

RF MEMS 스위치를 이용한 위상 천이기 기술 동향

김광용 · 이상노 ·
육종관

연세대학교
전기전자공학부

요 약

현대의 레이더나 통신 시스템에 있어 위상 배열 안테나는 필수 구성요소이고 이러한 위상 배열 안테나에는 수 천개의 독립적인 위상제어기가 사용되어지고 있다. 따라서 대량생산이 가능하면서도 성능이 우수한 저손실, 저가격의 True-Time Delay (TTD)를 지원하는 위상천이기가 크게 요구되고 있는 실정이다. 최근 몇 년 동안 MEMS 공정을 이용한 저손실 RF 스위칭 소자와 가변 캐패시터가 성공적으로 개발되었으며 이러한 저손실의 MEMS 스위칭 소자를 이용한 위상천이기 구현이 가능하게 되었다.

본 논문에서는 크기나 전력소모, 삽입손실 등에서 우수한 고주파 특성을 갖는 RF MEMS (Micro-Electro Mechanical System) 스위치에 대해서 간략히 언급하고 이를 이용한 위상 천이기와 기존의 위상천이기를 비교 분석하였다.

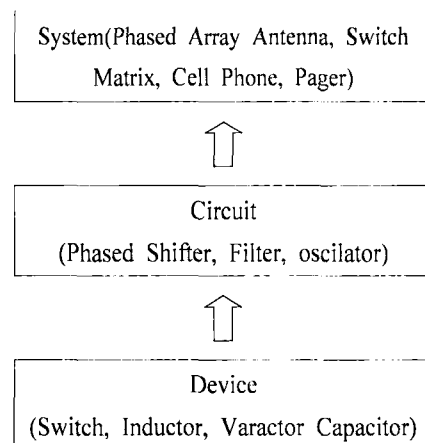
I. 서 론

위상천이기는 1947년 Fox^[1]에 의해 "Rot-ary vane adjustable waveguide phase changer"가 제안된 이후로 1957년에 Reggia-Spencer^[2]에 의해 최초로 전자적으로 위상을 조절할 수 있는 페라이트 위상천이기가 보고되었다. 1960년대 중반, 위상천이 제어를 위한 전자 스위치로 p-i-n 다이오드를 사용하게 되었으며, MMIC(Monolithic microwave integrated circuit)

기술이 출현함에 따라, 전자 제어 소자로서 MESFET과 바랙터를 사용한 MMIC 위상천이기가 가능하게 되었다. 여기에 안테나와 고주파 GaAs 기술의 발전은 완전한 Monolithic 위상천이기 모듈의 개발에 있어서 새로운 도전의 장을 열게 하였다. 1970년대와 1980년대에 위상천이기 기술은 최고의 정점에 달했지만 소형화와 유용성에 대한 연구는 계속 진행되어 왔다.

1990년대에 들어서 RF/Microwave 시스템은 향상된 기능을 가진 소형화, 경량화, 저전력, 저가격, 소자의 집적화 등의 필요조건 때문에 RF/Microwave 시스템에 대한 새로운 MEMS 소자의 기술 개발로 자연스럽게 진행되었다.

RF와 무선통신 응용에 대한 MEMS 기술은 집적화된 RF 소자에 나타난 한계를 극복할 수 있게 하



[그림 1] RF MEMS의 적용 모식도

였고, MEMS 소자를 이용한 새로운 시스템으로의 재구성이 가능하게 되어 성능향상을 기대할 수 있게 되었다.

[그림 1]은 RF MEMS 기술의 단계별 적용 모식도이다^[3].

II. MEMS 위상천이기 기술동향

2-1 MEMS 위상천이기 개요 및 분류

위상천이기는 RF 신호의 위상을 변화 시키는 2 단자 소자이다. 현재 사용되고 있는 대부분의 위상천이기는 페라이트 위상천이거나 또는 반도체 소자(pHEMT, MESFET, Varactor diode) 위상천이기이다. 오늘날 전자 가변 위상천이기는 통신과 측정장비를 포함하는 다양한 시스템에서 사용되고 있고, 위상배열 레이다에 유용하다는 사실이 밝혀짐에 따라 개발이 가속화되고 있다.

전자 가변 위상천이기는 구현방법에 따라 반도체 소자를 응용한 위상천이기, MEMS 기술을 이용한 위상천이기 등으로 구분할 수 있다.

첫째, 반도체 소자를 응용한 위상천이기로는 switched line type, loaded-line type, branch-line type, high-pass/low-pass type 등의 구조가 있다. 이러한 소자들은 MEMS를 이용한 위상천이기에 비해 비교적 손실이 큰 스위치로서, 가장 좋은 성능을 나타내는 pHEMT 스위치를 사용한 Ka-band 4비트 위상천이기의 경우 평균적으로 6.5 dB의 삽입손실을 갖는다^[4].

반도체 소자를 사용한 위상천이기는 스위칭 타임이 $1\mu s$ 이하이며, 전형적인 성능지수는 1 GHz에서 144 o/dB, 12 GHz에서 211 o/dB, 16~18 GHz에서 86 o/dB, 60 GHz에서 60 o/dB, 그리고 94 GHz에서 41 o/dB이다^[5].

p-i-n 다이오드나 varactor 다이오드를 이용한 하

이브리드 구조는 1~10 GHz대역에서 1 kW까지의 RF 전력을 처리하고, Monolithic 소자들은 수 mW에서 1 W 정도의 RF 전력을 처리하고 있으며, 주파수는 100 GHz까지 사용되고 있다.

둘째, MEMS 기술을 이용한 위상천이기는 소형이고 무게가 가벼우며, 가격도 싸고, 손실이 적다. 그리고 정전기적으로 동작하므로, 시스템 레벨에서 DC 전류가 필요 없어 전력소모를 최소화 할 수 있다. 한 예로, 기존의 스위치에 비하여 손실과 기생성분이 적고 높은 선형성을 갖는 RF MEMS 캐패시티브 스위치를 이용한 Ka-band용 3비트 및 4비트 위상천이기가 Resonant-switched 전송선로 마이크로스트립 구조를 사용하여 제작되었다^[6]. 4비트 위상천이기의 경우 22.5°씩 0°에서 337.5° 까지, 3비트 위상천이기의 경우 45°씩 0°에서 315°까지의 위상천이가 가능하며 4비트 위상천이기의 경우 1.4 dB, 3비트 위상천이기의 경우 1.7 dB의 삽입손실을 보인다.

또 다른 예로, 단일 아날로그 제어 전압에 의해 MEMS 브릿지의 높이를 변화시킴으로써 위상속도를 변화시키는 Distributed MEMS capacitor를 사용한 True-time Delay(TTD) 위상천이기가 개발되었다^[7]. 스위치의 특성은 21~60 GHz에서 40 dB 이상의 높은 격리도를 가지며, 60 GHz에서 2 dB loss/118°, 40 GHz에서 1.8 dB loss/84°의 손실/위상천이를 보였다. 다중비트 위상천이기를 구현하기 위해 MEMS 스위치를 사용하면, 수 천개의 위상천이기가 부착된 위상배열 안테나의 가격과 무게를 줄일 수 있고, Si-CMOS 공정과 멤브레인 스위치 공정의 호환성으로 인하여 다른 RF 소자와의 집적화가 가능하다.

2차원 전자 주사안테나(2-D Electronically Scanned Antenna)는 방사개구면의 각각에서 위상천이기를 필요로 한다. 이러한 위상천이기는 RF손실을 최소화 하기 위하여 증폭기 앞단에 위치하도록 하는

능동 ESA(Active Electronically Scanned Array)와 손실은 발생하지만 설계를 간단히 하기위해서 증폭기 뒤에 위치하는 수동 ESA (Passive ESA) 로 구분할 수 있다^[8].

첫째 능동 ESA에는 GaAs 위상천이기와 FET 위상천이기가 있다. GaAs 위상천이기는 RF 손실이 없지만, 각 소자에서 상당한 무게와 가격이 비싼 송수신 모듈을 필요로 하며, SBR (Space Based Radar) 시스템의 경우 더욱 많은 소자를 필요로 한다. FET 위상천이기는 적은 전력으로 구동이 가능하나, 높은 손실을 가지게 되어 높은 이득과 전력을 가지는 LNA가 필요하다.

둘째로, 수동 ESA에는 페라이트, p-i-n 다이오드 또는 MEMS의 세가지 방법이 있다.

페라이트 위상천이기는 최소의 RF 손실을 가지지만 가격이 비싸고 무겁다. p-i-n 다이오드 위상천이기는 RF 손실이 가장 높지만 크기가 적고, 무게가 가벼우며 가격이 낮다. 그러나 위상천이기가 동작하기 위해서는 높은 전력을 필요로 한다.

이에 비하여 MEMS 위상천이기는 초소형, 초경량, 저가격 및 낮은 RF 손실 발생으로 수동 ESA 응용에 가장 적합한 대안으로 떠오르고 있다.

또한 MEMS 위상천이기는 정전기적으로 동작하기 때문에, 시스템 레벨에서 DC 전류의 소모가 거의 없으므로 전력소모를 최소화 할 수 있다. <표 1>에 능동 및 수동 ESA에 대한 4비트 위상천이기의 손실, 가격, 그리고 특성을 나타내었다^[8].

2-2 MEMS 스위치 기술

최초의 MEMS 스위치는 electrostatically actuate cantilever 스위치로써, 저주파의 전기적인 신호를 스위칭하기 위하여 소개되었다^[9]. 그 이후로 MEMS 스위치는 cantilever^[10], rotary^[11], membrane^[12] 구조를 사용하여 마이크로파 주파수에서도 삽입손실이 적고 격리도가 높을 뿐 아니라, 높은 신뢰성을 보장하고 고전력을 핸들링할 수 있게 되었다.

최근에는 MEMS 스위치가 Capacitive shunt switch, Resistive series switch, 그리고 Distributed MEMS transmission lines (DMTL) 등이 제작되었다.

capacitive membrane shunt switch는 cantilever series switch보다 스위칭 시간이 빠르고 낮은 동작 전압을 가진다. 주파수에 대한 성능은 series switches가 낮은 주파수에서 더 좋은 이득 특성을 보이며, 멤브레인 스위치는 높은 주파수에서 더 좋은 성능을 보인다.

MEMS 스위치의 주요 특징으로는 혼변조 왜곡을 무시할 수 있고 잠재적으로는 CMOS와의 집적화가 가능하게 되어 무게를 줄일 수 있고 패키징과의 상호연결을 통하여 기생성분을 최소화 할 수 있다. MEMS 스위치는 연속적인 DC 전류를 필요로 하지 않으므로 매우 낮은 전력소모를 갖고 1 W 정도의 전력에서도 사용이 가능하다. 이 정도의 전력은 빔 조정에 사용된 위상 천이기를 충분히 제어할 수 있는 전력이다.

<표 1> 능동 및 수동 ESA에 대한 특성비교

	Loss(dB)	Cost(\$)	Advantage	Disadvantage
AESA(GaAs)	0.0	40	Lowest RF losses	High cost
Ferrite	0.5	75	Low loss	High cost, Weight thermal control
Diode	3.0	40	Known technology	High loss, Operating power, Thermal control
MEMS	2.0	2	Low cost, Light weight	New technology, Moderate loss, Switching time

MEMS 스위치의 RF 손실은 40 GHz 에서 0.1~1 dB, 풀-인 전압은 10~50 V, 스위칭 속도는 대략 4 μ s 정도의 성능을 갖도록 제작되고 있다. 이러한 MEMS 스위치의 성능으로 레이더나 통신응용에서 동작이 가능한 스위칭 속도가 빠른 저손실의 디지털 위상천이기가 가능하게 되었다.

MEMS 스위치는 위상천이기로서 기능을 하기 위해 능동소자를 필요로 하지 않으므로 기존의 GaAs 위상천이기에 비해 가격이 낮은 고저항성 실리콘 상에 제작되어질 수 있다. 이러한 실리콘 기판위에 MEMS 위상천이기와 함께 제어회로를 집적화 할 수도 있다.

한편 MEMS 스위치의 단점은 30 ns 정도의 스위칭 속도를 갖는 반도체 스위치와 비교할 때 상당히 느린 스위칭 시간 (2~50 μ s)과 높은 동작 전압 (10~60V)이 필요하다는 것이다.

〈표 2〉^[13]에 기존의 반도체 스위치와 MEMS 기술을 이용한 스위치를 비교하여 장단점을 나타내었다.

2-3 MEMS 위상천이기의 개발현황

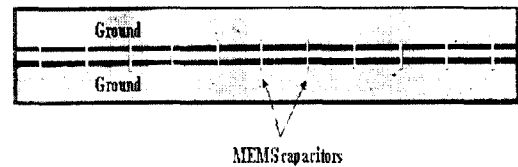
〈표 2〉 반도체 스위치와 MEMS 스위치의 비교

Switching technology	RF signal coupling	Actuation (Volts)	Insertion loss (dB @ Freq)	Isolation (dB @ Freq)
UIUC Approach (Project goal) Hinge	Capacitive/ Resistive	< 5 14~17	0.2 @ 40 GHz 0.25~0.5 @ 20~40 GHz	<30 @ 40 GHz <27 @ 0.25~40 GHz
Solid-state Switches				
PIN diode	Resistive	2	1.0	20
MESFET		2	1.2 @ 40 GHz	17
MEMS Cantilever Switches				
Rockwell	Resistive	28	0.25 @ 40 GHz	25 @ 40 GHz
Univ. of Michigan	Capacitive	14~16	0.2 @ 20 GHz	30 @ 40 GHz
MEMS Membrane Switches				
T.I-Raytheon	Capacitive	30~50	0.8 @ 20 GHz	N.A
MEMS Air Bridge Switches				
T.I-Raytheon	Capacitive	30~50	0.28 @ 35 GHz	25 @ 20 GHz
Univ.of Michigan	Capacitive	15~20	0.9-1.4 @ 20~40 GHz	40~45 @ 20~40 GHz

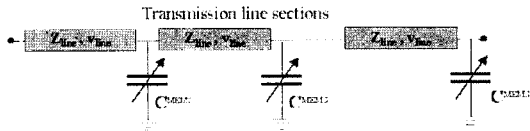
2-3-1 K/Ka-band 1비트 위상천이기

Borgioli^[14]에 의해 제안된 MEMS 스위치의 구조는 MEMS 부하 캐패시터 (down state)의 멤브레인을 snapping down 시킴으로써 위상속도가 변화될 수 있는 synthetic 전송 선로의 개념에 기초하고 있으며, 스위치의 캐패시티브 접촉을 필요로 하지 않기 때문에 제작상의 신뢰성이 높고, Pull-down 전압이 감소될 뿐만 아니라, 높은 capacitive 비(~7.5)를 갖는다.

[그림 2]는 실제 제작된 위상천이기의 사진이다. 제작된 Borgioli 위상천이기는 길이가 8.58 mm인 CPW 전송라인에 11개의 브릿지형 shunt MEMS 캐



[그림 2] 위상천이기의 실제 제작된 사진



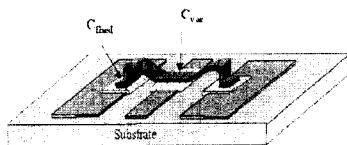
[그림 3] 위상천이기 등가회로

패시터로 구성되었다. MEMS 캐패시터 사이의 간격은 $780 \mu\text{m}$ 이다. [그림 3]은 Borgioli 위상천이기에 대한 등가회로이다.

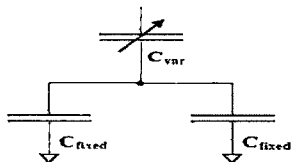
위상천이가 되는 원리는 DC 전압을 인가하면 MEMS 스위치가 up 상태에서 down 상태로 동작하고 이는 부하 캐패시턴스의 증가를 야기한다.

이러한 캐패시턴스 증가로 인하여 위상속도와 특성임피던스가 변하게 된다. 위상속도의 변화는 위상천이를 낳게되고 이 위상천이는 원래의 전송선로의 캐패시턴스와 MEMS 소자의 캐패시티브 비($C_{\text{on}}/C_{\text{off}}$)에 의해 결정된다. [그림 4]는 실제 구현된 단일 MEMS 브리지이다.

MEMS 스위치가 down 상태에서 적은 캐패시턴스 값을 나타내기 위해서 Membrane의 크기를 줄이거나, 중심도체를 코팅함으로써 유전체층의 두께를 증가시키는 방법이 있다. 그러나 [그림 4](a)와 (b)에서 보는 바와 같이 직렬 구성방법을 채택함으로써

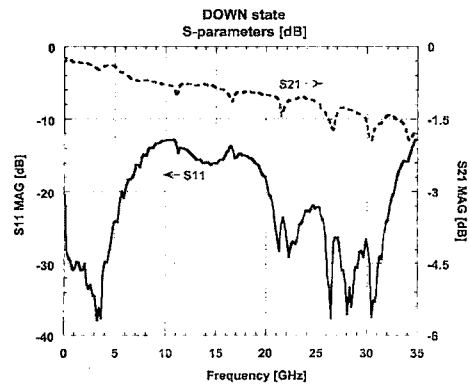
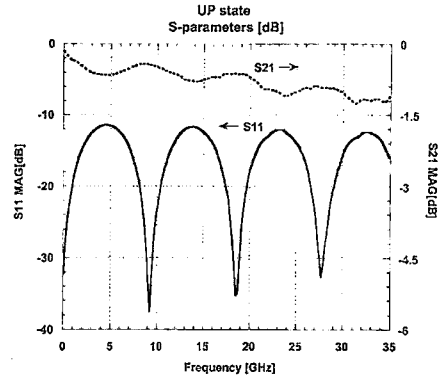


(a) MEMS 스위치의 직렬 구성



(b) MEMS capacitor의 등가회로

[그림 4] 단일 MEMS 브리지



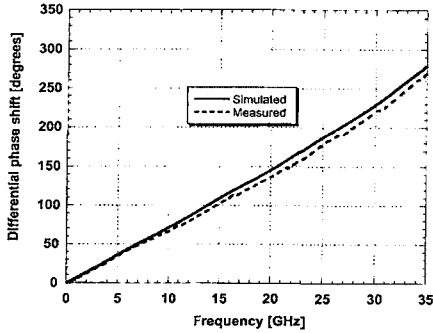
[그림 5] up 상태와 down 상태의 측정치와 이론치

다운상태에서 비교적 낮은 캐패시턴스($<0.1 \text{ pf}$) 값을 얻을 수 있다.

[그림 5]는 MEMS 스위치의 up 상태와 down 상태에서 측정된 삽입손실과 반사손실을 보여준다.

up 상태에서 삽입손실은 25 GHz에서 0.98 dB, 35 GHz에서 1.07 dB이고, down 상태에서의 삽입손실은 25 GHz에서 1.17 dB, 35 GHz에서 1.69 dB를 나타낸다. 반사손실은 두 가지 상태에서 모두 11 dB 이상이다. [그림 6]은 주파수에 따른 위상천이를 보여준다.

측정된 결과는 25 GHz에서 $180^\circ/1.17 \text{ dB}$, 35 GHz에서 $270^\circ/1.69 \text{ dB}$ 의 위상천이/손실을 갖고, 반사손실은 0~35 GHz에서 11 dB보다 더 좋은 지연선로를 가진다.



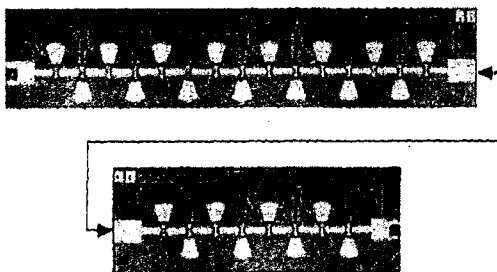
[그림 6] 이론치와 측정치의 주파수에 대한 위상천이

25 GHz에서 154°/dB와 35 GHz에서 160°/dB의 저손실 특성으로 K/Ka 밴드에서 최적의 성능을 발휘하는 다중비트 디지털 MEMS 위상천이기를 구현할 수 있음을 의미한다.

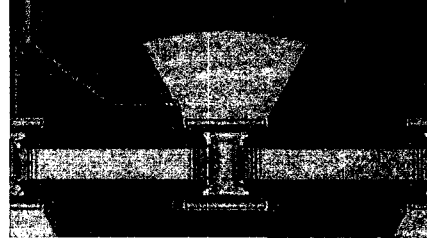
2-3-2 DC-18 GHz용 2비트, 4비트 MEMS 위상천이기

DC에서 18 GHz까지 동작하는 2비트와 4비트 광대역 분포정수 마이크로스트립 위상천이기를 Michigan 대학과 Raytheon에서 제작하였다^[15].

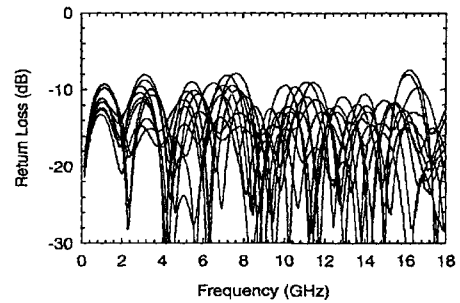
Distributed MEMS Transmission line (DMTL) 위상천이기는 MEMS 브릿지에 의해 capacitively loaded된 130um의 폭을 가진 고임피던스 선로(78 Ω)와 마이크로스트립 방사 스테브로 구성된다.



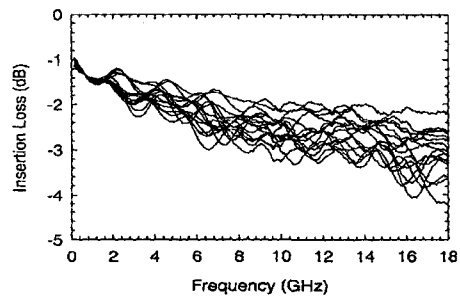
[그림 7] 2비트 분포정수 마이크로스트립 위상천이기. 위는 180°, 아래는 90° 위상천이 부분



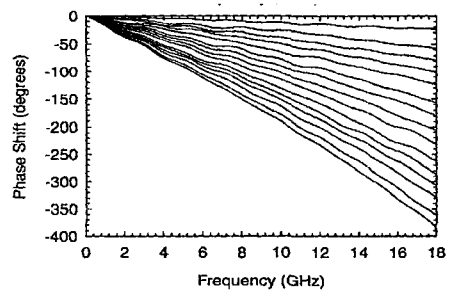
[그림 8] 단일 MEMS 스위치 부분의 사진



(a) 반사 손실



(b) 삽입 손실



(c) 위상천이

[그림 9] 마이크로스트립 4비트 MEMS DMTL 위상천이기 측정 결과

[그림 7]은 제작된 위상천이기의 사진이며, [그림 8]은 위상천이에 사용된 단일 MEMS 스위치의 사진이다. 방사 스텐드는 120 k Ω 의 바이어스 라인을 통하여 전송선로에 연결되어진다.

일반적으로 Bragg 주파수는 최대 위상천이 선형성을 최대화 하기위해 설계주파수의 약 3배 정도로 한다.

그러나 MEMS 스위치의 간격이 Bragg 주파수를 감소시키기 때문에 18 GHz까지 좋은 선형성을 유지하면서, 소형화를 위해 설계 주파수의 1.8배 정도로 선택되어진다.

[그림 9]는 180°, 90°, 45°, 22.5° 부분이 직렬로 구성된 4비트 위상천이기의 측정 결과이다.

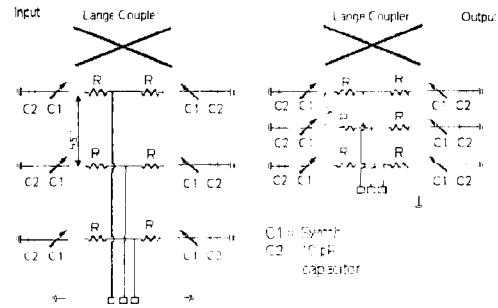
4비트 위상천이기의 경우 16가지 상태에 대한 반사계수는 -9 dB보다 적고, 평균 삽입손실은 16 GHz 에서 -3.0 dB로 나타났으며, 333°의 최대 위상 천이를 얻었다.

2-3-3 X-band 4비트 위상천이기

Raytheon에서는 저손실 RF MEMS 4비트 X-밴드 Monolithic 위상천이기를 21 mil 두께의 고정형성 실리콘에 3 dB-Lange coupler를 사용한 반사 구조를 기반으로 제작하였다^[16].

도체는 4 μ m 두께의 gold를 sputtering 하였다, 스위치들은 ON 상태일 때 3 pF, OFF 상태일 때 35 fF의 캐패시턴스 값을 가진다. 스위칭 시간은 5 μ s 이고, 동작전류가 필요 없어, 전력소모가 매우 적은 특징을 나타낸다. 반사 구조는 초저손실 광대역 성능을 나타내는 Lange coupler를 사용하므로 병렬 스위치만을 필요로 하고 정합회로가 필요 없는 구조이다.

또한 위상천이를 위해서 기존의 스위치 전송선로 설계 길이의 절반만을 사용한다. 이 구조는 작고 광대역 응답특성을 보이며 RF MEMS 스위치 구조에



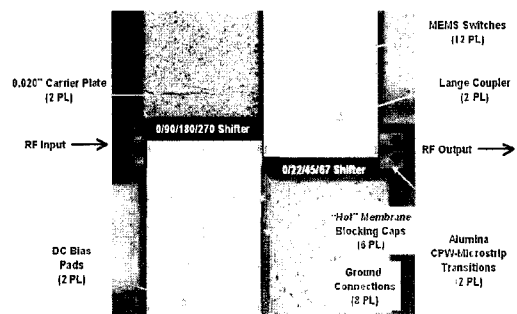
[그림 10] 두 개의 2비트 위상천이기를 이용한 4비트 위상천이기

적합하다.

[그림 10]은 4비트 반사 위상천이기를 보여주고 있다.

회로는 두 개의 2비트 반사 부분으로 구성된다. 첫번째 2비트 부분은 0°, 90°, 180°, 270°의 위상을 천이시키기 위해서 설계된 것이고, 두번째 2비트 부분은 0°, 22.5°, 45°, 67.5°의 위상천이를 위해 설계 되어졌다. 이러한 두 개의 부분은 0°부터 337.5°까지 22.5°의 단계로 4비트 위상천이기를 만든다.

커플러는 설계에 있어서 가장 중요한 부분으로써, 도체 폭과 간격이 알맞은 동작을 위해서 수 마이크로론 내로 제어 되어야만 한다. 그렇지 않으면 부정합 손실이 발생해서 쉽게 0.5 dB의 삽입손실을 보인다.



[그림 11] 4비트 위상천이기 회로 사진

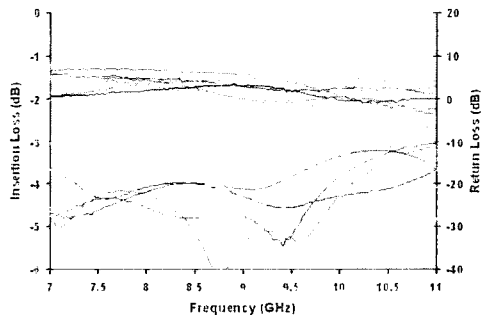
[그림 11]은 실제 구현된 4비트 위상천이기에 대한 사진이다.

[그림 12]와 [그림 13]은 4비트 위상천이기에 대한 삽입손실, 반사손실, 그리고 위상성능을 보여주고 있다.

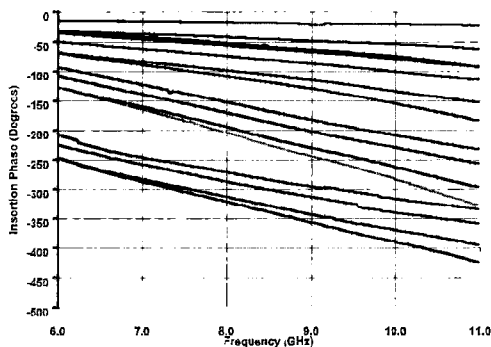
회로의 평균 삽입손실은 8 GHz에서 1.4 dB이고, 반사손실은 모든 16가지 상태에서 11 dB보다 좋다. 이는 X-밴드 위상천이기에 있어서 가장 좋은 성능을 보인 것이다.

2-3-4 Ka-band 4비트 위상천이기

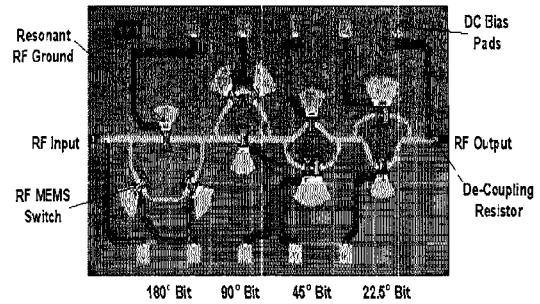
다음은 Raytheon 시스템의 B. Pillans가 제작한 RF MEMS 캐패시티브 스위치를 사용한 저손실 Ka-



[그림 12] 4비트 X-밴드 위상천이기의 삽입손실과 반사손실



[그림 13] 4비트 X-밴드 위상천이기의 위상 성능

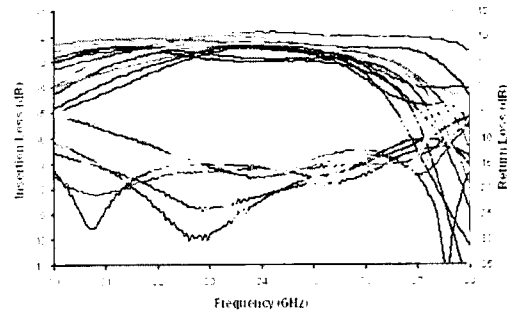


[그림 14] 제작된 4비트 위상천이기

밴드 위상천이기의 응용사례이다¹⁷⁾. 4비트 Ka-밴드 위상천이기는 공진 스위치 마이크로스트립 전송선로 구조로 제작되었으며, RF MEMS 캐패시티브 스위치는 다른 지연 경로사이클을 스위치할 수 있도록 두 개의 1/4 파장 변환기를 형성하기 위하여 사용되었다. [그림 14]는 제작된 4비트 MEMS 위상천이기이다.

이 위상천이기는 스위치 지연선로의 1비트 부분과 저항성 바이어스 회로를 사용하였으며, 회로는 6 mil의 고저항성 실리콘상에 가상의 RF 접지로써 공진 스타터블을 사용한 via가 없는 구조이다. [그림 15]는 측정된 4비트 위상천이기의 삽입손실과 반사손실을 나타내고 있다.

스위칭은 멤브레인과 전송라인에 45 V의 DC 전



[그림 15] 4비트 위상천이기 성능

〈표 3〉 MEMS 위상천이기의 최근 개발 동향

Group/company	Raytheon	Raytheon	UC Santa Barbara and Air Force Research Labs	University of Michigan
Phase Shifter Topology	4-bit distributed reflection-type	4-bit switched line	3-bit distributed loaded line	2-bit distributed loaded-line
Frequency	X-band	Ka-band	K-band	Wideband
Insertion loss at Frequency	1.4 dB average 2.2 dB max. (8 GHz)	1.7 dB average 2.2 dB max. (34 GHz)	1.7 dB average 2.5 dB max. (26 GHz)	about 2 dB not measured (8 ~ 10 GHz)
Return Loss at Frequency	11 dB all states (8 GHz)	15 dB all states (34 GHz)	7 dB all states (26 GHz)	15 dB (120o) (8 ~ 10 GHz)
Switch Type	Capacitive shunt	Capacitive shunt	Capacitive shunt	Capacitive shunt
RF Switch Performance	$C_{on}/C_{off}=100$	$C_{on}/C_{off}=100$	$C_{on}/C_{off}=7.5$	$C_{on}/C_{off}=2$
Actuation Voltage	35 ~ 40 V	45 V	75 V	40 V
Transition Time	5 μ s	3 ~ -6 μ s	N/A	N/A

압을 인가함으로써 이루어졌다. 그리고 34 GHz에서 측정된 4비트 위상천이기의 삽입손실은 1.8 dB에서 2.25 dB까지 변하였고 위상천이는 0°에서 337.5°까지 변하였다. 반사손실은 15 dB보다 좋은 성능을 나타내고 있다.

스위칭 속도는 약 3 ~ 6 μ s이고, 35 GHz에서 전송선로의 손실은 0.7 dB/cm로 측정되었다.

〈표 3〉은 최근에 발표된 MEMS 위상천이기에 대한 주요한 특성을 요약 정리한 것이다.

III. 결 론

위상천이기는 위상배열 안테나에 있어 필수적인 소자이며, 기존의 다이오드나 반도체를 이용한 위상천이기의 경우 다수의 소자를 사용하게 됨으로써 가격이나 크기, 무게 면에서 단점을 가지고 있다. 현재의 위상배열 안테나에서는 p-i-n 다이오드, MES-FET, 페라이트등을 사용하는데 이러한 소자들은 가격이 비싸고, 큰 손실을 야기시키므로, 이로 인해 시스템 설계를 복잡하게 만든다. 최근의 MEMS 기술

은 높은 RF 주파수에서 가격이 낮고, 성능이 우수한 위상배열 안테나를 만들 수 있는 가능성을 제시해 주었다.

MEMS는 20 GHz 이상의 높은 주파수에서도 저손실 (0.1 ~ 0.3 dB), 높은 이격특성, 손실에 비해 큰 위상천이 (70 ~ 90°/dB)와 같은 좋은 성능을 보일 뿐만 아니라, 고전력을 견딜 수 있으며, 낮은 혼변조 왜곡을 갖는 장점을 가지고 있다. 이러한 MEMS 위상천이기는 전력 소모가 적고, 적은 물체를 검출하며, 추적하기 위한 큰 안테나가 요구되어지는 위성 레이더 시스템에 적용되어질 수 있다.

현재 MEMS를 사용한 TTD 위상천이기는 110 GHz까지 비교적 쉽게 설계가 이루어지고 있으며, 심지어는 MEMS 브릿지 사이의 간격을 줄이고 Bragg 주파수를 높임으로써 300 GHz까지 설계가 가능하다. MEMS 브릿지를 이용한 위상천이기는 밀리미터파와 서브밀리미터파 대역에서 매우 낮은 기생성분 인덕턴스와 직렬 저항 때문에 잘 동작할 수 있다. 또한 TTD 위상천이기의 설계는 전기적인 측면과 기계적인 측면 모두를 고려해야 할 뿐만 아

나라, 스위칭 속도, 패키징, RF와 CMOS 소자와의 집적화기술이 더 연구해야 할 부분으로 남아있다.

MEMS 위상천이기는 이러한 단점만 극복된다면, 저렴한 가격과 향상된 성능등의 장점을 이용하여 무선통신 시스템에 있어 새로운 대안으로 자리잡을 것이다.

참고문헌

- [1] A. G. Fox, "An Adjustable Waveguide Phase Changer", *Proc. IRE*, vol. 35, pp. 1489-1498, Dec. 1947.
- [2] F. Reggia, and E. G. Spencer, "A New Technique in Ferrite Phase Shifting for Beam Scanning of Microwave Antennas", *Proc. IRE*, vol. 45, pp. 1510-1517, Nov. 1957.
- [3] Hector J. De Los Santos, "MEMS for RF/Microwave Wireless Applications: The Next Wave Part II", *Microwave Journal*, vol. 44, no. 7, Jul. 2001.
- [4] P. Stenger, M. Sarantos, E. Niehenke, H. Fudem, C. Schwerdt, F. Kuss, D. Strack, G. Hall, and J. Masti, "A miniature, MMIC one Watt W-band solid-state transmitter", *IEEE MTT-S Dig.*, pp. 431-434, 1997.
- [5] S. Weinreb, W. Berk, S. Duncan, and N. Byer, "Monolithic varactor 360° phase shifters for 755-110 GHz", *Int. Semi-Device Conf. Dig.*, Dec. 1993.
- [6] B. Pillans, S. Eshelman, A. Malczewski, and C. Goldsmith, "Ka-Band RF MEMS Phase Shifters", *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 9, no. 12, Dec. 1999.
- [7] N. Scott Barker and Gabriel M. Rebeiz "Distributed MEMS True-Time Delay Phase Shifters and Wide-Band Switches", *IEEE Trans. on MTT*, vol. 46, no. 11, Nov. 1998.
- [8] B. R. Norvell, et al., "MicroElectroM-echanical switch (MEMS) Technology Applied to Electronically Scanned A-rays for Space Based Radar", *IEEE Aerospace Con.*, vol. 3, pp. 239-247. 1999.
- [9] K. E. Peterson, "Micromechanical Membrane Switches on silicon", *IBM Journal of Research and Development*, vol. 23, no. 4, pp. 376-385, Jul. 1979.
- [10] J. J. Yao and M. F. Chang, "A Surface Micromachined Miniature Switch for Telecommunications Applications with Signal Frequencies from DC up to 4 GHz", *Transducers '95*, pp. 384-387, Jun. 1995.
- [11] L. E. Larson, R. H. Hackett, M. A. Melendes, and R. F. Lohr, "Micro-machined Microwave Actuator (MIMAC) Technology-A New Tuning Approach for Microwave Integrated Circuits", *IEEE MTT-S*, pp. 27-30, Jun. 1991.
- [12] C. Goldsmith, T. H. Lin, B. Powers, W, R. Wu, B. Norvell, "Micromechanical Membrane Switches for Microwave Applications," *IEEE MTT-S*, pp. 91-94, May 1995.
- [13] R. Isom, M. Hawkins, J. Richins, S. McEwan, and M. Iskander, "Comparative Evaluation of MEMS and Ferro-electric Technologies in Phase Shifter Design", *IEEE AP- S*, vol. 2, pp. 808-811, 2000.
- [14] Andrea Borgioli, Yu Liu, Amit and S. Nagra, "Low-Loss Distributed MEMS Phase shifter", *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 10, no. 1, Jan. 2000.
- [15] Joseph S. Hayden, Charles L. Goldsmith, and

Gabriel M. Rebeiz, "2 and 4-Bit DC-18GHz Microstrip MEMS Distributed Phase Shifters", *IEEE MTT-S Dig.*, pp. 219-222, 2001.

[16] A. Malczewski, S. Eshelman, B. Pillans, C. L. Goldsmith, "X-Band RF MEMS Phase Shifters for Phased Array Applications" *IEEE Micro-*

wave and Guided Wave Lett., vol. 9, no. 12, Dec. 1999.

[17] B. Pillans, S. Eshelman, A. Malczewski, J. Ehmke, and C. L. Goldsmith "Ka-Band RF MEMS Phase Shifters", *IEEE Microwave and Guided Wave Lett.*, vol. 9, no. 12, Dec. 1999.

≡ 필자소개 ≡

김 광 용



2001년: 광운대학교 전자공학부 (공학사)
 2001년 2월 ~ 현재: 연세대학교 전기 전자
 공학과 석사과정
 [주 관심분야] 초고주파회로 설계

이 상 노



1998년: 고려대학교 전파공학과 (공학사)
 2001년: 광주과학기술원 정보통신공학과 (공
 학석사)
 2001년 2월 ~ 현재: 연세대학교 전기전자
 공학과 박사과정
 [주 관심분야] 초고주파회로 설계

육 중 관



1987년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1989년: 연세대학교 전자공학과 (공학석
 사)
 1998년: University of Michigan 전기전자
 공학과 (공학박사)
 1997년 1월 ~ 1998년 10월: University of
 Michigan Research Fellow
 1998년 11월 ~ 1999년 2월: Qualcomm Inc. Senior Engineer
 1999년 3월 ~ 2000년 2월: 광주과학기술원 조교수
 2000년 3월 ~ 현재: 연세대학교 전기전자공학과 조교수
 [주 관심분야] 마이크로파 구조 해석 및 설계, RF MEMS, 박
 막공진구조