

## 굴곡 용착면을 이용한 고밀도폴리에틸렌 관의 버트 용착 공정에서의 열유체 거동 수치모사

유재현 · 최선웅\* · 안경현 · 오주석\*†

서울대학교 화학공정신기술연구소 화학생물공학부  
08826 서울특별시 관악구 관악로 1  
\*한남대학교 화공신소재공학과  
34054 대전광역시 유성구 유성대로 1646  
(2017년 2월 20일 접수, 2017년 3월 16일 수정본 접수, 2017년 4월 10일 채택)

### Numerical Simulation of Heat and Flow Behaviors in Butt-fusion Welding Process of HDPE Pipes with Curved Fusion Surface

Jae Hyun Yoo, Sunwoong Choi\*, Kyung Hyun Ahn and Ju Seok Oh\*\*†

School of Chemical and Biological Engineering, Institute of Chemical Processes, Seoul National University, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul, 08826, Korea

\*Department of Advanced Materials & Chemical Engineering, Hannam University, 1646, Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon, 34054, Korea  
(Received 20 February 2017; Received in revised form 16 March 2017; accepted 10 April 2017)

#### 요 약

폴리머 재질의 관을 용착 시키기 위해서는 버트 용착 공정을 거치는데, 최근 용착면에 굴곡을 주어 용착 강도를 높이고자 하는 시도가 있었다. 본 연구에서는 용착면의 굴곡이 폴리머의 열유체 거동 및 용착 강도에 어떠한 영향을 미칠 것인지 2차원 축대칭 평면에서 유한요소법을 사용하여 살펴보았으며, 고밀도폴리에틸렌 관을 대상으로 하였다. 열유화 단계에서 용착면의 형상을 따라 굴곡진 상경계면이 나타남을 확인할 수 있었다. 접합 단계에서는 굴곡진 상경계면과 용착면 사이에서의 멜트의 압착 흐름이 나타남을 확인할 수 있었으며, 굴곡용착부의 낮은 전단율은 관의 축과 수직 방향 배향을 완화시켜 용착부 강도 향상에 도움을 줄 수 있을 것으로 예상된다.

**Abstract** – Butt-fusion welding process is used to join the polymeric pipes. Recently, some researchers suggest the curved surface to enhance a welding quality. We investigated how curved welding surface affects heat and flow behaviors of polymer melt during the process in 2D axisymmetric domain with finite element method, and discussed the effect to the welding quality. In this study, we considered HDPE pipes. In heat soak stage, curved phase interface between the melt and solid is shown along the shape of welding surface. In jointing stage, squeezing flow is generated between curved welding surface and phase interface. The low shear rate in fusion domain reduces the alignment of polymer to the perpendicular direction of pipes, and then this phenomenon is expected to help to enhance the welding quality.

Key words: Butt-fusion welding, Heat and flow behaviors, HDPE pipes, Finite element method, Melt flow

#### 1. 서 론

최근 들어 농업용수 및 생활용수 혹은 가스 수송 등에 폴리머 재질의 관이 많이 사용되고 있다. 이는 폴리머 재질의 관이 철제 관에 비하여 가볍고, 부식이 없으며, 설치와 운용면에서 경제적이기 때문이다[1-3]. 폴리머 재질의 관도 단일 관의 제조 길이에는 한계가

있기 때문에 긴 배관 라인을 구축하기 위해서는 관을 이어 붙여야 하는데, 통상적으로 버트 용착 공정을 통해 배관의 접합이 이루어진다[1-4].

버트 용착 공정은 크게 열유화(熱柔化, heat soak) 단계와 접합(接合, jointing) 단계의 두 가지로 나눌 수 있다. Fig. 1은 이러한 버트 용착 공정의 과정을 보여준다. 열유화 단계에서는 용착면에 열을 접촉시켜 관에 열을 가하여 열관과 맞닿은 면에서부터 고체에서 멜트로의 상태변화가 일어난다. 용착을 하기 위해서 이 멜트 층이 충분히 형성될 때까지 본 단계를 지속한다. 열유화 단계가 지나면 열관은 제거되고, 열유화 단계에서 가열된 한 쌍의 관을 멜트 영역끼리 맞대어 압착시켜 관을 연결하는 것이 접합 단계이다. 버트

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jsoh@hnu.kr

‡ 이 논문은 서강대학교 유기공 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

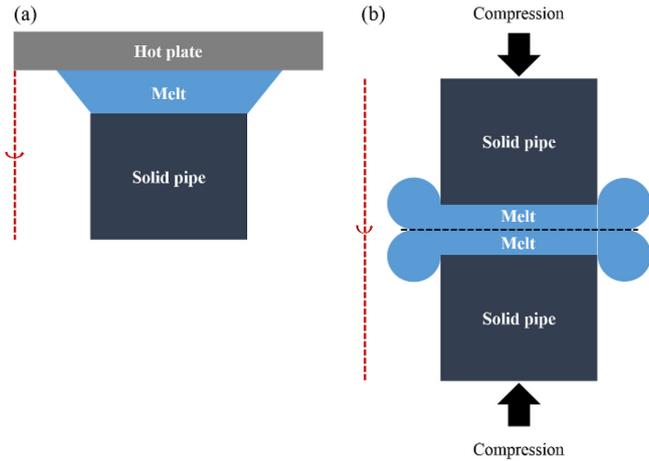


Fig. 1. Schematic sketches of the butt-fusion welding on a 2D axisymmetric domain; (a) heat soak and (b) jointing stage.

융착 공정에 대한 더 상세한 설명은 참고자료들에 잘 나와있다 [3-6].

열유화 단계에서는 열판에 의해 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 관의 단면이 가열되고, 멜트로의 상변화와 열팽창에 의한 유동이 발생한다. 접합 단계에서는 열유화된 관을 상대 관을 향해 밀어줌으로써 멜트 영역에서 압착 유동이 발생하며, 이 단계에서는 열유화 단계에서 승온되었던 부분의 냉각이 일어난다. 그러므로 융착 공정 전 단계에 걸쳐 열 및 운동량 전달이 발생하는 것이다.

위와 같은 버트 융착을 통하여 폴리머 재질의 관을 융착시킬 수 있는데, 융착부의 강도가 모재에 비해 크게 떨어지는 문제점이 상존해 왔다. 이런 문제를 해소하기 위해서 공정 조건을 최적화하고자 하는 실험적 시도가 많이 진행되었다[7-10]. 하지만 체계적이고 효율적인 공정 설계를 위해서는 공정 중 멜트 영역에서 일어나는 열유체 거동에 대한 이론적인 접근이 필요했고, 이어서 수치모사적인 접근이 시도되었다[3-6,11].

그렇지만 융착의 모든 단계에서 열 및 운동량 전달이 동시에 발생하는 실제 공정과 달리, 기존의 수치모사적인 연구는 운동량 전달을 무시한다든가, 흐름을 간소화하여 문제에 접근하는 등 한계점이 있었다. 최근에 와서야 열 및 운동량 전달을 동시에 고려하여 버트 융착 공정에서 멜트의 열유체 거동을 분석할 수 있었다[12]. 또한 접합 단계에서 나타나는 전단 유동이 융착부 내의 폴리머 배향에 영향을 줄 수 있고, 이러한 배향이 융착부의 강도를 약화시킬 수 있음을 지적하였다[12].

최근 열판의 온도 혹은 압착 압력 등의 공정 조건을 조절하는 것에서 나아가, 융착면에 굴곡을 주어 융착부의 강도를 높이고자 하는 시도가 있는데, 관의 파괴가 발생하여 진행될 때 진행방향에 장애가 있으면 파괴의 진행을 늦어지고, 응력이 분산된다는 예측이 있다.

본 연구는 이러한 파괴역학적인 관점에서 벗어나, 융착 공정 중 폴리머의 열유체 거동을 2차원 축대칭 평면에서 유한요소법을 사용하여 살펴보고자 한다. 이를 통해 융착면 형상 변화가 열유체의 거동, 나아가 융착 강도에 어떠한 영향을 미칠 것인지 논할 것이다. 산업적으로는 내구성, 운용 용이성의 이유로 고밀도폴리에틸렌 재질의 관이 널리 사용되고 있으며, 수치모사 또한 이러한 경향에 맞춰 고밀도폴리에틸렌 관을 대상으로 했다.

## 2. 이론적 배경

### 2-1. 지배방정식

열 보존방정식과 운동량 보존방정식을 Lagrangian 관점에서 풀다[13]. 우선 열 보존방정식(식 1)을 전체 관의 도메인에서 풀어서 열이력을 구한다. 폴리머의 녹는점(고밀도폴리에틸렌의 녹는점: 135 °C) 이상의 영역을 멜트 영역으로 간주할 수 있는데, 이 멜트 영역에서 운동량 보존방정식(식 2)과 연속방정식(식 3)을 다룸으로써 멜트 영역에서의 유동장을 구해낼 수 있다. T는 온도, D/Dt는 물질 미분, ρ는 밀도, 그리고 k는 열전도율을 의미한다. C<sub>eff</sub>는 유효 열용량으로써, 멜트로의 상태변화를 고려한 열용량 값이다. σ는 유체의 응력, p는 압력, τ는 편향응력, 그리고 u는 유체의 유동장을 의미한다.

$$\rho C_{eff} DT/Dt = \nabla \cdot (k \nabla T) \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \sigma = 0, \sigma = -pI + \tau \tag{2}$$

$$D\rho/Dt + \rho \nabla \cdot u = 0 \tag{3}$$

본 연구에서 사용된 유한요소법 수치모사 방법론과 고밀도폴리에틸렌의 온도에 따른 물질 상수는 선행연구를 참고하였다[12].

### 2-2. 계산 도메인

열유화 단계에서 열판으로부터 관으로 전달되는 열의 양에는 한계가 있다. 열판으로부터 거리가 비교적 먼 영역은 공정 시간 내내 상온을 유지하고 있다고 합리적으로 추정 가능하며 실제 온도를 측정해도 같은 결과를 얻을 수 있다. 그렇게 상온으로 유지되는 면의 위치를 z = 0으로 정의하고, 그 면보다 열판에 가까운 영역만을 계산 도메인으로 한정 짓는다. 열판과 맞닿은 융착면의 위치와 형태를 함수 f로 정의할 수 있다. Fig. 2(a)의 굵은 선은 열유화 단계에서의 관의 도메인을 나타낸다.

멜트 영역은 온도가 폴리머의 녹는점 이상의 영역으로 정의된다. 열판이 z = f에 위치한다고 하였을 때, 멜트 영역은 폴리머의 녹는점에 해당하는 등온선을 기점으로 열판과 가까운 관의 도메인의 위쪽 영역에 해당한다. 이 등온선은 멜트와 고체 영역을 나누는 상경

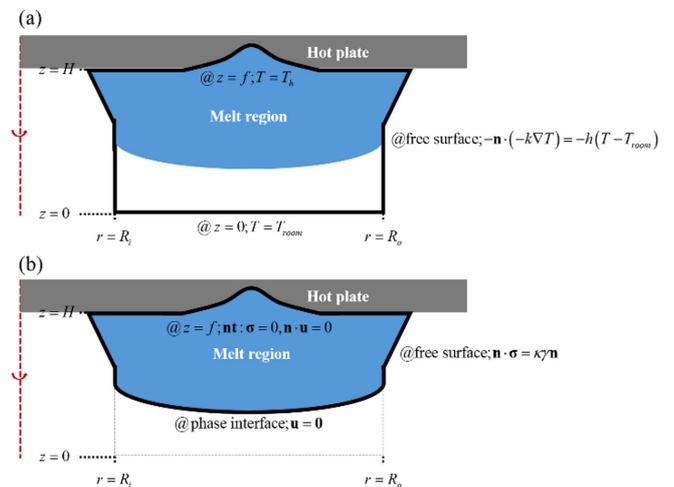


Fig. 2. Boundary conditions (a) for the heat transfer on the pipe domain and (b) for the momentum transfer on the melt domain in the heat soak stage.

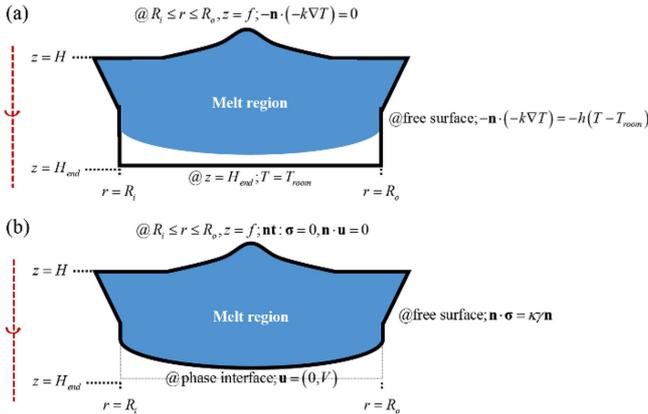


Fig. 3. Boundary conditions (a) for the heat transfer on the pipe domain and (b) for the momentum transfer on the melt domain in the jointing stage.

계선(phase interface)에 해당한다. Fig. 2(b)의 굵은 선은 열유화 단계에서의 멜트 도메인을 나타낸다.

접합 단계에서는 열판이 제거되고 용착 시키고자 하는 상대 관이  $z = f$ 에 위치하게 된다. 관의 압착은 상온으로 유지되는  $z = 0$  평면을 시간에 따라 상대 관을 향해 이동시킴으로써 구현해 낼 수 있다. 평면의 위치가 매 미소 시간,  $\Delta t$  이 지날 때마다 기존의 위치에  $V\Delta t$ 가 더해져  $z = H_{end}$ 가 변하는 방식이다.  $V$ 는 관의 압착 속도이다. 접합 단계에서 멜트 도메인을 추출해내는 방식은 열유화 단계에서의 방식과 같다. Fig. 3의 굵은 선은 접합 단계에서의 관 및 멜트 도메인을 나타낸다.

2-3. 모델링

열유화 단계에서 초기 관의 온도는 상온을 유지하고 있다. 열판은  $z = f$ 에 위치하고, 그 위치에서의 온도는 열판의 온도와 같다. 공기 노출된 관 내·외벽은 자유경계면(free surface)으로써, 대류에 의한 냉각이 발생한다.  $z = 0$ 은 열판의 열이 전달되지 못하는 영역으로 상온을 유지한다. 열전달에 관한 초기 조건과 경계조건은 다음의 식 4와 같다. Fig. 2(a)에서는 이 경계조건을 관의 도메인 상에 나타내었다.  $t_{soak}$ 는 열유화에 걸리는 시간, 그리고  $\mathbf{n}$ 은 평면의 법선 벡터를 의미한다.  $T_{room}$ 은 상온(20 °C), 그리고  $T_h$ 은 열판의 온도를 나타낸다.  $h$ 은 열전달 계수를, 그리고  $R_i, R_o$ 는 각각 관의 내경과 외경을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 &@t_{soak} = 0; T = T_{room} \\
 &@z = f; T = T_h \\
 &@free\ surface; -\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = -h(T - T_{room}) \quad @z = 0; T = T_{room} \quad (4)
 \end{aligned}$$

열판과 닿는 영역에서는 perfect slip이 일어난다고 가정한다. 멜트 영역 중 관의 내·외벽에 해당하는 자유 경계면에는 표면 장력이 작용한다. 열유화 단계에서는 열판과의 접촉을 유지하고 수평을 맞추기 위해 관을 기기적으로 잡아주는데, 상경계면에서의 변위를 0으로 제한하는 것으로 이를 모사할 수 있다. 이러한 운동량 전달에 관한 경계 조건은 다음의 식 5와 같으며, Fig. 2(b)에서는 이를 멜트 도메인 상에 나타내었다.  $\mathbf{t}$ 는 평면의 접선벡터,  $k$ 는 자유계면의 평균 곡률,  $\Gamma$ 는 유체의 표면 장력을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 &@z = f; \mathbf{nt} : \boldsymbol{\sigma} = 0, \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} = 0 \\
 &@free\ surface; \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} = k\Gamma \mathbf{n} \\
 &@phase\ interface; \mathbf{u} = 0 \quad (5)
 \end{aligned}$$

접합 단계에서 초기 관의 온도 분포는 열유화 단계가 끝난 시점에서의 관의 온도 분포,  $T_{final}$ 와 같다. 열판이 제거되고 용착 시키고자 하는 상대 관이  $z = f$ 에 위치하게 된다. 멜트 영역이 압착되면서 관 내·외벽으로 밀려나게 되는데, 이 때 관 내·외경을 넘어가는 영역( $R_i > r$  or  $r > R_o, z = f$ )은 자유계면으로 가정하였다. 그를 제외한 영역( $R_i \leq r \leq R_o, z = f$ )은 상대 관과 맞닿은 영역으로써, 대칭평면으로 처리된다. 접합 단계에서 열전달에 관한 초기 조건과 경계조건은 다음의 식 6과 같다. Fig. 3(a)에서는 이 경계조건을 관의 도메인 상에 나타내었다.  $t_{jointing}$ 는 접합 시간을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 &@t_{jointing} = 0; T = T_{final} \\
 &@R_i \leq r \leq R_o, z = f; -\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = 0 \\
 &@free\ surface; -\mathbf{n} \cdot (-k\nabla T) = -h(T - T_{room}) \\
 &@z = H_{end}; T = T_{room} \quad (6)
 \end{aligned}$$

압착에 의한 관의 이동은 상경계면의 이동으로 모사될 수 있으며, 이를 포함한 운동량 전달에 관한 경계 조건은 다음의 식 7과 같다. Fig. 3(b)에서는 이를 멜트 도메인 상에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 &@R_i \leq r \leq R_o, z = f; \mathbf{nt} : \boldsymbol{\sigma} = 0, \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} = 0 \\
 &@free\ surface; \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} = k\Gamma \mathbf{n} \\
 &@phase\ interface; \mathbf{u} = (0, V) \quad (7)
 \end{aligned}$$

Modeling에 대한 자세한 사항은 선행연구에 나와 있다[12].

3. 결과 및 토론

3-1. 용착면 형상 및 공정 조건

본 연구에서는 용착면 형상의 변화가 열유체 거동에 어떠한 영향을 주는지 살펴보기 위해 기존 관의 평평한 용착면 대신에 한쪽 관의 끝을 볼록하게 모델링 하였다(Fig. 4(a)). 용착될 상대 관의 용착면은 오목한 굴곡을 갖게 된다(Fig. 4(b)). Fig. 4의 관의 도메인은 버트 용착 공정이 시작되기 전( $t_{soak} = 0$  s)의 굴곡 용착면을 지닌 한 쌍의 관 형상을 모사하고 있다. Fig. 4에서 관의 용착면의 형상  $f$ 는 식 8과 같다  $\lambda w = 12$  mm.  $r_0 = 4$  mm를 사용하였고, Fig. 4(a)의 볼록한 용착면의  $h = 0.1$  경우  $h = 0.1$ , Fig. 4(b)의 오목한 용착면이 경우  $h = -0.1$ 로 정의하였다.

$$f = H + h[1 - \cos(2\pi/\lambda w(r - r_0))] \quad (8)$$

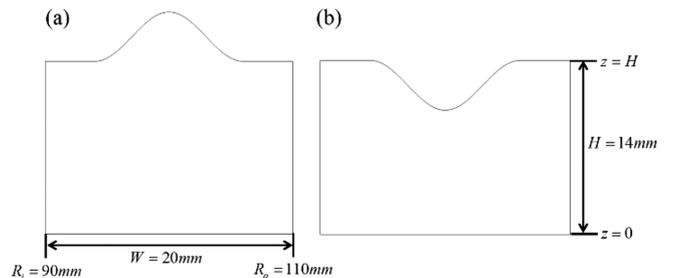


Fig. 4. Pipe domain with curved welding surface; (a) convex and (b) concave type.

본 연구에서 사용한 공정 조건은 다음과 같다. 230 °C의 표면온도를 띄는 열판을 사용하여 240 s 동안 열유화 단계를 거쳤다. 실제 산업에서 접합 단계에서의 공정 조건은 관의 이동속도 V로 정의되지 않고, 기기적인 측정 용이성에 의해 압착 압력으로 정의되고 있다. 수치모사적으로는 주어진 압착 압력을 낼 수 있는 관의 이동속도 V를 찾아내어 이를 경계 조건으로 사용하고 있다. 본 연구에서 사용한 압착 압력 조건은 다음의 식 9과 같다. 이러한 용착 공정 조건은 산업적으로 널리 사용되는 규격이다.

$$0 < t_{\text{jointing}} \leq 10 \text{ s}; p = 15000 (t_{\text{jointing}}) [\text{Pa}]$$

$$10 \text{ s} < t_{\text{jointing}}; p = 150000 [\text{Pa}] \tag{9}$$

고밀도폴리에틸렌 관을 모사하기 위해 고밀도폴리에틸렌의 물질 상수를 사용하였다[12]. 온도에 따라 달라지는 고밀도폴리에틸렌의 점도는 (주)레올로지솔루션즈의 ARS M-200 레오미터를 이용하여 측정하고, Carreau-Yasuda 모델로 표현하여 수치모사에 이용하였다[12]. 고밀도폴리에틸렌이 고분자의 대표적인 성질인 점성과 탄성을 모두 가지고 있지만 수치해석에서는 계산의 안정성을 위해 탄성을 배제하고 식 10과 같이 온도와 전단속도에 따라 변하는 점성을 포함시켰다.

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = [1 + (\lambda \dot{\gamma})]^{(n-1)/2}$$

$$\eta_{\infty} = \mu_{\infty} a \exp\left(\frac{b}{Ta}\right)$$

$$\eta_0 = \mu_0 a \exp\left(\frac{b}{Ta}\right) \tag{10}$$

위 식에서  $\eta$ 는 점도를 나타내며,  $\eta_{\infty}$ 는 임의의 온도에서 전단율이 무한대인 경우의 점도,  $\eta_0$ 는 임의의 온도에서 전단율이 0일 때의 점도를 나타낸다.  $\dot{\gamma}$ 는 전단율을 나타내며  $\lambda$ 와  $n$ 는 Carreau-Yasuda 모델에 사용되는 상수이다[14].  $\mu_{\infty}$ 는 온도 Ta에서 전단율이 무한대인 경우의 점도계수로서 0.1이고,  $\mu_0$ 는 온도 Ta에서 전단율이 0로 수렴할 때의 점도계수로서 4.0이다. 완화시간  $\lambda$ 는 7.11 s이고 식 10의 첫 번째 식의 지수 부분의  $n$ 은 0.26이다. 식 10의 두 번째와 세 번째 식의 지수 앞에 있는  $a$ 는 314 Pa·s이고 지수부분의  $b$ 는 2050 K이다.

3-2. 열유체 거동

Fig. 5는 열유화 단계에서 시간에 따른 관내의 열이력과 형상 변화를 나타낸다. 시간에 따라 열판으로부터 열이 전달됨에 따라 열판과 가까운 부분에서부터 온도가 올라가는 것을 확인할 수 있다. 반면, 기존 평평한 용착면을 지닌 관의 경우와 같이 열평창에 의해 관의 내·외벽에 불룩한 용착 비드가 생기는 것도 확인할 수 있다. 이는 실험적인 관찰과 유사한 결과이다. Fig. 6은 열유화 단계가 마무리 된 뒤의 멜트 영역을 나타낸 것이다. 멜트 영역과 고체 관의 경계면은 멜트와 고체의 상경계면이 되는데, 용착면의 형상을 따라 굴곡진 모양으로 형성되었음을 확인할 수 있다. 용착부와 맞닿은 열판으로부터의 배관 축방향의 열 전달량이 방사상 위치에 상관없이 유사하기 때문에, 열판으로부터의 열의 침투 깊이도 방사상 위치에 따라 거의 변하지 않는다.

Fig. 7은 접합 단계에서 시간에 따른 멜트 내의 유속이력과 형상 변화를 나타낸다. 압착에 의해 내·외벽으로 멜트가 밀려나 용착 비드를 형성한다. 이 용착 비드가 분수 흐름에 의해 밀려 젖혀지는 것을 확인할 수 있다. 이는 기존의 평평한 용착면을 사용하였을 때와 유사하며, 실험적 관찰과도 유사하다[12].

용착 공정 전의 관은 관의 압출공정에서 발생하는 전단력에 의해 관의 축 방향의 배향을 띤다. 멜트 영역을 압착시켰을 때는 관의 축 방향에 수직방향으로의 전단 유동이 나타나고, 이 전단 유동에 의해

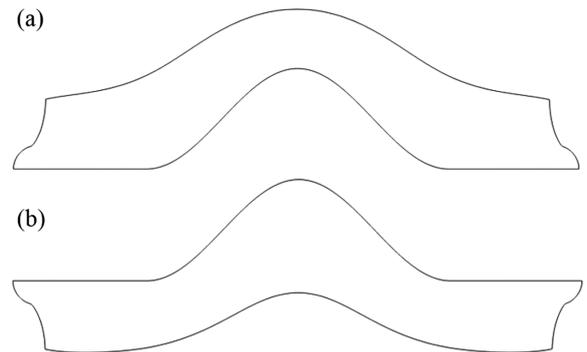


Fig. 6. Melt region after completing the heat soak stage; (a) concave and (b) convex type.

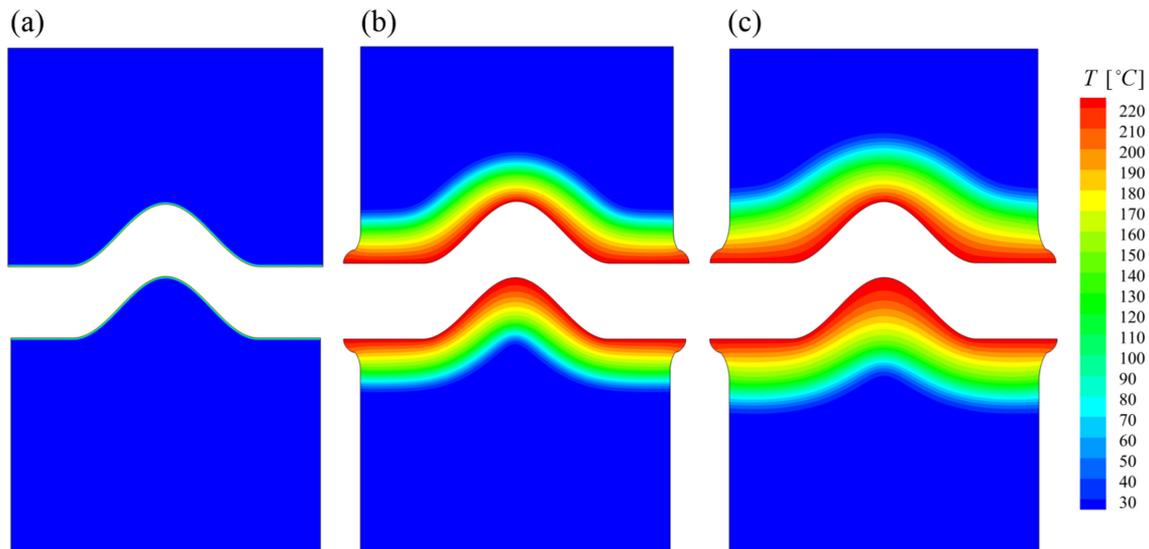


Fig. 5. Temperature contour and pipe shape in the heat soak stage with respect to time; (a)  $t_{\text{soak}} = 1 \text{ s}$ , (b)  $t_{\text{soak}} = 121 \text{ s}$ , and (c)  $t_{\text{soak}} = 240 \text{ s}$ .

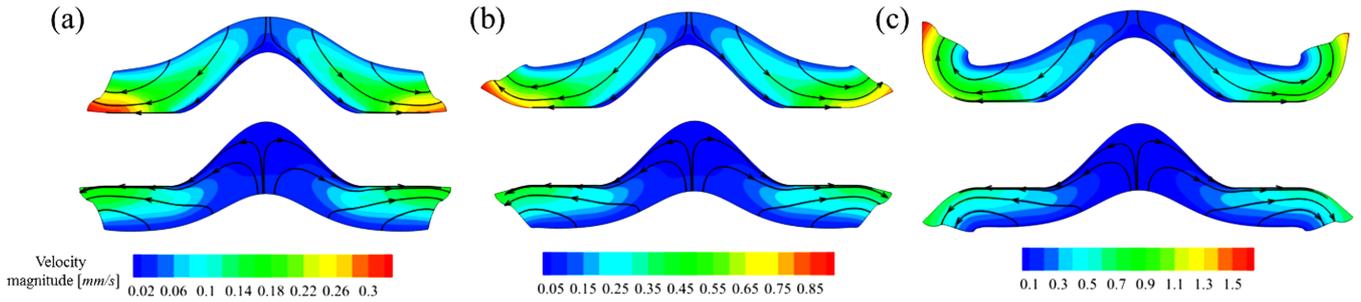


Fig. 7. Velocity magnitude contour and stream lines (the solid lines with arrows) in the melt region in the jointing stage with respect to time; (a)  $t_{jointing} = 3.1$  s, (b)  $t_{jointing} = 6.1$  s, and (c)  $t_{jointing} = 9.1$  s.

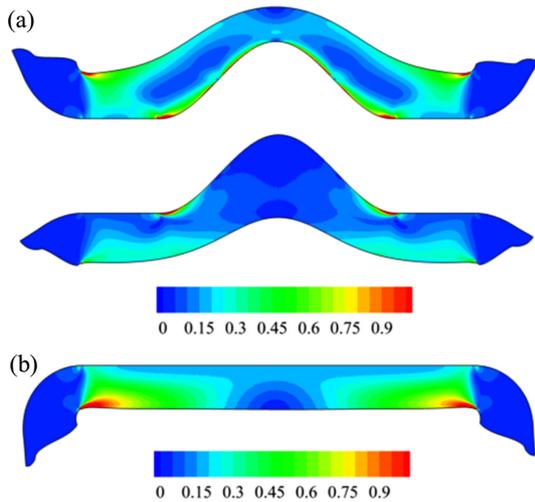


Fig. 8. Shear rate contour in the melt region in the jointing stage (a) with curved welding surface at  $t_{jointing} = 8$  s and (b) with flat welding surface at  $t_{jointing} = 8$  s [12].

폴리머의 배향이 배관 축 방향에서 관의 축방향의 수직 방향으로 바뀐다[12]. 전단율이 클수록 폴리머의 배향을 강하게 유도할 수 있다는 것은 많은 연구자들에 의해 규명되었다[15-17]. Fig. 8은 전단율 이력을 나타낸 것인데 굴곡이 있는 용착면을 사용하였을 때(Fig. 8(a))의 전단율이 기존의 평평한 용착면을 사용하였을 때(Fig. 8(b)) 보다 작다는 것을 확인 할 수 있다. 이는 굴곡이 있는 용착면을 사용하였을 때 폴리머의 배향을 일부라도 관의 축 방향으로 유지할 수 있음을 보여준다. 용착부의 강도는 인장 테스트를 통해 결정되는데, 폴리머의 배향이 인장 방향에 평행한 방향인 배관 축 방향을 유지하고 있을 수록 강도가 높다. 그래서 용착부 강도에 있어서 폴리머 배향을 배관 축 방향으로 유지할 수 있는 굴곡이 있는 용착면이 유리할 것으로 예측된다.

#### 4. 결 론

최근 폴리머 소재의 관의 사용이 증대됨에 따라, 버트 용착을 거친 관의 용착부 강도 향상에 대한 산업적인 요구가 있다. 이러한 요구에 대응하여 용착면에 굴곡을 주어 용착부의 강도를 높이고자 하는 아이디어가 제시되고 이를 뒷받침하는 데이터도 있다[18]. 본 연구에서는 고밀도폴리에틸렌 관을 대상으로 유한요소법 수치모사를 통하여 용착면의 굴곡이 열유체 거동에 어떠한 영향을 줄 것인지를 분석하고, 강도 향상에 대한 가능성을 제시하였다. 선정하여 수치

모사를 진행하였다.

열유화 단계에서 열평창에 의해 관의 내·외벽에 용착 비드가 형성됨을 확인할 수 있었다. 또한 상경계면이 용착면의 형상을 따라 곡선으로 형성되는 것도 확인할 수 있었다. 집합 단계에서는 굴곡진 상경계면과 용착면 사이의 분수 흐름을 확인하였고, 용착 비드의 젖혀짐을 관찰하였다. 이는 실험적 관찰과 유사한 결과이다. 또한 용착면에 굴곡을 줄 경우에 집합 단계에서 상대적으로 작은 전단율을 확인함으로써, 용착면의 굴곡진 형상이 강도 강화에 도움을 줄 수 있음을 예측할 수 있었다. 앞으로, 굴곡 용착면의 사용과 용착부 강도 강화의 관계에 대해 직접적으로 뒷받침할 수 있는 실험적 시도가 수반되어야 하고, 최적화된 용착면의 형상에 대한 논의가 추가로 필요할 것이다.

#### Nomenclature

- a : constant for Carreau-Yasuda model. 314 Pa·s
- b : constant for Carreau-Yasuda model. 2,050 K
- $C_{eff}$  : effective heat capacity
- $D/Dt$  : substantial derivative
- $H_{end}$  : end point of pipe in the axial direction used for heat equations
- h : heat transfer coefficient
- k : thermal conductivity
- n : normal vector
- n : coefficient of shear thinning effects for Carreau-Yasuda model
- p : pressure
- $R_i$  : inner radius of pipe
- $R_o$  : outer radius of pipe
- $r_0$  : parameter to define curved surface
- t : tangential vector
- T : temperature
- $T_a$  : reference temperature for Carreau-Yasuda viscosity model
- $T_h$  : temperature of hot plate
- $T_{room}$  : room temperature (20 °C)
- $T_{final}$  : temperature distribution at the end of thermal soak process
- $t_{soak}$  : end time of thermal soak process
- $t_{jointing}$  : jointing time
- $\Delta t$  : time increment used for numerical simulation
- u : velocity field of melt
- V : squeezing speed of pipe
- $\dot{\gamma}$  : shear rate

$\eta$	: viscosity, depending on temperature and shear rate
$\eta_{\infty}$	: viscosity at infinite shear rate of arbitrary temperature
$\eta_0$	: viscosity at zero shear rate of arbitrary temperature
$k$	: average curvature of free surface
$\Gamma$	: surface tension of melt
$\lambda$	: constant for Carreau-Yasuda model
$\lambda_w$	: parameter for curved surface
$\mu_{\infty}$	: infinite shear viscosity at temperature $T_a$
$\mu_0$	: zero shear viscosity at temperature $T_a$
$\rho$	: density
$\sigma$	: stress of melt
$\tau$	: stress minus isotropic pressure

## 감 사

이 논문은 2016년도 정부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20131510200400).

## References

1. EL-Bagory, T. M., Sallam, H. E. and Younan, M. Y., "Effect of Strain Rate, Thickness, Welding on the J-R Curve for Polyethylene Pipe Materials," *Theor. Appl. Fract. Mec.*, **74**, 164-180(2014).
2. Leskovics, K., Kollár, M. and Bárczy, P., "A Study of Structure and Mechanical Properties of Welded Joints in Polyethylene Pipes," *Mater. Sci. Eng. A*, **419**, 138-143(2006).
3. Wood, A. S., "The Butt-fusion Welding of Polymers," *Chem. Eng. Sci.*, **48**, 3071-3082(1993).
4. Shillitoe, S., Day, A. J. and Benkreira, H., "A Finite Element Approach to Butt Fusion Welding Analysis," *P. I. Mech. Eng. E-J. Pro.*, **204**, 95-101(1990).
5. Benkreira, H., Shillitoe, S. and Day, A. J., "Modeling of the Butt Fusion Welding Process," *Chem. Eng. Sci.*, **46**, 135-142(1991).
6. Wood, A. S., "Numerical Simulation of the Butt-fusion Welding Process," *IMA J. Math. Appl. Bus.*, **7**, 117-127(1996).
7. Barber, P. and Atkinson, J. R., "Some Microstructural Features of the Welds in Butt-welded Polyethylene and Polybutene-1 Pipes," *J. Mater. Sci.*, **7**, 1131-1136(1972).
8. Barber, P. and Atkinson, J. R., "The Use of Tensile Tests to Determine the Optimum Conditions for Butt Fusion Welding Certain Grades of Polyethylene, Polybutene-1 and Polypropylene Pipes," *J. Mater. Sci.*, **9**, 1456-1466(1974).
9. Colaluca, M. A., Earles, L. L. and Malguarnera, S. C., "Fractional Factorial Testing to Determine Processing Parameters Producing Acceptable Heat Fused Joints in Polyethylene Pipe," *Polym-Plast. Technol.*, **20**, 181-195(1983).
10. Decourcy, D. R. and Atkinson, J. R., "The Use of Tensile Tests to Determine the Optimum Conditions for Butt Welding Polyethylene Pipes of Different Melt Flow Index," *J. Mater. Sci.*, **12**, 1535-1551(1977).
11. Riahi, M., Kooshayan, K. and Ghanati, M. F., "Analysis of Effect of Pressure and Heat on Mechanical Characteristic of Butt Fusion Welding of Polyethylene Pipes," *Polym-Plast. Technol.*, **50**, 907-915(2011).
12. Yoo, J. H., Choi, S., Nam, J., Ahn, K. H. and Oh, J. S., "Numerical Analysis of the Heat Transfer and Fluid Flow in the Butt-fusion Welding Process," *Korea-Aust. Rheol. J.*, **29**, 37-49(2017).
13. Mao, W. and Khayat, R. E., "Numerical Simulation of Transient Planar Flow of a Viscoelastic Material with Two Moving Free Surfaces," *Int. J. Numer. Meth. Fl.*, **21**, 1137-1151(1995).
14. Lee, S. H., Koh, H. J., Shim, S. H., Jung, H. W. and Hyun, J. C., "An Optimal Die Design for the Coating Uniformity of Non-Newtonian Liquids in Slot Coating Process," *Korean Chem. Eng. Res.*, **49**(3), 314-319(2011).
15. Huang, C., Winkler, R. G., Sutmann, G. and Gompper, G., "Semi-dilute Polymer Solutions at Equilibrium and Under Shear Flow," *Macromolecules*, **43**, 10107-10116(2010).
16. Islam, M. T. and Archer, L. A., "Nonlinear Rheology of Highly Entangled Polymer Solutions in Start-up and Steady Shear Flow," *J. Polym. Sci. Pol. Phys.*, **39**, 2275-2289(2001).
17. Padding, J. T. and Briels, W. J., "Coarse-grained Molecular Dynamics Simulations of Polymer Melts in Transient and Steady Shear Flow," *J. Chem. Phys.*, **118**, 10276-10286(2003).
18. Oh, J. S., Choi, S. W., "Joining Method for Polyethylene Pipes Using Butt Fusion," The Korean Intellectual Property Office, Application No. 10-2014-0045605(2014).