8. 재료에 대한 검사

송 수영/ 한국산업안전공단 부장

가. 재료강도시험

구조형태를 안전하게 유지하기 위해서는 사용하는 재료의 적절 선정여부가 중요한 사항이 된다. 이를 위해서 기계적 성질을 검사하는 방법을 택하게 되며 이것을 재료강도시험 혹은 재료시험이라 부른다. 이러한 방법은 비파괴검사방법과 파괴시험방법의 두 가지로 구별되며 또한 작용하는 힘에 따라 정적시험과 동적시험으로 분류할 수 있다.

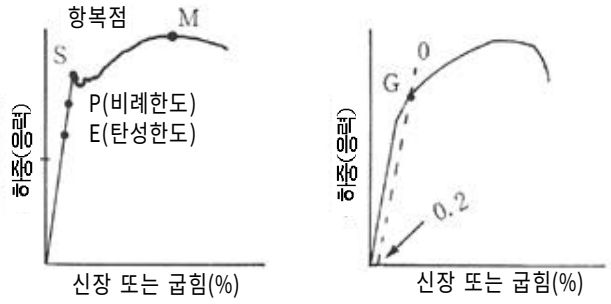
이러한 재료시험의 결과는 모든 공학적인 설계의 기초가 되므로 보편성이 요구된다. 그러므로 시험항목, 시험편의 형상, 시험방법, 시험기 등에는 엄격한 규격이 필요하게 되며 이에 의하여 모든 시험검사가 행하여지며 이를 위해 한국공업협회 규격이 그 기준이 되고 있다. 이와 관련된 것을 열거해 보면 다음과 같다.

① KS B 0802 금속재료 인장시험법
② KS B 0801 금속재료 인장시험편
③ KS B 0804 금속재료 굴곡시험방법
④ KS B 0803 금속재료 굴곡시험편
⑤ KS B 0808 금속재료 항절시험편
⑥ KS B 0809 금속재료 충격시험편
⑦ KS B 0801 금속재료 충격시험방법
⑧ KS B 0805 브라넬 경도시험방법
⑨ KS B 0811 비커스 경도시험방법
⑩ KS B 0806 로크웰 경도시험방법
⑪ KS B 0807 쇼어 경도시험방법
⑫ KS B 0814 금속재료의 인장 크리프 시험방법
⑬ KS B 0815 금속재료의 크리프 파단 시험방법

1) 인장강도시험(Tensile Strength Test)

인장강도 시험이란 소정의 시험편에 인장력을 서서히 가하면서 다음과 같은 제성질을 알아내는 검사이다.

① 항복점 ② 내력 ③ 인장강도 ④ 비례한도 ⑤ 탄성한도 ⑥ 탄성계수 등



(a) 저탄소강 (b) 합금강

<그림 8-1> 재료의 응력-변형율

가) 항복점

연강의 인장강도 곡선은 <그림 8-1> (a)의 S 점과 같이 항복점이라 일컫는 현저한 현상이 나타난다. 이 점까지는 하중과 신장은 거의 직선적 관계에 있으나 이 점을 넘으면 하중을 증가하지 않아도 늘어나기 시작한다. 이때의 최대하중(kg)을 원단면적(㎟)으로 나눈 것을 항복점 또는 항복응력(kg/㎟)이라 한다.

나) 내력

<그림 8-1>(b)의 스텐레스강, 동, 황동과 같은 항복점이 나타나지 않은 경우의 재료에 대해서는 항복점에 대응하는 내력을 측정한다. 예를 들어 보통 흔히 잘 쓰이는 내력 0.2%는 <그림 8-1(b)>과 같이 신장축상의 0.2.% 신장점에서 직선부분으로 평행선을 긋고 이것을 인장강도 곡선과 교차하는 점 G가 나타내는 하중을 원단면적으로 나눈 것으로 표시한다.

다) 인장강도(Tensile Strength)

항복점보다 한층 하중을 늘려 <그림 8-1(a)>에서 M으로 표시되는 최대하중(Ultimate tensile load, Pmax)을 검사시편의 본래의 단면적 A0(㎟)로 나눈 값을 인장강도라고 한다. 즉 인장강도 $\sigma = P_{max}/A_0$(kg/㎟)와 같다.

라) 비례한도(Proportional Limit)

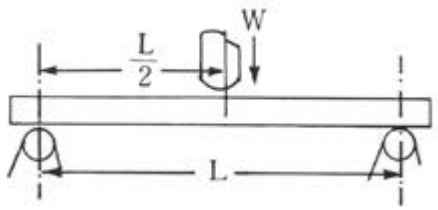
하중과 신장이 비례를 유지하는 최대 하중시 응력을 말한다.(<그림 8-1>(a)의 P점)

마) 탄성한도(Elastic Limit)

하중을 완전히 제거했을 때 재료가 부하흔적을(영구변형) 남기지 않고 되돌아 올 수 있는 최대의 응력(<그림 8-1>(a), E점)을 말한다. 그러나 이것을 측정정도에 관계되므로 영구변형의 값을 0.01% 0.03%(어떤 경우에는 0.003%, 0.001%등)로 하는 경우가 많다.

바) 신장(Extension)

인장시험편과 파단후시험편을 대조하여 표점간의 거리를 측정 본래의 표점간거리 Lo를 구하는 것으로서 재료의 연성을 판단하는 검사를 말한다.



<8-2> 항절시험

즉, 신장율 $\delta(\%) = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100$

사) 탄성계수(영계수, Young's /modulus)

영계수 $E = \sigma / \varepsilon$

실험적으로 작은 응력의 범위내에서는 동일 재료에 대하여 E의 값은 일정하며 재료의 물리적 상수에 속한다.

2) 굽힘시험(Bending Test)

가) 굽힘시험

재료의 굽힘시험은 주로 소성가공성을 조사하기 위해 행하는 것으로 시험편을 규정의 내측반경에서 규정의 각도가 될 때까지 굽혀 휘어진 부분의 외측의 표면에 있어서의 신장 또는 파열의 발생유무를 조사한다. 방법에는 자유굽힘, 형굽힘의 2종류가 있으며 어느 것이나 보통 180o로 굽힌다.

표면의 신장은 최초의 표점거리 t와 시험 전후의 표점간거리의 차이 △t에 의하여 다음 공식을 구한다.

신장(%) $= \frac{\triangle t}{t} \times 100$

나) 항절시험

항절시험은 인장시험을 행하기 어려운 굳은 재료의 성질을 조사하기 위하여 행한다. 주로 주철에 대해서 실시하며 초경합금에도 적용하고 있다.

주철품은 <그림 8-2>에 나타내는 것처럼 지점간의 중앙에 하중을 가하여 파단할때의 하중과 인성을 검사한다. 보통 항절력이라 말하고 최대굽힘응력 σ_b를 구하는 공식은

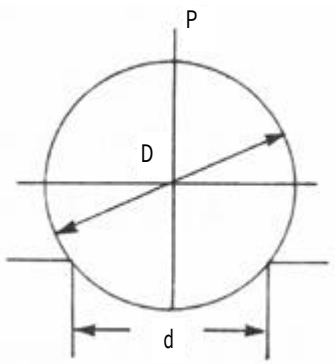
$\sigma_b = \frac{WL}{4} / \frac{\pi}{32} D^2$ (W : 파단하중)

3) 압축시험

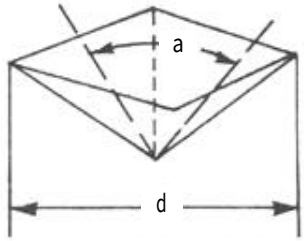
금속재료의 압축강도는 인장강도에 비하여 상당히 크므로 이것을 시험하는 경우는 거의 없다. 간혹 주철품의 시험이 행해질 정도이다. 시험편은 일반적으로 원주형인데 직경을 D, 길이를 L이라고 한다면 L/D=1 2.5정도의 것이 사용된다.

4) 경도시험

이 시험은 측정이 용이하므로 재료의 기계적 성질을 판정하는 방법으로서 흔히 쓰인다. 경도



<8-3> 브리넬 경도



<그림 8-4> 비커스 경도

는 인장시험과 달리 비교상의 수치이다 경도를 측정하는 방법으로는 일반적으로 다음과 같은 것을 들 수 있다.

가) 브리넬 경도(Brinell Hardness)

$$H_B = \frac{\text{시험하중(kg)}}{\text{영구패임의 표면적(㎟)}} = \frac{P}{\pi D}$$

$$= \frac{2P}{\pi D\ (D - \sqrt{D-d}\ )}$$

d : 압흔의 직경(㎜)
h : 압흔의 깊이(㎜)

여기서 주의해야 할 것은 시험편의 크기로서 압흔의 중심은 시험편의 테두리보다 2.5d이상, 다수측정하는 경우는 압흔의 중심과 중심의 거리는 4d이상, 시험편의 두께는 10h이상이 되어야 한다. 또 측정강도를 양호하게 하기 위하여 d/D = 0.25 0.5가 되도록 하중을 선정한다.

나) 비커스 경도

비커스 경도는 브리넬경도와 마찬가지로 하중을 압흔의 표면적으로 나눈 것으로 나타낸다. 이 경우의 입자는 <그림 8-4>에 나타내는 것과 같은 대면각 136°의 다이어몬드 사각추이다.

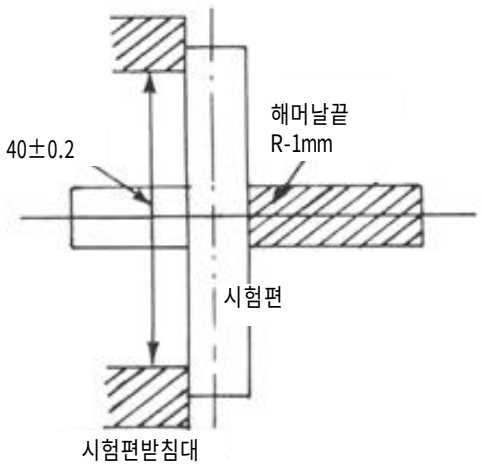
$$Hv = \frac{\text{하중}}{\text{자국의 표면적}} = \frac{2P\sin\alpha/2}{d^2}$$

$$1.854\ \frac{P}{d^2}$$

Hv : 비커스경도
P : 하중(kg)
d : 패인 대각선의 평균길이(㎜)
α : 대면각 136°

다) 로크웰 경도(Rockwell Hardness)

강구 또는 다이어몬도원추(원각 120°)를 일정한 하중으로 시험편을 눌러 생긴 패임의 깊이에 의하여 경도를 측정하는 방법이다. 비교적 간단



<그림 8-5> 샤르피 충격시험법

하고 정확한 방법으로 널리 이용되고 있다. 추와 시험하중의 조합에 의하여 A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K 등의 다수의 스케일이 있으나 일반적으로는 B, C 스케일이 많이 이용된다.

라) 쇼어경도(Shore Hardness)

이것은 일정한 높이 h_0에서 선단에 다이어몬드가 붙은 작은 해머를 시료의 시험면상에 낙하시켜 그 튀어 오르는 높이 h로 경도를 표시하는 것이다. 즉 쇼어경도는 다음의 식으로 표시된다.

$$Hs = \frac{10000}{65} \times \frac{h}{h_0}$$

또한 해머의 충격에너지를 시험편이 얼마나 흡수하느냐에 좌우되므로 KS의 경우에는 시험편의 중량을 0.1kg이상 두께는 10㎜이상으로 하고 있다. 이 시험방법도 널리 이용되고 있으나 때때로 경도표준편에 의하여 검정할 필요가 있다.

마) 기타

이 외에도 마이크로 경도시험, 긁음경도시험, 마이어(E · Meyer)경도, 누프(Knoop) 경도시험 등 여러 가지의 경도 시험방법이 있다.

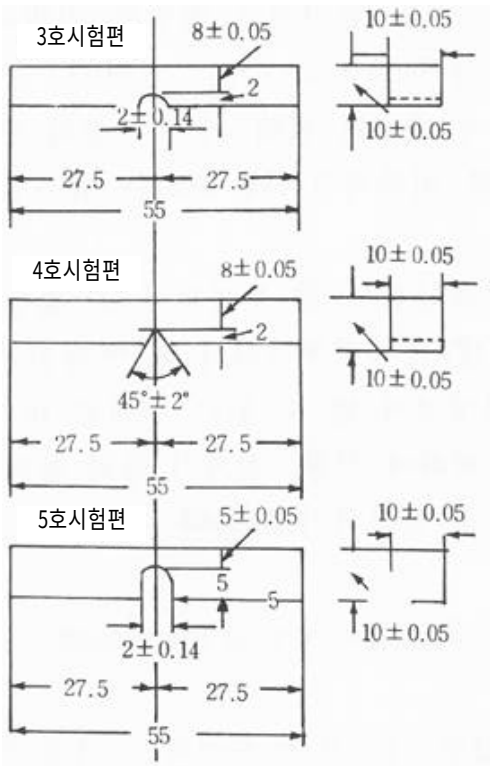
5) 충격시험(Impact Test)

금속재료에 변형의 여유를 주지않고 파단시켜 이른바 충격치를 측정하는 시험방법으로 현재 실시되는 방법은 <그림 8-5>에서보는 바와 같이 구부리는 충격를 가하여 파괴에 필요한 에너지를 측정하는 방법이다. 이 방법에도 샤르피충격시험과 아이조트 충격시험법의 두 가지가 있다<그림 8-5>는 샤르피충격시험법을 <그림 8-6>은 그 시험편이다.

6) 마찰시험

금속의 마찰에 대해서는 매우 복잡하여 산화마찰 · 점화마찰(기계마찰)등이 있다는 것은 이미 아는 사실이며 이상 설명한 바와 같은 기계적성질의 시험방법처럼 정해진 시험방법이 없는 것도 현재의 실정이다.

마찰기구에 의해, 마찰하는 상호의 성질에 의해 변화하는 것은 물론 마찰의 각종 조건, 즉 마찰하중, 마찰속도, 마찰재의 상호의 크기 · 형상, 윤활제 기타의 유무 · 주위 상황온도 · 습도 · 분위기 등에 의하여 영향을 받으므로 시험목적에 부응하는 적절한 시험장치를 선정하는 것이 중요하다.



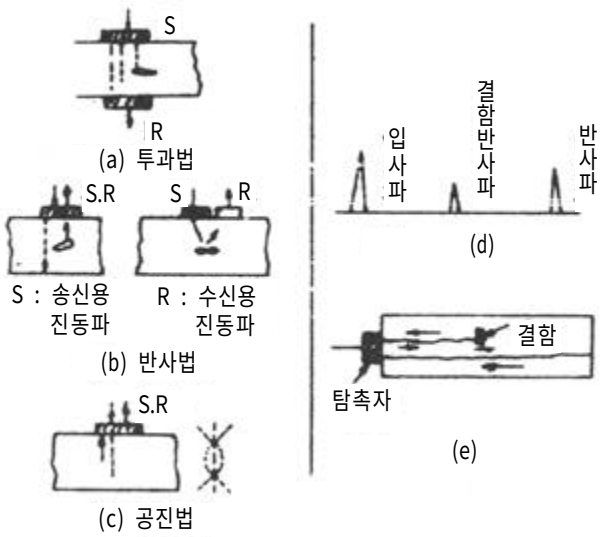
<그림 8-6> 샤르피충격 시험편

나. 비파괴검사

재료 또는 제품의 재질이나 형상 치수에 아무런 변화를 주지 않고 그 재료의 결함유무를 검사하는 방법을 비파괴검사라 칭하며, 이것을 생략하여 NDT 또는 NDI라 부르기도 한다. 압연재·주조품·단조품·용접구조물의검사에 이용되며 이로써 재료의 선택·공작가공의 선정·제품의 품질관리 등에 도움을 주고 있다. 현재 비파괴검사에 속하는 검사법의 주된 것을 들어보면 다음과 같은 것이 있다.

① 육안검사 ② 누설검사 ③ 침투검사 ④ 초음파검사 ⑤ 자기검사 ⑥ 자분탐상검사 ⑦ 방사선투과검사 ⑧ 액체침투탐상검사 ⑨ 기타

이상에서 알 수 있는 것처럼 비파괴검사는 재료나 제품에 변화를 주지 않도록 하기 위하여 진동, 전자기 등의 물리적 현상을 이용하는 검사법이다. 그 중에서 주된 것을 설명하기로 한다.



<그림 8 - 7> 초음파 검사법

1) 육안검사(Visual Inspection)

육안검사는 가장 오래되고 가장 널리 쓰이고 있는 비파괴검사 중의 한 가지이다. 간편하고 신속하며 값싸게 아무런 특별한 장치도 필요 없이 육안 또는 저배율의 확대경으로 검사가 가능한 방법이다.

이 검사의 대상이 되는 것은 재료의 표면결함, 예컨대 용접에 있어서는 언더커트, 오우버랩, 마무리의 양부, 치수의 오차와 이러한 결함을 통해 종합적 판정 등의 검사를 할 수 있고, 어떤 경우에는 정량적으로 비교적 정확히 결정할 수가 있다. 다만 이 검사법을 사용하는 데는 오랜 경험이 있어야 한다.

2) 초음파검사(Ultrasonic Inspection)

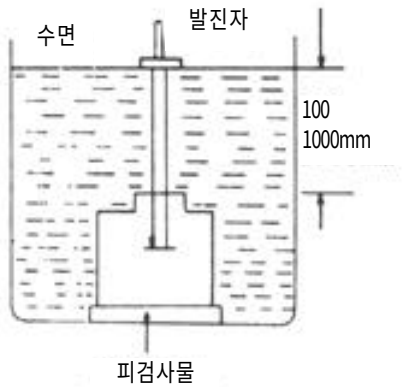
초음파검사법은 가청주파수를 넘는 음파, 보통 주파수 0.5 15MHz의 초음파를 피검사물에 보내어 내부의 결함/도는 불균일층의 존재에 의한 초음파의 진행 교란에 의해 결함을 검출하는 방법이다. 이 방법은 적당한 두께의 수정판 또는 티탄산 바륨판의 양단면에 라디오주파수의 전기적진동을 가하면 판이 기계적 진동을 일으키고 또 반대로 초음파가 기계적 진동을 받으면 양단면에 플러스·마이너스의 전기가 발생하여 전기진동으로 바뀌는 성질을 이용한다.

다음으로 초음파의 속도는 공기중에서는 330m/s, 물 속에서는 약 1,500m/s, 탄소강 중에서는 약 6,000m/s이므로 공기와 강의 경계면

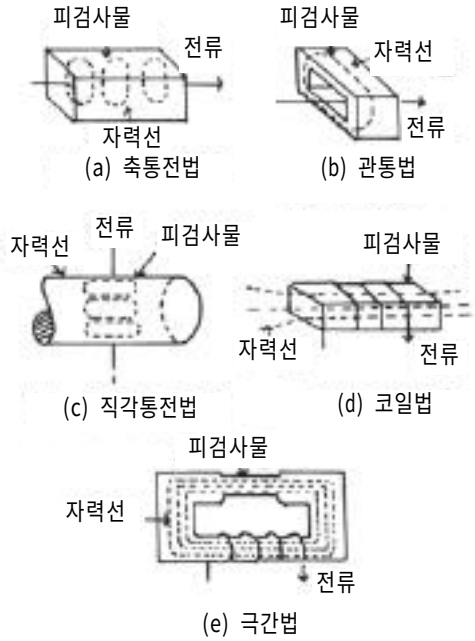
에서 초음파는 거의 100% 반사된다는 것을 알 수 있고 강 중에 초음파를 침입시키려면 물 또는 글리세린등을 강의 표면에 칠하여 초음파의 발진용탐촉자를 접촉시킬 필요성이 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 내부의 결함부에서 초음파가 강하게 반사된다는 것도 이해할 수 있다. 이러한 초음파탐상의 방법으로서는 (a) 투과법 (b) 반사법 (c) 공진법의 세 방법으로 대별할 수 있으며, 수적탐사법도 이용되고 있다.

가) 투과법

투과법은 <그림 8-7(a)>에 나타내는 바와 같이 피검사물체의 일면에서 초음파를 송신용진동자 S로부터 연속적으로 보내어 반대측의 수신용 자동자 R에 도착하는 초음파의 강도를 비교하는 방법이다. 즉 결함에 의해 초음파의 도착이 교란되는 사실에서 결함의 크기를 판단할 수 있다. 이 방법은 박판제품 혹은 단면이 일정한 것, 표면층 가까이에 있는 결함을 발견해 내는 데 편리하다.



<그림 8-8> 수적탐사법



<그림 8-9> 자기검사법

나) 반사법

<그림 8-7>에 나타내는 바와 같이 검사하는 물체에 수정의 초음파진동자를 대어 극히 단시간적으로 초음파를 투과하여 다른 결함 단면에서 반사되어 오는 음파를 수신 그 사이의 시간의 지연에서 결함까지의 깊이를 알아내는 방법이다. 이 관계가 브라운간 오실로그래프(Oscillo graph)에 나타나기 때문에 어떤 주기로 반복하여 충격파를 보내면 <그림 8-7(d)> 처럼 입사파와 반사파의 시간적 차이를 알 수 있다.

다) 공진법(共振法)

<그림 8-7(c)>에 나타내는 바와 같이 공진법은 발진자의 파장을 순차적으로 연속변화시켜 반파장의 정수배가 판두께와 동등할 때 입사파와 반사파가 공진하여 정상파를 발생하는 것을

이용하는 것으로서 판두께의 측정 또는 공진의 강도에서 부식의 정도 또는 내부 결함의 유무를 가려내는 방법이다.

라) 수적탐사법(水積探査法)

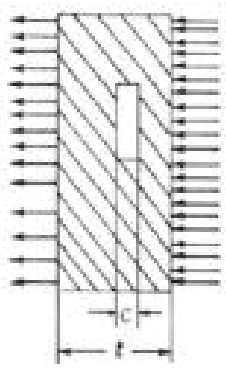
검사면에 ○○이 있을때는 발진자·수진자가 검사면에 밀착되지 않고 공기층이 생겨 초음파가 통과하지 못하므로 공기층이 생겨 초음파가 통과하지 않기 때문에 피검사물을 기름이나 물속에 넣어 <그림 8-8>과 같이 해서 검사하는 방법이 있다.

이것을 수적탐사법이라 한다.

3) 자기검사(Magnetic Flux Inspection)

자성재료의 표면과 내부결함의 탐상시험에 사용된다. 피검사물을 자화할때 표면 또는 표면에 가까운 상흔에 의하여 생기는 누설자속을 자분 또는 검사코일에 의해 상흔을 검출하는 방법이다. 이 방법은 전술한 육안검사로 보이지 않는 작은 상흔도 검출할 수가 있다.

피검사물의 자화방법으로서는 검사물의 형성과 흠의 방향 등에 의하여 여러 가지 방법이 사용된다.



<그림 8-10> x선 투과검사

자기 분말검사에서는 다음의 5가지 방법이 있고 <그림 8-9>는 이것을 나타내는 것이다. (a) 축통전법(軸通電法) (b) 관통법 (c) 직각통전법 (d) 코일법 (e) 극간법 재료의 종류에 따라 연속적으로 자화하는 것과 잔류자기를 이용하는 것이 있다. 자화전류(磁化電流)로서는 보통 500 5000 A 정도로 사용한다. 사용하는 자분(磁粉)은 철 또는 자성산화철의 분말로 검사면과의 대조를 이루기 위해 백, 적, 흑 등으로 착색하고 있다.

이것을 건조한 상태에서 사용하는 건식법과 경유 등에 혼합해서 사용하는 습식법이 있다.

4) 방사선 투과검사

방사선 투과검사는 x선 또는 γ선으로 투과하여 결함을 검출하는 방법으로 비파괴검사법 중에서 가장 널리 신뢰받고 있는 방법이다. 그러나 미크로파열이나 라미네이션류에 속하는 결함의 거물은 곤란하다.

x선은 두께가 두꺼워지면 투과하기 어려워지므로 한층 파장이 짧고 투과력이 큰 γ선이 사용된다.

γ선은 코발트 60 (Co60), tptba 134(Cs134), 이리지움 192(Ir192) 등의 방사선 동위원소가 많이 사용된다. 이 장치의 취급은 간단하나 X선과 마찬가지로 인체에 유해하므로 법규에 의하여 단속을 받고 있다.

가) X선투과검사

x선은 물체를 투과하나 일부의 x선은 물체중에 흡수되는 성질이 있다. 투과 x선의 강도는 투과의 두께·결함의 유무·재질에 따라 변화한다. 또 x선은 형광물질에 닿으면 가시광선을 발생하거나 사진필름을 감광시키는 성질이 있다.

x선투과법은 이와 같은 성질을 이용하여 금속 내부에 있는 결함도 검출할 수 있는 것이다. 가령 파장 λ로 일정한 강도의 x선을 <그림 8-10>과 같이 일정한 두께 t의 금속을 투과시키는 경우

$Iy/Ix = e^{+\mu c}$

Ix : 무결함부의 투과 x선의 강도

Iy : 결함부(길이 c)의 투과선의 강도

μ: x선 흡수계수

즉 결함이 있는 곳과 없는 곳의 투과 x선의 강도의 비는 입사 x선의 강도에는 무관하며 결함의 길이 c와 물질의 흡수계수로 결정된다. Iy/Ix 가 클수록 사진필름에 나다나는 검기(黑)의 차가 커져 콘트라스가 증가하므로 μ가 되도록 커지도록 파장이 긴 x선을 사용하는 것이 바람직하다는 것을 나타내고 있다.

나) X선장치

피검사물을 X선 검사실에 반입하여 검사하는 경우 보통 150 400KV, 현장에 가서 검사하기 위한 휴대용 X선 장치는 파고치 125 200KV로 중량은 50kg이하의 것 2개로 분할하여 운반에 편리하게끔 한다. <표 8-1>은 방사선원과 실용투과판 두께의 관계를 나타낸다.

최근에는 두꺼운판용으로서 10,000KV, 2,000KV 공진변압기식 고전압 X선 발생장치가 실용화되고 있다. 또한 베타트론이라 칭하는 원주괴도상을 전자를 회전운동시켜 1회전마다 수

<표 8-1> 방사선원과 실용투과판 두께의 관계

방 사 선	스 크 린	실용 판두께[㎜]	
		동	알 미 늄
50kV X선	없 음	0.12 0.60	2.0 12
100kV X선	없 음	1.0 4.8	12 25
150kV X선	없음연백	25까지	100까지
	형 광	38까지	160까지
250kV X선	연 백	50까지	25 200
	형 광	75까지	300
400kV X선	연 백	75까지	25 225
	형 광	100까지	325
1000kV X선	연 백	25 225	25 300
	형 광	25 175	400
2000X선	연 백	25 225	-
15 MeV 베타트론	연 백	30 300	-
24 MeV 베타트론	연 백	50 500	-
Ra	연 백	25 100	-
Co^{60}	연 백	25 150	-
Ir^{192}	연 백	12 70	25이상
Cs^{137}	연 백	20 75	-

백만 내지 일억전자볼트의 높은 에너지를 주어 이것을 타케트에 충돌시킴으로써 X선을 발생하는 장치가 이용된다. 베타트론은 비교적 값이 싸고 고전압의 X선이 얻어지는것이 특징이다.

다) 촬영

X선투과시험방법에 대한 규정은 아래와 같다.

(가) 조건-X선 투과사진촬영에 영향을 주는 인자는

① 파장(관구전압 KV p)
② 강도(관구전류 mA)
③ 타게트에서 필름까지의 거리
④ 피검사물의 두께와 밀도
⑤ X선원의 초점의 크기
⑥ 노출시간
⑦ 필름의 종류
⑧ 스크린의 종류

(나) 투과도계(Penetrameter)

투과도계에 대한 규정에서는 두께의 2%의 결함이 검출되어야 한다. 이것을 확인하기 위하여 피검사물 표면에 투과도계를 놓고 그 상을 동시에 촬영한다.

투고도계에는 여러 종류가 있으나 KS에서는 철사형을 채용하고 있다. 이것은 직경이 약간 다른 철사를 평행으로 7개 또는 10개를 등간격으로 설치 또는 테에다 붙인 것으로서 예컨대 판두께 5 50㎜에 대해서는 직경 0.1, 0.2…, 1.0㎜와 같이 0.1㎜씩다른 10개의 철사가 사용되어 판두께 2%에 해당하는 직경의 철사가 필름상에 판별되는 지를 조사하는 것이다.

(다) 기타

X선사진촬영은 시간이 걸리므로 최근에는 영상증폭기를 사용하여 직접투시에 의해 검사능력을 향상시켜 각종의 연구에 공헌하고 있다.

(라) X선 결함판정

정상적인 X 선사진에 의한 X 선결함의 판정은 일정한 지식을 가진 경험 있는 사람에 의해서 비로소 정확한 판정이 가능하다는 사실에 주의해야 한다.

5) γ선 투과검사

두께가 두꺼워지면 보통의 X선으로는 투과하기 어려워지므로 X선보다 한층 파장이 짧고 투과력이 강한 γ선을 이용한다. γ선원으로는 천연의 방사성원소 외에 최근에는 원자로에서 만들어지는 인공방사성동위원소(Radioisotope)가 흔히 사용된다.

γ선은 장치가 간단하여 현장에서의 취급이 용이하며 가반성이고 값이 싸다. 방사성동위원소로서 현재 쓰이는 것은 Co60 Cs134 Ir102 등이다. γ선은 인체에 해로우므로 보통 Al제 캡슐에 채워 텅스텐제의 용기에 넣어 보관하고 사용시에 뚜껑을 벗겨 사용한다.

6) 액체침투탐상검사

액체침투탐상검사의 원리는 시험품 표면에 침투액을 적용시켜서 균열 등의 불연속부에 침투시킨 후 과잉의 침투제를 제거하고, 현상제를 적용시켜 침투된 침투액을 추출(抽出)시켜 불연속의 위치, 크기 및 지시모양을 검사하는 방법이다. P·E