

高分子Damping 材料의 形態와 特性(2)

최 재 운

1. 音의 調節과 Damping

音を 效果的으로 調節하는 것이 방송국의 스튜디오나 공연회장에서는 필수불가결한 것으로 간주되었으나 이제는 商業的이나 工業的인 環境 구성에서도 가장 本質的인 것으로 台頭되고 있다. 商業的, 工業的인 目的下에서 效果的인 소음관리에 박차를 가하게 된 주된 原因은 보다 좋은 環境에서 作業하고 居住하려는 욕망에서 나타났고 特히 工場의 소음규제는 作業者들의 귀에 악영향을 미치는 지속적인 聾음의 防止와 生産量의 증대에 目的이 있는 것이다.

소음은 空氣의 壓力波에 依해 직접 傳達되기도 하고 땅이나 建物の 構造를 通하여 間接적으로 傳達되기도 한다. 그리고 構造物에서 발생되는 振動은 空氣를 매체로하여 壓力波를 발생시키므로 振動은 소음으로 變化한다. 이렇게 하여 生成된 소음을 規制하는 方法으로서는 防振材料나 충격흡수材料를 構造物에 부착시킴으로써 構造物이나 地盤의 振動을 막아 根源的으로 소음관리를 할 수 있다. 그러나 어떤 경우에 있어서도 소음을 감소시킬 수가 없을 때가 있다. 예를 들면 교통소음과 같은 것은 大部分이 空氣를 通하여 傳達되기 때문이다. 이러한 경우에는 가능한 限을 效果的으로 解決하기 위해서 일

반적인 소음관리 장치와 建物構造를 復合적으로 생각하여 많은 인자들을 分析해야 한다.

2. 소음의 週期依存性

소음을 조절하는 細部事項을 決定하기에 앞서서 설치가 效果的인가를 판단하기 위해서는 주위 條件을 파악하는 것이 重要하다.

그리고 이러한 條件을 設定하기 위하여 간단한 panel을 예들들어 說明하기로 한다.

Fig. 1은 주어진 週期에서 panel에 투사된 全體에너지가 쇄진하는 것을 소리감속지수 R을 使用하여 예견할 수 있다는 것을 보여준다.

여기서 $R = 10 \log(1/T)$ (dB)이며 T는 panel에 투사된 全體energy와 panel을 통과한 소리energy의 比로서 定義되는 傳達係數이다.

2.1 剛性 效果

共鳴週波數 以下の 領域에서는 damping의 效果가 작기때문에 panel의 振動幅은 panel의 剛性에 依해 조절된다. 그리고 damping에 比해 彈性率이 높은 振動係는 상당히 높은 共鳴peak를 形成하기도 한다. 그러나 실제에 있어서 是 剛性에 依해서 조절되는 低週波數 領域은 問題가 되지 않으며 大部分의 panel 構造物이

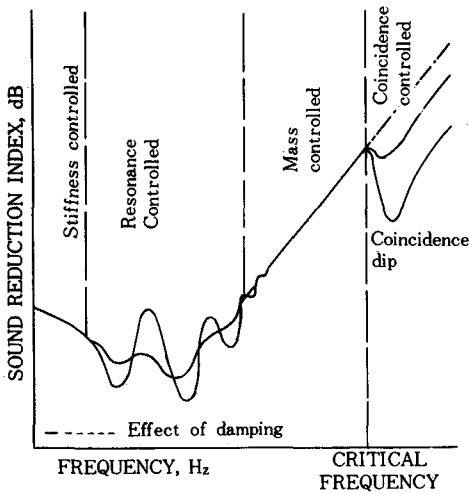


Fig. 1. Characteristic transmission loss of a partition.

100Hz 以下에서 共鳴peak를 가지고 있기때문에 damping 材料를 使用하면 共鳴peak의 振幅을 效果적으로 調節할 수가 있다.

2.2 質量效果

質量 效果는 空氣로부터 발생된 소음을 效果적으로 감소시키는데 使用되며 質量 效果가 나타나는 領域에서는 소리에너지 準位가 遲鈍됨으로 소음의 根源이 차단된다.

이러한 效果는 彈性매체를 지닌 機械의 mounting block에서 나타나는 效果와 類似하며 강제진동주파수를 自然振動週波數로 效果적으로 轉換시키는 'deturning' 效果라 할 수 있다.

2.3 coincidence 效果

panel이 표면의 직각방향으로 振動하면 panel을 따라 移動하는 波가 形成되며 音波가 panel coincidence를 panel의 표면과와 같이 振動시킬 때 共鳴效果가 발생한다. 그러나 coincidence 效果는 單一週波數현상이 아니기 때문에 panel을 따라 移動하는 變形波의 速度는 週波數와 같이 증가하며 coincidence 效果가 始作되는 임계 주파수는 panel을 따라 이동하는 굽힘과와 空氣中에서의 音速과 같을 때 일어난다.

3. Damping Panel과 Damping 物質을 使用한 構造物

均一한 damping材料로 構成된 構造物이 damping energy를 발산하기 위해서는 높은 stress를 가진 振幅하에서도 充分히 使用될 수 있는 條件을 가져야 한다.

復合物質中에서 特히 높은 damping을 가진 점탄성 復合材料는 damping材料로서 새로운 可能性을 제공하여 점차 重要性이 증대되고 있으며 工學的인 條件을 만족 시키기 위하여서는 材料의 선정과 形態의 선정 및 stress 分布에 對한 적절한 選擇이 필요하다. 이러한 damping材料를 선정하기 위해서 점탄성 材料의 높은 damping特性에 주안을 둔 수많은 研究가 수행되어 왔다. 特히 두개의 딱딱한 板사이 에 접착제 가 들어있는 三成分으로 構成된 간단한 damping panel에 對해서 점탄성 접착제에 관한 研究 수행 方法은 접착제가 주기적인 變形을 받을 때의 damping mechanism을 밝혔으며 全體damping은 각 성분 의 damping特性과 stress 分布에 따른 자료로 계산될수 있다고 밝혔다. 이러한 접근 方法의 타당성은 實驗적으로 확정되었고 아래에서 보다 자세히 說明하러 한다. damping을 研究하는 方法은 두가지로 나눌 수 있다. 하나는 damping材料가 伸張될 때의 damping 形態와 다른하나는 剪斷力을 받을때 나타나는 damping 形態이다.

3.1 Extensional Damping

Extensional damping의 研究는 독일의 Oberst (1956)와 Becker (1956), 프랑스의 Lienenard (1951)에 依해 最初로 研究되었으며 簿板에 한 종류 의 材料를 均一하게 입힌 狀態에서 damping을 研究하였다. 이들은 damping이 damping layer의 두께와 손실성분 및 damping 材料의 剛性에 依存된다는 것을 밝혔으며 다음의 damping 圖案 mechanism은 Obsert에 依해 제안된 것이다.

(1) damping材料가 높은 内部에너지 손실과 높은 剛性을 가지면 damping이 큰 sheet를 얻을

수 있다.

(2) 같은 modulus와 같은 内部손실을 가진 두 가지 材料가 금속표면에 같은 비율로 膜을 形成하였을때 damping은 damping材料의 密度와는 무관하기 때문에 낮은 密度를 지닌 材料를 우선적으로 선택 하여야 한다.

1959年 Obsert의 理論을 계승한 Ruzika는 extensional damping의 광의적인 해석방법을 제공하였으며 한 가지 damping材料의 均一層이 어떤 板에 도포될 때 剪斷力에 의한 damping은 무시할 수 있다고 하였다. 이런경우 extensional damping만이 일어난다고 한다면 다음의 式으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\eta}{\eta_2} = \frac{K_2 [12h_{21}^2 + h_2^2 (1 + K_2)^2]}{[1 + K_2] [12K_2 h_{21}^2 + (1 + K_2) (1 + K_2 h_2^2)]} \dots\dots\dots (1)$$

이 식에서 η 는 復合材料의 damping (damping 인자 η 는 復合材料로 構成된 材料가 damped되었을 때 damping度를 測定하는 無次元의인 量이다)이며, h_2 는 금속板 (H_1)에 對한 점탄성材料의 두께비이며, K_2 는 금속판에 對한 점탄성재료의 剛性的의 비이며 h_{21} 은 板두께에 對한 점탄성재료와 금속판의 중앙面 사이의 거리이다.

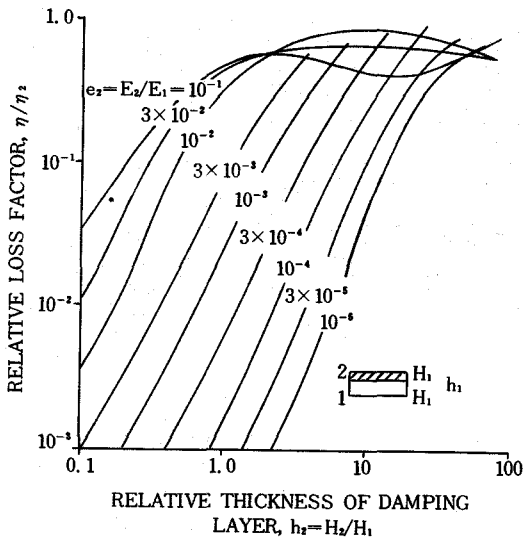


Fig. 2. Relative damping as a function of relative thickness and relative Young's modulus of homogeneous damping layer.

이 방정식으로 부터 均一한 층이 있는막대기의 damping 인자는 damping材料의 두께 $h_2 (=H_2/H_1)$ 와 彈性modulus $e_2 (=E_2/E_1)$ 의 함수임을 보여준다.

Fig. 2는 이를 도식적으로 나타낸 것이며 만약 η 가 η_2 의 40%보다 크다고 할 때 damping이 最大가 되고 증가된 두께가 더 이상의 damping을 부여하지 않는 漸減하는 회복지역에 도달한다. 이 graph로부터 damping을 상대적인 Young's modulus와 두께의 함수로서 나타낼 수 있으며 가장 높은 손실 modulus를 지닌 damping 材料가 주어진 두께에서 가장 큰 damping을 나타내므로 damping은 그 材料의 손실 modulus $\eta_2 E_2$ 에 比例한다고 가정할 수 있다. 이것이 Becker와 Obsert가⁵⁾ 새로운 damping材料를 開發하기 위하여 세운 제안이다.

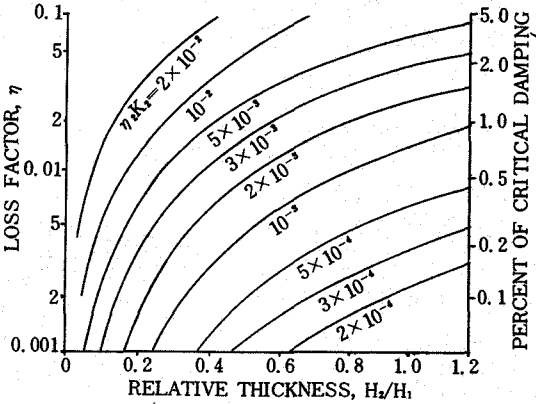


Fig. 3. Damping effectiveness of homogeneous treatments for moderate thickness of damping material.

Fig. 3은 손실 modulus를 매개변수로 使用하였을 때 damping材料의 두께비에 對한 damping 效果의 그래프이며 이 그림은 다음과 같이 damping材料를 알아내기위한 圖案chart로서 使用될 수 있다.

(1) 만약 damping材料의 特性이 알려졌다면 주어진 두께에서 예상되는 damping의 量을 알 수 있으며, 一定한 damping량이 決定되었을

경우에 두께를 결정할 수 있다.

(2)damping 材料의 特性이 알려지지 않았더라도 두께에 따른 實驗結果를 점철할 수 있으며 loss modulus값도 얻을 수 있다.

non-constrained damping layer로 부터 예견될 수 있는 양태를 說明하기 위하여 Becker 와 Obsert가 報告한 最上의 damping 材料에 對한 Beranek¹¹⁾(1959)의 계산이 만들어졌다.

Fig. 4는 板무게에 對한 damping재료의 重量 비를 函數로하여 η_{max} (最上의 damping 材料)을 나타내었으며 damping은 중량비의 자승에 따라 증가하는것으로 나타났다. 그리고 damping 材料의 주어진 두께와 무게에서 얻어질 수 있는 最大 damping량은 damping layer의 特性에 따라 제한된다. 예를들면 damping 材料의 $\eta_2 E_2$ 가 10^9 Nm^{-2} 이고 剛板의 E_1 이 $2.0 \times 10^{11} \text{ Nm}^{-2}$ 이라면 loss modulus는 5×10^{-3} 이다. 여기에서 나타난 η_{∞} 의 最大값으로부터 plate두께와같은 damping layer의 最大 손실인자 η 는 $0.065 (H_2/H_1)^2$ 과 같거나 작다는 것을 알 수 있다. 一般的으로 loss modulus가 큰 材料는 loss modulus가 낮은 材料보다 構造가 치밀하다. 이것은 比重 ρ^2 를 지닌 材料가 주어진 상대무게에서 最大 damping은 $\eta_2 E_2 / \rho^2$ 이 最大일 때 일어난다는 것으로 부터 알 수 있으며 比重이 0.6이고 loss modulus가 $4 \times 10^8 \text{ Nm}^{-2}$ 인 材料가 最大의 extensional damping을 제공하는 것으로 나타났다.

Kerwin은⁹⁾ 均一한 damping 材料는 가벼운 spacer layer 위에 점탄성layer를 부착함으로써 보다 效果的으로 만들수 있다고 제시하였으며 가벼운 spacer layer가 전단력이 크고 extensional stiffness가 낮을 때 다음의 式을 제안 하였다.

$$\eta/\eta_s = \frac{K_s(12h_3^2 + h_1^2)}{1 + 12K_s h_1^2} \dots \dots \dots (2)$$

여기서 η 는 復合材料의 damping이며 η_s 는 점탄성 layer의 damping이다. K_s 는 metal layer에 對한 점탄성 layer의 剛性比이며, h_s 는 metal layer의 두께 (H_1)에 對한 점탄성layer의 두께 (H_2)의 비이고 h_{s1} 은 板에 對한 primary plate

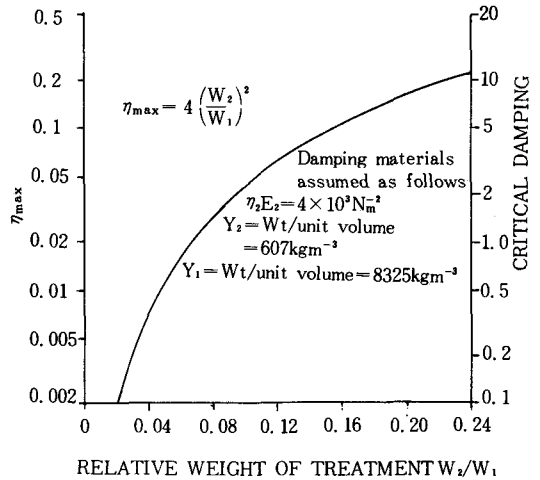


Fig. 4. Maximum damping for single homogeneous damping layer

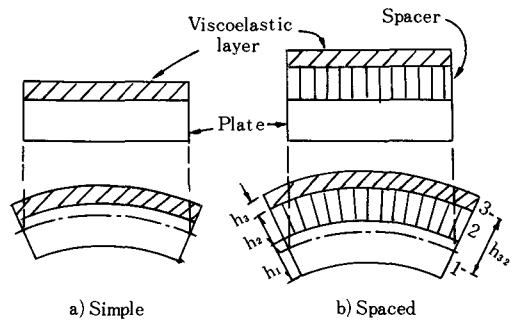


Fig. 5. Shear stiff spacer may magnify the extensional strain of a homogeneous damping layer.

의 중앙면과 점탄성layer의 중앙면 사이의 거리의 비이다.

이는 (1)式과 유사한 形態로서 하나의 均一한 layer에 對해서는 이를 적용시킬 수 있으며 이상적인 spacer 效果는 layer의 중앙면으로부터 거리를 멀리 하므로서 damping 效果를 上昇시킬 수 있다.

space가 있는 均質한 점탄성layer의 배열을 Fig. 6에 나타내었다. 이 그림은 이상적인 spacer를 지닌 계산된 damping 동작의 예이다.

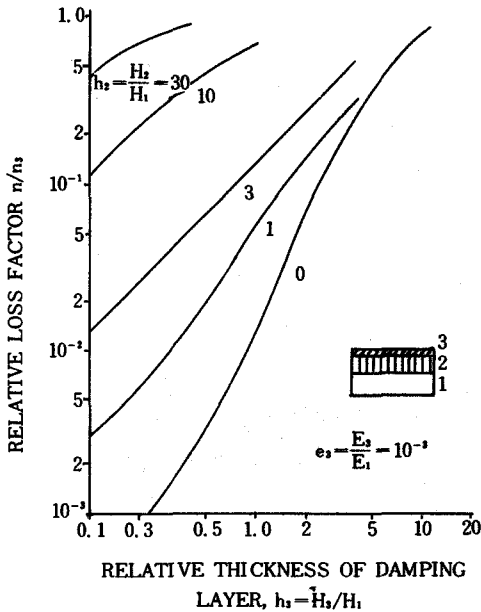


Fig. 6. Calculated damping performance of a free viscoelastic layer with an ideal spacer.

3.2 Constrained layer damping

Constraining 形態의 layer가 damping材料 위에 부착되면 剪斷damping은 extensional damping보다 크게 되는것처럼 나타나며 사실상 똑같은 무게에서 비교하더라도 전단damping을 使用하는 것이 extensional damping을 사용 하는것보다 더욱 效果的이다.

Fig. 7은 이에 포함된 原理를 說明하고 있다.

Kerwin은²⁾ 板사이에 끼인 점탄성layer의 剪斷特性에 의해 惹起되는 damping의 일반적인 해석방법을 제공했다. 그는 damping이 주파수에 依存한다는 것을 증명하였으며 damping材料의 최적두께도 발견하였다.

일반적으로 粘彈性layer와 彈性layer가 板에 부착되면 extensional damping과 剪斷damping이 일어나는 複合材料를 얻을 수 있다.

두개의 점탄성layer가 板에 부착된 damping 形態에 관한 해석이 Ross, Kerwin, Dyer에 의해 開發된 이래 constrained layer를 使用한 damping원리는 다음의 두 방향으로 발견 되었는데

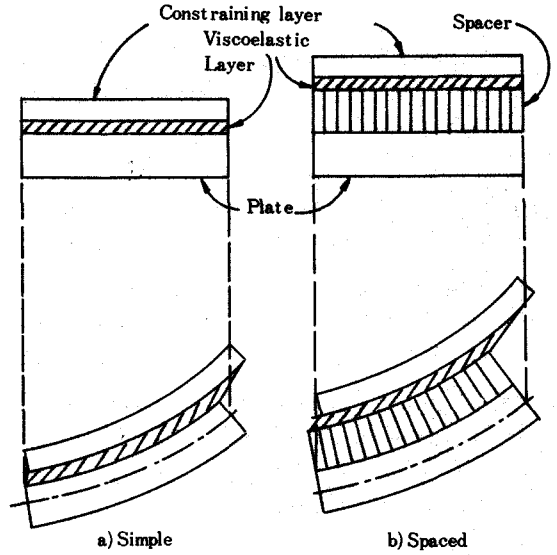


Fig. 7. A shear-stiff spacer can magnify the shear of a damping layer.

데 하나는 structural member에의 응용이 가능한 damping-tape이다.

3.2.1 Damped structural sheet

structural sheet의 제조에 있어서 damping 기술의 응용은 매우 적합하다.

Fig. 8과 Fig. 9는 두가지 形態의 감쇄구조를 가지는 sheet를 나타낸것이다.

감쇄된 薄板 sheet는 粘彈性 damping 材料의 均一한 층으로 분리된 構造로 되어있으며 이러한 sheet는 여러가지 상품명으로 판매되고 있다. 꿀벌집같은 감쇄sheet의 제조는 규정된 꿀벌집같은 構造에 粘彈性 damping材料인 constrained layer가 덧붙여진 形態로 構成되어있다. 이러한 材料들은 構造物의 振動을 最小化시키는데 使用하며 항공기와 미사일의 振動實驗을 하는 고정지반에도 응용된다.

Fig. 10은 보통의 laminated beam과 감쇄된 laminated beam의 전형적인 비교그림이다. 이 그림은 基本的인 共鳴週波數 η_c 에 對한 여기주파수 η 의 比의 函數로서 끝점의 轉達性 $T(\ell)$ 을 比較하고 있다. beam의 振動은 damped beam의 형태로 크게 감소하였다. 예를들면 감쇄된 알

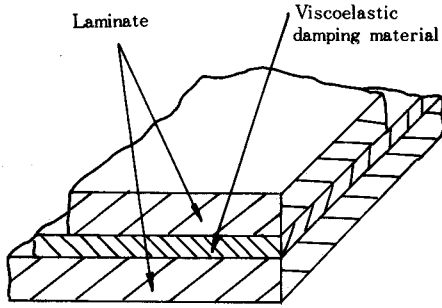


Fig. 8. Viscoelastic damped laminated sheet

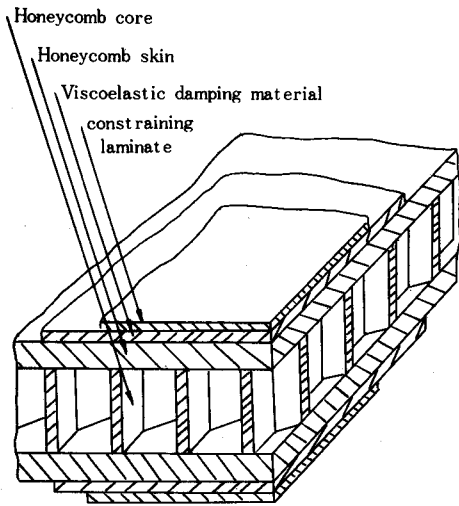


Fig. 9. Viscoelastic damped honeycomb sheet

루미늄beam의 증폭인자는 10인데 比하여 보통 알루미늄beam의 증폭인자는 300이었다. 그리고 共鳴振動의 감소는 beam 자체의 週波數가 크면 클수록 크게 나타났다. 감쇄처리된 beam의 여기는 보통beam의 5 번째까지의 조화파에 對해 100배 가량 증폭되며 감쇄처리된 beam의 共鳴 peak는 octave당 4dB의 율로 감소하는데 이는 週波數가 높을수록 더 크게 감쇄되는것을 의미한다.

유리섬유로 強化된 epoxy laminate 사이에 特殊한 BTR(Broad Temperature Range) 고무를 結合시킨 감쇄샤쉬 board를 제조하는 것이 可能해졌다.

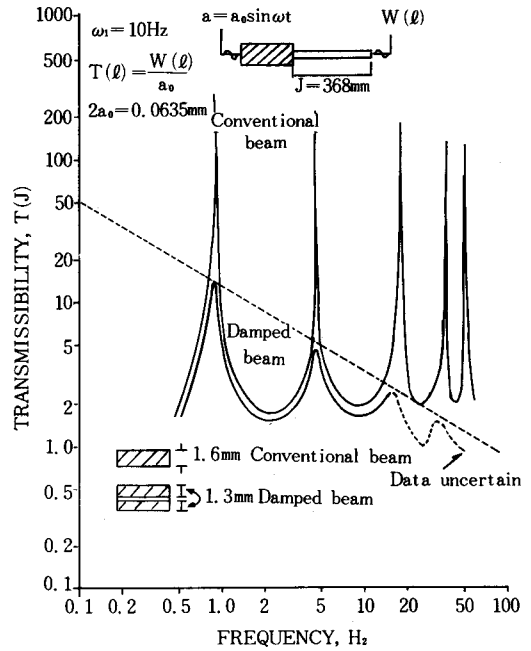
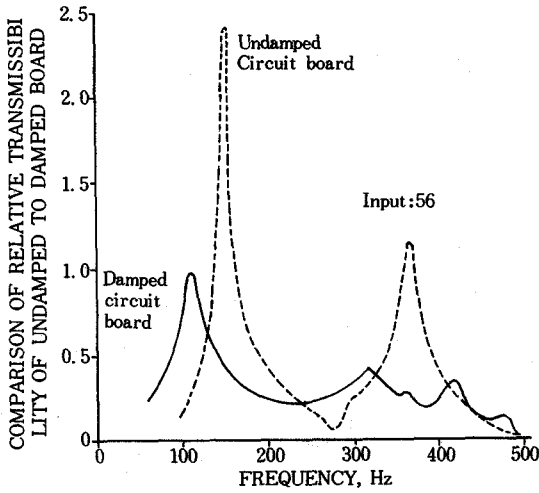


Fig. 10. Comparison of ekd point transmissibility of sojrd and damped aluminium beams at room temperature as a function of the ratio of excitation frequency to fundamenteal resonant frequency

Fig. 11은 電子回路가 board에 부착되었을 때 board에 對한 전형적인 transmissibility 曲線을 보여준다. 이 曲線들은 damping 材料가 共鳴 振幅을 50~60%까지 감소시킨다는 것을 說明하고 있으며 이러한 振動의 감소는 電子裝備의 신뢰성을 상당히 높여 준다.

'Rigidamp' 形態의 damping laminate는 Barry會社에서 開發하였으며 잠수함과 우주선의 光 panel에 使用되었다. 光 panel의 cantilever 効果는 振動과 damping問題를 惹起시켰으며 이러한 問題는 주위를 진공으로 할 경우에는 해결될 수 있다. damping laminate 効果는 Fig. 12에서 說明되었는데 rigidamp beam이 있고 없는데 따른 solar panel의 끝점 증폭에 관한 비교이다. 군사적인 측면에서 감쇄된 laminate 効果는 미사일에 使用되는 電子裝備가 振動이 있는 나쁜상태에서 나타나는 문제점을 해결 하여주



* CURVES BASED ON NORMALISED TRANSMISSIBILITY OF 1 FOR DAMPED BOARD.

Fig. 11. Typical transmissibility curves showing how 'Dynadamp' material reduces resonance amplification by 50 to 60% compared with that exhibited by undamped material

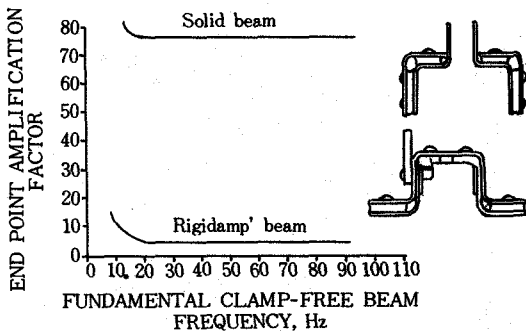


Fig. 12. Performance of the solar panels of the Ranger spacecraft, and typical panel cross-section.

기 때문에 매우 重要하다. 그리고 유리섬유로 強化된 plate에 매우 重要한 電子장비가 부착되었을 때 유리섬유로 強化된 수지를 Rigidamp mounting plate로 대체함으로써 주위의 振動條件에 依해 전자장비가 훼손되는 것을 방지할 수 있다.

Fig. 13은 plate를 대체하였을 때 glass fiber

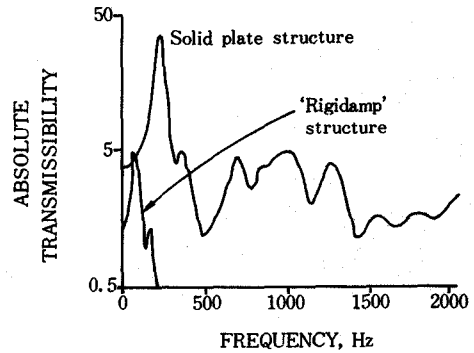


Fig. 13. Comparison of response curves of solid and 'Rigidamp' mounting plates in ICBM war-head

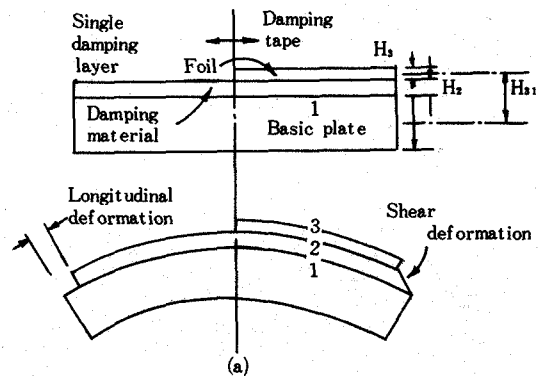


Fig. 14. (a) Energy absorbing actions compared for single damping layer (left) and tape which is a damping layer plus metal foil (right). Foil constrains the damping layer and makes it deform in shear.

와 rigidamp의 응답 곡선을 비교한 결과이다. 여기서 나타난 결과를 비교하여 볼 때 粘彈性材料를 사용함으로써 절대 전달성 (absolute transmissibility)이 매우 감소됨을 알 수 있다.

3.2.2 Damping tapes

一般的으로 damping tape는 tape가 부착되는 baseplate와 比較할 때 통상적으로 상당히 얇으며 damping 효과 η 는 다음식으로 나타낼 수 있다.

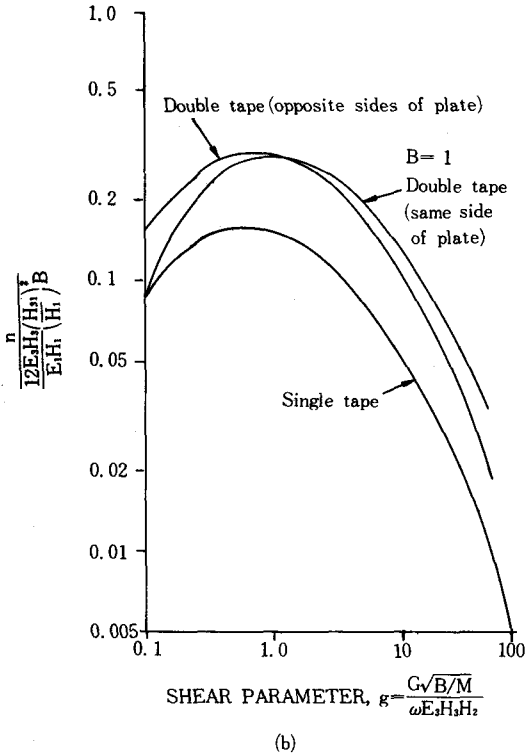


Fig. 14. (b) Damping function for three tape configurations shows tapes can provide significant increases in damping effectiveness η over wide ranges of frequency. Two tapes on opposite sides of a plate double the single tape damping effect over identical frequencies. Superposed tapes give about the same maximum damping, but the curves shift to the right, giving best damping at lower frequencies (high g values) for design, other families of curves should be plotted for other values of loss factor β .

$$\eta = 12 \frac{E_3 H_3}{E_1 H_1} \left(\frac{H_{31}}{H_1} \right)^2 \beta g / [1 + 2g + (1 + \beta^2)g^2] \dots\dots\dots(3)$$

여기서 H_1 , H_3 와 H_{31} 은 Fig. 14(a)에서의 차원을 나타내었으며 E_1 과 E_3 는 base plate와 tape foil의 彈性 modulus이며 β 는 材料의 손실인자(= $\tan \delta$)이다

Unger⁹⁾는 전형적인 粘彈性材料는 그들의 損失인자가 0.2와 2 사이에 있는 材料라고 하고 damping과 연관된 전단 parameter를 g 라고 하여 다음과 같은 식으로 나타내었다.

$$g = \frac{G(B/M)^{\frac{1}{2}}}{\omega E_3 H_3 H_2} = \frac{G H_1}{4\pi f E_3 H_3 H_2} \left(\frac{E_1}{3\rho_1} \right)^{\frac{1}{2}} \dots\dots(4)$$

여기서 H_2 는 dissipative layer의 두께이며 B 는 流動強性이고, M 은 plate의 단위면적당 質量이며 e_1 은 plate의 密度이다. 전단매개변수 g 는 物理的인 해석이 가능한데, 部分的인 전단교란이 일정한 값으로 감소된 범위 내에서는 g 는 振動波長과 거리의 比에 依存한다. B式은 Fig. 14에서 하나의 β 값으로 接續하였는데 damping 效率 η 는 g 값이 작은(高週波)領域에서는 g 와 거의 線形的으로 變化하며 $g=1/(1+\beta^2)^{1/2}$ 에서 最大가 되고 g 값이 큰 낮은 週波數領域에서는 g 와 역으로 變化한다.

그래서 3式은 주파수와 溫度가 damping材料

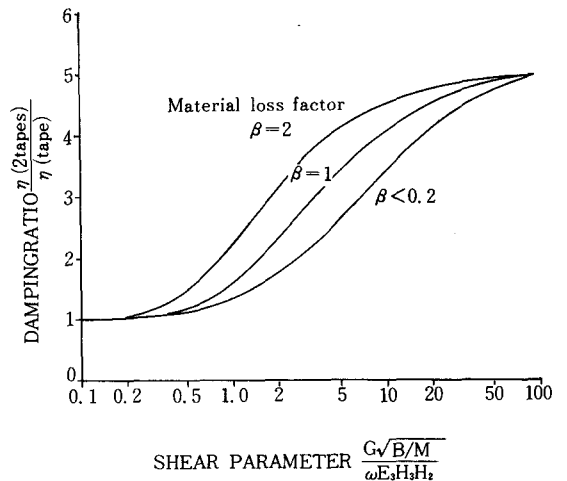


Fig. 15. Damping ratio curves are useful when converting a one-tape design into a design with two tapes superposed. A double tape design is nearly three times as a single tape when g is approximately equal to 1, and a dissipative layer of high β value is used.

의 β 와 G 에 미치는 영향을 제공한 식이기 때문에 damping tape를 設計하는 데는 基本的으로 사용되는 식이다. 그러나 重量이 무거운 構造物일 경우에는 적합한 damping을 얻기 위해서 양면에 damping材料가 부착된 양면 tape를 이용한다. Fig. 15는 이러한 중첩에 의해 얻어진 damping特性을 보여준다. 이 그림에서 보면 高週波領域에서는 양면 tape는 tape가 하나인 것처럼 거동하지만 저주파 영역에서는 tape가 한 면인 것보다 월등히 좋다.

3.3 Constrained damping layer와 nonconstrained damping layer의 比較

nonconstrained damping layer에 의해 나타나는 damping은 材料의 重量의 자승에 거의 비례하며 constrained damping layer에 의해 나타나는 damping은 重量에 거의 비례한다. 最適 damping 材料를 선택하는데 있어서 base plate의 무게에 비해 damping材料의 무게가 10%와 20% 사이에 있는 damping 物質은 두 形態가 모두 비슷한 效果를 나타내는데 10% 以下에서는 constrained damping이 效果的이고 20% 以上

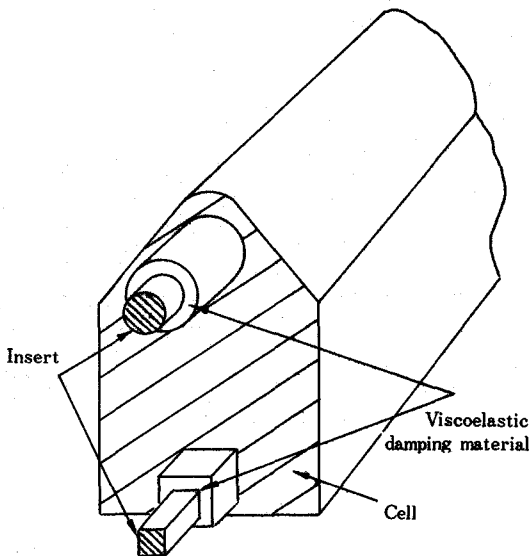


Fig. 16. Model illustrating the cell insert design of damped structural beams (6)

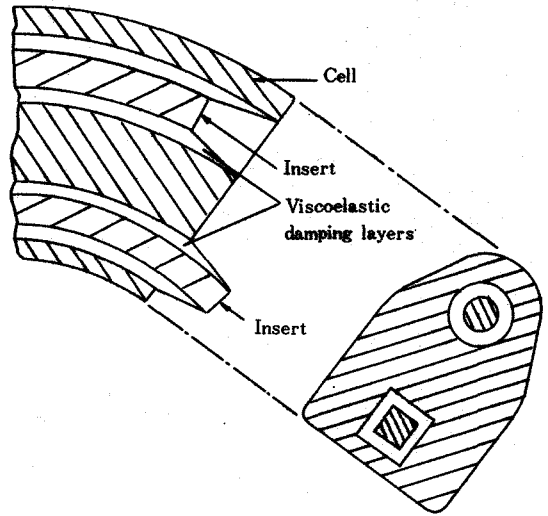


Fig. 17. Longitudinal cross-sectional view of cell insert beam model, illustrating shear of the viscoelastic damping layers between the insert and cellular portions of the beam (6)

에서는 non-constrained layer의 damping이 效果의 이다.

3.4 감쇄구조를 지닌 beam의 種類

하중을 지지하는 성분에 점탄성 剪斷 damping mechanism을 도입한 cell insert기법이 딱딱한 構造物에 damping 材料를 使用함으로써 開發되었다. Fig. 16은 cell-insert beam의 모형을 나타낸 것이다. 두개의 삽입물이 있는 면에서의 굴곡진동은 중재된 damping layer의 粘彈性 效果 때문에 cell의 끝 부분과 삽입물들 사이에 상대적인 운동을 증가시킨다.

Fig. 17은 삽입물과 cell 사이에서 振動週期の 아래부분에 대한 전단상태를 나타내었다. 粘彈性 damping layer가 剪斷力을 받았을 경우에는 원형삽입물은 beam쪽으로 위축되었으며 각형삽입물은 cellular body의 한계를 벗어나 밖으로 뺏어나왔다. 여기서 cell과 삽입물 양쪽은 하중을 전도하는 構成体이다.

Fig. 18은 cell-insert 기법을 적용한 전형적인 model로서 일반적으로 이러한 形物을 제조할 때 다수의 삽입물을 포함시키면 beam의 5인 振

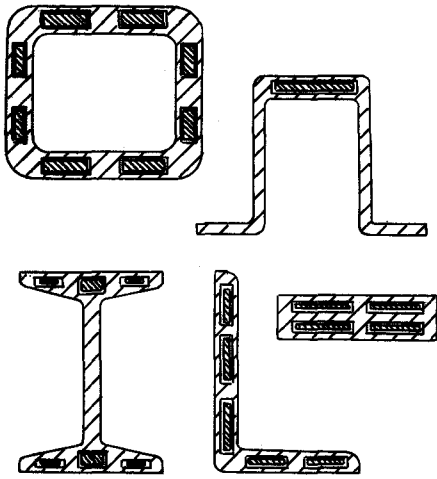


Fig. 18. Cross-sections of cell-insert damped beam designs for common structural shapes (6)

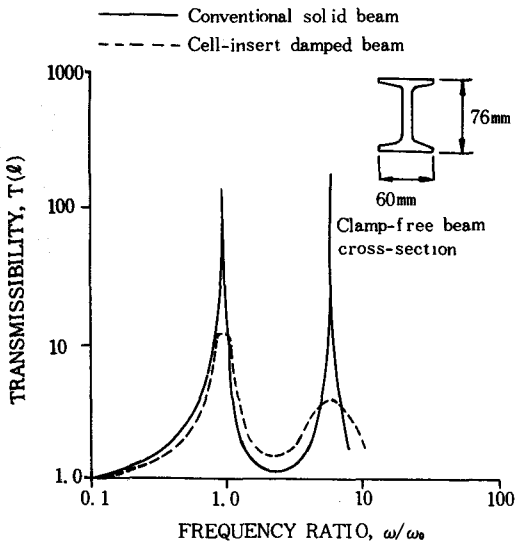


Fig. 19. Comparison of end point transmissibilities of solid and damped 76mm I beams as a ratio of excitation frequency to fundamental resonant frequency

動은 물론 굽힘振動에서도 높은 damping이 얻어진다. 그리고 bolt나 rivet같은 제조설비가 다수 포함되면 振動時 粘彈性 damping layer의

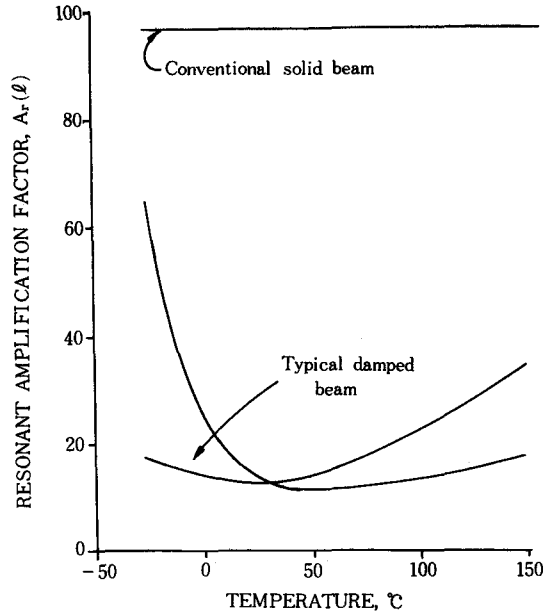


Fig. 20. Fundamental frequency resonance amplification factor of a conventional solid beam and typical damped laminated beams as a function of temperature. The curves for the damped beams refer to two different viscoelastic damping materials.

剪斷力을 억제한다.

Fig. 19는 cell-insert 기법의 효과에 對한 예로서 典型的인 I字 beam과 cell이 insert된 I字 beam의 끝 점의 전달성 $T(\ell)$ 을 基準共鳴週波數 ω_n 에 對한 여기 주파수 ω 의 比의 函數로서 比較한 것이다.

初期共鳴週波數에서 solid beam의 振動幅은 damping beam보다 15배나 크며 두번째 조화공명주파수에서 solid beam은 damping beam보다 40배나 여기 되었다.

Fig. 20은 一般의인 beam과 damping beam의 週波數 共鳴 증폭계수 $A_r(\ell)$ 의 높은 溫度와 낮은 溫度에서의 效果이다. 一般의인 알루미늄 beam은 實驗溫度에서 一定한 共鳴 증폭계수를 가지나 damping laminated beam의 典型的인 곡선은 低溫에서의 공명 증폭계수가 실온보다 더욱 높게 나타난다.

그러나 粘彈性 damped beam의 共鳴振動은 室溫에서는 낮은 값으로 제한된 반면 極도로 높은 溫度에서는 効果의으로 완충되지 않는다.

3.5. Strip damper

一般的인 構造物의 共鳴은 strip damper를 사용하여 완충시킬 수 있으며 Fig. 21과 22는 전형적인 strip damper의 構造를 보여준다. Fig. 21은 삽입물을 싸고 있는 retainer strip의 使用方法을 說明한 것으로서 Fig. 21(a)에서는 삽입물이 점탄성 damping材料의 막에 依해 retainer 벽으로부터 분리된 것을 나타내었고 Fig. 21(b)는 strip damper에 retainer strip과 insert가 부가 될 때 一般的으로 設計된 構造에서 damping을 조절할 수 있는 方法을 제공한다.

이러한 構造物에 strip damper를 부착하는 理想的인 위치는 構造物에서 最大 振幅이 나타나는 部位에 十字로 연결하면 되는데 이때에 s-strip damper의 끝이 最大 振幅이 나타나는 쪽으

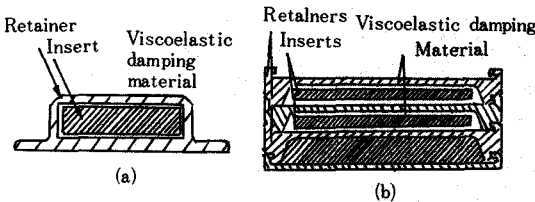


Fig. 21. Strip damper cross-sections for (a) single insert design, and (b) interlocking multi-insert design (6)

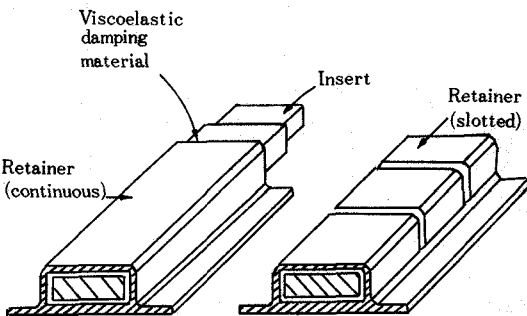


Fig. 22. Strip damper designs with (a) continuous retainous retainer, (b) slotted retainer (6)

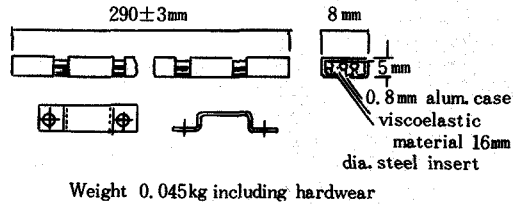


Fig. 23. Strip damper and securing bracket (6)

로 위치하여야 한다.

Fig. 22(a)와 22(b)는 유사한 形態의 strip damper의 모형이며 Fig. 23은 構造物에 bolt가 박힌 strip damper의 모형이다. Fig. 23에서의 aluminium case는 Fig. 22(b)에 보여진 strip damper의 slotted retainer와 같은 역할을 한다.

4. Damping이 높은 高分子 材料

4.1 Damping 자료의 표현 방법

새로운 高分子 材料가 開發됨에 따라 damping材料를 design하는데에 必要한 damping資料를 연기가 점차 어려워지고 있다. 보통 damping자료는 다음의 세가지 中の 하나로써 표현되는데

(a) Fig. 24에서 나타난 isometric graph의 使用.

(b) Fig. 25에서 표현한 contour plots의 使用

(c) Fig. 26에서 표현한 multiple curve의 使用이다.

(c) 方法은 資料의 合理的인 도식표현 方法을 제시하며 interpolation은 어렵지만 操作溫度가 試驗溫度와 같을 때 data를 읽을 수 있도록 되어 있다.

(b) 方法은 週波數와 溫度에 따라 變化하는 彈性 modulus G' 와 손실인자 β 의 變化개념을 부여한다. 그러나 주요한 결점은 이러한 값들이 3次元의인 plot로부터 쉽게 읽어낼 수 없는 점이다. Fig. 26에서 나타난 multiple graph는 아주 알맞게 읽을 수 있도록 되어 있으며 하나의 溫度에서 점결된 曲線은 等溫 graph에서

일정한 溫度 profile數의 projection으로 간주되고 있다.

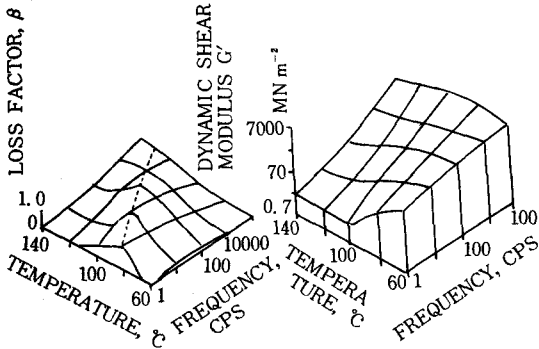


Fig. 24. Isometric graphs for a polycster (8)

4.2 Plastics

200cps의 週波數 범위에서 高分子 damping材料的 loss modulus E"의 溫度 曲線을 Fig. 27에 나타내었다. 제일 위와 중간 曲線群은 水溶液 狀態로서 spray gun과 knife를 이용하여 금속판에 도포할 수 있는 材料이며 이들 材料의 대부분은 흑운모(vermiculite)로 充填된 材料이다. Fig. 27에서 最上部의 그림은 溫度 分布가 협소한 材料들로서 유리 轉移點이 넓게 퍼져있는 材料에 對한 曲線群이다. (ΔT 의 범위는 20°C에서 40°C) 이들 材料는 polyvinyl acetate(6), polyvinyl propionate(4), 가소화된 vinyl aceta-

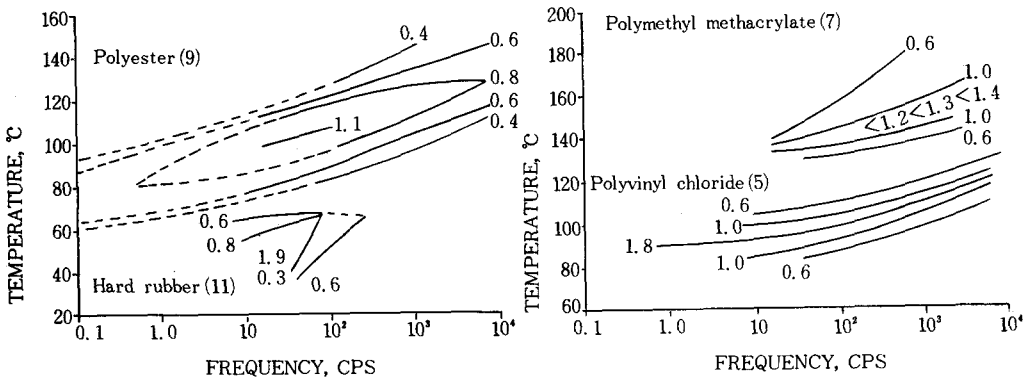


Fig. 25. Contour plots for high damping materials (numbers in brackets refer to position of material in Table 1 (8))

Ungar⁸⁾와 Hatch가 만든 damping材料的 資料는 모든 材料에 對해서 週波數-溫度面 內에서의 일정한 손실인자 β의 윤곽을 점철할 수 있도록 되어 있고 損失因子가 最大인 領域에서 剪斷(혹은 引張) 應력의 最大값이 수록된 것으로 構成되어 있다.

Table 1은 damping材料에 對한 資料를 제시하였는데 Table에서 나타난 자료는 높은 damping領域에서 손실인자와 溫度와 週波數와의 관계를 나타낸 資料이기 때문에 energy의 損失이 작은 構造物을 설계하는데 使用하는 資料로서는 적당하지가 않다.

te의 copolymer(1, 2, 5) 및 acrylate(3) 이다. 이 graph에서 (5)와 (6)의 材質을 比較하면 充填劑의 添加가 loss modulus의 最大點을 상당히 증가시켰으며 보다 높은 溫度쪽으로 最大點을 移動시켰다는 것을 알 수 있다.

Fig. 27의 가운데 曲線群은 상당히 넓은 溫度 分布를 가진 가소화된 vinyl acetate copolymer (12)와 構成比를 달리한 copolymer들에 對한 曲線들이다. 이러한 材料들은 産業分野와 自動車 産業을 위해 特別히 고안된 材料들의 資料이며 (11)같은 材料는 높은 溫度에서도 使用이 可能한 材料이기 때문에 特別히 自動車産業 분야에 有用

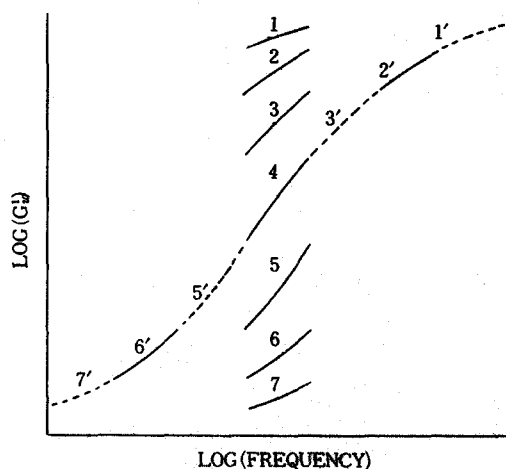


Fig. 26. Construction of composite frequency-dynamic shear modulus curve from data obtained within limited frequency range and at different temperatures. Curves 1-7 relate to increasing temperature, that for curve 4 being the 'reference temperature' T_0 .

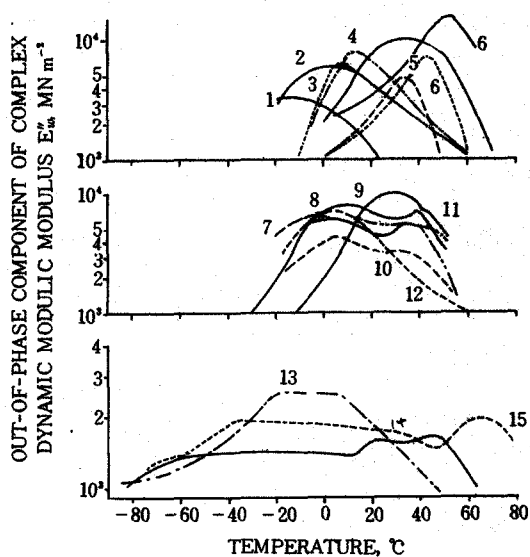


Fig. 27. E'' vs. temperature curves for a range of polymers which have been developed for damping purposes (5)

Table 1. Dynamic property data for wide range of temperature and frequency

Material	Max loss factor β_{max}	Position of β_{max}		Shear modulus G' at β_{max} $MN m^{-2}$
		Frequency cps	Temperature $^{\circ}C$	
Plasticised polyvinyl acetate	2.6	50	5	15
Polystyrene	2.0	2000	140	100
Polyisobutylene	2.0	6000	25	2.0
Polysulphide rubber (Thiokol RD)	1.9	7	5	70
Polyvinyl chloride	1.8	20	92	23
Buna N (Type B-1), vulcanised	1.5	4000	20	10
Polymethyl methacrylate	1.5	1200	142	100
Plasticised PVC (Koroseal)	1.45	660	50	24
Polyester	1.1	200	108	70
Polytetrafluoroethylene (Teflon-TFE)	1.0	400	23	40
Hard rubber	1.0	40	60	70
Nitrile rubber	0.8	1800	20	110
Urethane rubber (Shore 80A)	0.8	30	-8	16
Filled rubber	0.5	2500	22	230
Urethane rubber (Shore 94A)	0.4	140	-23	300
Aquaplas (water soluble)	0.38	1000	40	167

한材料이다.

Fig. 27의 가장下部의曲線群은 가장 넓은溫度分布를 지닌材料들의曲線群이다. 이러한材質들은金屬板에 두꺼운film의形態로接着될수 있는 vinyl chloride copolymer의 혼합물들이다.

Fig. 28에 나타난曲線은 금속판에粘彈性layer가 입혀진材料의複合損失인자의溫度曲線이다. 여기에 사용된 damping 材料는大部分의 흑운모로充塡되어 있으며 Fig. 27에서 사용한 재질들이다. (3, 4, 5, 6)은 협소한溫度分布를 가진材料이며 (8, 10, 11, 12)는 중간 정도의溫度分布를 가진材料들이다.

Fig. 28에서溫度分布가 협소한材料들의 low modulus 최대값은 서로 다른 값을 가지거나複合損失因자의最大값은 거의 같은 값을 가진다. 그리고 Obsert는 layer의密度와剛度사이의關係에서 layer의 두께가 감소한效果는 stiffness를 증가한效果와 같다고 하였다. 특히 200 cps의週波數에서 damped structure에對한 damping材料의質量比가 0.1과 0.2 사이에 있을 때의 금속과粘彈性 layer와의 조합構造가複合損失 계수가最大로 된다는 것을 밝혔다.

溫度分布를 확대 시킴으로서複合損失 계수의最大값의 감소는 분포법칙에 따른다. 약 50°C의溫度分布를 지닌材料는最大損失因子(質量比가 0.2일 때)가 0.1인領域에 있을 때 이러한材料는加工성이 좋은材料라 간주한다.

溫도와 관련된損失因子分布法則은

$$\frac{E''_{max}}{E_{\infty}} \Delta T \approx 6.0 \text{ 으로서}$$

여기서 $\frac{E''_{max}}{E_{\infty}}$ 는 표준화된最大損失 modulus이다. 여기서 기준값 E_{∞} 는 유리와 같은特性이 나타나는高週波領域에서의動的인 modulus E'' 의極限값에比例한다. 그리고 ΔT (화씨) E'' 가 $1/2E''_{max}$ 과 거의 같을 때 E'' 와溫度曲線의幅을意味한다.

4.3 고무

Fig. 29는 가끔 damping을 목적으로使用할

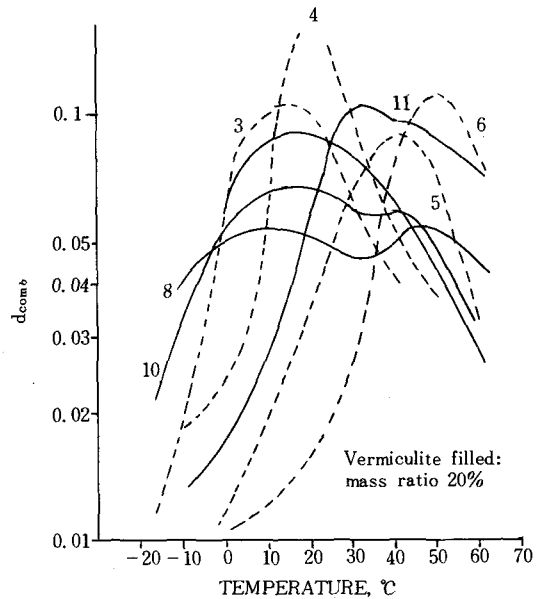


Fig. 28. Combined loss factor curves for several of the materials shown in

수 있는 여러가지 고무의 $\tan \delta$ peaks를 보여주고 있다.

이 그림은週波數가變化함에 따라 $\tan \delta$ 가變化하는特性을 잘 나타내고 있으며 frequency에 따라 damping peak가 다르게 나타나는 것을 보여주고 있다.

Table 2는 실제로 고무가 사용되는領域에서週波數 범위가 10~1,000cps에 있고 $\tan \delta$ 가 0.5보다 큰 온도 범위에對해서 언급하고 있다. Fig. 30은溫度에 따른 이들 고무들의 $\tan \delta$ 와彈性剪斷 modulus의 그림이다.

single layer와 constrained-layer의 damping 기구는 높은 loss tangent와 높은彈性 modulus를 지닌 고무를 필요로 하며 더우기 높은溫度에서도 이러한特性을 유지하여야 한다.

Fig. 30에서 보는 바와 같이 특히 PIB (polyisobutylene)는 넓은溫度영역과週期가 10^6 보다 큰狀態에서도 $\tan \delta$ 가 0.5보다 큰材料임을 알 수가 있으며 Hypalon 20의 damping特性은 PIB의 damping特性과 비슷하나溫度分布 범위

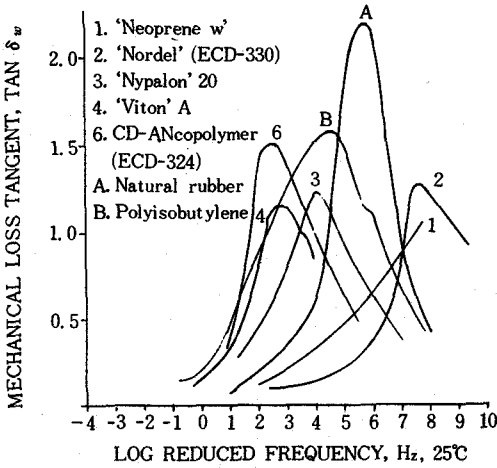


Fig. 29. $\tan \delta_w$ -reduced frequency curves for several rubbers (4)

Table 2. Temperature range with and $\delta > 0.5$ Throughout frequency $10 < f < 1000\text{cps}$

Polymer	Temperature (°C) Range		
	from	to	°C
Hypalon 20	- 5	13	18
Viton A	4	25	21
CD-AN copolymer	4	25	21
Natural rubber	-45	-23	22
SBR	-33	-14	19
Polyisobutylene	-47	18	65
Polyurethane No. 1	-34	2	36
Polyurethane No. 2	17	50	33
Polyurethane No. 3	27	69	42
Polyurethane No. 4	34	66	32
Polyurethane No. 5	-35	30	65
Polyurethane No. 6	9	45	36

가 작다. 그러나 PIB도 溫度가 25°C보다 높고 週波數가 10cps 以下일 경우에는 $\tan \delta$ 의 크기가 매우 떨어지므로 使用하기가 어렵다.

viton A와 CD-AN共重合體(Neoprene ILA)는 週波數 그림에서 볼 때 PIB의 왼쪽에 위치하여 高 damping材質로서의 特性은 높은 溫度 영역에서 나타나지만 이 溫度의 영역에서는 작다.

이와 같은 高分子들의 damping特性을 더욱 效果의 으로 이용하기 위해서 特殊한 고무가 開發

1. 'Neoprene' W
2. 'Nordel' (ECD-330)
3. 'Hypalon' 20
4. 'Viton' A
5. 'Neoprene' ILA (ECD-377)

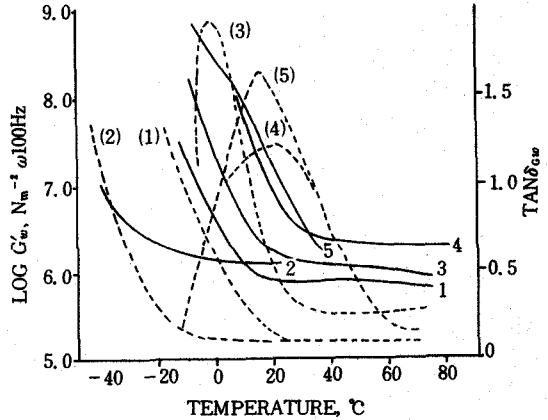


Fig. 30. In-phase component of complex dynamic shear modulus (ulbroken line) and tangent of the loss angle (broken line) data for several polymers (4)

되었다.

Dupont社는 實驗的으로 여섯가지 種類의 polyurethane을 生産하였는데 Fig. 31은 이들 여섯 種類의 loss tangent 曲線을 25°C에서 같은 週波數에서 얻은 比較曲線이다.

Fig. 31에서 보면 loss tangent peak의 위치는 초음파 週波數 영역에서 낮은 週波數 영역으로 變化하였는데 이러한 事實로부터 polyurethane의 조성비를 變化시키면 最大 loss damping 領域은 polyurethan(곡선 6의 最大 loss-damping 領域에서 좌측으로 移動시킬 수 있다는 것을 보여준다.

一般的으로 고무는 그들의 damping特性에 의해 세가지로 구분 된다.^{10, 11)}

(1) 室溫에서 有效한 좁은 damping 領域을 가진 범용고무.

(Table 2에서 1~5번까지)

(2) 65°C 부근에서 넓은 damping 領域을 지닌 polyisobutylene 고무

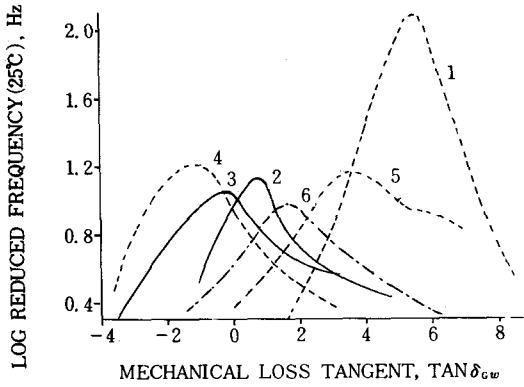


Fig. 31. Mechanical loss tangent-log(reduced frequency) curves for a range of experimental polyurethanes. See Table. 2.

(3) 넓은 温度와 주파수 범위에서 매우 넓은 damping 領域을 지닌 polyurethane 고무이다.

polyurethane의 温度범위는 범용 탄성체의 温度범위에 비해 매우 넓으며 架橋도 가능한 長點도 소유하고 있다. 이러한 特性은 粘彈性 材料가 static load에 의해 계속적으로 stress를 받을 경우에 나타나는 creep 問題를 最小化한다.¹²⁾

4.4 動的特性을 改善하기 위한 plasticiser의 使用

polymer에 結合된 plasticiser들은 유리轉移 温度를 낮추는 것처럼 damping이 最大로 나타나는 地點의 温度를 낮춘다.

plasticiser를 使用 함으로써 最大 damping이 일어나는 地點의 温度가 낮아진다는 것은 特定한 温度에서 最大 damping이 일어나는 週波數가 감소한다는 것과 같은 意味이다. 特히 유리轉移點을 낮출 수 있는 plasticiser들은 base polymer에 녹을 수 있는 plasticiser이어야 하고 유리轉移點을 어느 정도 낮출 수 있는가에 對한 것은 plasticiser 자체의 유리轉移 温度에 크게 依存한다. 그리고 damping peak가 나타나는 温度를 낮추는데 使用되는 有效한 plasticiser는 粘度가 낮고 温度係數가 낮아야 한다.

plasticiser는 유리轉移 温度를 낮출뿐 아니라

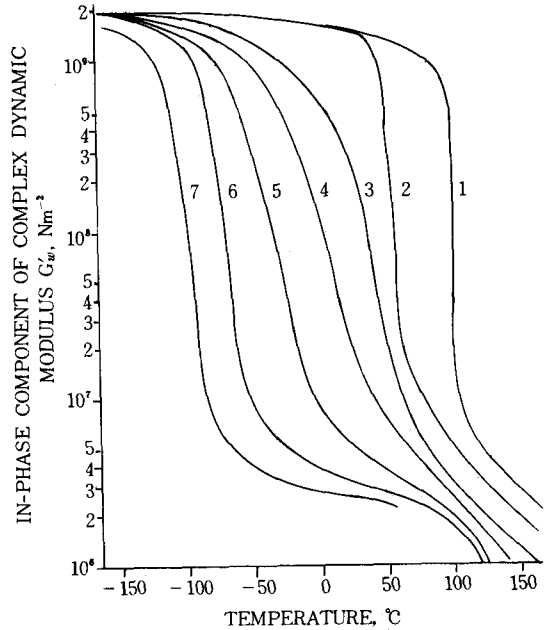


Fig. 32. G'_{ω} - temperature curves for polyvinyl chloride and polyvinyl chloride-plasticiser materials. The plasticiser contents are noted on the appropriate curves in Fig. 33.

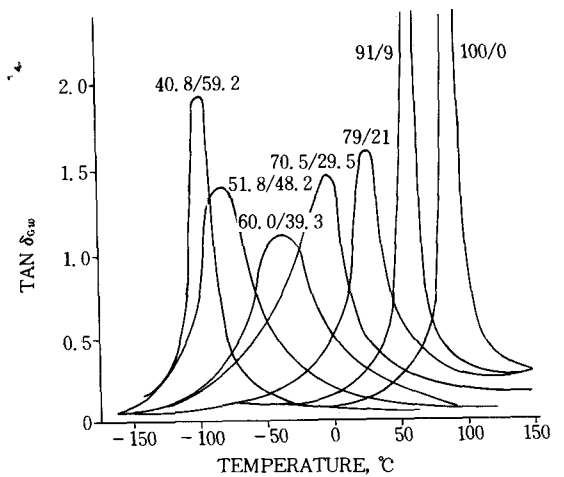


Fig. 33. $\text{Tan } \delta'_{\omega}$ curves for polyvinyl chloride and polyvinyl chloride plasticiser materials(4)

통상 轉移地域을 넓게 한다.

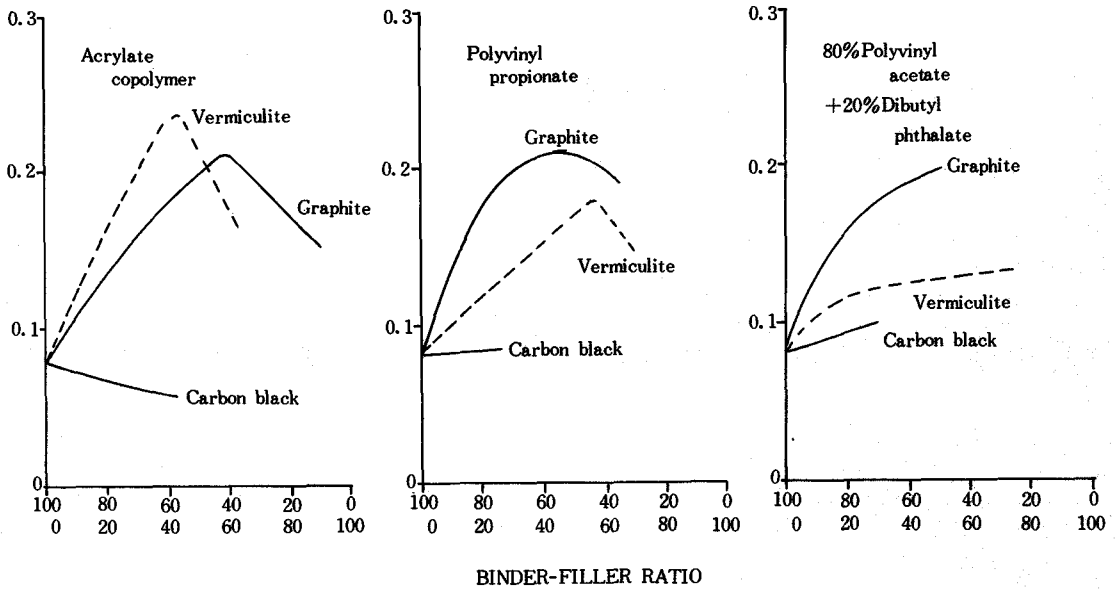


Fig. 34. Dependence of $\tan \delta_{cw}$ on binder-filler ratios (1)

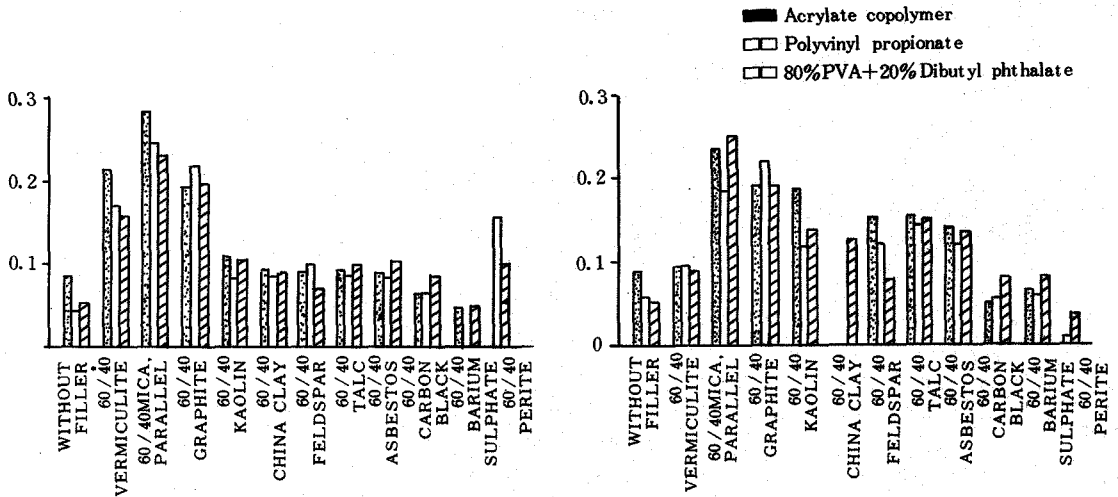


Fig. 35. (Top) levels of damping maxima, $\tan \delta_{cw}$, for a coating on sheet metal. Mass ratio, 0.2; binder-filler ratio, 60/40; frequency, 200Hz. (Bottom) Levels of damping maxima for various fillers for constant coating thickness of 1.5mm on 1 mm sheet metal. Binder-filler ratio, 60/40; frequency, 200Hz.

Fig. 32와 33은 PVC에 plasticiser의 비를 달리하였을 때 나타나는 효과이다.

이 그림에서 나타난 것처럼 유리轉移 영역의 확장은 plasticiser의 特性에 依存하며 damping

peak의 幅은 polymer와 plasticiser 사이의反應性에 依存하는 것이 나타났다. 그리고 plasticiser가 polymer에 한계 溶解性을 가지거나 polymer와 結合하는 特性이 있으면 넓은 damp-

ing peak가 발견된다.

轉移領域은 용해성이 감소 할수록 확장되며 溫度 peak가 커짐으로서 전이영역은 줄어들는다. 그리고 대수응력온도곡선의 기울기는 轉移領域이 확장됨에 따라 작아지는데 이는 damping이 대수응력곡선의 기울기에 거의 비례하는 경향이 있기 때문이다.

1955年 Obsert는 振動防止 시약으로서 plasticiser를 使用하였으며 정확한 plasticiser의 量을 선택함으로써 振動이 감쇄되어야하는 주파수에 $\tan \delta$ peak가 나타나도록 할 수 있다는 것을 발견하였다.

4.5 動的特性을 變化시키기 위한 充填劑의 使用

damping을 증대시키는 데에 있어서 充填劑의 效果를 Fig. 34와 35에 나타내었다. Fig. 34와 35에 나타난 바와 같이 vermiculite (含水硅酸鹽物로 雲母로 一種임)와 graphite 두 種類의 充填劑는 複合物質의 damping을 증대시켰다. 이러한 效果는 graphite나 vermiculite의 觀상구조와 관련이 있다.

이러한 效果는 표면에 평형으로 층이난 딱딱한 材料가 layer로 使用되고 그 사이에 polymer가 있을 때 이 材料가 外력을 받을 때에는 剪斷變形이 上昇하는 效果와 같다.

充填劑를 使用할 때 또 하나의 이점은 감쇄를 目的으로 한 coating材料가 質量이 많이 나가는 것을 원치 않고 높은 modulus를 지닌 材料를 要求할 때 가볍고 딱딱한 充填劑를 使用하면 $\tan \delta$ peak가 나타나는 주파수를 거의 變化시키지 않고 損失因子를 最大로 감소시킨다.

參 考 文 獻

- 1) Beranek L. L., *Charted Mech. Engr.*, 162 (April) (1959)
- 2) Kerwin E. M. Jr., *J. Acoust. Soc. Amer.*, 31 (July) (1959)
- 3) Kerwin E. M. Jr. and Ross D., Paper presented at 3rd Int. conf. on Acoustics, stuttgart (Sept), (1959)
- 4) Nielson L. E., Buchdahl R. and Levrault R., *J. Appl. phys.*, 21, 607 (1950)
- 5) Obsert H., Bohn L. and Linhardt F., *Kunststoffe*, 51. 495 (1961)
- 6) Ruzicka J. E., *Structural Damping*, Pergamon, Oxford (for ASME) (1959)
- 7) Thurn H., *Kunststoffe* 50, 606 (1960)
- 8) Ungar E. E., *Prod. Engng.*, 31, 57 (1960)
- 9) Ungar E. E., Ross D. and Kerwin E. M. Jr., *Structural Damping*, (Ed. J.E. Ruzicka), Pergamon, Oxford (for SAE), section. 3, P49 (1959)
- 10) 日本ゴム協會誌：稻垣頰二, 岡本弘, 56, 225 (1983)
- 11) R.R. Rahalkar, C.U. Yu and J.E. Mark., *Rubber Chem. Technol.*, 51, 45 (1977)
- 12) Theo Kemperman., *Rubber Chem. Technol.*, 55, 391 (1981)
- 13) Edwin R. Fitzgerald, and Jhon D. Ferry., *Rubber Chem. Technol.*, 55, 15 69 (1981)