[논 문] - 비파괴검사학회지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 23, No. 2 (2003. 4)

LNG 저장 탱크 지중연속벽 품질시험

Inspection of Underground Slurry Wall for LNG Storage Tank

김영환*,†, 조철현**, 임성진***

Young H. Kim*,†, Churl-Hyun Jo** and Seong Jin Lim***

초 록 지중식 LNG 저장 탱크의 지중연속벽(슬러리 벽체)의 시공 품질 및 건전성을 평가하기 위하여 비파괴 진단을 수행하였다. 이를 위하여 지중 연속벽의 9군데 측점을 선정하여 각각의 측점에서 탄성파 충격-공진법으로 벽체의 두께를 측정하였고, GPR을 사용하여 철근의 배치 간격을 조사하였다. 또한, 음속과 반발경도를 측정하여 압축강도를 추정하였다. 그 결과로 벽체의 두께는 150 cm 이상으로 설계값을 만족하고 있으며, 철근의 배근 간격도 설계값과 잘 일치하였다. 콘크리트의 압축강도 추정값은 기준값보다 훨씬 크게 나타나서 전체적으로 구조물의 시공 품질은 양호한 것으로 판단된다.

주요용어: 슬러리 벽체, 두께측정, 강도추정, 철근탐사

Abstract Nondestructive testing was carried out in order to evaluate the structural integrity and construction quality of the slurry wall of the underground LNG storage tank. 9 test points were selected, and the wall thickness, rebar spacing, and compressive strength of the slurry wall were evaluated by stress wave impact-resonance method, GPR, sonic velocity, and rebound testing, respectively. As results, the wall thickness, rebar spacing and estimated compressive strength satisfy the design criteria.

Keywords: slurry wall, thickness measurement, strength estimation, rebar location

1. 서 론

콘크리트 구조물의 붕괴는 재산피해 및 인명 피해를 야기시킬 수가 있어서 구조물에 대한 품질관리는 매우 중요하다. 콘크리트에 대한 품질관리는 공사 전에는 재료에 대한 물리적 화학적 실험 및 배합 실험을 실시하고 공사 중에는 골재시험, 콘크리트 압축강도 시험, 콘크리트 타설 전의 철근의 배근 상태조사등을 실시하며 공사 후에는 비파괴시험, core test 등을 통하여 이루어진다. 시공된 콘크리트가 설계 목적과 부합되는지 알아보기 위한 방법으로 압축 강도법이 가장 많이 사용되는데 이는 구조물에 사용되는 콘크리트와 같은 조건으로 시험편을 제작하여 일정시일이 경과되었을 경우에 압축강도를 측정하는 방법이다. 비파괴 시험법은 시험체에 손상을 입히지 않고 시험체의 물리적 성질이나 구조적인 결함을 조사하는 방법으로 공사 중이거나 사용 중인 콘크리트 구조물에 대한 품질관리 방법으로 사용이 가능하다. 콘크리트에 대한 비파괴 검사는 콘크리트의 강도, 철근의 배근상태, 내부 결함의 유무, 콘크리트의 균질성 등을 조사하여 콘크리트 구조물의 품질관리를 달성할 수가 있다.

(접수일: 2003. 2. 28, 심사완료일: 2003. 3. 20) *성균관대학교 기계공학부, **지하정보기술(주), ***대한검사기술(주) 부설연구소, †교신저자: 성균관대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746) yhkim@skku.ac.kr

액화천연가스(LNG) 저장 탱크는 다른 토목 구조물과는 달리 초저온성과 고도의 안전성을 필요로 한다. 즉 -162℃의 초저온 상태를 유지해야하는 보냉 구조와 가연성 가스에 대한 충분한 기밀성 및 안전성을 가지는 구조이어야 하므로 천재지변과 같은 예기치 못하는 제반 구조에 대비하여 부지선정에서부터 탱크구조·형식, 설계 및 시공에 이르기까지 안전성 확보를 최우선으로 한다. LNG 저장탱크는 천연가스의 액화기지, 인수기지 등에 임시저장용으로 필요하다. 저장탱크는 2중구조로써 외각은 포스트 스트레스(post-stressed) 콘크리트 벽체로 모든 힘을 여기에서 받게 되어 있으며, 내부 탱크는 액체와 기체상태인 LNG 또는 증발가스가 새어나오지 못하도록 스텐레스강으로 된 밀폐된 멤브레인 벽으로 이루어져 있는데 외벽과 내벽사이에는 단열재로 채워놓아 밖에서 들어오는 열을 차단한다. 저장탱크의 형태는 지상식, 지중식 및 지하식이 있는데, 최근 들어서 미관 등을 고려하여 지중식 탱크가 많이 사용되고 있다. 지중식 저장탱크(inground storage tank)란 LNG의 최고 액면을 지표면과 동등 또는 그 이하가 되도록 설치하는 형태의 저장탱크를 말한다. Fig. 1은 대표적인 지중식 저장탱크를 보여주고 있는데, 지상식 저장탱크와는 달리 토사가 밀려들어오지 않도록 슬러리 벽체(slurry wall)을 먼저 설치하게 된다[1]. 이 슬러리 벽체는 지하연속벽 시공법으로 시공되었다.

본 연구에서는 LNG 저장탱크의 지중연속벽에 대한 품질검사를 위해 지중연속벽면의 두께, 속도 및 강도 시험을 통하여 콘크리트 내부 구조물의 상태를 조사하고 각각의 패널에 대한 두께를 파악함으로써 이미 건설된 콘크리트 구조물에 대한 안전도의 적합성 여부와 품질을 평가하고자 하였다.

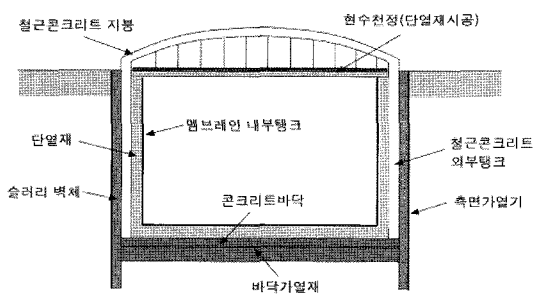

Fig. 1 Schematic diagram of inground storage tank

2. 비파괴검사의 기본원리

본 연구에서 사용된 비파괴검사법은 탄성파 충격-공진법, GPR(ground penetrating radar) 탐사, 탄성파 속도 측정법 과 반발경도 시험법이다. 이들 시험법의 원리를 간단히 기술한다.

탄성파 충격-공진법(impact-resonance method)은 1980년대에 개발되어 콘크리트 슬래브의 두께 측정, 공동 탐사, 박리검사, 텐던(tendon)과 같은 보강재의 상태 진단, 다짐 불량으로 인한 honeycomb 구조 검출 등과 같은 콘크리트 구조물에 대한 안전도 진단의 수단으로 널리 활용되고 있는 비파괴 시험법이다. 충격-공진법은 일반적인 초음파 펄스에코 시험법으로는 불가능한 재질 내의 산란이 큰 재료에 대하여 적용할 수 있다[2-4].

충격-공진법은 탄성파의 공진 현상을 이용하는 방법으로 좁은 시간 폭의 충격을 표면에 가하면 동시에 여러 주파수 성분이 동시에 발생된다. 그 중에서 시험체의 공진 주파수와 일치하는 성분만 긴 시간 동안에 지속되면서 공진을 일으키게 되고 표면에 부착된 탐촉자를 사용하여 진동 파형을 수신하고 그 신호의 주파수를 분석하여 시험체의 두께, 공극 유무 등을 판정한다. 공진주파수, f 로부터 두께, D는

$$D = \frac{c}{2f} \tag{1}$$

와 같이 주어진다. 여기서, c는 시험체에서의 탄성파 속도이다. 주파수 분해능이 Δf 인 경우에 두께 측정오차, δD는 다음과 같다.

$$\delta D = \frac{c}{2f^2}\Delta f = \frac{2}{c}D^2\Delta f \tag{2}$$

GPR 탐사는 송신 안테나를 통해 전자기파를 방사시키고, 방출된 전자파가 전자기적 물성이 다른 물체를 만나 반사되어 돌아오는 신호를 수신 안테나에서 탐지하고, 이를 처리하여 대상물 내부의 상태를 해석하는 방법이다[5]. GPR 탐사에 영향을 미치는 주된 물성은 유전율(dielectric permittivity)과 전기전도도(electrical conductivity)이다. 일반적으로 지하매질은 전도성 열손실, 물분자의 이완에 의한 손실, 점토에 의한 전기화학적 손실 등으로 인하여 전자파의 감쇠와 분산이 발생한다. 전기전도도와

주파수가 높을수록 전자파 신호는 급격히 감소하여 투과심도(조사가능한 심도)가 낮아지나, 주파수가 높을수록 파장이 짧아 탐지 분해능이 높아진다. 반대로 파장이 길어지면 탐사깊이는 증가하나 분해능이 떨어진다.

강자성체가 아닌 매질에서 전자파의 속도는 주로 매질의 유전율에 의존하며, 반사파의 진폭 역시 이웃하는 두 매질의 유전율의 상대적 차이에 따라 달라진다. 즉, 유전상수의 대비가 큰 물질은 매우 잘 탐지될 수 있는데, 예를 들어 구조물 내부의 공동이 존재하여 있을 경우 주변 물질과 공기의 유전율 차이가 크므로 뚜렷한 반사 신호를 얻을 수 있다. 그러나, 이러한 경우에는 그 뒤에 또 다른 반사체가 있더라도 앞부분에서 많은 에너지가 반사되므로 탐지가 곤란하다.

탄성파의 속도는 밀도와 탄성계수에 의해 결정된다. 탄성파는 종파와 횡파 및 이들의 간섭에 의한 표면파, 판파 등이 있다. 콘크리트는 고체이므로 이러한 여러 종류의 탄성파가 모두 존재하며, 이 중에서 종파인 P파가 가장 빠르게 전달되므로 신호의 파악이 쉬워 물성파악의 변수로 가장 널리 사용된다[6]. 높은 주파수의 탄성파는 파장이 짧아 반사 혹은 전달되는 파동의 위상을 명확하게 판별할 수 있으나, 산란되는 에너지가 많아 그 진폭이 급격히 작아지므로 커다란 구조물에 대한 조사에는 부적절하다. 또한, 높은 주파수의 탄성파를 이용할 경우에는 측정면과 탐촉자의 접촉상태가 매우 양호해야 한다. 따라서, 표면 상태가 매끄럽지 못하거나 큰 대상체를 검사할 경우에는 수 kHz 대역의 음원을 사용하여 속도를 측정하는 것이 보다 바람직하다.

콘크리트를 선단이 반구상인 햄머(강추)로 타격하여 반발도(rebound number)를 측정하면, 반발도는 탄성계수와 비례관계가 있고, 탄성계수는 강도와의 관계가 있으므로 사전에 작성한 반발도와 압축강도와의 관계도 표를 써서 압축강도를 추정한다[7]. 시험방법은 슈미트햄머(Schmidt hammer)를 콘크리트 표면에 눌러서 강추 (햄머)를 타격한다. 1개소 20점 이상을 타격하여 평균치를 구하고, 이 값을 타격방향, 함수율 등에 따라 보정하여 대표치로 한다. 반발경도법의 장점은 시험방법이 간편하고, 측정개소를 증가하는 것이 용이하며, 시험경비가 싸다는 점이 있지만, 측정값이 여러 요인에 의해 지배되므로 강도 추정치의 오차가 크다는 단점이 있다. 반발경도시험에서 고려해야할 사항들은 국제건설재료구조연구기관 연합(RILEM) 등에서 제안한 규격에 자세히 나와있다[8-10].

3. 시험검사의 개요

Fig. 2는 공사중인 지중연속벽의 사진이다. 이 구조물의 개략도와 패널 배치도는 각각 Fig. 3에 나타내었다. 지중 연속벽체는 직경과 깊이가 70 m이며, 하부의 일부가 토사와 콘크리트로 메워져서 바닥면의 높이는 지표에서 약 40 m 아래에 위치한다. 지중 연속벽체에서 모두 9개의 측정장소를 선정하였는데 측점 1, 2, 3, 4는 탱크의 저면부에 위치해 있으며, 측점 5, 6, 7, 8, 9는 A12 패널에서 높이를 달리한 부위이다. 본 검사에서 수행된 9개소의 측점의 위치와 시험의 종류를 Table 1에 나타내었다

선정된 9개 지점에서 1) 탄성파 충격-공진시험을 실시하여 벽체의 두께를 측정, 2) GPR 장비를 이용하여 철근배근상태를 측정, 3) 탄성파속도측정기를 이용하여 콘크리트 내에서의 탄성파속도 측정, 4) 슈미트 해머를 이용하여 반발경도를 측정하였다. 또한 현장에서 채취한 코어에 대하여 탄성파속도와 압축강도를 측정하여 현장자료와 상호 비교하였다. 본 검사에 사용된 탐사 장비는 Table 2와 같다.

Table 1 Test position and testing methods

측점 번호	조사 부위	탐사 시험
1	A12 패널 하단	충격공진(두께), 철근배근, 반발경도, 속도측정
2	A17 패널 하단	충격공진(두께), 철근배근, 반발경도, 속도측정
3	A1 패널 하단	충격공진(두께), 철근배근, 반발경도, 속도측정
4	B4 패널 하단	충격공진(두께), 철근배근, 반발경도, 속도측정
5	A12 패널 중간 (EL-30)	충격공진(두께), 철근배근, 반발경도, 속도측정
6	A12 패널 중간 (EL-20)	충격공진(두께), 철근배근, 반발경도, 속도측정
7	A12 패널 중간 (EL-13)	충격공진(두께), 철근배근, 반발경도, 속도측정
8	A12 패널 중간 (EL-7)	충격공진(두께), 철근배근, 반발경도, 속도측정
9	A12 패널 중간 (EL-1)	충격공진(두께), 철근배근, 반발경도

Table 2 Test methods and equipments

시험명	시험목적	장비명
충격-공진시험	벽체 두께측정	KIS9300C(대한검사기술(주) 고유모델) 휴대용 notebook PC Digital oscilloscope (LeCroy 9354A)
GPR 탐사	철근배근 조사	SIR-2 (GSSI)
탄성파속도 측정	강도추정	- 가속도계(PCB) - Instrumented hammer(PCB) - Digital oscilloscope(Olson Instrument)
탄성파 속도측정	강도추정	PUNDIT
반발경도 시험	강도추정	Schmidt hammer-NR type (Control)

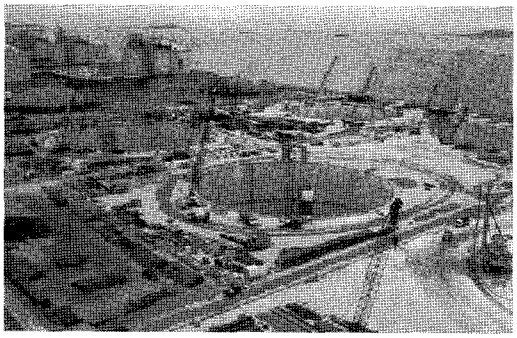

Fig. 2 Photograph of slurry wall for LNG storage tank under construction

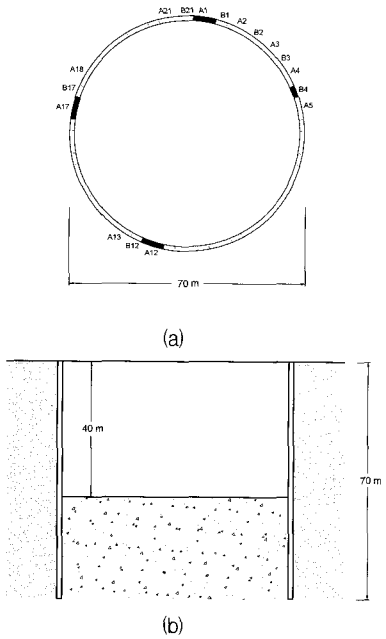

Fig. 3 Schematic diagrams of the slurry wall (a) Top view and (b) plain view

4. 결과 및 토의

4.1. 충격 공진 시험에 의한 두께 측정

콘크리트의 음속이 알려지지 않은 경우에 충격공진 시험을 수행하면 오차가 커지는데, 이 오차를 줄이기 위해서 측점 #1 위치에서 채취한 길이 210 mm 코어에 대하여 충격 공진 시험을 실시하여 대표적인 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 3회 실시하여 얻어진 공진주파수는 10.413, 10.449, 10.437 kHz로서 이의 평균값은 10.433 kHz로 그 결과 얻어지는 음속은 식 (2)로 부터

$$c = 2f_r \times D = 2 \times 10.433\,\text{kHz} \times 21.0\text{cm} = 4,382\text{m/s}$$

로 주어진다. 측점에 따라 음속의 편차가 있겠지만 전체적으로 음속을 4,380 m/s 로 가정하였다.

구조물의 두께를 측정하기 위해서 망치를 사용하여 벽체에 충격을 가하고 그 진동 신호를 광대역 압전형 탐촉자를 사용하여 수신하였다. 진동신호는 20 μs 간격으로 총 4096개의 파형을 수신하였다. 그 결과 주파수 분해능은 12.2 Hz로서 음속이 알려져 있을 경우에 식(2)로부터 벽체의 두께가 1.5 m 일 경우에 이론적인 측정 정밀도는

$$\delta D = \frac{2}{c} D^2 \Delta f = \frac{2}{4382} \times 1.5^2 \times 12.2 = 0.0125\,(\text{m})$$

로서 약 1.3 cm의 오차를 지닌다. 음속이 알려지지 않았을 경우에 대개의 오차는 5% 정도로서 전체적인 오차는 ± 9 cm 이내이다.

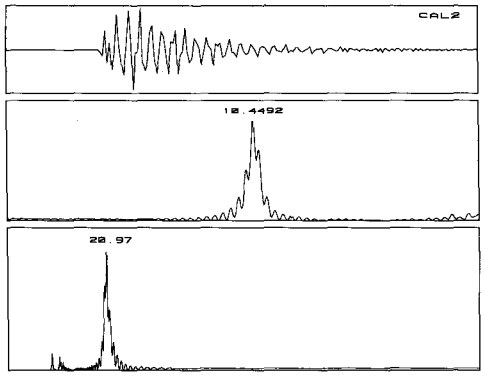

Fig. 4 Result of impact-resonance testing for the core specimen. Top: Time domain waveform (0.1 ms/div), medium: frequency spectrum (1 kHz/div), bottom: depth profile (10 cm/div)

구조물의 벽체가 단순한 슬래브 형태가 아니고 내부에 철근, 볼트 및 기타 내부 구조물이 존재하여 복잡한 공진 모드를 나타낸다. Fig. 5에 측점 #7 위치에서 충격-공진 시험을 실시한 결과를 나타내었다. 이 경우에 1.37 kHz의 강한 두께 공진 이외에도 2 kHz 이상의 높은 주파수는 철근, 볼트, 기타내부 구조물의 영향으로 판단되며 이들로 인하여 두께 모드의 공진 주파수를 정확하게 찾아내는 것이 어렵다. 따라서 디지털 필터링을 사용하여 2.5 kHz 이상의 고주파 성분에 해당하는 부분은 제거하였다. 그 결과는 Fig. 6에 나타내었는데, 필터링이 두께 모드 공진주파수에 영향을 미치지 않았음을 알 수 있다. 2.5 kHz는 약 1 m 두께에 해당하는 공진주파수로 저역통과 필터를 사용하면 1 m 이상의 두께에 해당하는 정보만 선택적으로 처리하게 되므로 본 검사에서 주요 관심사인 전체 벽체의 두께를 측정하는데에 매유 유용한 방법이다. 따라서, 다른 부위에서 얻어지는 충격-공진 시험 결과도 f_c = 2.5 kHz인 저역통과 필터를 사용한 결과를 이용하였다.

충격-공진 시험을 위해서 지중벽체에 충격을 가할 때에 발생되는 고유 진동수를 유한요소해석으로 분석하였다. 벽체의 음속을 4,000 m/s로 가정하고 ANSYS를 사용하여 선행 패널 고유 진동수를 분석한 결과 1차, 2차 휨 모드, 1차 비틀림 모드, 길이방향 종 모드의 고유 진동수는 각각 3.77, 10.75, 11.43, 48.53 Hz로 매우 낮은 주파수이다. 두께 방향 종모드의 고유진동수는 약 1.5 kHz로 추측되며 이는 상대적으로 높은 주파수로서 패널의 크기를 그대로 입력할 경우에는 쉽게 얻을 수 없으므로 폭과 길이가 두께와 유사한 크기에 대하여 유한요소해석을 한 결과 두께방향 종 모드 공진 주파수가 1.274 kHz 였다. 실제 구조물의 음속이 4,380 m/s를 사용하면 공진주파수는 약 1.4 kHz로 이는 측점 #1에서 공진주파수가 1.45 kHz인 것과 매우 잘 일치한다.

이와 같은 방법으로 9개소에서 충격-공진 시험을 수행하였으며 시험 결과로 얻어진 충격-공진 시험 결과를 Table 3에 나타내었다. 검사한 부위들의 두께는 150 cm 이상이다.

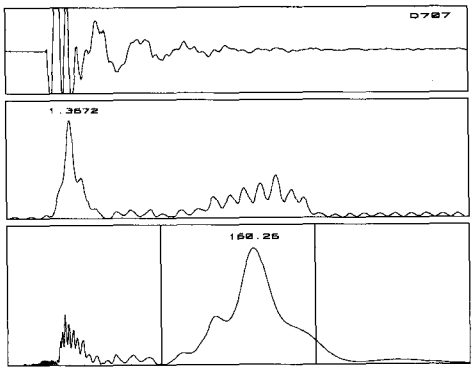

Fig. 5 Result of impact-resonance testing at the test position #7. Top: Time domain waveform (0.1 ms/div), medium: frequency spectrum (0.5 kHz/div), bottom: depth profile (10 cm/div)

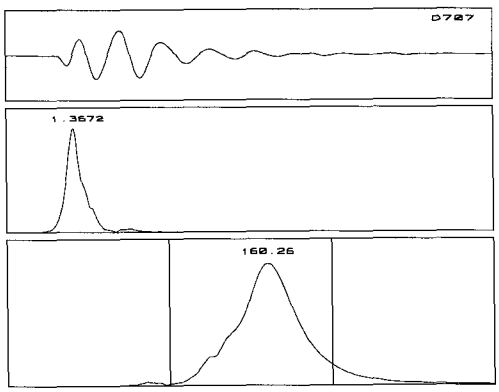

Fig. 6 Low-pass filtering(f_c=2.5kHz) result of impact-resonance testing at the test position #7. Top: Time domain waveform (0.1 ms/div), medium: frequency spectrum (0.5 kHz/div), bottom: depth profile (10 cm/div).

Table 3 Thicknesses of slurry walls obtained by impact-resonance testing

측점번호	공진주파수 (kHz)	두께 (cm)	특기사항
1	1.453	150.8	157cm 근처에 피크가 하나더 있으므로 154 cm로 판정함
2	1.025	213.7	반대면에 요철이 심할 것으로 판단됨
3	0.940	233.1	반대면에 요철이 심할 것으로 판단됨
4	1.111	197.2	반대면에 요철이 심할 것으로 판단됨
5	1.355	161.7	
6	0.977	224.4	
7	1.367	160.3	
8	1.294	169.3	
9	1.294	169.3	

4.2. 철근배근상태조사

철근의 배근상태를 조사하기 위해 Ferroscan (Hi1ti)와 GPR(GSSI) 장비를 준비하였다. 일반적인 상태, 즉 철근피복두께가 10cm 내외일 경우에는 Ferroscan 장비를 이용하여 철근의 배근상태를 평면상태로 도시할 수 있어 배근간격을 가시적으로 파악할 수 있으며, 또한 양호한 조건에서는 피복두께 및 철근의 직경도 추정할 수 있다. 그러나 현장에서 조사한 결과 본 장비로는 철근의 탐지가 불가능하였다. 이는 본 탐사의 대상인 지중 연속벽의 철근피복두께가 20 cm 이상인 경우가 대부분이므로 Ferroscan으로 검출할 수 있는 깊이를 벗어나기 때문으로 해석된다. 이를 대비하여 GPR 탐사기를 준비하였으며 이를 이용하여 철근의 배근상태를 파악할 수 있었다. 이때 사용한 안테나의 중심 주파수는 500 MHz이었으며, 1 cm 간격으로 데이터를 수집하였고 16 bit A/D 변환을 수행하였다.

수평 철근은 수직 철근에 비하여 피복두께가 상대적으로 작아서 측정 결과가 양호한 반면에 수직 철근의 경우에는 피복 두께가 깊어서 판독이 곤란한 경우가 많았다. 특히, 측점 #5부터 #9는 작업용 곤도라에서 검사하기 때문에 얻어진 GPR 데이터의 신뢰성이 낮았다. GPR 데이터 중에서 대표적으로 측점 #2 위치에서 얻어진 GPR 검사 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서 (a)는 수평으로 안테나를 이동하면서 얻어진 정보로서 수직 철근을 나타내 주며, (b)는 수직으로 이동하면서 얻어진 정보로서 수평 철근을 나타내 준다. 그 결과를 분석하여 보면 수직 철근의 경우는 그 간격이 70, 55, 40 cm로 나타났으며, 수평철근은 간격이 30 cm로 판독할 수 있다. 설계도면에는 수평 철근 간격 30 cm이고 수직 철근 간격은 20 cm로 되어 있어서 수평 철근의 간격은 잘 맞지만, 수직 철근의 간격은 많은 차이를 나타낸다. 그리고, 수직 철근의 피복 두께가 수평철근의 피복두께 보다 커야 함에도 불구하고 더 작게 나타났다. 이러한 현상은 측점 #1부터 #4까지 거의 공통적으로 나타났다.

설계도면과 GPR 측정 데이터와의 차이를 규명하기 위해서 2차로 측점 #1 에 대하여 면밀한 검토와 재시험을 실시하였다. 검사 현장과 철근 배열 도면을 대조하여 면밀히 검토한 결과 EL-39.55m 까지는 스터럽이 존재하는 영역임을 알 수 있었다. 특히, B12 패널 끝단 부분에 노출된 스터럽의 높이를 비교한 결과 기존의 측정부위에 스터럽이 존재하는 것으로 판명이 되었다.

측점 #1 부위에서의 철근의 배열도를 Fig. 8에 나타내었다. 스터럽의 간격은 40 cm, 60 cm 등으로 달라질 수 있으며, 스터럽의 간격이 60 cm 인 경우에 대하여 상세한 도면을 Fig. 9에 나타내었다. 이 경우에 수직으로 배열된 철근은 표면에 가장 가까운 스터럽 철근과 수직 철근 사이의 거리가 5 cm 정도 차이가 있다. 따라서, GPR로 측정된 수직 철근은 스터럽 철근으로 판단되었다. 수직 철근의 간격을 정확히 알기 위해서 스터럽이 없는 부위를 선정하였다. A12 패널에서 이전의 측점에서 30 cm 윗 부분 (EL-39.4m) 에서 GPR 탐사를 실시하고 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 이때에 2 m 구간 내에 나타나는 철근의 개수는 10개로 철근 사이의 간격이 20 cm로 판단된다.

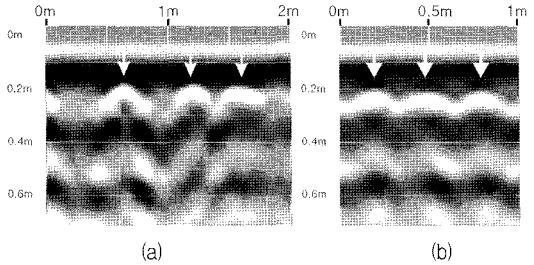

Fig. 7 GPR results at the test position #2 (a) Horizontal scan and (b) vertical scan

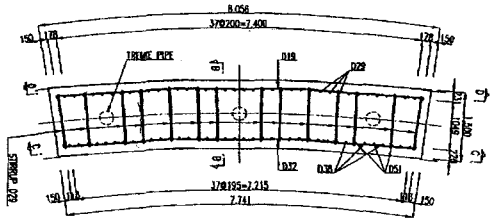

Fig. 8 Diagram of rebars near stirrup for A12 panel

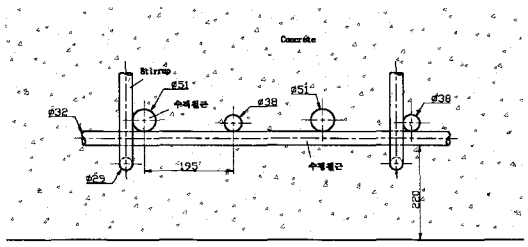

Fig. 9 Details of horizontal, vertical and stirrup rebars

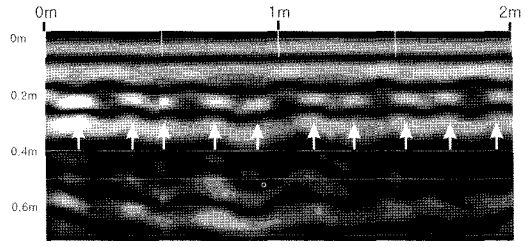

Fig. 10 GPR results for the A12 panel at the elevation of -39.4 m (horizontal scan)

4.3. 콘크리트의 탄성파 속도 측정

콘크리트 탄성파전달속도는 초음파측정으로 수행하는 것이 일반적이다. 초음파속도를 측정하기 위해서는 측정면의 면고르기 작업이 매우 양호하게 준비되어야 신뢰도 높은 값을 얻을 수 있다. 그러나 지중연속벽은 주로 대형이며 매우 높은 고도를 지니고 있어 면고르기 작업이 수월하지 못하며 본 현장도 이에 예외는 아니었다. 따라서 초음파보다 표면 상태에 좀더 민감하지 않는 중심주파수 1-5 kHz 의 음파영역의 탄성파의 속도를 측정하였다. 탄성파 발생원은 소형 해머이며, 이에 트리거 센서가 내장되어있다. 자료의 정확성을 높이기 위하여 수신탐촉자를 2개 준비하고 이들의 음원으로부터 거리간격을 달리하여 거리 차이에 대한 주시 차이를 측정하고 이로부터 속도를 계산하도록 하였다. Fig. 11에 속도측정에 대한 개략도를 제시하였다.

현장에서는 2개의 수신 탐촉자 사이의 간격을 60cm로 두었으며, 샘플링 시간은 2μs이고, 1ms 동안 데이터를 기록하였다. 대표적으로 측점 #3에서 얻은 탄성파 속도 데이터를 Fig. 12에 나타내었다. 각각의 수신 탐촉자에서의 초동주시 T1, T2을 독취하고 속도(Vp)를 계산하여 Table 3에 정리하였다. 조사점 1에서는 자료의 불량으로 초동주시를 결정할 수 없어, 근처에서 채취한 코어 2개의 평균값으로 가정하여 강도 추정에 이용하였다.

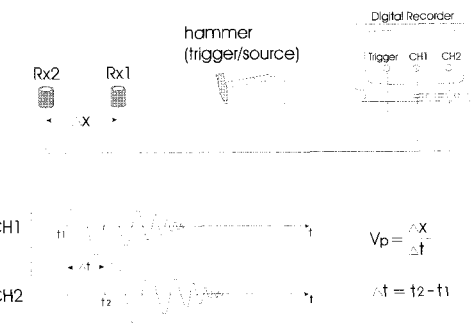

Fig. 11 Schematic diagram for the measurement of elastic wave velocity using two transducers

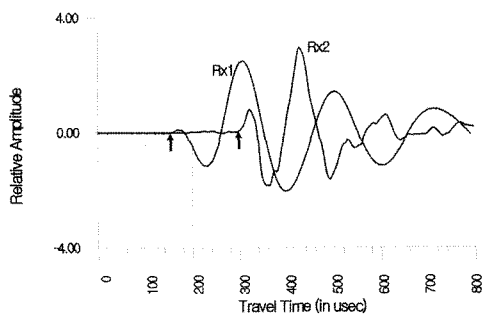

Fig. 12 Transducer outputs at the test position #3

4.4. 반발경도 측정

지중벽의 표면 상태는 매우 거칠기 때문에 반발경도 시험을 할 부분을 그라인더를 사용하여 연마하였다. 반발경도시험기와 수평면과의 각도(타격각)은 지중연속벽이 수직한 상태이므로 0도이고, 따라서 타격각에 대한 보정은 필요 없다. 타격회수는 측점 1에서 7 까지는 측점당 시험을 2차 수행하였으며, 각 시험차에 20회의 서로 다른 점에 대해 경도 시험을 하였다. 2차 시험점과 1차 시험점을 가능한 한 다르게 주었으나 시험의 영향으로 항상 2차 시험이 1차 시험보다 약간 높은 평균값을 보인다. 따라서 자료 정리시에는 1차 시험의 결과만을 선택하였다.

4.5. 강도계산

조사지점 1 근처에서 채취한 코어 2개에 대하여 현장시험과의 비교와 검증을 위해 강도시험과 탄성파 속도측정을 수행하였다. 또한 콘크리트 탄성파 속도 측정을 위해 코어에 대하여 PUNDIT를 이용하여 탄성파 속도를 측정하였다.

반발도 측정치로부터 강도의 추정은 일본재료학회의 식[11]

$$F = 13R - 184 \quad (3)$$

을 이용하였다. 현장측정치와 (3)식으로부터 계산한 추정강도를 Table 4에 정리하였으며, 반발도에 의한 추정강도는 F(R) 항에 나타나있다. 그 결과로 모든 지점에서의 압축강도는 400 kgf/cm^2 이상이었다. 채취한 코어에 대해 실측한 코어의 압축 강도의 값은 추정치 F(R)보다는 매우 크게 나타났다. 따라서, 반발경도와 탄성파 속도를 조합하여 강도를 추정하고자 하였다. 국제건설재료 구조연구기관 연합(RILEM)은 종파속도, 반발도, 인발력 등 7종의 시험값으로부터 2종을 조합하여 좀 더 정확한 강도 추정법을 제시하였다. 본 조사에서 수행한 강도 시험을 위한 비파괴 시험법은 콘크리트 탄성파속도(종파속도)와 반발경도이므로 이를 복합적용하여 강도추정을 시도하였다. RILEM CNDT 위원회에서는

$$Fc = 4.1R + 344V_p - 1022 \quad (4)$$

의 실험식을 제안하였으나 각 계수는 실험에 의해 확인되어야 한다[12].

본 검사에서는 코어에 대한 반발경도치를 얻을 수 없었기 때문에 코어를 채취한 1번 조사지점의 반발도인 52라 가정하고 반발도-음속 복합법을 적용한 결과

$$Fc = 4.1R + 344V_p - 1080 \quad (5)$$

로 계수를 조정하였다. 즉 좀더 보수적인 식을 만들어 적용하였다.

Table 4에서 코어1과 코어2는 조사지점1의 근처

Table 4 Estimated compressive strength

조사지점	반발도 (R)	T1 (us)	T2 (us)	Vp (m/s)	F(R) (kgf/cm^2)	Fc(R,Vp) (kgf/cm^2)	F(Ux) (kgf/cm^2)
1	52			*4556*	492	700	
2	53	153	298	4138	505	561	
3	53	152	298	4110	505	551	
4	52	140	288	4054	492	528	
5	53	154	305	3974	505	504	
6	52	148	297	4027	492	518	
7	52	148	292	4167	492	567	
8	51	140	275	4444	479	658	
9	45	166	317	3974	401	472	
코어1	*52*			4623	492	734	730
코어2	*52*			4489	492	688	670

* F(R) : 반발도에 의한 강도
* Fc(R,Vp) : 반발도와 탄성파속도에 의한 강도
* F(Ux) : 일축파괴 시험에 의한 압축강도
* 수신탐촉자 간격 : 60cm
* 기울임 글꼴은 추정치

에서 채취되었으므로 조사지점1의 강도와 유사한 강도를 나타낸다. 여타 지점이 상대적으로 낮은 강도를 보이는 이유는 계산된 속도가 상대적으로 낮기 때문이다. 현장에서 측정한 탄성파 속도가 실험실에서 측정한 값보다 낮은 이유는 에너지의 발산 패턴과 관련하여 실내에서는 최적의 송수신기 배열(마주보는 배열)이 가능한데 반해, 현장에서는 열악한 송수신기 배열(나란한 배열)만이 가능하므로 초동에너지 이후를 측정하기 때문으로 추측된다.

이렇듯 실제보다 낮을 것으로 예상되는 속도를 이용하여도 강도는 대부분 500 kgf/cm^2 이 넘는 충분한 강도를 나타냄을 알 수 있었다. 9번 조사지점은 연속벽의 상단으로 다소 낮은 강도이나 설계기준치인 400kgf/cm^2 보다는 매우 높은 강도를 보이고 있다.

5. 결론

지중식 LNG 저장 탱크의 지중연속벽(슬러리 벽체)의 시공 품질 및 건전성을 평가하기 위하여 비파괴 진단을 수행하였다. 이를 위하여 지중 연속벽의 9군데 측점을 선정하였으며, 각각의 측점에서 탄성파 충격-공진법으로 벽체의 두께를 측정하였고, GPR을 사용하여 철근의 배치 간격을 조사하였으며, 탄성파 속도와 반발경도를 측정하여 압축강도를 추정하였다. 그 결과로 벽체의 두께는 150 cm 이상으로 설계값을 만족하고 있으며, 철근의 배근 간격도 설계값과 잘 일치하였다. 콘크리트의 압축강도 추정값은 기준값보다 훨씬 크게 나타나서 전체적으로 구조물의 시공 품질은 양호한 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] 홍성호 외, "LNG 저장탱크 검사기술 연구," 한국가스공사 연구개발원 (2000)

[2] 이세경 외, "콘크리트 구조물의 초음파 탐상법 개발 (2차년도)", KSRI-87-45-IR, 한국표준연구소 (1987)

[3] M. Sansalone and N. J. Carino, "Impact-echo: A method for flaw detection in concrete using transient stress waves," NBS IR 86-3452, Nat'l Bur. Stds., Gaithersberg, MD, USA(1986)

[4] Y. H. Kim, S. Lee and H. C. Kim, "Quantitative vibration mode analysis of mortar and concrete blocks containing flaws," NDT Int'l. Vol. 23, No. 2, pp. 67-74 (1990)

[5] G. G. Clemena, "Short-pulse radar methods," In Handbook on Nondestructive Tetsing of Concrete, V. M. Malhotra and N. J. Carino, eds., pp. 253-274, CRC Press, Boca Raton FL. (1991)

[6] T. R. Naik and V. M. Malhotra, "The ultrasonic pulse velocity method," In Handbook on Nondestructive Tetsing of Concrete, V. M. Malhotra and N. J. Carino, eds., pp. 83-100, CRC Press, Boca Raton FL. (1991)

[7] J. Kolek, "An appreciation of the Schmidt rebound hammer," Mag. Concr. Res., Vol. 10, No. 28, pp. 27-36 (1958)

[8] RILEM, "Recommendations for testing concrete by hardness methods," RILEM/NDT-3 (1984)

[9] ASTM, "Standard test method for rebound number of hardened concrete," ASTM C805-02 (2002)

[10] BSI, "Tetsing concrete in structures, non-destructive testing, determination of rebound number," BS EN 12504-2:2001(2001)

[11] 일본재료학회 · 실시 콘크리트 강도판정 위원회, "슈미트 햄머에 의한 실시 콘크리트의 압축강도 판정방법(안)," 재료시험, Vo. 7, No. 59 (1958)

[12] RILEM CNDT-committee, "RILEM tentative recommendations for in-situ concrete strength determination by non-destructive combined methods (First draft)," (1980)