

# 스페이스프레임에 사용되는 에너지 흡수형 볼트의 인장성능연구

## A study on Tensile performance of Energy Absorbing Bolts in Space Frame

이 성 민\*      김 민 숙\*\*      강 창 훈\*\*\*      최 정 삼\*\*\*\*  
Lee, Sung-Min      Kim, Min-Sook      Kang, Chang-Hoon      Choi, Jung-Sam

### 요 약

스페이스프레임의 볼 조인트 접합부에서는 축부에 핀의 삽입을 위한 구멍이 존재하기 때문에 응력집중으로 인한 취성파단의 우려가 있다. 따라서 접합부에서의 변형능력이나 에너지흡수능력은 낮은 편이다. 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 개발하였으며 수치해석과 실험을 통해 그 성능을 검증하고자 하였다. 수치해석과 실험을 통하여 볼트의 축부 및 핀부의 단면을 조절함으로써 기존 고력볼트보다 소성변형능력이 향상됨을 확인할 수 있었다.

### Abstract

The hole for the insertion of the pin in the shank is exist at ball joint connection of the space frame. It brings about the brittle fracture caused by stress concentration. Consequently it cannot expect the deformation performance or energy absorption performance from ball joint connection. In this study we developed a new connection details which will increase the plastic deformation performance at ball joint connection and can absorb the error in construction, which expect the plastic deformation performance at the reduced shank without brittle fracture at the screw of bolt and pin. Also it's capacity is verified by the performance in numerical analysis and test. We confirmed bolt's plastic deformation performance through controled shank and pin's area.

**키워드 :** 스페이스프레임, 에너지 흡수형 볼트, 볼 조인트 접합부, 소성변형능력

**Keywords :** Space Frame, Energy absorbing bolts, Ball joint connection, plastic deformation performance

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 목적 및 배경

기존 메로 시스템의 볼 조인트 응력전단기구는 크게 접합부에 인장력이 작용하는 경우와 압축력이 작용하는 경우로 나눌 수 있다.

압축력의 전단기구는 부재, 콘, 슬리브, 볼의 순서로 힘이 전달되고 볼트에는 응력이 발생하지 않는다. 그러나 인장력의 전단기구는 부재, 콘, 볼트, 볼

의 순서로 힘이 전달되고, 볼트에 지배적인 인장응력이 발생한다. 압축응력 전단기구의 최종파괴모드는 부재의 좌굴이고, 인장응력 전단기구의 최종파괴모드는 부재의 인장파단이다. 압축좌굴이나 인장파단에 의한 최대내력 직후의 급격한 접합부 내력저하는 불가피한 실정이고, 그러한 항복내력 및 최대내력 이후의 변형능력은 낮은 편이다.

따라서 본 연구에서는 볼 조인트의 인장력 전단기구에서 발생하는 볼트의 취성파단을 방지하고, 최대내력 이후에도 변형능력의 확보가 가능한 새로운 접합부 상세를 개발하고자 한다.

### 1.2 메로시스템 접합부에서의 볼트

기존 메로 시스템의 접합부는 볼 조인트 접합부

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

로서, 우수한 구조성능과 더불어 편리한 시공성을 확보하고 있다. 메로 타입 접합부는 스트럿(strut), 콘(cone), 슬리브(sleeve), 볼트(bolt), 볼(ball) 그리고 핀(lock-pin)으로 구성된다. 스트럿과 콘은 용접접합되어 있고 콘과 볼은 볼트에 의하여 결속된다. 볼트의 외부에 있는 육각형의 슬리브를 회전시킬 때 볼트에 직각방향으로 부착되어 있는 핀에 의해서 볼트가 볼 속으로 삽입되면서 콘과 볼트, 볼트와 볼의 결합이 이루어진다.<sup>1)</sup>

일반적으로 메로 접합부에 삽입되는 볼트는 고력 볼트로서, 일반 연강에 비해 연성이 훨씬 떨어진다. 특히 건축구조물에 사용되는 고력볼트는 나사부 유효단면적이 축부 단면적보다 작기 때문에 최대내력과 동시에 나사부에서 취성파단을 보인다.

볼 조인트 접합부에서는 축부에 핀의 삽입을 위한 구멍이 존재하기 때문에, 응력집중으로 인한 취성파단의 가능성이 크다(<그림 2>). 이를 보완하기 위해 핀 구멍에 의한 결손단면을 고려하여 핀부의 결손단면적이 나사부 유효단면적보다 크도록 설계하고 있으나 일반적으로 응력집중에 의한 핀부의 취성파단 가능성에 대한 검토는 이루어지고 있지 않다. 이렇게 고력볼트의 취성 파단은 뚜렷한 항

복현상 없이 최대내력과 동시에 급격히 내력이 감소하기 때문에 접합부에서의 변형능력이나 에너지 흡수능력은 기대할 수 없다.<sup>4)</sup>

따라서 본 연구에서는 볼 조인트 접합부의 소성 변형능력을 향상시키고 현장에서 발생할 수 있는 시공오차의 흡수가 가능하도록, 볼트의 나사부나 핀부의 취성파단 없이 감소된 축부에서 소성변형능력이 기대되는 새로운 접합상세를 개발하였으며 수치 해석과 실험을 통해 그 성능을 검증하고자 한다.

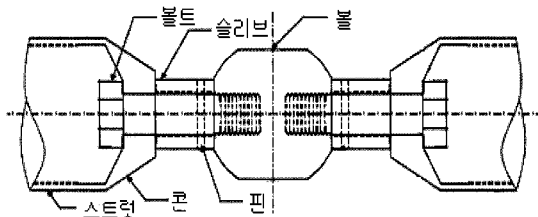
## 2. 수치해석

### 2.1 볼트 모델링

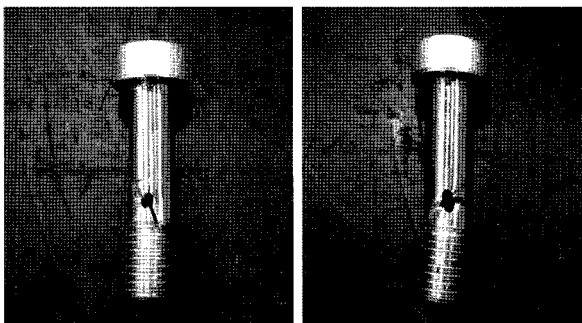
볼 조인트 접합부 중 볼트의 각 부분의 면적비에 따른 응력분포 및 거동특성을 분석하기 위하여, 범용유한요소해석 프로그램(ANSYS 9.0)을 사용 수치 해석을 수행하였다. 수치해석은 핀 구멍에 의한 결손단면은 고려하지 않고 축부 면적만을 감소시키고 나사부를 모델링한 볼트와 핀 구멍을 모델링하고 나사부는 경계조건만으로 모델링한 볼트 두 종류를 대상으로 하였다.

두 종류 모두 유한요소해석 프로그램인 ANSYS 9.0의 preprocess module을 사용하여 모델링하고 해석하였다. 해석모델은 형상 및 응력의 대칭성을 이용하여 그림 3과 같이 1/4만 모델링하였다.

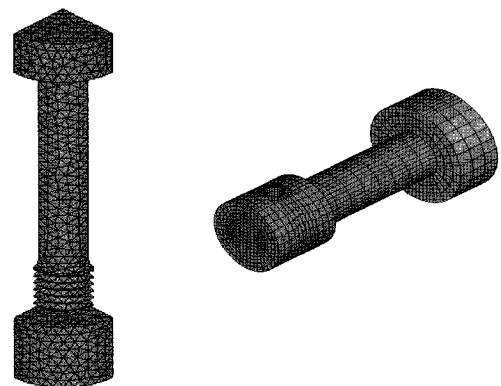
재료특성은 인장 실험의 결과를 적용하였다. 고력 볼트 단부는 모든 x축, y축, z축 방향의 변위를 구



<그림 1> 볼 조인트 접합부



<그림 2> 접합부 휨실험에 의한 볼트 파단



(a)모델A(나사부)

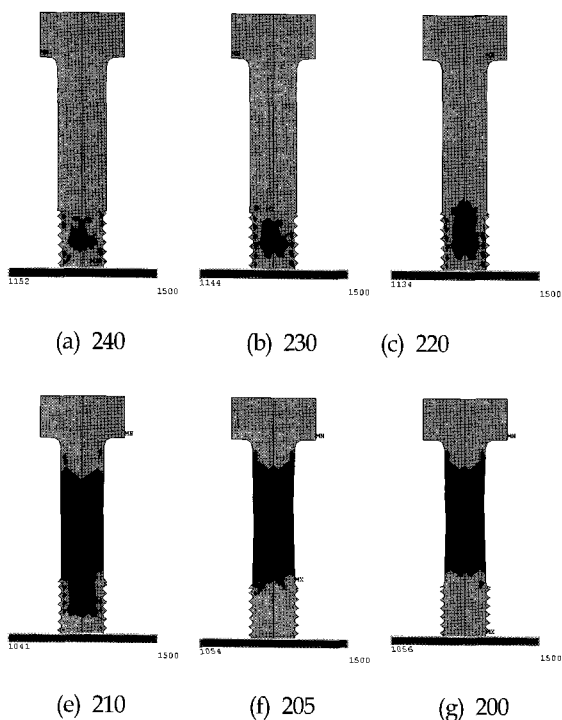
(b)모델B(핀부)

<그림 3> 축부감소형 볼트 해석모델

속하였고, 고력볼트의 머리부분은 x축과 z축의 변위를 구속하였다. 변위제어방법을 사용하여 고력볼트 머리부분에 y 방향으로 기준길이의 15%까지 변위를 제어하였다. 재료비선형 및 기하비선형 해석이 가능한 입체요소인 SOLID95 요소를 사용하였다. 이 요소는 20개의 절점으로 구성되고 각 절점은 x축, y축, z축 방향의 3자유도를 갖는다. SOLID95는 소성, 크리프, 응력, 강성, 큰 좌굴, 큰 변형성능을 가진다. 소성옵션은 BISO를 사용하였다. BISO 모델은 2개의 선으로 표현되는 응력-변형곡선이 사용된다. 항복은 Von Mises의 기준을 그리고 경화 기준은 등방성 경화 기준을 사용하였다.

### 2.2 모델 A 해석결과

핀부를 모델링하지 않고 나사부를 모델링한 해석 결과는 <그림 4>와 같다. 그림의 시험체명의 수치는 감소축부의 직경을 나타낸다. 해석결과에 의하면 시험체 240, 230, 220의 경우 나사부에서 항복이 시작되었고, 시험체 210의 경우 나사부와 축부에서, 그리고 시험체 205와 200의 경우 축부에서 항복이 시작되었다. 축부의 단면이 감소할수록 응력분포가 나사



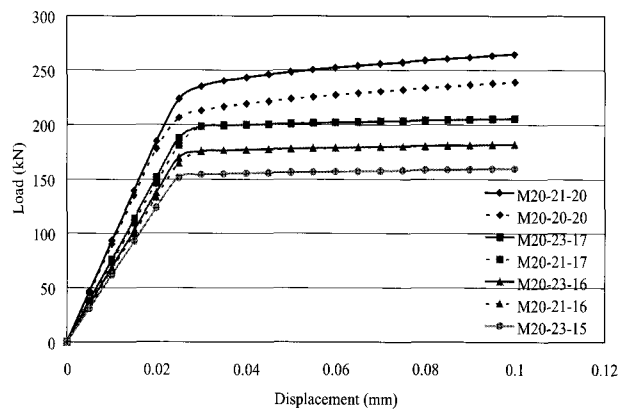
<그림 4> 볼트의 항복상태

부에서 축부로 이동하며 국부적인 응력집중 현상 없이 고른 응력분포를 보이는 것을 알 수 있다.

### 2.3 모델 B 해석결과

나사부를 모델링하지 않고 핀부를 모델링한 해석 결과는 <그림 5>와 같다. 시험체명에서 처음 수치는 나사부 원직경, 두 번째 수치는 핀부 직경, 세 번째 수치는 감소축부의 직경을 나타낸다. 예를 들어 M20-23-17은 나사부 직경이 20mm, 핀 구멍에 의한 결손단면을 고려한 핀부 직경이 23mm, 그리고 변형에너지가 집중하는 감소축부의 직경이 17mm인 시험체이다. 핀부의 확대나 축부의 감소가 없는 원래의 M20볼트인 M20-20-20 시험체를 기준으로, 핀부의 직경을 1mm 증가시킨 경우 항복내력 및 최대내력이 약 10% 상승하는 것으로 나타났다.

항복시의 응력분포는 <그림 6>에 나타내었다. 그림에서와 같이 축부 감소 없이 핀부만을 1mm 확대시킨 M20-21-20 시험체의 경우, 축부와 동일한 수준의 응력이 핀부 전반에 걸쳐 발생하고 있어, 핀부에서의 높은 응력집중이 예상된다. 또한 핀부를 1mm 확대시키고, 에너지흡수부인 축부는 3mm로 감소시킨 M20-21-17과, 핀부를 3mm 확대시키고 에너지흡수부인 축부는 3mm로 감소시킨 M20-23-17은 하중-변형 관계는 유사한 거동을 나타내고 항복내력 및 최대내력 또한 유사한 값을 나타내고 있으나, 항복내력시 핀부의 응력분포는 상이한 결과를 나타내고 있다. M20-23-17이 M20-21-17보다 핀부에서의 응력집중이 매우 완화됨을 알 수 있다.



<그림 5> 하중-변위



〈그림 6〉 항복하중시 응력분포

### 3. 에너지흡수형 볼트 구조성능시험

#### 3.1 실험체 계획

볼 조인트 접합부의 에너지흡수요소인 변형에너지 흡수형 고력볼트의 형상을 그림 7에 나타내었다. 그림에서와 같이 감소축부(reduced shank)는 변형에너지의 집중을 위하여 나사부 단면적보다 작게 제작되었고, 핀부(enlarged pin-part)는 핀 구멍에 따른 결손단면을

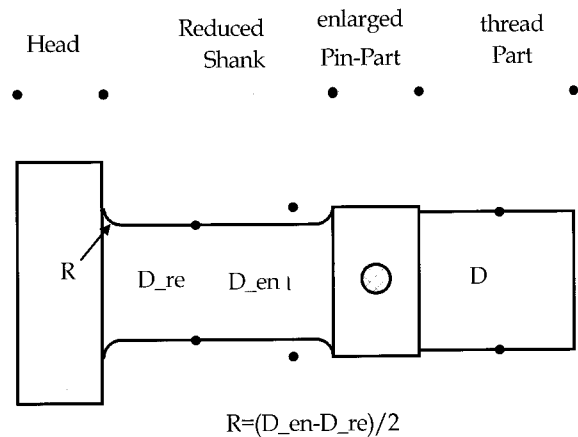
고려하여 나사부보다 크게 제작되었으며, 나사부(thread part)는 기존 볼트의 공칭치수에 따라 제작되었다.

일반적으로 고장력 볼트는 인장강도 70kg/mm<sup>2</sup> 이상의 열처리를 필요로하는 볼트를 지칭하며 본 연구에 사용된 볼트 재질인 SCM435H의 화학적 성분은 <표 1>에 나타내었다.

〈표 1〉 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	0.15

본 연구에서는 변형에너지흡수요소인 고력볼트의 나사부 직경(thread Part : D), 핀부 직경(enlarged Pin-Part : D<sub>en</sub>), 감소축부 직경(reduced Shank : D<sub>re</sub>)에 따른 각 부분의 단면적비 및 파괴모드를 주요 변수로 설정하였다. 실험체는 F10t급 M20볼트와 M24볼트를 기준으로, 각 실험체 당 3개씩 제작하였다. M20볼트와 M24볼트 실험체 일람은 <표 2>와 같다.



〈그림 7〉 에너지흡수형 볼트의 실험변수

#### 3.2 에너지흡수형 볼트 인장시험 방법

실험체 설치상황은 <그림 8>에 나타내었다. 볼트 실험용 인장지그에 설치된 실험체들은 980kN급 범용만능시험기(이하, UTM)을 사용하여 파단 시까지 가력하였다. 변위제어속도는 탄성범위 내에서 1mm/min이고, 비탄성범위 내에서 0.6mm/min 이다. UTM으로 가해지는 하중은 영점 조정된 로드셀

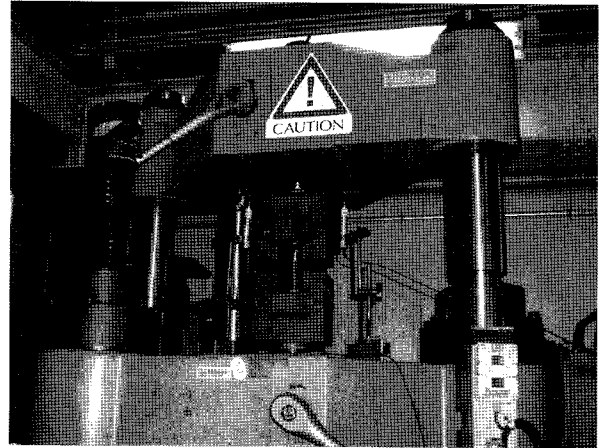
〈표 2〉 실험체 일람(M20볼트)

시험체명	볼트 직경 D	핀부 직경 Den	감소 축부 직경 Dre	Apen / Aeff (%)	Asre / Aeff (%)	예상 항복 내력 ePy (kN)	예상 최대 내력 ePu (kN)	파괴 모드
B20-20-20	20	20	20	96	128	207	229	핀부
B20-20-19	20	20	19	96	116	207	229	핀부
B20-20-18	20	20	18	96	104	207	229	핀부
B20-20-17	20	20	17	96	93	201	222	감소부
B20-20-16	20	20	16	96	82	178	197	감소부
B20-20-15	20	20	15	96	72	156	173	감소부
B20-21-20	20	21	20	100	128	217	240	나사부
B20-21-19	20	21	19	10	116	217	240	나사부
B20-21-18	20	21	18	109	104	217	240	나사부
B20-21-17	20	21	17	109	93	201	222	감소부
B20-21-16	20	21	16	109	82	178	197	감소부
B20-21-15	20	21	15	109	72	156	173	감소부
B20-22-20	20	22	20	123	128	217	240	나사부
B20-22-19	20	22	19	123	116	217	240	나사부
B20-22-18	20	22	18	123	104	217	240	나사부
B20-22-17	20	22	17	123	93	201	222	감소부
B20-22-16	20	22	16	123	82	178	197	감소부
B20-22-15	20	22	15	123	72	156	173	감소부
B24-24-24	24	24	24	128	73	294	326	핀부
B24-24-23	24	24	23	118	80	294	326	핀부
B24-24-22	24	24	22	108	87	294	326	핀부
B24-24-21	24	24	21	98	96	294	326	핀부
B24-24-20	24	24	20	89	106	278	308	감소부
B24-24-19	24	24	19	80	117	251	278	감소부
B24-25-24	24	25	24	128	82	312	345	나사부
B24-25-23	24	25	23	118	89	312	345	나사부
B24-25-22	24	25	22	108	98	312	345	나사부
B24-25-21	24	25	21	98	107	307	339	감소부
B24-25-20	24	25	20	89	118	278	308	감소부
B24-25-19	24	25	19	80	131	251	278	감소부
B24-26-24	24	26	24	128	91	312	345	나사부
B24-26-23	24	26	23	118	99	312	345	나사부
B24-26-22	24	26	22	108	108	312	345	나사부
B24-26-21	24	26	21	98	119	307	339	감소부
B24-26-20	24	26	20	89	131	278	308	감소부
B24-26-19	24	26	19	80	145	251	278	감소부

주 1) B20-22-15는 D=20mm, Den=22mm, Dre=15mm인 실험체이다.

- 2) Apen : 확대된 핀부 단면적
- 3) Aeff : 나사부 인장 유효단면적
- 4) Asre : 감소된 축부 단면적

를 사용하여 계측하였고 변위는 UTM 헤드 양쪽에 설치된 LVDT와 볼트 축부에 부착된 스트레인 게이지로 계측하였다. 스트레인 게이지는 변형에너지가

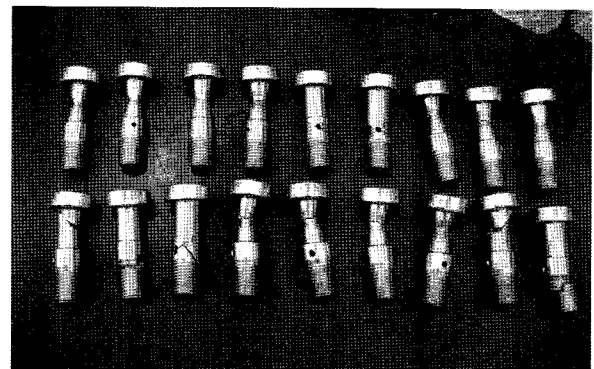


〈그림 8〉 인장시험 장면

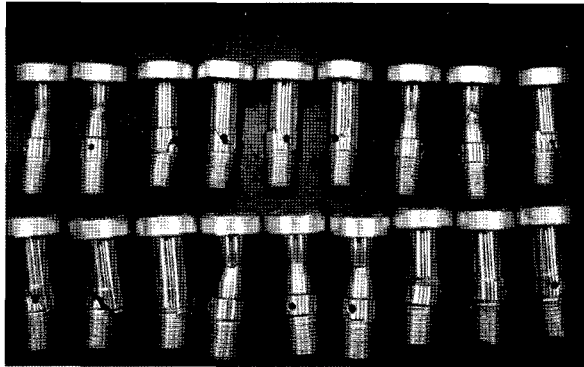
집중되는 감소축부 중앙부에 대칭으로 2개 부착하였다. 에너지흡수형 볼트 인장시험에 앞서, 고력볼트의 소재특성을 파악하기 위하여, 인장시험을 실험하였다. 인장시험결과, M20볼트의 항복강도는 1064MPa, 인장강도는 1130MPa이고 M24볼트의 항복강도는 1052MPa, 인장강도는 1118MPa로 나타났다. 볼트 인장시험결과의 항복강도 및 에너지흡수형 볼트 인장시험결과의 항복응력도는 0.2% off-set 법을 사용하여 결정하였다.

### 3.3 인장시험 결과

각 시험체의 실험결과를 정리하여, 표 3에 나타내었고 실험결과는 실험체 3개의 평균값을 사용하였다. 파단형상은 <그림 9>, <그림 10>에, 하중-변위의 관계 곡선은 그림 11에 나타내었다. 파단시 변형률( $\epsilon_u$ )은 고력볼트의 파단시 감소축부 및 확대핀부에서 발생한 변형의 평균값을 기준길이(감소축부에



〈그림 9〉 B20 볼트파단 형상



〈그림 10〉 B24 볼트파단 형상

서 확대편부까지의 길이)에 대한 변형률로 나타낸 것이다.

### 3.3.1 B 20 Type 실험결과

B20-20 TYPE에서는 B20-20-19, B20-20-20은 편부에서 파단되었으나 B20-20-15, B20-20-16, B20-20-17, B20-20-18은 절삭가공한 축부에서 파단되었다. B20-21 TYPE에서는 B20-21-20, B20-21-19, B20-21-18은 편부 및 나사부에서 파단되었고, B20-21-17, B20-21-16, B20-21-15는 절삭가공한 축부에서 파단되었다. 이로써 축부 단면이 절삭됨에 따라 파단 위치가 나사부 및 편부에서 축부로 이동한다는 것을 확인할 수 있었다. B20-20-20과 B20-20-15를 비교해보면 B20-20-15는 파단시 변형률이 65% 정도 증가한 반면 최대내력은 41% 정도 감소하였다. 즉, 변형률은 큰 폭으로 증가하였으나 단면 감소에 따른 내력은 현저하게 저하되었다. 그러나 B20-20-18은 B20-20-20에 비해 최대내력이 6% 감소하였고 파단시 변형률은 24% 정도 증가하여, 내력의 큰 감소없이 변형률의 증가를 보였다.

또한 B20-21-20에 비해 B20-21-15는 최대내력이 37% 정도 감소, 변형률이 23%정도 증가하는 것으로 나타났으며 B20-21-20과 B20-21-17을 비교해보면 최대내력이 16% 감소하였고, 변형률은 42% 정도 증가하였다.

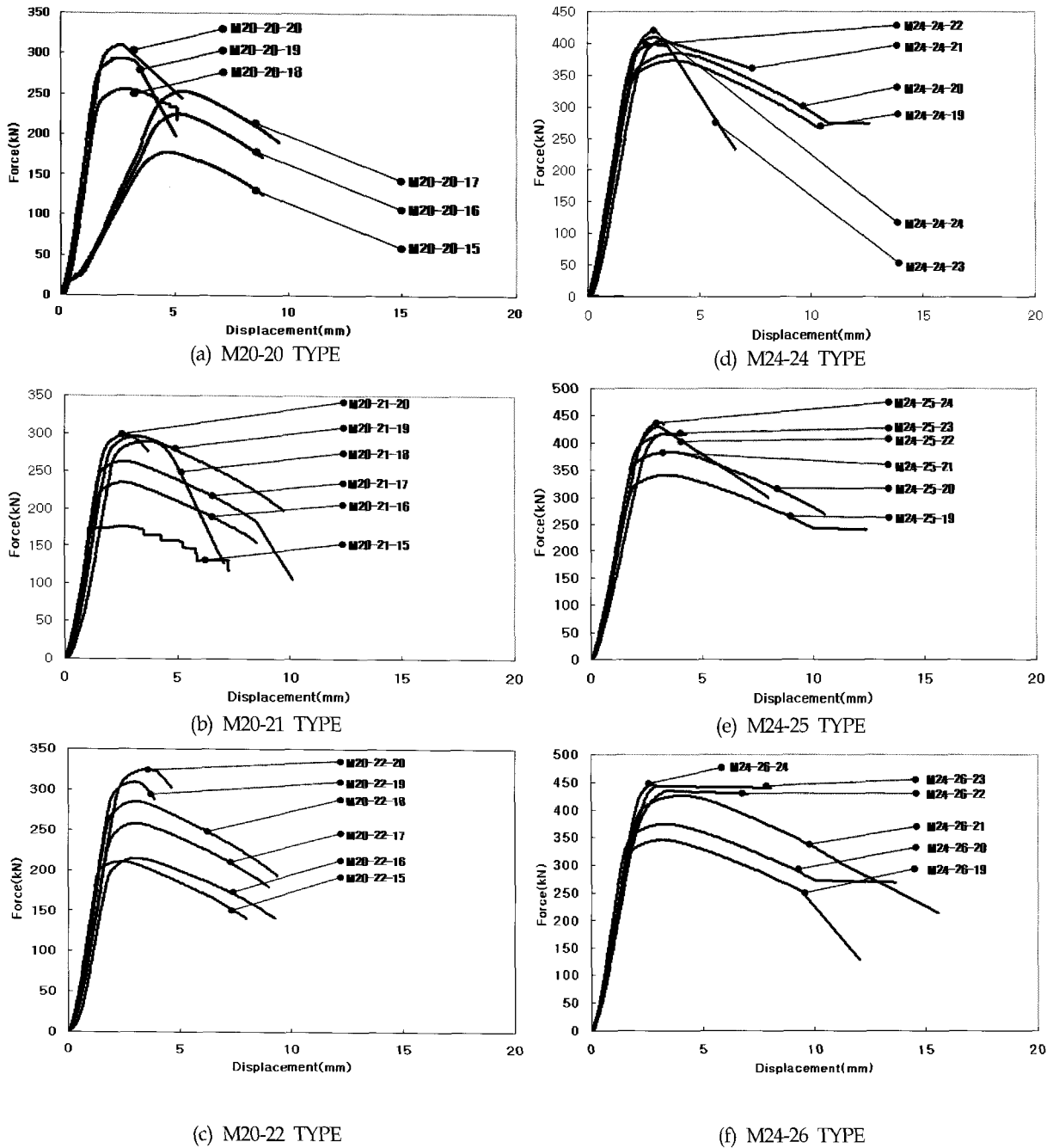
B20-22 TYPE의 실험결과를 살펴보면 B20-22-20은 나사부에서 파단되었지만 나머지 시험체들은 감소부에서 파단되었다. 편부의 단면을 증가시킴으로써 절삭가공한 축부의 단면적과 차이가 생김에 따라 절삭이 적음에도 파단이 축부로 이동하는 것을 알 수 있었다.

〈표 3〉 에너지흡수형 볼트 인장시험 결과

시험체	$tP_y$ (kN)	$tP_u$ (kN)	$t\sigma_y$ (MPa)	$t\sigma_u$ (MPa)	$\epsilon u$ (%)	파괴 모드	내력 비교 (%)	변형 률 비교 (%)
B20-20-20	292.7	300.1	932.1	955	8.98	편부	기준	기준
B20-20-19	283.7	300	1001.2	1055.1	8.05	편부	0	-10
B20-20-18	279	282	1096.7	1108.7	11.13	감소	-6	24
B20-20-17	251.3	253.8	1107.8	1118.7	14.92	감소	-15	66
B20-20-16	221.2	225.8	1101	1123.7	14.74	감소	-24	64
B20-20-15	173.7	178.2	983.4	1009	14.83	감소	-40	65
B20-21-20	294.1	300	936.6	952.5	10.86	편부	기준	기준
B20-21-19	303.1	310.5	1069.5	1095.8	10.99	편부	3	1
B20-21-18	304.5	308.6	1197.1	1213.4	13.77	나사	3	27
B20-21-17	248.4	253	1094.8	1115.1	15.43	감소	-16	42
B20-21-16	233.2	238.4	1160.2	1186.3	14.25	감소	-21	31
B20-21-15	184.7	189.3	1045.6	1071.8	13.36	감소	-37	23
B20-22-20	312	316.9	993.7	1009.4	10.75	나사	기준	기준
B20-22-19	333.6	339.2	1311.8	1333.4	11.59	감소	7	8
B20-22-18	278.6	284.1	1095.2	1116.9	13.5	감소	-10	26
B20-22-17	261.6	265.9	1153	1172	13.44	감소	-16	25
B20-22-16	223.2	225.6	1110.5	1122.7	13.5	감소	-29	26
B20-22-15	188.7	191.2	1068.5	1082.6	13.04	감소	-40	21
B24-24-24	409.9	411.2	906.4	909.3	7.71	편부	기준	기준
B24-24-23	407.6	409.1	981.6	985.3	9.4	편부	-1	22
B24-24-22	402.8	407.2	1060.3	1071.6	7.72	편부	-1	0
B24-24-21	398.4	400.2	1150.8	1156	9.64	편부	-3	25
B24-24-20	376.6	379.9	1199.3	1209.8	17.6	감소	-8	128
B24-24-19	334.7	340	1181.2	1200	17.2	감소	-17	123
B24-25-24	433.6	435.5	958.9	963.1	7.82	편부	기준	기준
B24-25-23	420.1	427	1011.7	1028.2	7.65	편부	-2	-2
B24-25-22	413.1	416.9	1087.3	1097.3	8.45	편부	-4	8
B24-25-21	415.1	416.1	1199	1202.1	9.95	편부	-4	27
B24-25-20	381.5	383.75	1215	1222.1	17.71	감소	-12	126
B24-25-19	344.8	350	1216.8	1235	17.65	감소	-20	126
B24-26-24	449	450.1	993	995.5	7.87	나사	기준	기준
B24-26-23	443.2	445.1	1067.3	1072	8.05	나사	-1	2
B24-26-22	443	444.9	1166	1171	9.45	편부	-1	20
B24-26-21	414.7	418.9	1198	1210.2	11.3	감소	-7	44
B24-26-20	362.7	378.5	1155	1205.3	11.64	감소	-16	48
B24-26-19	337.5	343	1191	1210.3	11.86	감소	-24	51

### 3.3.2 B 24 Type 실험결과

B24 type의 실험결과를 살펴보면 B24-24-24와 B24-24-23, B24-24-22, B24-24-21은 편부에서 파단되었고, B24-24-20과 B24-24-19는 절삭가공한 축부에서 파단되었다. 또한 B24-25-24, B24-25-23, B24-25-22, B24-25-21은 편부에서 파단되었고 B24-25-20과 B24-25-19는 절삭가공한 축부에서 파단되었다. 이로써 B20 TYPE과 마찬가지로 절삭가공한 축부를 따라



〈그림 11〉에너지 흡수형 볼트의 하중-변위

파단 부분이 이동하는 것을 알 수 있었다. B24-24-24에 비해 B24-24-19는 최대내력이 18% 정도 감소한 반면 변형률은 2배 이상 증가하였다. B24-24-24와 B24-24-20을 비교해보면 최대내력이 8%정도 감소한 반면 변형률은 2배 이상 증가하였다. 즉, B24-24-19에 비해 B24-24-20은 최대내력의 큰 감소 없이 큰 변형률을 얻을 수 있었다.

B24-25 TYPE에서도 B24-25-24에 비해 B24-25-19

는 최대내력이 20% 정도 감소하였고 변형률은 2배 이상 증가하였다. 절삭가공된 축부에서 파단된 B24-25-20과 축부단면의 감소가 없는 B24-25-24를 비교해보면 최대내력은 12% 정도 감소한 반면 변형률은 2배 이상 증가하였다.

B24-26 TYPE에서는 B24-26-24, B24-26-23은 나사부에서 파단되었고 B24-26-22는 핀부에서, 나머지 B24-26-21, B24-26-20, B24-26-19는 절삭가공된 축부

에서 파단되었다. B24-24 TYPE이나 B24-25 TYPE에 비해 핀부 단면을 늘리고 축부를 절삭가공한 B24-26 TYPE이 감소부에서의 파단 유도가 잘 이루어진 것을 볼 수 있었다.

#### 4. 결 론

볼트의 핀부 및 나사부의 국부적인 응력집중 현상으로 인한 취성 파단을 방지하고 소성변형능력을 극대화 시킨 에너지 흡수형 볼트의 인장성능 실험 및 해석에 관한 연구 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 볼트의 핀부와 나사부를 각각 모델링하여 유한요소해석을 수행한 결과 핀부 및 나사부에 집중되어 있던 응력이 감소된 축부 단면을 따라 고르게 분포되는 것으로 미루어 축부의 단면을 감소시킴으로써 취성과파단의 가능성을 줄일 수 있을 것이라 판단된다.
2. 에너지흡수형 볼트에 대한 구조성능실험결과, M20 볼트는 핀부를 22mm로 하고 감소축부를 18mm이하로 설계하고, M24 볼트는 핀부를 26mm로 하고 감소축부를 22mm이하로 설계하면 내력 및 강성의 저하 없이 변형능력의 극대화가 가능하다.
3. 핀부의 단면 증가가 없는 실험체 보다 핀부의 단면이 증가된 실험체가 내력의 저하없이 변형능력이 향상된 것을 알 수 있었으며 이로써, 축부 단면 감소와 핀부 단면 증가가 함께 고려된 에너지흡수형볼트가 일반 고력 볼트에 비해 소성변형능력이 개선되었다고 판단된다.
4. 유한요소해석 결과와 구조성능실험 결과는 비교적 일치한 것으로 보아 유한요소해석이 선행으로 다양한 실험 변수 설정 및 영향인자 도출이 가능하다고 판단된다.

#### 감사의 글

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

#### 참고문헌

1. Kenneth C. Naslund, 'Space Frame Structures', AISC Engineering Journal, Oct., 1964.
2. 김승구, 이승재, 오상훈, 강창훈, 고변형성능 고력볼트의 접합부 내진성능에 관한 연구, 한국강구조학회학술발표논문집,
3. 김승구, 이승재, 오상훈, 강창훈, 고력볼트의 변형능력을 향상시킨 강구조 보-기둥 접합부 제안, 한국강구조학회학술발표논문집
4. 박현숙, 이승재, 오상훈, 강창훈, 이성민, 축부 절삭가공형 고력볼트의 강도 및 변형성능에 관한 연구, 한국강구조학회학술발표논문집,