

플라스틱 배관의 접합 조건에 관한 연구

이철구⁺, 이우람*, 박철양⁺⁺

(논문접수일 2011. 08. 25, 수정일 2011. 10. 05, 심사완료일 2011. 10. 07)

A Study of Welding Conditions for Plastic Piping

C.K. Lee⁺, W.R. Lee*, C.Y. Park⁺⁺

Abstract

The current establishment of city gas piping polyethylene (PE) tube used as bonding state or part of the health or safety of fusion is very important. A part of these fusion methods to determine the soundness of the short-term trials and long-term tests can be largely classified. Typical tests include short-term strength, tensile strength, impact strength, compressive strength, resiliency and compression. Polyethylene (PE) pipes installed in the domestic terms of overall penetration rate of 45% has been used. However, polyethylene (PE) pipes have reliability problems, and these occurs mostly in part by defective welding. Therefore, the test is necessary for safety. Non-destructive methods (ultrasonic testing) are difficult to be used. Therefore, Polypropylene copolymer (PP-C), polypropylene homopolymer (PP-H), and polyethylene (PE) pipe are used. Fusion of thses materilas is necessary in these field however, its technical, and basic research has not been studied well. In this research, short-term strength of welding parts, its tensile strength, hardness, fatigue, and microstructure have been analyzed to find the optimum process conditions to improve mechanical properties.

Key Words : Poly propylene(폴리 프로필렌), Short-term trials(단기수압시험), Fatigue life(피로수명), Tensile strength(인장강도), Hardness(경도), Fusion temperature(융착온도)

1. 서론

현재까지 가스 배관용 플라스틱 관련 산업계에서는 내·외장 부품으로 주로 석유화학 원료로부터 제조되는 고분자수지를 사용한 것이 일반적이다. 국내에서 2000년대까지만 해도 자동차 내·외장 재료에는 금속이 주종을 이루었으나, 금속배관의 경우 부식 및 시공상에 복잡성으로 많은 문제점이 도출되고 있다⁽¹⁾. 그러나 폴리에틸렌(PE: Polyethylene), 폴리프로필렌(PP:

Polypropylene:), 폴리염화비닐(PVDF: Polyvinylidene Fluoride) 등을 사용하는 사례가 소개되면서 국내에서도 이를 이용한 엔지니어링 플라스틱의 사용을 검토 하게 되었다. 또한 환경적 요인이 대두되면 면서 액화천연가스(LNG: Liquefied natural gas)가 청정에너지로서 각광을 받아 국내에서는 1986년 인도네시아산 LNG가 처음 수입되었고 그 이후 2001년에는 천연가스 차량이 국내에서 200대 가량의 버스에 시범적으로 운용되고 있으며, 천연가스 수요는 매년 급속한 증가추세이다⁽²⁾. 엔지

+ 서울과학기술대학교 기계공학과

* 교신저자, 서울과학기술대학교 NID 융합기술 대학원 (wooramlee@snut.ac.kr)

주소: 139-743 서울시 노원구 공릉동 172

++ 서울과학기술대학교 산업대학원

니어링 플라스틱의 접합에는 접착제를 사용하는 방법도 있으나 이는 충격이나 진동, 열, 습기에 의해 분리되므로 현재 자동차 내장재로써 사용되고 있는 폴리프로필렌의 접합상태(용접부 결합), 즉 용착부의 건전성이나 안전성을 확보하는 것이 대단히 중요하다. 이러한 용착부의 건전성을 파악하는 방법으로는 단기시험과 장기시험으로 크게 분류할 수 있다. 단기강도의 대표적인 시험항목으로는 인장강도, 충격강도, 내압강도, 압축복원성 등이 있으며, 장기강도는 크리프강도, 내환경 응력균열성, 내기후성, 화학적 안전성 등이 대표적이다⁽³⁾. 또한 T.H Striplin은 맞대기 용착부에 관한 검사 기법으로 초음파를 이용한 평가 방법을 연구한 바 있고⁽⁴⁾, D.S.Rover는 폴리프로필렌 수지의 확산 거동에 대한 시간과 온도의 특성을 규명하고 이것으로부터 거대 분자 내부 확산에 의한 용착 개념을 기초로한 용착 이론을 제시하였으며⁽⁵⁾, A.Hillersborg는 가스용 PP재 열용착의 육안 검사 기준에 관한 연구를 하였고, M.Wolter는 PP관의 맞대기 용착에 관한 연구를 실시하였다. 이와 같이 PP관에 많은 연구가 진행되어 왔으나 국내에서는 이 분야에 대한 학문적, 기술적, 기초 연구가 부족한 실정이다. 반면 접착제는 크게 비전도성 접착제, 전도성 접착제로 나눌 수 있으며, 전도성 접착제는 다시, 이방성 전도성 접착제, 등방성 전도성 접착제로 나눌 수 있다. 비전도성 접착제의 접속에서는 수분에 의한 고분자 상의 부피 변화 및 고분자와 칩 또는 기판 간의 계면 박리, 범프와 패드 사이의 벌어짐 및 크래킹 등이 일어나 접합 불량률이 발생된다. 이러한 문제점은 비전도성 무기 입자의 첨가를 통하여 열팽창 계수를 낮춤으로써 접착 안정성을 얻을 수 있다. 최근 접착제의 소재로 사용되고 있는 에폭시 및 기타 수지는 내열성, 내 부식성, 접착력, 전기절연성 등의 물성이 우수하여 전기·전자 기계 산업분야에 많이 사용되고 있는 고분자 재료이다. 그러나 경화도가 높아지는 경우, 쉽게 부서지는 경향이 나타나며 열안정성 및 치수 안정성 등에서 접착 소재로서 아직 까지도 해결해야 하는 단점이 있기 때문에 엔지니어링 플라스틱의 접착에서는 접착제의 사용 보다는 용착이 확실한 접합 방법이다⁽⁶⁾. 따라서 본 실험은 단기강도의 일부분으로써 다양한 조건에서 용착을 실시한 후 인장, 경도, 피로, 외관형상 등을 실시하여 용착 시 최적의 압력과 온도를 규명하고자 하였다. 하지만 PP관은 신뢰성에 대한 문제가 있고, 일반적으로 결합이 용착부에서 주로 발생하여, 이 부분의 안전성에 대한 검사가 필요할 실정이다. 아울러, 이 용착부위는 비파괴적인 방법(초음파 탐상검사)에 의해서는 완벽한 안전성을 파악하는데 어려움이 있다⁽⁷⁾. 따라서, PP관을 이용하여 용착부가 적정한 강도를 유지하고 있는지 확인하고, 현장에서 필요한 용착 공정에 대한 기본 데이터를 제시하며, 용착의 신뢰성을 입증 할 필요가 있다. 본 연구의 목적은 다양한 조건, 즉 가열 온도, 압력, 용융 시간, 가열 유지 시간, 압착 시간에 변화를 주면서, 가스 배관으로 주로 사용하는 PP관을 이용하여, 용착을 하여, 비드의 형상,

폭, 높이, 두께 등 육안 검사로 접합상태를 파악하였고, 적당할 길이로 절단 연마한 후 용착 변수들을 달리하면서 용착하여 시험편을 제작, 인장 강도 시험을 실시하고 그 결과를 바탕으로 국내외 관련규격과 비교하여 최적의 용착 변수를 파악하였다.

2. 열용착(heat anastomosis) 공정

열용착 공정은 열(heater)을 사용하여 열판으로부터 용착하고자 하는 부위를 열전도에 의하여 용융시킨 후 히터를 제거하고 압착압력을 가하여 접합하는 방법이다⁽⁸⁾. 용착에는 맞대기(butt), 소켓(socket), 새들(saddle)용착이 있다. 맞대기(sutt)용착은 75A이상의 관 및 이음관 용착에 적용되며, 이 용착을 하기 위한 준비작업으로는 규격확인 → 손상확인 → 면취 → 열판의 온도 → 관의 예열 → 정결 → 용착기 상태점검 → 진원도 확인 → 관의 정렬 → 오염방지 등이 있다. 여기서 특히 주의해야 할 사항은 관 및 이음이 두께의 10%이상 손상되었을 경우 사용하지 말고, 또한 관 표면에 산화피막 및 자외선에 의해 노출된 영역은 필히 제거해야 한다. 또한 면취 단면의 틈새는 1mm이상 되지 않도록 해야 하며 파이프의 어긋남은 파이프 두께의 10%미만이어야 한다⁽⁹⁾.

위 사항은 용착을 하기 위해 꼭 필요한 주의사항이다. 용착의 공정단계는 다음과 같다.

- ① 가압용융(heating soak) : 관 또는 합쳐지는 접합이음관을 히터에 접촉시켜 가압하면서 용융한다. 이것은 정상적으로 열판으로부터 용융부위로 열전도가 이루어져 고르게 용융시키기 위하여 열판에 용융시키고자 하는 면을 밀착시킴이 그 목적이다. 방법으로는 용융부위 단면적당 490kPa의 압력으로 비드 전 둘레에 걸쳐 압력을 가해야 한다.
- ② 가열유지(pressure built-up) : 관 또는 합쳐지는 접합 이음관을 히터에 가볍게 밀착한 상태로 가열하여 용착을 하고자 하는 부위를 실질적으로 용융시키는 공정으로 용융부위에 비례하여 가열유지 시간을 충분히 지켜 관축 방향에 열을 충분히 전달시킨다.
- ③ 히터제거(plate removal) : 용융부위를 용착시키기 위하여 삽입된 열판을 용융부위로부터 신속하게 제거함을 목적으로 하며, 방법으로는 용착기 클램프를 열리게 하여 용융면이 열판으로부터 이탈되게 한 상태로 히터를 제거한다.
- ④ 압착(heat melting) : 관 또는 합쳐지는 접합이음관의 용융면끼리 압착하는 것으로서 히터제거 후 용융부위가 냉각되기 전에 신속하게 압력을 가하여 일정시간 용융부위가 밀착·접합하도록 단면적당 147kPa의 압력을 유지시킨다.
- ⑤ 냉각(Cooling) : 접합부를 냉각시키기 위한 목적으로 이 부위를 일정시간 이상 가만히 놓고 냉각한다⁽¹⁰⁾.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

실험장치는 열과 압력 모두 제어 가능한 열융착기를 사용하였다. Fig. 1 는 열융착에 대한 모식도 이다. X축으로 압력을 가해주고, Y 축에서 접합부를 용융시키는 구조이다.

3.2 실험조건

Table 1은 실험 변수에 따른 용착 조건이다. 가열온도는 210~250℃ 까지 10℃씩 증가시켜 가며 용착 하였다. 이에 따른 가압력은 50 ~ 150kg/cm² 까지 50kg/cm² 씩 증가 시켜가며 실험 하였다. 용착 시간은 10sec, 온도 유지 시간은 60sec 으로 고정하여 실험하였다.

3.3 분석방법

폴리프로필렌에 최적의 용착 조건을 만족하기 위하여 인장, 경도, 피로수명 등 3가지 분석실험을 하였다. 인장시험기는 Instron사의 5800series 로 수행되었으며, 최대 200kN의 용량을 갖는 재료 시험기이다. 시험절차는 KS B 0802에 명시된 절차를 준수하였으며 시험방식으로는 변위제어방식을 사용하였다. 이때의 시험 속도는 5.0mm/min으로 고정하였다. 경도시험은 Wolpert Wilson Instruments 사의 402MVD를 사용하였으며, 적용하중은 50gf(Hv 1)로 설정하였다. 상판 기준 하부 0.1mm 아래에서 0.3mm 간격으로 열영향을 받지 않는 모재까지 충분한 범위를 측정하였다. 피로시험은 ASTM E 466에 따라 Instron 사의 8802 모델을 사용하였으며, 응력비(stress ratio, R)는 -1이고, 적용 인장응력의 반복률은 20Hz 로 고정하였다. 시험에 가해지는 응력은 순수 인장응력 상태이며, 시험편에 적용되는 인장응력은 식 (1)과 같은 탄성보의 방정식(elastic beam equation)을 사용하였다. 여기서, c는 시험편의 최소 반

경, M은 인장 및 압축 모멘트, P는 적용하중, L은 모멘트 거리 그리고 I는 관성모멘트이다.

$$\sigma_b = \frac{M}{I} C = \frac{16PL}{\pi d_s^3} \quad (1)$$

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 외관형상

(1) PP-C

Fig. 2 은 각각 용착 압력 별 230℃ 에서의 PP-C에 대한 외관 형상이다. 온도에 따라서 용착된 부분의 형상이 다르게 나왔다. 이는 용융온도, 가해진 압력에 따라서 형상이 다르게 나온 것으로 추정한다.

(2) PP-H

Fig. 3은 각각 용착 압력 별 230℃ 에서의 PP-H에 대한 외관 형상이다. 온도에 따라서 용착된 부분의 형상이 다르게 나왔다. 이는 용융온도, 가해진 압력에 따라서 형상이 다르게 나온 것으로 추정한다.

4.2 인장시험

(1) PP-C

Fig. 4 는 각 조건별 10회 씩 인장 실험한 결과에 대한 평균값을 그래프화 하였다. 210℃ 를 기준점으로 용착한 경우 압력 50kPa 에서 약 5, 11, 7, 3kPa 씩 차이가 났다. 동일한 방법으로 압력 100kPa 에서는 10, 13, 10, 2kPa, 압력 150kPa 에서는 2, 8, 7, 3kPa 씩 차이가 났다. 온도 230℃ 에서 플라스틱의 재결정이 많이 이루어 진 것으로 추정한다. 인장시험의 경우 온도 230℃, 압력 100kPa이 적정 조건으로 추정한다.

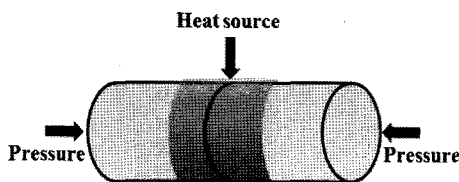


Fig. 1 Design of heat anastomosis sample

Table 1 Experimental parameters

Type	PP-C	PP-H
Temperature(℃)	210 ~ 250	
Pressure(kPa)	50 ~ 150	
Heat melting time(sec)	10	
Heating soak time(sec)	60	

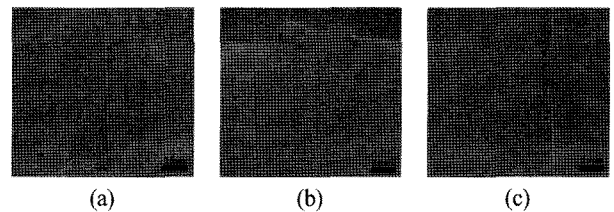


Fig. 2 Shape of PP-C (50 ~ 150kPa)

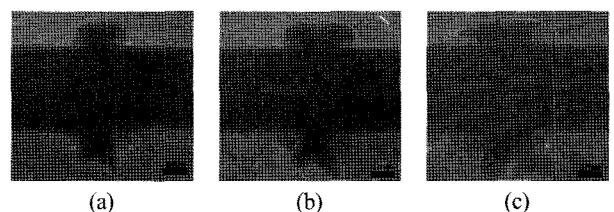


Fig. 3 Shape of PP-H (50 ~ 150kPa)

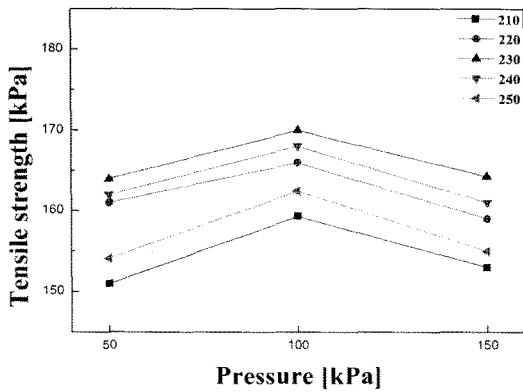


Fig. 4 Experimental results of tensile test PP-C

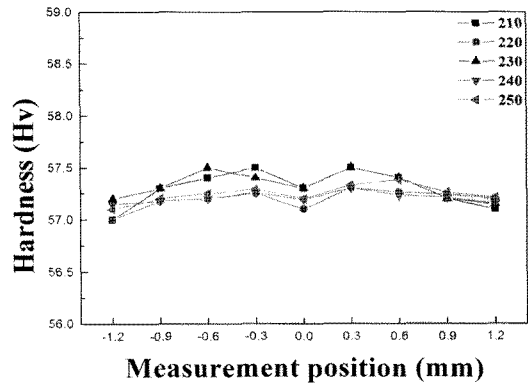


Fig. 6 Experimental results of hardness test PP-C

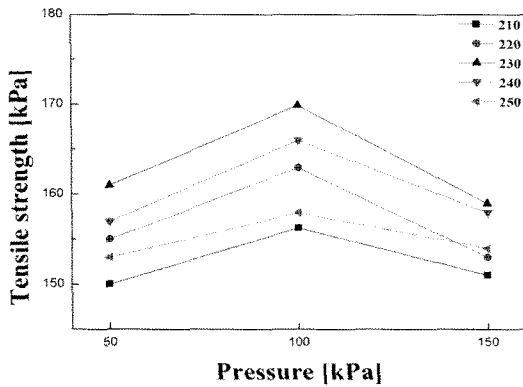


Fig. 5 Experimental results of tensile test PP-H

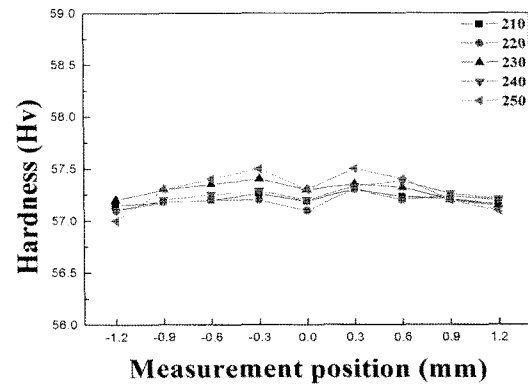


Fig. 7 Experimental results of hardness test PP-C

(2) PP-H

Fig. 5 는 각 조건별 10회 씩 인장 시험한 결과에 대한 평균값을 그래프화 하였다. 210°C 를 기준점으로 융착한 경우 압력 50kPa 에서 약 10, 13, 11, 3kPa씩 차이가 났다. 동일한 방법으로 압력 100kPa 에서는 7, 11, 9, 3kPa, 압력 150kPa 에서는 6, 11, 8, 2kPa 씩 차이가 났다. 온도 230°C 에서 플라스틱의 재결정이 a많이 이루어진 것으로 추정한다. 인장시험의 경우 온도 230°C, 압력 100kPa이 적정 조건으로 추정한다.

4.3 경도시험

(1) PP-C

Fig. 6 는 압력 조건 50kPa에서의 경도 시험한 결과의 대한 값을 그래프화 하였다. 210°C(57.09Hv) 기준으로 평균 0.14, 0.22, 0.28, 0.14Hv 씩 차이가 났다. 압력 조건 100kPa에서 경도 시험한 결과 210°C(57.2Hv) 기준으로 평균 0.11, 0.08, 0.04, 0.04Hv 씩 차이가 났고, 150kPa에서 경도 시험한 결과 210°C(57.3Hv) 기준으로 평균 0.1, 0.09, 0.03, 0.01Hv 씩 차이가 났다. 이는 플라스틱 재질은 금속 재질에 비해 온도에 따른 재결정이 이루어지더라도 경도 변화는 없었다. 평균적으로 230°C에서 약간 큰 경도 변화가 있었다.

(2) PP-H

Fig. 7 는 압력 조건 50kPa에서의 경도 시험한 결과의 대한 값을 그래프화 하였다. 210°C(57.2Hv) 기준으로 평균 0.02, 0.08, 0.04, 0.1Hv 씩 차이가 났다. 압력 조건 100kPa에서 시험한 결과 210°C(57.2Hv) 기준으로 평균 0.06, 0.09, 0.08, 0.01Hv 씩 차이가 났고, 150kPa에서 시험한 결과 210°C(57.2Hv) 기준으로 평균 0.06, 0.09, 0.01, 0.04Hv 씩 차이가 났다. 플라스틱 재질은 금속 재질에 비해 온도에 따른 재결정이 이루어지더라도 경도에 변화는 없었다. 평균적으로 250°C에서 약간 큰 경도 변화가 있었다.

4.4 피로시험

(1) PP-C

압력 조건 50kPa에서 피로 시험한 결과 210°C 기준으로 2, 3, 1, 3, 2 개씩 파괴가 일어나지 않았다. 이에 대한 평균 차이는 210°C(70.3kPa) 기준으로 5.1, 4, 6.1, 3.2kPa 씩 증가하였다. Fig. 8 는 압력 조건 100kPa 파괴된 시편의 피로한도에 대한 값을 log-log scale로 변환하여 최소 자승법에 의해 피팅(fitting)하였다. 시험한 결과 210°C 기준으로 1, 1, 3, 1, 2개씩 파괴가 일어나지 않았다. 이에 대한 평균 차이는 210°C(72.9kPa)

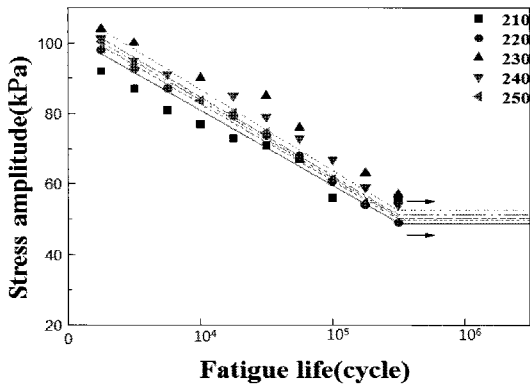


Fig. 8 S-N curve(log scale) for fatigue analysis 230°C PP-C

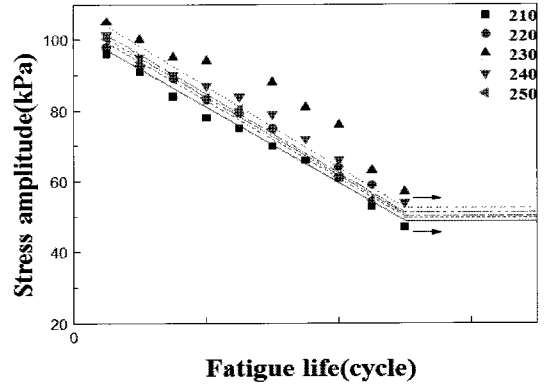


Fig. 9 S-N curve(log scale) for fatigue analysis 230°C PP-H

기준으로 1.6, 2.7, 0.4, 2.4kPa 씩 증가하였다. 압력 조건 150kPa 실험한 결과 210°C 기준으로 4, 4, 3, 4, 3개씩 파괴가 일어나지 않았다. 이에 대한 평균 차이는 210°C(71.8kPa) 기준으로 2.6, 5.2, 3.1, 2.3kPa 씩 증가하였다. 피로시험을 실시한 시험편의 균열은 모두 용착부에서 발생하여 모재 두께방향으로 형상을 유지하면서 관통된 후 진전되면서 파단 되었고, 인장 시험의 결과와 거의 동일한 결과를 나타내었다. 용착부의 적정 온도의 개선으로 피로수명 증가 시킬 수 있을 것으로 여겨지며, 단순 인장응력 범위가 150kPa이하인 실제 플라스틱 용착 이음부의 피로강도는 온도 및 압력 변수에 의해 크게 향상될 것으로 기대된다.

(2) PP-H

압력 조건 50kPa에서 피로 실험한 결과 210°C 기준으로 1, 2, 1, 2 개씩 파괴가 일어나지 않았다. 이에 대한 평균 차이는 210°C(72.6kPa) 기준으로 2.1, 5.3, 3.1, 1.8kPa 씩 증가하였다. Fig. 9 는 압력 조건 100kPa 실험한 결과 파괴된 시편의 피로한도에 대한 값을 log-log scale로 변환하여 최소 자승법에 의해 피팅(fitting)하였다. 210°C 기준으로 0, 2, 1, 2, 3개씩 파괴가 일어나지 않았다. 이에 대한 평균 차이는 210°C(72.7kPa) 기준으로 1.8, 5.4, 3.4, 2.6kPa 씩 증가하였다. 압력 조건 150kPa 실험한 결과 파괴된 시편의 피로한도에 대한 결과이다. 210°C 기준으로 2, 1, 2, 1, 2개씩 파괴가 일어나지 않았다. 이에 대한 평균 차이는 210°C(71.9kPa) 기준으로 2.9, 5.2, 4.3, 3.5kPa 씩 증가하였다. 피로시험을 실시한 시험편의 균열은 모두 용착부에서 발생하여 모재 두께방향으로 형상을 유지하면서 관통된 후 진전되면서 파단 되었다. 피로시험 결과 인장시험의 결과와 거의 동일한 결과를 나타내었다. 용착부의 적정 온도의 개선으로 피로수명 증가 시킬 수 있을 것으로 여겨지며, 단순 인장응력 범위가 150kPa이하인 실제 플라스틱 용착 이음부의 피로강도는 온도 및 압력 변수에 의해 크게 향상될 것으로 기대된다.

4.5 조직시험

(1) PP-C

Fig. 10는 위 실험들을 통하여 가장 적절한 조건인 100kPa 압력에서의 PP-C에 대한 미세 조직 형상이다. 배율은 X3000로 고정 하였다. 압력에 따라서 용착 된 부분의 형상이 다르게 나왔다. 모재부분에서는 열이 가해지지 않았기 때문에 미세한 기포만이 검출 되었다. 이는 재료가 가열되면서 재결정이 이루어지고, 압력의 크기에 따라 용착부가 불규칙하게 생성된 것을 확인 할 수 있다. 따라서 용융온도, 가해진 압력에 따라서 기공 및 형상이 다르게 나온 것으로 추정한다.

(2) PP-H

Fig. 11는 위 실험들을 통하여 가장 적절한 조건인 100kPa 압력에서의 PP-H에 대한 미세 조직 형상이다. 배율은 X3000로 고정 하였다. 압력에 따라서 용착 된 부분의 형상이 다르게 나왔다. 모재부분에서는 열이 가해지지 않았기 때문에 미세한 기포만이 검출 되었다. 이는 재료가 가열되면서 재결정이 이루어지고, 압력의 크기에 따라 용착부가 불규칙하게 생성된 것을 확인 할 수 있다. 따라서 용융온도, 가해진 압력에 따라서 기공 및 형상이 다르게 나온 것으로 추정한다.



Fig. 10 SEM image of PP-C 100 kPa

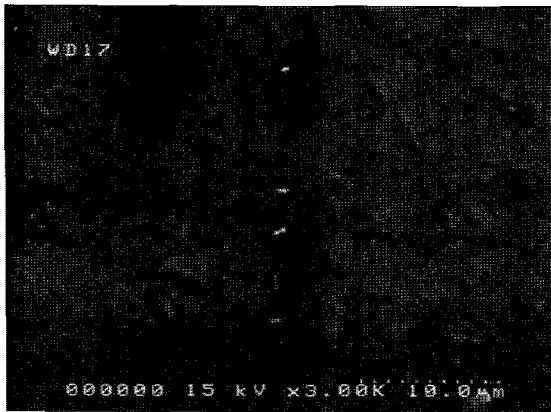


Fig. 11 SEM image of PP-H 100 kPa

5. 결론

가스배관용 플라스틱으로 이용되는 폴리프로필렌 재료를 맞대기 용착시켜 최적화된 접합조건에서의 기계적 특성, 피로특성 등을 파악하고자 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 인장강도, 경도, 피로특성, 외관형상 결과 용착 시 가열 온도 230~240°C에서 압력 100kPa 범위 내에서 기계적 성질이 향상되는 경향을 확인 할 수 있었다.
- (2) 가열시간 10sec, 압착시간 60sec을 가하면 최적의 용착 조건이 얻어지는 것을 알 수 있다.
- (3) 용착 시 가열 온도 230~240°C, 압력 100kPa, 가열시간 10sec, 압착시간 60sec 범위 내에서 기계적 성질이 개선되었음을 실험적으로 나타낸 결과라 할 수 있다.

덧붙여, 향후 플라스틱 배관의 접합 시 재료 표면 및 내부에서의 손상을 최소화할 수 있는 개선된 공정 연구가 필요할 것으로 여겨진다.

참고문헌

- (1) Donald, L. K. and Robert, L. L., 1990, "Natural Gas Engineering Production and Storage", McGraw-Hill, New York, pp. 5~17.
- (2) Striplin, T. H., 1990, "Ultrasonic Evaluation of Polyethylene Butt Fused Joint", McElroy Manufacturing Inc., pp. 92~100.

- (3) Rovre, D. S, Gueugnaut, D, and Robert, D., 1989, "Test Methodlogy for the Determination of Optimum Fusion Welding Condition of Polyethylene", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 38, No. 3, pp. 147~162.
- (4) A. Hillersborg, 1985, "Fusion Jointing of PE Gas Pipes, Criteria for Visual Judging of Heart Fused PEM Pipes", Weld World Soudage Monde, Vol. 23, No. 9~10, pp. 202~207.
- (5) Parry, T. V. and Wronski, A. S., 1981, "The effect of Hydrostatic Pressure on the Tensile Properties of Pultruded CFRP," J. of Materials Science, Vol. 20, No. 2, pp. 2141~2147.
- (6) McDaniel, D. K., 1979, "The Sun, Our Future Energy Source", John Wiley & Sons, Montreal, pp. 134~157.
- (7) Kim, W. S. and Kim, D. H., 2006, "A study on the Direct Casting of Photo-polymer," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, 15(6): pp. 127~133.
- (8) Cheong, T. H. and Ha, Y. W., 2002, "A Study on Compressor Seal for Automotive Air-conditioner using Polymer Resin," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, 11(5): pp. 81~87.
- (9) Kim, O. S, Kim, I. S., Son, J. S., Seo, J. H. and Moon, C. J., 2007, "The Characteristics of Bonding for Thermo-plastic using Solar Energy," Transaction of KSMTE, Vol. 16, No. 2, pp. 106~111.
- (10) Son, S. W., Kim, I. S., Jung, J. W., Kim, J. S., and Na, H. H., 2009, "Control the Welding Quality for Stainless Steel Weldment", Korea Society of Machine Tool Engineers Spring Conference, pp. 285~289.
- (11) Na, G. D., Yoo, Y. T., Shin, B. H., and Shin, H. J., 2007, "A Study on the Surface Hardening of SCM4 Steel Using a Continuous Wave Nd:YAG Laser", Transaction of KSMTE, Vol. 16, No. 5, pp. 24~32.
- (12) Yoo, Y. T., Shin, H. J., and Jang, W. T., 2004, "Surface Heat Treatment of Die Material by Means of CW Nd:YAG Laser", Transaction of KSMTE, Vol. 13, No. 5, pp. 67~74.