

技術資料

## 주물의 비파괴검사기술원리와 최근의 적용

박익민, 김부섭

### Principle of Nondestructive Testing Technique and Its Recent Application

I. M. Park and B. S. Kim

#### 1. 서 언

주물에서 나타나는 주조결함은 표면결함으로 crack, scab, buckle 등이, 내부결함으로 porosity, void, blow hole 등이 있고 이외에도 많은 결함들이 있다. 주조결함들은 현장기술자들을 괴롭히는 오랜 문제점으로 이에 관한 대책과 연구가 많이 보고되고 있다. 그러나 주조 결함을 완전히 없애는 것은 사실상 불가능하므로 주물의 신뢰성을 향상시키기 위해서 주조결함의 유무를 확인, 검사할 필요가 있다.

비파괴검사 혹은 비파괴시험은 기계와 구조물을 손상시키지 않고 결함 혹은 이물질의 존재 여부를 조사하는 기술이다. 일반적으로 내부에 존재하는 결함조사에는 방사선 투과법, 초음파시험법 등이 사용되고 표면결함조사에는 자분탐사법, 침투탐상법, 와류탐상법 등을 사용하는데 주물종류나 결함의 종류에 따라 최적의 방법을 적용하는 것이 중요하다.

본 자료에서는 각 비파괴시험법의 원리와 특징을 간략히 정리하고 최근에 적용되고 있는 분야를 소개한다. 이 가운데 활용성이 높은 초음파탐상시험과 X선 CT는 비교적 상세한 설명과 적용예를 들었다.

#### 2. 여러가지 비파괴검사

##### 2.1 방사선투과시험

방사선에서는 X선,  $\alpha$ 선,  $\beta$ 선,  $\gamma$ 선, 중성자선 등이 있는데 그중 물질을 투과하기 쉬운 것은 X

선,  $\gamma$ 선 혹은 중성자선이다. 일반적으로 방사선 투과시험에서는 파장이 짧은 전자파인 X선 또는  $\gamma$ 선이 많이 사용된다.

금속을 진공중에서 백열상태로 가열하면 표면에서 열전자가 방출된다. 이 가열한 금속을 음극으로 하고 다른 금속(target)사이에 수kV에서 수백kV의 전압을 가하면 열전자는 급속히 가열되고 고속으로 타겟에 충돌한다. 그러면 열전자의 운동에너지의 일부가 X선으로 되어서 타겟에서 방출된다. 타겟과 음극과의 사이에 인가(applied voltage)된 전압을 관전압이라 하고 음극과 타겟사이에 흐르는 전류를 관전류라 한다.

발생한 X선의 강도는 관전압과 관전류의 증가에 따라서 상승해간다. 관전압이 높아짐에 따라서 X선의 강도가 최대가 되어 파장은 짧아진다. 관전압이 어떤 수치이상으로 되면 특정파장이 강한 X선이 발생한다. 연속된 파장분포를 표시하는 X선을 백색 X선이라 하고, 강도가 강한 특정파장의 X선을 특성 X선이라 한다. X선 투과시험에서는 백색X선이 이용된다. 백색X선은 어떤 파장범위에 분포되지만 이중에 파장이 짧은 X선은 물질을 투과하기 쉬운 hard-X선이라고 불리고 파장이 긴 X선은 물질을 투과하기 어려운 soft-X선이라 불린다. 금속을 투과시키는데는 hard-X선이 이용된다.

X선이 물질을 통과할 때, 물체를 구성하는 원자와 충돌한다. X선의 세기를 I로 하면 투과하는 물체의 두께 d와의 사이에 다음의 관계가 있다.

$$I = I_0 \exp(-\mu d)$$

여기서  $I_0$ 는 물체에 입사할때의 X선의 세기이

다. 또,  $\mu$ 는 선흡수계수로 불려지고, 방사선의 종류와 물체의 종류, 밀도에 의존하는 계수이다. 위의 식에 따라 투과하는 물체의 두께가 두꺼운 만큼 투과 X선의 강도는 감소해간다. 또, 물체의 원자번호가 크고 밀도가 큰만큼 선흡수계수  $\mu$ 는 크게 되고 투과하는 X선의 강도는 감소하게 된다. 방사선투과시험에서는 시험체를 투과하는 X선을 이용하여 내부의 틈이나 이물질 등의 유무를 조사한다.

### 2.2 자분탐상시험

Fe같은 강자성체가 자화되어 자석이 되면 표면근처에는 자속이 발생한다. 철분은 이 자속에 따라서 나열되고 모양을 만든다. 만약 강자성체의 표면 혹은 표면근처의 내부에 결함이 있다면 결함부위에서는 일반적으로 자속이 흐르기 어렵게 되어 결함부분을 피해가는 모양으로 자속이 넓어지고 물체표면의 자속이 새어나온다. 이 새어나온 자속을 누설자속이라 한다. 자화된 물체의 표면에 철분같은 강자성체의 미립자(자분)를 뿌리면 누설자속에 영향을 받아서 결함의 어떤 부분에 자분이 모인다. 이 자분이 만드는 모양을 자분모양이라 한다. 이 모양에서 결함의 유무나 결함의 크기를 판정할 수 있다.

자분탐상법에서는 시험체가 강자성체가 아니면 적용할 수 없는 결점이 있다. 그러나 표면에 존재하는 균열과 같은 결함의 검출에는 가장 우수한 방법이고 또 표면에서 2-3mm내에 있는 결함도 검출할 수 있다. 검출 가능한 결함은 균열 같은 선상의 표면결함 및 내부균열이고, pin hole 같은 점상의 결함을 검출하는 것은 어렵다.

시험에서는 결함에 따라 자속이 차단되는 방향으로 변화할 필요가 있다. 예를 들어 균열의 경우 균열에 대해서는 가능한한 직각방향의 자속을 시험체에 가한다. 만약 균열과 평행한 자속을 가하면 자속은 결함에 차단되지 않고 누설자속이 발생하지 않아 결함에 따른 자분모양은 나타나지 않는다.

### 2.3 침투탐상시험

침투탐상시험에서는 모세관현상을 이용해서 결함부위에 염색도료와 형광도료를 스며들게 해서 균열 등을 찾아낸다. 침투탐상시험은 침투액

의 도포, 세정, 현상의 3가지 공정으로 행한다. 침투액으로는 붉게 착색된 염색침투액이나, 형광 물질을 함유한 형광침투액을 이용하여 시험체 표면에 도포한다. 염색침투액은 밝은 장소에서 관찰할 때에 사용하고 형광침투액은 어둡게 한 장소에서 자외선을 닿게해서 형광을 발생시키고 관찰할 때 이용한다.

침투액을 표면에 도포한 상태에서는 결함은 관찰되지 않는다. 결함의 유무를 보는데는 표면에 남은 침투액을 제거할 필요가 있다. 이 세정액은 아세톤 등의 유기용제나 물을 사용한다.

세정한 후 그대로 건조하던지 표면에 하얀 분말을 얇게 도포한 후 건조한다(현상). 현상에 따라 결함중에 침투해 있는 액이 표면에 배어오와서 결함에 특유한 모양을 나타낸다. 표면에 하얀 분을 도포한 경우는 백지에 적색이 섞이기 때문에 결함의 유무를 용이하게 관찰할 수 있다.

### 2.4 와류탐상시험

와류탐상시험(전자유도시험)은 도체중에 발생하는 와전류 현상을 이용하는 시험이다. 와전류의 크기나 분포는 금속의 전기전도도나 투자율 등에 의존해서 변화하지만 균열 등의 결함이 있어도 와전류는 변화한다. 금속중에 발생하는 와전류는 금속의 표면근처에 집중하기 때문에 와류탐상시험은 금속의 표면 또는 표면근처에 있는 결함의 검출에 적당하다.

시험에 사용되는 코일에는 시험체의 형상에 따라 관통코일, 내삽코일, probe코일이 있다. 관통코일은 시험체를 둘러싸는 것처럼 코일을 배치하는 형태로 관, 봉, 선 등의 시험에 이용되고 결함의 검출이 비접촉상태에서 고속으로 행해진다. 내삽코일은 관통코일과 동형의 코일을 관의 내측에 삽입하고 내부에서 결함의 검출을 실시하는 경우에 사용된다. Probe코일은 코일의 축이 시험체 표면에 수직이 되도록 닿게해서 사용된다. 따라서 이 코일은 관이나 봉외에 판재 등에도 사용된다.

보통의 시험에서는 코일부분의 전압변화를 측정하고 결함의 유무를 조사한다.

### 2.5 초음파 탐상시험

초음파란 주파수가 약 20kHz이상의 인간의 귀

에 들리지 않는 소리이다. 가청음이 음원에서 전 방향으로 넓게 이동해 가는것에 비해 초음파는 강(鋼) 등의 물체내를 이동하는 경우, 자동차의 헤드라이트처럼 윤곽이 확실하게 된 음의 빔 (beam)이 되어서 어떤 한정된 방향, 범위에만 넓게 직진하는 성질이 있다. 또 물체내의 이물질이나 공극결함의 경계면에서 반사하는 성질이 있다. 이같은 초음파의 성질을 이용해서 재료나 구조물에 발생한 결함을 검출하고 그 위치나 크기를 측정하는 것이 초음파탐상시험이고 밀면(이면)까지의 초음파 왕복시간을 측정하는 것이 초음파 두께 측정이다. 여기서는 초음파 탐상시험에 대해서 설명한다.

초음파의 종류로는 종파, 횡파, 표면파, 판파 등이 있다. 초음파탐상시험에는 종파와 횡파가 주로 사용되고, 특수한 초음파탐상시험에는 표면파나 판파가 사용되고 있다.

2.5.1 파장과 주파수

초음파의 음속을 C, 파장을 λ, 주파수를 f로 하면, 이들 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$C = \lambda \cdot f$$

어떤 물체중에 초음파가 이동할 때 음속은 일정하기 때문에 주파수를 높게하면 파장은 짧게된다. 또, 횡파음속은 종파음속의 약 반이기 때문에 주파수가 같아도 파장은 약 반이 된다.

일반적으로 파장이 짧을수록 결함에 따라 반사산란이 현저하게 되기 때문에 주파수가 높은 초음파를 사용하는 것이 결함의 검출에 유리하다. 그러나 주파수를 너무 높게하면 결함의 검출이 곤란하게 되기 때문에 주파수의 선정에는 주의가 필요하다.

표 1은 초음파 탐상시험의 종류이고, 현재 가장 넓게 사용되고 있는 초음파 탐상방법은 펄스 반사법이다.

펄스반사법이란 초음파의 진동지속시간이 수 μs 정도의 지극히 짧은 펄스를 시험체에 입사시켜 시험체의 밀면이나 결함 등의 반사원에서의 반사신호(이것을 echo라 한다)를 수신하는 것에 따라 반사원의 위치나 크기를 아는 방법이다.

그림 1에서는 탐촉자법에 따른 펄스반사법의 원리를 나타낸다. 우선, 초음파 탐상기의 펄스전압발진기에 따라 발생한 고주파 전압을 탐촉자에

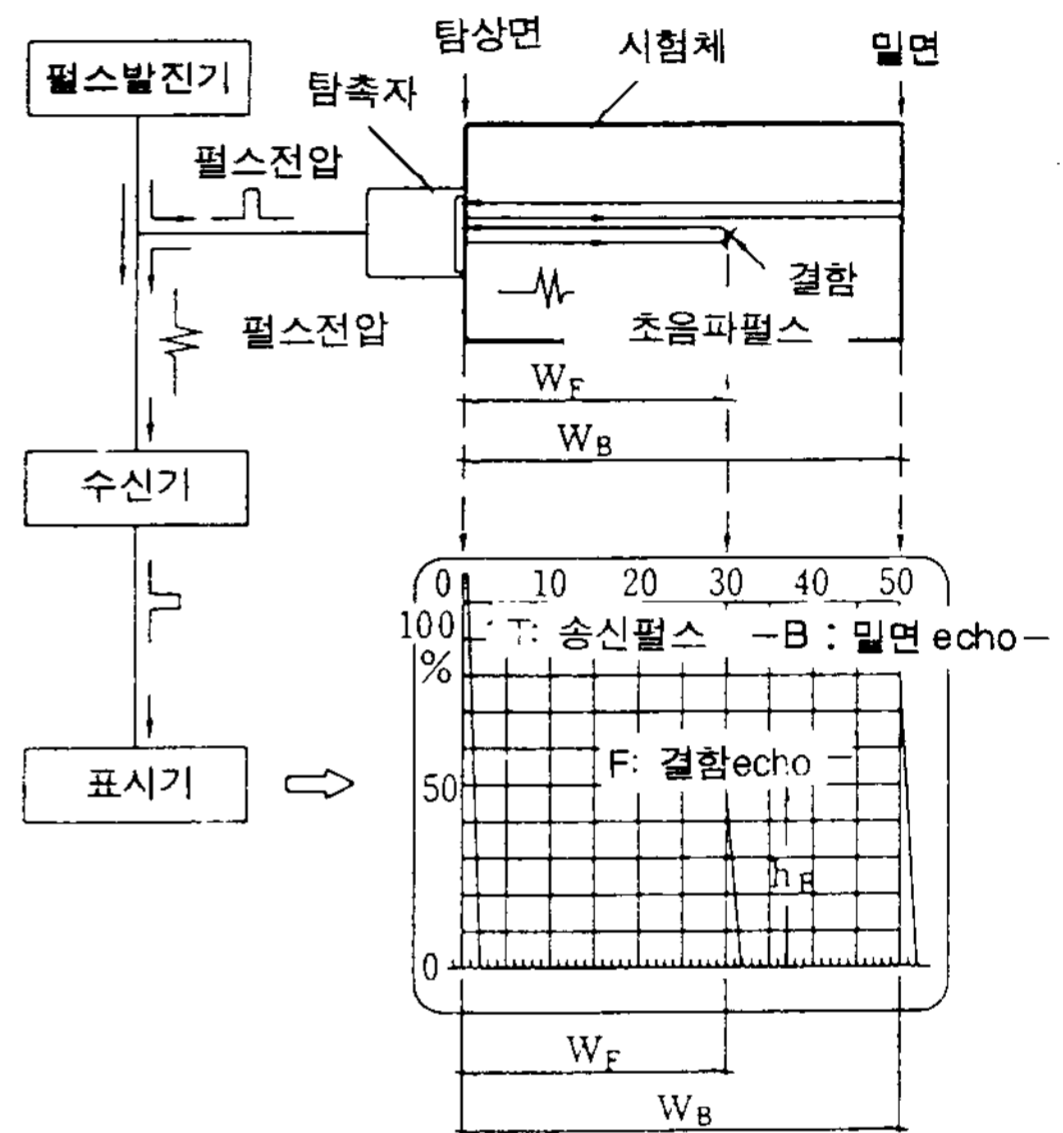


그림 1. 펄스반사법의 원리

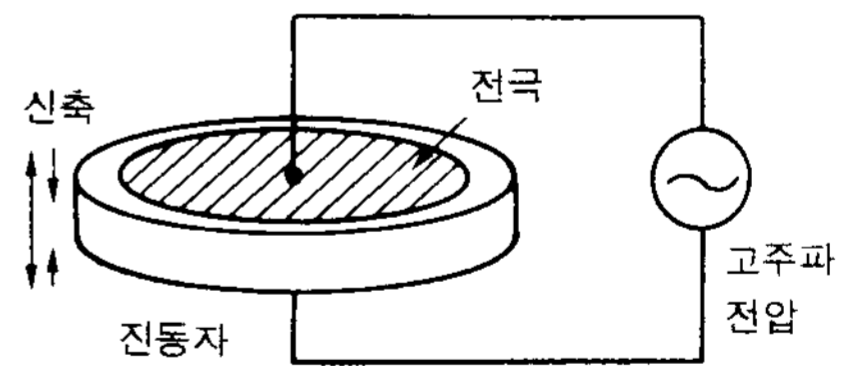


그림 2. 진동자의 동작

표 1. 초음파탐상시험법의 종류

초음파의 형태	송수신방식	탐촉자의 수	탐촉방법	파동양식·투과방향
펄스파법	반사법	1탐촉자법	직접접촉법	수직법(종파·횡파) 경사각법(종파·횡파)
연속파법	투과법	2탐촉자법	수침법	표면파법 판파법 누설(漏泄)표면파법

가한다. 탐촉자(transducer)에는 그림 2에 표시한것 같은 진동자(압전재료)가 있고, 이 진동자가 펄스전압에 따라 신축운동을 일으키는 초음파 펄스가 발생한다. 이 탐촉자를 시험체에 닿게하면 시험체내에 초음파 펄스가 전해지고 결함이나 밀면 등의 반사원에 닿으면 그곳에서 반사되어 탐촉자에 되돌아와서 수신된다.

진동자에 따라 그 진동이 고주파 전압으로 변환되고 수신기를 통해서 탐상기의 브라운관에 그림 1처럼 결함 echo-F나 밀면 echo-B로서 표시된다. 표시기의 횡축은 시간축이고 echo가 되돌아 올때까지의 필요한 시간이기 때문에 반사원까지의 거리를 알수 있다. 또, 표시기(브라운관)의 종축은 반사파의 진폭치, 즉 결함이나 밀면의 echo크기를 표시하고 있다. 결함의 크기는 echo의 크기 혹은 echo가 나타내는 범위에서 추정된다.

2.5.2 초음파 탐상장치

초음파탐상장치는 초음파 탐상기, 탐촉자 및 탐상케이블로 구성된다. 자동탐상의 경우에는 이외에 탐촉자 자동주사기구와 데이터처리 장치가 추가된다. 탐상기 전면에는, 표시기의 종축 및 횡축의 조정손잡이가 붙어 있다. 초음파를 송신하기 위한 탐촉자로서 시험체표면에서 수직으로 초음파를 투과시킨 수직탐촉자와 시험체 표면에서 비스듬히 초음파를 투과시키는 경사각탐촉자가 일반적으로 사용되고 있다. 탐촉자의 구조는 그림 3에 표시된다. 탐촉자 케이블은 탐상기와 탐촉자 사이에서 신호를 전달하는 케이블이고 동

축케이블이 사용되고 있다.

2.5.3 접촉매질

탐촉자를 시험체표면에 밀착시켰을때, 그 사이에 약간의 공기층이라도 있으면 초음파는 시험체 내부에 거의 도달하지 않는다. 그러나, 시험체표면에 액상의 매질을 도포한 후 탐촉자를 밀착시키면 초음파는 효율 좋게 시험체 내부로 이동한다. 이같은 목적으로 사용하는 액상의 매질을 접촉매질이라고 일반적으로 그리세린, 그리이스 등이 사용된다. 탐상시험전의 기본작업으로는 탐상방법의 선정, 주파수의 선정, 탐상면의 세척 등이 필요하다.

수직탐상법은 초음파를 탐상면에 대해서 수직으로 송수신해서 탐상하는 방법이다. 사용하는 초음파는 주로 종파이다. 결함이 존재하지 않는 정상부위에서는 탐상기의 표시기에는 밀면 echo만이 나타나고, 결함부분에서는 밀면 echo의 앞에 결함 echo가 나타난다. 결함을 검출하는데는 수직접촉자를 탐상면 위에서 이동하면서 밀면 echo의 앞에 나타나는 결함 echo를 찾고, 결함의 유무를 조사한다. 정상부위에서 나타난 밀면 에코의 표시위치(빔거리)는 시험체의 두께에 상당하고, 결함에코우의 표시위치를 읽으면 탐상면에서 결함까지의 거리 즉, 결함깊이 위치를 측정할 수 있다. 또, 밀면에코우의 다중반사의 상황에서 시험체의 감쇄상황 혹은 탐촉상태의 양부를 알 수 있다.

2.5.4 탐상방향의 선정

초음파 투과방향에 대해서 수직으로 넓게 있는

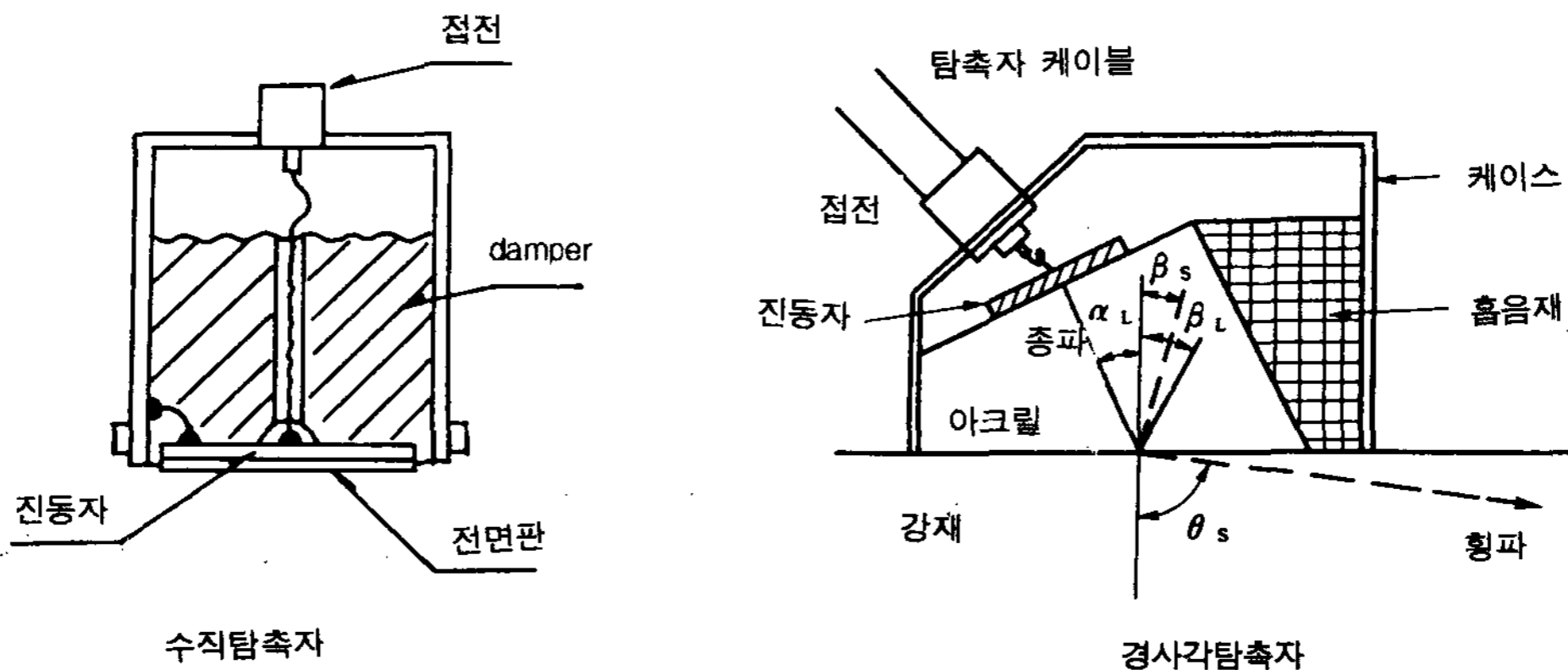


그림 3. 초음파탐촉자의 구조

결합에서의 에코우는 크게 나타나고 결합 검출율은 높다. 따라서 검출된 결합의 발생위치나 방향에 대응시켜서 탐상면 혹은 탐상방향을 선정한다. 예를들면 압연재에서는 내부 결합은 압연 방향으로 평행이기 때문에 판의 두꺼운 방향의 투영면적이 최대가 된다. 이 때문에 압연면을 탐상면으로서 수직방향에의 탐상이 행해지고 있다. 주조재나 단조재에서는 모든 방향에서 탐상이 행해지지만 주·단조방법에 따라서 결합의 방향이나 발생위치 등을 추정하여 탐상되고 있다.

2.5.5 탐촉자의 선정

직접접촉 또는 수침용의 수직탐촉자를 주로 사용한다. 또 시험체에서 가까운 부분의 탐상에는 진동자 수직탐촉자나 지연재 부착 수직탐촉자가 사용된다. 시험주파수의 선정은 탐상면의 거침이나 곡률, 감쇄나 SN비(signal to noise비) 등을 고려해서 선정한다. 얇은 물체나 표면근방의 탐상, 혹은 결정립에 따른 노이즈(林狀에코우, 숲모양에코우)가 많고 SN비가 적은 재료에 대해서는 주파수대역폭이 넓은(광대역)탐촉자의 사용이 유효하다. 진동자의 크기는 결합의 위치나 크기 등을 고려해서 선정한다.

2.5.6 검출레벨과 탐상감도

검출레벨이란 결합에코우-높이의 최저한계 수준으로, 이 수준을 넘는 에코우에 대해서 그 반사원의 위치나 크기 등을 측정해서 시험체의 평가나 처리가 결정된다. 따라서 검출레벨은 검출해야 할 결합의 최소수치와 그 에코우 높이를 참고로 해서 결합을 놓치는 일이 없도록 결정해야 한다. 대개는 규격과 기준에 따라서 정해져 있는 것이 많다.

탐상감도의 조정방법으로서 표준시험편을 이용하는 방법이다. 표준시험편을 사용하는 경우 시험체와의 재질, 탐상면의 거칠기, 곡률, 감쇄 등이 다른 경우에는 감도보정이 필요하게 된다. 또, 시험체의 밀면 에코우를 이용하는 방법도 있다. 이 방법에서는 시험체를 사용하기 때문에 표면상태나 감쇄에 따른 감도 보정이 필요하지 않다.

2.5.7 경사각 탐상법

경사각탐상법은 초음파를 탐상면에 대해서 비스듬한 방향으로 송수신해서 탐상하는 방법이다. 일반적으로는 횡파가 사용되지만 고감쇄재에는

종파경사각이 사용된다. 사각법의 용도는 넓지만 특히 용접부나 관류의 검사에 많이 사용되고 있다.

그림 4는 경사각탐상법의 개요이다. 경사각탐상의 경우는 수직탐상과 달리 정상부위에서도 밀면 에코우가 얻어지지 않고 결합 등의 반사원에 닿으면 반사해서 되돌아와서 브라운관에 에코우로서 관찰되기 때문에, 에코우 등의 반사원의 위치를 직감적으로 아는 것은 가능하지 않다. 이때문에 경사각 탐상에서는 빔의 거리와 미리 측정해 둔 탐촉자의 입사점 및 굴절각을 이용한 삼각함수의 관계식에 따라 반사원의 위치를 기하학적으로 추정한다. 여기서 입사점이란 경사각탐촉자의 초음파 빔 중심축이 탐상면에 입사하는 점이고 굴절각이란 시험체중을 이동하는 초음파빔의 진행방향과 입사위치에 있어서 탐상면의 법선과 이루는 각도이다.

경사각탐상에 따른 결합검출은 직접결합을 찾는 직사법과 초음파빔을 시험체 이면에 1회만

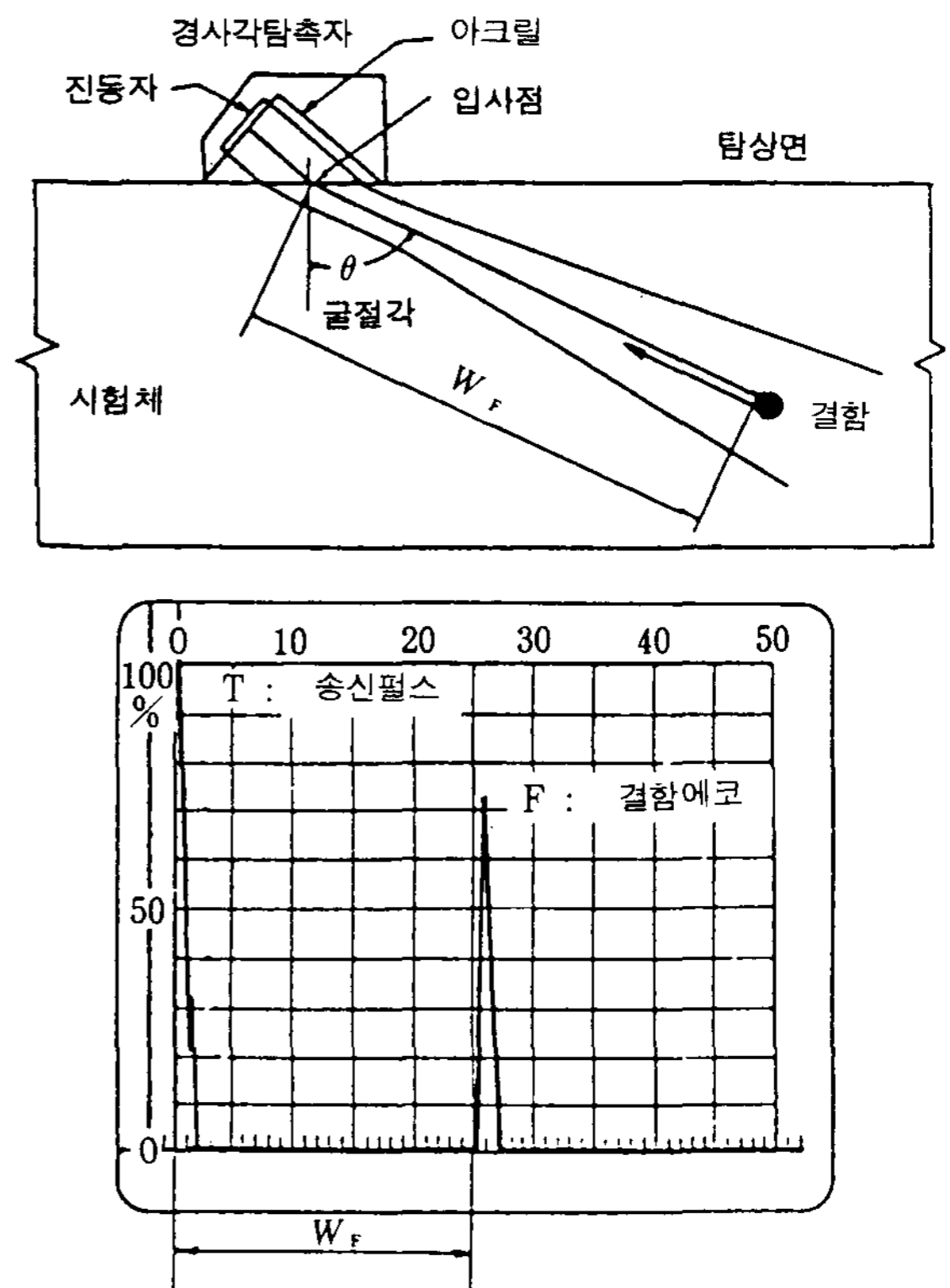


그림 4. 사각(斜角)탐상과 도형

반사시켜서 결함을 찾는 1회 반사법을 병용하는 것이 많다.

시험체의 판두께  $t$ , 탐촉자의 굴절각  $\theta$ , 빔 거리  $W$ 로 하면 직사법에 있어서 결함의 위치추정에 필요한 결함의 깊이 위치  $d$ , 탐촉자 결함거리  $Y_F$  및 기준선에서 결함까지의 수평거리  $Z$ 는 다음식에 따라 구할 수 있다.

결함의 깊이위치 :  $d = W \cdot \cos\theta$

탐촉자 결함거리 :  $Y_F = W \cdot \sin\theta$

기준선에서 결함까지의 수평거리 :

$Z = Y - Y_F = Y - W \cdot \sin\theta$

경사각탐상에 있어서는 사각면 뿐만 아니라 탐촉자의 방향에 따라서 탐상방향은 변화한다. 따라서 초음파 빔이 결함에 가능한한 직각으로 닿도록 탐상면 및 탐상방향을 선정한다.

탐촉자는 일반적으로는 횡파사각탐촉자가 사용되지만 감쇄가 우수한 재료에는 종파사각탐촉자가 사용되거나 빔을 미세하게 조절하기 위해 집속경사각탐촉자나 진동자경사각 탐촉자가 사용되고 있다. 여기서는 평판1 진동자 타입의 횡파 경사각 탐촉자를 대상으로 해서 서술한다.

경사각 탐촉자에는 주파수, 진동자치수, 굴절각에 따라서 여러가지가 있어서 적절하게 사용한다. 용접부의 탐상경우는 시험체의 재질, 판두께, 형상 및 빔 형상 등을 고려해서 적당한 것을 사용하고 있다.

시험주파수는 검출한계가 되는 결함치수, 탐촉자 및 결함의 방향성, 탐상면의 거칠기나 곡률에 따른 전달손실, 감쇄나 SN비 등을 고려해서 선정된다. 일반적으로 사용되는 주파수는 2-5MHz 이고, 용접부의 탐상에는 5MHz가 많이 사용되고 있다.

검출각의 선정은 시험체의 형상과 치수, 예상되는 결함의 방향을 고려하고 결함에 수직으로 가까운 방향에서 초음파가 닿도록 또 가능한한 짧은 빔으로 탐상할 수 있도록 굴절각을 선정한다.

2.5.8 경사각탐촉자의 주사방법

경사각탐촉자의 기본주사방법은 좌우주사, 전후주사, 전방부좌우주사가 있다. 이외의 주사방법에는 응용주사로서 진동자주사, 경사주사, 지그재그주사가 있고, 자동탐상용 주사로서 수평형 주사, 수직형 주사가 있다.

탐상감도의 조정방법으로서 표준시험편을 사용하는 방법이 있다. 표준시험편을 사용하는 경우, 시험체와의 재질, 탐상면의 거칠기, 곡률, 감쇄 등이 다른 경우에는 감도보정이 필요하게 된다.

2.5.9 시험체중에서의 초음파거동

시험체의 표면, 즉 탐상면이 거친 경우 혹은 곡률을 가지는 경우에는 초음파의 전달효율이 저하한다. 이것을 전달손실이라 하고 주파수가 높은만큼 현저하다. 또한 초음파가 시험체중을 지나갈 때 초음파 빔의 넓이에 따라 확산손실이 생기며 결정립에 따른 산란 및 내부마찰 때문에 초음파의 감쇄가 발생한다. 다결정체 금속에 있어서 초음파의 감쇄는 결정립 또는 그 조직에 따른 산란감쇄가 많고 내부마찰에 따른 감쇄는 극히 작고 감쇄는 밀면에코우 높이의 저하 및 밀면에코우의 다중반사회수의 감소로서 관찰된다. 또, 산란파의 일부는 탐촉자에 되돌아와서 노이즈로서 관찰된다. 이처럼 감쇄와 임상에코우는 시험체중의 결정립에 따른 초음파의 산란에 따라서 발생하는 것이고 주파수 의존성이 강하고 파장과 결정립경과의 관계에서 나타내는 방법이 결정되고 결정립이 크게됨에 따라서 감쇄도 임상에코우도 증가한다. 감쇄는 결함의 에코우 높이를 내려가게 할 뿐이지만 임상에코우는 결함의 검출한계에 영향을 주기 때문에 그 저감에 유의할 필요가 있다. 예를 들면 주조체와 오스테나이트계강의 용접부처럼 결정립이 조대한 시험체를 초음파탐상하는 경우에는 펄스폭의 좁은 광대역(고분해능)탐촉자를 사용하는 것에 따라 임상에코우 높이를 낮추어 SN비를 높게 할 수 있다.

2.5.10 거리진폭특성

초음파가 시험체중을 지나가는 거리가 짧게되면 위에서 언급한 손실, 감쇄에 따라 초음파는 점점 약하게 된다. 따라서 같은 크기의 반사원에 있어서도 탐촉자의 가까이 있는 경우와 멀게 있는 경우에 그 에코우높이는 다르다. 같은 크기의 결함은 그 존재단위에 관계없이 항상 같은 것이라는 평가를 해야 한다. 이 때문에 실제 탐상시험에서는 탐상에 앞서서 거리와 에코우 높이의 관계를 표시하는 거리 진폭특성곡선을 작성한다.

2.5.11 결함이나 경계면에서의 반사

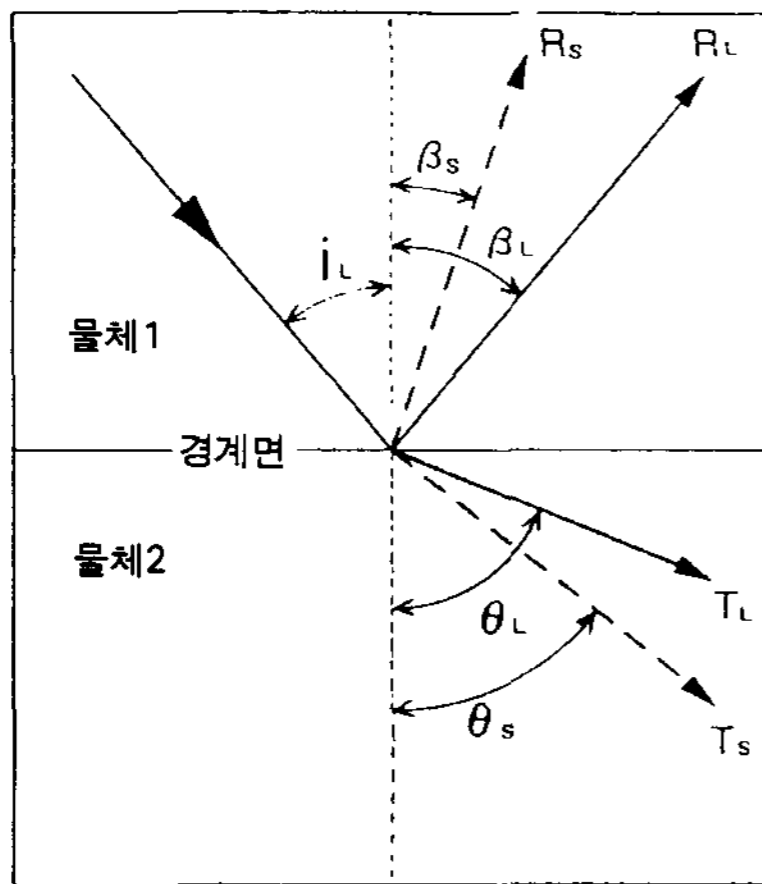
초음파는 결함과 시험체의 밀면 혹은 이종금속

과 같은 경계면에 닿으면 반사한다. 면상의 결함에서의 에코우높이는 초음파가 수직으로 입사하지 않는 경우에는 당연히 낮게되고 에코우가 얻어지지 않는 것도 있다. 모델화한 결함에서 반사하는 비율은 결함의 반사율로서 구해지고 있다. 또 경계면에 초음파가 수직입사하는 경우의 반사율  $\gamma$ 는, 경계면에서 접하는 2개의 물체 음향임피던스  $Z(=밀도 \times 음속)$ 의 관계식에서 구해진다.

$$\gamma = (Z_2 - Z_1) / (Z_1 + Z_2)$$

초음파가 경계면에 비스듬히 입사하는 경우에는 그림 5와 같은 반사 및 굴절이 일어난다.

초음파탐상결과를 나타내는 탐상도형은 에코우의 어느 정보를 어떤 도형으로서 표시할 것인가



$i$  : 입사각  $\beta$  : 반사각  $\theta$  : 굴절각 R : 반사파 T : 통과파  
L : 종파(실선) S : 횡파(점선)

$$\frac{C_{1L}}{\sin i_L} = \frac{C_{1L}}{\sin \beta_L} = \frac{C_{1S}}{\sin \beta_S} = \frac{C_{2L}}{\sin \theta_L} = \frac{C_{2S}}{\sin \theta_S}$$

그림 5. 비스듬한 입사시의 반사와 굴절

가에 따라서 분류된다. 현재 이용되고 있는 탐상도형의 표시방법중 주요한 것을 그림 6에 나타낸다.

기본표시(A스코프 표시)

기본표시는 횡축에 시간을 정하고 종축에 수신 신호(에코우)의 진폭을 표시하는 것으로 탐촉자를 닿게한 위치에서 에코우높이, 에코우위치, 에코우파형 3개의 정보가 탐상도형으로서 탐상기의 표시기에 즉각 표시된다. 전체적인 파악은 부족하지만 장치가 간편하고 가격이 싸기 때문에 현재 가장 널리 사용되고 있다.

단면표시(B스코프 표시)

단면표시는 A스코프 신호가 강한 부분에 brightness변조를 하고 탐촉자의 위치 또는 이동 거리와 초음파 투과시간 또는 반사원의 깊이 위치를 표시하는 방법이다. 얻어진 도형은 시험체 상에서의 탐촉자의 주사선에서 절단한 때의 단면상이고 주사선의 이상부위의 깊이 위치와 그 분포 및 밀면까지의 거리변화에 따른 판두께의 측정 등이 가능하다.

평면표시(C스코프 표시)

탐상면을 탐촉자에서 주사하고 그 이동에 따라 동시에 표시기상의 표시점을 이동시킨다. 탐상면과 밀면사이에 결함이 있는 경우 그 결함에코우 높이에 대해서 표시점의 brightness를 증가하거나 칼라표시의 경우에는 색을 변화시킨다. 이렇게 해서 탐상면 전면을 주사하는 것에 따라 결함 위치를 표시하는 방법이 평면표시(C스코프)이

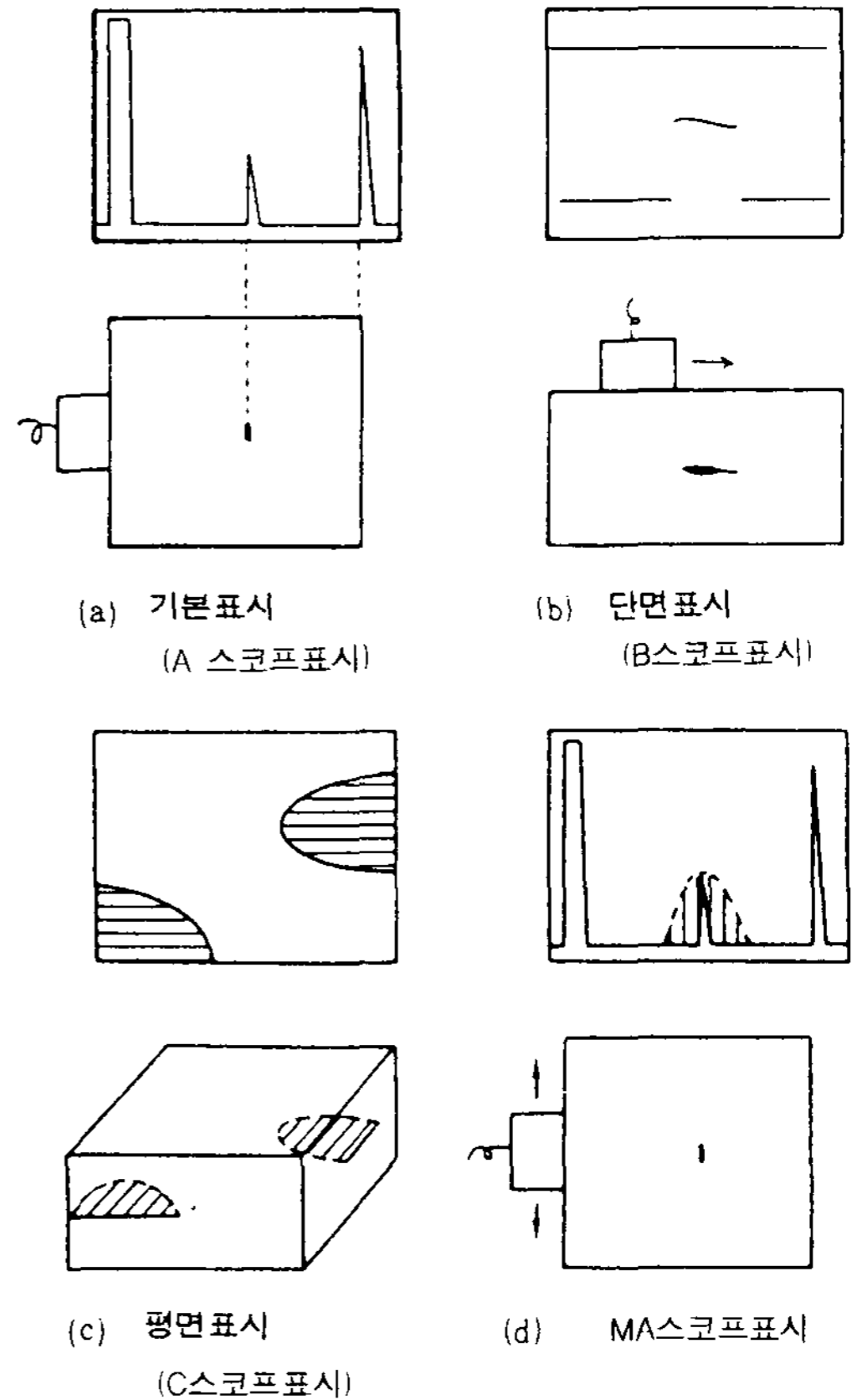


그림 6. 탐상결과 표시방법

다. 또, 에코우높이 대신에 결함에코우까지의 시간변화에 따라 색별로 해서 표시하면 탐상면에서 일정 깊이에 표시되는 결함의 평면도가 얻어진다.

**결함 평가방법**

시험체의 종류, 탐상방법, 적용규격이 다르면 결함의 평가방법도 다르지만 크게 나누면 다음에 표시하는 각 분류의 단독 또는 조합되는 평가방법이 사용된다.

- (1) 에코우높이에 따른 분류(F/B, 에코우높이 영역)
- (2) 밑면에코우의 다중반사회수에 따른 분류
- (3) 결함의 발생수, 부피점유율, 분포를 고려한 분류
- (4) 결함의 치수를 고려한 분류(길이, 높이, 면적)
- (5) 결함의 종류를 고려한 분류

최근에는 판두께 방향의 결함치수, 즉 결함의 지시높이의 측정을 요구하는 것이 증가되고 있다. 표 2에 결함의 높이 측정방법을 모아서 나타낸다.

표중의 주파수를 이용하는 방법 및 영상법 등의 방법은 초음파 향상기술의 새로운 방법이고 거의가 현재도 연구중이다.

초음파탐상시험은 각종 비파괴시험법중에서도 많이 사용되고 있고, 국내외에서도 많은 연구와 개발을 하고 있다. 이는 초음파시험법이 많은 분야에서 활용되어 가는 현상을 나타내고 있다. 많은 가능성을 가지고 있는 초음파시험법의 더 많은 활용이 기대된다.

**2.6 Acoustic Emission(AE)**

Acoustic Emission법은 소성변형, 균열의 발생

과 성장 등에 따라서 음파(AE파)가 방출되는 현상이다. 주석의 박판이나 봉을 구부리면 소리가 나는데 이것도 AE의 예이다.

AE파를 검출하는 것에 따라 내부상태의 비파괴검사가 가능하다. 종래의 초음파탐상시험이 능동적인 방법이라면 AE법은 수동적인 방법이고 양자의 차이를 다음 그림 7에서 나타낸다. AE파가 검출되는 물체가 위험신호를 내고 있는 것이다. 또 AE파를 검출하기 위한 변환자가 몇개 배치되어 있으면 AE파가 각 변환자에 도달할 때까지의 시간차이에서 AE의 발생원의 위치도 추정할 수 있다.

AE파의 원리는 지진과 같은 것으로 재료중에 틈이나 변형 등의 현상이 생기면 이에 수반해서 음파가 방출된다. 따라서 틈의 발생을 순간적으로 검출할 있기 때문에 구조물의 비파괴시험 뿐만 아니라 공구의 마모손상, 프로세서 콘트롤 등 내부수명의 평가나 재료물성의 연구 등에 응용되고 있다.

AE파는 넓은 범위의 주파수성분을 포함하지만 조사되는 AE신호는 100kHz에서 1MHz 정도의 범위에서 계측되는 것이 많다. AE파의 검출은 몇개 방법이 있지만 초음파시험에서도 이용되

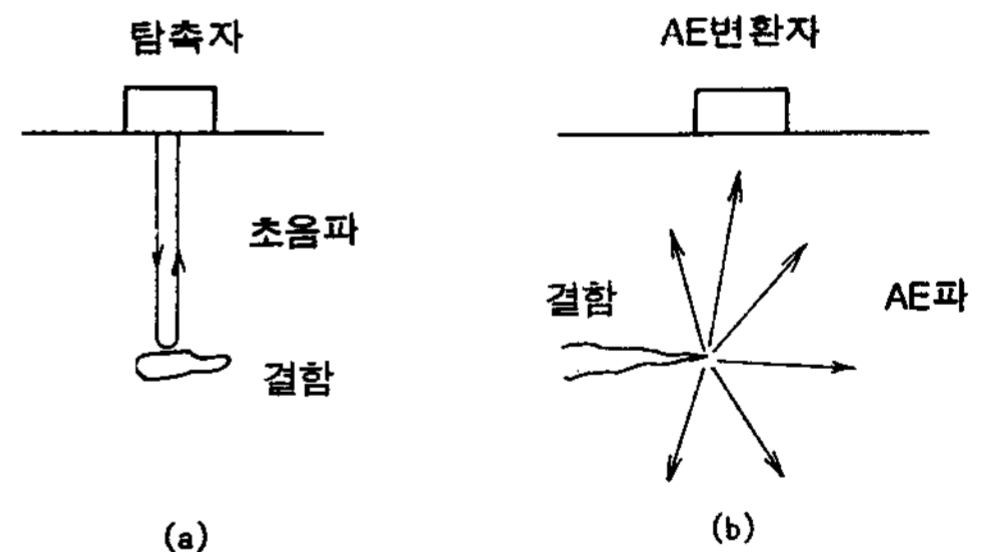


그림 7. 초음파탐상시험과 AE법의 차이

표 2. 결함높이의 측정방법

이 용 정 보	측 정 방 법 의 종 류
탐촉자 이동거리	덴벨도르프법, 유효빔폭법
에코우 높이	단층탐상법, 산란파법, DGS법, 탠덤법, 투과반사법
운반시간차	단부에코우법, 산란파법, 표면파법, 모-드 변환표면파법
주파수	주파수분산법·케프스트럼법
결함영상	단면표시(B스코프)법 폐구합성법·ALOK법 TOFD법·홀로그래프법



는 압전소자를 가지는 변환자를 이용하는 방법이 일반적이다. 계측된 AE신호에서 얻어진 파라메타로 AE파의 평균전압, AE파의 발생수, AE파의 최대진폭, AE에너지 등이 있고 각각의 AE파의 발생원인과의 대응이 조사되고 있다.

### 2.7 적외선 시험

적외선은 가시광선보다 파장이 긴 전자파이고 모든 물체는 온도에 대응한 적외선을 방사하고 있다. 적외선 시험은 물체표면에서 방사된 적외선을 감지하고, 물체의 표면온도의 분포를 비접촉상태에서 측정하는 방법이다. 적외선을 검출하는데는 적외선 방사온도계를 사용한다. 이 온도계는 비접촉상태로 50K에서 2,000K까지의 온도 범위에서 0.1K의 미소한 온도차를 검지하는 것이 가능하다. 표면에 결함이 있는 물체를 가열하면 결함이 있는 부분과 정상부위에서는 방열의 방식이 다른것부터 온도차가 발생하고 결함의 영향을 선명히 잡을 수 있다. 이것에 따라 표면 혹은 표면근처에 있는 결함의 유무가 비접촉에서 판단된다.

### 2.8 X선 CT(X-ray Computed Tomography)시험

CT기술은 물체의 단면을 정밀하게 표현할 수 있기 때문에 다양한 용도에 응용된다. 가장 일반적인 것은 X선 CT이고 인체용의 단층촬영장치로서 발명되었다. 현재는 X선에 머무르지 않고  $\gamma$ 선, 중성자, 초음파, 열선, 빛 등 각종 정보를 사용한 CT가 시험되고 있다. 인체용으로는 생체에 해가 없다고 인정되고 있는 전기를 사용한 MRI(Magnetic Resonance Imaging)가 보급되고 있다. CT는 투과형과 방사형이 있으며 투과형은 물체외부에서 방사선과 초음파 등을 닿게 해서 물체내를 투과할 때에 감쇄하는 양을 정밀하게 측정해서 내부정보를 얻는 것이다. 한편 방사형은 물체내부의 방사선원에서의 방사선량을 검출하고 그분포를 화상화하는 것이다.

CT는 직접 볼수 없는 내부상태를 밀도분포를 통한 비파괴, 비접촉으로 관찰할 수 있는것이 무엇보다 장점이다.

인체용으로는 SPECT(Single Photon Emission CT)와 PET(Positron Emission Tomography)가

실용화되고 있다.

산업용으로서 투과형 X선 CT가 실용적이고, X선원으로는 120-420kV의 X선장치가 이용되고 있다.

많이 사용되고 있는 산업용 X선 CT에 TOSCANER-20000series가 있다. T/R방식의 CT이고 단면상을 찍는 CT스캔과 투시상을 찍는 스캐너스코프를 가지고 있기 때문에 단면상과 X선 투시상의 양쪽을 얻을 수 있다. 이 방식은 스캔영역을 트레이스장에서 설정할 수 있는 것이 큰 특징이고  $\phi 300\text{mm}$ 와  $\phi 600\text{mm}$ 를 바꿔서 스캔하는 것이 가능하다.

X선관과 검출기 사이의 공간과 트레이스의 스트로크의 제한을 받기 때문에 600mm를 넘어서 스캔 area를 확대하는 것은 쉽지 않지만 공간분해능을 향상시키기 때문에  $\phi 300\text{mm}$ 이하의 스캔 area에 4000점을 가지고 있고, 화상재구성 매트릭스 1024 $\times$ 1024화소로 맞춰서 높은 해상도를 발휘하는 시스템으로 되어 있다. 또 여러가지 X선 흡수계수를 가지는 물체나 형상의 대소에 대해서 X선 출력을 선택하여 자르도록 X선 과전압 320kV/420kV와 2종류의 공급원이 준비되고 있다. 주조물을 스캔하기 위해서는 400kV이상의 X선 에너지가 필요하다. 철강의 경우 80mm까지 적용가능하다고 하며 승용차용에서는 캠축, 크랭크축, 매니홀드, 실린더헤드의 공극이 많은 부분 등을 스캔할 수 있다.

X선 투과능력을 높이는데도 X선관의 집점수치를 크게하고 X선 출력을 증대시키는 것이 좋다. 공간분해능을 다소 희생하면서 X선 포톤을 증가시키게 되고 철110mm, 알루미늄 300mm의 원주까지 스캔 가능하게 된다.

실제 스캔 대상물은 원주상에서 뿐만 아니라 단면상위에서 어느 정도의 공극을 함유하고 있기 때문에 기본적인 성능에서 표시되는 수치보다도 대형의 대상물까지 적용가능하다. 표 3에 대표적인 자동차용 주물의 적용에 대해서 표시한다. 물질 또는 밀도의 차이가 화상화되기 때문에 void, crack의 검출은 물론 주물사나 core의 잔해, 산화물 등의 이물질도 검출가능하다. 특히 산화물은 void와 달리 X선 투시검사나 X선 필름의 영향 등 다른 검사방법에서는 검출이 어려운 대상물이다.

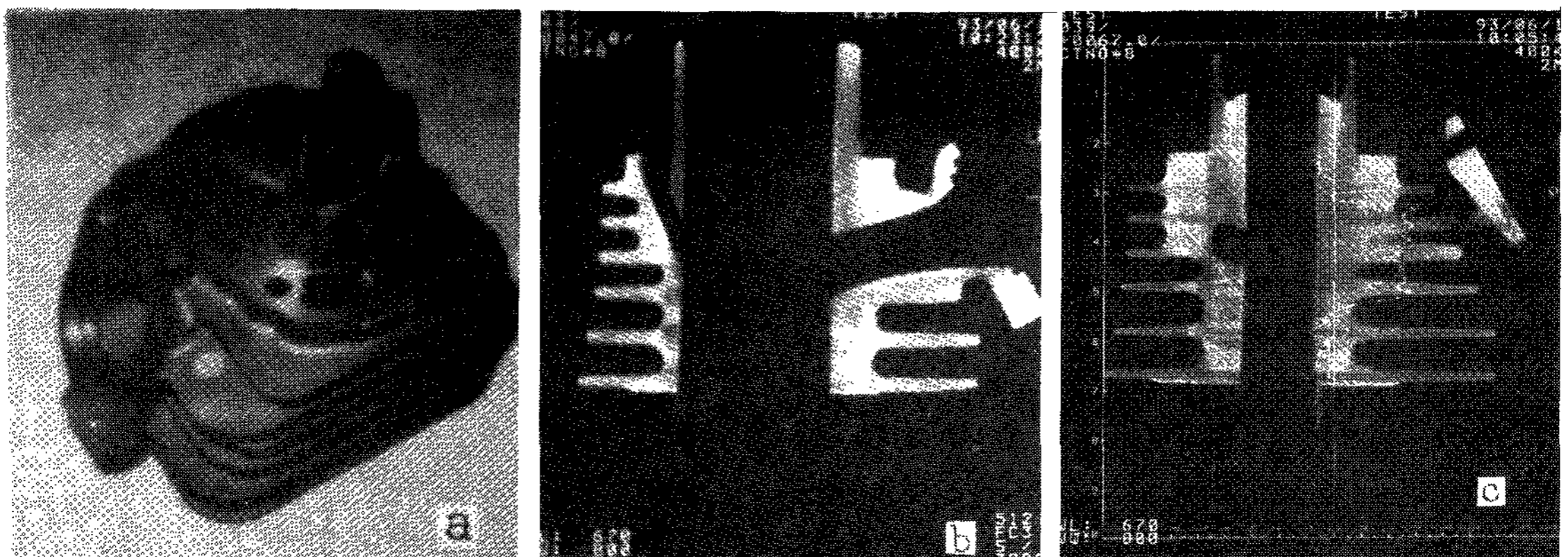
표 3. 자동차용 주물부품에 X선 CT의 적용(400kV X선 CT. Fe주물과 그외의 재질 대상물)

품명	재질	적용가부	사용목적
Caliper	Fe	○	void
Cylinder head	Fe	△	void, 치수, 용적, 주물사 잔사
Cylinder block	Fe	×	void, 치수, 용적
Connecting rod	Fe	○	void, crack, 산화물
Cam shaft	Fe	○	void, crack
Crank shaft	Fe	○	void, crack
Manifold	Fe	○	두께, 용적, void
Turbine wheel	ceramic	○	void, crack
Tire, Wheel	고무, steel wire Al	○	rim의 접합, steel wire의 배치 中空部 용적
Cylinder block	Al	○	void, 치수, 용적
Cylinder head	Al	○	void, 치수, 용적
Mainfold	Al, Fe	○	치수, void, 용적
ABS	Al	○	void
Knuckle	Al	○	void

그림 8에 주조물의 화상 예를 나타낸다. 한쪽이 110mm의 외형수치를 가진다. 그림 8a가 외관, b, c는 단면상이다. b그림의 우측에 검게 void의 집합이 나타나고 있다. c그림은 좌편의 우측구멍과 외측의 경계부에 결함같은 것이 있기 때문에 profile표시를 실시해서 확인한 것이다. 좌측의 사선위의 화상 data를 횡축에 CT치, 종축을 대상물의 위치로서 그래프 표시하고 있다. 중앙부근에서 CT치가 낮은 부분이 결함의 존재를 표시하고 있다. 그림 9는 알루미늄 주물에 Fe sleeve가 있는 상태의 단면상이다. 좌측에 중

간정도의 밝기로 보이는 것이 주물사대신 점토를 임의로 채운 부분이다.

그림 10은 CT의 특징중 하나인 고 X선 흡수의 물체이고 둘러싸여진 저 X선 흡수의 물체표현 능력을 표시하는 것이다. 외형 약 90mm, 두께 8mm의 철판파이프의 내측에 약품의 접촉을 막아 내식성을 높이기 위해 알루미나를 장착한 것이다. 박리나 알루미나의 결함 등이 나타날 수 있다. 박리검출이라면 반사형의 초음파탐상장치에서 위치의 확인은 가능하지만, 알루미나의 상태나 원주방향의 분포 등을 아는 것은 어렵다.



a.외관 1변이 110mm,

b.우측에 void의 집합이 있다.

c.결함profile표시

그림 8. Fe주물 CT scan

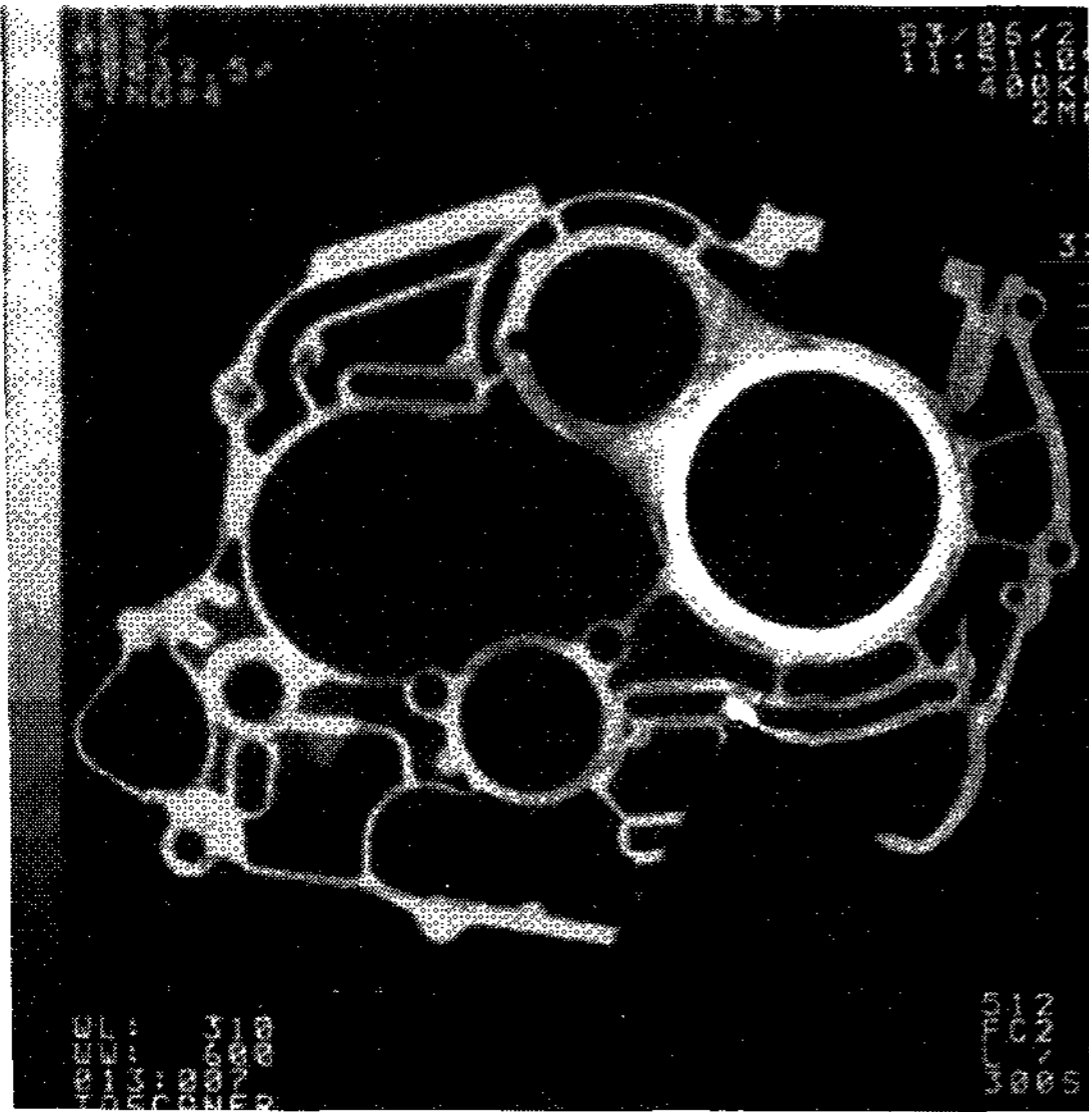


그림 9. Fe슬리브가 들어있는 알루미늄주물

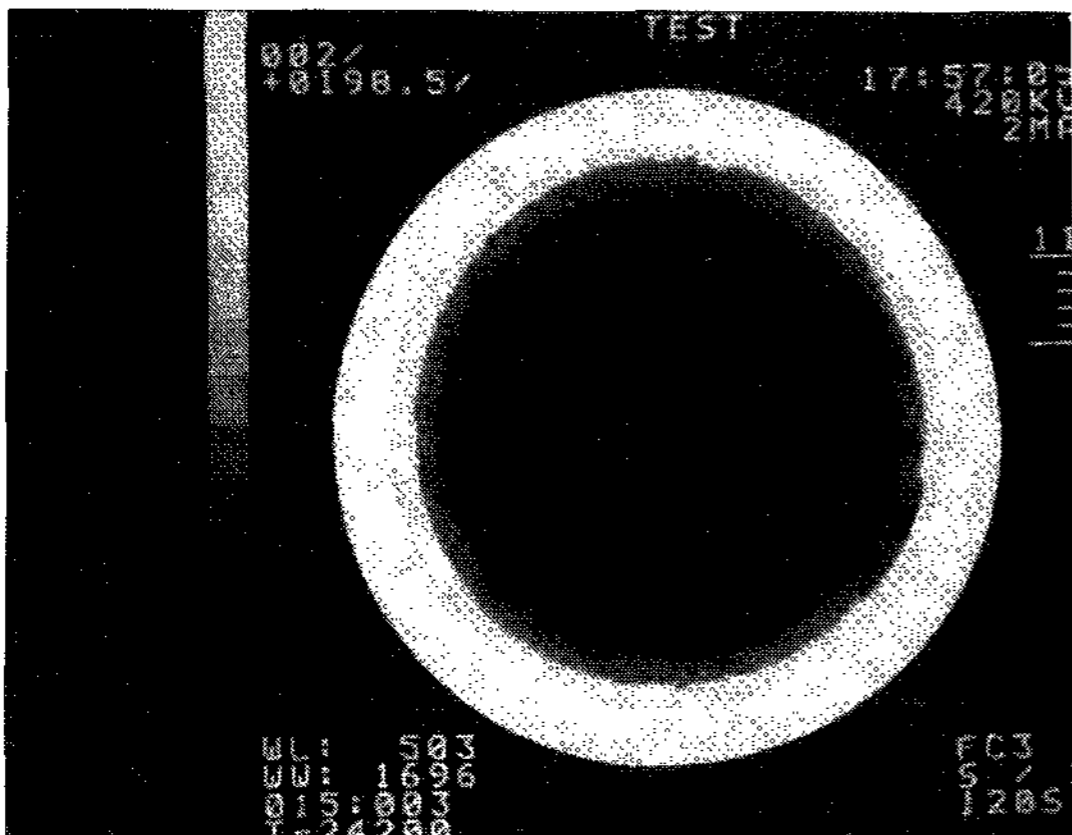


그림 10. Fe파이프의 내측에 알루미늄을 부착한 내식성배관

이처럼 CT에서는 원리에 충실한 화상표현이 되기 때문에 이해하기 쉬운 비파괴검사, 분석방법이라고 할 수 있겠다. 결국 X선 CT는 재질, 형상에 따르지 않는 X선 투과 능력만 있다면 우수한 단면표현능력을 발휘한다. Void나 결함의 검출 및 치수측정에 많이 사용되고 있고 치수계측을 발전시켜 CAD data와의 matching에 따른 제작정밀도의 향상에도 응용되고 있다. 근래에는 주물의 설계에 있어서 CAD화가 진행되고 부품의 고기능화에 따라 자유곡선 구성도 많이 되고

있다. CT의 단면상과 그 단면위치를 LAN (Local Area Network)을 통해 CAD에 주고 CAD에서 설계도와의 조합을 이행한다. 이것에 따라 설계의도가 최종제품에 반영되고 있는지를 빨리 알 수 있다. 형(型)의 설계, 시험제작부터 양산, 생산준비, lot의 시작에 이르는 많은 공정 중에서 CT가 가지는 우수한 화상화능력을 살리는 것에 따라 개발이나 생산시작의 시기를 약 30% 단축할 수 있다고 한다.

비파괴시험기술로서 최근에 주목되고 있는 방법으로 Acoustic Emission(AE), X선 및 초음파를 사용한 CT법, 전자초음파법, 초음파현미경, 적외선법 등이 있다. 또 비파괴적 재질판정법으로서 구상흑연주철의 구상화율을 초음파의 음속으로 판정하는 기술은 이미 실용화되어 있지만 음속이 금속조직이나 응력에 의존하는 성질을 이용하고 재료의 집합조직의 추정이나 잔류응력의 측정을 하고자 하는 음탄성법도 연구가 진행되고 있다. 또한 측정된 data를 computer처리해서 화상화하는 기술도 연구가 진행되고 있다.

### 3. 최근의 주물부품에의 비파괴검사기술의 적용에

표면결함으로는 주로 주조, 단조, 성형가공, 표면처리, 연삭가공시에 발생하는 표층부의 균열이나 기공이 있으며 내부결함으로는 주조, 단조, 세라믹성형 등에서 발생하는 기공, 개재물 등이 있다. 이에 대한 평가수단은 표 4와 같다.

#### 3.1 초음파의 적용

-FCD Steering Knuckle-arm의 즉시처리 초음파검사시스템의 예

검사내용으로는 흑연구상화율 판정, Chill조직 소실판정, 내부결함판정을 동시에 실시한다.

흑연구상화율의 판정은 구상화율이 최저인 최후응고부위에 있는 두터운 부위의 음의 투과속도를 측정하여 소재전체의 흑연구상화율을 보증한다. 또 금형주조는 chill조직의 생성을 억제하는 것이 어려워 소둔을 통하여 기지조직을 균질한 페라이트로 한다. Chill조직은 가공불량 및 강도 불량을 일으키므로 완전히 소실된 것을 보증해야 한다. 페라이트와 칠조직(세멘타이트)은 Young

표 4. 품질특성과 평가수단

평가수단 \ 품질특성	방사선계측(RT)	초음파계측(UT) AE 음향시험	전자기계측 자분탐상(MT) 외류탐상	육안검사·침투(PT) 광학계측 적외선시험, 기타
표면결함	○	○	○	○
내부결함	○	○		
재질·표면개량	○	○	○	
접합	○	○		
기밀성		○		○
외관조사				○
음·진동		○		○
응력	○	○	○	○

울과 밀도가 다르므로 음속을 비교해 판별이 가능하다. Chill조직 소실판정을 chill화 경향이 제일 높은 박육부의 음의 투과속도를 측정해서 소재전체에서 chill조직이 소실된 것을 보증한다.

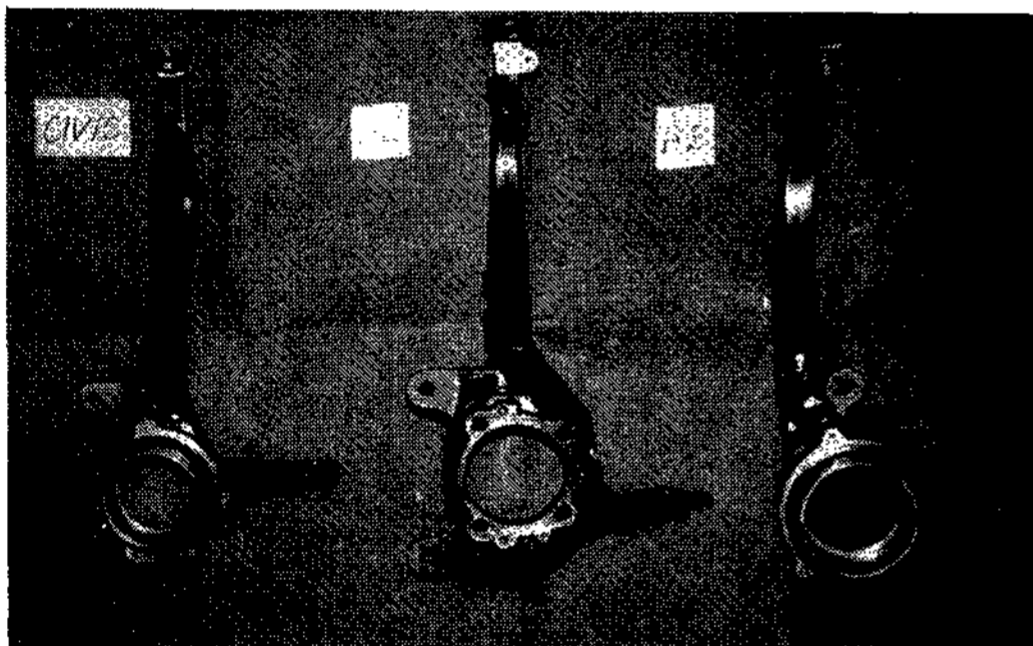


그림 11. 금형주조한 Steering Knuckle-arm

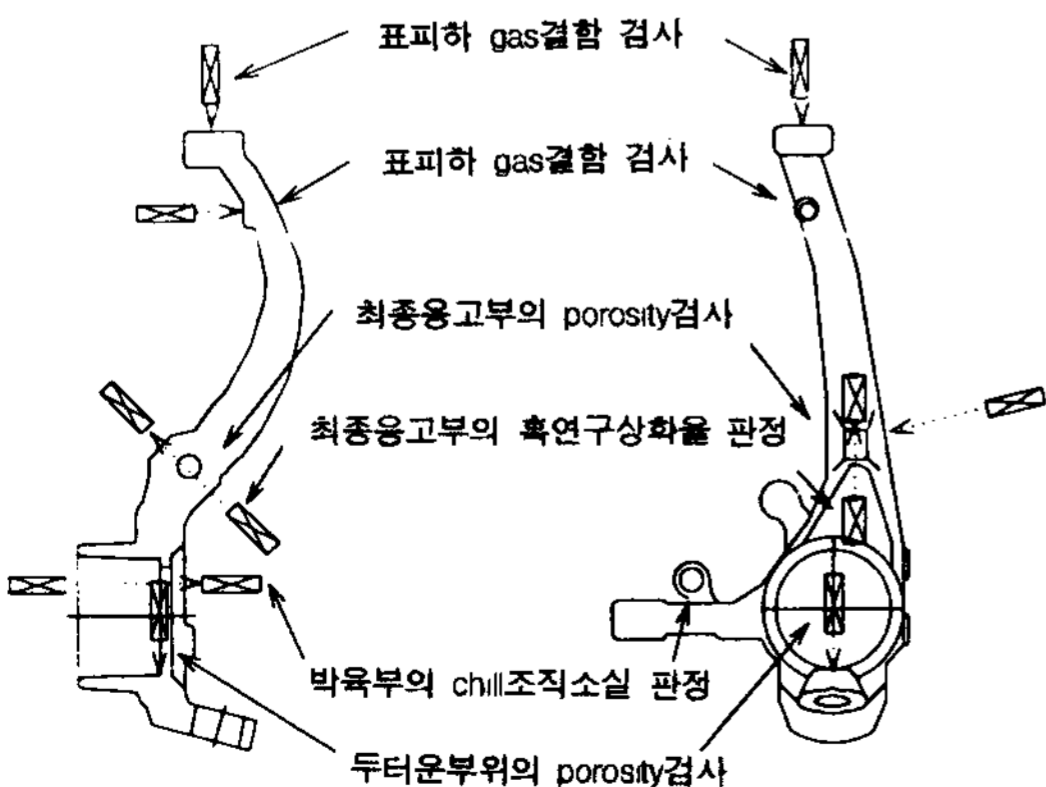


그림 12. Steering Knuckle-arm의 검사위치

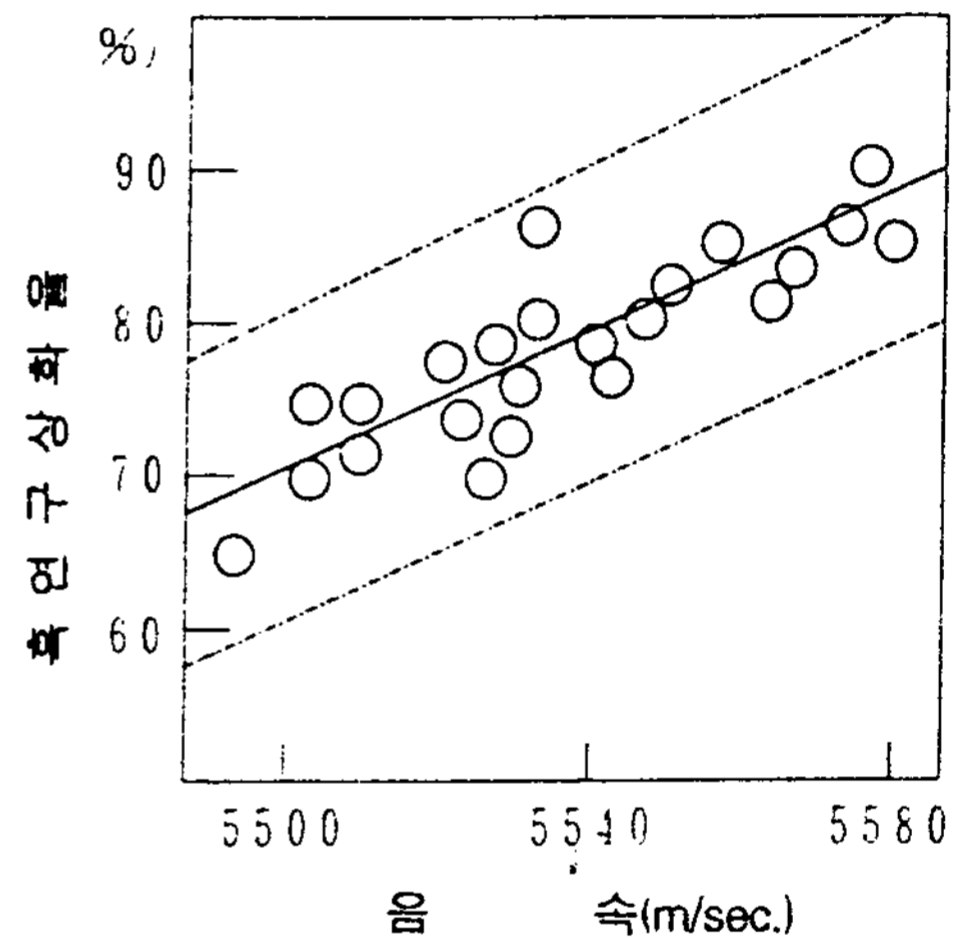


그림 13. Steering Knuckle-arm의 흑연구상화율과 음속의 관계

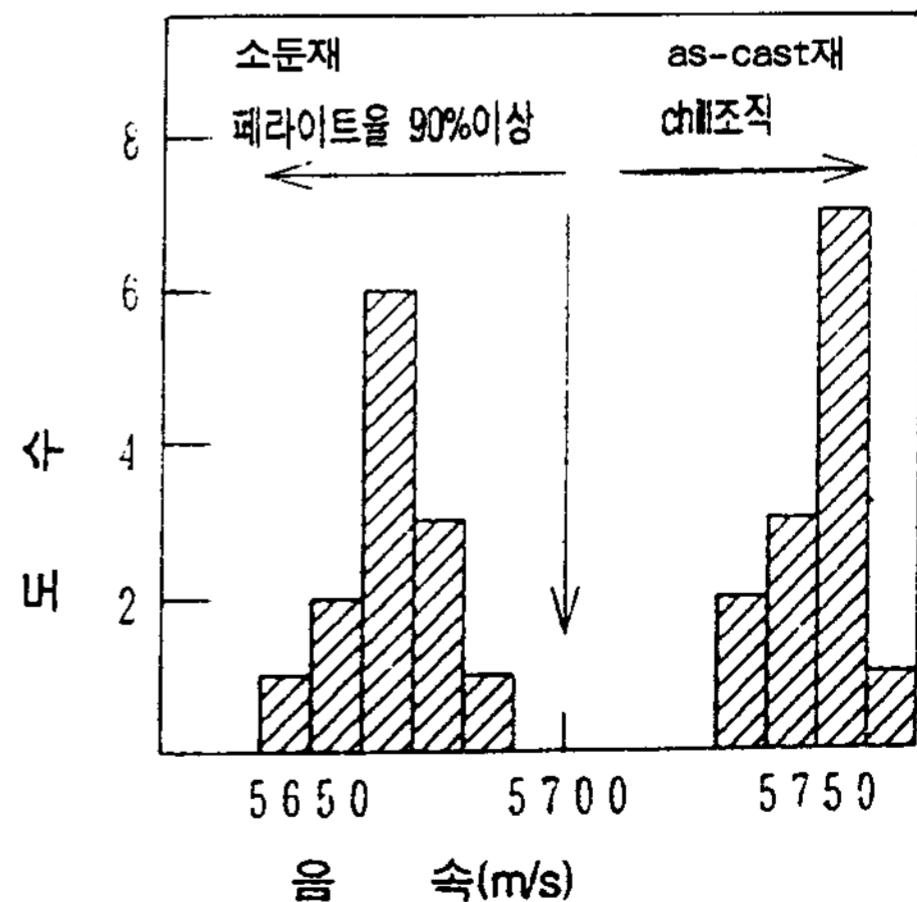


그림 14. Chill조직을 가진 as-cast재와 페라이트율 90%이상의 페라이트화 소둔재의 음속 그래프

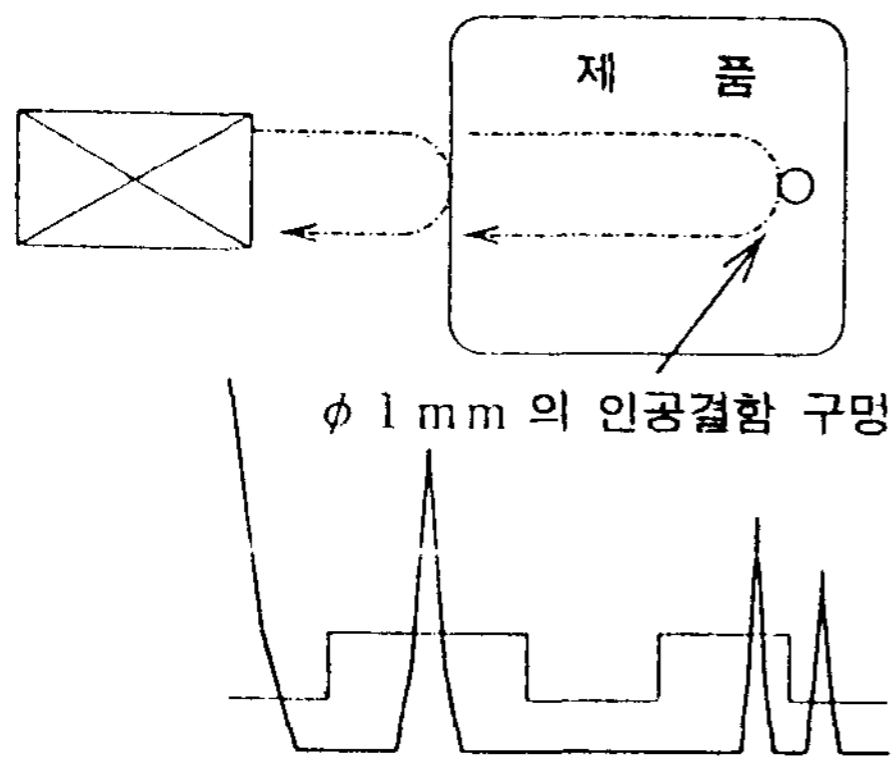


그림 15. 초음파탐상의 판정기준 설정

- 초음파를 이용한 camshaft경도 비파괴 검사

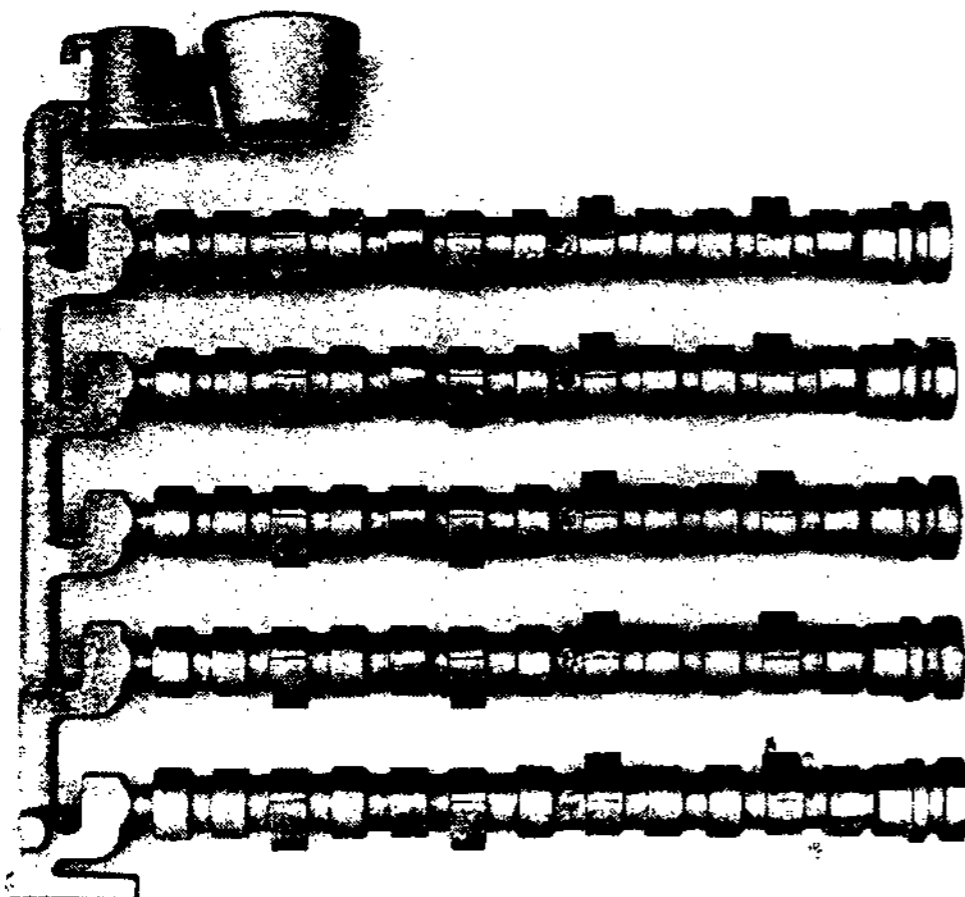


그림 16. 생산부품의 주조방안의 예

경도보증

보증부위는 표 5에서 나타내는데 내마모성과 피삭성(被削性)의 상반되는 특성을 가지고 있다. 초음파음속과 재질의 관계에서는 일반적으로 표 6과 같이 세멘타이트부위는 음속이 크게 되므로 세멘타이트량이 증가되면 경도가 증가되고 음속은 크게된다.

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

V : 종파음속(m/s)

E : 종탄성계수(Pa)

$\rho$  : 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

$\mu$  : Poisson비

그림 17과 같이 초음파탐상기기를 이용하여 cam부위의 nose top측 또는 측면에 송수신 probe를 부착하여 송신하여 반사파를 수신하기까지의 시간(초음파치)을 T라 하면 (2)식의 관계가 된다.

$$V' = 2L(\text{or } 2L')/T \tag{2}$$

T : 초음파치

L : cam길이

L' : cam폭

V' : 평균음속

또한 위의 특성과 (2)식에 따라

$$H \propto V' = 2L(\text{or } 2L')/T \tag{3}$$

H : 경도

가 된다. 초음파치가 작게되면 경도가 증가하는 경향이 기대된다.

표 5. Cam부위 경도보증 일람표

측정부위		보증이유	micro조직	Cam단면 개략도
Nose top부위(우측그림 A)		회전시의 밸브개폐부하에 대한 내마모성	백선	
Oil공급용 가공구멍	Cam side부위(우측그림 B)	드릴구멍(φ2~3)의 기계가공시의 피삭성	회주철	
	주통로부(우측그림 C)	회전축중심부의 가공시의 피삭성		

표 6. Micro조직과 음속의 관계(계산치)

미세조직	V(m/sec)	E(Pa × 10 <sup>6</sup> )	HRC
백선부(세멘타이트)	5150-5514	166600-196000	40.8-55.2
회주철부	4242-4580	107800-127400	(10)-(17)

주) 음속은 Poisson비 0.25에서 계산

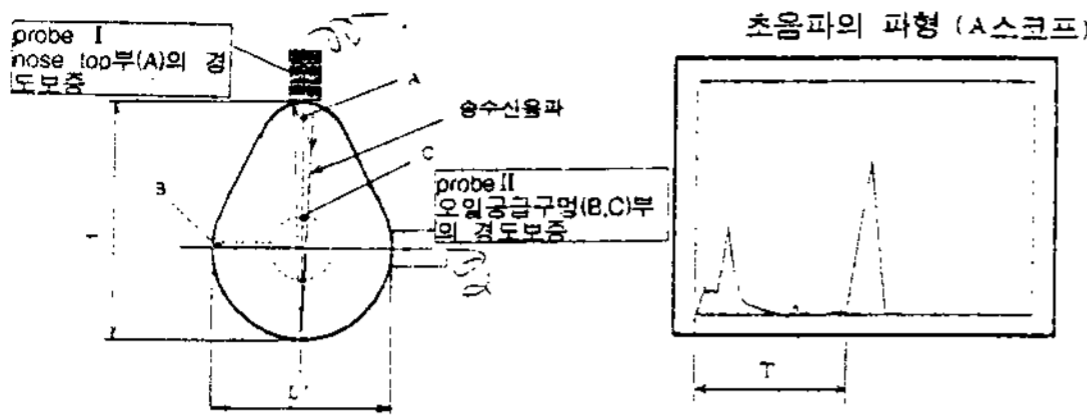


그림 17. 초음파치의 측정방법

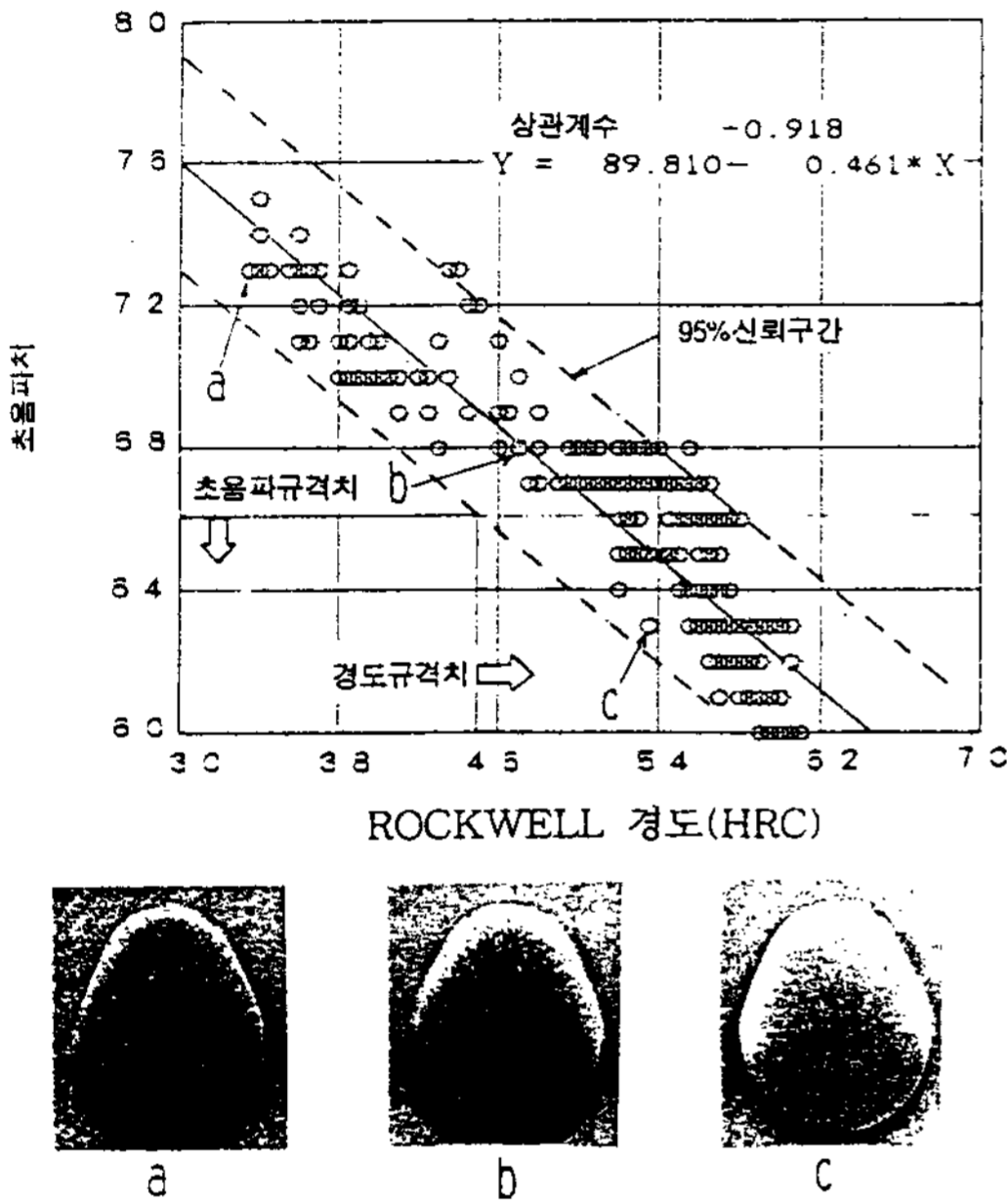


그림 18. Nose top부위의 실제경도와 초음파치의 관계 및 Cam단면의 micro조직의 예

초음파보증의 순서

검량선의 작성 : 성분조정에 따라 cam의 경부와 연부 모두 초음파치와 실제경도치와의 관계를 작성(그림 18)

초음파 규격치의 설정 : 95% 신뢰구간  
모니터의 반사파형조사(그림 19)

3.3 와류탐상법과 Ultrasonic을 이용한 MMC Cylinder Block의 비파괴검사

근래의 자동차기술 경향은 경량화와 compact의 방향이 큰 주류를 이루고 있다. 특히 엔진의 골격부를 형성하는 실린더블록은 큰중량과 부피를 점유하여 점차 경량화와 compact화가 많이 요구되고 있다. 이러한 요구에 호응하여 개발되

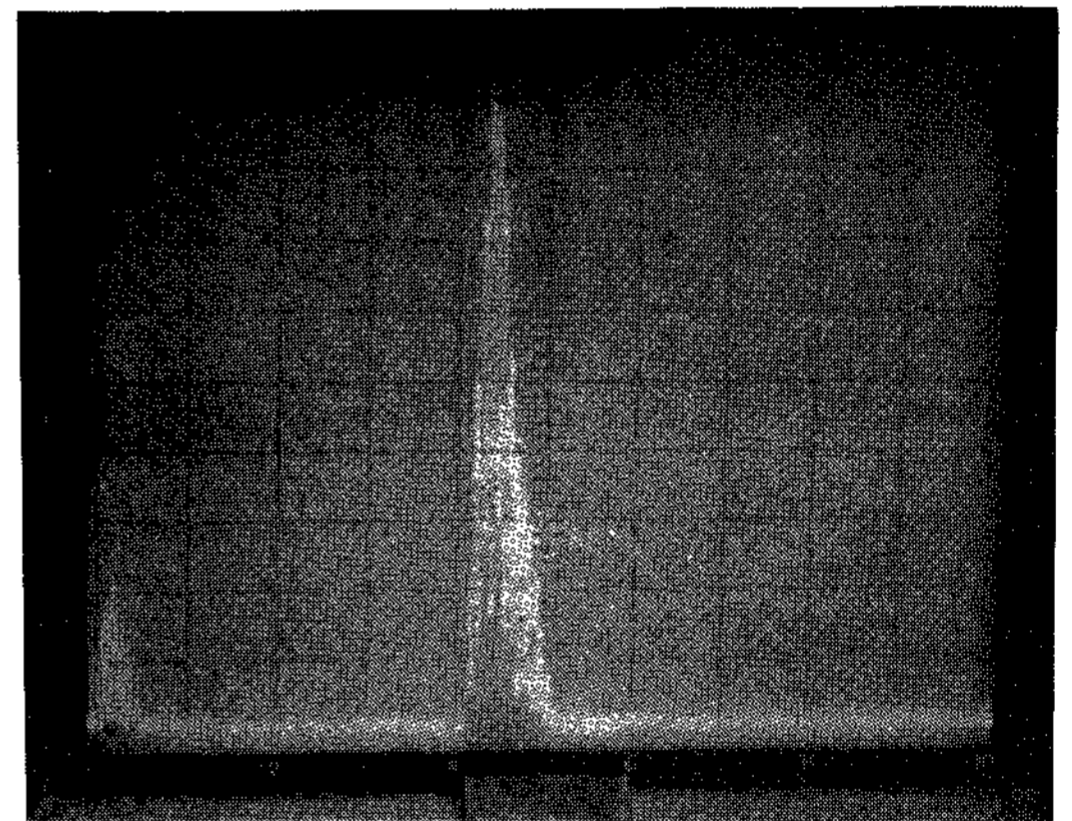
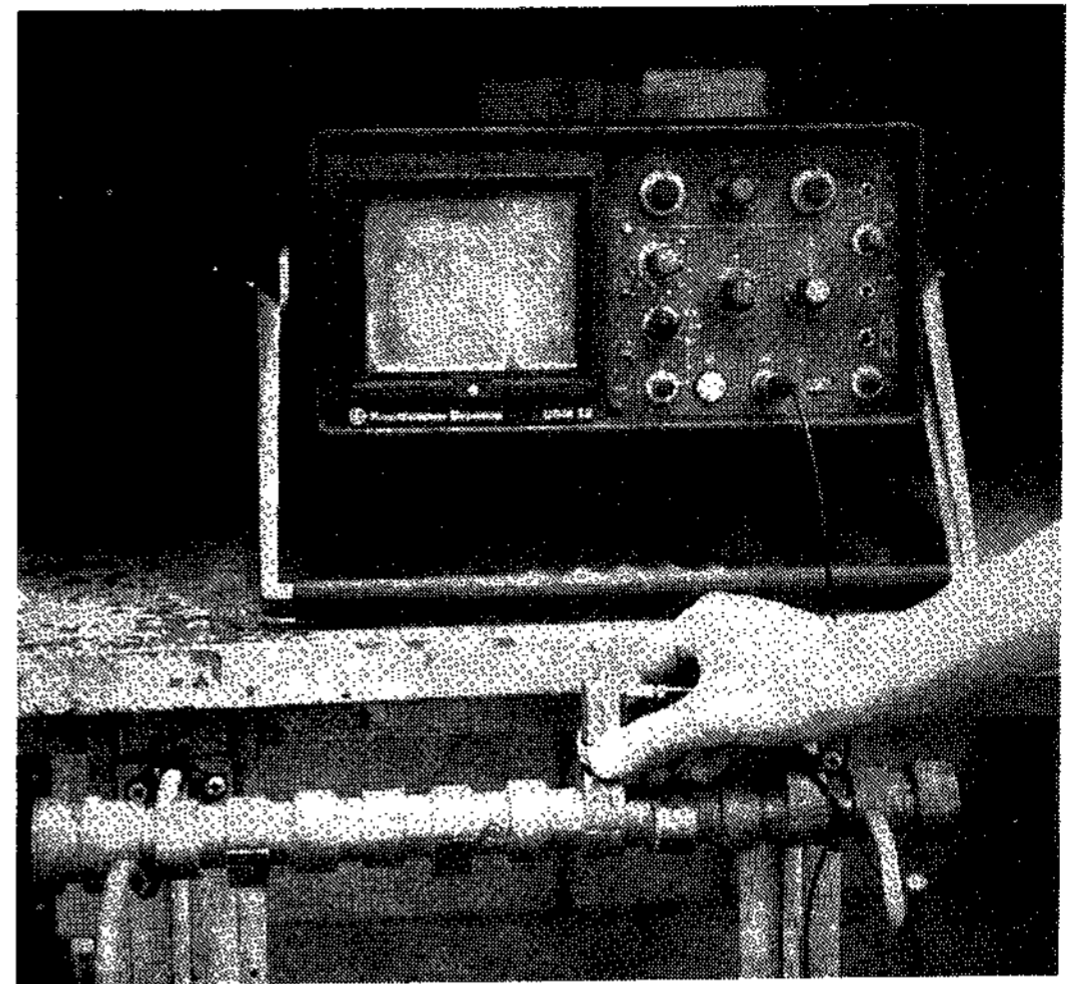


그림 19. 검사작업방법과 초음파치의 읽는 방법

고 있는 MMC(metal matrix composite)를 이용한 실린더블록에 대해 검사하고자 한다.

Linerless cylinder block은 matrix Al합금(ADC12)에 단섬유와 carbon을 hybrid로 사용하였다. 이 경우에

- 1) 완성시 MMC층의 최소두께 보증
- 2) MMC층의 건전성보증
- 3) MMC층 근방의 주조품의 정상상태에 대한 보증이 필요하다.

와류탐상(ET)과 초음파탐상(UT)의 2가지를 조합하여 검사한다. 일반적으로 와류탐상은 표면결함에 대해 검출감도가 높은 표층부결함의 평가에 유효하다. 와류탐상의 특성으로부터 MMC두께 검출은 저주파수범위(ET-1), 표면결함은 고주파수범위(ET-2)의 2가지로 나뉜다. 또 초음

파탐상은 내부결함에 대해 검출감도가 높고, 주조의 건전상태평가에 유효하다.

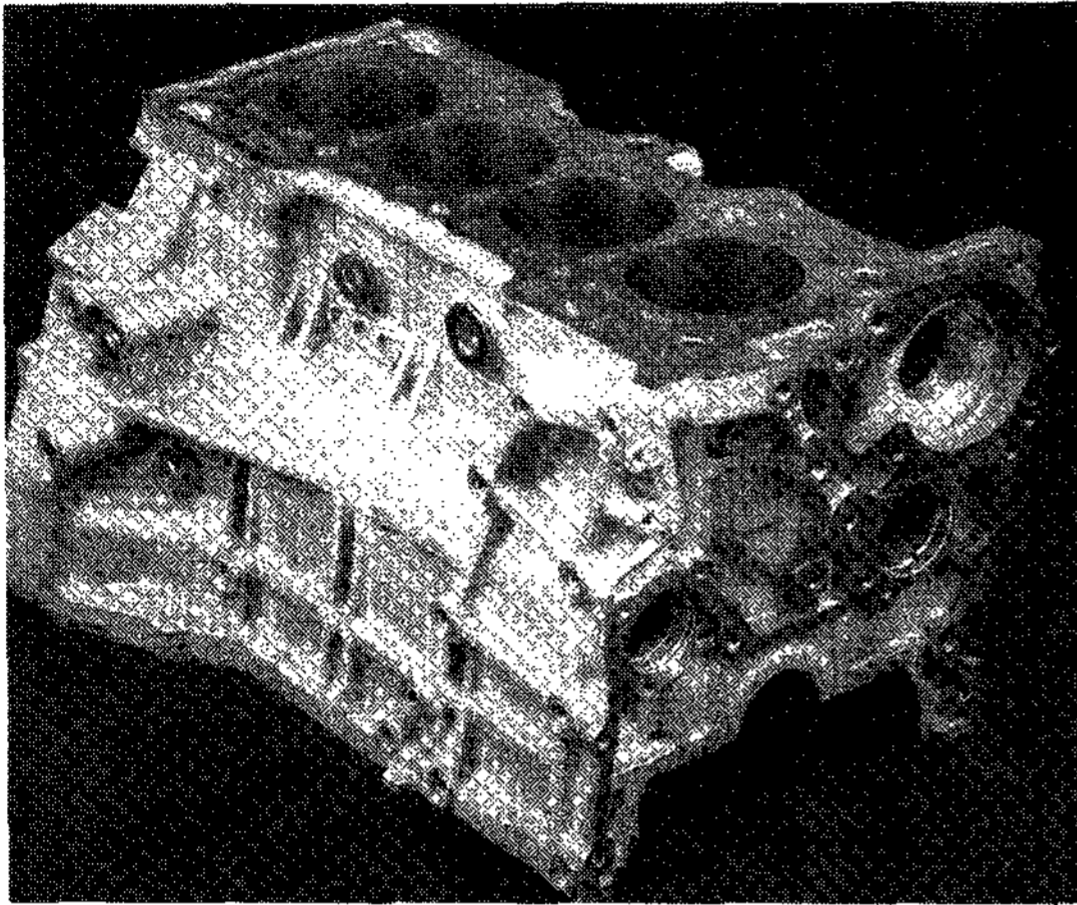


그림 20. MMC cylinder block

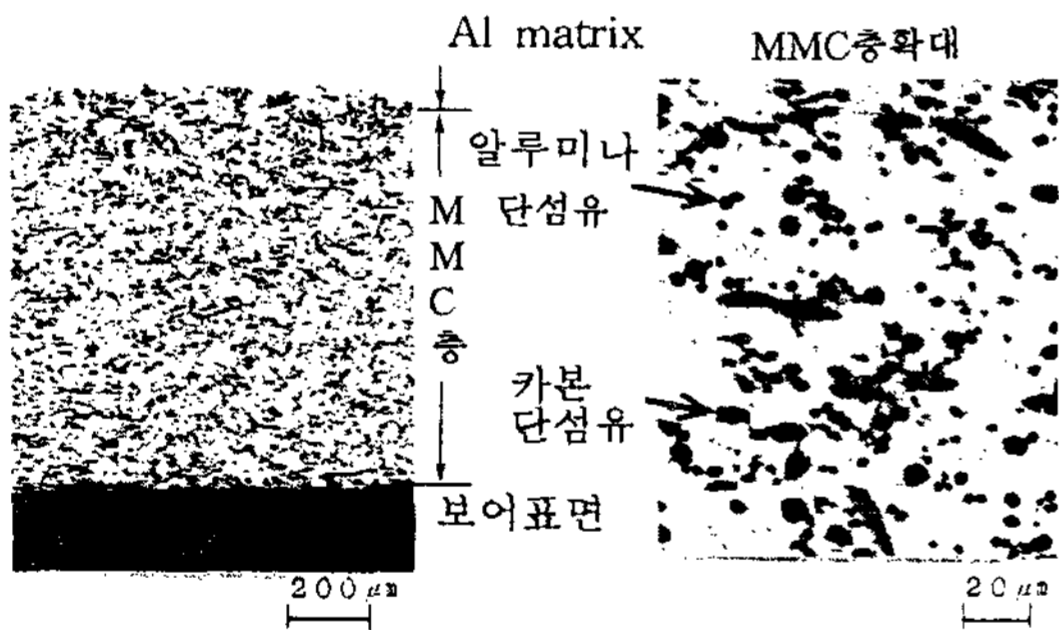
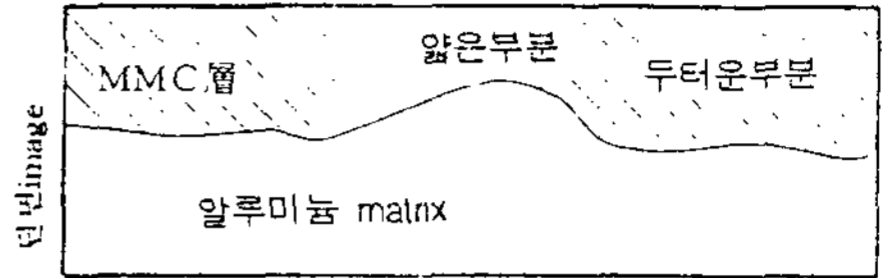
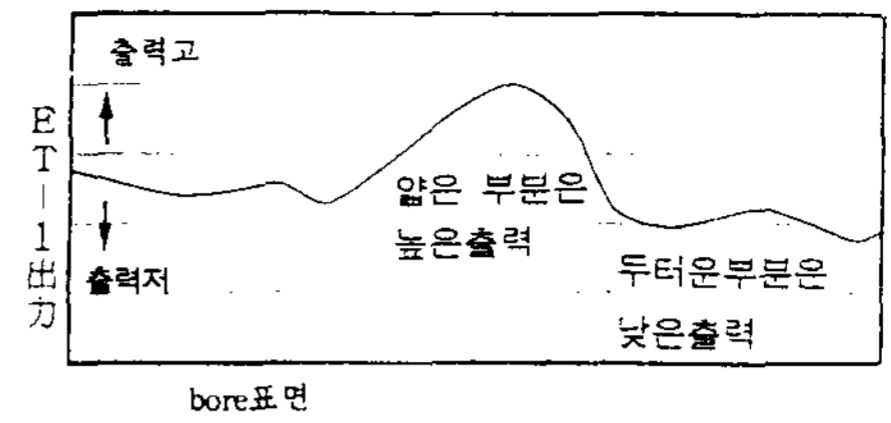
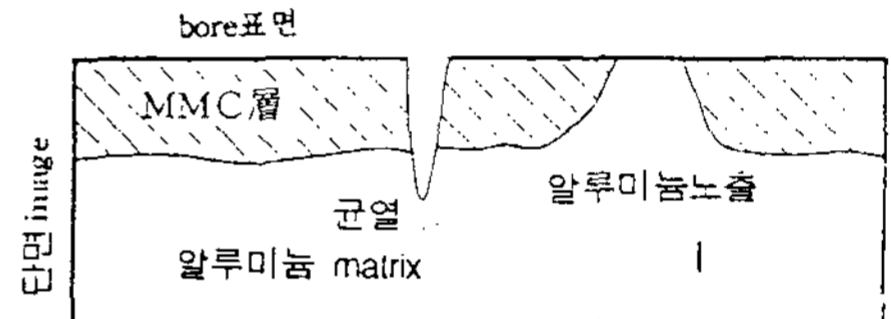
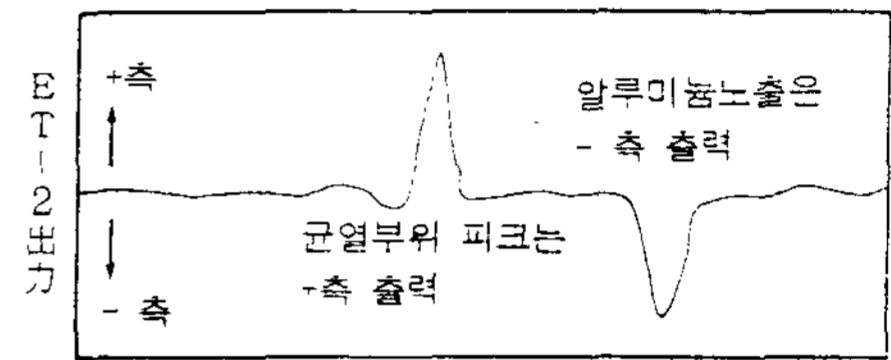


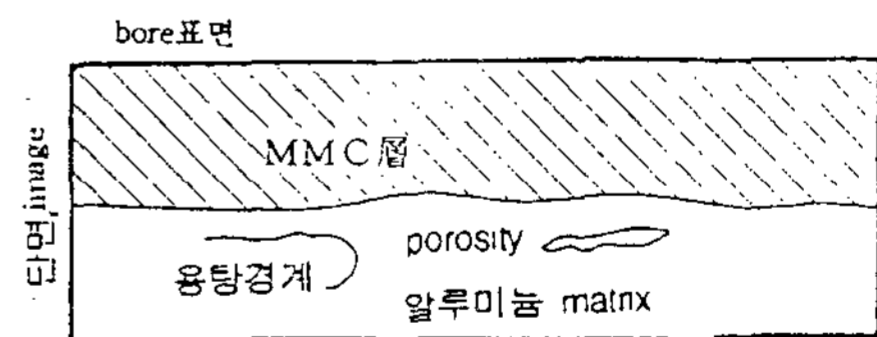
그림 21. MMC부위의 확대사진



최소두께의 보증, ET-1측정의 개념



MMC층의 정상상태 보증, ET-2측정의 개념



MMC층 근방의 정상상태 보증(UT), UT측정의 개념

그림 22. 여러가지 검사보증

표 7. 검사방법의 비교

검사방법	MMC두께	균열	노출	Porosity등	Inline적합
외투탐상	*◎	*◎	*◎	△	◎
초음파탐상	○	△	×	*◎	◎
X선투과탐상	×	△	×	◎	△
자기탐상	×	×	×	×	△
침투탐상	×	◎	△	×	△
광학탐상	×	△	△	×	○

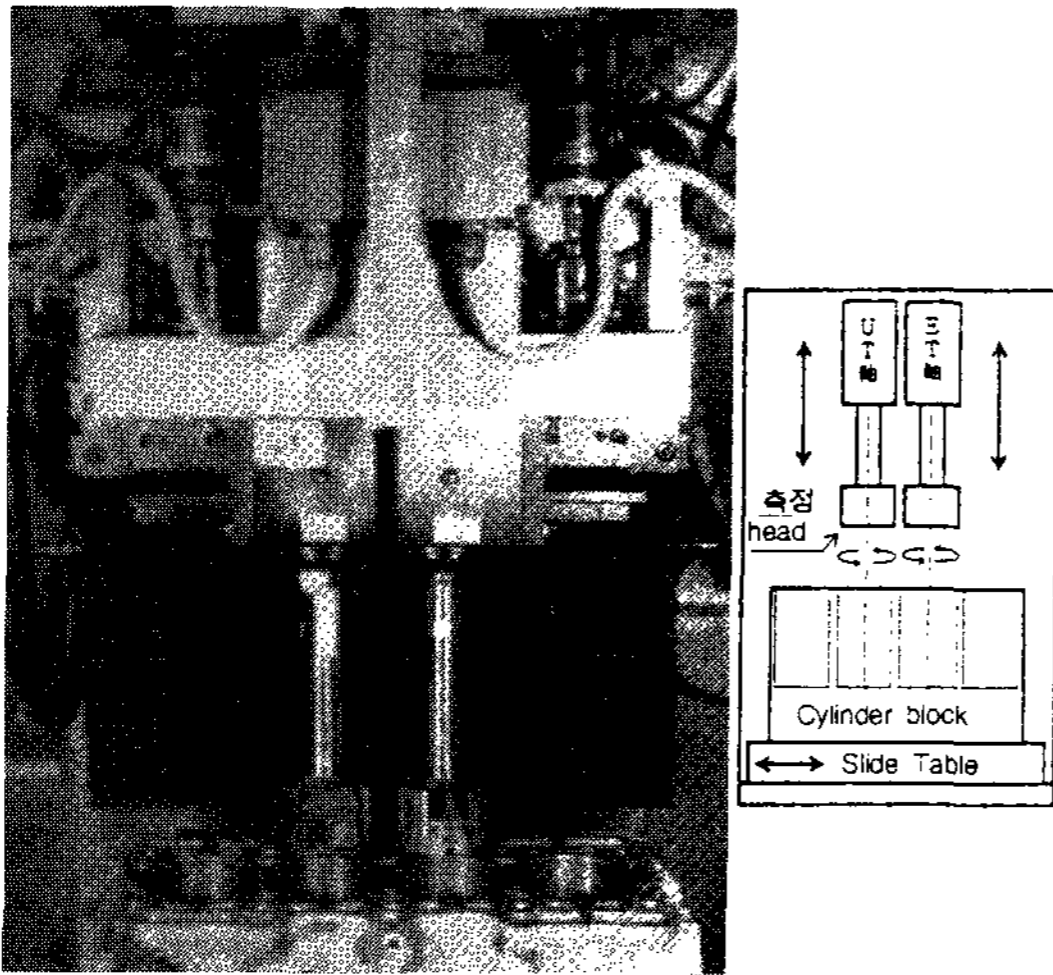


그림 23. 검사기계의 사진과 모식도

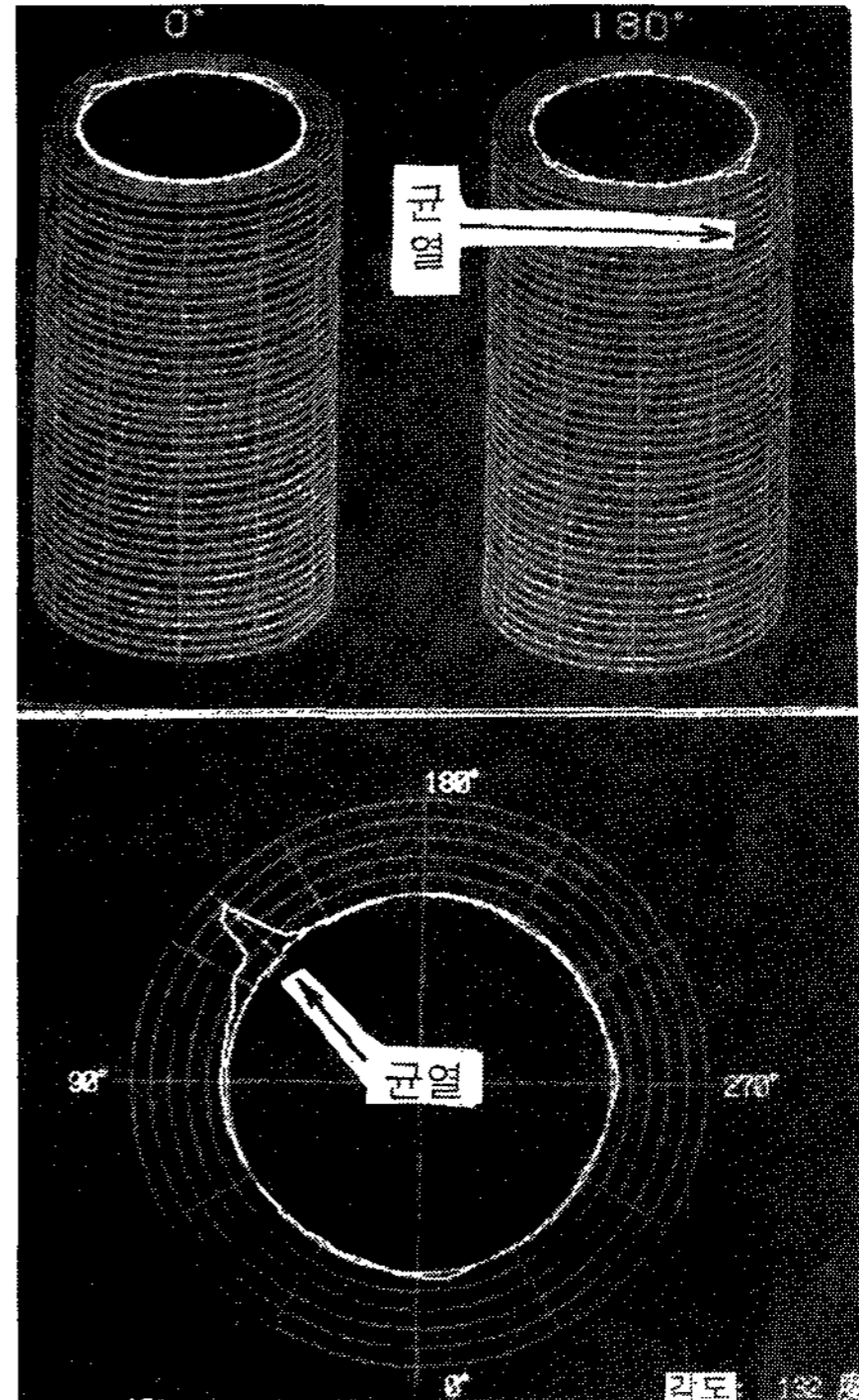


그림 25. 균열 검출예(ET-2)

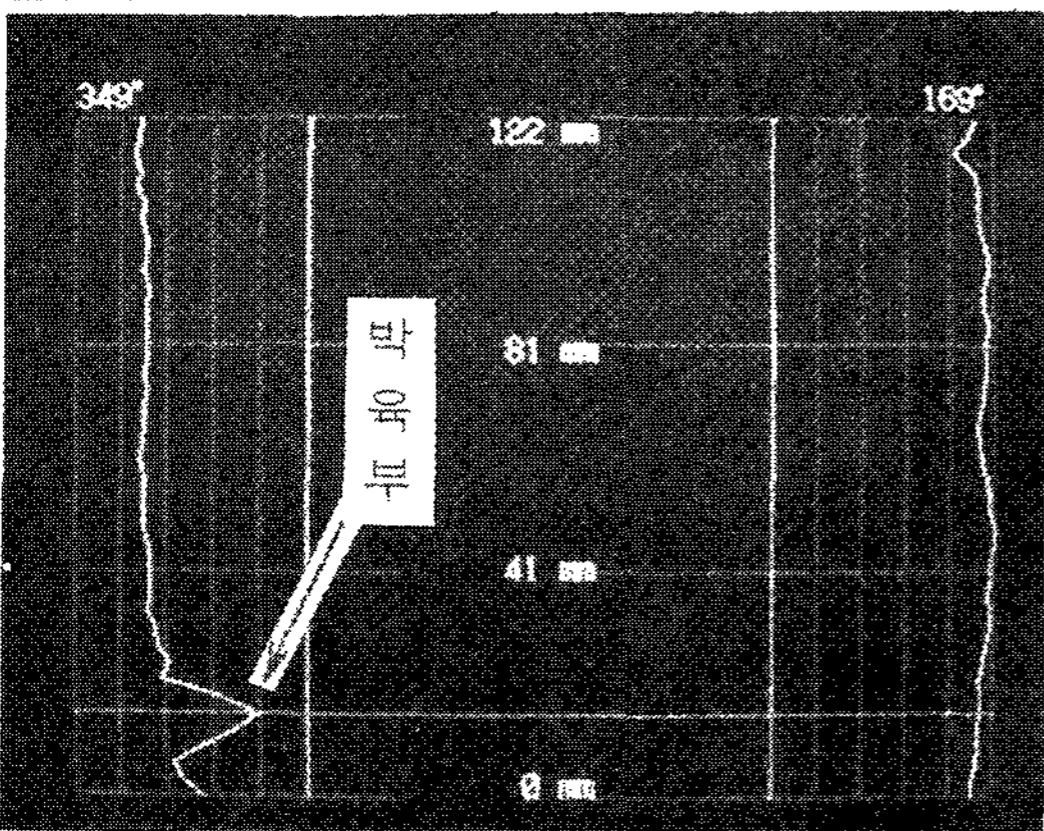
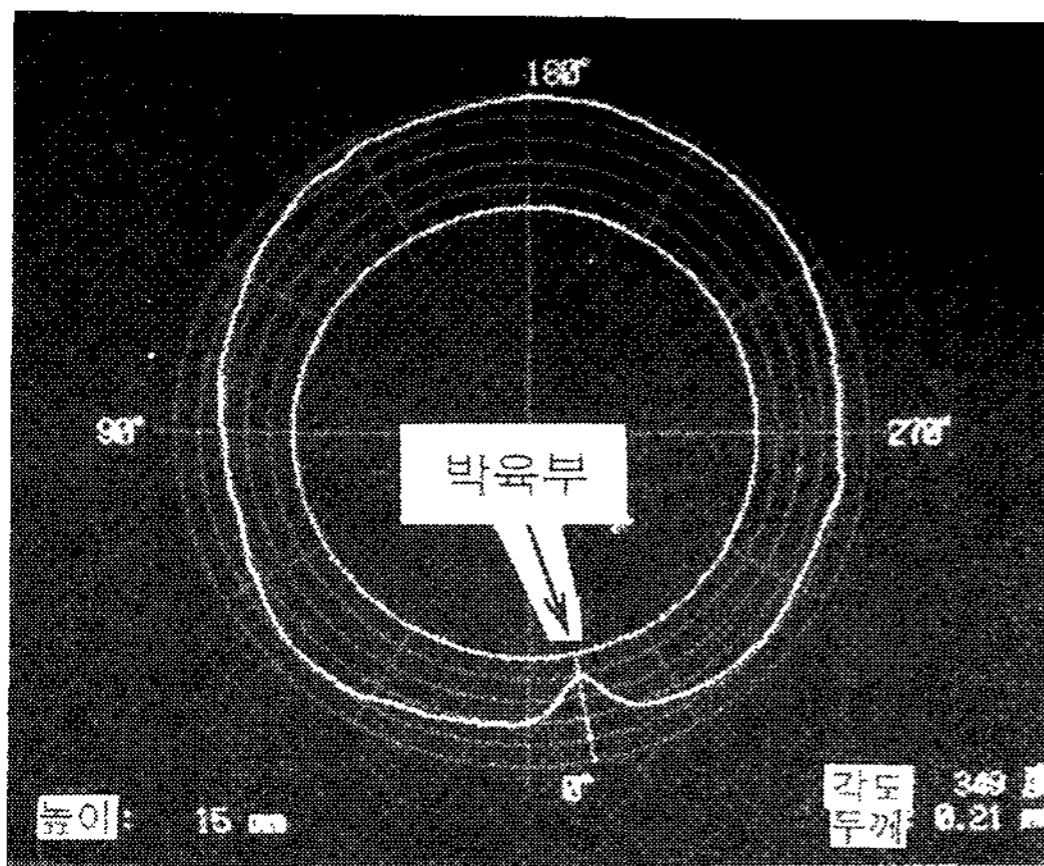


그림 24. MMC박육부 검출예(ET-1)

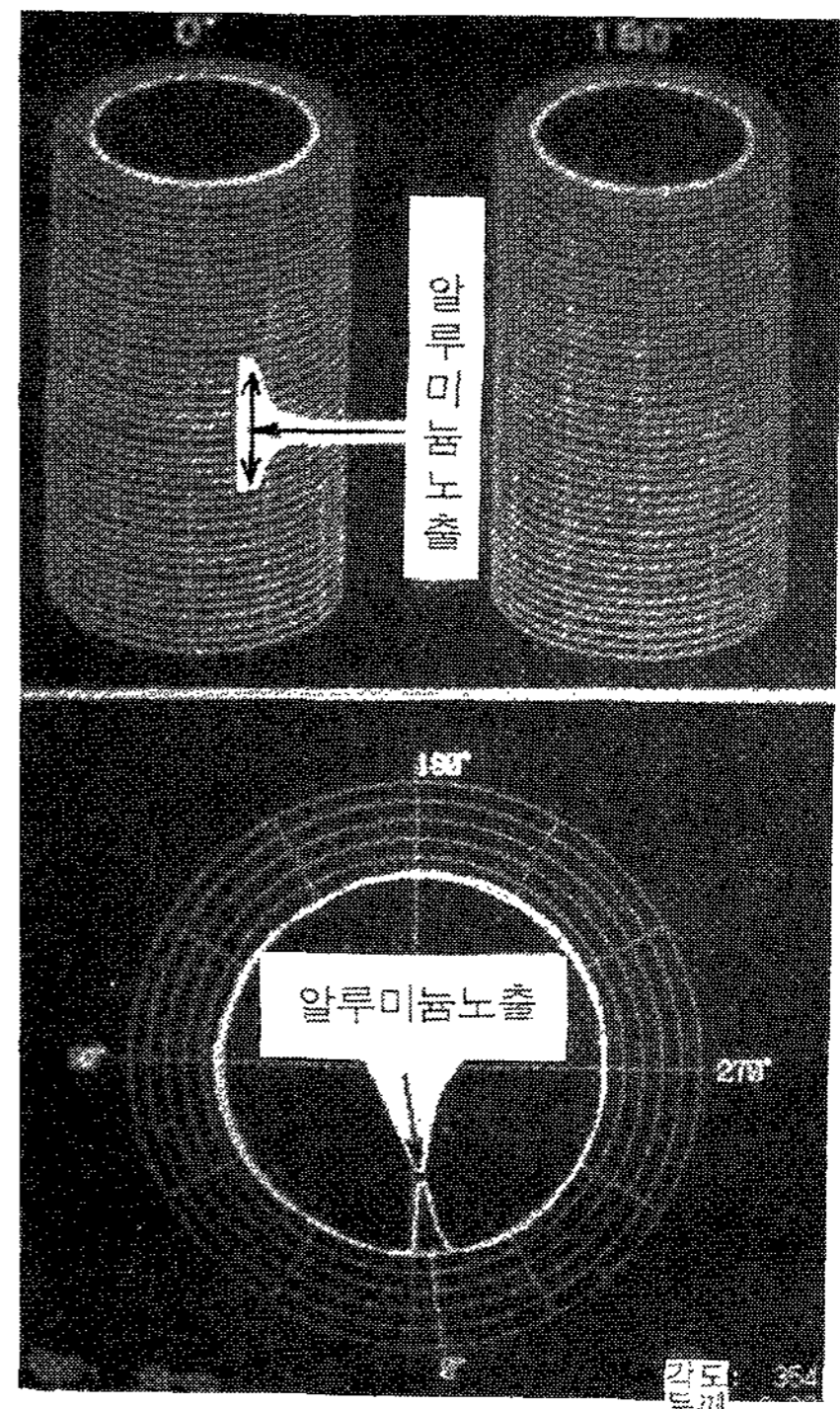


그림 26. 알루미늄노출 검출예(ET-2)



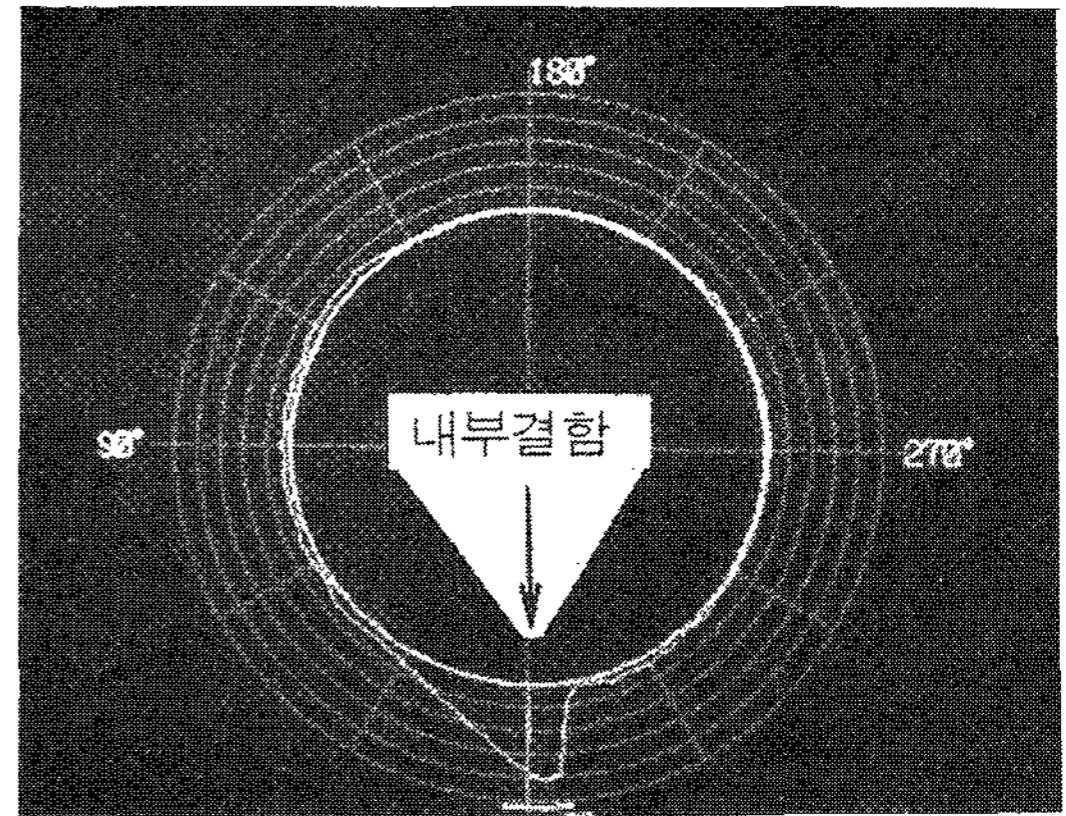
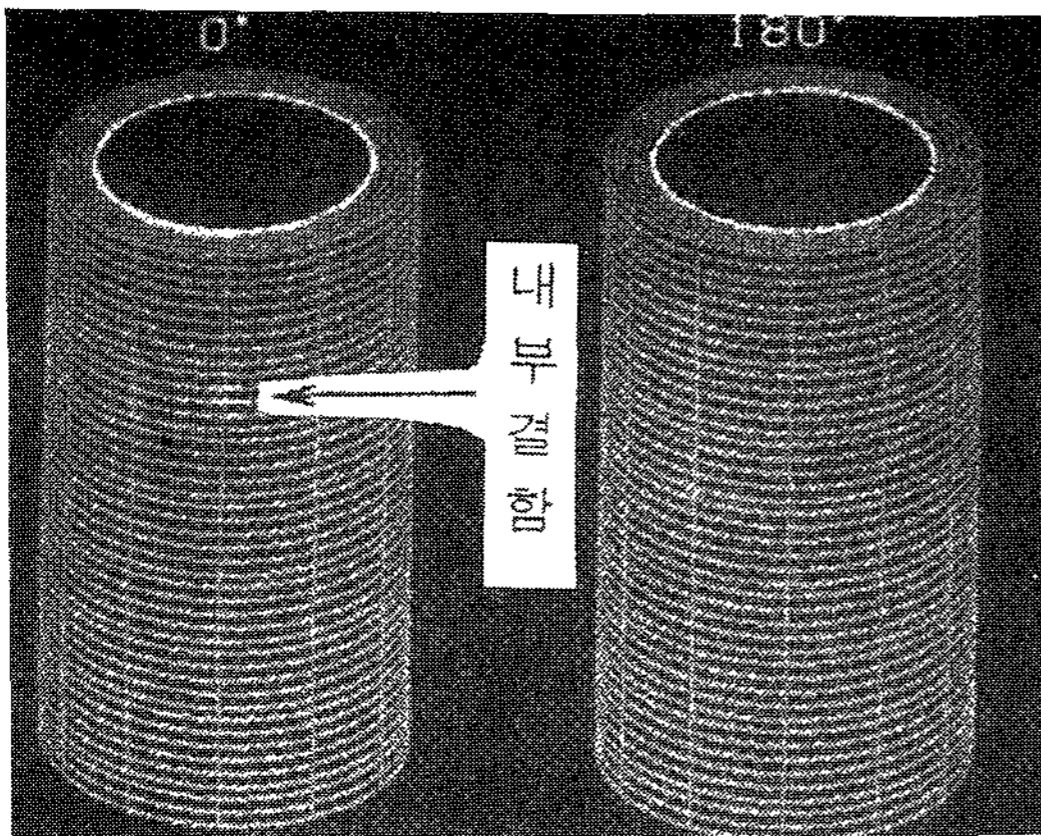


그림 27. 내부결함 검출예(UT)

3.4 X선 CT(Computed Tomography)장치  
의 응용

CT는 직접 볼수 없는 내부상태를 밀도분포를  
통한 비파괴, 비접촉으로 관찰할 수 있는 것이  
무엇보다 장점이다.

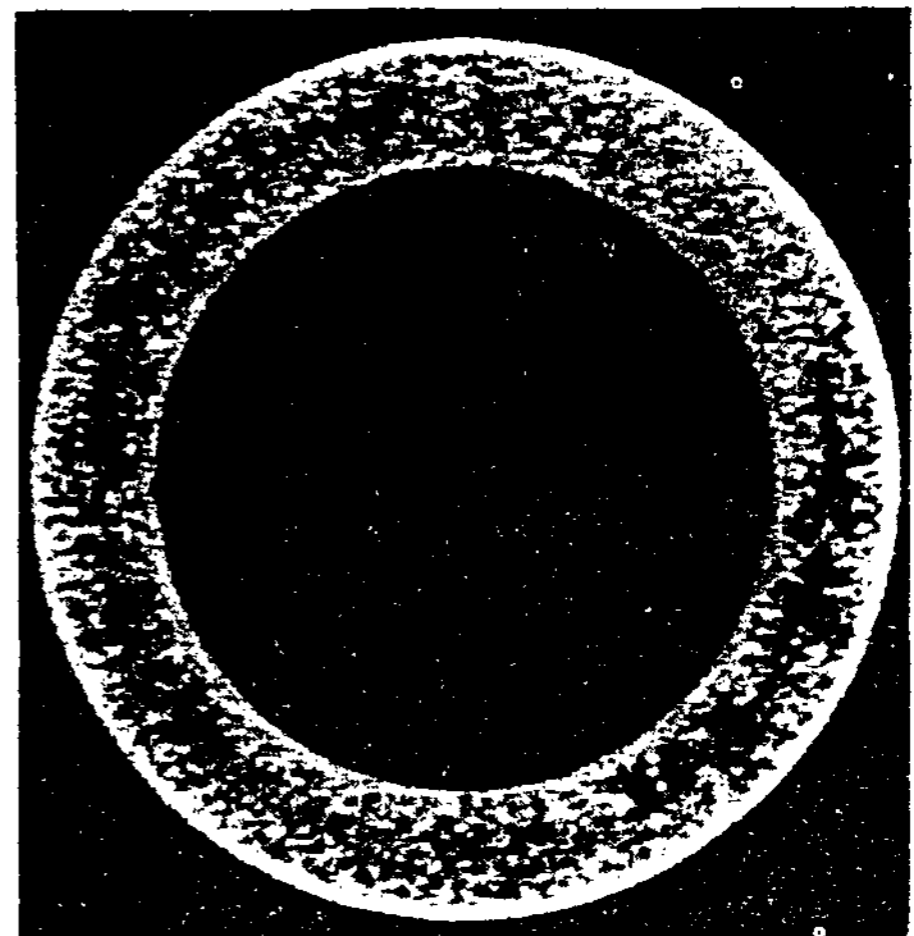


그림 29. 알루미늄 다이캐스팅 주조품내에 발생된  
porosity의 CT화상(φ200mm)

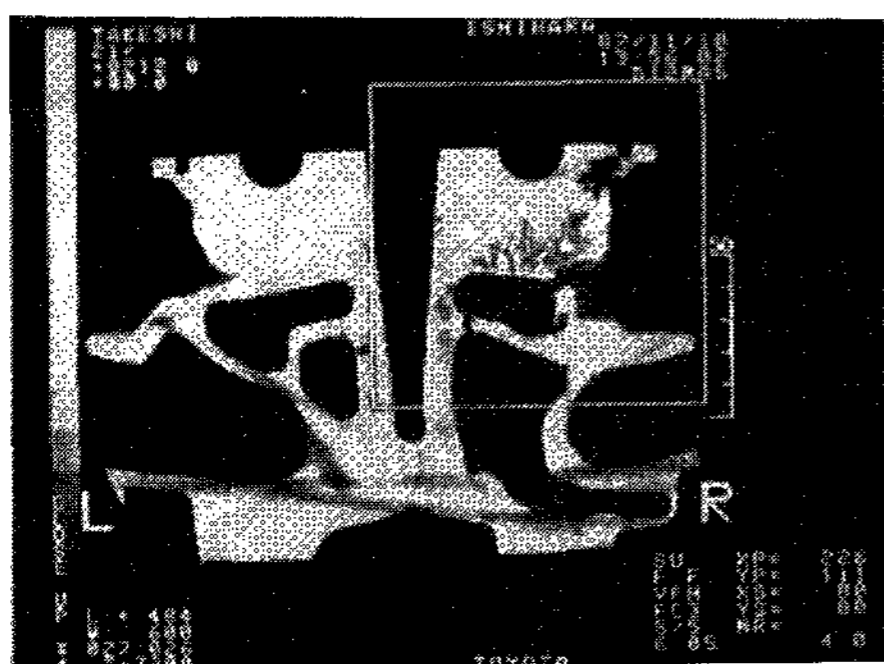
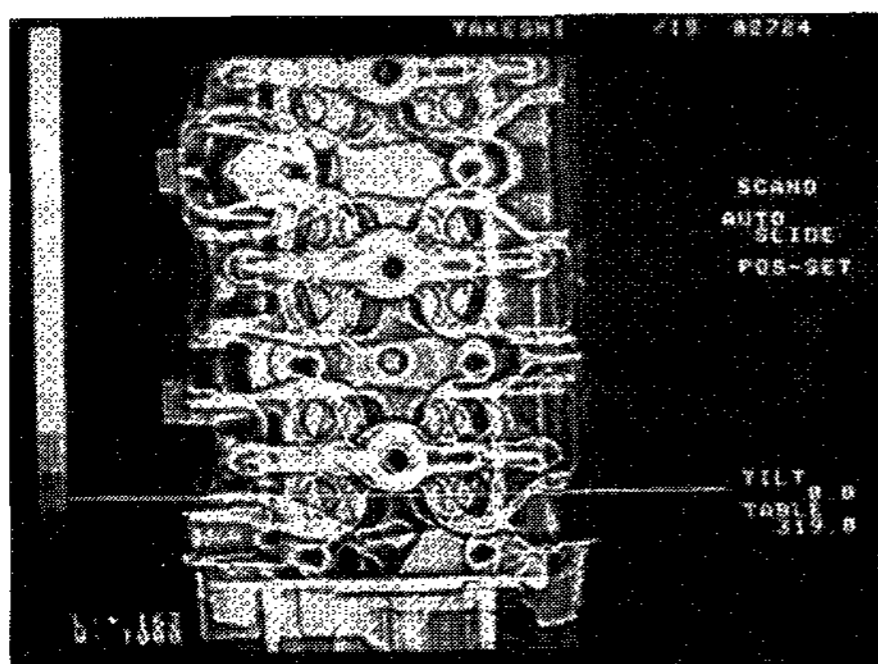


그림 28. X선 CT장치를 이용한 평면상(상)과  
단면상(하) 알루미늄 실린더 헤드 의 예

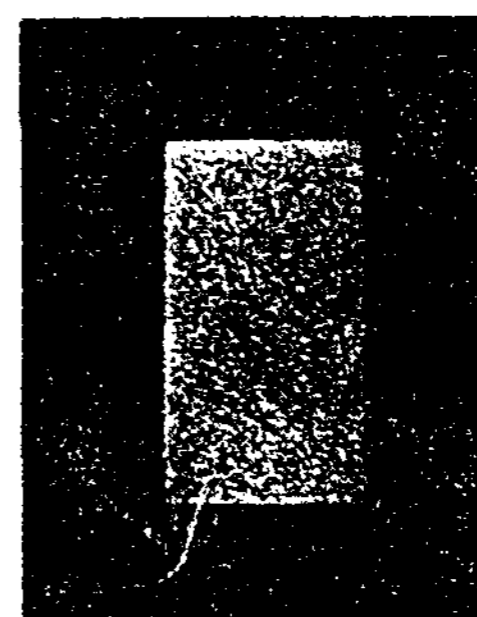


그림 30. 원통용기내에 2회로 나누어서 압축충전된  
다결정분말의 밀도분포상태의 CT화상  
(φ50×H150mm)



그림 31. Na/S 전지내의 활성물질의 측방향분포의 CT화상( $\phi 75 \times H400\text{mm}$ )

참 고 문 헌

[ 1 ] 大平五郎, 井川克也 : 鑄造工學, 日本金屬學會, (1971)

[ 2 ] 日本鑄物協會 : 鑄物便覽, 丸善株式會社, (1986) 1127

[ 3 ] 日本非破壞檢査協會編 : 新非破壞檢査便覽, 日刊工業新聞社, (1992)

[ 4 ] 川口正敏 外 : FCD Steering Knuckle Inline 超音波非破壞檢査시스템, 鑄物, 65, (1993) 933

[ 5 ] B. P. Flannery, H. D. Deckman, K. L. D' Amico, W. G. Roberge : SCIENCE 237 (1987) 1439

[ 6 ] 間瀬和行 : 超音波によるカムシャフト硬さの非破壞檢査, 鑄物 65, (1993) 937

[ 7 ] 吉川紀昭 : 鑄鐵鑄物への超音波探傷檢査の適用, 鑄物, 65 (1993) 941

[ 8 ] 鑄物 61 (1989) 852

[ 9 ] 船山美松 : クラッド型 ブレ-キディンスクの超音波探傷檢査, 鑄物, 65 (1993) 945

[10] F. Feil, K. Goebbels : Automation of Surface Defection and Evaluation with Liquid Penetrants : Development and Industrial Application, Materials Evaluation/45 (1987)

[11] 尹藤新一 : X線CT裝備の應用, 鑄物, 65 (1993) 957

[12] 米山弘志 : 超音波探傷檢査技術, 鑄物, 65 (1993) 910

[13] 藤井正司 : 産業用X線CTによる檢査技術, 鑄物, 65 (1993) 928

[14] 星川 洋 : 渦流探傷試驗技術, 鑄物, 65 (1993) 613

[15] 森永泰彦 : 非破壞計測の自動車部品への適用とその課題, 鑄物, 65(1993) 928

[16] 井村 武 外 : 渦流・超音波探傷によるMMCシリンダブロッックの檢査, 鑄物, 65 (1993) 949

[17] 日本鑄物協會, 鑄物, 65 (1993)

[18] T. Kanamori, S. Ito and T. Sukita : Proceedings of the 13th World Conference on Non-Destructive Testing (1992) 760

[19] M. Sasaki, T. Fujita, Y. Fukushima, M. Shimizu, S. Ito, A. Satoh and H. Miyamoto : Proceedings of the eighteenth International Symposium on Space Technology and Science (1992) 217

[20] 石原安興 : JACT NEWS 357 (1986) 23