

# 마이크로파 이미징 기반 뇌졸중 진단

## Brain Stroke Detection Based on Microwave Imaging

조 춘 식

Choon Sik Cho

## 요 약

뇌조직으로 흐르는 뇌혈류 이상으로 갑작스럽게 유발되는 국소 신경학적 결손 증상을 통칭하는 뇌졸중은 심장병과 암에 이어 세 번째로 큰 사망원인이며, 골든 타임이 매우 짧기 때문에 초기치료가 매우 중요하며, 접근 가능한 진단기기의 사용이 중요하다. 뇌졸중을 진단할 수 있는 주요 장비로는 CT와 MRI가 있으나, 가격 및 운영 상 지속적으로 검사하기가 어렵고 휴대가 불가능하다. CT는 전리 방사선을 사용하므로 환자에게 해로우며 이는 새로운 기기의 요구로 이어지고 있다. 마이크로파 기반 이미징 기술은 조직 간의 유전율 차이에서 발생하는 전자기파 산란 지도 작성에 기반하여 CT 등을 대체할 의료 영상화 도구로 각광 받고 있다. 마이크로파 이미징은 생체 조직 전체의 조망, 저가격, 휴대 가능성 및 무 방사능 등의 장점을 지니고 있으므로 뇌의 혈액 흐름 이상을 진단하는 훌륭한 기술이 될 수 있고, 뇌졸중을 관리하는 훌륭한 영상화 도구로 사용할 수 있다. 우선 단층영상화기법이 두부 이미징(head imaging)에 적용되어 휴대 가능하고 상대적으로 저가인 영상화 기술로 발전해 오고 있다. 그리고 최근에는 표적에서 반사되어 돌아오는 반사파의 시간 지연을 이용하여 3차원 영상을 만들어내는 방법이 제안되어 홀로그래피 기법을 마이크로파 방식에 적용하기 시작하였으므로 마이크로파 이미징 기반 뇌졸중 진단은 향후 계속 진화하여 인류의 생명을 구하고, 삶의 질을 향상하는 데 많은 쓰임을 받을 것이다.

## Abstract

Brain stroke, referred to as a local neurological deficit suddenly caused by abnormal blood flow to brain tissue, is the third leading cause of death after heart disease and cancer. Additionally, because of its very short golden hour, initial treatment and access to diagnostic devices are critical. The main equipment for diagnosing brain stroke are CT and MRI, but it is difficult to carry out continuous tests and the equipment are not portable. CT is detrimental to patients because it uses ionizing radiation, leading to the demand for new devices. Microwave-based imaging technology is emerging as a medical imaging tool to replace CT, based on the mapping of the electromagnetic scattering resulting from the difference in dielectric constant between tissues. Microwave imaging has the advantages of viability, low cost, portability, and radioactivity throughout a living tissue. Hence, it is an excellent technique for diagnosing blood flow abnormalities in the brain and a good imaging tool for managing brain stroke. In this study, tomography imaging has been applied to head imaging to develop portable and relatively inexpensive imaging technology. Further, a method for generating a 3-D image using the time delay of the reflected wave from the target has been proposed. With the application of the holography technique to the microwave method, the microwave imaging-based stroke diagnosis will continue to evolve, improving the quality of life.

Key words: Microwave Imaging, Brain Stroke, 3-D Imaging, Holography

「이 연구는 2019년도 한국항공대학교 교비지원 연구비에 의하여 지원된 연구의 결과임.」

한국항공대학교 항공전자정보공학부(School of Electronic and Information Engineering, Korea Aerospace University)

· Manuscript received February 21, 2020 ; Revised February 25, 2020 ; Accepted February 28, 2020. (ID No. 20200221-001S)

· Corresponding Author: Choon Sik Cho (e-mail: cscho@kau.ac.kr)

## I. 서 론

뇌조직으로 흐르는 뇌혈류 이상으로 갑작스럽게 유발되는 국소 신경학적 결손 증상을 통칭하는 뇌졸중은 심장병과 암에 이어 세 번째로 큰 사망원인이며, 혈관이 내부에서 막히는 허혈성 뇌졸중(ischemic stroke, 뇌경색)과 혈관이 터져서 혈액이 뇌로 새어 나오는 출혈성 뇌졸중(hemorrhagic stroke, 뇌출혈)으로 나뉘며, 이 중 허혈성 뇌졸중이 87%를 차지하며, 이는 뇌에 혈액을 공급하는 혈관 내부가 막혀서 발생하는 질환이며, 이와는 달리 약해진 혈관이 터져서 주변에 있는 뇌로 출혈이 일어나면서 발생하는 출혈성 뇌졸중은 혈액이 쌓이면서 주변의 뇌조직을 압박하는 증상을 내포한다. 뇌졸중은 골든타임 4.5시간 이내에 응급실로 가야 하는데, 증상 발현 후 3시간 이내에 조치해야 하므로 검사 시간 등을 고려하면 60~90분 이내에 가야 한다. 그러므로 초기 조치가 매우 중요하며, 접근 가능한 진단기기의 사용이 중요하다. 병원에서 진단할 수 있는 기기로는 CT, MRI, PET 및 초음파 장비가 있으며, CT와 MRI가 주요 장비이다. 불행하게도 이 두 장비는 가격 및 운영 상 지속적으로 검사하기가 어려워지며, 휴대가 불가능하다. 또한 CT는 전리 방사선을 사용하므로 환자에게 해로우며, 이는 새로운 기기의 요구로 이어지고 있다.

마이크로파 기반 이미징 기술은 생체 조직 간의 유전율(또는 유전성질) 차이에서 발생하는 전자기파 산란 지도 작성에 기반하여 CT 등을 대체할 의료 영상화 도구로 각광 받고 있다. 마이크로파 이미징은 생체 조직 전체의 조망, 저가격, 휴대 가능성 및 무방사능 등의 장점을 지니고 있으므로 뇌의 혈액 흐름 이상을 진단하는 훌륭한 기술이 될 수 있고 뇌졸중을 관리하는 훌륭한 영상화 도구로 사용할 수 있다. 지금까지 뇌졸중 진단을 위한 마이크로파 이미징은 1982년 처음으로 연구 결과가 발표된 이후 아무런 관심도 받지 못하다가 2000년 이후 본격적으로 전 세계 연구자들이 이 분야에 많은 노력을 기울이고 있다<sup>[1]</sup>. 특히 Zubal이 두부에 대한 수치 해석 모델을 공개하면서 2012년 이후 공초점(confocal) 방식에 의한 단층영상화기법을 두부 이미징(head imaging)에 적용하여 휴대 가능하고, 상대적으로 저가의 영상화 기술을 발전시켜오

고 있다. 공초점 방식은 원래 광학에서 사용하던 3D 영상화 방법인데, 광원 대신 전자기파를 사용하여 표적에서 반사되어 돌아오는 반사파의 시간 지연을 이용하여 3차원 영상을 만들어내는 방법이며, 속도는 빠르나 정밀도가 좋지 않은 결과를 보이고 있다. 역시 광학에서 정밀도 측면에서 공초점 방식보다 상대적으로 뛰어난 방식인 홀로그래피 기법을 마이크로파 방식에 적용한 기술이 오래전에 소개되어 그 가능성을 보이고 있었으나, 아직 타당성 연구 단계이다. 홀로그래피 방식은 공초점 방식과 달리 두 전자기파의 간섭으로 인한 위상정보를 바탕으로 3차원 영상을 만드는 기술이며, 앞으로 많은 진보를 이룰 것으로 보인다.

본 논문에서는 뇌졸중을 진단하기 위한 마이크로파 이미징 기술이 어떻게 진화되어 왔는지 2장에서는 마이크로파 단층 이미징 기반 뇌졸중 진단에 대한 연구의 역사를 소개하고, 3장에서는 마이크로파 3차원 영상화를 적용한 마이크로파 3차원 홀로그래피 연구에 대하여 소개하고자 한다.

## II. 마이크로파 단층 이미징

뇌졸중 단층 이미징은 크게 세 가지 특성으로 인하여 마이크로파 대역을 선호하는데, 첫 번째, 뇌경색 조직은 마이크로파 대역에서 건강한 조직과 비교하여 다른 전기적 특성을 가지고, 둘째, 마이크로파는 비전리 방사능이므로 특별히 연속적인 모니터링에 적합하고, 셋째, 마이크로파 기술은 휴대가 간편하고 저가의 장비를 구현하는 데 적합하다. 마이크로파를 이용하여 뇌 내부를 영상화하고, 나아가 뇌졸중을 진단하기 위한 절차는 크게 두부 모델링, Forward problem model 및 Inverse problem solution의 과정으로 이루어진다. 두부 모델링은 Forward problem에 사용하는 두부의 유전 성질을 보다 정확하게 만들기 위한 과정이며, Zubal이 최초로 공개한 모델을 지속적으로 보완 개선하여 현재는 MRI 등으로 실제 환경에서 측정한 실제 결과값을 토대로 진화하고 있다<sup>[2]</sup>. Forward problem model은 두부 모델을 사용하여 뇌 내부의 전기장 등 특성을 모사하는 과정으로써, 이미징 시스템을 구성하기 위한 송수신기의 위치 등을 정하기 위한 절차이며, 전통적으로 FEM, FDTD, MoM 및 IE 등의 다양한

수치해석법을 적용하고 있다. 그리고 Inverse problem의 해를 구하는 과정은 이미징시스템을 사용하여 획득한 측정결과를 토대로 뇌 내부의 유전적 특성에 대한 형상화를 이루는 과정으로 다양한 알고리즘이 개발되어 많은 연구자들이 적용하고 있다.

1982년 Lin과 Clarke가 뇌의 부종을 진단하기 위하여 X-선 대신 1~3 GHz의 마이크로파를 이용하여 Head phantom을 대상으로 투과계수의 위상을 조사하여 검출한 연구가 뇌의 이상을 마이크로파로 진단하고자 한 최초의 연구이다<sup>[1]</sup>. 이후로 연구자들이 아무런 관심을 보이지 않고 있다가, 2000년에 Lawrence Livermore National Laboratory의 Haddard 등이 UWB 레이더를 사용하여 Head phantom에 적용한 휴대용 비침습 뇌출혈 진단장치를 개발하는 데 성공하여 그 결과를 제시하였다<sup>[3]</sup>. 이 연구 결과를 바탕으로 인체의 질환을 비침습적으로 탐지하기 위한 UAB 레이더 적용은 2005년 Paulson 등이 연구하여 그 결과를 발표하였다<sup>[4]</sup>.

그러나 뇌졸중 등의 뇌질환을 단층 이미징 기술로 형상화시킨 최초의 연구는 2008년이 되어서야 Semenov와 Corfield가 수행한 결과로 나타났다<sup>[5]</sup>. 이때에야 비로소 인체에 유해한 전리방사선을 사용하는 X-선 대신 비전리 방사선을 사용하는 마이크로파 이미징 기술을 뇌 질환의 대표적인 증상인 뇌졸중에 적용한 연구결과가 출현하였음을 뜻한다. 마이크로파 단층 이미징 기술을 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션으로 완성한 결과는 그림 1과 같으며, 비선형 Newton 재형성(reconstruction)을 사용하여 뇌졸중 진단의 이미징을 위한 첫걸음을 떼었다. 0.5~2.0 GHz의

20 dBm 신호를 사용하여 2-D head model을 사용하여 단층 형상을 재형성한 최초의 연구결과로서 그 의미가 지대하다.

2010년 이후의 뇌졸중 이미징에 대한 연구 결과를 보면 우선 Ireland와 Bialkowski는 해부학적으로 그림 2에 나타난 것과 같은 실제 Head phantom에 기반하여 정밀모사한 뇌졸중에 대한 타당성 연구를 수행하였는데 3-D FDTD를 사용하여 15 mm의 뇌졸중을 탐지할 수 있음을 전기장의 세기를 모사 측정하여 보여주었다<sup>[6]</sup>. 여기서 사용한 Head phantom은 1994년 Zubal 등이 개발한 인간의 3-D head phantom이며, 이 Phantom이 공개된 이후로 뇌졸중 이미징에 대한 연구가 비약적으로 발전하기 시작하였다<sup>[2]</sup>. 뇌졸중 등 뇌의 이상세포나 조직을 검출하기 위하여 Head phantom과 그 주변의 전기장의 세기를 모사 측정하는 기술과 이를 수집하여 2-D 이미지로 재형상화하는 기술 두 가지를 동시에 진행하여야만 뇌졸중 이미징을 완성할 수 있으므로 관련 연구는 뇌의 특정 단층에서의 어떠한 전기적인 특성을 평면에서 나타내고, 또 이를 어떻게 형상화할지에 대한 연구로 구분될 수 있다.

Zakaria 등은 단순 2-D 뇌 모델을 사용하여 뇌출혈을 검출한 후, 이를 FEM과 Contrast Source Inversion(CSI) 이미지 형상화 기법을 적용한 결과를 발표하였으며, 그림 3과 같은 측정환경을 구축하여 전기장의 세기를 측정하였다<sup>[7]</sup>.

Scapaticci 등은 최적의 뇌 Phantom을 위하여 0.6~1.5 GHz의 주파수를 선정하여 뇌졸중 모니터링을 위한 Linear Sampling Method(LSM)를 제안하여 재형상화를

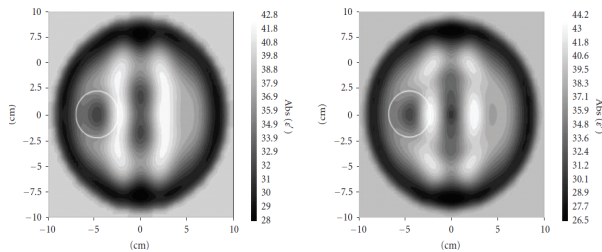


그림 1. Semenov와 Corfield의 시뮬레이션 기반 뇌졸중 마이크로파 단층 이미징 재형성 결과<sup>[4]</sup>

Fig. 1. Microwave imaging reconstruction result based on computer simulation from Semenov and Corfield.



그림 2. 참고문헌 [5]에서 구현한 1 GHz head phantom 모델  
Fig. 2. The head phantom model at 1 GHz realized in [5].

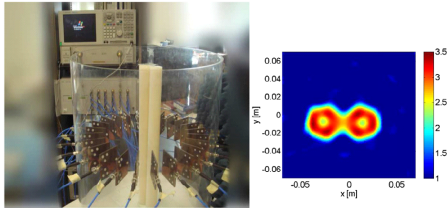


그림 3. 참고문헌 [7]에서 사용한 측정 환경 및 재형상화 결과  
Fig. 3. Measurement setup and image reconstruction<sup>[7]</sup>.

수행하였으며, 산란 Data를 Zubal의 Head phantom과 MoM 방법을 사용하여 수집하였다<sup>[8]</sup>. Jalilvand 등은 UWB radar 기법을 적용하였는데, 반사 및 투과 시나리오를 조사한 후 역산란 신호를 사용하여 뇌졸중의 위치를 획득하는 기술을 구현하였다<sup>[9]</sup>. 해석적인 모델을 뇌의 모델링에 그림 4와 같이 도입하여 뇌졸중 이미징을 구현하는 데 적용하였다.

Fhager 등은 뇌졸중 검출을 위하여 그림 5에 보인 마이크로파-헬멧을 구성하였으며, 통계적인 분류 알고리즘을 사용하여 Training data와 측정 data 사이의 거리를 계산하여 뇌졸중 검출에 이용하였다<sup>[11]</sup>.

Mustafa 등은 그림 6에 나타난 것과 같이 두부 주위에 16개의 Tapered slot 안테나 배열을 타원형으로 배치하여 산란신호를 Focusing 하기 위하여 Delay-and-sum 빔형

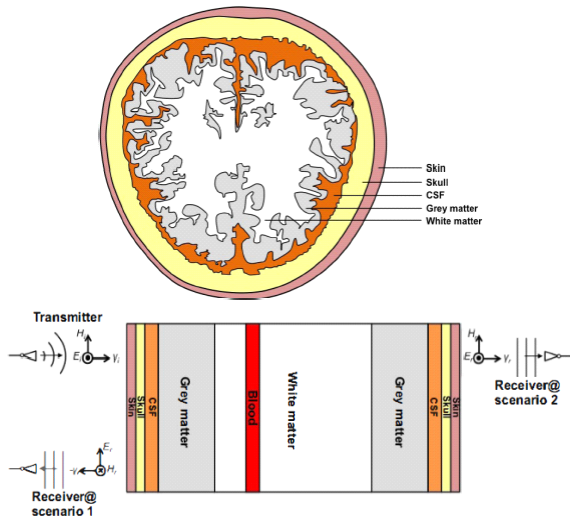


그림 4. 다층 구조의 뇌 모델<sup>[9]</sup>  
Fig. 4. Human head consisting of different layers<sup>[9]</sup>.



그림 5. 뇌졸중 측정을 위한 마이크로파-헬멧<sup>[10]</sup>  
Fig. 5. Microwave-helmet for measuring brain stroke<sup>[10]</sup>.

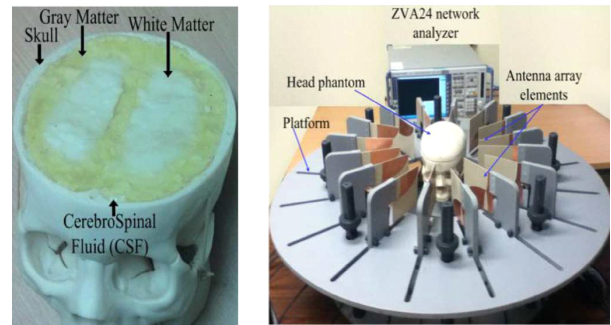


그림 6. 뇌졸중 측정을 위한 두부 팬텀 및 이미징 시스템<sup>[11]</sup>  
Fig. 6. Head phantom and imaging system for measuring brain stroke<sup>[11]</sup>.

성 기법을 적용하였으며, 정확한 검출을 위하여 배경 잡음을 제거하는 선처리 알고리즘을 제안하였으며, 광대역 공초점 형태로 형상화를 구현하였다<sup>[11]</sup>.

Priyadarshini는 뇌졸중 검출을 위하여 FEM-CSI(Finite Element Method - Contrast Source Inversion) 기법을 적용하여 두부 팬텀의 유전 성질 정보로 형상화 작업을 수행하는 모사를 보여주었다<sup>[12]</sup>.

Mobashsher 등은 그림 7에 보인 것처럼 휴대용 마이크로파 시스템을 제작하여 뇌의 이상 유무를 검출하였는데, 안테나, 송수신기, 신호 처리 및 형상화 알고리즘을 위한 광대역 시스템을 구현하였다<sup>[13]</sup>. 여기에서는 가상의 배열 Monostatic 레이다 방식을 채택하여 두부 주위의 32 안테나 위치에서 측정한 데이터를 사용하여 Back projection 알고리즘에 적용하여 형상화를 구현하였다. Mobashsher

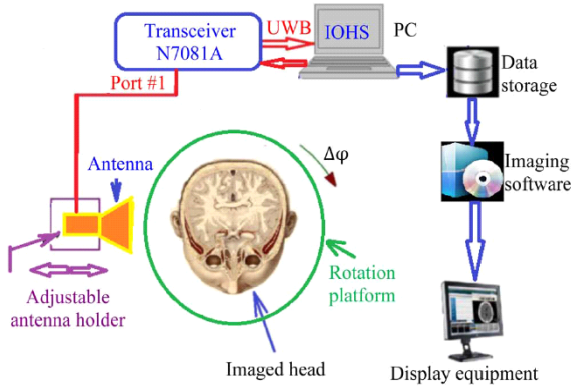


그림 7. 뇌졸중 측정을 위한 이미징 시스템<sup>[13]</sup>  
Fig. 7. Head imaging system for measuring brain stroke<sup>[13]</sup>.

등은 나아가 Delay-and-sum back-projection inversion 알고리즘을 개선하여 뇌졸중을 검출하기 위한 측정 시스템을 만들어서 두부 팬텀을 사용하여 측정한 후, 시간 및 주파수 영역에서 공히 분석을 수행한 결과를 보이고 있으며, 역시 Monostatic 레이다 기술에 기반하고 있다<sup>[14]</sup>.

Bisio 등은 Inexact-Newton method iterative procedure 기법을 적용하여 뇌 내부의 복소 유전율 Map을 획득하는 수치 해석적 과정을 나타내어 한 단계 진전을 이루고 있다<sup>[15]</sup>. Zakaria 등은 마이크로파 이미징을 위하여 Finite-element contrast source inversion 방법을 기반으로 하여 Inversion 알고리즘을 구현하여 형상화 성능을 개선시켰음을 보여주고 있다<sup>[7]</sup>.

두부 모델을 보다 실제 환경에 적합한 모델로 만들기 위하여 Qureshi 등은 Zubal이 제시한 타원형 두부 모델보다 훨씬 실제환경에서 MRI로 측정한 데이터를 사용하여 보다 발전된 모델을 구축한 후, 각 모델을 적용하여 FEM 방식에 기반한 마이크로파 단층기법(tomography)으로 뇌졸중 진단 모사를 수행하였다<sup>[16]</sup>.

Bjelogrić 등은 차동 마이크로파 이미징(differential MWI) 기법을 적용하여 그림 8에 나타난 것과 같이 차동 Contrast 함수를 측정 결과로부터 계산하여 원 Contrast 함수보다 훨씬 더 성긴 분포를 보이므로 정밀도 향상을 기대할 수 있다<sup>[17]</sup>.

Munawar 등은 전자기 임피던스 단층기법(electromagnetic impedance tomography)을 제안하였으며, FEM-CSI

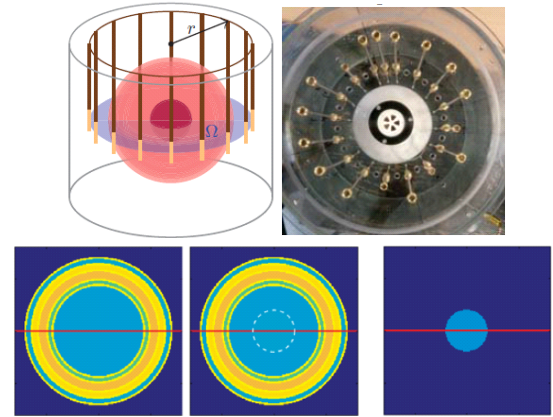


그림 8. 뇌 측정 차동 이미징 시스템 및 contrast 차동 함수<sup>[17]</sup>

Fig. 8. Differential imaging system for measuring brain stroke and contrast function<sup>[17]</sup>.

를 사용하여 Forward model을 구성하고, 뇌졸중 문제를 모사하였다<sup>[18]</sup>.

마이크로파 이미징은 산업 및 의료분야에서 광범위하게 사용되고 있는데, 이미징을 위하여 단일 주파수 또는 다중 주파수를 대상 표적에 투사하며, 투사하는 신호 또한 단일 마이크로파 원 또는 다중 마이크로파 원을 사용하고 있다. 대상 표적으로부터 반사 또는 산란된 신호는 다양한 수신 위치에서 측정을 하며, 표적의 유전 성질을 계산하여 알려진 주변 매질 환경하에서 대상 표적(여기서는 뇌의 내부)을 형상화하는 절차를 거친다. 뇌의 정상적인 조직과 비정상적인 조직 사이의 유의미한 대조를 이용하여 마이크로파 이미징을 구현하는데, 크게 세 가지 방법으로 나눌 수 있다.

마이크로파 Tomography는 EMIT로도 불리며<sup>[18]</sup>에서 제안한 기법이며, 뇌 내부의 유전체 성질이 정상조직과 비정상조직 사이에서 큰 차이가 나는 점을 이용하여 뇌졸중 검출을 모사하는데, 그림 9에 나타난 것과 같은 이미징 시스템을 구성하였으며, 총 16개의 점 전류원을 배치하여 모방 복제(emulation)한 뇌졸중을 검출하는 결과를 보여주고 있다. 특별히 FEM을 Forward problem 과정에서 사용하였으며, Inverse problem에서는 CSI를 사용하여 효과적인 분석과 뇌졸중 검출에 적용하였다.

레이다 이미징은 본디 유방암 진단을 위하여 고안된



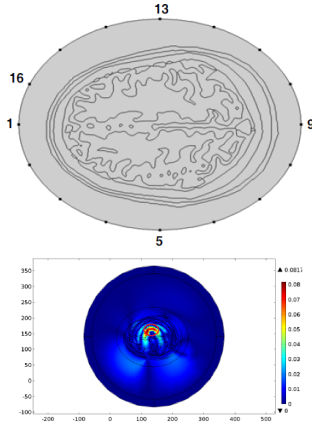


그림 9. EMIT 기반 뇌졸중 이미징 시스템과 모방 복제된 출혈성/허혈성 뇌졸중 검출 결과<sup>[18]</sup>

Fig. 9. EMIT-based brain stroke imaging system and emulated hemorrhagic and ischemic brain stroke detection<sup>[18]</sup>.

표 1. 대조를 이용한 마이크로파 이미징 분류

Table 1. Microwave imaging classification using contrast function.

Classification	Characteristics
Microwave tomography <sup>[18]</sup>	Dielectric contrast of normal and abnormal cells used
Radar imaging <sup>[19]</sup>	Multistatic radar technology used
Inverse scattering <sup>[20]</sup>	Repetitive numerical method in space used

것인데, 이를 뇌졸중 진단분야에도 확장이 가능하며, 그림 10에 나타낸 것과 같이 Multistatic 레이더 시스템으로 구성하여 송수신 레이더를 여러 개 설치하여  $S_{21}$ 을 측정 한 후 Modified delay and sum(DAS) 알고리즘을 적용하여 마이크로파 이미징을 구현하는 것이다<sup>[19]</sup>. 마지막으로 Inverse scattering 방법은 전기장에 대한 적분 방정식을 Moment method 등의 수치해석법으로 측정한 산란장과 수치해석으로 계산한 산란장 사이의 대조 차이를 반복적으로 계산하여 뇌 내부의 유전 성질을 밝혀내는 기법이다<sup>[20]</sup>.

한편 Inverse problem solution은 크게 Contrast Source

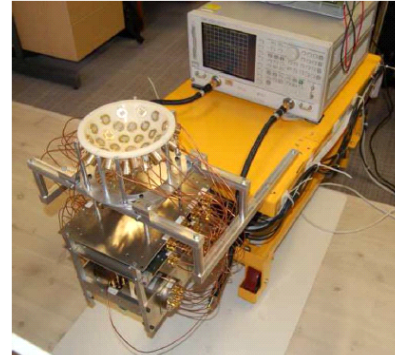


그림 10. 레이더 기반 뇌졸중 이미징 시스템<sup>[19]</sup>

Fig. 10. Radar-based brain stroke imaging system<sup>[19]</sup>.

Inversion(CSI), Gauss-Newton Inversion(GNI), Confocal Delay-and-Sum Algorithm, Born Iterative Method(BIM), Conjugate gradient method와 Levenberg-Marquadt 알고리즘 등으로 나눌 수 있다.

CSI 방법은 전기장의 측정한 결과를 포함하고 있는 Cost 함수를 최소화하기 위하여 Contrast source와 Contrast 변수를 연속적으로 업데이트하는 방법으로서, 첫 번째 순서로 Polak - Ribière 검색 방향의 Conjugate-Gradient 기법을 적용하되 Contrast source 변수  $w_i$ 를 업데이트한다. 이때 Contrast 변수  $\chi$ 는 상수로 유지한다<sup>[7]</sup>. 두 번째 순서로는  $w_i$ 를 상수로 유지하면서 Cost 함수의 Domain 방정식을 업데이트하는데, CSI 방법의 첫 업데이트 방정식은 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$w_{i,n} = w_{i,n-1} + \alpha_{i,n} d_{i,n} \quad (1)$$

여기서  $n$ 은 반복 횟수이고,  $\alpha$ 는 update step-size,  $d$ 는 Polak - Ribière 검색 방향을 나타낸다. Contrast source 변수를 업데이트한 후에 Cost 함수의 Domain 방정식을 최소화하면서  $\chi$ 를 계산하고,  $n$ 번째 반복 후에  $\chi_n$ 에 대한 Sparse 행렬의 해를 구하게 된다.

국부 최적화(local optimization) 해를 구하기 위한 Newton 방법은 현재 상태에서 Cost 함수의 1, 2차 미분(Gradient 및 Hessian 행렬)에 기반하여 비선형 Cost 함수를 근사화하는 방법이며, 다음 반복 상태에서 최솟값을 선택한다. 그러나 이 방법은 초기 추정값이 해와 가까우면 놀라운 선형 수렴을 보이나, 초기 추정값이 해와 멀어지면

Newton 보정이 결국 Cost 함수의 증가로 이어진다. 이를 개선하기 위한 Gauss-Newton 법은 Cost 함수를 다변수 다차원으로 확장하여 Cost 함수가 발산하지 않도록 개선한 방법이다<sup>[21]</sup>. 특히 Cost 함수를 정규화하여 수렴속도를 향상시키는 다양한 방법들이 측정된 전기장 데이터를 이용하여 이미지 형상화에 적용되고 있다.

Delay-and-Sum에 기초한 Confocal 최적화 법은 주어진 지점에서 하나의 Echo 신호가 생성되며, 각각의 안테나로부터 발생하는 차이를 이 지점에 더하는 가설을 적용하여 동작한다<sup>[11],[22],[23]</sup>. 특정한 산란체(scatterer) 위치에 대한 가설이 맞으면 신호는 가간섭성으로(coherently) 더하여지고, 큰 값의 합(sum)을 획득한다. 만일 가설이 틀리면 신호는 비가간섭성으로(incoherently) 더하여지고 작은 합을 획득한다. 이때 신호는 직진방향으로 이동한다고 가정하며 매질은 균일하다고 가정한다. 이러한 가정은 실제 매질에서는 맞지 않으므로 선처리를 통하여 보정하고, 올바른 신호의 방향을 찾기 위한 Femat의 원리 등을 적용하고 있다.

마이크로파 이미징 시스템에서 측정한 데이터를 이용하여 이미지 재형성(reconstruction)을 하는 원리는 그림 11에 나타내었는데, 측정한 데이터는 그림 11의 Sensor points에 해당하고, 이미지 재형성(또는 형상화)은 이를 이용하여 Investigation domain의 각 Cell의 정보를 채우는 과정이다<sup>[24],[25]</sup>. 주변 매질의 유전체 특성에 정규화된 식 (2)의 유전특성을 찾는 것이 마이크로파 이미징의 목적이다.

$$\tilde{\epsilon}_r(x, y) = \left[ \epsilon_r(x, y) + \frac{\sigma(x, y)}{j\omega} \right] / \tilde{\epsilon}_s \quad (2)$$

$\tilde{\epsilon}_r(x, y)$ 를 구하기 위하여 Born iterative 법을 사용하면 적분 기반 시스템의 Inverse 해를 구할 수 있으며, 적분의 Kernel은 상수로 유지한다. 초기값을 1로 설정하여 다음의 식 (3)에 나타난 적분방정식을 반복적으로 구하여 목표 하는 유전특성( $\tilde{\epsilon}_r(x, y)$ )을 구할 수 있다.

$$\hat{E}_{scat, \nu}(x, y) = \frac{-jk_s^2}{4} \iint [\tilde{\epsilon}_r^k(x', y') - 1] E_{tot, \nu}^{k-1}(x', y') H_0^{(2)}(k_s \rho) dx' dy' \quad (3)$$

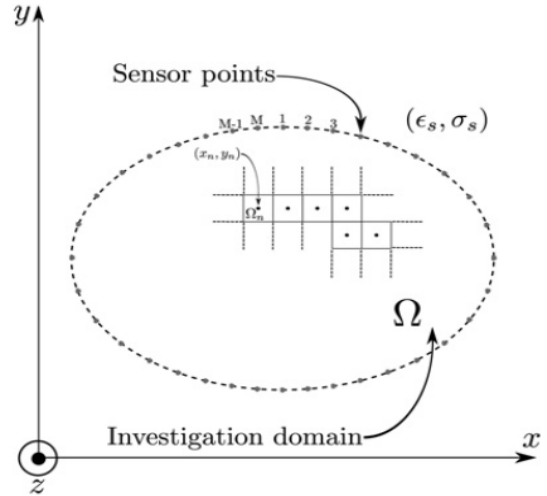


그림 11. 마이크로파 이미징 시스템의 이미지 재형성 과정<sup>[24],[25]</sup>

Fig. 11. Image reconstruction processing for the microwave imaging system<sup>[24],[25]</sup>.

### III. 마이크로파 3D 홀로그래피

마이크로파 이미징을 적용하여 뇌졸중을 진단하기 위한 2차원 형상화(또는 재형성, reconstruction)에 대한 연구는 앞의 II장에 다양한 방법과 절차를 소개하였으며, 3차원 형상화를 위한 마이크로파 뇌졸중 홀로그래피 연구는 아직 초보 단계이므로 뇌졸중 외의 진단에 마이크로파 홀로그래피 기술을 적용한 예를 살펴보고 뇌졸중 진단에 3차원 홀로그래피 형상화를 위한 초기 연구에 대하여 소개하고자 한다.

홀로그래피는 1948년 Gabor가 최초로 제시한 이미징 기법으로서, 물체의 Fresnel 회절 패턴을 이용하여 이미지 재형성을 하는 광학적 방법으로서 최초로 제안할 당시에는 레이저 광을 만드는 기술이 부족하여 전자현미경의 배율을 혁명적으로 증가시킬 수 있는 제안에 불과하였다<sup>[26]</sup>. 이를 통신이론의 관점에서 Leith 등이 재해석을 하여 홀로그래피의 발전을 위한 기초를 마련하였다<sup>[27]</sup>.

이후 오랜 연구에 의하여 그림 12와 같이 레이저 광을 이용하여 물체로부터 나오는 물체광과 레이저 기준광을 회절 간섭시켜 감광재료에 이 회절패턴을 기록한 후(이를 홀로그램이라 한다.) 그림 13에 나타난 것과 같이 다시

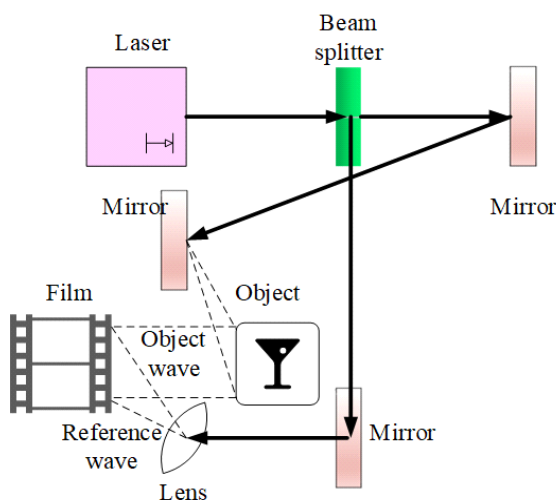


그림 12. 홀로그래피를 이용한 회절 패턴 획득  
Fig. 12. Diffraction pattern with holography.

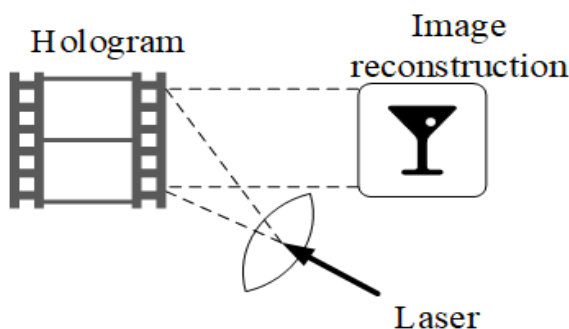


그림 13. 홀로그래피를 이용한 이미지 재형성  
Fig. 13. Image reconstruction using hologram.

기준광을 투사하여 3D로 재형성하는 방법을 사용하여 현재 수많은 응용에 쓰이고 있다.

그림 12에서는 기준광을 반사된 물체광과 간섭을 시키는 방법으로서 반사형 홀로그래피라고 하며, 뚜렷한 입체감을 보이고 있고, 물체광을 투과시켜서 홀로그래피를 획득하게 되면 투과형 홀로그래피라고 한다. 여기서 홀로그래피를 획득하기 위한 광원과 홀로그래피에서 이미지를 재형성하는 기준 광원 모두를 마이크로파 주파수로 바꾸면 전자기파의 특성상 물체 내부로 침투하므로 전자기파를 이용한 물체나 생체 내부의 이미지 형상화에 적용이 가능하므로 유방암 등 질병 진단을 위한 알고리즘 연구에 많이 이용되고 있다. 광학 홀로그래피나 마이크로파 홀로그

래피 모두 물체에 광원이라 전자기파를 투사시키고 표적 물체로부터 산란된 신호 파면의 진폭과 위상을 샘플링하여 획득한 결과를 홀로그래피라 하며, 이 홀로그래피로부터 이미지를 재형성하기 위하여서는 광학 홀로그래피는 필름을 사용하여 광학적으로 또는 Fourier-optic 절차를 거치는 데 반하여, 마이크로파 홀로그래피는 송수신기를 사용하여 스캔한 후 이를 디지털 이미지로 재형성하므로 광학적 홀로그래피보다 이미지의 품질이 뛰어나고, 컴퓨터 연산에도 훨씬 용이하게 사용할 수 있는 장점이 있고, 3D로 이미지를 재형성하기가 매우 수월한 특징을 지니고 있다.

마이크로파 주파수 대역에서는 1965년 Dooley가 이를 최초로 적용하여 X-Band 홀로그래피를 구현하였고, 여기서 기록된 회절 패턴을 홀로그래피라 하며, 아직은 투과형의 2차원 형태를 보이고 있고, 재형성은 광학 주파수에서 수행하였다는 점에서 완전한 마이크로파 홀로그래피와는 매우 거리가 멀다고 할 수 있다<sup>[28]</sup>.

마이크로파 대역에서 홀로그래피로 생성하는 이미지의 해상도는 주파수가 증가할수록 커지므로 1969년에 Iizuka가 34.26 GHz의 마이크로파 신호원을 Klystron으로 생성하여 폴라로이드 필름에 홀로그래피를 만든 후 이미지 재형성시에는 순방향 산란(forward-scattered) 마이크로파를 투사시켜서 지갑속의 동전에 대한 홀로그래피를 구현하여 진전을 이루었다<sup>[29]</sup>.

밀리미터파를 포함하여 마이크로파를 이용한 홀로그래피는 Farhat이 개발한 시스템이 최초이며, 마이크로파 주파수 신호원을 투사하여 홀로그래피를 생성하고, 이를 광학적인 방법이 아닌 Fourier 변환을 통하여 디지털로 이미지를 재형성하는 최초의 알고리즘을 구현하여 마이크로파 홀로그래피의 발전의 초석을 마련하였다<sup>[30]~[32]</sup>.

1973년에는 Orme 등이 땅속의 물체로부터 획득한 산란장(scattered field)을 기록하여 마이크로파 홀로그래피를 구현하는 데 성공하였으며<sup>[33]</sup>, 땅속 수십 센티미터까지 물체의 홀로그래피를 획득하려는 지속적인 연구 결과, Junkin 등이 손실있는 표면에서 합성개구면 마이크로파 홀로그래피의 한계에 대하여 연구결과를 1988년에 발표하였다<sup>[34]</sup>.

3D 홀로그래피 이미징은 최초로 Sheen 등이 2001년에



몸속에 숨겨진 무기 탐지를 위하여 밀리미터파 신호를 사용하여 구현하였으며, 직사각형 개구면을 사용하였고, 그림 14에 이를 나타내었다<sup>[35]</sup>.

RASCAN 형태의 부표면 홀로그래픽 레이더(subsurface holographic radar)를 사용하여 단일 주파수 신호원을 투사하여 두 개의 Quadrature 채널로 진폭-위상 홀로그램을 획득하여 이미지 재형성을 2002년 Chapursky 등이 수학적으로 모델링하여 실제 측정한 데이터를 사용하여 제시하였다<sup>[36]</sup>. 한편, 2007년에는 Lu 등이 우주선의 열 보호 타일에 결점이 생긴 것을 RASCAN 부표면 홀로그래픽 레이더로 탐지하기 위한 알고리즘을 개발하였는데, 3.6~4.0 GHz의 마이크로파 신호를 사용하여 결점을 홀로그래피로 3D 이미지 재형성하는 데 성공하였다<sup>[37]</sup>.

Laviada 등은 합성 평면파를 통한 간접 홀로그래피를 사용하여 위상정보가 없어도 오직 진폭 정보만을 사용하여 물체의 3차원 이미지를 형상화시키는 역산란 알고리즘을 구현하였으며, 그림 15와 같은 장치를 이용하여 복잡한 Vector network analyzer를 사용하지 않고도 이미지 형상화에 성공하였다<sup>[38]</sup>.

한편, 뇌졸중을 진단하기 위하여 3D 홀로그래피를 적용한 최초의 연구는 2.5 GHz에서 시뮬레이션을 위한 마

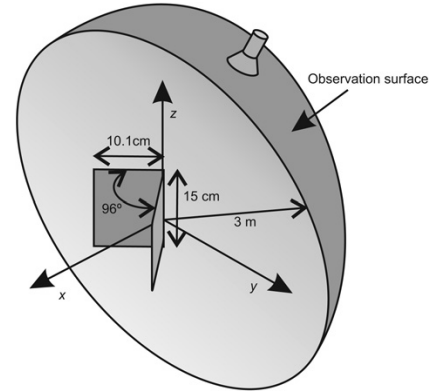


그림 15. 간접 홀로그래피를 이용한 이미징 장치<sup>[38]</sup>  
Fig. 15. Imaging set-up for the indirect holography<sup>[38]</sup>.

이크로파 홀로그래피 이미징 배열을 사용하여 Wang 등이 수행하였는데, 1개의 송신기와 15개의 수신기를 배치하여 3D 두부 모델을 적용한 후 이미지 재형성을 구현하였다<sup>[39]</sup>. 계속하여 Wang 등은 유전체의 3D 홀로그래피를 구현하기 위하여 3-D 원거리장 마이크로파 이미징 시스템을 설계하여 흠이 있는 유전체의 3D 이미지를 재형성하는데 성공하였다<sup>[40]</sup>.

Amineh 등은 3차원 근접장 기반 마이크로파 홀로그래피를 최초로 구현하였으며, 그림 16에서처럼 반사 및 투과 신호를 사용하였다<sup>[41]</sup>. 이어서 Lao 등은 근거리 표적에 대한 3차원 마이크로파 홀로그래피를 구현하였다<sup>[42]</sup>.

Cheng 등은 표적 영역을 몇 군데로 나누어서 auto-focus 홀로그래피를 구현하였는데, 그림 17에 설계한 시스템을 나타내었으며, Multi-section으로 나누어서 구한 결과를 전통적인 결과와 비교하였다<sup>[43]</sup>.

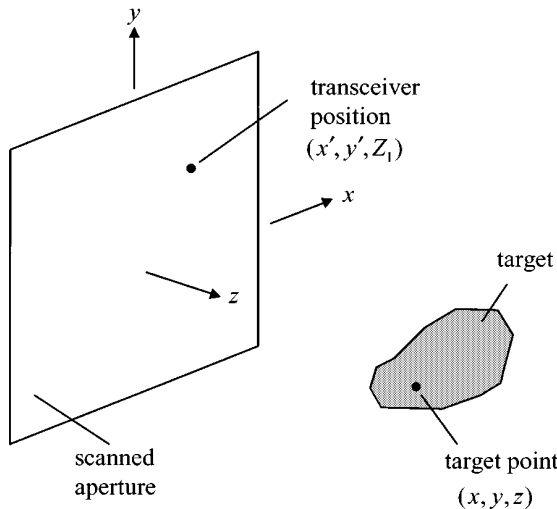


그림 14. 직사각형 개구면 기반 마이크로파 홀로그래피 개념도<sup>[35]</sup>

Fig. 14. Imaging set-up for rectangular aperture based holography<sup>[35]</sup>.

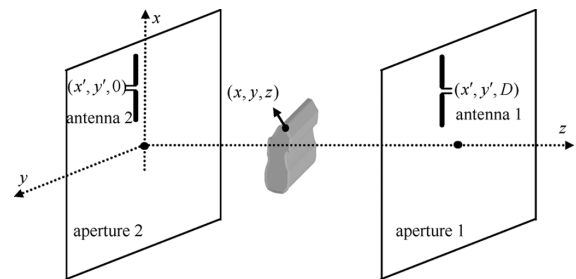


그림 16. 근접장 기반 마이크로파 홀로그래피<sup>[41]</sup>  
Fig. 16. Near-field microwave holography<sup>[41]</sup>.

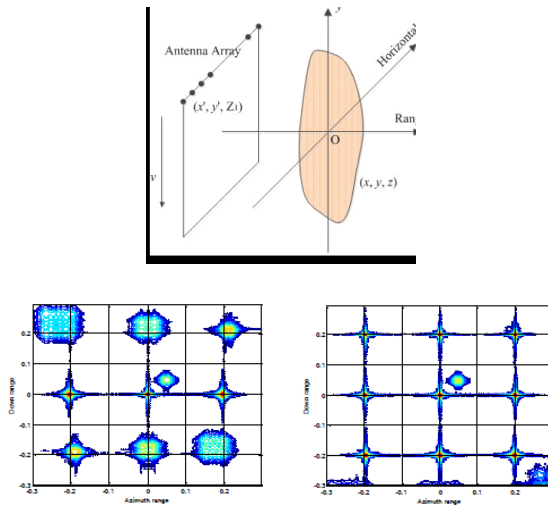


그림 17. 다중 섹션 마이크로파 홀로그래피<sup>[43]</sup>  
Fig. 17. Multi-section microwave holography<sup>[43]</sup>.

마이크로파 홀로그래피의 이미지 재형성은 오랫동안 정성적으로 구현하였는데, Tajik 등은 정량적인 이미지 재형성 알고리즘을 구현하였으며, 이는 근거리에서 표적에 대한 형상화시 높은 정확도를 유지할 수 있으며, 주로 Point-spread function 등을 이용한다<sup>[44]</sup>.

Ivashov 등은 RASCAN 레이더를 사용하여 유전물질의 비파괴 검사를 위한 고해상도 마이크로파 홀로그래피 시스템을 구현하였으며, 10 MHz~24 GHz의 광대역에서 직접 측정된 결과를 바탕으로 폴리우레탄 절연체의 홀로그래프를 재형성시키는 데 성공하였다<sup>[45]</sup>.

유방암 진단을 위한 마이크로파 이미징을 위하여 공초점 방식과 홀로그래피 방식을 직접 비교 구현을 Medina 등이 하였는데, 공초점 방식은 UWB 방식의 광대역 주파수를 이용하여 반사계수 기반으로 이미지를 재형성하는 대신, 홀로그래피는 투과계수 기반으로 홀로그래프를 재형성하는 방법이므로 정밀도에서 상대적으로 우월함을 그림 18에서 확인할 수 있다<sup>[46]</sup>. 한편, 유방암 진단을 위하여 Asghar 등은 Multistatic 홀로그래피 이미지를 MATLAB으로 구현하였는데, 4개의 송신 안테나와 14개의 수신 안테나를 사용하여 5~8 GHz에서 동작하도록 설계하였다<sup>[47]</sup>. Tajik 등은 정량적 마이크로파 홀로그래피와 산란력 매핑을 적용하여 매우 밀도가 높은 Compressed breast phantom을 실시간으로 마이크로파 이미징으로 구현하는데 성

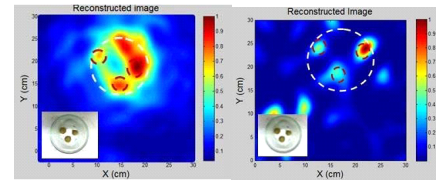


그림 18. Confocal(왼쪽) 및 홀로그래피(오른쪽) 유방암 이미징<sup>[46]</sup>

Fig. 18. Confocal and holographic breast cancer imaging<sup>[46]</sup>.

공하였다<sup>[48]</sup>.

밀리미터파 대역에서도 홀로그래피를 구현하는 연구가 Li 등이 수행하였는데, 200 GHz 대역에서 계단 주파수 연속파 구조를 통하여 그림 19와 같이 인라인 이미징 시스템을 구현하여 홀로그래프를 재형성하는 데 성공하였다<sup>[49]</sup>.

마이크로파 홀로그래피는 기본적으로 실시간 근접장 생체조직 이미징에 사용 가능한 직접적인 Inversion 알고리즘인데, 원래 비선형인 산란문제를 선형화하기 위하여 선형화 기법을 선택하는데, 이 기법이 결국 홀로그래프의 재형성 품질을 결정하게 된다. 선형화 기법으로 주로 Born 근사화 및 Rytov 근사화를 사용하며, Tajik 등은 마이크로파 생체조직 이미징에 이 두 근사화 기법을 비교 적용하여 Rytov 근사화가 상대적으로 우월함을 증명하였다<sup>[50]</sup>.

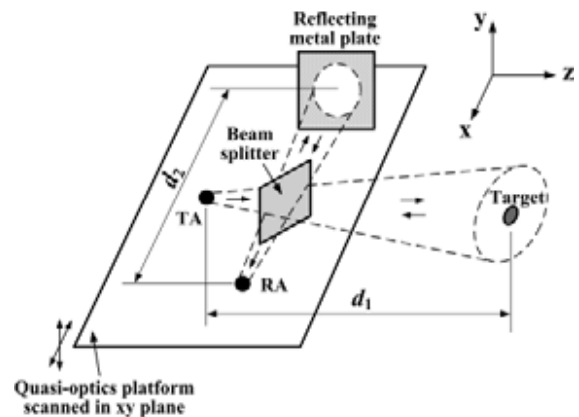


그림 19. 계단 주파수 연속파를 이용한 밀리미터파 인라인 홀로그래피<sup>[49]</sup>

Fig. 19. Millimeter-wave inline holography with step-frequency continuous-wave<sup>[49]</sup>.

위상정보를 사용하지 않고 근접장의 표적을 재형성하는 간접 마이크로파 홀로그래피를 공간 영역에서 구현한 Costanzo 등의 연구를 그림 20에 나타내었는데, Spectrum 중첩 문제를 해결하는 훌륭한 접근 방법을 보이고 있다<sup>[51]</sup>.

마이크로파 이미징은 주로 균일하고 평면 표면을 가정하고 홀로그래피 시스템을 구현하였으나, 실제로는 불규칙한 표면으로 이루어져 있으므로 Razevig 등은 불규칙적인 표면에도 잘 동작하는 마이크로파 홀로그래피를 구현하였다<sup>[52]</sup>.

홀로그래피를 위하여 마이크로파 신호를 효과적으로 Focusing 하기 위한 메타표면을 Gowda 등이 설계하였으며 그림 21에 나타난 것처럼 Fresnel 영역에서 마이크로파 신호를 Focusing 가능하며, 10 cm 지름으로 20 GHz에서 동작하는 메타표면으로 이루어져 있다<sup>[53]</sup>. Wu 등은 메타표면을 이용하여 근접장 Power pattern을 합성하는 알고리즘을 구현하여 홀로그래피에 적용할 수 있도록 그림 22와 같이 설계 및 제작하여 측정하였다<sup>[54]</sup>.

Li 등은 두 마이크로파 주파수 대역에서 동작하는 홀로그래피용 메타표면을 홀로그램 Multiplexing 용으로 구현하였으며, 그림 23에 그 개념도와 설계도를 나타내었다<sup>[55]</sup>.

3-D 마이크로파 홀로그래피 이미징은 기본적으로 비선형 적분방정식으로 인하여 ill-posed 특성을 함유하므로 입력 오차에 대하여 결과는 매우 예민하게 반응하므로 Tsai 등은 여러 가지 가정을 제거하고, 이미지 품질을 향

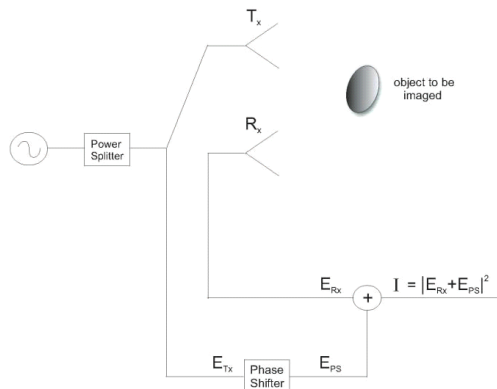


그림 20. 공간 영역 간접 마이크로파 홀로그래피<sup>[51]</sup>  
Fig. 20. Spatial-domain indirect microwave holography<sup>[51]</sup>.

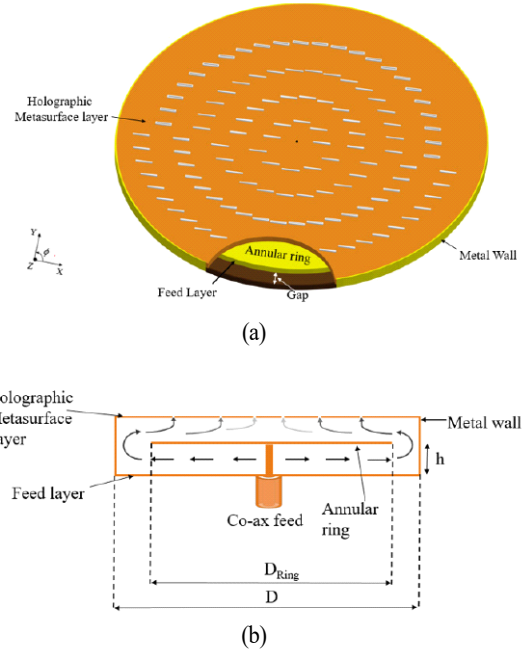


그림 21. 마이크로파 홀로그래피를 위한 메타표면 구성<sup>[53]</sup>  
Fig. 21. Metasurface for microwave holography<sup>[53]</sup>.

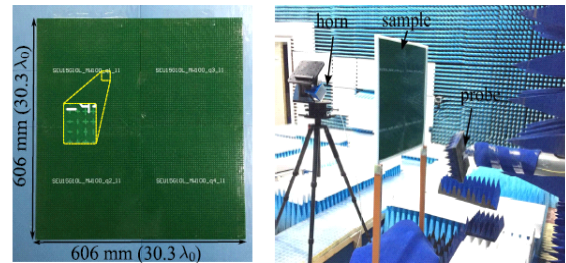


그림 22. 근접장 power pattern 합성을 위한 메타표면<sup>[54]</sup>  
Fig. 22. Metasurface for near-field power pattern control<sup>[54]</sup>.

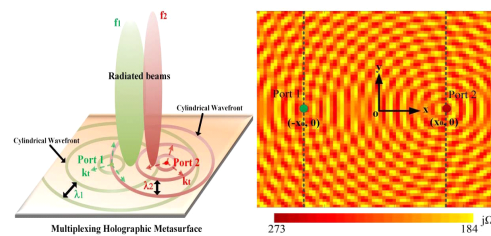


그림 23. 다중 주파수 홀로그램 multiplexing 메타표면<sup>[55]</sup>  
Fig. 23. Metasurface for multi-frequency multiplexing hologram<sup>[55]</sup>.

상시킴을 위하여 Probe 및 위상 보정을 제안하였다<sup>[56]</sup>. 그림 24에 이를 위한 개념도를 나타내었다. 그리고 Dual-probe를 사용한 홀로그래피로 확장하여 그림 25에 개념도를 나타내었다<sup>[57]</sup>.

직사각형 개구면 대신 원통형 개구면을 사용하여 근접장을 이용한 마이크로파 홀로그래피는 시뮬레이션 상으로 직사각형 개구면을 사용한 홀로그래피보다 우월한 성능을 보임을 Wu 등이 증명하였으며 그림 26에 그 개념도를 나타내었다<sup>[58]</sup>.

지중의 지뢰를 탐지하여 이미지 재형성하기 위한 알고리즘을 홀로그래피 부표면 레이더에 Borgioli 등이 적용하였는데, 그림 27에 이의 블록도와 좌표계를 보이고 있으며, 국방분야나 재난분야에도 요긴하게 사용할 수 있음을 보이고 있다<sup>[59]</sup>.

마이크로파 홀로그래피에 대한 연구는 최근 이미지 재형성의 정확도를 높이고, 속도를 빠르게 하는 방향으로 지속적으로 발전되고 있으며, Gao 등은 다른 주파수를 사용한 간섭계를 적용하여 홀로그램을 획득한 후 이를 이미지 재형성에 사용하였는데, Range 해상도와 Cross-range 해상도를 개선시켰음을 보이고 있으며, Range Migration

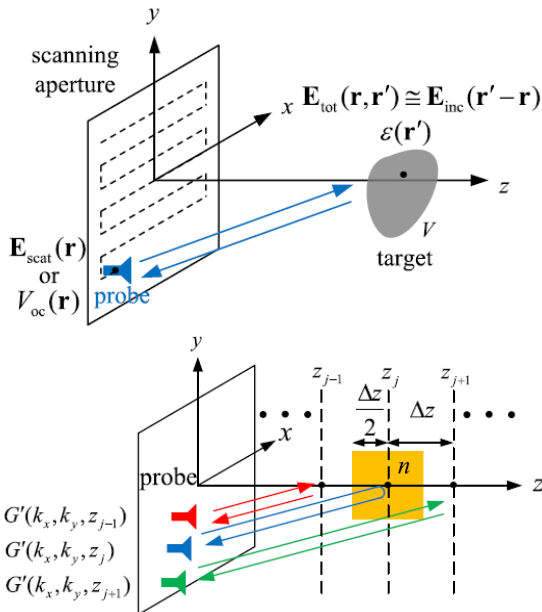


그림 24. Probe 및 위상 보정 마이크로파 홀로그래피<sup>[56]</sup>

Fig. 24. Probe and phase compensated microwave holography<sup>[56]</sup>.

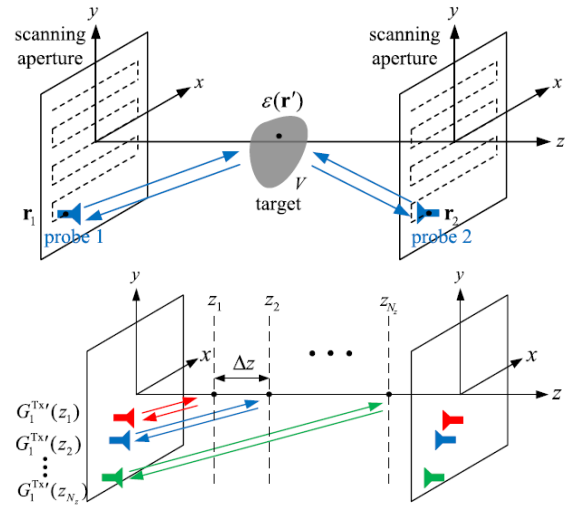


그림 25. Dual-probe용 probe 및 위상 보정 마이크로파 홀로그래피<sup>[57]</sup>

Fig. 25. Dual-probe probe and phase compensated microwave holography<sup>[57]</sup>.

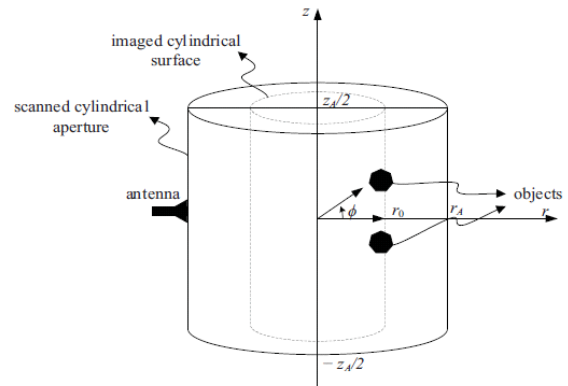


그림 26. 원통형 개구면 마이크로파 홀로그래피<sup>[58]</sup>

Fig. 26. Cylindrical aperture microwave holography<sup>[58]</sup>.

Algorithm(RMA)과 Range Resolution Enhancement(RRE) 알고리즘과 비교하여 우월함을 증명하였다<sup>[60]</sup>. 그림 28에 이 연구의 근본을 이루는 Coherent summation된 이미지를 사용하여 간섭을 수행하는 개념을 보이고 있다. 이를 확장하여 원통형 MIMO 홀로그래피를 구현하였으며, 이미지 품질 향상 및 연산량 감소를 보이고 있다<sup>[61]</sup>. 그림 29에 이에 대한 개념도를 나타내고 있다.

그리고 홀로그래피에서 결국 가장 중요한 Range 해상도를 달성하기 위하여 하나의 주파수를 사용하여 홀로그

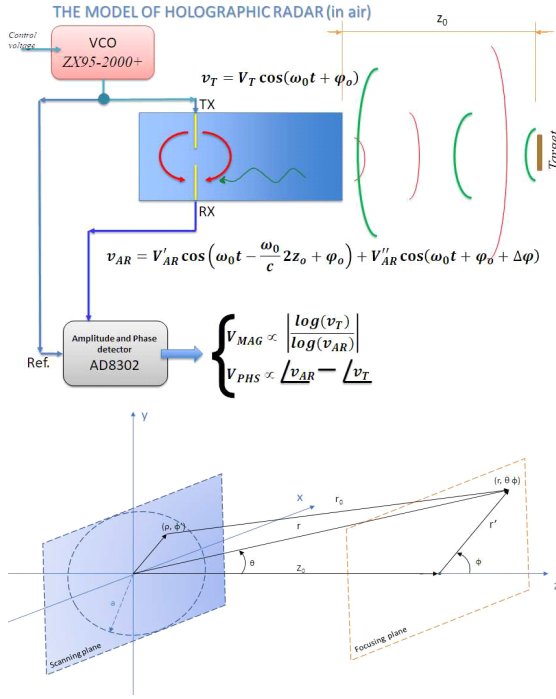


그림 27. 홀로그래피 부표면 레이더<sup>[59]</sup>  
Fig. 27. Holographic subsurface radar<sup>[59]</sup>.

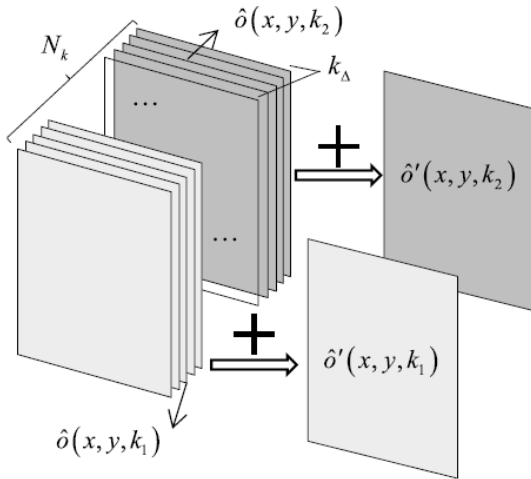


그림 28. Coherent summation 기반 홀로그래피 이미징<sup>[59]</sup>  
Fig. 28. Holography imaging based on coherent summation<sup>[59]</sup>.

래피 이미징을 구현하기 위한 시스템을 Baua 등이 개발하였는데, 그림 30에 나타난 것과 같이 하나의 송신기에 여러 개의 수신기를 사용하였으며, 하나의 주파수를 사용

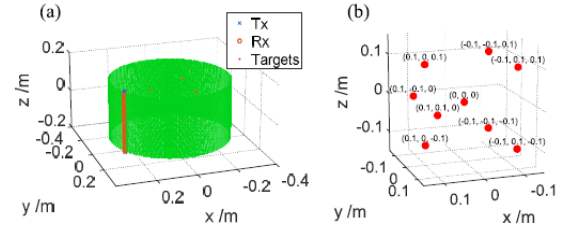


그림 29. 원통형 MIMO 기반 홀로그래피 이미징<sup>[60]</sup>  
Fig. 29. Cylindrical MIMO holography imaging<sup>[60]</sup>.

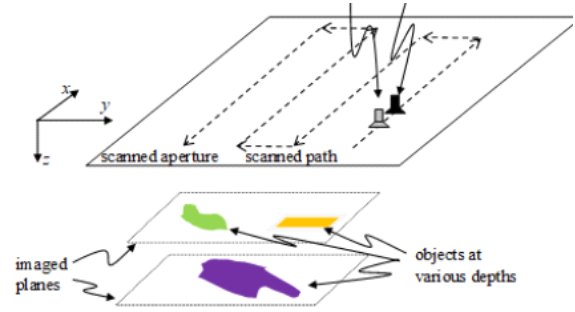


그림 30. Range 해상도를 달성하기 위한 하나의 주파수 기반 마이크로파 홀로그래피 이미징<sup>[62]</sup>  
Fig. 30. Range resolution in holographic imaging using single frequency microwave data<sup>[62]</sup>.

하여 3D 홀로그래피 이미징을 위한 기초 연구를 수행하였다<sup>[62]</sup>.

폴리우레탄 등 폼 절연체를 비파괴 검사하기 위하여 단일 주파수가 아닌 광대역 주파수 신호원을 사용한 마이크로파 홀로그래피 이미징은 많은 연구자들이 연구를 수행하였는데, Chizh 등은 광대역 홀로그램 Autofocusing을 적용하여 폼 절연체의 이미지 재형성을 그림 31과 같은 알고리즘으로 수행하였다<sup>[63]</sup>.

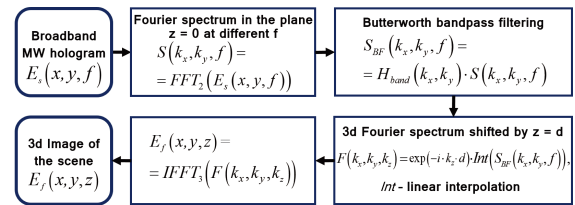


그림 31. 폼 절연체의 비파괴 검사를 위한 광대역 마이크로파 홀로그래피<sup>[63]</sup>  
Fig. 31. Broadband microwave imaging for foam insulation diagnostics<sup>[63]</sup>.



3D 마이크로파 홀로그래피를 생체조직이나 종양 진단을 하기 위하여 최근에 연구가 이루어지고 있는데, 이는 마이크로파 홀로그래피가 근접장의 생체조직 이미징에 매우 적합하며, Point-spread function으로 인하여 연산처리가 매우 빠르고 모델링 오차가 거의 없기 때문에 풀이된다. 그러나 실제 생체 조직의 유전율을 홀로그래피로 계산하면 선형 Forward 모델로 인하여 매우 비현실적인 값(실수부  $< 1$ , 허수부  $> 0$ )을 갖게 된다. Tajik 등은 개선된 최적화 기법과 위상 Unwrapping 알고리즘을 도입하여 정량적 마이크로파 홀로그래피 기법을 개선시키는 데 성공하였다<sup>[64]</sup>. 한편, Wang은 마이크로파 홀로그래피 이미징을 유방암 진단에 적용하기 위하여 다중 주파수를 사용하여 그림 32와 같은 3D 이미징 시스템을 설계하였으며, 다양한 유방암 팬텀에 대한 3D 이미징에 성공하였다<sup>[65]</sup>. 그리고 매우 작은 크기의 유방암세포에 대한 이미징 품질을 높이기 위하여 자기 나노입자를 그림 33과 같이

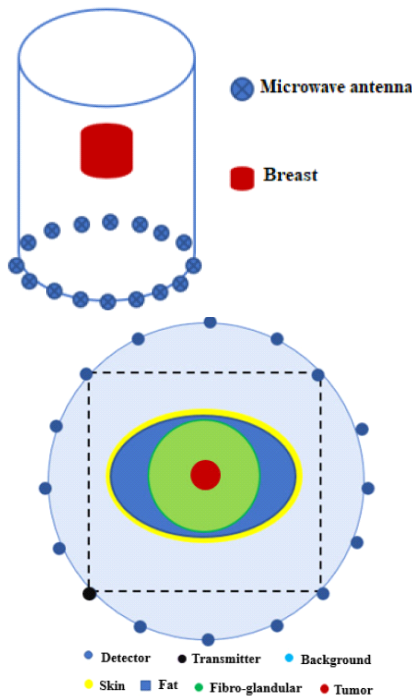


그림 32. 유방암 진단용 다중 주파수 마이크로파 홀로그래피<sup>[65]</sup>

Fig. 32. Microwave holography imaging for breast lesion diagnostics<sup>[65]</sup>.

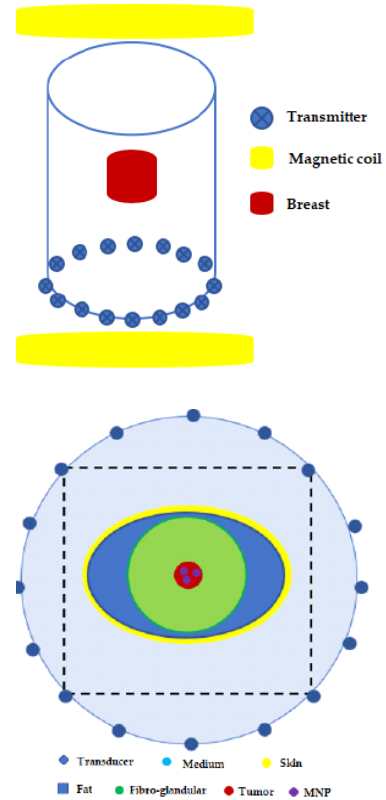


그림 33. 유방암 진단용 자기 나노입자 마이크로파 홀로그래피<sup>[66]</sup>

Fig. 33. Magnetic nanoparticle microwave holography imaging for breast lesion diagnostics<sup>[66]</sup>.

적용하여 구현하여 3D 마이크로파 홀로그래피를 다양한 암진단에 활용할 수 있음을 보이고 있다<sup>[66]</sup>.

본 장에서 다양하게 살펴본 3차원 마이크로파 홀로그래피에 대한 연구는 광학에서 출발하여 현재 지중이나 보이지 않는 곳에 존재하는 다양한 표적 물체를 탐지하기 위하여 진행되어 왔으며, 이를 생체조직까지 확장하여 유방암 진단을 위한 타당성 연구를 지나 뇌졸중 진단을 위한 매우 초보적인 단계에 진입하였다. 생체 아닌 분야에서 많이 진전된 3차원 마이크로파 홀로그래피는 머지않아 생체 분야 특히 뇌졸중 진단을 위한 연구에 적용되어 연구의 진전이 계속될 것으로 기대된다. 표 2에 지금까지 기술한 광학이 아닌 마이크로파를 사용한 3차원 홀로그래피의 다양한 분류 방법에 대한 기술적인 장단점을 요약하였다.

표 2. 3차원 마이크로파 홀로그래피의 다양한 분류  
Table 2. Classification for 3D microwave holography.

Classification criteria	Type	Characteristics
Scanning aperture	Rectangular synthetic aperture <sup>[35]</sup>	Simple integral equation, small processing amount
	Cylindrical synthetic aperture <sup>[58]</sup>	Complex integral equation, large processing amount, better performance
Working frequency	UWB(Confocal method) <sup>[46]</sup>	Reflection coefficient
	Single (Holography) <sup>[47]</sup>	Transmission coefficient, better resolution
Inline holography	Beam splitter used <sup>[49]</sup>	Millimeter-wave
Phase	Indirect holography <sup>[38]~[51]</sup>	Phase not in use, simple system
	Direct holography <sup>[38]</sup>	Phase in use, better resolution
Reconstruction	Qualitative <sup>[44]</sup>	Normal method
	Quantitative <sup>[44]</sup>	Point-spread function, better accuracy
Linearization of inversion algorithm	Born approx <sup>[50]</sup>	Worse
	Rytov approx <sup>[50]</sup>	Better
Phase compensation	Phase compensation holography <sup>[56],[57]</sup>	Better image quality
Mutiple frequency	Mutiple frequency holography <sup>[65],[66]</sup>	Fast processing time, good image quality

#### IV. 결 론

지금까지 뇌졸중 진단을 위한 2차원 마이크로파 이미징 기술에 대한 다양한 연구와 3차원 홀로그래피의 일반적인 여러 분야로의 응용 연구에 대하여 살펴보았다. 마이크로파 기반 3차원 홀로그래피를 뇌졸중 진단에 적용한 연구는 아직 나타나지 않고 있으므로 이 분야로의 집

중적인 연구가 절실한 실정이다. 두부를 모방복제하여 해를 구하는 Forward problem의 연구와 측정된 산란계수로부터 3차원 이미지를 재형성하는 연구는 특성상 많은 관련 연구가 동반되어야 하므로 연구자들의 융합적 사고가 특별히 요구되고 있다.

#### References

- [1] J. C. Lin, M. J. Clarke, "Microwave imaging of cerebral edema," in *Proceedings of the IEEE*, May 1982, vol. 70, no. 5, pp. 523-524.
- [2] I. George Zubal, C. R. Harrell, E. O. Smith, Z. Rattner, G. Gindi, and P. B. Hoffer, "Computerized three-dimensional segmented human anatomy," *Medical Physics*, vol. 21, no. 2, pp. 299-302, Feb. 1994.
- [3] W. Haddad, J. Chang, T. Rosenbury, G. Dallum, P. Welsh, and D. Scott, et al., "Microwave hematoma detector for the rapid assessment of head injuries," *Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, Report No. UCRL-ID-137901*, Feb. 2000.
- [4] C. N. Paulson, J. T. Chang, C. E. Romero, J. Watson, F. J. Pearce, and N. Levin, "Ultra-wideband radar methods and techniques of medical sensing and imaging," in *Proceeding of the SPIE 6007, Smart Medical and Biomedical Sensor Technology III*, Nov. 2005, vol. 6007, p. 60070L.
- [5] S. Y. Semenov, D. R. Corfield, "Microwave tomography for brain imaging: Feasibility assessment for stroke detection," *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2008, p. 254830, May 2008.
- [6] D. Ireland, M. Bialkowski, "Feasibility study on microwave stroke detection using a realistic phantom and the FDTD method," in *2010 Asia-Pacific Microwave Conference*, Yokohama, 2010, pp. 1360-1363.
- [7] A. Zakaria, C. Gilmore, and J. LoVetri, "Finite-element contrast source inversion method for microwave imaging," *Inverse Problems*, vol. 26, no. 26, p. 115010, 2010.

- [8] R. Scapaticci, L. Di Donato, I. Catapano<sup>1</sup>, and L. Crocco, "A feasibility study on microwave imaging for brain stroke monitoring," *Progress in Electromagnetics Research B*, vol. 40, pp. 305-324, 2012.
- [9] M. Jalilvand, X. Li, and T. Zwick, "A model approach to the analytical analysis of stroke detection using UWB radar," in *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP)*, Gothenburg, 2013, pp. 1555-1559.
- [10] A. Fhager, Y. Yu, T. McKelvey, and M. Persson, "Stroke diagnostics with a microwave helmet," in *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Gothenburg, 2013, pp. 845-846.
- [11] S. Mustafa, B. Mohammed, and A. Abbosh, "Novel pre-processing techniques for accurate microwave imaging of human brain," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 460-463, 2013.
- [12] N. Priyadarshini, E. Rajkumar, "Finite element modeling of scattered electromagnetic waves for stroke analysis," in *2013 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Osaka, 2013, pp. 2404-2407.
- [13] A. T. Mobashsher, A. M. Abbosh, and Y. Wang, "Microwave system to detect traumatic brain injuries using compact unidirectional antenna and wideband transceiver with verification on realistic head phantom," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 62, no. 9, pp. 1826-1836, Sep. 2014.
- [14] A. T. Mobashsher, K. S. Bialkowski, A. M. Abbosh, and S. Crozier, "Design and experimental evaluation of a non-invasive microwave head imaging system for intracranial haemorrhage detection," *PLOS ONE*, vol. 11, no. 4, p. e0152351, Apr. 2016.
- [15] I. Bisio, A. Fedeli, F. Lavagetto, M. Pastorino, A. Randazzo, and A. Sciarone, "Brain stroke detection by means of complex dielectric permittivity reconstruction at microwaves," in *2017 IEEE MIT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications(IMWS-AMP)*, Pavia, 2017, pp. 1-3.
- [16] A. M. Qureshi, Z. Mustansar, "Levels of detail analysis of microwave scattering from human head models for brain stroke detection," *PeerJ*, vol. 5, p. e4061, 2017.
- [17] M. Bjelogrić, B. Fuchs, J. P. Thiran, and M. Mattes, "Comparison of regularization techniques for microwave imaging of brain stroke," in *12th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP 2018)*, London, 2018, pp. 1-5.
- [18] A. Munawar Qureshi, Z. Mustansar, and A. Maqsood, "Analysis of microwave scattering from a realistic human head model for brain stroke detection using electromagnetic impedance tomography," *Progress in Electromagnetics Research M*, vol. 52, pp. 45-56, 2016.
- [19] M. Klemm, J. A. Leendertz, D. Gibbins, I. J. Craddock, A. Preece, and R. Benjamin, "Microwave radar-based differential breast cancer imaging: Imaging in homogeneous breast phantoms and low contrast scenarios," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 58, no. 7, pp. 2337-2344, Jul. 2010.
- [20] N. Joachimowicz, C. Pichot, and J. P. Hugonin, "Inverse scattering: An iterative numerical method for electromagnetic imaging," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 39, no. 12, pp. 1742-1753, Dec. 1991.
- [21] J. De Zaeytijd, A. Franchois, C. Eyraud, and J. M. Geffrin, "Full-wave three-dimensional microwave imaging with a regularized Gauss-Newton method: Theory and experiment," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 11, pp. 3279-3292, Nov. 2007.
- [22] D. Ireland, M. E. Bialkowski, "Microwave head imaging for stroke detection," *Progress in Electromagnetics Research M*, vol. 21, pp. 163-175, 2011.
- [23] B. J. Mohammed, A. M. Abbosh, S. Mustafa, and D. Ireland, "Microwave system for head imaging," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 1, pp. 117-123, Jan. 2014.
- [24] D. Ireland, K. Bialkowski, and A. Abbosh, "Microwave

- imaging for brain stroke detection using born iterative method," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 7, no. 11, pp. 909-915, Aug. 2013.
- [25] J. W. Kim, S. K. Keon, J. W. Ok, E. N. You, D. J. Kim, and Y. W. Sim, et al., "Real-time image reconstruction for compact Drone-Borne SAR using GPU signal processing," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 9, pp. 780-783, Sep. 2019.
- [26] D. Gabor, "A new microscopic principle," *Nature*, vol. 161, pp. 777-778, Jan. 1948.
- [27] E. N. Leith, J. Upatnieks, "Reconstructed wavefronts and communication theory," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 52, no. 10, pp. 1123-1130, 1962.
- [28] R. P. Dooley, "X-band holography," in *Proceedings of the IEEE*, Nov. 1965, vol. 53, no. 11, pp. 1733-1735.
- [29] K. Iizuka, "Microwave holograms and microwave reconstruction," *Electronics Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 26-28, Jan. 1969.
- [30] N. H. Farhat, W. R. Guard, "Millimeter wave holographic imaging of concealed weapons," in *Proceedings of the IEEE*, Sep. 1971, vol. 59, no. 9, pp. 1383-1384.
- [31] N. H. Farhat, "Microwave holography and its applications in modern aviation," in *Engineering Applications of Holography Symposium Proceedings*, 1972, pp. 295-314.
- [32] G. Tricoles, N. H. Farhat, "Microwave holography: Applications and techniques," in *Proceedings of the IEEE*, Jan. 1977, vol. 65, no. 1, pp. 108-121.
- [33] R. D. Orme, A. P. Anderson, "High resolution microwave holographic technique: Application to the imaging of objects obscured by dielectric media," in *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, Apr. 1973, vol. 120, no. 4, pp. 401-406.
- [34] G. Junkin, A. P. Anderson, "Limitations in microwave holographic synthetic aperture imaging over a lossy half space," in *IEE Proceedings F(Communications, Radar and Signal Processing)*, Aug. 1988, vol. 135, no. 4, pp. 321-329.
- [35] D. M. Sheen, D. L. McMakin, and T. E. Hall, "Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 49, no. 9, pp. 1581-1592, Sep. 2001.
- [36] V. V. Chapursky, S. I. Ivashov, V. V. Razevig, A. P. Sheyko, and I. A. Vasilyev, "Microwave hologram reconstruction for the RASCAN type subsurface radar," in *Proceedings of the Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar(GPR2002)*, 2002, vol. 4758, pp. 520-526.
- [37] T. Lu, C. Snapp, T. H. Chao, A. Thakoor, T. Bechtel, and S. Ivashov, et al., "Evaluation of holographic subsurface radar for NDE of space shuttle thermal protection tiles," in *Proceedings of the Sensors and Systems for Space Applications*, May 2007, vol. 6555, p. 65550S.
- [38] J. Laviada, Y. Álvarez-López, A. Arboleya-Arboleya, C. Garcia-González, and F. Las-Heras, "Inverse scattering with phase retrieval based on indirect holography via synthesised plane-waves," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 6, no. 12, pp. 1389-1398, Dec. 2012.
- [39] L. Wang, A. M. Al-Jumaily, and R. Simpkin, "Holographic microwave imaging array for brain stroke detection," *Journal of Signal and Information Processing*, vol. 4, no. 3B, pp. 96-101, 2013.
- [40] L. Wang, R. Simpkin, and A. M. Al-Jumaily, "Three-dimensional far-field holographic microwave imaging: An experimental investigation of dielectric object," *Progress in Electromagnetics Research B*, vol. 61, pp. 169-184, 2014.
- [41] R. K. Amineh, M. Ravan, A. Khalatpour, and N. K. Nikolova, "Three-dimensional near-field microwave holography using reflected and transmitted signals," *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, vol. 59, no. 12, pp. 4777-4789, Dec. 2011.

- [42] B. Lao, T. An, and Y. Gong, "Three-dimensional short-range microwave holographic imaging algorithm and imaging system scheme," in *2015 4th International Conference on Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, Harbin, 2015, pp. 1345-1350.
- [43] H. Cheng, J. Gu, Y. Cheng, S. Li, and H. Sun, "Multi-section auto-focus millimeter-wave holography," in *2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, San Francisco, CA, 2016, pp. 1-3.
- [44] D. Tajik, J. R. Thompson, A. S. Beaverstone, and N. K. Nikolova, "Real-time quantitative reconstruction based on microwave holography," in *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (AP-SURSI)*, Fajardo, 2016, pp. 851-852.
- [45] S. Ivashov, A. Zhuravlev, M. Chizh, and V. Razevig, "High resolution MW holographic system for NDT of dielectric materials and details," in *2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, Hong Kong, 2016, pp. 1-5.
- [46] Y. Medina, M. Augusto, and A. V. Paz, "Microwave imaging for breast cancer detection: Experimental comparison of confocal and holography algorithms," in *2016 IEEE ANDESCON*, Arequipa, 2016, pp. 1-4.
- [47] I. Asghar, A. A. Khan, and A. K. Brown, "Multistatic holographic imaging for breast cancer detection," in *2018 15th European Radar Conference (EuRAD)*, Madrid, 2018, pp. 14-17.
- [48] D. Tajik, F. Foroutan, D. S. Shumakov, A. D. Pitcher, and N. K. Nikolova, "Real-time microwave imaging of a compressed breast phantom with planar scanning," *IEEE Journal of Electromagnetics, RF, and Microwaves in Medicine and Biology*, vol. 2, no. 3, pp. 154-162, Sep. 2018.
- [49] C. Li, X. Gao, and G. Y. Fang, "Millimeter-wave inline holography with step-frequency continuous-wave," in *2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, Copenhagen, 2016, pp. 1-2.
- [50] D. Tajik, D. S. Shumakov, and N. K. Nikolova, "An experimental comparison between the born and Rytov approximations in microwave tissue imaging," in *2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, Honolulu, HI, 2017, pp. 1391-1393.
- [51] S. Costanzo, G. D. Massa, "Microwave imaging with spatial-domain indirect holography," in *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 2017, pp. 1412-1414.
- [52] V. V. Razevig, A. V. Zhuravlev, A. S. Bugaev, M. A. Chizh, and S. I. Ivashov, "Imaging under irregular surface using microwave holography," in *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS-FALL)*, Singapore, 2017, pp. 172-177.
- [53] V. R. Gowda, M. F. Imani, T. Sleasman, O. Yurduseven, and D. R. Smith, "Focusing microwaves in the fresnel zone with a cavity-backed holographic metasurface," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 12815-12824, 2018.
- [54] J. W. Wu, R. Y. Wu, X. C. Bo, L. Bao, X. J. Fu, and T. J. Cui, "Synthesis algorithm for near-field power pattern control and its experimental verification via metasurfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 2, pp. 1073-1083, Feb. 2019.
- [55] Y. Li, A. Li, T. Cui, and D. F. Sievenpiper, "Multi-wavelength multiplexing hologram designed using impedance metasurfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 11, pp. 6408-6413, Nov. 2018.
- [56] C. H. Tsai, J. Chang, L. O. Yang, and S. Y. Chen, "3-D microwave holographic imaging with probe and phase compensations," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 1, pp. 368-380, Jan. 2018.
- [57] C. H. Tsai, J. Chang, L. O. Yang, and S. Y. Chen, "Dual-probe probe- and phase-compensated reflection-coefficient-only 3-D microwave holographic imaging," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, no. 3, pp. 1884-1897, Mar. 2019.
- [58] H. Wu, R. K. Amineh, and M. Ravan, "Near-field ho-



- lographic microwave imaging using data collected over cylindrical apertures," in *2018 18th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics(ANTEM)*, Waterloo, ON, 2018, pp. 1-2.
- [59] G. Borgioli, L. Bossi, L. Capineri, P. Falorni, T. Bechtel, and F. Crawford, et al., "A hologram reconstruction algorithm for landmine recognition and classification based on microwave holographic radar data," in *2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama)*, Toyama, 2018, pp. 1938-1944.
- [60] J. Gao, Y. Qin, B. Deng, H. Wang, and X. Li, "A novel method for 3-D millimeter-wave holographic reconstruction based on frequency interferometry techniques," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 3, pp. 1579-1596, Mar. 2018.
- [61] S. Baua, R. K. Amineh, "Achieving range resolution in holographic imaging using single frequency microwave data," in *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Boston, MA, 2018, pp. 1803-1804.
- [62] J. Gao, B. Deng, Y. Qin, H. Wang, and X. Li, "An efficient algorithm for MIMO cylindrical millimeter-wave holographic 3-D imaging," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 11, pp. 5065-5074. Nov. 2018.
- [63] M. Chizh, A. Zhuravlev, V. Razevig, and S. Ivashov, "Broadband microwave imaging for foam insulation diagnostics," in *2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium(PIERS-Toyama)*, Toyama, 2018, pp. 1887-1894.
- [64] D. Tajik, A. D. Pitcher, D. S. Shumakov, N. K. Nikolova, and J. W. Bandler, "Enhancing quantitative microwave holography in tissue imaging," in *12th European Conference on Antennas and Propagation(EuCAP 2018)*, Apr. 2018.
- [65] L. Wang, "Multi-frequency holographic microwave imaging for breast lesion detection," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 83984-83993, Jun. 2019.
- [66] L. Wang, "Enhanced holographic microwave imaging for MNP target tumor detection," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 37167-37180, Mar. 2019.

## 조 춘 식 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-0833-5254>



1887년 2월: 서울대학교 제어계측공학과 (공학사)

1998년 12월: 미국 Colorado 대학교 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)

1987년~1993년: LG 정보통신

1999년~2003년: 팬택앤큐리텔

2004년 3월~현재: 한국항공대학교 항공

전자정보공학부 교수

[주 관심분야] RFIC 설계, Analog IC 설계, 전파의료, 레이더 시스템, 전파 이미징