

## 國產 Epoxy Resin의 光彈性的 特性 研究

金 東炫\*, 金 孝根\*, 尹 甲英\*\*

### A Study on the Photoelastic Characteristics of Domestic Epoxy Resin

Dong-Hyun Kim\*, Hyo-Geun Kim\*, Kab-Young Yoon\*\*

#### ABSTRACT

In Korea, all the photoelastic materials are imported from foreign countries. The cost of these materials are expensive and problems in importing have been restrained research and development in this field. To reduce these problems, the domestic EPOXY RESIN which is made of bisphenol type epoxy resin have been investigated in this study to find a photoelastic characteristics by tensile test and to measure photoelastic sensitivity coefficient and transition temperature and the optimum using condition was also investigated.

#### Nomenclature

E	: Modulus of elasticity	$T_f$	: Stress-freezing temperature
N	: Fringe order	$\alpha$	: Photoelastic Sensitivity coefficient
P	: Load acting on model	$\delta$	: Deflection
Q	: Characteristic Value ( $Q=E \alpha$ )	$\sigma_{\rho l}$	: Limit of proportionality
S	: Sensitivity Index ( $S=\sigma_{\rho l} \cdot \alpha$ )		

#### 要 旨

國內에서는 光彈性 材料의 全量을 外國으로부터 輸入에 依存함으로써 高價이고 入手 難에 부딪쳐 研究活動에 어려움을 주고 있다. 이러한 問題點을 解決하기 위해 國內에서 市販되고 있는 Epoxy Resin의 大部分을 차지하고 있는 비스페놀型 樹脂를 對象으로 光彈性的 特性을 引張試驗, 感度係數 및 遷移溫度 測定으로 分析檢討하였고, 応力凍結試驗을 통하여 最適使用條件을 究明하였다.

84년도 한국정밀기계학회 추계학술대회(11. 30)에서 발표

\* 漢陽大學校 大學院(정회원)

\*\* 漢陽大學校 工科大學教授(정회원)

## 1. 序 論

光彈性 實驗法은 <sup>1) 2) 3) 4)</sup> 실제의 機械部品 構造物에 발생하는 應力分布狀態를 模型과 간단한 實驗裝置를 使用해서 2次元 및 3次元 應力 裝置를 시각화하여 한번에 알수 있는 편리한 應力 解析法이다.

특히 應力集中이 있는 곳에서는 매우 便利하며 發電用原子爐, 原子力潛水艦, 宇宙機器 等の 複雜한 機械構造物에 對한 精밀한 應力解析뿐 아니라 人體各部 骨格構造의 應力分布를 알기 위하여 醫學分野 <sup>6) 8)</sup> 에서도 光彈性 實驗法의 活用이 급속도로 늘어나고 있다.

이러한 추세에 따라 光彈性 實驗材料의 선택과 취급에 필요한 研究와 實驗이 이루어지게 되었으며 최근 일본에서는 光彈性學會(1979)를 설립하여 光彈性 實驗法의 개선 <sup>3) 5) 9)</sup> 과 使用目的에 따른 光彈性的 特性研究 <sup>4) 5) 6)</sup> 에 박차를 가하고 있고 특히 動荷重狀態에서의 應力解析이 要求되어 이에 따른 光彈性材料의 特性研究와 기존 材料에 對해서도 應力凍結法의 適性係數改善에 관한 研究가 활발히 이루어지고 있는바 國內에서도 光彈性 實驗法에 對한 인식이 높아져 대단위 연구소, 학교에서도 光彈性 實驗裝置를 도입하여 研究하기에 이르렀으나 光彈性 實驗材料에 對한 研究가 없어 光彈性 實驗用 EPOXY RESIN의 全量을 外國으로부터의 輸入에 依存함으로서 高價이고 入手難에 부딪혀 研究活動에 어려움을 주고 있다.

本 論文에서는 이러한 어려움을 해소 하고져 國內에서 제조 시판되고 있는 여러 종류의 EXPOXY RESIN을 대상으로 예비실험을 한 결과 비스페놀형 EPOXY RESIN이 가장 適合함이 判定되어 그의 光彈性特性을 引張試驗, 感度係數 및 遷移溫度測定으로 分析檢討하였고 應力凍結試驗을 통하여 應力凍結特性和 3次元 應力凍結時 最適使用條件을 究明하였다.

## 2. 實驗方法 및 內容

本 試驗에서 使用한 高溫硬化性 國產 EPOXY RESIN은 國內에서 시판되고 있는 EPOXY

RESIN의 대부분을 차지하고 있는 비스페놀형 EPOXY RESIN이다. 國產硬化劑로는 酸無水物계열의 Phthalic Anhydride를 使用하였으며 外國產 EPOXY RESIN과 硬化劑는 CyBA社 製品인 ARALDITE CT200과 H ARDENER HT 903을 使用하였다.

試驗片을 얻기위해서 EPOXY RESIN과 硬化劑의 重量比를 100 : 30으로 하였으며 먼저 소요량의 EPOXY RESIN을 넣고 125℃까지 충분히 가열하여 액상이된 상태에서 硬化劑를 첨가하여 다시 125℃가 되때까지 기포가 발생하지 않도록 저어주며 불순물을 제거한다. 다음에 完全히 液相狀態가 된 溶液을 應力凍結爐속에서 미리 예열되어 있던 모형제작용 paraffin coating box에 기포가 생기지 않도록 주의깊게 부어넣고 125℃의 一定溫度로 30時間 이상 爐內高溫 硬化시킨후 다시 125℃에서 부터 常溫이 될때까지 매시간당 10℃의 冷却速度로 서서히 應力凍結爐 内部溫度를 冷却시킨후 paraffin coating box를 제거하여 大型 EP-OXY 板을 成形하였다.

이와같이 해서 成形 제작한 試片에 初應力이 없을때는 직접 實驗을 행하여도 되나 初應力이 存在할 경우에는 Annealing을 하여 初應力을 제거한 다음 實驗에 使用하였다.

國產 EPOXY RESIN의 linearity, 機械的 性質 및 國產과 外國產의 常溫에서의 光彈性的 特性을 比較檢討하기 위하여 使用한 實驗裝置로는 引張試驗을 위한 美國 MTS社製 MTS Series 810과 等色線觀찰을 위해 日本製(理研計器 PA-300) 大型 렌즈式인 Circuler polariscope 및 試驗片製作, 遷移溫度測定, 應力凍結을 위해 日本製(理研計器 PA-2) Stress freezing furnace을 使用하였다.

그리고 感度係數가 增加함에 따라 model에서 관찰되는 무늬次數(fringe order)도 增加되므로 光彈性材料는 높은 感度係數를 갖는 것이 바람직하다. 이러한 理由로 本 試驗에서는 國產과 外國產 EPOXY RESIN의 感度係數를 測定하여 比較檢討하였으며 이 값을 根據로 하여 引張試驗에서 변형률을 Digital strain indicator로 측정하여  $\sigma = E\epsilon$  식에 의하여 7

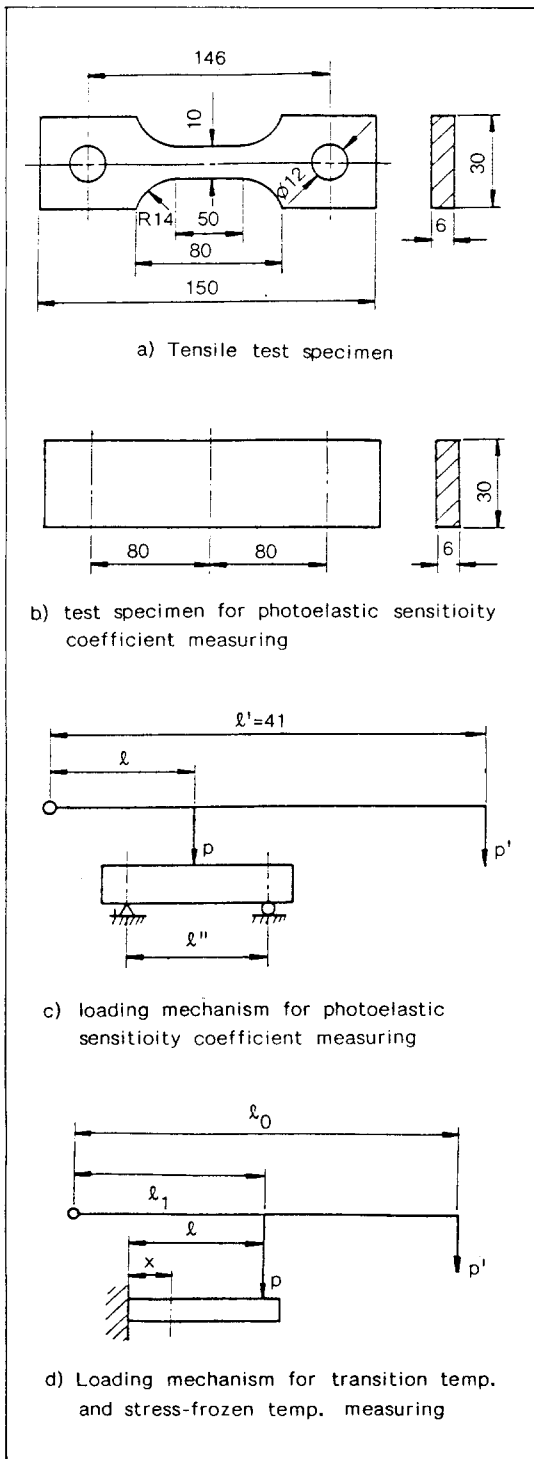


Fig. 1 Test specimen and Loading mechanism

한 彈性係數 ( $E$ )와 比例限度 ( $\sigma_{pl}$ )로부터 光彈性 實驗材料의 選別條件이 되는 適性係數 ( $Q$ )와 敏感係數 ( $S$ )를 求하였다. 또한, cantilever式으로 처짐을 측정하여 彈性係數를 利用하여 遷移溫度를 求하였으며 遷移溫度以下에서 應力凍結을 行하여 應力凍結特性을 比較檢討하였으며 으로부터 3次元 應力凍結을 위한 凍結最適條件을 求하였다. Fig. 1은 本 研究에서 行한 引張試驗, 感度係數 및 遷移溫度測定, 應力凍結試驗에서 사용한 試驗片과 荷重裝置들이다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### (1) 引張試驗 및 感度係數測定

國產과 外國產 EPOXY RESIN에 對하여 常溫에서 引張試驗結果 stress strain relation은 各各 Fig. 2와 Fig. 3은 같고 感度係數測定의 DATA는 Tabel. 1에서 보여주고 있다.

光彈性 model의 材料로 使用되기 위해서는 stress - strain curve의 처음 부분에 반드시 linear한 部分이 存在하여야 하는바 國產 EPOXY RESIN의 경우에도 이러한 光彈性的 特性이 잘 나타나고 있다.

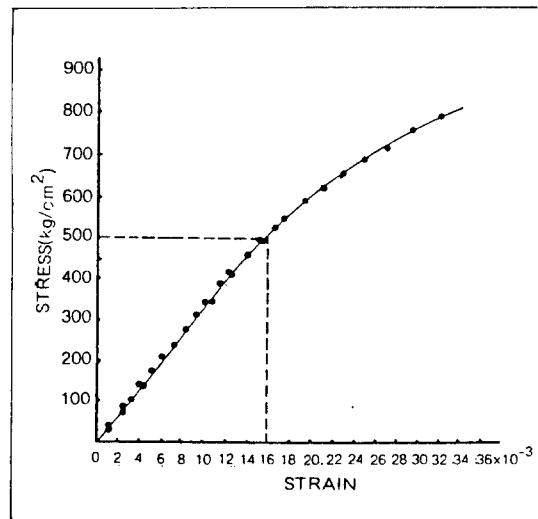


Fig. 2 Stress-Strain Relation of Domestic Epoxy Resin

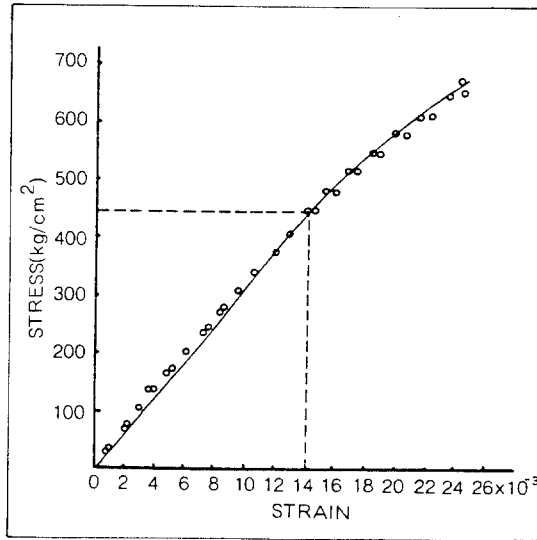


Fig. 3 Stress-Strain Relation of foreign Epoxy Resin.

Fig. 2와 Fig. 3에서 國産 EPOXY RESIN의 彈性係數  $E = 312 \text{ kg/mm}^2$  比例限度  $\sigma_{pl} = 5 \text{ kg/mm}^2$  을 外國産 EPOXY RESIN의 경우  $E = 312 \text{ kg/mm}^2$ ,  $\sigma_{pl} = 4.5 \text{ kg/mm}^2$  을 보여주고 있다.

Table. 1에서는 各各 3개의 試驗片으로 感度係數를 測定한 結果로서 平均值를 求해 보면 國産 EPOXY RESIN의 感度係數는  $\alpha = 0.85 \text{ kg/mm}$ 이고 外國産 EPOXY RESIN의 感度係數는  $\alpha = 0.78 \text{ kg/mm}$ 이다.

常溫의 引張試驗과 感度係數 測定에서 얻은 彈性係數( $E$ ) 比例限度( $\sigma_{pl}$ ) 및 感度係數( $\alpha$ )로부터 彈性變形에 관한 指標가 되는 適性係數 및 敏感指數를 求하여 國産과 外國産 EPOXY RESIN을 比較檢討하여 보면 感度係數, 比例限度, 適性係數, 敏感指數는 國産이 外國産보다 큰 값을 나타내고 있다.

(a) Data of photoelastic sensitivity for domestic epoxy resin

Load	$N_1$	$\alpha_1$	$N_2$	$\alpha_2$	$N_3$	$\alpha_3$
2000g	1.79	0.84	1.83	0.86	1.81	0.85
2500g	2.27	0.85	2.27	0.85	2.29	0.85
3000g	2.78	0.87	2.69	0.84	2.78	0.87
3500g	3.14	0.84	3.17	0.85	3.17	0.85
4000g	3.56	0.835	3.54	0.83	3.71	0.87
4500g	3.94	0.82	4.13	0.86	4.03	0.84
5000g	4.43	0.83	4.53	0.85	4.43	0.83

(b) Data of photoelastic sensitivity for foreign epoxy resin

Load	$N_1'$	$\alpha_1'$	$N_2'$	$\alpha_2'$	$N_3'$	$\alpha_3'$
2000g	1.75	0.81	1.71	0.8	1.73	0.81
2500g	2.13	0.80	2.08	0.78	2.11	0.79
3000g	2.53	0.79	2.40	0.75	2.50	0.78
3500g	2.90	0.78	2.84	0.76	2.84	0.76
4000g	3.25	0.76	3.33	0.78	3.20	0.75
4500g	3.61	0.75	3.79	0.79	3.60	0.75
5000g	4.14	0.78	4.05	0.76	4.00	0.75

Table 1. Data of photoelastic sensitivity test

Table 2. Photoelastic characteristics of Domestic and Foreign epoxy resin

Epoxy Resin	$\sigma$ (Kg/mm)	E (Kg/mm)	$Q=\alpha E$ (Kg/mm)	$S=\alpha$ (1/mm)
Domestic	0.85	312	5	4.25
Foreign	0.78	321	4.5	3.51

彈性係數는 外國産이 더크나 感度係數와 比例限度로 補償할 수 있다.

따라서 常溫에서의 光彈性 實驗材料로서 國産 EPOXY RESIN은 充分히 使用可能하다.

(2) 遷移 溫度 測定

천이온도측정은 Fig 1의 (d)와 같은 시험편과 하중장치에 의해 凍結爐內에서 측정한 Contil- ever의 최대처짐과 각 온도에서 측정하고자하는 탄성계수의 값을 그 온도에서의  $\delta_{x=1}$ 을 관찰하여  $E = \frac{Pl^3}{3I} \cdot \frac{1}{\delta_{x=1}}$ 을 구하였다. Epoxy

Resin의 이 값들은 온도에 의하여 현저한 영향을 받으므로 Fig.4와 Table3은 국산 Epoxy Resin의 溫度變化에 따른 光彈性的 特性을 보여주고있다. 여기서 感廣係數와 彈性係數가 急變하고 있는 115°C ~ 125°C 附近에서 遷移領域이다. Fig.4 Table 3.

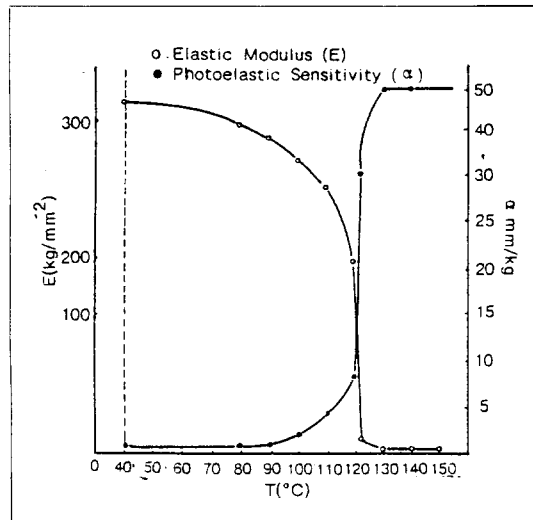


Fig. 4 Changes in photoelastic characteristics by temperature

Table 3. Data of changes in photoelastic characteristics by temp

Temp.	Fringe order N	Deflection $\delta$ (mm)	Photoelastic sensitivity $\alpha$ (mm/kg)	Modullis of Elasticity E (kg/mm)
80°C	0.16	0.064	0.87	296
90°C	0.2	0.066	1.09	287
100°C	0.4	0.070	2.18	270
110°C	0.8	0.075	4.36	252
120°C	1.5	0.095	8.17	199
122°C	6	3.15	32.7	6
130°C	7.5	9.46	40.8	2
140°C	7.5	9.46	40.8	2

Fig.4에서 보듯이 遷移領域以下の 溫度에서는 완만하게 변화하고 115°C부터 顯著하게 변화함으로서 3次元應力凍結材料가 지나야 할 明確한 遷移溫度領域을 알수가 있다.

(3) 應力凍結 實驗

Table4, Table5는 實驗한 內容과 結果로서 凍結溫度에 따른 應力凍結特性 data이며 Fig 5는 이들을 정리하여 Plot 한 것이며 Fig. 6

Table 4. Data of stress-freezing characteristic domestic epoxy resin at given freezing given freezing temp.

Temp.	Load P(kg)	Fringe order N	Deflec- tion $\delta$ (mm)	Photo- elastic sensi- tivity $\alpha$ (mm/kg)	Modulus of elas- ticity E(kg/mm <sup>2</sup> )	Charac- teristic value Q= $\alpha$ E
70°C	1.5	2.4	1.6	0.87	175	155.75
80°C	1	1.8	1.16	0.96	163	159.7
90°C	1	3.5	1.55	1.9	122	231.6
100°C	0.8	5.8	4.9	3.95	37	146
110°C	0.105	6.45	8.5	33.5	2.34	78.39
120°C	0.1	7.5	15.3	40.9	1.24	50.72
130°C	0.1	7.7	16.6	42	1.14	47.88

Table 5. Data of Stress-freezing characteristic foreign epoxy resin at given free freezing temp

Temp.	Load P(kg)	Fringe order N	Deflec- tion $\delta$ (mm)	Photo- elastic sensi- tivity $\alpha$ (mm/kg)	Modulus of elas- ticity E(kg/mm <sup>2</sup> )	Charac- teristic value Q= $\alpha$ E
70°C	1.5	2.2	1.5	0.8	189	151.2
80°C	1	1.5	1.0	0.82	186	153
90°C	1	2.5	1.08	1.36	175	238
100°C	0.8	6.3	4.15	4.3	36.5	157
110°C	0.1	6.8	9.3	37	2.3	83
120°C	0.1	7.7	16.6	42	1.32	55.5
130°C	0.1	8.1	21	44	1.14	50

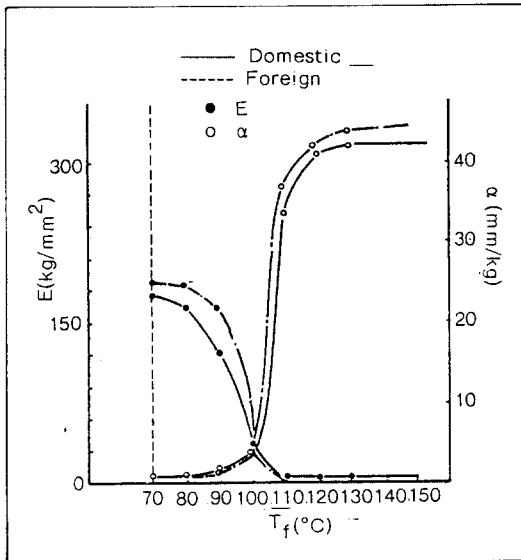


Fig. 5 Stress-freezing characteristics at given freezing temperature

은 국산 Epoxy Resin의 應力凍結이됨을 사진으로 촬영한 光彈性 무늬의 代表的인 例이다.

遷移領域以下の 溫度에서도 應力凍結이 可能한 理由는 Fig.7에서 보는바와같이 凍結溫度  $T_f$  以下の 빛금친 部分에서 작으나마 이미 遷移가 되고있기 때문이다. 따라서  $T_f$  에 있어서 凍結作用은 凍結溫度  $T_f$  가, 上昇함에 따라 增加하겠지만 반면에 彈性係數(E)값은 感少하기 때문에 그 凍結溫度  $T_f$  에서의 感度係數( $\alpha$ )와 함께 생각해보면 適性係數  $Q = E\alpha$  가 最大로 되는 溫度가 存在할 것이다.

Fig.5와 Table 4, Table 5를 利用하여 國産과 外國産 Epoxy Resin의 最適凍結 條件이 되는 즉,  $Q_{max} = (E\alpha)_{max}$ , 溫度領域을 알기 위하여 凍結溫度( $T_f$ )에 대한 適性係數를 求하여 온도변화에 따른 應力 동결 특성을 결정 하였다.

Fig. 8은 그것을 Plot 한 것이다.

그 結果變形을 작게하여 應力凍結을 할수있는 最適應力凍結溫度는 88°C ~ 95°C 附近에서

나타났다.

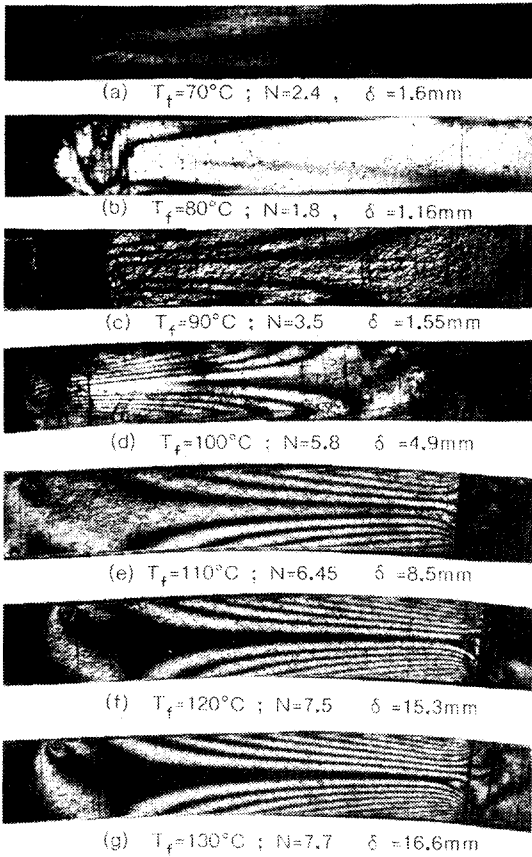


Fig. 6 Photoelastic view of the stress-frozen specimens of Domestic Epoxy Resin

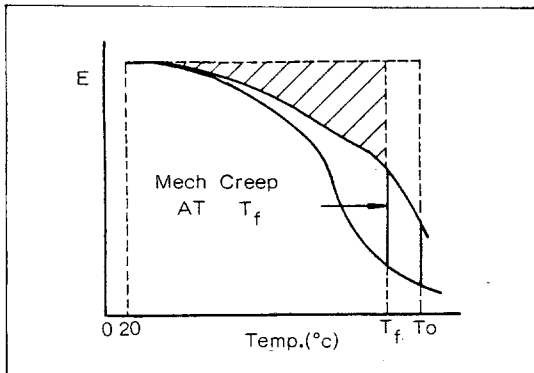


Fig. 7 Mechanism to be stress-frozen at transition temperature

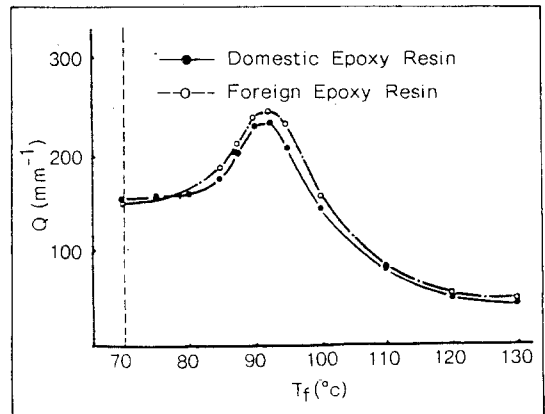


Fig. 8 Characteristic values curve at each Stress-freezing temperature

#### 4. 結 論

高度硬化性 國產 Epoxy Resin 中 비스페놀型 樹脂를 對象으로 光彈性 特性和 3次元 應力凍結 時 最適使用條件을 究明하기 위하여 常溫에서 引張試驗應力凍結 試驗을 行하였다. 얻어진 結果는 다음과 같다.

1) 常溫에서의 引張試驗과 感度係數測定結果 國產 EPOXY RESIN이 stress strain relation 의 linearity와 뛰어난 感度係數( $\alpha = 0.85 \text{ kg/mm}$ )을 갖고 適性係數와 敏感係數의 값이 外國產( $Q = 250 / \text{mm}$ ,  $S = 3.51 / \text{mm}$ )보다 國產( $Q = 265 / \text{mm}$ ,  $S = 4.25 / \text{mm}$ )이 더 큰것을 알수있다.

#### 2) 遷移溫度測定 結果

國產 EPOXY RESIN의 경우 3次元 應力凍結材料가 지나야할 明確한 適移領域이  $115^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$ 附近에서 나타났다.

#### 3) 應力凍結試驗 結果

國產 EPOXY RESIN도 應力凍結됨을 알수 있고 配合比를 主劑 : 硬化劑 = 100 : 30 (重量化)로 하여 變形을 작게하며 應力凍結을 할수있는 最適應力凍結溫度  $88^{\circ}\text{C} \sim 95^{\circ}\text{C}$ 附近이다.

4) 以上の 1), 2), 3) 의 結果에서 国产 EPOXY RESIN도 常溫에서 뿐만 아니라 3次元 應力凍結에서도 充分히 使用할 수 있다.

참고문헌

1. James W. Dally, William F. Riley, Experimental stress analysis, McGraw-Hill Kogakusha.
2. Budynas, Advanced strength and Applied stress Analysis McGraw-Hill, Kogakusha
3. 岸武保, “應力凍結法の一改良”, 日本 光彈性學會 第 3 回 研究發表講演會, 講演論文集 (1981).
4. 橋本彰三, 河田幸三, “工木キン樹脂의 動的 光彈性的 舉動”, 日本 光彈性學會 第 3 回 研究發表講演會 講演論文集(1981)
5. 西田正孝, 澤 芳ま, “3次元應力凍結法の 適性係數 改善(=フして”, 日本 光彈性學會 第 3 回 研究發表講演會 講演論文集(1981)
6. 三浦豊彦, “足とはまの”, 勞動科學書: 叢書 ; 勞動科學研究所
7. 河田幸三, 西田正孝, 辻二即, 光彈性實驗法, 日刊工業新聞社.
8. 조 인호, “총의치 교합형태에 따른 3次元 的 光탄성응력분석”, 서울대학교 대학원 齒醫學博士學位論文(1982)
9. 西田, 澤 鶴田, “三次元 熱應力の凍結 光彈性實驗法について, 日本機械學會論文集, 44 - 383(昭53-7) 2264-2271
10. 辻二即, 河田幸三, 共者, 光彈性實驗法, 理研究計器株式會社(1957)
11. W. Kuhm, F. Grum. Kolloid Z., 101 (1942), 248.
12. L. R. G. Treloar, Trans. Faraday Soc, 43(1947) 284 ; The Physics of Rubber Elasticity. oxford(1949) 144; Proc. Phys. Soc, 60 (1948). 135.
13. R. S. Stein, A. V. Tobolsky, J. Polymer Sci., 11(1953) 285
14. R. S. Stein, S. Krimm, A. V. Tobolsky, Textile Res. J. 19(1949). 8
15. W. E. Thibodeau, A. T. McPherson, J. Research Natl, Bur Standards, 13(1934)
16. 彬森勝, 宮野靖, 岡尾武, “工木キン樹脂의 光彈性 特性係數의 決定,” 日本 光彈性學會 第 3 回 研究發表講演會論文集(1981)
17. 金 源澤 編著, 基本高分子科學, 探求堂