

論文

리브보강 Al-Mg-Si계 가로등 등주의 구조적 거동

남정훈*, 주형중*, 김영호**, 윤순종****

Structural Behavior of Rib Reinforced Mg-Si Aluminum Alloy Lighting Pole

Jeong-Hun, Nam*, Hyung-Joong, Joo*, Young-Ho, Kim**, Soon-Jong Yoon****

ABSTRACT

Lighting system of road is an essential structure used for the safety of pedestrians and vehicles. Most of the lighting pole is made with steel which is vulnerable under corrosive environment. To overcome such corrosion problems, stainless steel and iron steel are used, but they are usually manufactured by hand which is not efficient. Due to their high strength and stiffness, when there is car collision with the lighting pole structure the safety of driver may not be ensured. Hence, the development of new-type lighting pole system which is easy to adjust the right on the road, lengthen the service life, and reduce the maintenance, is necessary. Lighting pole made with aluminum alloy is high in strength per unit weight, is strong against corrosive environment, and is easy to construct due to flexibility and right weight. But, because the strength and stiffness of the material is lower than that of steel, the structural safety and serviceability of the system can be a problem. To mitigate the structural problem associated with conventional lighting pole system, experimental investigation is conducted on the conventional lighting pole and rib reinforced aluminum alloy lighting pole, respectively. By comparison of results, it was found that the rib reinforced Mg-Si aluminum alloy lighting pole is efficiently applicable to the lighting pole system of road.

초 록

가로등은 운전자의 안전을 위한 필수적인 도로 부속구조물이며, 대부분 강재 등주를 사용하고 있다. 강재등주는 부식이 발생하여 내구성을 감소시키고, 도시미관을 저해하므로 스테인레스 제품이나 주철재 등을 사용하기도 한다. 그러나 주철재 및 스테인레스 등주를 사용하더라도 부식에 대한 위험성을 완전히 배제할 수 없고, 높은 강도와 강성은 충돌시 운전자의 안전을 위협하는 요인이 되고 있다. 따라서 새로운 형태의 등주 시스템의 개발이 요구되고 있다. 기존 등주의 문제점을 보완하기 위해 최근 알루미늄 합금을 사용한 등주가 개발되어 사용되고 있다. 알루미늄은 재료적 특성상 단위중량당 강도가 높고 부식에 대한 저항성이 매우 커서 그 활용성을 크게 증대될 것으로 예측되나 강재에 비해 강성과 강도가 낮기 때문에 구조적 안전성에서 문제점이 제기되고 있어 구조거동에 대한 연구가 필요하다. 이 연구는 현재 가로등 등주로 사용되고 있는 강재 및 알루미늄 등주에 대한 휨, 압축실험 등을 수행하여 알루미늄 등주의 구조거동을 조사하였고, 기존 강재등주와 비교하여 효율성 및 안전성을 평가하였다.

Key Words : 가로등 등주(lighting pole), 하중저항성능(load carrying capacity), 구조적 거동(structural behavior), 알루미늄 합금 (Al-Mg-Si alloy)

* 홍익대학교 토목공학과 구조전공 대학원

** 세진특허법률사무소

**** 홍익대학교 토목공학과 구조전공 교신저자(E-mail: sjyoon@hongik.ac.kr)

1. 서 론

가로등은 보행자의 안전과 차량의 원활한 통행을 위한 필수시설이다. 특히, 야간 교통사고 발생 원인은 대부분 조명시설과 직접적으로 관련되어 있어 가로등의 충분한 확보와 그에 따른 효율적인 가로등 시설의 개발이 필요하다. 그러나 국내 실정은 부족한 가로등의 설치로 인하여 안전한 야간운행에 필요한 도로 노면조도를 제공하지 못하고 있다. 즉, 가로등의 형식은 노면조도를 확보하기에 곤란한 주두식과 고정식 가로등을 많이 사용하고 있으며, 고정식 등주에 부착되는 암대는 각도에 따라 노면조도를 현저히 감소시키기도 한다. 현재, 이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 연구가 시도되고 있으나 국내 도로안전시설 및 등기구 관련 업체의 경우 대부분 디자인과 광학적 설계기술에 대한 기술력 부족으로 외국제품에 대한 무분별한 복제 및 핵심소재와 디자인 기술을 그대로 도입하여 제품을 생산하고 있다⁽¹⁾. 최근 이러한 문제점을 해결하고 국내실정에 적합하며, 가설 및 유지관리가 유리한 가로등 등주가 Mg-Si계 알루미늄 합금계를 활용하여 개발된 바 있다. 그러나 일반적으로 재료의 역학적 성질면에서 알루미늄은 기존의 가로등 등주에 사용되고 있는 강재에 비해 강도와 강성이 작은 것으로 알려져 있어 구조성능에 대한 크고 작은 문제점이 지적되고 있다. 또한, 국가 산업규격인 KS D 3600에서도 가로등 등주의 변위에 대한 부분이 모호하게 표현되어 있으며, 지역에 따른 설계 풍하중이 차이가 있음에도 불구하고 획일적인 하중을 적용하고 있어 등주에 대한 체계적인 평가와 분석이 필요하다. 따라서 이 연구에서는 알루미늄 합금 가로등 등주에 대한 구조적 거동을 실험을 통해 조사하였다.

2. 가로등 등주의 특성 및 문제점 분석

현재 국내에서 사용되고 있는 등주는 대부분 강재, 스테인레스, 주철재 등으로 구성되어 있다. 강재 등주는 부식에 의해 미관 및 구조적 내구성에서 큰 문제점을 드러내고 있으며, 주철재 등주의 경우 주물을 통하여 제작해야 하므로 생산성에서 비효율적이다. 특히 주철재 가로등은 차량의 충돌에 의한 내충격 특성이 낮아 피로안전성에 문제가 발생할 수 있으며, 강재 등주에 비해 강성이 크기 때문에 차량 충돌시 차량 파손과 운전자의 생명을 위협하는 요소로 작용하기도 한다. 또한, 스테인리스스틸을 활용한 등주는 강재나 주철에 비해 부식에 대해서는 안전하지만 절설제로 사용되는 염화칼슘 등이 등주 표면에 흡착되어 부식을 초래하며, 관제를 일정크기로 제단하고 인력으로 절곡하여 일정형상을 만드는 제조공정은 노동력과 생산성에서도 비효율적이다. 또한, 기존 등주는 재료적인 문제점 뿐만아니라 원통일체형으로 개성있는 디자인의 연출이 어렵고, 탈색과 변색으로 유지관리비용이 증가하며, 감전사고의 위험, 불법광고물의 부착, 감전보호대 설치에 따른 접촉사고 등의 문제점들 안고 있다. 최근 이러한 문

제점들을 개선하기 위해 서울시에서는 가로등 등주의 디자인 지침(안)이 제시된바 있고, 기존 가로등 등주의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 알루미늄 가로등 등주에 대한 관심이 집중되고 있다.⁽²⁾ 최근, 유지관리, 구조적 안전성 및 시공성 등을 고려하여 개발된 알루미늄 등주를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1의 알루미늄 등주는 설치 및 유지관리가 용이하도록 하부베이스와 하단 및 상단등주, 암대 등이 조립식으로 구성되어 있고, 암대의 각도 조절 및 가로등 내외면에 각종 조립부품을 원활히 조절할 수 있도록 리브 형태의 가이드 홈을 갖는다.

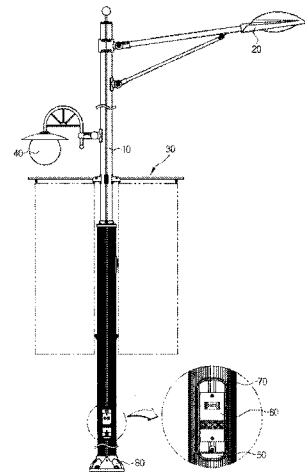


Fig. 1 Aluminum Lighting Pole.

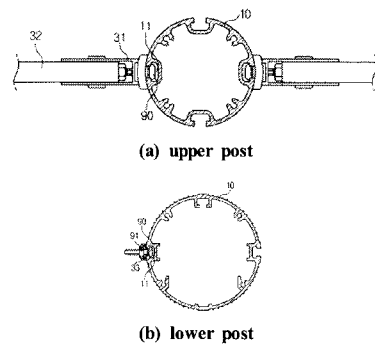


Fig. 2 Section of Aluminum Lighting Pole.

3. 재료의 역학적 성질

알루미늄은 규소다음으로 지구상에 많이 존재하는 원소이다. 비중은 2.7로서 Mg, Be를 제외하면 실용금속 중 가장 가벼운 금속이다. 알루미늄은 주조가 용이하고, 다른 금속과 합금성이 우수하여 사용되는 용도에 따라 합금으로 가공하여 사용하고 있다.

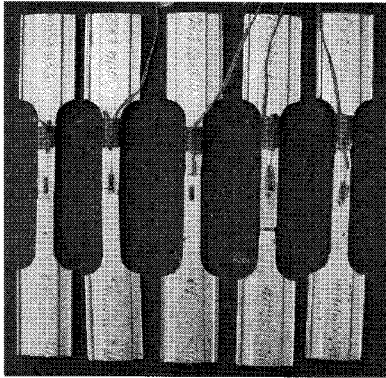


Fig. 3 Tensile Test Specimen.

Table 1 Test result

Spec.	항복강도 σ_y (MPa)	인장강도 σ_u (MPa)	σ_y/σ_u	비고
1	171.9	258.8	0.664	두께 5.8mm~6.1mm 폭 12.0mm~12.1mm
2	-	243.4		
3	167.4	247.7	0.676	
4	167.1	234.4	0.629	
5	167.0	246.1	0.678	
평균	168.4	246.1	0.66	

건설분야에서 일반적으로 광범위하게 사용하고 있는 알루미늄 합금은 Mg-Si계열로서 성형가공성과 강도, 내식성이 우수하여 가로등 등주에 적용하기에 적합하며, 합금원소의 종류에 따라 6061, 6063, 6N01 등으로 구분된다. 6061은 차량과 건축등의 구조용 재료로 사용되고, 6063은 건축용, 6N01은 대형 용접용으로 철도차량, 선박용으로 많이 사용된다.

알루미늄 가로등 등주에 사용되는 합금의 종류는 KS D 6759, KS D 6761 등에서 규정하고 있는 A6063 PE T6으로 항복강도의 경우 강재에 비해 약 69%정도인 반면 탄성계수는 강재에 비해 약 1/3정도에 지나지 않는다. 반면 외력에 대한 탄성복원력이 우수하여 상당한 변형에도 탄성적으로 회복하는 성질을 가지고 있다. 또한, 다이캐스팅이나 주조성능이 뛰어나 일정한 형상의 관이나 판 단면은 압출성형에 적합하여 제품의 규격화, 품질의 균일화를 꾀할 수 있는 장점이 있으며, 복잡한 단면은 일반 철강재와 동일하게 다이캐스팅 공정을 통해 간단하게 주조 성형할 수 있다.

Fig. 1에 나타난 가로등 등주는 국내설계규준에서 정하는바와 같이 A6063 PE T6으로 제작되어 있으며, 재료의 역학적 성질을 조사하기 위해 등주를 절단하여 인장시험을 Fig. 3과 같이 제작하여 KS B 0802에 따라 인장시험을 수행하였다.

인장시험결과 항복강도와 인장강도를 Table 1에 나타내었으며, 설계규준에서 제안하고 있는 항복강도(166.7MPa)와 인장강도(210.8MPa)를 만족하고 있는 것으로 나타났다.

4. 구조거동 평가실험

이 연구에서는 알루미늄 등주의 구조성능을 확인하기 위해 압축실험, 휨실험을 수행하였으며, 알루미늄 등주와 기존 등주를 비교하기 위해 기존 사용되고 있는 강재 등주와 동일한 실험체를 추가하였다.

4.1 단주압축실험

등주의 압축성능을 평가하기 위한 실험체는 원형 알루미늄 합금 등주와 강재 원형 및 팔각 단면으로 제작하였으며 각 실험체의 단면모양 및 치수, 단면성질은 Table 2, 3, 4에 나타내었다.

Table 2 Dimension of Specimen

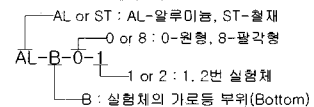
Spec.	Type	외경 D (mm)	두께 t (mm)	높이 h (mm)
AL-B-0-1	알루미늄 합금	220	5.0	650
AL-B-0-2				
ST-B-0-1	강재	220	3.5	
ST-B-0-2				
ST-B-8-1				
ST-B-8-2				

Table 3 Sectional Properties

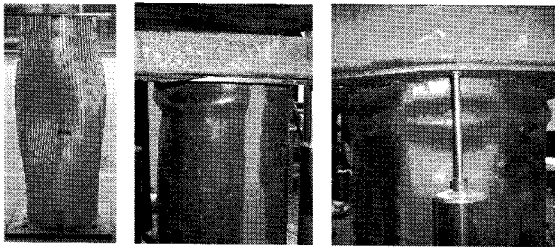
Spec.	단면적 (cm ²)	단면2차모멘트 (cm ⁴)	단면계수 (cm ³)	실제항복하중 tonf (MPa)
AL-B-O	54.16	2694	244.87	119.1 (1168)
ST-B-O	21.84	1204	109.45	51.0 (500)
ST-B-8	21.25	943	85.71	52.4 (514)

Table 4 Shape of specimen

구분	AL-B-O-1 / AL-B-O-2	ST-B-O-1 / ST-B-O-2	ST-B-8-1 / ST-B-8-2
단면	 D/t = 44	 D/t = 62.8	 D/t = 62.8



압축실험체는 각각 2개씩 제작하였고, 실험체의 길이는 Stub-column Test에 준하여 650mm의 단주로 제작하였으며, 축방향 변위를 측정하기 위해 2개의 LVDT를 설치하였다. 실험결과 실험체의 파괴형태는 Fig. 4에 나타내었다.



(a) AL-B-0 (b) ST-B-0 (c) ST-B-8

Fig. 4 Failure mode.

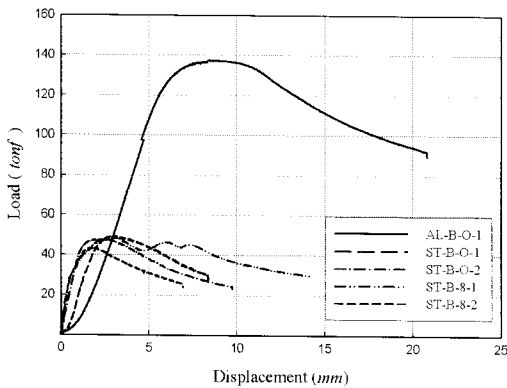


Fig. 5 Load-displacement curve.

압축실험을 수행하는 동안 AL-B-O 일부 실험체 단부에서 찢김현상이 관찰되었으며, 실험체 절단과정에서 발생한 것으로 판단되어 실험결과 및 분석에서는 AL-B-O 실험체 1개에 대한 결과만을 적용하였다.

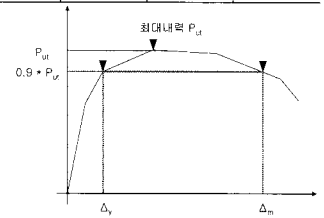
실험결과 Fig. 4에서 강재 등주는 전형적인 단부국부좌굴에 의해 파괴되었으며, 알루미늄 합금 등주는 중앙부에서 전체좌굴에 의한 전단면 소성거동을 보이며 최종파괴에 도달하는 것으로 조사되었다. 계측기로부터 측정된 하중-변위관계는 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5에서 각 실험체의 초기 축강성은 강재에 비해 알루미늄 등주가 작은 것으로 나타났으나 하중증가에 따른 강도와 연성능력은 매우 크게 평가되었다. 각 실험체에 대한 하중저항능력을 평가하기 위해 실험결과를 분석하여 압축성능을 Table 5에서 비교하였다.

Table 5에서 알루미늄 등주의 최대 압축강도는 강재 등주에 비해 약 2.9배 정도 큰 값을 나타내어 우수한 압축성능을 확보하고 있는 것으로 나타났으며, 특히, 단면의 최대내력은 설계항복하중에 비해 15%이상 증가된 결과를 얻었다. 또한, 최대 압축강도 이후 파괴거동은 강재 등주의 경우 재료의 항복에 앞서 좌굴거동에 의해 파괴에 도달하였으나, 알루미늄 원형 등주는 항복에 도달하여 전단면 소성내력을 만족하는 결과를 나타내었으며, 파괴거동은 후좌굴강도 특성으로 완전한 열화성능을 나타내며 커다란 변형에너지 흡수능력을 보였다.

Table 5 Comparison of test results

Spec.	P_{ut} tonf (MPa)	Δ_{ut} (mm)	Δ_y (mm)	Δ_m (mm)	Δ_m/Δ_y
AL-B-O-1	137.5 (1349)	8.91	6.94	12.97	1.87
ST-B-O-1	49.6 (487)	2.55	2.59	4.77	1.84
ST-B-O-2	47.7 (468)	3.03	1.65	4.96	3.00
ST-B-8-1	48.6 (477)	3.17	1.50	8.45	5.63
ST-B-8-2	43.4 (426)	1.98	1.03	2.91	2.82

P_{ut} : 최대하중
 Δ_{ut} : 최대변위
 Δ_y, Δ_m :
 P_{ut} 의 90%에서 측정된 변위



4.2 휨실험

알루미늄 등주의 휨성능을 평가하기 위한 실험체의 특징은 Table 6에 나타내었다.

각 실험체는 압축실험에서와 유사하게 기존 강재등주와 성능을 비교하기 위한 실험변수 설정하였으며, 각 종류별 2개씩 실험체를 제작하였다.

휨실험은 4점재하시험(Four Point Bending Test)으로 수행하였다. 실험체의 휨성능을 조사하기위한 계측기는 중앙 및 중앙으로부터 각각 300mm, 600mm 떨어진 위치에 변위계(LVDT)를 설치하였다.

휨실험 결과 모든 실험체에서 동일하게 중앙하부에서 설계 항복강도를 초과한 후 상부 압축측의 좌굴현상으로 나타났으며, 각 실험체별 최종파괴형태는 Fig. 6에 나타내었다.



(a) AL-T



(b) AL-B



(c) ST-B

Fig. 6 Failure mode.

Table 6 Characteristic of bending specimens

실험체	형상
AL-T-1	
AL-T-2	
알루미늄 가로등 등주, 상단주 외경 135 mm, 두께 4.0 mm, 실험체 길이 1,600 mm	
AL-B-1	
AL-B-2	
알루미늄 가로등 등주, 하단주 외경 220 mm, 두께 5.0 mm, 실험체 길이 2,500 mm	
ST-B-1	
ST-B-2	
강재 원형 가로등 등주, 외경 220 mm, 두께 3.5 mm, 실험체 길이 2,500 mm	
기호 설명	—AL or ST : AL-알루미늄, ST-철재 —B or T : B-가로등 하단, T-사로등 상단 —1 or 2 : 1, 2번 실험체

실험체 중앙에서 측정된 변위계로부터 각 실험체의 하중-변위관계를 Fig. 7에 나타내었다. 하중재하초기단계에서는 재료의 탄성으로 선형을 나타내며, 파괴하중에 가까울수록 항복한계를 초과하고 압축측에서 발생한 좌굴현상으로 비선형 관계를 나타낸다. 실험결과 하중 및 변위계로부터 분석한 내용은 Table 7에 나타내었다. Table 7에서 알루미늄 하단 등주 AL-B 실험체는 알루미늄 상단 등주 AL-T 실험체에 비해 단면계수가 약 2.96 배 크기 때문에 최대 발생 휨모멘트가 약 2.67~3.21 배 정도 차이를 나타내었다. 특히, 하단 등주와 상단 등주의 이론적 소성휨모멘트(M_y)는 각각 $40.8 kN \cdot m$ 와 $13.7 kN \cdot m$ 로, 실험으로부터 측정된 최대휨모멘트($94.6 kN \cdot m$, $33.6 kN \cdot m$ 에 비해 약 2.31배와 2.45배로 높은 성능 나타내었다. 따라서 알루미늄 상단 및 하단 등주는 압축측에서 국부좌굴이 발생하기 전에 전단면이 항복에 이르는 것으로 평가되었다.

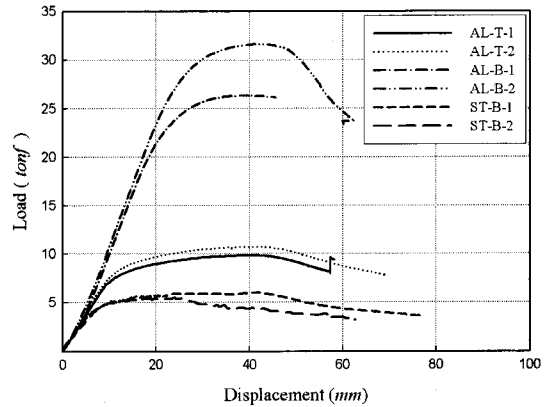


Fig. 7 Load-Displacement Curve.

Table 7 Test results

Spec.	M_{ut} tonf · m (kN · m)	M_y tonf · m (kN · m)	Δ_y (mm)	M_{ul}/M_y	Δ_m (mm)	Δ_m/Δ_y
AL-T-1	3.28(32.2)	1.40(13.7)	18.0	2.34	52.46	2.91
AL-T-2	3.58(35.1)		18.4	2.56	53.13	2.89
AL-B-1	8.77(86.0)	4.16(40.8)	23.8	2.11	49.11	2.06
AL-B-2	10.53(103.3)		26.7	2.53	53.57	2.01
ST-B-1	1.96(19.2)	2.62(25.7)	14.2	0.75	52.2	3.68
ST-B-2	1.80(17.7)		10.8	0.69	29.64	2.74

P_{ut} : 실험체 최대하중
 M_{ut} : $0.5P_{ut} \times$ 모멘트 팔거리, M_y : 전단면 소성휨모멘트강도
 Δ_y, Δ_m : $M_{ul} \times 90\%$ 하중에서 변위
 M_y : 설계항복강도 \times 단면계수

강재 원형등주의 경우 이론적 소성휨모멘트(M_y)는 $25.7 kN \cdot m$ 이지만 실험으로부터 측정된 최대휨모멘트(M_{ut})는 $18.4 kN \cdot m$ 로 소성휨모멘트 보다 작은 값을 나타내었다. 따라서 소성휨모멘트에 이르기 전에 중앙 상부 압축측에서 국부 좌굴이 발생하여 이론적 최대내력(M_y)에 도달하지 못하는 것으로 나타났다.

또한, 가로등 등주의 휨변형에너지 흡수능력을 판단하기 위한 방법으로 최대내력이 90%를 타나낼 때의 변위를 비교하는 연성도 지수(Δ_m/Δ_y)를 평가한 결과, 알루미늄 상단 등주와 하단 등주는 약 2.0~2.91의 수치를 나타내었으며, 강재 원형등주의 연성도 지수도 약 2.74~3.68로 나타나 모든 실험체에서 높은 변형에너지 흡수능력을 보유하고 있는 것으로 확인되었다.

4.3 주각부 휨성능평가 실험

가로등은 하부가 도로에 고정된 캔틸레버 구조물이라 할 수 있으며, 휨응력이 최대 발생하는 주각부에 대한 구조적 안전성에 대한 평가는 매우 중요한 설계변수이다. 따라서 Table 8에

- 조성능 평가, 연구보고서, 홍익대학교 부설 과학기술연구소, 2007.
- 2) 장은석, 남연우, 가로등주 디자인에 관한 연구(알루미늄 제품디자인을 중심으로), *정보디자인학연구*, 제11권, 0호, 2008, pp. 83~91.
 - 3) 기술표준원, 가로등 등주 강도 계산, 산업자원부, 2001.
 - 4) 건설교통부, 도로안전시설 설치 및 관리지침, 제 2편 조명 시설 편, 2005.
 - 5) KS D 0004 알루미늄 및 알루미늄 합금의 질별 기호, 한국산업규격.
 - 6) AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 1996.
 - 7) ASTM B221M, Aluminum and Aluminum Alloy Extruded Bars, Rods, Wire, Shapes and Tubes. American Society for Testing and Materials.
 - 8) EN 40-6, Part 6 Specifications for Aluminium Columns, *European Standard*, 2000.