

자동차용 엔지니어링 플라스틱의 접합조건

Joining Condition of Engineering Plastic for Car

이정현¹, 이우람^{2,✉}
Jung Hyun Lee¹ and Woo-Ram Lee^{2,✉}

¹ 볼보 자동차, 스웨덴(Volvo cars, Sweden.)

² 서울과학기술대학교 NID 융합기술 대학원 (Seoul National University of Science and Technology, Graduate School of NID Fusion Technology.)

✉ Corresponding author: wooramlee@snut.ac.kr, Tel: 02-970-6305

Manuscript received: 2011.6.13 / Revised: 2011.9.19 / Accepted: 2011.9.22

The current establishment of car engineering plastic 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 included 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, 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: Polyethylene (폴리에틸렌), Short-term (단기시험), Fatigue Life (피로수명), Tensile Strength (인장강도), Hardness(경도), Fusion Temperature (용착온도)

1. 서론

지금까지 자동차 산업계에서는 내·외장 부품으로 주로 석유화학 원료로부터 제조되는 고분자 수지를 사용한 것이 일반적이다. 국내에서 2000 년대까지만 해도 자동차 내·외장 재료에는 금속이 주종을 이루었으나, 금속배관의 경우 부식 및 시공상의 복잡성으로 많은 문제점이 도출되고 있다.¹ 그러나 폴리에틸렌(Polyethylene: PE), 폴리프로필렌(Polypropylene: PP), 폴리염화비닐(Polyvinylidene Fluoride: PVDF) 등을 사용하는 사례가 소개되면서 국내에서도 이를 이용한 엔지니어링 플라스틱의 사용을 검토하게 되었다. 또한 환경적 요인이 대

두되면서 액화천연가스(LNG: liquefied natural gas)가 청정에너지로서 각광을 받아 국내에서는 1986 년 인도네시아산 LNG 가 처음 수입되었고 그 이후 2001 년에는 천연가스 차량이 국내에서 200 대 가량의 버스에 시범적으로 운용되고 있으며, 천연가스 수요는 매년 급속한 증가 추세이다.² 엔지니어링 플라스틱의 접합에는 접착제를 사용하는 방법도 있으나 이는 충격이나 진동, 열, 습기에 의해 분리되므로 현재 자동차 내장재로써 사용되고 있는 폴리에틸렌의 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, 압축복원성등이 있으며, 장기강도는 크리프강도, 내환경 응력균열성, 내기후성, 화학적 안전성 등이 대표적이다.³ 또한 T.H Striplin 은 맞대기 용착부에 관한 검사 기법으로 초음파를 이용한 평가 방법을 연구한 바 있고,⁴ D.S Rover 는 폴리에틸렌 수지의 확산 거동에 대한 시간과 온도의 특성을 규명하고 이것으로부터 거대 분자 내부 확산에 의한 용착 개념을 기초로한 용착 이론을 제시하였으며,⁵ A.Hillersborg 는 가스용 PE 재 열용착의 육안 검사 기준에 관한 연구를 하였고, M.Wolter 는 PE 관의 맞대기 용착에 관한 연구를 실시하였다. 이와 같이 PE 관에 많은 연구가 진행되어 왔으나 국내에서는 이 분야에 대한 학문적, 기술적, 기초 연구가 부족한 실정이다.

이에 반면 접착제는 크게 비전도성 접착제, 전도성 접착제로 나눌 수 있으며, 전도성 접착제는 다시, 이방성 전도성 접착제, 등방성 전도성 접착제로 나눌 수 있다. 비전도성 접착제의 접착에서는 수분에 의한 고분자 상의 부피 변화 및 고분자와 칩 또는 기판 간의 계면 박리, 범프와 패드 사이의 벌어짐 및 크래킹 등이 일어나 접합 불량 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, 내부식성, 접착력, 전기절연성 등의 물성이 우수하여 전기·전자·기계 산업분야에 많이 사용되고 있는 고분자 재료이다. 그러나 경화도가 높아지는 경우, 쉽게 부서지는 경향이 나타나며 열안정성 및 치수안정성 등에서 접착 소재로서 아직까지도 해결해야 하는 단점이 있기 때문에 엔지니어링 플라스틱의 접착에서는 접착제의 사용보다는 용착이 확실한 접합 방법이다.⁶⁻⁸

따라서 본 실험은 단기강도의 일부분으로써 다양한 조건에서 용착을 실시한 후 인장, 경도, 피로, 미세형상 등을 실시하여 용착 시 최적의 압력과 온도를 규명하고자 하였다. 그런데 PE 관은 신뢰성에 대한 문제가 있고, 일반적으로 결함이 용착부에서 주로 발생하여, 이 부분의 안전성에 대한 검사가 필요할 실정이다. 아울러, 이 용착부위는 비파괴적인 방법(초음파 탐상검사)에 의해서는 완벽한 안전성을 파악하는데 어려움이 있다.⁹

따라서, PE 관을 이용하여 용착부가 적절한 강도를 유지하고 있는지 확인하고, 현장에서 필요한

용착 공정에 대한 기본 데이터를 제시하며, 용착의 신뢰성을 입증할 필요가 있다.

본 연구의 목적은 다양한 조건, 즉 가열 온도, 압력, 용융 시간, 가열 유지 시간, 압착 시간에 변화를 주면서, 자동차 내·외장 배관으로 주로 사용하는 PE 관을 가지고, 용착을 하여, 비드의 형상, 폭, 높이, 두께 등 육안 검사로 집합상태를 파악하였고, 적당한 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. 이론적 배경

2.1 폴리에틸렌(PE)

플라스틱 재료는 열가소성 플라스틱과 열경화성 플라스틱으로 크게 구분할 수 있다. 열가소성 플라스틱을 가열하면 유연하게 되지만, 냉각하면 단단하게 되는 성질을 가진 플라스틱으로 폴리에틸렌, 폴리프로필렌, 폴리염화비닐 등이 있다.¹⁰

열경화성 플라스틱은 가열외의 방법에 의해 고분자 화합물사이에 반응을 일으켜, 3 차원적인 구조를 형성하여 경화한 것으로, 한번 경화하면 다시 가열하여도 연화하지 않는 플라스틱이며, 이에 페놀수지, 멜라민(melamine)수지 등이 있다.¹¹

플라스틱 관재료로서 사용되는 열가소성 플라스틱의 특징중 폴리에틸렌은 유연성이 있고, 내충격성이 있으며, 내약품성, 열용착이 가능하여, 포장, 농업용 필름, 병, 운반상자, 파이프 등에 쓰이며, 폴리염화비닐은 기계적 강도가 비교적 높아 접착제로 접합이 가능하며, 파이프, 포장, 농업용 필름, 전선피복, 골함석 등에 쓰인다. 또한 ABS 는 내충격성이 높고 접착제로 접합이 가능하며, 전기기기 하우징, 자동차 부품, 사무기재료 등에 쓰인다.¹² 열경화성플라스틱중 폴리에스테르는 내열성 및 내약품성이 우수하여, 유리천이 플라스틱(육조, 경화조, 연단 등), 봉입주형품 등에 사용된다.¹³

2.2 열용착(Heat anastomosis)

열(heater)을 사용하여 열판으로부터 용착하고자 하는 부위를 열전도에 의하여 용융시킨 후 히터를 제거하고 압착압력을 가하여 접합하는 방법이다.¹⁴ 용착에는 맞대기(butt), 소켓(socket), 새들(saddle)용착이 있다. 맞대기(butt)용착은 75A 이상의 관 및 이음관 용착에 적용되며, 이 용착을 하기 위한 준

비작업으로는 규격확인→손상확인→면취→열관의 온도→관의 예열→청결→용착기 상태점검→진원도 확인→관의 정렬→오염방지등이 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 1mm 이상 되지 않도록 해야 하며 파이프의 어긋남은 파이프 두께의 10%미만이어야 한다.¹⁵

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

① 가압용융(heating soak) : 관 또는 합쳐지는 접합이음관을 히터에 접촉시켜 가압하면서 용융한다. 이것은 정상적으로 열관으로부터 용융부위로 열전도가 이루어져 고르게 용융시키기 위하여 열관에 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 열관을 용융부위로부터 신속하게 제거함을 목적으로 하며, 방법으로는 용착기 클램프를 열리게 하여 용융면이 열관으로부터 이탈되게 한 상태로 히터를 제거한다.

④ 압착(heat melting) : 관 또는 합쳐지는 접합 이음관의 용융면끼리 압착하는 것으로써 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.¹⁶

2.3 응력효과

반복하중(repeated loads)을 받는 기계부품, 차량, 구조물 등은 미시적 손상 즉, 슬립, 균열 발생 등의 누적에 의하여 파손이 발생하게 된다. 이러한 일련의 과정을 피로라고 하며, 피로에 의해 일어난 파손을 피로파괴(fatigue failure)라고 한다. 실제의 기계, 구조물에서 일어나는 파괴의 대부분은

피로(fatigue)에 의한 것이며 자동차, 항공기, 펌프, 터빈 등의 사고 원인도 대부분 피로파괴에 의한 것이다. 피로파괴는 재료의 미시적 방법(microscopic approach), 역학적 방법(mechanical approach), 그리고 불안정 파괴, 균열의 진전 등을 대상으로 다루는 파괴역학적 방법(fracture mechanical approach)에 의하여 해석되고 있다. 또한 피로강도, 피로수명 평가의 관점에서는 응력에 의한 방법과 변형률에 의한 방법으로 해석되고 있다.

피로파괴는 기계부품의 설계, 제작 및 사용상황과 깊은 관계가 있으므로 피로강도, 피로수명의 평가에 있어서 이를 고려하지 않으면 의미가 없다. 또한, 피로현상의 규명은 내 피로에 미치는 인자가 많을뿐만 아니라 이들 인자의 영향이 복잡하여 해석이 쉽지 않으므로 피로현상을 규명하기 위해서는 실험에 의한 검증이 필요하다.¹⁷ 그러므로 부품의 설계에 있어서 대상물의 사용조건을 파악하여 피로수명을 확립하고 안전율을 설정한 후 설계 조건 및 제작조건을 결정하여야 한다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 실험장치

실험장치는 Fig. 1 과 같이 열과 압력 모두 제어 가능한 열용착기를 사용하였다.

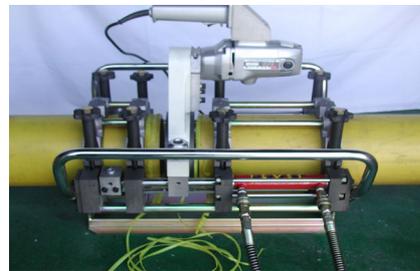


Fig. 1 Experimental butt anastomosis machine

Fig. 2 는 열용착에 대한 모식도 이다. X 축으로 압력을 가해주고, Y 축에서 접합부를 용융시키는 구조이다.

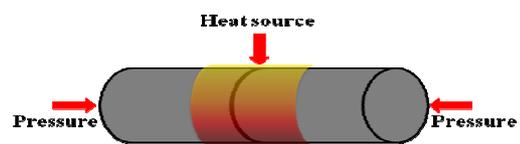


Fig. 2 Design of heat anastomosis sample

Fig. 3 은 열융착 공정에 따라 제작된 시편의 형상이다.



Fig. 3 Specimen of heat anastomosis

3.2 실험조건

Table 1 은 실험 변수에 따른 융착 조건이다. 가열온도는 210~250℃ 까지 10℃씩 증가시켜 가며 융착하였다. 이에 따른 압력은 3 가지 조건에서 실험하였다. 융착 시간 10 sec, 가압 시간 60 sec 로 고정하여 실험하였다.

Table 1 Experimental parameters

Type	PE
Temperature (°C)	210, 220, 230, 240, 250
Pressure(kg/cm ²)	50, 100, 150

3.3 분석방법

폴리에틸렌에 최적의 융착 조건을 만족하기 위하여 인장, 경도, 피로수명 등 3 가지 분석실험을 하였다. 인장시험기는 Instron 사의 5800 series 로 수행되었으며, 최대 200kN 의 용량을 갖는 재료 시험기이다. 시험절차는 KS B 0802 에 명시된 절차를 준수하였으며 시험방식으로는 변위제어방식을 사용하였다. 이때의 시험 속도는 5.0 mm/min 으로 고정하였다. 경도시험은 Wolpert Wilson Instruments 사의 402MVD 를 사용하였으며, 적용하중은 50gf(Hv 1)로 설정하였다. 상판 기준 하부 0.1 mm 아래에서 0.3 mm 간격으로 열영향을 받지 않는 모재까지 충분한 범위를 측정하였다. 피로시험은 ASTM E 466 에 따라 Instron 사의 8802 모델을 사용하였으며, 응력비(stress ratio, R)는 -1 이고, 적용 인장응력의 반복률은 20 Hz로 고정하였다. 시편에 가해지는 응력은 순수 인장응력 상태이며, 시험편에 적용되는 인장응력은 식(1)과 같은 탄성보의 방정식(elastic beam equation)을 사용하였다. 여기서, c 는 시험편의 최소 반경, M 은 인장 및 압축 모멘트, P 는 적용하중, L 은 모멘트 거리 그리고 I 는 관성모멘트이다.

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

4. 실험결과 및 고찰

4.1 인장시험

Fig. 4 는 각 조건별 10 회 씩 실험한 결과에 대한 평균값을 그래프화 하였다. 210℃ 를 기준점으로 융착한 경우 압력 50 kPa 에서 약 4.2, 13, 5.4, 3.1 kPa 씩 차이가 났다. 동일한 방법으로 압력 100 kPa 에서는 4.4, 13.6, 8.8, 3.3 kPa, 압력 150 kPa 에서는 3.6, 11.3, 6.7, 2.2 kPa 씩 차이가 났다. 온도 230℃ 에서 플라스틱의 재결정이 이루어진 것으로 추정된다. 인장시험의 경우 온도 230℃, 압력 100 kPa 이 적정 조건으로 추정된다.

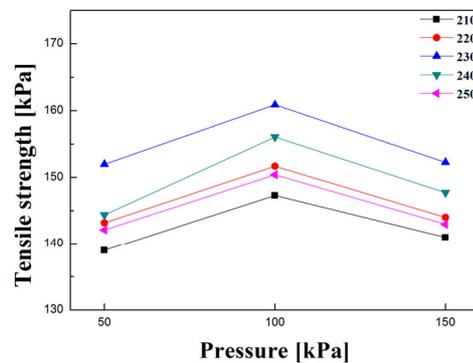


Fig. 4 Experimental results of tensile test

4.2 경도시험

Fig. 5 는 압력조건 50 kPa 에서의 경도 실험한 결과의 대한 값을 그래프화 하였다. 210℃(57.2 Hv) 기준으로 평균 0.1, 0.08, 0.04, 0.05 Hv 씩 차이가 났다. 플라스틱 재질은 금속 재질에 비해 온도에 따른 재결정이 이루어지더라도 경도에 변화는 없었다. 평균적으로 220℃에서 약간 큰 경도 변화가 있었다.

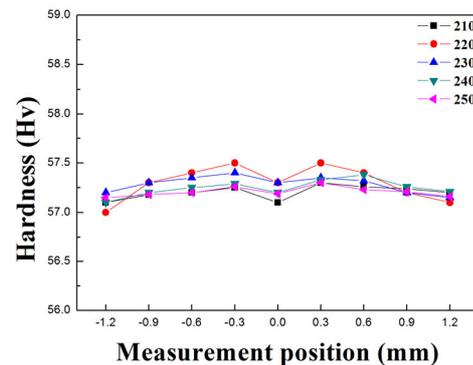


Fig. 5 Experimental results of hardness test 50kPa

Fig. 6 은 압력 조건 100 kPa 에서의 경도 실험한 결과의 대한 값을 그래프화 하였다. 210℃(57.1 Hv) 기준으로 평균 0.11, 0.18, 0.14, 0.06 Hv 씩 차이가 났다. 플라스틱 재질은 금속 재질에 비해 온도에 따른 경도에 변화는 없었다.

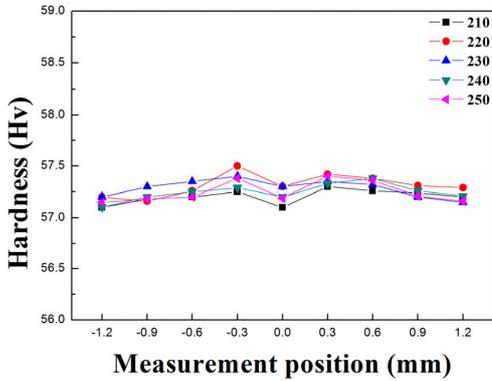


Fig. 6 Experimental results of hardness test 100kPa

Fig. 7 은 압력 조건 150 kPa 에서의 경도 실험한 결과의 대한 값을 그래프화 하였다. 210℃(57.3 Hv) 기준으로 평균 0.08, 0.09, 0.03, 0.04 Hv 씩 차이가 났다.

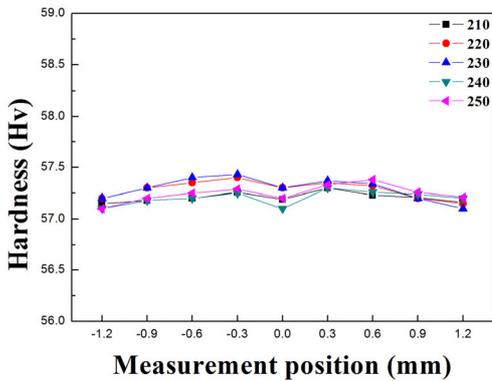


Fig. 7 Experimental results of hardness test 150kPa

4.3 피로시험

Fig. 8 은 압력조건 50 kPa 실험한 결과 파괴된 시편의 피로한도에 대한 값을 log-log scale 로 변환하여 최소 자승법에 의해 피팅(fitting)하였다.

210℃ 기준으로 3, 4, 2, 4, 2 개씩 파괴가 일어나지 않았다. 이에 대한 평균 차이는 210℃(70.4 kPa) 기준으로 2.1, 5.3, 3.3, 1.8 kPa 씩 증가하였다.

피로시험을 실시한 시험편의 균열은 모두 용착

부에서 발생하여 모재 두께방향으로 형상을 유지하면서 관통된 후 진전되면서 파단 되었다. 피로 시험 결과 인장시험의 결과와 거의 동일한 결과를 나타내었다. 용착부의 적정 온도의 개선으로 피로 수명 증가시킬 수 있을 것으로 여겨지며, 단순 인장응력 범위가 150 kPa 이하인 실제 플라스틱 용착 이음부의 피로강도는 온도 및 압력 변수에 의해 크게 향상될 것으로 기대된다.

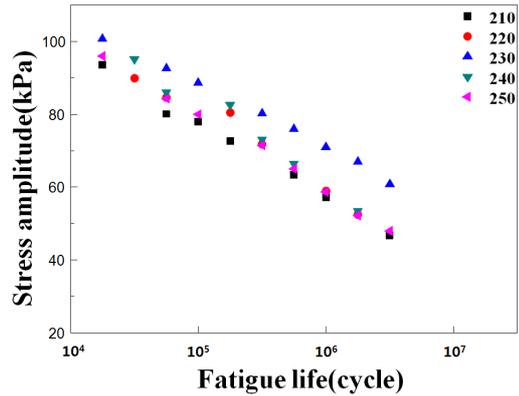


Fig. 8 S-N curve(log scale) for fatigue analysis 50kPa

Fig. 9 는 압력 조건 100 kPa 실험한 결과 파괴된 시편의 피로한도에 대한 결과이다. 210℃ 기준으로 3, 4, 3, 2, 3 개씩 파괴가 일어나지 않았다. 이에 대한 평균 차이는 210℃(72.9 kPa) 기준으로 1.7, 5.6, 3.4, 2.5 kPa 씩 증가하였다.

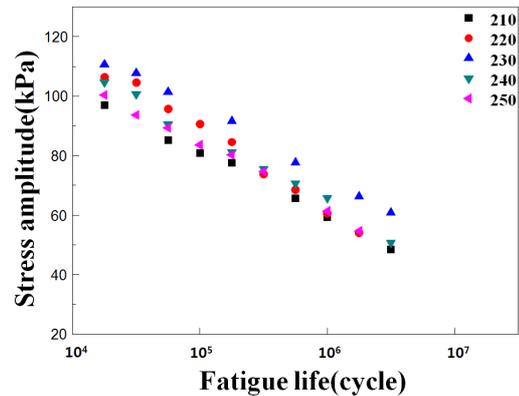


Fig. 9 S-N curve(log scale) for fatigue analysis 100kPa

Fig. 10 은 압력 조건 150 kPa 실험한 결과 파괴된 시편의 피로한도에 대한 결과이다. 210℃ 기준으로 4, 3, 3, 4, 3 개씩 파괴가 일어나지 않았다. 이

에 대한 평균 차이는 210°C(71.8 kPa) 기준으로 2.6, 5.2, 3.1, 2.3 kPa 씩 증가하였다.

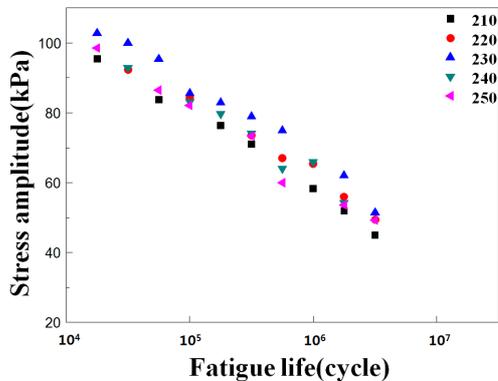


Fig. 10 S-N curve(log scale) for fatigue analysis 150kPa

5. 결론

자동차용 엔지니어링 플라스틱으로 이용되는 폴리에틸렌 재료를 맞대기 용착시켜 시험하여 최적화된 인장강도, 경도 시험에서의 기계적 특성, 피로특성 등을 파악하고자 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 인장강도, 경도, 피로특성 결과 용착 시 가열 온도 230~240°C, 압력 100 kPa 범위 내에 두고 가열시간 10 sec, 압착시간 60 sec 을 가 하면 최적의 용착 조건이 얻어지는 것을 알 수 있다.

참고문헌

1. Donald, L. K. and Roberd, L. L., "Natural Gas Engineering Production and Storage," McGraw-Hill, pp. 5-17, 1990.
2. Striplin, T. H., "Ultrasonic evaluation of polyethylene butt fused joint," McElroy Manufacturing Inc., pp. 92-100, 1990.
3. Rovre, D. S., Gueugnaut, D. and Robert, D., "Test methodology for the determination of optimum fusion welding condition of polyethylene," Journal of Applied Polymer Science, Vol. 38, No. 1, pp. 147-162, 1989.
4. Hillersborg, A., "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, 1985.

5. Parry, T. V. and Wronski, A. S., "The effect of hydrostatic pressure on the tensile properties of pultruded CFRP," J. of Materials Science, Vol. 20, No. 6, pp. 2141-2147, 1981.
6. McDaniel, D. K., "The Sun, Our Future Energy Source," John Wiley & Sons, pp. 134-157, 1979.
7. Kim, W. S. and Kim, D. H., "A study on the direct casting of photo-polymer," Transactions of KSMTE, Vol. 15, No. 6, pp. 127-133, 2006.
8. Cheong, T. H. and Ha, Y. W., "A Study on compressor seal for automotive air-conditioner using polymer resin," Transactions of KSMTE, Vol. 11, No. 5, pp. 81-87, 2002.
9. Kim, O. S., Kim, I. S., Son, J. S., Seo, J. H. and Moon, C. J., "The Characteristics of Bonding for Thermo-plastic using Solar Energy," Transactions of KSMTE, Vol. 16, No. 2, pp. 106-111, 2007.
10. Son, S. W., Kim, I. S., Jung, J. W., Kim, J. S., and Na, H. H., "Control the Welding Quality for Stainless Steel Weldment," Proc. of KSMTE Spring Conference, pp. 285-289, 2009.
11. Na, G. D., Yoo, Y. T., Shin, B. H. and Shin, H. J., "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, 2007.
12. Yoo, Y. T., Shin, H. J. and Jang, W. T., "Surface Heat Treatment of Die Material by Means of CW Nd:YAG Laser," Transaction of KSMTE, Vol. 13, No. 5, pp. 67-74, 2004.
13. Park, H. L., Lim, J. M., Seol, S. D., Lee, W. N. and Moon, J. B., "A study on polymer surface treatment using plasma," J. of the KOSOS, Vol. 20, No. 1, pp. 94-100, 2005.
14. Lehocky, M., Drnovska, H., Lapcikova, B., Barros-Timmons, A. M., Trindade, T., Zembala, M. and Lapcik, L., "Plasma surface modification of polyethylene," Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, Vol. 222, No. 1-3, pp. 125-131, 2003.
15. Kleinent, H., Grober, S., Schultrich, B. and Siemroth, P., "Activating adherend surfaces by applying arc-discharge treatment," International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 17, No. 3, pp. 203-206, 1996.
16. Maxwell, D. and David, B., "Principles and practices

- of adhesive bonded structural joints and repairs,”
International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol.
19, No. 2, pp. 91-103, 1998.
17. Oisetha, S. K., Krozerb, A., Kasemoa, B. and
Lausmaa, J., “Surface modification of spin-coated
high-density polyethylene films by argon and oxygen
glow discharge plasma treatments,” Applied Surface
Science, Vol. 202, No. 1-2, pp. 92-103, 2002.
18. Lu, W. L., Huang, C. Y. and Roan, M. L., “Effect of
plasma treatment on the degree of Am grafting for
highdensity polyethylene,” Surface and Coatings
Technology, Vol. 172, No. 2-3, pp. 251-261, 2003.