技術資料

스테인레스 밸브의 이상조직 원인분석

박상태

A Cause Analysis of Abnormality Structure for Stainless Steel Valve

Sang-Tae Park

1. 연구 목적

ASTM A351 CF8M Stainless주강을 Valve형태로 주조하였을 때 RT 비파괴 검사 시 異常조직의 징후를 보이고 있는데, 이와 같은 異常조직의 생성 원인을 분석하여 생성 억제 대책 방안을 마련하고, 이와 같은 異常조직이 기계적 특성에 미치는 영향을 조사함으로 해서 제품의 품질안정화에 기여 하고자 한다.

2. 연구 내용

가. 자료 및 문헌조사

☞ Stainless주강품(Austenite계)의 품질검사에 관한 문헌조사

나. 비파괴 검사

☞ X-ray투과시험을 통하여 결함 형상이 검출되는 제품 (CF-8M-D)과 결함 형상이 검출되지 않는 제품 (CF-8M-S)으로 구별하여 비교 검사

☞ 초음파 탐상법(UT)을 이용하여 CF-8M-D와 CF-8M-S에 대하여 RT와 같은 목적으로 비교 검사

다. 미세조직 검사

☞ CF-8M-D와 CF-8M-S제품을 연마 후 마크로 부식을 시켜 마크로 조직을 관찰함으로 해서 응고조직과 RT결과와의 연관성 규명

☞ 마크로 조직 뿐만 아니라 마이크로 조직의 제품별 차이점을 구별하기 위하여 금속광학현미경, EPMA, Image Analyzer를 이용하여 미세조직 관찰

라. 용체화 처리 효과 검사

☞ CF-8M-D 제품의 異常조직 현상을 고온에서의 균질화 공정을 통하여 제거될 수 있는 가를 알아보기 위하여 일반적인 용체화처리 온도보다 높은 온도인 1200°C에서 약 16시간까지 가열 후 Water Quenching 시켜 미세조직을 관찰

마. 기계적 특성 검사

☞ 異常조직이 상온인장 및 충격특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 X-ray 투과 시험 결과 후 CF-8M-D와 CF-8M-S로 구별하여 상온인장 및 충격시험을 실시하였음.

3. 연구 결과

가. 비파괴 검사

1) 비파괴 시험의 기초

비파괴 검사란 비파괴 시험에 의해 얻은 결과에 따라 그 제품의 성능을 추정하고, 공업 제품으로서의 안정성을 판단하는 기술이다. 따라서 비파괴 시험은 재료의 물리적 성질이 결함의 존재에 의해 변화하는 사실을 이용해서, 그 변화량을 측정하여 결함의 존재를 추정하는 기술이다.

재료의 물리적 성질로서 현재 비파괴 시험에 이용되고 있는 것으로는 방사선에 대한 재료의 성질, 탄성파에 대한 성질, 전기적 성질, 자기적 성질, 열적 성질

범한금속공업㈜(Pan-Korea Metal Industrial Co., Ltd)
E-mail : stpark@pkvalve.co.kr

"본 기술자료는 2001년도 하계기술강연대회에서 발표된 내용임"

및 표면 에너지의 성질 등이다. 따라서 이들의 물리적 성질의 특성을 명확히 하고 그 성질의 미세한 변화의 측정 기술이 비파괴 시험의 근원이 되는 것이다.

즉, 물리적 양의 변화는 재료 내부에 내재하는 조직의 이상, 기하학적 이상에 의한 것을 이용하고 반대로 물리적 양의 변화에서 조직 및 기하학적 이상을 추정하는 기술이다. 그러나 이론적으로 반대는 반드시 참이 아니고,반드시 물리적 변화와 재료내부의 이상은 1대 1의 대응을 이루지 않는다. 또 재료내부의 이상은 반드시 모든 물리적 양의 변화를 동반하는 것은 아니다. 따라서 몇 개의 물리적인 모든 양의 변화를 총합해서 내부의 이상에 대한 판단을 내려야 한다.

이상의 이유에 의해 1개의 비파괴 시험 방법에 의해 재료내부의 결함은 반드시 발견되는 것은 아니고, 또 결함 지시가 있어도 반드시 특정한 결함의 존재를 표시하는 것도 아니다. 1가지의 비파괴 시험 방법은 모든 결함을 발견할 수 없고 또 경우에 따라서는 1가지의 비파괴 시험 방법에 의해 판단하는 것은 위험한 경우도 있다. 그러므로 각 비파괴 시험 방법의 기초가 되는 물리적 양이 갖는 의의를 분명히 해두고 몇 개의 비파괴 시험 결과를 종합적으로 판단한 결과에서 결정하는 것이 바람직하다.

2) 방사선 투과시험의 원리

방사선 투과시험에는 X-선 및 γ선이 일반적으로 많이 사용되고 있다. X-선 및 γ선은 시험체를 투과하는 성질이 있으며, 이의 투과하는 정도는 재료를 구성하는 원소와 두께에 따라 달라진다. 시험체중에서 방사선의 흡수가 달라지면, 이것은 방사선 투과 사진상에서 흑화도의 차이가 생겨 나타나며, 이것을 관찰하여 시험체 내부의 결함의 유무를 확인할 수 있다. (그림 1 참조)

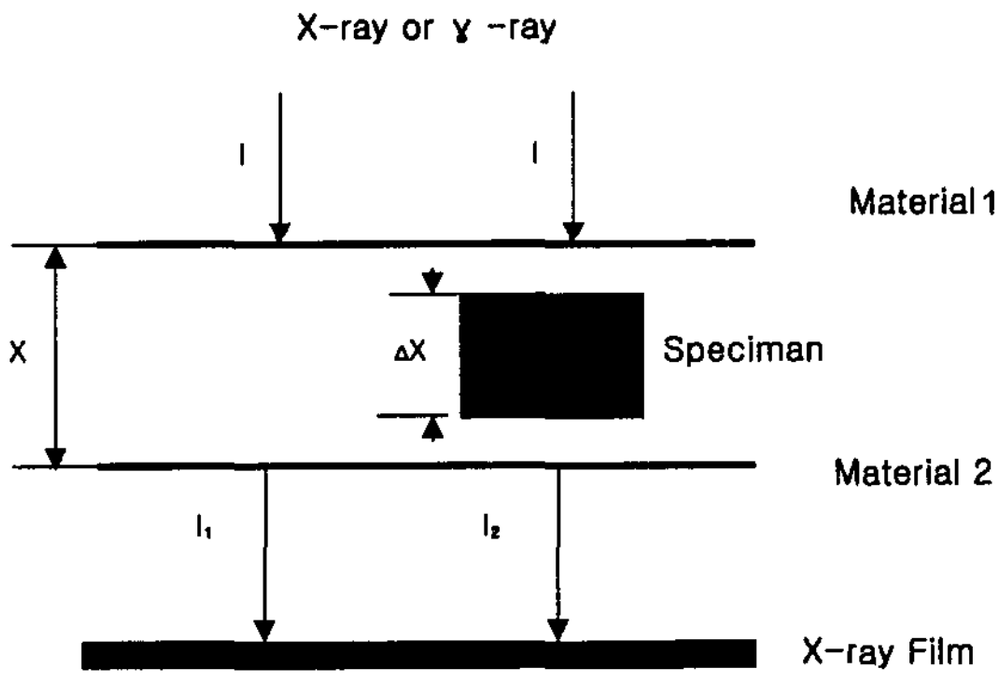


그림 1. 방사선 투과시험의 원리.

그림에서 시험체를 투과한후의 방사선의 강도를 I_1 및 I_2라 하면 I_1 및 I_2는 각각 다음식으로 나타낸다.

$$I_1 = I_0 e^{-\mu x} \tag{1}$$

$$I_2 = I_0 e^{-\mu(x-\Delta x)} = I_0 e^{-\mu x^{+}(\mu-\mu')\Delta xcc} \tag{2}$$

그러므로 $I_2/I_1 = e^{(\mu-\mu')\Delta x}$ (3)

여기에서 I^o는 시험체 두께가 0인 경우의 조사선의 강도를 나타낸다. 또 μ 및 μ'는 각 시험체를 투과한 방사선의 강도가 달라지는 선흡수 계수로 각 물질 1 및 물질 2의 선흡수 계수를 나타낸다. (3)의 식으로부터 알 수 있는 것과 같이 시험체중에 Δx의 이종재료의 물질이 있으면 μ는 방사선을 흡수하는 정도를 나타내는 것으로 시험체를 구성하는 원소의 원자번호에 의해 달라지고, μ값은 대부분의 경우 원자 번호가 클수록 크다.

3) CF8M에 대한 방사선 투과 시험 결과

실제 Valve제품은 두께가 매우 두꺼우므로 X-ray 투과시험으로는 비파괴검사가 불가능하여 현장에서는 γ-ray 투과 시험을 실시하고 있으며 시험 결과 그림 2와 같이 방사선 투과 사진상에 막대모양의 결함 흔적이 보이고 있다. 이와 같이 결함이 보이는 제품(이하 CF-8M-D라고 명명함)과 결함이 보이지 않는 제품(이하 CF-8M-S라고 명명함)을 수거하여 결함 흔적이 검출되는 부위에 대하여 두께를 22 mm정도로 가공 후 실험실에서 X-ray 투과 시험을 실시하였다. 시험 결과 그림 3과 같이 2가지 시편에 대하여 모두 물질 및 막

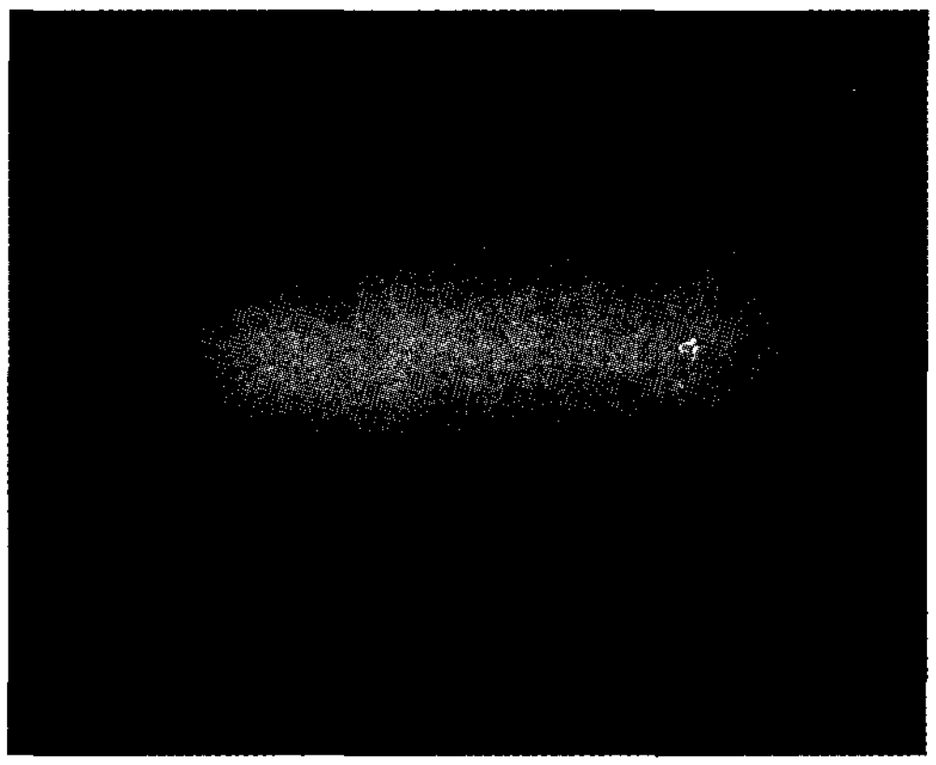
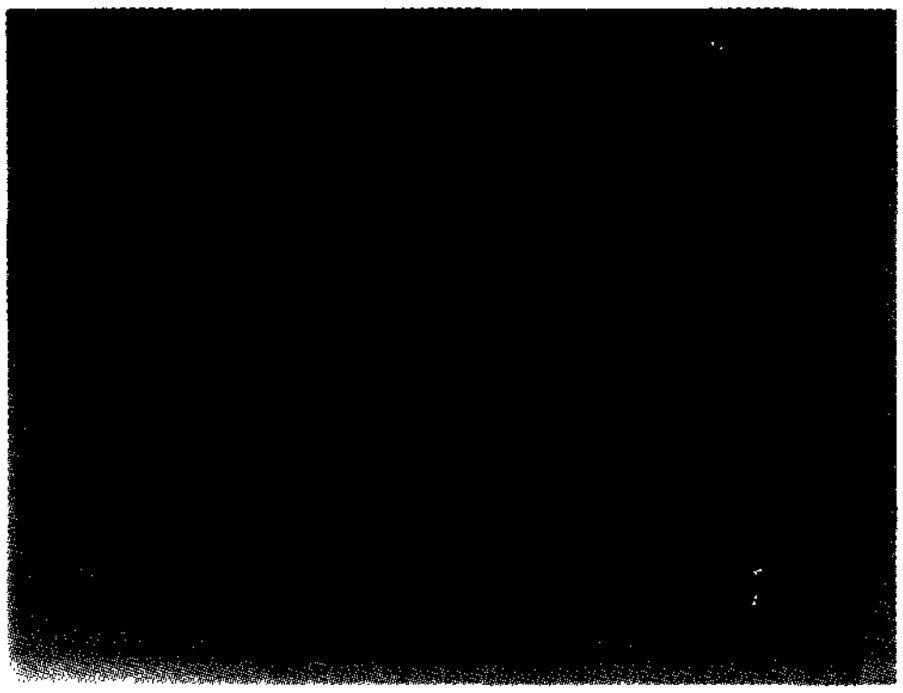
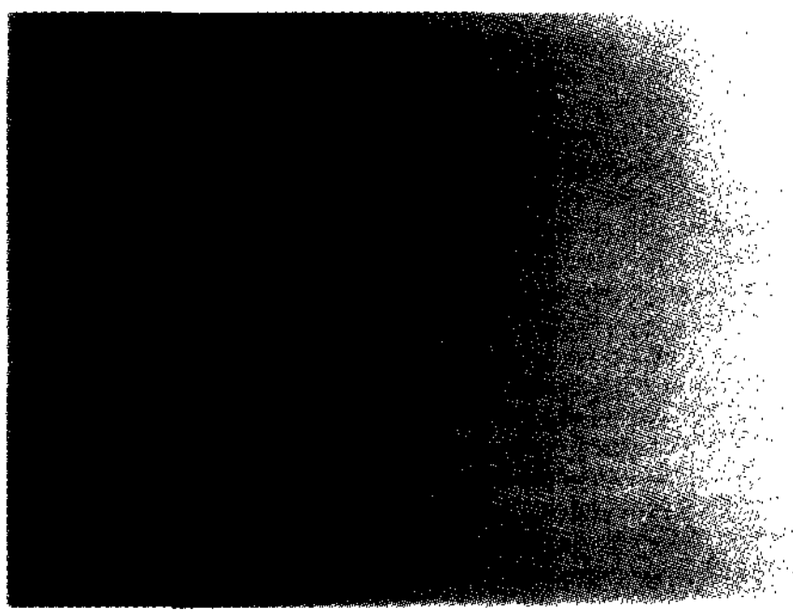


그림 2. 실제 Valve제품의 γ-ray 투과시험시 나타나는 결함 흔적.



(a)



(b)

그림 3. CF-8M-D(a)와 CF-8M-S(b)의 X-ray 투과 시험 결과.

대 모양의 異常흔적이 보이고 있음을 알 수 있다. 그러므로 이와 같은 이상 흔적을 주조상의 일반적인 결함이 아닌 재질 특성상의 문제일 것이라는 추측을 할 수 있겠다.

4) 초음파 탐상 시험의 원리

주파수가 대략 2000 Hz 이상의 높은 음은 인간의 귀로는 들을 수 없기 때문에 초음파라 한다. 이 초음파를 이용한 시험방법에는 펄스반사법, 투과법, 공진법의 3가지가 있으며, 가장 널리 이용되고 있는 것은 펄스반사법으로 보통 초음파 탐상 시험이라 하면 이 방법을 말한다.

펄스반사법에서는 시험재의 표면으로부터 지속시간이 극히 짧은 초음파펄스를 내부로 전달시켜, 시험재중의 결함에 의해 반사되는 초음파(이른바 echo라 한다)를 검출한다. 이때 에코의 크기로부터 결함에 크기를 추정하고, 또 송신된 초음파 펄스가 수신될 때 까지의 시간을 측정하여 결함까지의 거리를 알 수 있다. 이러한 것을 초음파 탐상기의 브라운관에 나타낸다. 브라운관의 전면에는 눈금판이 그려져 있으며, 횡축은 왼쪽으로부터 오른쪽으로 시간의 경과, 즉 결함까지의 거리를, 종축은 에코의 크기를 나타내도록 되어 있다.

초음파의 송수신기에는 전압을 가하면 초음파가 발생하고, 초음파를 받으며 전압을 발생시키는 동작을 하는 진동자를 보호용케이스에 넣은 탐촉자를 이용한다. 하나의 탐촉자로써 초음파를 송신.수신하는 것이 많고 이를 1탐촉자법이라 한다. 초음파를 시험재에 진행시키는 방향에 따라 수직 탐상법과 사각 탐상법으로 분류한다.

수직탐상은 시험재의 표면(탐상면이라 한다)에 수직으로 초음파를 입사시키는 방법이다. 수직탐촉자가 결함의 바로 위에 위치하는 경우 결함에코는 저면에서 반사된 저면에코의 앞에 나타나며 그 높이로부터 결함의 크기를 또 저면에코 및 결함에코의 시작점의 위치 입사점 및 빔 거리로부터 재질의 두께 및 결함의 깊이를 측정할 수 있다.

건전부에서의 결함에코는 나타나지 않고 저면에코만 나타난다. 결함의 크기가 초음파 빔(beam)의 직경보다 작은 경우에는 결함의 바로 위에 수직탐촉자가 위치했을 때 결함에코 높이는 최대가 된다. 결함의 크기가 초음파 빔의 직경보다 큰 경우에는 저면은 결함에 의해 가리 워지기 때문에 저면에코가 소실된다. 이 경우 탐촉자를 탐상면을 따라 측정하면 결함의 폭을 측정할 수 있다. 수직탐상은 표면에 평행한 평면상 결함의 검출에 적당하고, 강판이나 두께가 두꺼운 단강품, T이음이나 모서리 이음의 용접부 시험에 적용된다.

사각탐상은 탐상면에 대해 경사지게 입사 시키는 방법이다. 사각탐상에서는 초음파 빔이 기울어져 진행하므로 저면에코는 나타나지 않는다. 결함에코 F가 나타나는 위치에서 탐촉자의 입사점(초음파 빔의 중심축이 탐상면에 입사하는 점으로써 탐촉자측면에 눈금으로 위치를 나타낸다)으로부터 초음파 빔의 진행방향에 따라 결함까지의 거리가 측정된다.

먼저 사용하는 탐촉자의 입사점 및 굴절각(시험재중을 진행하는 초음파 빔의 중심축이 탐상면에 법선과 이루는 각도)를 측정하면 결함의 위치를 구할 수 있다. 시험부를 직접 겨누는 방법을 직사법이라 하고, 저면에서 1회 반사하여 겨누는 방법을 1회반사법이라 한다. 탐촉자-용접부 거리(입사점으로부터 결함까지의 탐사면 상의 거리)를 Y, 탐촉자-결함거리(입사점으로부터 결함까지의 탐상면 상의 거리)를 Yf라 하면, 결함 위치(용접부의 기준선으로부터 결함까지의 탐상면 상의 거리 ΔY와 탐상면으로부터의 깊이 d는 다음과 같이

나타난다.

탐상면상의 거리 : $\Delta Y = Y - YF = Y - W_{Fsin\theta}$ (4)

깊이(직사법) : $d = W_{Fcos\theta}$ (5)

깊이(1회 반사) : $d = 2t - W_{Fcos\theta}$ (6)

사각탐상법은 주조 맞대기 용접부의 시험에 적용된다.

5) CF8M에 대한 초음파 탐상 시험 결과

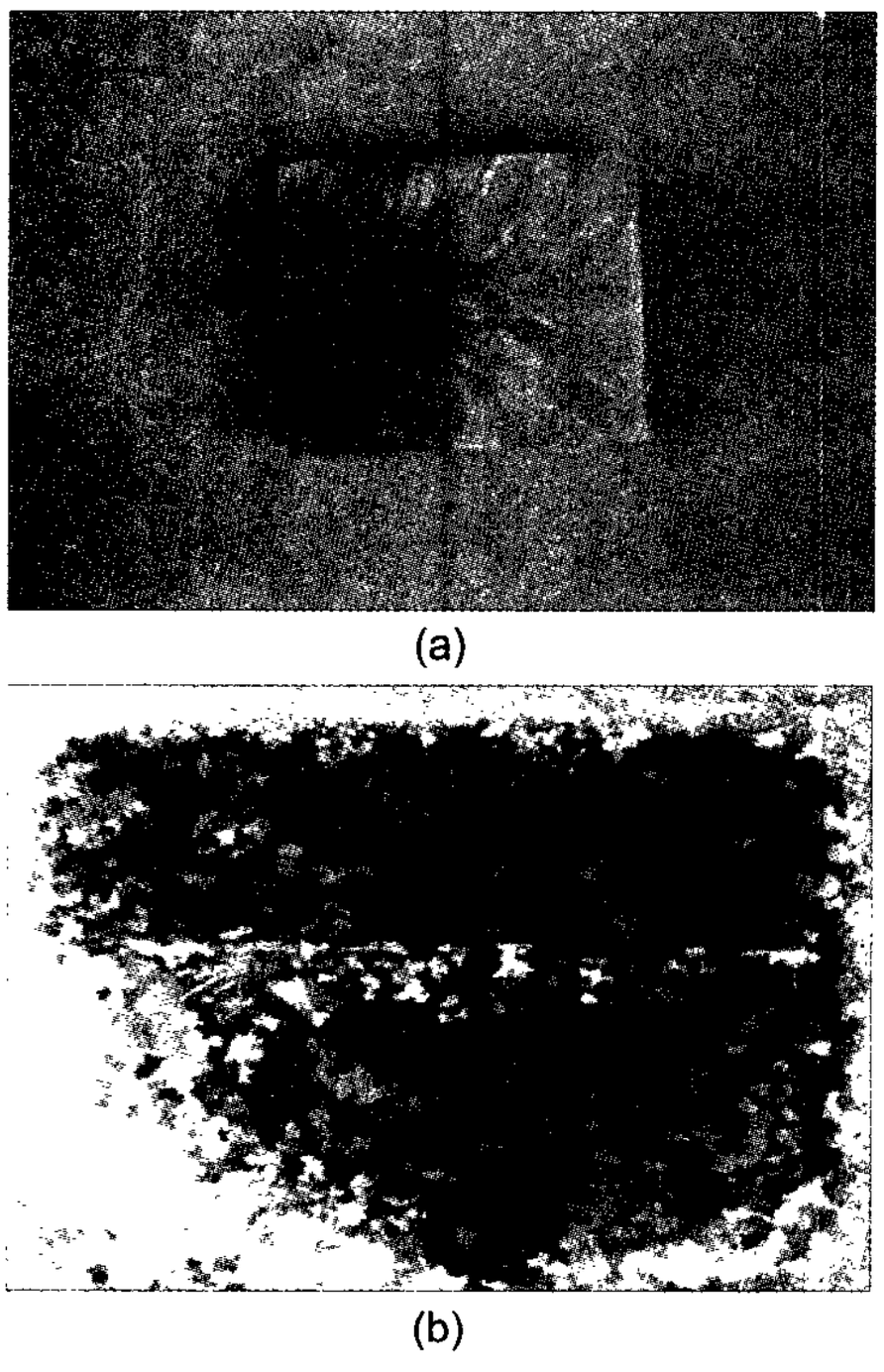
앞에서 설명한 초음파는 재료의 제조상태 및 재질에 따라 물질 내에서 음파의 전달속도가 달라진다. 이러한 초음파 탐상 시험의 원리를 이용하여 본 재료에 대하여 초음파 탐상 시험을 실시 하였으며, 방사선 투과필름에서 나무무늬 같은 형상이 나타나지 않는 시편에 대하여 초음파의 전달속도를 측정하여 본 결과 음파의 전달속도는 차이가 없는 것으로 나타났으나 음파의 감쇠가 심한 것으로 미루어보아 이는 재료의 주조상태 등 재질자체 변수에 의한 것이며, 또한 필름상에 나타난 무늬형상의 시편에 대하여 초음파시험을 실시한 결과 결함으로 나타나는 결함신호가 나타나지 않는 점으로 보아 이형상들은 방사선 투과시험의 설명에서 언급한 바와 같이 재료의 고유 특성인 것으로 추정된다.

나. 미세조직 검사

1) 마크로 조직검사

앞서 기술한 방사선 투과시험 결과 나타나는 나무무늬 모양의 결함이 주조품의 마크로 조직과 연관 관계가 있는가를 알아보기 위하여 마크로 부식액(염산 200 ml, 과산화수소 180 ml)을 이용하여 시편 표면을 연마 후 마크로 조직 시험을 실시 하였다.

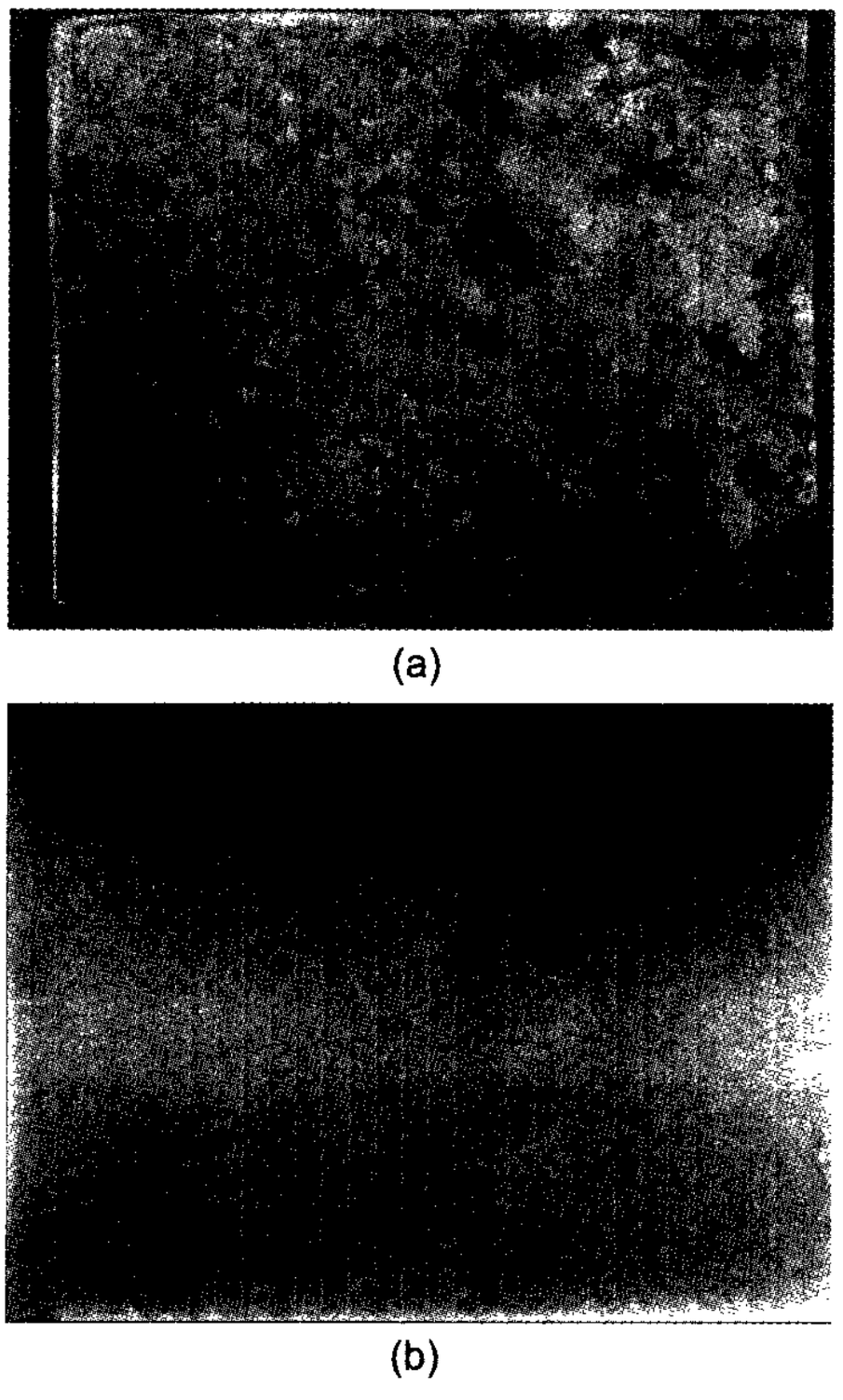
일반적으로 주조품의 마크로 조직검사는 주조품의 응고조직 즉 입자크기, 응고방향, 응고상태 등을 알아보기 위한 방법이다. 시험결과 전반적으로 그림 4(a)와 같이 비교적 응고속도가 빠르면서 지향성 응고가 일어나 응고조직이 Columnar형태를 나타내고 이 시편의 경우는 나무무늬 모양의 이상조직이 방사선 투과시험에서 잘 나타나지 않고 있는 반면에 그림 4(b)와 같이 비교적 응고속도가 느리고 마크로 조직이 Equiaxed 형태를 갖는 시편의 경우에서는 앞서 기술한 이상조직 현



(a)

(b)

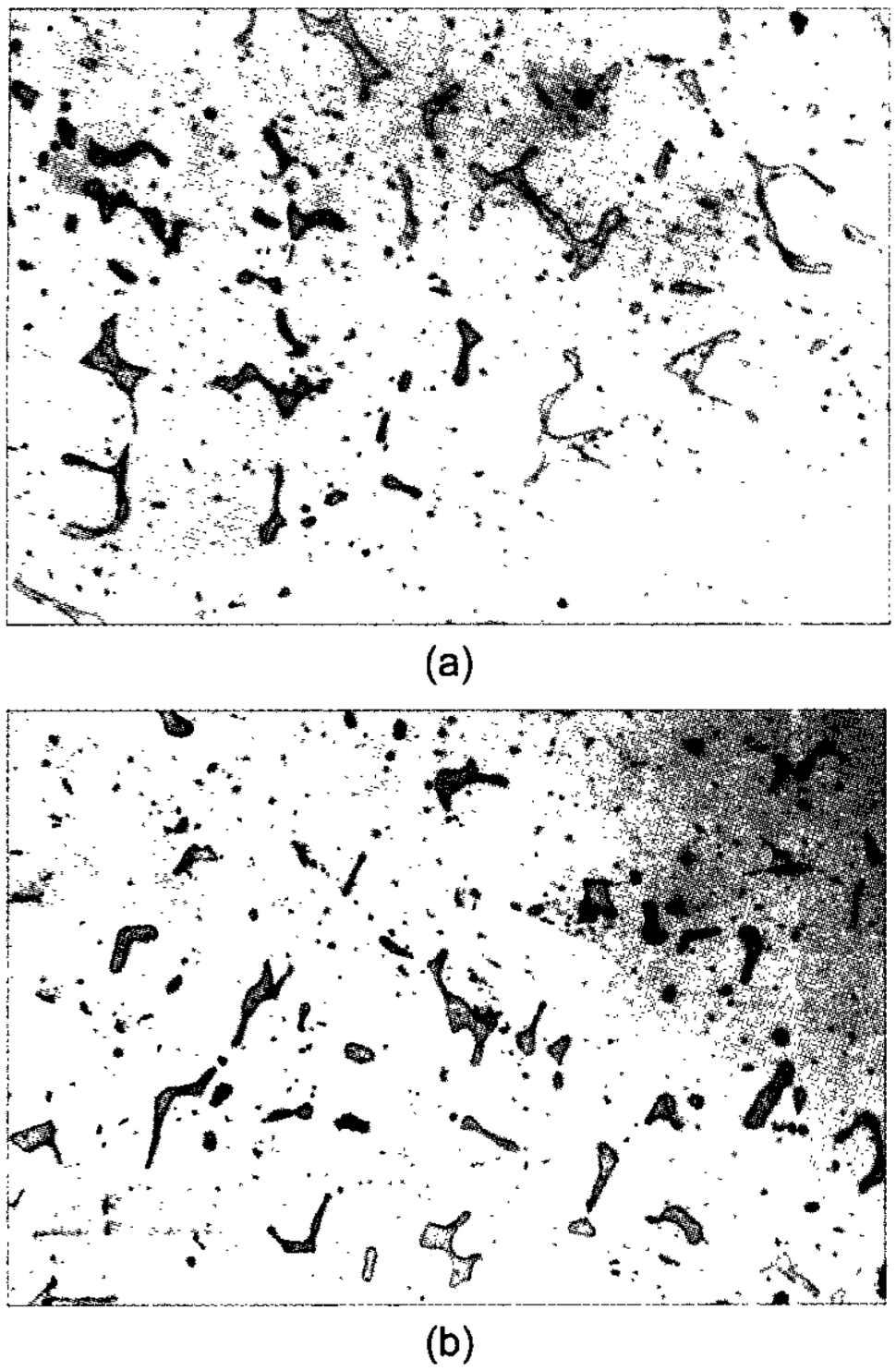
그림 4. CF-8M 시편의 마크로 조직 (a) Columnar Structure (b) Equiaxed Structure.



(a)

(b)

그림 5. CF-8M-D 시편의 두께 1.5 mm 판재에 대한 (a)마크로 조직과 (b) X-ray 투과시험 Film.



(a)

(b)

그림 6. 금속 광학 현미경 조직 사진 (×100) (a) CF-8M-D (b) CF-8M-S.

상이 나타나고 있다. 즉 방사선 투과시험시에 나타나는 Film상의 나무무늬 모양의 이상조직은 주조품의 마크로 조직 차이에서 기인하고 있으며 이와 같은 현상은 그림 5 에서와 같이 시편의 두께를 1.5 mm로 가공 후 X-ray 투과시험을 행한 시험에서 잘 나타나고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 마크로 조직의 형태는 X-ray 투과 시험시의 Film에 검출된 조직과 잘 일치하고 있다.

2) 마이크로 조직검사

금속광학현미경을 이용하여 마이크로 조직을 검사하기 위하여 Glyceregia액(Glycerol 40 ml, 염산 30 ml, 질산 10 ml)으로 Etching을 실시한 후 미세조직을 검사하였다.

검사 결과 뚜렷하게 미세 조직상 차이점은 발견할 수 없었다.

미세조직은 Matrix의 γ(Austenite Phase)와 응고 중에 생성된 δ-Ferrite로 구성되어 있는데 δ-Ferrite의 Volume Fraction (Image Analyzer을 이용하여 측정)

표 1. EPMA 성분 분석 결과 (Unit : wt%)

	Si	Cr	Fe	Ni	Mo
CF-8M-D	1.31	19.71	67.44	9.38	2.16
CF-8M-S	1.13	19.13	67.65	9.19	2.90

표 2. CF-8M-S 와 D 의 상온인장 특성 비교

	항복강도 ($Kg.f/mm^2$)	인장강도 ($Kg.f/mm^2$)	연신율 (%)
CF-8M-D	28.99	50.71	58.45
CF-8M-S	29.05	55.57	46.54

도 CF-8M-D(이상조직이 있는 경우)의 경우는 약 11.4%이고, CF-8M-S (이상조직이 없는 경우)의 경우는 약 11.5%로 역시 미세조직 구성상에는 큰 차이는 발견되지 않았다.(그림 6 참조)

CF-8M-D와CF-8M-S와의 사이에 미소 성분상의 차이점을 알아 보기 위하여 이 부위에 전자현미경을 이용한 EPMA 미소성분 분석을 실시하였다. 분석을 실시한 결과 표 1과 같이 역시 큰 차이점은 발견 되지 않았다.

다. 용체화 처리 효과 검사

CF-8M-D 제품에서 나타나는 나무무늬 모양의 이상조직이 제품 주조 시 부분적인 성분 편석에 의하여 생성되는 것은 아닌가 하는 관점에서 일반적인 용체화 처리 온도보다 높은 1200°C에서 약 16시간까지 장시간 열처리를 실시한 후 X-ray 투과시험을 실시하였다. 시험결과 이상조직은 소멸되지 않았다. 그러므로 이와 같은 시험 결과는 앞서 기술한 이상 조직이 주조품의 마크로 조직에서 기인한다는 사실을 뒷받침 하고 있다.

라. 기계적 특성 검사

이상조직이 있는 시편(CF-8M-D)과 이상조직이 발견되지 않은 시편(CF-8M-S)에 대하여 기계적 특성 검사를 실시 하였다.

1) 상온 인장 특성

상온 인장 시험을 행한 결과는 표 2와 같다.

표에서 알 수 있는 바와 같이 상온 인장 특성상 큰 차이점은 발견되지 않고 있다.

그러나 지금까지의 상온인장 시험결과를 좀 더 자세히 검토하여 보면 항복강도는 거의 비슷한 특성을 보이고 있으나, CF-8M-D시편이 CF-8M-S시편에 비하여 인장강도 값은 약 10%정도 낮고, 연신율은 약 18% 증가되고 있는 경향을 보이고 있다.

또한 이와 같은 상온 인장강도 값은 규정치인 인장

표 3. 충격시험 결과

시편번호	시 편	흡수에너지(J)	비 고
20°C	CF-8M-D	213.5	
	CF-8M-S	137.0	
0°C	CF-8M-D	178.5	
	CF-8M-S	157.0	
-80°C	CF-8M-D	144.0	
	CF-8M-S	141.0	

강도 49.2 Kg.f/mm^2, 항복강도 21.1 Kg.f/mm^2, 연신율 30%를 모두 상회하고 있다.

2) 충격 시험

상온 인장 시험을 CF-8M-D 와 CF-8M-S 의 충격 특성을 비교하기 위하여 20, 0, -80°C에서 각각 충격 시험을 행하였다. 그 결과는 표 3에 제시 하였다.

표에서 보는 바와 같이 전반적으로 충격치는 CF-8M-D가 오히려 CF-8M-S에 비하여 월등히 높은 것으로 평가되고 있다.

4. 결　론

지금까지의 연구결과를 토대로 결론을 내리면 X-ray 결과 검출되는 이상조직은 주조결함의 일종이 아니고 응고 과정중(응고속도)에서 오는, 즉 입자크기 및 형상(Columnar 혹은 Equiaxed)에서 오는 일종의 회절 현상으로 보인다. CF-8M-S와 CF-8M-D시편의 경우, 제품 두께를 X-ray 투과 시험에 적합한 약 20 mm정도의 두께로 가공 후 시험을 실시하면 거의 모든 시편에서 응고조직(마크로 조직)에 따른 나무무늬 모양의 이상조직이 검출되고 있다는 사실이 앞서 기술한 결론을 뒷받침한다.

JIS G0581(주강품의 방사선 투과시험방법 및 투과사진의 등급분류방법)규정을 검토하여 보면 대상 강종으로서 JIS G5101(탄소강 주강품)과 JIS G5111(구조용 합금강 주강품)에 한하고 있고 고합금주강, 예로 들면 Stainless주강품, 내열강 주강품, 고 Mn주강품 등에 관하여서는 투과 사진상에 나타나는 유사 결함 모양 등의 문제점이 있기 때문에 예외로 하고 있다는 사실도 지금까지의 결론을 간접적으로 뒷받침한다고 하겠다.

기계적 특성면에서도 CF-8M-D가 CF-8M-S에 비하여 인장강도값은 다소 낮고, 연신율은 크게 증가하고 있으며, 이에 따라 충격치도 CF-8M-S에 비하여 높은 결과를 보이고 있다.

이와 같은 기계적 특성의 차이도 주조 결함의 존재 유무에 따른 것이 아니고 단지 주조 시 응고속도에 따른 주조 조직의 미세화 정도에 따른 것으로 예측된다.

참고문헌

[1] ASTM A351, Standard Specification for Castings, Austenitic, Austenitic-Ferritic(Duplex), for Pressure-containing Parts, Vol. 01.02 (1990)
[2] JIS G0581, Methods of radiographic examination for steel castings, (2000)
[3] JIS G5101, Carbon steel castings, (2000)
[4] JIS G5111, High tensile strength carbon steel castings and low alloy steel casting for structural purposes (2000)