

直接接觸方式 熱 및 物質交換 裝置의 傳達現象(Ⅱ)*

金 錫 賢
 <國民大學校 機械工學科 教授>

2.4 液體側 傳達現象

不凝縮性 氣體가 系를 支配하는 境遇(이를 때 면 일부 응축기나 폐열회수장치, 冷却塔, 乾燥 장치 등)의 液體側 熱傳達係數는 氣體側 傳達係數보다 훨씬 커서 全體傳達抵抗에 미치는 영향이 적다고 보지만 잘 設計된 증발기나 응축기 등의 많은 問題에서는 液體側 전달현상이 全體傳達現象을 支配하게 된다(liquid side controlled system). 特히 交換器의 作動流體中 한쪽 만이 상태변화를 하는 境遇(single stream exchanger)를 제외하고는 兩側의 傳達現象을 確實히 파악하는 것이 이러한 系의 解析이나 設計에 必須的인 要素가 된다.

直接接觸式 交換裝置(以下 直接 交換器라 함)에서 液體의 流動形態의 선택은 매우 다양하며 전달계수 역시 個別的인 狀況이나 充填物의 종류에 따라서 달라지므로 一律적으로 제시되지 못하고 있다. 많은 경우 實驗을 通하여 熱傳達 또는 物質傳達係數를 測定하게 되나 開水路, 自由落下液體膜, 液體噴流와 같이 理想化가 可能한 경우, 이러한 傳達係數를 求하기 爲하여 理論的 또는 半實驗的인 解析을 遂行하기도 한다.

수많은 관련 研究結果들은 층류유동에 關한 것과 난류유동의 경우로 구분되고(豫想되듯이 대부분의 直接交換器의 流動領域은 亂流쪽이다), 亂流流動의 解析은 다시 表面更新理論(surface

renewal model), 渦流擴散係數모델(eddy diffusivity model-macroscopic), 微分形渦流모델(differential eddy diffusivity model)로 大別된다. 여기서는 수많은 交換器形態의 資料정리보다 上記와 같이 大別된 液體側 流動영역별로 전달현상해석의 方法을 간단히 정리하고자 한다.

(1) 層流流動의 浸透理論

自由落下液體膜(falling film: 以後 液膜이라 함) 등과 같이 流動形態해석의 理論的 接近이 용이한 경우 층류영역에서의 運動量方程式은 比較的 쉽사리 만들어지고 또한 에너지方程式과 연립으로 풀려질 수가 있다. 特히 열 또는 물질 전달의 境界層內의 速度分布가 一定이라고 假定되는 領域에서는 古典的인 浸透理論(penetration theory)⁽¹⁰⁾이 利用될 수 있다. 이 경우의 에너지 방정식과 初期 및 境界條件들은 非定常 열전도식과 같은 形態로 주어지고 그 解는

$$\frac{T - T_{in}}{T_s - T_{in}} = \text{erfc } \eta \quad (28)$$

$$\eta = \frac{y}{\sqrt{4 \alpha z / u_0}}$$

과 같이 얻는다. 이것으로부터 局部열전달 계수 h 는

$$\frac{h}{\rho C_p} = \sqrt{\frac{u_0 \alpha}{\pi z}}; \alpha \text{는 열확산계수} \quad (29)$$

와 같이 求해지고 같은 方法으로 物質傳達係數 K 는

$$\frac{K}{\rho} = \sqrt{\frac{u_0 \mathcal{D}}{\pi z}}; \mathcal{D} \text{는 물질확산계수} \quad (30)$$

* 本 講座의 (I)은 大韓機械學會誌 第24卷 第5號 pp. 358~366(1984. 10)에 掲載되었음.

로 주어진다.

이 이론은 이어서 소개되는 난류流動에 대한 表面更新모델의 背景이 되며 境界층이 自由表面 近處에 아주 얇은 경우에 妥當하다. 그러나 境界층이 比較的 두꺼워진 유동영역에서는 역시 속도분포가 먼저 求하여져야만 하므로 침투이론의 一般的 適用이 되지 않게 된다.

(2) 表面更新모델

Higbie⁽¹⁷⁾와 Dankwerts⁽¹⁸⁾는 流動의 中心部分 渦流(bulk eddy)가 난류流動의 結果로 表面으로 밀려나면 그 表面에서 非正常열전달이 아주 짧은 時間內에 일어나고 그 渦流는 中心부분에서 밀려나온 다른 渦流에 의해 中心部로 다시 돌아가게 됨으로써 난류流動에서의 自由表面 附近에서 일어나는 傳達現象을 說明하였으며 이와 같은 假說로부터 傳達係數에 대한 關係式

$$\frac{h}{\rho C_p} \propto \sqrt{\alpha f} \quad (31)$$

를 유도하였다. 여기서 f 는 표면이 새로운 渦流로 更新되는 率을 나타내는 주기이며 式 (29)의 $h \propto \sqrt{\alpha}$ 와 같은 형태를 취하고 있음에 유의된

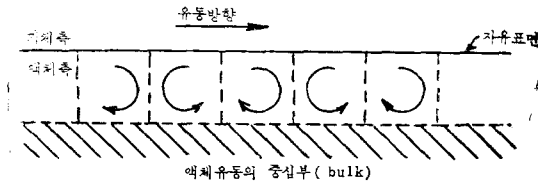


그림 10 直接 接觸하는 층류유동 液體表面의 모델

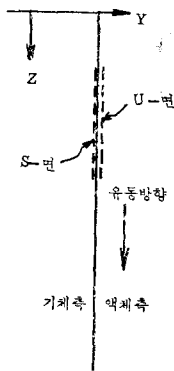


그림 11 큰 渦流의 細胞모델⁽²⁰⁾

다. 이 모델은 침투이론의 擴張으로 간주되며 (pointwise penetration theory) 따라서 난류의 크기가 浸透깊이 보다 훨씬 크다는 假定을 同伴하고 있고 또한 傳達現象이 잘 확립된 경우(fully developed)의 적용에 限한다.

이 이론은 그후 Ruckenstein⁽¹⁹⁾ 등의 많은 研究者들에 의해 改良되어 왔으며 Fortescue와 Pearson⁽²⁰⁾에 이르러 큰 渦流들의 表面細胞모델 (cellular model 그림 11 참조)로 變貌하고 있으나 많은 실질적인 缺點들을 보완치 못하고 있다.

(3) 渦流擴散係數모델

自由表面近處에서의 傳達現象解析에 渦流확산 계수(eddy diffusivity: ϵ)가 導入된 것은 Levich⁽²¹⁾, Davies⁽²²⁾, King⁽²³⁾ 등에 依해서 이다. 난류流動의 여러 傳達法則들(transport laws)은 時間에 對한 平均值를 定하는 統計學的 處理의 結果로 레이놀즈 플럭스項 $\overline{v'\phi'}$ (여기서 v' 및 ϕ' 는 각각 속도 및 고찰대상변수의 변동량)을 포함하고 있고, 이것은 다시 Boussinesq의 가설에 따라 $\epsilon \frac{\partial \phi}{\partial n}$ 으로 대치 됨으로써 渦流확산계수 ϵ 이 도입된다. ϵ 은 그 背景에서 짐작되듯이 유동장 전체에 걸쳐 一定치가 않으며 自由表面이 있는 유동의 경우 그 표면에서는 아마도 表面張力의 영향으로 세기가 소멸된다. 직접교환기에서 液體側 전달현상은 특히 이 자유표면 근처에 그 重要性이 集中되므로 어떠한 機構에 依하여 난류가 自由表面 가까이로 가면서 소멸되는가, 또는 그 근처의 난류세기의 分布가 어떠한 형태인가 하는 문제가 매우 重要的 課題가 된다.

渦流擴散係數는 난류流動의 位置와 物性值들의 函數가 되는 여러 特性值들로 표시될 수 있는데 잘 알려진 Prandtl의 混合길이理論(mixing length hypothesis)이 대수표시식의 보편적인 方法으로 引用되며 v 와 l 을 각각 난류세기 및 난류混合 길이라 할 때

$$\epsilon = v \cdot l \quad [m^2/s] \quad (32)$$

로 주어진다. 여기서 난류의 세기 및 혼합길이를 代數式 形態로 求하든지 微分方程式 形態의 傳達法則을 풀어서 求하게 된다. 後者の 경우는

(4)項에서 좀더 詳述될 것이다. 代數式 형태의 표시를 物理的 現象에 근거하여 추가되는 가정을 하거나 次元해석을 하기도 한다. 예를 들면 自由表面 근처에서 渦流擴散係數가 소멸되어지는 原因이 표면장력에 있는가⁽²¹⁾ 液體의 粘性作用에 있는 것인가⁽²⁴⁾ 하는 觀點에 따라 다른 모델들이 提案되고 있다. 그러나 많은 理論들이 共히

$$v \propto y; y \text{는 가로方向座標} \quad (33a)$$

$$l \propto y \quad (33b)$$

를 가정함으로써

$$\epsilon \propto y^2 \quad (34)$$

을 주고 있고, 이것은 잘 確立된 流動에서 Prandtl 數나 Schmidt 數의 값이 아주 큰 極限에서 유도되는 渦流擴散係數의 꼴^(23, 25)

$$\epsilon = ay^n \quad (35)$$

과 같은 모양을 가진다. 式 (35)에서 a 는 유동 형태와 位置 그리고 物性值들의 函數이고 n 도 實驗的으로 決定되어야 할 값이므로 直接 交換器의 形態에 따라 定해 주어야 한다.

(4) 渦流擴散係數의 微分모델

간단한 代數式형태의 외류확산계수 모델은 그 實用價値에 制限이 加해지는 경우가 많으므로 좀더 完全하고 一般的인 微分모델들을 추구하는 연구가 많이 이루어져 왔다. 이러한 微分모델에서는 亂流流動의 性質들, 이를테면 난류의 세기 라든지 亂流의 運動에너지 또는 消散率等이 傳達法則

$$\frac{D\phi}{Dt} = \nabla \cdot (\text{flux}) + (\text{source}) \quad (36)$$

의 從屬變數가 되어 풀려진다.

Launder와 Spalding⁽²⁶⁾ 그리고 Harsha⁽²⁷⁾는 이 分野에 適用 가능한 微分모델들을 幅넓게 檢討比較하고 있다. 그 중 2-方程式모델(two equation model)인 k - e 모델이 가장 널리 使用되고 있으며 根本的으로 높은 亂流 레이놀즈수(Re_i) 領域의 解析을 爲한 것이다. 여기서 k 및 e 는 亂流의 運動에너지 및 亂流消散率으로써

$$k = \frac{1}{2}(u'^2 + v'^2 + w'^2) \quad [m^2/s^2] \quad (37)$$

$$e = \frac{\nu}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 \quad [m^2/s^3] \quad (38)$$

와 같이 表示되며 이때 亂流混合길이는

$$l = \frac{c_\mu k^{3/2}}{e} \quad (39)$$

로 주어진다. 亂流擴散係數는 所謂 Prandtl-Kolmogorov 모델⁽²⁶⁾

$$\epsilon = k^{1/2} l \quad (40)$$

로부터 계산하게 된다. 한편 亂流레이놀즈數는

$$Re_i = k^{1/2} l / \nu \quad (41)$$

로 定義되는데 直接 交換器에서의 중요한 觀點인 自由表面에서는 前述한 바와 같이 亂流의 크기가 소멸하게 되고 따라서 亂流레이놀즈數도 零에 접근하게 된다. 따라서 우리의 문제에서 通常의 微分모델의 適用은 合當치 않다.

낮은 亂流레이놀즈數 영역에서의 보정을 試圖한 改良모델이 Jones와 Launder⁽²⁸⁾에 依해 제안되었으며 그 最終形態는

$$u \frac{\partial k}{\partial z} + v \frac{\partial k}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r(\nu + \epsilon_k) \frac{\partial k}{\partial r} \right\} + \epsilon \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \left\{ e + 2\nu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial r} \right)^2 \right\} \quad (42)$$

$$u \frac{\partial e}{\partial z} + v \frac{\partial e}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r(\nu + \epsilon_c) \frac{\partial e}{\partial r} \right\} + c_1 f_1 \frac{e}{k} \epsilon \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 - \left\{ c_2 f_2 \frac{e^2}{k} - 2\nu \epsilon \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right)^2 \right\} \quad (43)$$

와 같다. 이것의 解로부터

$$\epsilon = \frac{c_\mu f_\mu k^2}{e} \quad (44)$$

로 외류확산계수를 얻는다. 여기서 未知函數 f_μ, f_1, f_2 및 未知常數 c_μ, c_1, c_2 등은 一般的인 것이 아니며 유동의 경우에 따라 實驗的으로 주어지게 되고 또한 式 (42) 및 (43)을 풀기 위한 初期條件과 境界條件도 경우에 따라 적절히 주어져야 한다. 유감스럽게도 아직은 液體-氣體間의 직접 접촉 流動場에 對한 亂流의 微視的 형태 파악을 위한 研究結果가 혼하지 않으며 따라서 微分方程式 形成에 必要한 데이터가 구성되지 못하는 경우가 많다. 액체측 전달현상의 精確한 해석을 위하여 이 分野의 폭넓은 研究가 기대

된다.

(5) 液膜(falling film)

液膜을 採擇한 直接 交換器는 일반적으로 큰 流量 및 큰 傳達係數를 얻을 수 있을 뿐 아니라 流體(液體側 및 氣體側 共히)流動에 必要한 壓力損失을 極少化할 수 있는 利點이 많은 反面구조물이 많아지고 平板上의 오염 등에 依한 問題點이 있다. 機械工學分野의 應用을 爲한 液膜周邊의 傳達문제에 대한 本格的인 研究는 Brauer⁽²⁹⁾以後로 생각된다. 이 古典的 研究는 液體落下膜을 두 部分, 即 平板에 가까운 部分(base film portion)과 自由表面의 亂流波動部分으로 나누고, 이 중 파동부분이 빠른 速度로 大部分의 流動量을 담당한다고 간주하여 最初로 이러한 波動의 구조와 統計學的 特性에 관한 定量的 結果를 제시하고 있다.

Chun 과 Seban⁽³⁰⁾은 벽면이 加熱됨으로써 증발하고 있는 亂流液膜에 對한 實驗을 遂行하였고 그 後 Mills와 Chung⁽³¹⁾은 Chun 과 Seban의 實驗結果를 理論的으로 확인하였는데 壁면 근처의 流動에 van Driest의 亂流形狀⁽³²⁾을, 그리고 자유표면 附近에는 Lamourelle와 Sandall⁽²⁵⁾의 와류확산계수모형을 擇하여 液膜全體에 걸친 完全한 渦流擴散係數를 使用하였다.

自由表面의 波狀, 또는 응축·증발 등의 가로 方向移動現象으로 因한 자유표면에서의 마찰계수의 變化 등은 直接 交換器에서 볼 수 있는 전형적인 附隨問題로써 等價거칠기法(equivalent sand grain roughness approach) 등의 理論的 접근을 하기도 하나⁽³³⁾ 역시 實驗에 의존하는 경우가 많다. Ueda 등⁽³⁴⁾은 수직관 內의 수증기 응축에 관하여 實驗을 행하였는데 여기에는 수증기流動과 液體膜 사이의 마찰을 고려하고 있다. 또한 粘性이나 表面張力과 같은 流體의 物性值에 依한 傳達現象의 變化⁽³⁵⁾ 등 數없이 많은 研究가 進行되고 있으며, 特히 最近의 開放사이클 海洋溫度差發電(OC-OTEC)의 응용과 관련하여 液膜形態의 직접 접촉식 응축기 및 증발기에 대한 연구가 注目을 끌고 있다.^(16, 36)

(6) 亂流液體噴流(liquid jet), 其他

液體의 安定된 亂流噴流(stable, turbulent jet)는 液膜과 類似한 형태를 만들 수 있기 때문에 비슷한 分野에 應用된다. 特히 噴流를 利用하는 데는 平板(substrate)가 除去되기 때문에 구조부분이 상당히 간소해지는 장점이 있다. 이 分野의 實驗的 研究는 主로 Zinger⁽³⁷⁾以後의 소련科學者들이 직접 접촉식 응축기 개발을 위해 수행하여 왔으나 대부분이 아주 높은 레이놀즈數 영역에 대한 것이고 따라서 噴流와 噴霧(spray)의 중간형태 程度가 아닌가 추측된다. 最近에는 Heller system⁽³⁸⁾이나 Claude cycle⁽³⁹⁾ 등의 實用化에 초점을 맞춘 研究가 歐美에서 進行되는 것을 자주 볼 수 있다.^(40, 41) Mills 등⁽⁴²⁾은 亂流噴流의 열 전달 및 물질전달現象에 대한 근래의 報告들을 綜合하였다.

亂流噴流와 亂流液膜의 相互間 비슷한 外形에도 불구하고 유동특성에서 근본적으로 다른 點이 있다. 即 液膜은 剪斷流動(shear flow)로써 평판과의 마찰에 依하여 連續的으로 亂流가 生成되고 있으나(turbulence generation), 噴流의 경우 노즐내에서 일단 生成된 亂流는 분사直後부터 下流로 유동함에 따라 점차 쇠퇴하게 된다(turbulence decay). 따라서 난류분류를 채택하는 직접 교환기의 液體側 전달현상은 자유낙하막의 경우와 매우 相異하며 서로 互換되지 못하는 別途의 現象을 파악하여야 한다. 即 噴流의 경우 渦流확산계수의 자유표면 근처 가로 方向 소멸 현상은 물론이고 유동방향으로의 소멸현상도 고려해 주지 않으면 안된다. Brumfield와 Theofanous⁽⁴³⁾는 噴流의 中心部分亂流(bulk turbulence)가 等方性(homogeneous)라 보고 Batchelor⁽⁴⁴⁾의 資料를 使用하여 이 現象을 해석하고 있다.

한편 직접 교환기로는 噴霧室(spray chamber) 또는 氣泡장치(bubble cap)의 형태를 사용키도 하는데, 噴霧장치의 경우 분사에 所要되는 기계적 일이 과다할 뿐 아니라 구조물의 外形이 커지는 短點이 있으며, 氣泡장치의 경우도 같은 크기의 접촉면적을 만들어 주는데 所要되는 구조물이 복잡해 지는 등 實用化를 爲한 問題點이

있다. 最近에는 潛熱蓄熱器에서 一般的으로 열 전도율이 낮은 축열재의 傳熱을 促進하기 爲하여 靑의 使用 등 受動的 方法과 並行하여 相互 不溶性 作動流體組合을 利用한 直接 接觸式 蓄熱器⁽⁴⁵⁾가 提案되고 있어서 에너지의 유효이용의 觀點에서 期待를 모우고 있다.

(다음호에 계속)

참 고 문 헌

- (17) Higbie, R., "The Rate of Absorption of a Pure Gas into a Still Liquid During Short Periods of Exposure", *Trans. AIChE*, Vol. 31, pp. 365~388, 1935
- (18) Dankwerts, P.V., "Significance of Liquid Film Coefficients in Gas Absorption", *Ind. Engr. Chem.*, Vol. 43, No. 6, pp. 1460~1467, 1951
- (19) Ruckenstein, E., "On Turbulent Mass Transfer near a Liquid-Fluid Interface", *Chem. Engr. J.* Vol. 2, pp. 1~8, 1971
- (20) Fortescue, G.E. and J.R.A. Pearson, "On Gas Absorption into a Turbulent Liquid," *Chem. Engr. Sci.*, Vol. 22, pp. 1163~1176, 1967
- (21) Levich, V.G., *Physicochemical Hydrodynamics*, Prentice Hall Inc., 1962
- (22) Davies, J.T. and S.T. Ting, "Mass Transfer into Turbulent Jets", *Chem. Engr. Sci.* Vol. 22, pp. 1439~1548, 1967
- (23) King, C.J., "Turbulent Liquid Phase Mass Transfer at a Free Gas-Liquid Interface", *Ind. Engr. Chem. Fund.*, Vol. 5, pp. 1~8, 1966
- (24) Henstock, W.H. and T.J. Hanratty, "Gas Absorption by a Liquid Layer Flowing on the wall of a Pipe", *AIChE J.*, Vol. 25, pp. 122~132, 1979
- (25) Lamourelle, A.P. and O.C. Sandall, "Gas Absorption into a Turbulent Liquid", *Chem. Engr. Sci.*, Vol. 27, pp. 1035~1043, 1972
- (26) Launder, B.E. and B.D. Spalding, *Mathematical Models of Turbulence*, Academic Press Inc., London, 1972
- (27) Harsha, P.T., Kinetic Energy Methods, in *Handbook of Turbulence*, Vol. 1, Ch. 8, Plenum Press, NY, 1977
- (28) Jones, W.P. and B.E. Launder, "The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence", *Int. J. HMT*, Vol. 15, pp. 365~388, 1935
- (29) Brauer, H., "Stromung und Wärmeübergang bei Rieselfilmen", *ForschHft. Ver. Dt. Ing.*, Vol. 457, 1956
- (30) Chun, K.R. and R.A. Seban, "Heat Transfer to Evaporating Liquid Films", *J. Heat Transfer*, Vol. 93, pp. 391~396, 1971
- (31) Mills, A.F. and D.K. Chung, "Heat Transfer across Turbulent Falling Films", *Int. J. HMT*, Vol. 16, pp. 694~696, 1973
- (32) van Driest, E.R., "On Turbulent Flow near a Wall", *J. Aero. Sci.*, Vol. 23, pp. 1007~1011, 1956
- (33) Wallis, G.B., *One Dimensional Two Phase Flow*, McGraw Hill, NY, 1969
- (34) Ueda, T., T. Kubo and M. Inoue, "Heat Transfer for Steam Condensing Inside a Vertical Tube", Proceedings of the 5th Int'l. Heat Transfer Conference, Tokyo, Vol. 3, pp. 304~308, 1974
- (35) Won, Y.S. and A.F. Mills, "Correlation of the Effects of Viscosity and Surface Tension on Gas Absorption Rates into Freely Falling Turbulent Liquid Films", *Int. J. HMT*, Vol. 25, pp. 223~229, 1982
- (36) Sam, R.G. and B.R. Patel, "An Experimental Investigation of OC-OTEC Direct Contact Condensation and Evaporation Processes", *Trans. ASME J. Heat Transfer*, Vol. 106, pp. 120~127, 1984

- (37) Zinger, N.M., "Heating of a Jet of Water in a Vapor-Filled Space", In the Collection: *Problem of Heat Transfer During a Change of State*, USAEC Report AEC-tr-3405, pp. 75~85, 1953
- (38) Bakay, A. and T. Jaszay, "High Performance Jet Condensers for Steam Turbines", Paper EC 10, VI Int. Heat Transfer Conference, Toronto, 1978
- (39) Shelpuk, R. and A.A. Lewandowski, "Alternative Cycle Applied to Ocean Thermal Energy Conversion", OTEC Paper No. 3589, 11th Offshore Technology Conference, Houston, 1979
- (40) Jacobs, H.R. and R. Nadig, "Condensation on Coolant Jets and Sheets", ASME Paper No. 84-HT-29, 1984
- (41) Bharathan D., and T. Penny, "Flash Evaporation from Turbulent Water Jets", *Trans. ASME J. Heat Transfer*, Vol. 106, pp.407~416, 1984
- (42) Mills, A.F., S. Kim, T. Leininger, S. Ofer and A. Pesaran, "Heat and Mass Transport in Turbulent Liquid Jets", *Int. J. HMT*, Vol. 25, No. 6, pp.889~897, 1982
- (43) Brumfield, L.K. and T.G. Theofanous, "Turbulent Mass Transfer in Jet Flow and Bubble Flow: A Reappraisal of Levich's Theory", *AIChE J.*, Vol. 22, No. 3, pp. 607~610, 1976
- (44) Batchelor, G.K., *The Theory of Homogeneous Turbulence*, Univ. Press, Cambridge, 1953
- (45) 阿部宣之, "蓄熱器における直接接觸熱交換", 84新テクノロジー Symposium, Tokyo, Nov. 1984

(412페이지에서 계속)

- Crankshaft Journals during Engine Firing, SAE Paper 810772.
- (10) K. Ochiai and M. Nakano, Relation between Crankshaft Torsional Vibration and Engine Noise, SAE Paper 790365.
- (11) R. Bremer, A Practical Treatise on Engine Crankshaft Torsional Vibration Control, SAE Paper 790763.
- (12) J. Affenzeller and G.E. Thien, Evaluating Engine Design for Low Noise Using Dynamic Structural Modelling, SAE Paper 820435.
- (13) N. Lalor, Computer Optimised Design of Engine Structures for Low Noise, SAE Paper 790364.
- (14) M.E. Moncelle, Diesel Engine Sound Reduction by Dynamic Structural Modeling, SAE Paper 800409.
- (15) R.G. De Jong and J.E. Manning, Modeling of Vibration Transmission in Engines to Achieve Noise Reduction, SAE Paper 790360.
- (16) H.A. Fachbach and G.E. Thien, An Approach to a Quiet Car Diesel Engine, SAE Paper 790441.
- (17) Takao Kubozuka, Yoshimasa Hayashi, Yoshikazu Havakawa, and Kazuhiro Kikuchi, Analytical Study on Engine Noise Caused by Vibration of the Cylinder Block and Crankshaft, SAE Paper 830346.