렉서 제작 결과.....	91
3. 2중대역 결합 광대역 다이플렉서 제작.....	93
1) 다이플렉서 제작 및 시험 결과.....	93
2) 다이플렉서 설계 결과와 시험 결과 비교 분석.....	97
4. LTCC 듀플렉서와 광대역 다이플렉서를 결합한 쿼드플렉서 제작.....	99
1) 쿼드플렉서 제작 및 측정 결과.....	99
1-1) 셀룰러 대역 수신단 특성.....	100
1-2) 셀룰러 대역 송신단 특성.....	101
1-3) WCDMA 대역 수신단 특성.....	103
1-4) WCDMA 대역 송신단 특성.....	104
2) 설계 결과와 제작 결과 특성 비교.....	105
2-1) 셀룰러 대역 수신단 특성.....	105
2-2) 셀룰러 대역 송신단 특성.....	106
2-3) WCDMA 대역 수신단 특성.....	107
2-4) WCDMA 대역 송신단 특성.....	108
VII. 결론	110
References	113

List of tables

Table 1. Element values of DNG transmission line in cellular band.	11
Table 2. Element values of ENG transmission line in cellular band.	13
Table 3. ENG filter characteristics in cellular band.	15
Table 4. Final ENG transmission line element values in cellular band.	16
Table 5. Element values of DNG transmission line in WCDMA band.	17
Table 6. Element values of ENG transmission line in WCDMA band.	17
Table 7. ENG filter characteristics in WCDMA band.	19
Table 8. Final ENG transmission line element values in WCDMA band.	20
Table 9. Characteristic value of cellular band filter with notch function.	22
Table 10. Element values of ENG transmission line in cellular band.	22
Table 11. Characteristic value of WCDMA band filter with notch function.	24
Table 12. Element values of transmission line in WCDMA.	24
Table 13. Comparison of Q value by resonator structure.	30
Table 14. Q value for cellular and WCDMA by #4 resonator structure.	30
Table 15. Parameter of resonator design for cellular and WCDMA.	31
Table 16. band pass filter specification of low power repeater.	32
Table 17. Characteristic values of cellular band filter.	34
Table 18. Parameters for a designed LTCC filter for cellular band.	35
Table 19. Characteristic values of WCDMA band filter.	37
Table 20. Parameters for a designed LTCC filter WCDMA band.	38
Table 21. Characteristic values of cellular band filter.	42
Table 22. Parameter of LTCC BPF structure with notch function.	43
Table 23. Parameter of LTCC BPF structure with notch function in cellular Tx band. ·	44
Table 24. Characteristic values of WCDMA band filter.	46
Table 25. Parameter of LTCC structure with notch function in WCDMA Rx band. ·	47

Table 26. Parameter of LTCC BPF structure with notch function in WCDMA Tx band .	48
Table 27. Divider designed parameters in cellular band.	50
Table 28. Simulation results of cellular band duplexer.	52
Table 29. Divider designed parameters in WCDMA band.	52
Table 30. Simulation results of WCDMA band duplexer.	54
Table 31. Design specification of broadband diplexer.	56
Table 32. LPF design parameters in cellular band.	60
Table 33. Simulation results of cellular band LPF.	60
Table 34. Simulation results of WCDMA band BPF.	64
Table 35. BPF design parameters in WCDMA band.	64
Table 36. Divider design parameters for broadband diplexer.	64
Table 37. Broadband diplexer simulation results.	67
Table 38. Characteristic of N1 electrode paste.	68
Table 39. Percentage of contraction before and after sintering of LTCC multi-layer filter. ...	74
Table 40. Development summary for LTCC filter.	79
Table 41. Target specification for quad-plexer.	80
Table 42. Characteristics of cellular band pass filters.	84
Table 43. Measured and simulated results of cellular band duplexer.	87
Table 44. Measured and simulated results of WCDMA band BPF.	91
Table 45. Measured and simulated results of WCDMA band duplexer.	93
Table 46. Measured and simulated results in cellular Rx band pass of quad-plexer. ...	106
Table 47. Measured and simulated results in cellular Tx band pass of quad-plexer. ·	107
Table 48. Measured and simulated results in WCDMA Rx band pass of quad-plexer.	108
Table 49. Measured and simulated results in WCDMA Tx band pass of quad-plexer.	109

List of Figures

Fig. 1. DNG equivalent circuit.	7
Fig. 2. SNG equivalent circuit.	7
Fig. 3. A general inductively coupled-resonator band pass filter schematic.	8
Fig. 4. The ' π ' model periodic structure of ENG equivalent circuit.	9
Fig. 5. Filter structure using ENG equivalent model.	9
Fig. 6. Filter schematic with notch function for isolation improvement.	10
Fig. 7. Filter schematic using metamaterial transmission line.	11
Fig. 8. Filter characteristics by value of DNG transmission line in Cellular band. ·	12
Fig. 9. Comparison of passband characteristics between DNG and ENG transmission line in cellular band.	13
Fig. 10. Filter characteristics by value of ENG transmission line in Cellular band. ···	14
Fig. 11. ENG filter characteristics in cellular band.	15
Fig. 12. Filter characteristics by value of transmission line model in WCDMA band. ··	18
Fig. 13. ENG filter characteristics in WCDMA band.	19
Fig. 14. Cross coupling schematics.	21
Fig. 15. Band pass filter schematics with notch function.	22
Fig. 16. Characteristics of ENG TL band pass filter with notch function in cellular band.	23
Fig. 17. Characteristics of ENG TL band pass filter with notch function in WCDMA band.	25
Fig. 18. Short-circuited $\lambda/4$ transmission line and parallel LC resonator equivalent circuit. ···	26
Fig. 19. Stripline geometry and shorted $\lambda/4$ stripline resonator.	27
Fig. 20. Short-circuited $\lambda/4$ resonator structures.	20
Fig. 21. Different resonator configurations.	29

Fig. 22. Resonator structure for cellular band.	31
Fig. 23. Resonator structure for WCDMA band.	31
Fig. 24. Proposed BPF structure and ENG equivalent circuit.	32
Fig. 25. Filter structure and simulation results in cellular band.	34
Fig. 26. LTCC filter structure for cellular band.	35
Fig. 27. Filter structure and simulation results in WCDMA band.	36
Fig. 28. LTCC filter structure for WCDMA band.	37
Fig. 29. Freq. shift according to epsilon value change.	39
Fig. 30. Structure and simulation results of cellular band filter with notch function. ·	42
Fig. 31. LTCC BPF structure with notch function in cellular Rx band.	43
Fig. 32. LTCC BPF structure with notch function in cellular Tx band.	44
Fig. 33. Structure and simulation results of WCDMA band filter with notch function. ·	46
Fig. 34. LTCC BPF structure with notch function in WCDMA Rx band.	47
Fig. 35. LTCC BPF structure with notch function in WCDMA Tx band.	48
Fig. 36. Duplexer divider structure.	49
Fig. 37. Variation of reflection coefficient by length of output port in cellular band. ...	51
Fig. 38. Simulation results of cellular band duplexer.	51
Fig. 39. Variation of reflection coefficient by length of output port in WCDMA band. ...	53
Fig. 40. Simulation results of WCDMA band duplexer.	54
Fig. 41. Diagram of combination of broadband diplexer and LTCC diplexer.	55
Fig. 42. Step impedance LPF structure.	56
Fig. 43. High-impedance short-line element.	56
Fig. 44. Low-impedance short-line element.	57
Fig. 45. Cellular band LPF structure and simulation results.	59
Fig. 46. Direct coupling structure of comb-line resonator.	61
Fig. 47. WCDMA band BPF structure and simulation results.	63
Fig. 48. Broadband diplexer divider structure.	65
Fig. 49. Variation of reflection coefficient by length of output port.	66
Fig. 50. Broadband diplexer structure and simulation results.	67

Fig. 51. Dielectric and electrode paste.	69
Fig. 52. Material forming process.	70
Fig. 53. Punching and calcination process.	71
Fig. 54. Punched green sheets.	72
Fig. 55. Sintering furnace	74
Fig. 56. Process of ceramic sintering.	75
Fig. 57. Sintering shrinkage behavior of Ag plated electrode and LTCC ceramic. ...	75
Fig. 58. Sintering shrinkage behavior of Ag plated electrode and LTCC ceramic after ceramic additive addition.	76
Fig. 59. Flatness of Ag plated electrode.	78
Fig. 60. Drawing of Tx and Rx cellular band LTCC filter.	81
Fig. 61. Pattern of cross section for cellular band LTCC filter.	82
Fig. 62. Fabricated cellular band BPF.	83
Fig. 63. Comparison between simulation and fabrication characteristics of cellular BPF.	84
Fig. 64. Fabricated cellular band duplexer.	85
Fig. 65. Measured and simulated results of cellular band duplexer.	86
Fig. 66. Measured harmonic characteristic of the fabricated cellular band duplexer. ..	87
Fig. 67. Drawing of LTCC by stage.	88
Fig. 68. Drawing of LTCC plate.	89
Fig. 69. Fabricated LTCC BPFs for WCDMA band.	89
Fig. 70. Measured and simulated results of WCDMA band BPF.	90
Fig. 71. Fabricated WCDMA band duplexer.	92
Fig. 72. Measured and simulated results of WCDMA band duplexer.	93
Fig. 73. Fabricated broadband diplexer.	94
Fig. 74. Measured results in two passband of the fabricated broadband diplexer.	95
Fig. 75. Isolation characteristics of the fabricated broadband diplexer.	96
Fig. 76. Measured and simulation results of the designed broadband diplexer. ...	98
Fig. 77. Fabricated quad-plexer.	100

Fig. 78. Cellular Rx band pass characteristics of quad-plexer.	101
Fig. 79. Cellular Tx band pass characteristics of quad-plexer.	102
Fig. 80. WCDMA Rx band pass characteristics of quad-plexer.	103
Fig. 81. WCDMA Tx band pass characteristics of quad-plexer.	105
Fig. 82. Measured and simulated results in cellular Rx band pass of quad-plexer. ...	106
Fig. 83. Measured and simulated results in cellular Tx band pass of quad-plexer. ..	107
Fig. 84. Measured and simulated results in WCDMA Rx band pass of quad-plexer. ..	108
Fig. 85. Measured and simulated results in WCDMA Tx band pass of quad-plexer. ..	109

Abstract

In this thesis, a narrow band pass filter(BPF) with less than 3% bandwidth has been realized by using LTCC (low temperature co-fired ceramic) technology. A quad-plexer has been designed and manufactured by combining a diplexer with four LTCC BPFs operating in the cellular band of 0.8 GHz and the WCDMA band of 2.1 GHz.

The LTCC band pass filter has been designed by adopting an ENG model in a classical DNG constitution based on meta-structure theory. Since the bandwidth of the proposed band pass filter in this thesis is less than 3%, it has a very narrow band feature as compared with conventional LTCC band pass filters. Therefore, the filter has been designed through optimization based on the ENG model in order to maximize efficiency. Three types of dielectric substances are used in the LTCC filter manufacturing process. Of the three, the NH20M4 substance has been chosen. This substance has a relatively low dielectric constant of 21, and allowing the low insertion loss and low frequency deviation. The electrode material contains more than 80% of metal content in order to raise the Q value of the resonator. During the production process, it displays optimal characteristics when the electrode membrane is coated twice using the 7251S electrodes by Namics. Therefore, in the final manufacturing process of the LTCC filter, it has been manufactured utilizing NH20M4 dielectric powder and coating the 7251S electrodes twice.

For a duplexer structure, two LTCC band pass filters have been implemented with capacitive $\lambda/4$ resonators designed to get optimal Q value through various forms of research. Specifically, the LTCC filters have been developed with a LTCC material with a permittivity of 21 and loss of 0.001

The Q value of 338 for the resonator in the cellular and WCDMA band. The designed filters are 5th order SMD (surface mount device) modules with

a size of $22 \times 10 \times 3 \text{ mm}^3$. The manufactured duplexer operating in cellular band is composed of two LTCC filters, which they have passband of 0.824~0.849 GHz and 0.869~0.894 GHz in transmit and receive frequency band, by conjunction them with a microstrip line combiner. This duplexer shows 4.5 dB loss and over 45 dB isolation.

The Q value of the resonators in the WCDMA band LTCC duplexer is greater than 300 and the filters are 5th order with a size of $20 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$. In addition, the duplexer operating in the WCDMA band is composed of two LTCC filters, which they have passband of 2.11~2.17 GHz transmit and 1.92~2.17 GHz receive frequencies. Using the same structure as the cellular band duplexer, this duplexer shows 2.5 dB loss and over 60 dB isolation.

In order to combine the two LTCC duplexers on a printed circuit board, a diplexer consisting of a LPF in the low frequency band and a broadband band pass filter in high frequency band is realized by using a microstrip technology.

By combining the diplexer with the two LTCC duplexers, a quad-plexer has been developed to displaying desired performance. In addition, the quad-plexer has been measured by utilizing a VNA (vector network analyzer) and has been assessed for use in mobile communications. The measurement results show loss of 5 dB and isolation greater than 53dB in the cellular band and 3dB and 60 dB in the WCDMA band respectively. In conclusion, the compact size and displayed performance make it suitable for mobile RRH (remote radio head) of femto-cell BTS (base transceiver station) applications.

I. 서론

최근 세계적으로 주파수 재분배로 인한 이동통신 사업자들의 사용 주파수가 다양화 되면서 이동통신 환경이 다중대역 통신망으로 바뀌고 있다. 그리고 가입자들이 스마트 기기를 이용한 정보 사용량을 기하급수적으로 늘려감에 따라 최근 선진국을 중심으로 빅데이터(big data) 처리를 위한 초고속 통신망을 나날이 고도화시켜 운용하고 있는 추세이다. 따라서 최근의 이동통신망은 큰 셀 영역을 관할하던 기존의 RRH (remote radio head) 기지국 형태에서 작은 셀 영역(small cell)을 서비스하는 소형 기지국이나 인터넷 회선을 이용하는 초소형 펌토셀(femtocell) 기지국들로 대체되고 있다. 그리고 앞으로 이러한 초소형 기지국들에 대한 수요는 더욱 폭발적으로 증가할 것으로 예상되고 있다. 현재까지는 이동통신 기지국에 수십~수백 와트급 기지국용 캐비티 필터들이 주로 사용되고 있지만 점점 소형 기지국에 적합한 5W 급 필터들로 수요가 바뀔 것으로 예상되며, 그에 따른 소형 집적 수동 소자를 구현할 수 있는 LTCC (low temperature cofired ceramic) 부품에 대한 연구는 더욱더 활발히 진행돼 나갈 것이다[1-4]. 하지만 그 동안 연구된 LTCC 필터들은 광대역용으로 개발되었으며, 주로 군수용이나 특수 통신용으로 개발되어 사용되어 왔다. 이동통신용 LTCC 필터에 대한 제품들은 무라타, TDK와 같은 글로벌 기업들이 취급하고 있는데 대부분의 제품들이 비대역폭이 10% 이상인 광대역 특성을 갖는다. LTCC 필터 제품들은 일반적으로 크기가 수 mm 정도이고 대량생산을 목표로 하기 때문에 공정효율이 좋아야 한다. 따라서 유전율이 높고 통과대역이 넓을수록 공정효율이 좋아지게 되는데, 그런 이유로 인하여 기존에 개발된 LTCC 필터들은 대부분 설계 대역폭이 넓고 필터 차수가 3차 이하이며 인접 대역의 감쇄 특성이 완만하다[5-8]. 즉 협대역이면서 인접 감쇄특성까지 고려한 LTCC 필터는 차수가 늘어날 뿐만 아니라 삽입손실이 커지고 크거나 공정 효율이 좋지 않다[9-15]. 그러나 이동통신용으로는 주로 비대역폭이 3% 이내인 협대역 필터가 사용되기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다. 이동통신 주파수에서 송신과 수신대역을 분리시키는 소출력 필터들은 대부분 모노블럭 필터나 SAW 필터를 사용한다.

그러나 5W 급 기지국에는 mW 급에 적합한 SAW 필터는 사용할 수 없고, 모노블럭 필터는 비교적 크기가 클 뿐 아니라 제품을 모두 튜닝공정을 통하여 원하는 특성을 맞추기 때문에 문제가 된다. 이러한 원인으로 인해 협대역 LTCC 필터에 대한 개발은 반드시 필요하고, 더불어 이 협대역 필터를 이용하여 다중대역을 처리하는 멀티플렉서 개발도 동시에 병행되어야 한다. 일반적으로 멀티플렉서는 특정한 채널로 들어오는 원치 않는 신호들을 억제하기 위한 필터링 기능을 갖는 여러 개의 공진기나 부분 대역 필터들로 복합 구성되어 있다. 기존의 연구 문헌에 보고된 마이크로스트립 선로를 이용한 멀티플렉서 구성 형태들은 매니폴드(manifold)[16], 개방루프 (open-loop)[17-19], 계단임피던스 (stepped-impedance) [20, 21], 다중모드 (multi-mode)[22, 23] 방법 등이 있다. 이러한 형태로 고안된 멀티플렉서들은 여러 포트들이 동시에 결합되는 접합부에 추가적인 매칭 회로를 연결하여 다중대역 정합기능을 부여하고, 포트들 간에 격리도를 높이도록 설계하여야 한다. 그러나 마이크로스트립 선로로 구성된 멀티플렉서는 부분적으로 포트 정합이 가능하다고 할지라도, 다중대역을 모두 만족시키는 정합회로를 구성하기가 매우 힘들고 통과대역이 협소해지며 삽입손실이 커지는 단점이 있다[24-27].

본 논문에서는 LTCC 용 소재중 유전율이 20인 비교적 낮은 유전율 소재를 이용하여 비대역폭이 3% 이하이면서 필터 차수가 5차인 협대역 LTCC 필터를 개발하고, 이를 이용한 듀플렉서와 마이크로스트립 선로를 이용한 다이플렉서를 결합하여 4중 대역을 처리하는 멀티플렉서(quad-plexer)를 구현하고자 한다. 특히, LTCC를 이용한 듀플렉서의 기능과 성능을 향상시키기 위해서는 협대역 특성 뿐 아니라 송수신 대역을 크게 분리시킬 수 있도록 차단 특성을 키우는 것도 매우 중요하다. 일반적으로 높은 차단 특성을 구현하기 위해서는 필터의 차수를 증가시켜야 하지만 삽입손실 특성 또한 증가하는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 교차 결합 원리(cross coupling)를 이용한다. 교차 결합 원리는 인접하지 않은 공진기 간에 결합 구조를 추가하는 것으로 필터 차수를 증가시키지 않고도 통과대역과 인접한 주파수 대역에서 차단 특성을 개선할 수 있는 방법이다. 이를 위해서는 저손실 LTCC 매질에 대한 연구와 함께 높은 Q 값을 갖는 공진기 연구가 선행되어야 한다. 이러한 LTCC 필터 설계를 보다 효율적으로 진행하기 위해 기존의 삽입손실법 대신 메타 구조의 등가회로와 최적화 기법을 활용한다. 기본적인 메타 구조인

DNG(double negative) 모델은 RH 영역과 LH 영역 전체를 통과대역 특성으로 갖는데 반해, 변형된 메타 구조인 ENG(epsilon negative) 모델은 RH 영역만 통과대역을 형성하기 때문에 ENG 모델을 통해 보다 협대역 특성을 갖도록 설계할 수 있다[28, 29]. 하지만 메타 구조는 주기 구조로 통과대역 내의 반사손실 특성이 일반적인 필터들과 달리 중심 주파수에서 멀어질수록 커진다. 따라서 일반적인 필터들과 유사한 반사손실 특성을 갖도록 하기 위해서 최적화 기법을 적용한다. 이를 통해 주기구조인 ENG 모델을 비주기구조인 ENG 모델로 변형하여 협대역 필터를 설계한다. 한편, 구현된 두 서비스 대역의 듀플렉서를 하나로 묶을 수 있는 다이플렉서는 마이크로스트립 선로의 T-정합(T-matching) 기법과 각 서비스 대역을 통과시키고 그 외 대역은 차단할 수 있는 필터들을 조합하여 구현할 수 있다. 각 서비스 대역을 통과시키는 필터로는 저역통과 필터와 고역통과 필터, 또는 비교적 넓은 통과대역 특성을 갖는 대역통과 필터들이 활용되며, 낮은 삽입손실 특성을 갖도록 설계한다. 이렇게 설계된 필터들은 마이크로스트립 선로의 접합지점에서 차단 대역에 대해 각각 개방 특성이 되도록 구현함으로써 다이플렉서를 구현할 수 있다. 이를 통해 마이크로스트립 선로를 이용한 다이플렉서는 이와 같은 이동통신 주파수 대역별 LTCC 듀플렉서들과 여러 종류의 필터를 하나의 기판에 집적하는 집적 모듈로도 사용할 수 있으며, 다목적 용도로 사용되는 다중대역 소출력 기지국을 위한 표준화 제품으로서도 필요하게 될 것이다. 본 논문에서 설계하고자하는 멀티플렉서는 0.824~0.894 GHz인 셀룰러 대역과 1.920~2.170 GHz인 WCDMA 대역에서 동작한다. 설계된 멀티플렉서는 LTCC 듀플렉서와 다이플렉서를 결합하여 최종 제품인 쿼드플렉서를 구현하며, 셀룰러 대역에서는 5 dB 이하의 손실과 50 dB 이상의 송수신 분리도를 갖도록 제작하고 WCDMA 대역에서는 3 dB 이하의 손실과 60 dB 이상의 양호한 송수신 분리도가 나오도록 개발한다. 설계 과정에 LC회로 및 PCB 회로 설계는 상용 해석툴인 ADS(Advanced Development System)를 이용하여 해석하고, 공진기 Q 값 산출 및 LTCC 대역통과 필터 구조 해석은 상용 전자계 해석툴인 CST Microwave studio를 이용하여 해석한다. 최종적으로 쿼드플렉서 대하여 설계 결과와 제품 시험 결과를 비교하고 분석한다.

본 논문의 구성은 2장에서 메타 구조 이론을 적용하여 필터를 설계하는 이론과 방법에 대하여 연구하고, 3장은 ENG 구조를 기반으로 LTCC 대역통과 필터를 설

계하며, 4장은 LTCC 필터를 결합시키는 광대역 다이플렉서를 설계하고, 5장은 제품 제작을 위한 LTCC 제작 공정에 대하여 다루며, 6장은 LTCC 듀플렉서 및 다이플렉서, 쿼드플렉서 제작에 대해 서술하고, 마지막으로 7장에서 결론을 맺는다.

II. 메타 구조 이론을 이용한 필터 연구

1. 메타 구조 기본 이론

일반적인 메타 구조 전송선로는 그림 1과 같이 직렬 LC 공진 회로와 병렬 LC 공진 회로로 구성되어 있다. 이 등가 회로 구조는 DNG (double negative) 특성을 나타낸다.[30] DNG 등가 회로는 LH(left handed) 특성을 갖는 직렬 커패시터 C_L 또는 병렬 인덕터 L_L 중 하나를 제거함으로써 SNG (single negative) 특성을 갖도록 수정할 수 있다.

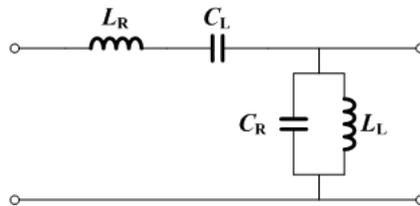


Fig. 1. DNG equivalent circuit.

그림 2(a)와 같이 ENG (epsilon negative) 모델은 그림 1에서 직렬 커패시터 C_L 을 제거함으로써 구현할 수 있다. 따라서 직렬 L_R 과 병렬 공진기의 조합으로 구성된다. 반면 MNG (mu negative) 모델은 그림 2(b)처럼 병렬 인덕터 L_L 을 제거함으로써 직렬 공진기와 병렬 커패시터로 이루어진다[28, 29].

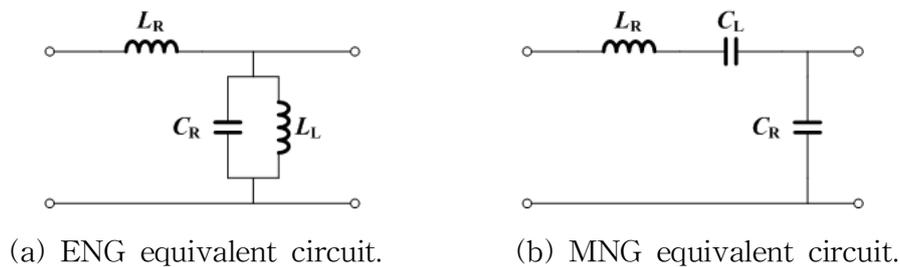


Fig. 2. SNG equivalent circuit.

DNG 모델은 RH (right hand) 영역과 LH 영역이 모두 존재하지만, ENG와 MNG 등의 SNG 모델에서는 LH 영역이 존재하지 않고 모두 RH 영역만을 갖게 된다. 그러

나 SNG 모델은 일반적인 RH 모델과 달리 비선형적인 β 와 ω 곡선 특성을 갖기 때문에 DNG와 유사하지만 0 Hz가 아닌 임의의 주파수에서 0차 공진 특성을 발생시킬 수 있고, 기본 공진 주파수에 대한 체배 주파수 제어가 훨씬 용이하다.

2. 공진기 간의 유도성 결합을 이용한 통과대역 특성

일반적인 대역통과 필터 이론에서 $\lambda/4$ 길이를 갖는 단락된 병렬 전송선로는 그림 3과 같이 병렬 공진회로로 모델링된다. 여기서 각 공진기의 LC 값과 유도성 결합 양은 필터 성능에 따라 결정된다. 본 연구에서는 기존의 필터 이론 대신 메타 구조 이론으로부터 각 공진기의 소자 값과 결합 양을 찾는다.

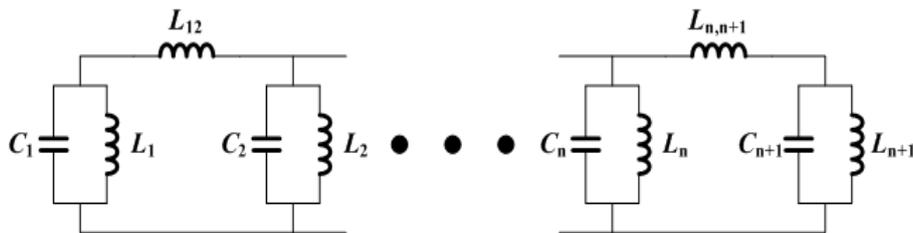
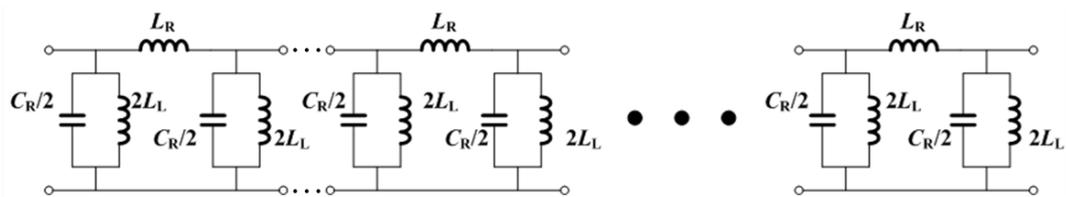
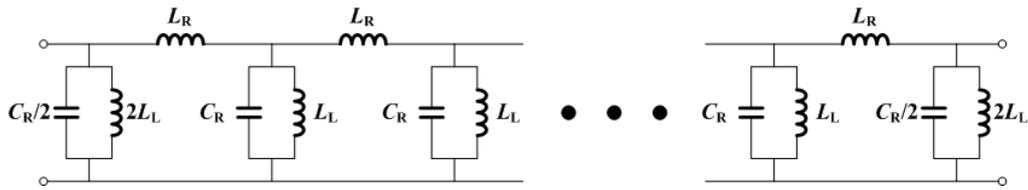


Fig. 3. A general inductively coupled-resonator band pass filter schematic.

ENG 모델을 π 형 모델로 변환하여 주기 구조로 연결하면 그림 4와 같이 구성할 수 있으며, 일반적인 대역통과 필터 구조와 유사한 등가 회로를 구현 가능함을 확인할 수 있다. 여기서 필터의 공진 회로 및 유도성 결합양은 필터 설계이론 따르지만, ENG 모델은 양 끝 종단 공진기를 제외하고는 모두 같은 공진회로로 구성되어 있기 때문에, 이를 필터로 이용할 경우 보다 나은 특성을 얻기 위하여 비대칭 주기구조로 변경할 수 있다.



(a) 'π' model unit-cell periodic structure.



(b) ' π ' model periodic structure.

Fig. 4. The ' π ' model periodic structure of ENG equivalent circuit.

3. 임피던스 정합을 위해 양 끝 단의 공진 회로의 수정

필터에 신호를 입력하는 전송선로의 특성 임피던스는 일반적으로 50 Ω 이므로, 설계된 필터의 입력단과 출력단의 임피던스 또한 50 Ω 에 정합이 되어야 한다. 하지만 공진기의 주기 구조에서 입출력단의 임피던스를 50 Ω 으로 맞추는 것은 쉽지 않다. 따라서 필터의 입력단과 출력단에는 임피던스 정합을 위한 정합회로가 추가되고, 첫 단의 공진기와 마지막 단의 공진기는 정합회로를 포함한 등가 공진 회로로 수정할 수 있다. 따라서 그림 5와 같이 첫 단과 마지막 단의 커패시터 $C_R/2$ 와 $2L_L$ 수정된 커패시터 C_f 와 수정된 인덕터 L_f 로 바뀌게 된다.

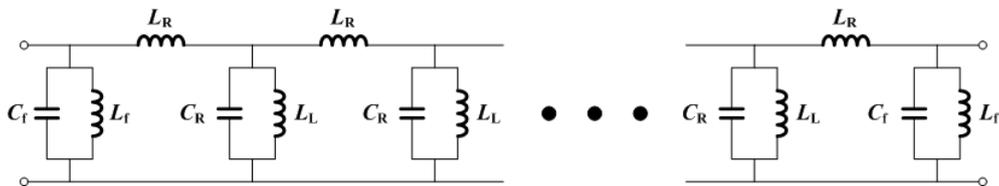


Fig. 5. Filter structure using ENG equivalent model.

4. 격리도 개선을 위한 필터링 기법 추가

대역통과 필터를 이용해서 듀플렉서를 구현하기 위해서는 인접 대역에서의 차단 특성을 개선시켜야 한다. 가장 많이 사용되는 방법 중 하나가 노치 필터링 기법을 이용하는 것이다. 듀플렉서를 구현하기 위해 사용되는 두 개의 대역통과 필터 중, 낮은 주파수 대역을 담당하는 필터의 경우에는 낮은 차단 주파수 대역보다 높은 차단 주파수 대역에서 차단 특성을 개선시킬 수 있도록 그림 6과 같이 노치 기능을 갖는 소자를

필터회로에 추가시킨다. 차단대역을 증가시키기 위해서는 둘 이상의 주파수에서의 노치 기능을 추가시킴으로써 차단 가능 대역을 넓히게 된다. 하지만 이 경우, 노치 기법으로 인해, 각 공진기의 인덕터 및 커패시터 값과 더불어 공진기 사이의 유도성 결합 정도가 동시에 변하기 때문에 공진기와 유도성 결합에 대한 수정이 필요하다. 이 과정을 거치게 되면 초기의 같은 등가 모델을 갖는 공진기들의 주기 구조가 서로 다른 등가 모델을 갖는 공진기들로 수정하게 된다[30-33].

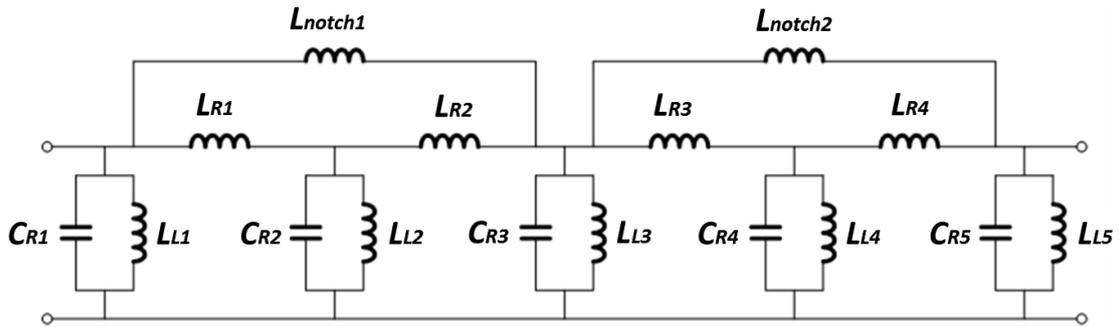


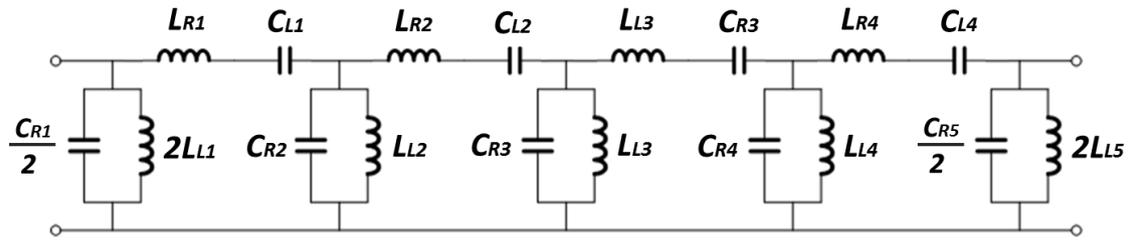
Fig. 6. Filter schematic with notch function for isolation improvement.

5. DNG 구조와 ENG 구조의 필터링 특성 비교

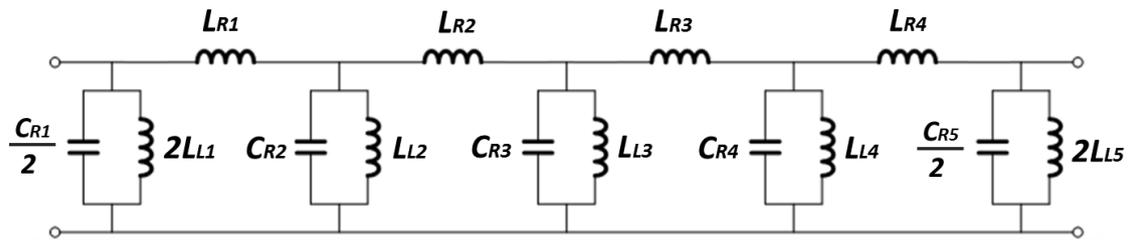
그림 7은 4개의 단위 셀로 구성된 DNG 전송선 구조와 ENG 전송선 구조이다. 각 소자 값을 동일하게 설정하였을 경우, ENG 전송선로는 공진 주파수보다 낮은 주파수 대역인 LH 영역이 차단되기 때문에 DNG 전송선로보다 협대역 구현에 적합하다. 이때 DNG 전송선의 각 소자 값들은 식 (1)의 평형 조건식을 만족하면 통과대역 내에 차단 영역 없이 회로를 구성할 수 있으며, 다양한 소자 조합을 통하여 0차 공진 주파수가 일정하더라도 상하측 차단 주파수는 조합된 소자 값에 따라 바뀌게 되어 대역폭을 변경할 수 있다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \quad (1a)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_R C_L}} = \frac{1}{\sqrt{L_L C_R}} \quad (1b)$$



(a) DNG transmission line schematic.



(b) ENG transmission line schematic.

Fig. 7. Filter schematic using metamaterial transmission line.

식 (1)과 그림 7회로를 이용하여 셀룰러 대역과 WCDMA 대역에서의 필터를 설계할 수 있다. 우선 셀룰러 대역에서의 필터 설계 과정을 살펴보자. 표 1은 0차 공진 주파수인 0.869 GHz에 대해 식 (1)을 만족하는 소자 값들을 4종류로 정리하였다. 그 외에도 많은 소자 값들의 조합이 가능하지만 원하는 대역 특성이 나타나는 조합을 정리하였다.

Table 1. Element values of DNG transmission line in cellular band.

ITEM	$L_{R(1\sim4)}$ [nH]	$C_{R(1\sim5)}$ [pF]	$L_{L(1\sim5)}$ [nH]	$C_{L(1\sim4)}$ [pF]
DNG #1	20	8	4.19	1.68
DNG #2	30	12	2.80	1.12
DNG #3	40	16	2.10	0.84
DNG #4	50	20	1.68	0.67

그림 8은 표 1에 정리된 소자 값들을 그림 7(a)에 적용하여 설계한 DNG 전송선의

필터링 특성이다. 0차 공진 주파수는 0.869 GHz로 일정하지만, L_R 값이 증가할수록 대역폭이 감소함을 확인할 수 있다. 따라서 0차 공진 주파수를 원하는 통과대역 내에 설정하고, L_R 등을 통해 대역폭을 조정하여 원하는 대역통과 필터 특성을 얻을 수 있다.

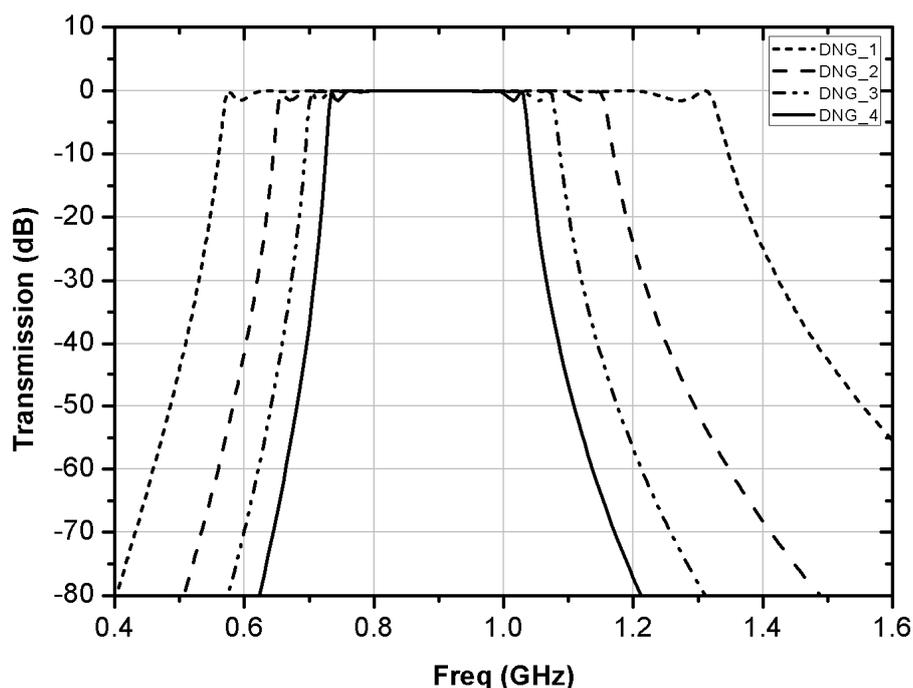


Fig. 8. Filter characteristics by value of DNG transmission line in cellular band.

그림 9는 표 1의 DNG #1과 DNG #1에서 직렬 커패시터 C_L 을 제거한 ENG 전송선 구조의 필터링 특성이다. DNG #1의 통과대역은 0.57~1.3 GHz가 된다. 하지만 ENG 전송선로의 경우에는 통과대역이 0.91~1.13 GHz로 크게 줄어들었음을 확인할 수 있다. 이 경우 LH 영역에서의 통과 특성이 사라지기 때문에 0차 공진 주파수 이하 대역에서 차단 특성이 발생하고, 상측 차단 주파수 또한 낮아지게 되어 보다 좁은 대역만 통과하게 된다. 한편 임피던스 정합 문제와 0차 공진 주파수 천이 현상이 개선되어야 한다.

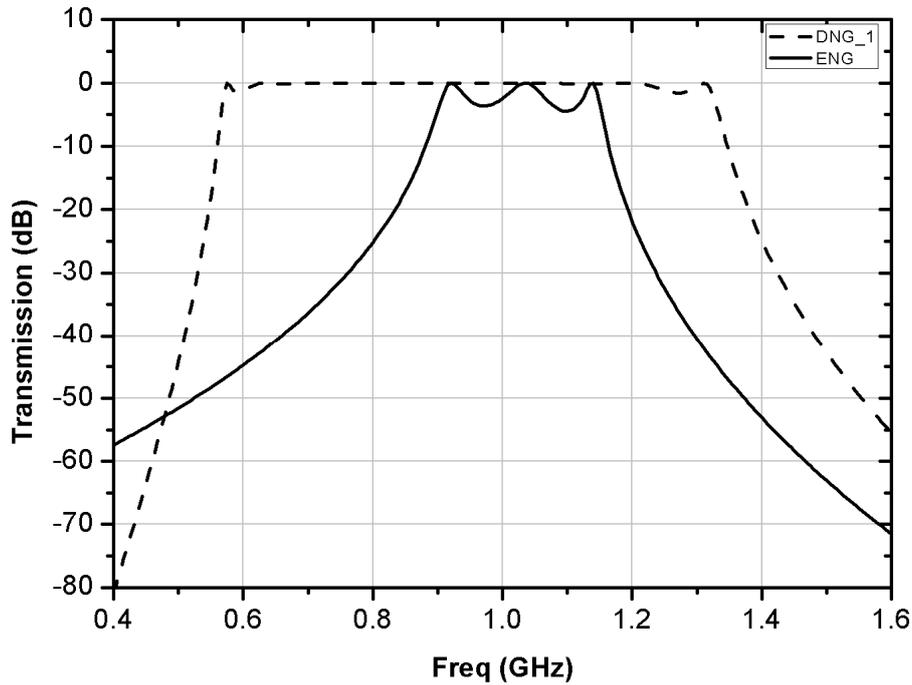


Fig. 9. Comparison of passband characteristics between DNG and ENG transmission line in cellular band.

일반적으로 ENG 전송선로에서 하측 차단 주파수는 0차 공진 주파수로 결정되고, 상측 차단 주파수는 직렬 인덕터 값에 크게 영향을 받는다. 그림 10에서처럼 직렬 인덕터 L_R 의 변화에 따라 평형 조건을 만족하도록 각 소자 값들을 동시에 변화를 시켜 주면 하측 차단 주파수는 같은 주파수로 유지되면서 상측 차단 주파수만 변하며, 이를 통해 통과대역폭을 조정할 수 있다. 따라서 ENG 전송선 구조는 DNG 전송선 구조에 비해 보다 협대역 특성에 유리할 뿐만 아니라 대역폭 조정 또한 편리하다. 이때 각 소자 값들은 표 2와 같다.

Table 2. Element values of ENG transmission line in cellular band.

Division	$L_{R(1\sim4)}$ [nH]	$C_{R(1\sim5)}$ [pF]	$L_{L(1\sim5)}$ [nH]
ENG #1	20	8	4.19
ENG #2	30	12	2.80
ENG #3	40	16	2.10
ENG #4	50	20	1.68

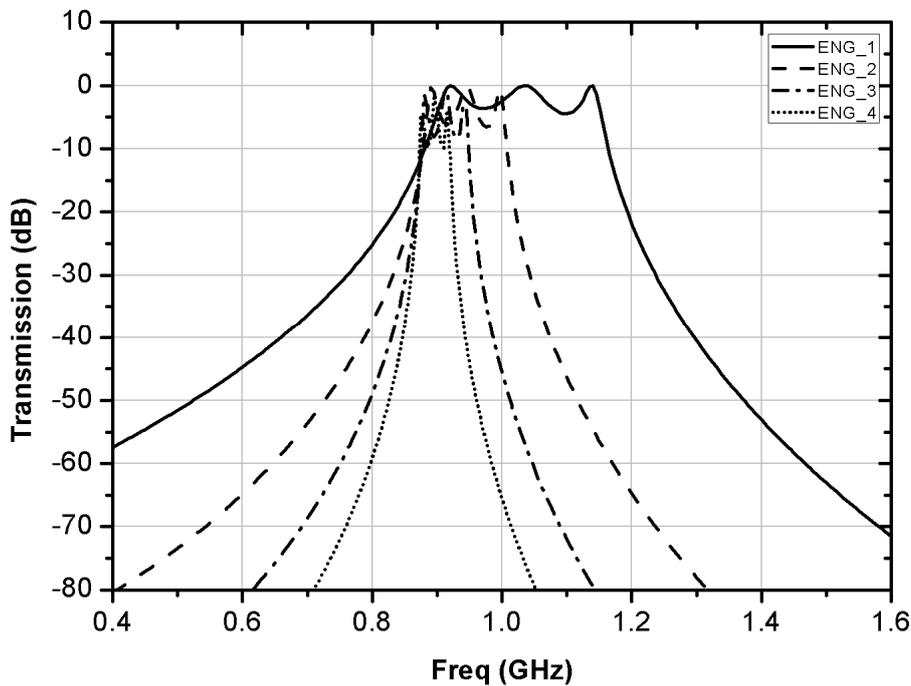
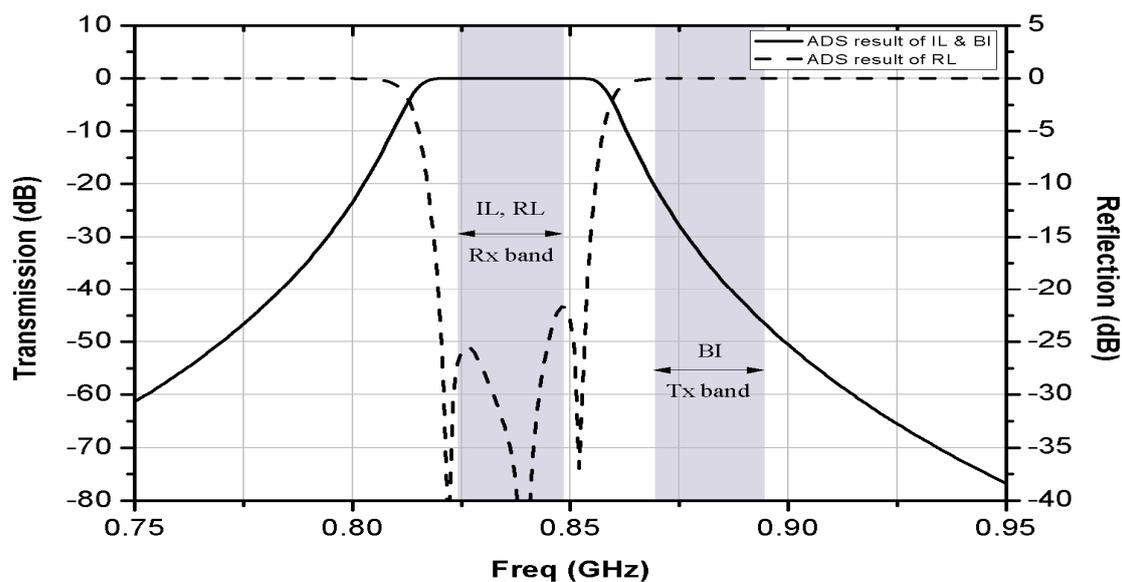


Fig. 10. Filter characteristics by value of ENG transmission line in cellular band.

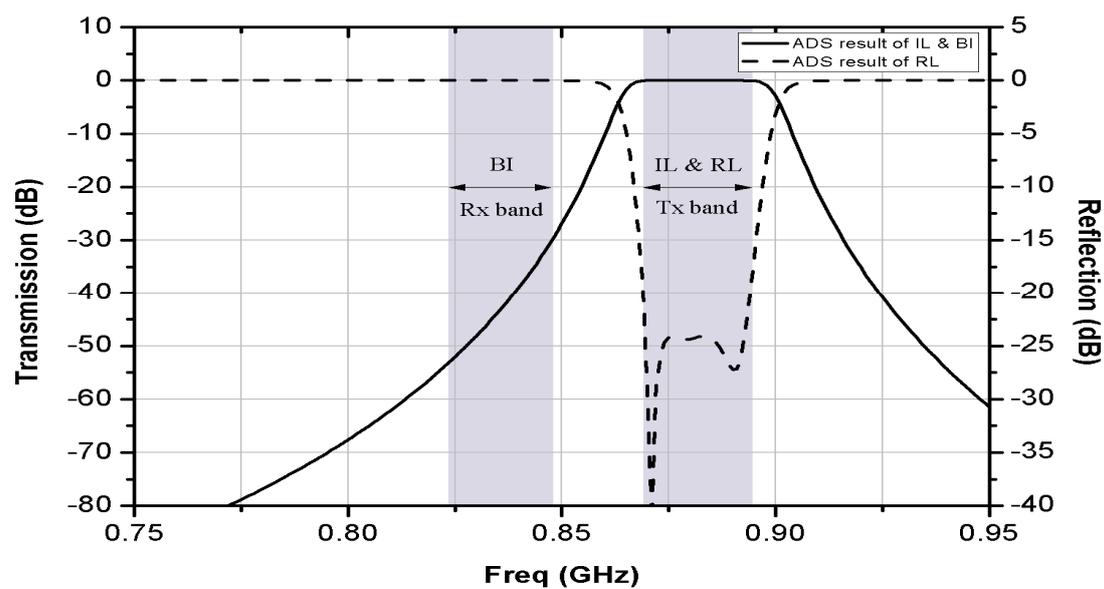
한편, ENG 전송선로의 경우 DNG 전송선로와 달리 임피던스 정합이 잘 이루어지지 않았기 때문에 실제 회로 설계에 적용하기 위해서는 임피던스 정합 과정이 필요하다. 각 소자 값에 임의의 변수인 가중치를 곱하여 최적화 알고리즘 등을 이용하면 쉽게 각 소자 값을 찾을 수 있다. 이 경우 가중치가 추가되더라도 식 (1)은 항상 만족할 수 있도록 하여야 한다. 또한 Tx (transmitter) 대역과 Rx (receiver) 대역에 대해 각 통과대역을 만족하는 ENG 전송선 구조를 이용하면 듀플렉서를 구현할 수 있다. 이때 Tx 대역의 하측 차단 주파수는 0차 공진 주파수이기 때문에 비교적 쉽게 결정이 가능하며, Rx 대역에서의 상측 차단 주파수 대역은 평형 조건 내에서 직렬 인덕터 성분을 통해 조정 가능하다. 그림 11은 ENG 전송선 필터의 최적화 전후에 따른 필터 특성을 보여 주고 있고 특성 값은 표 3에 나타내었다. 설계는 그림 7(b)의 ENG 전송선 회로에 각 소자 값을 표 4의 소자 값을 적용하였다. Rx 대역인 0.824~0.849 GHz와 Tx 대역인 0.869~0.894 GHz에서 반사손실이 20 dB 이상으로 임피던스 정합이 매우 잘 이루어졌음을 확인할 수 있다.

Table 3. ENG filter characteristics in cellular band.

ITEM	Unit	Rx	Tx
Frequency	GHz	0.824~0.849	0.869~0.894
Insertion Loss	dB	0.03	0.04
Return Loss	dB	21.75	20.23
Band Isolation	dB	19.85	28.25



(a) Rx band.



(b) Tx band.

Fig. 11. ENG filter characteristics in cellular band.

Table 4. Final ENG transmission line element values in cellular band.

Division	Rx		Tx	
Resonator #1	L_{L1}	0.719 nH	L_{L1}	0.541 nH
	C_{R1}	53.68 pF	C_{R1}	63.09 pF
Resonator #2	L_{L2}	0.405 nH	L_{L2}	0.313 nH
	C_{R2}	95.28 pF	C_{R2}	109.35 pF
Resonator #3	L_{L3}	0.454 nH	L_{L3}	0.348 nH
	C_{R3}	85.07 pF	C_{R3}	98.33 pF
Resonator #4	L_{L4}	0.405 nH	L_{L4}	0.313 nH
	C_{R4}	95.28 pF	C_{R4}	109.35 pF
Resonator #5	L_{L5}	0.719 nH	L_{L5}	0.541 nH
	C_{R5}	53.68 pF	C_{R5}	63.09 pF
L-coupling #1, #4	L_{R1}, L_{R4}	10.95 nH	L_{R1}, L_{R4}	10.52 nH
L-coupling #2, #3	L_{R2}, L_{R3}	13.61 nH	L_{R2}, L_{R3}	13.98 nH

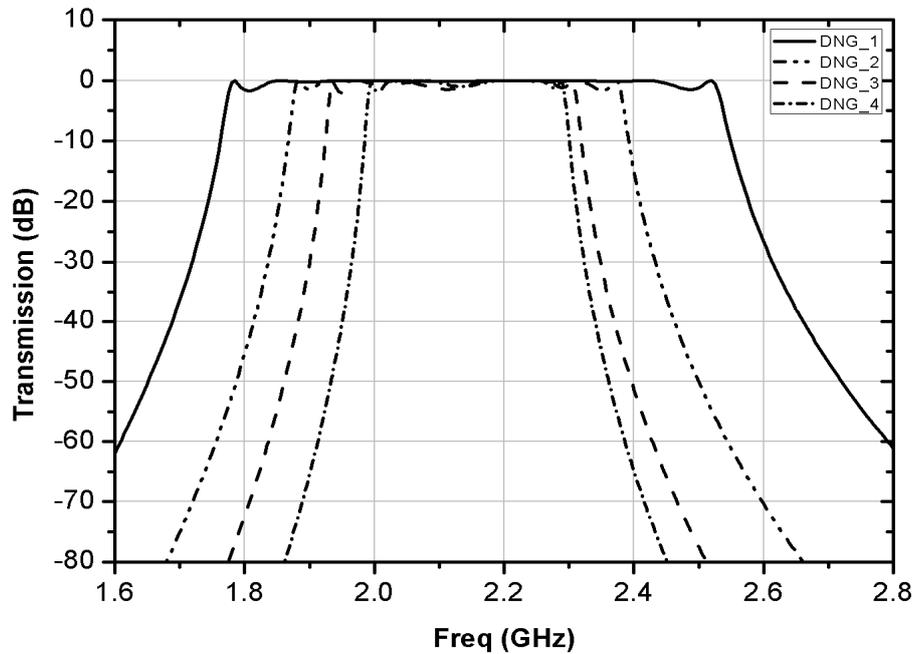
셀룰러 대역에 적용되었던 설계 방법은 WCDMA 대역에도 적용 가능하며, 그림 7 회로에서 DNG 전송선과 ENG 전송선의 각 소자 값은 표 5와 표 6과와 같다. WCDMA 대역의 경우 0차 공진 주파수는 2.11 GHz로 설정하였다. 셀룰러 대역과 달리 WCDMA 대역에서는 ENG 전송선의 경우 DNG 전송선과 동일한 L_R 값을 사용할 경우 매우 좁은 대역폭 특성이 나타나 소자 값에 따른 특성 비교가 쉽지 않아 L_R 의 범위를 조정하였다. 이 경우 각 소자 값은 식 (1)을 만족한다. 표 5과 표 6을 그림 7에 각각 적용하여 소자 값에 따른 특성을 살펴보면 그림 12(a)와 그림 12(b)와 같다. 셀룰러 대역에서와 동일하게 WCDMA 대역에서도 소자 값들의 변화에 따라 대역폭을 조정할 수 있으며, DNG 전송선 구조보다 ENG 전송선 구조가 협대역 특성을 가짐을 확인할 수 있다.

Table 5. Element values of DNG transmission line in WCDMA band.

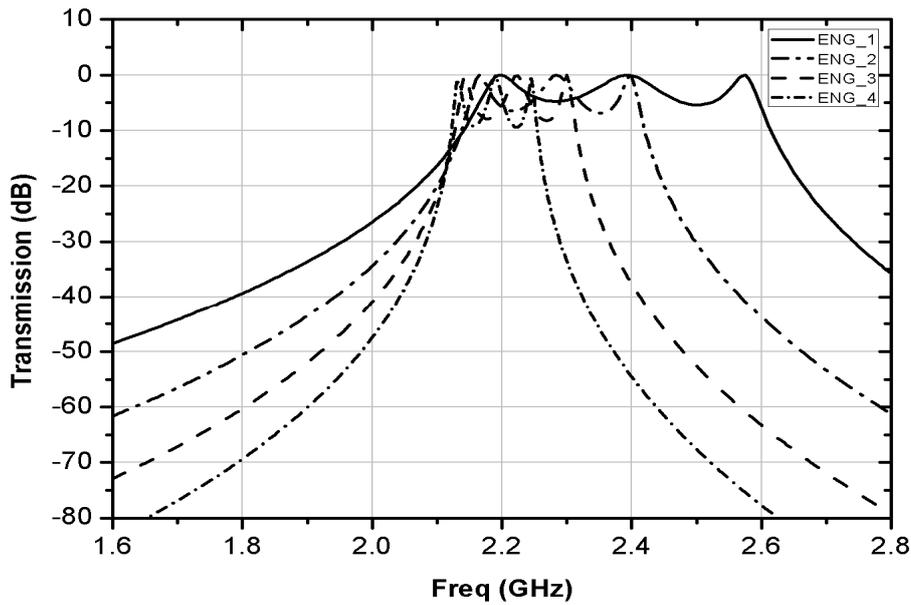
Division	$L_{R(1\sim4)}$ [nH]	$C_{R(1\sim5)}$ [pF]	$L_{L(1\sim5)}$ [nH]	$C_{L(1\sim4)}$ [pF]
DNG #1	20	8	0.71	0.28
DNG #2	30	12	0.47	0.19
DNG #3	40	16	0.36	0.14
DNG #4	50	20	0.28	0.11

Table 6. Element values of ENG transmission line in WCDMA band.

Division	$L_{R(1\sim4)}$ [nH]	$C_{R(1\sim5)}$ [pF]	$L_{L(1\sim5)}$ [nH]
ENG #1	10	4	1.42
ENG #2	13	5.2	1.09
ENG #3	16	6.4	0.89
ENG #4	19	7.6	0.75



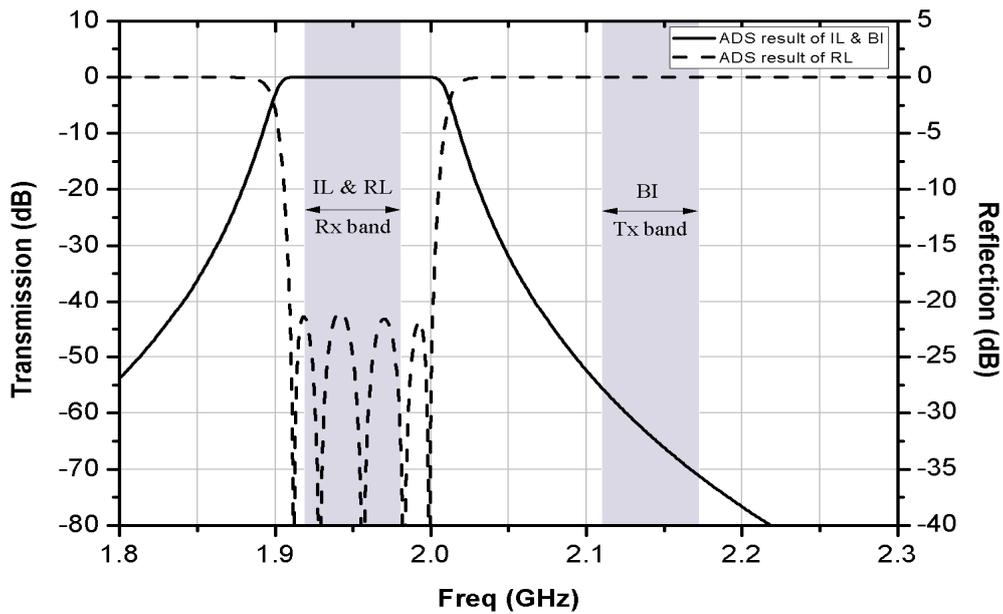
(a) DNG Transmission line.



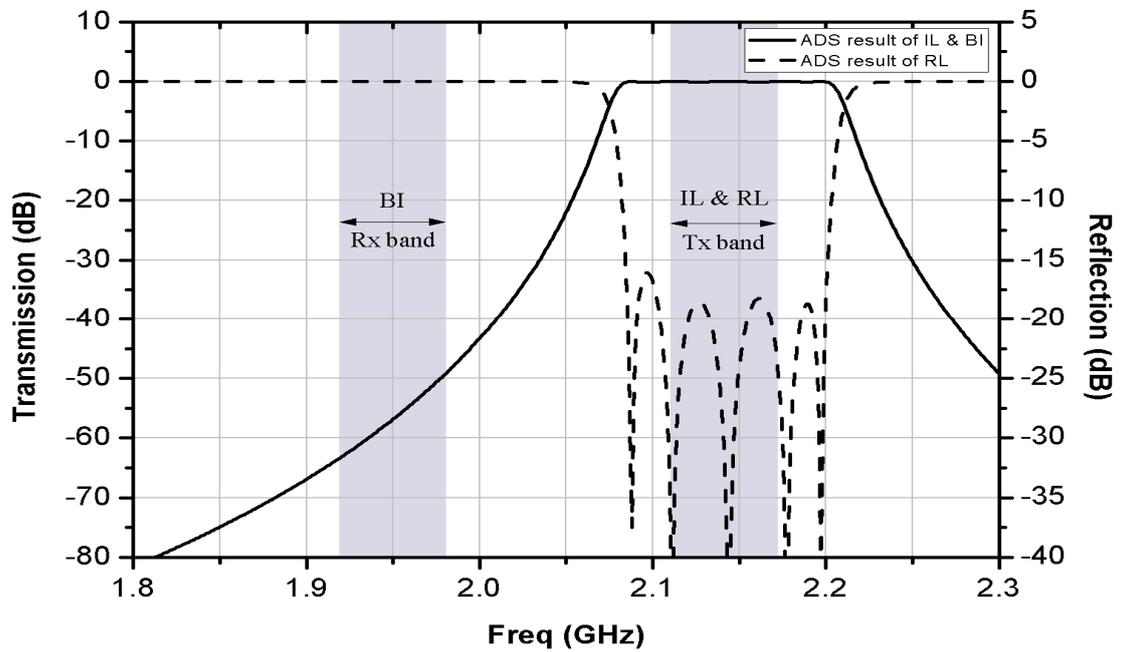
(b) ENG transmission line.

Fig. 12. Filter characteristics by value of transmission line model in WCDMA band.

우선적으로 WCDMA 대역 필터 설계를 위해 최적화 단계를 진행하면, 그림 13과 같이 대역통과 필터 특성을 얻을 수 있다. 이 경우 Rx 대역인 1.92~1.98 GHz와 Tx 대역인 2.11~2.17 GHz에서 임피던스 정합이 매우 잘 이루어졌음을 확인할 수 있다.



(a) Rx band.



(b) Tx band.

Fig. 13. ENG filter characteristics in WCDMA band.

Table 7. ENG filter characteristics in WCDMA band.

ITEM	Unit	Rx	Tx
Frequency	GHz	1.92~1.98	2.11~2.17
Insertion Loss	dB	0.04	0.10
Return Loss	dB	20.93	16.26
Band Isolation	dB	53.0	53.0

Table 8. Final ENG transmission line element values in WCDMA band.

Division	Rx		Tx	
Resonator #1	L _{L1}	0.221 nH	L _{L1}	0.199 nH
	C _{R1}	31.90 pF	C _{R1}	29.59 pF
Resonator #2	L _{L2}	0.107 nH	L _{L2}	0.092 nH
	C _{R2}	65.79 pF	C _{R2}	64.24 pF
Resonator #3	L _{L3}	0.104 nH	L _{L3}	0.084 nH
	C _{R3}	67.89 pF	C _{R3}	69.80 pF
Resonator #4	L _{L4}	0.107 nH	L _{L4}	0.092 nH
	C _{R4}	65.79 pF	C _{R4}	64.24 pF
Resonator #5	L _{L5}	0.221 nH	L _{L5}	0.199 nH
	C _{R5}	31.90 pF	C _{R5}	29.59 pF
L-coupling #1, #4	L _{R1} , L _{R4}	3.45 nH	L _{R1} , L _{R4}	2.87 nH
L-coupling #2, #3	L _{R2} , L _{R3}	3.27 nH	L _{R2} , L _{R3}	2.48 nH

6. 송수신 사이 격리도 향상을 위한 노치 구조

듀플렉서를 구현하기 위해서는 두 주파수 대역에 대한 격리 특성을 향상시켜야 한다. 격리도 향상을 위해서 그림 14와 같이 교차 결합(cross coupling) 기법을 적용할 수 있다. 일반적으로 대역통과 필터들은 인접한 공진기들 사이의 다양한 결합방식으로 구성되는데, 인접 공진기 외의 다른 공진기와의 결합 관계를 교차 결합이라 한다. 이 때 N번째 공진기와 N±2번째 공진기를 유도성 결합(inductive coupling)이 나타나도록 하면 통과대역의 상측 차단대역에서 감쇄극인 노치가 생성되고, 반대로 용량성 결합(capacitive coupling)이 이루어지도록 하면 하측 차단대역에서 노치가 생성되어 각 주파수 대역에 대한 격리도 특성이 개선된다.

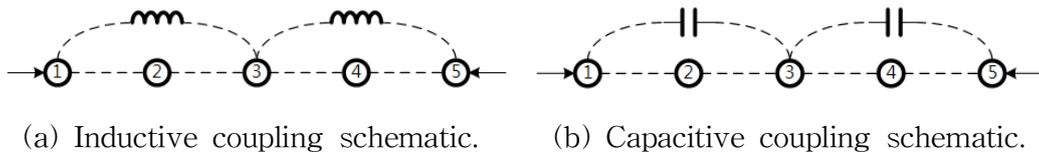
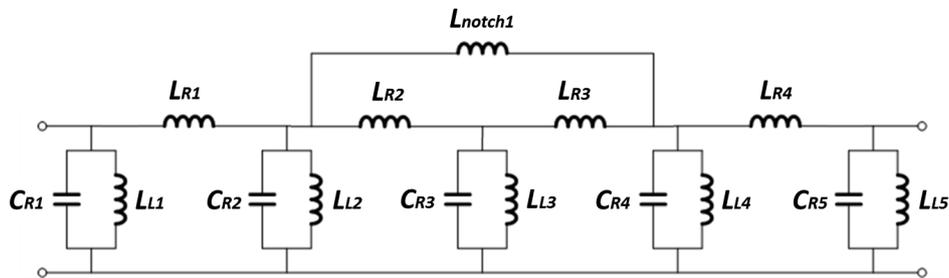


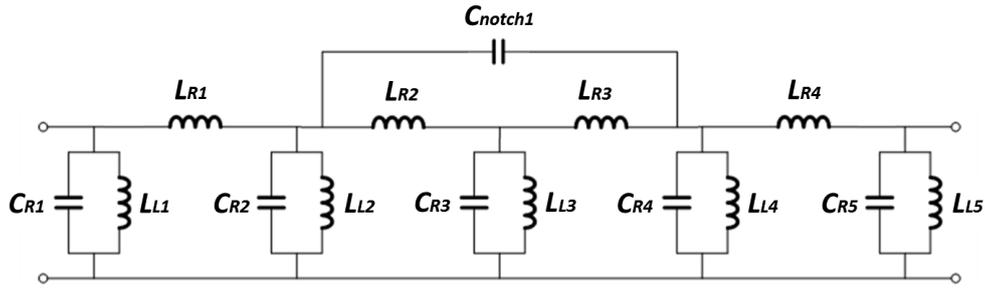
Fig. 14. Cross coupling schematics.

그림 7(b)의 ENG 회로에서 노치 회로를 추가하면 그림 15와 같이 유도성 결합 구조(그림 15(a))와 용량성 결합 구조(그림 15(b))가 추가된 필터 회로가 된다.

Rx 대역 필터는 통과대역인 0.824~0.849 GHz 대역 특성은 유지하면서, Tx 대역인 0.869~0.894 GHz 대역을 차단하기 위해 유도성 결합을 추가하였다. 유도성 결합 구조는 두 번째 공진기와 네 번째 공진기 사이에 인덕터를 추가함으로써 구현할 수 있다. 반대로 Tx 대역 필터는 통과대역인 0.869~0.894 GHz 대역 특성은 유지하면서, Rx 대역을 차단하기 위해 용량성 결합 구조인 커패시터를 두 번째 공진기와 네 번째 공진기 사이에 추가하였다. 이와 같이 두 통과대역 사이의 격리도 향상을 위해 노치 구조가 추가되면 각 셀 사이 임피던스 특성이 변하기 때문에 각 셀의 설계 값들의 수정이 필요하다. 특히 첫 번째 공진기 또는 다섯 번째 공진기와 같이 양 끝 단의 공진기들이 노치 구조와 연결될 경우, 임피던스 특성이 보다 크게 변하기 때문에 주의가 필요하며, 차단대역의 대역폭을 증가시키기 위해 그림 17과 같이 노치 구조를 둘 이상으로 늘릴 수 있다. 본 논문에서는 하나의 노치 구조로 충분한 차단 특성을 얻을 수 있었고, 임피던스 정합의 편리성을 위해 두 번째 공진기와 네 번째 공진기 사이에 노치를 구성한다.



(a) Rx filter.



(b) Tx filter.

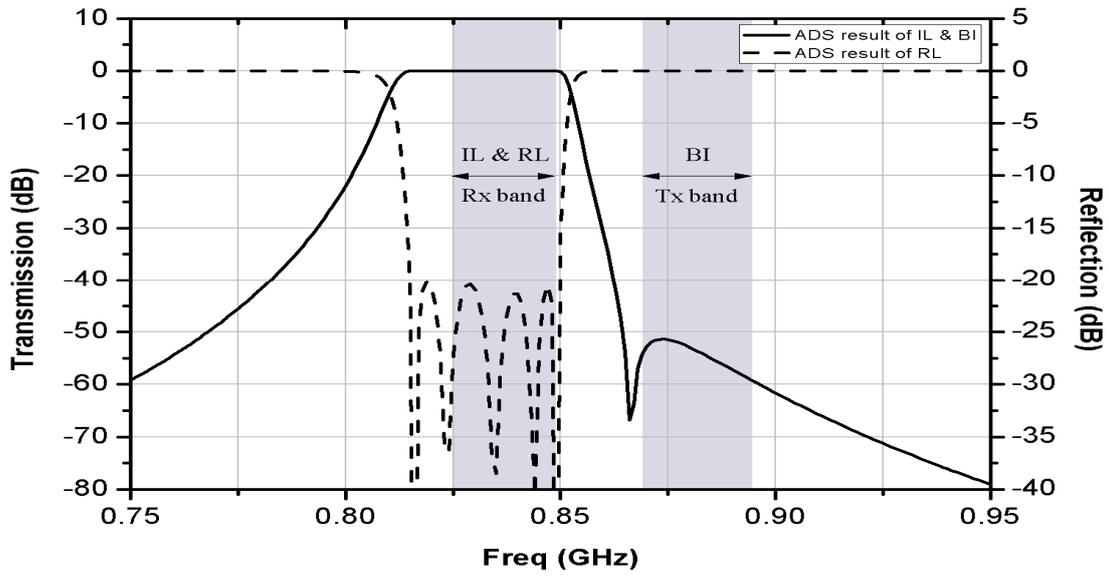
Fig. 15. Band pass filter schematics with notch function.

Table 9. Characteristic value of cellular band filter with notch function.

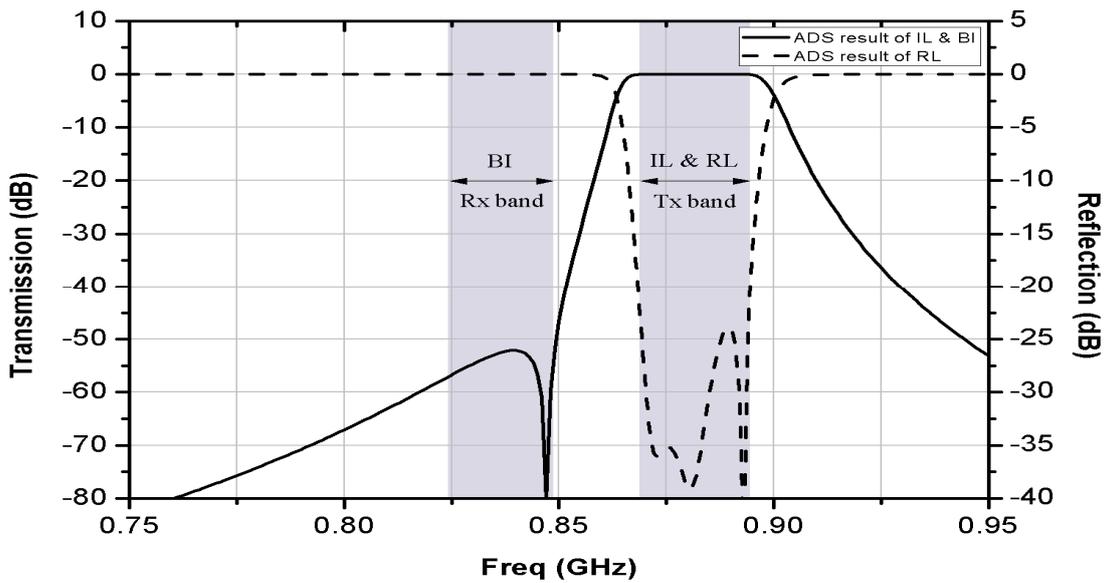
ITEM	Unit	Rx	Tx
Frequency	GHz	0.824~0.849	0.869~0.894
Insertion Loss	dB	0.04	0.02
Return Loss	dB	20.39	23.45
Band Isolation	dB	51.38	51.78

Table 10. Element values of ENG transmission line in cellular band.

Division	Rx		Tx	
Resonator #1	L_{L1}	0.441 nH	L_{L1}	0.496 nH
	C_{R1}	87.49 pF	C_{R1}	68.97 pF
Resonator #2	L_{L2}	0.208 nH	L_{L2}	0.311 nH
	C_{R2}	185.19 pF	C_{R2}	110.13 pF
Resonator #3	L_{L3}	0.397 nH	L_{L3}	0.212 nH
	C_{R3}	97.13 pF	C_{R3}	161.29 pF
Resonator #4	L_{L4}	0.208 nH	L_{L4}	0.311 nH
	C_{R4}	185.19 pF	C_{R4}	110.13 pF
Resonator #5	L_{L5}	0.441 nH	L_{L5}	0.496 nH
	C_{R5}	87.49 pF	C_{R5}	68.97 pF
L-coupling #1, #4	L_{R1}, L_{R4}	7.905 nH	L_{R1}, L_{R4}	10.61 nH
L-coupling #2, #3	L_{R2}, L_{R3}	10.935 nH	L_{R2}, L_{R3}	11.65 nH
Notch	L_{notch1}	21.4 nH	C_{notch1}	0.816 pF



(a) Rx band.



(b) Tx band.

Fig. 16. Characteristics of ENG TL band pass filter with notch function in cellular band.

그림 16은 그림 15에서 표 10의 설계 값으로 시뮬레이션한 결과로써, 노치 구조가 추가된 셀룰러 대역의 수신대역 필터와 송신대역 필터의 특성이다. 특성 값은 표 9에 나타내었고 그림 11과 비교했을 때 통과대역에서의 삽입손실 특성은 큰 변화가 없으며, 각 차단대역 격리 특성이 50 dB 이상 개선됨을 확인할 수 있다.

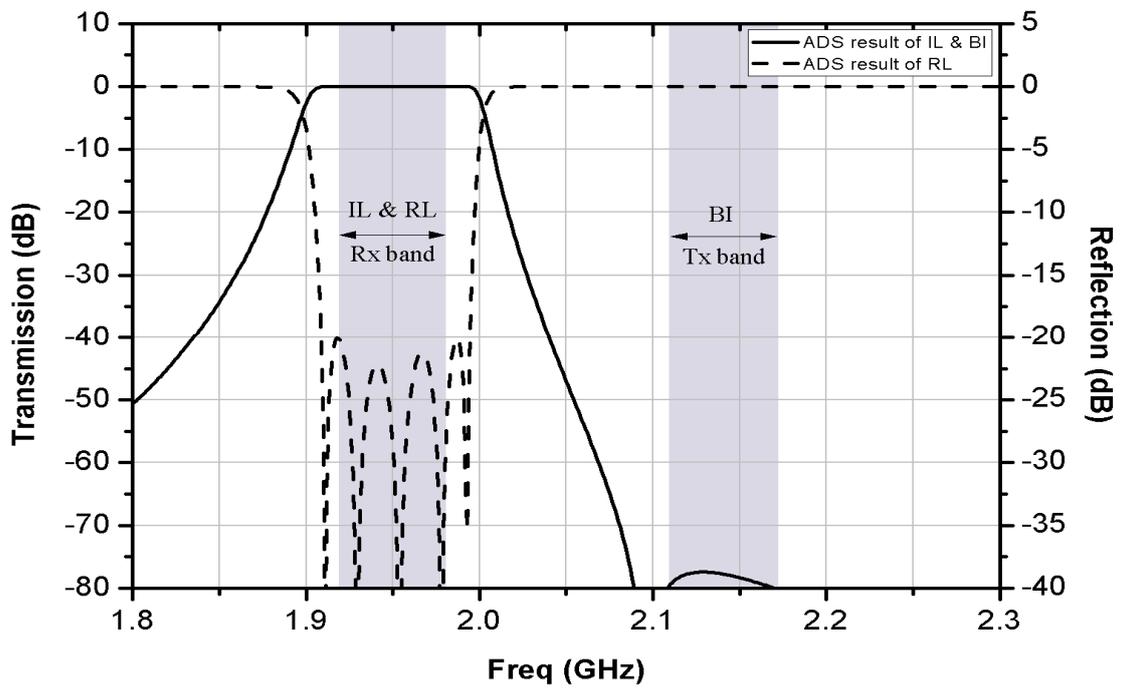
Table 11. Characteristic value of WCDMA band filter with notch function.

ITEM	Unit	Rx	Tx
Frequency	GHz	1.92~1.98	2.11~2.17
Insertion Loss	dB	0.43	0.10
Return Loss	dB	20.0	16.26
Band Isolation	dB	86.4	61.3

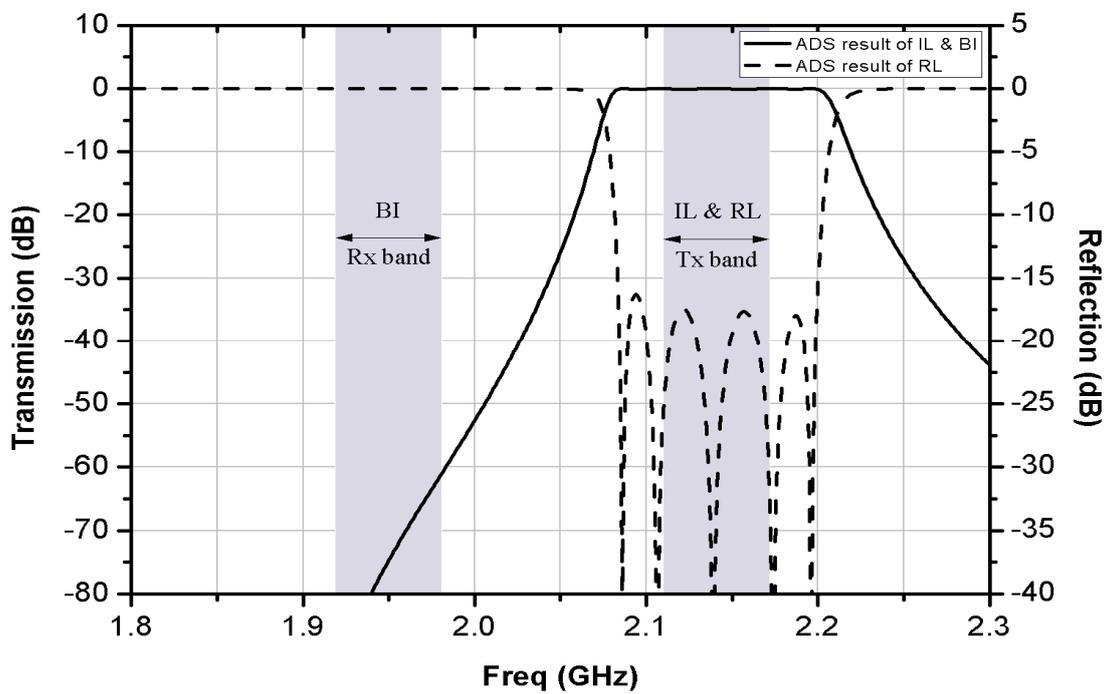
Table 12. Element values of ENG transmission line in WCDMA.

Division	Rx		Tx	
Resonator #1	L_{L1}	0.202 nH	L_{L1}	0.195 nH
	C_{R1}	34.87 pF	C_{R1}	30.19 pF
Resonator #2	L_{L2}	0.097 nH	L_{L2}	0.091 nH
	C_{R2}	72.90 pF	C_{R2}	64.39 pF
Resonator #3	L_{L3}	0.133 nH	L_{L3}	0.571 nH
	C_{R3}	53.02 pF	C_{R3}	10.32 pF
Resonator #4	L_{L4}	0.097 nH	L_{L4}	0.091 nH
	C_{R4}	72.90 pF	C_{R4}	64.39 pF
Resonator #5	L_{L5}	0.202 nH	L_{L5}	0.195 nH
	C_{R5}	34.87 pF	C_{R5}	30.19 pF
L-coupling #1, #4	L_{R1}, L_{R4}	3.43 nH	L_{R1}, L_{R4}	2.846 nH
L-coupling #2, #3	L_{R2}, L_{R3}	3.872 nH	L_{R2}, L_{R3}	2.094 nH
Notch	L_{notch1}	17.12 nH	C_{notch1}	0.44 pF

그림 15 구조는 WCDMA 대역에도 그대로 적용 가능하다. 그림 17은 표 12의 소자 값을 그림 15의 회로 구조를 적용하여 시뮬레이션 한 결과이다. 노치구조가 없을 때에 대한 결과인 그림 13과 비교하면, 각 필터의 통과대역 특성은 큰 변화가 없으나 차단 대역 격리 특성은 표 11과 같이 60 dB 이상을 얻을 수 있다.



(a) Rx band.



(b) Tx band.

Fig. 17. Characteristics of ENG TL band pass filter with notch function in WCDMA band.

Ⅲ. LTCC 대역통과 필터 설계

대역통과 필터의 성능 중에 가장 중요한 부분은 크게 두 가지로 통과대역 내의 삽입손실 특성과 저지대역에서의 감쇄특성이다. 앞에서 다룬 대역통과 필터에 대한 내용은 무손실 조건으로 해석이 되었고 실제 특성은 손실 부분이 고려되어야만 제작 특성에 가까운 삽입손실 특성을 예측할 수 있다. 대부분 대역통과 필터의 삽입손실은 각 공진기의 저항 성분에 의해 결정이 되고, 이 저항 성분은 공진기의 Q 값에 반비례적인 영향을 미친다. 따라서 개별 공진기의 Q 값을 알면 전체 회로 즉, 설계하고자 하는 대역통과 필터의 삽입손실 특성을 예측할 수 있다.

1. 공진기 이론

공진기는 필터 설계에서 동작 주파수, 통과대역에서의 삽입손실 및 차단대역에서의 감쇄 특성 등을 결정하는데 있어 가장 중요한 역할을 하며, 필터 설계의 기본이다. 일반적으로 공진기는 구조 및 동작 원리에 따라 직렬 LC 또는 병렬 LC 회로로 등가화 가능하며, 공진기를 이용한 필터 설계에서는 주로 병렬 LC 등가 회로를 활용한다. 마이크로파 회로에서 대역통과 필터에 사용되는 가장 대표적인 공진기는 단락된 $\lambda/4$ 전송선로 구조로 병렬 LC 공진 회로로 표현할 수 있으며, 공진기의 손실 특성은 L과 직렬과 연결된 저항 R을 추가하여 나타낼 수 있다.

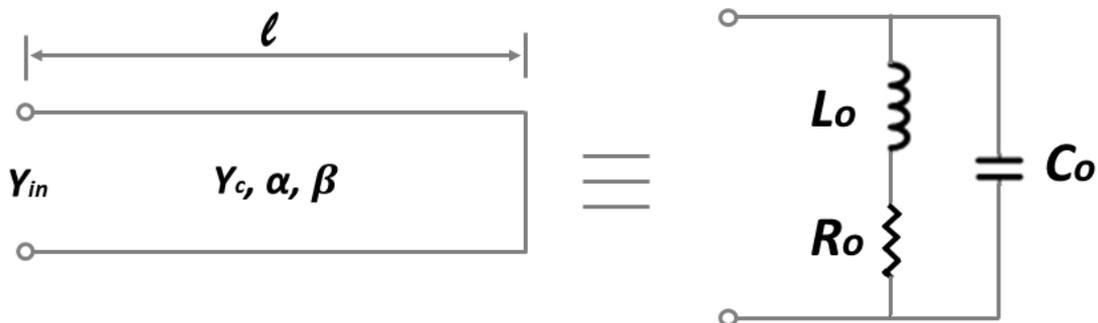
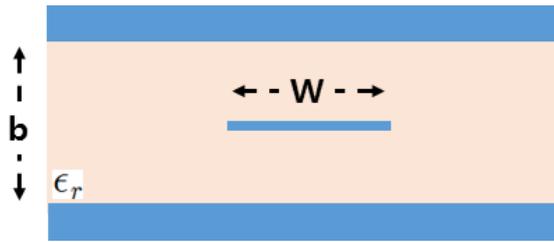
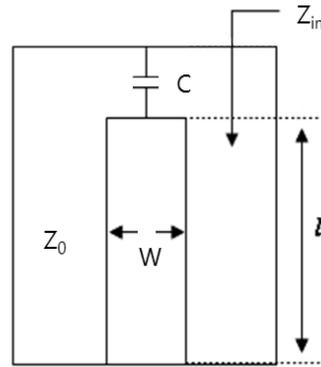


Fig. 18. Short-circuited $\lambda/4$ transmission line and parallel LC resonator equivalent circuit.

그림 18은 단락된 $\lambda/4$ 전송선로와 이를 표현한 병렬 공진기 등가 회로를 나타낸다. 우선 단락된 $\lambda/4$ 전송선로의 입력 임피던스를 살펴보자. 본 논문에서 사용하고 자하는 공진기 구조는 그림 19와 같이 스트립라인 구조이므로 $\lambda/4$ 스트립라인 단락 공진기 이론을 적용한다[34].



(a) Stripline geometry.



(b) Shorted $\lambda/4$ stripline resonator.

Fig. 19. Stripline geometry and shorted $\lambda/4$ stripline resonator.

위와 같은 공진기에서 $0 < l < \lambda/4$ 인 경우 입력 임피던스 Z_{in} 은 식 (2)와 같다.

$$Z_{in} = Z_0 \tanh(\alpha + j\beta)l = R + jwL \quad (2)$$

여기서 공진기의 특성임피던스 Z_0 는 그림 20에서 ϵ_r 이 20, W 가 2 mm, b 가 3 mm 일 때 식 (3)으로부터 약 19Ω 정도 이다.

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{b}{W+0.441b} \quad (3)$$

식 (2)에서 위상정수와 감쇄상수는 다음과 같다.

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4)$$

$$\alpha = \alpha_d + \alpha_c (Np/m), \quad (\alpha_d : \text{유전체감쇄상수}, \alpha_c : \text{도체감쇄상수}) \quad (5)$$

여기서 각 감쇄 상수는 식 (6), (7)과 같고, 식 (8)로 도체의 표면 저항을 구할 수 있다.

$$\alpha_d = k \tan \frac{\delta}{2}, \quad k = \frac{2\pi f \sqrt{\epsilon_r}}{c} \quad (m^{-1}) \quad (6)$$

$$\alpha_c = \frac{2.7 \times 10^{-3} R_s \epsilon_r Z_0}{30\pi(b-t)} \left(1 + \frac{2W}{b-t} + \frac{1}{\pi} \frac{b+t}{b-t} \ln\left(\frac{2b-t}{t}\right)\right), \quad (t: \text{선로두께}) \quad (7)$$

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma}}, \quad (\sigma = 6.17 \times 10^7 \text{ s/m}) \quad (8)$$

공진기의 Q 값은 공진기에서 손실된 에너지와 축적된 에너지의 비로 나타낼 수 있기 때문에 식 (2)로부터 식 (9)와 같이 입력 임피던스의 실수부와 허수부 값을 알면 식 (10)으로부터 공진기의 Q 값을 구할 수 있다.

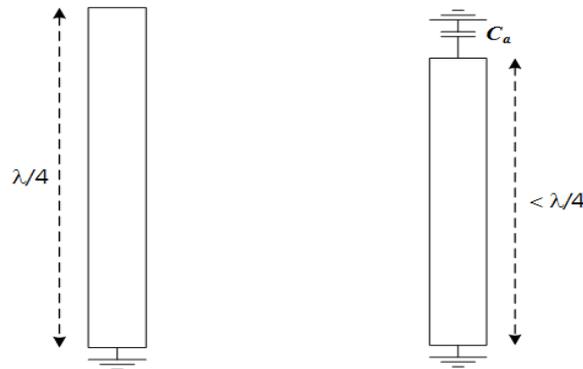
$$R = \text{Re}[Z_{in}], \quad \omega L = \text{Im}[Z_{in}] \quad (9)$$

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (10)$$

그림 19(b)처럼 단순 스트립라인 공진기 구조에서는 식 (9)와 식 (10)을 이용하여 공진기 Q 값을 구할 수 있지만 실제 LTCC공진기 구조는 다소 복잡하므로 수치해석법을 이용하여야 정확한 Q 값을 구할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 다양한 공진기 구조에 대해 CST 전자계 해석 툴을 이용하여 Q 값을 산출하였다.

2. 공진기 구조

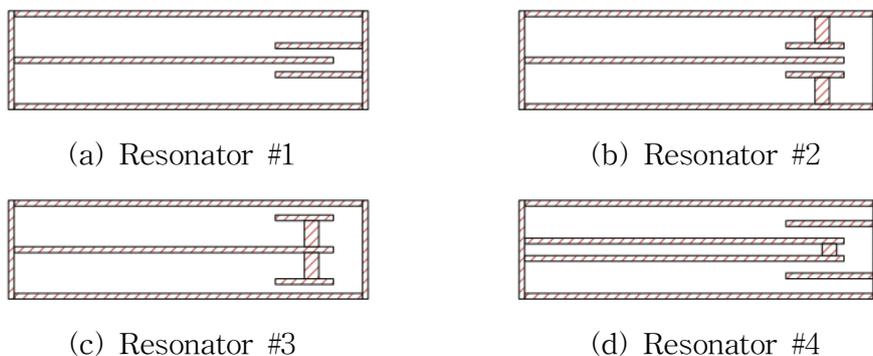
$\lambda/4$ 길이를 갖는 단락 스테브는 LC 병렬 공진 구조를 가지며 대역통과 특성을 갖는다. 그림 20에서와 같이 공진기 소형화를 위해 단락된 종단 반대편의 개방된 종단에 커패시터를 추가할 수 있다. 추가된 커패시터 C_a 값이 커질수록 공진기 크기를 줄일 수 있지만 Q 값이 낮아지기 때문에 소형화와 함께 삽입손실 특성 또한 고려되어야 한다. 일반적으로 스테브는 선로로 구현하고, C_a 는 인터디지털 커패시터(interdigital capacitor)나 MIM (metal-insulator-metal) 커패시터 등으로 구현할 수 있다.



(a) General $\lambda/4$ resonator. (b) Capacitor loaded resonator.

Fig. 20. Short-circuited $\lambda/4$ resonator structures.

LTCC의 경우 공진기는 스트립 선로로 구현된다. 단락된 종단은 LTCC의 측면 접지면과 연결하고, 개방 종단의 커패시터는 둘 이상의 도체판으로 구현한다. 여기서 다양한 조합에 따른 공진기들의 Q 값을 분석한 후 필터 설계에 활용한다.



(a) Resonator #1

(b) Resonator #2

(c) Resonator #3

(d) Resonator #4

Fig. 21. Different resonator configurations.

그림 21은 여러 가지 공진기 구조중 Q 값이 280이상이 되는 4가지 공진기 유형을 나열 하였다. CST 시뮬레이션 툴을 이용하여 Rx 대역의 중심주파수인 0.836 GHz에서의 공진기들의 Q 값을 구하면 표 13과 같다. 여기서 각 공진기는 유전율 21.5이고 6 mm × 12 mm × 3 mm의 크기를 갖는 유전체 중앙에 구현된다.

Table 13. Comparison of Q value by resonator structure.

Resonator	Resonator #1	Resonator #2	Resonator #3	Resonator #4
Q	324	282	288	338

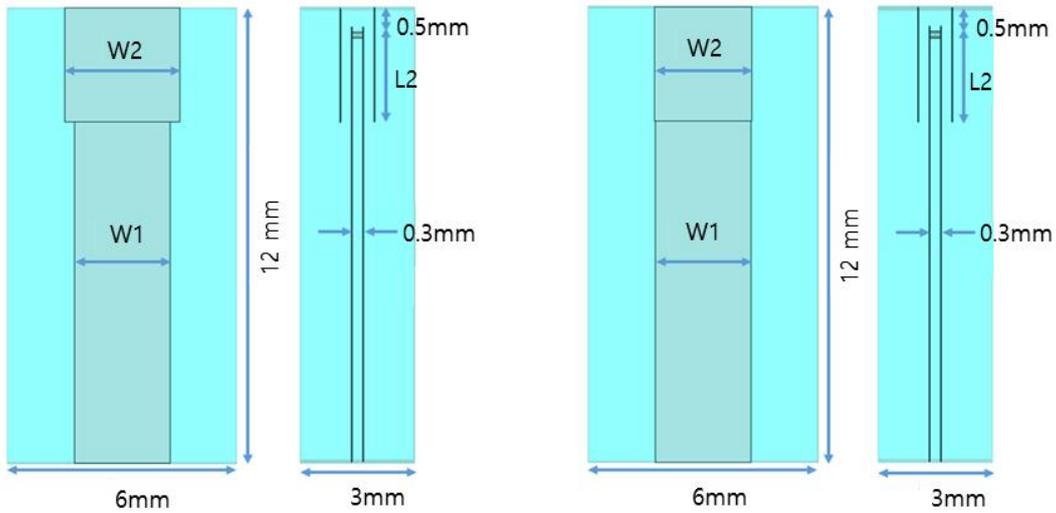
표 13의 결과로부터 필터 설계에 가장 적합한 공진기 구조는 Q 값이 가장 높은 공진기 #4이다. 따라서 각 대역별 대역통과 필터는 공진기 #4 구조를 이용하여 설계한다. 공진기 #4를 이용하여 WCDMA 대역에서는 시뮬레이션 툴을 이용하여 Rx 대역과 Tx 대역의 중심주파수인 1.95 GHz와 2.14 GHz에서의 각 공진기의 Q 값은 314와 328이다. 여기서 각 공진기는 유전율 21.5이고 6 mm × 5 mm × 3 mm의 크기를 갖는 유전체 중앙에 구현되었다. 각 대역별 공진기 크기는 표 14, 표 15 및 그림 22, 그림 23과 같다. 이때 각 선로 및 구성 요소들 사이 간격은 0.3 mm로 고정하였다.

Table 14. Q value for cellular and WCDMA by #4 resonator structure.

Band	Cellular		WCDMA	
	Rx	Tx	Rx	Tx
Center frequency	0.836 GHz	0.881 GHz	1.95 GHz	2.14 GHz
Q	338	342	314	328
Epsilon	21.5			
Resonator size	6 mm × 12 mm × 3 mm		6 mm × 5 mm × 3 mm	

Table 15. Parameter of resonator design for cellular and WCDMA. [mm]

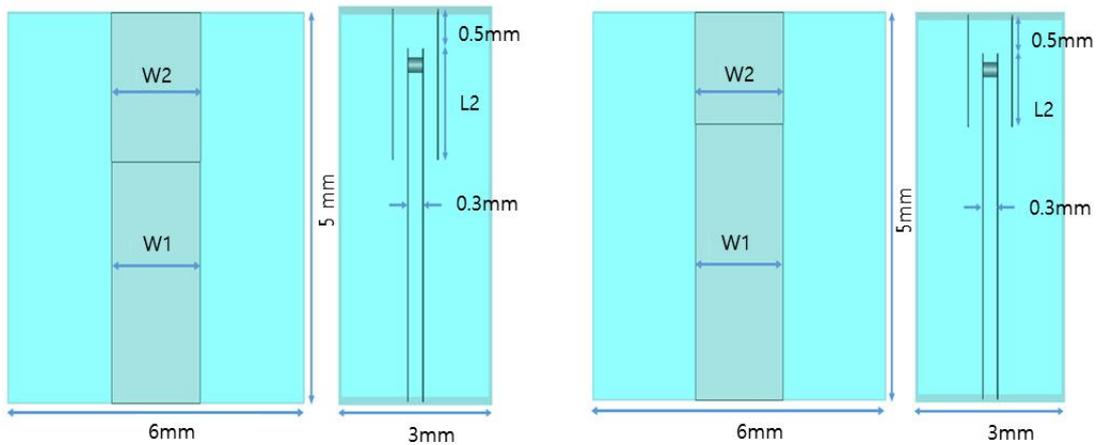
Band	Cellular		WCDMA	
	Rx	Tx	Rx	Tx
W1	2.5	2.5	1.8	1.8
W2	3.0	2.54	1.8	1.8
L2	2.5	2.5	1.41	0.94



(a) Rx band.

(b) Tx band.

Fig. 22. Resonator structure for Cellular band.



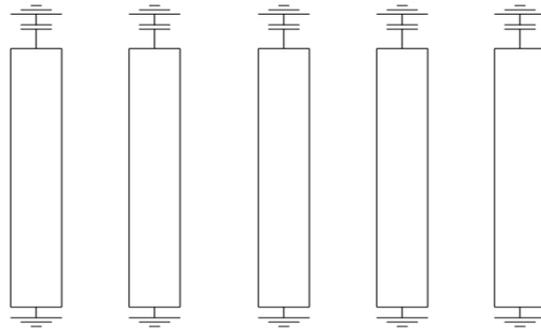
(a) Rx band.

(b) Tx band.

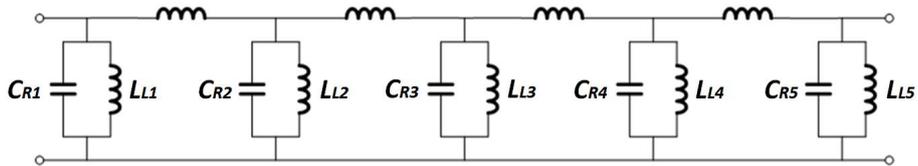
Fig. 23. Resonator structure for WCDMA band.

3. 대역통과 필터 설계

그림 22와 그림 23의 공진기를 이용하여 그림 24와 같이 대역통과 필터를 설계 한다. 기본적으로 공진기는 병렬 LC 공진 특성을 갖고 있으며, 공진기들 사이를 자체 결합 구조로 설계함으로써 등가적으로 직렬 인덕턴스를 갖게 된다. 따라서 제안된 필터 구조는 그림 24의 ENG 등가회로와 같이 구현된다. 이때 각 공진기 및 직렬 인덕터 값 들은 표 3의 설계된 값들을 활용할 수 있으며, 각 값들에 해당하는 공진기 크기 및 자 계결합 정도를 조정하여 필터 설계를 진행한다.



(a) Proposed BPF structure.



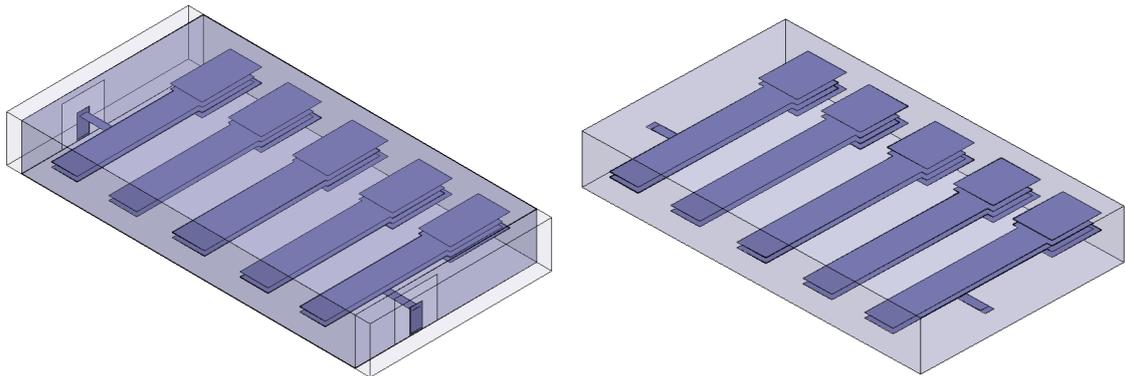
(b) ENG equivalent circuit.

Fig. 24. Proposed BPF structure and ENG equivalent circuit.

Table 16. Band pass filter specification of low power repeater.

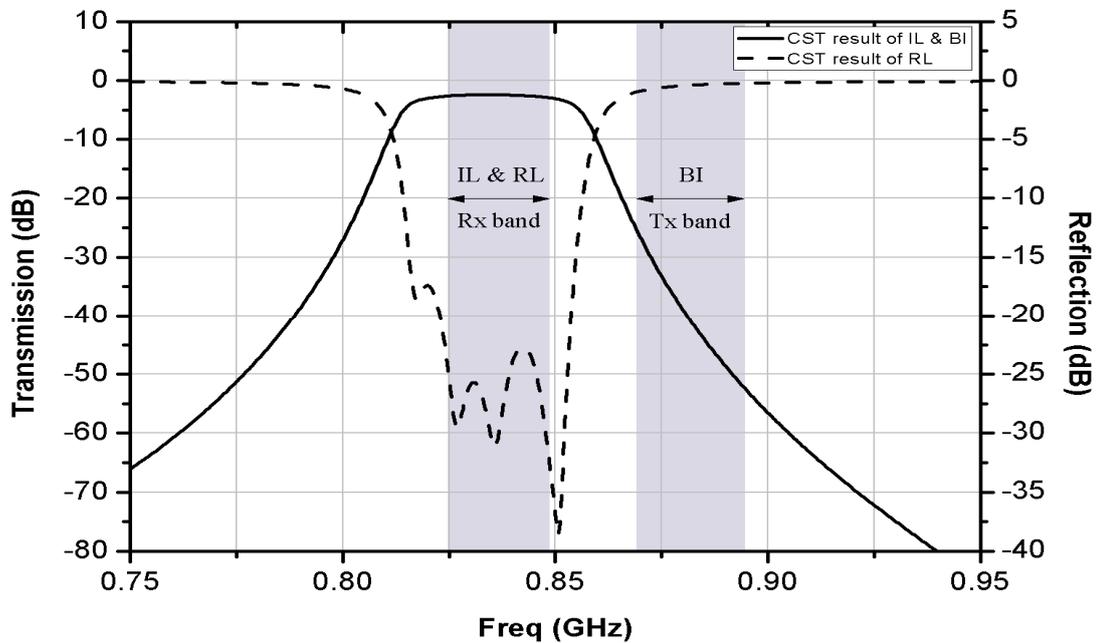
ITEM	Electrical Specifications	
Pass band	Rx : 0.824 ~ 0.849 GHz	Rx : 1.92 ~ 1.98 GHz
	Tx : 0.869 ~ 0.894 GHz	Tx : 2.11 ~ 2.17 GHz
Insertion loss	3.5 dB Max	2.5 dB Max
Return loss	15 dB Min	15 dB Min
Band Isolation	40 dB Min	60 dB Min

표 16은 일반적으로 적용되는 소출력 중계기의 필터 규격을 나타낸 것으로 손실 항을 고려한 구조 해석 결과에 대한 목표치로 설정하였다. 그림 25는 셀룰러 대역에 대한 필터 구조 및 CST시뮬레이션 툴을 이용한 해석 결과이고 유전율은 20, 유전손실은 0.001을 적용하였다.

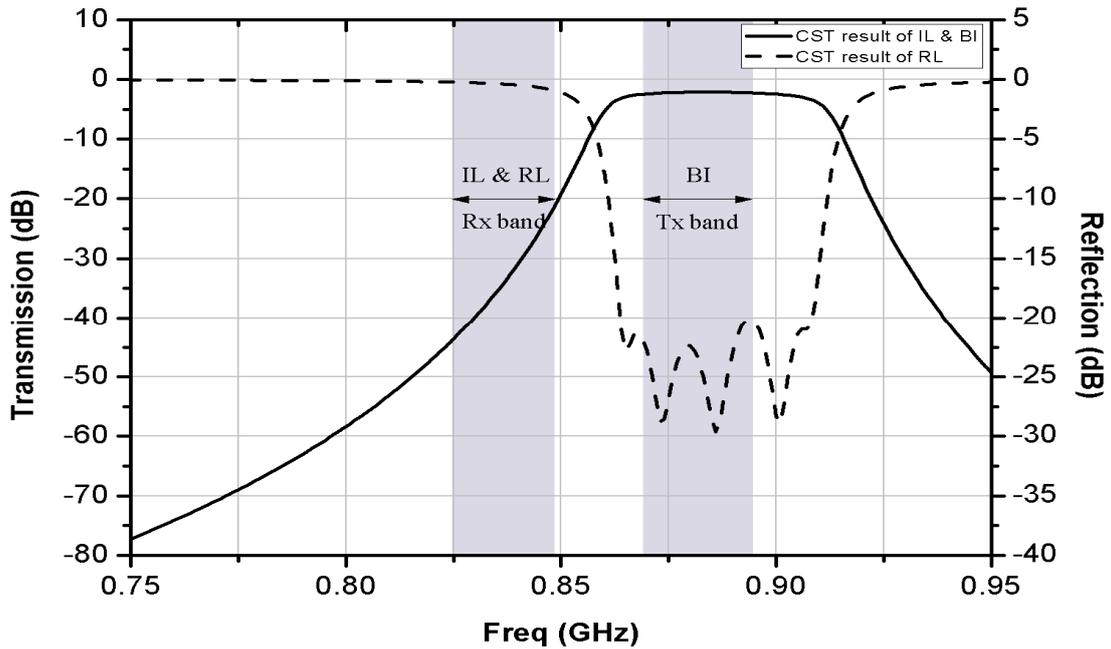


(a) Filter structure of Rx.

(b) Filter structure of Tx.



(c) Rx filter properties.



(d) Tx filter properties.

Fig. 25. Filter structure and simulation results in cellular band.

그림 25의 시뮬레이션 결과 값은 표 17에 나타내었다. 반사손실이 20 dB 이상으로 정합은 잘 되었고 대역 분리도 특성이 20~25 dB 정도로 나타났다. 표 16의 상용화 기준치와 비교하면 대역 분리도가 약 20 dB 정도 향상이 되어야 되는데 이를 위해서 노치 구조가 필요하다. 그림 25에서 송수신 필터 구조 (a), (b)에 대한 구조는 그림 26 이고, 상세 파라미터는 표 18과 같다.

Table 17. Characteristic values of cellular band filter.

ITEM	Unit	Rx	Tx
Frequency	GHz	0.824~0.849	0.869~0.894
Insertion Loss	dB	3.9	2.49
Return Loss	dB	22.64	20.08
Band Isolation	dB	25.35	20.50

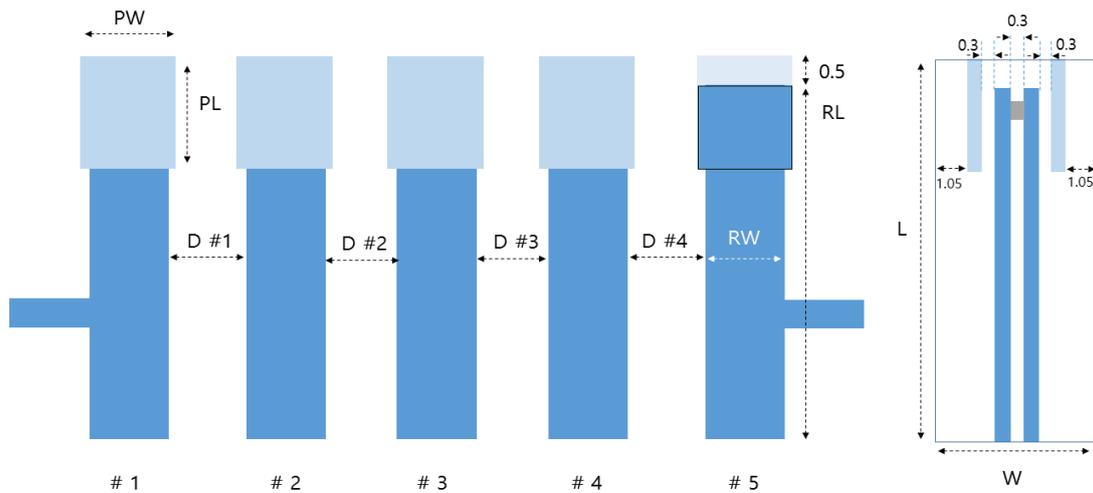


Fig. 26. LTCC filter Structure for Cellular band.

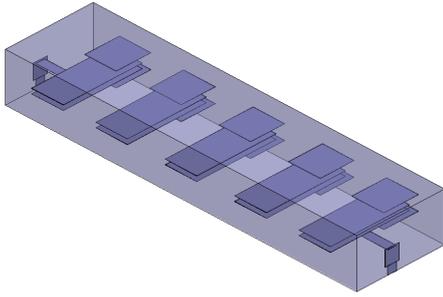
Table 18. Parameters for a designed LTCC filter for cellular band. [mm]

(a) Parameter for Rx band design.

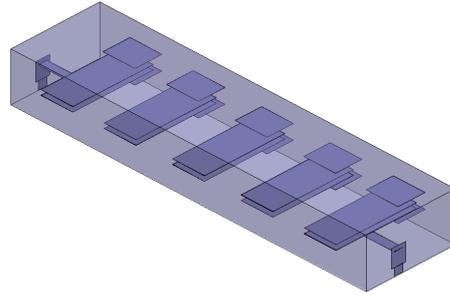
Rx : 0.824~0.849 GHz					
Rx	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
PW	2.1	2.2	2.35	2.2	2.1
PL	3.9	3.9	3.93	3.9	3.9
RW	1.68	1.85	2.1	1.85	1.68
RL	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
D	2.1	2.35	2.35	2.1	-
W	3				
L	12				

(b) Parameter for Tx band.

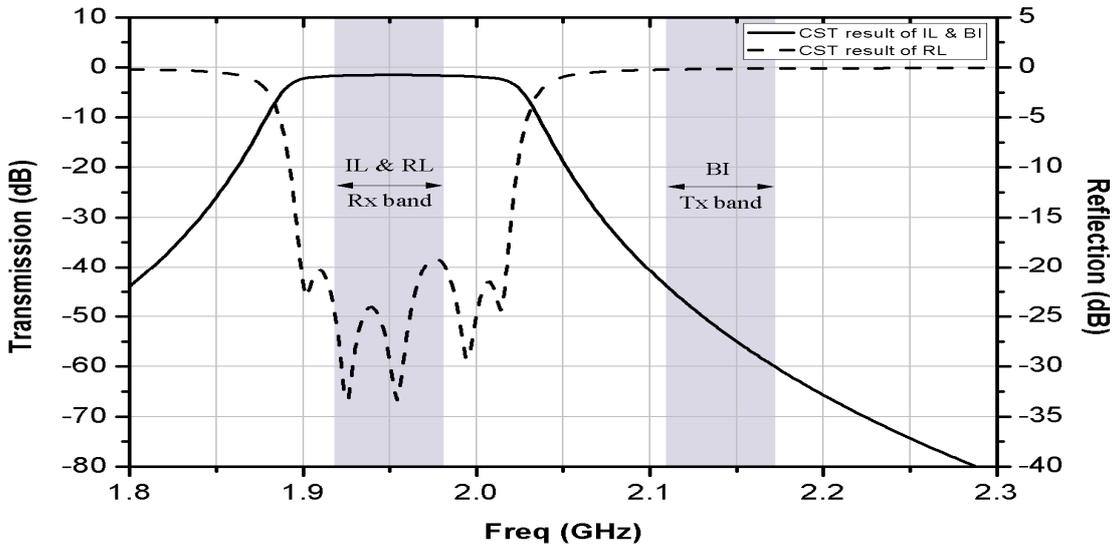
Tx : 0.869~0.894 GHz					
Rx	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
PW	2.3	2.33	2.33	2.33	2.3
PL	2.92	2.81	2.81	2.81	2.92
RW	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
RL	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
D	1.91	2.21	2.21	1.91	-
W	3				
L	12				



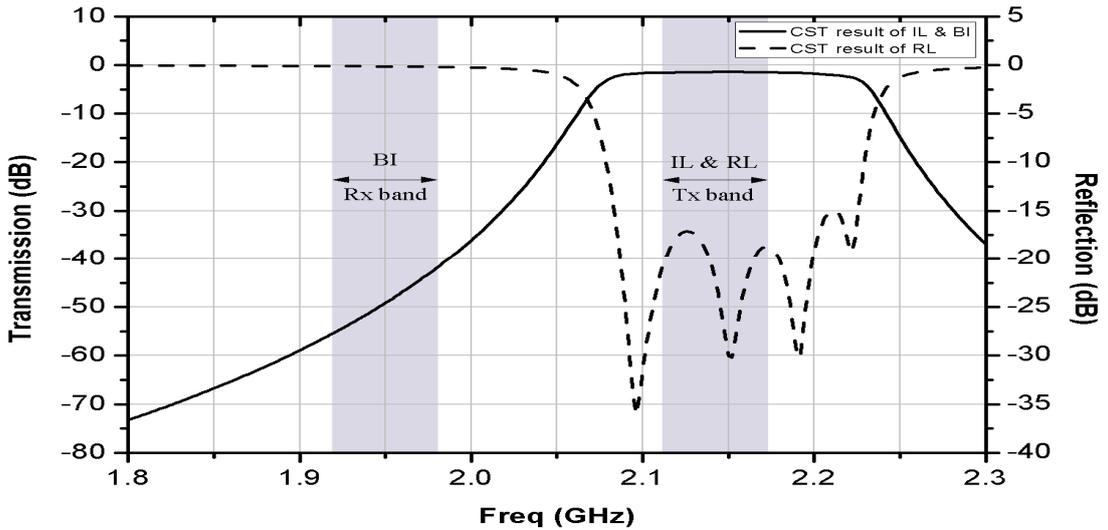
(a) Filter structure of Rx.



(b) Filter structure of Tx.



(c) Rx filter properties.



(d) Tx filter properties.

Fig. 27. Filter structure and simulation results in WCDMA band.

그림 27은 WCDMA 대역 필터 구조 및 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이고 결과 값은 표 19에 나타내었다. 반사손실이 17 dB 이상으로 정합은 잘 되었고 대역 분리도 특성이 약 43 dB 정도로 나타났다. 셀룰러 대역 필터와 마찬가지로 표 16의 상용화 기준치와 비교하면 대역 분리도가 약 20 dB 정도 향상이 되어야 되는데 이를 위해서 노치 구조가 필요하다. 그림 27에서 송수신 필터 구조 (a), (b)에 대한 구조는 그림 28이고 상세 파라미터는 표 20과 같다.

Table 19. Characteristic values of WCDMA band filter. [mm]

ITEM	Unit	Rx	Tx
Frequency	GHz	1.92~1.98	2.11~2.17
Insertion Loss	dB	1.66	1.59
Return Loss	dB	18	17.5
Band Isolation	dB	43.88	42.63



Fig. 28. LTCC filter structure for WCDMA band.

Table 20. Parameters for a designed LTCC filter for WCDMA band. [mm]

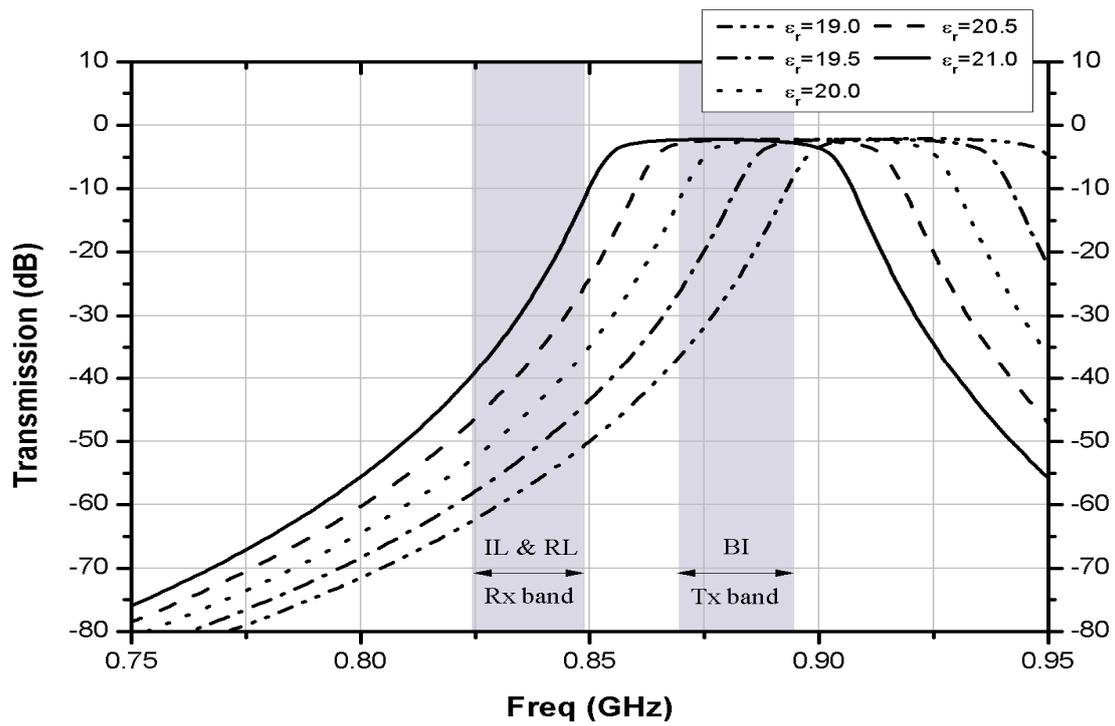
(a) Parameter for Rx band design.

Rx : 1.92~1.98 GHz					
Rx	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
PW	1.8	1.9	1.8	1.9	1.8
PL	1.97	1.93	1.93	1.93	1.97
RW	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
RL	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
D	1.85	2.15	2.15	1.85	-
W	3				
L	5				

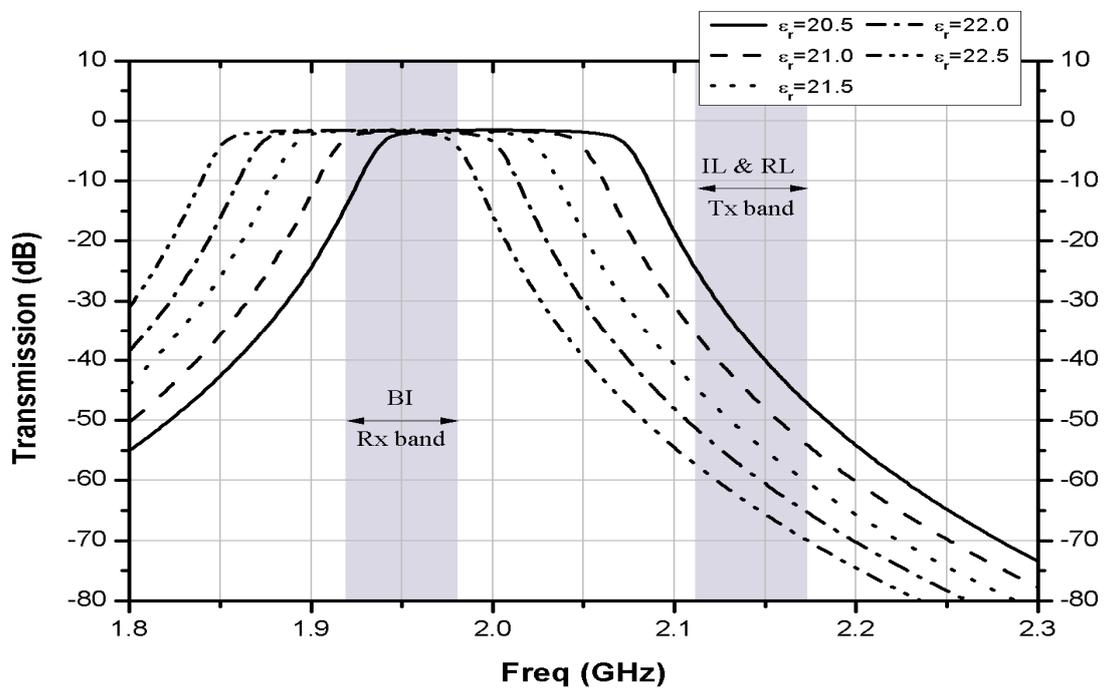
(b) Parameter for Tx band design.

Tx : 2.11~2.17 GHz					
Rx	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
PW	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
PL	1.52	1.49	1.48	1.49	1.52
RW	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
RL	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
D	1.75	2.05	2.05	1.75	-
W	3				
L	5				

그림 29는 실제 LTCC 대역통과 필터를 제작할 때에 유전체의 유전율 편차로 인하여 발생할 수 있는 주파수 편이에 대해 시뮬레이션 한 결과를 나타낸 것으로 셀룰라 대역과 WCDMA 대역에서 유전율 0.5 정도 오차가 약 20MHz 정도의 주파수 편이를 만들고 있다. 따라서 실제 LTCC 대역통과 필터를 제작할 때 발생하는 주파수 편이는 그림 29에서처럼 유전율 미세 조정을 통한 재설계로 주파수 편이를 조절하게 된다.



(a) Cellular band.



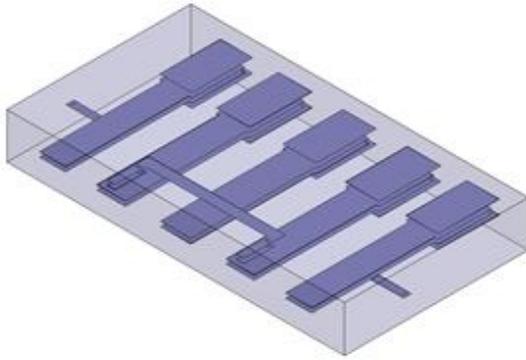
(b) WCDMA band.

Fig. 29. Freq. shift according to epsilon value change.

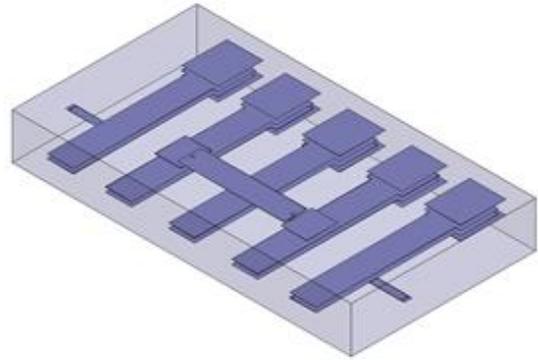
4. 격리도 향상을 위한 노치 구조 추가 설계

앞 3절에서 5차 구조를 갖는 대역통과 필터에 대한 구조 해석에서는 상용화 규격과 비교했을 때 대역 분리도 특성이 약 20 dB 정도 부족한 것으로 나타났다. 따라서 대역 분리도 특성을 개선하기 위해서는 두 번째 공진기와 네 번째 공진기 사이에 전자계 성분을 결합시켜 줄 수 있는 노치 구조가 필요하다. 이 때 공진기들이 동일한 평면 위에 구성되어 있기 때문에 인접한 공진기에 영향을 주지 않으면서 그 다음 공진기와 교차 결합 관계를 구성하기 위해서는 다른 층에 유도성 결합 또는 용량성 결합 구조를 구현하여야 한다. 유도성 결합 구조 중 가장 단순한 구조는 전송선으로 연결하는 구조이다. 따라서 하나의 교차 결합 구조는 두 번째 공진기와 네 번째 공진기를 전송선으로 직접 연결하면 되고, 두 개의 교차 결합 구조를 구현하기 위해서는 첫 번째 공진기와 세 번째 공진기, 세 번째 공진기와 다섯 번째 공진기를 전송선을 통해 직접 연결하면 된다. 이때, 유도성 결합 양은 전송선의 길이 또는 폭을 이용하여 쉽게 조절이 가능하다. 용량성 결합 구조는 유도성 결합 구조의 전송선을 공진기에 직접 연결하지 않고 전송선 끝 부분과 공진기를 MIM 커패시터로 구현할 수 있다. 이 경우, MIM 커패시터로 등가 커패시터를 구현하지만, 이론과 달리 전송선에 의한 직렬 인덕터 성분이 기생 성분으로 추가된다. 따라서 기생 인덕터 성분을 최소화 할 필요가 있다.

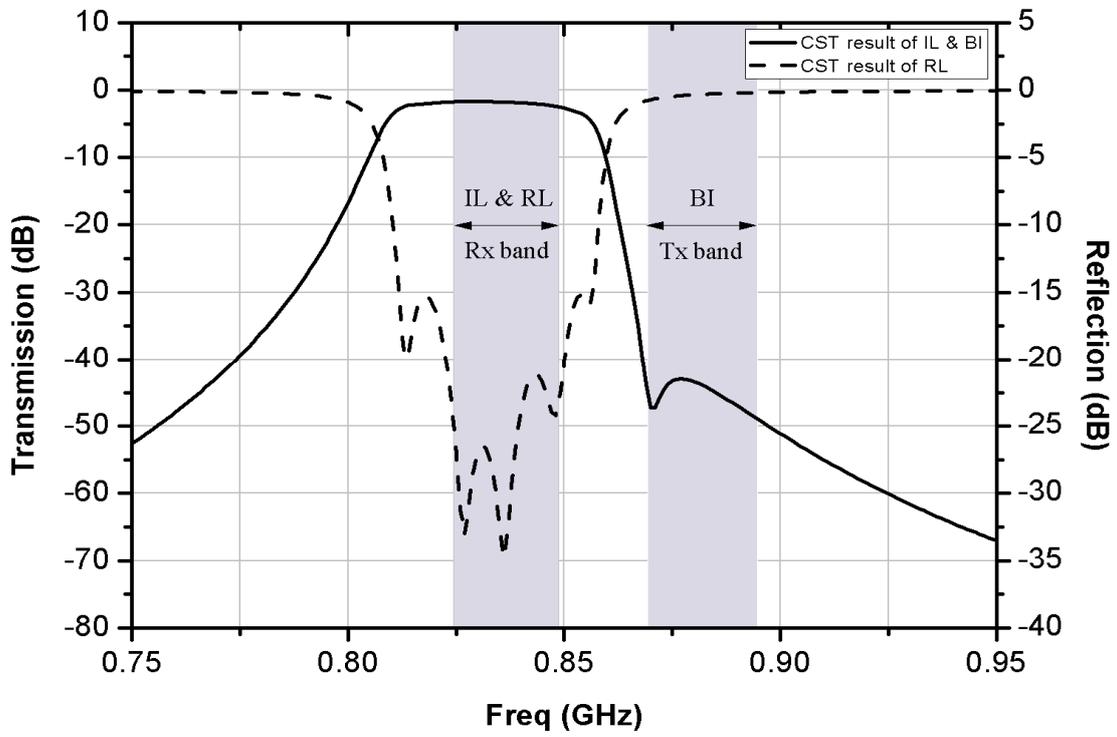
그림 30은 노치 구조를 포함한 셀룰러 대역의 필터 구조 및 특성을 나타낸 것이다. 격리도 향상을 위한 노치 특성을 구현하기 위해 Rx 대역은 유도성 결합 구조, Tx 대역에서는 용량성 결합 구조를 이용하였다. Rx 대역 필터에서 유도성 결합은 교차 결합 전송선로를 공진기와 직접 연결할 경우 공진기 자체의 특성에 영향을 미치기 때문에 측면 접지면을 통해 연결하여 구현하였다. 반면 Tx 대역 필터의 용량성 교차 결합은 공진기와 전송선로를 MIM 커패시터로 구현하였다.



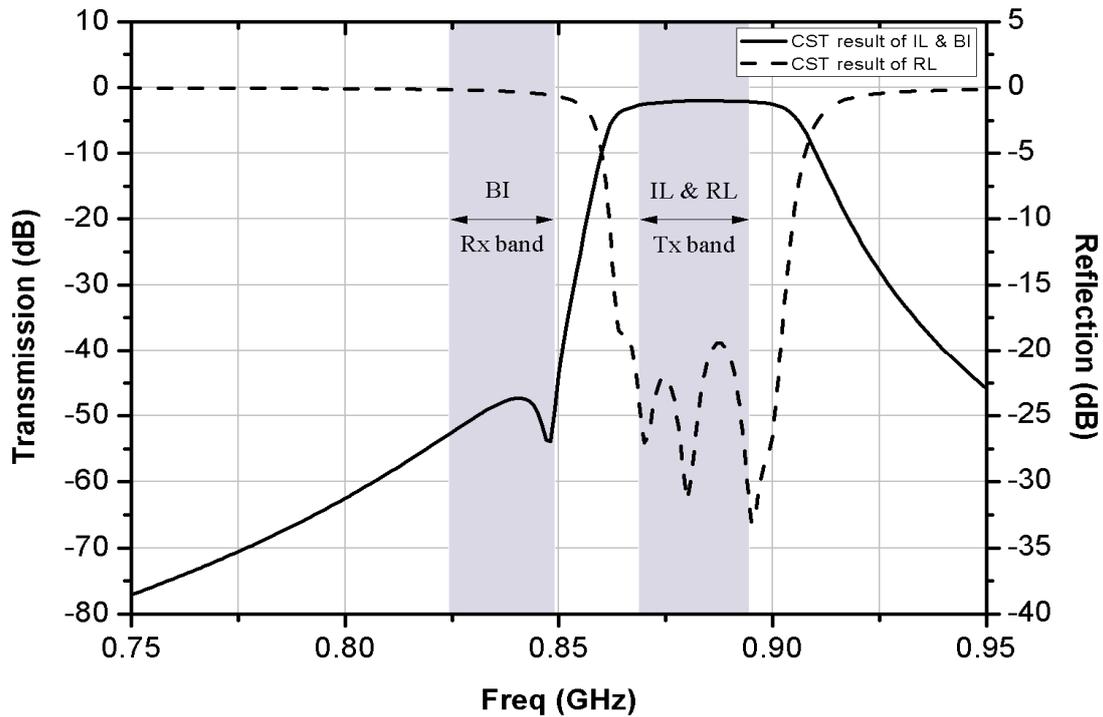
(a) Rx band structure.



(b) Tx band structure.



(c) Characteristics of Rx filter.



(d) Characteristics of Tx filter.

Fig. 30. Structure and simulation results of cellular band filter with notch function.

그림 30에서 송수신 필터 구조 (a), (b)에 대한 상세 구조와 설계 파라미터는 그림 31 과 32 그리고 표 22와 23에 나타내었다. 표 22와 23에서의 설계 파라미터를 가지고 구조 시뮬레이션을 한 결과는 그림 30 (c), (d)에 나타냈으며, 표 21에서와 같이 삽입손실은 3.0 dB 이하, 반사손실은 약 20 dB, 송수신 분리도는 42 dB 이상의 특성을 나타냈고, 노치 구조가 없을 때 보다 약 20 dB 정도 개선된 분리도 특성을 나타냈다.

Table 21. Characteristic values of cellular band filter.

ITEM	Unit	Rx	Tx
Frequency	GHz	0.824~0.849	0.869~0.894
Insertion Loss	dB	2.46	2.63
Return Loss	dB	20	19
Band Isolation	dB	42.5	47.42

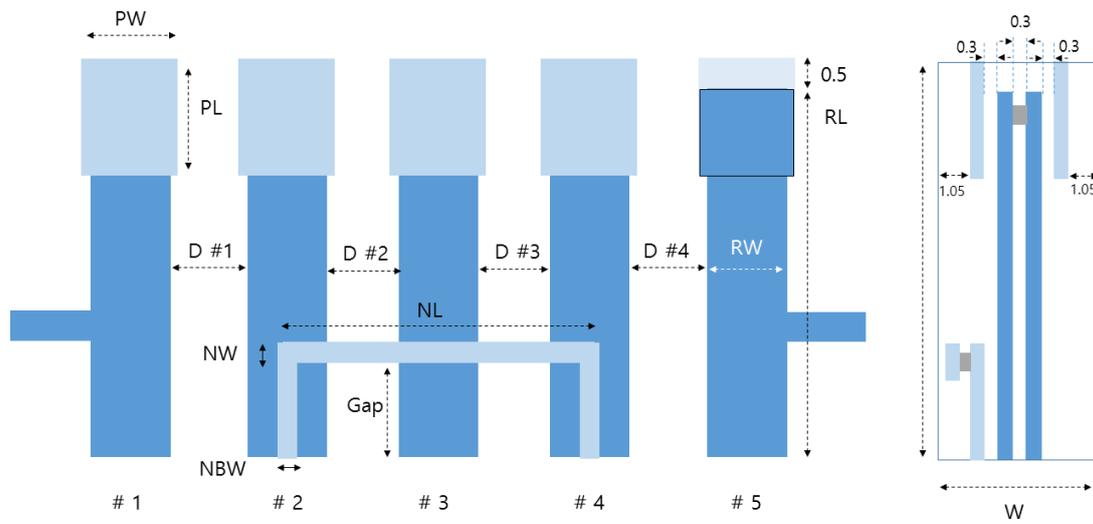


Fig. 31. LTCC BPF structure with notch function in cellular Rx band.

Table 22. Parameter of LTCC BPF structure with notch function in cellular Rx band. [mm]

Rx : 0.824~0.849 GHz					
Rx	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
PW	2.1	2.2	2.2	2.2	2.1
PL	3.97	4.04	3.92	4.04	3.97
RW	1.7	1.85	1.97	1.85	1.7
RL	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
D	2.05	2.3	2.3	2.05	-
NW	0.7	NL	8.92	NBW	0.5
Gap	2	W	3	L	12

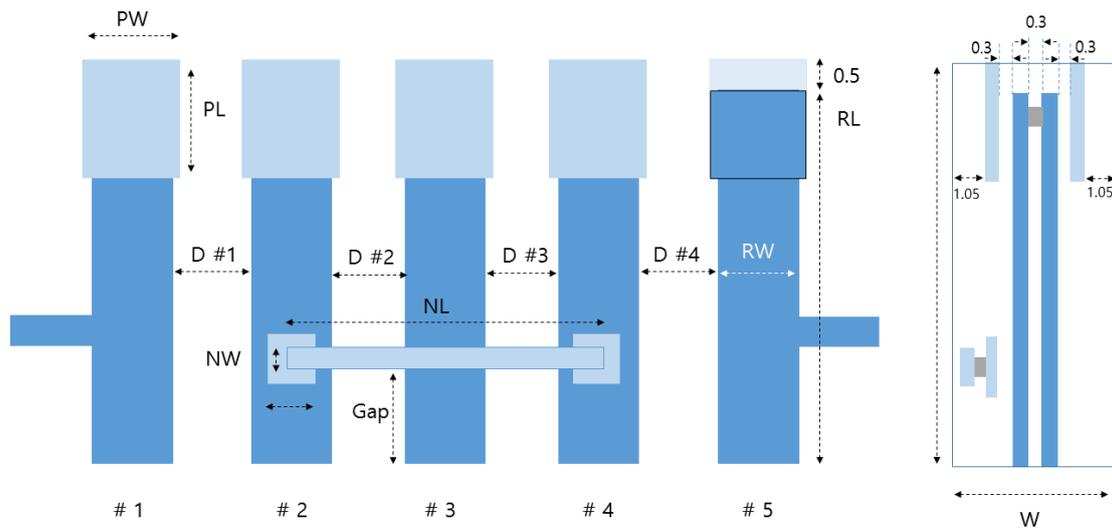
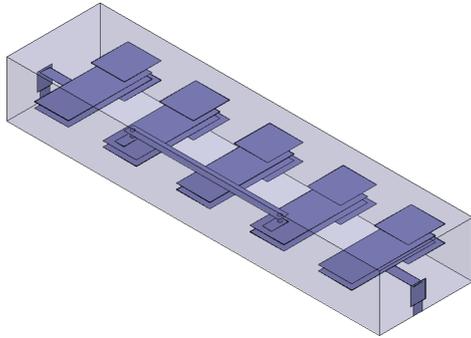


Fig. 32. LTCC BPF structure with notch function in cellular Tx band.

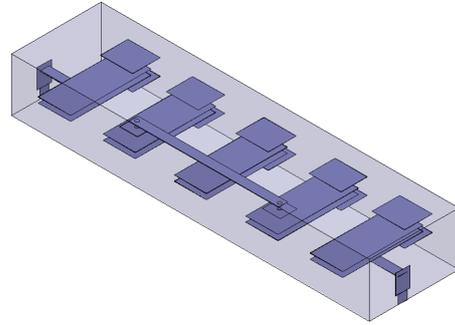
Table 23. Parameter of LTCC BPF structure with notch function in cellular Tx band. [mm]

Tx : 0.869~0.894 GHz					
Rx	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
PW	2.38	2.3	2.44	2.3	2.38
PL	2.94	2.93	2.95	2.93	2.94
RW	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
RL	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5
D	2.08	2.4	2.4	2.08	-
NW	1.5	NL	6.9	NBW	1.7
Gap	2	W	3	L	12

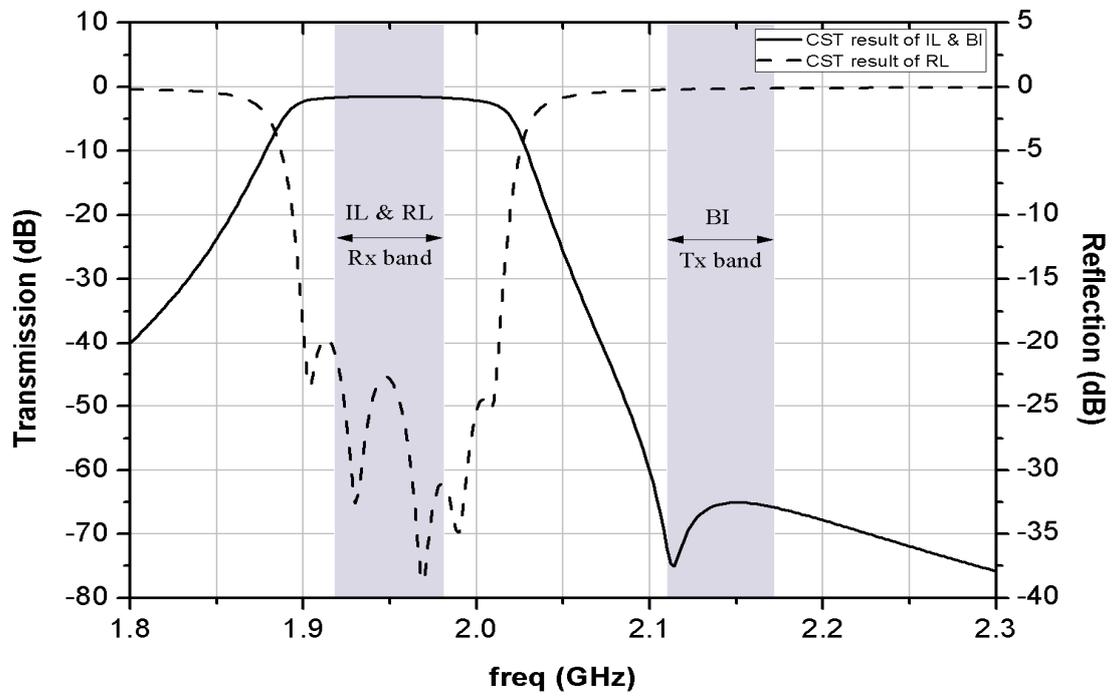
그림 33은 노치 구조를 포함한 WCDMA 대역의 필터 구조 및 특성이다. 격리도 향상을 위한 노치 특성을 구현하기 위해 셀룰러 대역 설계와 마찬가지로 Rx 대역은 유도성 결합 구조, Tx 대역에서는 용량성 결합 구조를 이용하였다.



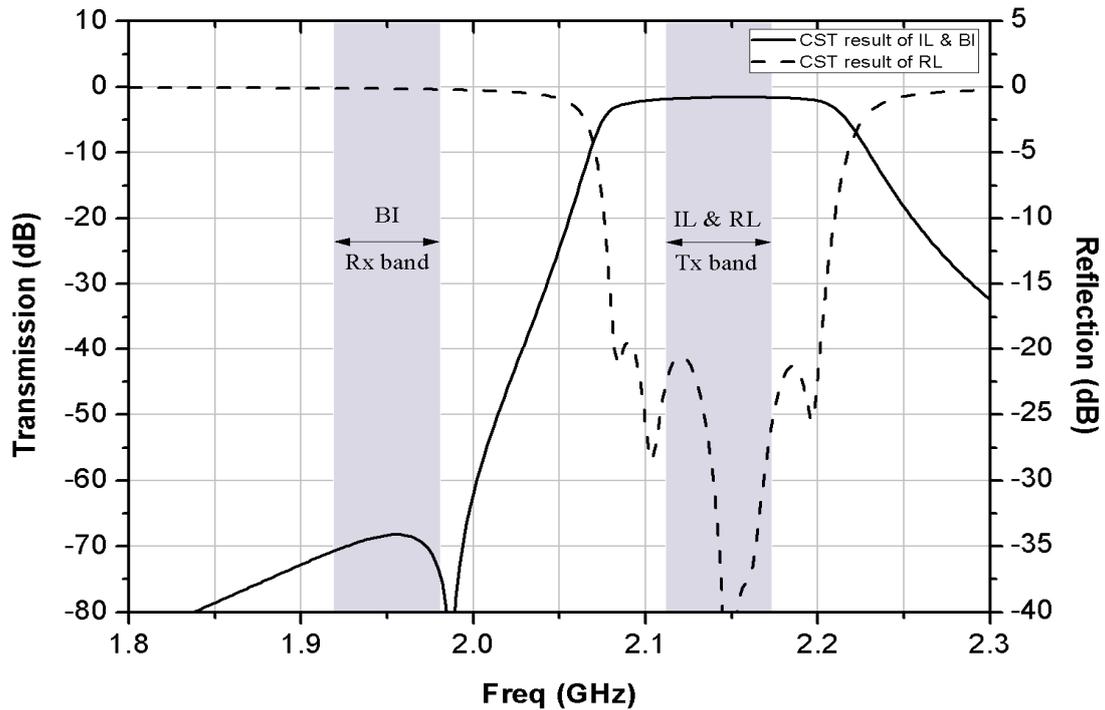
(a) Rx band structure.



(b) Tx band structure.



(c) Characteristics of Rx band filter.



(d) Characteristics of Tx band filter.

Fig. 33. Structure and simulation results of WCDMA band filter with notch function.

그림 33에서 송수신 필터 구조 (a), (b)에 대한 상세구조와 설계 파라미터는 그림 34와 35 그리고 표 25와 26에 나타났다. 표 25와 26에서의 설계 파라미터를 가지고 구조 시뮬레이션을 한 결과는 그림 33(c), (d)에 나타냈으며, 표 24에서와 같이 삽입손실은 2.0 dB 이하, 반사손실은 약 20 dB, 송수신 분리도는 65 dB 이상의 특성을 나타냈고, 셀룰러 대역과 마찬가지로 노치 구조가 없을 때 보다 20 dB 이상 개선된 분리도 특성을 나타내는 양호한 결과를 보였다.

Table 24. Characteristic values of WCDMA band filter.

ITEM	Unit	Rx	Tx
Frequency	GHz	1.92~1.98	2.11~2.17
Insertion Loss	dB	1.71	1.88
Return Loss	dB	20	20.48
Band Isolation	dB	65.09	68.28

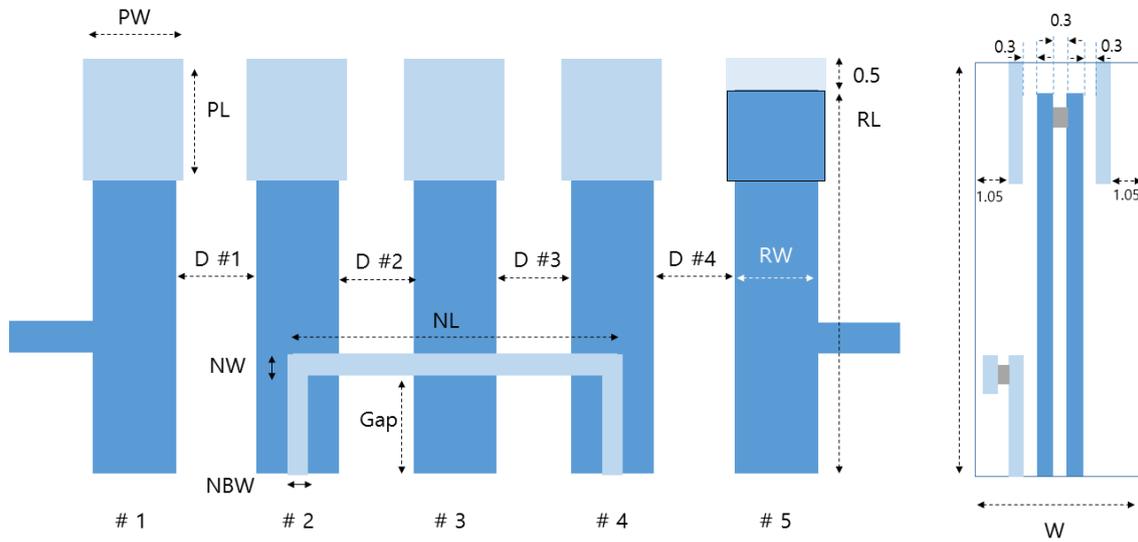


Fig. 34. LTCC BPF structure with notch function in WCDMA Rx band.

Table 25. Parameter of LTCC structure with notch function in WCDMA Rx band. [mm]

Rx : 1.92~1.98 GHz					
Rx	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
PW	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
PL	1.97	1.95	1.9	1.95	1.97
RW	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
RL	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
D	1.85	2.15	1.85	2.15	-
NW	0.5	NL	4.15	NBW	0.5
Gap	1.8	W	3	L	5

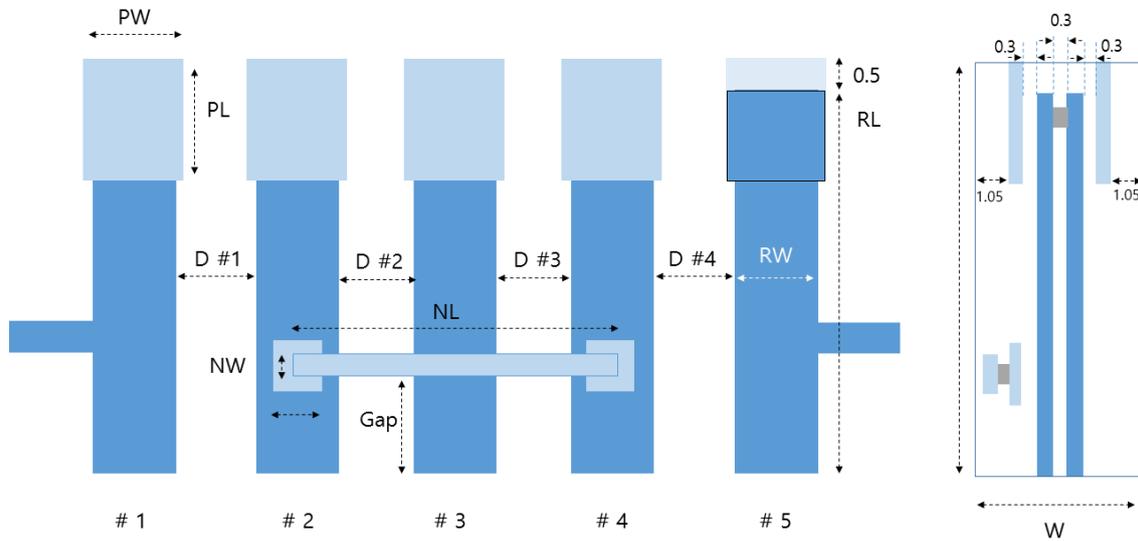


Fig. 35. LTCC BPF structure with notch function in WCDMA Tx band.

Table 26. Parameter of LTCC BPF structure with notch function in WCDMA Tx band. [mm]

Tx : 2.11 ~ 2.17 GHz					
Rx	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
PW	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
PL	1.54	1.47	1.56	1.47	1.54
RW	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
RL	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
D	1.81	2.18	2.18	1.81	-
NW	0.5	NL	8.36	NBW	1.0
Gap	1.6	W	3	L	5

5. 듀플렉서 설계

4절에서 설계된 LTCC 송수신 대역통과 필터들은 쿼드플렉서 구현을 위해 다이플렉서와 연결이 되어야 한다. 즉, 마이크로스트립 T-분배기 구조를 이용하여 송신과 수신대역통과 필터를 연결한 듀플렉서를 구현한다.

그림 36은 듀플렉서용 분배기 구조이다. T-분배기의 두 개의 출력 포트에는 그림 31와 32 그리고 그림 34와 35에서 설계된 필터가 연결되어 최종적인 셀룰러 대역과 WCDMA 대역을 처리하는 듀플렉서가 설계된다. 이때 각 대역의 송수신 대역 격리 특성을 향상시키기 위해 Rx 포트에 연결되는 필터의 반사손실 위상 곡선이 Tx 주파수 대역에 대해 개방($\Gamma = 1\angle 0^\circ$) 회로가 되도록 l_{Rx} 의 길이를 조정해야 하고, 반대로 Tx 출력 포트로는 Rx 주파수 대역 신호에 대해 개방($\Gamma = 1\angle 0^\circ$) 회로가 되도록 l_{Tx} 의 길이를 조정해야 한다. 이때 필터 설계에 사용된 기판은 유전율 4.4, 유전체 두께 0.787 mm, 유전손실 0.016을 갖는다.

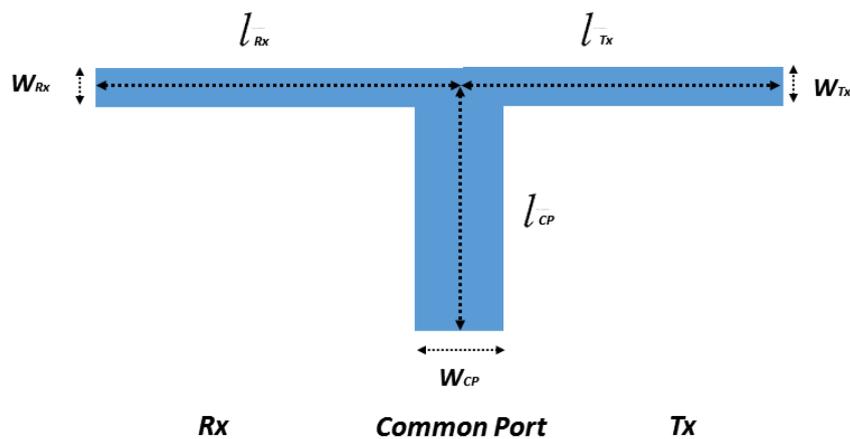


Fig. 36. Duplexer divider structure.

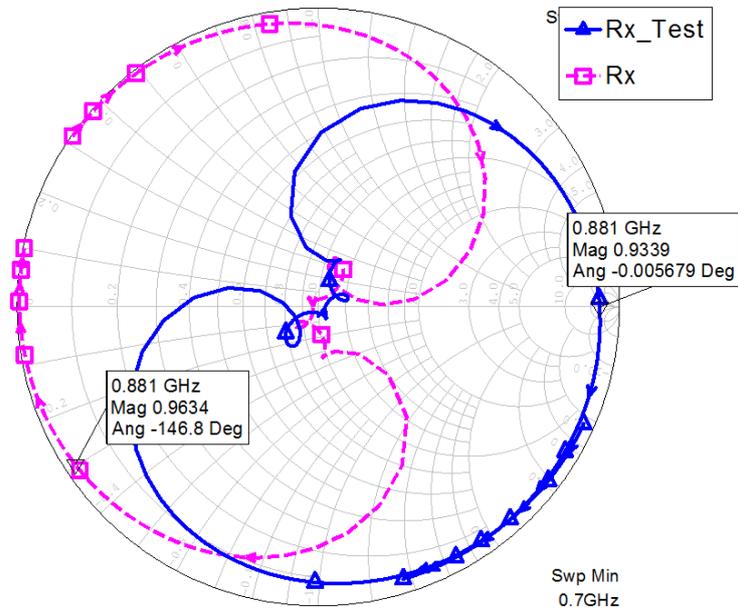
1) 셀룰러 대역 듀플렉서 설계

그림 31와 32에서 설계된 셀룰러 대역 필터들을 그림 36의 분배기 구조에 연결한다. 이때 l_{Rx} 와 l_{Tx} 의 길이 변화에 대한 위상변화는 그림 37과 같다. 그림 37(a)에서 Rx 위상 곡선은 그림 30(c)의 Rx 대역 필터의 반사손실에 대한 위상 특성을 나타낸 결과이며 l_{Rx} 의 길이가 0 mm일 때 Tx 중심 주파수 0.881 GHz에서 반사계수는 $0.96\angle -146.8^\circ$ 이 된다. 이때 l_{Rx} 의 길이를 55.45 mm까지 증가시키면, Rx_Test의 위상 곡선

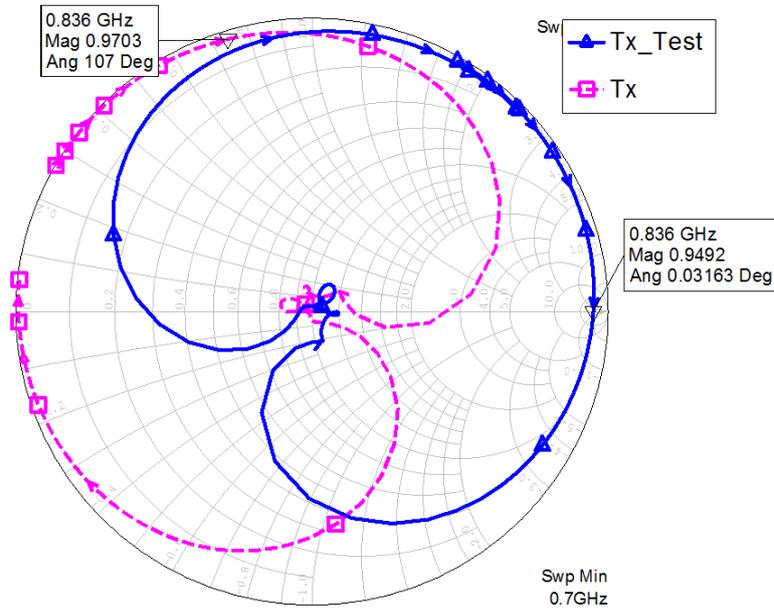
에 나타난 결과와 같이 반사계수가 $1 \angle 0^\circ$ 과 가까워지면서 0.881 GHz에 대해 개방특성을 갖게 된다. 그림 37(b)에서 Tx 위상곡선은 그림 30(d)의 Tx 대역 필터의 반사손실에 대한 위상 특성을 나타낸 결과이며 l_{Tx} 의 길이가 0 mm일 때 Rx 중심 주파수 0.836 GHz에서 반사계수가 $0.97 \angle 107^\circ$ 이 된다. 이때 l_{Tx} 의 길이를 29.45 mm까지 증가시키면, Tx_Test의 위상 곡선에 나타난 결과와 같이 반사계수가 $1 \angle 0^\circ$ 과 가까워지면서 0.836 GHz에 대해 개방 특성을 갖게 된다. 그림 38은 최종 설계된 셀룰러 대역의 듀플렉서 특성을 나타낸 그래프이다. 최종 설계된 듀플렉서는 표 28로부터 두 개의 통과대역에서 약 3 dB 이하의 삽입손실 특성, Rx 대역에서의 Tx 대역 차단 특성은 50 dB 이상, Tx 대역에서의 Rx 대역 차단 특성은 48 dB 이상임을 확인 할 수 있다.

Table 27. Divider designed parameters in cellular band. [mm]

W_{Rx}	l_{Rx}	W_{cp}	l_{cp}	W_{Tx}	l_{Tx}
1.48	55.45	1.48	5	1.48	29.45



(a) L_{Rx} variation.



(b) L_{Tx} variation.

Fig. 37. Variation of reflection coefficient by length of output port in cellular band.

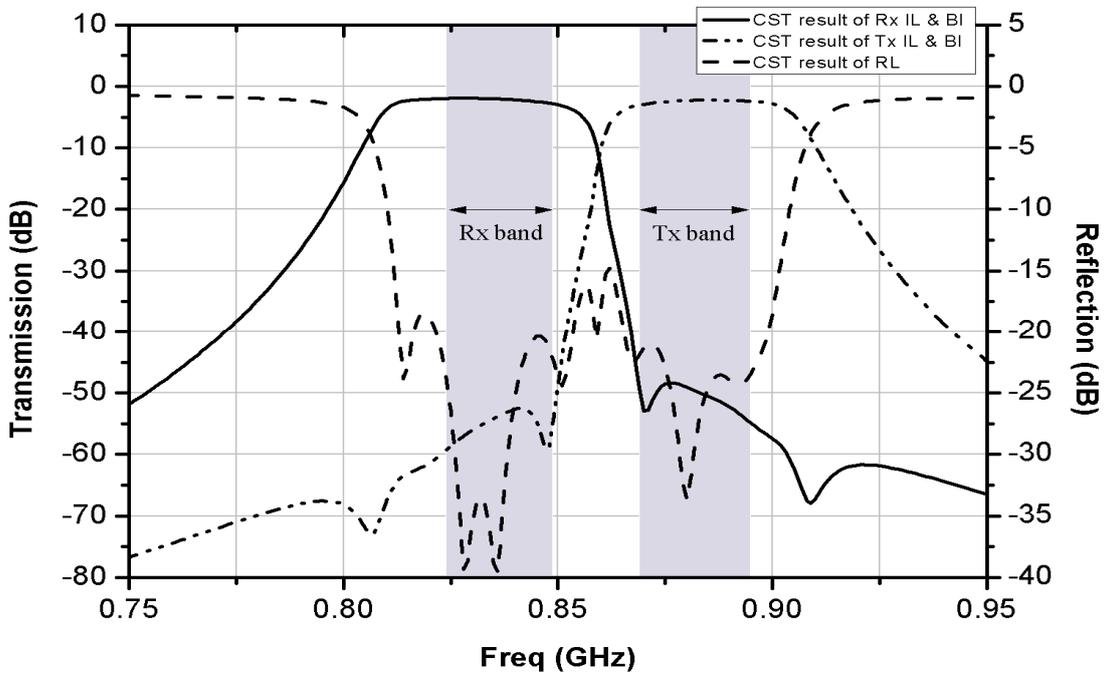


Fig. 38. Simulation results of cellular band duplexer.

Table 28. Simulation results of cellular band duplexer.

ITEM	Unit	Rx	Tx
Frequency	GHz	0.824~0.849	0.869~0.894
Insertion Loss	dB	2.85	3.06
Return Loss	dB	20.35	20.97
Band Isolation	dB	48.53	53.45

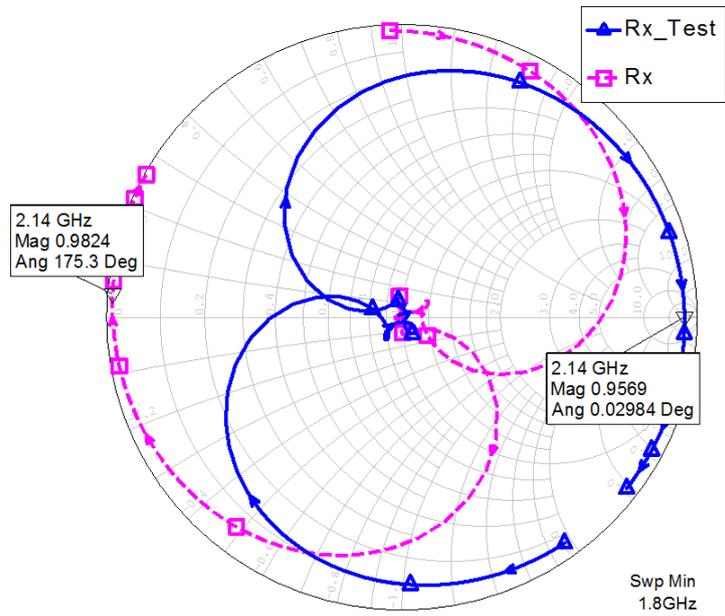
2) WCDMA 대역 듀플렉서 설계

그림 35와 36에서 설계된 셀룰러 대역 필터들을 그림 36의 분배기 구조에 연결하면, WCDMA 대역 듀플렉서 구조를 구현할 수 있다. 이때 l_{Rx} 와 l_{Tx} 의 길이 변화에 대한 위상변화는 그림 39와 같다. 그림 39(a)에서 Rx 위상 곡선은 그림 33(c)의 Rx 대역 필터의 반사손실에 대한 위상특성을 나타낸 결과이며 l_{Rx} 의 길이가 0 mm일 때 Tx 중심 주파수 2.14 GHz에서 반사계수가 $0.98 \angle 175.3^\circ$ 이 된다. 이때 l_{Rx} 의 길이를 18.77 mm까지 증가시키면 Rx_Test의 위상곡선에서 나타난 결과와 같이 반사계수가 $1 \angle 0^\circ$ 과 가까워지면서 2.14 GHz에 대해 개방특성을 갖게 된다. 그림 39(b)에서 Tx 위상 곡선은 그림 33(d)의 Tx 대역 필터의 반사손실에 대한 위상 특성을 나타낸 결과이며 l_{Tx} 의 길이가 0 mm일 때 Rx 중심 주파수 1.95 GHz에서 반사계수가 $0.98 \angle 96.8^\circ$ 이 된다. 이때 l_{Tx} 의 길이를 11.41 mm까지 증가시키면 Tx_Test의 위상곡선에 나타난 결과와 같이 반사계수는 $1 \angle 0^\circ$ 과 가까워지면서 1.95 GHz에 대해 개방 특성을 갖게 된다.

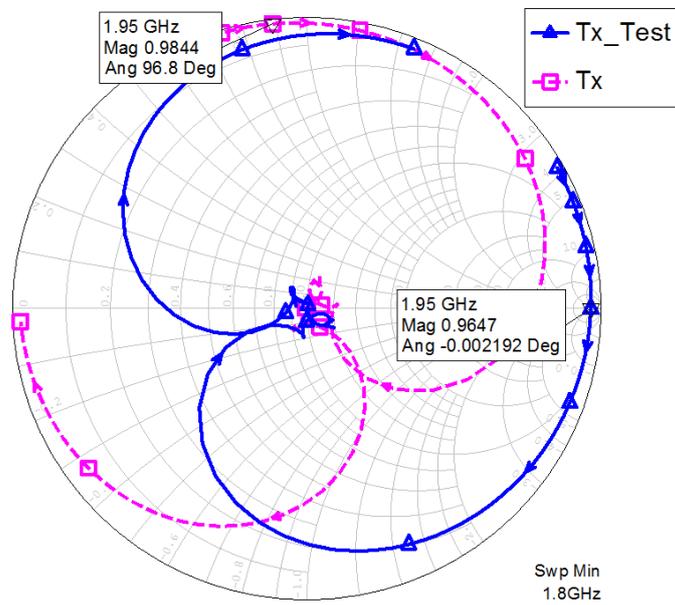
그림 40은 최종 설계된 WCDMA 대역 다이플렉서 특성을 보여 준다. 표 28로부터 최종 설계된 듀플렉서는 두 개의 통과대역에서 약 2 dB 이하의 삽입손실 특성, 각 대역별 차단 특성은 60 dB 이상임을 확인 할 수 있다.

Table 29. Divider designed parameters in WCDMA band. [mm]

W_{Rx}	l_{Rx}	W_{cp}	l_{cp}	W_{Tx}	l_{Tx}
1.48	18.77	1.48	10	1.48	11.41



(a) L_{Rx} variation.



(b) L_{Tx} variation.

Fig. 39. Variation of reflection coefficient by length of output port in WCDMA band.

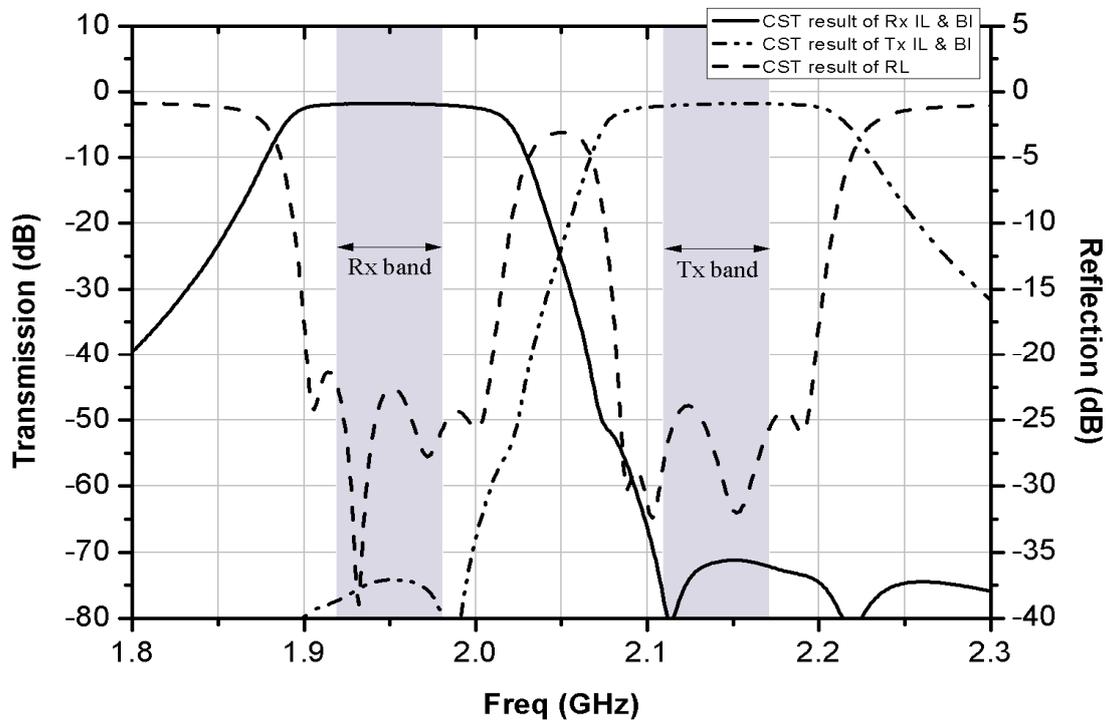


Fig. 40. Simulation results of WCDMA band duplexer.

Table 30. Simulation results of WCDMA band duplexer.

ITEM	Unit	Rx	Tx
Frequency	GHz	1.92~1.98	2.11~2.17
Insertion Loss	dB	1.78	1.88
Return Loss	dB	21.5	24.0
Band Isolation	dB	71.0	73.5

IV. 광대역 다이플렉서 설계

1. 광대역 다이플렉서 설계

광대역 다이플렉서는 셀룰러 대역 듀플렉서와 WCDMA 대역 듀플렉서를 최소한의 손실과 최소한의 왜곡으로 결합시키기 위해 꼭 필요하다. 그림 41은 쿼드플렉서 결합도를 나타낸 것으로 3장에서 설계된 듀플렉서와 광대역 다이플렉서가 연결되어 구성된다. 광대역 다이플렉서는 셀룰러와 WCDMA 대역을 포함하는 2개의 이동통신 주파수대역에서 표 31와 같이 삽입손실 0.5 dB 이내로 손실 없이 신호를 전송하여야 하고, 차단대역에서는 15 dB 이상의 대역저지 특성을 가져야 한다.

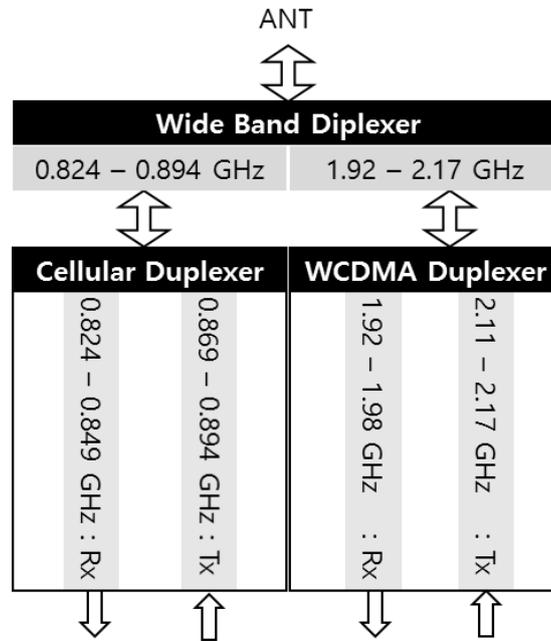


Fig. 41. Diagram of combination of broadband diplexer and LTCC diplexer.

그림 41의 상위 포트인 안테나 포트는 2개의 송신대역 필터 (0.869~0.894 GHz, 2.11~2.17 GHz)로부터 들어온 신호가 다중화 되어 안테나로 공급하는 역할을 하거나, 또는 반대로 안테나로부터 들어온 신호를 2개의 수신대역 필터 (0.824~0.849 GHz, 1.92~1.98 GHz)로 신호를 분류하는 단자이다. 하단의 4개의 포트들은 좌측에서 우측으로 각각 0.85 GHz 셀룰러 이동통신대역의 수신 및 송신 포트, 그리고 2.1 GHz WCDMA 대역의 수신 및 송신 포트를 나타낸다.

Table 31. Design specification of broadband diplexer.

ITEM	Cellular Band	WCDMA Band
Frequency	0.824~0.894 GHz	1.92~2.17 GHz
Insertion Loss	0.5 dB, Max	0.5 dB, Max
Return Loss	15 dB, Min	15 dB, Min
Band Isolation	15 dB, Min	15 dB, Min

1) 셀룰러 대역 설계

셀룰러 대역 필터는 저역통과 필터로 설계하였으며, 그림 42와 같은 가장 대표적인 저역통과 필터인 계단 임피던스 저역통과 필터를 이용하였다[35].

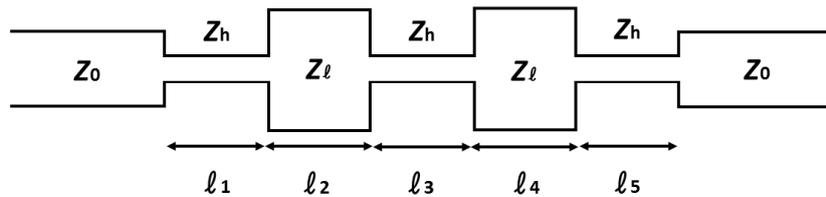
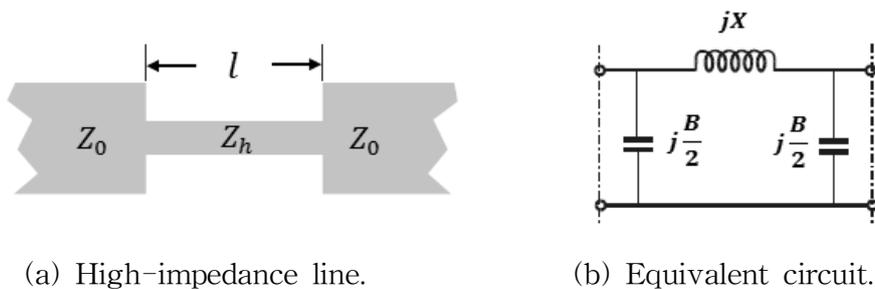


Fig. 42. Step impedance LPF structure.

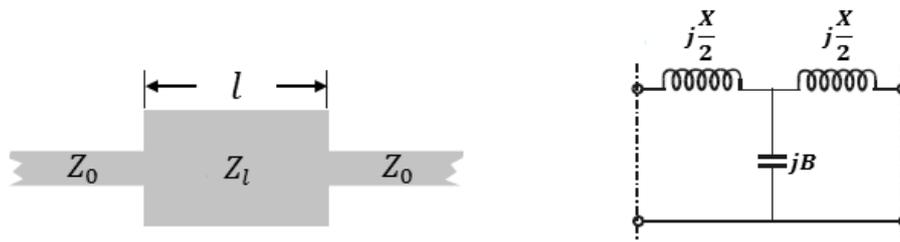
그림 43에서 Z_0 는 50Ω 선로이고 Z_h 는 높은 특성임피던스를 의미하고, Z_l 은 낮은 특성임피던스를 의미한다. 높은 특성임피던스(Z_h) 선로에 대한 등가회로는 그림 44에서와 같이 나타낼 수 있고 무손실 전송선로일 때 식 (11)과 같이 전송선의 전기적 길이(βl)을 이용하여 리액턴스 성분과 서셉턴스 성분으로 등가화 시킬 수 있다.



(a) High-impedance line.

(b) Equivalent circuit.

Fig. 43. High-impedance short-line element.



(a) Low-impedance line.

(b) Equivalent circuit.

Fig. 44. Low-impedance short-line element.

$$X = Z_h \sin\left(\frac{\beta l}{2}\right) \quad (11a)$$

$$\frac{B}{2} = \frac{1}{Z_h} \tan(\beta l) \quad (11b)$$

이때 전송선로의 길이가 $\lambda/8$ 보다 작으면서 높은 특성임피던스를 갖는 전송선로의 양끝 종단에 비교적 낮은 특성임피던스를 갖는 전송선로가 연결되어 있다면 병렬 캐패시터 성분은 무시할 수 있고 식(12)와 같이 직렬 인덕터 성분으로만 근사화 시킬 수 있다.

$$X \approx Z_h(\beta l) \quad (12)$$

낮은 특성임피던스(Z_l) 선로에 대한 등가회로는 그림 44에서와 같이 나타낼 수 있고 식 (13)과 같이 등가화 시킬 수 있다.

$$B = \frac{1}{Z_l} \sin(\beta l) \quad (13a)$$

$$\frac{X}{2} = Z_l \tan(\beta l) \quad (13b)$$

마찬가지로 전송선로의 길이가 $\lambda/8$ 보다 작으면서 낮은 특성임피던스를 갖는 전송

선로의 양끝 종단에 비교적 높은 특성임피던스를 갖는 전송선로가 연결되어 있다면 직렬 인덕터 성분은 무시할 수 있고 식(14)와 같이 병렬 캐패시터 성분으로만 근사화시킬 수 있다.

$$B \approx \frac{1}{Z_l}(\beta l) \quad (14)$$

식 (12)와 (14)를 이용하여 정규화된 원형(prototype) 필터의 5차 필터에 대한 소자 값(g_k)과 전송선로의 전기적 길이와의 상관관계는 식 (15)와 같이 정리할 수 있다.

$$X = Z_h \beta l = \omega L_k = \omega g_k \frac{Z_0}{\omega_c} \quad \Rightarrow \quad \beta l = \frac{\omega}{\omega_c} \frac{g_k Z_0}{Z_h} \quad (15a)$$

$$B = \frac{\beta l}{Z_l} = \omega C_k = \frac{\omega g_k}{Z_0 \omega_c} \quad \Rightarrow \quad \beta l = \frac{\omega}{\omega_c} \frac{g_k Z_l}{Z_0} \quad (15b)$$

전기적 길이는 차단 주파수 $\omega = \omega_c$ 인 조건에서 결정되기 때문에 식 (15)는 식 (16)와 같이 간소화되고, 정규화된 원형 필터의 소자 값으로부터 원하는 성능 목표에 맞춰 다단 임피던스 저역통과 필터 설계가 가능하다.

$$\beta l_k = \frac{g_k Z_0}{Z_h} \quad (16a)$$

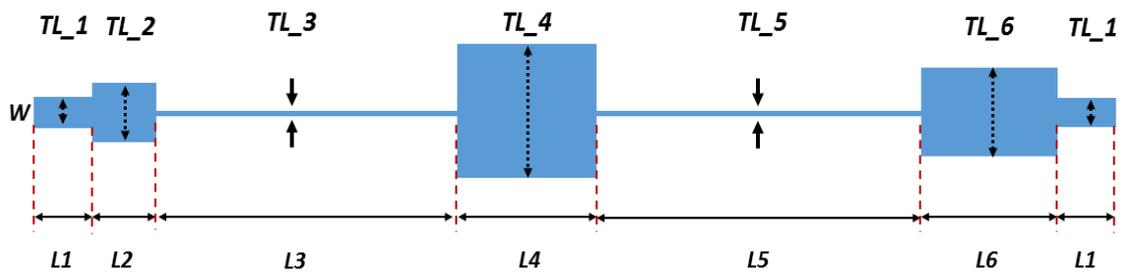
$$\beta l_k = \frac{g_k Z_l}{Z_0} \quad (16b)$$

그림 45는 셀룰러 대역 전역 통과 필터의 구조 및 특성이다. 설된 저역통과 필터의 차단 주파수는 1.0 GHz이고, WCDMA 대역인 1.92 GHz에서 15 dB 이상의 감쇄 특성을 가져야 한다. 이를 위해 정형화된 원형 소자 값은 0.1 dB 리플인 체비셰프 방정식을 이용하면, 각 소자 값은 $g_1 = 1.1468$, $g_2 = 1.3712$, $g_3 = 1.9750$, $g_4 = 1.3712$, $g_5 = 1.1468$ 과 같다[35].

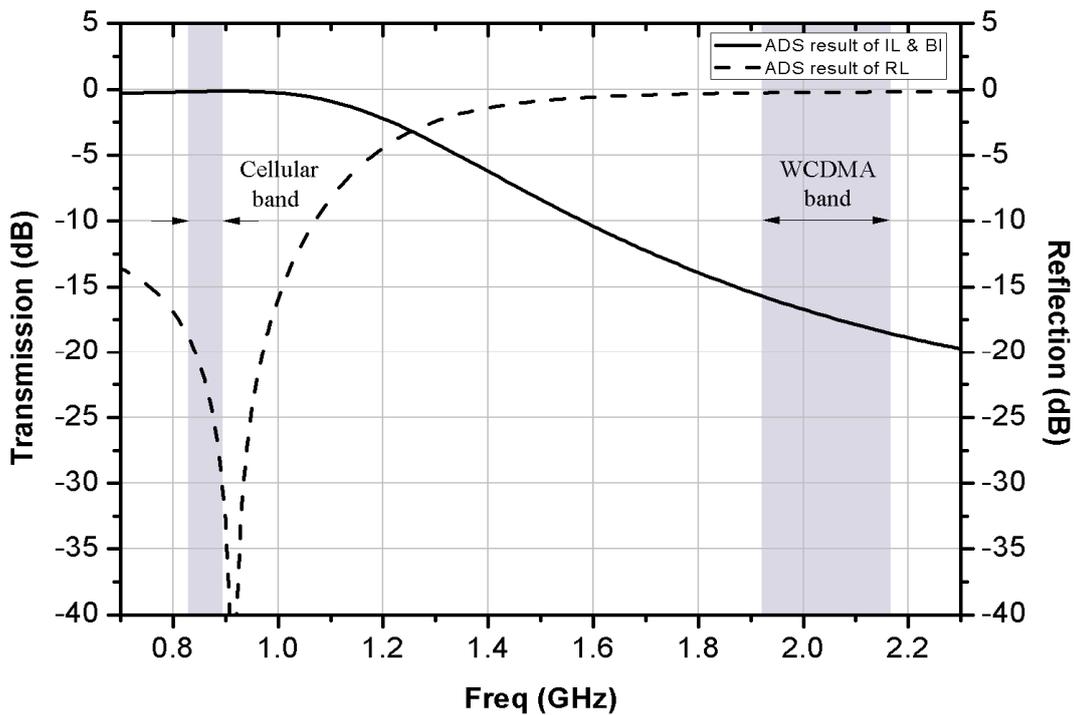
각 소자 값을 이용하여 설계된 5차 저역통과 필터의 각 단에서 전송선로의 폭과 길이는 표 32의 TL_2 ~ TL_6와 같으며, 이 값은 시험과정을 최적화된 값이고

TL_1은 필터의 입출력을 위한 50Ω 전송선로이다. 이때 필터 설계에 사용된 기판은 유전율 2, 유전체 두께 0.787 mm, 유전손실 0.001을 갖는다.

설계된 저역통과 필터는 표 33으로부터 통과대역인 셀룰러 대역에서 17 dB 이상의 반사손실 특성과 함께 0.2 dB 이하의 삽입손실 특성을 만족하고 있으며, 차단대역인 WCDMA 대역에서는 15 dB 이상의 감쇠 특성을 나타냄으로써 표 31의 설계 목표를 만족하고 있다.



(a) Layout.



(b) Simulation results.

Fig. 45. Cellular band LPF structure and simulation results.

Table 32. LPF design parameters in cellular band.

[mm]

ITEM	TL_1		TL_2		TL_3		TL_4		TL_5		TL_6	
	W	L	W	L	W	L	W	L	W	L	W	L
Value	2.5	5.0	4.6	5.5	0.5	25.6	10.2	12.0	0.5	27.5	6.8	11.7
Impedance	50Ω		32Ω		110Ω		17Ω		110Ω		23Ω	
Line-length	0.022λ		0.025λ		0.107λ		0.055λ		0.115λ		0.053λ	

Table 33. Simulation results of cellular band LPF.

ITEM	Unit	Diplexer (Cellular Band)
Frequency	GHz	0.824~0.894
Insertion Loss	dB	0.16
Return Loss	dB	17.9
Band Isolation	dB	15.6

2) WCDMA 대역 설계

WCDMA 대역 필터는 직접 결합 구조를 갖는 콤라인(comb-line) 대역통과 필터 구조를 사용하였다. 일반적으로 콤라인 필터는 그림 24와 같이 공진기 사이의 자체결합 구조 특성을 갖도록 구현되며 비교적 협대역 특성을 갖는다. 하지만 공진기 간의 자체결합 구조를 그림 46과 같이 직접 결합구조로 변경하면 비교적 넓은 대역폭 특성을 얻을 수 있으며[36], 기존의 비교적 넓은 대역 특성을 갖는 병렬 결합 구조 필터 등에 비해 낮은 삽입손실 특성을 얻을 수 있기에 다이플렉서 구현에 적합하다.

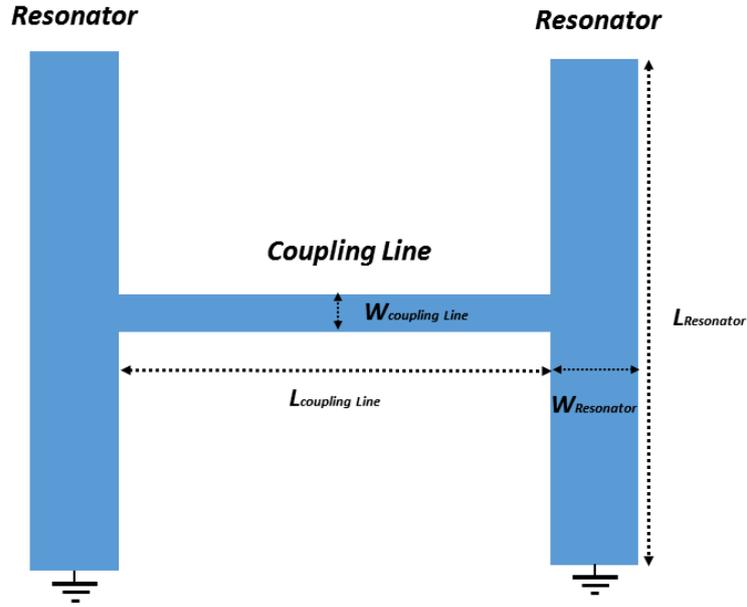


Fig. 46. Direct coupling structure of comb-line resonator.

일반적인 콤라인 대역통과 필터는 원형 저역통과 필터의 파라미터 값과 함께 식 (17)과 같이 공진기의 서셉턴스(b_i)를 결정한 후 시작된다[37].

$$\frac{b_i}{Y_A} = \frac{Y_{ai}}{Y_A} \left(\frac{\cot\theta_0 + \theta_0 \csc^2\theta_0}{2} \right) \quad \text{for } i = 1 \text{ to } n \quad (17)$$

여기서 Y_A 는 종단 선로의 어드미턴스, θ_0 는 공진기 공진 주파수의 전기적 길이, Y_{ai} 는 인접 공진기와 접지된 선로의 어드미턴스로 해석된다. Y_{ai} 의 선택은 필터의 어드미턴스 레벨을 결정하고, 공진기의 무부하 Q 값에 영향을 줄 수 있다.

비대역폭 FBW가 주어졌을 때, 원형 필터 소자 값 g_i 를 식 (18)에 대입하여 필터를 설계할 수 있다.

$$\frac{J_{0,1}}{Y_A} = \sqrt{\frac{FBW \frac{b_1}{Y_A}}{g_0 g_1}} \quad (18a)$$

$$\frac{J_{n,n+1}}{Y_A} = \sqrt{\frac{FBW \frac{b_n}{Y_A}}{g_n g_{n+1}}} \quad (18b)$$

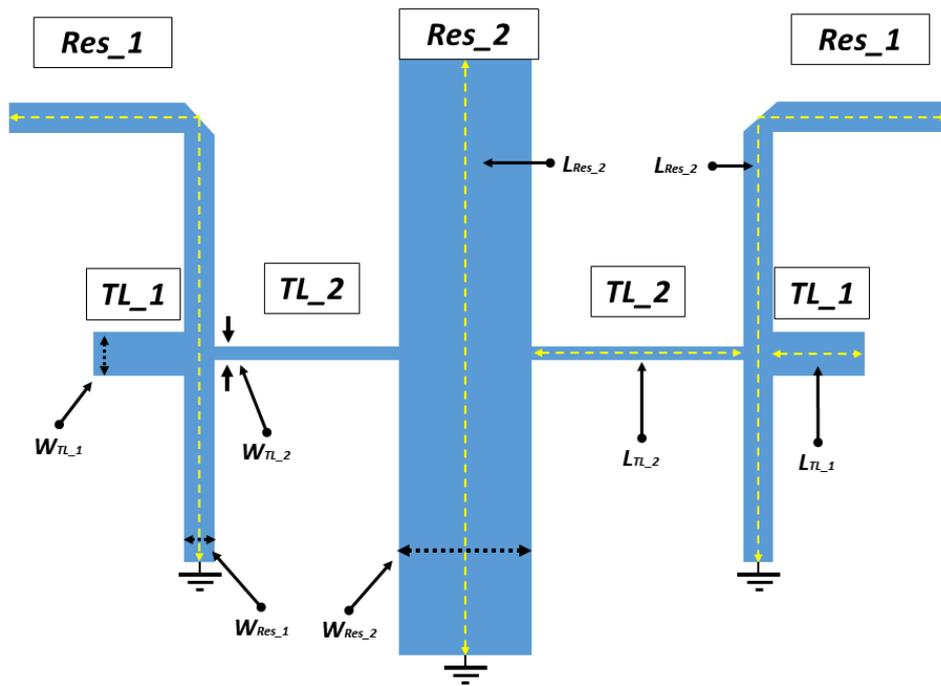
$$\frac{J_{i,i+1}}{Y_A} = FBW \sqrt{\frac{b_i b_{i+1}}{Y_A Y_A}} \frac{1}{g_0 g_1} \quad (18c)$$

이때 각 공진기 간의 결합 계수는 식 (19)와 같이 결정되는데, 대역이 넓은 경우 보다 높은 결합 계수가 필요하게 된다.

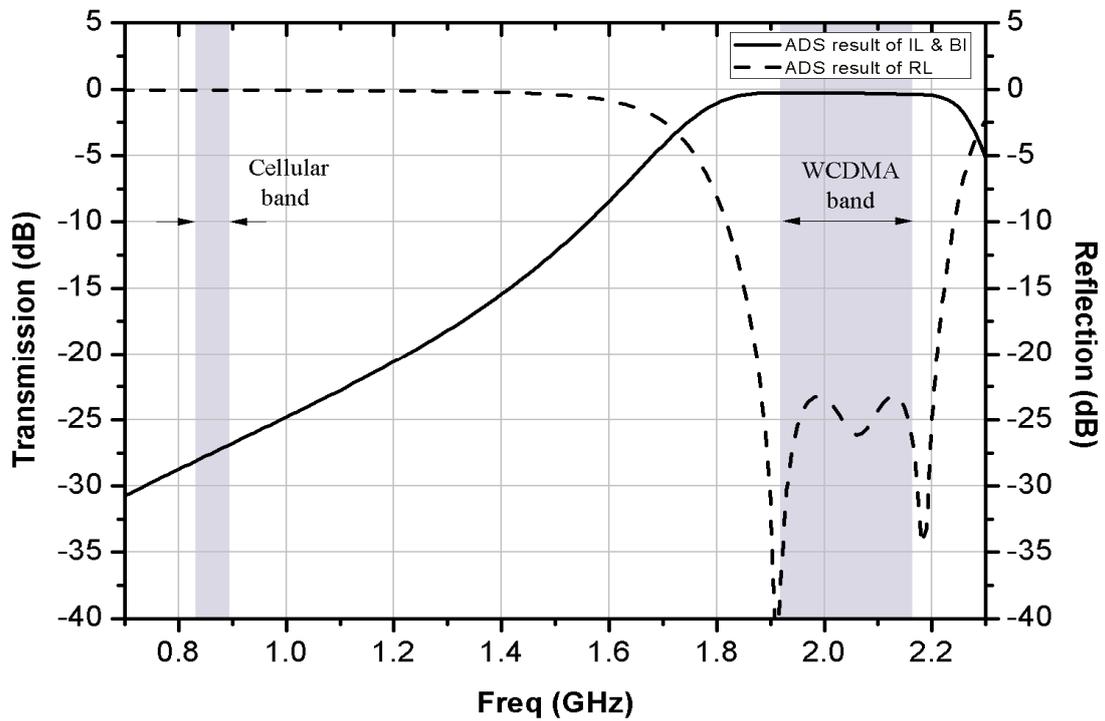
$$M_{i,i+1} = \frac{J_{i,i+1}}{\sqrt{b_i b_{i+1}}} = \frac{FBW}{\sqrt{g_i g_{i+1}}} \quad (19)$$

설계 주파수 대역인 WCDMA 대역의 통과대역은 1.92~2.17 GHz로 비대역폭은 약 0.122이다. 0.1 dB 리플을 갖는 체비세프 다항식을 이용한 원형 소자를 이용하여 3차 필터를 구현하면 셀룰러 대역에서 충분한 차단 특성을 얻을 수 있는데, 원형 소자는 $g_1 = 1.0316$, $g_2 = 1.1474$, $g_3 = 1.0316$ 이다. 이 값을 식 (17)에 대입하면 각 공진기 사이 결합 계수는 $M_{0,1} = 0.1203$, $M_{1,2} = 0.1124$, $M_{2,3} = 0.1124$, $M_{3,4} = 0.1203$ 이다. 일반적으로 마이크로스트립 구조에서 공진기 사이의 자체결합 구조를 이용하여 0.1 이상의 결합 계수를 구현하기 어렵기 때문에 그림 46과 같이 직접 결합 구조를 이용하여 필터를 설계한다.

그림 47은 직접 결합 구조를 갖는 콤팩트 필터를 이용하여 구현된 WCDMA 대역 필터 구조 및 특성이다. 설계된 필터는 3차 필터이며, 통과대역인 1.92~2.17 GHz 대역에서는 0.4 dB 이하의 삽입손실 특성을 가지며, 차단대역인 0.824~0.894 GHz 대역에서는 27 dB 이상의 차단 특성을 갖는다. 설계된 대역통과 필터는 유전율 2, 유전체 두께 0.787 mm, 유전손실 0.001을 갖는 기판을 사용하였으며, 각 설계 파라미터는 표 35과 같다. 필터는 대칭 구조로 설계되었기 때문에 공진기 #1과 공진기 #3, 결합 선로 #1과 #2는 동일한 설계 파라미터 값을 갖는다.



(a) Layout.



(b) Simulation results.

Fig. 47. WCDMA band BPF structure and simulation results.

Table 34. Simulation results of WCDMA band BPF.

ITEM	Unit	Diplexer (WCDMA Band)
Frequency	GHz	1.92~2.17
Insertion Loss	dB	0.33
Return Loss	dB	23.17
Band Isolation	dB	25.99

Table 35. BPF design parameters in WCDMA band. [mm]

TL_1		Res_1		TL_2		Res_2	
W1	L1	W2	L	W3	L5	W4	L
2.5	5.0	1.65	L2 : 9.7	0.9	12.6	7.37	L6 : 15.96
			L3 : 8.9				L7 : 16.46
			L4 : 8.9				

3) 광대역 다이플렉서 설계

그림 48은 다이플렉서용 분배기 구조이며, 그림 36의 분배기와 같은 동작원리를 이용할 수 있다. 분배기의 두 개의 연결 포트에는 그림 45와 그림 47에서 설계된 필터가 연결되어 최종 셀룰러 대역과 WCDMA 대역만 출력된다. 이때 두 대역 사이 격리 특성을 향상시키기 위해 셀룰러 대역 포트로는 WCDMA 주파수 대역에 대해 개방($\Gamma = 1 \angle 0^\circ$)이 되도록 $l_{cellular}$ 의 길이를 조정해야하고, 반대로 WCDMA 출력 포트로는 셀룰러 주파수 대역 신호에 대해 개방($\Gamma = 1 \angle 0^\circ$)이 되도록 l_{WCDMA} 의 길이를 조정해야 한다.

Table 36. Divider design parameters for broadband diplexer. [mm]

$W_{cellular}$	$l_{cellular}$	W_{cp}	l_{cp}	W_{WCDMA}	l_{WCDMA}
2.5	50	2.5	5	2.5	56

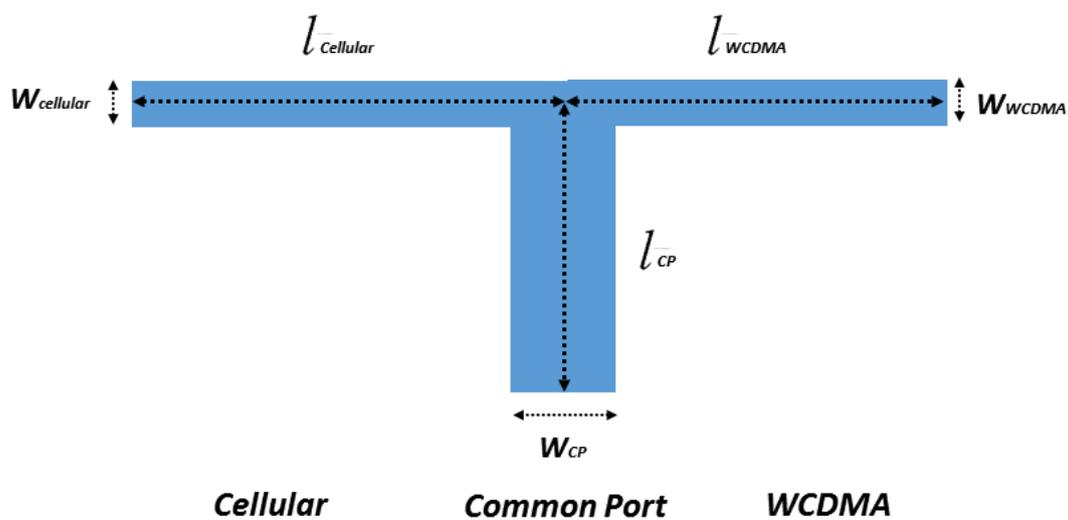
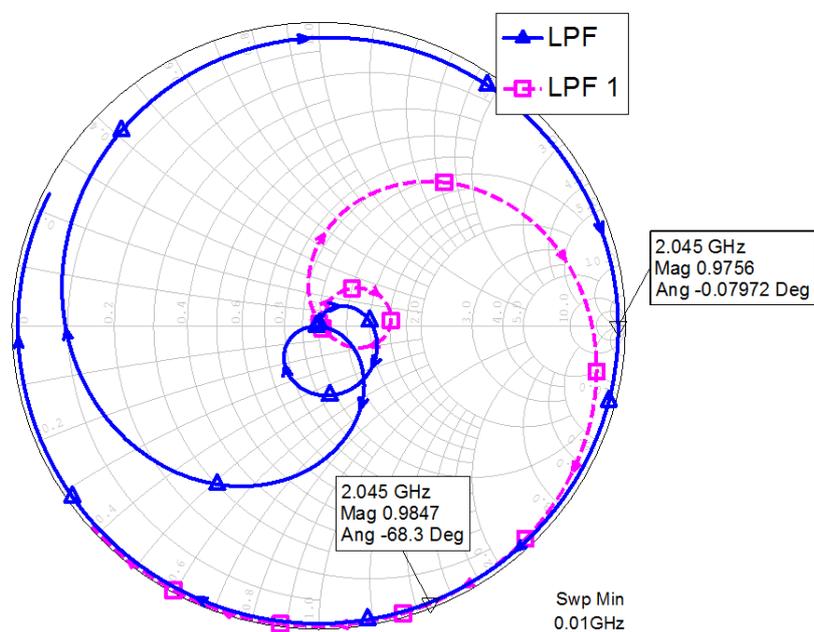
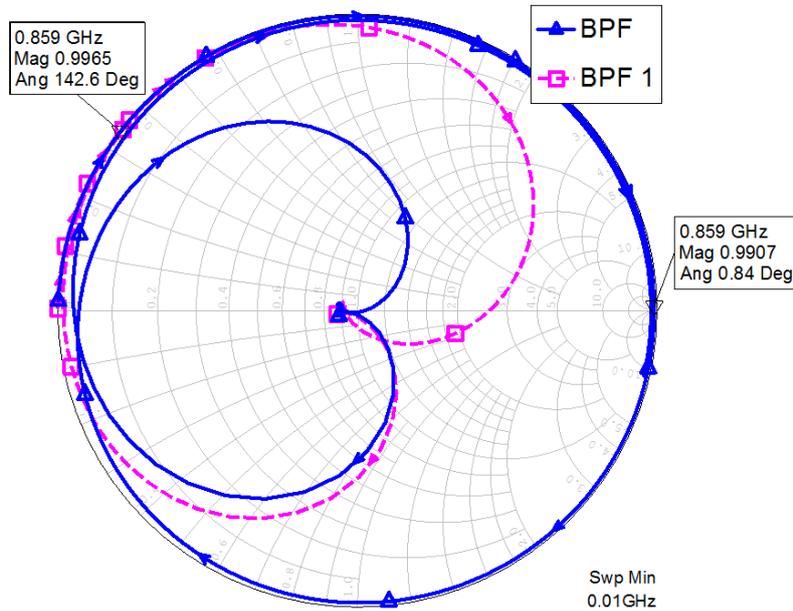


Fig. 48. Broadband diplexer divider structure.



(a) Variation of $l_{cellular}$



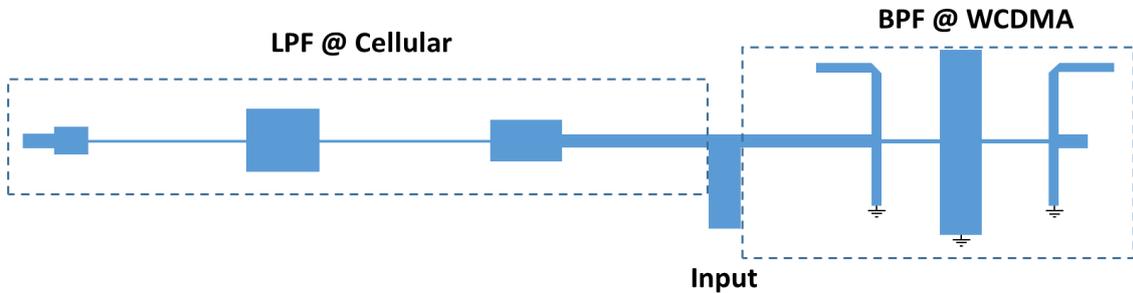
(b) Variation of l_{WCDMA}

Fig. 49. Variation of reflection coefficient by length of output port.

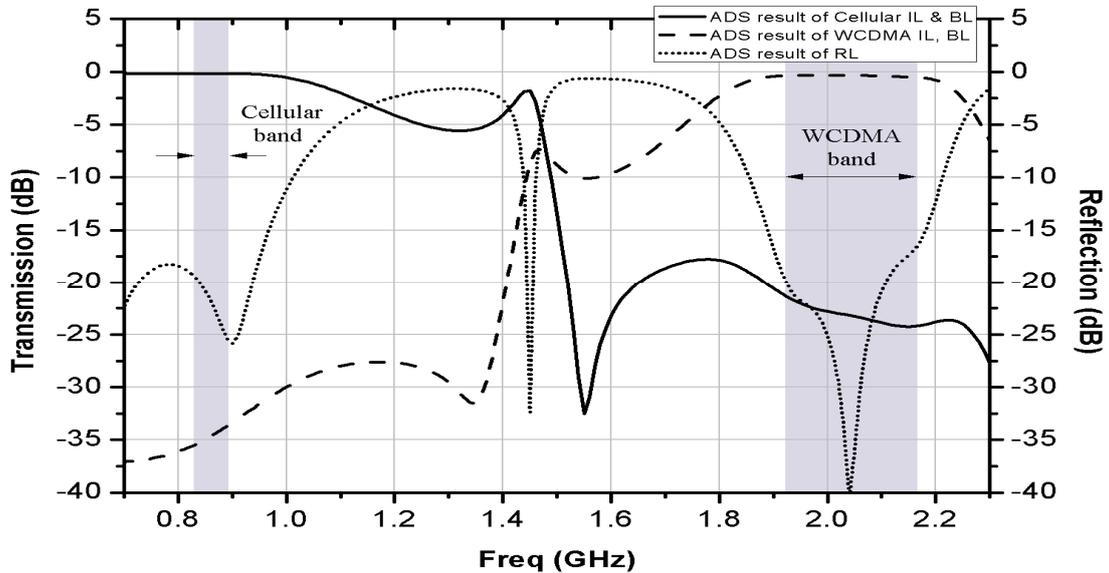
그림 49는 그림 45와 그림 47에서 설계된 필터들의 입력 전송선로의 길이 $l_{cellular}$ 와 l_{WCDMA} 에 따른 반사 계수의 변화를 나타낸 것이다. 그림 49(a)에서 LPF 1의 위상곡선은 그림 45의 필터에 따른 결과이며 입력단 전송선로 길이 $l_{cellular}$ 가 0 mm일 때 2.045 GHz에서 반사계수가 $0.98 \angle -68.3^\circ$ 이 된다. 이때 $l_{cellular}$ 를 50 mm까지 증가시키면 LPF의 위상곡선에 나타난 결과와 같이 반사계수가 $1 \angle 0^\circ$ 과 가까워지면서 2.045 GHz에 대해 개방 특성을 갖게 된다. 그림 49(b)에서 BPF 1의 위상곡선은 그림 47의 필터에 따른 결과이며 전송선로의 길이 l_{WCDMA} 가 0 mm일 때 0.859 GHz에 대한 반사계수는 $0.996 \angle 142.6^\circ$ 이고, l_{WCDMA} 를 56 mm까지 증가시키면 BPF(위상곡선)와 같이 반사계수는 $1 \angle 0^\circ$ 과 가까워지고 0.859 GHz에 대해 개방 특성을 갖게 된다.

그림 50은 최종 설계된 다이플렉서 구조 및 특성이다. 최종 설계된 다이플렉서는 그림 48의 분배기의 두 출력 포트에 그림 45의 저역통과 필터와 그림 47의 대역통과 필터를 연결한 것으로, 저역통과 필터의 경우, 분기 지점에서 필터까지 전송선 길이 $L1 = 50$ mm이고, 대역통과 필터의 경우 분기 지점에서 필터까지 전송선 길이 $L2 = 56$ mm이다. 그림 50(b)의 결과인 표 37로부터 최종 설계된 다이플렉서는 두 개의 통과

대역에서 0.5 dB 이하의 삽입손실 특성을 나타냈고, 셀룰러 대역에서의 WCDMA 대역 차단 특성은 30 dB 이상, WCDMA 대역에서의 셀룰러 대역 차단 특성은 20 dB 이상임을 확인 할 수 있다.



(a) Layout.



(b) Simulation results.

Fig. 50. Broadband diplexer structure and simulation results.

Table 37. Broadband diplexer simulation results.

ITEM	Unit	Cellular Band	WCDMA Band
Frequency	GHz	0.824~0.894	1.92~2.17
Insertion Loss	dB	0.18	0.53
Return Loss	dB	18	16.2
Band Isolation	dB	25.5	33

V. LTCC 제작 공정

1. 유전체 및 전극재료

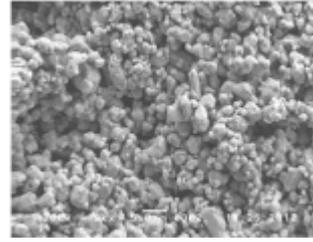
LTCC 소재를 이용하여 셀룰러 이동통신 대역의 초소형 듀플렉서를 제작하기 위해서는 소형화를 위해 고유전율의 소재가 필요하며, 통과대역에서의 낮은 삽입손실과 높은 감쇄특성을 갖기 위해 가능하면 유전손실($\tan\delta$)이 낮은 것이 유리하다. LTCC 필터 제작 과정에서 총 세 가지 종류의 유전체 재료를 사용하였는데, 유전율이 41.6이고 유전손실이 0.0004인 R40, 유전율이 40이고 유전손실이 0.002인 N40 그리고 유전율이 20고 유전손실이 0.001인 N20을 사용하여 LTCC 필터를 제작하여 특성을 비교하였다. LTCC 필터 제작 과정에서 R40 재료는 층 분리 현상으로 인하여 소성이 불가능하였고, N40 재료는 높은 유전손실로 인하여 손실 특성이 많이 저하되는 결과를 나타냈다. 여러 제작 과정을 거치면서 유전율이 비교적 낮아 주파수 편이 현상이 적고, 유전손실도 N40 보다 적어 삽입손실 특성이 비교적 양호한 N20 재료를 사용하여 최종 LTCC 필터를 제작하였다. 내부전극에 사용된 전극재료는 800~900℃의 온도에서 LTCC 유전체 재료와 동시에 소성을 위해 Ag 전극을 사용하였다. Ag 전극 페이스트를 LTCC 유전체 시트 위에 스크린 프린팅하여 전극 패턴을 형성하였다. 표 38은 N1 전극페이스트의 특성을 나타낸 것으로 공진기의 Q 값을 높이기 위하여 메탈함량이 80% 이상인 전극 재료를 사용하였다.

Table 38. Characteristic of N1 electrode paste.

Division	Characteristic value
Conductor	Ag
Metal content	87±1 %
Resistivity	$1.9 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}$
Sheet Resistivity	$1.73\text{m}\Omega/\text{cm}^2$
Sintering temperature	850~900℃



(a) Dielectric powder N20.



(b) Ag Paste N1.

Fig. 51. Dielectric and electrode paste.

2. LTCC 적층필터 제조공정

LTCC 제조 공정은 크게 원료 성형공정, 인쇄 및 적층공정, 소성공정 3종류로 분류된다. 유전체 재료와 바인더를 볼밀(ball mill)에서 혼합 및 분쇄하여 슬러리를 제조한다. 슬러리를 닥터블레이드(doctor blade) 성형기를 이용하여 얇게 테이프캐스팅(tape casting)하고, 이렇게 성형된 시트(sheet) 위에 다양한 형태의 내부전극 패턴을 스크린 인쇄하여 준비한다. 이후, LTCC 적층필터의 설계에 맞게 인쇄패턴과 더미(dummy) 유전체 층을 적층, 압착, 절단하여 날개의 소성 전의 그린(green) 필터를 얻는다. 그린 필터를 800~900°C에서 소성하여 적층필터를 제조한다. 이후에 표면에 은(Ag)을 무전해 도금하여 LTCC 적층필터 제조를 완료한다.

1) 원료 성형 공정

그림 52는 원료성형 공정도를 나타낸다. 슬러리 제조를 위해 유전체분말을 톨루엔, 에탄올 및 엔부틸(n-Butyl) 알콜로 이루어진 혼합 용매와 PVB 바인더에 투입하여 볼밀에서 YTZ 볼(2Φ)을 이용하여 24시간 동안 두 번에 걸쳐 섞는 과정을 수행한다. 슬러리 내의 이물질을 제거하기 위해 필터링을 한 후에 기포를 제거하기 위하여 탈포를 1시간 동안 실시하고, 이후에 에이징을 15 rpm의 저속으로 8시간에 걸쳐 로드밀(load mill)로 돌려준다. 이후에 닥터 블레이드 코터를 용하여 50 μ m 두께로 성형하고, 65°C에서 30분간 건조하여 성형 시트를 얻는다.

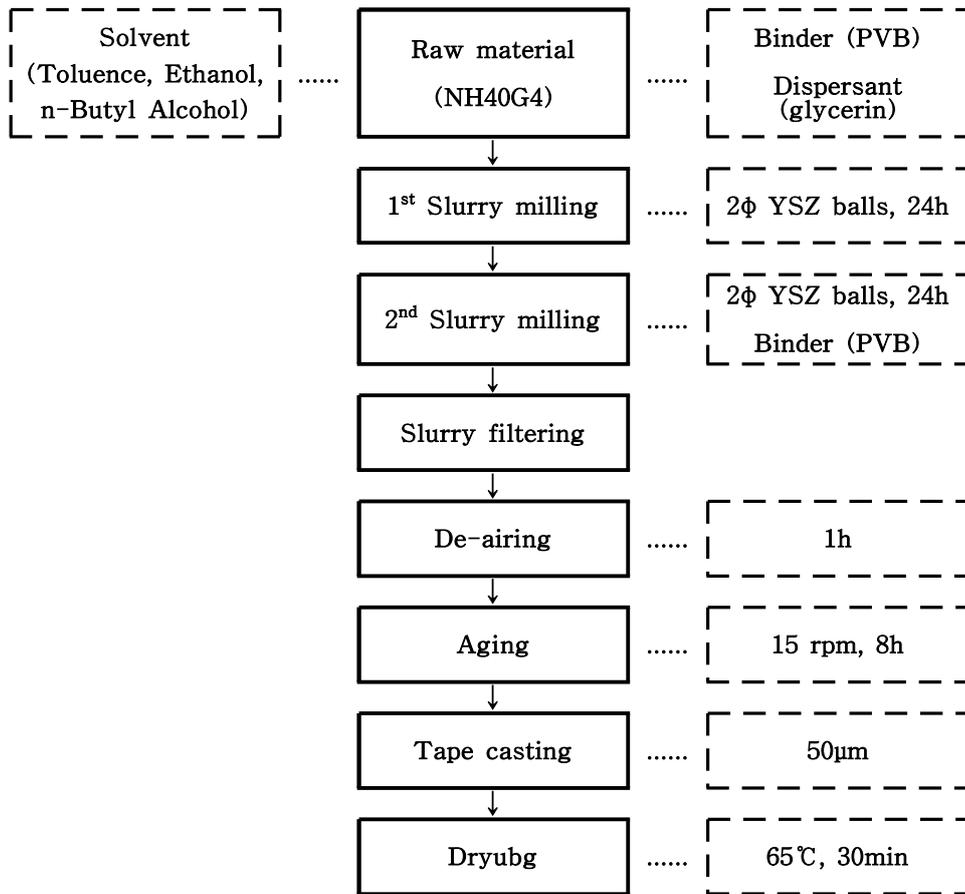


Fig. 52. Material forming process.

1-1) 분쇄 및 분산

먼저 바인더 용액을 제조하기 위하여 프리믹서(pre-mixer)에 혼합용매(톨루엔, 에탄올, 엔부틸 알콜)와 PVB 바인더를 넣고 충분히 용해시켜준다. 이렇게 준비된 바인더 용액에 유전체 분말을 넣고 1차 분산을 시킨 후 볼/바스켓밀(ball/basket mill)을 이용하여 분쇄 및 분산시킨다.

1-2) 탈포 및 에이징

제조된 슬러리는 볼에 의해서 응력이 한 곳으로 집중되어 응집될 수 있고 밀링 중에 슬러리 안에 발생된 기포를 제거하기 위하여 1시간 동안 탈포를 실시한 후에 슬러리 응집을 분산시켜 이방성이 없는 안정한 슬러리를 제조하기 위해 15rpm 속

도로 8시간 이상 에이징 한다.

1-3) 그린시트 성형

제조된 슬러리는 데이프캐스터 장비를 이용하여 분당 0.5 ~ 0.8m 의 성형 속도로 50 μ m두께의 그린시트(green sheet)를 제조한다.

2) 인쇄 및 적층 공정

그림 53은 펀칭에서 소성까지의 공정을 나타낸다. 내부전극 패턴 사이의 전기적 연결을 위한 통로를 만들기 위해 펀처를 이용하여 성형 시트위에 지름 200 μ m의 비아(via)를 형성한다. 이렇게 형성된 비아를 스크린 인쇄를 통하여 전극을 채운다. 내부전극 패턴은 Ag 전극 페이스트를 이용하여 스크린 인쇄를 하여 준비한다. 전극인쇄의 두께는 전극의 Q 값에 영향을 미치므로 매우 중요하며, 페이스트의 점도 및 인쇄횟수에 의해 조절할 수 있다. LTCC 필터 제작시 Ag전극 인쇄는 2겹으로 실시하여 전극 두께를 약 20 μ m정도로 제작한다.

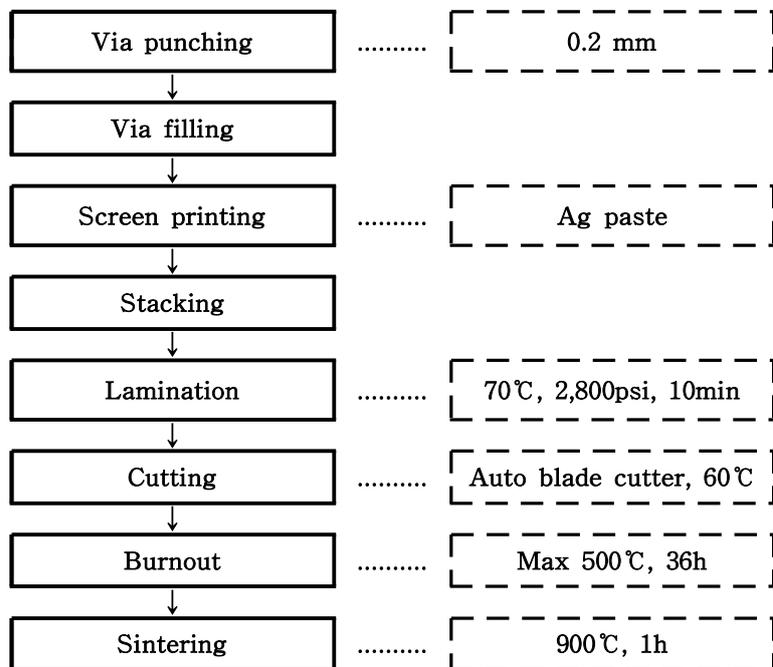


Fig. 53. Punching and calcination process.

2-1) 펀칭

제작된 그린시트를 적층할 때에 얼라인먼트를 맞추기 위하여 가이드홀(guide hall)과 인덱스홀(index hole), 그리고 층간 전기 도통을 위한 비아홀을 펀칭한다. 이때 가이드홀과 인덱스홀은 각각 직경이 6 mm 와 0.3 mm 펀치로, 비아홀은 직경 0.2 mm 펀치로 천공한다.

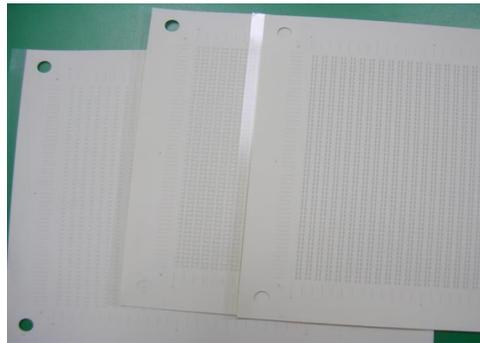


Fig. 54. Punched green sheets.

2-2) 비아충진

0.2 mm로 천공한 비아에 층간 전기가 통할 수 있도록 스크린 인쇄기(Micro-tec 사)를 사용하여 은전극을 충전한다.

2-3) 스크린 인쇄

내부 전극 패턴은 시트 위에 수평 도통이 될 수 있도록 스크린 인쇄기를 사용하여 은 전극을 인쇄하였다. 이 때 사용된 제판 사양은 ST325 (screen mesh 325)에 유제막 높이 $10\mu\text{m}$ 조건이고 손실 특성을 좋게 하기 위해 2겹 인쇄하여 인쇄 두께를 $20\mu\text{m}$ 로 높였다.

2-4) 적층

내부 전극이 인쇄된 그린시트는 65°C 에서 30분 동안 건조한 후 아래의 적층 설비를 사용하여 적층 순서에 따라 적층한다. 적층은 비전(vision)을 사용하여 인덱스홀을 인식한 후 상하 시트의 얼라인먼트를 맞추어 적층한다.

2-5) 가압접착

적층 순서에 맞게 적층된 시트는 70℃에서 2,800psi 의 정수압으로 600초간 가압하여 적층된 시트를 접착시키고 시트의 밀도를 증가시킨다.

2-6) 절단

적층된 시트는 자동 시트절단기(UHT사)로 원하는 크기로 절단하였다. 절단 시에는 바인더를 부드럽게 하여 절단이 용이하도록 60℃로 가열된 플레이트 위에서 초경 칼로 절단한다.

2-7) 탈바인더

생소지(green body) 안에는 10~15% 정도의 바인더가 포함되어 있으므로 탈바인더(binder burnout) 구간에서 충분히 천천히 승온하지 않으면 내부 기압에 의해 부풀거나 층간박리(delamination) 불량 발생할 수 있다. 그러므로 아래와 같은 TG 분석을 통해 소진(burnout) 온도를 확인하고 소진 온도 구간에서 약 36 시간 정도 유지하여 탈바인더를 완료한다.

3) 소성

소성은 그림 55와 같은 벨트퍼니스 장비를 사용하여 900℃에서 60분 유지 조건으로 실시하였다. 소성 시 적층필터 수축율은 아래의 표 39과 같다. 선(L)과 폭(W)의 소성 수축율은 16.45와 16.24%이며, 두께(T) 수축율은 28.05%로 L, W 수축율에 비하여 높은 값을 나타내었다.



Fig. 55. Sintering furnace.

Table 39. Percentage of contraction before and after sintering of LTCC multi-layer filter.

Classification	Dimension before calcination (mm)	Dimension after calcination (mm)	Percentage of contraction (%)
L	26.33	22.0	16.45
W	14.35	12.02	16.24
T	4.1	2.95	28.05

표 39에서 두께는 수축율을 감안하여 $50\mu\text{m}$ 의 그린시트를 소성 전에 총 79장을 적층하여 소성하면 설계치인 3 mm두께를 얻을 수 있다.

3. 저온 소성용 Ag계 전극 페이스트 설정 및 수축 거동 분석

LTCC의 내부전극으로는 Ag가 주로 사용되며, 융점은 963°C 이고 보통 $800\sim 940^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 소성된다. 세라믹소체인 LTCC와 내부전극인 Ag를 동시에 소성할 때 Ag 전극은 그림 56에서 보듯이 400°C 까지는 Ag 입자들 사이에 넥(neck)을 형성하여 약간의 부피 수축이 일어나며, 다음으로는 Ag 전극들이 치밀하게 되면서 급격히 수축한다. 마지막으로 Ag 전극이 구형화하면서 팽창하며 약간의 체적이 증가한다.

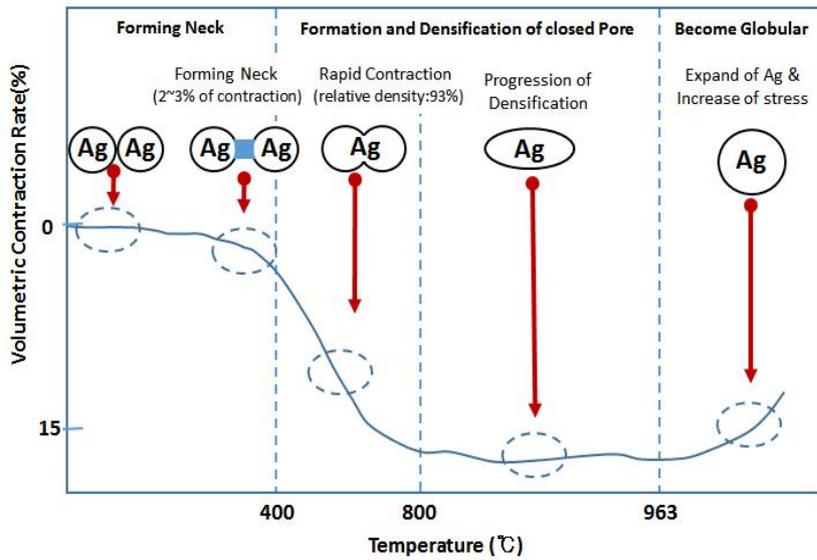


Fig. 56. Process of ceramic sintering.

그림 57은 상온에서 고온까지 측정된 LTCC 세라믹과 Ag 내부전극의 소성수축 거동을 나타낸 것이다. Ag 내부전극은 LTCC 세라믹에 비하여 낮은 온도에서 수축이 일어나므로 Ag 전극과 LTCC 세라믹 사이의 수축율 차이에 기인하여 층간박리와 균열과 같은 결함이 발생될 수 있어 전극과 세라믹 소체간의 소성수축율을 맞추는 것이 필요하다. Ag 입자가 작을수록 소성수축은 더 낮은 온도에서 일어남을 알 수 있다.

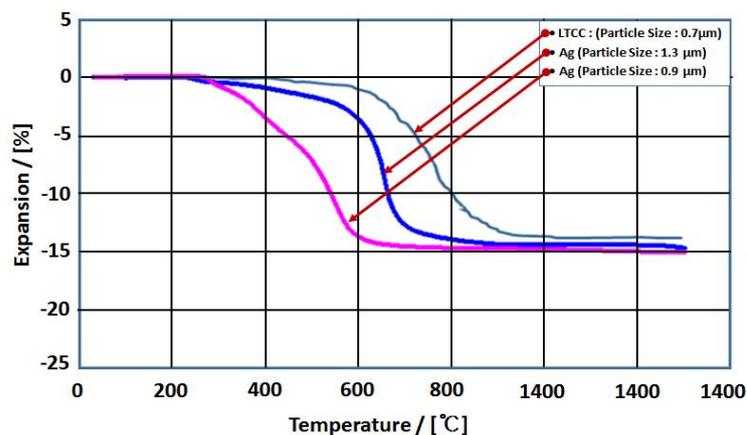


Fig. 57. Sintering shrinkage behavior of Ag plated electrode and LTCC ceramic.

세라믹과 전극의 소성 수축율을 만족시키기 위해서는 Ag 전극페이스트 내에 세라믹 첨가물을 넣는 것이 효과적이다. 세라믹 첨가물은 Ag 금속분말 사이에 위치하여 Ag 금속분말의 넥(neck) 형성을 억제하여 소성수축 온도를 높일 수 있다. 그림 58은 Ag 전극페이스트 내에 세라믹 첨가물을 6wt%(wt:무게)정도 넣은 내부전극 페이스트의 수축거동을 나타낸 그림이다. 순수 Ag 전극에 비하여 LTCC 첨가물 분말을 첨가함으로써 수축이 일어나는 온도가 상승함을 나타내고 있다. 따라서 미립의 첨가물을 적절량 추가함으로써 소성수축 거동을 제어할 수 있다.

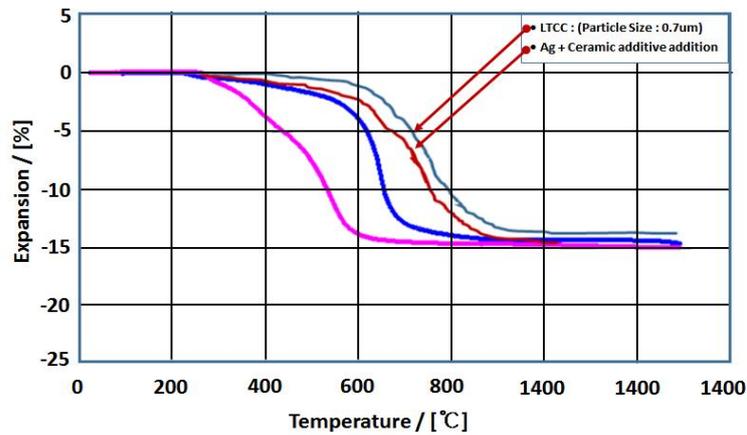


Fig. 58. Sintering shrinkage behavior of Ag plated electrode and LTCC ceramic after ceramic additive addition.

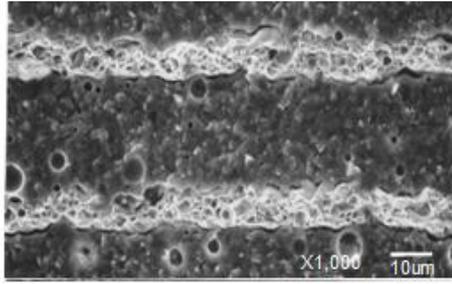
LTCC의 미세구조 및 전기적 특성은 소성 온도에 의존한다. 940°C에서 소성된 시편은 소성 후 전극내부 및 전극 주위에 많은 기공이 관찰된다. 한편, 이러한 기공들은 소성 온도를 900°C로 낮추고, 소성 시간을 6시간으로 증가시킴으로써 전극 및 전극주위에 기포가 상당히 감소하고 치밀한 조직을 갖는 미세구조를 얻을 수 있다. 940°C에서 2시간 동안 소성된 시편은 전극의 두께가 14.2 μm 으로 두꺼우며, 이는 전극내부의 기공이 소성이 되기 전에 밖으로 빠져나가지 못하여 전극주위에 단결정 결함인 트랩(trap)이 발생되기 때문이다. 한편, 900°C의 낮은 온

도에서 6시간 동안 서서히 온도를 높임으로써 세라믹 소재 내의 바인더 가스가 충분히 빠져 나가므로 전극내부에 기공이 적고 보다 얇은 전극이 형성된다. 따라서 LTCC 필터 제작을 위한 최적의 소성 조건은 900°C에서 소성 시간을 6시간으로 했을 때이다.

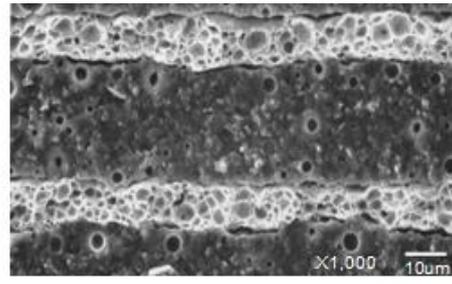
삽입손실의 경우 전극의 Q 값에 크게 의존하며, 내부전극이 평탄하고 기공이 적을수록 삽입손실이 작다. 따라서 900°C의 저온에서 충분히 오랫동안 소성시킨 경우가 우수한 삽입손실을 갖는다. LTCC 필터의 경우 삽입손실의 제어가 특히 중요하다. 삽입손실은 식 20에 의하여 재료의 Q 값과 전극의 Q 값에 영향을 받는다.

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_d} + \frac{1}{Q_e} \quad (20)$$

여기서, Q_d 는 유전체의 Q 값이고 Q_e 는 전극의 Q 값을 나타낸다. 따라서 삽입손실을 향상시키기 위해서는 내부전극의 특성 및 선택이 중요하게 된다. 실험에 사용된 내부전극은 Namics사의 7251S(무기함량 88%, 점도 10만 CPS)와 Tanaka사의 TR-651CM(무기함량 83%, 점도 20만 CPS)이다. 전극의 저항을 줄이기 위해 최대한 Ag의 무기함량을 80%이상으로 높이고, 내부전극의 두께를 소성 후 고점도인 적정한 두께가 되도록 10 μ m이상으로 유지한다. 소성 전 7251S와 TR-651CM 페이스트의 인쇄막의 두께는 각각 15 μ m과 16 μ m으로 차이가 존재하나, 소성후의 7251S와 TR-651CM 전극 두께는 각각 11.3 μ m과 11.2 μ m으로 거의 동일한 값을 갖는다. 한편, 인쇄막의 평탄도는 그림 59에서 보듯이 7251S가 3.55 μ m으로 TR-651CM의 3.72 μ m에 비하여 평탄하다[38]. 실제 LTCC 필터 제작 후 삽입손실 특성을 비교한 결과 7251S의 경우가 보다 좋은 특성을 나타낸다. 따라서 본 논문에서는 7251S 전극을 사용하여 최종 시료를 제작하였다. 일반적으로 고주파에 있어서 전극의 표면이 매끈할수록 삽입손실이 감소하게 된다. 따라서 삽입손실을 제어하기 위해서는 내부전극 내의 기공 제거에 의한 치밀화 및 전극의 평탄도를 높이는 것이 중요하다.



(a) TR-65CM.



(b) 7251S.

Fig. 59. Flatness of Ag plated electrode.

VI. LTCC 듀플렉서 및 다이플렉서, 쿼드플렉서 제작

LTCC 필터의 Tx와 Rx 소자의 삽입손실 및 감쇄량은 설계패턴, 유전체 재료의 유전을 및 유전손실 그리고 전극재료에 의존한다. LTCC 적층필터 Tx와 Rx 소자의 성능향상을 위하여 표 40과 같이 설계변경, 유전체 소재 변경 및 전극 두께 변화 등의 다양한 방법으로 제작하여 필터 성능을 검증하였다. 유전체 재료는 유전율이 각각 41.6, 40, 21인 총 3가지 종류로 시험을 하였고, 전극을 1겹, 2겹 인쇄를 하여 특성을 비교하였다. 표 40에서 유전율이 41.6인 세라믹 파우더 RNE-40를 사용한 경우 약 300 MHz 정도의 주파수 편이가 발생하였고 층 분리현상이 생겨 비슷한 유전율 값을 갖는 NH40G4 세라믹 파우더로 변경하여 시험하였다. 이 때 층 분리 현상과 주파수 편이 정도는 어느 정도 개선이 되었으나 삽입손실 특성이 약 6 dB 정도로 나타나 유전손실이 0.002인 NH40G4 보다 절반정도(0.001)인 NH20M4를 사용하여 삽입손실 특성을 개선하였다. 전극 또한 Namics사의 7251S전극을 2겹으로 인쇄 했을 때가 가장 좋은 특성을 나타내어 최종 제작 공정에서는 NH20M4 유전체 파우더를 사용하고, 7251S전극을 2겹 인쇄하여 LTCC 필터를 제작하였다.

Table 40. Development summary for LTCC filter.

Classification	Material of powder	Number of plating electrode	Filter shape	Note
Primary	RNE-40($\epsilon_r=41.6$)	Once	4th	Approx. 300MHz of frequency deviation
Secondary	RNE-40($\epsilon_r=41.6$)	Once	5th	
Third	NH40G4($\epsilon_r=40$)	Once	5th	Change of material
Fourth	NH40G4($\epsilon_r=40$)	Once, Twice	5th & Notch	Plated thickness
Fifth	NH20M4($\epsilon_r=21$)	Twice	5th & Notch	Change of material (tan δ lowered) approx. 15MHz of frequency deviation
Sixth	NH20M4($\epsilon_r=21$)	Twice	5th & Notch	Simulation after epsilon reconciliation

Table 41. Target specification for quad-plexer.

ITEM	Cellular band	WCDMA band
Pass Band	Rx : 0.824 ~ 0.849 GHz Tx : 0.869 ~ 0.894 GHz	Rx : 1.92 ~ 1.98 GHz Tx : 2.11 ~ 2.17 GHz
Insertion Loss	5.5 dB Max	3.5 dB
Return Loss	15 dB Min	15 dB
Band Isolation	50 dB Min	60 dB

제작된 LTCC 필터를 3장에서 설계된 PCB 분배기와 연결하여 듀플렉서를 구현하였고, 제작된 쿼드플렉서는 4장에 제시된 설계 데이터를 이용하여 제작된 다이플렉서를 셀룰러 대역과 WCDMA 대역의 듀플렉서와 연결시켜 구현하였다. 제작하고자 하는 쿼드플렉서 목표 성능 규격은 표 41과 같다. 이 규격은 미국 통신 시스템 제조사인 Comscope사, Westell사, Ampenol사 등 일반적으로 빌딩 내부의 DAS 시스템이나 소출력 중계기에 주로 사용되는 규격으로 제작된 쿼드플렉서의 상용화 가능성을 판단하는 기준으로 제시하였다. 그리고 설계에 따른 시뮬레이션 결과와 실제 네트워크분석기(E5071C, ENA Network Analyzer, Aglient 사)로 측정된 결과를 비교 분석하였다.

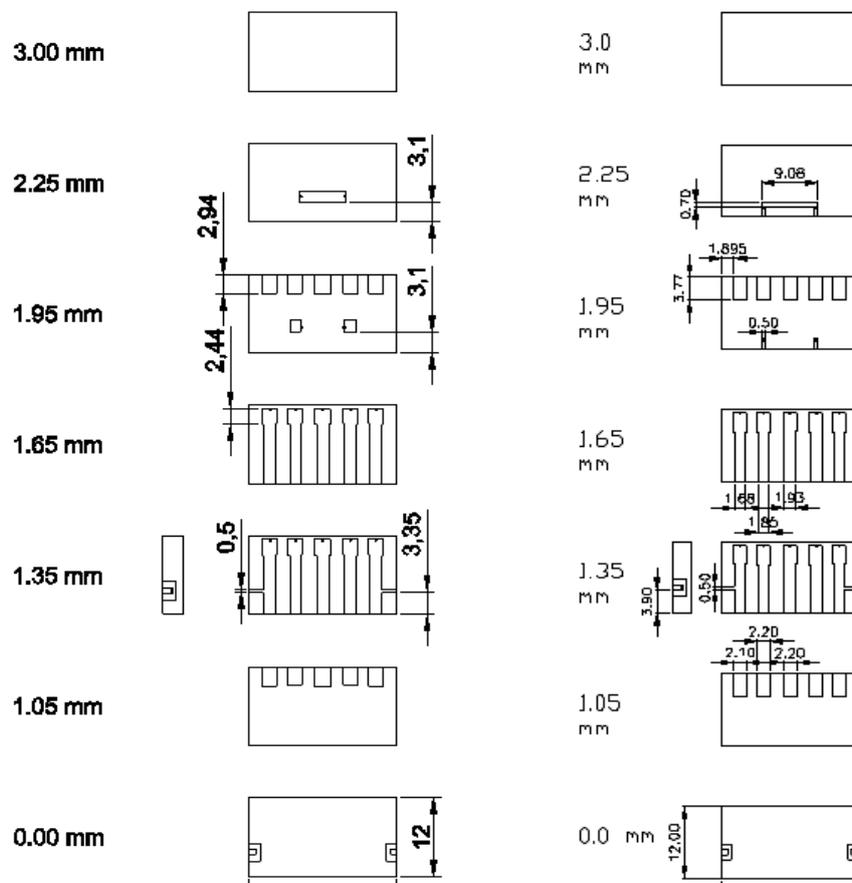
1. 셀룰러 대역 LTCC 듀플렉서 제작 결과

1) 셀룰러 대역 LTCC 대역통과 필터 제작 결과

표 40에서 6차 개발시험 과정을 통하여 최종 제작된 LTCC 대역통과 필터는 표 40의 5차의 실험결과를 바탕으로 Tx, Rx 필터를 제작하고 이들을 PCB 기판에 적용하여 듀플렉서를 만들었다. 유전율이 21이고, 유전손실이 0.001인 유전 소재를 사용하였으며, 전극 인쇄는 2겹 인쇄로 설정하였다. 또한, 삽입손실을 줄이기 위하여 공진기 구조는 그림 21(d)의 공진기를 사용하였으며, 입력 및 출력 급전선은 직선의 직접 연결형 입출력 포트였다. 한편, 5차 샘플 제작결과에서 공진 주파수가 최초 설계 값에서 약 0.015 GHz 만큼 낮은 쪽으로 벗어난 결과를 나타냈다. 따

라서 설계에 사용된 매질의 유전율은 20이 아닌, 20보다 약간 큰 20.65로 설계하여 중심주파수를 높은 쪽으로 이동시키고자 하였다.

그림 60은 최종 샘플 제작용 Rx 및 Tx 필터의 설계패턴을 나타낸 것이다. Tx 필터의 경우는 5개의 액티브(active) 내부전극 층과 앞과 뒤 커버(cover) 층으로 구성되어 있다. 액티브 내부전극 층은 공진기와 로딩 캐퍼시터 층 및 공진기 사이의 1개의 교차 결합 층으로 구성되었다. Rx 필터의 경우도 Tx 필터와 유사한 전극 구조를 가지고 있음을 알 수 있다.



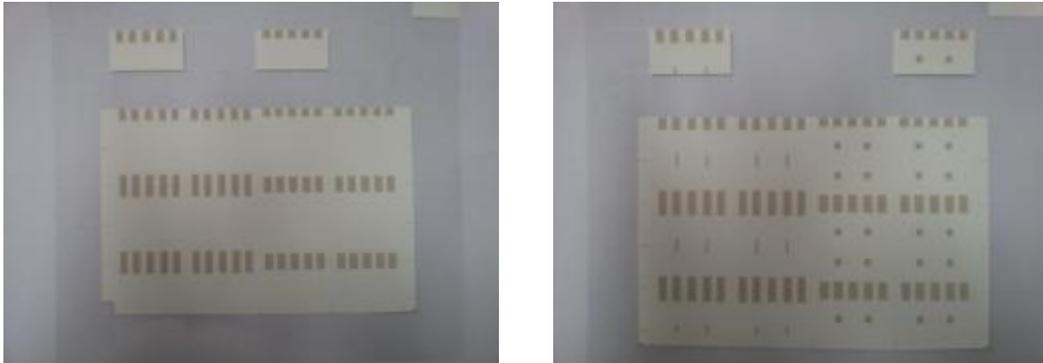
(a) Drawing of Tx filter.

(b) Drawing of Rx filter.

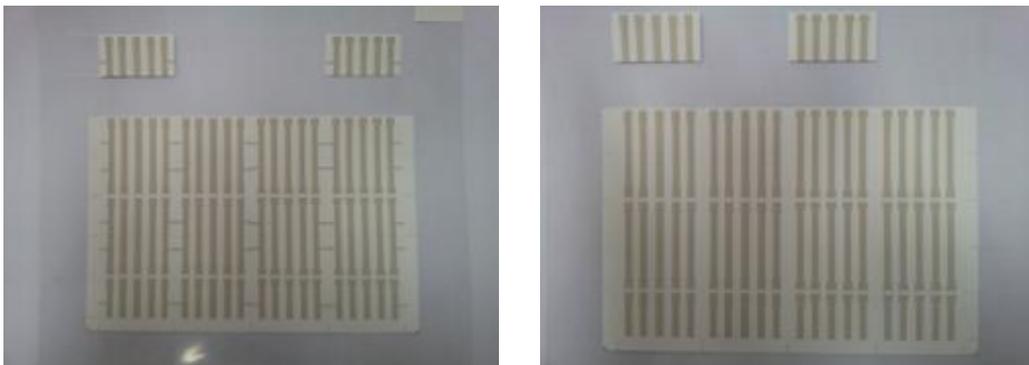
Fig. 60. Drawing of Tx and Rx cellular band LTCC filter.

그림 61은 50 μ m 두께의 그린시트 위에 인쇄된 전극 패턴을 나타낸 것이다. 5개의 일렬로 나열된 직사각형 형태의 로딩캐퍼시터, 5개의 막대 모양의 일렬로 늘어선 공진기 인쇄 패턴 그리고 노치 교차결합 인쇄 패턴을 좌우에 한 개씩 나타내었고,

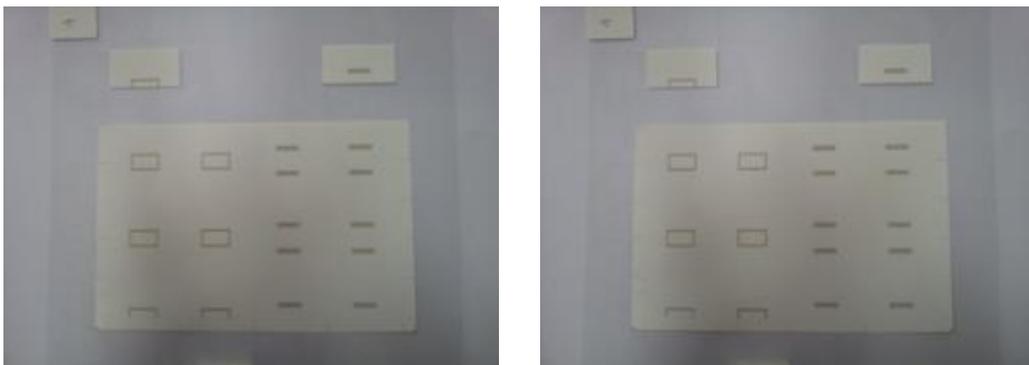
이들의 인쇄 패턴을 다층 형태로 밀착시켜 만들면 2층 공진기 구조를 갖는 LTCC 대역통과 필터가 구성된다.



(a) Printed pattern of loading capacitor.



(b) Printed pattern of resonator.



(c) Printed pattern of cross-coupling line.

Fig. 61. Pattern of cross section for cellular band LTCC filter.

그림 62는 LTCC 제작 공정으로 최종 제작된 셀룰러 대역 송수신 대역통과 필터

에 대한 사진이다.



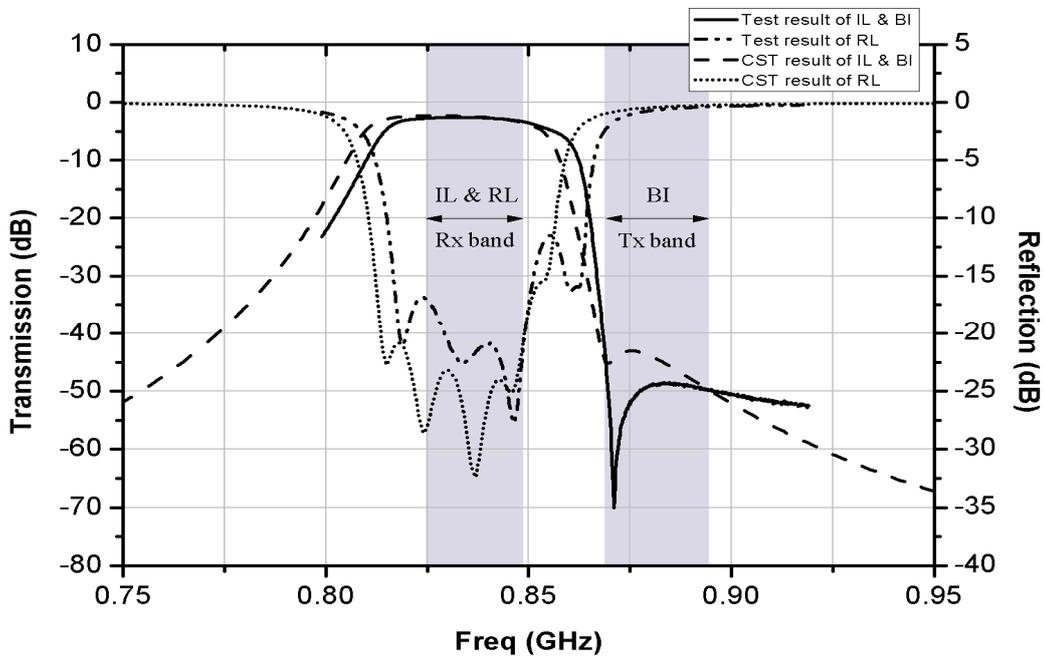
(Size(mm) : 12x25x3)

(a) LTCC filter for Rx and Tx.

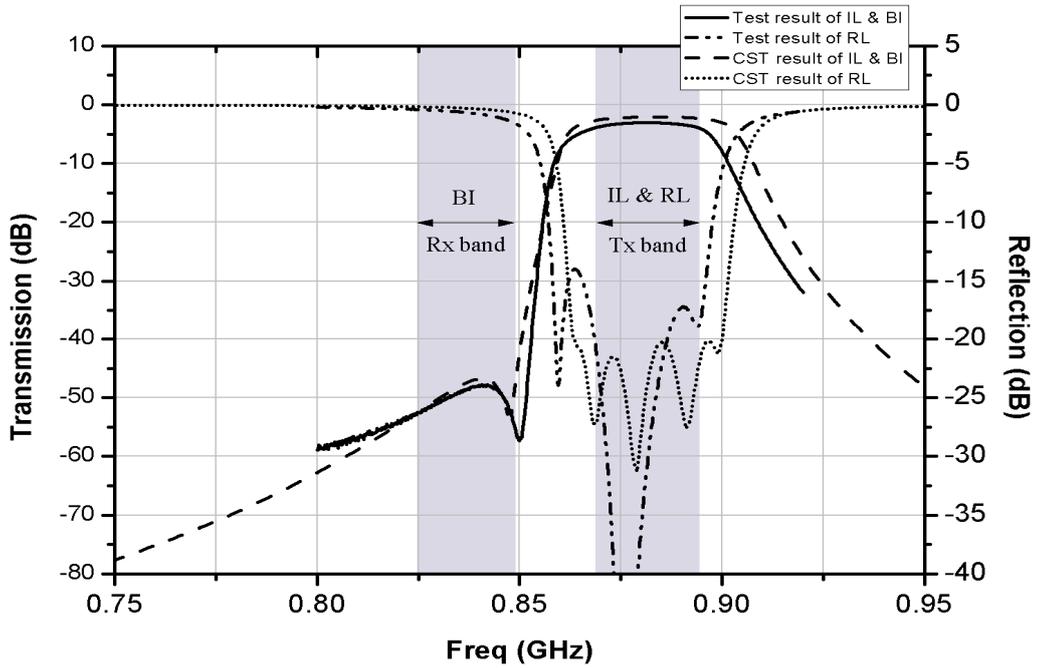
(b) BPF on test board and jig.

Fig. 62. Fabricated cellular band BPF.

그림 63은 표 22와 표 23의 제원으로 설계한 셀룰러대역의 송수신 대역통과 필터의 시뮬레이션 특성과 실제 제작하여 측정된 특성을 비교한 그래프이다. 표 42에 각각 특성에 대한 결과 값을 비교하였다. 그래프에서 시뮬레이션 특성은 점선으로 제작 특성은 실선으로 나타내었다.



(a) Rx band pass filter.



(b) Tx band pass filter.

Fig. 63. Comparison between simulation and fabrication characteristics of cellular BPF.

Table 42. Characteristics of cellular band pass filters.

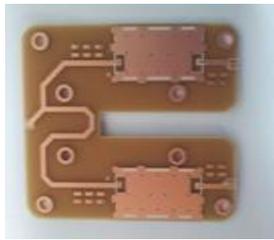
ITEM	Unit	Rx		Tx	
		Simulation	Test Result	Simulation	Test Result
Frequency	GHz	0.824~0.849		0.869~0.894	
Insertion Loss	dB	2.46	3.5	2.63	3.9
Return Loss	dB	20	17	20	16.5
Band Isolation	dB	42.5	42	47.42	48

표 42는 그림 63을 토대로 셀룰라 대역의 대역통과 필터에 대하여 도출된 결과를 나타낸 것이다. 제작된 송신과 수신대역필터의 성능은 시뮬레이션 값보다 전반적으로 저하되었고, 특히 수신대역 필터의 삽입손실이 약 1 dB 정도 증가되어 나타났다. 그 이유는 LTCC 제작 공정 후 약 5 MHz정도 높은 쪽으로 주파수 편이가 발생함으로써 통과대역이 천이되어 가장 낮은 주파수인 824 MHz에서 손실 특성이 커졌기 때문이다. 그리고 LTCC 필터를 측정 지그와 PCB에 연결할 때에 커넥터

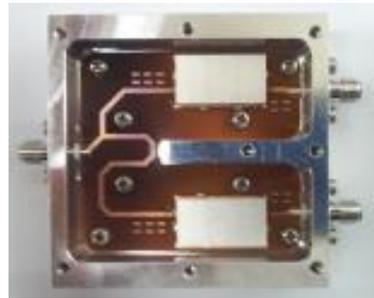
및 PCB 선로 손실이 더해진다. 반면에 송신대역 필터회로는 LTCC 제작 공정 후 통과대역이 약 5 MHz 정도 좁아져서 시뮬레이션 특성보다 약 1.3 dB 정도 제작 특성이 저하되었다. 그 이유는 송신대역 필터회로가 수신대역 필터회로보다 커넥터 및 PCB 선로 손실 등이 높은 주파수 영향을 인하여 약 0.3 dB 정도 더 크게 나타났기 때문이다.

2) 셀룰러 대역 LTCC 듀플렉서 제작 결과

그림 64는 듀플렉서 제작을 위한 PCB 기판과 실제 측정을 위한 지그에 장착된 LTCC 듀플렉서 샘플이다.



(a) PCB Test board.

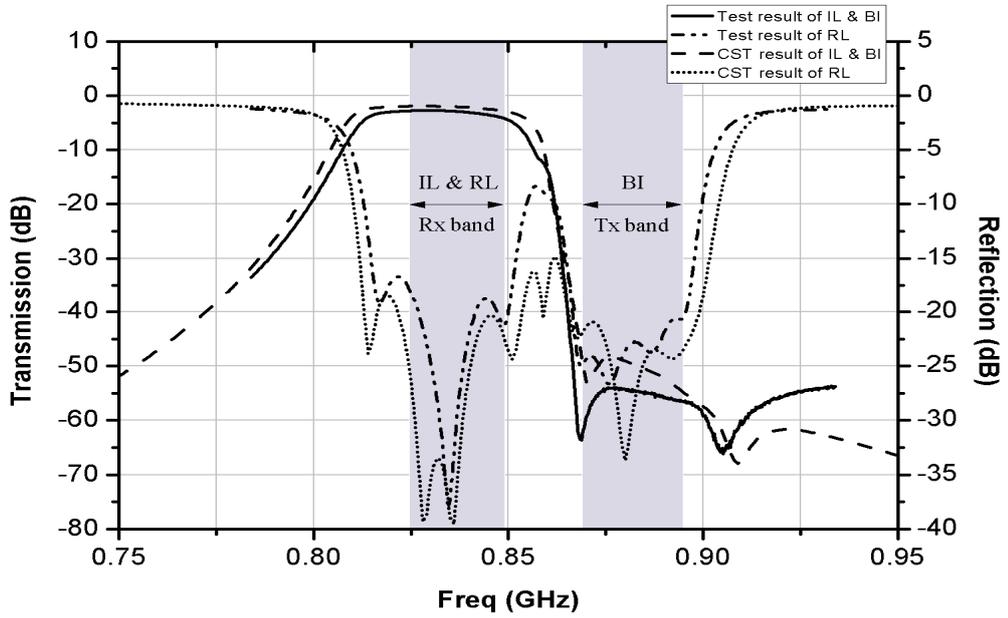


(b) Duplexer on test jig.

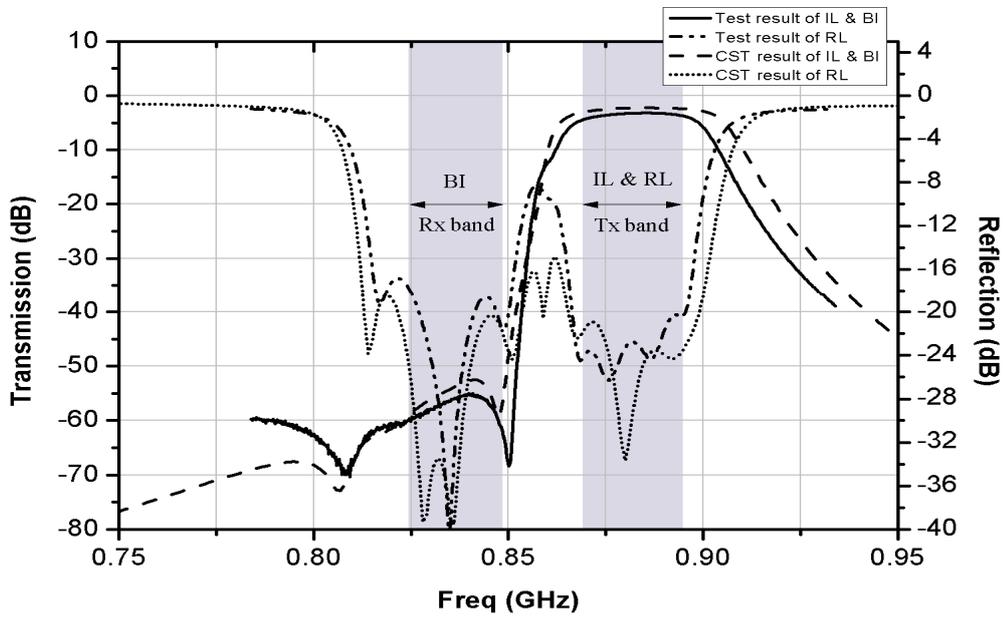
Fig. 64. Fabricated cellular band duplexer.

그림 65는 그림 64(b)의 듀플렉서에 대한 시뮬레이션 특성과 측정된 결과를 비교한 그래프이다. 표 43에 각각 특성에 따른 결과 값을 비교하였다. 그래프에서 시뮬레이션 특성은 점선으로 그리고 제작 특성은 실선으로 나타내었다. 손실 특성 관점에서 비교해 보면 제작 특성이 시뮬레이션 특성보다 약 1.4 dB 정도 저하되었다. 그러나 각 LTCC 단품에서 삽입손실이 시뮬레이션 특성보다 약 1~1.3 dB 정도 저하되는 것을 감안하면, T 분배기의 선로 손실은 고작 0.1 dB 정도이기 때문에 시험지그(test jig)에 조립된 듀플렉서의 정합은 매우 잘 이루어져 있음을 확인할 수 있다. 송신과 수신대역 분리도 특성은 송신과 수신대역 LTCC 필터를 T 분배기를 사용하여 하나의 포트에 결합시켜서 지그 상에 듀플렉서를 구성함으로써 서로 송수신 대역을 이격시키는 효과로 인하여 송신과 수신대역 상호 주파수 간에 감쇄 특성을 향상시키게 된다. 그런 현상에 의해 대역 분리도

특성이 대역통과 필터일 때 보다 약 5~10 dB 정도 향상되어 나타난다.



(a) Rx of duplexer.



(b) Tx of duplexer.

Fig. 65. Measured and simulated results of cellular band duplexer.

Table 43. Measured and simulated results of cellular band duplexer.

ITEM	Unit	Rx		Tx	
		Simulation	Test Result	Simulation	Test Result
Frequency	GHz	0.824~0.849		0.869~0.894	
Insertion Loss	dB	2.85	4.22	3.06	4.47
Return Loss	dB	20.35	17	20.97	16.5
Band Isolation	dB	48.53	52	53.45	52.5

그림 66은 0.85 GHz 듀플렉서의 하모닉(harmonic) 특성을 나타낸 것이다. 기존 중심주파수 대역인 0.85 GHz 근처뿐만 아니라 약 2.7 GHz의 범위까지도 30 dB 이상으로 양호한 특성을 나타내고 있다.

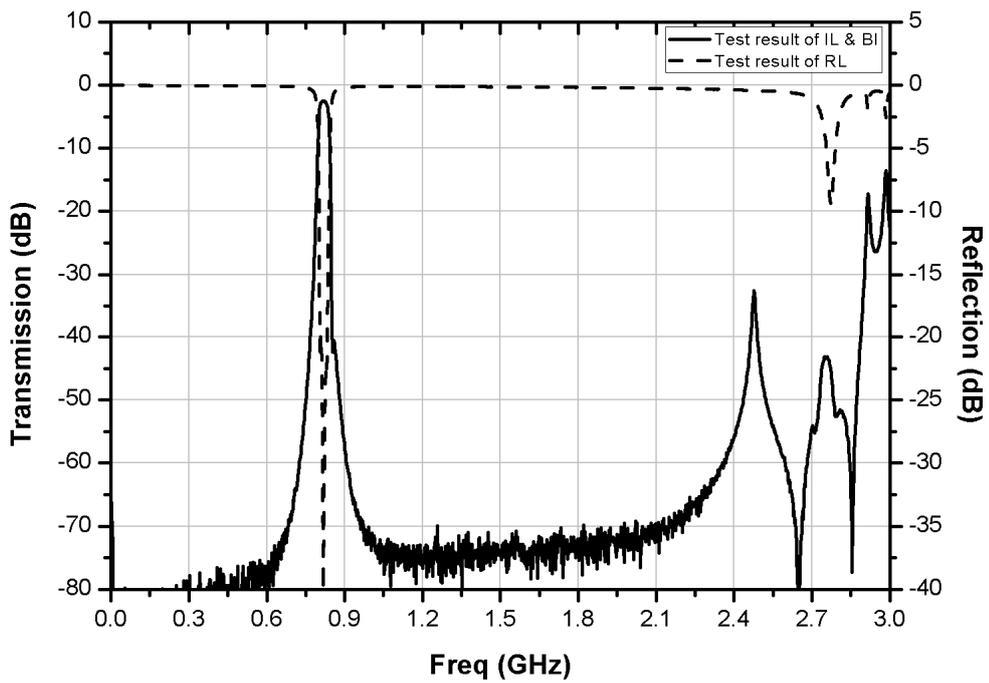
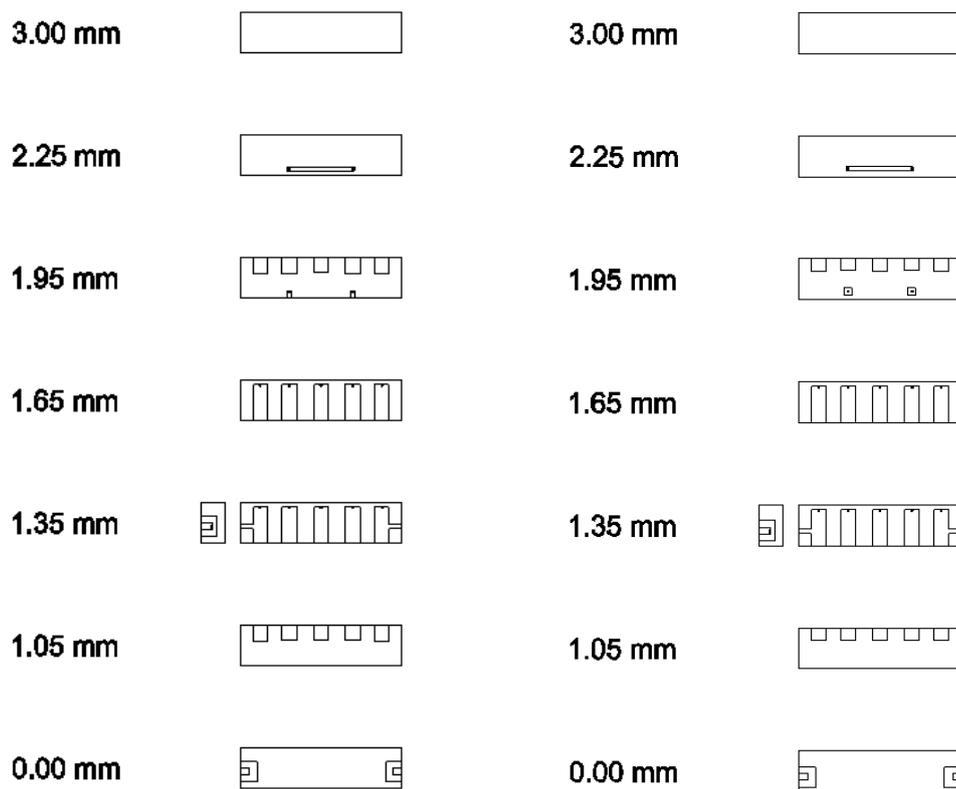


Fig. 66. Measured harmonic characteristic of the fabricated cellular band duplexer.

2. WCDMA 대역 LTCC 듀플렉서 제작

1) WCDMA 대역 LTCC 대역통과 필터 제작 결과

그림 67은 설계된 필터를 제작하기 위한 각 필터의 층별 도면이다. 각 필터는 상단과 하단 접지면을 포함하여 총 7층으로 구성되어 있으며, 20 mm × 5 mm × 3 mm의 크기를 갖는다. 상하단 접지면을 제외한 각 층은 0.3 mm의 간격을 갖는다. LTCC 제작을 위해 파우더 상태의 유전율은 20, 유전 손실은 0.001로 제공되었지만, 주파수나 시트 제작 상에 유전율 오차가 발생하기 때문에 시뮬레이션 결과와 실제 제작 결과를 우선 비교하고 나서 테스트를 실시하였다. 테스트 결과 유전율은 21.5로 설계할 때 두 결과가 가장 유사한 특성을 나타냄을 확인할 수 있다. 따라서 2 GHz 대역에서의 최종 설계는 유전율을 21.5로 설계하였다.



(a) Cross section of Rx.

(b) Cross section of Tx.

Fig. 67. Drawing of LTCC by stage.

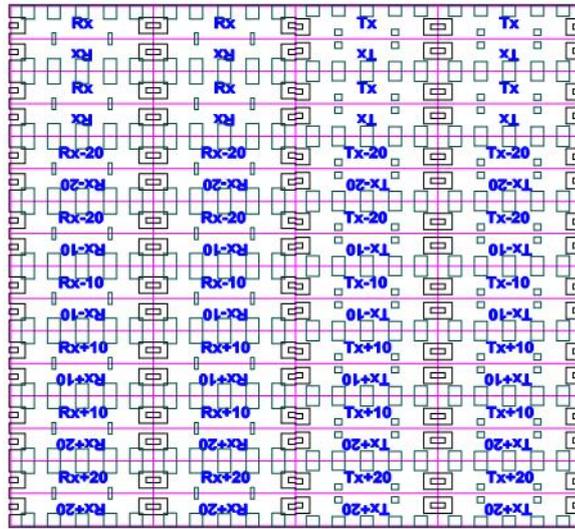
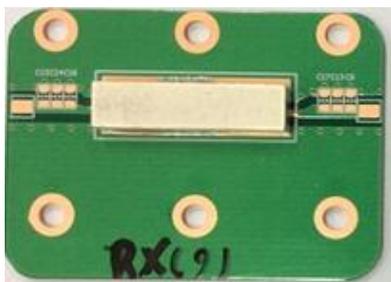


Fig. 68. Drawing of LTCC plate.

그림 68은 실제 LTCC 제작 환경에서의 제판 도면을 나타낸 것으로 제판 1개당 총 64개의 샘플을 구성할 수 있다. 그림 69는 제작된 LTCC 대역통과 필터에 대한 사진이다. 필터 특성을 측정하기 위해 PCB 테스트 보드에 실장하였으며, PCB 보드에는 필터 성능을 보정하기 위한 튜닝 영역을 추가하였다. 일반적으로 LTCC 필터는 제작되고 나면 내부 회로 패턴을 수정할 수 없기 때문에 외부 PCB 보드 등에 튜닝 영역을 추가하여야 하며, 이를 통해 제작 오차 등을 보정 할 수 있도록 하였다.



(a) Rx band filter.

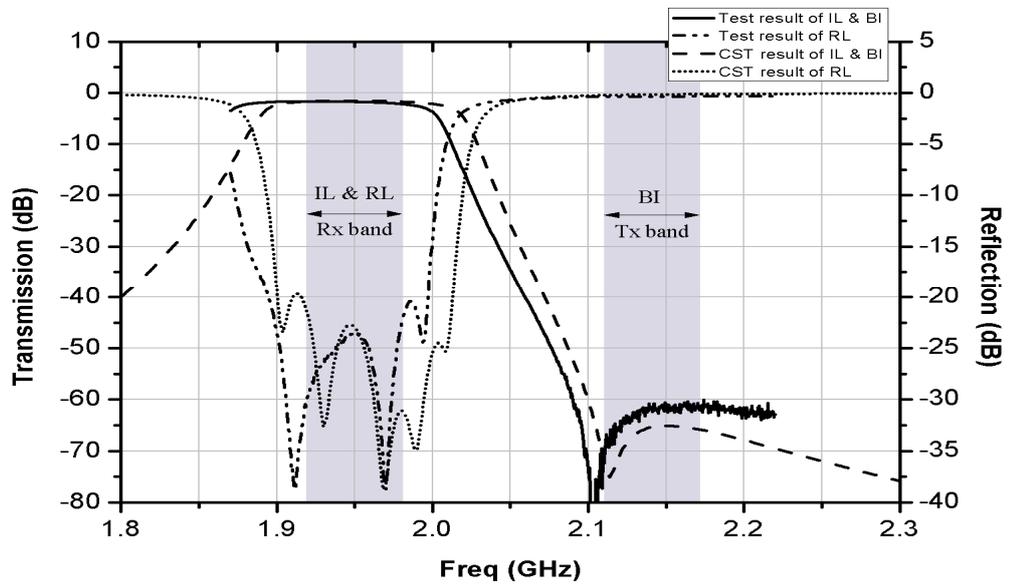


(b) Tx band filter.

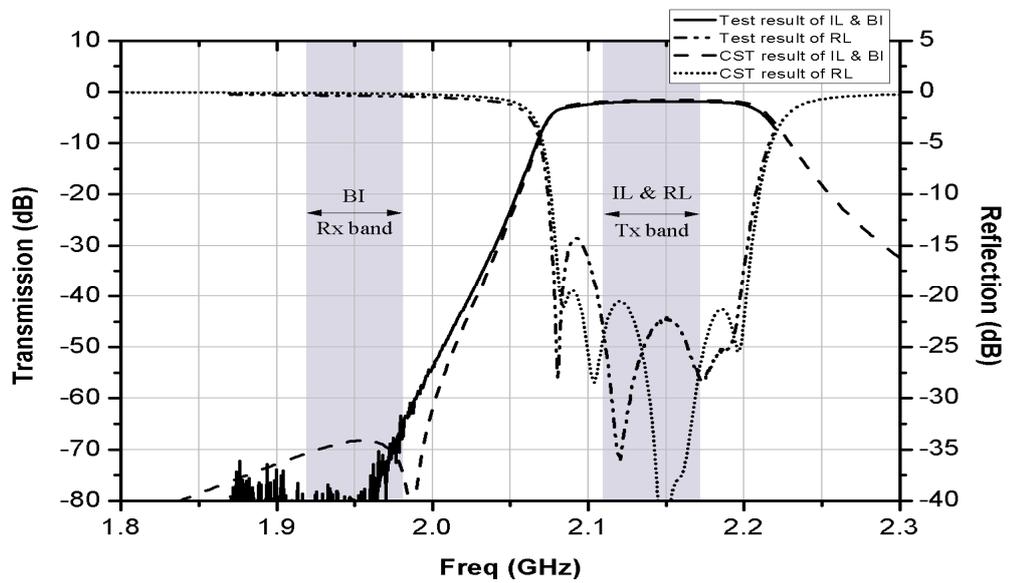
Fig. 69. Fabricated LTCC BPFs for WCDMA band.

그림 70은 표 25와 표 26의 제원으로 설계한 WCDMA 대역의 송수신 대역통과

필터의 시뮬레이션 특성과 실제 제작하여 측정한 특성을 비교한 그래프이다. 표 44에 각각 특성에 대한 결과 값을 비교하였다. 그래프에서 시뮬레이션 특성은 점선으로 표시하였고 제작 특성은 실선으로 나타내었다.



(a) Rx BPF.



(b) Tx BPF.

Fig. 70. Measured and simulated results of WCDMA band BPF.

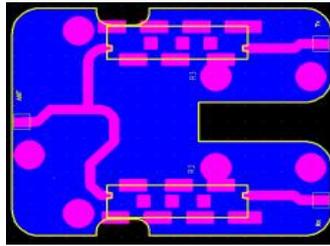
Table 44. Measured and simulated results of WCDMA band BPF.

ITEM	Unit	Rx		Tx	
		Simulation	Test Result	Simulation	Test Result
Frequency	GHz	1.92~1.98		2.11~2.17	
Insertion Loss	dB	1.71	2.1	1.88	2.0
Return Loss	dB	20	20.5	20.48	20
Band Isolation	dB	65.09	61	68.28	62

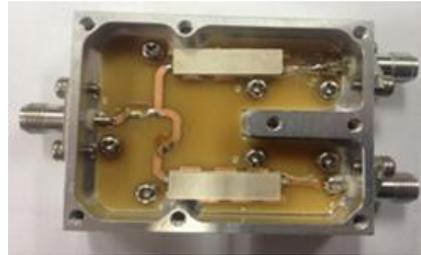
결과 비교를 통해 표 44로부터 수신단의 삽입손실이 시뮬레이션 결과에 비해 약 0.3 dB 정도 특성이 저하되었는데, 이는 LTCC로 수신대역 필터를 제작한 주파수 편이에 따른 특성 결과가 그림 70(a)의 낮은 쪽으로 약 15 MHz정도 이동되었기 때문에 통과대역 중 가장 높은 1.98 GHz에서 손실이 조금 더 크게 나타났다. 송신대역 필터에서는 시뮬레이션보다 제작 특성에 대한 삽입손실이 약 0.12 dB 정도 커지지만 커넥터 및 PCB 선로 손실을 감안하면 거의 차이 없이 정합이 잘 이루어졌음을 확인할 수 있고, 제작 후에도 주파수 편이가 거의 없는 것으로 나타났다. 하지만 송신과 수신대역 분리도에서 노치 특성이 설계치 보다 약 40 MHz정도 저주파 방향으로 이동하면서 설계치보다 약 6 dB 정도 저하되는 결과를 나타내었다.

2) WCDMA 대역 LTCC 듀플렉서 제작 결과

그림 71은 듀플렉서 제작을 위한 PCB 기판과 실제 측정을 위해 지그에 장착된 LTCC 듀플렉서 샘플이다. 입력 분기점에서 서로 송신과 수신에 대한 상대 주파수 영역은 개방 상태가 되도록 전송선로의 길이를 조정하였으며, 일부 칩 소자를 이용하여 임피던스 정합 상태를 조정하였다. 그림 72는 그림 71(b)로부터 측정된 WCDMA 대역 듀플렉서의 제작특성과 시뮬레이션 특성을 비교한 그래프이다. 그래프에서 시뮬레이션 특성은 점선으로 그리고 제작 특성은 실선으로 표시하였다. 또한 이들을 종합적으로 분석하여 표 45에 WCDMA 송수신 대역의 듀플렉서에 대한 제반 성능을 비교하여 나타내었다.



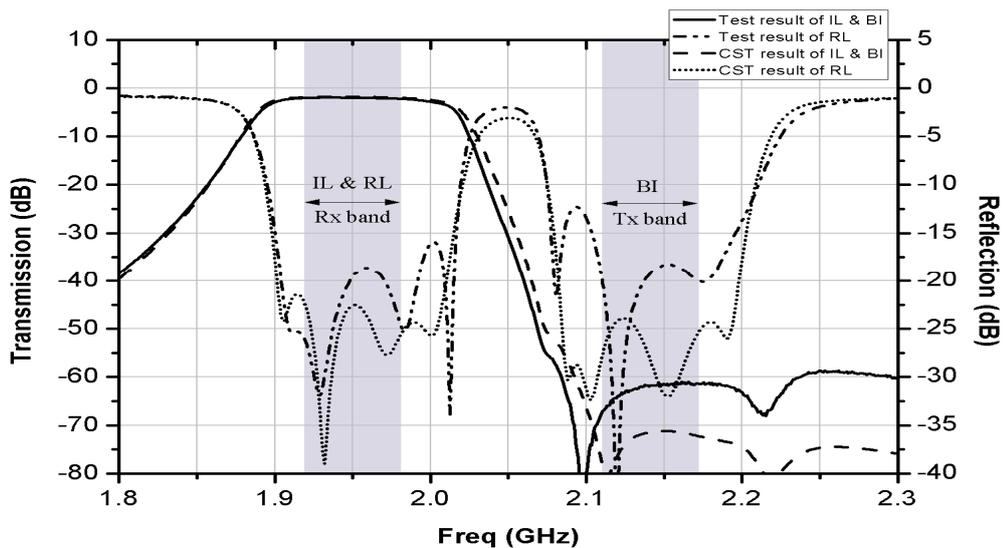
(a) Drawing of PCB.



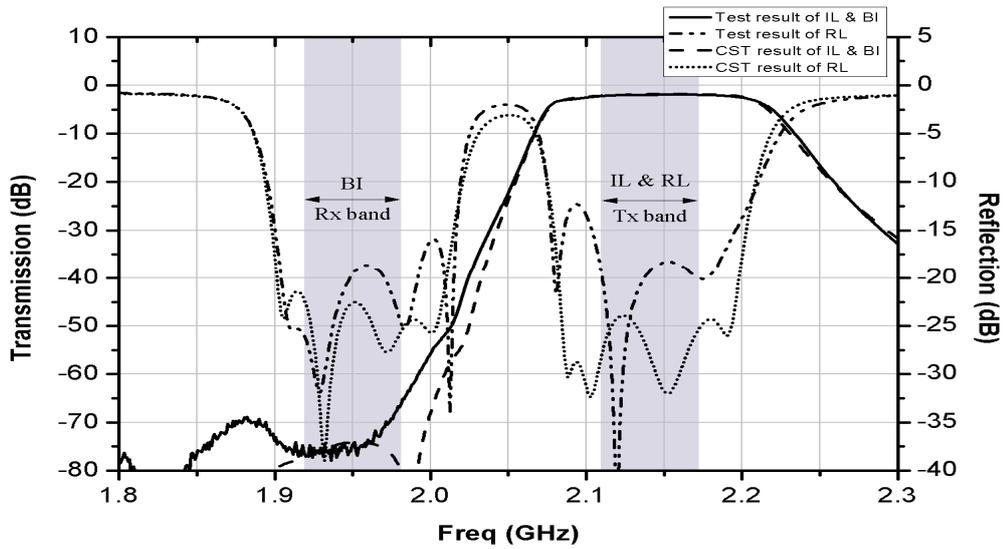
(b) Fabricated duplexer.

Fig. 71. Fabricated WCDMA band duplexer.

수신단의 삽입손실은 제작 특성이 약 0.4 dB 정도 시뮬레이션 특성보다 저하 되는 것으로 나타났다. 그 원인은 LTCC 필터 단품에서 0.3 dB 정도의 손실 차가 발생하였고, 이 필터 단품들을 T 분배기를 통하여 측정 지그에 연결하여 듀플렉서를 구성함으로써 지그 접합부에서 반사손실이 0.1 dB가 증가하여 나타난 결과이다. 송신단에서는 주파수에 대한 편이는 거의 없으나 듀플렉서를 구성할 때에 반사손실 저하로 인하여 0.1 dB 정도의 손실이 증가하였다. 그리고 LTCC 필터 제작 과정에서 나타나는 현상으로 인하여 대역 분리도에 따른 너치 특성이 설계치 보다 약 40 MHz정도 저주파 방향으로 이동하였고, 가드 밴드(1.98~2.11 GHz)에서의 비정합 특성으로 인하여 대역 분리도 특성이 설계치보다 약 13 dB 정도 차이가 발생하였다.



(a) Rx of duplexer.



(b) Tx of duplexer.

Fig. 72. Measured and simulated results of WCDMA band duplexer.

Table 45. Measured and simulated results of WCDMA band duplexer.

ITEM	Unit	Rx		Tx	
		Simulation	Test Result	Simulation	Test Result
Frequency	GHz	1.92~1.98		2.11~2.17	
Insertion Loss	dB	1.78	2.2	1.88	2.0
Return Loss	dB	21.5	18	24	17
Band Isolation	dB	71	61	73.5	60.32

3. 2중대역 결합 광대역 다이플렉서 제작

1) 다이플렉서 제작 및 시험 결과

2중대역 다이플렉서는 셀룰러 대역과 WCDMA 대역을 포함하는 2개의 이동통신 주파수대역에서 0.5 dB 이내의 삽입손실과 15 dB 이상의 작은 반사손실로 신호를 전송하여야 하고, 차단대역에서는 15 dB 이상의 대역저지 특성을 가져야 한다.

그림 73은 2중대역의 신호를 송수신하기 위하여 설계한 다이플렉서를 마이크로

스트립 기판에 에칭과정을 통하여 제작한 패턴이다. 다이플렉서의 하단 포트의 구성 형태를 보면, 맨 좌측에 셀룰러 이동통신을 수행함에 있어서 송수신 주파수 대역을 분리하고 합성하는 LTCC 듀플렉서와 연결되는 포트가 배치되어 있다. 그리고 그 포트와 인접한 바로 우측에는 WCDMA 신호를 처리하는 듀플렉서 포트를 배치하여 서로 다른 이동통신 서비스 대역간의 주파수 간섭이 최소화 하도록 설계하였다.

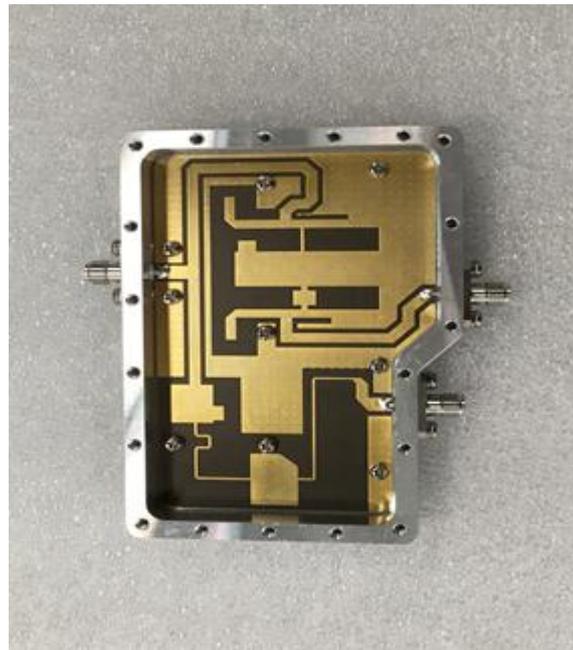
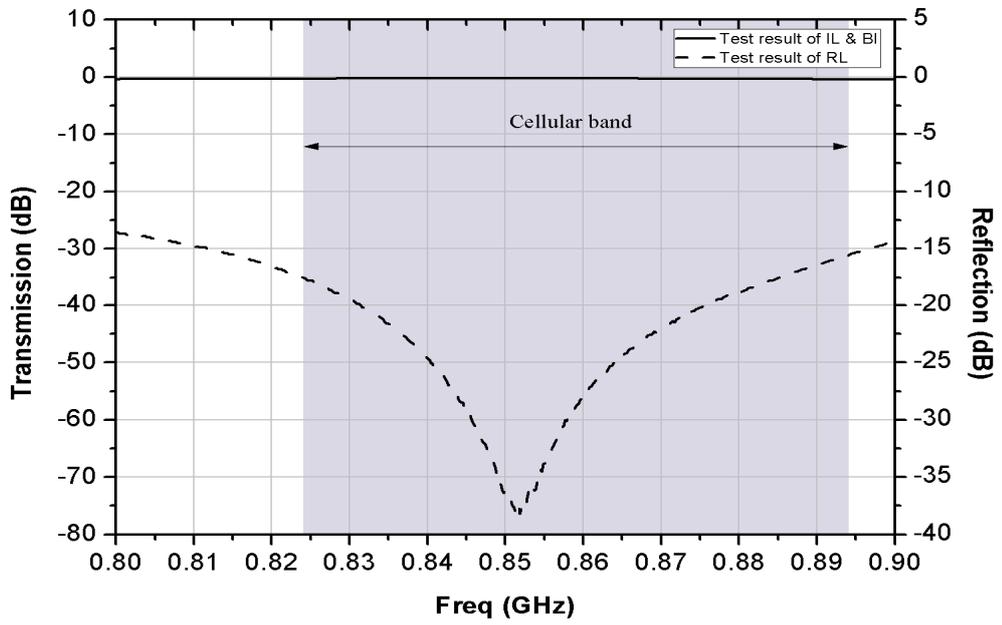
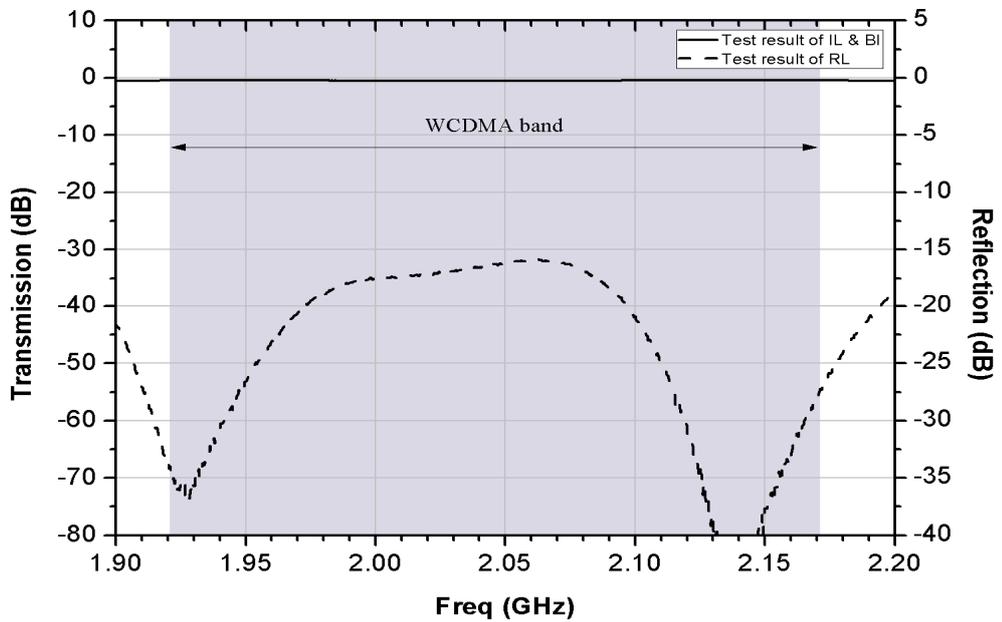


Fig. 73. Fabricated broadband diplexer.

4장에서 이미 설계한 저역통과 필터, 대역통과 필터 및 다이플렉서 분배기의 설계 파라미터를 가지고 그림 73과 같이 다이플렉서를 제작하였다. 제작 및 측정 과정에서 나타나는 반사손실 특성을 개선하기 위해 튜닝을 통하여 일부 패턴을 조정함으로써 원하는 특성을 만족시켰다. 그림 74는 셀룰러 대역과 WCDMA 대역에서 삽입손실에 대한 측정 결과를 나타낸다. 셀룰러 대역과 WCDMA 대역에 대한 삽입손실 특성은 통과대역 내에서 약 0.25~0.4 dB 정도로 나타났고 반사손실은 약 15 dB 이상으로 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

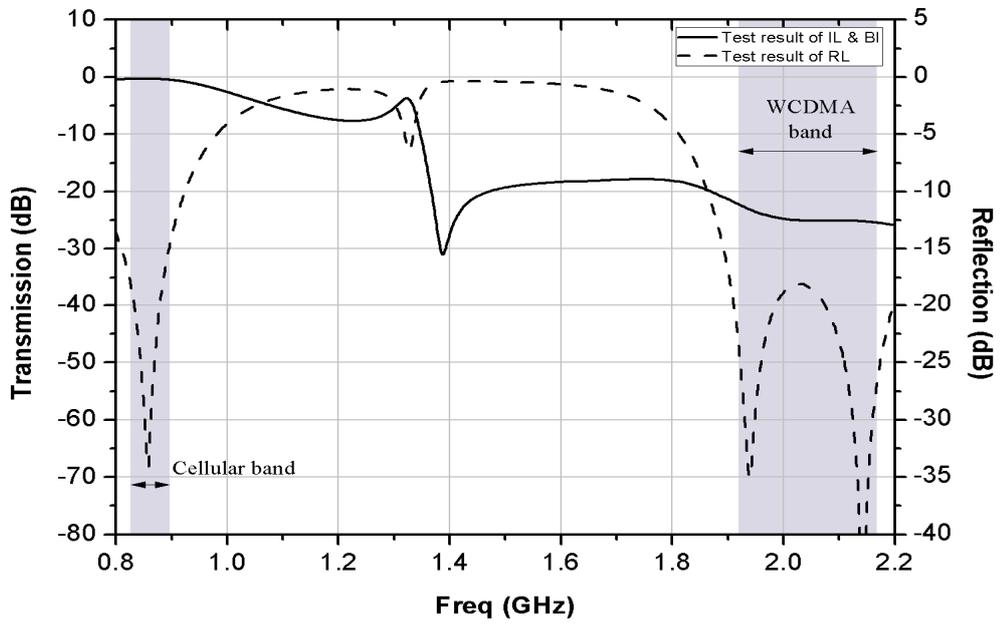


(a) Cellular band. (0.824~0.894 GHz)

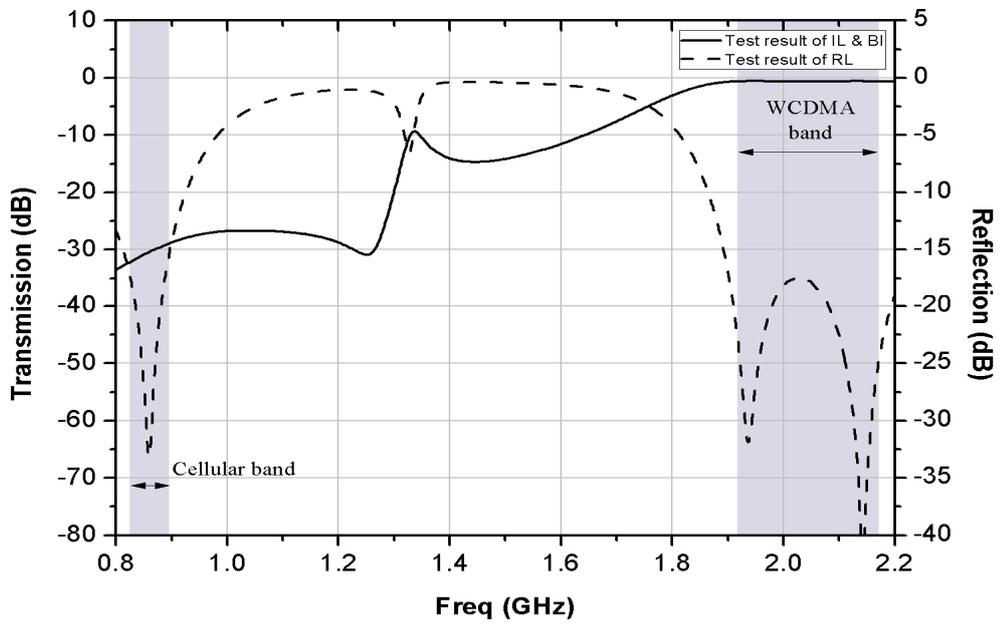


(b) WCDMA band. (1.92~2.17 GHz)

Fig. 74. Measured results in two pass band of the fabricated broadband diplexer.



(a) Cellular band. (0.824~0.894 GHz)



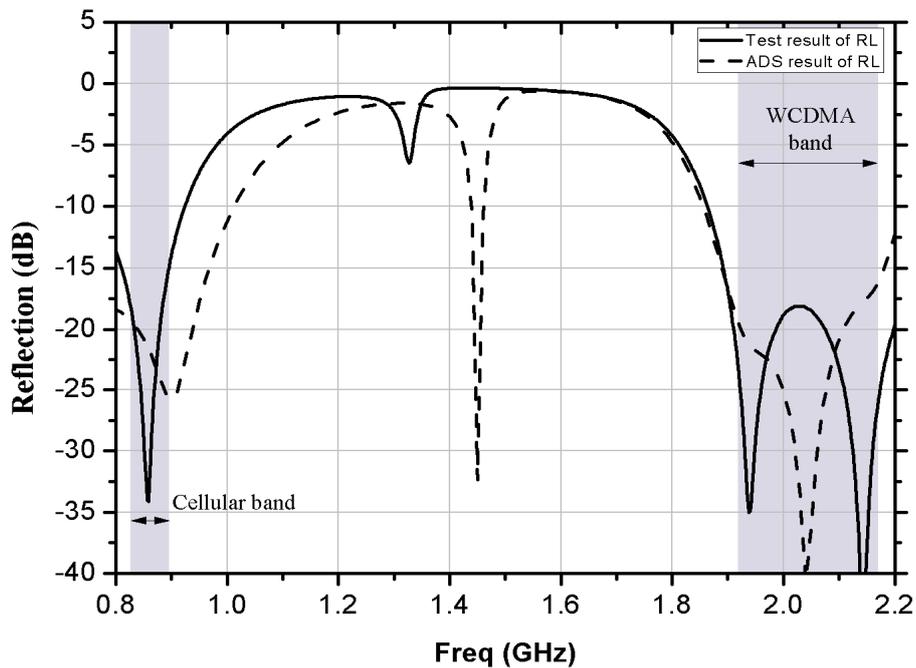
(b) WCDMA band. (1.92~2.17 GHz)

Fig. 75. Isolation characteristics of the fabricated broadband diplexer.

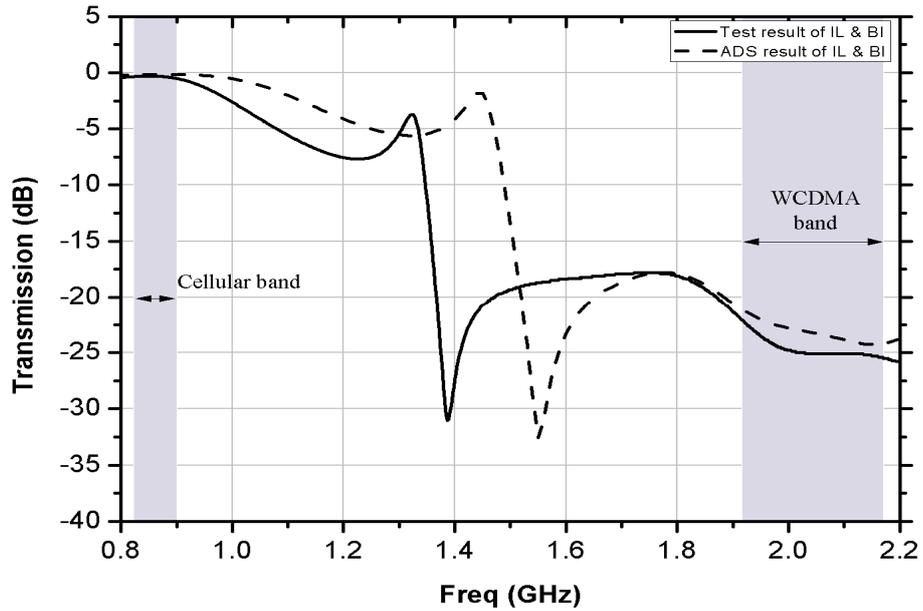
그림 75는 셀룰러 대역과 WCDMA 대역에서 대역 간의 분리도에 대한 측정결과를 나타낸다. 그림 75(a)는 셀룰러 대역의 입력포트로 신호가 인가될 때에 WCDMA 대역에서 나타나는 감쇄 특성을 측정한 것으로써 22 dB 정도의 감쇄 값을 나타냈고, 그림 75(b)는 셀룰러 대역과 인접한 WCDMA 대역의 입력포트로 신호가 인가될 때에 셀룰러 대역에서 측정한 결과로서 28 dB 정도의 감쇄 특성을 갖는다.

2) 다이플렉서 설계 결과와 시험 결과 비교 분석

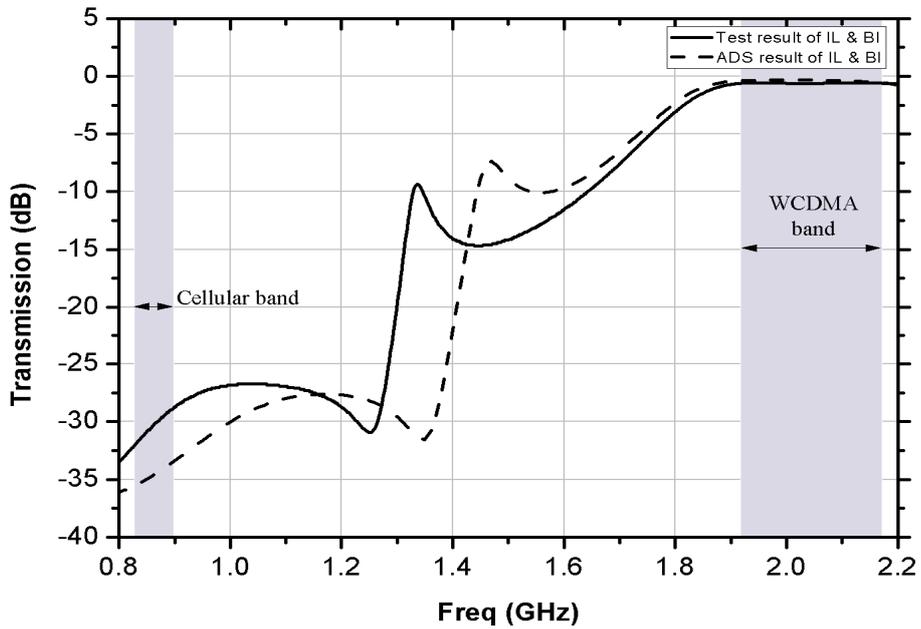
그림 76은 설계한 다이플렉서에 대한 시뮬레이션 결과와 측정값을 비교하여 나타낸 것이다. 그래프에서 점선은 시뮬레이션 결과이고 실선은 제작 특성을 나타낸다.



(a) Measured and simulated results of return loss about diplexer.



(b) Measured and simulated results of cellular band insertion loss and band isolation about diplexer.



(c) Measured and simulated results of WCDMA band insertion loss and band isolation about diplexer.

Fig. 76. Measured and simulation results of the designed broadband diplexer.

제작된 광대역 다이플렉서에 대한 측정 결과를 시뮬레이션 값과 비교해 보면, 셀룰러 대역에서의 측정값은 0.2 dB 이하의 삽입손실과 19 dB 이상의 반사손실로 계산 결과 보다 조금 특성이 저하되어 나타났는데, 이는 공간 활용도를 높이기 위해 격인 구조로 저역통과 필터를 제작하다 보니 발생하는 부정합 특성과 제품 조립에 사용되는 커넥터 접합 손실로 인한 결과로서 제품 성능에는 큰 영향을 주지 않는다. 또한 WCDMA 대역에서는 실측 결과의 삽입손실이 0.5 dB 정도로 약간 특성이 좋아졌지만, 감쇄 특성은 약 32 dB 이하로 계산 결과보다 조금 저하되었다. 이는 실제 제작 상에서 통과대역이 이론 결과 보다 조금 더 광대역으로 넓어진 현상 때문이다.

4. LTCC 듀플렉서와 광대역 다이플렉서를 결합한 쿼드플렉서 제작

1) 쿼드플렉서 제작 및 측정 결과

쿼드플렉서 제작은 그림 77과 같이 이전 단원에서 개발한 LTCC 듀플렉서 2개와 다이플렉서를 복합 연결하여 구성하였으며, 소형화 개발을 위해 다이플렉서의 저역통과 필터는 사진처럼 ‘ㄷ’ 형태로 꼬아서 셀룰러 대역 듀플렉서와 바로 연결되도록 구성하였다. 다이플렉서의 대역통과 필터도 분배회로 밑부분에 위치시켜 WCDMA 대역 듀플렉서와 연결이 쉽도록 구성하여 제작함으로써 특성 저하를 최소화 하면서 크기도 최적화 하였다. 쿼드플렉서의 목표 성능 규격은 이미 표 39에서 제시하였고, 이를 바탕으로 실제로 제작된 쿼드플렉서의 특성 결과가 목표 성능에 만족하는지 분석하였다.

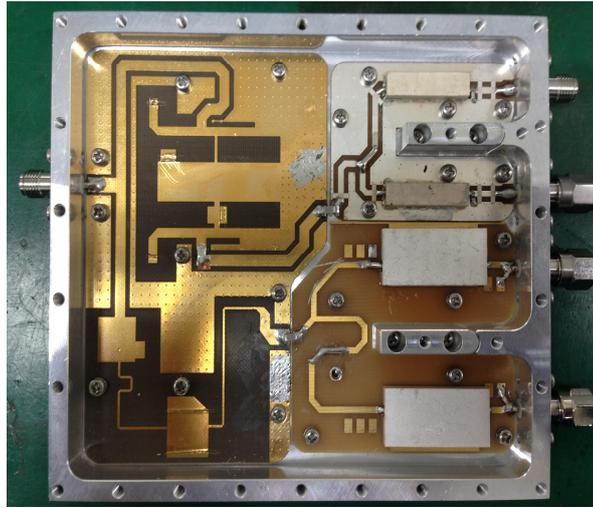
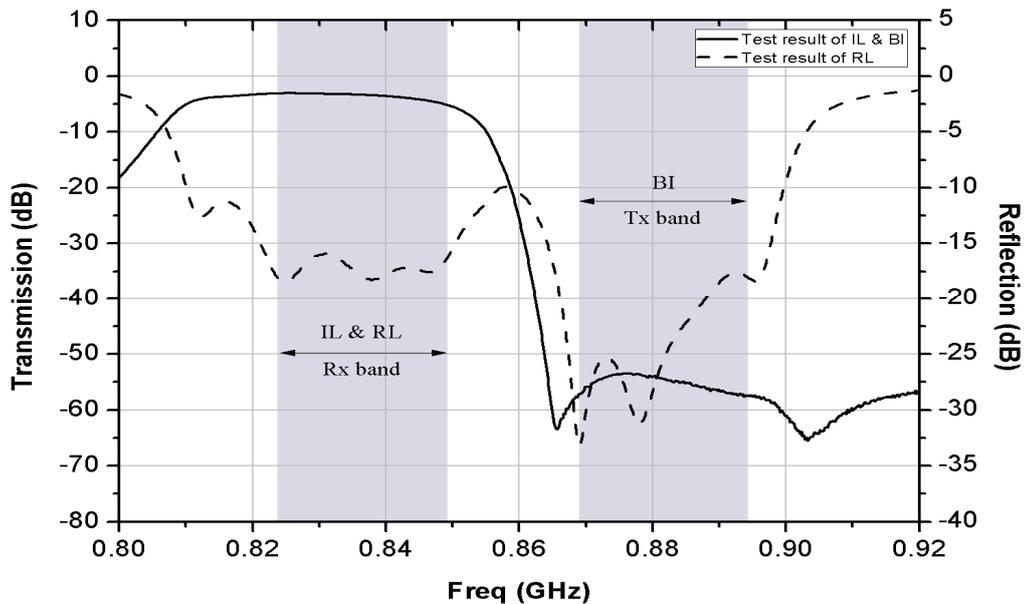


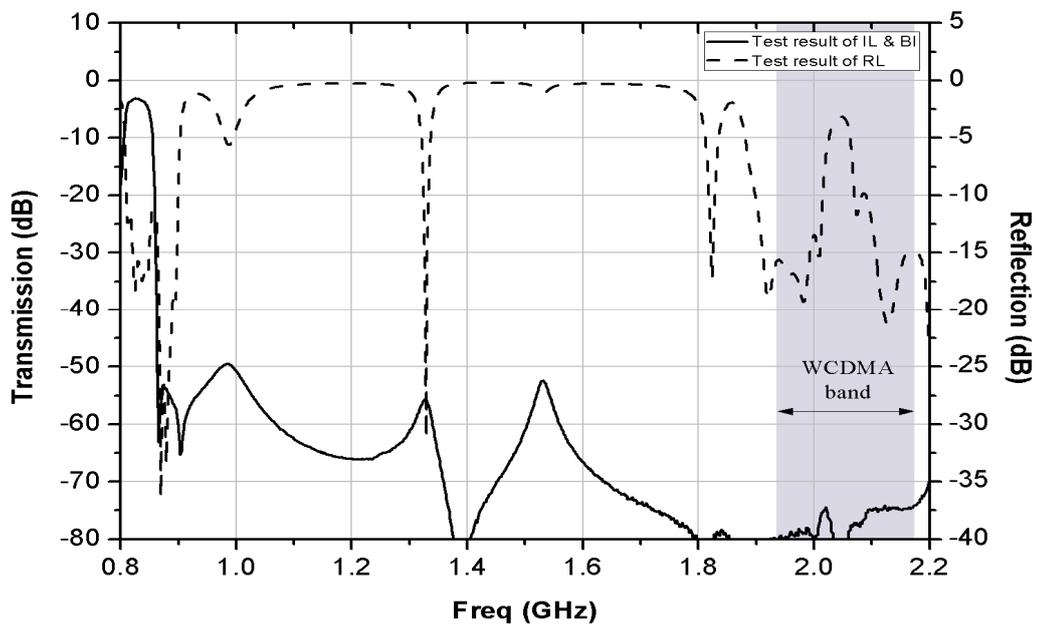
Fig. 77. Fabricated quad-plexer.

1-1) 셀룰러 대역 수신단 특성

그림 78은 최종 제작된 쿼드플렉서의 셀룰러 대역 수신단에서 측정한 대역통과 특성 결과이다. 삽입손실은 가장 큰 값이 5.07 dB이고 16 dB의 반사손실과 52 dB의 송수신 분리도 및 74 dB의 서비스 대역 분리도를 갖는다.



(a) Cellular Rx band pass characteristics in service band.

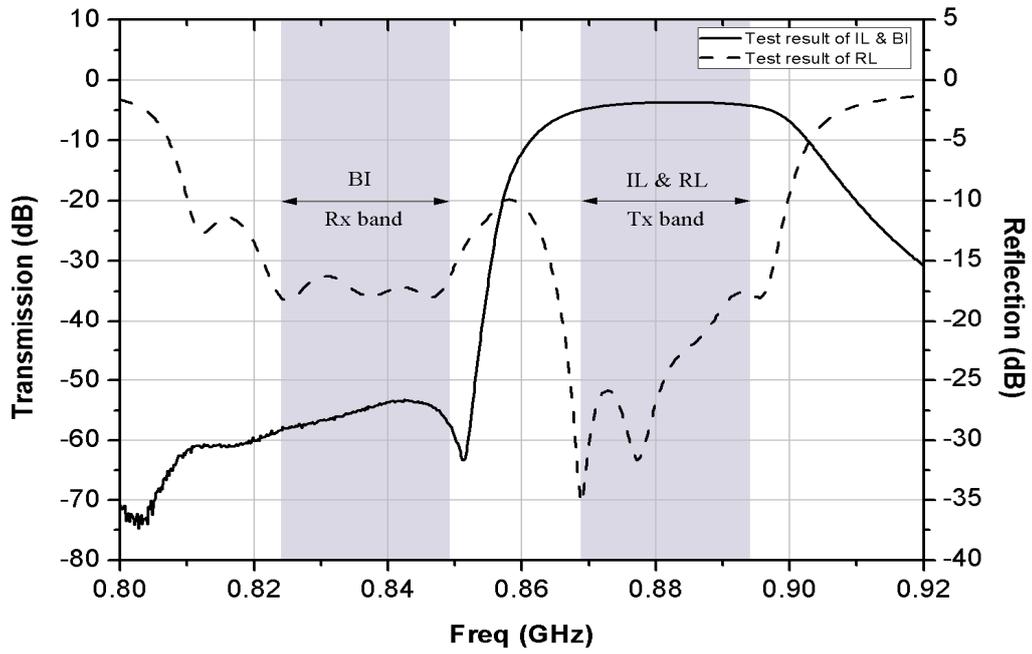


(b) Cellular Rx band pass characteristics in whole band.

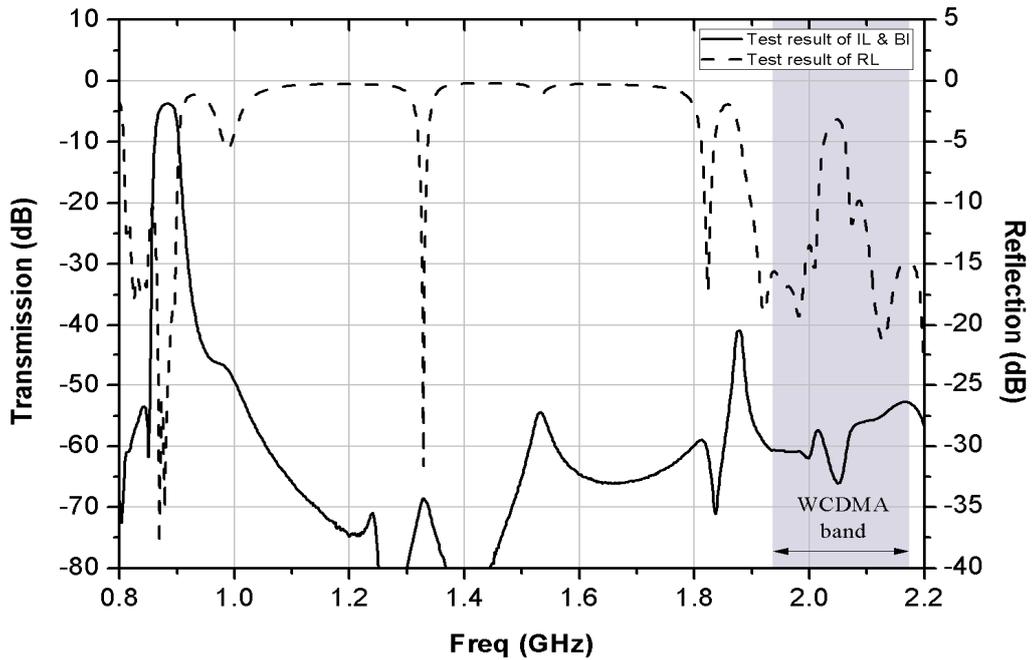
Fig. 78. Cellular Rx band pass characteristics of quad-plexer.

1-2) 셀룰러 대역 송신단 특성

그림 79는 쿼드플렉서의 셀룰러 대역 송신단에서 측정한 삽입손실과 반사손실 특성을 나타낸 결과이다. 대역내의 삽입손실은 가장 큰 값이 4.9 dB이고, 17.5 dB의 반사손실, 52 dB의 송수신 분리도, 그리고 52.8 dB의 서비스 대역 분리도를 갖는다. 대역 분리도가 수신단 보다 20 dB 정도 특성이 떨어진 이유는 LTCC 송신 필터 구조에서 개방형 노치 구조가 LTCC 구조 내부에서 특정 주파수에 기생공진이 발생되면서 나타난 결과이다.



(a) Cellular Tx band pass characteristics in service band.

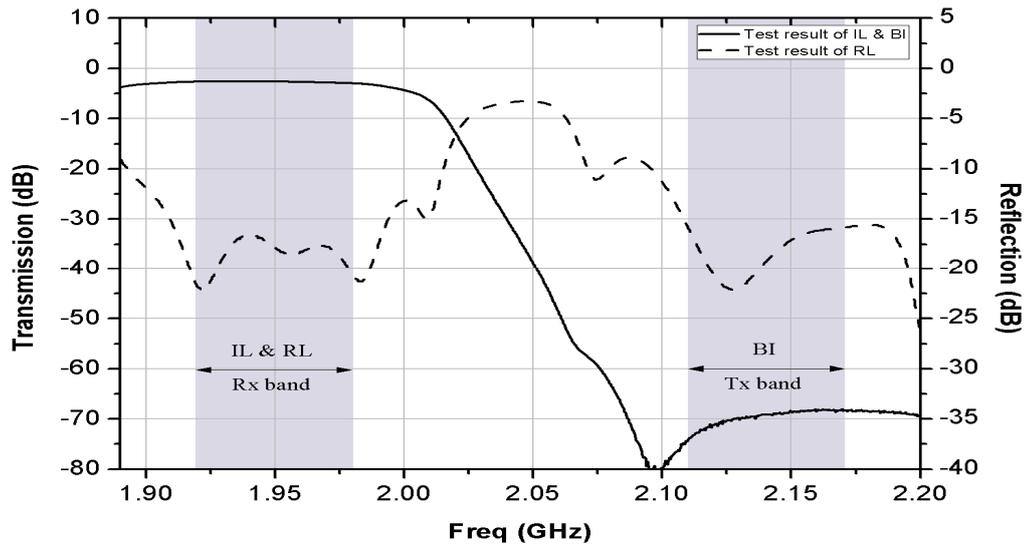


(b) Cellular Tx band pass characteristics in whole band.

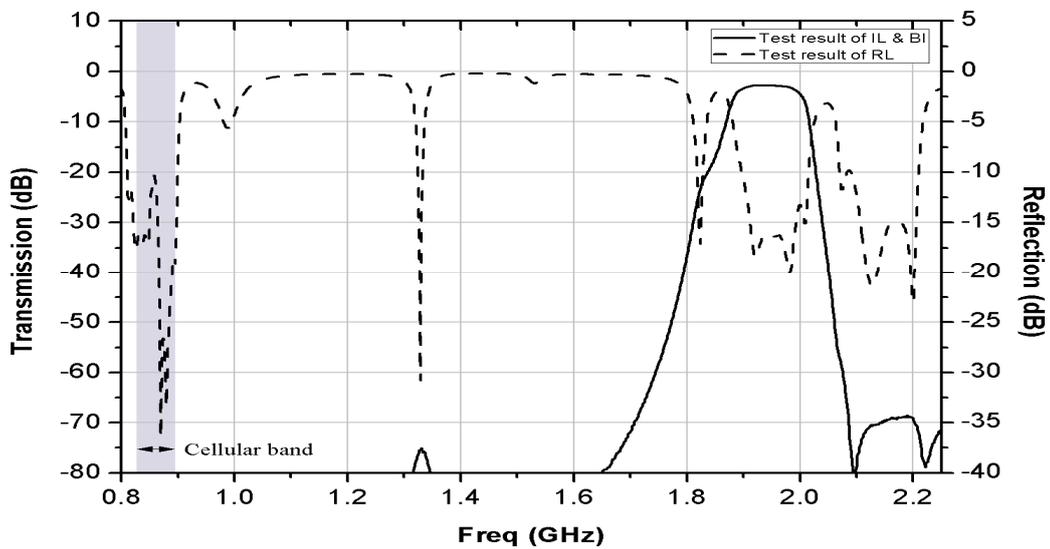
Fig. 79. Cellular Tx band pass characteristics of quad-plexer.

1-3) WCDMA 대역 수신단 특성

그림 80은 제작된 쿼드플렉서의 WCDMA대역의 수신단에서 측정한 삽입손실과 반사손실 특성을 나타낸 결과이다. WCDMA 수신대역 내의 삽입손실은 가장 큰 값이 2.95 dB이고, 16.5 dB의 반사손실과 68.4 dB의 송수신 분리도, 그리고 약 100 dB의 서비스 대역 분리도를 갖는다.



(a) WCDMA Rx band pass characteristics in service band.

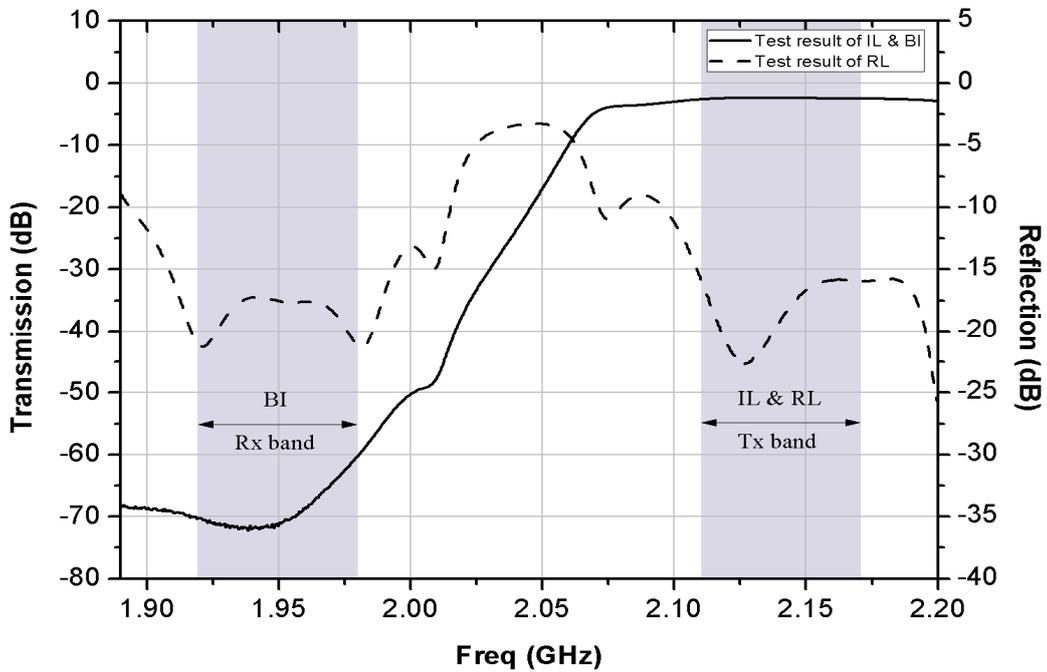


(b) WCDMA Rx band pass characteristics in whole band.

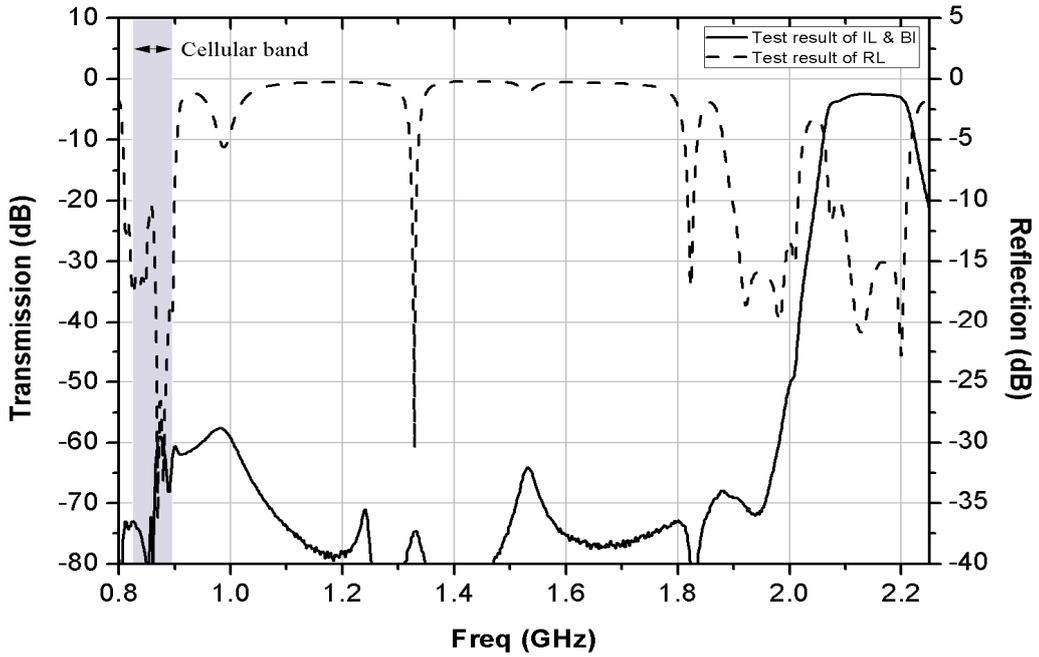
Fig. 80. WCDMA Rx band pass characteristics of quad-plexer.

1-4) WCDMA 대역 송신단 특성

그림 81은 제작된 쿼드플렉서의 WCDMA 대역 송신단에서 측정한 삽입손실과 반사손실 특성에 대한 그래프이다. WCDMA 송신대역 내의 삽입손실은 가장 큰 값이 2.61 dB이고, 15.7 dB의 반사손실과 60.2 dB의 송수신 분리도, 그리고 약 60 dB의 서비스 대역 분리도를 갖는다. 대역 분리도가 수신단 보다 40 dB 정도 특성이 떨어진 이유는 셀룰러 대역 송신 필터와 마찬가지로 LTCC 송신 필터 내의 개방형 노치 구조에서 발생된 기생공진에 의한 요인 때문이다.



(a) WCDMA Tx band pass characteristics in service band



(b) WCDMA Tx band pass characteristics in whole band

Fig. 81. WCDMA Tx band pass characteristics of quad-plexer.

2) 설계 결과와 제작 결과 특성 비교

2-1) 셀룰러 대역 수신단 특성

그림 82는 쿼드플렉서 셀룰러 대역의 수신단 특성에 대한 설계 결과와 제작 결과를 비교한 것이다. 수신대역 내의 삽입손실은 제작 특성이 설계 특성 보다 약 2 dB 정도 감소되어 나타났고, 반사손실과 송수신 분리도는 제작 특성이 설계 결과보다 좀 더 양호하게 나왔다. 삽입손실 저하의 원인은 듀플렉서를 구성할 때에 분배기 결합 구조에서 발생된 손실뿐만 아니라, 제작된 제품의 통과대역이 설계 대역 보다 좁게 나타남으로써 수신대역의 상한 주파수인 0.849 GHz에서 손실 특성이 감소되었고, 그로 인해 송수신 분리도 특성은 설계 결과 보다 3.5 dB 정도 더 좋은 특성을 나타냈다.

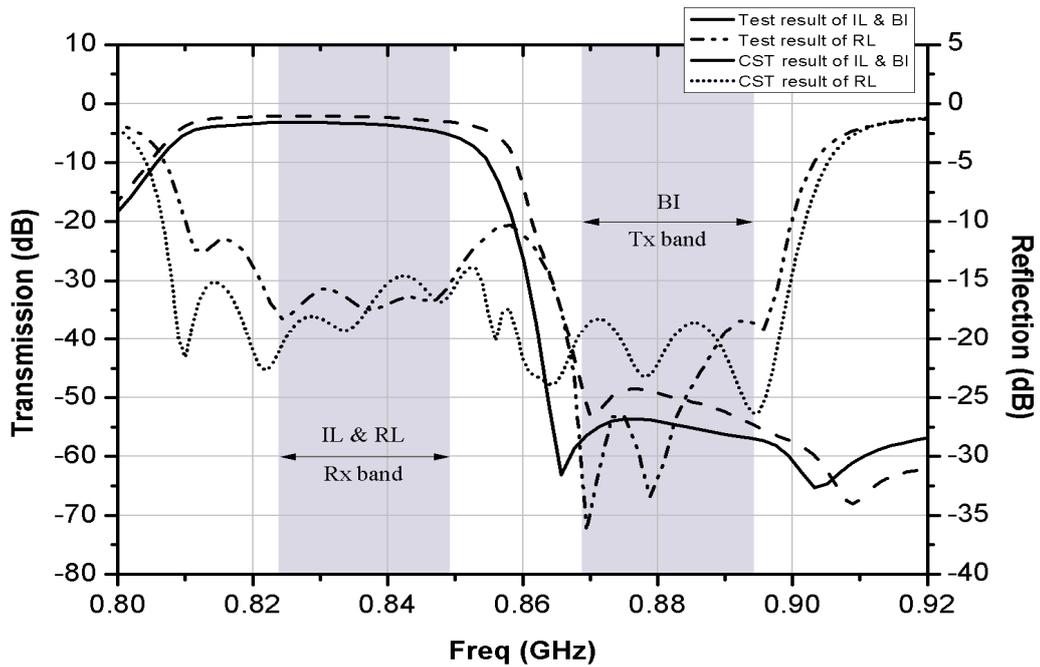


Fig. 82. Measured and simulated results in cellular Rx band pass of quad-plexer.

Table 46. Measured and simulated results in cellular Rx band pass of quad-plexer.

ITEM	Unit	Simulation	Test Result
Insertion Loss	dB	3.0	5.0
Return Loss	dB	14.6	16
Bans Isolation	dB	48.5	52

2-2) 셀룰러 대역 송신단 특성

그림 83은 쿼드플렉서 셀룰러 대역의 송신단 특성에 대한 설계 결과와 제작 결과를 비교한 것이다. 송신대역 내의 삽입손실은 제작 특성이 설계 결과보다 약 1.7 dB 정도 감소되어 나타났고, 반사손실과 송수신 분리도는 유사하게 나타났다. 삽입손실이 저하된 이유는 수신단과 마찬가지로 듀플렉서를 구성할 때에 분배기 결합 구조에서 발생된 손실과 더불어, 제작된 제품의 통과대역이 설계 대역 보다 좁게 나타남으로써 송신대역의 하한 주파수인 0.869 GHz에서 손실 특성이 감소된 때문이다.

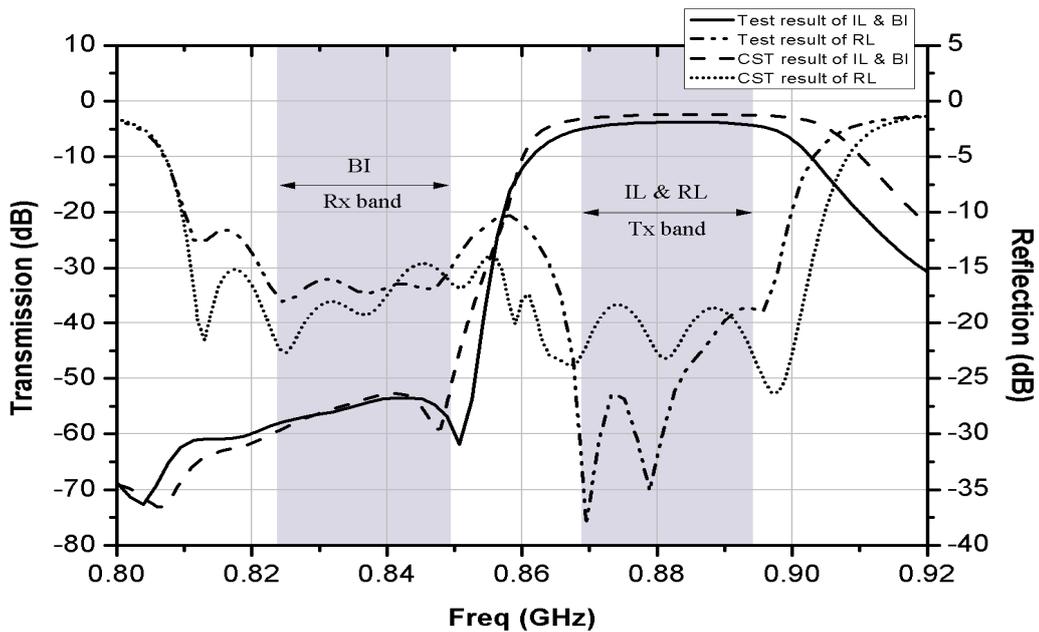


Fig. 83. Measured and simulated results in cellular Tx band pass of quad-plexer.

Table 47. Measured and simulated results in cellular Tx band pass of quad-plexer.

ITEM	Unit	Simulation	Test Result
Insertion Loss	dB	3.1	4.9
Return Loss	dB	18.2	17.5
Bans Isolation	dB	52.7	52.8

2-3) WCDMA 대역 수신단 특성

그림 84는 쿼드플렉서 WCDMA 대역의 수신단 특성에 대한 설계 결과와 제작 결과를 비교한 것이다. WCDMA 수신대역 내의 삽입손실은 제작 특성이 설계 결과보다 약 0.7dB 정도 감소되어 나타났지만 거의 유사하게 나타났고, 반사손실은 약 10 dB 정도 차이가 나지만 30 dB 이하에서 나타나는 오차이기 때문에 매우 작은 값이다. 그리고 송수신 분리도는 30 dB 이하에서 두 결과가 유사하게 나타났다. 수신대역 내의 삽입손실과 반사손실에 대한 제작 특성이 설계 결과에 비해 저하된 원인은 수신대역폭이 낮은 주파수로 천이 되면서 설계 대역보다 약간 좁게 형성되

기 때문이다.

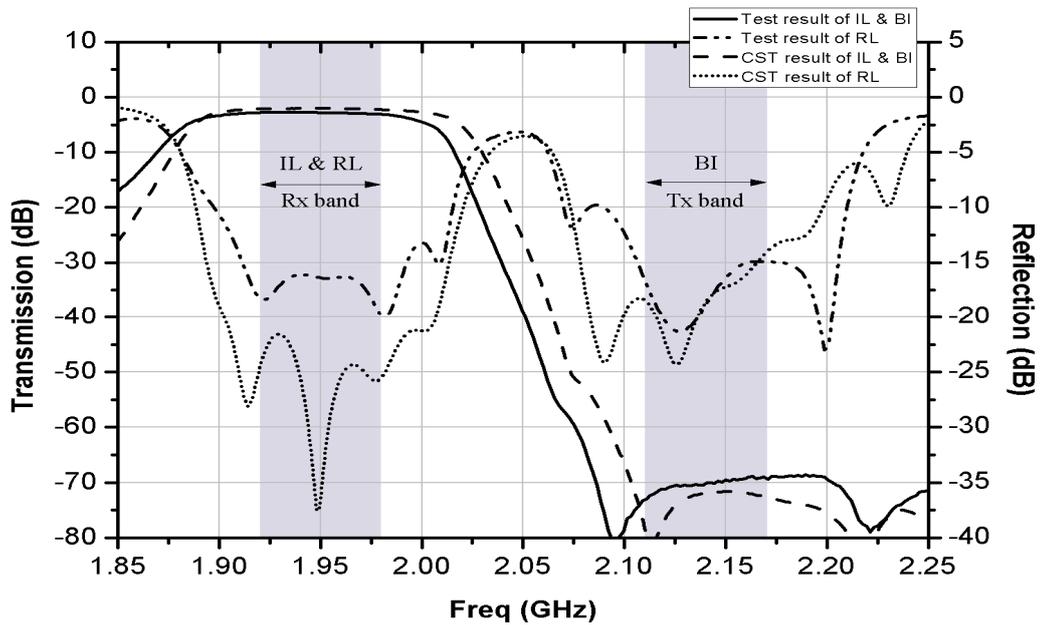


Fig. 84. Measured and simulated results in WCDMA Rx band pass of quad-plexer.

Table 48. Measured and simulated results in WCDMA Rx band pass of quad-plexer.

ITEM	Unit	Simulation	Test Result
Insertion Loss	dB	2.2	2.9
Return Loss	dB	21.6	16.5
Bans Isolation	dB	71.0	68.4

2-4) WCDMA 대역 송신단 특성

그림 85는 쿼드플렉서 WCDMA 대역의 송신단 특성에 대한 설계 결과와 제작 결과를 비교한 것이다. 삽입손실과 반사손실은 제작 특성과 설계 결과가 0.1dB 이내로 유사하게 나타났고, 송수신 분리도는 제작 특성이 설계 특성 보다 약 14 dB 정도 저하되어 나타났다. 이는 LTCC 송신필터 제작 특성에서 너치 구조에 의한 대역 저지 특성이 설계 값보다 낮은 주파수 쪽으로 천이되어 나타났기 때문이다.

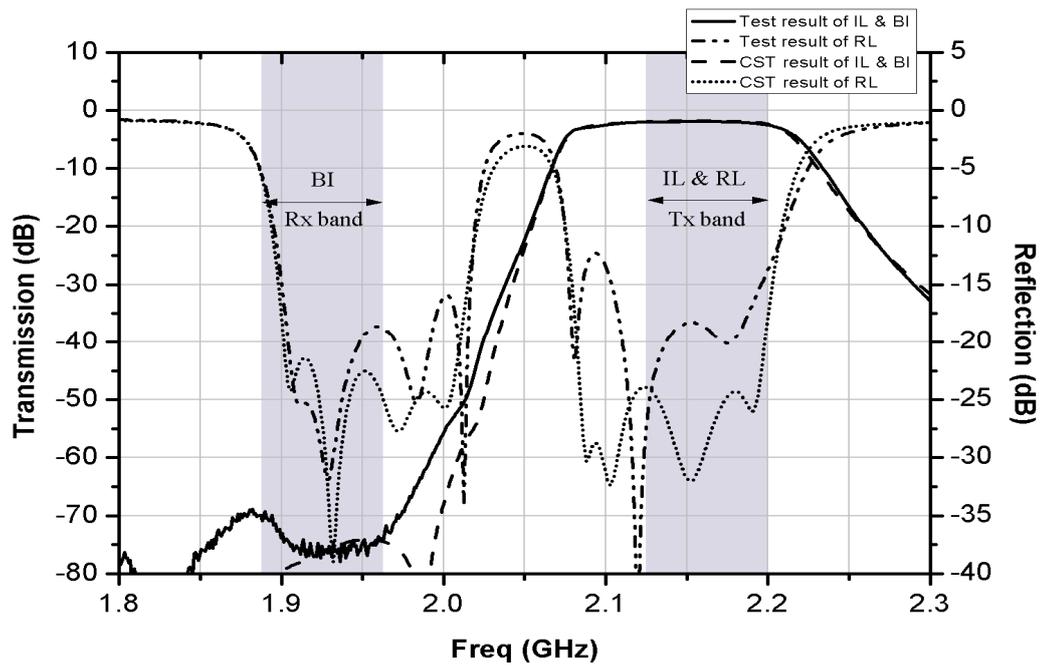


Fig. 85. Measured and simulated results in WCDMA Tx band pass of quad-plexer.

Table 49. Measured and simulated results in WCDMA Tx band pass of quad-plexer.

ITEM	Unit	Simulation	Test Result
Insertion Loss	dB	2.5	2.6
Return Loss	dB	14.1	15.7
Bands Isolation	dB	74.4	60.2

VII. 결론

본 논문에서는 LTCC 기반의 듀플렉서와 마이크로스트립 선로로 구성된 다이플렉서를 단일 지그 위에 집적회로로 설계하여 셀룰러 대역과 WCDMA 대역에서 우수한 성능으로 동작하는 쿼드플렉서를 제안하였다. 각 대역에서의 LTCC 듀플렉서는 송수신 대역에 대한 2개의 대역통과 필터와 이 필터들을 결합시키는 T 분배기로 구성된다. 동시에 두 대역의 LTCC 듀플렉서를 결합시키는 다이플렉서는 셀룰러 대역을 통과시키고 WCDMA 대역을 차단하는 저역통과필터와 WCDMA 대역을 통과시키고 셀룰러 대역을 차단하는 대역통과 필터로 구성되며, 두 필터는 T 분배기를 통해 결합된다.

듀플렉서 구현을 위한 대역통과 필터들은 메타구조 이론을 토대로 기본 DNG 구조에서 ENG 모델을 도입하여 설계하였다. 본 논문에서 제안한 대역통과 필터의 대역폭은 3% 이하로 기존의 LTCC 대역통과 필터들에 비해 매우 좁은 대역을 갖기 때문에 협대역 필터 설계를 위하여 보다 효율적인 접근을 위해서 ENG 모델을 선택하였으며, 이 ENG 이론을 기반으로 최적화 과정을 거쳐 셀룰러 대역과 WCDMA 대역 특성을 갖는 협대역 필터를 설계하였다. 또한 LTCC 대역통과 필터 설계 과정에서 주어지는 제한적 공간 내에서 다양한 구조체 시뮬레이션을 수행하여 0.8 GHz 대역과 2.1 GHz 대역에서 최적의 Q 값을 갖는 공진기 구조를 제시하였다. 대역통과 필터를 구성하는 공진기 구조체는 소형 LTCC 공정에 가장 적합한 $\lambda/4$ 길이를 갖는 단락 스텐브 선로로 설계 하였으며, 소형화와 협대역 설계에 용이 하도록 MIM 커패시터 구조를 공진기 구조체 내에 추가하였다. 공진기 구조체는 크게 4가지 구조에 대한 Q 값을 비교한 다음 선정하였고, 선택된 공진기들의 Q 값은 CST 시뮬레이션 툴을 이용하여 설계 대역의 중심주파수에서 구하였다. 그중에 가장 큰 Q 값을 가지면서 양호한 특성과 필터 구성 과정에 공진기들 간에 설계가 용이한 이격 거리를 가질 수 있는 구조를 선정하였다. 이때 설계에 사용된 매질의 유전율은 21.5이고 0.8 GHz 대역에서 공진기의 크기는 $6 \text{ mm} \times 12 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$, 2.1 GHz 대역에서는 $6 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$

의 크기로 유전체 중앙에 구현하였다. 마지막으로 교차결합 구조를 추가하여 차단특성을 개선한 필터를 제안하였다. 필터를 구성하는 공진기들 사이에 전자계 교차결합 구조를 갖는 소형 패치를 추가함으로써 공진기 차수를 줄이면서도 차단특성을 개선할 수 있는 LTCC 대역통과 필터를 구현하였다.

LTCC 필터를 설계하는 과정에서 제작 공정에 적합한 재료를 파악하기 위하여 세 종류의 유전체 재료를 시험하였다. 유전율이 41.6이고 유전손실이 0.0004인 RNE-40, 유전율이 40이고 유전손실이 0.002인 NH40G4 그리고 유전율이 20이고 유전손실이 0.001인 NH20M4을 사용하여 LTCC 필터를 제작하여 제반 특성을 비교하였다. RNE-40를 사용하여 LTCC 필터 제작한 경우에는 약 300MHz 정도의 주파수 편이가 발생하였고 층 분리현상이 생김으로 인하여 비슷한 유전율 값을 갖는 NH40G4 세라믹 파우더로 변경하여 시험하였다. 이 때 층분리 현상과 주파수 편이 정도는 어느 정도 개선이 되었으나 삽입손실이 약 6 dB 정도로 저하된 특성이 나타났다. 저하된 삽입손실 특성을 개선하기 위해 NH40G4 보다 주파수 편이 현상이 적고, 유전손실과 삽입손실 특성이 양호하며 비교적 유전율이 20으로 낮은 NH20M4 재료를 사용하였다. 내부전극에 사용된 전극재료는 800~900°C의 온도에서 LTCC 유전체 재료와 동시 소성이 가능한 Ag 전극을 사용하였다. Ag 전극 페이스트를 LTCC 유전체 시트 위에 스크린 프린팅하여 전극 패턴을 형성하였고, 공진기의 Q 값을 높이기 위하여 메탈함량이 80% 이상인 전극 재료를 사용하였다. 그리고 제작과정 중에 Namics사의 7251S 전극을 2겹으로 인쇄 했을 때가 가장 좋은 필터 특성을 나타냈기 때문에, 최종 제작 공정에서는 NH20M4 유전체 파우더를 사용하고, 7251S 전극을 2겹 인쇄하여 LTCC 필터를 제작하였다.

이상의 LTCC 공정과정을 통하여 제작된 이동통신용 송신대역과 수신대역 필터를 마이크로스트립선로 T-분배기와 연결하고 PCB 위에 구현하여 듀플렉서를 제작하였다. 제작 결과에 대한 특성은 0.8 GHz 주파수에서 삽입손실 4.5 dB 이하, 송수신 분리도 50 dB 이상으로 양호한 특성을 나타냈고, 2.1 GHz에서 삽입손실 2.3 dB 이하, 송수신 분리도 60 dB 이상으로 좋은 특성 결과를 얻었다.

셀룰러 대역 듀플렉서와 WCDMA 대역 듀플렉서를 최소한의 손실과 왜곡으로 결합시키기 위한 광대역 다이플렉서는 저역통과 필터와 광대역 대역통과 필터를 연결하여 설계하고 제작하였다. 2중 대역을 포함하는 광대역 다이플렉서는 셀룰

러와 WCDMA 대역인 2개의 이동통신 주파수 대역에서 통과대역 삽입손실이 0.5 dB 이하인 낮은 손실 특성과 차단대역에서 15 dB 이상의 대역저지 특성을 갖도록 설계하였다. 셀룰러 대역 필터는 저역통과 필터로 설계하였으며, 대표적인 계단 임피던스 저역통과 필터 설계방법을 이용하였다. WCDMA 대역 필터는 기존에 많이 쓰이는 전자계 결합 구조보다 광대역 특성 설계가 용이한 직접 결합 구조를 갖는 콤팩트 대역통과 필터 구조로 설계하였다. 설계된 다이플렉서는 설계 값과 실측 값 모두 15 dB 이상의 반사손실 특성과 0.5 dB 이하의 삽입손실, 20 dB 이상의 상대 대역 차단 특성을 나타내어 목표치를 모두 만족하는 양호한 결과를 얻었다.

최종적으로 설계 제작된 듀플렉서 2종과 다이플렉서를 연결하여 하나의 안테나 포트와 2중 대역 송수신 포트가 연결된 쿼드플렉서를 제작하였다. 최종 목표 값은 셀룰러 대역에서 5.5 dB 이하의 손실과 50 dB 이상의 송수신 분리도, WCDMA 대역에서는 3 dB 이하의 손실과 60 dB 이상의 송수신 분리도가 나오도록 설정하였으며, 제작된 제품의 측정값은 셀룰러 대역에서 약 5 dB의 손실과 53 dB 이상의 송수신 분리도, 그리고 WCDMA 대역에서 약 3 dB의 손실과 60 dB 이상의 양호한 송수신 분리도를 얻을 수 있었다.

본 논문에서는 변형된 메타구조인 ENG 모델을 기반으로 이동통신용 협대역 LTCC 대역통과 필터를 설계하여 제작하고, 이들을 다이플렉서와 결합시켜 기존에 세계적으로 많이 서비스 되고 있는 셀룰러 대역과 WCDMA 대역을 동시에 송수신 할 수 있는 쿼드플렉서를 구현하는 방법을 제시하였다. 최근 들어 세계 이동통신 환경이 사업자간 서비스 주파수가 점점 복잡해지고 있고, 제한된 주파수 사용 기간 등의 영향으로 주파수 재입찰이 활발히 이루어지고 있는 실정이다. 이로 인하여 광대역으로 설계된 안테나 하나를 사용하면서 안테나와 연결되는 RRH 시스템은 다중대역 시스템으로 재편되고 있는 실정이다. 이러한 환경에서 논문에 제시된 LTCC 설계 기법을 이용하면 더욱더 많은 서비스 대역이 결합된 협대역 다중밴드 멀티플렉서를 가볍고 작은 크기로 제작이 가능할 것이다. 그리고 LTCC 대역통과 필터 설계 노하우는 추후 5G와 같은 초고주파 대역에 사용되는 필터 설계에도 유용하게 이용될 수 있다.

References

- [1] L. K. Yeung, K. L. Wu, and Y. E. Wang, "Low temperature cofired ceramic LC filters for RF applications", *IEEE Microwave Magazine*, vol. 9, no. 5, pp. 118-128, 2008.
- [2] W. S. Tung, Y. C. Chiang, and J. C. Cheng, "A new compact LTCC band pass filter using negative coupling", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 10, pp. 641-643, 2005.
- [3] C. W. Tang, C. W. Shen, and C. C. Tseng, "Broadband cascade quadruplet band pass filter with low-temperature cofired ceramic technology", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 17, no. 5, pp. 340-342, 2007.
- [4] C. L. Tsai and Y. S. Lin, "Analysis and design of single-to-balanced combline band pass filters with two independently controllable transmission zeros in LTCC technology", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 11, pp. 2878-2887, 2010.
- [5] L. K. Yeung and K. L. Wu, "A compact second-order LTCC band pass filter with two finite transmission zeros", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 2, pp. 337-341, 2003.
- [6] C. W. Tang and S. F. You, "Design methodologies of LTCC band pass filters, diplexer, and triplexer with transmission zeros", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 2, pp. 717-723, 2006.
- [7] C. W. Tang, "Harmonic-suppression LTCC filter with the step-impedance quarter-wavelength open stub", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 52, no. 2, pp. 617-624, 2004.
- [8] K. Rambabu and J. Bornemann, "Simplified analysis technique for the initial design of LTCC filters with all-capacitive coupling" *IEEE*

- Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 53, no. 5, pp. 1787–1791, 2005.
- [9] B. Yuan, W. Yu, H. Sun, and X. Lv, “A band pass filter using LTCC system-on-package (SOP) technology”, in Proc. Int. Conf. Microw. Technol. Comput. Electromagn. (ICMTCE’09), pp. 257 - 260, 2009.
- [10] Y. S. Dai, H. S. Zhang, G. P. Qi, D. L. Lu, Z. L. Tao, G. X. Qian, and H. Wang, “LTCC band pass filter for Bluetooth application with dual transmission zeros”, in Proc. Int. Conf. Microw. Millim. Wave Technol. (ICMMT’08) , vol. 1, pp. 284 - 286, Apr. 2008.
- [11] L. K. Yeung and K. L. Wu, “A compact second-order LTCC band pass filter with two finite transmission zeros”, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 51, no. 2, pp. 337 - 341, 2003.
- [12] C. F. Chang and S. J. Chung, “band pass filter of serial configuration with two finite transmission zeros using LTCC technology”, IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 53, no. 7, pp. 2383 - 2388, 2005.
- [13] H. H. Huang, C. H. Chen, and T. S. Horng, “Quasi-lumped band pass filter with sharp transition edge and wide stopband rejection”, Electron. Lett., vol. 49, no. 7, pp. 479 - 480, 2013.
- [14] H. H. Huang and T. S. Horng, “Capacitive-coupled resonator-based band pass filter with controllable multiple transmission zeros at stopband”, Microw. Opt. Technol. Lett., vol. 55, no. 7, pp. 1563 - 1565, 2013.
- [15] E. Arabi, M. Lahti, T. Vaha-Heikkila, and A. Shamim, “A 3-D miniaturized high selectivity band pass filter in LTCC technology”, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 24, no. 1, pp. 8–10, 2014.
- [16] M. Zewani and I. C. Hunter, “Design of ring-manifold microwave multiplexer”, Microwave Symposium Digest, 2006 IEEE MTT-S International, pp. 689–692, 2006.
- [17] C. F. Chen, T. Y. Huang, T. M. Shen, and R. B. Wu, “A Miniaturized

- microstrip common resonator triplexer without extra matching network”, Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference, AMPC, pp. 1439-1442, 2006.
- [18] A. F. Tunc, C. Ulker, A. M. Mungan, O. Ceylan, and H. B. Yagci, “Triplexer design with hairpin structure”, 19th Telecommunication Forum, TELFOR, pp. 988-991, 2011.
- [19] C. W. Tang and C. T. Tseng, “Design of a packaged microstrip triplexer with star-junction topology”, Proceedings of the 42nd European Microwave Conference, EuMA, pp. 459-462, 2012.
- [20] P. C. Arannibar, P. R. Postigo, A. G. Lamperez, and D. S. Vargas, “Compact triplexer with open ring resonators as microstrip trisection band pass filters for asymmetric response”, Microwave and Optoelectronic Conference, 2013 SBMO/IEEE MTT-S International, 2013, pp. 1-5, 2013.
- [21] H. W. Wu, S. H. Huang, and Y. F. Chen, “Compact microstrip triplexer based on coupled stepped impedance resonator”, Microwave Symposium Digest, 2013 IEEE MTT-S International, pp. 1-3, 2013.
- [22] C. F. Chen, T. M. Shen, T. Y. Huang, and R. B. Wu, “Design of multimode net-type resonators and their applications to filters and multiplexers”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 59, no. 4, pp. 848-856, 2001.
- [23] J. Y. Wu, K. W. Hsu, and W. H. Tu, “High-isolation microstrip triplexer using multiple-mode resonators”, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 22, no. 4, pp. 173-175, 2012.
- [24] G. L. Matthaei, S. M. Rohlfing, and R. J. Force, “Design of HTS, lumped-element, manifold-type microwave multiplexer”, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 44, no. 7, pp. 1313-1321, 1996.
- [25] M. Karlsson, A. Serban, J. Osth, Owais, and S. Gong, “Frequency triplexer for ultra-wideband systems(6-9 GHz)”, IEEE Transactions on

- Circuit and Systems-I: Regular Papers, vol. 60, no. 3, pp. 540-547, 2013.
- [26] P. H. Deng, M. I. Lai, S. K. Jeng, and C. H. Chen, "Design of matching circuits for microstrip triplexers based on stepped-impedance resonator", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 12, pp. 4185-4192, 2006.
- [27] S. Taravati and M. K. Amirhosseini, "Design method for matching circuits of general multiplexer", *IET Microwave Antennas and Propagation*, vol. 7, iss. 4, pp. 237-244, 2013.
- [28] A. Alu and N. Engheta, "Pairing an epsilon-negative slab with a mu-negative slab: resonance, tunneling and transparency", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 10. pp. 2558-2571, 2003.
- [29] J. Park, Y. Ryu, J. Lee, and J. Lee, "Epsilon negative zeroth order resonator antenna", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 12. pp. 3710-3712, 2007.
- [30] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic metamaterials: trnsasimission line theory and microwave applications*, A John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [31] R. J. Cameron, "Advanced filter synthesis", *IEEE Microwave Magazine*, vol. 12, no. 6, pp. 42-61, 2011.
- [32] J. S. Hong and M. J. Lancaster, "Cross-coupled microstrip hairpin-resonator filters", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 46, no. 1, pp. 118-122, 1998.
- [33] C. K. Liao and C. Y. Chang, "Modified parallel-coupled filter with two independently controllable upper stopband transmission zeros", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 12, pp. 841-843, 2005.
- [34] Robert E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, McGRAW-HILL, Inc. pp. 488-490, 1992.
- [35] David M. Pozar, *Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, Inc. pp.

137-140, pp. 389-416, 2005.

- [36] C. J. Kikkert, “Designing low cost wideband microstrip band pass filters”, IEEE Tencon 05, Melbourne, Australia, pp. 21-24, 2005.
- [37] J. Hong and M. J. Lancaster, *Microstrip Filters for RF/Microwave Applications*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 142-148, 2001.
- [38] M. P. Chun, J. H. Cho, and B. I. Kim, “The control of electrical properties of multilayered LC-filter for 5GHz applications”, J Electroceram, 17:415-419, 2006.

논문과 관련된 저자의 실적

1. 학회 논문지

- [1] Sooduk Seo, Hakrae Cho, Dooyeong Yang, “D-CRLH Based Band Rejection Filter using a Concavi-Convex Coupled CPW Transmission Line”, Journal of Electrical Engineering Technology, vol. 11, no. 2, pp. 463-469, 2016.
- [2] 서수덕, 조학래, 양두영, “이동통신 기지국용 삼중대역 멀티플렉서”, 한국산학기술학회 논문지, 15권 12호, pp. 7309-7316, 2014.
- [3] 서수덕, 조학래, 양두영, “미앤더 마이크로스트립 전송선을 이요한 고감쇄 LPF 설계 및 제작”, 한국산학기술학회 논문지, 15권 3호, pp. 1734-1739, 2014.
- [4] 양두영, 서수덕, 조학래, “LH 전송선을 이용한 광대역 고역통과 필터 설계 및 제작”, 한국정보통신학회 논문지, 18권 2호, pp. 260-267, 2014.
- [5] Dooyeong Yang, Sooduk Seo, Jeongpyo Kim, “Miniaturized Band Stop Filter Using Swirl-type Microstrip Transmission Line Based on Dual CRLH”, Microwave and Optical Technology Letter, vol. 56, no. 12, pp. 2867-2871, 2014.

2. 학술대회 논문집

- [1] 서수덕, 조학래, 김정표, 양두영, “LTCC를 이용한 협대역 Compline 대역통과 필터”, 2014년 한국전자과학회 하계종합학술대회, 2014년 8월.
- [2] 서수덕, 조학래, 오학성, 김정표, 양두영, “LTCC BPF의 교차결합구조 연구”, 2015년 한국전자과학회 하계종합학술대회, 2015년 8월.
- [3] 이동학, 서수덕, 조학래, 양두영, “LTE MIMO(4×4) 시스템용 빔성형 버틀러 스위치 설계”, 2016년 한국콘텐츠학회 춘계종합학술대회, 2016년 5월.
- [4] 이동학, 서수덕, 조학래, 양두영, “버틀러 위상오차에 따른 빔성형 효과 분석”, 2016년 한국전자과학회 하계종합학술대회, 2016년 6월.

3. 특허

1) 국내

- [1] 서수덕, 조학래, 김정표, “공진 소자 및 이를 이용한 필터”, (주)이너트론, 특허 제10-1430684, 2014년 08월 08일.
- [2] 서수덕, 조학래, 김정표, “공진기 및 이를 포함하는 필터”, (주)이너트론, 특허 제10-1439420, 2014년 09월 02일.
- [3] 서수덕, 조학래, 고문봉, “공진 소자 및 이를 포함하는 필터”, (주)이너트론, 특허 제10-1598980, 2016년 02월 24일.
- [4] 서수덕, 조학래, 고문봉, “공진 소자 및 이를 포함하는 필터”, (주)이너트론, 특허 제10-1591876, 2015년 02월 11일.
- [5] 서수덕, 조학래, 하종우, “공진 소자 및 이를 포함하는 필터”, (주)이너트론, 특허 제10-1591878, 2016년 02월 11일.
- [6] 서수덕, 조학래, 하종우, “공진 소자 및 이를 포함하는 필터”, (주)이너트론, 특허 제10-1579856, 2015년 12월 17일.
- [7] 서수덕, 조학래, 김정표, “공진 소자 및 이를 포함하는 필터”, (주)이너트론, 출원번호 : 10-2015-0067935, 2015년 05월 15일.

2) 해외

- [1] 서수덕, 조학래, 고문봉, “Resonance device and filter including the same”, Innertron, Inc., 미국 특허 등록 : 9,209,505, 2015년 12월 08일.
- [2] 서수덕, 조학래, 고문봉, “Resonance device and filter including the same”, Innertron, Inc., 미국 특허 등록 : 9,350,061, 2016년 05월 24일.
- [3] 서수덕, 조학래, 김정표, “Resonance device”, Innertron, Inc., 중국 출원번호 : 201310192472.7, 2013년 05월 22일.
- [4] 서수덕, 조학래, 김정표, “Resonance device”, Innertron, Inc., 미국 출원번호 : 14/039,594, 2013년 09월 27일.
- [5] 서수덕, 조학래, 김정표, “Resonance device and filter including the same”,

Innertron, Inc., 미국 출원번호 : 14/725,237, 2015년 05월 29일.

[6] 서수덕, 조학래, 김정표, “Resonance device and filter including the same”,
Innertron, Inc., 유럽 출원번호 : 15 169 766.1, 2015년 05월 29일.

[7] 서수덕, 조학래, 김정표, “共振素子およびそれを含むフィルター”, イナートロ
ン インク, 일본 출원번호 : 2015-244668, 2015년 12월 21일.

감사의 글

석사과정부터 부족한 저를 언제나 변함없는 지도와 격려로써 이끌어 주신 양두영 지도교수님께 진심으로 감사를 드립니다. 미비한 논문을 지도 심사하여 주시고 많은 조언과 격려를 해주신 김홍수 교수님, 현승엽 교수님, 전자공학과 고석준 교수님, 대진대학교 이민수 교수님께도 깊이 감사드립니다. 박사과정 동안 많은 도움을 주신 임재윤 교수님, 김순환 교수님, 좌정우 교수님 그리고 지금은 고인이 되셨지만 강진식 교수님께 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 대학원 과정 동안 가끔이지만 좋은 조언과 도움을 주신 홍성욱 선배님, 박재신 선배님 그리고 이동학 후배님, 조교 선생님께 감사를 드립니다. 제가 박사과정을 할 수 있도록 물신양면으로 지원해 주시고 격려해 주신 저희 회사 조학래 사장님께 깊은 감사드립니다. 앞으로 더욱더 회사 생활 열심히 하겠습니다. 논문 준비할 때 제 곁에서 여러모로 큰 도움을 준 (주)에이티코디의 김정표 박사, 저희 회사 고문봉 대리한테 고마움을 표합니다. 아마들의 도움이 없었다면 상당히 힘들었을 거야, 정말 고마워. 그리고 저희 회사 (주)이너트론의 오학성 부사장님, 조맹래 전무님 그리고 하종우 부장한테도 감사의 마음을 전합니다. 오늘이 있기까지 많이 염려해주시고 도와주신 형님, 형수님께 진심으로 감사한 마음을 전하고 항상 뒤에서 성원해 주신 장인과 장모님께도 감사드립니다. 많은 어려움 속에서도 고통을 함께 나누며 학업에 전념할 수 있도록 뜨거운 사랑과 정성으로 뒷바라지를 해준 아내 혜숙씨에게 사랑과 고마운 마음을 전합니다. 그리고 논문 준비한다고 많이 신경써주지도 못하고 놀아 주지도 못한 큰아들 진혁아 그리고 막내 은혁아 아빠가 잘 못해줘 미안하다. 앞으로 아빠역할 잘하도록 노력할게. 제가 태어나면서부터 항상 사랑과 염려로 지켜봐 주신 아버님, 어머님께 정말 감사드립니다. 부모님의 응원이 없었다면 쉽지 않았을 것입니다. 박사과정 동안 항상 긍정적으로 이끌어 주시고 뒷바라지 해주신 아버님, 어머님께 다시 한 번 깊은 감사를 드립니다.

끝으로 이 논문이 있기까지 여러 도움을 주신 분들께 다시 한 번 감사를 드리며 앞으로 더욱더 열심히 노력하도록 하겠습니다. 감사합니다.