

臼齒部 Inlay 修復物에 作用하는 Stress에 關한 光彈性學的 分析

서울大學校 大學院 齒醫學科 補綴學 專攻

(指導教授 張 翼 泰)

金 俊 淵

— 目 次 —

第一章 緒 論
第二章 實驗材料 및 方法
第三章 實驗成績
第四章 總括 및 考察
第五章 結 論
參考文獻
英文抄錄
寫眞附圖

第一章 緒 論

齒科 修復物을 口腔內에 適用할 때 修復物을 支持하는 齒牙와 口腔顎系의 保存을 優先的으로 다루는 것이 齒科補綴學의 思考이다. 즉 修復物을 支持하는 齒牙, 齒根膜, 齒槽骨, 粘膜, 顎骨 및 筋肉等에 咬合力 및 咀嚼力이 作用될 때 各各의 生理的 限界를 넘는 過大한 힘이 傳達되지 않게 함은 勿論이고 힘의 分散을 圖謀하여 各部에 미치는 壓力을 均一하게 되도록 補綴物을 設計하는 것이 매우 重要하다.⁴⁰⁾ 이러한 修復物의 力學的 問題에 關한 研究는 口腔內에서 直接 實驗하는 方法보다 實物과 類似한 模型을 製作하여 口腔外에서 測定, 實驗하는 方法이 많이 利用되어 오고 있다.^{6, 8, 9, 27)} 그 理由는 修復物의 形態는 複雜하고 多樣한 힘을 받고 있기 때문에 口腔內에서 直接 그 壓力을 測定하기란 매우 어렵기 때문이다. 이렇게 實物과 類似한 模型을 製作하여 間接的 方法으로 研究할 때는 그 模型을 實物의 길이, 形態等의 幾何學的인 條件뿐만 아니라, 彈性率과 強度等 物理的 性狀도 可能한 限 實物과 一

致되도록 製作해야 한다. 齒科 修復物에 對한 力學的 研究는 여러 先學들에 依해서 究明되어 왔다.^{1, 3, 5-13, 17-34, 40-43)} 一般的으로 stress 樣相을 實驗的으로 分析하는 主된 方法은 photoelastic stress analysis, brittle lacquer coating technique, electronic strain gauge 등이 있다. 其中 本 實驗에 利用한 photoelastic analysis는 齒科修復物에 外力을 加할 때 肉眼的으로 stress를 받는 部位를 認知할 수 있고, 또 어떤 部位에 stress가 集中되고 分散되는지를 光彈性 模型에서 쉽게 究明할 수 있는 長點이 있다.

Stress에 對한 光彈性學的 分析法은 二次元的 分析法, 三次元的 分析法和 光彈性物質 塗布分析法이 있으며 其中 齒科修復物에 對한 stress의 分析은 主로 二次元的 光彈性 模型分析法에 依해서 이루어지고 있다.^{3, 8, 9, 12, 17-25)} 光彈性 分析法은 1861年 英國의 David Brewster가 stress optical property를 發見한 以後, 1920~1940年代에 工學的 應用的 한 方法으로 experimental stress analysis에 利用되었고 最近에 그 重要性은 더욱 認定되고 있다. 齒科 領域에서는 1935年 Zak¹⁾가 二次元的 分析法으로 齒槽骨內의 矯正力에 關하여 처음으로 研究했으며 그후 Noonan³⁾은 이 方法으로 窩洞의 形態에 關한 力學的 分析을 하였다. 1950年代에 들어와 Castro⁵⁾, Mahler^{8, 9)}, Walton⁷⁾, King⁶⁾, Guard¹⁰⁾ 등은 修復物의 構造의 形態에 따른 stress의 分散樣相을 研究하였으며, 1960年代에 Craig, Peyton¹³⁾이 brittle coating technique을 利用하여 架工義齒에 對한 여러가지 樣相의 stress를 測定하였으며 本 論文이 引用한 인레이에 關한 二次元的인 光彈性 分析法¹⁷⁾이 1967년에 研究되었다. 그 이후 El-Ebrashi等의 二次元的 分析法에 依해 齒冠軸壁의 平行에 關한 研究²⁰⁾, 咬合面 削減

과 pin에 관한 연구와 架工義齒의 構造的 設計와 stress 分析에 관한 연구²³⁾가 光彈性 分析에 依해 이루어졌고, 三次元的²⁴⁾ 또는 光彈性物質 塗布分析法^{25, 26)}을 利用하여 齒科修復物과 類似한 諸模型上에서 stress의 集中 및 分散樣相이 研究되어졌다.^{20-26, 31-34)} 韓國에서는 尹⁴¹⁾, 趙⁴²⁾, 林⁴³⁾의 齒冠補綴物, 架工義齒 및 齒冠補綴物의 隣接邊緣部位에 作用하는 stress에 관한 光彈性學的 分析이 研究되었다.

著者は 二次元的 光彈性學 分析法를 利用하여 臼齒部 인레이 修復物에 作用하는 stress의 分散狀態와 量的 計測을 研究하여 多少의 知見을 얻었기에 그 結果를 報告하는 바이다.

第二章 實驗材料 및 方法

實驗器具로서는 美國 photoelastic 社의 606 circular transmission polariscope(그림 1)을 使用했다.

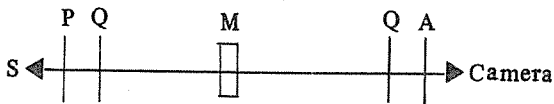


그림 1 Circular transmission polariscope의 配列은 (s) 光源 (p) polarizer (M) 模型部位 (Q) 1/4 wave plates (A) analyzer 로 되어 있다.

이는 光源, polarizer, 1/4 wave plate, 模型部位, 1/4 wave plate, analyzer로서 構成되어 있다. 이 偏光器에서 analyzer와 polarizer가 서로 直角으로 交叉된 軸을 이루면 dark field가 되며, 軸이 平行을 이루면 light field가 된다. 計測의 基準은 dark field가 正數倍의 fringe 順序를 가짐으로, 測定基準으로 利用된다. 二次元的 模型에서 얻어지는 isochromatic fringe는 principal stress의 差($\sigma_1 - \sigma_2$)가 恒數(常數)로써 該當되는 colorful pattern의 帶를 이룬다. (그림 2) 그리고 恒數는 fringe의 順序(N)에 依해서 決定된다. isochromatic fringe의 判讀은 1st fringe 順序는 red와 blue 사이의 뚜렷한 境界線이며 次期의 fringe 順序는 blue color가 消失되고 green color로 代置되는 特徵을 보인다. fringe pattern의 두번째 type은 principal stress의 方向에 關聯되며 isoclinic fringe pattern이라고 부른다. isoclinic fringe는 principal stress (σ_1 과 σ_2)가 一定한 傾斜(角度)를 가진 線으로써 나타난다. isoclinics는 白色光이 交叉된 plane polariscope

Color Observed	Fringe Number (Order)	
	Dark field	Light field
Black		
Yellow		
Red		
* 1st fringe	1	0.5
Blue-Green		
Yellow		
Red		
* 2nd fringe	2	1.5
Green		
Yellow		
Red		
* 3rd fringe	3	2.5
Green		

그림 2 Isochromatic fringe

에 利用될때 (즉 1/4 wave plate의 役割이 無視될 때) isochromatics 과 區別할 수 있고, 이때 isoclinics는 다른 colored pattern(isochromatic fringes) 위에 重疊된 dark bands로써 나타난다. polarizer와 analyzer를 同時에 回轉시킴으로써 principal stress direction이 固定된 參照軸과 恒常 一定한 角을 이루는 isoclinics 혹은 isoclinic이 위치하는 點의 位置를 求할 수 있다.

이러한 isochromatic fringe order (N)와 isoclinic fringe의 變數(parameter)에 依해서 한 點에서의 stress의 量的 計測을 stress analysis의 shear difference method (剪斷應力 算出法)에 따라서 計算한다.

實驗材料로써는 PSM-1(Photolastic社)을 인레이 修復物로 使用했으며, aluminum plate(1/4" 두께)를 齒質로 利用했다. PSM-1 sheet(1/4"×10"×10")를 미리 tracing paper에 그려는 實物形態에서 擴大한 인레이 形態를 製作했다.^{14, 16)} 그 形態는 MOD box type과 slice type으로 製作했다(그림 3, 4). 製作後 PSM-1 sheet에 充分한 冷却水를 주면서 模型用 band saw로써 서서히 切른다.³⁷⁾

Aluminum plate는 正常位置와 23° 傾斜된 位置의 齒牙形態로 製作했다. 즉 MOD slice with flat axio pulpal line angle과 MOD box with rounded axio pulpal line angle의 PSM I 인레이 形態와 各各의 正常位置와 23° 傾斜된 aluminum plate로 된 齒牙模型을 齒科用 硬石膏(Velmix stone, Kerr社)로써 接着

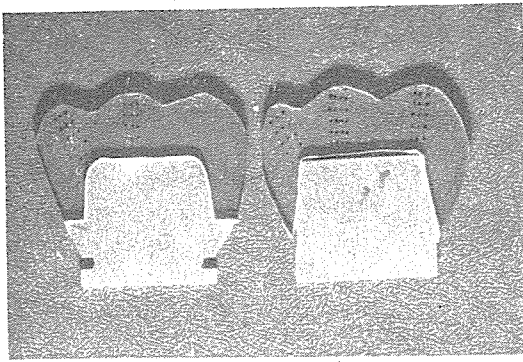


그림 3. 正常位置에서의 完成된 模型

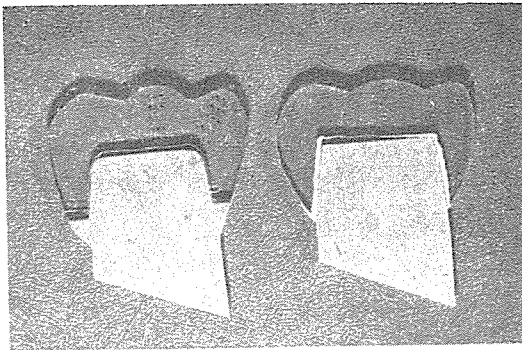


그림 4. 23°傾斜된 位置에서의 完成된 模型

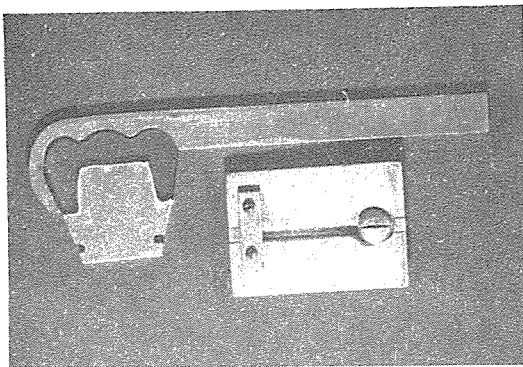


그림 5. Bending moment를 觀察하기 爲한 模型과 aluminum device

시켜 光彈性模型을 完成하였다. 硬化된 後 30分 以上 經過된 後에 100 Lbs의 static load를 定해진 部位에 加했다. (日製 Kyowa self balancing indicator, SLW-220PA를 使用하여 load測定)

計測은 肉眼 및 天然色 寫眞에 依하여 dark field 와 light field의 移行을 通한 100分 比率을 利用하여 fringe order를 求했고, 또 前述한 isoclinic parameter의 數値를 求하여 stress analysis 公式의^{2,4,35}

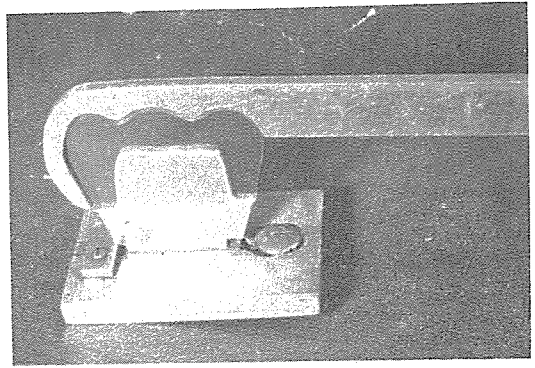


그림 6. Class II lever type의 位置로 固定된 模型

shear difference method (grid method)에 代入 하여 各 點에서의 principal stress(σ_1 과 σ_2)를 求했다. 이때 垂直值인 σ_1 의 값을 plotting하여 stress concentration curve로써 나타내었다.

Bending moment의 效果를 보기爲해서 MOD box 形態의 인레이修復物에 맞는 bending device를 aluminum plate로 製作했다. lever arm의 長이는 loading point로부터 齒牙模型까지 5.5 inches로 하여 Craig 等의 研究結果와 比較 檢討했다. 그리고 荷重時 模型이 들리지 않도록 Class II lever type의 固定裝置를 aluminum plate로 製作했다(그림 6).

第三章 實驗成績

Stress analysis 公式에 依해 principal stress의 差는 $\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{Nf}{h}$ 로 나타내어진다.

N : fringe order

f : stress optical coefficient (PSM-1, 40 psi-inch / fringe)

h : thickness ($\frac{1}{4}$ " standard sheet)

(1) A'B', A''B''를 따라서 A', $x_1, x_2, x_3 \dots$ 點에서의 fringe 數와 θ 를 求하여 shear stress (J_{xy})를 求한다.

$$J_{xy} = -\frac{Nf}{2h} \sin 2\theta$$

(2) ΔJ_{xy} 를 $\frac{A+x_1}{2}, \frac{x_1+x_2}{2}, \dots, \frac{x_2+B}{2}$ 에서 計算한다.

$$\Delta J_{xy} = J_{xy}' - J_{xy}''$$

(3) AB를 따라 $\frac{Nf}{h}$ 와 $\frac{Nf}{h} \cos 2\theta$ 를 計算한다.

(4) AB를 따라 σ_x 를 計算한다.

$$(\sigma_x)_{x_1} = (\sigma_x)A - \Delta \int_{xy} \frac{A+x_1}{2}$$

$$(\sigma_x)_{x_2} = (\sigma_x)_{x_1} - \Delta \int_{xy} \frac{x_1+x_2}{2}$$

$$\vdots$$

$$(\sigma_x)B = (\sigma_x)_{x_9} - \Delta \int_{xy} \frac{x_9+B}{2}$$

$$(\sigma_x)A = -\left(\frac{Nf}{h}\right) \quad x=A \text{點}$$

(5) AB를 따라 σ_y 를 計算한다.

$$\sigma_y = \sigma_x - \frac{Nf}{h} \cos 2\theta$$

(6) σ_1, σ_2 를 計算한다.

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y + \frac{Nf}{h}) \quad \sigma_2 = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y - \frac{Nf}{h})$$

以上과 같은 計算方式으로써 $\overline{AB}, \overline{CD}, \overline{EF}, \overline{GH}$ 에서 다음과 같은 表와 stress concentration curve

Table 1. A'-B'에서의 fringe order와 θ 에 따른 shear stress ($\int_{xy}' = -\frac{Nf}{2h} \sin 2\theta$)를 計算한다.

A'-B'	A'	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	B
N	0	0	0.1	0.5	2	4.3	4.3	1.8	0.3	0.1	0
θ	-6	2	40	47	55	74	-80	-60	-45	-33	15
\int_{xy}'	0	0	-8	-40	-150	-182	118	125	24	7	0

Table 2. A''-B''에서의 fringe order와 θ 에 따른 shear stress ($\int_{xy}'' = -\frac{Nf}{2h} \sin 2\theta$)를 計算한다.

A''-B''	A''	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	B''
N	0	0.1	0.3	1.2	1.9	2.8	2.8	2	0.75	0.25	0
θ	11	35	57	53	68	78	-80	-73	-69	-20	0
\int_{xy}''	0	-8	-22	-92	-106	-91	77	89	40	13	0

Table 3. $\Delta \int_{xy} = \int_{xy}' - \int_{xy}''$

\int_{xy}'	0	-4	-24	-95	-166	-32	122	75	16	4
\int_{xy}''	-4	-15	-57	-99	-99	-7	83	65	27	7
$\Delta \int_{xy}$	4	11	33	4	-67	-25	39	10	-11	-3

를 얻었다. stress concentration curve는 σ_1 (垂直成分)의 數值를 plotting 한 것이다 (Table 1~20) (Graph 1~4) (附圖 1~4). 附圖 5, 6에서의 fringe order의 比較는 Table 21에 圖示되어 있다.

Table 5와 Graph 1(附圖 1)에서 line A-B에 따른 stress의 樣相은 힘을 받는 部位에서 stress가 第一 크고 (-512 psi), 양쪽 끝 部位는 거의 stress가 없었다 (0, 1 psi).

Table 10과 Graph 2(附圖 2)에서 line C-D에 따른 stress의 樣相은 힘을 받는 第一 가까운 部位 C點에서 stress가 가장 많고 (-3040 psi) 齒髓面 近處인 D點에서 第一 적었다 (-221 psi).

Table 15와 Graph 3(附圖 3)에서 line E-F에 따른 stress의 樣相은 E點에서 -2880 psi, F點에서 -90 psi 사이의 分布를 나타냈다.

Table 20과 Graph 4 (附圖 4)에서 line G-H에 따른 stress의 樣相은 G點에서 -2880 psi, H點에서 -800 psi 사이의 分布를 나타냈다.

Table 21에서 各點에서의 fringe order의 比較를 나타냈으며, 이中 line K-L에 따른 stress의 分散 樣相中 L點이 fringe order 8로써 stress 集中이

Table 4. A-B를 따라 $\frac{Nf}{h}$ 와 $\frac{Nf}{h} \cos 2\theta$ 를 計算한다.

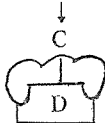
A-B	A	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	B
N	0	0.1	0.3	1	2	3.5	3.5	2	0.5	0.5	0
θ	2	10	45	50	63	76	-80	-70	-55	-25	10
$\frac{Nf}{h}$	0	-16	-48	-160	-320	-560	-560	-320	-80	-80	0
$\frac{Nf}{h} \cos 2\theta$	0	-15	0	28	188	494	526	245	27	51	0

Table 5. A-B를 따라 $\sigma_x \sigma_y$ 를 計算하고, principal stress σ_1, σ_2 를 計算한다.

A-B	A	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	B
$\Delta \gamma_{xy}$		4	11	33	4	-67	-25	39	10	-11	-3
σ_x	0	-4	-15	-48	-52	15	40	1	-9	-2	1
σ_y	0	11	-15	-76	-240	-479	-486	-244	-36	-53	1
$\frac{Nf}{h}$	0	-16	-48	-160	-320	-560	-560	-320	-80	-80	0
σ_1	0	-5	-39	-142	-306	-512	-503	-282	-76	-68	1
σ_2	0	12	9	18	14	48	57	39	18	13	1

Table 6. C'-D'에서의 fringe order와 θ 에 따른 shear stress를 計算한다.

C' - D'	C'	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	D'
N	6	10	6	4.5	4	3.7	3.5
σ	70	52	15	2	0	-3	-5
γ_{xy}'	-309	-1087	-240	-25	0	31	49



24mm (4 mm 等分)

그 部位에 第一 큰 것을 보였다(附圖 5, 6).

Bending moment의 fringe order 相樣도 附圖 7. 8

에 나타나 있고 boundary stress 樣相의 圖式 을

그림 7. 8에 나타냈다.

Table 7. C''-D''에서의 fringe order와 θ 에 따른 shear stress를 計算한다.

C''-D''	C''	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	D''
N	6	10	6.1	4.7	4	3.7	3.5
θ	-80	-37	-15	-11	-8	-7	-5
J_{xy}''	164	769	244	141	88	72	49

Table 8. $\Delta J_{xy} = J_{xy}' - J_{xy}''$

J_{xy}'	-698	-664	-83	-13	16	40
J_{xy}''	467	507	193	115	80	61
ΔJ_{xy}	-1165	-1171	-266	-128	-64	-21

Table 9. C-D를 따라 $\frac{Nf}{h}$ 와 $\frac{Nf}{h} \cos 2\theta$ 를 計算 한다.

C - D	C	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	D
N	19	12	6.3	4.7	4.1	3.7	3.5
θ	0	0	0	0	0	0	0
$\frac{Nh}{h}$	-3040	-1920	-1008	-752	-656	-592	-560
$\frac{Nf}{h} \cos 2\theta$	-3040	-1920	-1008	-752	-656	-592	-560

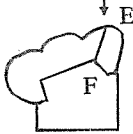
Table 10. C-D를 따라 σ_x, σ_y 를 計算하고, principal stress σ_1, σ_2 를 計算한다.

C-D	C	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	D
ΔJ_{xy}	-1165	-1171	-266	-128	-64	-21	
σ_x	-3040	-1875	-704	-438	-310	-246	-221
$\frac{Nf}{h} \cos 2\theta$	-3040	-1920	-1008	-752	-656	-592	-560
σ_y	0	45	304	314	346	346	335

C-D를 따른 點들의 角이 모두 0° 이며, 따라서 σ_x, σ_y 가 곧 σ_1, σ_2 가 된다.

Table 11. E'-F'에서의 fringe order와 θ 에 따른 shear stress를 計算한다.

E'-F'	E'	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	F'
N	8	9	6	5	4.2	4	3.5
θ	60	47	18	11	6	0	0
J_{xy}'	-554	-718	-282	-150	-70	0	0



22mm (4 mm 等分)

Table 12. E''F''에서의 fringe order와 θ 에 따른 shear stress를 計算한다.

E''-F''	E''	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	F''
N	8	9	6.5	5.3	4.3	3.6	3.7
θ	-75	-50	-17	-7	-3	0	0
J_{xy}''	320	709	291	103	36	0	0

Table 13. $\Delta J_{xy} = J_{xy}' - J_{xy}''$

J_{xy}'	-636	-500	-216	-110	-35	0
J_{xy}''	515	500	197	70	18	0
ΔJ_{xy}	-1151	-1000	-413	-180	-53	0

Table 14. E-F를 따라 $\frac{Nf}{h}$ 와 $\frac{Nf}{h} \cos 2\theta$ 를 計算한다.

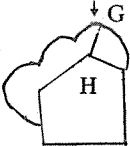
E - F	E	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	F
N	18	10	7	5.3	5	4	4
θ	0	0	3	4	4	5	6
$\frac{Nf}{h}$	-2880	-1600	-1120	-848	-800	-640	-640
$\frac{Nf}{h} \cos 2\theta$	-2880	-1600	-1114	-840	-792	-630	-626

Table 15. E-F를 따라 σ_x, σ_y 를 計算하고, principal stress σ_1, σ_2 를 計算한다.

E - F	E	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	F
ΔJ_{xy}		-1151	-1000	-413	-180	-53	0
σ_x	-2880	-1729	-729	-316	-136	-83	-83
σ_y	0	-129	385	524	656	547	543
$\frac{Nf}{h}$	-2880	-1600	-1120	-848	-800	-640	-640
σ_1	-2880	-1729	-732	-320	-140	-88	-90
σ_2	0	-129	388	528	660	552	550

Table 16. G'-H'에서의 fringe order와 θ 에 따른 shear stress를 計算한다.

G' - H'	G'	x_1	x_2	x_3	x_4	H'
N	5	6	5.7	5.4	5.4	5
θ	60	45	8	4	0	-20
$T_{xy'}$	-346	-480	-126	-60	0	257



20mm (4mm 等分)

Table 17. G''-H''에서의 fringe order와 θ 에 따른 shear stress를 計算한다.

G'' - H''	G''	x_1	x_2	x_3	x_4	H''
N	11	8.5	5.5	4.3	3.5	4
θ	-60	-48	-20	-4	4	15
$J_{xy''}$	762	676	283	48	-39	-160

Table 18. $\Delta J_{xy} = J_{xy'} - J_{xy''}$

$J_{xy'}$	-413	-303	-93	-30	129
$J_{xy''}$	719	480	166	5	-100
ΔJ_{xy}	-1132	-783	-259	-35	229

Table 19. G-H를 따라 $\frac{Nf}{h}$ 와 $\frac{Nf}{h} \cos 2\theta$ 를 계산한다.

G - H	G	x_1	x_2	x_3	x_4	H
N	18	9.5	6.8	5.5	5.5	5
θ	0	0	-5	1	8	0
$\frac{Nf}{h}$	-2880	-1520	-1088	-180	-880	-800
$\frac{Nf \cos 2\theta}{h}$	-2880	-1520	-1071	-879	-846	-800

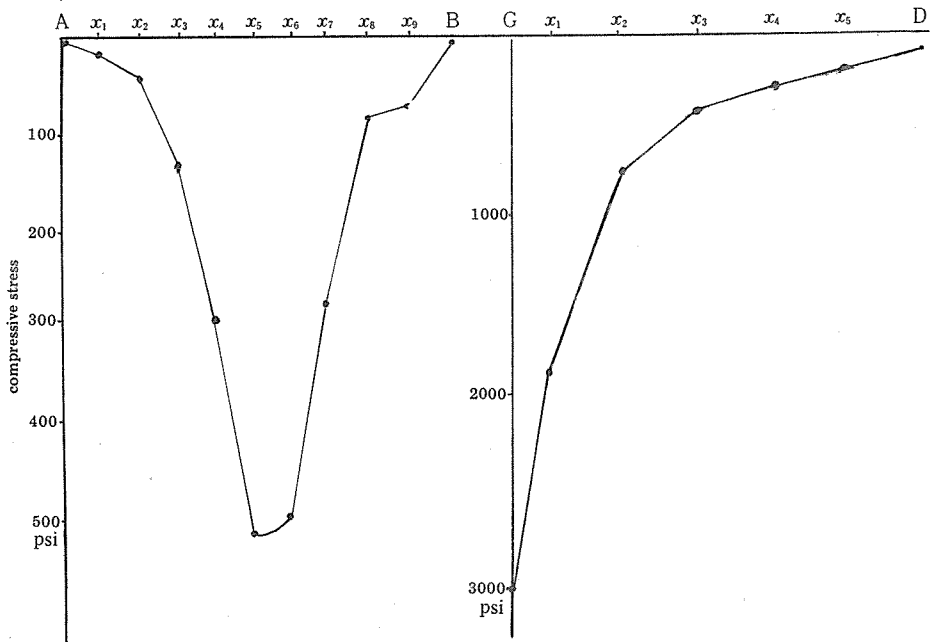
Table 20. G-H를 따라 $\sigma_x \sigma_y$ 를 계산하고, principal stress σ_1, σ_2 를 계산한다.

G - H	G	x_1	x_2	x_3	x_4	H
ΔT_{xy}	-1132	-783	-259	-35	229	
σ_x	-2880	-1748	-965	-706	-671	-900
σ_y	0	-228	106	173	175	100
$\frac{Nf}{h}$	-2880	-1500	-1088	-880	-880	-800
σ_1	-2880	-1748	-974	-707	-688	-800
σ_2	0	-228	115	174	192	0

Table 21. 各點에서의 fringe order의 比較

		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	
I - J	18 (∞)	12	8	5.5	4.3	3.3	2
K - L	18 (∞)	11	7	5.5	4.6	5	8
E - F	18	10	7	5.3	5	4	4
G - H	18	9.5	6.8	5.5	5.5	5	(5)

A diagram showing four points labeled K, I, L, and J. Point K is at the top, I is at the bottom, L is on the left, and J is on the right. They are connected by lines to form a diamond shape.

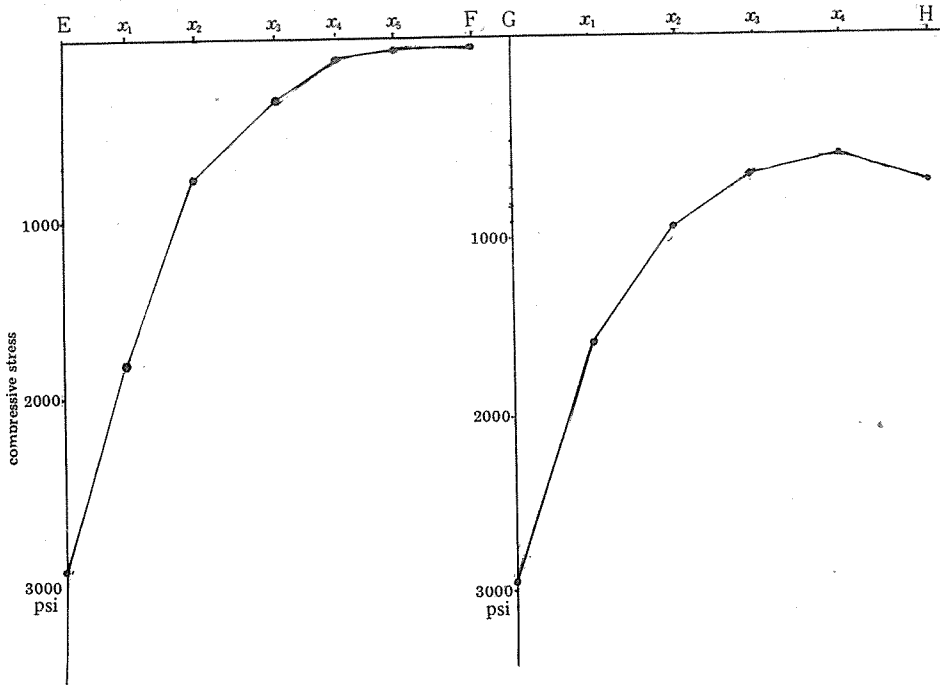


Graph 1.

Compressive stresses along line A-B from the mesial contact area to the distal contact area.

Graph 2.

Compressive stresses along the vertical line C-D.



Graph 3.

Compressive stresses along the vertical line E F (tilting position of MOD box restoration)

Graph 4.

Compressive stresses along the vertical line G H, (tilting position of MOD slice restoration).

第四章 總括 및 考察

齒科修復物の 構造는 外形上 復雜하고 또 여러 外力이 作用한다. 따라서 修復物の 各部分에 作用되는 外力을 正確히 計測하기는 어렵다. 또 이러한 構造의 樣相은 生理的인 役割에 相當한 影響을 미치게 된다.^{6,7,9,12} 光彈性 分析은 復雜한 齒牙構造物에서 荷重(咬合力 및 咀嚼力)을 加할 時의 stress의 크기와 分散狀態를 實物에 類似한 光彈性模型에서 쉽게 觀察할 수 있다.

스트레스의 크기(magnitude)를 MOD box 修復物에서 研究되었다. 附圖 1은 遠心頰側咬頭의 頂點에 加해진 100Lbs의 static load와 그에 따른 isochromatic fringes를 보여준다. Compressive stress는 修復物の 中央에서 最大이고 A-B line을 따라서 graph 1에서 보는 것처럼 近遠心으로 갈수록 減少된다. 附圖 2에서 vertical line C-D를 따라서 나타나는 stress 分散은 graph 2에서 보여준다. 이것은 maximum compressive stress는 荷重을 加하는 部位이며 齒髓面 가까이에는 stress가 거의 없는 것을 보여준다. 이는 Craig等의 研究結果¹⁷와 一致하고 있다. 附圖 3,4 graph 3,4에서 MOD box type과 MOD slice type에 關係없이 rounded axio-pulpal angle에 비해 flat axio pulp angle의 角진 部位에 stress의 集中現象을 볼 수 있고, 또 stress의 分散樣相도 角진 部位만큼 厚徑이 짧아지는 關係로 稠密하다.^{18,41} 위의 結果에 따라 臼齒部인레이 修復物の 構造는 그 厚徑을 두껍게 해주기 위해서 生物學的 許容限度內에서 齒髓組織에 損傷을 주지않기 위하여 line angle을 둥글게 하여 stress 集中을 防止해야 한다. 따라서 齒科 修復物の 構造는 齒牙의 生物學的 樣相을 考慮하여 最少限의 削減을 要하기 때문에, 주어진 厚徑에서는 rounded axio-pulpal line angle이 가장 좋은 結果를 招來한다고 思料된다.^{6,8,9,10} 附圖 5,6에서 MOD slice 修復物の 近心頰側咬頭와 遠心頰側咬頭의 頂點에 各各 100Lbs의 static load를 加했을 때의 fringe order와 stress 分散을 보여준다. 여기서 齒髓壁에 垂直으로 作用하는 force가 stress 分散이 均一하고 齒髓面 近處에서 stress가 적은 것을 볼 수 있다. 따라서 graph 2와 graph 3과의 關係에서는 principal stress中 σ_1 值만을 plotting한 結果에 依해서 graph 3의 數値가 적지만 σ_1 , $-\sigma_2$ 인 shear stress에서는 D點에서는 -556 psi와

F點에서는 -640 psi의 計測에 依해 客觀的으로 D點이 shear stress를 덜 받는다는 것이 數值的으로 立證된다. 이는 그 部位가 더 安定된 狀態라는 것을 意味한다.

Bending moment의 5,15Lbs에 따른 isochromatic fringe를 附圖 7,8에서 보여준다. 여기서 15Lbs에서 MOD인레이 修復物이 脱落되었는데 이는 Craig等의 結果¹⁷와 比較하면 쉽게 脱落된 現象을 나타낸다. 이는 模型의 構造의 設計의 差異에 基因된다고 思料된다. 그림 7,8은 boundary stresses의 方法으로 그려졌다. 그림 7은 bending moment가 27.5 pound inches이고 그림 8은 bending moment가 82.5 pound inches이며 이때 脱落이 일어났다.

Maximum tensile stress가 近心邊緣部位에 發生하고 maximum compressive stress가 同一한 proximal axio-pulpal angle에서 惹起된다. 따라서 bending moment時는 tensile stress와 compressive stress가 同一한 proximal site에 存在하므로, 修復物の 構造를 設計 하는 主要課題가 proximal margin에 發生하는 tensile stress를 極小化시켜 그 脱落을 防止하는 것이다.²⁷⁻³⁰ 이는 修復物 脱落에서 構造의 樣相과 傾斜量 및 荷重되는 部位가 重要한 要因이 된다는 것을 立證한다. 즉 咬頭의 位置에 따라 邊緣部位에 stress를 받는 程度가 달라지는 것을 光彈性 模型에서 쉽게 認知할 수 있다.^{17, 18, 42, 43)}

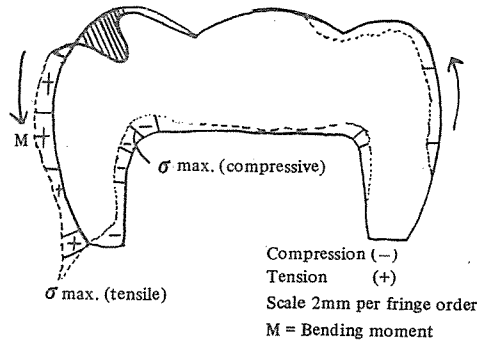


그림7. 5 Lbs 荷重에 依한 bending moment 時의 boundary stresses의 樣相.

參考文獻

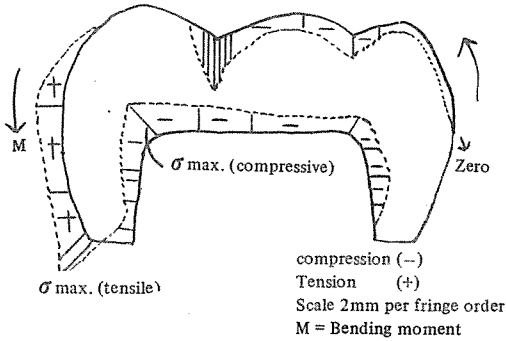


그림 8. 15Lbs 荷重에 의한 bending moment 時의 boundary stresses의 樣相.

第五章 結 論

著者は 二重屈折 物質인 光彈性 材料 PSM-1 (polyester)로써 齒牙인레이 修復物을 製作하여 四種의 實驗模型(aluminum 製材) 上에서 100Lbs 의 靜的 狀態의 荷重을 加했을 때, stress의 傳達方向 및 分散樣相을 circular transmission polariscope 로서 研究한 結果 다음의 結論을 얻었다.

1. MOD 修復物에서 齒髓壁에 垂直되게 힘이 作用될 때 compressive stress는 齒髓面에 가까울수록 減少됐다.

2. Compressive stress의 變化率은 同一한 實驗條件 下에서 正常咬合의 齒牙狀態와 傾斜진 齒牙狀態에서 比較할때 傾斜진 齒牙狀態에서 比較的 더 높았다.

3. Rounded axio-pulpal line angle이 flat axio-pulpal line angle에 비해 stress 集中이 더 적었다.

4. Bending moment時 近心邊緣部位에 tensile stress를 惹起시키고, mesio axio-pulpal line angle 에 높은 compressive stress를 나타냈다. 또 load application으로 부터 對角線 方向의 隅角部位에 光彈性模型의 脫落을 招來 하였다.

(끝으로 本 論文을 始終 指導鞭撻하여 주신 張翼泰 教授님께 眞心으로 感謝드리며 많은 助言을 해주신 補綴學 教室의 教授님들께도 感謝드리며 또 機械 使用에 도움을 주신 K. I. S. T. 精密機械室員 들께도 感謝를 드립니다).

1. Zak, B.: Photoelastische Analyse in der Orthodontischen Mechanik, Oesterr. Z. Stomatol. 33:22-37, 1935.
2. Frocht, M.M.: Photoelasticity, New York, J. Wiley & Sons, Inc. Vol 1, and Vol 2, 1941, 1948.
3. Noonan, M.A.: The Use of Photoelasticity in a Study of Cavity Preparations, J.D. Child, 16:24-28, 1949.
4. Hetengi, M., Editor: Handbook of Experimental Stress Analysis, ed 3, New York, J. wiley & Sons, Inc. pp, 828-970, 1950.
5. Castro, M.E.: Photoelasticity Applied in a Comprative Study of Four Types of Cavity Preparations for Primary Molars. Thesis, The University of Michigan. Ann Arbor, 1952.
6. King, R.M.: A Method for the Photoelastic Study of Stresses Developed in Dental Structures, Thesis, The University of Michigan, Ann Arbor, 1953.
7. Walton, C.B., and Leven, M.M.: A Preliminary Report of Photoelastic Tests of Strain Patterns within Jacket-Crown, J.A. D.A., 50:44-48, Jan., 1955.
8. Mahler, D.B., and Peyton, F.A.: Photoelasticity as a Research Technigue for Analyzing Stresses in Dental Structures, J. Dent. Res., 34:831-838, Dec. 1955.
9. Mahler, D.B., and Terkla, L.G.: Analysis of Stress in Dental Structures, Dent. Clin. N. Amer. Nov. pp. 789-798, 1958.
10. Guard, W.F., Haack, D.C., Ireland, R.L.: Photoelastic Stress Analysis of Buccolingual Sections of Class II Cavity Restorations, J.A.D.A., 57:631-635, Nov. 1958.
11. Chilton, N.W.: Studies in Design and Analysis of Dental Experiments. II. A Four-Way Analysis of Variance, J. Dent. Res. 39:

- 344-360, 1960.
12. Mahler, D.B., and Terkla, L.G.: Relationship of Cavity Design to Restorative materials, *Dent. Clin. N. Amer. Mar.* pp. 149-157, 1965.
 13. Craig, R.G., and Peyton, F.A.: Measurement of Stresses in Fixed Bridge Retorations Using a Brittle-Coating Technique, *J. Dent. Res.*, 44:756-762, 1965.
 14. Thylman, S.D.: *Theory and Practice of Crown and Bridge Prosthodontics*, C.V. Mosby, Inc., pp. 177-203, 1965.
 15. Juvinal, R.C.: *Engineering Considerations of Stress, Strain, and Strength*, New York, McGraw-Hill, Inc. pp. 467-485, 1967.
 16. Sturdevant, C.M. et al.: *The Art and Science of Operative Dentistry*. chapter 13. Gold Inlay Restorations for CI II. Cavity Preparations, McGraw-Hill, Inc., pp. 303-324, 1968.
 17. Craig, R.G., El-Ebrashi, M.K., Le Peak, P.J., and Peyton, F.A.: Experimental Stress Analysis of Dental Restorations. Part I. Two-Dimensional Photoelastic stress Analsis of Inlays, *J. Prosthet. Dent.*, 17:277-291, 1967.
 18. Craig, R.G., El-Ebrashi, M.K., and Peyton, F.A.: Experimental Stress Analysis of Dental Restorations. Part II. Two-Dimensional Photoelastic Stress Analysis of Crown, *J. Prosthet. Dent.*, 17:292-302, 1967.
 19. El-Ebrashi, M.K., Craig, R.G. and Peyton, F.A.: Experimental Stress Analysis of Dental Restorations. Part III. The Concept of the Geometry of Proximal Margins, *J. Prosth. Dent.*, 22:333-345, 1969.
 20. El-Ebrashi, M.K., Craig, R.G., and Peyton, F.A.: Experimental Stress Analysis of Dental Restorations. Part IV. The Concept of Parallelism of Axial Walls. *J. Proshet. Dent.*, 22:346-353, Sept. 1969.
 21. EL-Ebrashi, M.K., Craig, R.G. and Peyton, F.A.: Experimental Stress Analysis of Dental Restorations. Part V. The Concept of Occlusal Reduction and Pins. *J. Prosthet. Dent.*, 22:565-577, Nov. 1969.
 22. EL-Ebrashi, M.K., Craig, R.G., and Peyton, F.A.: Experimental Stress Analysis of Dental Restorations. Part VI. The Concept of Proximal Reduction in Compound Restorations, *J. Prosthet. Dent.*, 22:663-670, Dec. 1969.
 23. El-Ebrashi, M.K., Craig, R.G., and Peyton, F.A.: Experimental Stress Analysis of Dental Restorations. Part VII. Structural Design and Stress Analysis of Fixed Partial Dentures, *J. Prosthet Dent.*, 23:177-186, Feb. 1970.
 24. Tillitson, E.W., Craig, R.G., Farah, J.W., and Peyton, F.A.: Experimental Stress Analysis of Dental Restorations. Part VIII. Surface Strains on Gold and Chromium Fixed Partial Dentures, *J. Prosthet. Dent.*, 24:174-180, Aug. 1970.
 25. Nally, J.N., Farah, J.W., and Craig, R.G. Experimental Stress Analysis of Dental Restorations. Part IX. Two-Dimensional Photoelastic Stress Analysis of Porcelain Bonded to Gold Crowns, *J. Prosthet. Dent.* 25:307-316, Mar. 1971.
 26. Farah, J.W., and Craig, R.G.: Reflection Photoelastic Stress Analysis of a Dental Bridge, *J. Dent. Res.*, 50 (5):1253-1259, 1971.
 27. Mondelli, J., and Vieira, D.F.: Influence of Cavity Design, Heat Treatment, and Cementation on MOD Gold Inlays. I. Proximal Permanent Deformation under Occlusal Stress, *J. Prosthet. Dent.*, 30(6): pp. 882-890, Dec., 1973.
 28. Mondelli, J., Vieira, D.F., and Joao Galan Junior. Influence of Cavity Design, Heat Treatment, and Cementation on MOD Gold Inlays. II. Resistance to Removal

- under Tensile Stress and its Relationship to the Cavity Surface Area, *J. prosthet. Dent.*, 31(1):pp.61-65, Jan., 1974.
29. Nicholls, J.I.: Crown Retention. Part I Stress Analysis of Symmetric Restorations. *J. Prosthet. Dent.* 31(2):pp. 179-184, Feb., 1974.
 30. Nicholls, J.I.: Crown Retention. Part II, The Effect of Convergence Angle Variation on the Computed Stresses in the Luting Agent. *J. Prosthet. Dent.*, 31(6): pp. 651-657, June, 1974.
 31. Caputo, A., Chaconas, S., and Hayashi, R.: Photoelastic Visualization of Orthodontic Forces during Canine Retraction, *Am. J. Orthod.*, 65:250-259, 1974.
 32. Kratochvil, F.J., and Caputo, A.A.: Photoelastic Analysis of Pressure on Teeth and Bone Supporting Removable Partial Dentures, *J. Prosthet. Dent.*, 32(1):52-61, 1974.
 33. Craig, R.G., Farah, J.W., and EL-Tahawi, H.W.: Three Dimensional Photoelastic Stress Analysis of Maxillary Complete Dentures, *J. Prosthet. Dent.*, 31(2):122-129, Feb. 1974.
 34. Broadsky, J.F., Caputo, A.A., and Furstman, L.L.: Root tipping: A Photoelastic-Histopathologic Correlation. *Am. J. Orthod.* 67(1):1-10, 1975.
 35. Dally, J.W., and Riley, W.F.: *Experimental Stress Analysis*, McGraw Hill, Inc. 1965, 1978.
 36. Bulletin SFC-200: Photoelastic Stress Analysis, Photolastic Inc. Malvern, P.A., U.S.A.
 37. Bulletin 1-203: Instructions for making Two-Dimensional Photoelastic Models with the Photolastic High Speed Router Model HSR-I Photolastic Inc. Malvern, P.A., U.S.A.
 38. Bulletin p-1120-2: Materials for Photoelastic Coatings, Photoelastic Models,
 39. Bulletin TDG-I.: Introduction to Stress Analysis by the Photoelastic Coating Technique, Photolastic Inc. Malvern, PA., U.S.A.
 40. 宮川 修, 塩川延洋: 有限要素法について, 補綴物と支持組織の力學的問題への應用のために, 齒界展望, 44(6): pp.903-911, 1974.
 41. 尹聖逸: 齒冠補綴物에 作用하는 Stress에 對한 光彈性學的分析, 大韓齒科醫師協會誌, 17: 1, pp.47-52, 1979.
 42. 趙元行: 架工義齒에 作用하는 Stress에 關한 光彈性學的分析, 大韓齒科補綴學會誌, 18: 1, pp.15-35, 1980.
 43. 林政奎: 齒冠補綴物의 隣接邊緣部位에 作用하는 Stress에 關한 光彈性學的分析. 大韓齒科補綴學會誌, 18: 1, pp.37-47, 1980.

PHOTOELASTIC STRESS ANALYSIS OF DENTAL INLAY RESTORATIONS ON POSTERIOR TEETH

Jun Yeon Kim, D.D.S., M.S.D.

*Dept. of Prosthodontics, Graduate School, Seoul National University
(Directed by Associate Professor, Ik Tae Chang, D.D.S., M.S.D., Ph.D.)*

.....> Abstract <.....

The purpose of this study was to investigate the general stress distribution of two different types of class II inlays when their positions were normal and tilted, and to measure quantitatively using two-dimensional photoelasticity.

A circular transmission polariscope used consisted of a light source, polarizer, 1st Quarter-wave plate, loading device, second quarter-wave plate, and analyzer.

A circular transmission polariscope was used to record the isochromatic and isoclinic fringes.

The photoelastic material as inlay body used in this study was PSM-1. A base for the plastic model was fabricated from aluminum and improved stone was used to cement the fabricated plastic model on to the aluminum base. Four models were constructed, MOD slice restorations with flat axio-pulpal line angle and MOD box restorations with rounded axio-pulpal line angle.

Static loading procedures (100Lbs) were used at predetermined sites.

The results were as follows.

1. Compressive stresses were reduced near the pulpal surface of MOD restorations.
2. The rate of change of compressive stresses were relatively higher in tilted teeth compared with teeth in normal occlusion, under similar test condition.
3. The MOD box preparation with rounded axio pulpal line angle has lower stress concentration in comparable areas to the shoulderless slice preparation, especially in tilting position.
4. Bending moments exerted on the mesial surface of MOD restoration resulted in high tensile stress at the mesial margin, as well as high compressive stress at mesio-axio-pulpal angle and the failure of the photoelastic model took place on the corner diagonal from the site of load application.

Explanation of Figures

- Fig. 1 : A MOD box restoration loaded with 100 pounds in center.
A-B, Horizontal mesio- distal line.
- Fig. 2 : A MOD box restoration loaded with 100 pounds in center.
C-D, Vertical occluso - pulpal line.
- Fig. 3 : A Tipped tooth loaded distally (E-F) with 100 pounds in the MOD box restoration.
- Fig. 4 : A Tipped tooth loaded distally (G-H) with 100 pounds in the MOD slice restoration.
- Fig. 5 : A MOD slice restoration loaded with 100 pounds in center (I-J).
- Fig. 6 : A MOD slice restoration loaded mesially (K-L) with 100 pounds off the center.
- Fig. 7 : Isochromatic fringes associated with a bending moment of 27.5 pound inches.
- Fig. 8 : Isochromatic fringes associated with a bending moment of 82.5 pound inches.

