

HDPE 관의 TEE 성형에 대한 유한요소해석

왕창범¹, 송두호², 박용복^{3*}

Finite Element Analysis of TEE Forming for HDPE Pipe

Chang-Bum Wang¹, Doo-Ho Song² and Yong-Bok Park^{3*}

요약 본 논문에서 HDPE 관의 일체형 TEE성형 공정은 강소성 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 해석을 하였다. 이중 보온관에서 외관으로 사용되는 HDPE 관은 관을 통하여 흐르는 온수의 온도를 유지하기 위한 관으로, TEE는 주관에 가지관을 연결하여 열의 수송방향을 바꾸는 역할을 한다. TEE제작에 압출 용접(Extrusion Welding)을 사용하는 기존의 방법으로는 이음부에서 강도가 취약한 문제점이 발생하기 때문에 HDPE 관을 성형시켜 TEE 형태로 일체화시킨 후에 맞대기 용접(Butt Welding)을 하는 방식을 제안하였다. 열간과 냉간 성형 실험을 실시하였고, 초기 구멍 형태에 따른 모델 파라미터가 강소성 유한요소해석에 의해 규명되어 졌으며, 이는 실제의 제품 제조 공정에 적용되어 졌다.

Abstract TEE Forming process for HDPE(High Density PolyEthylen) pipe has been analyzed by using rigid plastic finite element code, DEFORM-3D. TEE of HDPE pipes is necessary to connect main pipe with branch pipe and change the flow direction of hot water. A HDPE pipe is used as a insulator to maintain the temperature of hot water. A butt welding process through TEE forming for a HDPE pipe is a updated process improving the strength of welding part compared to conventional extrusion welding process. The Experiment of Hot and Cold Forming have been performed. The design parameters such as a initial hole shape have been obtained through rigid-plastic finite element analysis, which is applied to the actual manufacturing process.

Key Words : HDPE, Finite Element Analysis, TEE forming, Butt Welding Process, Extrusion Welding Process

1. 서론

고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 관은 이중보온관에서 외부와 접촉하는 외관을 구성하고 있는데, 열을 수송할 때의 절연재로서 널리 사용된다. 이중 보온관은 열을 수송하는 관이라고 한마디로 요약할 수 있으며, 주로 지역 냉/난방 시스템 등 대단위 주거 지역에서 사용되고 있다. 이중 보온관의 구조는 그림 1 과 같이 직접 열과 접촉하며 열을 수송하는 내관(Carrier pipe), 외부와 접촉하고 보온재를 내관과의 사이에 충전시킬 수 있는 외관(Casing pipe), 그 사이에 보온재(Rigid Polyurethane Foam)로 구성되어 있다. 내관은 주로 강(Steel)으로 되어 있으며 외관은 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)으로 되어 있다. 또한 형태별로는

주관에서 열의 수송방향을 바꾸어 주며 동시에 유동량을 감소시켜 주는 티(TEE)와 유동량만을 감소시켜주는 리듀서(REDCER) 등이 있다.

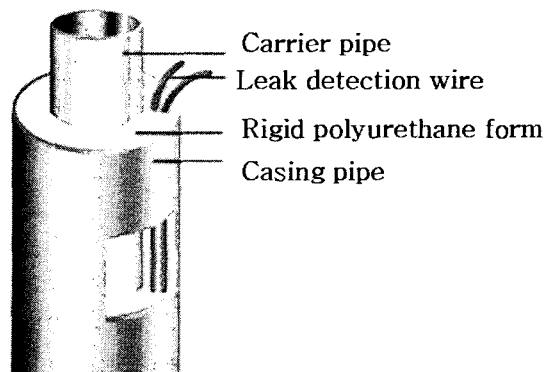


그림 1. 이중 보온관의 구조

¹공주대학교 기계자동차공학부대학원

²현대 모비스

³공주대학교 기계자동차공학부

*교신저자: 박용복(ybpark@kongju.ac.kr)

본 연구는 TEE의 성형을 다루고 있는데, 주관(Main pipe)과 가지관(Branch pipe) 사이의 연결부위에 사용된다. 이 부분은 관을 통하여 흐르는 유체의 압력 및 온도, 태양열과 지열에 의한 관의 수축/팽창으로 인한 결합이 많이 발생하기 때문에 제품의 품질검사가 엄격히 시행되고 있다. 지금까지 HDPE를 이용한 TEE 제작은 그림 2 와 같이 주관에 구멍을 뚫고, 가지관과 동일한 소재인 용융된 HDPE를 접착하는 압출 용접(Extrusion Welding) 방식을 사용하여 왔는데, 작업은 간단하지만 이음부에서 강도가 취약한 것으로 알려져 있다. 따라서 기존의 제조공정으로는 위에서 제시한 품질을 충족시키지 못하고 있다.

Kim[1]등은 강에 대하여 FEM을 이용하여 액압 벌지 성형법(Liquid Bulge Forming)에 의한 TEE 제작을 연구하였으며, Filho[2]등은 일래스토머(Elastomer) 막대를 이용한 TEE 성형에 대하여 해석적 방법으로 슬랩 방법을 사용하였고, Wang[3]등은 실험적 방법으로 폴리우레탄의 TEE 성형에 대해 연구하였으나, HDPE 소재에 대해 인발 펀치를 사용한 TEE 제작에 관한 연구는 아직 체계적으로 이루어진 바가 없다.

본 논문에서는 TEE의 최적성형을 위하여 가열여부, 인발 펀치의 설계, 최적 초기 구멍 형상 및 인발된 부위의 두께 균일화로부터 주관과 가지관의 유효 용접면적을 증가시킴으로써 작업의 단순화와 생산성을 도모하는 방법도 종합적으로 연구하였다.

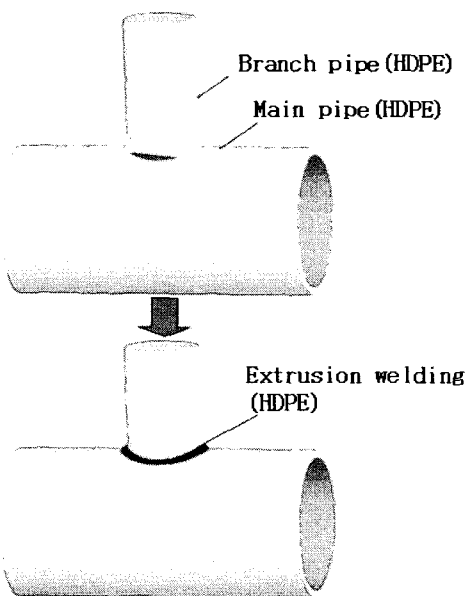


그림 2. 기존 공정

2. TEE 제조공정

2.1 신제조 공정

이음부에서 강도가 취약한 것으로 알려져 있는 기존의 공정에 대한 대안으로 제시되고 있는 방법이 주관을 성형시켜 TEE 형태로 일체화시킨 후에 가지관과 주관의 이음부를 국부 가열하여 압착시킴으로서 모재의 강도와 동일하게 하는 맞대기용접(Butt Welding)이 있는데(그림 3), 이 방법의 기술적 어려움은 일체형 TEE의 인발 방법이다.

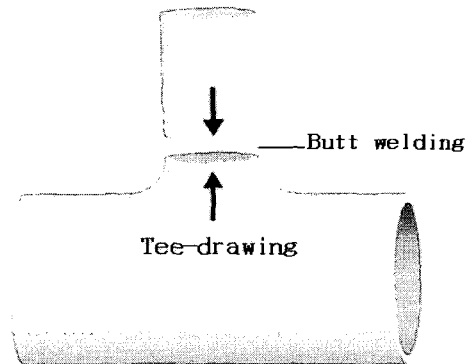


그림 3. 제안된 공정

2.2 열간성형 실험

HDPE 소재는 용융점이 낮고 재료의 물성이 온도에 민감하여 지나친 가열이 소재에 가해질 경우 소재의 조직/물성 변화가 예상되고, 변형 후 원래의 형상으로 돌아가려는 성질이 매우 강하여 변형후의 형상을 유지시키기 어려운 것으로 알려져 있으며, 이러한 성질(Spring Back) 때문에 원하는 치수의 형상을 정확히 만족시키는 제품의 성형이 대단히 어렵다. 열간성형방법은 변형부위를 국부적으로 가열하여 인발 TEE를 국부성형하고 급냉을 시키면 변형을 최소화 할 수 있는 방법이다.

그림 4 와 같이 가열시킬 부위에 열풍을 적절히 분사시켜 가열 후 성형한 경우 그림 5 처럼 양호한 제품의 제작이 가능한 것으로 확인되었으나, 냉간 성형에 비해 기본적으로 가열공정이 추가됨으로서 발생하는 재료의 미세한 조직 및 물성치 변화에 대한 품질 인증이 어렵고 작업 특수성으로 인하여 균일한

제품의 생산에 대한 확실한 보장이 없기 때문에 작업의 표준화 및 품질의 균일성이 확실히 보장될 수 있는 냉간 성형 방식에 대해 실험을 수행하였다.

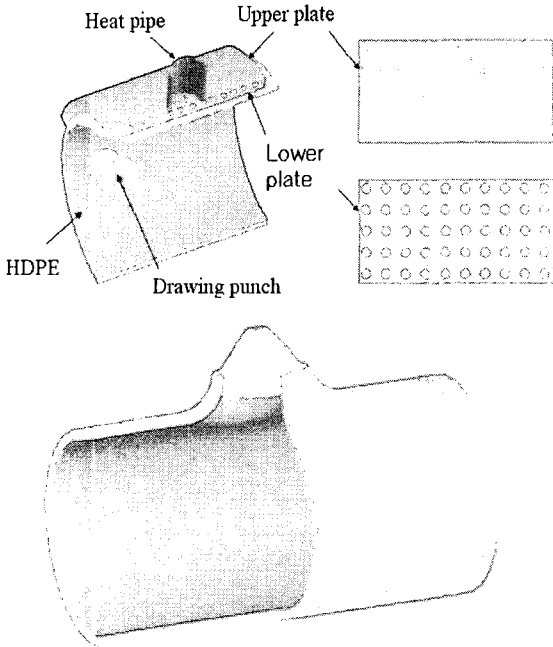


그림 4. 열간 성형 모델

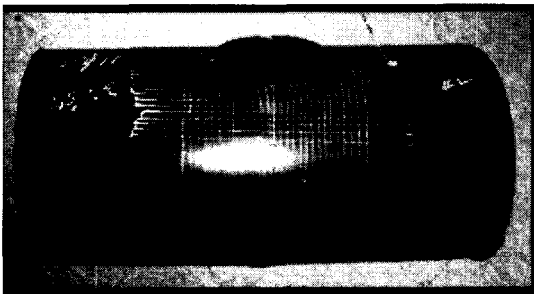


그림 5. 열간 성형에 의해 인발된 TEE

2.3 냉간성형 실험

상온에서 펀치를 이용하여 TEE를 성형하기 위해서는 변형하중이 상당히 크기 때문에 가압용 프레스에 의해 제품성형을 하였으며, 다양한 크기의 주관에 대응하기 위해 그림 6 에서 보는 바와 같이 충분히 큰 곡률을 가진 다이를 제작하여 실험을 수행하였다. 실험 결과 주관의 진원도를 유지하기 위해서는 초기 주관의 반경과 같은 반경을 갖는 다이가 필요함을 확인하였다. 또한 변형 후의 잔류응력이 크기 때문에 가지관 구멍의 크기가 감소하여 주관의 인발 부분을 맞대기 용접 할 수 없게 되는 문제점이 있어 그림 7 처럼 변형 후 링을 삽입하여 잔류응력으로 인한 변형량을 최소화하는 방식을 도입하였다.

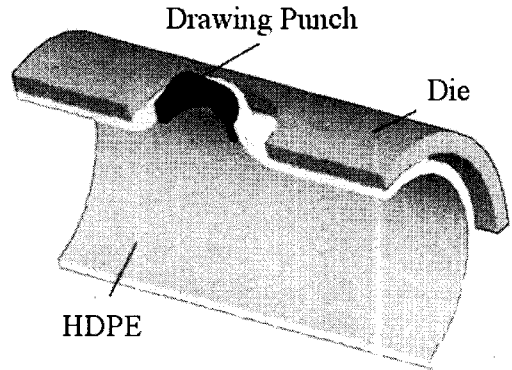


그림 6. 냉간 성형 모델

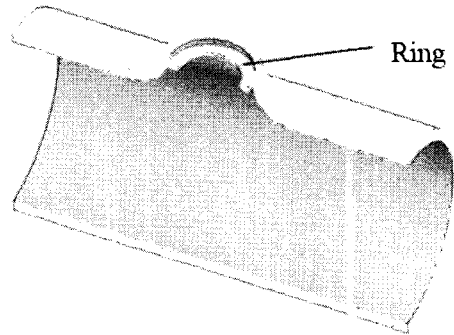


그림 7. 냉간 성형 후 링의 삽입

3. TEE 성형에 대한 유한요소해석

3.1 유한요소 모델

TEE의 성형공정은 대변형을 수반하는 일종의 소성가공 공정을 거치기 때문에 재료(HDPE)의 응력과 변형도 사이의 비선형 관계식을 알아야 하며, 그에 따른 적절한 해석방법이 선택되어야 한다. 유한요소법을 이용한 소성가공 해석 방법에는 탄소성 해석, 강소성 해석, 점소성 해석 등이 있는데, 각각이 나름대로 장단점이 있으며 해석 목적에 따라 선택적으로 사용되고 있다.

본 연구에서는 상업용 유한요소 해석 프로그램인 DEFORM-3D[4]를 이용하여 강소성 유한요소법으로 공정을 해석하였다. 성형 제품의 기하학적 특성상 대칭 조건을 이용하여 전체의 1/4 만을 해석하면 충분하고 그림 8 과 같이 펀치와 다이는 강체로 가정하고, 소재에 대해서만 유한요소 격자(Tetrahedron element)를 구성하였고, HDPE의 내경과 외경의 길이는 표 1과 같다. HDPE 소재는 금속과 달리 항복응력이 일반적으로 잘 정의되어 있지 않아, 탄성과 소성변형 범위가 명확하게 구별되지 않

으나, 많은 문헌[5~9]을 참조하여 주관의 응력과 변형도 관계를 식(1)과 같이 선정하였다. 마찰계수는 $\mu = 0.1$ 로 하였고, 절점과 요소의 갯수는 각각 5404개, 16462개이다.

$$\bar{\sigma} = 36.57(0.02 + \bar{\epsilon})^{0.039} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

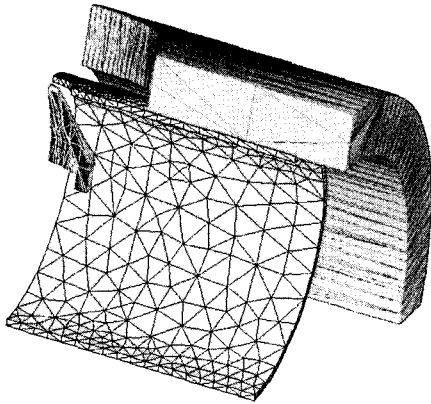


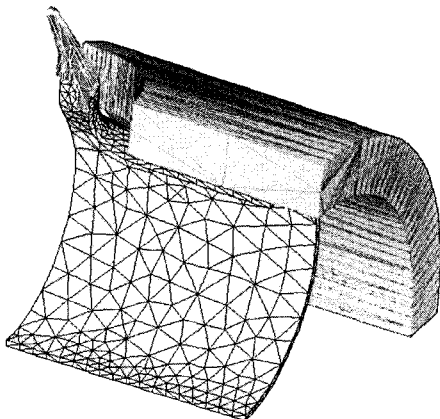
그림 8. 초기 MESH 형상

표 1. HDPE의 내경과 외경의 치수

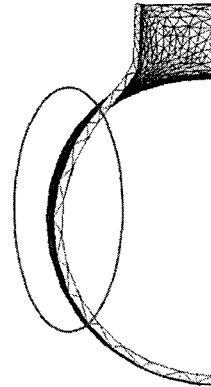
| HDPE | Item | Specification(mm) |
|-------------|--------------|-------------------|
| Main pipe | Outer radius | 125 |
| | Inner radius | 118.6 |
| Branch pipe | Outer radius | 62.5 |
| | Inner radius | 56.1 |

3.2 해석 결과 및 고찰

그림 9(a)은 다이의 내경이 주관의 외경보다 큰 경우의 해석 결과를 보여주며 그림 9(b)와 같이 성형후 TEE의 진원도가 유지되지 못했다.



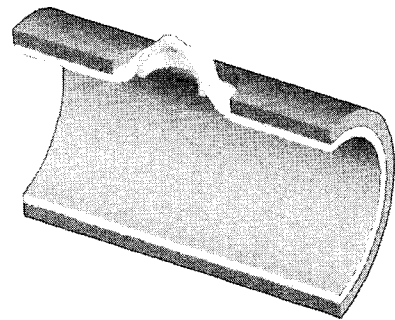
(a) 기존 다이



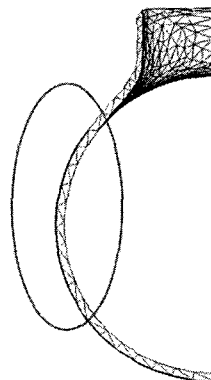
(b) 성형 후 단면 형상

그림 9. 기존 다이에 의한 해석 결과

따라서 다이의 크기를 TEE의 치수와 동일하게 그림 10(a)와 같이 설계 변경하여 해석한 결과 그림 10(b)에서와 같이 수정된 다이에 의해 진원도가 완벽한 제품이 얻어졌다.



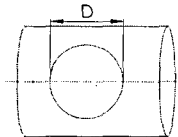
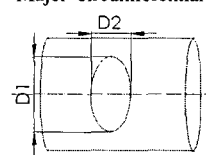
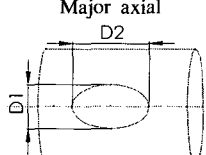
(a) 수정된 다이



(b) 성형 후 단면 형상

그림 10. 수정된 다이에 의한 해석 결과

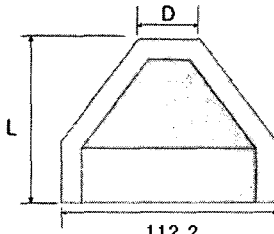
표 2. 초기 구멍의 형상과 치수

| Hole shape | | Parameter(mm) | |
|------------|--|--------------------|--------------------|
| Circle |  | D = 40 | D = 50 |
| | | | |
| Ellipse | Major circumferential  | D1 = 40 D2 = 30 | D1 = 50 D2 = 40 |
| | Major axial  | D1 = 30 D2 = 40 | D1 = 40 D2 = 50 |

TEE의 성형공정상의 특징 때문에 주관에는 펀치를 잡아 끌 수 있도록 초기에 구멍을 만들어 주어야 하는데, 본 연구에서는 표 2와 같이 초기 구멍의 형상을 원형과

원주방향으로 장축을 갖는 타원형과 축방향으로 장축을 갖는 타원형으로 지름의 길이에 따라 그림 11과 같이 해석을 수행하였다.

표 3. 펀치의 치수

| | |
|---|---------------|
|  | Parameter(mm) |
| | D = 30 |
| | L = 100 |

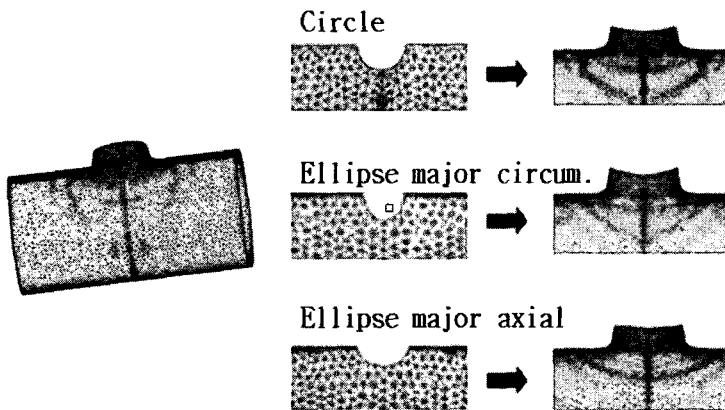
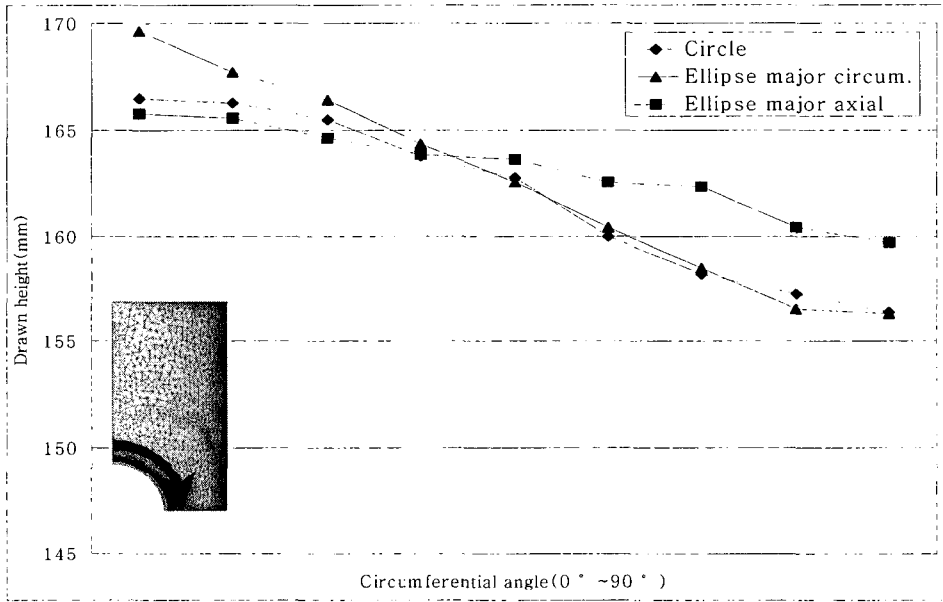


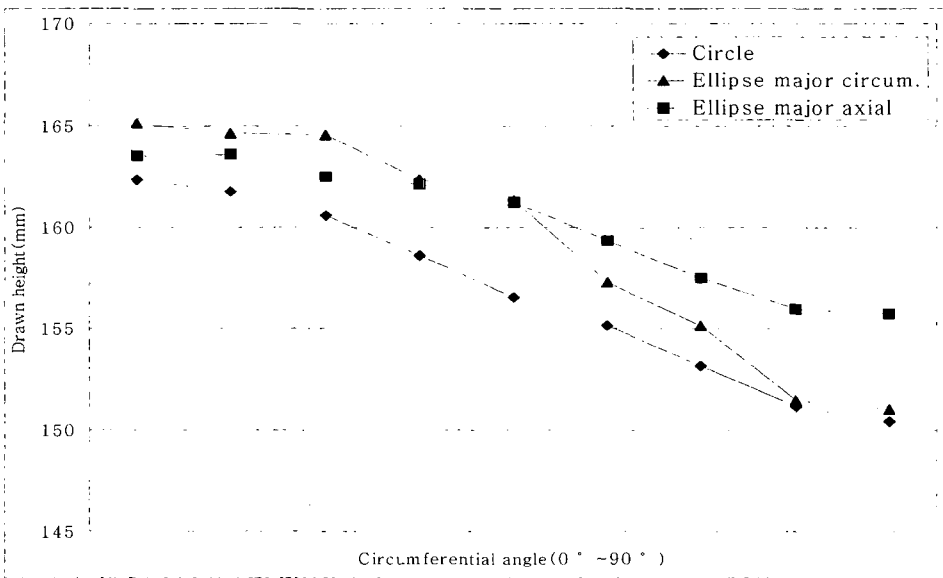
그림 11. 해석 전·후의 형상

그림 12는 관의 중심으로부터 인발되는 TEE까지의 높이 균일성을 비교한 결과로 축방향으로 장축을 갖는 타원형 구멍이 가장 일정한 것으로 나타났고 초기 구멍의 지름이 커짐에 따라 인발 되는 높이는 작아지는 것으로 나타났다.

인발 되는 높이의 균일성은 두께의 균일성을 보장하며 이것은 가지관과 맞대기 용접할 때 유효 단면적의 증가로 제품의 강도 향상을 가져옴으로써 제품의 파단 가능성을 최소화 한다.



(a) 초기 구멍 치수 D=40

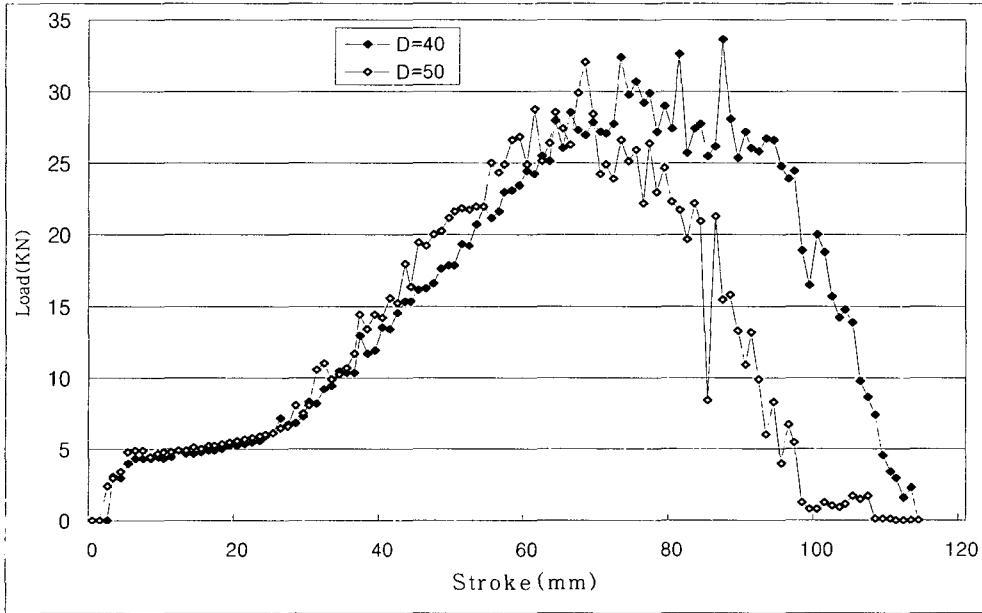


(b) 초기 구멍 치수 D=50

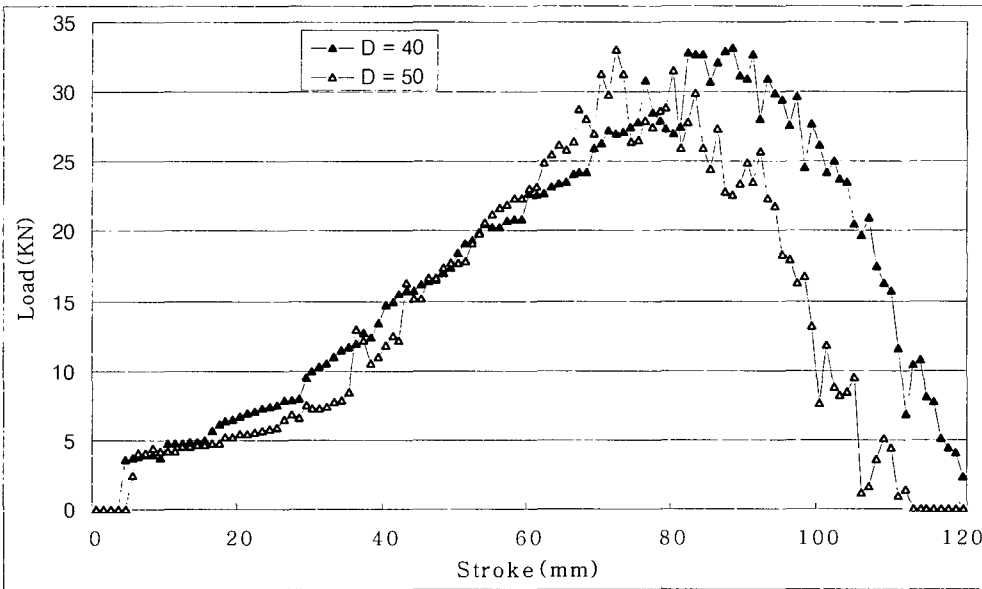
그림 12. 초기 구멍 형상에 따른 인발된 높이의 비교

그림 13은 지름과 구멍 형상에 따른 하중을 보여 주고 있는데, 원형과 축방향으로 장축을 갖는 타원형과 원주방

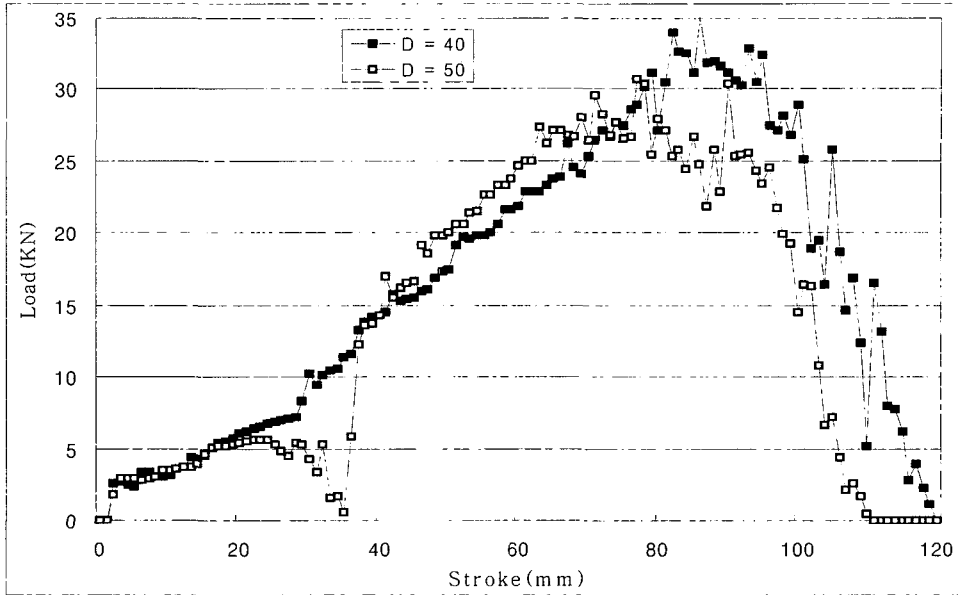
향으로 장축을 갖는 타원형의 성형 하중이 거의 비슷하



(a) 원형



(b) 원주방향으로 장축을 갖는 타원형



(c) 축방향으로 장축을 갖는 타원형

그림 13. 초기 구멍 지름에 따른 하중의 비교

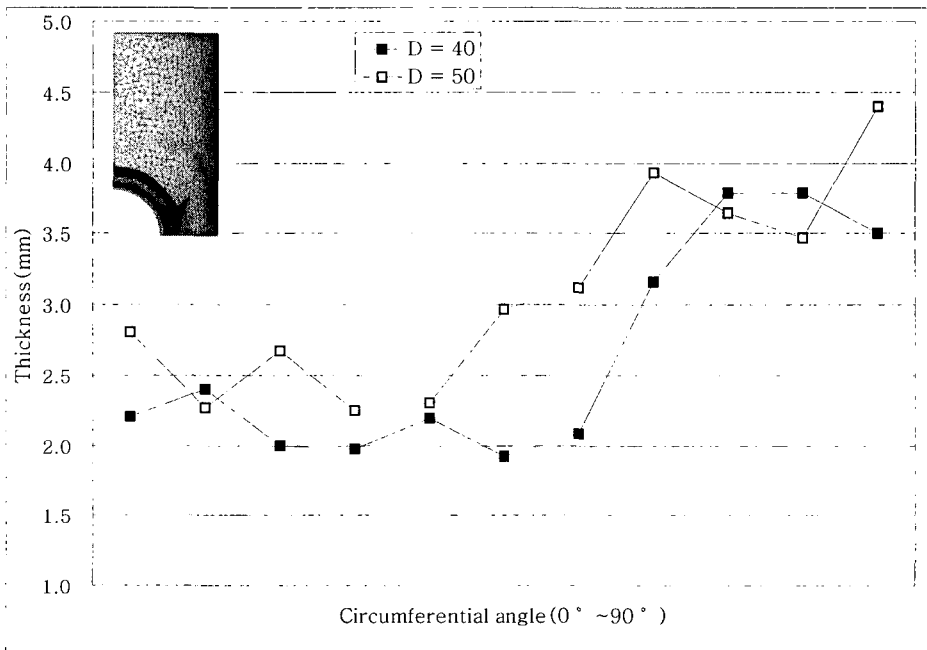


그림 14. 초기 구멍 지름에 따른 인발된 관의 두께 비교

그림 14는 인발되는 높이가 가장 균일한 결과를 보인 원주 방향으로 장축을 갖는 경우 관두께의 균일성을 비교한 결과로, 초기 구멍의 지름이 커질수록 두께가 발생

하였다. 이는 초기 구멍의 크기를 더 크게 하는 것이 하중 및 제품 응력 감소를 가져와 제품의 품질을 보장한다.

4. 결론

인발 TEE의 성형방법으로서 열간성형과 냉간성형을 제시하였으며, 각각에 대한 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 열간성형은 형상면에서 비교적 만족스러운 제품을 얻을 수 있었으나, 냉간 성형에 비해 공정이 추가됨으로서 발생하는 재료의 미세한 조직 및 물성치 변화에 대한 품질 인증이 어렵고, 균일한 제품의 생산에 대한 확실한 보장을 할 수 없는 단점이 있다.
2. 냉간성형은 상온에서 작업이 진행되는데, 진원도를 유지하기 위해서는 주관의 반경과 같은 반경을 갖는 다이가 필요함을 확인하였으며, 그러한 결과는 본 성형 해석에서도 확인되었다.
3. 변형후의 잔류응력이 크기 때문에 인발 구멍의 크기가 감소하여 주관의 인발 부분을 맞대기 용접을 할 수 없게 되는 문제점이 있어 변형 후 링을 삽입하여 잔류응력으로 인한 변형량을 최소화하는 방식을 도입하였다.
4. 주관에 만들어 주는 초기 구멍 형상은 축방향으로 장축을 갖는 타원형 형상의 구멍이 인발 되는 높이가 균일함에 따라 두께의 균일성을 보장하며 초기 구멍이 커짐에 따라 인발 되는 높이가 작아지는 것을 알 수 있다.
5. 초기 구멍 형상에 따른 성형 하중이 거의 비슷하였으며, 그 중에서 초기 구멍의 크기를 더 크게 하는 것이 하중의 감소와 두께의 증가를 가져와 품질을 보장한다.

참고문헌

- [1] H.J. Kim, B.H. Jeon, H.Y. Kim and J.J.Kim, "Finite Element Analysis of The Liquid Bulge Forming Process", Advanced Technology of Plasticity, 1993 - Proceeding Fourth International Conference on Technology of Plasticity.
- [2] L.A. Moreira Filho, J.C. Menczes, and H.A. AL-Qureshi, "Analysis of Unconventional TEE Forming on Metal Tubes", J. of Materials Processing Technology vol.45, pp. 383-388, 1994.
- [3] Wang Tonghai, Sun Sheng and Mo Dexiu, "The Reserch of Tube Bulging Using Polyurethane under Compound External Forces and it's Application", Advanced Technology of Plasticity, 1993.
- [4] Deform-3D User Manual, 1999.

- [5] R. Byron Bird, Rovert C. Armstrong and Ole Hassager, "Dynamics of polymeric liquids-Volume1, Fluid mechanics", 2'nd ed. A Wiley-Interscience Publication, JOHN WILEY & SONS, 1987.
- [6] L.lin and A.S. Argon, "Review - Structure and plastic deformation of polyethylene", Journal of Materials Science, Vol.29, pp.294-323, 1994.
- [7] R. Hill, "The Mathematical Theory of Plasticity", Clarendon Press, Ocford, 1950
- [8] S.H. Ahamad "Flow Stress of Density Poethylene and Nylon 66 at High Rates of Strain" Polymer International vol. 28, pp.291-294, 1992.
- [9] F. Daver and B.W Cherry "Modeling the Elastic Modulus of HDPE in Terms of Stress-Dependent Thermally Activated Rate Process" Journal of Applied Polymer Science, Vol. 59, pp.453-457, 1996.

왕 창 범(Chang-Bum Wang)

[정회원]



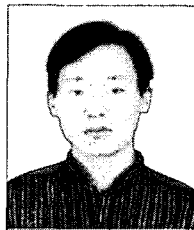
- 2005년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부 (공학사)
- 2006년 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 대학원 석사과정

<관심분야>

소성가공, 유한요소법, CAD/CAM/CAE

송 두 호(Doo-Ho Song)

[정회원]



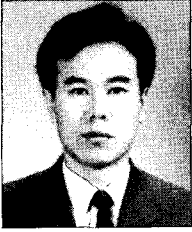
- 1994년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부 (공학사)
- 2000년 2월 : 공주대학교 기계자동차공학부 대학원 (공학석사)
- 2000년 ~ 2004년 : 비스티온 인터리어스 코리아(주)
- 2004년 ~ 현재 : 현대 모비스(주) 내장부 모듈 파트

<관심분야>

소성가공, 유한요소법, CAD/CAM/CAE

박 용 복(Yong-Bok Park)

[정회원]



- 1985년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 한국과학기술원 생산공학과 (공학석사)
- 1987~1991년 : 한국중공업, KIST, 한국생산기술연구원
- 1995년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)

- 1995년 9월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 부교수

<관심분야>

소성가공, 유한요소법, CAD/CAM/CAE