

電子連接器密封性能檢視

黃彥文¹、廖國基^{1*}

¹ 國立臺灣大學生物產業機電工程學系

E-mail: kokki@ntu.edu.tw

摘要

本論文呈現一套分析應用於音響設備之二合一連接器矽橡膠墊圈密封性能之系統化流程。當音響設備之背蓋放置於設計之位置時，背蓋將矽橡膠墊圈壓迫於背蓋與二合一連接器之間，將背蓋與二合一連接器間之縫隙密合，隔絕音響設備內外，內部形成一密封腔體。然洩漏將於經過一段時間後發生，因此以有限元素分析矽橡膠墊圈之受力情形與歷時變化。分析過程將矽橡膠墊圈材料之超彈性質與應力鬆弛現象納入考量，以穆尼-黎弗林與普羅尼級數描述材料受力行為進行數值分析，而此些材料模型之參數係藉由單軸壓縮鬆弛實驗與單軸拉伸鬆弛實驗，並採用合宜描述矽橡膠材料之數值進行參數迴歸。矽橡膠墊圈之密封性能將由其與二合一連接器兩者間之接觸應力大小評估，經由有限元素分析檢視矽橡膠墊圈承受三種下壓量對於接觸應力之影響，亦考量其歷時變化情形。針對二合一連接器進行密封實驗所得之壓力損失百分比，並根據矽橡膠墊圈關鍵元素於承受下壓量0.2mm條件下之接觸應力與時間關係，代入自行提出洩漏率預測模型進行參數迴歸，接續預測其餘較大下壓量之相對應壓力損失百分比。針對另一採用相同墊圈材料之耳機座連接器，將上述所得之模型參數代入預測其壓力損失百分比，與相對應密封實驗所得進行比較，進一步驗證此流程之合宜性。

關鍵字：洩漏、橡膠墊圈、電子連接器、有限元素分析

1. 前言

電子連接器於電子產品之功能扮演重要角色。大多數電子連接器之密封性能通常藉由點膠與矽橡膠墊圈之使用，點膠方式係利用密封膠，填補連接器內金屬端子與塑膠基座間因干涉結合產生之縫隙；矽橡膠墊圈則放置於產品與連接器間，藉由矽橡膠墊圈與產品間之緊密程度提供密封性能。業界通常透過通氣密封實驗為連接器密封性能之判斷，將其擺放於治具並輸入規範氣壓於所形成之密閉腔體，於規範時間內，量測其內部之氣壓變化值，倘若剩餘氣壓值過小，即判定失效。為提昇密封性能，業界通常先更換密封膠種類，若無法改善其密封性能，則增加矽橡膠

墊圈與產品間干涉量，然此方法將可能變更電子連接器結構設計，增加產品生產時程，進而提高成本。

2. 文獻回顧

Sun與Gu [1] 利用螺栓法蘭公式與有限元素分析獲得墊圈材料最大接觸應力，並考慮其歷時變化與不同環境條件下，結合多孔介質理論，提出應用於非金屬墊圈材料時變洩漏率預測模型，並搭配實驗進行驗證。針對橡膠墊圈於粗糙表面之流體密封性能。唇形密封墊圈常為工業界廣泛應用於旋轉軸相關機械設備，具有保持潤滑與排除污染物等功用，Yang等人 [2]因此針對含迴油溝唇形密封墊圈，將迴油率視為橡膠密封性能指標，經由流固耦合分析，比較不同轉速條件對於唇型油封流體流動特性與橡膠變形之影響，模擬結果與實驗觀察相符。Jeon等人 [3]針對應用於手機防水之橡膠密封墊圈，利用有限元素分析檢視其承受負荷下之形變，預測是否達到產品之防水需求，並搭配實驗進行驗證，然其有限元素分析並無考慮墊圈材料之歷時變化。Liu等人 [4] 針對彈性墊圈進行密封評估，當流體壓力大於彈性墊圈接觸應力時，導致彈性體與原本接觸物體失去部分接觸造成洩漏。透過有限元素分析獲得彈性體接觸應力，並經由實驗決定理論模型所需參數，進而預測不同幾何形狀彈性體之流體洩漏壓力，並搭配實驗進行驗證，然其亦未考慮墊圈材料之歷時變化。Ke等人 [5]針對應用於防止氣體洩漏之橡膠墊圈，提出一量測橡膠墊圈與金屬接觸介面氣體洩漏之方法，並將量測所得實驗數據搭配流體力學理論迴歸其相關參數，有助於橡膠墊圈之設計。橡膠墊圈近年來亦應用於太空載具，Zhang等人 [6]針對不同材料之O型橡膠密封環，利用Roth洩漏理論搭配經驗公式，預測不同壓縮應變下密封環之時變洩漏率。同時進行實驗量測密封環於不同組裝方式與溫度下之洩漏率，提出較適合用於月球登陸艇返回艙之O型橡膠密封環材料。

綜合上述文獻回顧，過往甚少針對電子連接器之流體密封性能進行檢視。本研究因此擬藉由有限元素分析評估二合一連接器與耳機座連接器之密封性能，並與相對應實驗量測進行比較。

3. 實驗量測

本研究採用之密封墊圈材料型號為Silopren LSR2020，其具備如高熱穩定性、不易燃、與不易老化等多種良好性能。首先執行矽橡膠材料LSR2020之單軸壓縮鬆弛實驗，實驗試片係根據ASTM D1418規範製作，單軸壓縮鬆弛實驗試片為直徑18mm與高度25.5mm之圓柱體。將試片架設於靜態油壓萬能材料試驗機INSTRON 5569，以5mm/min等速率進行下壓，試片達公稱應變量(nominal strain) 30%後，持續保持3600秒。接續執行矽橡膠之單軸拉伸鬆弛實驗，單軸拉伸鬆弛實驗試片為標距2.5公分、標距寬度4公分、與厚度2公分之啞鈴形。亦將試片架設於上述靜態油壓萬能材料試驗機，以5mm/min等速率進行拉伸，試片達公稱應變量50%後，持續保持3600秒。本研究藉此些實驗獲得矽橡膠材料公稱應變與公稱應力之關係。

二合一連接器雖具備氣密要求，然並無氣體密封相關實驗規範，業界通常採用國際防護等級認證(international protection marking) IEC 60529防護等級7 (IPX7)所制定之實驗條件，輸入規範水深高度轉換之等效氣壓值於矽橡膠墊圈與連接器所形成密閉腔體，要求最終損失氣壓值不得大於通入初始氣壓值百分之二。本研究利用連展科技公司設計之密封實驗機台，架設其於插拔力試驗機，控制探頭向下壓迫矽橡膠墊圈位移量(爾後於本文通稱下壓量)，分別為0.2mm、0.3mm、與0.4mm，其應變量範圍相當於5%至10%之間。圖一係為二合一連接器擺放相對位置圖，透過此實驗獲得三種下壓量分別進行五次實驗之矽橡膠固定端平均正向力量與時間關係，接續經由數位壓力錶量測密閉腔體之壓力值，並計算相對應之壓力損失百分比，亦獲得三種下壓量分別進行五次實驗之平均壓力損失百分比與時間關係。由上述實驗結果可知當矽橡膠墊圈下壓量增加時，相對應正向力量隨其上升，而壓力損失百分比則隨之降低。

為驗證二合一連接器密封實驗之流程合宜性，本研究因此另行評估耳機座連接器之密封性能，實驗規範與前述二合一連接器所採用一致。密封實驗設備亦與前述相同，僅更替密封實驗金屬治具連接器固定端與矽橡膠固定端、耳機座連接器、與相對應之矽橡膠墊圈，此實驗之矽橡膠墊圈應變量範圍介於2.5%至5%之間。透過此實驗獲得耳機座連接器0.2mm、0.3mm、與0.4mm三種下壓量分別進行五次實驗之矽橡膠固定端平均正向力量與時間關係，同時獲得三種下壓量分別進行五次實驗之平均壓力損失百分比與時間關係。

4. 研究方法

矽橡膠之應力應變反應通常呈現非線性關係，採用超彈性材料模型較能適切描述此類橡膠行為。多種超彈性材料模型以應變能方式呈現，如雙變數之穆尼

-黎弗林模型(Mooney-Rivlin form)描述單位參考體積應變能(strain energy per unit of reference volume)與應變不變量關係，其形式為

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J^{el} - 1)^2 \quad (1)$$

其中 U 表示單位參考體積應變能， C_{10} 、 C_{01} 、與 D_1 為材料參數， \bar{I}_1 為第一偏量應變不變量(first deviatoric strain invariant)，則 \bar{I}_2 為第二偏量應變不變量(second deviatoric strain invariant)， J^{el} 為彈性體積比(elastic volume ratio)，偏量伸長量(deviatoric stretches) $\bar{\lambda}_i = J^{-1/3}\lambda_i$ ，其中 J 為總體積比(total volume ratio)， λ_i ($i=1, 3$)為主伸長量(principal stretches)。本研究同時採用普羅尼級數(Prony series)描述矽橡膠之應力鬆弛現象，結合雙變數穆尼-黎弗林模型與普羅尼級數描述矽橡膠墊圈之數值模型因此可描述為

$$U = C_{10} \left(1 - \sum_{k=1}^m \bar{g}_k^p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right) \right) (\bar{I}_1 - 3) + C_{01} \left(1 - \sum_{k=1}^m \bar{g}_k^p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right) \right) (\bar{I}_2 - 3) \quad (2)$$

其中 C_{10} 、 m 、 \bar{g}_k^p 、與 τ_k 為材料參數。本研究採用三項之普羅尼級數，亦即式(2)中之 $m=3$ ，描述材料之黏彈性性質。利用矽橡膠材料單軸壓縮鬆弛負荷實驗與單軸拉伸鬆弛負荷實驗之公稱應變與公稱應力關係，並同時進行相對應之有限元素數值模擬，接續藉由反應曲面法進行二因子之中央合成設計(central composite design)，建立式(2)所含 C_{10} 、 C_{01} 、與決定係數(coefficient of determination) R^2 間之迴歸模式，並以望大 R^2 之目標函數計算獲得最佳之 C_{10} 、 C_{01} 組合。進一步進行最佳D型設計(D-optimal design)建立式(2)所含 \bar{g}_1^p 至 \bar{g}_3^p 、 τ_1 至 τ_3 、與 R^2 間之迴歸模式，亦以 R^2 望大之目標函數計算獲致最佳之 \bar{g}_1^p 至 \bar{g}_3^p 與 τ_1 至 τ_3 組合，各參數值如表一所示。

透過修改Sun與Gu[1]之洩漏率預測模型，本研究自行提出一洩漏率預測模型為

$$L = C_1 \frac{1}{l\eta} \left(\frac{S(t)}{S_i} \right)^{-C_2} P_m (P - P_1) \times \left(C_3 \exp \left(C_4 \exp \left(C_5 \left(\frac{S_{ip}}{S_t} \right) \right) \right) \right) \quad (3)$$

圖二所示之FACE A為矽橡膠墊圈與二合一連接器接觸區域，此為密閉腔體與外部環境連接之部位，亦即洩漏發生之潛在區域。此區域具備數條可能洩漏路徑，當某一路徑包含之最大接觸應力相較於其他路徑包含之最大接觸應力小，則定義此路徑上之最大接觸應力位置為關鍵元素。其中 $S(t)$ 為此關鍵元素之接觸應力， S_i 為墊圈下壓至設計位置後之初始接觸應力， S_{ip} 為墊圈充入規範氣壓後之最大接觸應力， S_t 為矽橡膠材料之抗拉強度， C_i ($i=1, 5$)則為迴歸參數。

數值分析主要分為三個步驟，第一步驟為矽橡膠墊圈與二合一連接器之密封分析，輸入二合一連接器三維模型於ABAQUS [7]，將矽橡膠組成律參數輸入並完成相關基本設定。接續針對氣體輸入於密閉腔體之分析，採用ABAQUS [7]內*FLUID CAVITY功能進行輸入規範氣體對於矽橡膠墊圈承受負荷影響分析，以符合密封實驗之設置，藉以獲得壓迫矽橡膠墊圈之正向力量，並與相對應實驗量測值進行比較。第二步驟進行二合一連接器三種下壓量之相對應壓力損失百分比評估，經由ABAQUS [7]獲得矽橡膠墊圈承受下壓量0.2mm條件下關鍵元素之接觸應力，輸入洩漏率模型所需幾何與環境參數與矽橡膠墊圈之抗拉強度，藉由數值方法調整式(3)內5個材料參數 C_i ($i=1, 5$)，獲得密閉腔體內洩漏率與時間關係，並與前述相對應量測結果進行擬合。進而預測另兩種下壓量之洩漏率與時間關係，最終將三種下壓量之洩漏率對時間進行數值積分轉換為壓力損失百分比，與相對應之實驗值比較。第三步驟另針對採用相同墊圈材料之耳機座連接器，由上述流程進行壓力損失百分比預測，並與相對應密封實驗量測所得進行比較，進一步驗證本評估流程之合宜性。

5. 結果與討論

圖三顯示矽橡膠墊圈於三種下壓量條件下，有限元素分析所得壓迫墊圈正向力量與相對應量測平均值比較圖，表二顯示此三種下壓量於鬆弛1800秒後，模擬與量測所得壓迫墊圈正向力量，兩者差異僅約2.9%至4.5%。圖四顯示矽橡膠墊圈承受下壓量0.2mm之接觸應力分布狀態，其中關鍵元素位置為圖中圓圈處。圖五顯示二合一連接器數值分析所得關鍵元素接觸應力與時間關係。接續利用相同矽橡膠組成律參數進行耳機座連接器之密封分析，有限元素分析所得壓迫墊圈正向力量與相對應量測平均值比較如圖六所示，表三顯示三種下壓量於鬆弛1800秒後，模擬與量測所得壓迫墊圈正向力量，兩者差異約3.3%至9.6%。圖七分別顯示耳機座連接器矽橡膠墊圈承受下壓量0.2mm之接觸應力分布狀態，其中關鍵元素位置為圖中圓圈處，圖八則顯示耳機座連接器數值分析所得關鍵元素接觸應力與時間關係。

利用二合一連接器矽橡膠墊圈承受下壓量

0.2mm條件下，關鍵元素之接觸應力與時間之關係，接續輸入洩漏率模型所需幾何與環境參數與矽橡膠墊圈之抗拉強度(S_t) 6.5MPa，藉由MATLAB [8]中迴歸分析之非線性最小平方法(nonlinear least square)功能調整式(3)內5個材料參數 C_i ($i=1, 5$)，並與第三章所述相對應量測結果進行擬合，將迴歸結果整理列於表四。接續預測墊圈承受下壓量0.3mm與0.4mm條件下之壓力損失百分比，圖九為數值分析結果與實驗量測平均結果比較圖。如前所述，測試規範為經過1800秒後，密閉腔體洩漏氣壓值不得大於初始氣壓值之百分之二，表五顯示三種下壓量於1800秒後，模擬與量測所得壓力損失百分比，兩者差異約為2.8%至10%。進一步預測耳機座連接器墊圈承受三種下壓量條件下之壓力損失百分比，與其相對應實驗量測平均結果比較，如圖十所示，表六顯示三種下壓量於1800秒後，模擬與量測所得壓力損失百分比，兩者差異則約為4.5%至7.8%。研究結果顯示，針對此兩連接器而言，矽橡膠墊圈均需承受下壓量略大於0.4mm之條件，方得使其壓力損失百分比符合規範。

6. 結論

本研究針對矽橡膠墊圈應用於電子連接器之密封性能提供一系統化分析流程，首先將矽橡膠墊圈材料製成之標準樣本施以單軸壓縮鬆弛負荷，藉以獲得矽橡膠墊圈材料組成律參數。接續導入有限元素分析，獲取二合一連接器矽橡膠墊圈承受下壓量0.2mm條件下，關鍵元素之接觸應力。搭配密封實驗之壓力損失百分比量測數據，透過MATLAB [8]針對之自行提出洩漏率模型進行參數迴歸，接續預測墊圈承受其餘較大小下壓量條件下之壓力損失百分比，並與相對應實驗量測比較，具備良好吻合度。為驗證本研究之流程合宜性，另針對採用相同墊圈材料之耳機座連接器進行密封分析，預測墊圈承受三種下壓量條件下之壓力損失百分比，亦與相對應實驗量測比較，獲致良好一致性，彰顯本洩漏率模型可有效評估電子連接器之密封性能。

未來可依據本研究之成果，推廣至如Liu等人[4]之液體洩漏評估，其研究主要裝置基本上係由兩壓克力板間夾一墊圈材料組成，壓縮墊圈負荷可由組裝兩壓克力板之螺釘控制。墊圈上方形成一密閉腔體，液體藉由幫浦輸入此空間，同時利用壓力感測器紀錄密閉腔體壓力。裝置前方架設一攝影機，觀察液體洩漏情形。數值分析亦可遵循實驗設定進行模擬，進而提出適用於液體之洩漏預測模型，接續將本研究流程導入進行相關實驗與驗證，並檢視於設計階段之其它具備密封性能連接器，成信對於提升產品開發效率具備顯著助益。

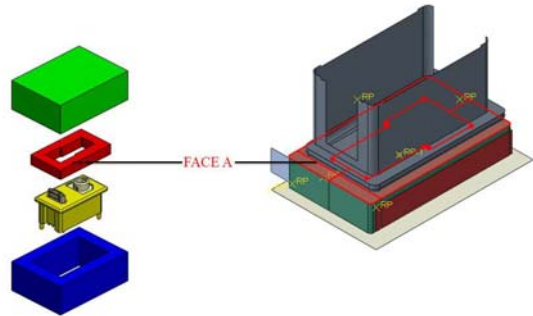
7. 誌謝

本論文承蒙科技部MOST-000-0000-E-000-MY3

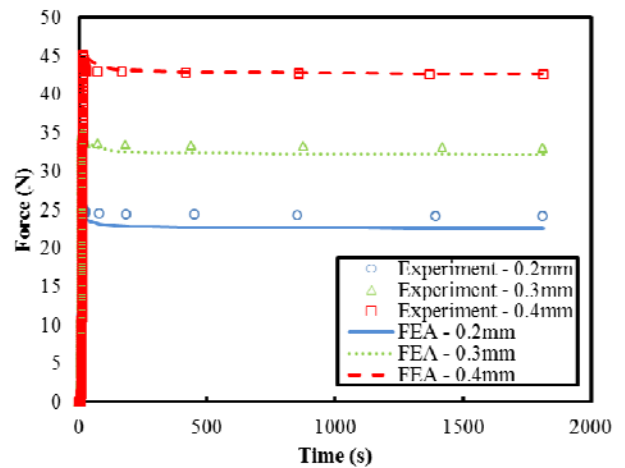
之經費支持，與連展科技公司提供實驗機台及所需樣品，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

8. 參考文獻

1. Z. G. Sun, and B. Q. Gu, "Prediction of Time-Correlated Leakage Rates of Bolted Flanged Connections by Considering the Maximum Gasket Contact Stress," Journal of Pressure Vessel Technology Vol.134, pp. 1-7, 2012.
2. A. S. Yang, C. Y. Wen, and C. S. Tseng, "Analysis of flow field around a ribbed helix lip seal," Tribology International Vol. 42, No. 5, pp. 649-656, 2009.
3. H. Jeon, H. Seo, M. Kim, and J. Kim, "A study on predictable model of waterproofing for mobile phone using finite element analysis based on evaluation of seal rubber," ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference Vol. 2, pp. 131-136, 2012.
4. Q. Liu, Z. Wang, Y. Lou, and Z. Sou, "Elastic leak of a seal," Extreme Mechanics Letters Vol. 1, pp. 54-61, 2014.
5. Y. Ke, X. Yao, H. Yang, and Q. He, "A measuring method of gas leakage along the contact interface of the stripped rubber seals," Measurement: Journal of the International Measurement Confederation Vol. 61, pp. 299-304, 2015.
6. B. Zhang, M. Yu, and H. Yang, "Leakage analysis and ground tests of the O-type rubber ring seal applied in lunar sample return devices," Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering Vol.299, No.3, pp. 479-491, 2015.
7. H. D. Hibbit, B. I. Karlsson, and E. P. Sorensen, ABAQUS User Manual. Version 6.12. USA., 2012.
8. MATLAB (R2010a).MATLAB User Manual, Release 7.10.0. USA., 2010.

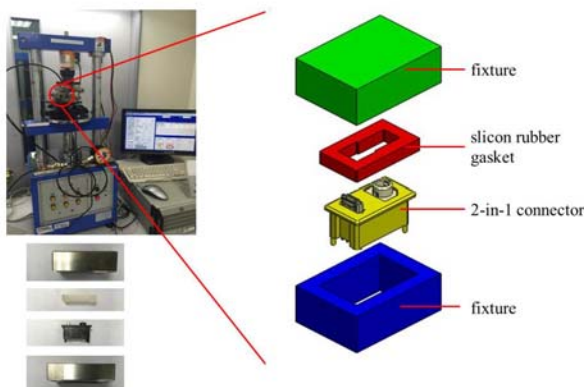


圖二：二合一連接器密封分析矽橡膠墊圈接觸面示意圖

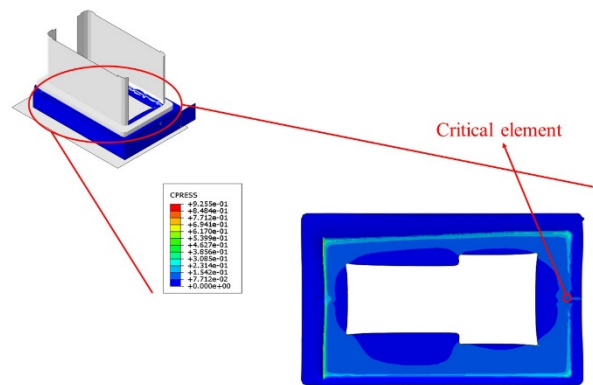


圖三：二合一連接器矽橡膠墊圈於三種下壓量條件下，有限元素分析所得壓迫墊圈正向力量與相對應量測平均值比較圖

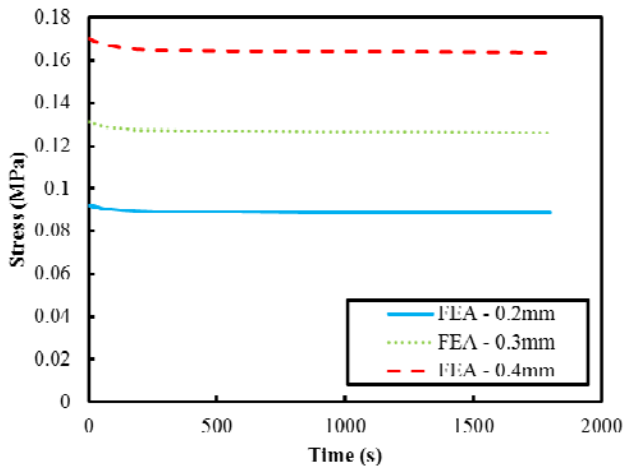
9. 圖表



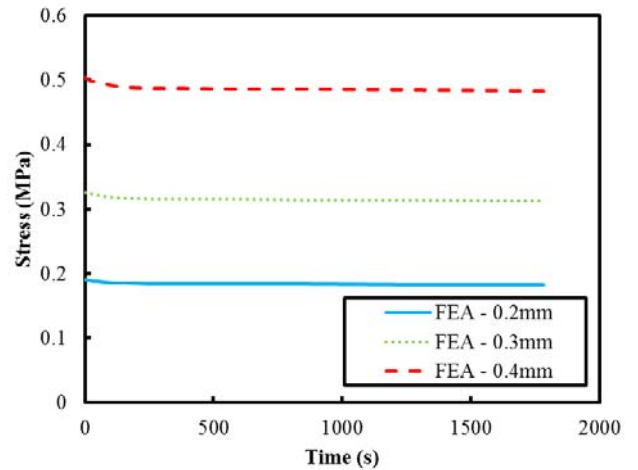
圖一：二合一連接器擺放相對位置圖



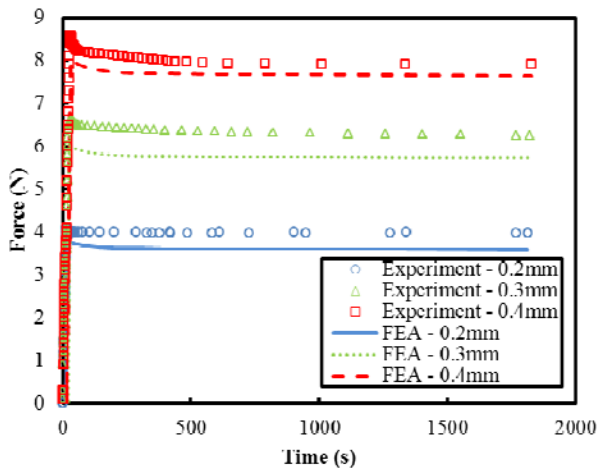
圖四：二合一連接器矽橡膠墊圈承受下壓量0.2mm條件下之接觸應力分布圖



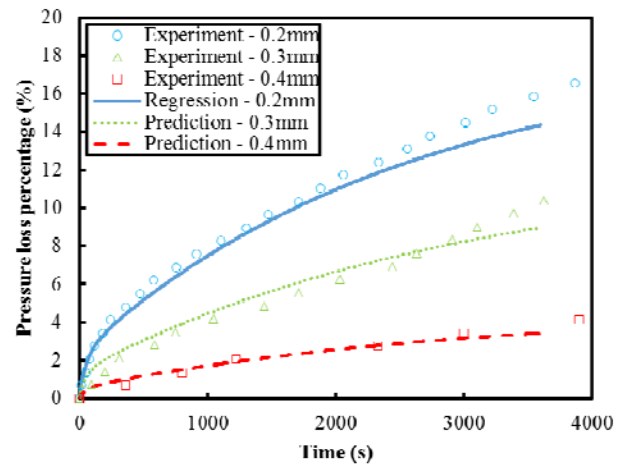
圖五：二合一連接器矽橡膠墊圈承受三種下壓量條件下，關鍵元素之接觸應力與時間關係圖



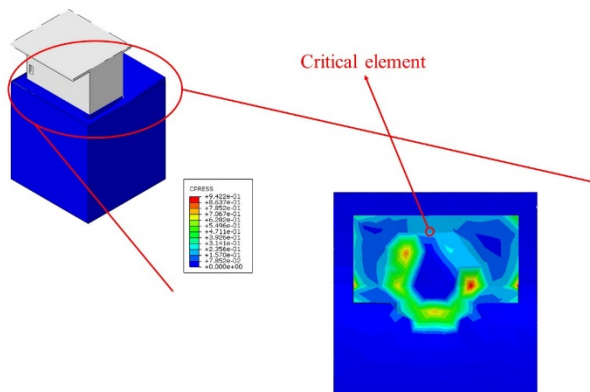
圖八：耳機座連接器矽橡膠墊圈承受三種下壓量條件下，關鍵元素之接觸應力與時間關係圖



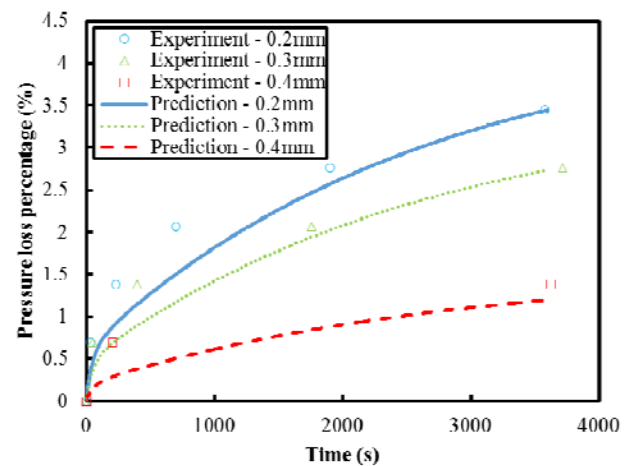
圖六：耳機座連接器矽橡膠墊圈於三種下壓量條件下，有限元素分析所得壓迫墊圈正向力量與相對應量測平均值比較圖



圖九：二合一連接器密封分析與量測所得之壓力損失百分比比較圖



圖七：耳機座連接器矽橡膠墊圈承受下壓量0.2mm條件下之接觸應力分布圖



圖十：耳機座連接器密封分析與量測所得之壓力損失百分比比較圖

表一：矽橡膠材料組成律參數

c_{10} (MPa)	c_{01} (MPa)	\bar{g}_1^p	\bar{g}_2^p	\bar{g}_3^p	τ_1 (s)
0.055	0.0447	0.09	0.01	0.042	35000
τ_2 (s)	τ_3 (s)				
5656	70				

表二：二合一連接器矽橡膠墊圈鬆弛1800秒正向力量

承受下壓量 (mm)	有限元素分析 (N)	實驗量測平均 值(N)
0.2	24.1	25.1
0.3	33	34.0
0.4	42.5	44.5

表三：耳機座連接器矽橡膠墊圈鬆弛1800秒正向力量

承受下壓量 (mm)	有限元素分析 (N)	實驗量測平均 值(N)
0.2	3.59	3.97
0.3	5.73	6.23
0.4	7.64	7.90

表四：洩漏率預測模型迴歸係數

C_1 (mm ⁴)	C_2	C_3	C_4	C_5
3.62×10^{-9}	74.8	1.31×10^{-12}	-26.1	-1.01

表五：二合一連接器於1800秒壓力損失百分比

承受下壓量 (mm)	數值分析(%)	實驗量測平均 值(%)
0.2	10.4	10.7
0.3	6.28	5.71
0.4	2.42	2.43

表六：耳機座連接器於1800秒壓力損失百分比

承受下壓量 (mm)	數值分析(%)	實驗量測平均 值(%)
0.2	2.50	2.71
0.3	1.97	2.07
0.4	0.85	0.89

Leakage Assessment for Electronic Connectors

Yen-Wen Huang¹, Kuo-Chi Liao^{1*}

¹ Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Taiwan University

*Email: kokki@ntu.edu.tw

Abstract

Systematic procedures are developed to investigate sealing characteristics of a so-called 2-in-1 electronic connector applied to audio equipment in the present

study. A silicon elastomer gasket located between a plastic housing of the connector and a back-cover of the audio equipment will be squeezed to provide the sealing function when the back-cover is displaced at a designated position. Gas is subsequently pumped into the confined chamber up to the specific pressure while the internal pressure is continuously monitored. Leakage indicated by the pressure loss percentage however could occur through the gasket after a certain period. A finite element analysis is carried out to explore the time-dependent response of the silicon elastomer gasket. The Mooney-Rivlin and the Prony series constitutive models are adopted in the numerical simulations to account for the hyperelasticity and the stress-relaxation behaviors of the gasket material, respectively. Required parameters of these mathematical models are evaluated based on experimental measurements of the specified silicon elastomer specimen subjected to both the uniaxial compression-relaxation and tensile-relaxation loading conditions. Sealing performances can then be assessed by implementing variations of the contact stress of the critical point of the gasket over the relatively long period into a proposed leakage rate prediction model. Pressure loss percentages in the chamber based on the numerical calculations agree well with those based on the corresponding experiments. In order to validate the appropriateness of the current systematic procedures, the pressure loss percentage of an enclosed cavity of an audio jack connector is also evaluated here.

Keywords: leakage, elastomer gasket, electronic connector, finite element analysis