

콘크리트 구조물의 결함발견을 위한 3차원 초단파 영상처리기술의 개발

김유진 · 김용곤^{†*}

캘리포니아 주립대학 어바인 캠퍼스 · *한경대학교 안전공학과
(2003. 6. 7. 접수 / 2003. 10. 14. 채택)

3D Microwave Imaging Technology for Damage Detection of Concrete Structures

Yoo Jin Kim · Yongon Kim^{†*}

University of California at Irvine

^{*}Department of Safety Engineering, Hankyong National University
(Received June 7, 2003 / Accepted October 14, 2003)

Abstract : Various nondestructive evaluation (NDE) techniques have been studied to locate steel rebars or dowel, and to detect invisible damage such as voids and cracks inside concrete and debonding between rebars and concrete caused by corrosions and earthquakes. In this study, the authors developed 3-dimensional (3D) electromagnetic (EM) imaging technology to detect such damage and to identify exact location of steel rebars or dowel. The authors have developed sub-surface two-dimensional (2D) imaging technique using tomographic antenna array in previous works. In this study, extending the earlier analytical and experimental works on 2D image reconstruction, a 3D microwave imaging system using tomographic antenna array was developed, and multi-frequency technique was applied to improve quality of the reconstructed image and to reduce background noises. This paper presents the analytical expressions of numerical focusing procedures for 3D image reconstruction and numerical simulation to study the resolution of the system and the effectiveness of multi-frequency technique. Also, the design of 4?4 antenna array with switching devices is introduced as a preliminary study for the final design of whole array.

Key Words : microwave, non-destructive evaluation (NDE), 3D imaging technology, damage detection

1. 서 론

콘크리트 구조물은 열화정도나 시공상의 부실로 인하여 여러 가지 결함이 내부에 발생하기 쉬운 구조로 되어있다. 이와 같은 결함에는 내부공극, 균열, 철근과 콘크리트 사이의 박락 등이 있으며 과도한 하중, 철근의 부식, 지진의 영향 등이 결함을 일으키고 결과적으로 구조물의 수명을 단축하는 역할을 하고 있다. 그리하여 구조물 내부의 결함이나 철근의 위치를 탐지하는 등 비파괴시험의 필요성이 대두되고 있고 합성재료인 콘크리트 구조물의 특성상 시험 목적에 따라 여러가지 비파괴시험방법이 부분적으

로 사용되고 있는 상황이다. 이러한 가운데 초단파를 이용하는 비파괴시험방법이 의학계에서 암세포 발견 등에 시도되고 있는 것에 착안하여 구조물 안전진단 분야에서도 최근 관심을 불러일으키고 있다.

이미 초단파를 이용한 2차원 영상처리방법이 콘크리트구조물의 검사에 적합하게 개발되어 FRP (Fiber Reinforced Polymer) 섬유를 이용한 보강단면에 대한 접착부의 검사에 적용된 사례가 있다. 과거의 연구에서는 공극 및 FRP 섬유와 콘크리트 표면 사이의 부착과피 부분이 검사되었다. 본 연구에서는 개발된 2차원 영상화 방법을 확장하여 3차원 영상처리방법을 개발하고 콘크리트 구조물 내의 결함을 탐지하기 위한 안테나를 구성하였다^{1,4)}. Fig. 1은 3차원적인 구조물 내부 탐사방법을 도식적으로 보

[†]To whom correspondence should be addressed.
yongon@hnu.hankyong.ac.kr

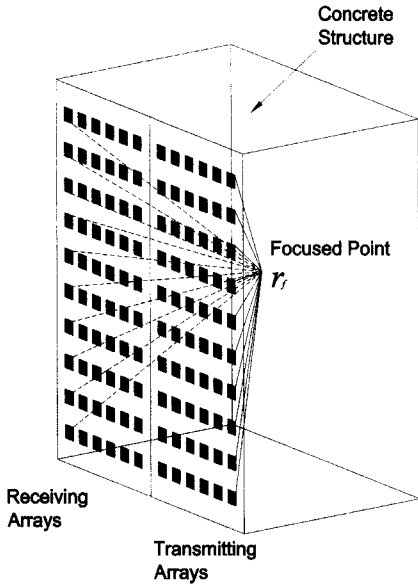


Fig. 1. Use of 3D microwave reflection arrays to focus waves on sub-surface point.

여주고 있다. 평면 안테나의 조합들이 초단파 신호를 보내고 받는데 이용되고 있으며 구조물 내부의 검사하고자 하는 위치에 초점이 맞도록 수치적 초점조절시스템을 이용하여 소프트웨어적으로 조절이 되었다. 그렇게 함으로써 초점을 고정시키지 않고 송신부와 수신부의 초점을 동시에 조절하여 구조물 내부의 모든 부분을 검색할 수 있게 되었다. 그리고 다중주파수 방식을 이용함으로써 데이터의 오류를 제거하고 해상도를 향상시켜 구조물 내부의 결함이나 내부모습을 탐지할 수 있는 3차원 영상장치를 개발하였다. 수치적 초점조절 시스템과 다중주파수 방식의 성능은 수치적 시뮬레이션을 통하여 검증되었다.

2. 수치적 연구와 시스템의 구성

2.1. 수치적 연구

Fig. 2에 보이는 것과 같이 측정시스템은 송신부에 $N_k \times N_l$ 요소를, 수신부에 $N_m \times N_n$ 요소를 사용한다. 측정시에는 $N_l \times N_n$ 행렬이 사용되며 N_l 는 송신요소의 숫자이고 N_n 는 수신요소의 숫자이다. 각각의 모든 송신요소행에 대하여 N_r 수신요소열이 검색되어 $N_l \times N_r$ 행렬이 작성되는 것이다.

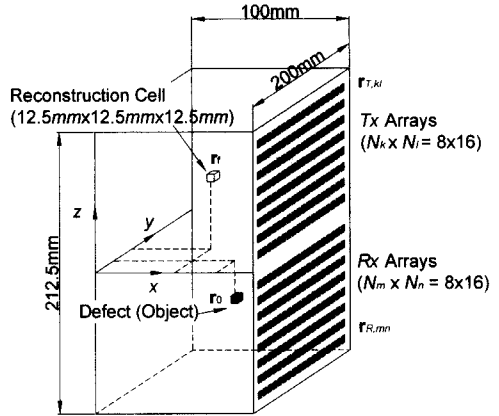


Fig. 2. Measurement geometry for planar transmitting and receiving arrays.

전자기 보상의 원리에 의하여 결함에서의 신호는 동등한 강도의 분포전류 $J_{eq}(x_0, y_0, z_0)$ 를 일으키고, 이 분포전류가 형상화과정을 거치면서 전자기적인 형상이 맏히게 된다⁵⁾. 형상재현 알고리즘은 송신 및 수신 안테나 한 개씩의 조합에 의해 형상을 재현하게 된다. 그러한 형상화 과정이 모든 배열안테나에서 이뤄지고 다시 전체가 조합되어 한 점에 초점을 맞추게 된다. 측정행렬을 수치적 방법으로 처리함으로써 이러한 과정이 이뤄질 수 있는 것이다. 초점조절시스템은 각 점의 데이터를 역산하는 과정이다. 각 점의 전기장은 Green의 정리에 의해 e^{jk_r}/r 에 비례하므로 송신점 $r_{Tk}(x_{Tk}, y_{Tk}, z_{Tk})$ 에서 $r_f(x_f, y_f, z_f)$ 로 초점이 모아질 때 임의의 점 $r_i(x_i, y_i, z_i)$ 에서 입사되는 전기장은 식 (1)과 같이 나타내어진다.

$$E_i(x_i, y_i, z_i) = \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{k=1}^{N_k} I_{Tk}(x_f, y_f, z_f) \cdot \frac{e^{-jk_e |r_{Tk} - r_i|}}{|r_{Tk} - r_i|} \quad (1)$$

여기서, k_e 는 유효파수(effective wave number)이며, $I_{Tk}(x_f, y_f, z_f)$ 은 초점조절 연산자로서 식 (2)와 같이 나타내어진다.

$$I_{Tk}(x_f, y_f, z_f) = \frac{|r_{Tk} - r_f|}{e^{-jk_e |r_{Tk} - r_f|}} \quad (2)$$

결함이 $r_0(x_0, y_0, z_0)$ 에 있다면 측정점 $r_{Rmn}(x_{Rmn}, y_{Rmn}, z_{Rmn})$ 에서의 산란된 신호는 식 (3)과 같다.

$$E_s(x_{Rmn}, y_{Rmn}, z_{Rmn}) = E_s(x_0, y_0, z_0) \cdot I_{obj} \cdot \frac{e^{-jk_r |r_{Rmn} - r_0|}}{|r_{Rmn} - r_0|} \quad (3)$$

여기서, I_{obj} 는 재료의 전자기적 성질과 관련되는 상수이며 본 논문에서는 콘크리트와 공기의 유전율 (dielectric constant) 의 차이인 4.0이 적용되었다.

수신된 영역인 $(x_{Rmn}, y_{Rmn}, z_{Rmn})$ 의 초점을 해당 되는 측정점 (x_f, y_f, z_f) 에 모으는 데에 있어서 (x_f, y_f, z_f) 에서의 전자기적 영상 $E_f(x_f, y_f, z_f)$ 는 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$E_f(x_f, y_f, z_f) = \sum_{n=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{N_y} E_s(x_{Rmn}, y_{Rmn}, z_{Rmn}) \cdot I_{Rmn}(x_f, y_f, z_f) \quad (4)$$

여기서, 초점조정 연산자인 $I_{Rmn}(x_f, y_f, z_f)$ 은 식 (5)로 주어진다.

$$I_{Rmn}(x_f, y_f, z_f) = \frac{|r_{Rmn} - r_f|}{e^{-jk_r |r_{Rmn} - r_f|}} \quad (5)$$

식 (1)에서 식 (5)까지의 과정은 다음의 식 (6)으로 나타내어질 수 있다.

$$E_f(x_f, y_f, z_f) = \sum_{n=1}^{N_x} \sum_{m=1}^{N_y} \left[I_{Rmn}(x_f, y_f, z_f) \cdot \sum_{p=1}^{N_z} \{ I_{obj,p} \cdot \frac{e^{-jk_r |r_{Rmn} - r_{0,p}|}}{|r_{Rmn} - r_{0,p}|} \cdot \sum_{k=0}^{N_\theta} \sum_{l=1}^{N_\phi} I_{Thk}(x_f, y_f, z_f) \cdot \frac{e^{-jk_r |r_{Thk} - r_{0,p}|}}{|r_{Thk} - r_{0,p}|} \} \right] \quad (6)$$

식 (6)을 측정행렬이 포함된 행렬식으로 나타내기 위해서는 송신 및 수신배열의 첨자는 식 (7) 및 (8)과 같이 각각 조정되어야 한다. 여기서, 첨자 r 와 r 은 1부터 128까지의 정수를 의미한다.

$$\Gamma_{Thk} \rightarrow \Gamma_{Tr} \quad (7)$$

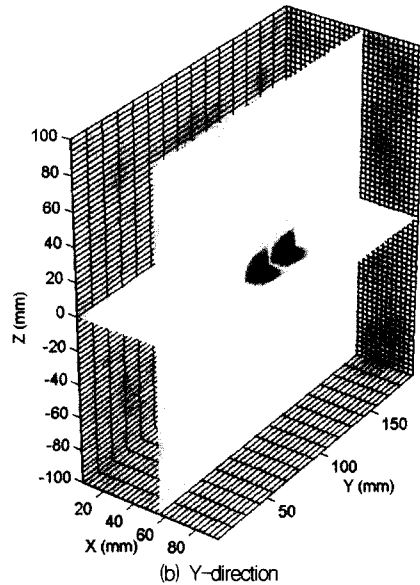
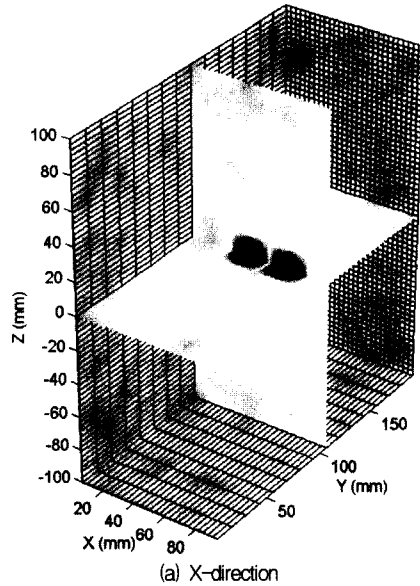
$$\Gamma_{Rmn} \rightarrow \Gamma_{Rr} \quad (8)$$

행렬식은 다음의 식 (9)와 같이 나타내어지며 최종적인 측정행렬의 크기는 128×128 이 된다.

$$E_f(x_f, y_f, z_f) = [I_{Tr} I_{Tr} L I_{Tr}] \begin{bmatrix} E_{s, TrR} & E_{s, TrR} & L & E_{s, TrR} \\ E_{s, TrR} & E_{s, TrR} & L & E_{s, TrR} \\ M & M & O & M \\ E_{s, TrR} & E_{s, TrR} & L & E_{s, TrR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Rr} \\ I_{Rr} \\ M \\ I_{Rr} \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.2. 해상도 검증

앞 절에서 유도된 식을 적용하여 송신 및 수신 안테나로 이루어진 평면배열을 구성하였다. 각각



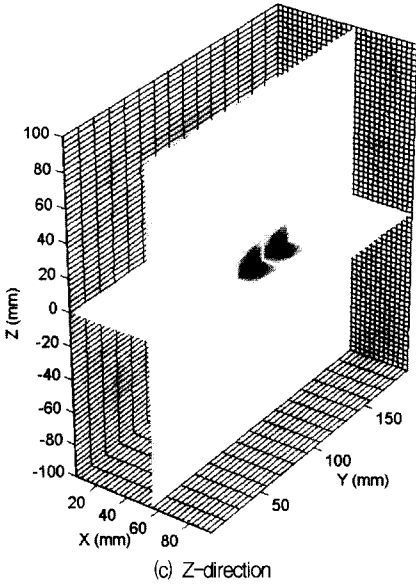


Fig. 3. Resolution of the system (25mm) at 5.2GHz.

128개의 안테나로 이루어져 있고 주파수는 5.2GHz, 콘크리트에서의 파장, λ_c 은 25.06mm이다. 수식적으로 얻어진 데이터를 이용한 시뮬레이션을 실시하여 해상도를 검증하였다. 각 축을 따라 서로 25mm 떨어진 측정 대상체 중앙의 두 지점을 가정하여 검증을 실시하였다. Fig. 3과 같이 초점조절시스템에 의하여 얻어진 결과는 분해능(25mm)이 파장을 넘지 않는 만족스러운 결과가 얻어졌다.

3. 다중주파수 방법의 적용

오류데이터를 제거하여 재현된 형상의 정확성을 높이기 위해 한정된 주파수대역에서의 다중주파수 방법이 적용되었다. 이 방법은 설계주파수 근방의 주파수들을 측정주파수로 사용하여 안테나배열에서 송신과 수신에 이용하는 것이다. 각기 다른 주파수로부터 나온 신호들을 평균함으로써 철근으로 인한 간섭효과를 포함한 데이터오류를 제거하고 주파수/잡음 비를 향상시킬 수 있는 것이다⁶⁾. 다중주파수의 사용으로 인하여 입사 및 산란된 신호와 수치적 초점연산자를 다음 식 (10)과 같이 주파수의 함수가 되도록 조절하는 효과가 있다.

$$\begin{aligned}
 E_i(x_i, y_i, z_i) &\rightarrow E_i(x_i, y_i, z_i, k_{eN}) \\
 E_s(x_{Rmn}, y_{Rmn}, z_{Rmn}) &\rightarrow E_s(x_{Rmn}, y_{Rmn}, z_{Rmn}, k_{eN}) \\
 E_f(x_f, y_f, z_f) &\rightarrow E_f(x_f, y_f, z_f, k_{eN}) \\
 I_{Tkl, m}(x_f, y_f, z_f) &\rightarrow I_{Tkl, Rmn}(x_f, y_f, z_f, k_{eN})
 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, k_{eN} 은 N번째 주파수의 유효파수이며 식 (11)과 같이 주어진다.

$$k_{eN} = kN\sqrt{\epsilon_r} \quad (11)$$

여기서, $\sqrt{\epsilon_r}$ 은 유전상수이며, $r_f(x_f, y_f, z_f)$ 에서의 전자 기적 영상 $E_f(x_f, y_f, z_f)$ 는 식 (12) 혹은 (13)과 같이 나타내어진다.

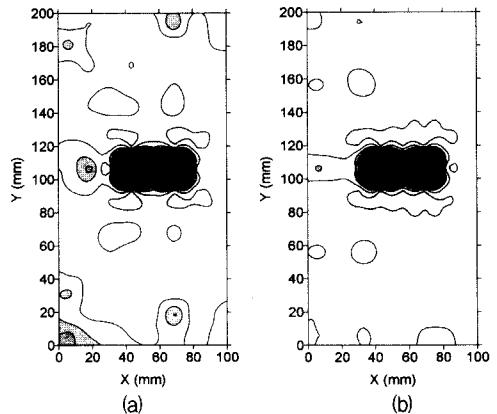
$$\begin{aligned}
 E_f(x_f, y_f, z_f) &= \sum_{N=1}^{NFreq} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N [I_{Rmn}(x_f, y_f, z_f, k_{en}) \\
 &\cdot \sum_{\beta=1}^{N_n} \left\{ I_{obi, \beta} \cdot \frac{e^{-jk_{en} |r_{Rmn} - r_{0, \beta}|}}{|r_{Rmn} - r_{0, \beta}|} \cdot \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{k=1}^{N_k} \right. \\
 &\left. I_{TKl}(x_f, y_f, z_f, k_{eN}) \frac{e^{-jk_{en} |r_{TKl} - r_{0, \beta}|}}{|r_{TKl} - r_{0, \beta}|} \right\}] \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$E_f(x_f, y_f, z_f) = \sum_{N=1}^{NFreq} [I_{T1} \ I_{T2} \ L \ I_{Tl}]$$

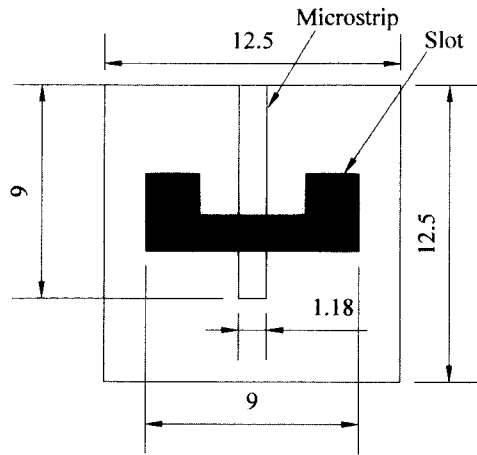
$$\begin{bmatrix} E_s, T1R \\ E_s, T2R \\ M \\ E_s, TlR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s, T1R \\ E_s, T2R \\ O \\ E_s, TlR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ L \\ M \\ L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_s, T1R \\ E_s, T2R \\ M \\ E_s, TlR \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{R1} \\ I_{R2} \\ M \\ I_{Rr} \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서, $NFreq$ 는 사용된 주파수의 개수이다.

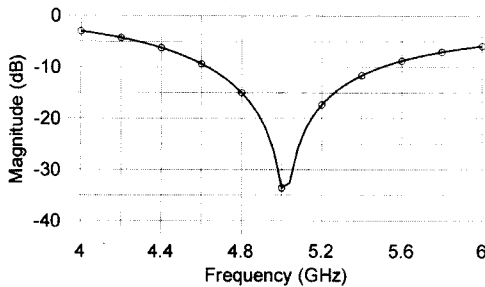
다중주파수방식이 사용되어 25mm 떨어진 두 점에 대한 형상화 작업이 실시되었다. 서로 다른 네가지 주파수 4.6, 4.8, 5.0, 5.2GHz가 사용되었다. Fig. 4의 (a)와 (b)의 비교에서 보이는 바와 같이 다중주파수방식의 사용으로 신호대 잡음비(S/N ratio)가 약 50% 가량 증가하여 명확한 형상이 얻어질 수 있었다.



Using single frequency (5.2GHz). Using multi-frequencies (4.6, 4.8, 5.0, and 5.2GHz)
 Fig. 4. Comparison of single/multi illuminating frequency (image of two point-like objects).



(a) Geometry of slot antenna.



(b) S11 parameter (reflection measurement).

Fig. 5. Design of single slot-antenna element.

4. 안테나 배열의 설계

성능실험을 위하여 4×4 모양의 안테나 배열이 설계되었다. 전체 배열은 4×4 안테나 배열 16개의 조합으로 이루어져 있으므로 4×4 안테나 배열의 설계가 완성되면 전체배열은 확장에 의하여 얻어질 수 있다. 설계 주파수는 5.2GHz로서 콘크리트 구조물의 검사를 위하여 구성되었다($\epsilon_r = 5.3$). 먼저, 단일 안테나요소가 홈 형태의 안테나로 구성되고, 형태와 투사능력을 감안한 단일 홈 형태의 안테나들이 Fig. 5와 같이 설계되었다.

큰 배열의 설계에서는 두가지 고려할 사항이 있다. 개폐(switching)작용과, 데이터 전송(feeding)이다. Fig. 6에 보이는 바와 같이 정류기의 주파수검색은 간단한 개폐작용을 보여주고 있다.

그러나 데이터는 정류기에서의 손실로 인하여 송신부에서 각각의 안테나까지 완전히 전송될 수가 없다. 각 정류기에서 3dB의 손실이 있다면 128개 요소에서 모두 21dB의 손실이 생긴다. 또한 여기에는

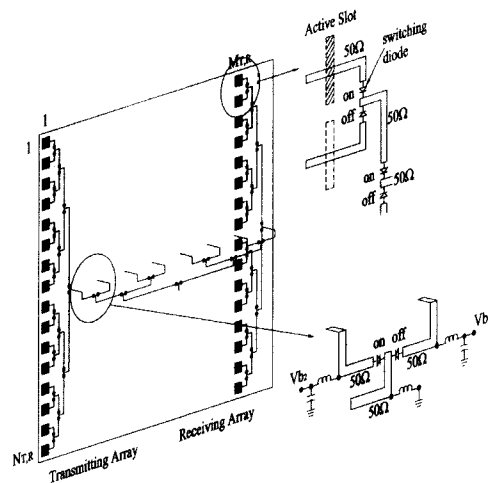
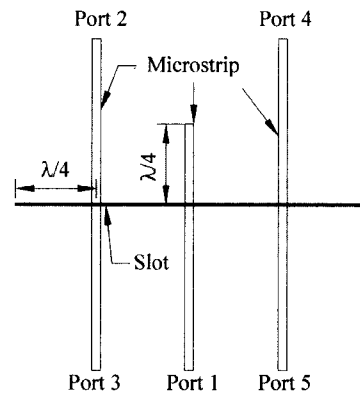
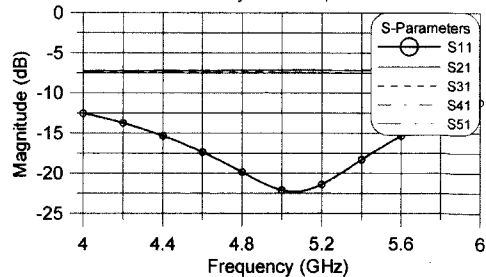


Fig. 6. Multiplexing technique using diodes



(a) Geometry of example.



(b) S-parameters (reflection and transmission parameters)
Fig. 7. Microstrip-slot transition example.

총 256개로서 너무 많은 SPDT 정류기들이 필요하게 된다. 그래서 본 연구에서는 다중송신방법을 변환하여 개폐작용을 이용하였다. 그렇게 함으로써 모든 교차점에 SPDT 정류기를 사용하지 않고 요소의 입구에 1개의 SPDT정류기만 사용할 수 있게 되었다. SPDT 정류기로 인한 손실을 줄이고 전송부의

상태를 일치시킬 수 있게 된 것이다. 전체로 보면 128개의 SPDT 정류기와 정류기를 통제하기 위한 256개의 단자가 사용되었다.

두 번째 다중주파수방식에서 고려할 사항은 신호를 손실 없이 전달하고 주파수대역을 유지하기 위한 데이터 전송네트워크이다. T형의 연결부는 커패시터 역할을 하기 때문에 T형 연결부에서 주파수대역이 달라진다. 이 문제를 해결하기 위해 그림 7에 보이는 예와 같이 주파수대역을 넓힐 수 있도록 얇은 띠형상과 홈형상을 가진 전송네트워크를 사용하였다^{7,8)}.

신호가 포트 1로부터 포트 2에서 5까지로 각각 전달되어갈 때 띠형상에서 홈형상으로 변환되어 가다가 최종적으로는 다시 홈형상에서 띠형상으로 변환되는 것이다. 회로의 성질을 설명하기 위하여 변환상수 S_{ij} 와 반사상수 S_{ii} 이 사용된다. 띠형상에서 홈형상으로의 변환은 Fig. 7(b)와 같이 가장 적절한 주파수를 선택하여 설계되며 이 경우는 5GHz이다.

안테나요소하나의 송수신조건을 만족하기 위하여 ADS (Automated Design System)을 이용한 최적화방법이 사용되어 띠형상과 홈형상의 길이와 너비를 최적화하였다. Fig. 8은 형상변환방법을 이용하여 두 개의 단자를 갖는 4×4 안테나요소를 최적화한 결과를 보인 것이다. 결과적으로 S_{11} 은 5.2GHz

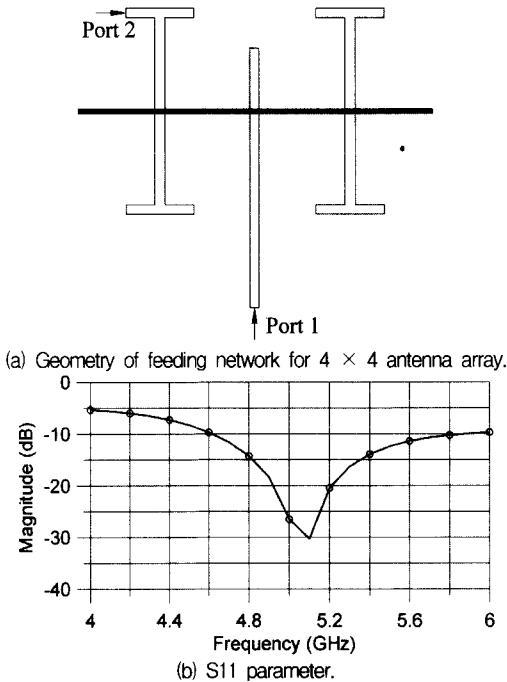


Fig. 8. Optimized microstrip-slot transition.

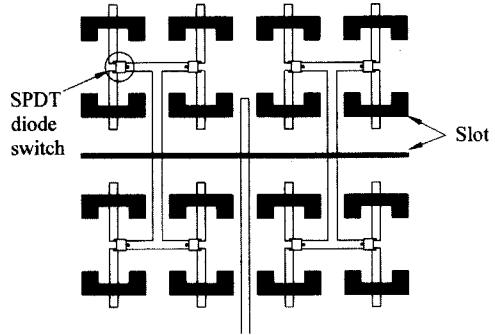


Fig. 9. Design of 4 × 4 antenna array

에서 -20dB이하이며 4.5GHz에서 6GHz까지의 주파수대역을 갖는다.

개폐작용과 띠-홈 변환작용을 전송방법으로 이용하는 변환된 주파수조절방법에 의하여 4×4 안테나 배열이 Fig. 9와 같이 완성되었다. 향후 연구에서는 이 배열을 이용하여 전체 안테나를 직접 제작하여 구조물을 대상으로 실험한 결과를 발표할 계획이다.

5. 결론

본 연구에서는 구조물 내부의 보이지 않는 결함과 철근의 위치를 탐지하기 위하여 3차원 초단파 영상화 방법이 개발되었다. 수치시뮬레이션 결과로부터 초점조절 연산자를 이용함으로써 오차범위가 콘크리트 재료에서의 파장 이내인 해상도를 보였으며 다중주파수방식에 의하여 데이터 오류를 줄임으로써 재현된 영상의 정확성이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 개폐작용과 띠-홈 변환작용을 전송방법으로 이용하는 변환된 주파수조절방법에 의하여 4×4 안테나배열을 설계함으로써 5.2GHz에서 주파수대역을 넓게 유지하고 우수한 투과성능을 보일 수 있었다.

참고문헌

- 1) M. Q. Feng, F. De Flaviis, and Y. J. Kim, "Use of Microwaves for Damage Detection of Fiber Reinforced Polymer-Wrapped Concrete Structures", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 128(2), pp. 172~183, 2002.
- 2) Y. J. Kim, L. Jofre, F. De Flaviis, and M. Q. Feng, "Microwave Sub-Surface Imaging of Damage in Concrete Structures", *Proceedings of the 9th Inter-*

- national Symposium on Smart Structures and Materials, SPIE, San Diego, CA, March 17-21, 2002.
- 3) Y. J. Kim, L. Jofre, F. De Flaviis, and M. Q. Feng, "Microwave Reflection Tomography Array for Damage Detection of Concrete Structures", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2, pp. 651~654, Seattle, WA, June 2-7, 2002.
 - 4) Y. J. Kim, L. Jofre, F. De Flaviis, and M. Q. Feng, "Microwave Tomographic Array for Damage Detection of Civil Structures", accepted to publish in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003.
 - 5) I. M. Girones, L. Jofre, M. Ferrando, M. De Los Reyes, and J. Ch. Bolomey, "Microwave Imaging with Crossed Linear Arrays", IEE Proceedings, Vol. 134, No. 3, pp. 249~252, June, 1987.
 - 3) R. Pierri, A. Brancaccio, and F. De Blasio, "Multi-frequency Dielectric Profile Inversion for a Cylindrically Stratified Medium", IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, No. 4, pp. 1716~1724, 2000.
 - 7) J. B. Knorr, "Slot-Line Transitions", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, MTT-22, pp. 548~554, May, 1974.
 - 8) M. Aikawa and H. Ogawa, "Double-Sided MIC's and Their Applications", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 37(2), pp. 406~413, February, 1989.