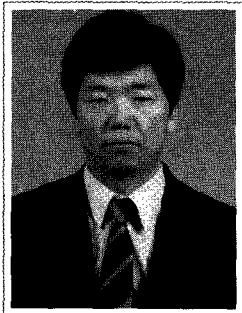


디지털 방사선 투과 탐상 기술

정 용 무

한국원자력연구소 원자력재료기술개발팀 책임연구원



기술에서도 종래의 필름을 사용하는 영상 기록 방식에서 탈피하여 디지털 영상으로 촬영하는 기술과 영상 처리 기술을 적용하여 보다 우수한 품질의 방사선 투과 탐상 결과를 얻는 기술이 개발되고 있다.

지난 5월 22일부터 6월 2일까지 2주간에 걸쳐서 국제원자력기구(IAEA)와 과학기술부 주관하에 한국원자력연구소에서는 산업용 디지털 방사선 탐상 촬영 기술(IAEA/RCA Regional Training Course on Digital Industrial Radiography)에 대한 훈련 과정이 실시되었다.

본 과정은 동남아 17개국이 회원국으로 있는 IAEA 지역간 협력(RCA: Regional Cooperative Agreement) 프로그램의 일환으로 원자력의 산업적 응용 분야-비파괴 검사 기술 과제에서 수행되었으며, 독일 비파괴검사학회 전문가 2명을 강사로 초빙, 국내 참가자 5명을 비

롯하여 동남아 13 개국에서 파견된 20명의 참가자들에게 강의 및 실습을 통한 교육이 이루어졌다.

본 과정은 그 특성상 첨단 PC 교육 시설 및 장비가 필요한데, RCA 회원국 중에 한국이 가장 적합하다고 판단한 IAEA 측의 권고로 실시하게 되었으며, 전 과정을 PC 네트워킹하에서 CD 교재 및 디지털 영상 실험 자료를 사용하여 강의 및 실습을 실시하였다.

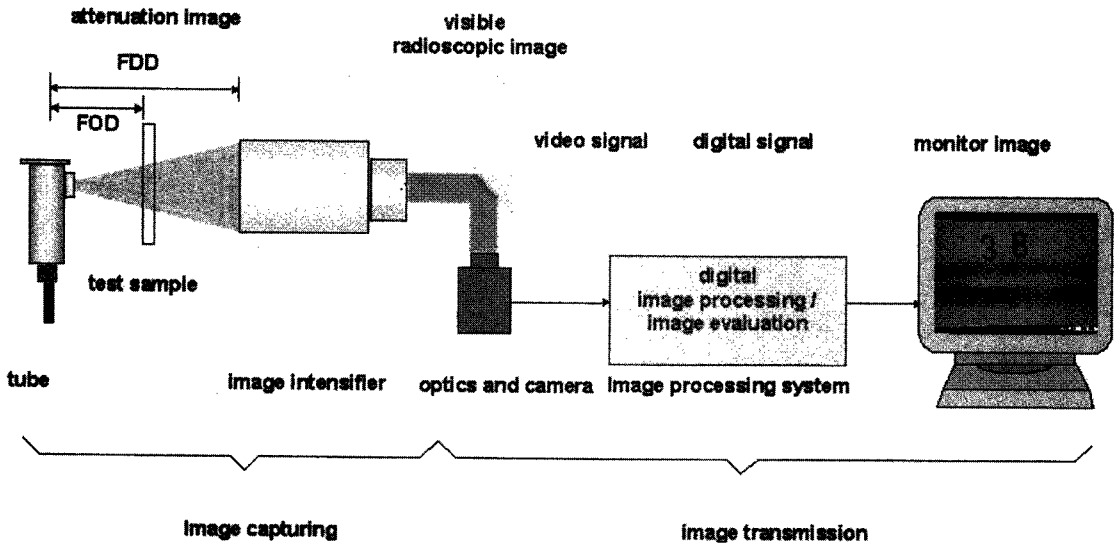
본고에서는 이 훈련 과정에서 논의된 기술을 중심으로 디지털 방사선 투과 탐상 기술 현황 및 앞으로의 방향에 대해서 간략히 기술하고자 한다.

X-선 필름과 디지털 영상 처리

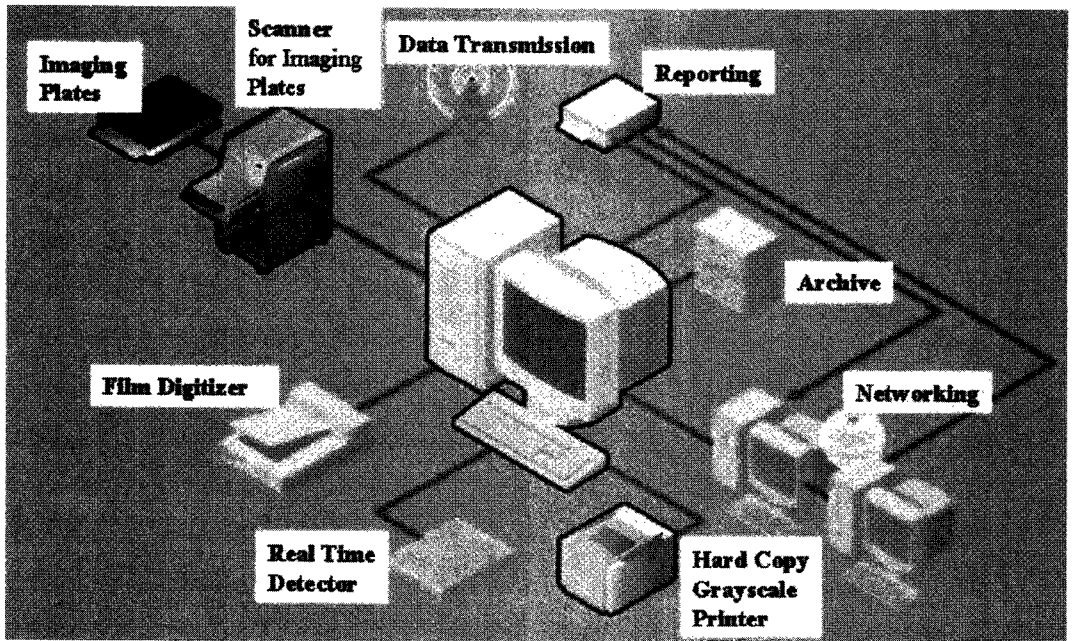
1896년 뢰트겐이 브롬화은(AgBr)에 X-선이 감광된다는 사실을 발견하여 형광 스크린에 피검사

원 자력 산업을 비롯한 다양한 산업에서 공업 생산품의 결함 검사, 용접부 검사, 주조/단조품 검사 등에 사용되는 비파괴 검사 방법의 하나로 방사선 투과 탐상 기술이 널리 사용되고 있다.

최근 컴퓨터 및 정보 통신 기술의 급속한 발전으로 디지털 영상 처리 기술을 응용하는 분야가 확대되고 있는 실정이며, 방사선 투과 탐상



〈그림 1〉 디지털 방사선 투과 탐상 장치 구성도



〈그림 2〉 디지털 방사선 투과 시험 장치 구성도

체를 접촉하여 영상을 만들어낸 이래로 X-선 필름은 다양한 신기술이 개발되어 현재까지도 방사선 투과 시험에 사용되고 있다.

1915년에는 브롬화은 에멀전을 유리 대신에 Nitro cellulose를 사용한 필름을 사용하였으며, 1929년에는 처음으로 금속 증감 스크린을 사용하기 시작하여 1950년대에는 이러한 금속 증감 스크린의 사용이 일반화되었다.

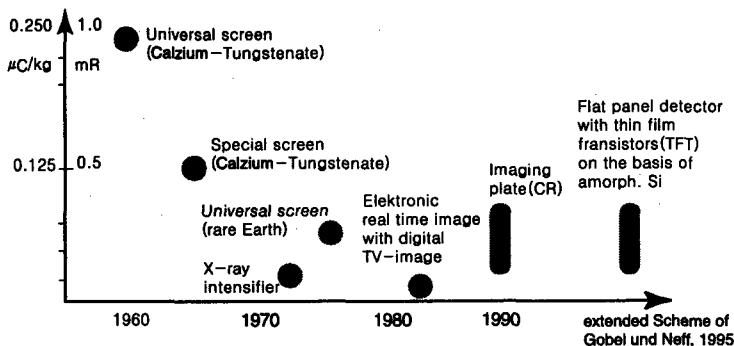
이후 1975년에는 중금속을 포함한 형광 스크린이 개발되었으며, 1980년에는 대단히 안정화된 cubic 브롬화은 결정을 X-선 필름에 사용하였다.

이러한 고성능 필름의 개발 목표는 공간 분해능과 화면 contrast를 높여서 고화질 영상을 얻고자 하는데 있다.

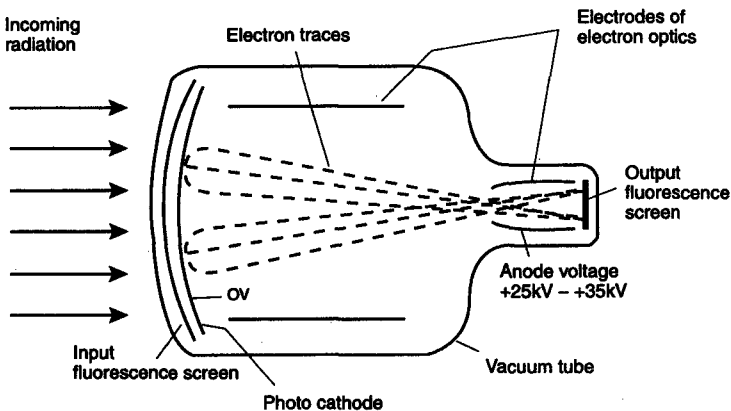
최근에는 공간 분해능을 높이기 위해서 브롬화은 결정의 크기를 $0.5\mu\text{m}$ 까지 낮추었으며, 필름의 고유한 unsharpness가 $30\mu\text{m} \sim 400\mu\text{m}$ 범위에 이르고 있다.

이것은 필름 크기 $30\text{cm} \times 40\text{cm}$ 면적을 분해능 $15\mu\text{m}$ 을 가진 디지털 화면으로 환산할 경우 약 0.5 GByte 크기가 된다.

이러한 필름 방식의 방사선 투과 탐상 기술은 오랜 기간 동안 널리 사용되어 왔으며, 아직도 화상 구현의 방식으로는 대단히 우수한 방식으로 간주되고 있다.



〈그림 3〉 디지털 방사선 투과 시험용 센서의 발달사



〈그림 4〉 X-선 증감 스크린

특히 필름은 공간 분해능이 대단히 우수하고 검사체의 영상을 단시간 내에 촬영할 수 있으며 필름 감광제의 최소 결정 크기가 수 있다는 장점이 있다.

그러나 필름은 사진 현상 작업이 필수적이고 이에 따른 불편함과 시간이 소요되며 현장에서 영상을 즉시 볼 수 없으므로 순간 영상 조건

의 수정이 불가능하며 사진 현상 과정에서 환경 오염을 초래한다는 단점이 있다.

필름은 특성상 영상 contrast와 dynamic range를 동시에 강화할 수 없기 때문에 관심있는 전범위에 대해서 모두 우수한 contrast를 유지한 영상을 얻을 수 없다.

최근 빠른 컴퓨터 시스템에 최신

영상 처리 소프트웨어가 결합되어 디지털 영상 처리가 가능하게 되었으며, 특히 반도체 센서의 개발로 인하여 실시간 방사선 투과 탐상이 가능하게 되었다.

이러한 디지털 스크린의 장점으로 높은 고감도로 105 이상의 높은 dynamic range를 가지며 암실 작업이 필요 없고 화상 처리가 가능하다는 장점이 있는 반면에, 공간 분해능이 필름 방식보다는 낮으며 낮은 에너지 영역에서 감도가 높으며 산란 방사선에 대해서 민감하다는 단점이 있다.

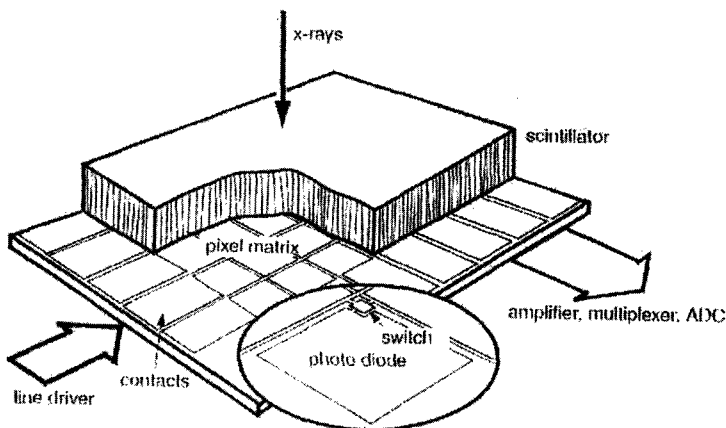
디지털 방사선 투과 탐상법이 종래의 필름 방식으로 수행되어 온 방사선 투과 탐상 방식을 급속히 대체하면서 항공 산업을 비롯한 산업적 응용 분야를 넓혀가고 있다.

영상의 디지털화로 인하여 contrast 강화 기법, 공간 필터 적용 등 화상 처리가 디지털로 가능하며 반도체 센서를 적용함으로써 영상 dynamic range를 대단히 크게 할 수 있다.

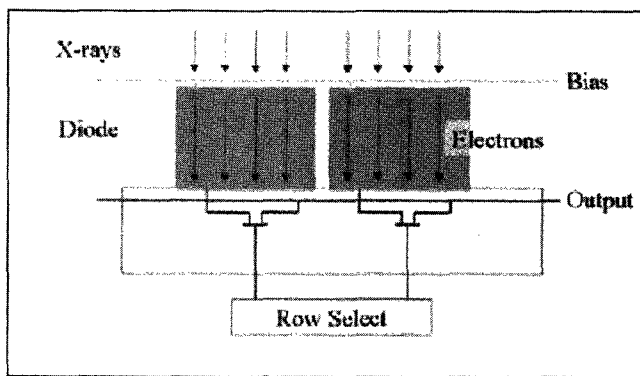
또한 다양한 영상 처리 기술을 동원하여 우수한 영상 품질을 구현할 수 있으므로 종래의 필름 방식을 급격히 대체해 나가고 있는 실정이다.

디지털 방사선 투과 탐상 장치

〈그림 1〉에 보이는 바와 같이 디지털 방사선 투과 탐상 장치는 일반



〈그림 5〉 평면형 TFT센서



〈그림 6〉 Direct Conversion 센서

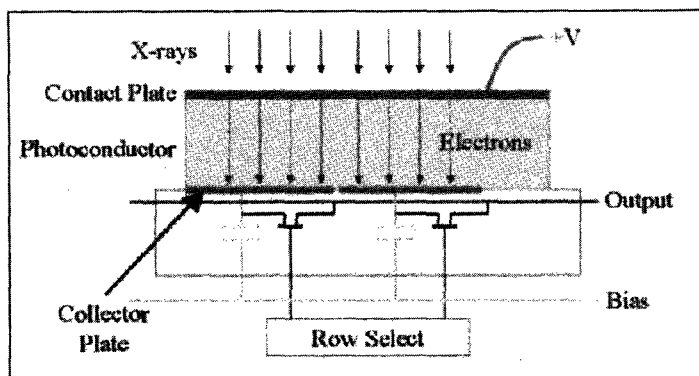
적으로 X-선 발생 장치, image intensifier, 디지털 카메라, 화상 처리 장치 및 PC로 구성되어 있다.

X-선원은 피검사체를 투사하여 영상을 구성하게 되는데, 선원-센서 거리(FDD: focus detector distance)와 선원-검사체 거리(FOD: focus object distance)의

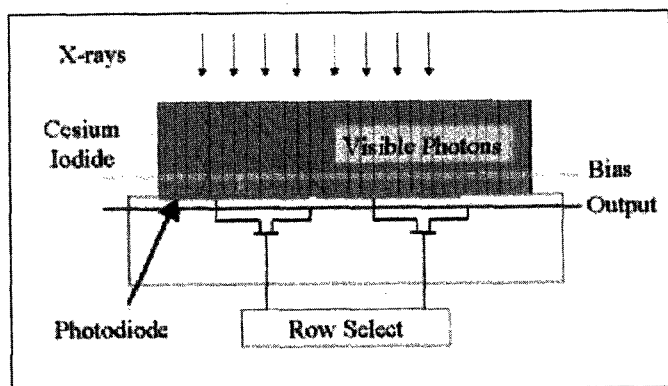
비율로써 영상의 기하학적인 확대 비율이 결정된다.

X-선 image intensifier는 방사선 영상을 가시광선 영상으로 변환하여 이후 영상 신호 처리 과정을 거친 뒤 모니터에서 검사자가 영상을 관찰할 수 있게 한다.

이 과정에서 디지털 영상 처리 기



〈그림 7〉 Photo conductive conversion 센서



〈그림 8〉 Scintillator conversion 센서

킹 및 프린터 등이 필요하다.

디지털 방사선 투과 탐상은 실시간 영상 처리 기술이며 매우 높은 영상 contrast를 유지할 수 있다. 분해능은 탐지 센서의 성능에 따라 좌우되며 현재 gray level로 65,000 단계까지 가능하다.

방사선 탐지 센서

디지털 방사선 투과 탐상에서는 화상을 탐지하여 디지털 신호로 변환하는 방사선 센서의 개발이 핵심 사항이다.

이러한 방사선 투과 시험 센서를 살펴보면 〈그림 3〉에서 보는 바와 같이 1960년대에 Ca-W 스크린이 개발된 이래로 1970년대에 X-선 증감 스크린(〈그림 4〉 참조), 회도류계 스크린을 거쳐서 1980년대 디지털 TV 화면에 실시간으로 화면을 재생하는 기술이 적용되기 시작하였으며, 현재에는 비정질 Si를 사용한 평면형 박막 트랜지스터(TFT: thin film transistor)가 적용되고 있다(〈그림 5〉 참조).

평면형 TFT 센서는 현재 노트북 PC의 화면으로 사용되는 것과 동일한 것이다.

디지털 방사선 투과 탐상 기술은 내부 구조가 겹쳐서 보이는 종래의 의료용 X-ray 영상과 유사하다.

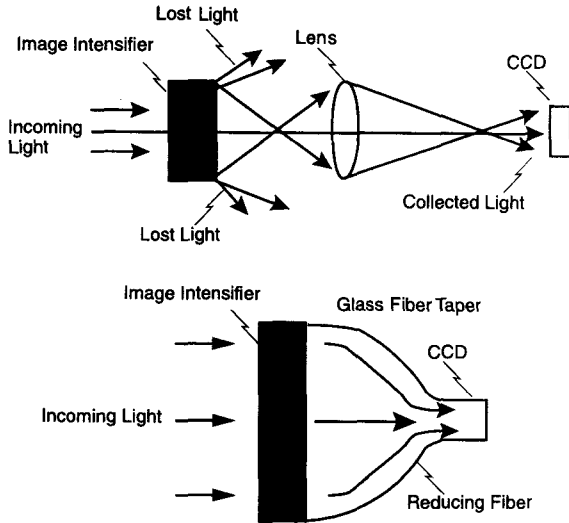
이렇게 투사된 영상은 복잡한 내

법을 동원하여 영상 화질을 개선하고 자동 영상 평가도 가능하게 한다.

그러나 실제로는 x-선원의 초점 크기가 유한하기 때문에 기하학적 unsharpness가 존재하며 영상 화질이 흐려지는 작용을 하며 탐지 센서와는 무관하게 고유한 분해능의 한계가 되며 선원의 초점 크기가

클수록 이러한 unsharpness가 증가하게 된다.

방사선 투과 탐상을 디지털화하기 위해서는 〈그림 2〉에 보인 바와 같은 디지털 시스템이 필요한데, 개략적으로 PC를 중앙에 놓고 실시간 탐지 센서 스크린, 필름 디지털이저, 스캐너, 데이터 전송 네트워크



〈그림 9〉 Glass fiber를 사용한 센서 개념도

〈표 1〉 디지털 분해능 대 신호대 잡음비

	Gray levels	SNR by digitization
8 bit	256	128
10 bit	1024	512
12 bit	4096	2048
14 bit	16384	8192

용물의 영상이 겹쳐서 나타날 경우 종래의 필름 방식과 큰 차이가 없을 수도 있다.

그러나 공항에서 수화물을 검사할 때 X-ray 밑으로 수화물을 통과시키는 것과 유사하게 X-선원과 센서가 피사체를 가운데 두고 선형적으로 이동하거나 반대로 피사체가 이동하면서 피사체의 영상 자료를 수집한 다음 이를 디지털 처리한 다음 3차원 영상으로 보일 수도 있다.

1. 직접 변환 센서

이 방식은 〈그림 6〉에서 보는 바와 같이 의료용이나 산업용으로 널리 사용되는 방식으로, 진공관에 인을 칠한 스크린으로 X-선 photon을 가시광선 photon으로 변환하고 이를 다시 전자로 변환한 뒤 이를 음극선관에서 수천 eV로 가속되며 이렇게 가속된 전자가 출력 형광면에 충돌한 뒤 빛을 발함으로써 영상을 얻을 수 있다. 영상은 주로 텔레비전 카메라의 렌즈를 통하여 볼 수 있다.

2. 광전자 변환 센서

이 시스템에서는 〈그림 7〉에서와 같이 증감 스크린이 필요치 않으며 X-선을 가시광선 photon으로 변환시키는 인스크린을 사용하지 않

고 X-선 흡수 단면적이 대단히 높은 Gadolinium oxysulfide를 사용하며 X-선관 저레벨 광학 카메라 시스템에서 사용하고 있다.

3. Scintillator 변환 센서

이 방식에서는 〈그림 8〉에 보인 바와 같이 Cesium Iodide를 사용하여 X-선을 직접 가시광선으로 변환하여 이 가시광선을 photo-diode로 감지하여 화상을 구성하는 방식이다.

4. Fiber optic 센서

앞으로 개발 가능한 방식으로써 종래의 CCD 방식에서 탈피하여 증감면에 형성되는 가시광선을 수많은 glass fiber로 전송하여 화면을 구성하는 방식인데 보다 높은 분해능이 예상된다〈그림 9〉.

영상 처리(Image Processing)

디지털 영상으로 변환하기에 앞서 각각 화소에 대한 디지털 분해능 대 센서 감도는 기본적으로 〈표 1〉로 알 수 있다.

디지털 영상의 특성을 표현하는 성질로는 영상 contrast, dynamic range, 신호대 잡음비, 디지털 분해능 또는 화소(pixel) 공간 분해능, gray contrast 등이 있다.

일단 촬영된 영상은 다양한 신호 처리 소프트웨어를 사용하여 영상

〈표 2〉 Laplace-operator matrix operation 사례

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

-1	-1	-1
-1	8	-1
-1	-1	-1

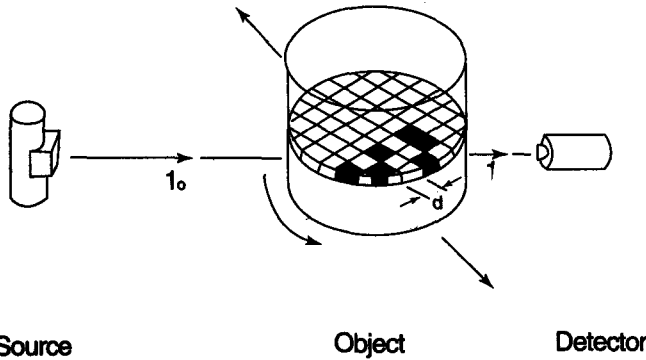
〈표 3〉 Sobel-operator matrix operation 사례

1	2	1
0	0	0
-1	-2	-1

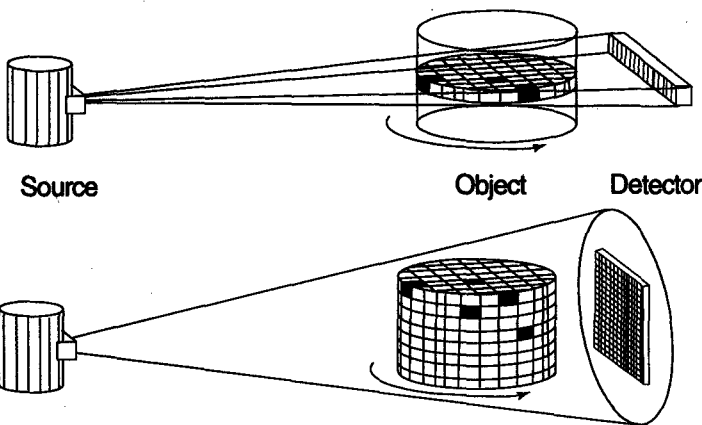
1	0	-1
2	0	-2
1	0	-1

0	-1	-2
1	0	-1
2	1	0

-2	-1	0
-1	0	1
0	1	2



〈그림 10〉 X-선 컴퓨터 토모그래피의 원리



〈그림 11〉 2차원 및 3차원 컴퓨터 토모그래피

처리가 가능한데, 널리 쓰이는 범용 소프트웨어로 Paintshop이나 Coreldraw 같은 것이 있으며 다른 어떤 영상 처리 소프트웨어를 사용 하더라도 대부분의 원하는 기능을 사용할 수 있다.

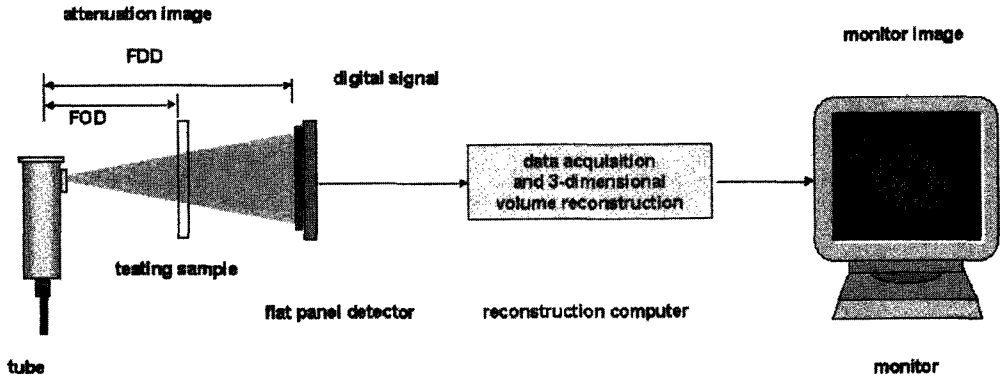
먼저 촬영된 화면을 눈으로 보고 영상 처리 방식을 결정해야 하는데 일반적인 절차로는 다음과 같다.

① 방사선 투과 시험 영상의 유효성을 확인하기 위해서 먼저 컴퓨터 모니터의 성능을 확인하여 필요시 보정해야 한다.

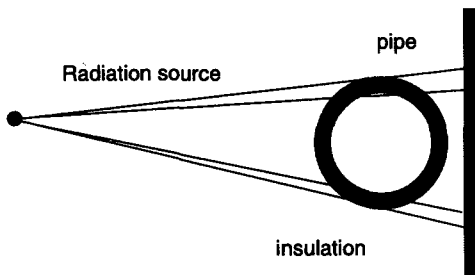
인간의 눈과 컴퓨터 모니터의 색상별 감지 특성이 다르며 모니터의 색상은 인간의 눈의 색감도에 대해서 이미 보정된 경우가 많다.

② 방사선 투과 시험 영상의 광도를 눈으로 확인한 뒤 gray value, brightness, contrast, Gamma value 등의 조정 여부를 결정한다. 항상 검사자의 눈으로 판정하는 것이 가장 정확하다고 간주한다.

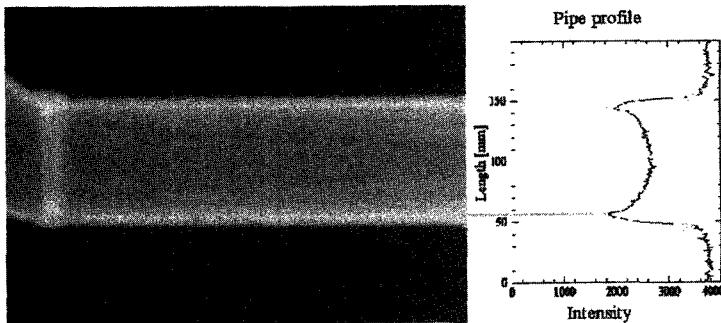
③ 광도의 histogram을 살펴보고 자동 보정 여부를 결정한다. 일반적으로 histogram이 넓게 퍼지도록, 즉 dynamic range가 커지도록



〈그림 12〉 3차원 컴퓨터 토모그래피 구성도



〈그림 13〉 배관의 X-선 투과 시험



〈그림 14〉 보온재 배관의 X-선 투시 사진 및 광도 profile

록 조정하는 것이 일반적이나 항상 그런 것은 아니다.

④ 화질의 smoothing이나 sharpness를 시행 여부를 결정한다. 통계적인 절차로 Median, Max, Min, 등의 방법이 가능하다.

또한 수동 작업을 원할 경우 행렬 처리법으로 영상의 smoothing이나 sharpen을 행할 수도 있으며 대개 5 × 5 개의 행렬 각각에 대해서 원하는 값들을 입력하여 수동 필터를 설정할 수 있다.

일반적인 행렬 처리법으로 Laplace-operator 같은 것이 있는데, 〈표 2〉〈표 3〉에 간단한 3 × 3 Laplace-operator 행렬 처리 및 Sobel-operator 방법을 보였다.

⑤ 통계적인 필터 또는 특수 필터 적용 여부를 결정한다.

⑥ 사용자가 편리하도록 다양한 필터가 이미 소프트웨어상에 제공되고 있으므로 이를 사용할 수 있

며 필요시에는 직접 수동 작성하여 사용할 수도 있다. 방향성 또는 무방향성 필터로는 gradient 필터 같은 것이 있다.

이러한 다양한 방식으로 영상 처리를 수행하는 이유는 기본적으로 보다 우수한 영상을 통하여 결합 판정 능력을 향상시키고자 하는 데 있다.

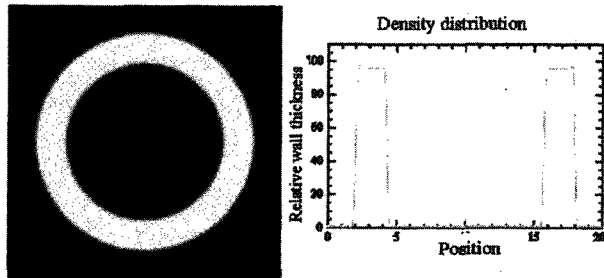
최종적으로 디지털 방사선 투과 탐상 영상의 화질을 검증하는 방식은 종래의 필름 방식과 유사하며 영상 내에 포함된 IQI(image quality indicator) 영상의 contrast 또는 구별 능력으로 판정하며 이는 종래의 필름 방식과 유사하므로 여기서 생략하기로 한다.

컴퓨터 토모그래피

X-선 컴퓨터 토모그래피(Computer Tomography; CT)는 종래의 방사선 투과 탐상에서 평면적 화상만을 얻을 수 있는데 반해 3차원 입체 화상을 얻을 수 있는 방법이다.

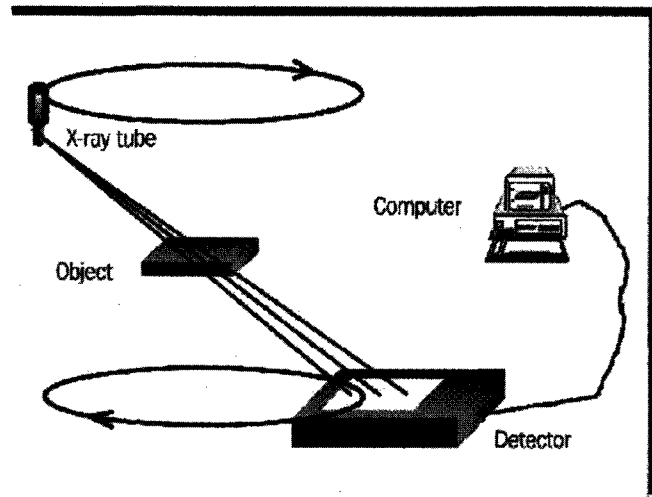
CT 화상 기법은 종래의 화상 처리법이 투사되는 경로에 수직인 화상을 얻을 수 있는데 반해 CT에서는 투사 경로에 평행한 화상도 얻을 수 있으며, 따라서 검사체의 투사 각도에 따라 위치별로 상대적인 방사선 감쇄량이 측정되어서 검사체를 얇은 절편으로 자른 면에서의 화상을 재구성할 수 있다.

이를 위해서는 <그림 10>에서 보



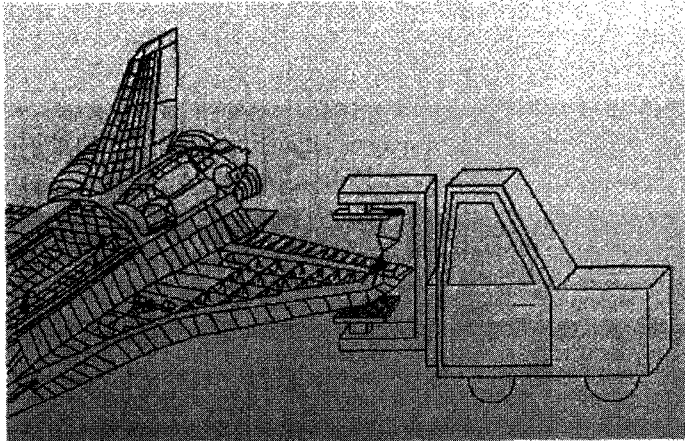
<그림 15> 필터를 적용한 화상 처리 후 배관의 두께 측정

X-ray tube and detector move synchronously, but phase shifted by 180°, at circular orbits above and below the test object.

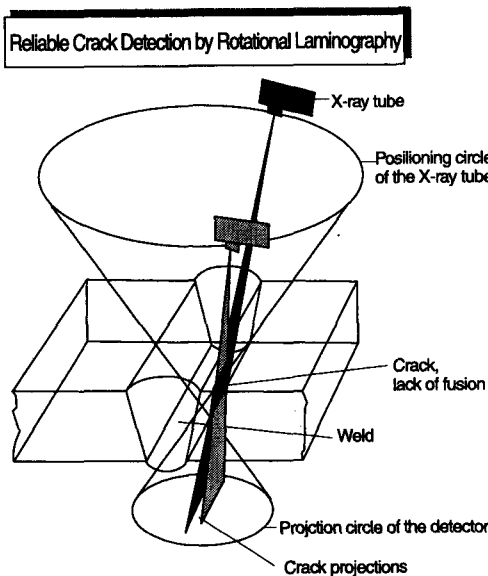


<그림 16> Digital X-ray laminography

인 바와 같이 피검사체를 회전시키면 2차원 CT와 3차원 CT의 차이는
 든지 X-선원이 회전을 하면서 화상을 수집한 뒤 이를 재구성해서 입
 체 화상을 얻는다. <그림 11>에서 보인 바와 같이 1차



〈그림 17〉 Digital X-ray laminography를 항공기 검사에 적용한 사례



〈그림 18〉 Digital laminography를 용접부 균열 검사에 적용한 사례

원적인 선형 X-선 센서를 사용할 경우 2차원 CT가 가능하며 2차원적인 X-선 센서를 사용할 경우 3차원 CT가 가능하다.

3차원 X-선 CT의 실제 장비 구성은 〈그림 12〉와 같다.

디지털 방사선 투과 탐상 기술의 적용

1. 보온재 배관의 정밀 두께 측정

보온재가 쌓여있는 배관의 부식을 검사하기 위해서 일반적인 방사선 투과 시험법을 적용할 경우 〈그림 13〉과 같은 배열에서 〈그림 14〉와 같이 촬영될 것이다.

여기서 배관의 두께 부분을 통과하는 방사선의 세기가 기하학적인 배치로 말미암아 경계면이 불분명한 unsharpness 현상이 나타난다.

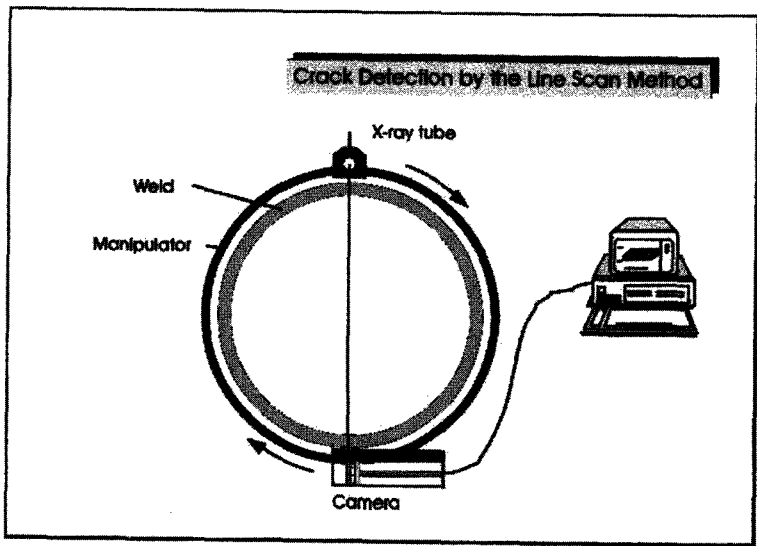
이를 수학적 알고리즘을 동원하여 계산된 필터를 적용하면 〈그림 15〉와 같이 나타낼 수 있으며 여기서 정확한 배관의 두께를 측정할 수 있다.

또한 국부적인 부식 현상도 화면 밀도 차이를 분석함으로써 부식 정도를 판정할 수 있다.

2. 디지털 laminography

컴퓨터 토모그래피 기술을 실제로 적용하기 위해서 〈그림 16〉과 같이 X-선원과 탐지 센서를 동시에 회전시키면서 투시 화면을 촬영한 뒤 이 데이터를 재구성하여 정밀한 검사를 할 수 있다.

〈그림 17〉에서는 항공기 검사에 적용한 경우의 개념도를 보였다. 또한 이 방법은 〈그림 18〉과 같



X-선의 영향을 막을 수 있으므로 보다 우수한 영상을 얻을 수 있다.

4. Baggage Inspection in Airport

X-선을 이용한 검사법으로 공항에서 수화물의 내부 투시에 사용되고 있는데, <그림 20>에서와 같이 폭발물로 의심되는 물체를 발견한 경우 이를 스펙트럼 분석하여 물체의 성분을 분석해 낼 수 있다.


요약

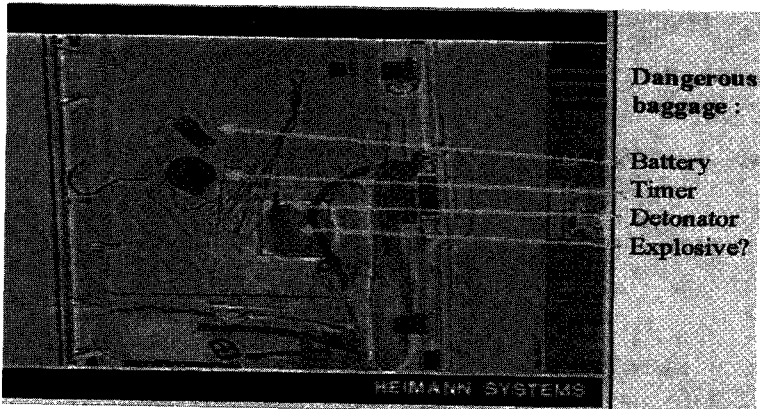
현재 급속한 발전을 이루고 있는 디지털 방사선 투과 시험법에 대해서 간략히 살펴보았으며 이를 요약하면 다음과 같다.

- 현재까지 디지털 화상 처리 방식은 기본적으로 우수한 X-선 필름의 성능을 능가할 수는 없다.

- 그러나 사용의 편리성 및 여러 가지 장점으로 인하여 중감 스크린을 사용한 디지털 방사선 투과 시험법이 특히 경금속 합금의 시험 등에 널리 사용되고 있다.

- 새로운 평면형 박막 트랜지스터 방식의 스크린이 널리 사용됨으로써 화면을 이동하기 용이하며 특히 3차원 투시법에서 중요한 역할을 한다.

- 선형 센서를 적용한 자동화 X-선 검사 방법으로 용접부 검사도 가능하며 배관 내용물의 판정과 균열 평가 등이 가능하다. 



<그림 20> 공항에서의 X-선 투시에 의한 가방 검사 화면

이 용접부 결함 검사에도 적용할 수 있는데, 컴퓨터 토모그래피 화면을 재구성해 보면 균열의 형상을 3차원으로 형상화하여 볼 수 있다.

3. 배관의 line scan

배관 용접부를 검사할 경우 <그림 19>와 같이 line scan법을 적용하면 종래의 필름 방식에 비해서 산란