

스페이스프레임의 볼조인트 접합부 파괴모드에 관한 실험적 연구

An Experimental study on Failure Mode of Space Frame's Ball joint connection

이성민* 김민숙** 강창훈*** 김대영**** 송창영*****
Lee, Sung-min Kim, Min-sook Kang, Chang-Hoon Kim, Dae-Young Song, Chang-Young

요약

대공간구조에서 접합부의 신뢰도는 매우 중요하다. 접합부에 사용되는 고력볼트의 나사부 유효단면적은 축부단면적보다 작고 볼트 축부에 락핀용 구멍이 있기 때문에 볼트 나사부 또는 락핀용 구멍에 응력집중 현상이 발생하여 취성 파단이 발생할 우려가 높다. 특히 접합부는 직렬형 구조로 이루어져 있다. 따라서 접합부에서의 극한상황시 파괴유형은 필히 취성파괴를 피해야 하며 연성과손으로 유도해야 한다. 따라서 본 연구에서는 볼 조인트 접합부의 소성변형능력을 향상시키고 현장에서 발생할 수 있는 시공오차의 흡수가 가능하도록, 볼트의 나사부나 핀부의 취성파단 없이 소성변형능력 향상을 목표로 하였다. 에너지흡수형 볼트를 사용함으로써 소성변형능력이 향상된 스페이스 프레임의 접합상세를 제안하였다.

Abstract

The reliability of joint is one of the most important factors in Spatial Structure. Screw's effective sectional area of high tensile bolt used in joint is smaller than shank area and shank has lock-pin hole. It could bring about brittle fracture caused by stress concentration. Specially joint is comprised in-line structure. So failure mode at an extreme situation must evade brittle failure and induce ductile failure certainly. Accordingly in this study, Our goal is new joint detail expected plastic deformation performance without brittle fracture. We proposed space frame's joint that improved plastic deformation performance.

키워드 : 스페이스프레임, 접합부, 고력볼트, 소성변형, 직렬형구조, 볼조인트

Keywords : Space frame, joint, High tensile bolt, plastic deformation, buckling load, ball joint

1. 서론

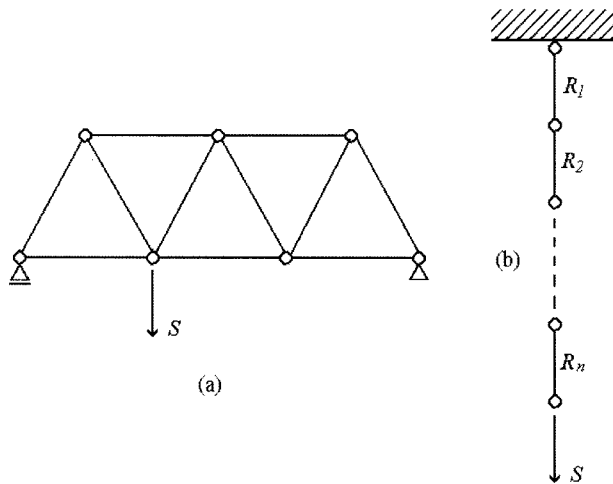
현존하는 대부분의 개폐식 돔 건축물은 강성구조로 구성되어 있고, 돔으로 대표되는 대공간 건축물의 일반적인 구조시스템은 스페이스 프레임이다. 대공간 구조를 설계하기 위하여 스페이스 프레임을 사용한 구조가 많이 늘어나게 되었고, 국내에서도 최근에 들어 월드컵 경기장, 역사 등을 중심으로 그 사용 예가 늘어나고 있다. 이러한 수요증가에도 불

구하고, 국내에서는 아직 스페이스 프레임 설계를 위한 기술자료가 부족한 상태이며, 특히 접합부의 구조성능 및 설계방법에 대한 검증이 미비한 실정이다.

대공간구조에서 접합부의 신뢰 매우 중요하다. 특히 접합부는 <그림 1>과 같이 직렬형 구조로 이루어져 있다. 따라서 극한 상황 시 접합부에서의 파괴유형은 필히 취성파괴를 피해야 하며 연성과손으로 유도해야 한다.

본 연구에서는 볼 조인트 접합부의 소성변형능력을 향상시키고 현장에서 발생할 수 있는 시공오차의 흡수가 가능하도록, 볼트의 나사부나 핀부의 취성파단 없이 감소된 축부에서 소성변형능력이 기대되는 새로운 접합상세를 제안하고자 한다.

* 정희원 · (재)한국건설품질연구원 이사, 공학박사
** 정희원 · (재) 한국건설품질연구원 연구원 공학석사
*** 교신저자, 정희원 · (주)엠코 과장, 공학박사
TEL : 02-3464-6638 FAX : 0502-610-0121
E-mail : judeman@amco.co.kr
**** 정희원 · 대우건설기술연구원 팀장, 공학박사
***** 정희원 · (주)한국구조물안전원 대표이사, 공학박사



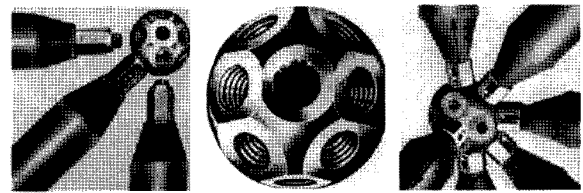
<그림 1> 직렬형 구조

2. 스페이스프레임의 접합부

2.1 메로시스템

메로 시스템은 공장에서 정밀제작된 부품들을 현장에서 조립하기 때문에, 공장과 현장에서 일반 건축공사보다 높은 정밀도를 요구한다. 특히 한 절점에서 누적된 오차는 장스팬의 타 절점에 미치는 영향이 매우 커서, 부재 길이의 미세한 부족은 전체 구조체의 시공을 불가능하게 하는 요인이 되기도 한다. 이러한 현장특성으로 메로 접합부의 볼트를 완전히 체결하지 못하는 현장결합의 발생가능성이 매우 크고, 이는 전체 구조체의 안전성을 크게 저하시킬 가능성이 있다.³⁾

일반적으로 메로 접합부에 삽입되는 볼트는 고력볼트로서, 최대내력이후에 급격한 내력감소와 함께 취성파단이 발생하는 인장거동의 특성을 보이기 때문에 볼트에서의 변형능력이나 에너지흡수능력을 기대할 수 없다. 또한 메로 접합부 부품 제작시, 볼트에는 락핀의 삽입을 위하여 구멍이 존재하게 된다. 일반적으로 건축구조물에 사용되는 고력볼트의 나사부 유효단면적은 축부단면적보다 작기 때문에, 락핀용 구멍은 나사부 유효단면적과 축부결손단면적을 고려하여 결정된다. 그러나 락핀 삽입용 구멍에 의한 축부결손단면적이 나사부 유효단면적보다 크더라도, 락핀용 구멍에 응력집중 현상이 발생하여 급격한 파단이 발생하기도 한다. 인장력에 의한 고력볼트 파단이나 압축력에 의한 스트럿(부재)의 좌



<그림 2> Mero 시스템

굴은 뚜렷한 항복현상 없이 최대내력과 동시에 급격히 내력이 감소하고 접합부에서 변형능력을 기대하기 어렵다.

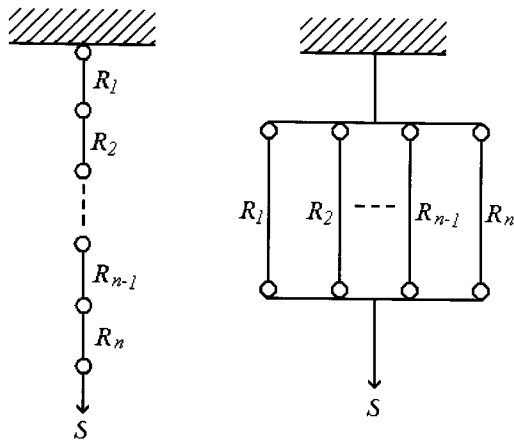
2.2 볼트의 파괴(파손) 유형(Failure mode)

강이나 알루미늄과 같은 연성재료는 일반적으로 연성거동을 하지만 고강도강은 일반 연강에 비해 연성이 훨씬 떨어진다.

연성부재의 취성파괴(Brittle Fracture of Ductile Material)는 보통 때는 연성인 재료가 특별히 감지할 만한 소성변형을 보이지 않은 채 발생하는 파괴형태를 말한다. 2차 세계대전 중 전쟁으로 인하지 않고 자연 상태에서 2500여대의 미국 리버티 수송선 중 145대는 두 동강이 나버렸으며 거의 700대는 중대한 파손이 발생하였다. 이러한 현상은 주로 재료의 결함이나 응력집중이 원인이 된다. 취성파괴는 소성변형이 발생하는 응력 하에서 발생하며 부재 내부의 작은 결점이 큰 균열로 발전해서 재료파괴 지점이 된다. 취성파괴는 그밖에도 온도, 다축응력, 용접부의 결함, 재료의 성분 등 여러 요인들에 의해 발생하는데 예고 없이 갑자기 발생하는 파괴형태이므로 큰 사고를 야기할 수 있다.

2.3 직렬형구조와 병렬형구조

복수의 요소로 구성된 시스템의 신뢰성은 각각의 요소의 신뢰성에 좌우된다. 시스템의 구성에 의해서, 그 요소의 파괴의 시스템 전체의 파괴에 대한 영향의 정도에 차이가 있다. 또 하나의 요소가 파괴되는 것에 의해 시스템 전체가 기능을 잃는 경우를 생각할 수 있다. 구조물에서는 정정구조물이 이에 해당한다. 예를 들어 <그림 3>의 정정트러스에는, 어떤 요소가 파괴되더라도 트러스 전체가 내하력을 잃는다. 이러한 시스템을 직렬시스템이라고 하며 <그림



(a) 직렬형 모델 (b) 병렬형 모델

<그림 3> 시스템 구성도

3(a)>는 이러한 직렬시스템을 모델로 치환한 것이다. 여기서 요소 i 의 파괴 事象을 E_i 라 하면, 시스템의 파괴확률은 다음과 같다.

$$P_f = \text{Prob} [E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_n]$$

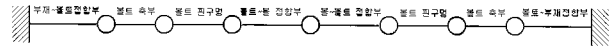
$$= 1 - \text{Prob} [\bar{E}_1 \cap \bar{E}_2 \cap \dots \cap \bar{E}_n] \quad (1)$$

직렬모델과 대조적인 <그림 3(b)>의 병렬모델은 그 부재의 파괴가 발생해도 시스템 전체의 파괴는 발생하지 않는다. 따라서 직렬시스템에서 기술한 파괴확률은 병렬시스템에 있어서는 일반적으로 파괴가 아닌 손상의 확률이 된다. 부정정구조물은 그 개념에 의한 성격상 여기에 해당하며, 구성요소의 파괴가 시스템 전체의 파괴를 가져오지 않도록 하는 fail-safe 설계도 이와 맥락을 같이 한다. 이 경우 시스템의 파괴확률은 다음과 같다.

$$P_f = \text{Prob} [E_1 \cap E_2 \cap \dots \cap E_n] \quad (2)$$

정정트러스구조와 같은 직렬시스템의 구조물에서는 한 부재의 파괴가 전체의 파괴로 이어지기 때문에 시스템 전체의 신뢰성을 확보하기 위해서는 각 구조 요소 모든 파괴확률을 작게 해야 한다.^{1,2)}

대공간구조에서 접합부의 신뢰도는 매우 중요하다. 특히 접합부는 직렬형 구조로 이루어져 있다. 따라서 접합부에서의 극한상황시 파괴유형은 필히 취성파괴를 피해야 하며 연성파손으로 유도해야 한



<그림 4> 스페이스프레임 접합부 직렬형 시스템

다. <그림 4>는 스페이스프레임 접합부 직렬형시스템을 이상화하여 표현한 것으로서 부재~볼트 접합부와 볼트~볼 조인트부는 나사부분에서 취성파단이 발생하기 쉽고, 볼트 핀부분도 구멍부분에서 응력집중으로 취성파단될 우려가 높다.

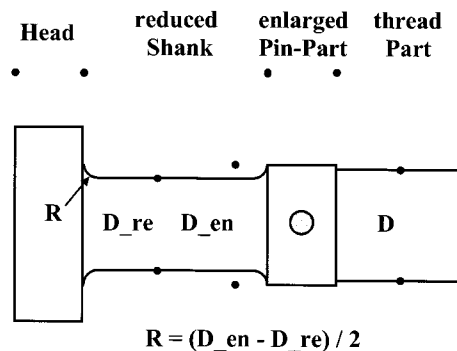
3. 볼 조인트 인장접합부 실험

3.1 실험체 계획

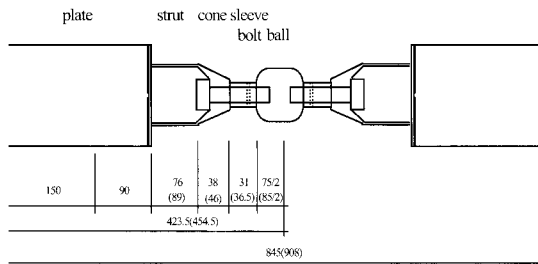
에너지흡수형 볼트(<그림 5>)를 사용한 볼 조인트의 인장거동을 파악하기 위하여 볼 1개를 기준으로 동일 직선상에 2개의 스트럿(부재)이 위치하는 단순 인장접합부 실험체를 <그림 6>과 같이 제작하였다.

실험체는 크게 두 가지 형태, 스트럿 직경 76.3mm, 두께 3.2mm 사용한 CA타입 접합부와 스트럿 직경 89.1mm, 두께 3.2mm 사용한 CB타입 접합부로 나누어 제작하였다. 실험체에는 M20과 M24 볼트를 사용하였으며 M20의 감소축부 직경 15mm를 제외하고 모든 실험체가 스트럿이 항복하도록 설계하였다. 스트럿에는 강종 SPS400이 사용되었으며, 규격은 M20 볼트의 경우 직경 76.3mm와 두께 3.2mm이고 M24 볼트의 경우 직경 89.1mm와 두께 3.2mm이다. 각 접합부 실험체의 일람은 <표 3>에 나타내었다.

실험에 앞서 각 실험체의 파괴모드를 예측하였는데, 접합부에 삽입되는 볼트가 인장력을 받는다고 가정하여, 볼트의 축부, 핀부, 나사부의 단면적의 최



<그림 5> 에너지흡수형 볼트 상세



〈그림 6〉 볼 조인트 인장접합부 실험체

대내력을 계산하여 최소치를 파괴되는 부분으로 예측하였다.

스트럿 및 에너지흡수형 볼트의 소재특성을 파악하기 위하여, 인장시험을 실시하였다. 인장시험결과, M20볼트의 항복강도는 1064MPa, 인장강도는 1130MPa 이고 M24볼트의 항복강도는 1052MPa, 인장강도는 1118MPa로 나타났다. 또한 스트럿의 항복강도는 312MPa, 인장강도는 432MPa으로 나타났다.

Ball은 기계구조용 탄소강으로서 최경강(最硬鋼)인 SM45C를 단조(forging)처리 방식으로 성형한 후에 drilling하여 압나사를 가공하였으며 기계적 성질은 <표 1>과 같다. 일반적으로 고장력 Bolt는 인장강도 70kg/mm² 이상의 열처리를 필요로 하는 Bolt를 지칭하며 본 연구에 사용된 Bolt 재질인 SCM435H의 화학적 성분은 <표 2>와 같다.

〈표 1〉 SM45C의 기계적성질

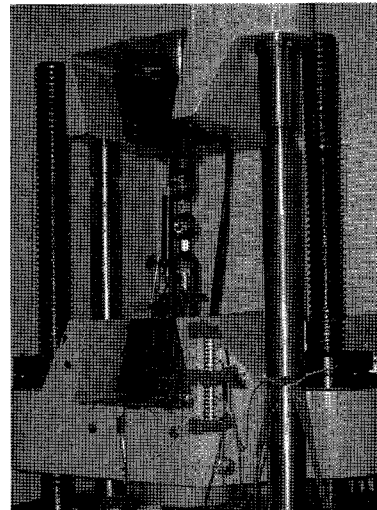
담금질 (°C)	뜨임 (°C)	인장 강도 (kg/mm ²)	연신율 (%)	항복점 (kg/mm ²)	경도 (Hb)
820~870 수냉	550~650 급냉	70이상	17이상	50이상	201~269

〈표 2〉 SCM435H의 화학적성분(w, %)

C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.36	0.79	0.18	0.18	0.12	0.13	0.09	1	0.15

3.2 볼 조인트 인장접합부 실험

실험체 설치상황 및 계측방법을 <그림 7>에 나타내었다. 볼트실험용 인장시험기에 설치된 실험체들은 980kN급 범용만능시험기(이하, UTM)을 사용하여 파단 시까지 가력 하였다. 변위제어속도는 탄성범위



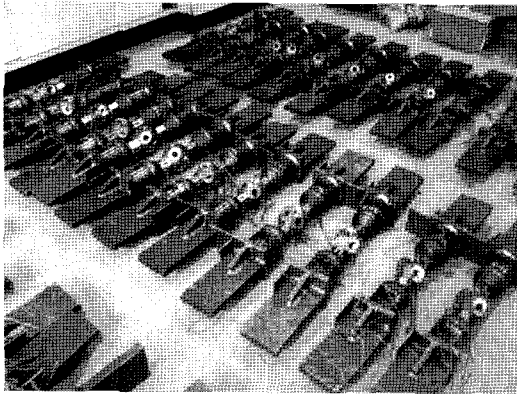
〈그림 7〉 실험체 설치상황

내에서 1mm/min이고, 비탄성범위 내에서 0.6mm/min이다. UTM으로 가해지는 하중은 영점 조정된 로드셀을 사용하여 계측하였고 변위와 변형도는 UTM 헤드 양쪽에 설치된 LVDT와 스트럿 중앙부와 에너지흡수형 볼트 축부에 부착된 스트레인 게이지로 계측하였다. 국부변형도를 측정하기 위하여, 스트럿 중앙부 및 에너지흡수형 볼트에 소성변형률 게이지를 부착하고 하중 단계별 변형분포를 측정하였다. 또한 하중-변형 관계를 측정하기 위하여, 변위계를 설치하여 최대내력 도달 시까지의 접합부 인장거동을 측정하였다.

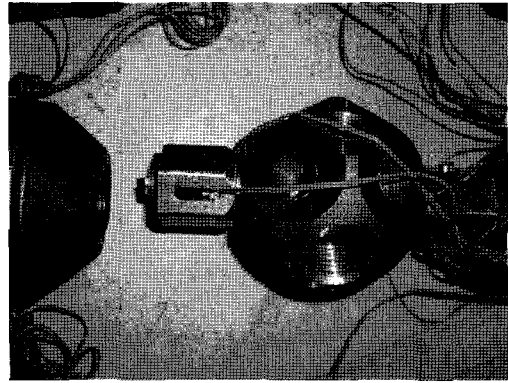
3.3 인장접합부 실험 결과

M20 시리즈 에너지흡수용 볼트가 사용된CA타입 접합부 인장실험결과와 M24 시리즈 에너지흡수용 볼트를 사용한 CB타입 접합부 인장실험결과는 표 3에 정리하였다. δ_u/δ_y 는 항복내력시 인장변형량에 대한 최대내력시 종국변형량의 비로서, 접합부의 소성변형능력을 측정하는 지표이다.

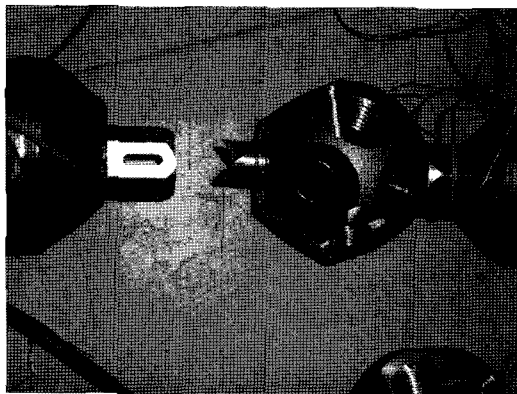
CA 타입 실험결과를 살펴보면 축부를 5mm 절삭한 볼트를 사용한 CA20-20-15는 CA20-20-20에 비해 변형률이 5배 가까이 증가했지만 내력은 약 40% 정도 저하되었다. 그러나 CA20-20-18은 내력은 약 11% 정도 저하된 반면 변형률 4배 이상 높게 나타났다. CA20-20-15, CA20-20-16, CA20-20-17은 변형률의 차이를 거의 보이지 않고 내력은 크게 저하되는 추세



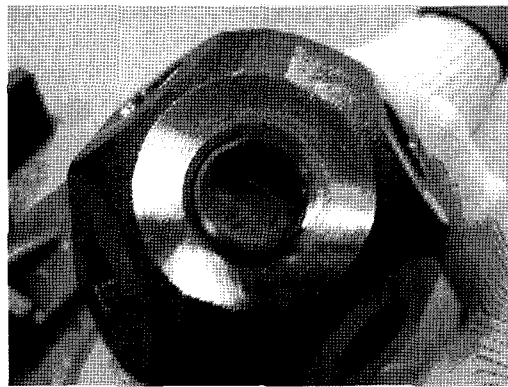
(a) 실험체



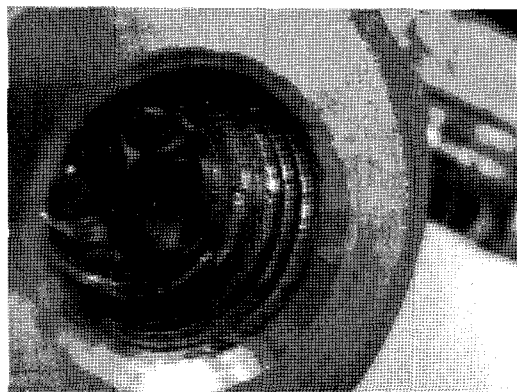
(b) 감소부 파단



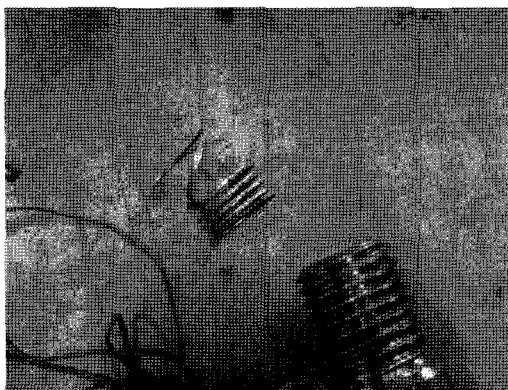
(c) 핀부 파단



(d) 나사부 파단



(e) 볼의 나사산 파단



(f) 볼의 나사산 파단

〈그림 8〉 CA 및 CB 타입 파단 모습

를 보이기 때문에 축부를 3mm이상 절삭하는 것은 의미가 없다고 판단되었다. CA 20-21-20은 예측 파괴 모드와 다르게 볼의 너트 부분이 파단되었다. 이는 볼의 너트와 볼트의 나사산의 제작과정시 생긴 시공오차 때문이라고 생각된다. CA20-21-19, CA20-21-18은 볼트의 나사부에서 파단되었고 나머지 실험체들은 볼트의 감소축부에서 파단되었다. 감소축부에서 파단된 실험체에 비해 나사부에서 파단된 실험체들은

변형률이 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다.

CB 타입 실험결과를 살펴보면 CB24-24시리즈와 CB24-25시리즈는 축부 절삭의 효과가 크게 나타나지 않았다. CB 24-24 시리즈에서는 축부를 5mm 절삭한 CB24-24-19만이 축부에서 파단되었고 나머지는 핀부에서 취성파단하였다. CB 24-25 시리즈에서는 축부를 4mm 절삭한 CB24-25-20과 축부를 5mm 절삭한 CB 24-25-19만이 축부에서 파단되었고 나머

〈표 3〉 실험체 일람 및 실험결과

시험체명	예측							실험결과					
	ePy (kN)	ePu (kN)	ePy/ esPy	ePu/ esPy	ePy/ esPu	ePu/ esPu	파괴 모드	tPy (kN)	tPu (kN)	$t\delta_y$ (mm)	$t\delta_u$ (mm)	$t\delta_y/t\delta_u$ (%)	파괴 모드
CA20-20-20	207	229	120%	133%	70%	78%	핀부	305.8	307.5	7.6	8.13	6.97	핀부
CA20-20-19	207	229	120%	133%	70%	78%	핀부	286.0	287.7	6.14	7.03	14.5	핀부
CA20-20-18	207	229	120%	133%	70%	78%	핀부	262.4	271.2	6.43	8.35	29.9	감소부
CA20-20-17	201	222	116%	129%	68%	76%	핀부	242.5	248.2	3.6	5.03	39.7	감소부
CA20-20-16	178	197	103%	114%	61%	67%	감소부	214.8	222.4	3.25	4.49	38.2	감소부
CA20-20-15	156	173	91%	100%	53%	59%	감소부	175.1	180.9	3.18	4.25	33.6	감소부
CA20-21-20	217	240	125%	139%	74%	82%	나사부	310.2	311.8	10.64	11.4	7.1	볼-나사산
CA20-21-19	217	240	125%	139%	74%	82%	나사부	308.1	308.7	11.5	12.06	4.9	나사부
CA20-21-18	217	240	125%	139%	74%	82%	나사부	274.3	275.1	6.46	6.87	6	나사부
CA20-21-17	201	222	116%	129%	68%	76%	감소부	226.9	232.5	4.16	5.21	25.2	감소부
CA20-21-16	178	197	103%	114%	61%	67%	감소부	214.1	219.9	4.01	4.81	20.0	감소부
CA20-21-15	156	173	91%	100%	53%	59%	감소부	178.7	185.2	2.96	3.96	33.8	감소부
CA20-22-20	217	240	125%	139%	74%	82%	나사부	309.1	309.4	10.84	11.03	1.8	볼-나사산
CA20-22-19	217	240	125%	139%	74%	82%	나사부	296	297	7.95	8.47	6.5	나사부
CA20-22-18	217	240	125%	139%	74%	82%	나사부	281	286.5	5.73	7.24	26.4	나사부
CA20-22-17	201	222	116%	129%	68%	76%	감소부	244	252.4	4.23	5.56	31.4	감소부
CA20-22-16	178	197	103%	114%	61%	67%	감소부	206.6	213.3	3.58	5.06	41.3	감소부
CA20-22-15	156	173	91%	100%	53%	59%	감소부	180.6	188.3	3.02	4.27	41.4	감소부
CB24-24-24	294	326	145%	161%	85%	94%	핀부	398.6	398.6	13.53	13.71	1.3	핀부
CB24-24-23	294	326	145%	161%	85%	94%	핀부	406.3	406.3	18.12	18.38	1.4	핀부
CB24-24-22	294	326	145%	161%	85%	94%	핀부	397.7	398	13.21	13.44	1.7	핀부
CB24-24-21	294	326	145%	161%	85%	94%	핀부	385.5	385.8	8.21	8.38	2.1	핀부
CB24-24-20	278	308	137%	152%	80%	89%	감소부	371.7	375.1	9.51	10.9	14.6	핀부
CB24-24-19	251	278	124%	137%	73%	80%	감소부	332.8	341	9.27	11.08	19.5	감소부
CB24-25-24	312	345	154%	170%	90%	100%	나사부	404.4	404.4	16.13	16.2	0.4	나사부
CB24-25-23	312	345	154%	170%	90%	100%	나사부	395.5	395.7	12.99	13.24	1.9	나사부
CB24-25-22	312	345	154%	170%	90%	100%	나사부	377.2	377.6	8.14	8.29	1.8	나사부
CB24-25-21	307	339	151%	167%	89%	98%	감소부	376.3	376.8	8.59	8.81	2.6	볼-나사산
CB24-25-20	278	308	137%	152%	80%	89%	감소부	373.1	373.2	8.65	8.76	1.3	감소부
CB24-25-19	251	278	124%	137%	73%	80%	감소부	341.7	343.2	6.23	7.02	12.7	감소부
CB24-26-24	312	345	154%	170%	90%	100%	나사부	391.5	391.7	10.93	11.2	2.5	나사부
CB24-26-23	312	345	154%	170%	90%	100%	나사부	396.2	397.8	12.75	13.94	9.3	나사부
CB24-26-22	312	345	154%	170%	90%	100%	나사부	378	380.1	8.8	9.38	6.6	나사부
CB24-26-21	307	339	151%	167%	89%	98%	감소부	358.8	361.1	5.43	5.75	5.9	감소부
CB24-26-20	278	308	137%	152%	80%	89%	감소부	370.8	377.6	6.79	9.55	40.6	감소부
CB24-26-19	251	278	124%	137%	73%	80%	감소부	334.9	339.3	8.3	9.5	14.5	감소부

- 1) CA20-22-15는 D=20mm, Den=22mm, Dre=15mm인 볼트와 직경 76.3mm, 두께 3.2mm 스트럿 사용
- 2) CB24-26-19는 D=24mm, Den=26mm, Dre=19mm인 볼트와 직경 89.1mm, 두께 3.2mm 스트럿 사용
- 3) ePy : 파괴모드에 기초한 집합부의 공칭 항복내력
- 4) ePu : 파괴모드에 기초한 집합부의 공칭 최대내력
- 5) δ_y : 항복내력시, 실험치 인장변형량 (항복변형량)
- 6) δ_u : 최대내력시, 실험치 인장변형량 (종국변형량)
- 7) esPy : 스트럿의 공칭 항복내력
- 8) esPu : 스트럿의 공칭 최대내력
- 9) tPy : 실험치 항복내력,
- 10) tPu : 실험치 최대내력
- 11) δ_y : 항복내력시, 실험치 인장변형량 (항복변형량)
- 12) δ_u : 최대내력시, 실험치 인장변형량 (종국변형량)

지는 나사부에서 취성적인 파단을 보였다. CB 24-26 시리즈의 실험결과를 살펴보면, CB 24-26-24, CB 24-26-23, CB 24-26-22는 나사부에서 파단하였고, CB 24-26-21, CB 24-26-20, CB 24-26-19는 절삭

된 축부에서 파단되었다. CB24-26-20 CB24-26-24에 비해 내력은 5.3% 저하된 반면 변형률은 20배 이상 증가한 것으로 나타났다. 즉, 핀부의 단면을 늘이고 축부의 단면을 감소하여 핀부와 축부의 단면차를

크게 한 실험체가 더 큰 변형률의 향상을 보였다고 볼 수 있다.

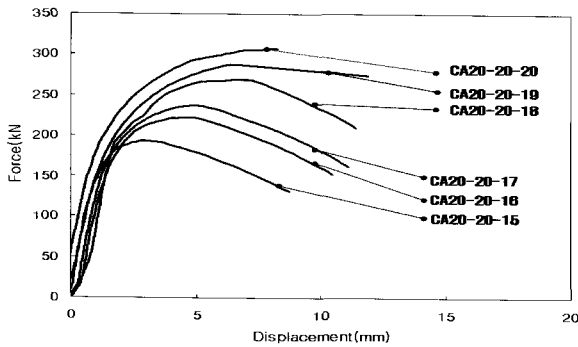
4. 결 론

에너지 흡수형 볼트를 삽입한 볼 조인트 접합부의 인장거동에 관한 실험으로 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

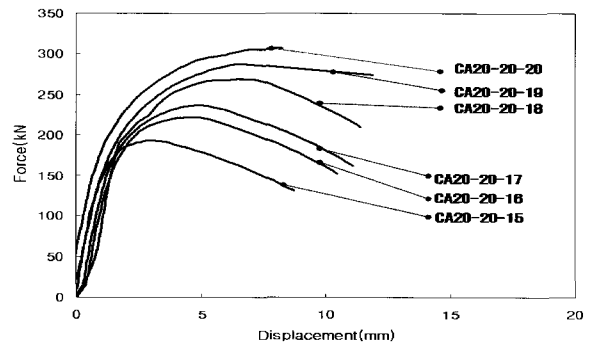
1. M20의 에너지 흡수형 볼트를 삽입한 볼 조인트 접합부 실험 결과 축부를 최소 2mm 이상 절삭하여야 변형능력이 향상되는 것을 확인할

수 있었으며, 향후 축부 절삭치를 증가시키거나 편부의 단면을 더 늘인 에너지 흡수형 볼트를 사용한 접합부의 추가 실험 수행이 필요하다고 판단된다.

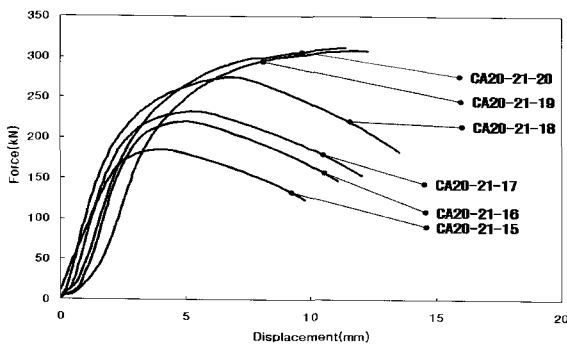
2. M24의 에너지 흡수형 볼트를 삽입한 볼 조인트 접합부 실험 결과 CB 24-26-24 실험체가 내력의 큰 저하없이 가장 큰 변형능력성능을 보였다. 또 축부 단면만을 절삭시킨 볼트보다 편부 단면의 증가가 함께 이루어진 볼트를 사용한 접합부가 내력 저하 없이 변형능력의 향상을 보였다.



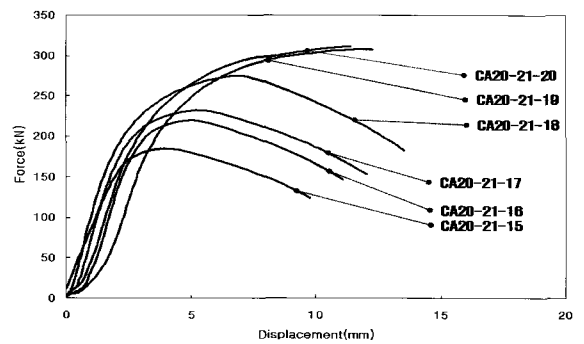
(a) CA20-20 type 하중-변위 곡선



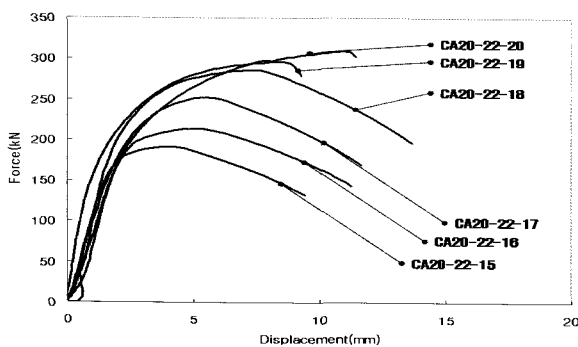
(d) CB 24-24 type 하중-변위 곡선



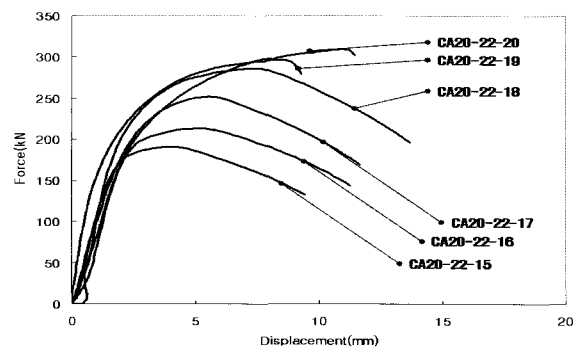
(b) CA20-21 type 하중-변위 곡선



(e) CB 24-25 type 하중-변위 곡선



(c) CA20-22 type 하중-변위 곡선



(f) CB 24-26 type 하중-변위 곡선

3. M20과 M24의 에너지흡수형 볼트를 사용하여 스페이스프레임 접합부의 인장성능을 실험한 결과, 축부를 4mm이상 절삭할 경우에는 내력이 크게 저하되어 절삭 한계치를 4mm이하로 하는 것이 적절할 것으로 판단된다.
4. 볼 조인트 접합부 실험 시, 몇몇 실험체의 경우 파단을 유도한 볼트가 아닌 볼의 너트부가 파손되었다. 이는 볼트의 나사산과 볼의 너트부 사이의 시공오차 때문인 것으로 판단되며 볼의 너트부 파손시 내력저하 및 취성거동을 보이므로 향후 대구경 볼트와 볼의 제조관련 단조기술 확보가 필히 요구된다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2006년도 첨단도시개발사업(06 건설핵심 B03)의 지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

1. Moses, F., 'System Reliability Development in Structural Engineering', Structural Safety I, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1982.
2. Terada, S. & Takahashi T., 'Failure Conditioned Reliability Index', Journal of Structural Engineering, Vol. 114, No. 4, April, 1988.
3. Kenneth C. Naslund, 'Space Frame Structures', AISC Engineering Journal, Oct., 1964.
4. K. Uduma, O. D. Olowokere and T. Arciszewski, 'Survey of Existing Studies on the Strength and Deformation of Spherical Joints in Steel Space Trusses', Engineering Journal, ACE, Third Quarter, 1989.