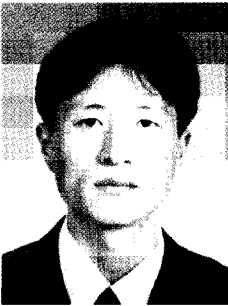


수중 구조물의 비파괴시험



원 순 호

(KIMM 시험평가부)

- '93 한양대학교 물리학과(학사)
- '95 한양대학교 물리학과(석사)
- '95. 3-현재 한국기계연구원 연구원



조 경 식

(KIMM 시험평가부)

- '78. 2 서울공대 공업교육과(기계전공)
- '93. 2 창원대학교 기계공학과(석사)
- '87. 8 비파괴검사 기술사
- '77. 12-현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서 론

인류는 바다가 가지고 있는 자원을 이용하여 문명발달에 수많은 혜택을 받고 있으며 육상자원의 고갈에 따라 해양공간을 이용하고자 하는 노력을 강화해 가고 있다. 이에 따른 해상 공간의 개발은 해상공항이나 해상기지, 저장기지 등 수중 구조물의 증대와 더불어 시설의 안전성 확보에 대한 신뢰성 문제를 제기시키고 있다. 그러나 이 분야에 대처할 현재의 국내 기술은 매우 미약한 실정으로 관련 요소기술의 개발이 요구되고 있는 시점이다. 외국의 경우 1960년대와 1970년대 초반에 유럽의 북해에서 원유와 가스 탐사를 시작으로 관련분야의 연구개발이 활발히 진행되어 왔으며 현재는 상당한 수준의 실용화 기술^{[1]-[11]}을 보유하고 있다. 이러한 시점에서 미래에 대처할 자체적인 기술개발이 시급히 요청되고 있으나 체계적인 기술개발은 전무한 상태이다. 따라서 1996년부터 시작한 "BMP 개발사업"에 관련하여 본 그룹에서는 수중 구조물의 상태를 감시할 수 있는 관련기술의 연구, 개발을 지속적으로 진행하고 있다. 현재 수중 구조물의 안전성 확보를 위한 요소기술로 관련소재의 방식 및 내식 코팅기술 등을 우선적으로 고려할 수 있으나 무엇보다도 결함의 발생과 더불어 이를 조기에 진단, 평가할 수 있는 비파괴시험 기술이 수중 구조물의 초장수명을 유지하는데 있어서 필수 요소기술이라 할 수 있다.

본 고에서는 수중 구조물의 안전진단에 실용화되는 비파괴시험방법에 대하여 논의하고 본 그룹에서 "BMP 개발사업"과 관련하여 개발 및 추진중

인 수중 비파괴시험법에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 시험방법 및 적용

본래 비파괴검사는 대기상태에서의 사용을 목적으로 개발되었지만 수중에도 적용될 수 있음이 확인되었다. 근본적인 검사방법의 원리는 일반적인 비파괴검사와 크게 다를 바 없으나 적용절차와 장비에 있어서 특별한 과정이 요구된다. 가장 큰 문제는 수중에 적용해야 할 관련장비를 어떻게 적용하느냐 하는데서 발생되며 비파괴에 대한 일련의 지식을 갖춘 다이버 및 ROVs(Remote Operated Vehicles)가 요구된다는 점도 주목할 사항이다.

2.1 자분탐상시험 (Magnetic Particle Testing : MT)

수중 구조물에 대한 비파괴검사로 자분탐상검사는 매우 인기가 높다. 이 방법의 이점은 장비가 비싸지 않고 대부분의 다이버가 이 방법에 익숙하다는 것이다. 과거에는 저전압 DC 요크가 사용되었으나 최근에는 110V AC 요크가 사용되고 있다. 또한 자외선 등에서만 보여지던 과거의 자분과는 달리 요즘은 백색광에도 보이는 자분이 개발되어 사진이나 비디오 촬영으로 지시를 관찰할 수 있게 되었다. 자분탐상검사는 표면의 불연속을 발견하는데 있어서 우수한 검사방법으로 가장 일반적으로 사용되는 기법이다. 이 방법은 검사가 빠르고 정확하며 수상에서 판독을 하기 위한 별도의 검사자가 요구되지 않는다는 장점을 가지고 있다. 가동중 발생한 피로 또는 마디(node) 부분이나 용접부에 발생한 균열 등의 검출이 자분탐상의 주요 적용대상이다. 대부분의 경우 형광자분탐상이 적용되며 교류나 직류전원이 모두 사용될 수 있지만 교류의 사용이 추천되어지고 영구자석은 일반적으로 사용되지 않는다. 그러나 자분탐상검사는 가시성에 제한이 있

거나 요크의 적용이 곤란한 상태에서는 적용이 불가능한 단점을 가지고 있다. 그리고 해류가 강한 지역에서는 자분뿐만 아니라 검사자 조차 한 곳에 유지하기가 어려우며 코팅이 두껍게 되어 있는 부분에는 검사가 제한되는 단점이 있다. 그림 1.은 수중에서의 자분탐상시험을 수행하는 모습이다.

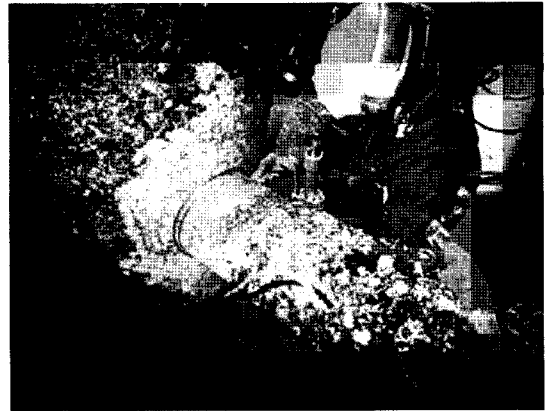


그림 1. 용접부의 수중 자분탐상시험

2.2 초음파탐상시험(Ultrasonic Testing : UT)

수중의 초음파탐상은 부식측정(corrosion mapping)과 용접부의 내부결함을 측정하는데 사용되고 있다. 자동 초음파탐상장비는 1981년 이래 수중탐상에 사용되어 왔고 현재에는 매우 폭넓게 적용되고 있다. 수중에서 초음파 사용의 가장 큰 이점은 별도의 접촉매질이 요구되지 않는다는 것이다. 그러나 사용되는 케이블이 내구성, 방수성 등에 대한 기본요건을 충족시켜야 하며 시험에 있어서는 두 명의 소요인원(평가자와 검사자)이 요구된다. 수중에 사용되는 탐촉자는 보통 특별주문에 의해서 만들고 탐촉자와 케이블 사이의 연결은 경화 처리한 고무테이프로 완전 봉합하여 방수되도록 만들어진다. 그러나 무엇보다도 가장 큰 문제점은 검사가 시작되기 전의 표면처리^{[12]-[13]} 문제이며 경제성이 고려되어야 한다. 수중 초음파탐상에 대한 비파괴시험은 영

국, 노르웨이 등 유럽에서 가장 발전되어 있고 국내의 시설물 뿐만 아니라 중동의 해저구조물에 대한 비파괴시험 등을 용역 받아 수행하고 있다. 자동화된 시스템은 영국의 AEA(Atomic Energy Authority), 미국의 SWRI(SouthWest Research Institute)외에 많은 연구소에서 개발되어 실용되고 있다. 그림 2.는 자동화된 방법에 의해서 시험부위를 탐상하는 초음파스캐너의 전형적인 형상이다.

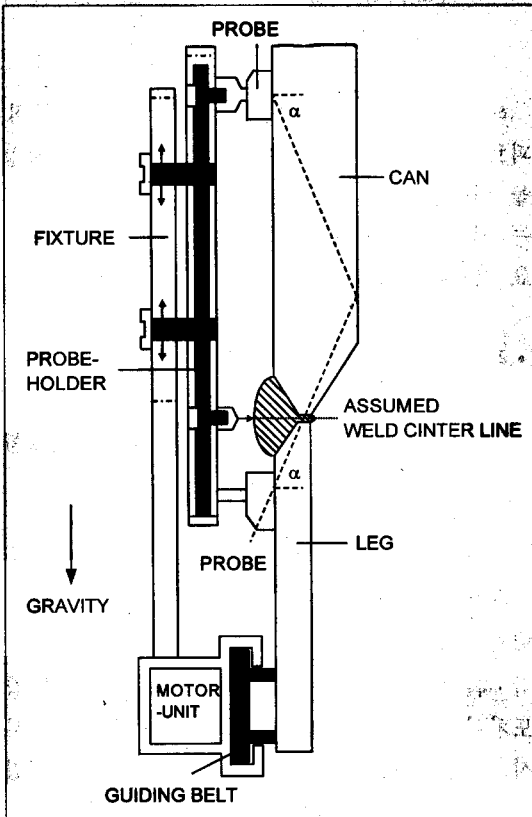


그림 2. 수중 초음파탐상을 위해 제안된 스캐너의 개략도

수중에 적용되는 초음파탐상시험에는 몇가지 공통점이 있다. 일반적으로 수중에서 수상의 데이터 처리시스템까지의 신호전송 거리가 100m 이상이기 때문에 수중에 별도의 pulser-receiver를 설치한다는 점이다. 또한 자동화된 방법에 있

어서는 그림 2.에 보이는 바와 같이 guiding belt에 연결된 모터를 이용하여 스캐너를 이동시키고 탐촉자를 고정시키기 위한 홀더가 사용되고 있다. 이러한 방법 아래 수중 초음파탐상시험이 성공적으로 적용되기 위해서는 다음의 3가지 조건이 필수이다.

- 탐촉자배열의 적절한 선정
- 성능이 입증된 하드웨어의 적용
- 철저한 훈련과 절차서 개발



그림 3. 수중 배관의 초음파탐상시험(AEA)

2.3 와전류 탐상 시험 (Eddy Current Testing : ECT)

육상의 용접부시험에 대한 와전류탐상시험은 매우 잘 확립되어 있지만 수중구조물에 대하여 와전류를 적용한 것은 최근의 일이다. 장비에 사용되는 케이블은 감도의 손실 없이 최소한 90m까지 신호를 전달할 수 있어야 하고 염수 및 다양한 화학성분에 대해서 방수 및 내구성을 갖추어야 한다. 가장 중요한 것은 탐촉자의 선택으로 대부분의 지시가 용접부 선단의 피로균열이기 때문에 탐촉자는 이러한 부분 모두를 접근할 수 있어야 한다. 근래에는 와전류 음극선관을 이용한 비디오카메라가 개발되어 수상의 지시평가지가 수중의 상황을 볼 수 있는 단계에 이르렀다.

와전류탐상은 표면조건에 크게 구애받지 않고, 코팅된 표면을 검사할 수 있으며, 가시성이 나쁜 환경, 해류의 흐름 등에 크게 영향을 받지 않는다는 이점을 갖고 있다. 이러한 이유로 경제적·신뢰성 측면을 고려할 때 와전류탐상은 자본탐상시험의 단점을 극복하는 방안으로 적용되고 있다. 다음은 자본탐상시험법과의 비교에 의한 와전류탐상시험법의 장점이다.^[14]

- MT는 0.2~0.3 μ m 이상의 코팅두께에 적용될 때 감도가 떨어진다.^[15] 반면에 ECT는 2mm 이내의 비전도성 코팅두께에서 신뢰성 있게 적용될 수 있다.
- 습, 건식 MT 방법에 비해 ECT는 수중환경에 적용하기가 쉽다.
- MT에 비해 가시성이 나쁜 환경에 적용할 수 있다.
- MT는 핵 관련구조물의 시험에 있어서 자본의 흡입을 막기 위한 보호장비를 착용해야 한다

2.4 기타 시험방법

결합의 측정을 위해서 AC potential drop법이 나 일반적인 것은 아니지만 고압 용접부에 γ -ray 투과 시험법이 이용된다. 또한 음향방출(Acoustic Emission : AE)시험법이 노르웨이와 영국에서 실용화되고 있다.

3. 국내의 연구개발

영국, 프랑스, 미국 등 해양자원개발의 선두주자인 이들 국가들은 해양 에너지자원의 개발과 관련하여 해양구조물의 안전성 확보를 위한 수중 비파괴시험 기술을 연구, 개발하여 상업적으로 이용하기 시작하였으며 80년대에 와서는 컴퓨터 및 잠수정과 로봇을 이용한 검사기술을 개발하는 등 활발한 연구를 진행하고 있다. 반면에 국내에서는 수중 비파괴시험에 관한 연구가 전

무한 상태이며 이 기술의 국내 적용사례가 없는 실정이다. 따라서 우리나라에서도 기반기술로서 해양구조물의 건설 및 설비의 보수유지와 안전성 확보를 위하여 수중 비파괴시험기술의 개발을 서둘러야 할 시점에 와 있다. 이에 본 그룹에서 연구, 개발 및 개발 중에 있는 수중 비파괴시험 기술은 해양산업 발전의 세계적인 추세에 부응할 수 있는 21세기의 필수 요소기술이다.

3.1 자본탐상시험법에 의한 표면결함 탐지 기술

해양구조물의 수중 용접시 또는 사용중 부식, 피로 등에 의해 발생하는 결함을 수중에서 자장을 이용하여 탐지하고 그 크기를 측정할 수 있는 기술 및 탐상장치 개발이 연구의 목표로 주요 연구내용은 다음과 같다.

- 적절한 검사기법 선정
- 최적 검사조건 도출
- 균열의 깊이와 도장의 두께에 따른 탐상감도 실험
- 수중 적용성 실험

3.1.1. 검사기법 및 조건

균열이 있는 동일한 용접시편을 A.C 요크로 형광 습식자원을 사용하여 대기과 물속에서 각각 자본탐상검사를 수행한 결과 감지할 만한 감도차이가 관찰되지 않아 육상에서 자본탐상검사이 적용되는 규정을 적용할 수 있음을 확인하였다. 따라서 수중에서 주로 적용되는 요크법 및 코일법에 대한 적절한 자화조건을 다음과 같이 정하였다.

가. 요크법

가) 적용전류 : 과거에는 영구자석이나 저전압의 직류전류를 주로 사용하였으나 해양구조물의 결함발생은 주로 응력이나 피로에 의한 표면균열이므로 최근에는 표피효과에 의해 표면 자속밀도

가 높은 교류전류가 주로 사용되고 있다. 따라서 본 연구에서도 자동 누전차단장치가 부착된 AC 110V를 사용하였다. 그러나 표면하 결함의 검사 또는 교류전류를 사용할 때 결함의 판정 등이 곤란할 경우에는 직류전류를 사용할 수 있다.

나) Lifting power : 교류를 사용할 경우 최대 pole spacing에서 lifting power가 4.5kg 이상 되어야 하며 직류 또는 영구자석 요크를 사용할 경우 최대 pole spacing에서 lifting power가 18kg 이상이어야 하고 검사할 부위의 구조상 1Leg 요크를 이용할 때에도 전류의 종류에 따라 위와 같은 값이 적용되어야 한다.^[16]

나. 코일법

평면용접부의 검사에는 요크법을 적용하는 것이 적당하나 파이프와 같은 부재의 원주용접부를 검사하는 데는 코일법이 매우 유용하다. 코일법을 적용할 때의 자화조건은 길이(L)와 직경(D)에 따라 다음과 같다.^[16]

가) L/D의 비가 4 이상일 경우 :

$$\text{Ampere-turns} = \frac{35,000}{(L/D)+2}$$

나) L/D의 비가 2 이상 4 미만일 경우 :

$$\text{Ampere-turns} = \frac{45,000}{(L/D)}$$

다) 검사할 면적이 코일 양쪽으로 150mm 이상일 경우 : L/D를 만족하는 전류를 적용하더라도 검사할 면적이 코일 양쪽으로 150mm 이상일 경우에는 자장지시계를 사용하여 검사할 부위에 대한 자장의 적정성을 확인하여야 한다.

라) 대형 구조물일 경우 : 적용하는 전류의 크기는 1,200~4,500 Amper-turns로 하되 자장지시계로 자장의 적정성을 확인하여야 한다.^[16]

3.1.2. 탐상감도

가. 자분의 종류에 따른 탐상감도
비형광자분을 사용한 결함지시는 가시성에서

형광자분에 의한 결함지시에 비해 다소 떨어지는 것으로 나타났다. 그리고 수중용 백색광/자외선 검출 형광자분(적색)인 MI-Glow UW #1과 육상용 습식 형광자분 LY-6400S의 검사결과를 비교할 때 가시성은 두 가지 자분 모두 양호하나 미세한 균열을 탐지할 수 있는 감도에 있어서는 LY-6400S가 MI-Glow UW #1에 비해 약간 양호한 것으로 관찰되었다.

자분의 농도에 있어서는 육상에서 습식 자분 탐상검사를 할 때, 자분살포용 용기내에 들어있는 liquid vehicle의 양에 따라 농도가 결정되나 수중검사시에는 자분용기에서 자분이 살포되면 주변의 물 때문에 농도가 크게 희석될 뿐만 아니라 수중에서는 해류나 탐상면으로부터의 자분살포거리에 따라 도중에 자분의 유실이 많으므로 자분의 농도가 육상검사시에 비해 4~5배 정도 높아야 적당하다는 것을 확인하였다.

나. 표면 코팅 두께에 따르는 탐상감도

시편의 표면에 페인트를 칠해 그 두께를 증가시키면서 교류요크를 사용하여 자분탐상검사를 실시한 결과, 모든 깊이의 노치에 대하여 페인트의 두께가 0.5mm까지는 자분지시가 매우 선명하게 관찰되었고, 페인트의 두께가 0.7mm~0.8mm 정도까지는 육안관찰시 결함으로 판정할 수 있을 정도의 자분지시가 나타났으나 페인트의 두께가 0.9mm 이상에서는 자분지시를 거의 관찰할 수 없었는데 이 실험은 문헌으로부터 조사된 결과와도 잘 일치하였다.^[17] 이 결과로부터 코팅을 한 검사체의 경우 코팅두께가 최대 0.8mm 정도까지가 지시검출의 한계로 나타났으며 따라서 표면코팅의 두께가 0.8mm 이상이거나 또는 보다 미세한 결함을 탐지할 필요가 있을 경우에는 검사대상의 표면에 처리한 코팅을 제거할 필요가 있다.

3.1.3. 수중 적용성

수중검사에는 조명을 하거나 자외선등으로 형광자분탐상검사를 수행할 때는 검사장비와 조명

등 또는 자외선등을 동시에 다루어야 하기 때문에 통상 2명의 검사자가 필요하다. 그러나 검사 장비와 조명등이 일체가 되도록 고안하거나 자분의 분사노즐을 자외선등에 연결시키면 한 손으로 장비를 잡고 자화를 하는 동안 다른 한 손으로는 자외선을 조사하면서 자분을 분사할 수 있기 때문에 한사람의 검사자로도 검사가 가능하다.

수중에서 사용하는 요크나 조명등, 자외선등과 같은 장비는 누전을 방지할 목적상 스위치가 부착되어 있지 않아 필요할 경우 물 밖에서 해야 하기 때문에 물속의 검사자와 물 밖과는 상호 의사전달 수단이 있어야 하며 일단 잠수를 하면 다시 물 밖으로 나오기가 번거로우며 또 많은 시간을 요하기 때문에 입수하기 전에 사용할 장비의 기능과 측정용 자, 글자판 고정용 자석, 마킹용 펜, 카메라 등 필요한 모든 것을 사전에 면밀히 점검하고 준비하여야 한다.

수중검사자는 잠수에 능숙해야 하며 또 자분 탐상검사 경험이 많아야 나타난 여러 가지 양상의 자분지시를 정확하게 판독할 수 있다. 본 연구는 정지된 물속에서 수행을 하였기 때문에 실험의 수행에 별 어려움은 없었으나 파도나 조류의 흐름이 빠른 물속에서 검사를 수행하려면 충

분한 잠수훈련을 받아야 할 것이다.

3.2 초음파를 이용한 부식측정 기술

해양구조물 사고의 주된 원인이 되는 부식을 측정(corrosion mapping)하기 위한 연구로 초음파 펄스법을 적용한 자동화된 방법에 의하여 부식두께를 측정할 수 있는 기술개발에 관한 연구이다. 주요 연구 내용은 다음과 같다.

- 부식측정 초음파 시스템 구성
- 잔존두께 측정 신호처리 소프트웨어 개발
- 부식두께 측정 및 수중 적용성 실험

3.2.1. 부식측정 초음파 시스템 구성

자동화된 방법으로 부식을 측정하기 위한 장치로는 설정조건에 따라 이동 분해능을 조절할 수 있는 스캐너가 필요하다. 수중 구조물임을 고려하여 수침법을 적용하였고 실험실적 시스템으로 0.01 μ m의 이동 분해능을 갖는 스캐너를 제작하였다. 탐상 후 얻어진 데이터는 컴퓨터에 저장되고 분석프로그램으로부터 두께치가 계산, 평가되었다.

측정시스템의 개략도는 그림 4와 같다.

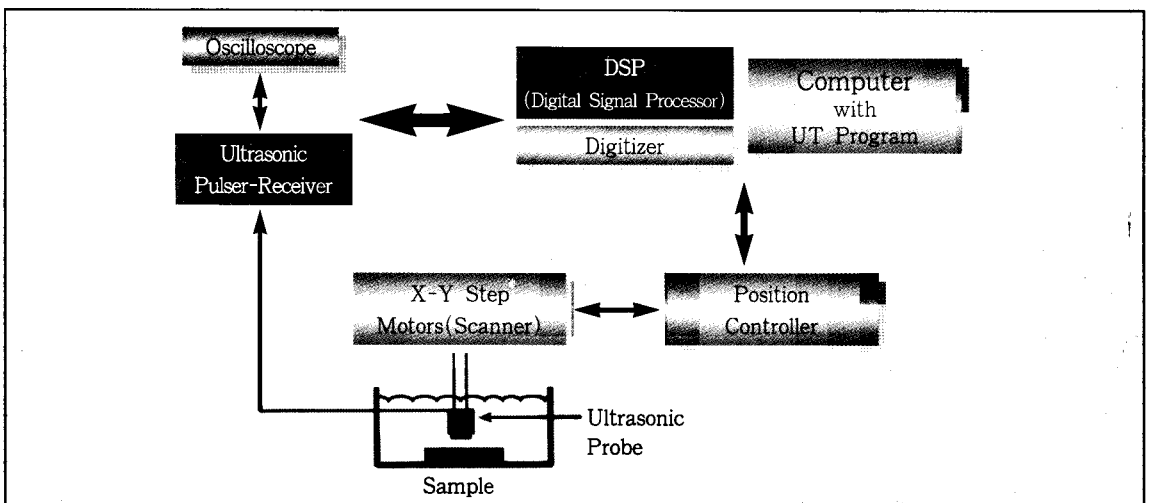


그림 4. 부식측정을 위한 초음파탐상 시스템의 개략도

3.2.2. 잔존두께 측정 프로그램 개발

일반적으로 구조물의 잔존두께를 측정하는데는 초음파 두께측정기를 이용한다. 그러나 초음파 두께측정기를 이용한 두께는 국부적으로만 측정되며, 표면이 매우 거칠 때에는 측정이 불가능하고 또 넓은 면에서의 전반적인 두께감소 추이를 알기는 어렵다. 따라서 부식두께 측정 프로그램은 초음파 스캐너가 수집한 초음파신호를 처리하여 두께를 측정하고 이를 B/C-Scan 표시를 할 수 있도록 하여 수중 구조물의 두께측정 및 부식 모니터링에 활용하는데 목적이 있다. 프로그램의 적용이론은 초음파 펄스법의 electronic transit-time 측정법^[18]을 적용하였고 탐상소재의 전, 후면에 대한 부식두께치 및 잔존두께치가 출력되도록 하였다. 프로그램 언어는 visual basic 5.0을 사용하였고 요구되는 초기화 정보는 데이터 양, 시간, 전압 값, sampling rate, scan dimension 등이며 프로그램의 흐름도는 그림 5.와 같다.

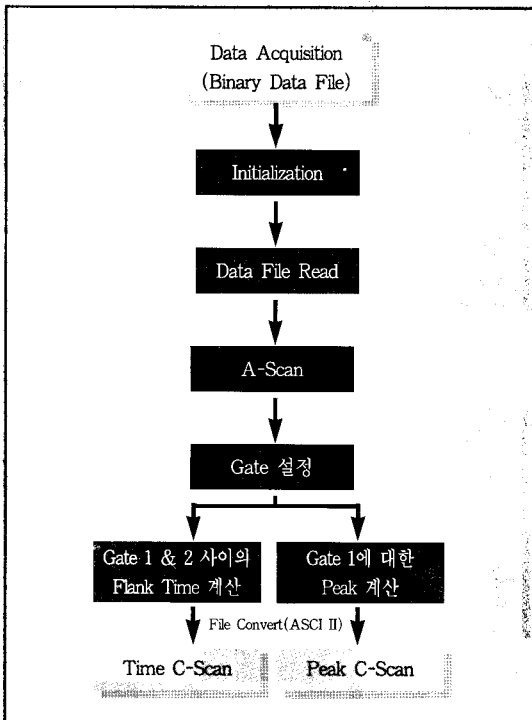


그림 5. 부식두께 측정 프로그램 흐름도

3.2.3. 부식두께 측정 및 수중 적용성 실험

제작된 시스템을 이용하여 준비된 부식시편에 대한 두께를 측정하였다. 측정된 결과는 초기에 설정한 간격에 따라 x, y 방향으로 탐상한 결과로 탐상부위에 대한 두께의 C-scan 표시이다. 결과적으로 표 1.은 측정된 부위로부터 얻어지는 데이터의 형식을 나타낸 것으로 데이터는 각 부위에서의 잔존두께를 나타내고 있다. 이러한 결과로부터 잔존두께를 C-scan으로 도시화한 것이 그림 6.이며 본 연구의 결과를 실용화할 수 있음을 확인하였다.

3.3 음향방출시험법에 의한 원거리 자동감시 기술

수중 구조물의 주요 응력집중부위, 특히 용접부에 음향방출 센서를 부착하여 결함의 발생시 방출되는 탄성파를 수신하고 신호를 처리하여 결함의 발생여부 및 그 위치를 on-line으로 감시할 수 있는 기술 및 감시시스템 기술 개발을 목표로 추진중에 있는 연구분야이다. 연구내용은 다음과 같다.

- 모의실험을 통한 AE 감시 기술 기초연구
- 수중에서의 AE 신호 전파특성 연구
- 수중에서의 구조별 AE 신호 감쇠특성 및 감쇠계수 측정
- 구조별 source location 기법 및 컴퓨터 소프트웨어 개발 연구

4. 결 론

비파괴검사의 수중환경에의 적용은 한정된 지역에 국한되고 있지만 이러한 방법을 적용하는데 있어서의 어려움과 경제성은 점차로 호전되고 있는 상황이다. 다른 분야에서 "필요악"의 한계에 다다른 현실화 불가능한 검사임에도 불구하고 수중 비파괴에서는 비파괴검사로 얻을 수

표 1. 상대적인 시간차를 보여주는 두께측정 프로그램의 출력예시

[단위 : mm]

y \ x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	20.3	20.4	20.1	19.8	19.8	19.8	22.2	21.0	21.2	22.4
2	20.4	19.8	19.4	19.2	19.5	19.5	19.7	19.8	20.1	20.4
3	20.3	20.1	19.2	18.9	18.9	19.2	19.2	19.5	19.6	19.8
4	20.3	20.2	19.4	18.6	18.3	18.8	19.0	19.2	19.4	19.6
5	20.4	20.3	19.9	19.1	18.1	17.9	18.2	18.6	18.9	19.1
6	20.4	20.3	21.1	19.0	19.7	17.9	17.9	18.1	18.3	18.9
7	20.4	20.3	19.9	20.8	20.2	19.8	18.2	18.1	18.2	18.3
8	20.4	20.3	19.9	19.1	20.7	20.4	20.3	20.1	19.9	18.4
9	20.4	20.4	20.3	20.1	19.9	19.8	21.0	20.8	20.7	20.4
10	20.4	20.4	20.4	20.2	20.2	20.1	20.1	20.1	19.8	19.6

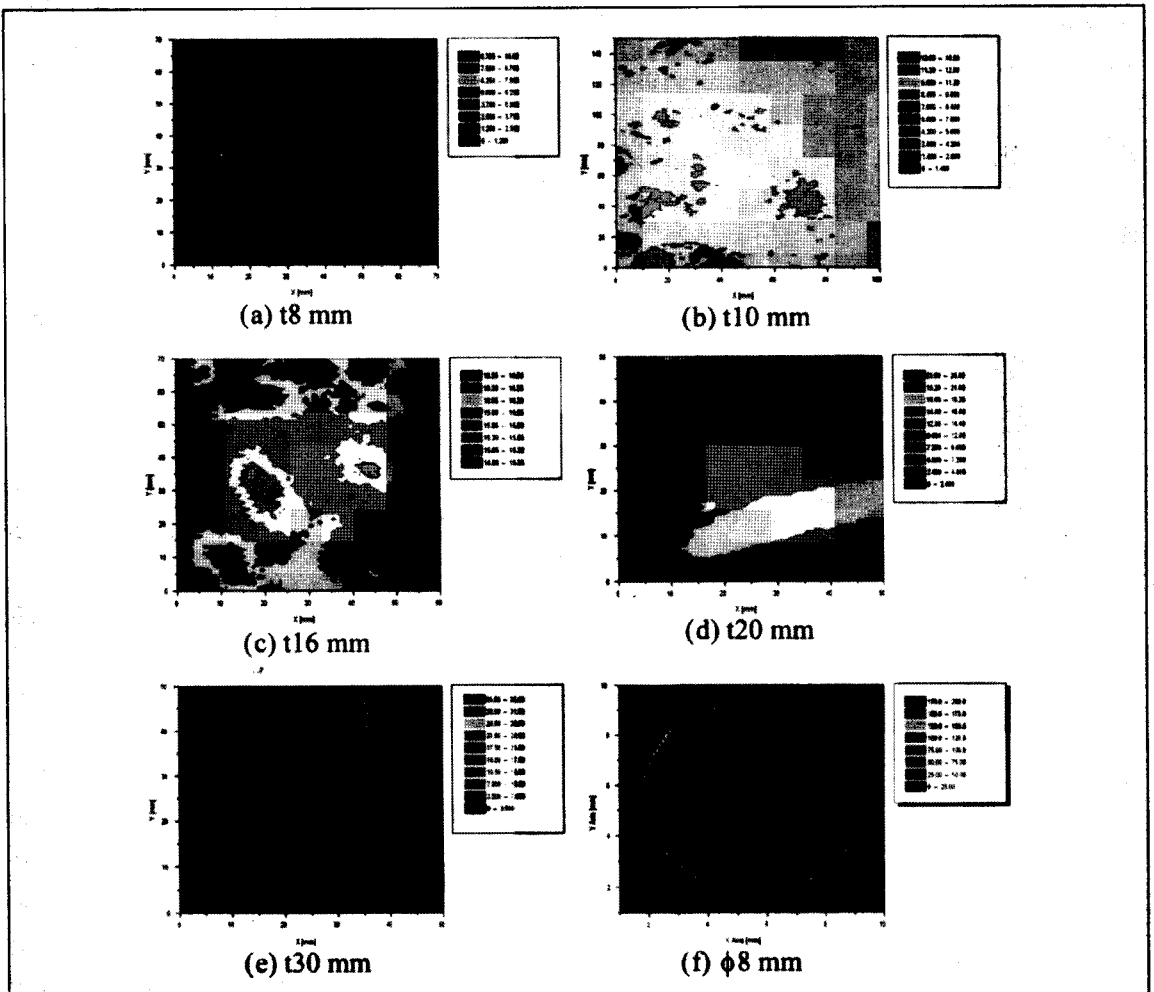


그림 6. 부식두께 측정에 대한 C-scan 결과

있는 혜택이 현실화되고 있다. 더구나 해양 관련 산업의 발전과 함께 수중 비파괴검사 기술이 21세기 요소기술로 요구되고 있고 그 중요성이 부각되고 있는 시점이다. 따라서 기술의 적용과 응용을 위한 지속적인 노력이 이뤄져야 할 것이다. 또한 검사자의 접근이 곤란한 수심이 깊은곳의 검사도 원거리 제어방식에 의한 자동화된 기술의 개발로 해결하여야 하며 이러한 연구, 개발의 실현화를 위해서 다음의 절차가 요구되어진다.

- (1) 적용가능성에 대한 실험실적 연구
- (2) 하드웨어의 고안 및 개발
- (3) 하드웨어의 실용성 입증 및 검사절차서의 작성
- (4) 수상에서의 훈련
- (5) 수중에서의 훈련 및 작동, 검사절차의 확정
- (6) 기계적 절차에 의한 검사

참 고 문 헌

- [1] SWRI Report : Contract No. N68305-81-C-0011, Development and Testing of Nondestructive Techniques to Measure the Thickness of Corrosion-Pitted Steel Structures Underwater, 1981.
- [2] W. S. Burkle, Method for Measuring Transducer Movement During Underwater Ultrasonic Evaluation of Weld Flaws, Materials Evaluation, 41, pp.579-581, 1983.
- [3] B. M. Hawker, The Diffraction and Sizing of Defects in Offshore Steel Structures by the Diffraction of Ultrasound, Underwater Technology Conference, pp.311-325, 1984.
- [4] J. J. M. van Nisselroy, N. 't Hooft and R. J. Whillas, Mechanised Ultrasonic Underwater Inspection of Girth Welds In Platform Legs, British Journal of NDT, pp.347-353, 1984.
- [5] A. J. Auchterlounie, Magnetic Particle Inspection Underwater : The True Potential, Journal of the Society for Underwater Technology, pp.17-20, 1982.
- [6] M. B. Moncaster, Underwater Inspection of Welds : An Assessment of Some Techniques and Their Reliability, Journal of the Society for Underwater Technology, pp.7-12, 1982.
- [7] G. Mills, C. Priestley, R. Reid and T. Thirlwell, Underwater Photography of Magnetic Particle Inspection Results, British Journal of NDT, pp.127-129, 1983.
- [8] W. Stumm, In-Service Nondestructive Inspection of Heavy Loaded Structures in Particular Underwater Structures with Leakage Flux Methods, British Journal of NDT, pp.124-126, 1983.
- [9] L. Goldberg, Innovation in Underwater Magnetic Particle Testing, Materials Evaluation, 46, pp.718-720, 1988.
- [10] A. Bennett and D. Brown, Inspection of Underwater Structures by Flooded Member Detection, British Journal of NDT, pp.121-123, 1983.
- [11] G. A. Raine and N. Smith, NDT of On and Offshore Oil and Gas Installations Using the Alternating Current Field Measurement (ACFM) Technique, Materials Evaluation, pp.461-465, 1996.
- [12] Chevron UK Limited, Underwater Inspection Procedures, 1996.
- [13] Sea Test Services, Magnetic Particle Inspection of Fixed Offshore Structures, 1992.
- [14] Sea Test Services, Ferritic Weld Inspection Using Eddy Current, Joint Industry Study, 1996.

- [15] Electric Power Research Institute, Reliability of Magnetic Particle Inspection Performed Through Coating, Palo Alto, CA, NP-5951, 1988.
- [16] ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Sec. V Nondestructive Testing, 1992.

- [17] C. E. Betz, Principles of Magnetic Particle Testing, Magnaflux Corporation, 4th ed.
- [18] Josef Krautkrämer, Hebert Krautkrämer, Ultrasonic Testing of Materials, 2nd ed., Springer-Verlag, 269-286, 1977.