

구조용 접착기술을 이용한 동력조향장치 경량화 기술개발 Development of light-weight power steering cylinder assembly by using structural adhesive bonding technology

*이찬주¹, #김병민¹, 이상곤², 고대철³, S. Marzi⁴, 이종만⁵

*C.J. Lee¹, #B.M. Kim(bkim@pusan.ac.kr)¹, S.K. Lee², D.C. Ko³, S. Marzi⁴, J.M. Lee⁵
¹ 부산대학교 기계공학부, ²PNU-FIAM 국제공동연구소, ³부산대학교 ILIC, ⁴Fraunhofer IFAM, ⁵㈜ 태림산업

Key words : Adhesive Bonding, Cohesive zone model, Power Steering system, Joint strength

1. 서론

자동차용 동력조향장치는 운전자가 핸들에 가한 회전 모멘트를 기관으로 구동되는 유압장치로 증폭시켜 자동차의 조종을 돕는 장치이다. 최근 환경규제에 따른 연비향상을 위한 자동차 경량화는 동력조향장치에도 요구되고 있다. 유압장치는 스틸 브라켓을 이용하여 용접에 의해 차체와 부착된다. 기존의 스틸 브라켓을 알루미늄 브라켓으로 대체할 경우, 기존 대비 약 20%의 경량화 효과를 얻을 수 있다. 알루미늄 브라켓으로 대체시 알루미늄-스틸 간의 이종소재 접합이 요구되지만, 기존 연구된 리벳, SPR, 클린칭과 같은 관재성형 부품조립을 위한 기계적 이종소재 접합방법을 동력조향장치에 적용하기가 어렵다.[1,2] 본 연구에서는 구조용 접착기술을 적용하여 브라켓과 유압실린더를 접합하여 경량 동력조향장치를 개발하였다.

유압실린더는 조향을 위한 동력전달장치이므로 연결브라켓에 항상 많은 하중이 작용한다. 운전중 작용하는 하중에 의해 접합부의 높은 강도가 요구되며, 설계를 요구되는 강도이상을 만족하도록 접합부 형상을 설계하여야 한다. 본 연구에서는 유한요소해석을 통해 동력조향 유압실린더의 접합부 강도해석을 수행하였다. 또한 유한요소해석결과를 이용하여 형상에 따른 접합강도를 도출하고, 이를 바탕으로 브라켓의 형상을 설계하였다. 이 때 접합부의 접착제 거동은 접착지역모델(cohesive zone model)의 파괴거동으로 가정하였다.

2. 유한요소해석모델

알루미늄 브라켓과 유압실린더 사이의 접착제는 접착요소(cohesive element)를 사용하여 나타내었으며, 접착제의 파괴는 다음 식(1)과 (2)에 의해 결정된다.[3]

$$\frac{\sigma_{max}}{(\sigma_{max})_I} + \frac{\sigma_{s1}}{(\sigma_{max})_{II}} + \frac{\sigma_{s2}}{(\sigma_{max})_{II}} = 1 \quad (1)$$

$$G_C = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \left(\frac{G_S}{G_T} \right)^n \quad (2)$$

여기서, $\sigma_{s1,2}$ 는 접착요소에 작용하는 전단응력이며, $G_S (= G_{s1} + G_{s2})$, $G_T (= G_n + G_S)$ 는 인장 및 전단 변형에너지의 합으로 계산된다. 접착제의 파괴는 인장과 전단하중이 복합된 하중에 의해 파괴되는 복합모드파괴(mixed-mode failure)가 발생한다.[4,5] 이를 고려하기 위해 Table. 1에 나타난 순수 인장 및 전단모드 파괴물성을 이용하여 식(1)과 (2)를 통해 복합모드 파괴를 고려하였다.

Table 1 Comparison of measured roughness data

Parameter	Tensile (mode I)	Shear (mode II)
Elastic modulus	2.71 GPa	1.89
Critical stress	42.7 MPa	32.3 MPa
Toughness	1.089 J/m ²	3.38 J/m ²

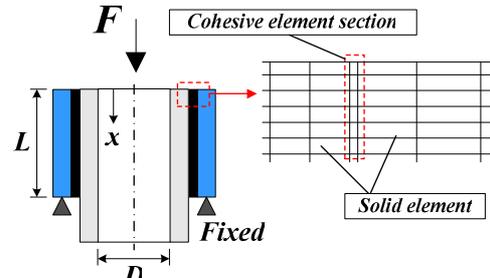


Fig. 1 Schematic model to evaluate the joint strength of power steering cylinder for axial direction

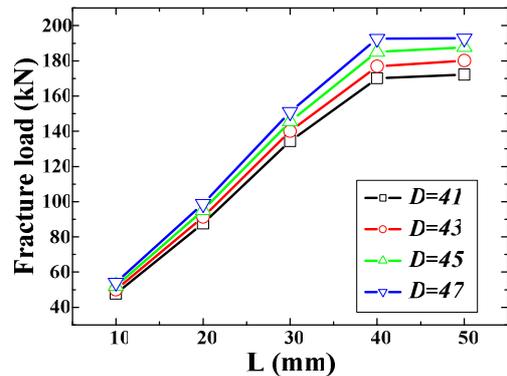


Fig. 2 Variation of fracture load with increasing bracket length, L and diameter, D

3. 축방향 강도설계

본 연구에서는 접착부의 접착강도 평가가 목적이므로 접합강도 평가시 변형이 거의 없는 브라켓 차체 마운팅부는 유한요소해석시 고려하지 않았다. 일반적으로 접착구조물은 박리응력에 취약하기 때문에 접착부에 박리응력이 최소화 되도록 브라켓을 링형상으로 설계했다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 축방향 접합강도를 접합길이 L 과 유압실린더 직경 D의 변화에 따라 유한요소해석을 통해 평가하였다. 축방향 요구접합강도는 유압실린더의 항복강도를 기준으로 189.3kN 으로 설정하였다. 축방향 접합강도가 189.3kN 이상이면 접착부의 파괴 전에 유압실린더가 변형하게 된다.

Fig. 4에 유압실린더의 접합길이 및 직경의 변화에 따른 접합부 파괴하중을 나타내었다. 브라켓의 길이가 증가함에 따라 접착부의 파괴하중이 증가하는 경향을 나타내었으며, 이후 접합길이 40mm 이상에서는 일정한 값으로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 실린더 직경이 증가할수록 접착면적에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다. 유한요소해석을 통해 축방향 접합강도를 만족하는 접합길이는 40mm 이상, 직경은 45mm 이상인 것으로 나타났다.

3. 비틀림 강도설계

접합부의 비틀림강도를 평가하기 위해 Fig. 3에 나타난 것과 같이 비틀림하중에 대한 유한요소해석을 수행하였다.

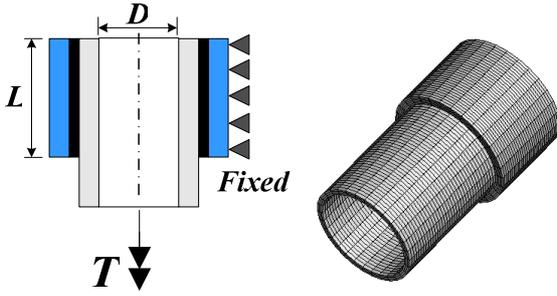


Fig. 3 FE-model to evaluate torsional strength

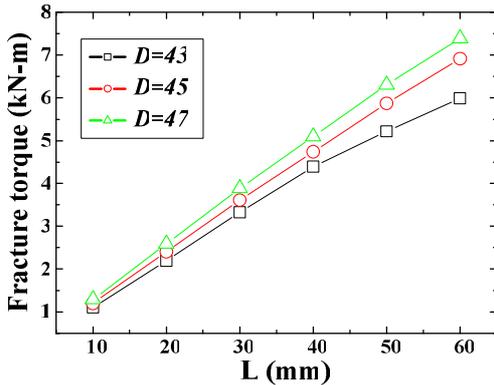


Fig. 4 Variation of fracture torque with increasing bracket length, L and diameter, D



(a) bending failure (b) buckling failure (c) torsional failure
Fig. 5 Failure mode of power steering cylinder after joint strength and torsion test

축방향 접합강도와 마찬가지로 요구비틀림강도는 유압실린더의 변형이 발생하는 7.24kN-m로 설정하였다. Fig. 4에 유압실린더의 접합길이 및 직경변화에 대한 비틀림강도를 나타내었다. 접합길이가 증가함에 따라 비틀림강도는 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다. 일반적으로 접착구조물의 접합강도는 하중방향에 수직인 방향으로 접착면적을 증가시킬 경우 접착면적에 비례하여 증가한다. 비틀림강도의 경우 접합길이의 증가는 비틀림하중에 대해 수직인 방향으로의 접착면적의 증가를 의미하므로 접합길이에 비례하여 증가하는 경향을 나타낸다. 직경이 증가함에 따라 비틀림강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 유한요소해석결과를 바탕으로 비틀림강도를 만족하는 접합길이는 약 60mm 이상, 직경 47mm 이상으로 평가되었다.

브라켓 길이 40mm 이상, 브라켓 직경 47mm 이상에서 축방향 접합강도를 만족하였다. 40mm 이상에서는 축방향 접합강도는 거의 일정하기 때문에 40mm로 설정하는 것이 경량화 효과가 좋다. 그러나 비틀림강도는 5.10kN-m로 동력유압실린더의 요구비틀림 접합강도를 만족할 수 없기 때문에 브라켓 길이를 더 확보하여 비틀림강도를 확보하여야 한다. 브라켓 직경 47mm에서 비틀림강도는 단위길이당 비틀림 접합강도 증가량은 0.1225kN-m/mm 이므로 비틀림강도 접합강도 7.24 kN-m을 만족하는 브라켓 길이는 58mm이다. 재설계된 브라켓의 기존 제품무게 대비 경량화 효과는 약 20%이다.

4. 축방향 및 비틀림 강도실험

재설계된 동력조향 유압실린더의 축방향 접합강도 평가하기 위해 Fig. 10에 나타낸 것과 같이 접착부 접합강도 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 Henkel사의 구조물용 1액형 에폭시 접착제를 사용하였으며, 180[°C]에서 30분간 경화시켰다. 실험에 사용된 유압실린더는 기존의 용접에 의해 사용되던 유압실린더와 동일한 실린더를 사용하였으며, 브라켓은 재설계된 형상으로 알루미늄 6061로 기계가공하여 제작하였다.

동력조향 유압실린더는 브라켓에 의해 차체와 연결되므로 이를 고려하여 유압실린더를 고정하고 브라켓에 하중을 가하였다. 축방향 접합강도 시험에서 유압실린더의 접합강도는 하중 19.75kN을 정점으로 하중이 점차 감소하였다. 이것은 브라켓의 고정점과 실린더의 중심이 불일치로 벤딩 모멘트가 작용한다. 이 벤딩 모멘트에 의해 Fig. 5의 (a)에 나타낸 것과 같이 유압실린더와 브라켓의 연결부에 굽힘이 발생했다. 반면에 유압실린더를 압축한 경우, 20.27kN에서 최대하중을 나타내었으며, Fig. 5의 (b)에 나타낸 것과 같이 유압실린더와 브라켓의 연결부에서 압축하중에 의해 실린더의 좌굴이 발생하였다. 축방향 접합강도 실험에서 접합부에서 파단이 발생하지 않았으며, 유압실린더의 변형이 발생하므로 재설계된 브라켓 형상은 축방향 접합강도를 만족하는 것으로 판단된다.

브라켓과 유압실린더를 고정시키고, 유한요소해석에서와 같이 유압실린더를 회전시켰다. Fig. 5의 (c)와 같이 유압실린더의 파단이 발생하였으며, 이 때 파단토크는 7.39kN-m로 나타났다. 재설계된 브라켓 형상은 축방향 접합강도와 마찬가지로 접착부에서 파괴가 발생하지 않고 유압실린더에서의 파단이 발생하므로, 충분한 비틀림 접합강도를 가지고 있는 것으로 판단할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 자동차 동력조향 유압실린더를 경량화하기 위해 구조용 접착기술을 적용하였다. 접착부의 접합강도를 평가하기 위해 CZM을 활용한 유한요소해석을 수행하였으며, 그 결과를 바탕으로 동력조향 유압실린더의 브라켓을 재설계하였다. 그 결과 접합강도 19.75kN, 비틀림강도 7.39kN-m 이상으로 평가되었다. 개발된 자동차 동력조향 유압실린더의 무게의 약 20%를 절감하였다.

후기

이 논문은 국제과학기술협력재단(KICOS, K2060100004-07E0100-00400)의 지원 및 한국산업기술재단 전략기술인력 양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

1. A. Higgins, 2000, "Adhesive bonding of aircraft structures," International Journal of Adhesion & Adhesives, **20**, pp. 367-376.
2. G. Fessel et al., 2007, "Evaluation of different lap-shear joint geometries for automotive applications," International Journal of Adhesion & Adhesives, **27**, pp. 574-583.
3. ABAQUS Ver. 6.4, 2004, "User's manual," Hibbit, Karlsson & Sorensen Inc.
4. B.R.K. Blackman et al., 2003, "The use of a cohesive zone model to study the fracture of fibre composites and adhesively-bonded joint," International Journal of Fracture, **119**, pp. 25-46.
5. J.G. Williams and H. Hadavinia, 2002, "Analytical solutions of cohesive zone models," Journal of Mechanics and Physics, **50**, pp. 809-825.