

초장축 스테인레스/복합재료 파이프의 피팅 공정 개발

박수현*, 이춘만⁺

(논문접수일 2007. 12. 3, 심사완료일 2007. 12. 31)

Development of Fitting Process for Extra Long Stainless/Composite Material Pipes

S. H. Park*, C. M. Lee⁺

Abstract

Rubbing-roller is used for manufacturing liquid crystal display, and static displacement of the rubbing-roller becomes bigger as length of the rubbing roller made of aluminum is getting longer. Therefore, material of the rubbing-roller is changed from aluminum to CFRP(Carbon Fiber Reinforced plastic). Recently thermal spraying is applied to manufacturing process of long rubbing-roller. The thermal spraying has disadvantages such as increment of manufacturing time and fraction defective caused by density of stainless steel particle. In this study, fitting process by drawing was suggested and FEM analysis with Tsai-Wu failure theory and fitting experiments are carried out to find adequate shrink allowance. The suggested shrink allowance gives proper adhesive force, and CFRP failure is not occurred. Furthermore, the fitting process is applied to long rubbing-roller and availability of the fitting process is studied by measurement of roundness, straightness and shear strength.

Key Words : Stainless Pipe(스테인레스 파이프), Composite Material Pipe(복합재료 파이프), Drawing(인발), Thermal Spraying(용사), Shrink Allowance(축재)

1. 서론

러빙 롤러(Rubbing Roller)는 액정표시소자(Liquid Crystal Display)의 제조공정 장비인 러빙기(Rubbing Machine)에 장착되는 핵심 부품이다. LCD대형기판의 제조 장비 중 하나인 러빙기는 배향막(Orientatiton Film) 표면을 러빙포를

이용하여 균일한 압력과 속도로 마찰시켜 배향막 표면에 고분자 사슬을 일정한 방향으로 정렬함으로써 액정분자의 배향을 결정시켜 주는 장비이다.

액정표시소자의 휘도나 응답성을 균일하게 하기 위해서는 러빙처리에 있어서 배향층의 표면을 균일하게 문지름으로써 액정재료를 균일하게 배향시키는 것이 필요하다. 따라서 러빙

* 창원대학교 기계설계공학과 대학원

⁺ 교신저자, 창원대학교 기계설계공학과 (cmlee@sarim.changwon.ac.kr)

주소: 641-773 경상남도 창원시 사림9번지

롤러와 유리 기관의 위치 결정, 특히 러빙 롤러와 유리기관 위의 배향막 사이의 거리를 균일하게 유지할 필요가 있다. 이런 용도로 사용되는 러빙 롤러는 기존에 알루미늄 재질의 원통을 가공하여 사용하였으나, 액정의 대면적화에 따라 기관 크기가 대형화되므로 러빙 롤러의 길이도 길어지게 되었다. 따라서 러빙 롤러의 자체 하중에 의한 중간부의 처짐량이 알루미늄 재질의 롤러로서는 평면과의 평행도를 맞추지 못하는 수준까지 도달하게 되어 최근에는 탄소섬유 혹은 유리섬유가 함유된 고강도/고강성의 에폭시 복합재료를 사용하여 롤러의 대형화에 따른 중간부위 처짐량을 최소화하고 있는 추세이다. 이와 같이 섬유강화 복합재료는 비강성 및 비강도가 매우 우수하여 여러 분야의 구조재로 사용되고 있다. 또한 진동에 대한 고감쇠 특성, 작은 열팽창계수, 열특성 등이 우수하여 기존에 금속재료로 사용되던 분야의 상당부분들이 빠르게 복합재료로 대체되고 있다^(1,2).

현재 러빙 롤러의 제조공정으로는 장축에 대한 열박음 연구가 진행 중이며, 열박음 시의 진원도 공차의 원인으로 후처리 공정에서의 문제점을 발생시킨다. 그렇기 때문에 복합재료 파이프 위에 스테인레스 입자를 입히는 용사 공정이 적용되고 있으며, 이런 용사 공정은 작업시간의 증대와 스테인레스 입자의 밀도에 따른 불량률의 증가가 뒤따른다⁽³⁾.

본 논문에서는 초장축 이종소재 파이프의 피팅 방법으로써 스테인레스 파이프 속에 복합재료 파이프를 삽입 후 동시에 인발하는 공정을 제안하였다. 제안된 인발 공정에 대하여 Tsai-wu 파손 이론식을 적용한 선형 유한 요소 해석을 실시함으로써 복합재료 파이프의 파손이 발생하지 않고 두 소재 간의 적절한 접합력이 유지되는 쥘새를 찾고자 하였고 또한, 피팅 실험을 통해 진원도와 접합강도 즉, 전단강도를 고찰하여 제안된 인발 공정을 초장축 파이프에 적용함으로써 그 유용성을 검증하였다.

2. 탄소 복합재료 파이프의 쥘새 선정

본 논문에서는 인발시 쥘새 크기에 따른 선형 유한 요소 해석을 상용프로그램인 ANSYS 10.0을 이용하였다. 파손 여부 판단은 사용한 재료와 하중조건과 관계되어 있는 파손 모드에 따라 달라진다. 취성 거동이 지배적인 경우에는 최대 응력 이론과 변형률 이론이 좀 더 효과적이고 전단이나 압축 하중하의 연성 거동이 지배적인 경우 Tsai-Wu 파손 이론식이 좀 더 효과적이다. 본 논문에서는 식 (1)에 주어진 Tsai-Wu 파손 이론식을 이용하였으며, 이 식에서 좌측항 값이 1보다 크게 된다면 파손이 발생한 것으로 간주한다^(1,4).

$$F_{ij}\sigma_i\sigma_j + F_i\sigma_i \leq 1 \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

복합재료 파이프의 파손 되지 않는 쥘새를 선정하기 위하여 내경 $\varnothing 123.44\text{mm}$, 외경 $\varnothing 138\text{mm}$, 길이 $1,720\text{mm}$ 인 복합재료 파이프를 모델링하여 지름 방향 쥘새(diameter shrink allowance)를 $\varnothing 0.05\text{mm}$, $\varnothing 0.07\text{mm}$, $\varnothing 0.1\text{mm}$, $\varnothing 0.12\text{mm}$, $\varnothing 0.15\text{mm}$ 로 주었다. 이때의 쥘새비는 쥘새를 복합재료 파이프의 지름으로 나눈 값으로 0.0003, 0.0005, 0.0007, 0.0009, 0.001이 된다.

복합재료 파이프는 적층(layered structural solid)요소를 사용하여 3D로 구성하였으며, Fig. 1과 같이 요소 수는 2,880개이며 절점의 수가 8,736개인 유한 요소 모델을 구성하였다. Fig. 2는 지름 방향 쥘새에 따른 강제 변위 축소를 한 구속조건을 보여주며 이때의 구속조건은 인발에서의 동일한 구속을 부여하기 위하여 지름 방향의 구속 조건만 부여하고 축 방향의 구속은 하지 않았다. 본 연구에 사용된 복합재료는 SK 케미컬사의 USN175, URN300, WSN3K들로 38ply 적층된 것이며, 재료 물성치는 Table 1과 같다.

Table 2는 각각의 쥘새에 따른 복합재료의 Tsai-Wu 파괴

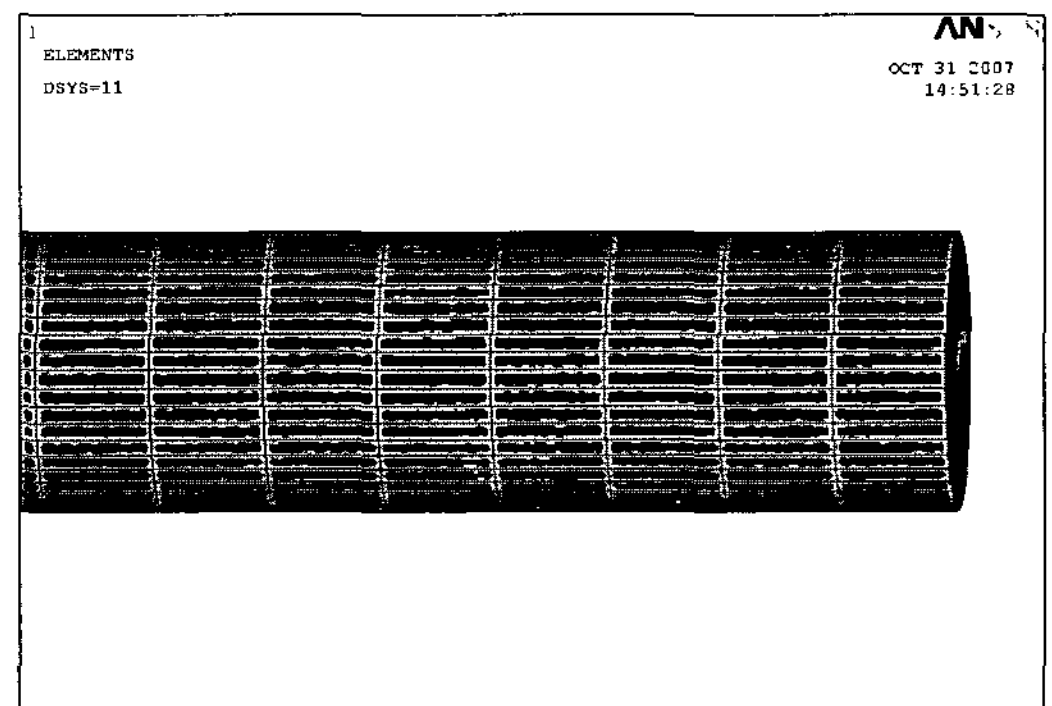


Fig. 1 FE-model of composite material

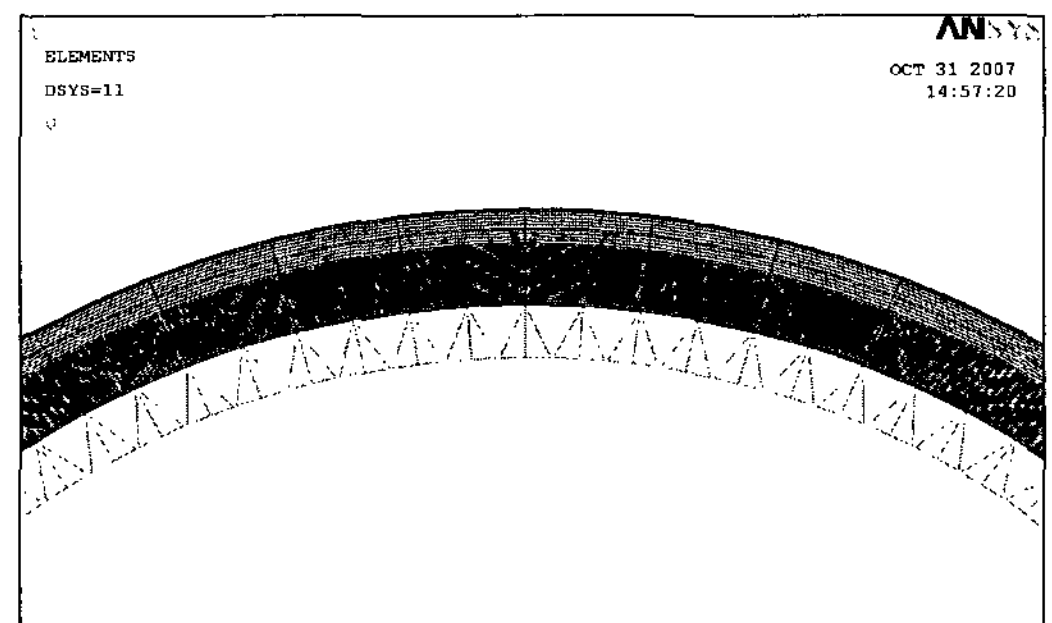


Fig. 2 Displacement along hole boundary

Table 1 Material properties

	USN175	URN300	WSN3k
E(GPa)	Ex = 131 Ey = 8.2 Ez = 8.2	Ex = 380 Ey = 5.1 Ez = 5.1	- 65.4 -
ν	$\nu_{12} = 0.28$ $\nu_{13} = 0.28$ $\nu_{23} = 0.47$	$\nu_{12} = 0.28$ $\nu_{13} = 0.28$ $\nu_{23} = 0.47$	- 0.058 -
G(GPa)	Gxy = 4.5 Gyz = 3.5 Gxz = 4.5	Gxy = 5.55 Gyz = 4.55 Gxz = 5.55	Gxy = 3.59 - -
Density(Kg/m ³)	1580	1580	1580
X _T (MPa)	2000	1500	959.1
X _C (MPa)	1400	1000	692.9
Y _T (MPa)	61	24	959.1
Y _C (MPa)	130	100	692.9
S _{xy} (MPa)	70	40	118.6
S _{xz} (MPa)	70	40	-
S _{yz} (MPa)	40	30	-

Table 2 Result of FEM analysis

Shrink allowance(ϕ)	Tsai-Wu failure index
0.05	0.06
0.07	0.09
0.1	0.75
0.12	0.93
0.15	1.81

지수를 나타낸 표로서, 파괴지수가 $\phi 0.15\text{mm}$ 일 때 1이상이 됨을 알 수 있다. 이 표에서 보는 바와 같이 지름 방향의 쥘새가 $\phi 0.12\text{mm}$ 이하 일 때는 0.93으로 인발시 복합재료 파이프의 파괴가 일어나지 않음을 알 수 있다. 그러나 복합재료 파이프의 진원도 공차가 $+0.02\text{mm}$ 이므로 인발시 $\phi 0.12\text{mm}$ 의 쥘새는 복합재료 파이프의 파손을 일으키고 $\phi 0.1\text{mm}$ 의 쥘새가 복합재료 파이프의 파손을 일으키지 않고 접합력 면에서도 적절하다고 판단되었다.

3. 예비 실험

본 연구에서의 초장축에 대한 피팅은 열박음 및 냉간 박음

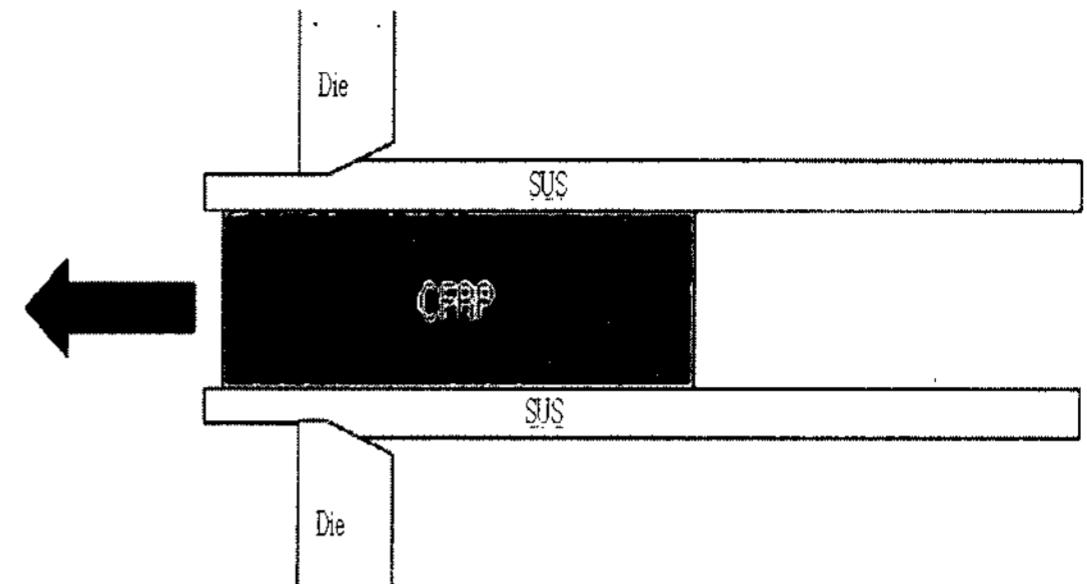


Fig. 3 Drawing process

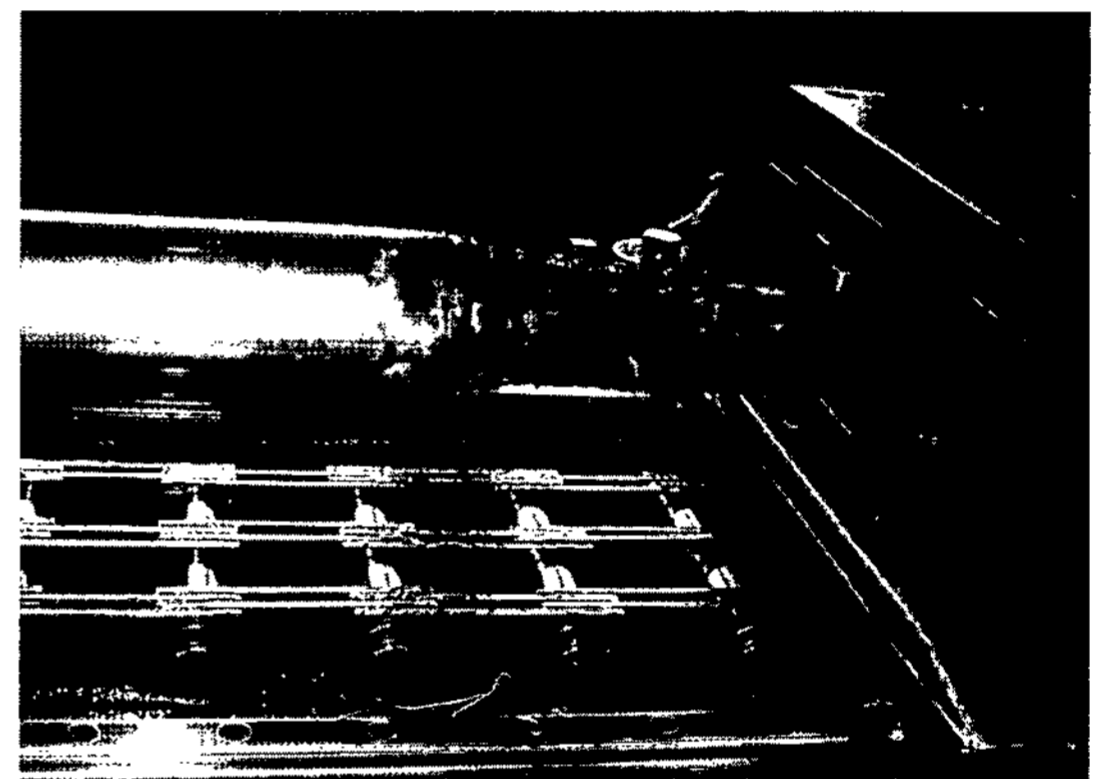


Fig. 4 Drawing with stainless-tube and composite material

이 불가능하므로 Fig. 3과 같이 복합재료 파이프를 스테인레스 파이프 속에 삽입시킨 상태에서 동시에 인발하는 방법으로 주로 맨드릴없이 파이프의 외경을 줄이는 목적으로 적용되는 튜브 인발 공정을 이용하였다. 이 공정을 적용한 초장축 복합재료 파이프와 스테인레스 파이프의 피팅 실험에서는 총 세 차례 인발 공정이 수행되었다. 1차와 2차 인발에서는 얇은 스테인레스 파이프를 제조하기 위하여 실시되었으며, 3차 인발에서 복합재료 파이프와 스테인레스 파이프를 동시에 인발함으로써 피팅을 하였다. 1차 인발에서 사용된 금형은 $\phi_{out}149\text{mm}$, $\phi_{in}145.40\text{mm}$ 인 내·외경 금형이고, 2차 인발에서 사용된 금형은 $\phi_{out}145\text{mm}$, $\phi_{in}141.55\text{mm}$ 인 내·외경 금형을 이용하였다. 최종 피팅 인발에서 사용되는 금형은 $\phi_{out}141.34\text{mm}$ 인 금형을 사용되었으며, T사의 인발기를 사용하였다. 또한 3차 인발 피팅 후 최종 제품의 진원도와 접합력에 영향을 끼치는 3차 인발 금형은 진원도 $6\mu\text{m}$ 로 가공하였다.

본 연구에서는 최종 인발 전에 두께 1.72mm , 외경 $\phi 145$

mm인 스테인레스 파이프 제조를 위하여 외경 $\varnothing 152.5\text{mm}$, 두께 2mm인 파이프를 두 차례의 인발 공정을 수행하였으며, 이때의 단면 감소율은 각각 11%로 하였고, 인발력은 176.5KN이었다. 이종 소재의 피팅 단계인 3차 인발에서는 유한 요소 해석 결과를 바탕으로 줌새를 $\varnothing 0.1\text{mm}$, $\varnothing 0.15\text{mm}$ 로 선정하였으며, 이 줌새를 주기 위하여 $\varnothing_{\text{out}} 141.34\text{mm}$, $\varnothing_{\text{out}} 141.29\text{mm}$ 인 인발 금형을 통하여 인발을 하였다. 본 연구의 실험에 사용된 스테인레스 파이프는 SUS304계열이며, Fig. 4는 탄소 복합재료 파이프를 스테인레스 파이프 속에 넣고 동시 인발하는 모습이다.

4. 예비 실험 결과

냉간 인발을 적용한 두 파이프의 피팅에서 $\varnothing 0.15\text{mm}$ 의 줌새를 주었을 때는 Fig. 5와 같이 탄소복합재료 파이프의 파손을 확인하였고, $\varnothing 0.1\text{mm}$ 의 줌새를 주었을 때는 Fig. 6에서 보는바와 같이 복합재료의 파손이 없이 인발이 완료되었다. 또한 육안 검사로 통하여 두 소재의 접합이 잘 이루어졌다고 판단되어진다.

4.1 접합강도

냉간 인발 공정을 이용하여 피팅한 러빙 롤러의 스테인레스 파이프 외경은 $\varnothing 141.4\text{mm}$ 이고, 내경은 $\varnothing 138\text{mm}$ 이며, 축으로 사용되는 복합재료 파이프는 외경 $\varnothing 138\text{mm}$, 내경 $\varnothing 123.44\text{mm}$, 높이 300mm로 제작 후 만능시험기인 INSTRON 8503을 사용하였다. 시편을 셋팅 후 압축 시험 방법을 적용

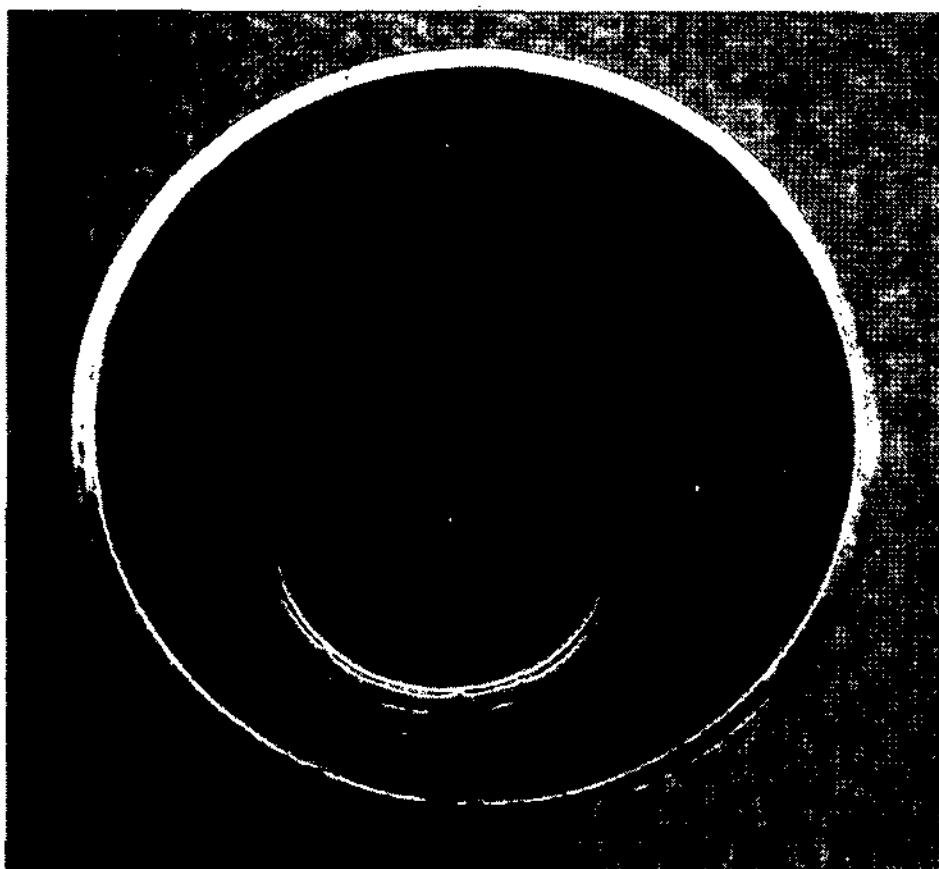


Fig. 5 After drawing(diameter shrink allowance= $\varnothing 0.15\text{mm}$)

하여 복합재료 파이프에만 힘을 가함으로써 두 파이프의 전단 강도를 측정하여, Fig. 7에서와 같이 피팅 후 두 소재의 힘-변위를 그래프로 나타내었다. 그래프에서 보는 바와 같이 최대 접합력이 7.98KN으로 전단강도가 49kPa로 나타났으며, 이것은 러빙 롤러가 배향막 표면의 고분자 사슬을 일정한 방향으로 정렬하기 위하여 배향층의 표면을 균일하게 문지를 때 큰 마찰력이 발생하지 않으므로 두 소재간의 미끄러움이 발생하지 않는 충분한 접합강도로 판단된다.

4.2 진원도

냉간 인발을 통하여 피팅되어진 러빙 롤러를 선반에 셋팅하여 진원도 측정을 하였다. 이때의 주축 회전 속도는 50RPM이고, 측정은 50mm 간격으로 총 6회에 걸쳐서 하였다. 냉간 인발을 적용한 롤러의 진원도는 최대 0.03mm으로 이는 후



Fig. 6 After drawing(diameter shrink allowance= $\varnothing 0.1\text{mm}$)

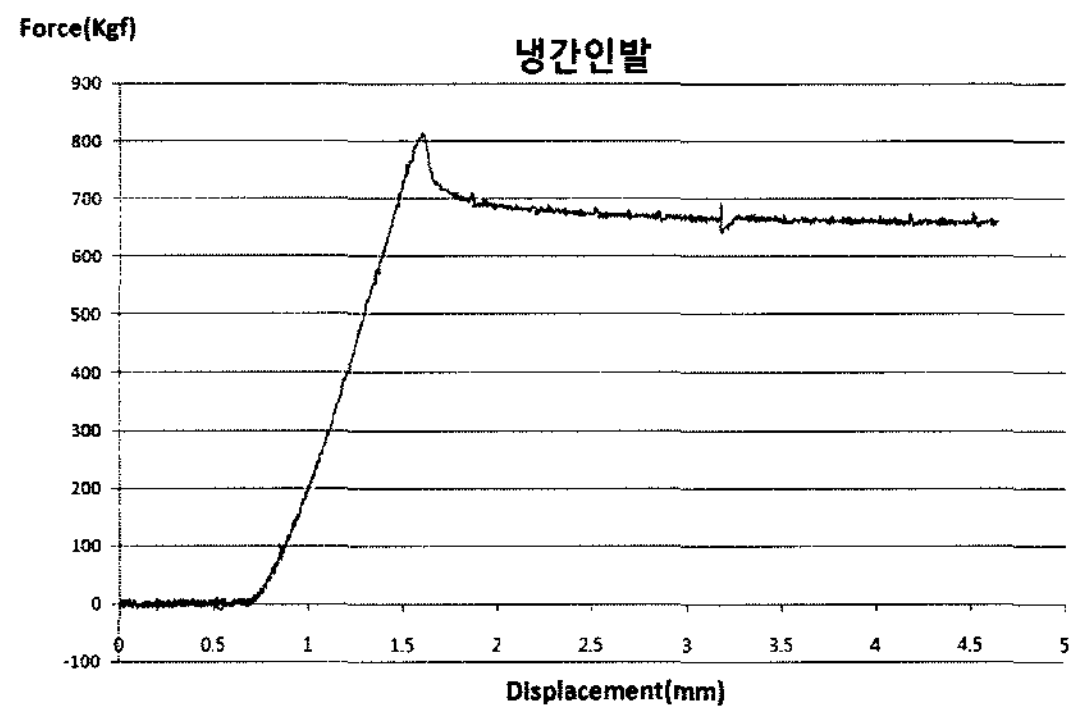


Fig. 7 Shear strength

처리 공정인 연삭 공정에서의 연삭이 가능한 진원도 공차로 판단된다.

5. 본 실험

본 연구에서는 선행 실험의 결과를 바탕으로 1,720mm 초장축 복합재료 파이프와 스테인레스 파이프를 최종 피팅 인발 전에 Fig. 8에서 보는 바와 같이 스테인레스 파이프 인발 전·후에 세 차례에 걸쳐 소둔 열처리를 하였다. 초장축 복합재료 파이프와 스테인레스 파이프와의 최종 피팅 인발 전에 길이 2,000mm, 두께 1.72mm, 직경 \varnothing 145mm인 스테인레스 파이프 제조를 위하여 외경이 \varnothing 152.5mm, 두께가 2mm인 파이프를 두 차례의 인발 공정이 수행되었으며, 이때의 단면 감소율은 각각 11%로 하였다. 또한 각각의 인발 전·후에 1050°C에서의 소둔 열처리를 함으로써 용접 부위를 오스테나이트(Austenite)계로 변화시키고, 1,2차 인발 후에 생기는 잔류응력을 제거하였다. 2차 인발 후의 스테인레스 파이프는 인발 금형을 통과하므로 초기의 형상 공차는 피팅에 큰 영향을 미치지 않으나 복합재료 파이프가 삽입이 되어야 하므로 교정기로 교정을 하였다.

실험은 예비 실험을 바탕으로 복합재료 파이프의 파손이 일어나지 않은 짚새 \varnothing 0.1mm로 하였다. Fig. 9의 (a)는 1차 인발 후의 스테인레스 파이프이며, (b)는 2차 인발 후의 교정을 마친 스테인레스 파이프, (c)는 길이가 1,720mm인 복합재료 파이프의 모습이다.

탄소 복합재료 파이프의 진직도 공차, 진원도 공차는 0.03mm, +0.02mm이며, 복합재료 파이프를 스테인레스 파이프에

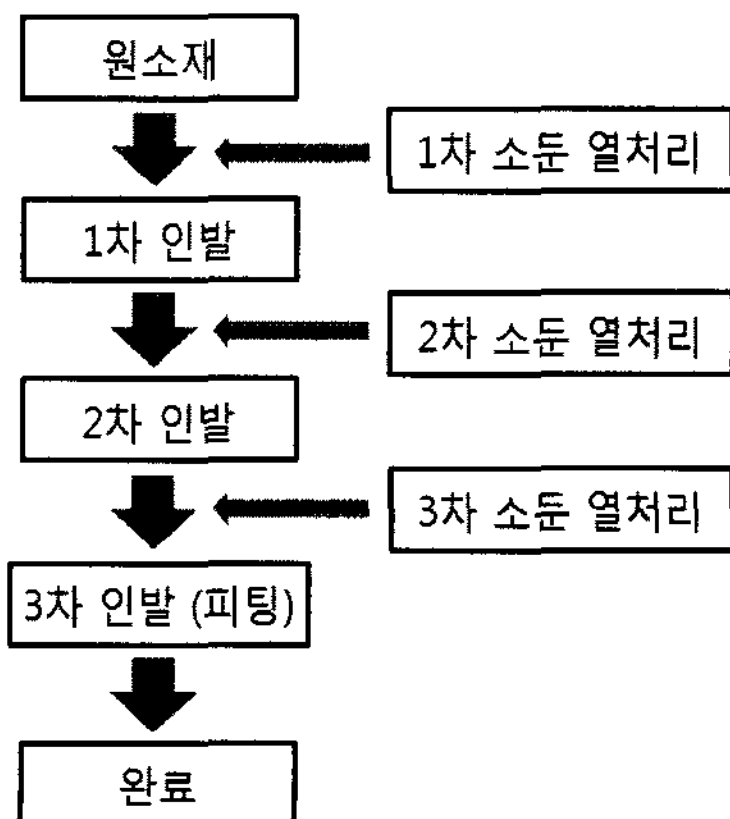


Fig. 8 Drawing process

삽입 후 최종 인발을 실시할 때의 인발력은 예비 실험에서와 동일하게 176.5KN으로 하였다. 본 실험에서의 지름 방향 짚새 \varnothing 0.1mm을 주기 위하여 예비실험에서와 동일한 \varnothing_{out} 141.34mm인 인발 금형을 사용하였으며, 복합재료의 파손이 없이 인발이 완료되었다. 또한 육안검사를 통하여 복합재료 파이프와 스테인레스 파이프의 접합도 양호한 것으로 판단된다. 냉간 인발을 적용하여 피팅되어진 러빙 롤러의 진원도와 진직도를 측정하기 위하여 삼차원 측정기를 사용하여 Fig. 10과 같이 정반에 올려놓고 길이 방향으로 200mm

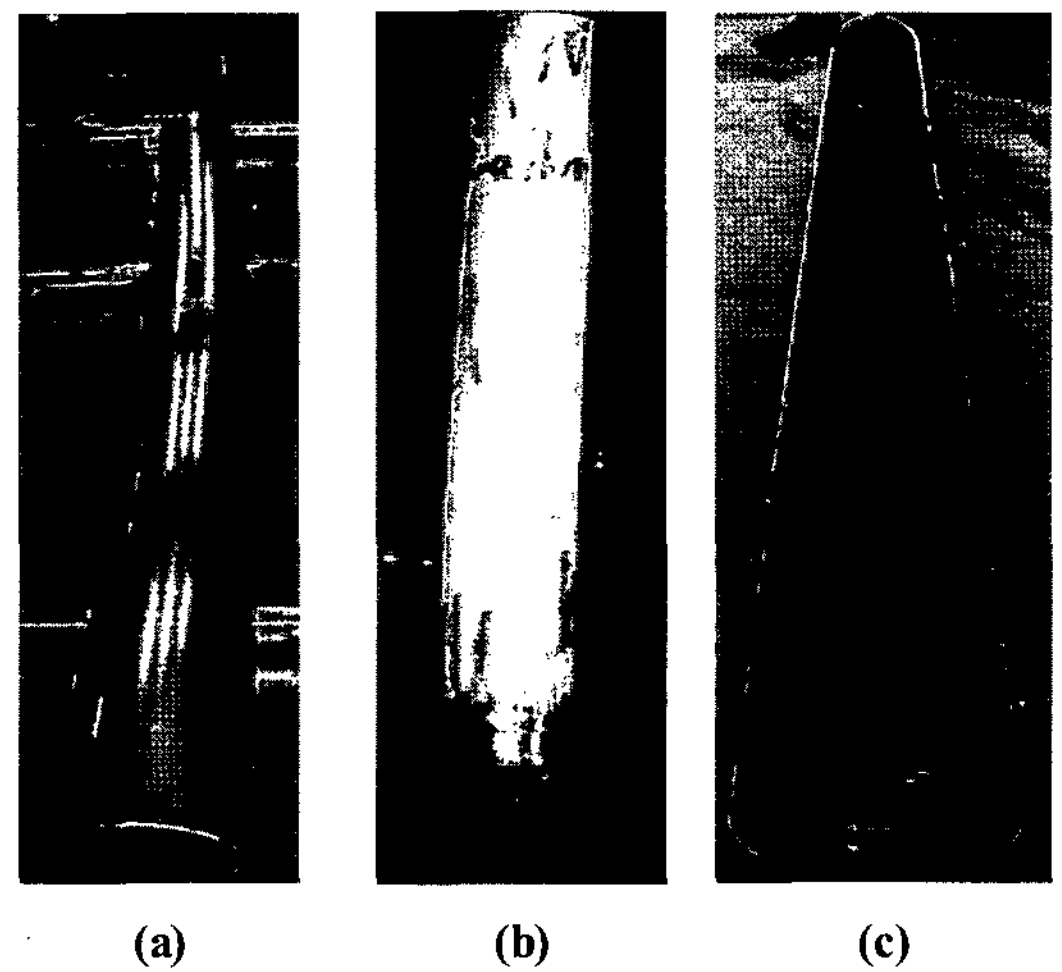


Fig. 9 Stainless and composite material pipes

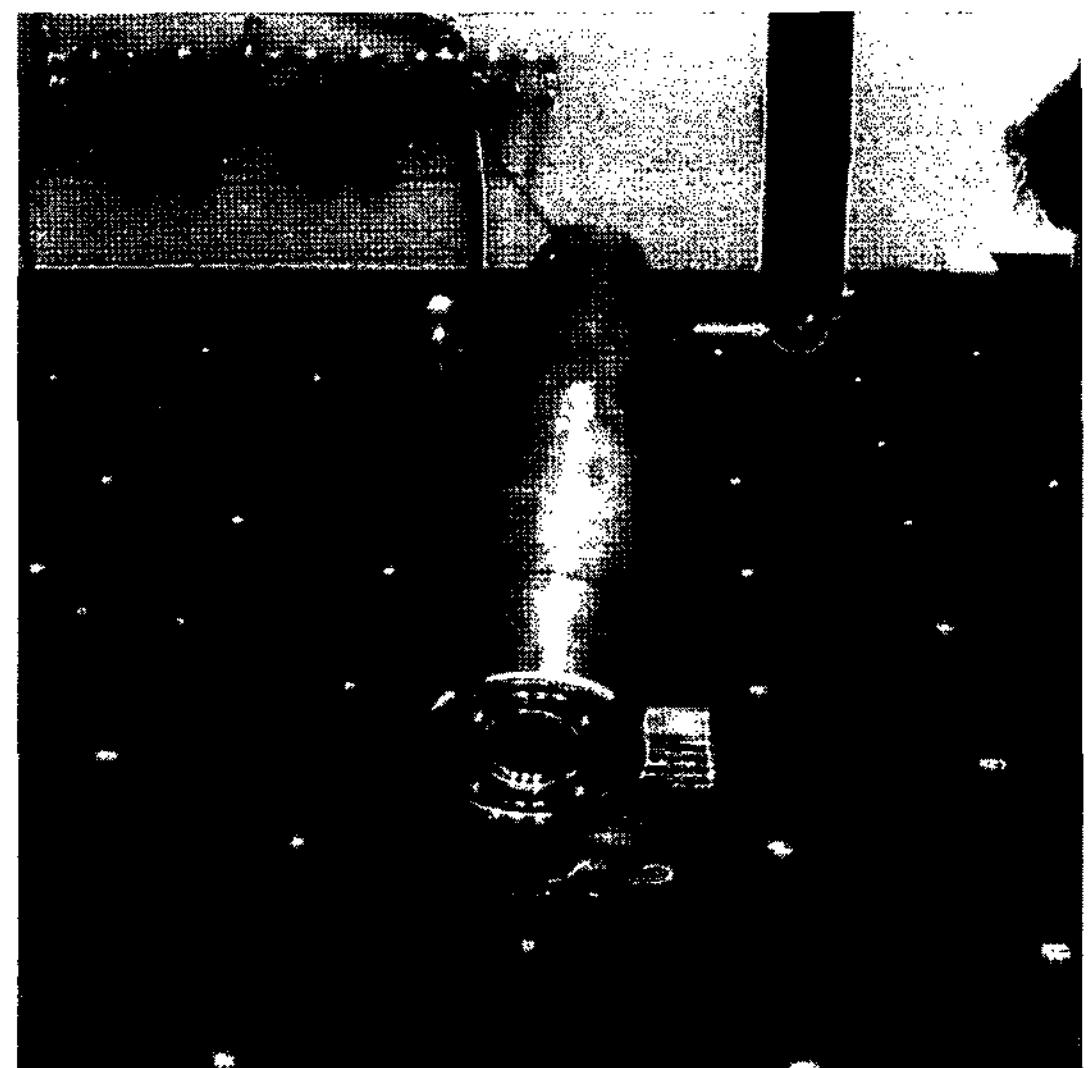


Fig. 10 Test of straightness and roundness

간격으로 7회에 걸쳐 진원도와 진직도를 측정을 하였다. 측정결과 최대 진원도 공차는 0.04mm이며, 최소 진원도 공차는 0.01mm이었다. 이는 예비 실험에서와 비슷한 결과로 나타났으며, 진직도 공차도 0.1mm로서 양호하게 나타났다. 이러한 진원도·진직도 공차는 초장축 파이프일지라도 후처리 공정인 연삭 가공이 가능한 공차로 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 초장축 스테인레스/복합재료 파이프의 피팅을 위하여 인발을 적용한 공정을 제안하였다. 또한 복합재료 파이프의 파손이 일어나지 않으며 두 소재간의 미끄럼이 발생하지 않는 적정 째새를 파악하기 위하여, 선형 유한요소 해석과 실험을 하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 냉간 인발을 적용한 피팅이 접합 강도와 진원도 측면에서 우수하다고 사료되며, 이를 토대로 초장축 이중 소재에 적용함으로써 형상 정밀도 측면에서 냉간 인발 피팅의 유용성을 확인하였다.
- (2) 냉간 인발 공정을 적용한 두 소재의 피팅 시 선형 유한요소 해석과 피팅 인발 실험을 통하여 복합소재의 파손이 발생하지 않고 접합강도 또한 양호하게 이루어지는 째새비는 0.0007임을 확인하였다.
- (3) 인발 공정 적용시 스테인레스의 용접 부위를 오스테나이트계로 바꾸어주고, 인발 후에 발생하는 잔류응력에 따른 두께 및 강도 증가를 방지할 수 있는 소둔 열처리가 필요하다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03] 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Choi, J. H., Chun, Y. J., and Kweon, J. H., 2002, "A Study on the strength of mechanically fastened composite joint," *Journal of Composite Materials*, Vol. 15, No. 4, pp. 9~16.
- (2) Im, K. H., Park, N. S., and Yang, I. Y., 1996, "Effects of Hygrothermals on Residual Fatigue Bending Strngth of CFRP Laminates," *Fall Conference of KSAE*, pp. 505~511.
- (3) Park, S. H., Lee, C. M., Chung, W. J., and Park, D. G., 2007, "A Study on the Shrink Fit for Long Pipes of Different Materials," *Spring Conference of KSPE*, pp. 629~630.
- (4) Jo, I. G., Park, J. S., and Lee, S. Y., 1995, "Finite Element Wound Composite Pipes and Flanges," *Journal of KSAS*, Vol. 24, No. 1, pp. 88~94.
- (5) Choi, S. H. and Kang, S. C., 2005, "Adhesion between the Nylon Cylinder and Steel Shaft by Expansion Fit and Induction Heating," *Journal of KSPE*, Vol. 22, No. 2, pp. 139~147.
- (6) Choi, S. H. and Kim, C. K., 1996, "Characteristics of the shrink fit strength using ceramic shaft and metal ring," *Fall Conference of KSMTE*, pp. 180~186.
- (7) Hwang, W. H., Kim, B. M., and Kim, W. Y., 2004, "Analysis of drawing process of the Al-Si wire using FEM," *Fall Conference of KSTP*, pp. 89~92.
- (8) Kim, H. S., Kim, B. M., Jo, H. H., and H. Jo., 2004, "Finite Element Analysis of Copper Clad Steel Wire Drawing Process," *Journal of KSTP*, Vol. 14, No. 2, pp. 147~152.
- (9) Lee, S. K., Hwang, W. H., Kim, B. M., and Bae, C. M., 2005, "Influence of Process Parameters on Residual Stress and Reducing Residual Stress in Drawn Wire," *Journal of KSTP*, Vol. 14, No. 8, pp. 704~711.
- (10) Lee, D. H., Kim, D. W., Kim, D. H., and Moon, H., 2004, "A study on Reduction Distribution in Tube Drawing Process," *Spring Conference of KSTP*, pp. 35~38.
- (11) Park, S. H., 2007, "A study on Reduction Distribution in Tube Drawing Process," Dissertation for the Degree of Master, Changwon National University, Republic of Korea.
- (12) Yoh, E. G. and Kim, Y. R., 1999, "A study on the Prediction of Fatigue Life in Dissimilar Materials Die Considering the Heat Shrink Fit," *Spring Conference of KSMTE*, pp. 93~98.
- (13) Choi, S. H. and Kim, C. K., 1996, "Characteristics of the shrink fit strength using ceramic shaft and metal ring," *Fall Conference of KSMTE*, pp. 180~186.