

벨런(2)



HL4CEY 이건식
hl4cey@karl.or.kr

지난 호에서는 평형과 불평형, 벨런의 종류, 원리, 벨런의 필요성과 같은 기초적인 것들을 알아보았다. 이번 호에서는 지난 호에서 부족했던 부분과 제작과 관련하여 알아보자. 벨런에 대해 실질적으로 이해하고 제작 하면 시행착오 없이 만족할만한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 막상 제작하려고 하면 막연하다. 그리고 일반 제작관련 기사 대부분 설명이 부족하여 이해가 안 된다. 치수(몇 cm)나 횟수(몇 회) 의존적이다. 외국의 경우도 역시 비슷하다. 이번 호에서는 벨런 관련 문헌에 자주 등장하는 전송선트랜스에 대해 알아보고 Guanella형, Ruthroff형의 유래, 그리고 벨런과 언언(Unun)의 차이점을 알아보고 더불어 알아야 할 용어와 단위와 제작할 때 재료 선정 요령과, 측정 방법, 계산방법, 주의사항들을 알아보도록 하자.

1. 전송선트랜스란 ?

문헌을 보면 전송선트랜스(Transmission Line Transformer)란 말이 자주 나온다. 이 전송선트랜스를 정확히 알아야 비로소 벨런을 이해하게 되므로 이번 호에서 꼭 이해하고 넘어가자. 이 전송선트랜스(이하 TLT라 하자)와 우리가 알고 있는 일반트랜스(Conventional transformer)는 근본적인 개념 차이가 있다. 일반트랜스는 철(iron)로 된 철심(Core)에 감겨진 일차 코일에 전류가 흐르면 자속이 발생, 이 자속이 자속의 길(코어)을 통하여 즉 자속쇄교(Flux linkage)를 통하여 이차 코일에 상호유도인덕턴스(Mutual inductance)에 의한 전류가 흘러 전압이 유도된다. 즉 상호유도가 기초원리이고 저주파에 주로 사용하는 것, 이것이 일반트랜스의 원리이다. 반면에 TLT는 전송선

중에 존재하는 트랜스로서, 처음 제안할 때는 내부 코어가 없는 형태이며, 두개의 코일(레헤르선 Lecher wire: 사전적 의미로 파장에 비하여 아주 가까운 거리에 코일을 평행하게 한 선로로, 서로 전류의 방향이 반대이므로 거의 방사 손실 없이 전송되는 도선으로 한쪽 끝을 단거나 열어두면 정재파가 존재하여 공진기나 필터 등으로 쓰인다)을 최소간격으로 감아 한 쪽 코일에 전류가 흐르면 그 코일의 주변에 자속이 발생, 다른 코일에 자속의 쇄교에 의한 유도 작용으로 코일에 전류가 유도된다. 물론 제안 당시엔 감긴 전체 코일(successive turns)의 공심 내부를 통한 상호유도 인덕턴스는 무시(neglect)하였다.

이 코일시스템(당시는 아직 벨런이라 하지 않음) 일컬어 이상적인 코일에 의한 이상적인 트랜스라 하였고, 이러한 결합은 양방향(입력과 출력)이 특성의 간섭이 없는 격리(Isolation)된 상태가 되고, 이러한 코일시스템을 적절한 횟수로 제작하여 출력단에 순수 저항부하를 연결하면 입력 임피던스와 코일시스템의 서지(surge: 특성임피던스와 같은 의미)임피던스와 저항부하의 임피던스는 다 같게 된다. 즉 전압 유도가 목적이 아니고 유도 작용을 이용하여 두개의 코일이 양이 같고 위상이 반대인 상태를 만드는 것이며 주로 고주파에 사용한다. 이것이 TLT의 원리이다. 또 구조상 TLT는 한가닥으로 감겨진 것이 없다. 모두 이중(2선: bifilar)이나 삼중(3선: trifilar), 사중선(4중: quadrifilar), 오중선(5중: quintufilar)으로 감겨져 있다. 그러나 코일가닥이 많을수록 효과가 감소하는 이유로 삼중선까지 권장한다. 또한 초기엔

내부에 코어가 없었으나 요즈음은 좋은 코아의 출현으로 자속밀도를 크게 하여 코일의 길이가 짧아졌다. 이유는 코일의 길이는 투자율(μ : 발음이 '뮤')이다. μH 의 '마이크로헨리'와는 다르다)의 제곱근에 비례하여 짧아진다. 또한 재료의 주파수 특성에 크게 의존하지 않아도 TLT는 상당히 광대역에 걸쳐 평탄한 주파수 특성을 갖는다. 이러한 이유로 TLT에서의 주파수특성 내지는 임피던스를 논하는 건 별의미가 없다. 특히 메이커 카다로그에 임피던스가 50옴, 정재파비가 얼마 하는 건 무의미하다.

이상의 설명처럼 TLT는 상당히 낮은 주파수, 즉 오디오주파수에서는 일반트랜스의 성질을 갖고, 높은 주파수, 즉 아마추어밴드 주파수이상에서는 전송선과 비슷한 성질을 갖추며 이 TLT를 하나의 회로부품(Block)으로 하여 직렬과 병렬 조합으로 1:1과 1:4를 기본형으로 여러 형태로 사용하고 있다. Ruthroff형도 마찬가지로 두선 이상의 다중선으로 감겨져 있는 TLT이다. 이러한 TLT는 분포정수로 해석되고, 설명되며 주로 전송계, 아마추어무선분야 뿐만 아니라 전자회로, 특히 고주파회로에서는 스트립라인형태로도 사용하며 없어서는 안 되는 주요 회로요소가 되었으며 광범위하게 사용되고 있다.

2. Guanella형과 Ruthroff형

원래 벨런은 1944년 Guanella가 Brown Boveri Reveiw 잡지에 제안하였다. 제안은 고주파회로의 임피던스 매칭을 저주파용 트랜스나 1/4파장 레헤르선을 사용할 때에 주파수가 달라지면 회로 내 누설인덕턴스가 발생하여 캐패시턴스로 조절해야 하는 큰 불편이 생긴다. 그 중의 하나로 진공관 푸시풀(두 알의 진공관이 반 사이클씩 동작하는 증폭방식의 종류)출력부의 벨런스 출력을 동축케이블 언벨런스에 연결 할 때, 재조절의 필요가 없고 평탄하고 좋은 매칭 결과를 얻기 위해 공심형으로 감은, 앞서 설명한 레헤르선 코일 4쌍으로 16:1의 임피던스 매칭을 구현하는 상당히 기발한 발명을 제안하였다. 그 후 많은 사람들 특히 벨연구소의 Jerry Seveck(W2FMI), 또 Sonoran연구소의 Chris Trask(N7ZWY)를 포함한 많은 과학자들을 통하여 실험, 연구되고 오늘날까지 다양한 형태로 변형, 응용되며 명쾌한 수학적 해석과 많은 문헌을 발표하며 많은 괄목할 만한 발전을 이룩했다. Guanella형은 코일 1차에 흐른 전류가, 2차 코일에 180도 위상이 변화하고 같은 양의 전류로 유도(Mutual inductance)되는 원리로 문헌에는 "Equal and delayed transformer"라고도 표현된다. 안테나로 보내려는 고주파 전류는 억제되지

않고 안테나로 가는 전류와 안테나에서 오는 전류를 같게 하고 컴턴모드 임피던스를 없이하여 동작상으로 보면 이 임피던스를 통하여 흐를 컴턴모드 전류를 억제(Chocking)한다. 제안 당시엔 전송선과 안테나 사이에 표피효과에 의한 누설전류가 발생하다는 사실은 규명되지 않았으며 근래에 와서 이 코일시스템(벨런)을 불평형 전류를 없애는 곳에도 이용하게 되었다.

또 한편으로 벨연구소 연구원이었던 Ruthroff는 1959년 그의 논문에서 이 TLT를 이용하여 상대적으로 낮은 트랜지스터 출력회로 임피던스를 그보다 높은 50옴 회로의 임피던스에 맞추기 위한 방편으로 Guanella형을 일부 변형한 형태로 제안한 Ruthroff형은 주로 임피던스 매칭을 위한 TLT로 응용되며 벨런으로는 몇 가지만이 가능하고 거의 unun형태(컴턴모드 형태: 접지점이 있는 형태)로 이용된다. 그리고 임피던스의 매칭에서 권수 비율이 까다로운 비율(Fractional ratios)의 경우 탭 조절로 미조정하고 있다. 이 전압형도 코일이 다중선형태로 되어있다. 언언의 필요성은 굳이 여러 설명이 필요 없이 아마추어무선에서 요긴하게 여러 가지 용도로 사용하고 있다. 필자의 생각은 벨런은 주로 전류형이, 임피던스 매칭은 전압형이 타당하다고 생각하며 두 가지를 동시에 사용하는 경우도 있다. 이처럼 TLT는 복잡한 여러 형태를 쉽게 구현할 수 있다. 본고를 통하여 벨런과 언언에 대한 개념을 확실히 알고, 또한 명칭의 사용을 확실히 하였으면 한다.

그 외에 전번 호에 언급 했던 비드(Bead)를 사용하는 Frank wit의 초크방법(일명 W2DU형)은 별로 권장하고 싶지 않다. 직접 실험을 해보지는 않았지만, 컴턴모드 전류가 비드에 유도되면서 자기 단락현상(전류 검출용 C.T를 개방상태로 두면 발열하여 소손되는 현상)으로 줄열이 발생, 열의 축적으로 비드가 가열되어 문제가 발생한다. 실제 실험해본 아마추어국(N7ML)이 약 50W정도에서 많은 발열로 재료가 큐리온도(재료의 온도상승으로 본래 특성인 강자성체의 성질이 상자성체 성질로 변하는, 재료 본래의 성질을 잃어버리는 온도, 재료마다 차이가 있으며 약200 ~ 250도 정도다)를 훌쩍 넘어 비드의 본성을 잃어버려 무용지물이 되었다는 사용 후기도 있다.

3 벨런 재료와 몇가지 단위

벨런 제작에 필요한 코아의 종류는 크게 나누어 두 가지로 압분철심(iron powder)과 산화물철심(Ferrite)이 있다. 압분철심은 카보닐(Carbonyl)의 화합물을 사용목적에 따라 적절히 섞어 투자율과

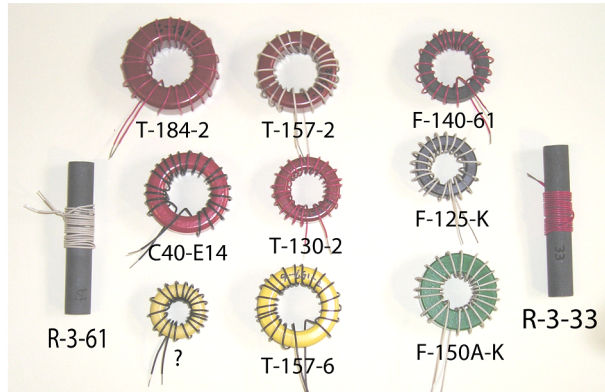
주파수 특성을 조금씩 다르게 한다. 아마추어밴드에 주로 사용하는 재료는 #2번(적색: Carbonyl-E)과 #6번(노란색: Carbonyl-SF)정도이며 형명은 T-000-2 또는 T-000-6로 표시하며, T는 압분철심, 중간숫자는 크기이고 끝의 숫자는 카보닐의 종류다. 또 산화물철심은 망간산화물(Manganese Zinc ferrite)과 니켈산화물(Nickel Zinc ferrite)의 두 종류가 있으며 망간산화물은 투자율이 대략 800 μ 이상이고 니켈산화물은 800 μ 이하이다. 사용할 수 있는 재료는 대략 K와 F이다. 재료들의 대부분 무엇을 어떻게 조합 했는지 설명은 거의 없고 나름대로 재료구분(Material code: 제작회사 별로 약간 다르다), 사용주파수, 투자율과 A_L 값뿐이다.

상기의 재료 중 투자율은 압분철심 보다 산화물철심이 더 좋고, 로드형(솔레노이드형)보다는 토로이달형이 더 좋다. 필자는 주로 컴퓨터 파워서플라이(Power supply)의 정류부의 평활필터 인덕터의 코아(노란색: Carbonyl계로 추정)를 사용하는데, 송신 출력 대략 100 ~ 150W정도에서 무난히 사용하였다. 일반 라디오의 바안테나에 사용하는 바(로드형)도 사용 가능한데 산화물철심의 망간계 같다. 메이커 에서는 #61혹은 #33로 판매된다.

이런 여러 종류 코아의 사용가능 여부의 대략적인 판단은 코아에 코일을 20회 정도 감고 L값을 측정하여 대략 5 μ H ~ 300 μ H정도 이면 사용 가능하고 너무 높으면 아마추어밴드에서 자기포화(Saturation)가 우려되어 고려해 보아야 한다. 참고로 외국산(CWS사 제품) 코아의 실제 값을 알아보고자 구매하여 측정 해보니 T-000-2, T-000-6의 값은 대략 5 μ H이고 F-125-K는 120 μ H, F-150-K는 220 μ H, 같은 K이나 크기(지름)와 두께의 차이(자료 단면의 넓이) 따라 달랐다. F-140-61은 60 μ H, 필자가 사용했던 노란색 코아는 30 μ H정도였다. 솔레노이드형 #61과 #33은 30 μ H, C40-E14는 국내 (주)코아전자 제품인데 측정결과 T-000-2과 유사한 특성으로 약 5 μ H정도이었다. 000-F00, 000-H00등 E중뿐 아니라 F중, H중도 있었으며 T-000-2, 6, 8과 유사하다. 국내에서 유사한 재료가 있다는 것이 놀라웠다.

사용한 측정기가 정밀급이 아님을 감안하기 바라며 실용상 비교 측정 개념이므로 큰 의미가 없다. 재료의 크기에 따른 사용전력은 재료의 성분, 크기, 운용 모드, 운용 방식, 감는 습씨에 따라 차이도 있겠으나 크기별로 지름이 30mm(106)는 100W, 35mm(130)는 150W, 40mm(157)는 250W,

50mm(184, 200)는 500W정도 사용 가능하다. 지름이 같아도 높이와 환(Ring)의 두께에 따라 다르겠다. 재료의 선택에 있어 카보닐(iron powder)이나, 페라이트(Ferrite)이냐는 가격검토, 제작, 실험을 통하여 결정할 문제이며, 쉽게 결정할 문제는 아닌 듯하다. 가격은 페라이트가 더 고가이다. 필자의 생각은 페라이트는 로우밴드에서 투자율이 높아 상대적으로 권수가 적어져 좋을 거 같다. 반면 카보닐계는 하이밴드가 좋을 듯 하다. 그러나 특성이 다르니 신중할 필요가 있다. 여러 가지 코아의 사진이다.



코아 재료를 검토할 때 자료에 나오는 투자율 μ , A_L 값(Inductance coefficient)은 우리에게 쉽게 짐작이 안 되는 값들이다. 투자율은 재료의 고유 특성을 나타내며 어떤 자료에서는 μ_s , 즉 비투자율을 사용하기도 한다. 투자율은 비투자율에 자성체 중에서의 계수를 곱한 값이다. 즉 $\mu = \mu_s \times \mu_o$ 이며, 계수 μ_o 는 $4\pi \times 10^{-7}$ [H/m]이다. 진공에서의 $\mu_s=1$ 이다. 또 A_L 값은 코아에 코일 한바퀴를 감았을 때의 L값(코일의 자기 인덕턴스)이다. 단위가 자료에 따라 [μ H/N²], [mH/1000]또 [nH/N²]으로 사용하여 해석이 난해하다. 비슷한 의미이나, 자료 검토할 때 단위에 유의 하여야 하며, 계산의 결과가 다를 수 있다.

4. 코일을 얼마나, 어떻게 감아야 할 가?

어떤 코일을 얼마나 어떻게 감느냐는 상당히 넓은 범위에서 검토할 일이며, 제작의 핵심이다. 여러 자료들을 검토한 결과, 밸런 코일의 주 함수(Function)는 인덕턴스(L: H)이며 사용주파수에서의 리액턴스(X_L : 옴)이다. 밸런 설계는 사용 주파수부터 고려해야 한다. 물론 넓은 주파수 대역을 갖고 있다고는 하나 단파대는 좁은 대역이 아니다. 앞서의 Sevvick은 밸런 권선의 리액턴스를 안

테나 부하저항(순수저항분)의 10배 정도를 권장한다. 사용 안테나가 50옴이라면 한쪽의 저항이 25옴이고, 이때 필요한 한 쪽 코일의 리액턴스는 250옴 정도이다. 이 때 단일 주파수에 사용하는 안테나는 별 문제가 없지만 멀티 밴드에서는 안테나의 부하저항과 코일은 고정이고 주파수가 변한다면, 코일의 리액턴스는 밴드마다 변한다. 즉 낮은 주파수에서는 리액턴스가 적고 높은 주파수에서는 크다. 그러므로 이를 감안, 주로 사용하는 밴드를 중심으로 설계하는 것이 좋을 것 같다. 구하는 권수는 공식 $X_L = 2\pi fL$ 을 이용하며, 필요 리액턴스(X_L)를 알고 주파수(f)를 알면 L 값을 구할 수 있다. 또 L 값에서 재료의 A_L 값을 알아 권수를 구한다.

예를 들어 7MHz에서 T-157-2를 사용한다고 하자, 우선 주파수는 MHz단위로 즉 7로 하면 L 값은 μH 가 된다. 계산은 $L = 250 / 6.28 \times 7$ 로부터 L 값은 5.69 μH 가 되고, T-157-2의 20바퀴의 인덕턴스가 5 μH 이므로 A_L 값은 $5 / 20^2 = 0.01\mu H(10nH)$ 이므로 권수 $T = \sqrt{L / A_L}$ 에서 $\sqrt{5.69 / 0.01} = 23.85$ 로 권선수 23.85, 약 24회가 나온다. 이 경우는 낮은 A_L 값의 재료보다 30 $\mu H \sim 60\mu H$ 정도의 재료(9회, 7회)가 좋겠다. 이렇듯 주파수별로 권수 차이가 있고, 또 그에 따라 코아 재료의 선택이 달라진다.

언언(임피던스매칭용)도 원하는 임피던스값의 계산은 필요 임피던스값에 팩터(factor)를 곱하여 리액턴스값을 얻고 리액턴스값에서 인덕턴스를 구하고, 인덕턴스에서 각 재료의 A_L 값을 통하여 권수를 구한다. 임피던스에 사용할 팩터(Factor)는 4정도를 권장하고 있다. 또한 임피던스비는 권수의 제곱에 비례한다. 즉 25옴 대 50옴이면 임피던스비는 1:2이고 이것의 권수비는 1:1.414이다. 그러나 TLT의 임피던스비는 비율만 참조하면 된다. 즉 임피던스비가 1:2인 언언은 25:50옴도 되고 50:100옴도 된다는 의미다. 다시 말해 언언의 고유임피던스는 없다. 이는 측정할 때 순수저항 부하를 연결해야 하는 이유이기도 하다. 임피던스의 변화요인은 코일의 굵기, 절연의 두께, 코일간의 간격, 꼬인 선(Litz wire)은 꼬인 간격(twisting pitch)등 많은 원인이 있다. 언언은 까다로운 비율(fractional ratios)이 나오는 경우 탭 조절이 가능해야 하므로 제작할 때 에나멜 코일이 좋겠다. 그 외의 주의사항 및 착안사항은.

1). 벨런은 안테나와 동축케이블 중간에 설치하므로 안테나쪽 배선 길이는 가능한 짧게 해야 한다.

이유는 배선의 길이가 안테나 길이에 포함되므로 안테나 공진주파수가 변한다(낮아진다).

2). 코아를 케이스 등에 고정할 때 토로이달의 경우 자속이 코아 내부에만 국한되고 외부로의 누설자속이 없어 코아끼리 어느 정도 근접하여도 절연만 잘되면 상관없다. 코아를 고정할 때 중심 또한 영향이 미치지 않아 비자성체의 볼트를 사용하여도 무방하다. 그러나 로드형은 다르다. 누설자속이 있어 방향(?)을 탄다. 배치에 유의한다.

3). 코일 간, 코아와 코일간 절연의 문제도 있다. 코일은 절연이 좋은 에나멜코일 이나 테프론 피복선이 좋다. 코아의 절연 내압은 코팅 재질에 따라 대략 500~700V 정도이다. 중단출력 방식이 진공관인지 트랜지스터인지에 따라 확보해야 할 절연 전압이 다르다. 진공관출력의 경우 코일을 테프론튜브 등을 사용하여 절연을 한다. 또한 감을 때에 물리적인 주의도 필요하다.

4). 사용전력에 따른 코일의 굵기는, 굵기에 따른 허용전류(코일 메이커 자료 참조)를 고려하여야 한다.

5). 두개의 코아 방식 보다는 약간 큰 한 개의 코아에 함께 감는 방식도 좋다. 이유는 두개의 코아가 정확히 성능이 일치해야하고 감는 코일도 일치해야 한다. 다만 케이스와의 크기는 고려한다.

6). 수평계 안테나인 경우는 연결시 문제가 없으나 수직안테나에 사용할 벨런은 한쪽이 컷오프모드이므로 커넥터와 연결할 때 중앙의 심선의 극성(?)을 유지하여야 한다. 이유는 코일의 감가극성의 문제가 있다. 자세한 설명은 여기서 생략한다.

7). 벨런 또는 언언의 경우 여러 주파수에서의 공통 사용은 주파수 특성이 평탄(Broad)하다고는 하나 숙고해봐야 할 거 같다. 예를 들어 6M 밴드용을 160M 밴드에서의 사용은 무리가 있겠다.

5. 마치면서

필자의 표현능력 부족으로 설명이 어렵고 어설픈 부분도 없지 않다. 단순한 원리의 설명이니 천천히 이해하시길 바란다. 가끔 원어를 같이 표기함은 원문을 참조할 때를 위함이다. 벨런과 언언이 종류도 많고 경우의 수도 많아 일일이 대응하지 못하고 꼭이 중요한 사항만을 설명 하였다. 더 자세한 사항은 시간을 두고 연맹의 웹페이지를 통하여 여유 있는 설명, 사진을 보충하기로 하자. 질문은 연맹의 이메일로 주시면 아는 한 성실히 답변 드리겠다.