3 포트 RF 수동부품의 IM 모델

The IM Model of 3 Port RF Passive Component

차영찬 · 이진택 · 양기덕* · 조영송** · 김상태*** · 신철재

Young-Chan Cha · Jin-Taek Lee · Ki-Dug Yang* · Young-Song Cho** · Sang-Tae Kim*** · Chull-Chai Shin

요 약

본 논문에서는 3 포트 RF 수동부품에서 발생하는 IM 모델을 제안하였다. 제안한 모델을 이용하여 전향 및 후향측정법의 PIM을 계산하였고 계산된 결과를 검증하기 위하여 3 포트 N 타입 커넥터의 측정결과와 비교하였다. 전향 IM의 측정값은 −123 dBc(at 43 dBm)로 계산결과와 비교하여 최대 약 2.5 dB의 차이를 보이며, 후향 IM의 측정값은 평균 −130 dBc(at 43 dBm)로 계산결과와 최대 약 3 dB의 차이로 전향 및 후향 IM의 계산값과 측정값이 잘 일치하였다. 또한 전향 IM이 후향 IM보다 케이블 길이, 접합부 IM 등의 변화에도 3차 IM 주파수 범위에서 일정한 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 제안한 모델을 사용해 3 포트 RF 수동부품의 전향과 후향 IM을 예측할 수 있고, PIM 저감화를 위한 원인분석 등에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

This paper presents IM model which is produced in 3 port RF passive component. We calculated forward and reflect PIM of 3 port component by using the model. And they are reasonable agreement with measurement result like below. In the case of forward IM, calculated result is −122 dBc(at 43 dBm), which differ 2.5 dB with measurement result. And reflected IM, the average calculated result is −130 dBc(at 43 dBm), which differ 3 dB with measurement result. The results which are calculated and measured under various condition(IM source level, frequency sweep, contour length, etc.) show that forward method gets more fixed result than that of reflect. Consequently, PIM of 3 port component is predicted and analyzed for desensitizing by the proposed model.

Key words : Passive Intermodulation, PIM Model, 3 port, PIM Measurement Method

Ⅰ. 서 론

수동부품의 비선형성으로 인해 발생하는 PIM (passive intermodulation)은 무선통신의 성능을 결정하는 중요한 요인중 하나이다. 일반적으로 통신시스템의 경우 IM(intermodulation)의 값이 −110 dBm을 넘어서면 이 잡음을 신호로 인식하여 에러나 콜 드럽(call drop)을 일으켜 시스템의 성능을 저하시킨다[1]. 특히 GSM 기지국의 경우 송신대역의 IM 주파수가 수신대역에 나타나며 위의 성능저하를 피하기 위해선 −153 dBc(at 43 dBm)의 엄격한 기준이 요구된다. 이와 같은 작은 값은 측정 방법이나 환경, 측정자에 따라서 변화될 수 있다. 그러나 측정전에 DUT의 PIM을 예측할 수 있다면, 신뢰성과 재현성 있는 적절한 측정방법이나 환경을 결정할 수 있다.

현재 RF 수동부품의 IM측정은 전향(forward)과

아주대학교 전자공학부(Div. of Electronics Engineering, Ajou University)
*안산1대학 전자통신과(Dept. of Electornics Communication, Ansan College)
**초당대학교 정보통신공학과(Dept. of Information Communication, Chodang University)
***한국생산기술연구원 산업기술정책연구소(Korea Institute of Industrial Technology Evaluation & Planning)
· 논 문 번 호 : 20030227-036
· 수정완료일자 : 2003년 5월 9일

후향(reflect)의 두 가지 측정법이 있다[2],[4],[8]. 1 포트 부품인 안테나[5]와 2 포트 부품인 케이블-어셈블리[3] 등에 관해서는 각 측정법에 대한 연구와 모델이 있어 전향과 후향 측정법에 대한 특징을 알 수 있고 PIM의 예측이 가능하다. 그러나 3 포트 부품에 관해서는 PIM의 발생 메커니즘을 이론적으로 설명할 수 있는 연구가 수행되지 않아 전향과 후향 측정법에 대한 특징을 알거나 예측이 불가능하다. 그러므로 3 포트 부품의 정확한 PIM을 측정하기 위해선 주파수 변화, 케이블 길이 변화 등에 대해 전향과 후향 측정을 해야 하는 번거로움이 있다.

따라서 본 논문에서는 번거로움과 다측정에서 발생할 수 있는 re-cabling 에러를 없애고 각 측정방법을 비교하기 위해 Summitek Instruments사의 Brad Deats와 Rick Hartman[3]에 의해 정립된 2 포트 케이블-어셈블리의 모델을 바탕으로, 3 포트 부품의 전향 및 후향측정법에 대하여 모델링하였다. 제안한 측정모델을 이용하여 PIM의 원인인 커넥터, 접합부분, 계측기 내부의 IM과 PIM에 영향을 줄 수 있는 IM이 진행하는 경로[7] 등 다양한 조건을 변화하여 IM값을 계산하였다. 계산결과 전향 IM의 값은 여러 조건하에서도 변화가 최대 1 dB의 일정한 값을 가졌으며, 후향 IM의 값은 변화가 최대 25 dB로 일정하지 않았다. 이러한 특징은 측정결과와도 일치하였다. 제안한 모델을 사용해 3 포트 RF 수동부품의 IM을 예측할 수 있고, PIM 저감화를 위한 원인분석 등에 유용하게 사용할 수 있을 것이라 기대된다.

Ⅱ. 3 포트 RF 수동부품의 IM 모델

2-1 3 포트 RF 수동부품의 IM 원인과 측정방법

PIM은 2 tone 이상의 신호가 인가되었을 때, 수동부품의 비선형성에 의해서 혼변조를 일으키는 현상을 말한다. 일반적으로 수동부품의 비선형성은 물질 비선형성(material nonlinearty)과 접촉 비선형성(contact nonlinearity)으로 나눌 수 있다[2],[5]. 물질 비선형성에는 비선형 히스테리시스(hysteresis), 열저항(thermal resistivity), 전송선로의 자기저항(magneto-resistivity) 등이 있고, 접촉 비선형성에는 터널링효과(tunneling effect), 미소방전(microdischarge), 상이(dissimilar)한 금속의 접촉에서 생기는 비선형성 등이 있다. 특히 3-포트부품의 원인으로는 그림 1과 같이 각 포트의 커넥터와 접합부분이 중요한 영향을 끼친다[9]. 그림 1의 port A, B, C는 각 커넥터와 계측기의 연결시 삽입되는 케이블-어셈블리와의 접촉에서 발생하는 비선형성에 의한 PIM이다. Junction은 각 포트가 접합하는 부분에서 발생하는 PIM을 나타낸다. 이밖에도 측정시에는 계측기 내부 또는 계측기와 DUT의 연결을 위한 케이블-어셈블리에서 발생하는 PIM 또한 고려해야 한다.

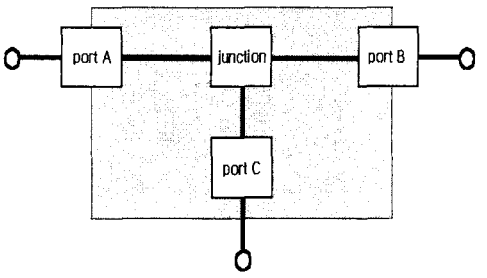
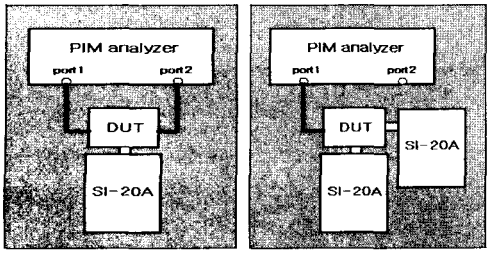


그림 1. 3 포트 RF 수동부품의 IM 원인
Fig. 1. IM source of 3 port RF Passive Component.

3 포트 RF 수동부품의 IM 측정방법은 2 톤 신호의 인가 방법에 따라 pre-combined CW tone 및 individual CW tone 방법으로 나눌 수 있고, 측정경로에 따라 전향과 후향방법으로 나눌 수 있다[8],[9]. 본 논문에서는 전향 및 후향 IM 측정이 용이하고, 계측기 또한 pre-combined CW tone으로 동작하므로 측정결과와 계산값의 비교가 가능한 precombined CW tone 방법을 사용하였다. 측정경로에 따라서 나뉘어지는 전향과 후향측정법은 그림 2와 같이 두가지 방법으로 측정이 가능하다. 그림 2(a)는 계측기 자체만으로 전향 및 후향 IM을 동시에 측정할 수 있어 전향과 후향을 별도로 측정할 때 발생하는 re-cabling에 의한 에러를 제거할 수 있다. 반면 그림 2(b)는 후향 IM만을 측정하기 위한 구조로 계측기에 연결되지 않는 포트는 외부 low IM termination (SI-20A)을 사용하여 종단시킨다. 그림 2(a)에서 사용하는 termination의 특성이 그림 2(a)에서 사용하는 내부 termination 보다 좋기 때문에 정확도와 민감성에서 더 좋은 특성을 갖는다. 측정에서는 신뢰성 있는 측정방법을 알아보기 위해 re-cabling 에러를 줄일 수 있는 그림 2(a)의 방법을 사용하였다.



(a) (b)

그림 2. 3 포트 RF 수동부품의 IM 측정방법
(a) 전향 및 후향 측정방법
(b) 후향 측정방법

Fig. 2. PIM measurement method of 3 port RF passive component.
(a) forward and reflect IM measurement method
(b) reflect only IM measurement method

2-2 3 포트 RF 수동부품의 IM 모델

그림 3은 그림 2(a) 측정방법에 대한 모델을 나타낸다. 중앙의 어두운 도형은 3 포트 DUT이다. 앞에서 살펴본 바와 같이 RF 수동부품의 IM 원인은 다양하지만, 가장 주요한 영향을 미치는 요소만 모델링에 적용하였다. 모두 6개의 요소를 고려할 수 있는데 다음과 같다. 각 포트의 커넥터 연결부위(DUT port a, b, c)의 3개와 접합면(J)의 한 개 그리고 계측기 내부에서 발생하는 IM(IM test port 1, 2)의 2개이다. 각 부분의 PIM은 아래와 같이 나타낼 수 있다. DUT 포트 a의 커넥터에서 발생하는 PIM을 σ_a라 놓으면, 커넥터에서 발생된 PIM 신호는 식 (1)처럼 표현한다[3].

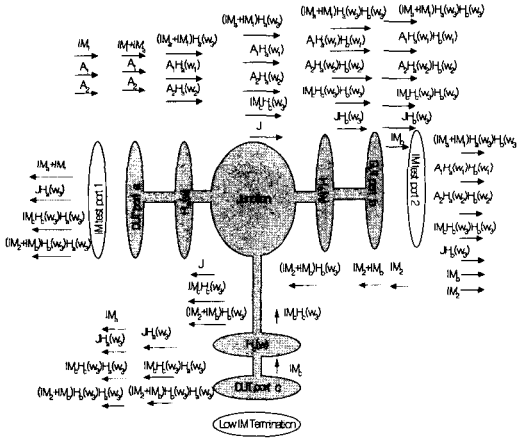


그림 3. 3 포트 RF 수동부품의 IM 모델
Fig. 3. Model of 3 port RF passive IM.

$$IM_a = \sigma_a e^{j(2w_1 - w_2)t} = \sigma_a e^{jw_3 t} \quad (1)$$

여기서 $\sigma_a = 10^{dBc/20}$이고, w_3은 3차 IM 주파수이다. 계측기 내부(IM_1)에서 생성되는 PIM을 같은 방법으로 정리하면 식 (2)와 같다.

$$IM_1 = \sigma_1 e^{j(2w_1 - w_2)t} = \sigma_1 e^{jw_3 t} \quad (2)$$

접합면(J), DUT 포트 b의 커넥터(IM_b), 계측기 내부(IM_2) 그리고 Low IM termination되어 있는 포트 c에서 발생하는 PIM 신호(IM_c)는 입력 A_1과 A_2가 각 포트와 접합간의 전달특성 $H_a(w)$, $H_b(w)$, $H_c(w)$을 지난 후에 발생하기 때문에 표현식이 복잡하다. 전달특성은 손실과 군지연의 특성을 가지고 있으므로 각각 식 (3), (4), (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$H_a(w) = |H_a(w)| e^{-j\beta_a L_a} \quad (3)$$

$$H_b(w) = |H_b(w)| e^{-j\beta_b L_b} \quad (4)$$

$$H_c(w) = |H_c(w)| e^{-j\beta_c L_c} \quad (5)$$

여기서 β_a, β_b, β_c 및 L_a, L_b, L_c는 접합면과 각 포트 a, b, c간의 전파상수와 물리적 길이이다. 위 식을 이용하여 접합면(J), DUT 포트 b, c의 커넥터(IM_b, IM_c)와 계측기 내부(IM_2)에서 발생하는 PIM 신호를 표현하면 다음과 같다.

$$J = \sigma_j H_a(w_3) e^{jw_3 t} \quad (6)$$

$$IM_b = \sigma_b H_a(w_3) H_b(w_3) e^{jw_3 t} \quad (7)$$

$$IM_2 = \sigma_2 H_a(w_3) H_b(w_3) e^{jw_3 t} \quad (8)$$

$$IM_c = \sigma_c H_a(w_3) H_c(w_3) e^{jw_3 t} \quad (9)$$

Ⅲ. 3 포트 RF 수동부품의 IM 계산

RF부품의 PIM은 각 부분에서 발생하는 PIM의 합으로 이루어지므로 전체적인 PIM은 식 (1), (2)와 식 (6)~(9)를 합치면 된다. 전향측정법은 포트 1에서 입력을 인가하고 포트 2에서 IM 신호를 측정하므로 그림 3의 IM test port 2에서 얻을 수 있고 후향측정법은 포트 1에서 입력을 인가하고 되돌아오는 IM 신호를 다시 포트 1에서 측정하므로 IM test

port 1에서 얻을 수 있다. 그림 3에서 살펴보면 모델의 위쪽으로 이어지는 화살표는 전향 IM 신호들이고 최종적으로 IM test port 2의 오른쪽 화살표들의 합이 전향 IM이 된다. 아래쪽의 화살표는 후향 IM 신호들로써 최종적으로 IM test port 1의 왼쪽 화살표들의 합이 후향 IM이 된다. 모델의 오른쪽 IM test port 2에서 얻어지는 신호들 중에서 전향 IM은 3차 IM 주파수의 함수인 $H(w_3)$을 포함하는 항이므로 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

전향 $IM(port\ 2)$

$$
\begin{aligned}
&= (IM_1 + IM_a)H_a(w_3)H_b(w_3) + JH_b(w_3) \\
&\quad + IM_cH_c(w_3)H_b(w_3) + IM_b + IM_2 \\
&= (\sigma_1 + \sigma_a)H_a(w_3)H_b(w_3)e^{jw_3t} + \sigma_jH_a(w_3)e^{jw_3t}H_b(w_3) \\
&\quad + \sigma_cH_a(w_3)H_c(w_3)e^{jw_3t}H_c(w_3)H_b(w_3) \\
&\quad + (\sigma_b + \sigma_2)H_a(w_3)H_b(w_3)e^{jw_3t} \\
&= e^{jw_3t}H_a(w_3)H_b(w_3)[\sigma_1 + \sigma_a + \sigma_j + \sigma_b + \sigma_2 + \sigma_cH_c^2] \quad (10)
\end{aligned}
$$

또한 모델의 왼쪽 IM test port 1에서 얻어지는 신호들 중에서 후향 IM은 3차 IM 주파수의 함수인 $H(w_3)$을 포함하는 항이므로 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

후향 $IM(port\ 1)$

$$
\begin{aligned}
&= IM_1 + IM_a + JH_a(w_3) + IM_cH_c(w_3)H_a(w_3) \\
&\quad + (IM_2 + IM_b)H_b(w_3)H_a(w_3) \\
&= \sigma_1e^{jw_3t} + \sigma_ae^{jw_3t} + \sigma_jH_a(w_3)e^{jw_3t}H_a(w_3) \\
&\quad + \sigma_cH_a(w_3)H_c(w_3)H_a(w_3)e^{jw_3t}H_c(w_3) \\
&\quad + \{(\sigma_2H_a(w_3)H_b(w_3)e^{jw_3t} + \sigma_bH_a(w_3)H_b(w_3)e^{jw_3t})\} \cdot \\
&\quad H_b(w_3)H_a(w_3) \\
&= e^{jw_3t}[\sigma_1 + \sigma_a + \sigma_jH_a^2(w_3) + \sigma_cH_a^2(w_3)H_c^2(w_3) \\
&\quad + \{\sigma_2 + \sigma_b\}H_a^2(w_3)H_b^2(w_3)] \quad (11)
\end{aligned}
$$

앞의 식 (10)과 (11)을 이용하여 3 포트 수동부품의 전향 및 후향으로 측정되어지는 IM을 다음의 조건하에 MATLAB®[10]을 사용하여 계산하였다. 식 (3), (4), (5)에서 L_a와 L_b의 길이는 1.05 m이고, L_c는 0.4 m이다. 두 개의 입력신호 A_1과 A_2는 크기가 각각 20 W(43 dBm)이고 주파수는 f_1을 1805 MHz에 고정시키고 f_2를 1830~1880 MHz로 1 MHz씩 변화시켰다. 이때 IM3(3차 IM) 주파수는 $2\times f_1\text{-}f_2$가 되어 1730~1880 MHz가 된다. σ_a, σ_b, σ_c, σ_1, σ_2의 값은 각각 −160 dBc이다. 접합면과 각 포트간의 전달특성 $H_a(w)$, $H_b(w)$, $H_c(w)$는 손실이 없고 군지연만이 있다고 가정하면 $H_a(w) = e^{-j\beta_aL_a}$, $H_b(w) = e^{-j\beta_bL_b}$, $H_c(w) = e^{-j\beta_cL_c}$이다. 그림 4와 그림 5는 접합에서 발생하는 IM(σ_j)를 −160~−120 dBc까지 변화시켰을 때 전향 및 후향 측정법에 의해 얻어지는 값을 계산한 것이다. 전향측정법의 계산결과 IM 값은 IM3 주파수 전대역에 걸쳐 큰 변화가 없다. 하지만 후향측정법의 계산결과는 σ_j의 값이 −140 dBc보다 낮을 때 전체 IM값이 일정하지 않았다. 또한 1758~1780 MHz에서는 σ_j값과 전체 IM값이 비례하지 않는 부분도 발생하였다. 이 결과 전향측정법이 후향측정법에 비해서 주파수 변화에 대하여 전체 IM값의 변화가 적어 신뢰성이 있다는 것을 알 수 있다. 이런 현상의 원인은 식 (10)과 식 (11)을 살펴보면 알 수 있다. 전향 IM을 나타내는 식 (10)의 마지막 결과식 $e^{jw_3t}H_a(w_3)\ H_b(w_3) \cdot [\sigma_1 + \sigma_a + \sigma_j + \sigma_b + \sigma_2 + \sigma_cH_c^2(w_3)]$에서 $\sigma_cH_c^2(w_3)$항을 제외한 모든 PIM들은 IM test port 2에 동일한 위상으로 도달하게 된다. 주파수에 대하여 독립적임을 뜻한다. 그러나 후향 IM을 나타내는 식 (11)은 각 PIM들의 위상 차의 합으로 이루어진다. 이는 주파수의 영향을 많이 받는다는 것을 말한다. 이와 같은 이유로 주파수 변화에 대하여 전향 IM은 큰 변화 없이 일정한 값을 갖고 후향 IM은 변화가 큰 값을 갖는다. 물리적으로 살펴보면 다음과 같다. Test port 2에서 측정되는 전향

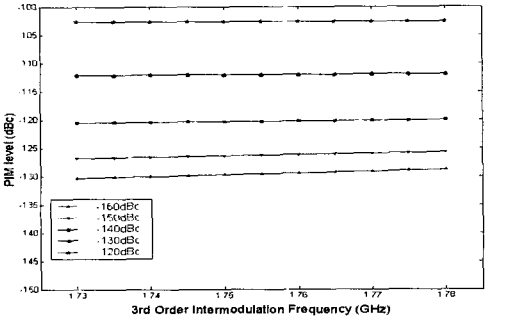


그림 4. 접합 IM 변화에 대한 전향 IM 계산
Fig. 4. Calculation results of forward IM depending on junction IM.

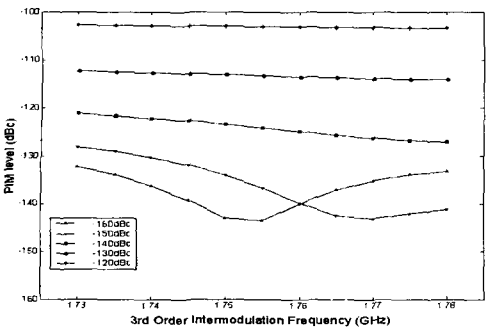


그림 5. 접합 IM 변화에 대한 후향 IM 계산
Fig. 5. Calculation results of reflect IM depending on junction IM.

IM은 발생한 각 PIM들이 동일한 방향으로 진행되기 때문에 같거나 비슷한 위상을 갖게 된다. 하지만 후향 IM은 test port 1으로 경로의 지연없이 측정되는 포트 a에서 발생한 IM과 포트 b나 c로 갔다가 돌아오는 지연된 PIM이 합쳐지기 때문에 다양한 위상들의 합이 되어 주파수의 함수가 되는 것이다. 이러한 이론은 다음에 나올 경로의 길이 변화에 대한 전향 및 후향 IM의 차이에 대해서도 설명이 가능하다.

그림 6은 접합과 각 포트간의 길이변화에 대해, 전향 및 후향측정법에 대한 계산결과이다. 이 때 σ_a, σ_b, σ_c, σ_1, σ_2, σ_j의 값을 -160 dBc이고, L_a, L_b의 길이는 1.05 m, L_c를 0.1~0.3 m로 변화하였다. 그 결과 전향측정법의 IM값은 약 1 dB 이하의 변화를 보였으나 후향측정법에 의한 IM 값은 최대 25 dB 이상의 변화를 보였다. 전향 측정법을 적용할 때

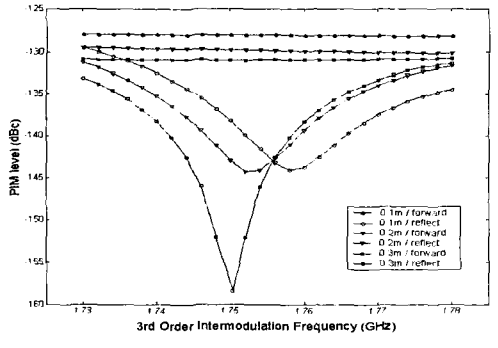
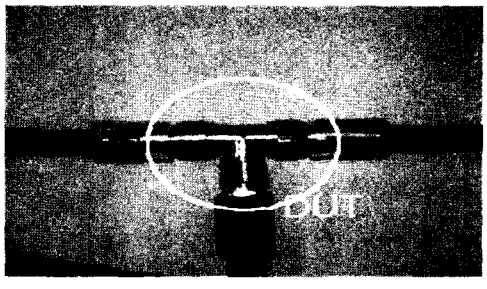


그림 6. 접합면과 포트간 길이(L_c) 변화에 대한 전향 및 후향 IM 계산
Fig. 6. Calculation results of forward and reflect IM depending on L_c.

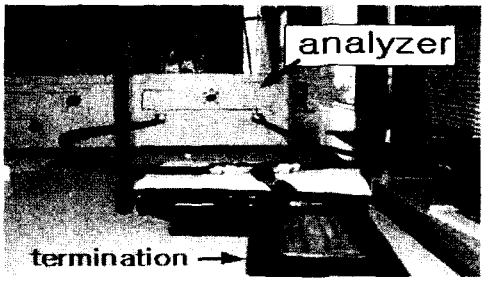
는 DUT에 연결하는 케이블-어셈블리 길이의 변화에 대해서도 신뢰성이 있는 IM값을 갖는다는 것을 알 수 있다.

Ⅳ. 3 포트 RF 수동부품의 IM 측정 및 결과 분석

전향과 후향측정법에 대한 모델의 타당성을 검증하기 위하여 N타입 3 포트 커넥터에 대하여 PIM을 측정하였다. 측정은 1805~1880 MHz의 송신대역과 710~1785 MHz의 수신대역을 갖는 SI-1800A PIM 분석기를 이용하였다. 입력전력은 계산시와 동일하게 각각 20 W(43 dBm)이고, 주파수는 f_1을 1805 MHz에 고정시키고 f_2를 1830~1880 MHz로 400 kHz씩 변화시켜 IM3 주파수를 1730~1880 MHz가 되게 하였다. 이때 사용된 케이블의 길이는 L_a, L_b는 1.05 m, L_c는 0.4 m이다. 그림 7은 측정에 사용된 N타입 3 포트 커넥터의 사진과 측정셋업이다. 그림 8은 계산된 결과와 측정된 결과를 비교한 그래프이



(a) 3 포트 DUT
(a) 3 port DUT



(b) PIM 측정셋업
(b) PIM measurement setup

그림 7. 측정에 사용된 N타입 3포트 커넥터와 PIM 측정셋업
Fig. 7. DUT and measurement setup of PIM.

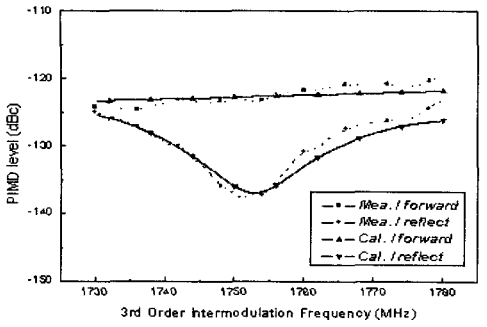


그림 8. PIM 측정 및 계산결과
Fig. 8. PIM measured and calculated results.

다. 두 결과가 약간의 오차는 있지만 전체적으로 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 이때 오차는 다음의 세 가지 요인에서 나타난 것으로 생각된다. 첫째, 커넥터와 계측기 내부, 접합에서 발생하는 PIM을 계산시에 모두 동일한 값으로 가정하였다. 실제의 경우 모든 PIM이 같지 않다. 둘째, 접합과 각 포트간의 전달특성은 손실이 없다고 가정한 것이다. 셋째는 측정시 커넥터와 계측기 사이에는 N과 DIN 타입 커넥터를 연결하기 위한 어뎁터가 삽입되는데 모델링에서는 이 길이를 고려하지 않았다. 앞의 계산된 결과에서도 알 수 있듯이 전향측정값은 주파수 전대역에 걸쳐 큰 변화가 없었다. 그러나 후향측정값은 1753 MHz 근처에서 값이 낮아지며 큰 변화를 보였다. L_c를 0.03 m로 바꾸어 측정했을 때에는 낮아지는 주파수가 1760 MHz 근처로 바뀌었지만 전체적으로 그림 8과 같은 경향을 보였다.

V. 결 론

본 논문에서는 3 포트 수동부품에서 발생하는 IMD를 계산할 수 있는 모델을 제안하였다. 제안한 모델을 사용하여 3 포트 수동부품의 IM을 측정하는 방법인 전향과 후향 두 가지 방법에 대하여 PIM을 계산하였다. 제안한 측정모델의 타당성을 알아보기 위해 N타입 3 포트 커넥터의 전향 및 후향 IM의 측정결과와 비교하였다. 전향측정값은 −123 dBc(at 43 dBm)이고 최대 약 2.5 dB의 오차가 있고, 후향측정값은 평균 −130 dBc(at 43 dBm)이고 최대 약 3 dB의 오차가 있어 두 값이 거의 일치함을 보였다. 모델을 통해 다음과 같은 전향과 후향 IM에 대한 특징을 알 수 있었다. 전향측정법은 부품 내부에서 발생하는 PIM의 크기에 비례하여 전체 IM값이 결정되고 전대역에 걸쳐 일정한 값을 유지하였다. 후향측정법은 PIM 발생이 일정값보다 낮으면 특정주파수대에서 부품에서 발생하는 PIM과 비례하지 않는 값이 나타났다. 또한 전향측정법은 경로의 길이 변화에 대해서도 후향측정법보다 일정한 값을 나타냈다. 이러한 결과들을 종합할 때 3 포트 RF 수동부품의 IM측정시 전향측정법을 쓴다면 신뢰성있고 재현성 있는 값을 얻을 수 있을 것이다. 제안한 모델을 사용하여 전향과 후향 각 측정방법의 특징을 알 수 있고, 주파수 변화, 케이블길이 등 측정환경변화시 3 포트 RF 부품의 PIM을 예측할 수 있고, PIM 저감화를 위한 원인분석에 유용하게 사용할 수 있으리라 예상된다.

참 고 문 헌

[1] V. Golikov, S. Hienonen and P. Vainikainen, "Passive intermodulation distortion measurements in mobile communication antennas", *IEEE 54th. Vehicular Technology Conference*, vol. 4, pp. 2623-2625, 2001.

[2] M. Bayrak, F. A. Benson, "Intermodulation products from nonlinearities in transmission lines and connecotrs at microwave frequencies", *Proc. IEE*, pp. 361-367, 1975.

[3] B. Deats, R. Hartman, "Measuring the passive-IM performance of RF cable assemblies", *Microwave & RF*, pp. 108-114, Mar. 1997.

[4] V. Golikov, S. Hienonen and P. Vainikainen, "Passive intermodulation distortion measurements in mobile communication antennas", *54th Vehicular Technology Conf. IEEE*, pp. 2623-2625, fall 2001.

[5] 김진태, 조인귀, 정명영, 최태구, "전자파 무반사실에서의 안테나 PIM 측정에 관한 연구", 한국전자파학회논문지, 12(7), pp. 1167-1174, 2001년 12월.

[6] B. G. M. Helme, "Passive Intermodulation of ICT components", *IEE colloquium on Screening Effectiveness Measurements*, pp. 1/1-1/8, 1998.

[7] M. B. Amin, F. A. Benson, "Nonlinear effects in coaxial cables at microwave frequencies", *Electorinics letters*, vol. 13, no. 25, Dec. 1977.

[8] B. Rosenberger, "The measurement of intermodulation products on passive components and transmission lines", *IEEE MTT-S Symposium on Technologies for Wireless Application Digest.*, pp. 57-62, Feb. 1999.

[9] *Application note #1900-1,* Summitek Instruments, Inc. 1997.

[10] *Matlab version 6.0.0.88 Release 12,* The MathWork, Inc., Sep. 22 2000.

차 영 찬

2001년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2001년 8월~현재: 아주대학교 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] RF 능·수동소자 및 시스템 설계

이 진 택

1997년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2002년 8월: 아주대학교 전파공학과 (공학석사)
2002년 8월~현재: 아주대학교 전자공학과 박사과정
[주 관심분야] RF 능·수동소자 및 시스템 설계

양 기 덕

1982년 2월: 인하대학교 전자공학과 (공학사)
1993년 6월: 미 Polytechnic Univ. 전기전자공학과 (공학석사)
1998년 8월: 아주대학교 전자공학과 (공학박사)
1997년 9월~현재: 안산1대학 전자통신과 교수
[주 관심분야] 이동 및 위성통신 부품 개발, 초고주파 통신 부품 수치해석

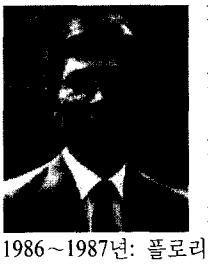
조 영 송

1988년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
1995년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학박사)
1995년 3월~현재: 초당대학교 정보통신공학과 교수
[주 관심분야] 마이크로파 회로 및 소자 모델링

김 상 태

1985년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
1984년 12월~1985년 8월: 대우중공업(주) 연구소
1987년 8월: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
2001년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학박사)
1991년 3월~현재: 한국생산기술연구원 산업기술정책연구소 선임연구원
[주 관심분야] 이동통신 및 위성통신 부품설계, MMIC 및 부품모델링, 수치해석

신 철 재



1964년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1968년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1983년 3월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1970~1977년: 광운대학교 조교수
1986~1987년: 플로리다대학교 방문교수
1977년~현재: 아주대학교 전자공학부 교수
[주 관심분야] 안테나설계 및 해석, EMI/EMC, 초고주파 통신부품개발, 전파전파