

용접부의 방사선투과시험

조 경 식

Radiographic Testing of Welds

Kyung-Shik Cho

1. 서 론

용접구조물을 생산한 사람은 그 구조물을 사용하고자 하는 것이 목적이기 때문에 생산한 구조물을 파괴시험 방법으로 용접부의 품질을 확인할 수는 없으므로 최종적으로 용접부의 품질을 파괴 없이 확인할 수 있는 방법이 필요하다. 이러한 방법이 바로 비파괴시험법(Nondestructive Testing)이다.

비파괴시험방법에는 여러 가지가 있지만 용접부의 내부결함탐상에 사용되는 비파괴시험법은 체적검사법으로 분류되는 방사선투과시험법이나 초음파탐상시험법이 있는데 그 중에서도 우리나라에서는 방사선투과시험법이 압도적으로 많이 적용된다.

X-선이나 감마선과 같이 짧은 파장의 방사선이 물질 속으로 들어가면 물질의 원자와 상호작용을 하여 에너지를 잃어버림으로써 방사선의 강도가 감소하게 되는데, 방사선투과시험은 이와 같이 시험체를 투과하는 방사선의 강도가 시험체의 밀도나 두께에 따라 달라지는 성질을 이용함으로써 가능하게 된다.

제조공정중 발생한 불완전한 부위를 통틀어 비파괴시험 용어로 불연속(discontinuity)이라고 하며 시험품의 용도상 허용될 수 없는 불연속을 결함(defect)이라 하는데, 불연속의 허용 여부는 불연속의 종류, 불연속의 크기 그리고 불연속의 위치에 의해 결정된다. 방사선투과시험법은 다른 비파괴시험법에 비해 필름에 얻어진 상을 통하여 이러한 불연속의 종류나 크기 또는 위치에 대한 판독이 상대적으로 매우 용이하기 때문에 용접부의 결함탐상에 주로 사용되고 있는데 이 시험법은 모든 종류의 재료에 적용가능하나 용접부의 위치, 모양 또는 두께에 따라 적용에 다소 제한을 받는다.

방사선투과시험법은 크게 분류할 때 필름을 사용하는 경우와 필름을 사용하지 않는 경우로 나눌 수 있다. 국내의 경우 용접부의 결함검사 등 공업적으로 활용이 되는 것은 대부분 필름을 이용하여 왔으나 최근 들어 필

름을 사용하지 않는 방사선투과시험에 대한 관심이 고조되고 있다.

본 고에서는 용접부의 결함을 탐지하는 수단으로서의 전통적인 방사선투과시험방법에 관한 기본적인 내용과 최근에 많은 발전과 관심의 대상이 되고 있는 디지털 래디오그래피에 대해 간단히 기술하고자 한다.

2. 방사선의 특성

2.1 방사선의 발생 및 일반적 특성

일반적으로 방사선투과시험에 사용되는 방사선은 주로 X-선과 감마선이며 X-선은 Fig. 1과 같이 필라멘트를 가열할 때 발생한 열전자가 음극과 양극간에 가해진 고전압에 의해 양극으로 끌려가 타깃에 충돌할 때 발생하며 감마선은 방사성동위원소가 붕괴할 때 발생하나 근본적으로는 둘 다 동일한 종류의 전자기파이다. 감마선을 방출하는 동위원소는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 한 개 또는 여러 개의 서로 다른 에너지를 방출하는데

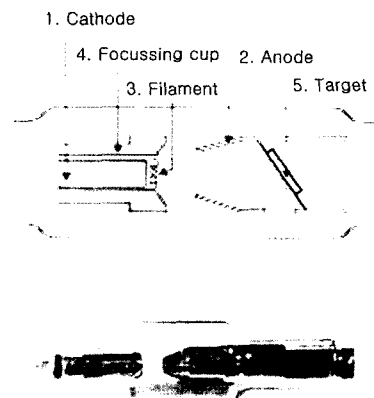


Fig. 1 X-선의 발생

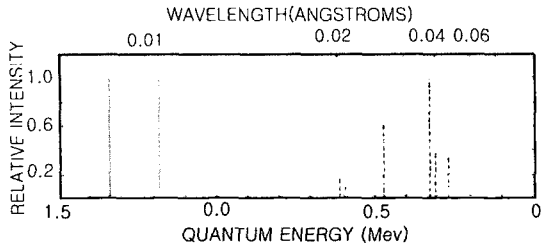


Fig. 2 Co-60 및 Ir-192의 에너지 스펙트럼

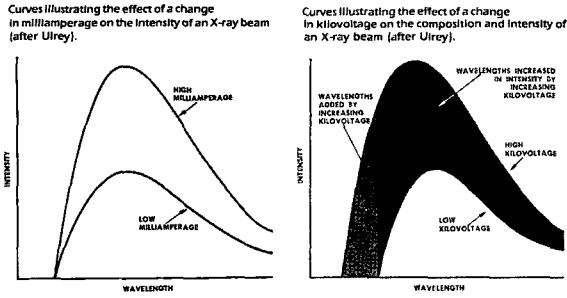


Fig. 3 X-ray 에너지 및 강도와 전압·전류와의 관계

비해 X-선의 경우에는 Fig. 3과 같이 연속스펙트럼 에너지를 방출한다.

물질에 대한 방사선의 투과능은 그 방사선이 갖는 에너지에 의해 결정되며 감마선의 경우 이 에너지는 동위원소의 종류에 따라 일정한 값을 갖는데 비해 X-선은 튜브에 가해지는 전압에 의해 에너지가 좌우된다. 그리고 방출되는 방사선의 강도는 동위원소의 경우는 큐리(Ci)의 크기에 따라, X-선의 강도는 X-선 튜브에 적용되는 전류량에 비례하게 되는데 이 강도 값은 주어진 시험체에 대한 촬영시 방사선의 노출시간을 결정하는 주요 요소가 된다.

2.2 방사선의 감쇠 및 흡수

방사선의 강도는 아래의 식 (1)과 같이 선원으로부터 거리의 제곱에 반비례한다. 따라서 방사선원과 필름사이의 거리가 멀어질 경우 노출시간이 크게 증가한다.

$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \quad \text{또는} \quad I = I_0 \times \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \quad (1)$$

여기서 I : 거리 d에서의 방사선 강도
 I₀ : 거리 d₀에서의 최초 방사선 강도
 d₀ : 선원으로 부터의 최초 거리
 d : 강도가 I가 되는 거리

또한 방사선의 강도는 투과하는 동안 주어진 시험체에 의해 감소하지만 완전하게 전부 흡수되는 것은 아니

다. 시험체를 투과한 방사선의 강도 I는 식 (2)와 같이 표시된다.

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (2)$$

여기서 I₀ : 방사선의 초기 강도
 μ : 선형 흡수계수
 t : 흡수체의 두께

이 식으로부터 시험체를 투과한 방사선의 강도는 시험체의 밀도와 두께에 따라 지수적으로 감쇠되는 것을 알 수 있으며, 선형 흡수계수 μ는 밀도의 함수이기 때문에 공업적으로는 이 식이 방사선을 이용하여 시험체의 두께나 밀도를 측정하는데 많이 이용된다.

2.3 방사선원의 선택

방사선투과시험에 사용되는 선원에는 여러 가지가 있으며 선원의 선택기준은 우선 만족할 만한 성질을 얻어야 하는데 기준을 두고 시험편의 두께를 투과할 수 있는 선원을 선택해야 한다. 일반적으로 방사선 에너지 스펙트럼의 분포상 선원으로서 동위원소를 이용하는 경우 보다는 X-선을 이용하는 경우의 방사선사진의 상질이 우수하며, 동일한 X-선을 사용하는 경우 노출시간 등을 고려하지 않는다면 Fig. 4에서와 같이 일반적으로 저전압을 사용하는 것이 높은 콘트라스트를 얻는데 유리하다.

3. 방사선투과시험의 개요

3.1 방사선투과시험 절차

방사선투과시험은 Fig. 5와 같이 시험하고자 하는 물체를 X-선 발생장치 또는 감마선 조사장치로부터 적당

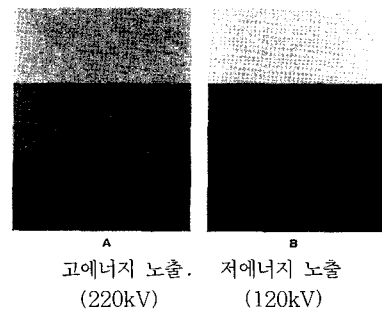


Fig. 4 사용 에너지의 크기에 따른 콘트라스트 비교

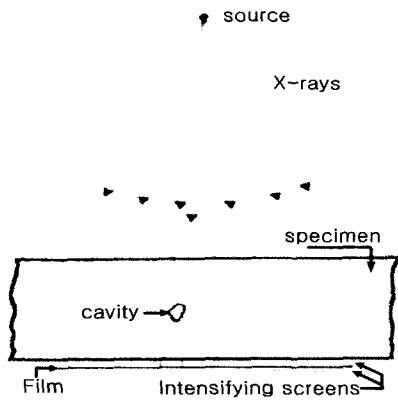


Fig. 5 방사선투과시험의 기본원리

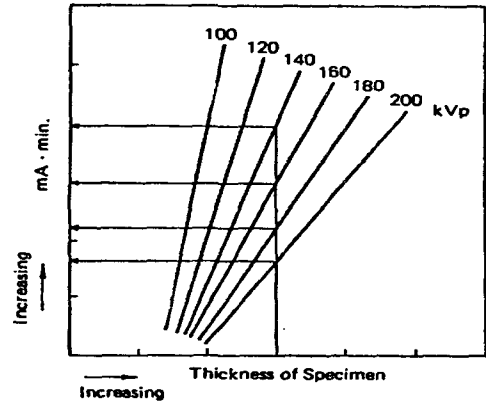


Fig. 7 X-ray 노출도표

한 거리에 방사선이 투과하는 두께가 최소가 되는 방향으로 두고 필름을 장진한 카세트를 시험체의 뒷면에 밀착시킨 후 방사선을 조사하여 적당한 시간동안 노출시킨다. 노출된 필름은 암실에서 현상, 정착한 후 물로 세척하고 건조시켜 관찰기(film viewer)위에 놓고 관찰하면, 기공이나 균열, 수축공, 개재물 등의 용접결합이 있는 부위는 다른 부위에 비하여 방사선이 많이 투과하기 때문에 필름에 도달하는 방사선의 강도가 커서 필름 위에 다른 부위에 비해 상대적으로 더 검은 상이 나타난다. Fig. 6은 이와 같이 촬영한 용접부에 존재하는 결함을 보여주고 있다.

X-선은 휴대용 또는 거치식 X-선 발생장치를 사용하고, 감마선원으로는 국내에서는 Ir-192가 비파괴검사사용 동위원소로 널리 사용되고 있으며, Co-60은 보다 두꺼운 시험체를 검사하는데 이용된다. 노출시간은 시험체의 재질, 두께, 방사선의 에너지, 시험체와 필름간의 거리, 필름의 종류, 요구되는 흑화도(density)에 의해 결정되는데, X-선을 사용하는 경우 시험체와 필름간의 거리, 시험체의 두께와 X-선 발생장치에 가할 전압 및 필요한 흑화도가 결정되면 Fig. 7에서 보는 바와 같은 노출도표로부터 소요되는 노출시간을 구할 수 있다. ASME Section V규격에서의 투과사진 흑화도는 선원이 X-선인 경우는 최소 1.8이고, 상대적으로 X-선보다 콘트라스트가 떨어지는 감마선은 최소 2.0으로 하고 있으며, 투과사진 농도의 최대값은 필름관찰기의 열영향에 따른 투과사진의 손실을 감안하여 4.0으로 규정하고 있다.



Fig. 6 아크용접부의 기공

여기서 필름 흑화도 D의 정의는 식 (3)과 같다.

$$D = \log \frac{I_0}{I_t} \quad (3)$$

여기서 I_0 : 필름을 투과하기 전의 빛의 강도
 I_t : 필름을 투과한 후의 빛의 강도

3.2 용접부 촬영시의 배치

시험체의 구조나 용접부의 위치에 따라 여러 형태로 배치할 수 있다. 또 기공이나 수축공과 같이 부피를 가진 3차원적인 결함의 탐상에는 크게 방향성이 없으나 균열, 융합불량, 불완전용입, 라미네이션 등과 같은 2차원적인 결함 탐상시에는 방사선의 조사방향과 결함의 방향이 가능한 한 서로 평행하도록 방사선을 조사하지 않으면 검출이 매우 어렵다. Fig. 8에 용접부의 방사선 투과시험시의 대표적인 몇 가지 배치도를 나타내었다.

3.3 방사선필름의 상질

촬영한 필름상의 질을 좌우하는 요소에는 선원의 종류와 에너지, 산란 방사선, 필름과 스크린의 종류, 필름

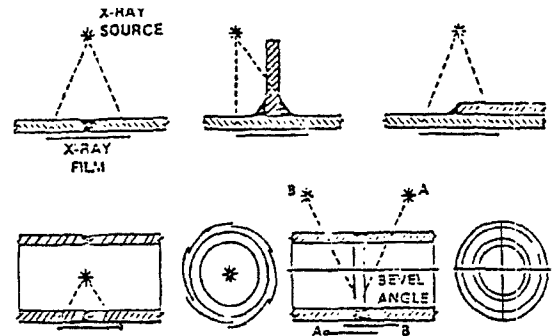


Fig. 8 방사선 투과시험의 Lay-out

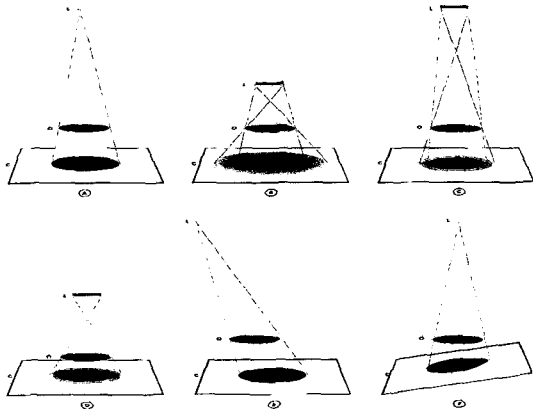


Fig. 9 선원의 크기 및 선원-필름간 거리에 따른 기하학적 불선명도

특성, 기하학적인 배치, 시험편의 재질과 두께 등이다. 필름은 할로겐은 화합물 입자의 크기가 커지면 해상도는 뒤지나 감광속도가 빨라진다. 필름의 등급은 입자가 가장 고운 G I부터 가장 굵은 G IV까지로 나누며, class A의 경우는 G III 이상의 고운 입자의 필름을 사용하고 class B의 경우는 G II 이상의 필름을 사용한다. 상질을 좌우하는 또 다른 인자는 기하학적인 불선명도(unshapness)이다. 방사선원의 크기가 유한하기 때문에 Fig. 9에서 보여주는 모식도와 같이 선원, 시험편, 필름까지의 거리에 따라 상질이 영향을 받게 되는데, 일반적으로 기하학적인 불선명도 Ug는

$$Ug = \frac{s}{f} t \quad (4)$$

와 같이 주어진다. 여기서, s는 유효 선원 크기, f는 선원에서 시험체까지의 거리, t는 시험체의 두께이다. 같은 해상도를 얻기 위해서는 두께가 두꺼울수록 선원을 더 멀리 두어야 하므로 더 긴 노출시간이 요구된다.

3.4 투과도계

방사선 투과사진의 상질을 점검하는 데는 표준시험편을 사용하며 이것을 투과도계 또는 IQI(Image Quality Indicator)라고 한다. 즉, 투과도계는 촬영한 필름의 상질이 요구하는 기준 이상으로 되었는지를 판단하는 기준이 되는 것으로 유공형 및 선형투과도계가 있으며 Fig. 10에 대표적인 유공형 투과도계를 나타내었다. 유공형 투과도계를 사용하는 경우 투과사진의 기준감도를 2-2T로 하는 경우가 많은데 이는 투과도계의 두께 T가 시험체 두께의 2% 이하가 되는 것을 사용하여 투과사진상에 직경이 2T인 구멍이 나타나도록 촬영해야 한다는 것을 의미한다.



Fig. 10 유공형 투과도계

4. 디지털 라디오그래피

지금까지의 방사선투과시험은 필름에 방사선을 조사한 후에 현상, 정착, 건조의 과정을 거쳐서 영상을 얻은 후 육안으로 관찰하는 방법이었다. 그러나 21세기에 들어 방사선검출기, 반도체 및 컴퓨터 기술이 급속도로 발전함에 따라 지금까지 필름을 사용하던 아날로그방식의 방사선투과시험이 필름을 사용하지 않고 필름 대신 Image Plate(IP)나 반도체 어레이 검출기를 사용하는 디지털 라디오그래피로 전환되는 시점에 놓이게 되었다.

디지털영상은 화소라는 이산적인 점으로 구성되며, 각 화소의 농도를 정수값으로 표현한 영상을 말한다. 이 디지털영상은 20세기 중후반에 들어 컴퓨터의 발전과 더불어 의료계에서 많이 활용하게 되었고, 산업용은 최근에 와서 디지털화가 서서히 적용되는 단계의 초입에 와 있다.

지난 100여년간 사용된 기존의 필름/스크린 시스템은 매우 우수한 해상도를 가짐에도 불구하고, 디지털 영상에 대한 관심이 증가하는 것은, 필름/스크린 시스템의 좁은 동적영역, 제한된 관용도(latitude), 영상변환의 불가능, 분실의 염려, 많은 필름보관 공간의 필요 등 여러 가지 단점을 가지는데 비하여, 디지털영상은 잡음에 강하고, 영상처리를 통하여 화질을 개선할 수 있으며, 검출기에 따라 동적영역이 넓고, 오래기간을 보관하여도 화질의 변화가 없으며, 원거리까지 손쉽게 전송할 수 있는 등 여러 가지 장점을 가지기 때문이다.

디지털영상장치의 종류에는 IP를 이용하며 Computed Radiography(CR)라고 부르는 간접디지털영상장치(Indirect Digital Radiography)와 직접디지털영상장치(Direct Digital Radiography)로 분류할 수 있다. Fig. 11에 이러한 방사선투과시험 결과처리의 흐름도를 나타내었으며 Fig. 12에는 용접부의 디지털 라디오그래피의 예를 보였다.

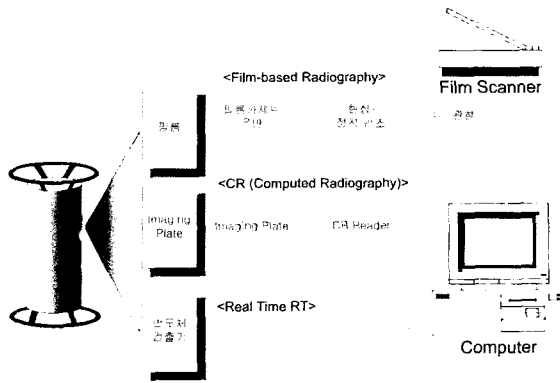


Fig. 11 방사선투과시험 결과처리의 흐름도

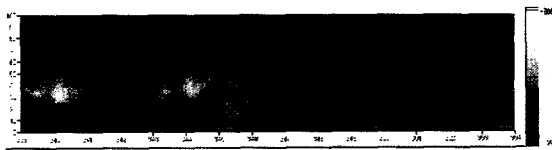


Fig. 12 용접부의 디지털 라디오그래피

4.1 CR(Computed Radiography)

CR은 필름 대신 재사용이 가능한 Fig. 13과 같은 구조의 IP를 사용한다. 화상을 영상화하기 위하여 IP는 광반응이 있는 인형광을 사용하는데, 방사선을 받으면 IP에 잠상이 형성된다. 이 잠상에 Fig. 14에서와 같이 레이저 비임을 주사하면 레이저 비임 에너지가 구속되어 있던 전자를 자극하여 가시성 있는 빛을 방출하도록 하며 이 빛이 다시 포획되어 디지털 상이 가능하도록 한다.

IP는 필름/스크린 시스템에 비하여 Fig. 15에서 보는 바와 같이 인형광 물질이 넓은 반응 범위를 가지고

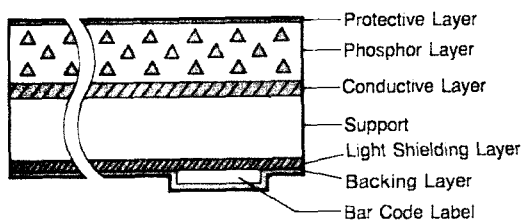


Fig. 13 Image Plate의 구조

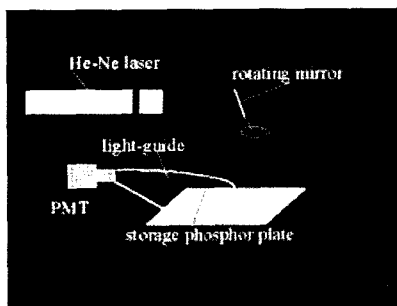


Fig. 14 IP 잠상의 판독

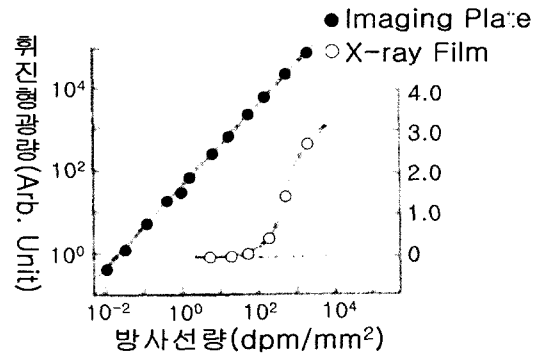


Fig. 15 필름과 IP의 동적영역 비교

있어 노출조건의 변경 범위를 넓게 하여 노출 선량의 선택을 매우 자유롭게 하므로 결과적으로 재촬영의 필요성을 크게 감소시키며 넓은 노출 관용도는 한번의 노출로 두께 차이가 있는 제품도 촬영이 가능하게 한다. 또한 IP는 구부릴 수 있어 곡면촬영을 할 수 있고 재사용이 가능하고 대면적의 방사선영상을 얻을 수 있으며 화학처리가 불필요하다.

4.2 직접 디지털영상장치

(Direct Digital Radiography ; DDR)

직접 디지털영상은 레이저 판독과정이 없기 때문에 간접 디지털영상에 비하여 업무효율이 매우 높으며 시스템에 따라 화질이나 넓은 동적영역 외에 실시간 영상 획득이 가능하며 IP가 필요 없는 등의 장점이 있으나, 가격이 고가인데다가 검출기를 구부릴 수 없고 검출기와 컴퓨터가 같은 장소에 있어야 하는 등의 단점이 있다.

1) CCD를 이용한 DDR

Charge Coupled Devices(CCD)는 빛을 전기적 신호로 변환하는 소자로서 섬광체 또는 증감지에서 X-선에 의해 발광하는 빛을 광학계를 통해 받아 영상을 획득하는 시스템이다. CCD는 그 크기가 2~3cm²로서 투영되는 영상의 크기보다 작기 때문에 큰 투영상을 축소시키기 위해 렌즈나 광섬유를 이용하거나, 두께 이상의 CCD를 사용한 후 영상을 합성하는 방법을 사용한다.

따라서 영상의 축소 또는 저렴한 장치를 원할 경우 CCD가 유용하지만 넓은 크기의 검출기가 필요한 경우에는 그다지 유리하지 못하다.

2) a-Si 검출기를 이용한 DDR

박막필름트랜지스터(TFT)와 광다이오드를 사용한 시스템으로 상층에 섬광체(CsI)를 도포한 구조를 지니고 있다. X-선이 섬광체에 입사하면 섬광체는 입사 X-선

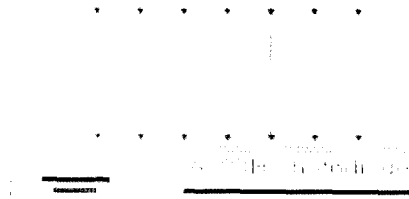


Fig. 16 a-Si DR의 개념도

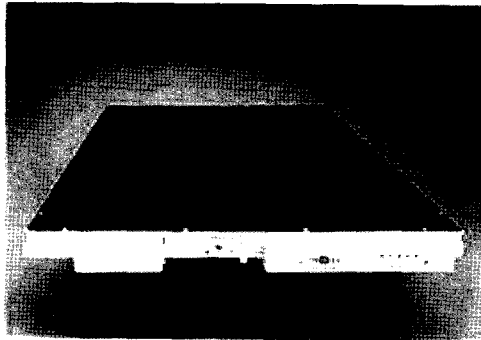


Fig. 17 a-Si DR 시스템

에너지의 강도에 비례하는 빛을 섬광체가 발광하며, 이 빛이 광다이오드에 의하여 전하로 변환된 후 광다이오드가 수집한 전하가 디지털 값으로 전환된다. Fig. 16 및 Fig. 17은 각각 a-Si DR의 개념도 및 a-Si DR 시스템을 보여준다.

3) a-Se을 이용한 DDR

비정질 Se판과 TFT 어레이로 구성되며, X-선을 조사하면 대전된 Se판이 X-선에 감응되어 전자, 정공이 발생하고, 직접 전하수집 전극에서 수집과 증폭과정을 거쳐 디지털화 된다. a-Se은 X-선 흡수특성이 있으며 매우 높은 고유 공간분해능을 지니고 있어서 검출기의 반도체 재질로 우수하다. Fig. 18 및 Fig. 19는 각각 a-Se DR의 작동원리 및 a-Se DR 시스템을 보여준다.

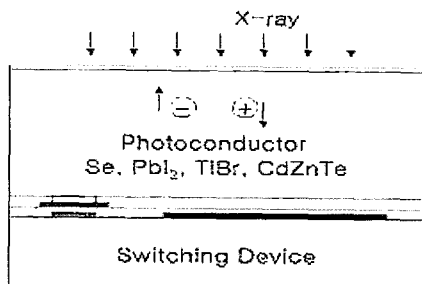


Fig. 18 a-Se을 이용한 Digital Radiography의 작동원리



Fig. 19 a-Se detector 시스템 X-ray → a-Se → 모니터

5. 맺음 말

재료나 구조물의 결함을 탐상하기 위한 비파괴시험방법은 여러 가지가 있지만 용접부의 비파괴시험은 거의 대부분 방사선투과시험법을 적용하고 있고 우리나라의 경우 비파괴검사전문업체의 매출실적 중 방사선투과검사가 차지하는 비율이 60% 이상을 차지할 정도로 방사선투과시험법이 널리 적용되고 있어 용접은 방사선투과시험과 불가분의 관계에 있다고 할 수 있다. 지금까지 이러한 방사선투과시험은 모두 방사선의 감광 및 기록매체로서 공업용 필름을 사용하여 왔다.

그러나 필름을 이용하는 전통적인 방사선투과시험법은 자료가 방대할 경우 보관이나 검색에 어려움이 있을 뿐 아니라, 필름의 제조나 현상처리에 따르는 자원낭비와 환경문제 등으로 인하여 최근에 와서는 필름을 사용하지 않는 디지털 래디오그래피에 대한 관심이 고조되고 있다.

디지털 래디오그래피는 필름 대신 IP나 반도체 어레이 검출기를 사용하여 시험체에 대한 결함의 영상을 획득하는 방법으로서 필름 래디오그래피에 비하여 여러 가지 장점을 가지기 때문에 향후 지속적인 연구개발을 통한 화질의 향상과 높은 가격문제 및 방사선투과시험과 관련된 공업규격 등이 제정 및 보완된다면 앞으로는 디지털 래디오그래피기술이 방사선투과시험분야를 주도해 나갈 것으로 전망되므로 우리나라도 이에 대한 적극적인 투자와 연구 등 빠른 대응이 요구되고 있다.

참고 문헌

1. Agfa-Gevaert N.V., Industrial Radiography, (1986)
2. Eastman Kodak Company, Radiography in Modern Industry, (1980)
3. ASNT, Nondestructive Testing Handbook, Volume I, pp. 25.1-25.15
3. 산업설비안전진단연구회, 배관안전진단기술, pp215-228, 도

- 서출판 창조, (2000)
4. The American Society of Mechanical Engineers, ASME Boiler & Pressure Vessel Code V. pp.21-30, (2001)
 5. Hologic, Inc., "Digital Radiography Systems : An Overview", (2000)
 6. Nand K.Gupta, "Real-Time On-Line Weld Inspection System", ASNT Fall Conference in Phoenix, AZ, (1999)
 7. Uwe Ewert, et al, "Recent Trends in Digital Industrial Radiology", National Seminar of ISNT, (2002)

8. 한국비파괴검사진흥협회, 비파괴검사 이대로 좋은가, NDT기술포럼, (2003)



- 조경식(曹卿植)
- 1951년생
- 한국기계연구원 시험평가센터
- 비파괴평가기술연구, 산업설비안전성평가
- e-mail: kscho@kmail.kimm.re.kr