مطالعه تجربى و عددى فرآيند شكلدهى بيلوزهاى فلزى

قادر فرجی^۱، محمود موسوی مشهدی^۲، حسین کاشانیزاده^۳ و محمدکاظم بشارتی^۴ گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران

چکیدہ

در ساخت بیلوزهای فلزی، نسبت قطر خارجی به قطر ریشه از حساسیت ویژهای برخوردار است، مخصوصاً زمانی که این نسبت بزرگ باشد. در این موارد خطر پارگی و یا چروکیدگی در این نوع قطعات بسیار بالا است. بنابراین، انتخاب و کنترل پارامترهای فرآیندی از اهمیت ویژهای برخوردار است. بیلوز فلزی در این پژوهش در دو مرحله با استفاده از تیوب اولیه ساخته میشود که شامل بالجینگ و فولدینگ است. پس از مرحله فولدینگ، ابتدا فشار داخلی و سپس نیروی محوری برداشته شده، برگشت فنری باعث افزایش طول بیلوز می گردد. مشخصات اساسی بیلوز ساخته شده شامل قطر خارجی، برگشت فنری و توزیع ضخامت آن است. پارامترهای اصلی که روی مشخصههای مذکور اثر میگذارد شامل فشار داخلی، کورس اولیه و مقدار پیشروی محوری میباشد. در این مقاله، یک مطالعه عددی پارامترهای اصلی که پارامترهای اصلی روی کیفیت بیلوزهای فلزی بررسی شده است. پارامترهای مشخصی برای رسیدن به بیلوز مطوب از بررسی پارامتری به دست آمده و تست های پارامترهای اصلی روی کیفیت بیلوزهای فلزی بررسی شده است. پارامترهای مشخصی برای رسیدن به بیلوز مطلوب از بررسی پارامتری به دست آمده و تست ه ای

واژههای کلیدی: بیلوز فلزی، متد اجزاء محدود، شکل دهی فلزات

Experimental and Finite Element Analysis of Metal Bellows Manufacturing

G. Faraji, H. Kashanizadeh, M. Mosavi, and M.K. Besharati Mech. Eng. Group, Tehran Univ.

ABSTRACT

Manufacturing of metal bellows with high ratio of crown to root diameter is very sensitive to design parameters, because of bursting possibilities. In this work, a process is introduced in which metal bellows are manufactured from tubes using bulging and folding processes. After the folding process, internal pressure, axial force, and annular plate dies are removed and the length of the bellows is increased with spring back. The quality of the final product depends on spring back, crown diameter, and thickness distribution. The main design parameters, which affect the quality of the products, are internal pressure, die course, and axial feeding. In this work, a parametric study was performed, using a commercial explicit finite element code and the effects of the main design parameters on the quality of the product is studied. Then, the design parameters leading to a product with acceptable quality were obtained numerically. Finally, an experiment was conducted to produce the metal bellows. The numerical and the experimental result showed very close agreements.

Key Words: Metal Bellows, Finite Element Method, Metal Forming, Experimental Study

۱_ دانشجوی کارشناسی ارشد (نویسنده پاسخگو): gfaraji@engmail.ut.ac.ir

۲_ استاد

۳_ کارشناس ارشد

۴⊣ستاد یار

۱_ مقدمه

47

بیلوزهای فلزی درصنایع نظامی و میکروالکترومکانیک کاربردهای ویژهای دارند و در برخی موارد نیز دارای کاربردهایی در صنایع یخچالسازی و تهویه مطبوع برای کنترل دما هستند. یکی از مهم ترین کارایی بیلوزها جذب انبساط و انقباضات ایجاد شده در سیستمها است. کارهای تحقیقاتی اخیر بیشتر روی خصوصیات بیلوزها و عملکرد آنها است. برخی از محققان ترکهای حاصل از خوردگی تنشی بیلوزهای فلزی مورد مطالعه قرار دادهانـد[۷]. پـژوهشهـای زيـادی در ارتبـاط بـا بررسـی و تخمین عمر خستگی و کمانش آنها و عوامل متأثر بر اینها صورت گرفته است[۳, ۳]. همچنین مشخصات دینامیکی آنها[۲,۱] و تنشهای ناشی از فشارهای داخلی، تغییر شکلهای محوری و ارتعاشات[۵] مورد بررسی قرار گرفته است. اما تعداد مقالات منتشر شده درباره فرآيندهاى ساخت بيلوزهاى فلزى بسیار کم است. به طور کلی بیلوزهای فلزی در چهار مرحله از ورق ساخته میشوند که عبارتاند از: کشـش عميـق، اتوکشـی، بالجینگ تیوب و فولدینگ [۶]. در این مقاله دو مرحله بالجینگ و فولدینگ مطالعه میشوند. در مرحله بالجینگ، صفحههای فلزي در فواصل مشخصي كه همان كورس اوليه گفته مي شود، دور تیوب قرار می گیرند و فشار داخلی تا یک مقدار مشخصے، افزایش می یابد. در این مرحله هیچگونه حرکت محوری وجود ندارد و تیوب در این مرحله حالت بشکهای پیدا میکند. زمانی که فشار به مقدار مشخصی مے ساد مرحله فولدینگ شروع می شود. در این مرحله فشار داخلی ثابت مانده و حرکت محوری دو سر تیوب بشکهای شده آغاز می شود. وقتی دو سر تیوب تا مقدار مشخصی به هم نزدیک شدند، قطعه نهایی شکل می گیرد. در نهایت فشار داخلی و نیروی محوری برداشته می شود و در نتیجه برگشت فنری اتفاق میافتد. برگشت فنری به خاطر توزیع دوباره تنشهای داخلی درقطعه نهایی است. پارامترهای مؤثر در فرآيند شامل قطر اوليه تيوب، ضخامت تيوب، كورس اوليه (فاصله قیدهای صفحهای)، مقدار پیشروی و فشار داخلی است. برای یک بیلوز مشخص مقادیر قطر و ضخامت تیوب تغییر نمی کنند، بنابراین سه پارامتر انتهایی بررسی شده است. این پارامترها روی قطر خارجی بیلوز، طول بیلوز بعد از برگشت فنری و توزيع ضخامت كه كيفيت بيلوز توليد شده را مشخص ميكند، تأثير می گذارند. هدف اين تحقيق شبيهسازي و مطالعه

پارامترهای شکلدهی بیلوزهای فلزی با استفاده از نرمافزار ABAQUS/Explicit و استفاده از آنها برای ساخت بیلوز با ابعاد مشخص است. حساسیت فرآیند به لحاظ نسبت کشش زیاد ،بالا است. در عمل کنترل پارامترهای فرآیند به سبب حساسیت بالای فرآیند، بسیار مشکل است.

اجزاى محدود

شبیهسازی فرآیند شکلدهی با استفاده از نرمافزار ABAQUS صورت گرفته است. به خاطر مسائل مربوط به واگرائی روش ضمنی (از روش حل صریح ۲ استفاده شده است. مدل به صورت دوبعدی هممحور^۳ است و یکی از ده حلقه بیلـوز به خاطر تقارن، مدلسازی شده است. تمام اندازهها در شکل ۱ و جدول ۱ آمده است، که ۲ ,r و L به ترتيب شعاع، ضخامت و t_d و اولیه تیوب هستند. D_c فاصله اولیه قیدهای صفحهای و ضخامت قیدهای صفحهای است. نمودار تنش کرنش به صورت میباشد که K و n در جدول ۱ بیان شدهاند. خواص $\overline{\sigma} = K\overline{\epsilon}^n$ الاستیکی، چگالی و ضریب اصطکاک نیز در جدول ۱ نشان داده شدهاند. خواص مکانیکی از طریق انجام تست کشش روی سه عدد از لوله اولیه حاصل شده است. مراحل مختلف فرآیند در شکل ۱ نشان داده شده است. فرآیند شامل سه مرحله بالجینگ، فولدینگ و برگشت فنری است. نمودار بارگذاری مربوط به فشار داخلی و پیشروی محوری در شکل ۲ نشان داده شده است. در مرحله بالجينگ فشار داخلي به صورت خطي با زمان افزايش میابد و هیچگونه حرکت محوری وجود ندارد (۰- ۰/۰۰۵ ثانیه در شکل ۲). در مرحله فولدینگ پیشروی محوری به انتهای تیوب اعمال می شود؛ در حالی که فشار داخلی ثابت است (۰۱ /۰۰ – ۰/۰۰۵ ثانیه در شکل ۲)، در مرحله برگشت فنری، نیروی محوری، فشار برداشته میشود و طول بیلوز افزایش می یابد. آزمایش های تجربی و تحلیل اجزای محدود شرایط به صورتی است که در مرحله بالجینگ هیچگونه حرکت محوری وجود ندارد و فشار داخلی به صورت خطی به بیشینه مقدار خود میرسد. در مرحله فولدینگ فشار ثابت میماند و

- 1- Implicit
- 2- Explicit
- 3- Axisymmetric

پیشروی محوری به انتهای تیوب اعمال میشود.

پیشروی محوری فقط به انتهای تیوب وارد می شود و حرکت صفحات فلزی به حرکت تیوب وابسته می باشد. در مرحله برگشت فنری ابتدا فشار داخلی و سپس نیروی محوری و صفحات فلزی برداشته میشوند. جنس تیوب، ایزوتروپیک فرض

شده، زیرا تیوب اولیه قبل از تولید بیلوز کاملاً آنیل میشود. برای مشبندی تیوب از المانهای پوستهای دوبعدی با دو نود استفاده شده است. نوع مشبندی به صورت شبکه تبعیضی است.



جدول ۱_ خواص مکانیکی، ابعاد و ضریب اصطکاک.

شکل ۲ ـ شرایط بارگذاری برای آزمایشهای تجربی و شبیهسازی اجزای محدود.

در این نوع مشبندی هرچه به ناحیه مرکزی حلقه نزدیک میشویم المانها ریزتر میشوند. برای مشبندی هـر حلقه از ۸۰ المان استفاده می شود. صفحات فلزی، صلب فرض شدهاند. تیوب و صفحات فلزی در ناحیه تماس با یکی قرار دادن درجه آزادیشان در جهت Z، به همدیگر وصل می شوند. بنابراین در مرحله فولدینگ، صفحات فلزی در ناحیه تماس با تیوب حرکت میکنند. حرکت صفحات فلزی در جهت x و y محدود می شوند و شعاع تیوب در ناحیه تماس نمى تواند افزايش يابد. پارامترهاى اصلى فرآيند شامل ضخامت اوليه تيوب، قطر تيوب، كورس قالب (فاصله اوليه صفحات فلزی)، فشار داخلی و جابجایی محوری هستند. به دلیل آنکه در این یژوهش بیلوز با ضخامت و قطر مشخصی در نظر است، در این کار اثر پارامترها روی توزیع ضخامت. قطر بیلوز و برگشت فنری مورد بررسی قرار میگیرد. جدول ۲ پارامترهای طراحی و مقادیر آنها را نشان میدهد.کورس قالب ۱۰mm، فشار داخلی ۴/۵ MPa و مقدار پیشروی ۹۵٪ به عنوان مقادیر پایه در بررسی پارامتری انتخاب می شوند جدول ۲.

در این مقاله هر بار دو پارامتر ثابت فرض شده و اثـر تغییرات پارامتر سوم بررسی میشود.

آزمايشات تجربى

جنس تیوب، فسفر برنزCuSn6 آنیل شده است. عناصر موجود در جدول ۳ بیان شده است. نتایج شبیه سازی اجزای محدود به عنوان مقادیر اولیه برای آزمایش های تجربی استفاده می شوند که باعث کاهش سعی و خطا در عمل می شود. مقادیر کورس قالب، مقدار پیشروی و فشار داخلی می شود. مقادیر کورس قالب، مقدار پیشروی و فشار داخلی به ترتیب ۱۰۰۳۸ ۹۵٪ و ۴/۳۵MP۹ انتخاب شده است. با ایجاد فشار داخلی از یک پمپ دنده ای استفاده شده است. با توجه به وجود نوسانات فشار و حساسیت زیاد این فرآیند به این نوسانات، استفاده از یک سیستم برای حذف نوسانات فشار ضروری است. با توجه به ضخامت کم تیوب، یکی از مشکلات فرآیند آببندی انتهای تیوب بود.

جدول ۲_مقادیر پارامترهای شبیهسازی اجزای محدود.

Die course(mm)	Internal pressure(MPa)	Axial displacement(mm)		
8	4.35	85%		
10	4.5	95%		
12	4.8	75%		

صفحات فلزی(قیود) از جنس فولاد زنگ نزن با سختی حدود ۵۰HRC و به ضخامت ۰/۵mm میباشند. موقعیت صفحات فلزی و تیوب در شکل **۳ ب** و قطعه نهایی در شکل **۳ ج** نشان داده شده است.

بررسی نتایج

مطابق جدول ۴، با افزایش کورس قالب، رنج تغییـرات فشـار برای رسیدن به قطعه بدون چروک و پارگی کاهش می یابد و باعث افزایش حساسیت فرآیند به فشار می شود. بنابراین حد پایین فشار مقداری است که قطعه چروک نمی خورد و حد بالای آن زمانی است که قطعه پاره نمی شود و این مسأله با عث پیچیدگی و مشکل شدن ساخت بیلوز می شود. در این مقاله نسبت قطر خارجی بیلوز به قطر تیوب برای کورس قالب ۱۰mm حدود ۱/۶۷ است که در مقایسه با مرجع [۶] كه ١/٥٢ است، نسبتاً بالا مي باشد. هر جـه ايـن نسـبت بـالا باشد، حساسیت فرآیند افزایش می یابد. برای مثال: در مرجع[8] محدوده تغییرات فشار برای رسیدن به قطعه مطلوب ۹٪ است که این مقدار در این تحقیق به کمتر از ۳٪ کاهش یافته است. بنابراین کنترل دقیق فشار بسیار مهم است و با افزایش این نسبت حساسیت آن افزایش می یابد. شکلهای ۵ و ۶ نشان میدهد که در قطعه نهایی کاهش ضخامت در ناحیه بیرونی ۱ (المان۴۳) و افزایش آن در ناحیه داخلی۲ (المان ۸۲) قابل مشاهده است. حداقل ضخامت اندازه گیری شده قطعه ساخته شده ۰/۰۷۳mm بوده است شکل ۱۰.

¹⁻ Crown point

²⁻ Inner point

مکانیک و هوافضا، جلد ۲، شمارهٔ ۲، آذرماه ۱۳۸۵

جدول۳_عناصر موجود در جنس تيوب اوليه												
Zn	Cd	Mg	Si	Fe	Al	Cu	Sb	Sn	Р	Cr	As	Na
0.0159	< 0.01	< 0.02	0.0123	0.0103	< 0.01	BAL	< 0.01	6.1164	0.0446	0.0168	< 0.01	0.012





شکل۳_(الف) مقطع برش خورده قطعه با استفاده از وایرکات (ب) موقعیت صفحات فلزی و تیوب (ج) بیلوز نهایی.

(Mpa) فشار	4.2	4.35	4.5	4.8
mm 8كورس قالب	چروکیدگی	كيفيت مطلوب	كيفيت مطلوب	نازک شدگی بیش از حد
10mmكورس قالب	چروکیدگی	چروکیدگی	كيفيت مطلوب	نازک شدگی بیش از حد
			•	

جدول ۴ ـ نتایج اجزای محدود فشار و کورسهای مختلف(B=8,10mm ، K=95 ، F=95) .





شکل۴۔ قطعه قابل قبول (الف) و چروک شده (ب) حاصل از متد اجزای محدود.

برای اندازه گیری توزیع ضخامت قطعه به خاطر هندسه پیچیده و کم بودن ضخامت، روشهای اندازه گیری معمول قابل استفاده نمی باشند. بنابراین برای اندازه گیری توزیع ضخامت ابتدا قطعه نهای با استفاده از دستگاه وایرکات^۱ در جهت قطری به دو قسمت بریده می شود، سپس مقطع قطعه برای از بین بردن پلیسههای حاصل از برش و افزایش دقت، پلیش کاری می شود. در انتها ضخامت قطعه در نواحی مختلف با استفاده از میکروسکوپ نوری با بزر گنمایی ۱۰۰ اندازه گیری می شود.

بیلوز نهایی سالم و چروک خورده حاصل از اجزای محدود در شکل ۴ نشان داده شده است. از نتایج تجربی مشاهده سی شود که کیفیت قطعات، شدیداً وابسته به فشار داخلی است. در فشار ۴/۲MPa چروکیدگی اتفاق میافتد در حالی که در فشار ۴/۵MPa پارگی در ناحیه بیرونی بیلوز روی می دهد و در فشار ۴/۳۵MPa بیلوز با کیفیت مطلوب حاصل می شود. بنابراین کنترل فشاردر فرآیند تولید بیلوز بسیار ضروری است. فشار داخلی و پیشروی محوری که منجر به تولید بیلوز با کیفیت مطلوب می شود، در شکل ۲ نشان داده شده است.

شکل **۵** تأثیر تغییرات پیشروی را روی توزیع ضخامت نشان میدهد. براساس شکل **۵** با افزایش مقدار پیشروی مقدار کاهش ضخامت افزایش مییابد. تأثیر پیشروی روی نازکشدگی در ناحیه بیرونی بیشتر از ناحیه داخلی است. تقریباً در ناحیه داخلی هیچگونه نازک شدگی اضافی با افزایش پیشروی مشاهده نمی شود. درصدهای پیشروی مقادیر ۲۵٪، ۸۵٪ و ۹۵٪ می باشند. محدوده قابل قبول برای تغییرات ضخامت حدود ۲۵٪ است. شکل **۶** تأثیر کورس قالب (فاصله اولیه صفات فلزی یا 'ds' در شکل **۵**، **۶، ۸**) را روی توزیع ضخامت نشان میدهد. این شکل نشان میدهد که با افزایش کورس قالب مقدار کاهش ضخامت بیلوز، افزایش مییابد. با مقایسه تأثیر پیشروی و کورس

کورس قالب بیشتر از پیشروی است. در کورس قالب ۱۲mm حداکثر کاهش ضخامت ۳۰٪ است که بیش از حد قابل قبول است. اما در کورس ۱۰mm توزیع ضخامت قابل قبول است. یکی از پارامترهای اساسی در تولید بیلوزهای فلزی فشار داخلی است. شکل ۷ تأثیر فشار داخلی را روی توزیع ضخامت بیلوز نشان میدهد. افزایش فشار داخلی باعث کاهش ضخامت بیشتر خصوصاً در ناحیه بیرونی (المان ۴۲) می شود. توزیع ضخامت در شبیهسازی اجزای محدود و قطعه ساخته شده در شکل ۷ نشان داده شده است. بر اساس این شکل حداکثر اختلاف در ناحیه بیرونی بیلوز است و دارای ۸٪ خطا میاشد. شکل ۸ تأثیر كورس قالب را روى قطر خارجى بيلوز نشان مىدهد. مطابق اين شکل افزایش کورس باعث افزایش قطر خارجی بیلوز می شود. این افزایش به صورت خطی میباشد. شبیهسازی اجزای محدود نشان میدهد که افزایش فشار تأثیر کمی روی قطـر بیلـوز دارد. در شکل ۹ تأثیر کورس قالب روی برگشت فنری نشان داده شده است. با افزایش کورس قالب برگشت فنری افزایش می یابد و حساسیت برگشت فنری در کورسهای بالاتر، بیشـتر مـیباشـد. تأثیر فشار روی برگشت فنری هم در شکل ۹ نشان داده شده است. افزایش فشار باعث افزایش برگشت فنری میشود. همچنین افزایش کورس باعث افزایش قطر خارجی میشود ولے، خطر چروکیدگی افزایش می یابد. مقایسه نتایج اجزای محدود و آزمایشهای تجربی در جدول ۵ بیان شده است. طبق جدول ۵، پس از حذف بـار طـول بيلـوز ۲۰٪ در تسـت تجربـی و ۲۵٪ در اجزای محدود افزایش مییابد. در آزمایش تجربی شعاع خارجی بیلوز ۰/۶٪ بعد از برگشت فنری و در اجزای محدود ۰/۵٪ کاهش می یابد. فشار در آزمایش تجربی برای رسیدن به قطعه مطلوب ۴/۳۵MPa و در شبیهسازی اجزای محدود ۴/۵MPa است که ۳/۴٪ خطا را نشان میدهد.. شکل ۱۰ تغییرات ضخامت بیلوز ساخته شده را نشان میدهد.

¹⁻ Wire Cut EDM



شکل۹_ تأثیر کورس قالب روی برگشت فنری.



شكل ١٠- توزيع ضخامت بيلوز ساخته شده و مقايسه با اجزاى محدود(پيشروى %Die Stroke=10mm,p=4.35,95) .

	D _{crown} (قبل از) D _{crown} (بعد از		+	طول بيلوز بعد از) L	قطر داخلی (D _{Inner Point}		
	(برگشت فنری	(برگشت فنری	u _{min}	(برگشت فنری	(برگشت فنری	(بعد از برگشت فنری	
FEM	21.95	22.06	0.078	0.875	0.5	13.15	
EXP	22.05	22.2	0.073	0.85	0.5	13.1	

جدول ۵_ نتايج تجربي و المان محدود (%p=4.5Mpa - d s=10mm -Feeding=95).

نتيجەگىرى

در این مقاله پارامترهای اساسی فرآیند ساخت بیلوزهای فلزی با استفاده از شبیهسازی اجزای محدود و آزمایشهای تجربی مطالعه شده و تأثیر فشار داخلی، کورس قالب و پیشروی روی توزیع ضخامت، قطر خارجی و برگشت فنری تحلیل شده است. آزمایشهای تجربی براساس نتایج اجزای محدود انجام شده و در نهایت نتایج زیر به دست آمده است:

- ۱-با بررسی تأثیر پیشروی مشاهده شده که با افزایش مقدار پیشروی، نازک شدگی بیشتری در ناحیه خارجی رخ میدهد ،اما تأثیری در ناحیه داخلی بیلوز ندارد. حداکثر اختلاف در اجزای محدود و نتایج تجربی ۸٪ است که از دیدگاه مهندسی قابل قبول میباشد.
- ۲-افزایش کورس باعث کاهش ضخامت در تمام نواحی بیلوز میشود، ولی کاهش ضخامت در ناحیه خارجی بیشتر از داخلی است. با افزایش کورس قطر خارجی افزایش مییابد. رسیدن به قطر بهینه، با بهینهسازی و یا با افزایش تعداد سعی و خطا در اجزای محدود صورت می گیرد.

میباشد. برای مثال، در کورس ۱۰۳m محدوده تغییرات فشار ۶/۶٪ و در کورس ۸ mm ۸، برابر ۱۳/۲٪ میباشد. ۴-افزایش کورس باعث افزایش قطر نهایی بیلوز و برگشت فنری میشود. ۵-با افزایش فشار، کاهش ضخامت بیشتر و افزایش برگشت فنری در بیلوز مشاهده میشود و حساسیت برگشت فنری نیز افزایش مییابد. شایان ذکر است که ساخت بیلوزهای فلزی با نسبت کشش بالا شایان ذکر است که ساخت بیلوزهای فلزی با نسبت کشش بالا برای اولین باردر ایران در این پژوهش انجام گرفته و نتایج آن باعث بومی شدن تکنولوژی ساخت این قطعات در کشور و

۳-حساسیت فرآیند به فشار بیشتر از حساسیت آن به کورس

تشکر و قدردانی

در پایان، نویسندگان از زحمات مدیر عامل و کارکنان شرکت مهندسی فناوری مقتدر و همچنین اساتید دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران تشکر و قدردانی مینمایند.

مراجع

- Broman,G.I., Jonsson, A.P., and Hermann, M.P. "Determining Dynamic Characteristics of Bellows by Manipulated Beam Finite Elements of Commercial Software", Int. J. Pressure Vessels and Piping, Vol. 77, No.8, pp.445-453, 2000.
- Igi, S., Katayama, H., and Kawahara, M. "Evaluation of Mechanical Behavior of New Type Bellows with Two Directional Convolutions; Nuclear Eng. & Design", Vol. 197, No. 2, pp. 107-114, 2000.
 Becht, C., "Fatigue Bellows a New Design Approach,
- Becht, C., "Fatigue Bellows a New Design Approach, Int. J. Pressure Vessels & Piping ", Vol. 77, No.13, pp.843-850, 2000.
- Zhu,Y.Z., Wang,H.F., and Sang,Z.F., "The effect of Environmental Medium on Fatigue Life for u-shaped Bellows Expansion Joints; Int. J. Fatigue", Vol. 28, No.1, pp.28-32, 2005.
- No.1, pp.28-32, 2005.
 Jakubauskas, V. and Werner, D.S., "Transverse Natural Frequencies and Flow Induced Vibrations of Double Bellows Expansion Joints", J. Fluids and Structures, Vol. 13, No.4, pp.461-479, 1999.
- 6. Lee,S.W., "Study on the Forming Parameters of the Metal Bellows", J. Material Processing Tech., Vol. 130-131, pp.47-53, 2002.
 - 7. Jha, A.K., Diwakar, V., and Sreekumar,K." Stress Corrosion Cracking of Stainless Steel Bellows of Satellite Launch Vehicle Propellant Tank Assembly", Eng. Failure Analysis,Vol. 10, No.6, pp.699-709.