

폴리에틸렌 배관의 전기융착부 비파괴검사기술에 관한 연구

† 길 성 희 · 권 정 락

한국가스안전공사 가스안전시험연구원 제품연구실
(2004년 6월 9일 접수, 2004년 8월 23일 채택)

Study for Non-Destructive Testing of Polyethylene Electrofusion Joints - Ultrasonic Imaging test

Seong Hee Kil and Jeong Rock Kwon

Dept. of Gas Safety R&D Center, Korea Gas Safety Corporation
(Receive 9 June 2004 ; Accepted 23 August 2004)

요 약

본 연구에서는 PE배관 연결망에 있어 취약 부위인 두 개의 배관이 연결되는 부분 즉, 전기융착부에 대한 검사방법을 살펴보고 그 중에서도 위상배열 초음파를 이용한 비파괴탐상방법에 대하여 고찰하였다. 그리고 정상 및 비정상 전기융착 시험편을 설계 및 제작하여 위상배열 초음파를 이용하여 PE배관 전기융착부에 대한 비파괴 탐상을 실시하였다. 마지막으로 현장에서 발생하는 전기융착 접합 실태를 조사한 후 원인을 분석하고 결함 유형을 분류하였다. 즉 융합 불량, 모래 섞임, 기포, 삽입 불량, 용입 과다의 5가지로 분류를 하였다.

Abstract - Electrofusion(EF) joints have been widely used as they are easy to fuse and suitable for high-quality joints for polyethylene(PE) pipes. This paper studies the cause of defects and classifies 5 types of defects. The defect detection technique for electrofusion joints of polyethylene piping is utilized by the ultrasonic phased array technique to obtain ultrasonic images of electrofusion joints. Test sample joints have been designed and fabricated using artificial defects which were made using paper. Finally, we studied the condition of electrofusion in the field and analyzed the main causes of defects. And we classified the defect types as local lack of fusion, sand inclusion, voids or air inclusion, short stab, excess penetration or excess bead.

Key words : polyethylene(PE), electrofusion(EF), ultrasonic array technique, non-destructive

1. 서 론

도시가스설비 중 가스를 수송하는 배관은 크게 강관과 폴리에틸렌(Polyethylene: PE) 배관으로 나눌 수 있다. 배관망에 있어 취약부위는 두 개의 배관이 연결되는 부분인데 강관의 경우에는 용접부이고 PE배관의 경우에는 융착부이다. 그래서 강관의 경우에는 시공시에 취약

부위인 용접부에 대한 비파괴검사를 반드시 표준화된 절차에 의해 수행하는 것을 규정화하고 있으며, 시공 후에도 부식방지를 위한 관리를 지속적으로 하고 있다. 그러나 강관에 비해 상용화가 늦게 된 PE배관의 경우에는 지금까지 마땅한 검사기준과 평가방법이 부족한 상황에 있다. 그래서 직접적인 비파괴검사를 수행하지 아니하고 기밀시험과 같은 간접적인 방법으로

검사를 하거나 시공질차를 관리하는 차원에서 배관망을 건설하고 있는 현실이다. 특히 PE배관의 분기관 작업을 할 경우에는 간접적인 검사조차도 하지 못하는 상황을 고려하면 폴리에틸렌 배관의 용착부의 접합상태의 건전성을 확인할 수 있는 검사방법의 개발이 매우 시급한 실정이다.

II. 전기용착

2.1. 전기용착 개요

PE배관을 연결하기 위한 여러 가지 방법 중의 하나가 전기용착으로 이음관을 이용하여 PE배관을 열용착으로 연결하는 방법[1]이다. 즉 이음관의 내면에 전기저항열선이 원주방향으로 두 부분에 걸쳐 나누어 감겨져 있는데 연결하고자 하는 두개의 배관을 삽입한 후, 전기저항열선에 전기를 가하여 발생된 열로 이음관의 내면과 삽입된 배관의 외면을 용융접합시키는 장치이다. 용융접합된 배관의 단면을 그림 2에 보였다.

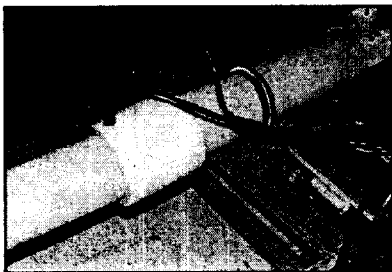


fig. 1. 전기용착과 전기용착기.

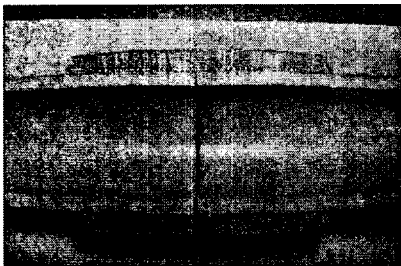


fig. 2. 용융접합된 배관의 단면.

2.2. 전기용착기

작업 현장에서 사용되는 전기용착기들은 작업 공정 확인을 위한 표시 장치, 작업 공정 내용 및 결과 저장을 위한 데이터 저장부, 시간

당 출력전류의 변화량/현장번호/업체/용착이상 유무 표시등의 데이터 출력 장치를 ISO/TR 13590의 규정[2]에 따라서 설치되어 있다. 열용착시에는 PE배관과 전기용착부 이음새의 연결 유무를 열선의 과부하 신호로 판단하고 있는데 이는 다음과 같은 문제점을 가진다.

- (1) 용착 결합의 기준을 이음새의 열선 과부하, 전기용착기의 전기부하, 외부온도 등에 두고 있다.
- (2) 용착 결합의 유무를 전기적으로만 판단한다.
- (3) 입력 및 출력 전원의 상태에 따라 용착 품질의 차이가 있다.
- (4) 정상 용착 신호가 나왔더라도 배관과 이음새의 용착면에 이물질, 공기층, 과도한 스크래핑으로 인한 배관 결합 등은 판별할 수 없다.

III. 전기용착부의 간접적인 비파괴검사 방법

전기용착 후 PE배관의 비파괴 검사방법은 전기용착부의 이음관에서 인디케이터의 용기를 육안으로 검사하는 방법과 공기나 불활성기체를 주입하여 압력 이상을 확인하는 내압시험과 기밀시험[3]이 있다. 이러한 검사방법은 단지 외관과 가스누출 여부만을 확인할 수 있다. 따라서 최근에는 선진 각국에서 전기용착부의 건전성을 높이기 위하여 용착 계면을 직접적인 방법으로 비파괴 검사를 하는 방법[4,5,6]이 활발하게 연구되고 있다.

3.1. 인디케이터 검사

PE배관의 전기용착 후 이음관의 터미널 옆에 인디케이터의 용융을 평가하여 완전용착 여부를 확인하는 검사방법이다. 이는 전기용착 중 이음관과 파이프에 열이 가해지면 PE의 팽창에 의해 인디케이터가 용기되는 원리를 이용한 것이다. 그림 3에서는 용착 전의 이음관의 상태를 보여주고 있으며, 그림 4에서는 용착 후의 이음관의 상태를 보여주고 있는데 그림 4의 (a)에서는 완전 용착의 경우이며, 그림 4의 (b)와 (c)는 불완전 용착의 경우로 인디케이터가 양쪽이 용기하지 않은 경우와 한쪽만 용기한 경우를 각각 보여주고 있다.

3.2. 내압시험

PE배관의 전기용착부에 대한 내압시험은 다음과 같이 수행한다.

- (1) 공기 또는 위험성이 없는 불활성기체로 한다.
- (2) 양 끝부에는 이음부의 재료와 동등이상의 성능이 있는 배관용 엔드캡으로 마감한다.
- (3) 3kg/cm²이상으로 하며, 규정압력을 유지하는 시간은 5분 내지 20분을 표준으로 한다.

3.3. 기밀시험

PE배관의 전기용착부에 대한 기밀시험은 다음과 같이 수행한다.

- (1) 공기 또는 위험성이 없는 불활성기체로 한다.
- (2) 최고사용압력의 1.1배 또는 840mmH₂O중 높은 압력이상으로 한다.
- (3) 기밀시험압력에서 누출 등의 이상이 없으면 합격으로 한다.

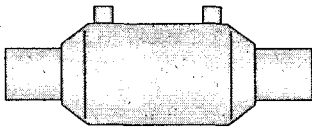
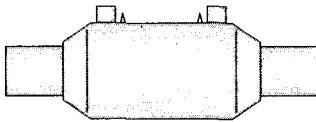
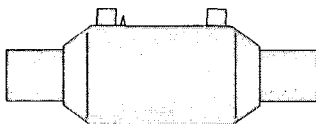


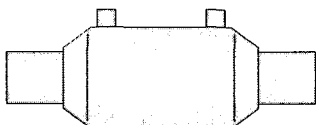
fig. 3. 용착전 이음관(인디케이터 보이지 않음).



(a) 완전용착(인디케이터가 양쪽 모두 용기한 상태)



(b) 불완전 용착(인디케이터가 한쪽만 용기한 상태)



(c) 불완전 용착(인디케이터가 모두 용기하지 않은 상태)

fig. 4. 용착후 이음관(인디케이터 검사).

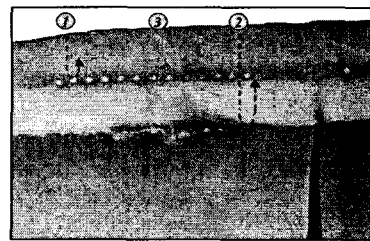
3.4. 초음파 탐상 시험

지금까지 알려진 비파괴검사기술 중에서 PE 배관의 전기용착부를 비파괴적으로 검사할 수 있는 가장 적합하고 안전한 기술은 초음파를 이용한 비파괴 검사[7]로 판단되어지고 있다. 기존의 RF 신호를 이용하여 결함을 검출하는

재래식 초음파 탐상기법은 그 적용에 한계가 있는데 그 요인은 첫째, PE배관에서는 초음파의 감쇠가 커서 분해능이 좋은 고주파를 사용할 수 없다는 것과 둘째, 저주파를 사용할 경우에는 분해능이 떨어져 용착을 위해 사용되는 열선과 결함을 구분할 수가 없다는 것이다. 따라서 재래식 초음파 기법의 문제점을 극복할 수 있는 초음파영상을 이용한 탐상 기법으로 배열초음파 기법[8]을 이용하고자 한다. 배열초음파 기법은 전자적 제어를 통하여 초음파 빔을 집속하고 조향이 가능하기 때문에 S/N을 향상시키고, 실시간 2차원 초음파 영상을 얻을 수 있어서 시험 대상의 단면에 대한 고분해 초음파 영상을 제공한다. 배열초음파 센서는 3가지 즉, 3.5MHz, 5MHz, 7.5MHz로서 대상체의 두께에 따라 선별하여 사용한다.

가. 검사원리

이음관에서 초음파는 일정간격으로 배열된 열선에서 반사되는데 이러한 특징은 초음파영상에서 일정간격으로 배열된 열선의 신호로 나타나고, 용착이 잘되면 초음파가 잘 투과하는데 초음파영상에서는 경계면의 신호가 보이지 않으며, 용착이 잘 안되면 많은 초음파가 반사되는데 용착 경계면의 신호가 나타나게 된다. 그리고 용착 경계면은 열선 바로 아래 형성이 되는데 불완전경계면의 열선신호가 바로 이것이다.



- ① ---> 구리선 반사 신호
- ② ---> 바닥 반사 신호
- ③ ---> 용착 경계면 반사 신호 (결함신호)

fig. 5. 초음파 검사 방법.

IV. 용착 접합부 검사

4.1. 결함이 없는 용착 접합부 검사

먼저 불량 용착 접합부와와의 비교를 위하여 결함이 없는 양호한 용착 접합부를 제작하였다. 제작시 사용한 PE배관 및 이음관은 100A, 150A

의 소구경이다. 그림 6 (a)는 결함이 없는 양호한 용착부의 사진으로 실험실에서 전기용착한 100A PE 이음관으로서 열선 바로 밑의 용착부를 살펴보면 어떠한 결함도 없이 용착이 양호하게 되었음을 확인할 수 있다. 또 (b)는 위상배열 초음파 장치를 이용하여 비파괴 검사한 결과로서 (a)와 같은 결과를 얻을 수 있다.

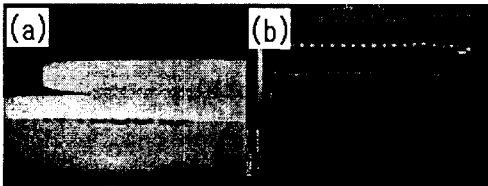


fig. 6. (a) 100A EF 정상 용착부
(b) 비파괴검사 결과

4.2. 인위적으로 결함을 만든 용착 접합부

그림 7은 150A와 100A PE 이음관을 가지고 용착을 할 때 종이나 운모판을 넣어 인공 결함을 삽입한 것으로써 열선 바로 밑에 약 2cm 정도의 용착이 안된 부분이 있음을 눈으로도 확인할 수 있다. 또한 비파괴검사 결과에서도 마찬가지로 같은 결과를 얻었다.

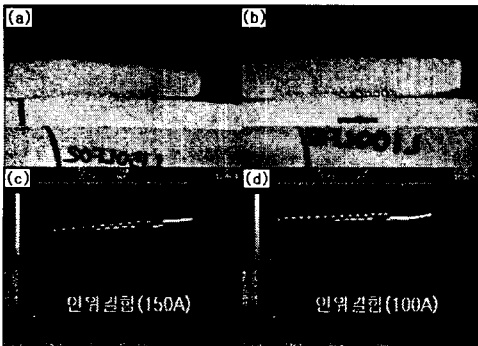


fig. 7. (a) 150A EF 인위결함 삽입 모습
(b) 100A EF 인위결함 삽입 모습
(c) 비파괴검사 결과
(d) 비파괴검사 결과

4.3. 용착 접합부 실태 조사

4.3.1 수원 화성 신도시 아파트 건설 현장

경기도 화성의 아파트 건설 공사 현장에서 PE 이음관의 용착부 접합 상태를 초음파 영상 장비를 이용하여 검사하였다.

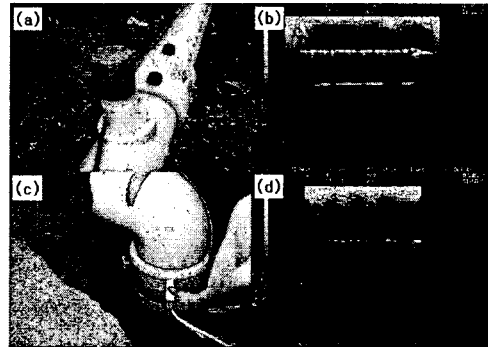


fig. 8. (a) 100A EF 연결 모습
(b) 100A EF 비파괴검사 결과
(c) 250A EF 검사 모습
(d) 250A EF 비파괴검사 결과

4.3.2 인천 송현동 공급관 공사

250A 공급관 공사 현장의 PE 이음관의 용착부에 대한 접합상태를 검사해 보았다. 그림 9 (a)는 용착 전 스크래핑을 실시하는 모습이며 (b)는 전기용착 실시 중인 상태를 나타낸 것이며 (c)는 용착 후 인디케이터가 돌출되지 않는 경우나 (d)의 비파괴검사 결과를 살펴보면 용착이 양호하게 잘 되었음을 확인할 수 있었다. 즉 250A 이상의 대구경 배관의 경우 현장에서 용착시 용착이 잘된 양호한 경우에도 인디케이터가 돌출이 되지 않는 경우가 종종 발생하였다. 따라서 250A 이상 대구경 배관의 경우에 인디케이터 돌출 외에 용착 접합부의 성능 여부를 확인할 수 있는 비파괴검사 방법을 실용화할 필요가 있다고 생각된다.

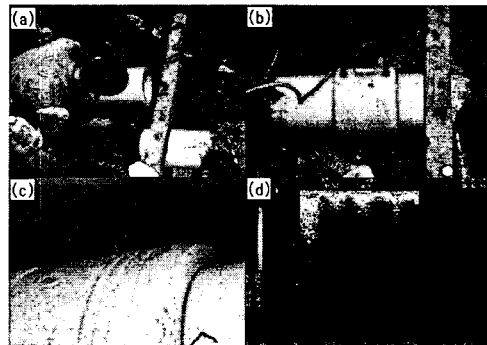


fig. 9. (a) 표면 스크래핑 작업
(b) 전기용착 모습
(c) 인디케이터 비돌출 모습
(d) 비파괴검사 결과

V. 용착 접합부에 발생하는 주요 결함의 원인 분석 및 유형 분류

4.1. 원인 분석

PE배관 전기용착부의 주요 결함 원인을 분석하는데 우선적으로 PE배관의 매설 전과 후로 구분하였다. 매설 전에서는 PE배관의 원재료인 PE배관과 이음관 자체의 결함 그리고 용착하는 과정에서의 전기용착기 오작동이나 결함 그리고 현장에서의 작업자에 의한 실수로 나누어 3가지 측면에서 접근하였다. 매설 후에는 매설 작업 과정, 매설 중인 상태, 굴착 작업 과정에 의한 실수로 나누어 3가지 측면에서 접근하였으며 배관·이음관·전기용착기 시공 지침과 관리 지침, ISO 제조 기준의 자료와 현장 조사를 병행하였다.

Table 1. 용착부의 매설 전 주요 결함의 원인.

결함 원인	내 용
1. PE배관 및 이음관 자체 불량	· PE배관 및 이음관 자체에 공극 포함
	· 적체 불량으로 인한 크랙
	· 코일 또는 컨트롤 저항 편이 부러진 상태
	· 이음관 내경이 적다 · 이음관 내경이 크다
2. 용착기 및 전원선에 의한 불량	· 출력 전압(40V) 유지
	· 정격사용 주파수 50~60Hz로 유지
	· 입력전압의 변동이 심하여 용착기 오작동
	· 입-출력선이 너무 길거나 가늘어 오작동
	· 영하의 기온에 용착기 방지 사용
	· 발전기, 변압기의 트랜스 용량 5kW이상 사용
	· 장비 노후로 코일 연결단자 부위가 느슨 · 편의 녹 또는 오염으로 용착시간 오작동
3. 작업자에 의한 불량	· 스크래핑 또는 관 청소
	· 클램핑(shot stab or binding condition)
	· 냉각 시간
	· 실제 용착 시간과 용착기(컨트롤 디스플레이)의 용착 시간 상이

매설 전에서는 PE배관 원재료의 불량으로 인하여 즉 제조사에서 생산 후 품질관리와 출하 후 현장 보관 관리상의 문제로 발생한다. 전기용착기는 용착기 결함, 오작동, 규정되지 않은 전기의 입출력 그리고 전기용착 중의 환경으로 인해 발생하며 용착 작업 중 현장 작업자의 실수도 또한 이에 해당된다.

매설 후에 발생하는 결함의 원인을 살펴보면 매설 작업자의 실수로 인해 발생할 수 있다.

매설 중인 상태에서는 이음관에 발생하는 피로로 인하여 발생할 수 있으며 굴착 과정에서 중기계와 작업자의 실수로 인하여 결함이 발생할 수 있다.

Table 2. 용착부의 매설 후 주요 결함의 원인.

결함 원인	내 용
1. 매설 작업 과정 중의 결함	· PE에 영향을 줄 수 있는 이물질과 같이 매설
	· 암반 위에 배관 매설
	· 전기용착 불량 상태로 배관 매설
	· 과도한 하중으로 토사 매설 및 다짐 · 중량이 과도한 중기계의 누름으로 배관 파손
2. 매설 중인 상태의 결함	· 토사 중 포함된 이물질이 이음관 자극
	· 차량이나 기타 하중에 의한 피로의 누적
	· 지반 침하 등의 과도한 힘에 의한 파손
3. 굴착 작업 과정에서의 결함	· 굴삭기의 하중에 의한 용착부 파손
	· 굴삭자의 장비에 의한 용착부 파손
	· 지반 붕괴로 인한 과도한 힘으로 용착부 파손

Table 4. 전기용착부 주요 결함의 유형 분류.

결함 유형	내 용	단면 사진	비파괴검사 결과
융합 불량 (Local lack of Fusion)	불완전 용착된 접합부가 일부 존재		
모래 섞임 (Sand Inclusion)	이물질 삼입으로 불완전 용착		
기포 (Voids or Air Inclusion)	수지의 유동 이상으로 공동 발생		
삼입 불량 (Short Stab)	열선 부분이 불완전하게 이동됨		
용입 과다 (Excess Penetration or Excess Bead)	수지가 과도하게 흘러내린 경우		

4.2. 유형 분류

PE배관 전기용착부가 어떠한 형태로 결함이 나타나는가를 조사하여 크게 5가지로 분류하였다.

즉 용합 불량(local lack of fusion), 모래 섞임(sand inclusion), 기포(voids or air inclusion), 삽입 불량(short stab), 용입 과다(excess penetration or excess bead)로 나누고 이에 대한 세부 내용을 표 4에 나타내었다.

4.3. 결함 판정 기준

현재 국내 기준 뿐만 아니라 국외 규격 또는 기준 등에서 PE배관의 전기용착부에 대하여 비파괴검사를 실시할 경우에 법으로 허용하는 결함 크기에 대한 기준이 없다. 다만 ASTM F1055에서 용착부에 기공이 존재할 경우 단일 기공에 대해서는 용착부 길이의 10%를 초과하지 않도록 하고 기공들이 합쳐진 복합 기공에 대해서는 용착부 길이의 20%를 초과해서는 안 된다고 규정하고 있을 뿐이다.

따라서 전기용착부에 비파괴검사를 실시할 경우에 결함 유무를 확인하고 결함이 존재할 경우 허용 가능한 결함 크기에 대한 보다 정확한 기준을 마련하기 위하여 결함 크기에 따른 용착부 성능 평가에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

VII. 결 론

PE배관의 안전성은 용착부 성능에 의존하기 때문에 용착 시 발생하는 불량의 주요 원인을 조사하고 용착 시 발생할 수 있는 용착 결함의 주요 유형을 크게 5가지로 분류하였다. 특히 환경이 큰 배관의 경우 인디케이터의 돌출 여부로 용착 결함의 유무를 판정할 수 없는 경우

가 많았다. 그리고 여러 종류의 인위결함을 삽입한 전기용착부 시험편을 제작하여 비파괴검사를 실시하였고 그 결과 정확한 결함 위치를 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 전기용착(Electronic Fusion) 표준 시공기준, 한국가스안전공사
2. ISO/TR 13950:1997, Plastics pipes and fittings - Automatic recognition systems for electrofusion
3. 폴리에틸렌 배관의 시공표준화에 관한연구, 한국가스안전공사 가스안전기술연구센터
4. 社団法人 日本ガス協會, 가스用ポリエチレン管接合作業及び教育・訓練マニュアル, 平成13年2月.
5. T.H.Striplin, "Non-Destructive Testing of Electrofused joints and Large Diameter Gas pipes", Plastics Pipes 10, The Plastics and Rubber Institute, London, pp.605-614, 1998.
6. L.J.Munns and G.A.Gorgiou, "Ultrasonic and Radiographic NDT of Butt Fusion Welds in Polyethylene Pipe", Plastics Pipes
7. T.Kitaoka, J.Furukawa, "Development of Electrofusion Interface Ultrasonic Technique, Contributing to Construction of Highly Reliable PE Piping", IGRC, 2001.
8. PE배관 전기용착부의 결함검출 기술개발, 성균관대학교, 한국가스안전공사