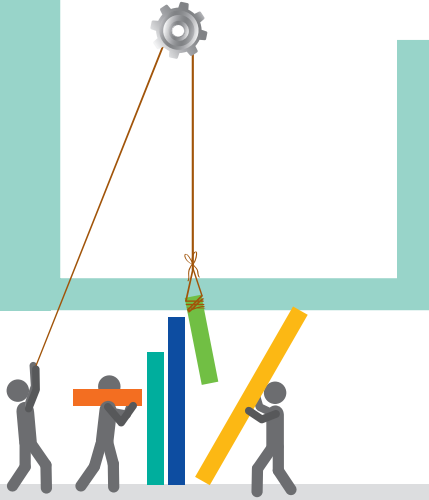


# 알루미늄 합금 건축물 적용 및 설계기준

## Application of Aluminum Alloys in Building Structure and Structural Design Codes



SCIENTIFIC ARTICLE

### 1. 서론

알루미늄합금(Aluminum alloys)이 1930년대에 미국을 시작으로 건축외장 재용의 구조재료로 사용되기 시작되었다. 1960년대에 압출성형과 커튼월 기술이 발전됨에 따라 알루미늄합금 시장은 급속한 성장을 보였다. 뉴욕의 United Nations Building과 피츠버그의 Alcoa Building의 커튼월공사에 대량의 알루미늄 합금이 사용되었다. 알루미늄합금은 보통강(탄소강)에 비해 재료비측면에서 고가이지만, 다양한 합금원소를 혼합시켜 탄소강을 대체할 정도의 강도를 확보할 수 있으며 특히, 단위중량(밀도)가 강재의 1/3수준으로 건축물의 경량화를 유도할 수 있으며 이로 인해 지지하는 주요구조부재의 전체물량을 줄일 수 있다. 또한, 가공성과 내식성이 뛰어나 생애기간동안 유지관리비용(LCC)을 줄일 수 있어 그 적용범위가 확대되고 있는 추세이다.

1979년 American Architectural Manufacturers Association(미국 건축제조자협회)에서 알루미늄 커튼월 설계 매뉴얼을 출판하였고, 이어 미국 알루미늄협회(American Aluminum Association)에서 Structural Design with Aluminum(1판, 1987년)의 출판을 시작으로 최신판인 Aluminum Design Manual(2010년)이 발행되었다. 유럽에서는 Eurocode 9 : Design of aluminium structures(1999년)에서, 일본에서는 알루미늄 건축구조협회의에서 알루미늄 건축구조설계기준·동해설(2007년)을 출판하였다. 특히, 일본에서는 건설교통성에서 2002년 알루미늄 합금을 건축물의 기초 및 주요구조부재에 사용되는 구조재료로 지정되어 관련연구와 건축물에서의 사용이 증대되고 있다.

이와 같이 미국, 유럽, 일본 등에서는 알루미늄 합금을 건축구조용 재료로 지정하여 그에 해당하는 구조설계기준이 제정되어 있고, 설계기준에 의거하여 해당 건축물이 구조설계되어져 구조적 안정성이 확

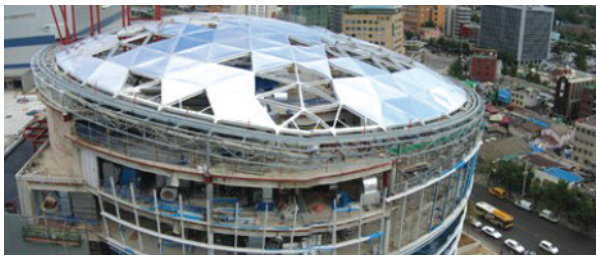


김 태 수 Kim, Tae Soo

한밭대학교  
건축공학과 부교수  
tskim@hanbat.ac.kr

보되고 알루미늄 합금의 수요가 꾸준히 증가되고 있다. 국내에서도 알루미늄 커튼월 및 그 지지부재 그리고 최근에 용산민자역사 지붕트러스(그림 1)등의 대공간 구조물의 구조시스템에 적용되고 있으나, 알루미늄합금이 국내건축구조기준에 구조용 재료로 지정되어 있지 않고 또한 구조설계 기준도 마련되어 있지 않은 실정이다. 그래서 알루미늄합금의 재료기준, 구조설계 기준을 대부분 미국 알루미늄협회 설계매뉴얼을 준용하고 있다.

알루미늄합금은 내식성이 우수하고, 밀도가 일반 강재의 1/3정도(경량성)에 불과하므로, 커튼월뿐만 아니라 건축물의 주요구조부재로의 사용에 대한 요구



a 용산 민자역사 돔 시공현황



b 가나자와역 모데나시들

Fig. 1 국내의 적용사례

도가 높아지고 있다. 특히, 대공간 구조물에서 구조체 자체의 경량화는 기둥 및 기초부의 물량감소로 전체공사비 절감에 큰 효과가 있다. 또한, 우수한 가공성, 내구성 및 현장 작업의 용이성 등을 극대화할 수 있어 향후, 건축구조 재료로서 큰 관심을 받을 것으로 생각된다.

본 기사에서는 최신의 국외 설계기준에 대한 조사·정리한다. 일반적으로 알루미늄합금이 일반탄소강에 비해 재료비가 고가라는 선입관과 용융점(600°C)이 현저히 낮아 95°C를 넘으면 인장강도가 낮아지고 크리프 현상이 두드러지는 경향이 있어 건축물에 구조부재로서 사용이 꺼려지고 있다. 그러나, 건축물의 생애주기 동안 유지관리비용을 고려한다면 오히려 경제적인 구조재료가 될 수 있고, 내화기준에 대한 강도기준과 설계상 유의점을 제시한다면 건축구조물에 그 적용성이 증대될 것이다. 여기서, 국내에서 생산되고 있는 알루미늄합금의 구조적 재료로서의 특성을 파악하고 일반탄소강과 비교하고자 한다. 추가로 알루미늄합금을 사용한 부재의 볼트접합부와 용접접합부에 대한 미국의 내력평가식을 소개하고자 한다.

## 2. 알루미늄 합금의 재료적 특성 및 적용사례

알루미늄의 물리적 성질(KS D 6759)을 표 1에 정리한다. 알루미늄합금은 순수 알루미늄(Al)외에 첨가되는 원소에 따라 크게 8가지로 분류되며, 알루미늄 재질등급에 따라 표 2와 같이 4자리 숫자로 구분된다. 4자리 숫자(예 6061, 7075 등) 중, 첫 번째 숫자는 가장

재료성질	공칭치
밀도	2700 kgf/m <sup>3</sup>
선(열)팽창계수	23×10 <sup>-6</sup> /°C
탄성계수	70GPa
포아송비	0.3

Table. 1 알루미늄의 물리적 성질

첫번째 숫자	다량 함유 원소기호	원소
1000계 알루미늄	Al	대부분 알루미늄
2000계 합금	Cu	구리
3000계 합금	Mn	망간
4000계 합금	Si	실리콘(규소)
5000계 합금	Mg	마그네슘
6000계 합금	Mg-Si	마그네슘-실리콘
7000계 합금	Zn	아연
8000계 합금	Other	기타 금속류

Table. 2 알루미늄합금의 분류 및 합금 원소

많이 함유되어 있는 화학성분을 나타낸다. 합금을 첨가하는 목적은 순수알루미늄의 특성상 무른 성질을 보완(강도증진)하고, 대기 중에서의 부식을 방지(내식내구성 향상)하는 것이다.

주요 알루미늄합금의 종류, 첨가금속구성, 주요용도 및 재료특성을 KS D 6701(알루미늄 및 알루미늄합금의 판 및 조)와 KS D 6759(알루미늄 및 알루미늄 합금 압출 형체)를 참조하여 표 3과 표 4에 간략하게 정리한다. 각각의 합금이 가지는 성질은 그 구성 금속 및 함량뿐만 아니라 가공방법(질별; 제조과정에서의 가공·열처리조건의 차에 의해 얻어진 기계적 성질의 구분)에 따라서도 크게 달라진다. 예를 들어서, 변형을 매우 쉽게 만들고자 한다면, 금속을 높은 온도에 노출시킨 후, 이것을 천천히 냉각함으로써 연한 성질을 얻을 수 있다. 3000 계열 및 5000 계열 제품군은 상온에서의 작업하면서 전성(넓게 퍼지는 성질)을 향상시킨 것이고, 2000, 6000, 7000 계열은 합금의 주요 원소를 급속히 냉각시키는 열처리를 통해서 우수한 강성을 갖도록 만든 것이다.

알루미늄-망간 합금(3000계)은 높은 강성, 가공성 및 내식성으로 가장 널리 사용된다. 알루미늄 캔(몸체)은 3004번의 합금을 적용한다. 3004번이나 3015번 등은 건물의 외장재나 농장의 지붕에 사용되는 슬레이트의 재질로 사용된다. 알루미늄으로 만들어진 주방용기나 연통 등도 역시 3000번대의 합금으로 만들어진다.

알루미늄-마그네슘 합금(5000계)은 3000계 합금보

다 강도가 높고, 가공성이 용이하고, 부식에도 더 강하다. 또한 용접이 가능하다. 5182번 합금은 알루미늄 캔 뚜껑에 사용된다. 5005, 5083, 5052, 5056, 5086 등은 전기설비, 주방용기, 금속판, 내압용기, 전파송신탑, 용접구조물, 화학물질 저장고 등에 널리 사용된다.

알루미늄-망간-규소의 합금(6000계)은 열처리로 균질한  $Mg_2Si$  분자를 형성하고, 높은 강도를 나타낸다. 가장 많이 사용되는 6000대의 제품군은 6063을 사용한 사출물과 6061을 사용한 금속 박판 및 금속판, 단조제품, 사출제품 등이다. 6063을 사용한 사출물은 방풍문, 창틀, 배관 등등의 건축자재로도 널리 사용된다. 6061 제품군은 가구, 파이프, 내부식성이 요구되는 구조부재뿐 아니라 트럭, 보트, 열차 등 교통설비 분야에도 사용된다. 급랭공법을 통해 강화된 6061 합금은 매우 가볍기 때문에 자동차 등의 휠에 사용될 경우 연료소모량을 절감할 수 있다.

새롭게 개발된 6000대 합금 중에서, 6013(높은 강도, 가공성 및 내부식성)은 항공기의 구조물용으로도 적용된다. 알루미늄-구리 합금(2000계)은 3000, 5000, 6000 계열보다도 높은 강도를 가지나 내부식성은 약한 편이다. 2014번 합금을 사용한 단조물은 교통수단을 제조하는 데에 널리 적용되며, 2024 합금은 비행기의 동체, 민간기나 군용 수송기 등의 날개에도 역시 일부 사용된다.

알루미늄-아연 합금(7000계)은 가장 뛰어난 강성을 갖는다.

구리가 함유되어 있지 않은 합금 7005은 용접이 가능하며, 우수한 내부식성을 가지기 때문에 육상수송기기 업계에 많이 사용된다. 7000번 계열 중에서도 가장 강도가 높은 것은 구리를 함유하고 있는 것이며, 이러한 합금은 용접이 불가능하며, 매우 높은 중량당 강도비 때문에 주로 항공기 업계에서 사용된다. 7075번 합금은 1950년대부터 고강성을 가지는 알루미늄합금의 대표주자였다. 1970년대에 스트레스와 부식으로 인한 손상에 대한 보다 강한 저항성을 확보

하고 표면이 부식으로 인해 얇게 벗겨지는 것을 막기 위해서 이 합금에 크롬이 첨가되었다. 7050 합금은 스트레스나 부식에 대한 높은 저항성뿐만 아니라 강한 강성을 가지고 있어서 군용기의 격벽 및 기타

부위에 많이 사용된다. 7150은 일반 민간기 주익의 윗부분에 사용되었고, 이 금속의 강도를 유지하면서 강한 내부식성을 갖는다.

그리고, 각 알루미늄합금의 질별기호는 표 5에 정

합금번호	첨가금속(원소기호), 단위는 %							용도
	Si	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	기타	
1100		0.12					Si 1%, Fe 다량	금속박판, 주방용기
1350							기타 0.5% 정도	전도물질
2008	0.7	0.9		0.4				자동차용 금속판
2014	0.8	4.4	0.8	0.5				비행기 외부, 트럭 프레임
2024		4.4	0.6	1.5				비행기 외부, 트럭 휠
3105			0.6	0.5				건축자재
5052				2.5	0.25			일반적 용도
6013	0.8	0.8	0.5	1.0				우주선용 금속
6061	0.6	0.25		1.0	0.20			일반적 목적
6063	0.4			0.7				일반적 목적, 사출형성
6201	0.7			0.8				전도물질
7075		1.6		2.5	0.25	5.6		비행기용 금속
8090		1.3		0.9			Li 2.4, Zr 0.12	우주선용 금속

Table. 3 알루미늄합금의 구성성분 및 용도

※ Si : 실리콘(규소), Cu : 구리, Mn : 망간, Mg : 마그네슘, Cr : 크롬, Zn : 아연.

합금계	종류	합금의 재료적특성
1000계 순알루미늄	1080 / 1070 / 1050	강도는 낮지만, 열과 전기의 전도성은 높고 성형성, 용접성, 내식성이 양호하다.
	1100 / 1200	강도는 비교적 낮지만, 성형성, 용접성, 내식성은 양호하다.
2000계 Al Cu Mg 계합금	2014	내식성은 떨어지나 강도가 상당히 높고, 열간가공성도 좋다
	2017	강도가 높고, 절삭가공성도 양호, 내식성, 용접성은 상당히 떨어진다.
	2024	2017보다 강도가 높고, 절삭성양호, 가공경화 후회 인공 시효성이 크고, 내용력부식성도 크다
3000계 Al Mg 계합금	3003 / 3203	강도는 1100보다 크고, 용접성, 내식성은 1100과 같은 수준이다.
	3004	3003보다 강도가 높고, 조임성이 뛰어나며 내식성도 양호하다.
4000계 Al Si 계합금	4032	내열성, 내마모성이 뛰어나고 열팽창계수가 낮다.
5000계 Al Mg 계합금	5005	3003과 비슷한 강도를 가지고 성형가공성, 용접성이 양호하다.
	5052	내식성 특히 내해수성이 뛰어나고 성형성, 용접성이 양호하다.
	5082	5083에 가까운 강도를 지니고, 성형가공성, 내식성이 좋다.
	5154	5052와 5083의 중간정도의 강도를 지니고, 성형성, 내식성, 용접성이 양호하다.
	5083	비열처리합금 중 최고의 강도를 가지고, 성형성은 떨어지나 내식성, 용접성이 양호하다.
	5N01	화학 또는 전해연마해서 양극 산화처리 후 대단한 광휘성이 있다. 성형성, 내식성, 용접성이 양호하다.
6000계 Al Mg Si 계합금	6061	내식성, 용접성이 중간정도의 강도를 가지는 냉간 가공성은 열처리 합금으로서는 양호하다.
	6063	양극 산화성은 현저하게 양호하고 용접성, 압출가공성도 좋다.
7000계 Al Zn Mg 계합금	7075	2024보다 높은 강도를 가지고, 현존 알루미늄합금 중 최고의 강도이다.
	7N01	용접성, 내식성, 성형성이 비교적 좋고, 상온에서 시효성이 있다.
	7003	용접구조용 압출합금, 7N01보다 강도는 약간 낮지만, 압출성은 양호.

Table. 4 알루미늄합금의 재료적 특성



질별기호	가공정도와 열처리조건
F	압출/압연/단조 등 열간가공상태 그냥
O	열간가공후 풀림(annealing)처리한 상태 냉간가공경화 풀림(work hardening)한 상태
H	- H1n : 가공화한 것 - H2n : 가공경화후 연화처리한 것 - H3n : 가공경화후 안정화처리한 것 n은 제품 경질화 정도를 표시하며, n=4는 1/2경질, n=6은 3/4경질, n=8은 경질, n=9는 특경질을 표시
T	용체화(solid solution)/시효경화(age hardening)처리한상태 - T3 : 용체화처리후 냉간가공을 한 것 - T4 : 용체화처리후 자연시효를 완료한 것 - T5 : 열간가공 즉시 급랭시킨후 인공시효한 것 - T6 : 용체화처리후 인공시효한 것 - T7 : 용체화처리후 인공시효온도이상에서 안정화처리한 것 - T8 : 용체화처리후 인공시효전 냉간가공한 것 - T9 : 용체화처리후 인공시효처리후 냉간가공한 것 상기번호에 두 번째 자리에 숫자를 붙일 경우가 있다 예로서 T36은 T3처리후 6%정도를 냉간가공을 한 것을 말하고, T32는 구매자가 필요한 특성을 얻기 위해 T3처리를 하는 것을 말한다.
W	용체화처리후 자연시효가 진행중인 것 예 7075-W30인 경우 용체화처리후 30일이 지나고 있다는 의미

Table. 5 알루미늄합금의 질별기호 및 설명

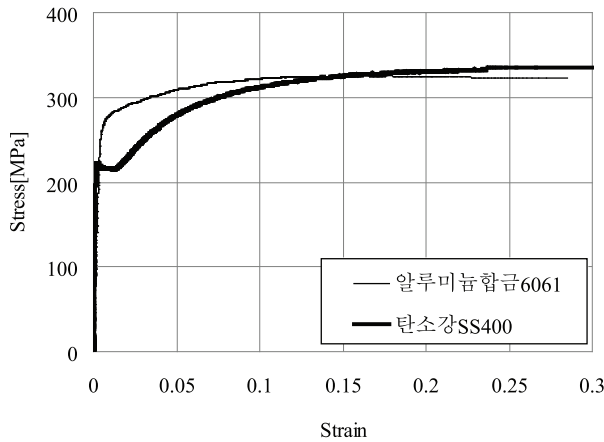


Fig. 2 응력도-변형도 관계곡선

리하고, 질별기호는 가공정도와 열처리조건으로 분류된다.

건축구조용 및 커튼월의 부재에 주로 사용되는 합금은 6061-T6(압연용)이며, 6063-T6(인발압출형)이며, 고강도를 요구하는 접합용 볼트재질로는 스테인리스강 또는 7075-T73이 사용된다. 국내에서 대공간구조물에 사용된 예는 성락교회 몽산포 연수원, 용산민자역사 돔 등이 있다.

### 3. 알루미늄 합금과 탄소강의 재료적 성질 비교

일반 탄소강(SS400)과 알루미늄합금(6061-T6)의 재료적 성질을 비교한 인장시험결과를 표 6에 정리한다. 탄성계수(E)는 탄소강이 3배이고 항복강도(Fy), 인장강도(Fu)는 탄소강이 크다. 항복비(Fy/Fu)의 경우, 알루미늄합금이 탄소강보다 크게 나타났고, 알루미늄합금이 항복이후 바로 최대인장강도에 도달될 가능성이 높아 재료의 인성 즉 에너지 흡수능력은 탄소강이 유리한 것을 알 수 있다. 이에 따라 연신율의 경우도 탄소강이 2배 이상 높은 것으로 나타났다.

재료의 인장강도 시험결과인 응력-변형도 관계곡선(그림 2)으로 부터 탄소강의 경우는 항복점이 뚜렷하나 알루미늄합금의 경우는 항복점이 명확하지 않으며, 오프셋 방법에 의해 항복강도를 정의하였다.

### 4. 알루미늄 합금의 접합설계기준

본 기사에서는 알루미늄합금에 관한 구조설계 기준인 미국알루미늄협회(AAA)에서 명시하고 있는 내력식을 정리한다. 미국알루미늄협회의 구조기준은

시험체명	E (GPa)	Fy (MPa)	Fu (MPa)	Fy/Fu YR(%)	연신율 EL(%)
AL6061-T6	67.66	267.87	325.36	82.33	14.20
SS400	210.25	343.48	499.67	68.74	34.00

Table. 6 알루미늄합금과 탄소강의 기계적 성질 비교(공칭두께 3.0mm)

파단 모드	기준식	비고
Net-section fracture (순단면파단, N)	$P_u = F_u A_e$	
Shear fracture (중전단파단, E)	$P_u = t d_e F_u$ $d_e =$ 하중방향 연단거리(e)	
Bearing fracture (지압파단, B)	$P_u = 2DtF_u$ , D = 볼트직경	
Block shear fracture (블록전단파단, BS)	$F_u A_{nt} \geq 0.6F_u A_{nv}$ 일 때, $P_{ut} = A_{nt} F_u + 0.6A_{gv} F_y$ $F_u A_{nt} < 0.6F_u A_{nv}$ 일 때, $P_{ut} = A_{gt} F_y + 0.6A_{nv} F_u$	AISC LRFD 기준 1993년 준용

Table. 7 미국알루미늄협회 알루미늄합금 파단모드별 각 기준 내력평가식

2010년에 출판되었지만, 볼트접합부의 거동특성에 대해서는 대체로 1990년대에 출판된 열간압연(후판)용의 구조설계기준(미국강구조협회 AISC)을 준용하여 접합부의 내력식을 규정하고 있다.

알루미늄합금에 관한 용접접합부에 대해 기계나 항공관련 분야에서 판재나 압출형재에 따른 알루미늄합금 종류별 용접의 구조성능에 관한 연구가 진행되어 왔으나, 건설분야에서 사용되는 알루미늄합금의 용접특성에 대해서는 관련 문헌 및 연구 결과가 많지 않은 실정이다.

미국 알루미늄 협회에서 용접접합부에 대한 강도 설계는 홈용접Groove weld과 모살용접Fillet weld을 분류하여 제시하고 있다.

홈용접에 대한 공칭인장 또는 압축강도는,

$$R_n = F_{twe}A_{we} \quad (1)$$

여기서,  $F_{twe}$ 는 모재, 열영향부 및 용접봉의 인장강도,  $A_{we}$ 는 용접유효면적(=용접유효길이×용접크기)

홈용접에 대한 공칭 전단강도는,

$$P_n = F_{swe}A_{we} \quad (2)$$

여기서,  $F_{twe}$ 는 모재, 열영향부 및 용접봉의 전단강도,  $A_{we}$ 는 용접유효면적(=용접유효길이×유효용접크기)

모살용접에 대한 공칭 전단강도,

$$P_n = F_{sw}L_{we} \quad (3)$$

여기서,  $F_{twe}$ 는 Min(용접봉 전단강도와 유효목두께의 곱, 전단을 받는 모재에 대해 모재의 전단강도와 모살크기의 곱, 인장을 받는 모재에 대해 모재의 인장강도와 모살크기의 곱),  $L_{we}$ 는 유효용접길이임.

## 5. 맺는말

알루미늄 합금의 내식성 및 경량성을 활용하여 창호재, 커튼월 부재뿐만 아니라 건축물의 주요구조부

재로써 사용성이 증대되고 있고, 미국, 유럽, 일본 등에서는 알루미늄 합금을 건축구조용 재료로 지정과 그에 따른 구조설계기준이 마련되어 있지만, 국내는 알루미늄 합금이 건축구조부재로 많이 사용되고 있으나, 아직 국내 설계기준이 마련되어 있지 않은 실정이다.

언급한 바와 같이 국내에서 알루미늄 합금을 적용한 건축물의 안전성을 확보하고 적용성을 증대시키기 위한 알루미늄 합금을 사용한 건축구조부재의 구조특성에 관한 연구가 이루어져 국내설계기준을 마련하기 위한 다양한 자료들이 필요하다. ❁

### ● 참고문헌 references ●

- 1 C.C. Menzemer, R. Ortiz-Morgado, R. lascone, T.S. Srivatsan, An Investigation of the bearing strength of three aluminum alloys, Materials Science and Engineering A327, 2002, 203-212.
- 2 B. Atzori, P. Lazzarin and M. Quaresimin, A re-analysis on fatigue data of aluminium alloy bolted joints, Int. J. Fatigue Vol. 19, No. 7, 1997, 579-588.
- 3 P. Lazzarin, V. Milanit and M. Quaresimin, Scatter bands summarizing the fatigue strength of aluminium alloy bolted joints, Int. J. Fatigue Vol. 19, No. 5, 1997, 401-407.
- 4 정광량, 엄광호, 용산민자역사 알루미늄 돔의 구조설계와 시공, 한국철공간구조학회지 기술기사, 2004, 15-19.
- 5 정광량, 김영진, 김명한, 엄광호, 알루미늄 돔을 이용한 대공간 구조물, 한국공간구조학회지 기술기사, 2001, 30-36.
- 6 Korean Standard(KS), 알루미늄, 마그네슘 및 그 합금-질별기호, KS D 0004, 기술표준원, 2003.
- 7 Korean Standard(KS), 알루미늄 및 알루미늄합금의 판 및 조, KS D 6701, 기술표준원, 2003.
- 8 Korean Standard(KS), 알루미늄 및 알루미늄 합금 압출형재, KS D 6759, 기술표준원, 2003.
- 9 Brungraber RJ, Clark JW. Strength of welded aluminum columns. Journal of Structural Division, ASCE 1960.
- 10 Aluminum Association, Aluminum Design Manual, Washington (DC): The Aluminum Association, 2010.
- 11 Eurocode 9: Design of aluminum structures -Part 1-1: General rules -General rules and rules for buildings, DD ENV 1999-1-1, EC9, 2000.
- 12 김태수, 임진성, 김민성, 알루미늄 합금 일면전단 볼트접합부에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 춘계학술대회, 2011.
- 13 임진성, 김태수, 조용현, 이용택, 알루미늄 합금(6061-T6) 볼트접합부의 종국거동에 관한 유한요소해석, 대한건축학회 추계학술대회, 2011.