地下鐵 電動車 構造強度에 관한 硏究

—第2報 實驗結果 및 考察—

廉永夏 · 申永琦 · 趙宣彙 · 李長茂 · 李敎一
〈서울大學校 · 工科大學〉

3. 實驗裝置 및 方法

1. 實驗機器

本 實驗에는 車體를 試驗하는 데 使用한 特殊裝置 등은 設計하여 製作하였고, 또한 計測에 使用한 計測用機器등은 서울大學校 工科大學에 있는 것과 H社가 導入한 스트레인 게이지 裝備 등을 試驗目的에 따라 附屬品을 만들어 活用하였다. 荷重 calibration은 Amsler standard calbration box (50ton)을 使用하여 표7과 같이 교정표를 작성하여 이것으로 하중을 측정하였다.

표 7 하중보정자료

만능시험기 (톤)	오일 잭(톤)		보정치	
			만능시험기	오일잭
25	28	28.5	25 ton	28 ton
30	33.5	34.0	50 ton	57 ton
35	39.0	40.0		
40	45	45.0	75 ton	86 ton
45	51.5	51.5	90 ton	103 ton
50	57	57.0		

1.1. 試驗裝置

本 實驗에 사용한 各種의 實驗 裝置와 機器는 다음과 같다.

1. 垂直荷重 벤딩 裝置 ; 1 unit
2. 車端 壓縮試驗裝置(assembly) ; 1 unit
3. 비틀림 荷重裝置 ; 1 unit
4. 벤딩 振動裝置 ; 1 unit
5. Universal tester(100 ton capacity) for oil jack calibration ; 1 unit
6. 비틀림(torsional) 振動裝置 ; 1 unit
7. 萬能試驗機(10 ton) ; 1 unit
8. Amsler standard load box ; 1 unit

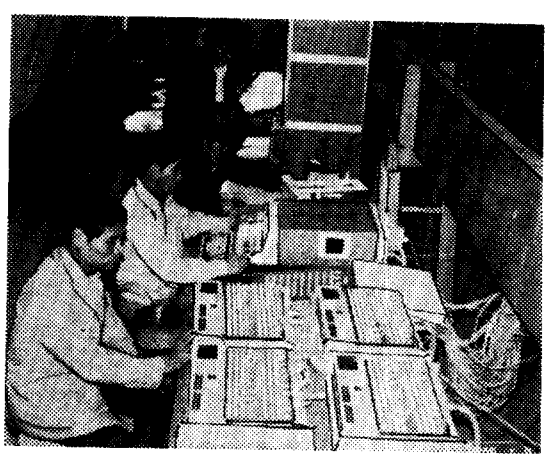

그림 12 Static strain instrumentation of digital strain indicator and balancing channel.

1.2. 計測用機器

1. Universal Digital Strain Measuring System UCAM-8A Model (Kyowa Co.) ; 1 set
2. Universal Scanning Switching box, Model USB-20 A 20 point ; 4 unit
3. Dynamic Strain Amplifier (6-channel) ; 1 unit
4. Rapicorder Strain Recorder (6-channel) ; 1 unit
5. Switching and Balancing unit(24 R) ; 2 unit
6. Switching and Balancing unit(25 channel) ; 1 ea
7. Balancing box (12 channel) ; 2 ea
8. Hydrauic pump and oil jack. Model Dualmaster, Hydraulic pump Model B ; 1 unit

2. 實驗方法

2.1. 加壓用 油壓잭의 荷重檢定

組立된 車體 試驗에 앞서 荷重測定에 사용할 油壓잭의 特性을 檢定하였다. 萬能材料試驗機에서 calibration 하고, 90 ton, 75 ton, 50 ton, 25 ton 등의 各 油壓 Jack scale에 calibrated scale을 만들어 사용하였다.

2.2. 車體의 벤딩 試驗 및 壓縮試驗

(1) 車體의 壓力測定 스트레인게이지 附着位置

시험할 車體에 대한 應力集中과 熔接構造의 特性을 檢討하기 위하여 應力測定할 스트레인 게이지와 變位를 측정할 다이얼 게이지의 附着位置를 정하는 것이 중요한 일이다.

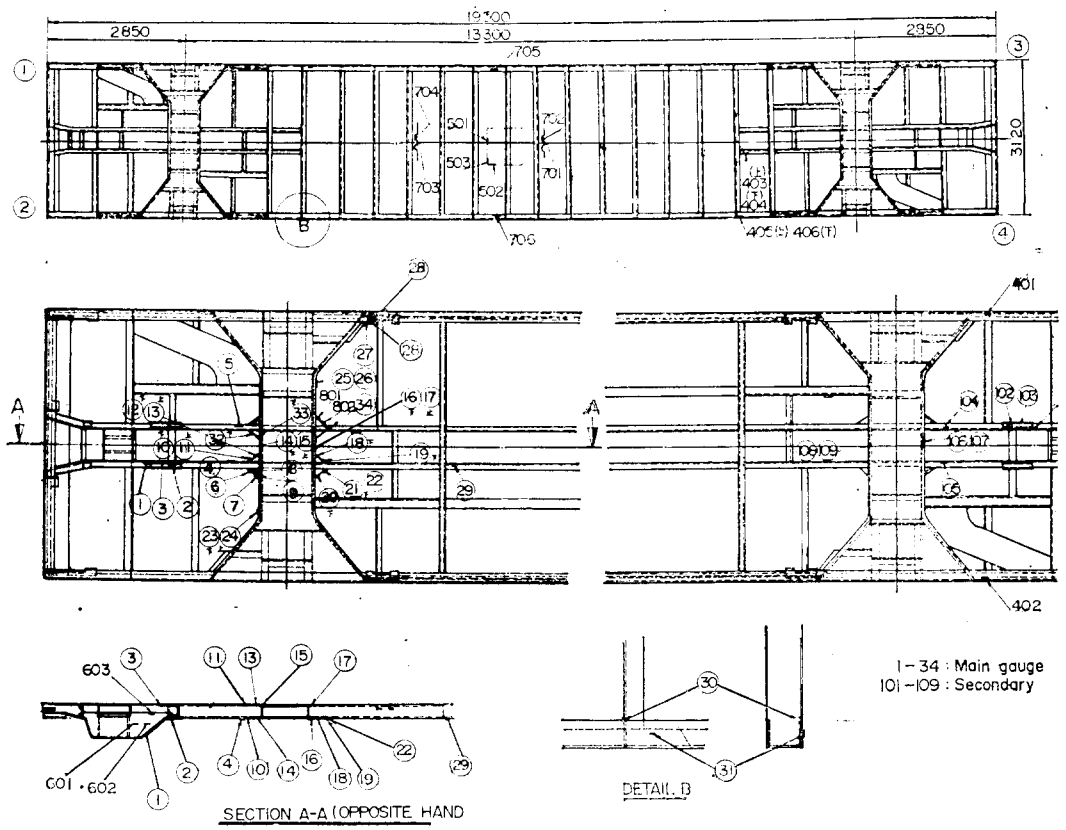

그림 13 Strain gage location of under frame.

그림 13은 車體의 under frame에 부착한 main strain gage No. 1~No. 34에서 secondary gage No. 101~109, 右側 under frame의 下部側에 gage No. 401~406까지, 그리고 under frame中央部位에 스트레인 게이지 No. 501~No. 503까지의 52點의 位置와 方向을 표시한다. 그림 13의 數字들은 스트레인 게이지 附着番號를 표시하며, 부착된 場所는 組立된 車體의 下部이다. 車體中心에서 左右가 대체로 對稱에 가까우므로 左半部를 集中的으로 측정하였다.

車體의 under frame의 應力은 bolster下部位置에 集中되어 있으며, 특히 bolster stiffener 部分에 스트레인 게이지를 많이 부착하였다.

그림 14는 車體의 roof와 side frame의 스트레인 게이지는 左側에 No. 201~206 그리고 右側에 No. 301~319까지 79點의 附着位置들을 표시한다. 그림 14의 side frame에 부착된 스트레인 게이지位置는 bogie truck中心線上部의 車體橫斷集面에 中附着되어 있고, 이 외에 또한 side frame에서는 出入口門의 角部의 應力을 측정하기 위해 No. 247~254, 301~307, 그리고 window side의 應力集中을 측정하기 위하여 No. 218~246와 308~319까지의 많은 게이지들이 부착되었다.

(2) 車體 變位測定 다이얼 게이지位置

굽힘荷重 및 압축荷重에 대한 車體의 變位를 측정하기 위하여 上下 및 左右方向에 17개의 dial indicator의 設置位置를 定하고, 附着하였다. 다이얼 게이지는 側梁에 설치하고, 番號 ①은 左側, ②는 다이얼 게이지 上部 車體上下 方向, 그리고 길이 方向中央線에 다이얼 게이지 ③, ④, ⑤ 3개를 설치하였다. ①~⑦의 각 다이얼 게이지들은 垂直 굽힘荷重에 따른 deflection 變位를 측정할 수 있도록 제작한 特殊固定具에 설치하여 사용하였다. 附着한 다이얼 게이지와 後

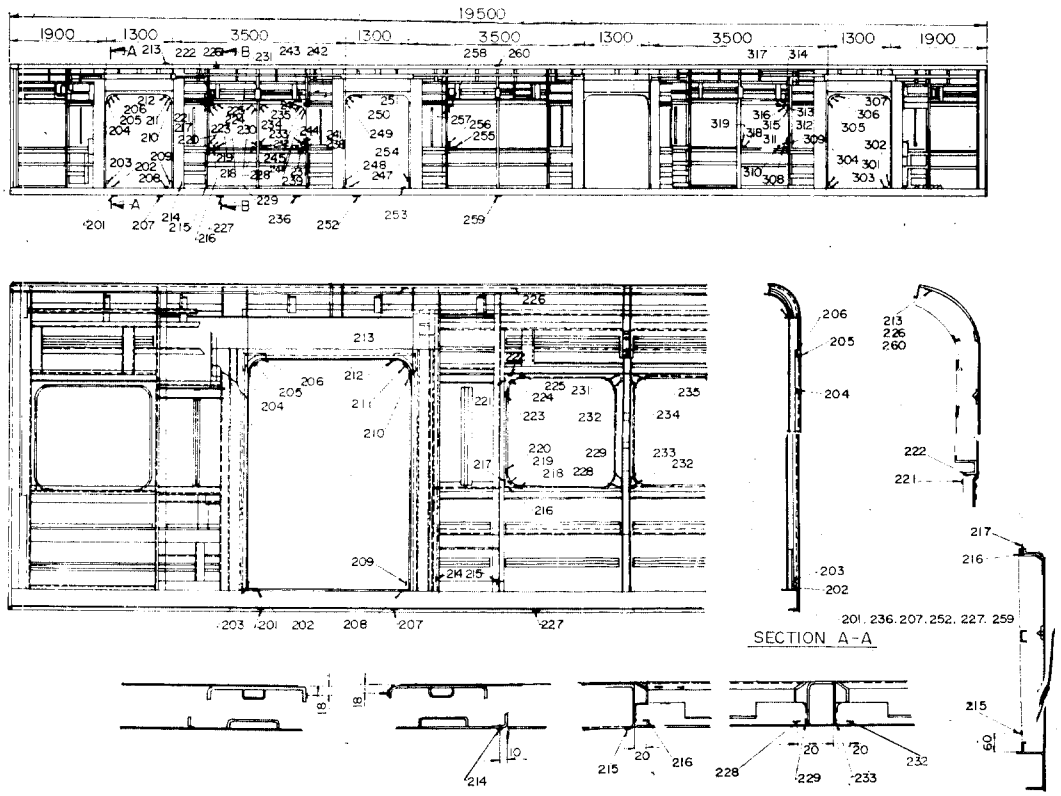

그림 14 Strain gage location in car side frame.

도 對稱位置에 設置하였다.

(3) 車體의 벤딩 및 壓縮荷重

本 實驗에서 굽힘荷重에는 20 kg의 sand bag을 사용하였다. sand bag은 均等分布荷重으로 하기 위하여 20 mm 두께의 4 ft×8 ft의 合板을 frame 上部의 floor에 깔고, 그 위에 荷重配置位置를 표시하였다. 그리고 굽힘 하중은 0~36 ton까지의 사이에서 4段階로 加荷(load-ing)하고 段階的으로 減荷하였다.

한편 滿員時의 垂直荷重은 표 8과 같다.

표 8 垂直荷重試驗의 根據値

車種	空車重量 a kg	台車重量 b kg	乘客荷重 c kg	合計 (a−b)+c	備考
M_1, M_2	40,500	15,540	25,000	49,600	≒1.4×36ton
MC_1, MC	41,500	15,540	25,000	50,960	

벤딩試驗荷重은 36 ton으로 하고, 最大設計荷重(50 ton)의 換算値는 50/36=1.4로 算出하여 M_1 車에 대한 車體試驗을 하였다.

Bending loading에 sand bag 使用하였다. 車端壓縮試驗에는 100 ton 油壓 잭을 사용하였으며, 壓縮荷重은 다음 4段으로 하였다.

0⇄12.5 ton⇄25 ton⇄37.5 ton⇄50 ton

이와 더불어 벤딩荷重 및 壓縮荷重時의 各段階에 대한 車體의 變化를 dial gage를 使用하여 測定하였다.

2.3. 車體 비틀림 및 벤딩振動測定

前述한 車體 비틀림裝置를 사용하여 비틀림荷重 4 ton-m의 torque에 따른 應力을 測定하였고, 또한 振動測定은 車體의 굽힘하중(1ton)에 대하여 振動加速度計를 사용하였다.

4. 實驗結果 및 考察

1. 車體의 under frame의 强度

1.1. Under frame의 實測應力과 應力計算値 檢討

표 9은 實測應力을 合成한 車體의 벤딩 壓縮應力合成値를 表示한다.

Center sill의 計算應力을 보면 그림 3의 各斷面에서 얻은 應力은 표 9과 같다. 표 9에서 stress level이 10.0 kg/mm² 以上 되는 것은 벤딩應力에서 E(upper), 合成應力値에서 A(lower), B(lower), C(upper) 等 4個所에서 5個가 있고, 그 中 stress level이 12.6kg/mm² 以上 되는 것이 2個所가 있었으나 補强으로 許容範圍에 들어갔다.

표 9 車體의 벤딩 및 壓縮應力의 合成應力値

Gage No.	Measure stress: Bending load 36 ton V	Measure stress: Compression load 50 ton(under 20 ton bending) C	Measure stress: Torsion load 4 ton-m	Calculated stress: $V'\fallingdotseq 1.4V$	Calculated stress: Combined stress $V'+C$
2	−0.09	−8.25	−0.20	−0.126	−8.124
4	−3.21	−3.50	0.14	−4.494	−7.994
5	−3.15	−4.04	0.00	−4.410	−8.450
6	−2.37	−5.27	0.08	−3.318	−8.588
7	−1.03	−4.05	0.00	−1.442	−5.492
8	1.84	−8.34	0.14	2.576	−5.764
9	0.97	−4.63	0.06	1.358	−3.272
10	−3.43	−0.49	−0.14	−4.802	−5.292
11	2.01	−6.53	−0.25	2.814	−3.716
12	−1.29	−2.65	0.00	−1.806	−4.456
13	1.25	−4.51	0.00	1.750	−2.760
14	0.99	−5.44	0.03	1.386	−4.054
17	−0.96	5.71	0.00	−1.344	4.366
18	−2.40	−0.51	−0.06	−3.360	−3.87
19	−4.68	−2.37	−0.06	−6.552	−8.922

(註) 應力 작은 No.는 除去하였다.

No.	V	C	T	V′	V′+C′
21	−4.27	0.38	0.81	−5.978	−5.598
22	−6.35	−2.20	0.08	−8.890	−11.09
26	1.20	1.48	−0.39	1.680	3.160
31	3.27	−5.39	0.36	4.578	−0.812
32	−3.04	0.01	0.11	−4.256	−4.246
33	−1.53	−1.10	0.11	−2.142	−3.242
34	−6.24	−3.49	−0.03	−8.736	12.226
101	0.71	−3.45	0.34	0.994	−2.456
102	0.10	−8.94	0.45	0.140	−8.80
104	−3.53	−3.07	−0.28	−4.942	−8.012
105	−3.21	−3.79	0.06	−4.494	−8.284
106	0.41	−4.46	0.17	0.574	−3.886
109	−0.40	5.75	−0.11	−0.560	5.190
209	−4.89	0.87	−0.06	−6.846	−5.976
218	3.16	−1.19	−0.14	4.424	3.234
219	8.77	−2.67	−0.06	12.278	9.608
220	3.17	−0.61	0.28	4.438	3.828
223	−2.19	1.07	0.00	−3.066	−1.996
224	−9.50	1.67	0.39	−13.300	−11.630
225	−3.59	0.93	0.20	−5.026	−4.096
227	−0.15	−3.49	0.25	−0.210	−3.700
233	2.20	−0.15	−0.17	3.080	2.930
238	3.16	−0.93	−0.39	4.424	3.494
239	−4.30	−0.63	2.24	−6.020	−6.650
240	−6.54	−1.01	0.45	−9.156	−10.166
241	−2.42	−0.69	0.22	−3.388	−4.078
244	2.63		−0.11	3.682	3.562

No.	V	C	T	V′	V′+C′
245	4.92	−0.28	−0.20	6.888	6.608
247	4.03	−7.25	0.17	5.642	−1.608
248	1.55	2.59	−0.31	2.170	4.760
251	−1.77	−0.73	−0.08	−2.478	3.208
252	−0.05	−5.20	−0.42	−0.070	−5.270
253	0.51	−5.45	0.39	0.714	−4.736
254	1.43	2.59	−0.39	2.002	4.592
302	−2.75	0.04	1.52	−3.850	−3.81
304	−7.37	2.39	0.34	−10.318	7.928
310	2.84	−0.77	0.17	3.967	3.206
311	8.07	−1.07	1.04	11.298	10.228
312	2.82	−0.75	0.11	3.948	3.198
315	−2.84	0.43	−0.45	−3.976	−3.546
316	−5.46	0.66	−0.28	−7.644	−6.984
403	−3.36	−0.05	−0.14	−4.704	−4.754
501	−3.16	0.39	0.00	−4.424	−4.034
502	−3.72	2.72	−3.33	−5.208	−2.487

1.2. Under frame의 實測應力

(1) Center sill의 應力

地下鐵 第2號線(No. 2 line) 電動客車의 center sill을 그림 15에서 보면 coupler box 前後의 斷面이 急變하는 A補强(左側)과 B補强(右側)이 圖面에 明示되어 있다. 이 部分은 從來 輕量化客車에서 脆弱部로서 指摘되었으므로 試驗前에 補强이 完了되었다.

그림 15은 center sill의 strain gage position

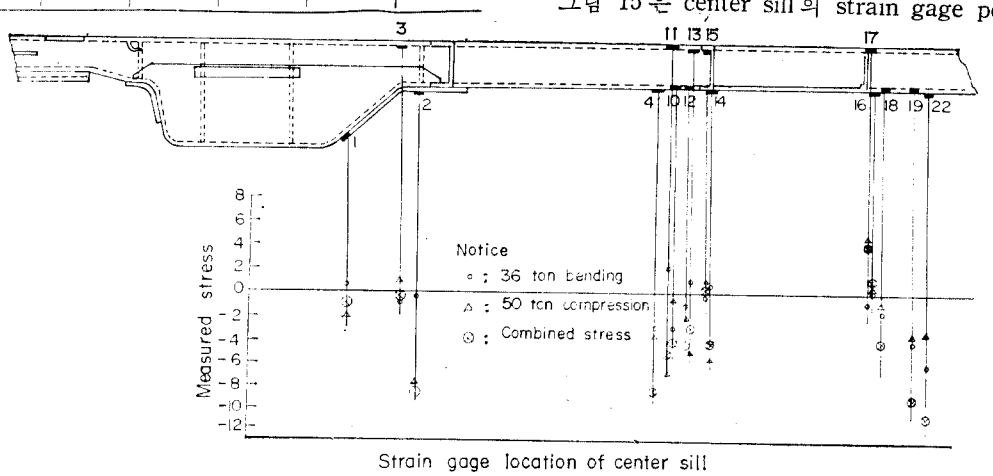

그림 15 Measured stress of center sill.

과 stress level을 表示한다. center sill 10 kg/mm²以上의 가장 큰 應力은 gage point No. 22 (−11.09kg/mm²)이고, 그 다음이 No. 19(−8.92 kg/mm²), No. 5, No. 2 No. 4等이 있으나, 어느 것이나 stress level 10 kg/mm² 以下이며, 또한 車體右側의 center sill 應力 No. 106, No. 105 等이 10 kg/mm² 以下이다. 限界應力値인 12.6 kg/mm² 以下의 값을 나타내고 있다.

(2) Body bolster의 實測應力

Body bolster에는 많은 스트레인 게이지를 붙쳤다. body bolster에는 center sill보다 높은 應力値게이지 No. 34(12.22 kg/mm²) No. 22(−11.09kg/mm²)가 있으나, 大部分이 10 kg/mm² 以下의 stress level으로 나타났다. 이들 높은 應力値들은 中心部에서 測定되었다.

1.3. 理論的 計算應力과 測定應力

强度計算應力과 스트레인 게이지에서 實測된 應力換算値와 비교한 값을 검토하기로 한다.

1) Center sill의 B位置 下部의 應力 計算値 −15.01 kg/mm²을 측정한 게이지 No. 2의 값은 −8.12 kg/mm²으로서 測定値가 작은 값을 보이고 있다.

2) Center sill의 C位置의 應力 중에는 計算된 stress level이 10 kg/mm² 이상 되는 部位는 −17.76kg/mm²(C 上), 1個所가 있으나 實側에서는 −8.45 kg/mm²로 나타났다.

3) Body bolster의 ①斷面 C部位의 計算應力이 높은 값 −19.20 kg/mm²이고, 實測應力은 11.09kg/mm²으로서 實測値가 計算値보다 작다.

以上의 結果로부터 計算應力은 12.6 kg/mm² 以上되는 것이 있으나 實測應力에서는 12.6kg/mm²以上 되는 것이 없어 試驗條件으로 보아 under frame의 center sill과 body bolster의 應力은 許容範圍에 있다고 解析되었다.

1.4. Side frame의 實測應力分析

Side frame의 應力은 표 9에 車體合成應力値에 表示하였다.

(1) Side frame의 出入口의 應力

Side frame에서 出入口는 第 1, 第 2 및 第 3 門의 應力을 測定하였다. 여기서 3 kg/mm²以上되는 合成應力値를 보면 實測値가 −5.97 kg/mm² 및 −7.92 kg/mm²의 큰 값이 出入口下部에서 發生하였다. 出入口 門部位에서는 一般으로 上部側보다 下部側에서 큰 應力이 發生하였다. 그러나 12.6 kg/mm²를 超過한 높은 應力은 없었다. 그리고 合成應力을 보면 出入口門에서는 壓縮應力이 作用하고 있음을 볼 수 있다.

(2) Window side의 應力値

Side frame의 窓側應力을 보면 出入口 側應力보다 높은 應力値를 보이고 있다. 그리고 窓側의 下部보다는 上部가 더욱 큰 應力値를 보였다. 窓側에서 應力値가 最大部位는 게이지 No. 244이며 stress level은 −11.63kg/mm²를 나타내었다.

(3) Side frame의 上下側의 應力

Side frame의 上側에 붙인 게이지 No. 213, No. 226 및 No. 260 等의 應力을 보면 가장 큰 것이 −2.708kg/mm²(No. 260)이고, 나머지는 이보다 훨씬 작았다. 그러나 side frame의 下側의 應力을 보면 上側보다 stress level이 一般的으로 크고, 4 kg/mm²을 超過한 것으로 −5.13 kg/mm²(No. 252) 等이 있다.

2. 車體의 剪斷 및 벤딩모우멘트

車體試驗은 36 ton에서 하고 實際設計最大荷量은 50톤이므로 本 計算에서는 36톤×1.4=50.4톤에 대하여 실시하고, 이것에 대한 車體의 shearing force 및 벤딩 모우멘트를 垂直荷重의 경우로 表示하면 그림 16과 같다.

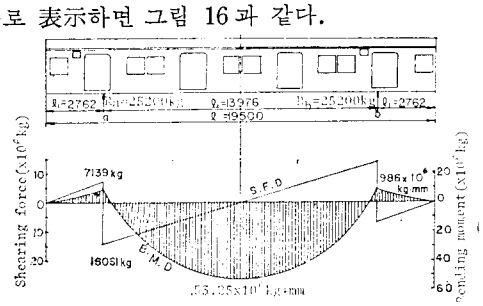

그림 16 Shearing force and bending moment diagram of car body at 50.4ton vertical load test.

3. 相當 굽힘 剛性(equivalent bending rigidity)과 固有振動數

3.1. 相當 굽힘 剛性

車體는 各 部材에 생기는 應力들이 許容範圍에 있으면 强度로서 충분하여도 어느 정도 이상의 剛性이 없으면 走行 중에 振動이 유발되기 쉽고, 또한 乘車安樂性(riding comfort)을 나쁘게 하든가, 共振을 일으킬 때에는 反復疲勞에 따른 破損의 원인이 되기도 한다. 그러므로 가장 큰 문제가 되는 것은 垂直方向의 벤딩에 따른 굽힘 剛性으로서, 그 값은 靜的 荷重試驗에서 實際的인 車體의 剛性은 bolster 上部에서 支持되고 있는 beam이 simple beam의 狀態이고, 均等分布荷重을 받은 경우로 假定하여 車體中央部의 變位에 對한 deflection으로부터 相當굽힘剛性(EI)를 구하는 式은 다음과 같다.

$$EI=\frac{wl_2}{384\delta}\times(5l_2^2-24l_1^2) \tag{4}$$

여기서 EI : 相當 굽힘 剛性(bending rigidity), w : 單位 길이 當의 荷重(kg/mm), l_1 : 突出部의 길이(mm), l_2 : bolster 中心間의 距離(mm), δ : 車體中央部의 變位(mm),

(1) 計算에 따른 相當 굽힘 剛性

本 硏究에서 數式化한 側構造强度解析에 따른 컴퓨터 計算의 垂直方向 變位 $\bar{y}$를 구하여 이를 使用하였다. 여기서 計算 荷重을 $W=50.4$ ton으로 하고, 이 때 均等 分布荷重 w는 다음과 같다.

$w=\frac{W}{l}=2.58$(kg/mm), $l_1=2,762$(mm), $l_2=13,976$(mm), $\delta=7.29$(mm) (computer 計算値)

따라서 $EI=\frac{wl_2^2}{384\delta}(5l_2^2-24l_1^2)$에 위의 값을 넣으면

$$=\frac{2.58\times(13,976)^2}{384\times7.29}\{5\times(13,976)^2-24\times(2,762)^2\}$$

$$EI=1.43\times10^{14}\text{kg-mm}^2 \tag{5}$$

(2) 測定에 따른 相當 굽힘 剛性

굽힘荷重 $W=50.4$ ton일 경우에

$w=\frac{W}{l}=\frac{50,400}{19,500}=2.58$(kg/mm),

$l_1=2,762$(mm), $l_2=13,976$(mm) $\delta=7.4$(mm)(50.4 ton 垂直荷重의 車體中央의 變位量)

(4) 式에서 $EI=\frac{2.58\times(13,976)^2}{384\times7.4}\times\{5\times(13,976)^2-24\times(2,762)^2\}$

$$EI=1.41\times10^{14}\text{kg-mm}^2 \tag{6}$$

實測値와 計算値差가 極히 적었고 한편 1975年 도입된 서울 地下鐵 第1號線의 測定벤딩 剛性値 1.34×10^{14}kg-mm²에 比하여 本 硏究의 實驗値는 5% 큰 값을 보이고 있다.

3.2. 車體의 上下方向 벤딩 振動數

(1) 車體의 固有振動數의 計算

車體의 振動式은 다음과 같다.

$$f=\frac{\pi}{2l_2^2}\sqrt{\frac{EI\times g}{w\left\{1+\frac{\pi^2}{6}\left(\frac{2l_1}{l_2}\right)^2\right\}}} \tag{7}$$

여기서, $EI=1.43\times10^{14}$kg-mm², $l_1=2,762$mm, $l_2=13,976$ mm, $g=9,800$ mm/sec²

$w^1=\frac{50,400}{19,500}=2.58$kg/mm(滿員時의 경우)

$w_2=\frac{25,400}{19,500}=1.30$kg/mm(鋼體만의 경우)

計算 結果로부터 얻는 車體 벤딩 固有振動數는 다음과 같다.

$f_1=5.3$cps 滿員時 $f_2=8.5$cps 鋼體만

(2) 實測 EI値로부터 計算한 固有振動數

$EI=1.41\times10^{14}$ kg/mm²(實測値使用計算), $l_1=2,762$ mm, $l_2=13,976$ mm, $w_2=1.3$ kg/mm(鋼體荷重) $g=9,800$mm/sec², $w_1=2.58$kg/mm(滿員時)

$$f=\frac{\pi}{2\times(13,976)^2}\times\sqrt{\frac{1.41\times10^{14}\times9,800}{w\times\left\{1+\frac{\pi^2}{6}\left(\frac{2\times2,762}{13,976}\right)^3\right\}}}$$

$f_1=5.6$cps 滿員時의 振動數,

$f_2=9.5$cps 鋼體만의 振動數

여기서, 振動數 (1) 경우의 計算値와 (2)경우의 計算値의 差異는 EI의 값에 따른 差로 생긴 것이다.

(3) 固有振動 測定値로부터 얻은 振動數

實測된 鋼體의 振動數는 10.4 cycle/sec의 값을 보여준다. 이 값들은 鋼體의 實測된 벤딩 荷重變位(bending deflection)에 따른 振動數計算値인 9.5 cycle/sec보다 약간 큰 값이며 理論的인 side frame의 構造强度의 計算에서 컴퓨터 計算에 따른 鋼體의 벤딩 變位의 振動數 8.5 cycle/sec보다 더욱 큰 값을 나타내고 있다. 한편 測定된 벤딩 固有振動數 10.4 cps는 1975年 導入된 日本 Hitachi Co.의 서울 地下鐵 第1號線의 벤딩振動數 10.1 cps와 잘 一致하고 있음을 알 수 있다.

5. 總 括

本 硏究에서는 서울首都圈 第2號線의 電動客車에 對하여 車體의 理論的인 構造强度를 解析하고 이에 對한 實驗方法에 스트레인 게이지를 使用한 應力解析을 通하여 車體의 强度, 變位, 振動을 測定하고 評價한 結果 等을 總括하면 다음과 같다.

1. 車體의 構造强度

1.1. 車體 under frame의 應力

(1) 車體의 under frame에서 center sill의 理論的 强度計算에서 合成된 stress level—17.7 kg/mm²(D 斷面上側)과 −15.01 kg/mm²(B面下側)等 2個所의 應力値가 12.6 kg/mm²를 超過하였으나, 實測된 合成應力値는 −8.28 km/mm²(No. 105) 및 −8.12 kg/mm²(No. 2)로 되어 許容範圍內에 있었다.

(2) Body bolster의 경우에 計算應力中에 垂直荷重과 水平荷重에 대한 應力을 比較하면, 水平荷重에 대한 應力値가 約 2倍의 높은 값을 나타내었다.

그리고 複合合成應力은 section①의 B와 C部位에서 計算上으로 最高値 ±19.20 kg/mm²를 내었고, section ②에서는 最高値가 ±4.79 kg/mm²에 不過하였다.

그러고 body bolster의 實測應力은 가장 큰 應力値가 12.22 kg/mm²(gage No. 34), −11.09 kg/mm²(gage No. 22) 等이 있으나, 大部分이 stress level이 10 kg/mm² 以下로서 나타나 安全範圍에 있다고 評價되었다.

(3) 外國의 경우(日本資料)에도 under frame의 center sill 및 body bolster의 計算應力이 15~21 kg/mm²되는 實例들이 있고, 또한 strain gage 實測値가 許容 12.6 kg/mm² 以內에 있을 때에는 安全한 것으로 評價되어 왔다. 그러나 實測應力이 許容値를 超過하였을 때에는 補强溶接 또는 斷面增加로 許容値의 減少를 期하고 있으나, 本實驗의 경우 under frame에서 許容値를 超過한 것은 나타나지 않았다.

(4) 地下鐵 第1號線電動客車 under frame의 强度와 第2號線客車 under frame의 强度를 比較하면 第1號線에서는 under frame에서 合成應力値가 第1次試驗에서 實測應力이 12.6 kg/mm²를 超過한 것이 10個所였고, 第1次에서부터 第4次補强을 通하여 實測應力이 減少되었다. 그러나 第2號線 under frame에서는 實測前에 設計에서 補强된 center sill 斷面變形部 2個所가 있는 狀態에서 實驗한 結果는 前述한 바와 같이 stress level이 全部 12.6 kg/mm² 以下로 되어 補强作業이 없었다. 그 理由는

(a) 設計改善에서 따른 것인지

(b) 第2號線 車體의 under frame은 日本에서 導入된 材料를 使用한 것이지, 또한 技術導入에 따른 技術向上에 起因되는 것인지

(c) 上記 (a)와 (b)의 併合된 效果인지

等에 대한 結論은 速斷할 수 없으나, 國內製作 電動車의 發展으로 評價되었다.

1.2. Side frame의 應力

(1) Side frame의 應力解析에서 Rahmen girder의 撓角法을 사용하는 것이 慣例로 되어 이에 대한 解法을 설명하였다. 이 방법은 15元 1

次聯立方程式을 풀어야 하므로 컴퓨터를 사용해야 한다. 旣往에 컴퓨터를 사용한다면 매트릭스 構造解法이 더욱 간단하고 편리하여 KAIST가 保有하고 있는 SAP Ⅳ를 使用하여 side frame의 强度를 計算하였다.

(3) Side frame의 應力을 컴퓨터로 計算한 것과 第2號線電動車의 强度計算應力을 보면 最高應力價値는 bolster 支持點 上部右側 出入口部에 各各 나타나 있다.

計算應力에서 第1出入口 bolster 支持部에서 가장 큰 應力은 9.46 kg/mm² 및 −8.89 kg/mm²으로, 第2出入口下部에서는 引張應力 8.71 kg/mm²의 값을 보였으나, 어느 것이다 計算値 및 實測値가 應力 10 kg/mm²를 超過하는 것은 없었다.

(4) Side frame에서 從來 stress level이 높은 값이 出入口 또는 window corner 等에서 나타난 實例들이 있다. 第2號線 電動客車의 計算應力이 가장 높은 것은 第1出入口의 下部에서 −10.19 kg/mm² 및 7.97 kg/mm²이였으나, 實測應力이 −5.976 kg/mm²이다. 第2出入口에서는 計算應力이 6.67 kg/mm²이고, 實測應力이 4.76 kg/mm²의 값을 보이고 있다.

(5) Window side의 應力을 檢討하면 第2窓角部에서 가장 큰 應力이 6.67 kg/mm² 第3窓에서는 −4.82 kg/mm²를 나타내고 있으나 實測應力은 第2窓 左上角部에서 −11.63kg/mm², 그리고 左側 下部에서 9.6 kg/mm²의 높은 應力이 測定되었으나, 第3窓部에서는 가장 큰 實測値가 6.6kg/mm², 그리고 第4窓部에서는 2.67 kg/mm²의 應力이 測定되었다. 그러나 第7窓에서는 10.22 kg/mm² 및 −6.98kg/mm²가 測定되어 第7窓의 stress level이 窓側應力中에서는 가장 큰 값을 보였다.

(6) 위와 같은 side frame의 出入口 및 窓側의 計算 및 實測應力値로 12.6 kg/mm²를 超過한 것이 없어 side frame의 各部位가 許容應力範圍에 드러갔으나, window side에서는 計算値보다 實測應力値가 比較的 stress level이 큰 값이 많이 나왔다.

(7) 1975年 固定編成客車(1975年)에서는 window corner stress를 補强하였고, 또한 1976年 地下鐵 第1號線의 window corner에서는 窓側應力이 12.6 kg/mm²를 超過한 것이 4個所에서 發生되어 window corner의 半徑을 크게 하고, 補强板을 grinder finishing으로 補完하여 許容範圍에 들어 갔으나, 本 實驗에서는 第1次 試驗에서 모두 許容範圍에 들어갔다.

1.3. 車體 벤딩모우멘트, 變位, 剛性 및 振動

(1) 벤딩 모우멘트는 中央部에서는 最大値 38.10×10^{6} kg/mm이고, 剪斷强度는 左右側의 bolster 上部 中央에서 最大値 ±12,900 kg가 車體에 作用하였다.

(2) 벤딩 및 壓縮에 對한 中央部의 deflection은 벤딩 荷重 36 ton에서 7.36 mm이고, 壓縮荷重 50 ton에서 −2.9 mm가 實測되었다.

한편 side frame에 對한 컴퓨터 프로그램에서 算出된 上中方向變位는 8.1 mm로서 實測値 7.4 mm보다 0.7 mm크다.

(3) 相當 벤딩 굽힘 剛性은 計算値가 1.29×10^{14} kg/mm²이고, 測定剛性値 1.41×10^{14} kg/mm²이며, 1975年 導入된 서울 地下鐵의 剛性測定値 1.34×10^{14} kg/mm²에 比해 5%의 差를 보이고 있다.

(4) 車體剛體의 上下方向固有振動數의 理論的인 計算値가 7.6 cps이고, 實測된 벤딩 剛性으로부터의 計算値는 9.5 cps이며, 벤딩 固有振動數를 振動加速度로 測定한 값은 10.4 cps이다. 이 測定値는 日本 Hitachi가 測定한 벤딩 固有振動數 10.1 cps와 大略一致되는 값이다.

追 記

(1) 本 硏究는 1980年度 文敎部政策 硏究費의 支援을 받어 遂行하였다. 서울大學校 工科大學은 現代車輛工業(株)과 産學協同으로 進行하였다.

(2) 本 硏究에 特히 積極的으로 協助하여 주신 鄭庸勇 理事 朴允洙次長, 宋光晤次長, 林鐘河課長, 宋基福代理 및 關係部의 여러분들에 勞苦에 깊은 感謝를 드리는 바입니다.

參 考 文 獻

1. 廉永夏外 3人；電動車强度에 관한 硏究, 서울大學校 工科大學附設 生產技術硏究所(1976) p. 1～199. (註) 大宇重工業(株)과 產學協同硏究(서울首都圈 地下鐵 第1號線)
2. 廉永夏外 3人；優等普通客車 强度에 관한 硏究, 서울大學校 工科大學附設 生產技術硏究所(1979), p. 1～103, (現代車輛 (株)과 產學協同硏究)
3. 廉永夏外 3人；冷暖房優等客車强度에 관한 硏究, 서울大學校 工科大學附設 生產技術硏究所(1977), p. 1～116. (大韓造船公社와 產學協同硏究)
4. 廉永夏外 5人；(새마을호 觀光客車) 固定編成客車强度에 관한 硏究, 서울大學校 工科大學 應用科學硏究所(1975) p. 1～78. (大宇重工業(株)과 產學協同硏究)
5. 廉永夏外 4人；國產溶接客車 强度에 관한 硏究, 서울大學校, 工科大學, 應用科硏究所(1974) p. 1～54. (大宇重工業(株)과 產學協同硏究)
6. 廉永夏外 5人；第5次 IBRD 客車强度에 관한 硏究, 서울大學校 工科大學 生產技術硏究所, 大宇重工業 (株)과 產學協同硏究 p. 1～94(1976).
7. 日本鐵道技術硏究所；輕量二軸보오기 三等車 車體荷重試驗報告(Naha 10型) p. 1～22.
8. 日本鐵道技術硏究所；二軸보오기 試驗車(Yasu 34型) 車體荷重試驗報告(1958) p. 1～26.
9. 日立製作所；아르헨티나 國鐵廳 1等客車 報告, 日本車輛技術誌, No. 82(1968) p. 1～11.
10. 日本鐵道技術硏究所；高性能電車(Moha 90型) 性能試驗速報, (1958) p. 88～70.
11. 日本鐵道技術硏究所；TR-50 臺車 靜荷重試驗報告(7-14)(1956) p. 1～20.
12. 日本鐵道技術硏究所；鐵道車輛車體 荷重試驗法 要項(1958) p. 1～14.
18. 日立製作所 車輛報告；서울首都圈 地下鐵 車輛試驗報告(1974)
(1) Load test of car body, p. 1～12.
(2) Strength calculation of under frame p. 1～5.
(8) Calculation of strength for motor car's bogie, p. 1～10.
14. 廉永夏；自動車 Seat 開發에 관한 硏究, 科學技術處, Most-R-70-43 MC. (1970) p. 20～54.
15. 廉永夏；自動車 Seat 性能에 관한 硏究, 大韓機械學會誌, Vol. 11, No. 3, (1971) p. 195～209.
16. 廉永夏；Taper leaf spring에 관한 硏究, 科學技術處, Most Report R-75-11 (1975) p. 1～48.
17. 趙誠鎬·林鎭壁外 3人；貨車(YUMI型)의 脫線係數測定, 鐵道技術硏究報告, Vol. 4, No. 1, (1969) p. 42～5610.
18. 渡邊理；Strain gauge와 그 應用, 日刊工業新聞社(1968) p. 281～256.
19. 林鎭壁 外3人；臺車 應力測定, 鐵道技術硏究報告, Vol. 2, No. 2 (1997) p. 55～66.
20. 應力測定技術硏究會編；應力測定法, 電氣抵抗 스트레인 게이지, 朝倉書店, (1960) p. 1～40.
21. 關東鐵道協會編；車軸折損事故防止 對策資料, (1958) p. 1～40.
22. 大塚誠元；鐵道車輛, 日刊工業新聞社, 發行, p. 15～26, p. 195～280.
23. 多賀祐重；鐵道車輛, 日本鐵道工學會, 發行, p. 184～156.
24. 科學朝日社編；"鐵道車輛의 强度試驗", No.1 (1958) p. 16～20.
25. 冲島喜人；新編鐵道車輛特論, 交友會, (1977).
26. 冲島喜人；列車脫線事故の原因と防止對策, 交友會, (1952).
27. 廉永夏；트럭(truck)車體 構造强度에 관한 硏究, 서울大學校 工科大學附設·生產技術硏究所. p. 190～(1977).
28. 大韓造船公社；冷暖房優等客車强度計算書 p. 1～14, 및 附屬 圖面, (1977) p. 1～20.
29. 現代車輛編；Strength calculaton and center gravity calculation (SMGi#2 E/C) (1980)