



XIX. ULUSAL MEKANİK KONGRESİ

24-28 Ağustos 2015, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

ILIK HİDROMEKANİK DERİN ÇEKME PROSESİNİN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ VE PARAMETRİK OPTİMİZASYONU

Doğan Acar¹, Mevlüt Türköz², Hüseyin Selçuk Halkacı³, Hasan Gedikli⁴,
Ömer Necati Cora⁵

^{1,4,5} Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon

^{2,3} Selçuk Üniversitesi, Konya

ABSTRACT

In current study, a comprehensive finite element modeling was established for warm hydromechanical deep drawing process which is a promising technique in forming of aluminum alloys that are expected to be increasingly exploited in automotive industry along with lightweighting efforts. Different number of elements and element formulations, coefficients of friction for contacting surfaces and material models were systematically tested and optimum choices and values were determined. In the second part of the study, optimum tool temperature, and loading profiles (hydraulic pressure and blank holder force) were obtained parametrically to achieve highest formability in warm hydromechanical deep drawing process by using established FE model. As a result, elastic-viscoplastic-thermal material model was found to be reflecting the material behavior better compared to other material models utilized. Coulomb friction coefficient for contacting surfaces blank-die, blank-blank holder and blank-punch were determined as 0.05, 0.05 and 0.25, respectively. Optimal temperatures values for die and punch were determined as 300 and 25°C, respectively when highest formability is taken into account. Hydraulic pressure was found to be more effective on formability than blank holder force.

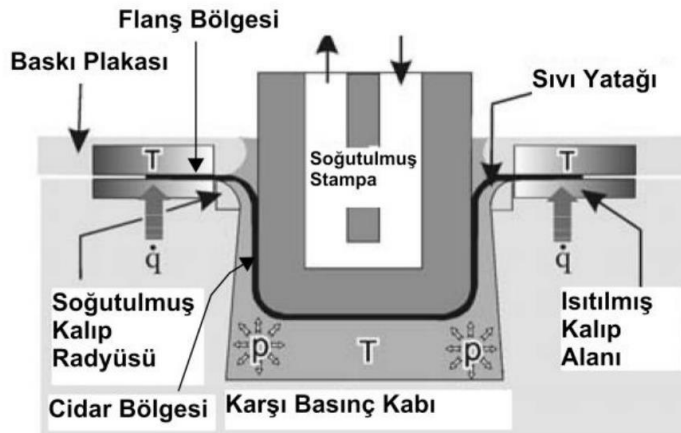
ÖZET

Bu çalışmada otomotiv sanayiinde taşıt ağırlığını azaltmak için giderek artan şekilde kullanılan alüminyum alaşımlarının şekillendirilmesinde kullanılan geleneksel yöntemlerin yerini almaya başlayan ılık hidromekanik derin çekme prosesinin kapsamlı bir sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Farklı eleman sayıları ve eleman formülasyonları, temasta bulunan bileşenler için farklı sürtünme katsayıları ve malzeme modelleri sistematik bir şekilde denenerek sonlu eleman modeli için en uygun tercihler ve değerler belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında ise, oluşturulan sonlu elemanlar modeli ile ılık hidromekanik derin çekme işlemindeki takım sıcaklıklarının ve yükleme profillerinin (hidrolik basıncı ve baskı plakası kuvveti) en iyi şekillendirilebilirliği veren değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde, malzeme davranışını en iyi elastik-viskoplastik-termal malzeme modelinin yansıttığı belirlenmiştir. Coulomb sürtünme katsayıları sac-kalıp ara yüzeyi için 0.05, sac-baskı plakası için 0.05 ve sac-zımba sürtünme yüzeyleri arasında 0.25 olarak tespit edilmiştir. En iyi şekillendirmenin sağlanabilmesi için kalıp ve zımbaya ait sıcaklık değerleri sırasıyla 300 ve 25 °C olarak belirlenmiştir. Hidrolik basıncın baskı plakasının kuvvetine göre daha etkin bir parametre olduğu görülmüştür.

GİRİŞ

Tüm dünyada fosil yakıtların tüketimi, petrol fiyatları ve CO₂ emisyonları 1973 yılındaki büyük petrol krizinden bu yana sürekli olarak artmaktadır [1]. Enerji piyasası denetleme kurulu tarafından hazırlanan rapora göre 2010-2012 yılları arasında ülkemizde ham petrolün temin edilmesinde yerli kaynakların kullanımında azalma olurken, ihtiyacın karşılanmasında ithalata yönelme gerçekleşmiş ve toplam ham petrol tüketimi yaklaşık %12 artış göstermiştir [2]. Bu artışla birlikte son 10-20 yılda artan rekabet koşulları ve çevresel düzenlemeler (hava kirliliği ve küresel ısınma karşıtı yasal düzenlemeler) otomotiv firmalarını, daha hafif, daha az yakıt tüketen, daha az CO₂ emisyonu açığa çıkaran ve mukavemet/ağırlık oranı daha yüksek araçlar üretmeye sevk etmiştir. Bu yüzden üreticiler, hafif ağırlıklı malzemeler, alaşımlar ve kompozit malzeme kullanımının arttırmak ve/veya bu malzemelerin kullanıldığı yerlerde ağırlık optimizasyonu yaparak daha hafif ve fonksiyonel yapılar haline getirmek zorundadırlar [3].

Hem literatürde hem de sanayide motorlu taşıtların gövdelerinde düşük karbonlu çelik (DKÇ) gibi otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan birçok malzemenin yerine alüminyum gibi hafif malzemelerin kullanılması ile ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Schultz, taşıt ağırlığının %10 azaltılması halinde yakıt tüketiminin % 6-8 azaltılabileceğini belirtmiştir[4]. DKÇ yerine alüminyum kullanılması halinde araç ağırlığında % 40-60 azalma elde edilebilmektedir. Ancak alüminyum alaşımlarının içerisindeki yüksek alaşım yüzdeleri sebebiyle oda sıcaklığındaki şekillendirilebilirlikleri sınırlıdır [5, 6]. Bundan dolayı, oda sıcaklığının üzerinde ancak yeniden kristalleşme sıcaklığının (Al alaşımları için 230-330 °C) altındaki sıcaklıklarda gerçekleştirilen ılık şekillendirme (İŞ) yöntemi bu alaşımların şekillendirilmesinde büyük önem arz etmektedir [5, 7]. İŞ'nin katkısıyla, şekillendirme kuvvetleri azalmakta ve aktif hale gelen ek kayma düzlemleri yardımıyla malzemelerin şekillendirilebilirliği (sünekliliği) artmaktadır [6]. Ayrıca bu yöntemle yapılan sac şekillendirme işlemlerinde daha yüksek kap derinlikleri de elde edilebilmektedir [8]. Alüminyum alaşımlarının oda sıcaklığındaki şekillendirilmesindeki bariyeri aşmak için kullanılan bir diğer yöntem ise şekillendirmenin zımba ilerlemesine karşı olarak hidrolik basıncının kullanıldığı hidroşekillendirme (HŞ) metodudur [3, 9]. Son yıllarda, hem İŞ hem de HŞ yöntemlerinin avantaj ve özelliklerinin bir araya getirildiği ve hafif alaşımların şekillendirilmesinde ılık şekillendirilmesinde ılık hidromekanik derin çekme (IHDC) yöntemi ön plana çıkmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Ilık hidromekanik derin çekme prosesi ve prensipleri [10]

Sac malzemelerin derin çekilmesinde şekillendirilebilirliğin değerlendirilmesinde kullanılan kriterlerden biri de sınır çekme oranıdır (SÇO). SÇO genel olarak tek kademedede başarıyla

şekillendirilebilen en büyük başlangıç sac çapının zımba çapına oranı olarak tanımlanmaktadır. Çizelge 1’de verilen, literatürde yapılmış bazı deneysel çalışmaların sonuçları incelendiğinde IHDC prosesinin diğer malzeme şekillendirme proseslerine nazaran çok daha etkili olduğu görülmektedir [10-12].

Çizelge 1. Farklı proseslerin malzemenin sınır çekme oranına etkilerinin karşılaştırılması

Çalışma	Klasik Derin Çekme	Hidromekanik Derin Çekme	Ilık Şekillendirme	Ilık Hidromekanik Derin Çekme
<i>Groche ve ark. [10]</i>	-	2.5	2.7	-
<i>Kurz [11]</i>	-	-	2.8	3.6
<i>Xu ve ark. [12]</i>	2.0	-	-	3.3

IHDC yöntemi başlı başına, alüminyum gibi hafif malzemelerin şekillendirilebilirliğinde önemli bir artış sağlasa da daha yüksek ve başarılı şekillendirme işlemi için prosesi etkileyen parametrelerin etkileri ve en iyi şekillendirilebilirliği veren proses parametreleri belirlenmelidir. Choi ve arkadaşları başarılı bir IHDC işlemi için proses boyunca kontrol edilmesi gereken değişkenleri zımba ve kalıp sıcaklıkları, hidrolik basıncı ve baskı plakası kuvveti olarak belirlemişlerdir [13]. Aynı araştırmacılar, kalıp ve zımba üzerindeki sıcaklık dağılımını belirlemek için adaptif-izotermal sonlu elemanlar analizine bağlı bir yöntem geliştirmişlerdir. Başka bir çalışmada ise yine sıcaklık parametresini literatürdeki deneysel verilerden yararlanarak analitik olarak incelemişlerdir [14]. Bir diğer çalışmada HB ve BPK değerleri, bulanık mantık algoritması ile oluşturulmuş bir alt program sonlu elemanlar kodu ile eş çalıştırılarak belirlenmiştir [15]. Altan ve arkadaşları HB ve BPK değerlerini adaptif sonlu elemanlar yöntemini kullanarak elde etmişlerdir [16].

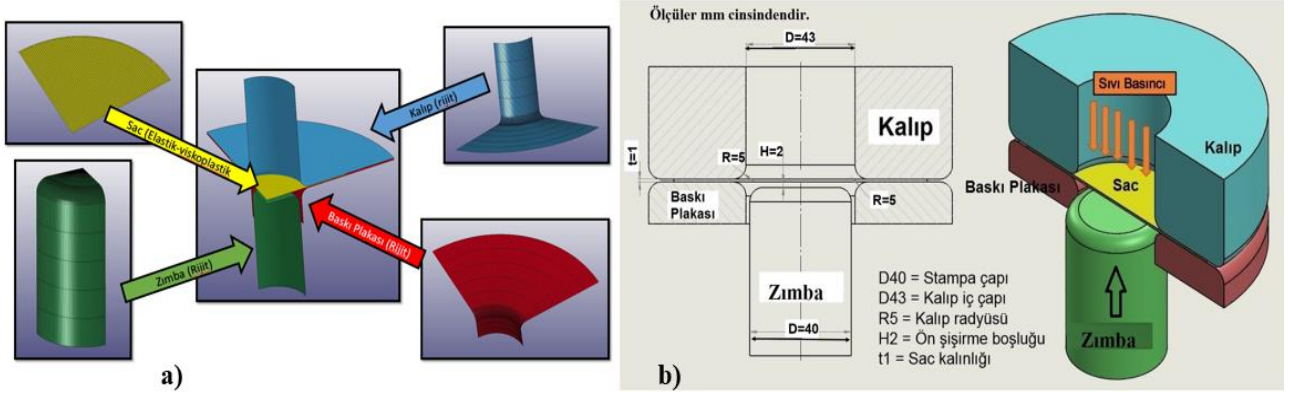
Bu çalışma kapsamında, en iyi şekillendirilebilirliği veren takım sıcaklık dağılımı ve HB ve BPK yükleme profillerinin şekillendirilebilirliğe etkileri şekillendirilen AA5754-O sacı üzerindeki kalınlık dağılımı esas alınarak sayısal olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Sayısal çalışmalarda LS-DYNA (LSTC Corp., Livermore, CA, ABD) ticari sonlu elemanlar yazılımı ve onunla eş çalışan optimizasyon modülü LS-OPT kullanılmıştır [17].

YAPILAN ÇALIŞMALAR

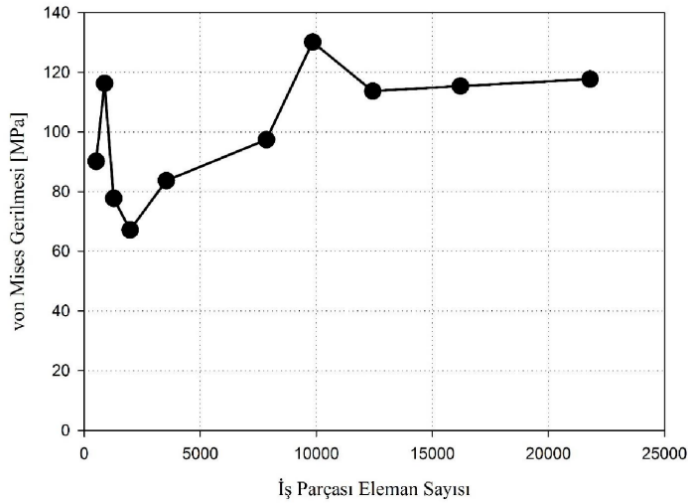
Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Ilık hidromekanik derin çekme prosesinin sonlu eleman modeli sırasıyla sac, kalıp, baskı plakası ve zımba olmak üzere dört ana parçadan oluşmaktadır. Bu parçalar ile oluşturulan sonlu eleman modeli ve boyutlar Şekil 2’de verilmiştir. Sonlu eleman modeli hazırlanırken sistemin eksene simetrik geometrisinden faydalanarak çeyrek model hazırlanmıştır. Proses süresince yüksek miktarda deformasyona uğrayan sac elastik-viskoplastik olarak tanımlanırken diğer parçalar rijit olarak tanımlanmıştır. Parçaların modellenmesinde eleman tipi olarak Belytschko-Tsay (eleman tipi 2) ve tam entegrasyonlu (fully integrated – eleman tipi 16) kabuk elemanlar denenmiştir. Kabuk elemanların kalınlığı boyunca 7 entegrasyon noktası tanımlanmıştır. Belytschko-Tsay eleman formülasyonu daha hızlı sonuç vermişse de

tam integrasyonlu eleman formülasyonunun malzeme davranışını daha iyi yansıttığı görülmüştür. Kalıp, baskı plakası ve zımba sırasıyla 1600, 1536, 1600 sabit eleman sayılarından oluşurken, sac için 1000-25000 arasında eleman sayısı denenerek ağ örgüsü (mesh) yakınsaklık analizleri sonucunda optimum eleman sayısı yaklaşık 12000 olarak belirlenmiştir (Şekil 3). Bu değerlendirme için sac üzerindeki sabit bir noktadaki maksimum von Mises gerilme değerleri dikkate alınmıştır.

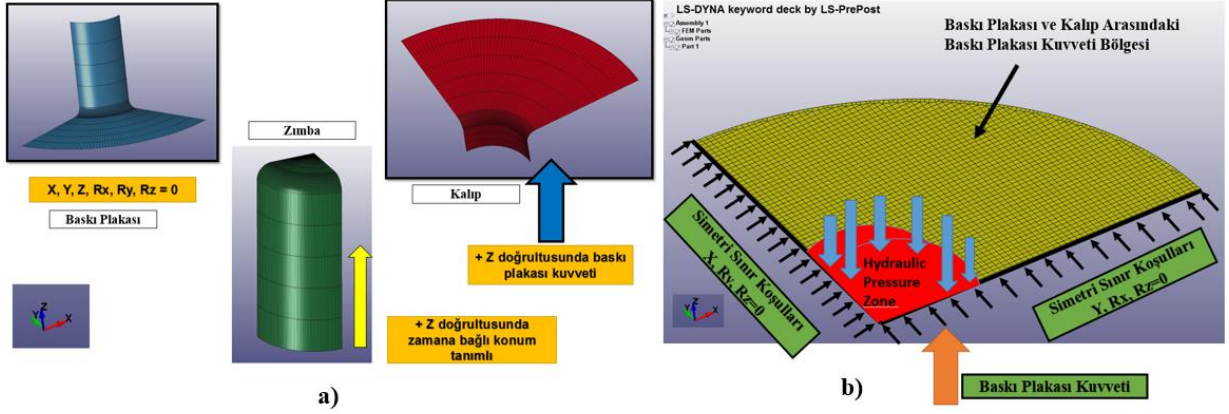


Şekil 2. a) Sonlu eleman modeli, b) Model geometrisi ve ölçüler



Şekil 3. Sac için kullanılan eleman sayısının sonuçlara etkisi

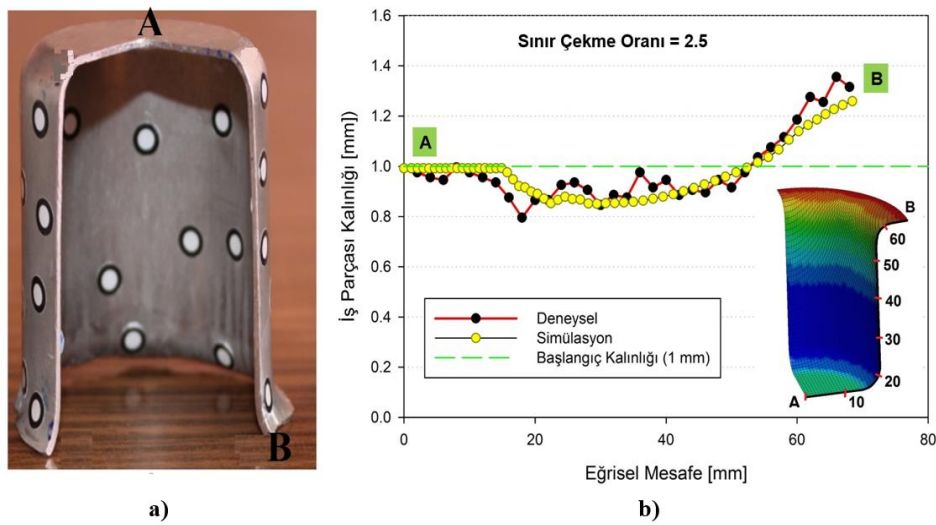
Kalıbın tüm serbestlik dereceleri (her üç eksen üzerindeki ötelenme ve dönmeler) sınırlandırılmıştır. Zımba ve baskı plakası için ise sadece z-ekseni doğrultusunda harekete müsaade edilmiştir. Sac üzerine simetri sınır koşulları tanımlanmış ve sac, baskı plakası ile kalıp arasında baskı plakası kuvveti yardımıyla tutulmuştur. Hidrolik basıncı uygularken, akışkanı modellenmek yerine sac üzerinde tanımlanan bir bölgeye hidrolik basıncı olarak uygulanmıştır. Takımlar ve sac için başlangıç ve sınır koşulları Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Başlangıç ve sınır koşulları: a) Baskı plakası, zımba ve kalıp için; b) Sac için

Sac-kalıp, sac-baskı plakası ve sac-zımba olmak üzere üç adet temas yüzey çifti belirlenmiştir. Bu yüzey çiftleri arasında belirlenen *Coulomb* sürtünme katsayıları çeşitli denemeler sonucunda sırasıyla 0.05, 0.05 ve 0.25 olarak belirlenmiştir. Temas algoritması olarak *forming-one-way-surface-to-surface*, *automatic-single-surface* ve *automatic-surface-to-surface* algoritmaları ile yapılan denemeler sonucunda *forming-one-way-surface-to-surface* algoritmasının temas davranışını en iyi bir şekilde yansıttığı görülmüştür. Literatürdeki çalışmalarda, *piecewise linear plasticity*, *power-law plasticity*, *Johnson-Cook* ve elastik-viskoplastik-termal malzeme modellerinin kullanıldığı görülmüştür. Bu malzeme modellerinden ilk ikisinin kullanımı için sac üzerinde homojen bir sıcaklık dağılımı gerekmektedir. Ancak, uygulamada sac üzerinde sac üzerindeki sıcaklık dağılımı homojen olmadığından *Johnson-Cook* ve elastik-viskoplastik-termal malzeme modelleri tercih edilmiştir. Her iki malzeme modeliyle de başarılı sonuçlar elde edilse de elastik-viskoplastik-termal malzeme modeli doğrudan farklı sıcaklıklarda elde edilen akma eğrilerini kullanmaya imkân sağladığından deneysel sonuçlara daha yakın değerler elde edilmiştir.

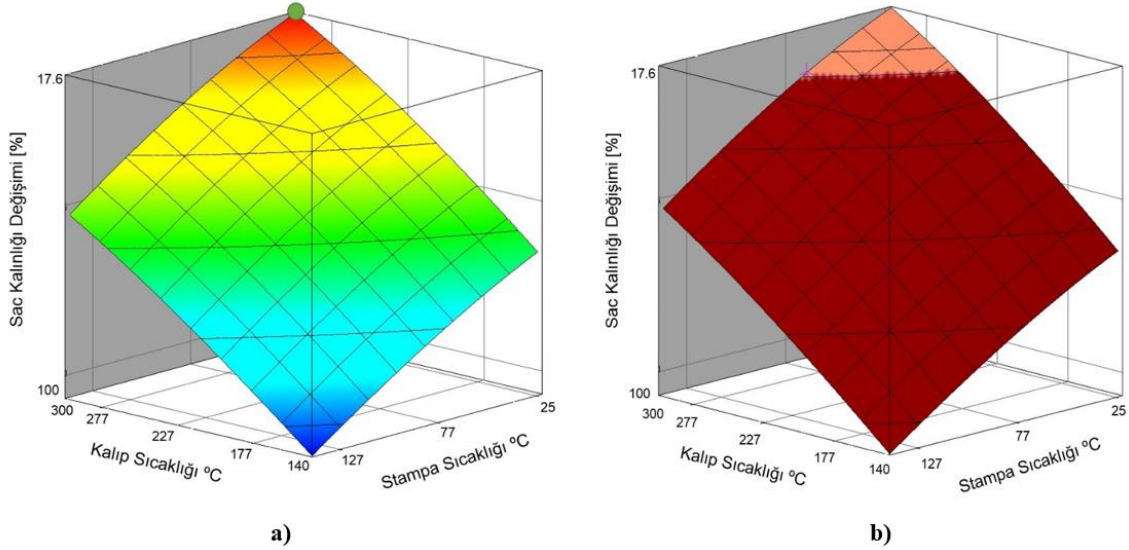
Tüm bu çalışmaların sonunda hazırlanan sonlu elman modelinin doğrulaması şekillendirilmiş bir kap üzerindeki bir kesitten alınan ölçüler ile sayısal analiz sonucunda elde edilen değerler karşılaştırılarak yapılmıştır. Şekil 5'ten de görülebileceği gibi hem deneysel hem de sayısal veriler yüksek oranda uyum göstermektedir.



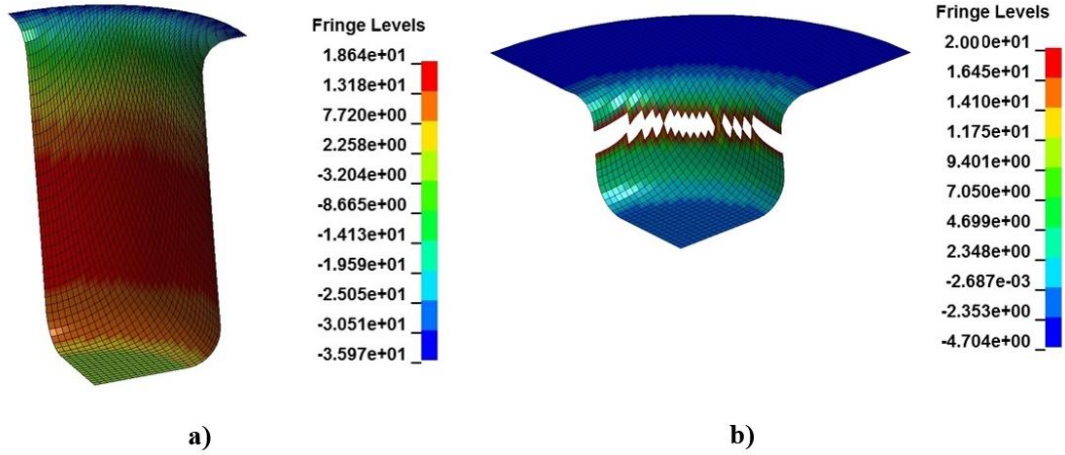
Şekil 5. a) Deney numunesi, b) Sonlu eleman modelinin doğrulaması için deneysel ve sayısal kalınlık dağılımlarının karşılaştırılması

Sıcaklık Optimizasyonu

Çalışmanın bu kısmında, en iyi şekillendirmenin sağlandığı kalıp, baskı plakası ve zımba sıcaklıklarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla sıcaklık optimizasyonunda diğer tüm parametreler sabit iken sadece kalıplar ve zımba üzerindeki sıcaklık değerleri değişken olarak ele alınmıştır. Sacın başlangıç sıcaklığı oda sıcaklığı (25 °C) olarak kabul edilirken, kalıp üzerindeki sıcaklık aralığı 140-300 °C ve zımba üzerindeki sıcaklık aralığı 25-140 °C olarak kabul edilmiştir. AA5754-O alüminyum alaşımının yeniden kristalleşme sıcaklığına göre belirlenen bu değerler LS-DYNA programında parametrik olarak tanımlanmış ve LS-OPT programında 10 farklı örnekleme noktasında analiz edilmiştir. Analizler değerlendirilirken sac üzerinde yırtılma gerçekleşmeden elde edilen maksimum sac incelleme yüzdesi kriter olarak ele alınmıştır. Yapılan analizler sonucunda Şekil 6'da verilen tepki yüzeyleri elde edilmiştir. Şekil 6.a'dan görülebileceği gibi sacda yırtılma olmadan sac üzerindeki maksimum incelleme kalıp sıcaklığı 300 °C ve zımba sıcaklığı 25 °C iken gerçekleşmiştir. Şekil 6.b'de ise aynı yüzey grafik üzerinde biri açık renkli diğeri koyu renkli iki bölge tespit edilmiştir. Bu bölgelerden açık renkli olanı şekillendirmenin güvenli olduğu bölgeyi temsil ederken koyu renkli bölge şekillendirmenin riskli olduğu bölgedir. Bu yorumu doğrulamak amacıyla her iki bölgeden birer adet kalıp-zımba sıcaklıkları kombinasyonu ile analizler gerçekleştirilmiştir. Güvenli bölgeden 260 °C kalıp, 25 °C zımba sıcaklığı çifti seçilirken riskli bölgeden 140 °C kalıp ve 25 °C zımba sıcaklığı çifti seçilmiştir. Yapılan iki analiz sonucuları Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7.a'da güvenli bölgede yapılan analiz 45 mm zımba ilerlemesinde başarılı bir şekillendirme ile sonuçlanmıştır. Ancak, riskli bölgede gerçekleştirilen analiz 17.5 mm zımba ilerlemesinde daha şekillendirme işlemi tamamlanmadan sacın yırtılması ile sonuçlanmıştır.



Şekil 6. a) Kalıp ve zımba için yapılan sıcaklık optimizasyonu sonuçları b) Kalıp ve zımba için yapılan sıcaklık optimizasyonu sınır değerleri (müsaade edilebilir incelleme: açık renkli bölge; riskli bölge: koyu renkli bölge)



Şekil 7. Farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilen ılık hidromekanik derin çekme işlemi ve yüzde kalınlık dağılımı a) 260 °C kalıp ve 25 °C zımba sıcaklığında (başarılı şekillendirme), b) 140 °C kalıp ve 25 °C zımba sıcaklığında (yetersiz şekillendirme ve hasar)

Yükleme Profillerinin Şekillendirme Üzerindeki Etkisi

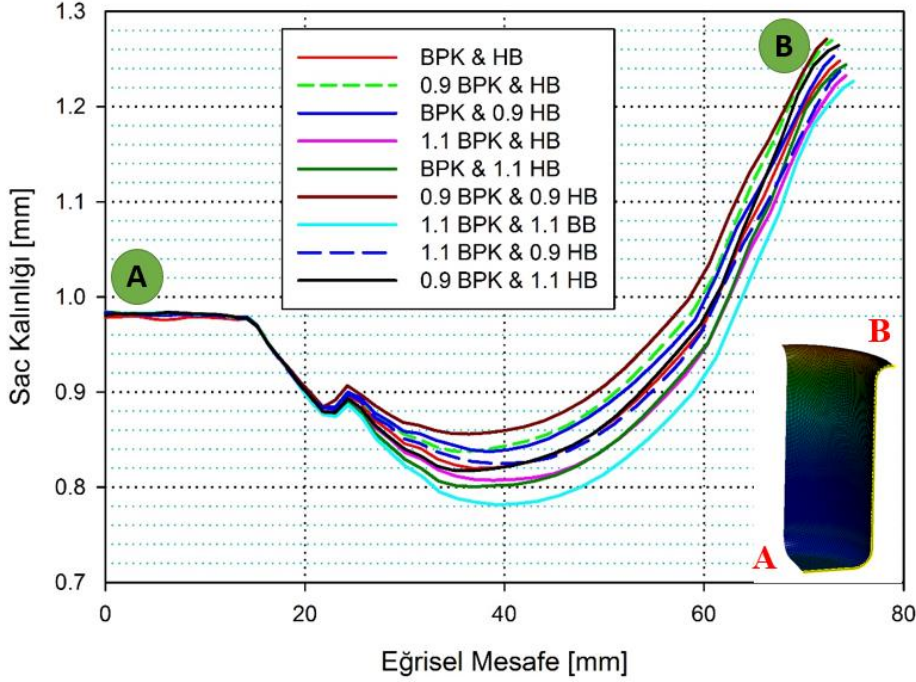
IHDÇ ile başarılı bir şekillendirme yapabilmek için ayrıca proses parametrelerinin, proses ve şekillendirilen parça üzerindeki etkilerini tam olarak bilinmesi gerekir. BPK ve HB yüklemeye profilleri IHDÇ prosesinin en önemli parametrelerindedir.

BPK ve HB'nin proses ve şekillendirilen parça üzerindeki etkilerini incelemek için şekillendirilmiş sacların kalınlıklarının yüklemeye profillerine bağlı olarak değişimleri incelenmiştir. Bu amaçla, ilk önce mevcut başarılı şekillendirme yapılabilen BPK ve HB yüklemeye profili çiftlerinden bir tanesi seçilmiştir. Seçilen BPK ve HB yüklemeye profilleri 1.1 ve 0.9 katsayıları ile çarpılarak profillerin \pm % 10 değiştirilmeleri halindeki değerleri belirlenmiştir. Ardından mevcut ve yeni profiller ile BPK-HB çiftleri oluşturularak 9 farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kullanılan bu profil çiftleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Analizlerde kullanılan farklı yüklemeye profili çiftleri

Analiz No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Yüklemeye Profilleri</i>	BPK HB	0.9BPK HB	BPK 0.9HB	1.1BPK HB	BPK 1.1HB	0.9BPK 0.9HB	1.1BPK 1.1HB	1.1BPK 0.9HB	0.9BPK 1.1HB

Çizelge 2'de verilen 9 farklı analiz gerçekleştirildikten sonra şekillendirilmiş sacların merkezinden kenarına olan eğrisel mesafe boyunca alınan kalınlık değişimleri karşılaştırılmıştır. Aynı çaptaki sacdan aynı derinlikteki kap çekilirken sacdaki incelme miktarının minimum olduğu durumda uygulanan yüklemeye çiftinin en iyi şekillendirmeyi veren profiller olduğu kabul edilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde, 0.9 BPK & 0.9 HB yüklemeye profili çifti ile şekillendirilen kap üzerindeki kalınlık dağılımı minimum incelmeyle gerçekleşmiş, dolayısıyla en iyi şekillendirmeyi vermiştir. Bu durumda, hem BPK hem de HB yüklemeye profilleri aynı ölçüde azaltıldığında şekillendirilebilirlik daha fazla artmaktadır.



Şekil 8. BPK ve HB'nin şekillendirilmiş sac üzerindeki birleştirilmiş etkisi

SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında başarılı bir ılık hidromekanik derin çekme işlemi için detaylı bir sonlu elemanlar modeli hazırlanmıştır. Sonlu eleman modelinin oluşturulmasında, temas algoritması için forming-one-way-surface-to-surface, malzeme modeli için elastik-viskoplastik termal, eleman formülasyonu için tam integrasyonlu kabuk eleman en iyi sonucu veren parametreler olarak belirlenmiştir. Temas yüzeyi çiftleri olan sac-kalıp, sac-baskı plakası ve sac-zımba için Coulomb sürtünme katsayısı ise sırasıyla katsayısı 0.05, 0.05 ve 0.25 olarak elde edilmiştir. Maksimum şekillendirilebilirlik için yapılan sıcaklık optimizasyonu sonucunda kalıp sıcaklığının 300 °C ve zımba sıcaklığının 25 °C olması halinde en iyi şekillendirme elde edilmiştir. Yükleme profilleri değerlendirmeye alındığında hem BPK hem de HB yükleme profillerinin birlikte azaltılmasıyla şekillendirilmiş sac üzerinde minimum incelme ile maksimum şekillendirilebilirlik elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, 112M913 numaralı ve “Ilık Hidromekanik Derin Çekmede Sıcaklık, Hidrolik Basıncı Ve Baskı Plakası Kuvvetinin Proses Ve Üretilen Parçalara Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Merrill KR. The Oil Crisis of 1973-1974: A Brief History with Documents. First Edition ed. Bedford/St. Martin's; New York, USA, 2007.
- [2] TC EPDK PPD Başkanlığı. Petrol Piyasası Sektör Raporu. 2013.

- [3] Koç M. Hydroforming for Advanced Manufacturing. In: Koç M, editor. Cambridge England: Woodhead Publishing Ltd.; 2008.
- [4] Schultz RA, Abraham AK. Metallic Material Trends for North American Light Vehicles. Great Designs in Steel. 2009.
- [5] Novotny S, Geiger M. Process Design for Hydroforming of Lightweight Metal Sheets at Elevated Temperatures. Journal of Materials Processing Technology. 2003;138:594-9.
- [6] Shah MK. Material Characterization and Forming of Light Weight Alloys at Elevated Temperature [Master Thesis]: The Ohio State University; 2011.
- [7] Bobbert S, Novotny S, Vahl M, Geiger M. Process strategies for sheet metal hydroforming of lightweight components. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2001;215:967-76.
- [8] Li D, Ghosh AK. Biaxial Warm Forming Behavior of Aluminum Sheet Alloys. Journal of Materials Processing Technology. 2004;145:281-93.
- [9] Schmoekkel D, Hielscher C, Huber R, Geiger M. Metal Forming of Tubes and Sheets with Liquid and Other Flexible Media. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 1999;48:497-513.
- [10] Groche P, Huber R, J D, Schmoekkel D. Hydromechanical Deep Drawing of Aluminum Alloys at Elevated Temperatures. Manufacturing Technologies. 2002;51:215-8.
- [11] Kurz G. Heated Hydro-Mechanical Deep Drawing of Magnesium Sheet Metal. Essential Readings in Magnesium Technology. 2004:389-93.
- [12] Xu Y, Kang D, Zhang S. Investigation of SUS 304 Stainless Steel with Warm Hydro-mechanical Deep Drawing. Journal of Materials Science & Technology. 2004;20:92-3.
- [13] Choi H, Koç M, Ni J. A Study on Warm Hydroforming of Al and Mg Sheet Materials: Mechanism and Proper Temperature Conditions. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2008;130:1752-66.
- [14] Choi H, Koç M, Ni J. A Study on the Analytical Modeling for Warm Hydro-mechanical Deep Drawing of Lightweight Materials. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007;47:1752-66.
- [15] Choi H, Koç M, Ni J. Determination of Optimal Loading Profiles in Warm Hydroforming of Lightweight Materials. Journal of Materials Processing Technology. 2007;190:230-42.
- [16] Altan T. Tube and sheet hydroforming - new development in equipment, tooling and process simulation. 2nd Annual North American Hydroforming Conference. Ontario, Canada2004.
- [17] Hallquist JO. LS-DYNA Keyword User's Manual. Livermore Software Technology Corporation. 2007.