

폴리에틸렌 배관 전기용착부 단기성능 평가를 위한 융합불량 영향 평가

길성희* · 권정락 · 조지환

한국가스안전공사 가스안전연구개발원 제품연구실
(2005년 4월 8일 접수, 2005년 5월 30일 채택)

Effect of Lack of Fusion Defects on Short-Term Performance of Polyethylene Electrofusion Joints

Seong Hee Kil*, Jeong Rock Kwon and Ji Hwan Jo

Dept. of Gas Safety R&D Center, Korea Gas Safety Corporation

(Received 8 April 2005, Accepted 30 May 2005)

초 록

본 연구에서는 폴리에틸렌 배관 전기용착부 단기성능 평가를 위한 비파괴검사를 실시할 경우 발견되는 결함에 대한 판정기준을 개발하였다. 인위적으로 3.8 mm~25 mm 내에서 6가지 크기의 결함을 삽입한 시험편을 설계 및 제작하여 기계적 평가를 실시하고 또 이론적 해석을 하였다. 안전계수 2를 적용하여 유효 응력을 산정할 경우 최대 허용 가능한 결함 크기는 11 mm(열선 폭의 30%)이며 안전 계수를 4를 적용할 경우에 최대 허용 가능한 결함 크기는 3.8 mm(열선 폭의 10%)이다.

주요어 : 폴리에틸렌, 전기용착, 융합불량, 결함판정기준

Abstract— In order to investigate the short-term performance of polyethylene electrofusion joints, the mechanical tests and stress analysis have been conducted to the artificially defected weld joints. The defects of lack of fusion with a square-type were fabricated with 10, 20, 30, 40, 50, 60% size of the width of heating wire zone, respectively. In this defect sizes range, both tensile and bending test results showed the dependence of defect size to the electrofusion joints performance, but both sustained pressure and crush test results didn't. The numerical stress analysis results including the soil and internal pressures, tensile and bending stresses clearly showed the dependence of fusion defect size. Based on both mechanical test and stress analysis results, the maximum acceptable defect size in polyethylene electrofusion joints is discussed.

Key words : Polyethylene (PE), Electrofusion (EF), Lack of fusion, Flaw criteria

1. 서 론

연료가스는 청정성, 편리성으로 인하여 그 보급률이 98%를 상회하는 국민적인 연료로서 매년 사용량이 증가하고 있다¹⁾. 이런 가스는 국가의 중요 에너지원이지만 사고 발생 시에는 엄청난 인적·물질 손실을 초래

할 개연성이 높기 때문에 이에 대한 안정성 검토는 큰 관심사가 아닐 수 없다.

현재 도시가스는 지하에 매설된 가스 배관망을 통하여 소비자에게 안정적으로 공급되고 있다. 이때 사용되는 배관 재료로는 내부식성, 내구성, 유연성, 시공성, 경제성 등이 양호한 폴리에틸렌이 널리 사용되고 있다.

이러한 가스 배관망의 안전성은 배관을 연결하는 이음부의 용접 성능에 의존하나 폴리에틸렌 배관은 재질 특성으로 인하여 기존의 비파괴검사기법(RT, UT, MT 등)으로 이음부의 용접 성능을 검사하기가 쉽지 않았다. 또한 대구경 배관의 경우에는 정원 변형이 많고 전기용착

*To whom correspondence should be addressed.

Dept. of Gas Safety R&D Center, Korea Gas Safety Corporation

Tel: 031-310-1423

E-mail: kiljudy@kgs.or.kr

시 배관의 정렬이 어려워서 용착 결합이 발생할 개연성이 아주 높다^[2]. 따라서 이러한 전기용착부의 이음부를 검사하기 위하여 기존의 초음파탐상장치와 달리 배열 초음파 기법을 이용하여 폴리에틸렌 배관 이음부의 용접 상태를 현장에서 비파괴적으로 실시간 영상을 획득할 수 있는 검사기술을 개발하였다. 따라서 본 연구에서는 폴리에틸렌 배관 전기용착부 단기성능 평가를 위하여 이 검사기술을 이용하여 비파괴검사를 실시할 경우 발견되는 결합에 대한 판정기준을 개발하고자 한다.

2. 기계적 시험 및 응력 해석

2-1. 75A 중밀도 폴리에틸렌 배관의 물성

중밀도 75A 폴리에틸렌 배관 재료의 물성을 Table 1에 나타내었다^[3].

2-2. 인위결합을 삽입한 시험편 제작

인위결합 크기는 다음 Table 2와 같고 열선 폭(38 mm)의 10%~60% 크기의 인위결합을 제작하여 이음관 바깥 콜드존(cold zone)에 삽입한 후 용착하여 시험편을 제작하였다. 이음관 바깥 콜드존에 인위결합을 삽입한 이유는 안측 콜드존보다 결합에 훨씬 민감한 부분이기 때문이다.

2-3. 기계적 시험

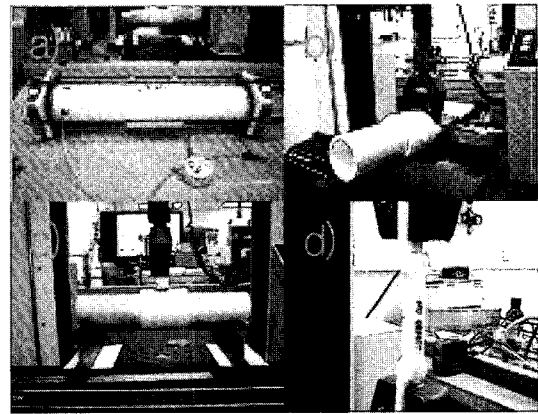
폴리에틸렌 배관 전기용착부의 단기성능 거동에 대한 결합 크기의 영향을 평가하기 위하여 정수압시험, 압축 박리시험, 굽힘시험 및 인장시험을 실시하였다.

2-3-1. 정수압시험

ASTM D1599^[4]에 따라서 배관 길이가 외경의 5배가 넘지 않도록 시험편을 만들고 배관 양쪽을 막은 후 최대 사용압력의 2.5배인 145 psi의 압력을 가하여 용착부에 가스누출이 생기는지 여부를 확인하였다. 이때 사용한 배관 길이는 431.8 mm이며 25°C의 온도에서 시험을 수행하였다.

2-3-2. 압축박리시험

ASTM F1055^[5]에 따라서 시험을 수행하였으며 Fig. 3에 압축박리시험의 개요를 나타내었다. 인스트롱 시험기를 이용하여 시험을 수행하였으며 결과적으로 하중-변형



a) sustained pressure test b) crush test
c) bend test d) tensile test

Fig. 2 Mechanical test apparatuses.

Table 1. Typical material properties for 75A MDPE pipes.

Outside diameter of pipes (mm)	Wall thickness (mm)	Density (g/cm ³)	Melt flow index (g/10 min)	Yield strength (psi)
89	9	0.933~0.939	0.15~0.4	2,560

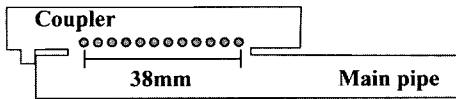


Fig. 1. Geometry of the 75A welded pipe fitting.

Table 2. Defects of different six sizes.

% of the welded zone	10	20	30	40	50	60
Defect size (mm)	3.8	7.6	11.4	15.2	20	25

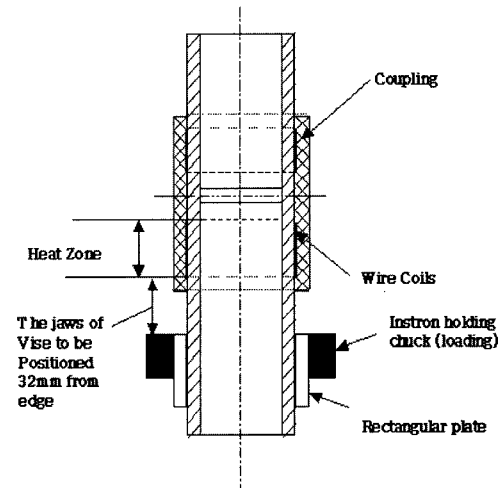


Fig. 3. Experimental setup for crush test.

곡선을 작성하여 융착부에서 이음관과 배관의 분리가 발생하였는지를 알아보았다.

2-3-3. 굽힘시험

결함크기에 따른 시험편의 변형량을 계산하기 위하여 굽힘 시험을 실시하였다. 최대 226.8 kg의 하중을 Fig. 2c)와 같이 시험편의 중심인 이음관 상부에 가하고 배관의 가로 중심부에서 아래로 어느 정도 변형이 되었는지 그 양을 측정하였다. 시험은 50.8 mm/min의 하중 속도에서 수행하였으며 이때 시험 온도는 상온이다.

2-3-4. 인장시험

ASTM D638⁽⁶⁾의 방법에 따라 인장시험편을 제작하여 시험을 실시하였으며 크로스헤드 스피드가 50.8 mm/min인 인스트롱 시험기를 이용하였다. 이때 시험한 온도는 상온이다.

2-4. 응력 해석

2-4-1. 융착부에 작용하는 하중 결정

폴리에틸렌 배관 융착부에 작용하는 외부 응력은 크게 내압, 토압, 차량하중에 의한 토압 등으로 구분할 수 있다⁽⁷⁾. 먼저 최대 사용압력이 4 kg/cm²인 경우 내압은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$W_i = 4 \text{ kg/cm}^2 = 56.89 \text{ psi} \tag{1}$$

토압은 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$W_r = r \cdot h \cdot g = 0.002 \text{ kg/cm}^3 \times 980 \text{ cm/sec}^2 \times 120 \text{ cm} = 0.00211 \text{ kg/cm}^2 = 0.03 \text{ psi} \tag{2}$$

- r : soil density (0.002 kg/cm³)
- h : depth of the buried pipe (120 cm)
- g : gravitational acceleration (980 cm/sec²)

차량 하중에 의한 토압(W_i)은 다음 식에 의해 계산한다.

$$W_i = \frac{3Q}{2\pi h^2} \left(1 + \left(\frac{h}{\sqrt{h^2 + X^2}} \right)^5 \right) \tag{3}$$

Q : impact loading of the rear tire of each vehicle (12,000 kg)

X : distance between the tires of the two vehicles (100 cm)

여기서 Q는 20톤 차량의 후륜 하중으로서 8,000 kg으로 하고 충격계수를 1.5로 하면 12,000 kg이 된다. 또한 는 차 두 대가 동시에 주행할 경우의 후륜 간격으로서 1,000 mm로 한다.

그러므로 $W_i = 0.499 \text{ kg/cm}^2 = 7.17 \text{ psi}$

따라서 폴리에틸렌 배관이 매설되어 있는 경우 외부 하

중으로서 여러 인자 중에 내압이 가장 크게 영향을 준다는 것을 확인할 수 있다.

또한 내압 외에도 이동하는 차량에 의해 발생하는 굽힘 응력에 의한 영향도 고려해야 하는데 배관 두께에 관한 도시가스법 규정에 따라서 굽힘 응력을 계산해보면 20톤 차량 두 대의 후륜으로부터 발생하는 충격 하중을 이용할 때 배관의 굽힘 응력은 축방향에서 최대로 발생하며 이때 81 psi가 된다.

엔드캡(end cap)에서 배관에 가한 압력으로 발생 가능한 인장 응력을 계산할 수 있다. 즉 다음 식에 나타낸 것처럼 배관 벽에 축방향으로 엔드캡에 가해진 압력으로부터 응력을 구할 수 있다.

$$58 \text{ psi} \cdot \pi(1.38\text{in})^2 = \sigma \cdot (\pi(1.74\text{in})^2 - \pi(1.38\text{in})^2) \tag{4}$$

$$\sigma = 100 \text{ psi}$$

2-4-2. 이론적 해석

위에서 실시한 기계적 시험방법 중에서 굽힘 시험과 동일한 시험방법으로 즉, 226.8 kg의 하중을 이음관 중앙에 가했을 때 그 변형량을 이론적으로 계산하여 기계적 시험방법 결과와 비교해 보았다. 그리고 58 psi의 내압과 100 psi의 인장 응력이 복합적으로 작용할 경우에 인위결함을 삽입한 시험편에 발생하는 최대응력을 응력 해석 모델링을 통하여 계산하였다.

3. 시험 결과

3-1. 기계적시험

정수압시험, 압축박리시험, 굽힘시험 및 인장시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

3-1-1. 정수압시험

인위결함을 삽입한 모든 시험편에서 압력 손실 또는 누설이 발생하지 않았다. 이는 결함크기에 대한 판정기준을 선정하는데 정수압시험은 큰 의미가 없는 시험임을 알 수 있었으며 또한 삽입한 인위결함의 면적이 융착면의 전체 면적에 비하여 매우 작기 때문에 큰 영향을 주지 못한 것으로 판단할 수 있었다.

3-1-2. 압축박리시험

인위결함을 삽입한 모든 시험편에 대한 압축박리시험 결과 모든 시험편에서 융착면의 분리는 발생하지 않았다. 즉 급격한 하중의 감소 또는 변형의 증가와 같은 현상은 발생하지 않았다. 압축박리시험 결과는 다음 Fig. 4에 나타내었다.

3-1-3. 굽힘시험

Fig. 2c)와 같이 시험편에 최대 하중이 226.8 kg가 될 때까지 하중을 가한 후 융착면의 변형을 측정하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 시험 결과 결함 크기가

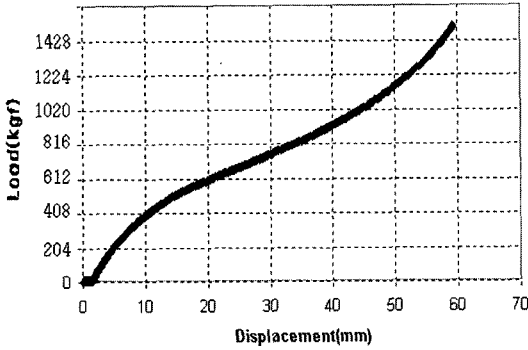


Fig. 4. Load-displacement curve for crush test.

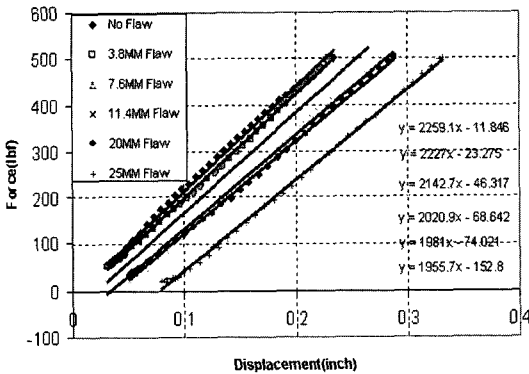


Fig. 5. The deflection with regard to different lack of fusion sizes of defects.

증가함에 따라서 변형이 증가하였다.

3-1-4. 인장시험

시험 결과를 살펴보면 다음 Table 3과 같고 Fig. 6에 인장시험 후 시험편의 파단 모습을 나타내었다. Fig. 6 c)를 살펴보면 일정 크기 이상의 인위결함을 삽입한 시험편에서는 인위결함 부위에서 파단이 발생함을 확인할 수 있다.

3-2. 응력해석

굽힘하중이 작용할 때 그리고 인장응력과 내압이 복

Table 3. Tensile test results.

Sample No	Defect size	Tensile strength (kg)
1	No defect	6,141.6
2	3.8 mm	6,050.9
3	7.6 mm	6,114.4
4	11.4 mm	5,724.3
5	15.2 mm	5,624.5

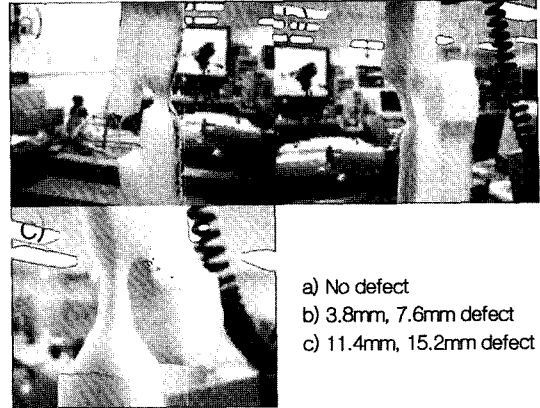


Fig. 6. Failure of samples.

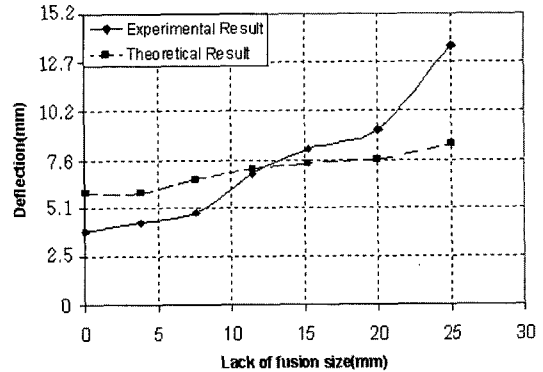


Fig. 7. Comparison between experimental and FEA predictions of the maximum deflection as a function of defect size.

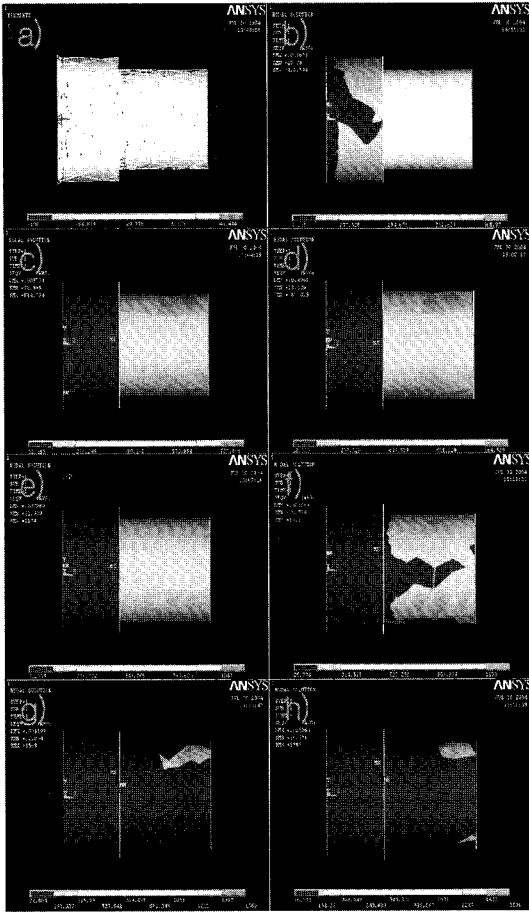
합적으로 작용하는 각각의 경우에 대하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

3-2-1. 굽힘하중이 작용할 경우

226.8 kg_f 굽힘하중 하에서 인위결함의 크기에 따른 변형량을 이론적으로 계산하였다. 이 결과와 실험 결과와 Fig. 7에 비교하여 도시하였다. 이론 해석 결과와 실험 결과가 비교적 만족스럽게 일치함을 알 수 있으며 결함 크기가 증가함에 따라서 최대 변형량도 증가함을 알 수 있다. 이는 결함에서 전단 변형이 발생하기 때문에 결함 크기가 증가할수록 굽힘 강성율은 감소하게 된다.

3-2-2. 인장응력과 내압이 복합적으로 작용할 경우

인장응력과 내압이 복합적으로 작용할 경우에 인위결함을 삽입한 용착면에 발생하는 응력을 이론적으로 계산해보면 다음 Fig. 8과 같다. Fig. 9는 인장응력과 내압이 복합적으로 작용할 때 인위결함을 삽입한 용착 시험편에 발생하는 최대 분미세스 응력에 대한 결함 크기



a) FEA model b) no defect
 c) 3.8mm defect d) 7.6mm defect
 e) 11.4mm defect f) 15.2mm defect
 g) 20mm defect h) 25mm defect

Fig. 8. Stress distribution for a welded sample with defect under combined internal pressure and tensile loading.

의 영향을 나타낸 것이다. 여기서 알 수 있듯이 인위 결함이 삽입된 용착부의 최대응력은 결함 크기가 20 mm 가 될 때까지 증가하다가 그 이상이 되면 일정하였다. 이는 결함 크기가 20 mm 이상이 되면 결함 크기에 관계없이 일정한 응력에서 용착부가 분리될 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

4-1. 기계적 시험

결함크기가 3.8 mm~25 mm인 인위결함을 제작하여 용

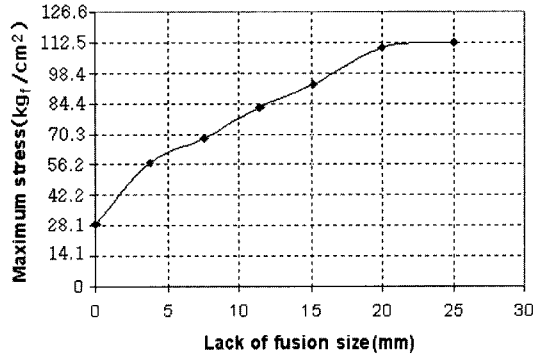


Fig. 9. FEA predictions of the maximum von Mises stress as a function of defect size for combined internal pressure (58 psi) and tensile loading (100 psi).

착면에 삽입한 후에 용착하여 시험편을 제작하였다. 정수압 시험을 실시한 결과 어떠한 결함 크기에서도 가스 누설은 발생하지 않았다. 굽힘 시험에서는 결함 크기가 증가할수록 변형량도 증가하였다. 압축박리시험 결과에서도 결함 크기에 따른 용착부 분리는 발생하지 않았다.

4-2. 응력 해석

용착부의 응력 분포를 해석하기 위하여 유한요소모델링을 사용하였다. 굽힘시험에 대한 응력해석 결과 실험값과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 내압과 인장 응력이 복합적으로 작용할 경우에 결함 크기에 따른 최대 응력을 계산한 결과 결함 크기가 3.8 mm~20 mm 까지 증가하는 경우에는 최대 응력도 증가하나 20 mm 이상인 경우에는 일정한 응력값을 나타내었다.

4-3. 결함판정기준

ASTM D2513^[8]의 설계방법에 따라 가스용 폴리에틸렌 배관의 재질에 대하여 다음과 같이 최대 허용 가능한 응력을 구할 수 있다.

$$\text{최대허용응력} \leq \sigma_y / \text{안전율(계수)}$$

σ_y : 항복 강도

Safety Factor : 안전율(계수)

안전 계수를 2로 산정하는 경우에 최대 허용 가능한 응력은 항복강도의 1/2인 1,280 psi가 되므로, Fig. 9를 참고할 때 결함 크기가 열선 폭의 30% 이내인 경우에 허용 가능한 응력 범위 내에 있으므로 안정하다고 판단할 수 있다. 그러나 국내 폴리에틸렌 배관 및 밸브 등의 제조 및 검사 기준에 따라서 안전 계수를 4로 산정하는 경우에 최대 허용 가능한 응력은 항복강도의 1/4인 640 psi가 되어 결함 크기가 열선 폭의 10% 이상인

경우 용착 불량으로 판정할 수 있다. 위의 결과는 ASTM F1055에서 규정하고 있는 용착 시 발생하는 결함의 크기가 용착 존 길이의 10%를 초과하지 않으면 허용할 수 있다는 기준과 동일한 결과이다.

5. 고 찰

이번 연구는 폴리에틸렌 배관 용착부의 단기성능평가에 대해서 검토하였다. 용착부의 결함판정기준을 정립하기 위해서는 단기성능평가 뿐만 아니라 장기성능 평가도 고려해야 할 것이며 이와 같이 장기성능 평가를 실시할 경우에 용착부 성능은 결함 크기에 따라 많은 영향을 받을 것으로 사료된다⁹⁾. 추후에 크립 크랙 성장 또는 점탄성 크랙 성장과 같은 시간 의존적인 파괴거동을 볼 수 있는 시험과 점탄성 유한요소 모델링과 같은 응력 해석을 통하여 장기성능평가에 대한 연구를 계속하고자 한다.

참고문헌

1. Wise, R.; Brown, C.; Chipperfield, F. "Resistive Implant Welding", Chapter 7 *Plastics and Composites Welding Handbook*, D.A. Grewell, A. Benatar and J.B. Park, Editors, Hanser, 2003.
2. Lustiger, A.; Cassady, M.J.; Uralil, F.S.; Hulbert, L.E. "Field Failure Reference Catalog for Polyethylene Gas Piping", First Edition, Battelle Research Report, 1986.
3. KS M 3514 95. "Standard for Polyethylene Pipes for the Supply of Gaseous Fuels", Korean Standard, 1995.
4. ASTM D1599 88. "Standard Test Method for Short-Time Hydraulic Failure Pressure of Plastic Pipe, Tubing and Fittings", ASTM International, 1988.
5. ASTM F1055 95a. "Standard Specification for Electrofusion Type Polyethylene Fittings for Outside Diameter Controlled Polyethylene Pipe and Tubing", ASTM International, 1995.
6. ASTM D638 95. "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics", ASTM International, 1995.
7. Korean Civil Gas Safety Management Regulations for Pipe Thickness, 2000, Chapter 2-11.
8. ASTM D2513 95. "Specification for Thermoplastic Gas Pressure Pipe, Tubing and Fittings", ASTM International, 1995.
9. Kanninen, M.F.; Popelar, C.H. *Advanced Fracture Mechanics*, Chapter 7, Oxford University Press, 1985.