

온도와 압력이 가스용 폴리에틸렌관의 용접성에 미치는 영향에 관한 연구

Effect of Temperature and Pressure on the Weldability of Polyethylene Pipe for the Supply of Gaseous Fuels

김 영 규*

Young-Gyu Kim

(1995년 5월 8일 접수, 1996년 9월 20일 채택)

ABSTRACT

The welding characteristics of polyethylene pipe for gas varying temperature and pressure is analyzed in this study. The analysis is very important to studying the weldability of PE pipe as well as is useful for its welding data. The specimens have the same welding conditions. Experimental data of the bead width, height and thickness for PE welding are measured with tool projector. Experimental results for PE welding indicated that temperature more than pressure have influence on the weldability. It was confirmed that optimal PE welding within the limits of 210°C and 15kg/cm² have high welding performance in comparison with other conditions. These results are very important to improve the safety and to reliable welding components of PE gas pipe.

1. 서 론

최근 가스관련 구조물의 안전사고가 빈번하면서 이에 따른 가스배관의 안전성 문제에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 대기오염 등의 환경문제가 크게 대두되면서 액화천연가스(liquefied natural gas; LNG)는 청정 에너지로서 각광을 받고 있으며 국내에는 1986년 인도네시아산 LNG가 처음 수입된 이후로 천연가스 수요는 매년 급속한 증가추

세에 있다^{1~3)}.

기체상태로 기화된 천연가스는 일반 가정이나 산업체에 관로(pipe line)을 통하여 공급되는데 이들 가스배관은 대부분 지하에 일정한 깊이로 매몰하여 설치된다. 가스배관을 강관으로 시공하는 경우, 납땜 및 섬유를 감는 방법이 초기에 사용되었으나 이것은 가스사용압력에 제한을 받기 때문에 고압이 요구되는 곳에는 배관을 용접하여 이용하는 방법이 사용되었다. 그러나 배관용접은 전기부

* 한국가스안전공사 가스안전기술연구소

식과 응력부식이 발생되어 배관을 방식하는 유지 보수 비용의 문제가 뒤따랐다. 그 후 지하에 매몰할 수 있는 배관으로서 강관에 중밀도 폴리에틸렌 (middle density polyethylene; MDPE, 이하 PE라 함)을 피복시킨 폴리에틸렌 피복강관이 개발되어 현재까지도 사용되어 오고는 있으나, PE 피복강관도 강관의 응력부식과 열화현상에 의한 가스누출의 개연성을 항상 가지고 있기 때문에 안전성의 문제가 역시 제기되었다. 이러한 배경으로 1960년대 초에 플라스틱 재질로된 새로운 배관의 사용이 가시화 되었으며, 특히 내충격성, 내화학적, 경제성, 사용성, 용융접합성 등이 우수한 순수 중밀도 폴리에틸렌 가스배관이 사용되기에 이르렀다. 현재는 오스트레일리아를 제외한 전세계 모든 국가에서 PE관을 가스배관용으로 채택하여 주로 비교적 압력이 낮은 저압배관에 사용하고 있다.

PE는 기계적인 응력 균열저항성 및 환경응력 균열저항성이 대단히 우수하여 현재 도시가스 배관에 90% 이상 사용되고 있으며, 일본은 1979년 가스용 PE관에 관한 JIS규격이 제정되었고⁴⁾ 국내의 경우 1983도에 KS로 제정하였다⁵⁾. 최근 들어 국내에서도 PE관을 가스배관으로 매우 많이 사용하고 있다. 이와 같이 가스용 배관으로서 PE관이 많이 사용됨에 따라 PE관에 대한 용접부의 신뢰성이나 안전성을 확보하는 것이 대단히 중요한데 이에 관한 국내의 연구결과는 매우 빈약한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 PE관 용접후 이물 접합면을 관찰하여 접합조건에 따른 용접상태를 규명하고, PE관 용접에 관한 기본데이터로 활용할 수 있는 최적의 용접조건을 도출하여 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 사용재료

실험에 사용된 재료시편은 KSM 3514, 가스용 폴리에틸렌관에 규정되어 있는 상단압력등급(standard dimension ratio; SDR)이 11이하인 호칭 75A배관으로 가스사용압력은 4kg/cm²이하이다⁵⁾. 폴리에틸렌⁶⁾은 원유를 증류하게 되면 납사

(naphta)가 추출되며, 크래킹(cracking)하게 되면 에틸렌이 생성된다. 이때 에틸렌을 촉매와 반응시켜 폴리에틸렌을 중합하게 되는데, 출하된 입상 폴리에틸렌을 압출성형하여 최종적으로 PE관이 제조되며, PE용접실험에 사용된 시편의 규격과 PE관의 물성 및 기계적인 특성은 Table 1과 Table 2에 각각 주어졌다.

Table 1 Dimension of PE pipe specimen

Nominal size of pipe	Outside diameter(mm)		Thickness (mm)		Length (mm)	Inside diameter (mm)
	size	allowance	size	allowance		
75A	89.0	±0.3	8.1	+1.1(0)	600	71.7

Table 2 Physical and mechanical properties of PE

Density (g/cm ³)	Yield strength (kg/cm ²)	Tensile strength (kg/cm ²)	Elongation (%)	Shore hardness	Thermal expansion (cm/cm°C)	Thermal conductivity (W/cm°C)
0.94	186	265	600	59	2.4×10 ⁻⁴	0.36

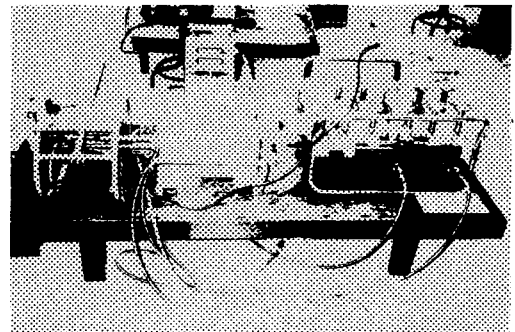


Fig. 1 Photograph of polyethylene butt welding machine

2.2 실험장치

본 연구에서 사용한 실험장치 및 기기는 폴리에틸렌 버트용접기(butt welding machine), 유압장치, 히터로서 Fig. 1과 같이 구성되었다. 유압장치에는 최대압력 100kg/cm²까지 가압할 수 있는 메인펌프가 내장되어 있으며, 용접기 몸체의 액츄에이터에 설치된 PE관 그립(grip)의 이송속도를 초당 5~10m로 전후진시킬 수 있는 4포트-2위치 전환밸브가 있다. 히터판의 온도는 히터의 표면과 중심부에 설치된 Chromel-Alumel 열전대로 감지하여 히터의 온도변화를 설정하거나 측정할 수 있

게 하였다.

2.3 실험방법

실험은 PE관의 접합하고자 하는 길이를 절단하고 접합면에 불순물 특히 먼지, 습기, 기름류 등이 없게 깨끗이 제거하여 배관을 맞대기 용접(butt welding)하였다. 폴리에틸렌관이 서로 맞닿는 히터표면(heater surface)의 온도는 150~240℃까지 30℃의 온도차를 주어 가면서 1차실험을 하였으며, 또한 각각의 경우에 대한 유압펌프의 압력변화는 10~40kg/cm²까지 10kg/cm²의 압력차를 주어 2차실험을 수행하였다.

PE용접은 처음에 히터면에 닿은 PE관을 가압 용융, 가열유지, 히터판 제거, 가압접 그리고 자연냉각시키는 순서로 진행된다. 히터판과 접촉한 배관단면부의 가열유지는 60초, 히터판 제거는 5초이내로 각각 실시하였고, 용접후의 냉각은 용접부를 포함한 배관전체를 움직이지 않게 완전히 고정된 상태에서 3분 이상의 시간을 충분히 주어 용접부의 열수축이나 잔류응력에 의한 비드변형과 배관의 비틀림 현상을 방지하였다. 또한 공구투영기(tool projector)를 이용하여 용접부의 단면비드형상을 계측하였다.

3. 실험결과 및 고찰

가스용 폴리에틸렌관에 대한 실험은 히터의 온도변화와 압력을 변화시켜 가면서 각각 수행하여 용접된 PE관의 대표적인 형상을 Fig. 2에 제시하였다. PE관 용접시 비드는 배관의 내측과 외측에 거의 대칭적인 형상으로 발생하게 되는데 제시된 사진에서는 외측의 비드형상만을 볼 수 있다. 따라서 용접성을 평가할 수 있는 용접후의 PE관 단면을 Fig. 3과 같이 정의하여 비드폭, 비드높이, 비드두께를 온도와 압력변화에 대하여 측정하였으며 그 결과를 Figs. 4~8에 제시하였다.

Figs. 4(a)~(b)는 폴리에틸렌관과 접촉한 히터의 표면온도와 압력에 따른 비드폭의 결과를 보여주고 있는데 비드폭은 압력과 온도가 높아짐에 따라 증가하는 경향으로 나타났다. 특히 온도 150℃에서의 비드폭은 나머지 다른 온도곡선에서의 비드폭에 비하여 비교적 그 범위가 넓게 발생되었으며 온도변화에 따른 실험결과도 이와 비슷한 양상

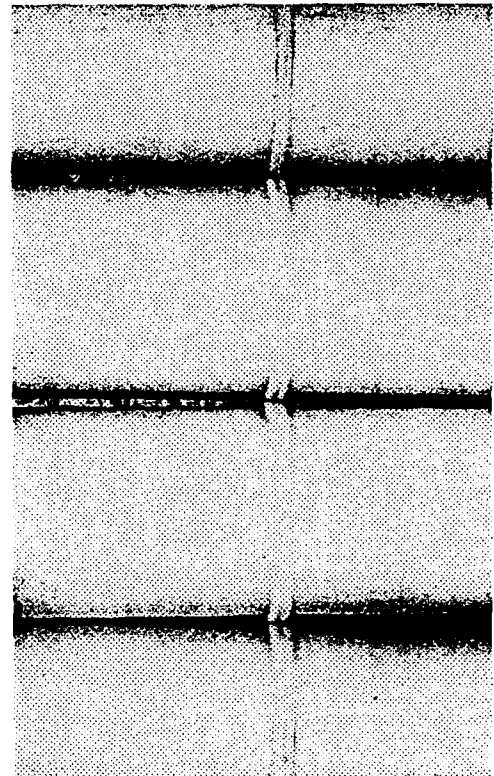


Fig. 2 Bead shapes of the welded PE pipe

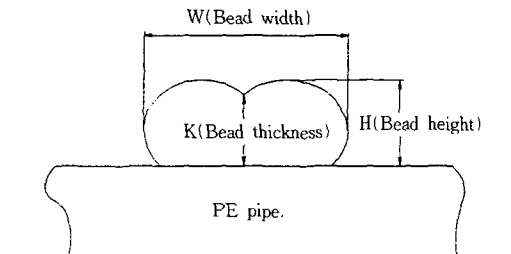
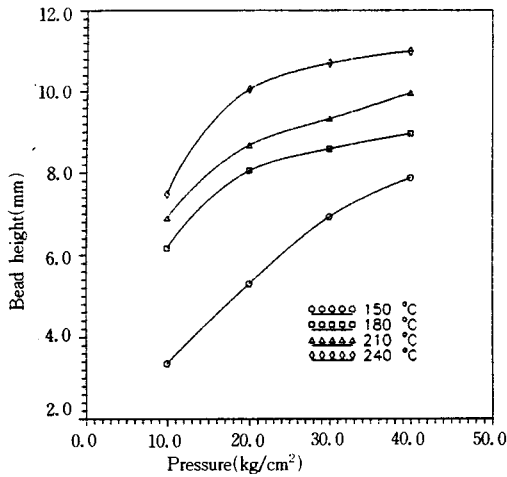


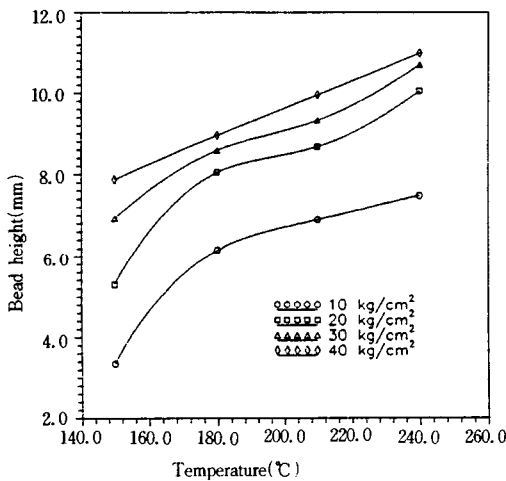
Fig. 3 Definition of the PE welding parameters

을 보여준다. 일본에서는 PE관의 용접에 대한 비드폭 W값을 5~8mm의 범위 내에 존재하도록 규정하여 사용하고 있다⁷⁾. 따라서 해석결과에 의하면 비드폭은 온도와 압력을 일정수준이하로 제한하여야 일본에서 적용되는 기준치를 만족하게 되므로 온도 200℃, 210℃, 220℃에서 압력을 20kg/cm², 15kg/cm², 10kg/cm²이하로 각각 규제하면 적절한 비드폭을 유지할 수 있을 것으로 생각된다.

한편, PE 맞대기 용접시 히터표면의 열량은 전



(a)



(b)

Fig. 4 Bead width for the varying pressure and temperature

도(conduction)에 의해 PE관내로 전달되는데 이때 3차원 열전달 지배방정식은 다음과 같이 표현된다⁸⁾.

$$\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q_i = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \dots (1)$$

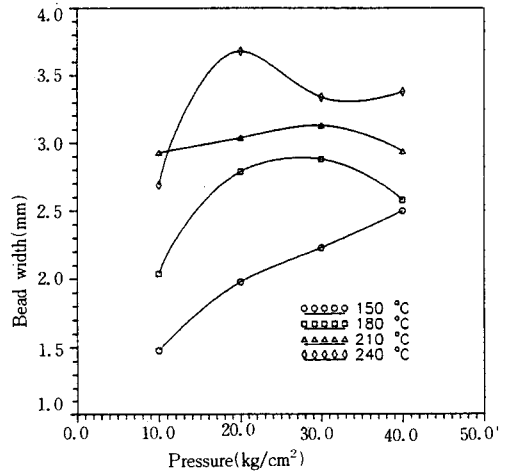
여기서 T는 온도, κ 는 열전도계수, Q_i 는 내부열 발생율, ρ 는 밀도, c는 비열, t는 시간을 각각 의미한다. 이 지배방정식에 적용되는 경계조건은 표면에서 열이 Flux로 유입되고 있으며, 대기로 대

류에 의해 열전달이 일어난다.

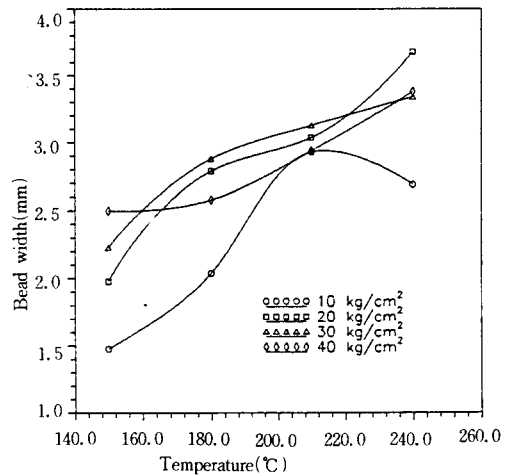
또한 폴리에틸렌관의 용접에 있어서 중요한 인자중의 하나로 작용하는 요구압력 P_d 는 다음 식으로 계산된다⁹⁻¹⁰⁾.

$$P_d = P_a + P_f \dots (2)$$

여기서 P_a 는 가압용융압력, P_f 는 파이프의 이동시 발생하는 마찰력을 각각 의미하는데, 파이프가 길게 되면 상대적으로 P_f 값이 증가하게 된다. 그러나 PE관 용접시 접합할 PE관의 길이는 0.6m 정도에 불과하기 때문에 궁극적으로 식(2)로 주어진 P_d 값의 결과는 큰 차이를 보이지 않는다.



(a)



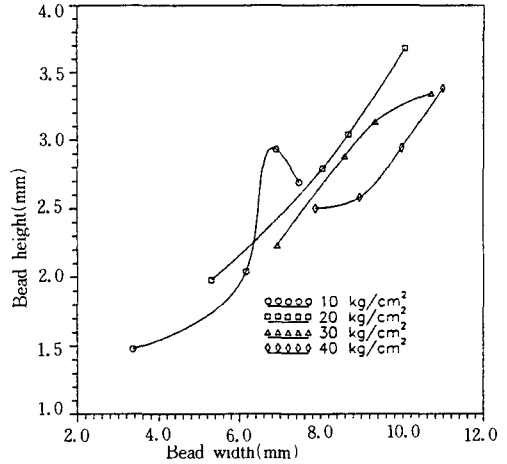
(b)

Fig. 5 Bead height for the varying pressure and temperature

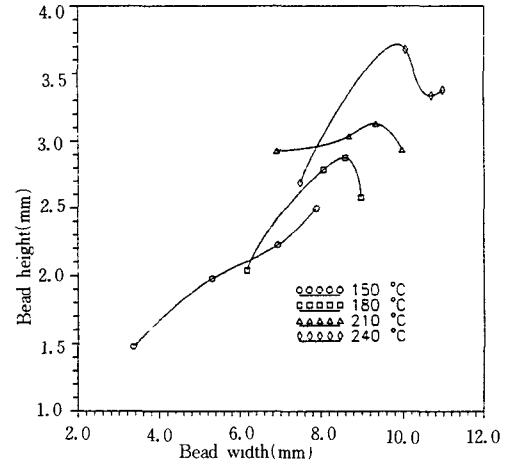
Fig. 5(a)의 압력변화에 따른 비드높이는 온도 210°C에서 비드높이의 최대값과 최소값과의 차이 즉, 변화폭이 가장 낮게 발생되고 있는 것을 볼 수 있는데, 이와 같은 결과는 PE 용접시 압력의 증가는 비드높이에 큰 영향을 주고 있지 못하며 상대적으로 온도에 의한 영향이 크기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 5(b)의 온도상승과 비드높이의 관계를 살펴보면, 온도가 높아지면 비드높이도 증가하는 경향으로 나타났으며, 특히 압력 10kg/cm²에서 PE 용접을 실시한 경우의 결과는 온도가 상승함에 따라 비드높이는 증가하다가 온도 240°C에서 감소하는 것으로 나타났다. 또한 전체적인 압력곡선상에서 온도 210°C일 때 비드높이는 2.9~3.1mm로서 다른 온도에서 측정한 비드높이의 수준에 비하여 상당히 안정적인 것으로 나타났다.

Fig. 6은 비드높이와 비드폭과의 관계를 제시하였는데, Fig. 6(a)의 압력 20kg/cm²에서의 비드폭에 대한 비드높이는 선형적으로 증가하고 있는 반면에 다른 값들에서는 불규칙한 양상을 보여주고 있다. 또한 Fig. 6(b)의 온도변화에 의한 결과를 보면 온도 210°C일 때 비드폭의 변화에 대한 비드높이의 상승도는 6.9%로서 다른 온도에서의 상승도 45%에 비하여 매우 낮은 수준으로 나타났다. 따라서 이들 결과로부터 PE 용접에서는 온도와 압력에 의한 영향이 크기 때문에 반복적인 방법을 사용한 최적의 온도와 압력값을 찾아내어 이들 조건값에서 PE 용접을 실시하므로써 적절한 비드높이와 비드폭을 갖도록 하는 것이 대단히 중요하다.

압력과 온도변화에 따른 용접비드의 단면두께는 Fig. 7에서 보여주고 있다. Fig. 7(a)의 압력변화의 결과에서 온도 210°C의 비드구배는 압력의 크기가 증가함에 따라 비드두께의 변화폭이 완만한 선형으로 나타남을 보여주고 있으며, 다른 온도곡선의 경우 압력증가에 대한 비드두께는 그 구배가 상당히 크게 나타나고 있다. 또한 Fig. 7(b)는 압력을 일정하게 고정하고 온도를 변화시켜 가면서 해석한 결과로서, 특히 모든 압력곡선상의 비드두께는 온도 210°C에서 근사적으로 수렴하고 있는 것을 볼 수 있다. PE관 용접시 비드두께는 Fig. 3에서 정의된 용접파라미터 중에서 강도 및 안전성에 미치는 영향이 가장 큰 중요한 요소이다. 따라서 압력과 온도를 일정한 범위 내에서 어느 정도는



(a)



(b)

Fig. 6 Relation between bead height and bead width

제한하여야 보다 우수하고도 안정적인 비드두께를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

한편, PE 용접에 따른 용접부위의 단면두께 K는 독일 DVS(German association for welding)에 K>0으로 규정되어 있고¹⁰⁾, ISO에서는 다음 식으로 계산된 수치이상의 값이 요구된다¹¹⁾.

$$K = 0.5 + 0.1 \times T_h \dots\dots\dots (3)$$

여기서 T_h는 폴리에틸렌관의 두께를 나타낸다. 따라서 실험에서 측정된 비드두께의 평균치는 약 2.2mm로서 식(3)에서 구한 이론값 1.3mm에 비하여 약 69.2%이상 증가한 비드수준을 나타내어 매우 우수하고도 신뢰할 수 있는 용접성능을 가

질 것으로 생각된다.

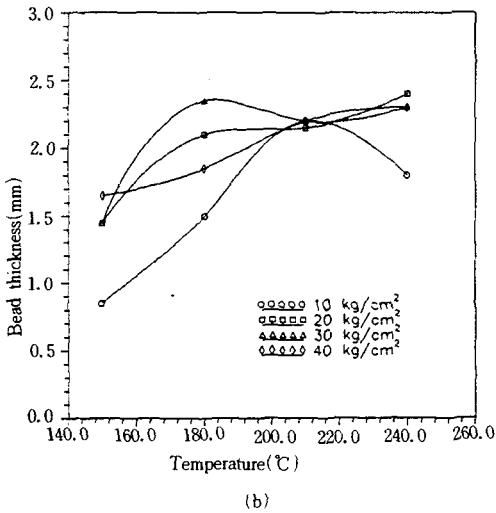
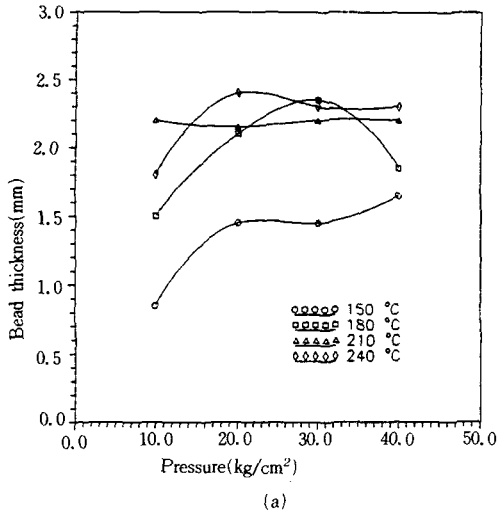


Fig. 7 Bead thickness for the varying pressure and temperature

Fig. 8(a)에 제시된 결과를 보면, 비드두께는 비드높이의 변화에 대하여 압력 20kg/cm²일 때 비교적 선형적으로 증가하는 현상을 보이면서 비드폭간의 거리분포도 다소 길게 나타났다. Fig. 8(b)에서는 이와는 다소 상이한 결과를 보여주고 있는데, 특히 온도 210°C 구간에서의 비드폭과 비드폭과의 거리는 매우 짧게 나타났다. 이들 실험결과에 의하면 비드높이와 비드두께도 PE관의 단면에 가해지는 압력과 온도에 크게 의존하는데 이러한 관계들로부터 최적의 용접조건을 도출할 수 있다.

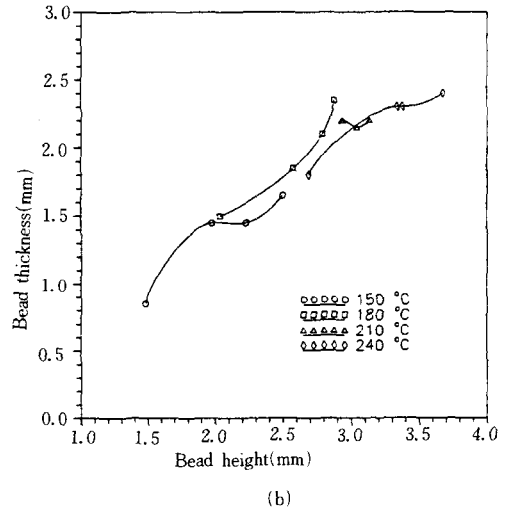
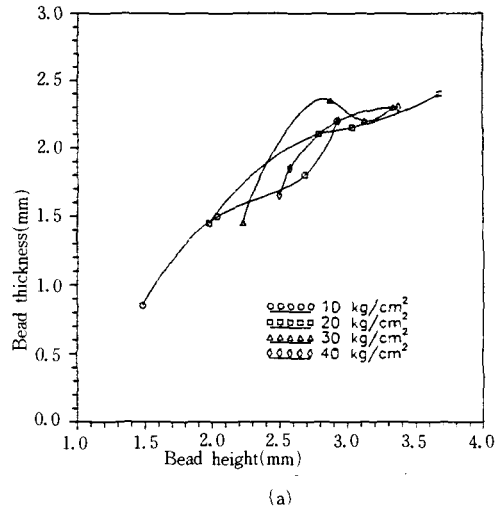


Fig. 8 Relation between bead thickness and bead height

4. 결 론

최근 도시가스배관으로 사용후세가 급증하고 있는 가스용 폴리에틸렌관(PE pipe)에 대한 용접성을 알아보기 위하여 버트용접기의 히터온도와 압입압력을 변화시켜 가면서 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) PE관 용접에서 용접비드는 접합면에 작용하는 압력보다는 온도에 더 큰 영향을 받는다.
- 2) 용접비드의 단면두께 K값은 온도 210°C에서 2.2mm로 나타났으며, 이것은 ISO기준치 대비

69.2%이상의 높은 수준으로서 매우 안정적인 결과로 나타났다.

- 3) PE관 용접시 최적의 용접 온도와 압력은 각각 210°C와 15kg/cm²임을 알 수 있었으며, 이때 용접부의 비드폭 W는 6~8mm로 발생되어 일본기준치(5~8mm)를 충족하였다.

참 고 문 헌

- 1) L. K. Donald and L. L. Robert, Natural Gas Engineering Production and Storage, McGraw-Hill, New York, pp. 5~17, 1990.
- 2) 가스사고 연감, 한국가스안전공사, pp. 11~15, 1996.
- 3) 고압가스통계, 한국가스안전공사, pp. 7~8, 1995.
- 4) JISK 6774, 가스용 폴리에틸렌관, 1979.
- 5) KSD 3514, 가스용 폴리에틸렌관, 1983.
- 6) 이국, 플라스틱기술, 성안당, pp. 144~154, 1989.
- 7) 폴리에틸렌관공사요령, 일본서부가스(주), pp. 101~110, 1992.
- 8) J. P. Holman, Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, pp. 3~14, 1986.
- 9) Polyethylene 가스관 System, 대림산업(주), pp. 17~21, 1993.
- 10) DVS 2207, part 1, 1992.
- 11) ISO 161, part 1, 1991.