<학술논문> **DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.11.1267**

핫 프레스 벤딩 공정에서 냉각회로 최적화를 위한 공정변수의 평가

남기주* · 최홍석* · 고대철** · 김병민†

(2009년 6월 30일 접수, 2009년 9월 2일 수정, 2009년 9월 3일 심사완료)

Evaluation of Design Parameters for Optimizing the Cooling Channel in Hot Press Bending Process

Ki-Ju Nam, Hong-Seok Choi, Dae-Cheol Ko and Byung-Min Kim

Key Words: Hot Press Bending(핫프레스벤딩),Cooling Channel(냉각채널),Phase Transformation(상변태),Cycle Analysis(사이클 해석),Turbulent Flow(난류유동)

Abstract

Hot press forming can produce high-strength components by rapidly cooling between closed punch and die after hot forming using quenchable boron steel austenized in a furnace. In the hot press forming process, the cooling rate is influenced by the size, position and arrangement of the cooling channel and the file condition of cooling water in the die. Also, mechanical properties of the final components and operation time are related to cooling rate. Therefore, the design of optimized cooling channel is one of the most important works. In this paper, the effect of position and size of the cooling channel on the cooling rate was investigated by using design of experiment and FE analysis in hot press bending process. Therefore the optimum cooling channel ratio was presented in the HPB.

1. 서 론

최근 자동차의 충돌안전성 및 경량화가 대두되면서 보론강을 이용한 핫프레스포밍(Hot Press Forming) 공법 기술에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.[1~4] 핫프레스포밍 공법은 블랭크(Blank)를 가열하여 완전 오스테나이트(Austenite)로 만든 후 성형과 동시에 금형 내부에서 퀜칭(Quenching)을 실시하여 마르텐사이트(Martensite) 변태에 의한 1500MPa급 이상의 강도를 가진 제품을 제조하는 공법이다. 핫프레스포밍에서 냉각시스템이 없는 연속생산공정에서는 금형의 온도가 200~350℃까지 상승한다.[5] 그러나 핫프레스포밍에서는 냉각채널을 이용하여 금형의 온도를 200℃이하로 유지해야 고강도의 제품을 얻을 수 있다.[6] 현재까지 핫프레스포밍 공법의 냉각채널설계에 관련된 연구에서 Heinz Steinbeiss[7]는 ISF(Institut fur Spannende Fertigung)[8]라는 사출금형 냉각채널 최적화 프로그램과 EA(Evolutionary Algorithm)를 사용하여 냉각채널의 최적화 방안을 제시하였다.

본 연구에서는 핫프레스포밍 공법의 일종인 핫프레스벤딩(HPB)공정을 해석하고, 이를 바탕으로 냉각채널의 최적화를 수행하였다. 그 선행단계로써 고온에서의 물성치를 파악하기 위해 재료 물성 모델러(Modeler)로 신뢰성이 있다고 알려진 J-MatPro[9,10]를 사용하여 보론강의 물성치를 획득하였으며, 유한요소해석 통해 HPB공정의 열-기계적 연성해석, 냉각해석 및 상(Phase)변태 해석을 수행하였다. 또한 냉각채널 설계의 최적화를 위

[이 논문은 대한기계학회 2009년도 부산지부 춘계학술대회(2009. 5. 8., 동명대) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : bmkim@pusan.ac.kr
TEL : (051)510-3074 FAX : (051)581-3075
* 부산대학교 대학원 정밀가공시스템전공
** 부산대학교 ILIC

해서 냉각효율에 가장 큰 영향을 미치는 공정변수를 파악하고자 실험계획법을 적용하였다. 유한요소해석의 결과를 바탕으로 다양한 공정변수의 조합 중 최적의 냉각효율을 갖는 냉각채널의 조건을 제시하였고, 기존 사출금형 냉각채널 설계방법에 의한 냉각효과와 비교하여 나타내었다.

2. HPB 공정의 유한요소해석

2.1 보론강의 열-기계적 물성 모델링

핫프레스포밍 공법에서는 블랭크의 담금질성을 증대시키기 위해 붕소(Boron)첨가강을 사용하며, Table 1에 본 연구에 사용된 보론강의 화학적 성분을 나타내었다. 핫프레스포밍 공법은 블랭크의 소성변형, 금형과 블랭크 사이의 열전달 및 그에 따른 상변태가 동시에 발생하기 때문에 각 상에 대한 온도별 열-기계적 물성치가 필요하다. 각 상별 요구되는 물성은 온도와 변형률속도에 따른 유동응력과 탄성계수, 쁘아송비, 열팽창계수 및 열전달계수 등이 있고, 상변태에 대해서는 CCT 선도와 마르텐사이트 변태에 관한 함수가 정의되어야 한다.[11] 이러한 복잡한 물성을 용이하게 획득하기 위해 열역학적 계산에 근거하여 재료의 열-기계적 물성치를 얻을 수 있는 J-MatPro를 사용하였다. 상온상태의 항복강도, 오스테나이트화 온도, 결정립크기 및 블랭크의 화학조성을 입력변수로 하여 Boron강의 다양한 물성치를 획득하였다. Fig. 1에는 획득한 물성치중 CCT선도를 대표적으로 나타내었다. 해석 시, 각 공정에서의 대류열전달 및 계면열전달 효과도 고려하였으며, 신뢰성 확보를 위해 온도에 따른 마찰계수의 변화와 압력에 따른 열전달계수의 변화 또한 고려하였다.[12]

Table 1 Chemical composition of the quenchable boron-steel

(Unit : wt %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	B	Fe
0.22	0.4	1.4	0.03	0.015	0.37	0.003	97.562

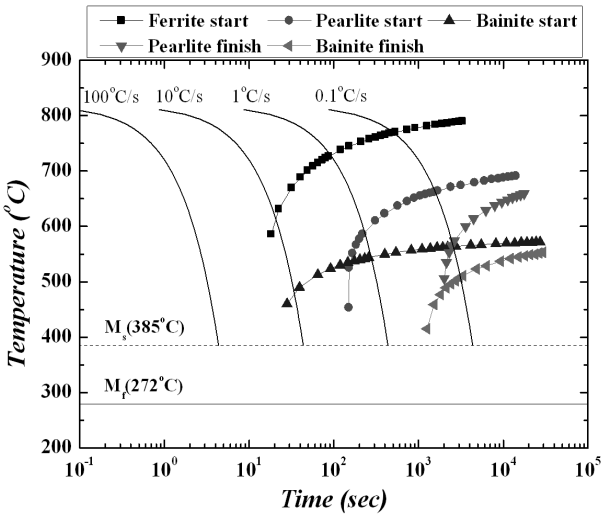


Fig. 1 CCT diagram of the boron steel

2.2 유한요소해석

Fig. 2는 본 연구에서 적용한 HPB공정의 개략도를 나타내었다. 먼저 초기블랭크는 900℃의 온도로 가열로에서 5분간 가열된 후 금형으로 3초간 이송된다. 상형금형이 블랭크까지 내려오는 시간을 2초, 성형완료시점까지 2초, 그리고 냉각시간을 20초로 선정하였으며, 일련의 공정은 상용 해석 프로그램인 DEFORM 2D(Ver_9.1)를 사용하여 유한요소해석을 수행하였다.

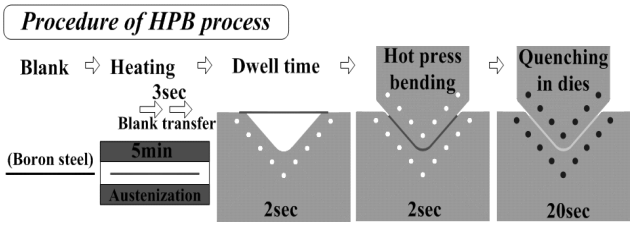


Fig. 2 Schematic of the processes in the HPB

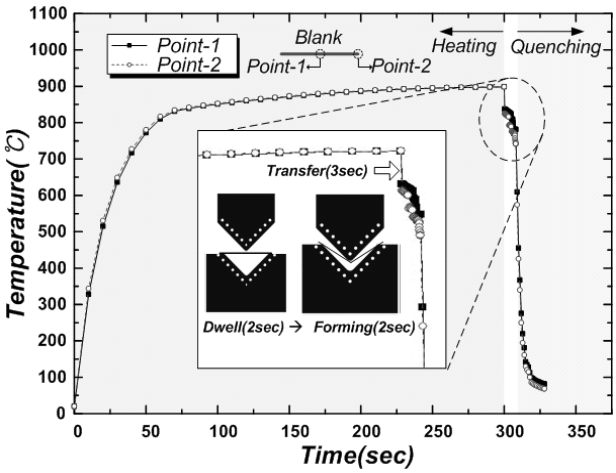


Fig. 3 Temperature change of the blank at 1cycle in the HPB

Fig. 3에는 HPB공정의 1cycle동안 블랭크의 중심부(point-1)와 끝단부(point-2)의 온도변화를 나타내었다. 3초간 이송된 블랭크는 815~830℃의 분포를 나타내며, 금형에 안착 후 성형완료시점의 블랭크의 온도는 약 740℃로 하강하였다. 또한 20초 냉각 후에는 70~85℃의 온도분포를 나타내었으며, 이때 블랭크의 냉각속도는 135℃/s로서 마르텐사이트 변태가 대부분 발생하였다

3. 냉각채널 최적화

핫프레스포밍은 금형으로의 열전달에 의한 냉각을 이용하여 마르텐사이트 조직을 얻는 공법이므로 금형은 신속한 냉각이 이루어져야 한다. Fig. 3에서도 알 수 있듯이 1cycle에서는 금형에 냉각시스템이 없더라도 금형자체의 열용량 및 열전도도로 인해 블랭크가 급랭이 되지만 연속생산 공정에서는 금형의 온도가 지속적으로 상승하기 때문에 냉각시스템이 필요하며, 여기서 냉각시스템의 효율은 최종제품의 고강도화 뿐만 아니라 양산성과 관련이 있으므로 핫프레스포밍 공법에서의 냉각채널 최적화 설계는 매우 중요하다.

3.1 냉각채널 최적화를 위한 공정변수

본 연구에서는 냉각채널의 최적화를 위해 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 냉각홀 직경(A), 홀과 벽면 사이의 거리(B), 홀과 홀 사이의 거리(C), 홀에 작용하는 냉각수의 유동조건(D)을 공정변수로 선정하였다. 각 공정변수가 냉각효율에 미치는 영향을 평가하기 위해 직교배열표를 작성하여 유한요소해석을 수행하였다. Table 2에 각 공정변수의 인자와 수준을 나타내었으며, Table 3은 이를 바탕으로 한 $L_9(3^4)$의 직교배열표이다. 목적함수로는 10cycle의 냉각 후의 펀치와 다이의 최대온도로 선정하였고 냉각수의 유동조건을 고려하기 위해 레이놀즈수(Re), 열전도도(K), 너셀트수(Nu), 냉각홀의 함수를 사용하여 냉각홀에 열전달계수(h)값을 경계조건으로 적용하였다.[13]

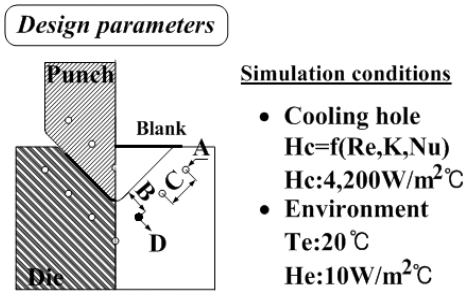


Fig. 4 Design variables and analytical model of HPB

Table 2 Design parameters and their levels in the hot press bending process

	Design parameter	Level		
		1	2	3
A	Hole Diameter (mm)	8	10	12
B	Distance between hole and sidewall (mm)	15	30	45
C	Distance between hole and hole (mm)	20	40	60
D	Flow condition	L	L/T	T

L : Laminar, L/T : Transition, T : Turbulent

Table 3 $L_9(3^4)$ Orthogonal array table

No	Design parameters and theirs levels			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	2	1	3
5	2	3	2	1
6	2	1	3	2
7	3	3	1	2
8	3	1	2	3
9	3	2	3	1

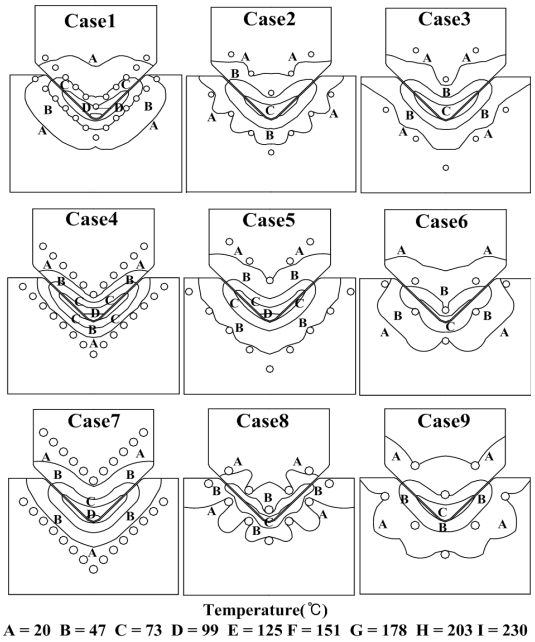
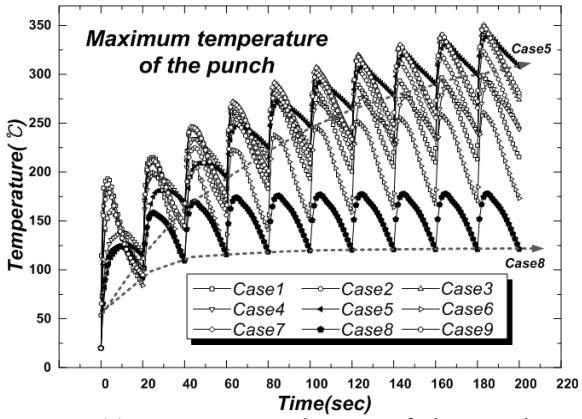


Fig. 5 Temperature distributions after 1cycle analysis

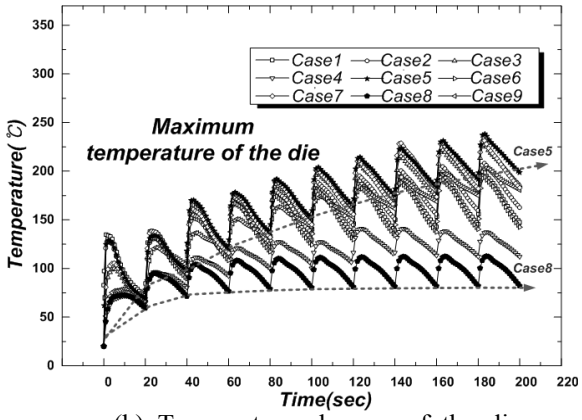
3.2 유한요소해석 결과

Fig. 5는 직교배열표를 통해 선정된 각 9case에 대하여 1cycle 냉각 후의 금형 온도 분포를 나타낸 것이다. 펀치와 다이의 최대온도는 70~100℃의 분포를 나타내었으며, 1cycle에서는 냉각에 의한 금형온도의 차이가 거의 없다는 것을 확인할 수 있다. 이것은 낮은 초기온도의 금형이 900℃로 가열된 블랭크와 접촉하면서 블랭크가 급속히 냉각되기 때문으로 판단된다.

Fig. 6 (a), (b)에 각 case별 금형냉각 10cycle 동안의 펀치와 다이의 최대온도변화를 각각 나타내었다. Fig. 7은 각 case별 10cycle 냉각 후의 금형온도분포를 나타낸 것이다. 펀치의 최대온도가 다이의 최대온도보다 약 100℃정도 높은 경향을 나타내었는데, 이는 펀치의 볼록한 면이 다이의 오목한 면보다 열손실량이 작기 때문으로 판단된다.[14] case8의 경우에는 10cycle후의 금형의 최대온도가 80~120℃의 분포로 가장 좋은 냉각효율을 나타내었으며, case5의 경우에는 금형의 온도가 약 300℃까지 상승하였다.



(a) Temperature changes of the punch



(b) Temperature changes of the die

Fig. 6 Temperature distributions after 10cycles analysis

Fig. 8에는 냉각효율이 가장 좋은 조건인 case8과 가장 낮은 case5의 10cycle 후 블랭크의 온도 및 마르텐사이트 상분율의 변화를 나타내었다. 10cycle 해석 후 블랭크의 냉각속도를 비교하면 case5는 약 37℃/s이고, case8은 약 56℃/s로 나타났다. 또한 냉각속도가 좋지 않은 case5는 마르텐사이트 상분율이 66%, case8은 94%로 상대적으로 높게 나타났다.

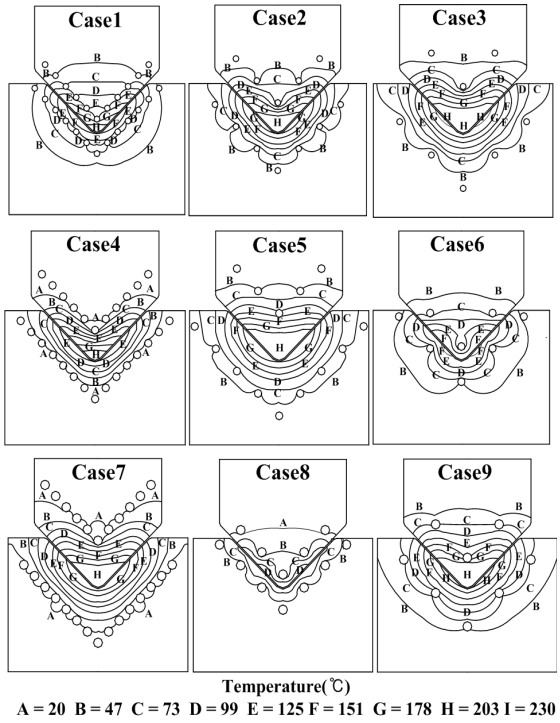


Fig. 7 Temperature changes of the tool during 10cycles analysis

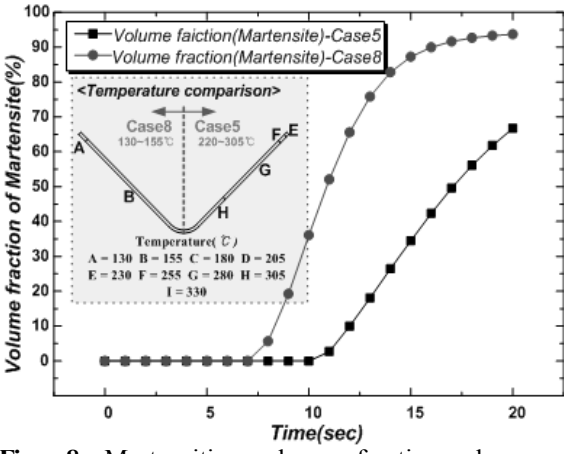
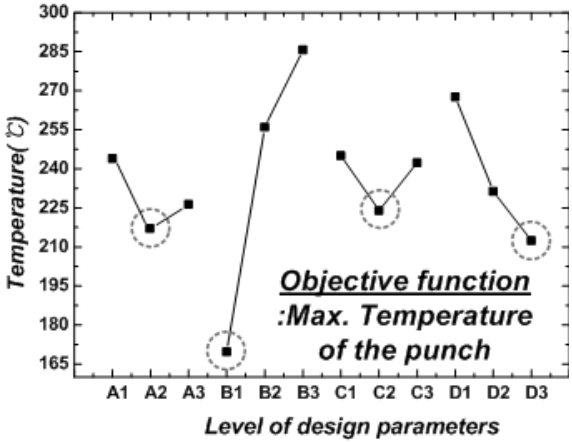
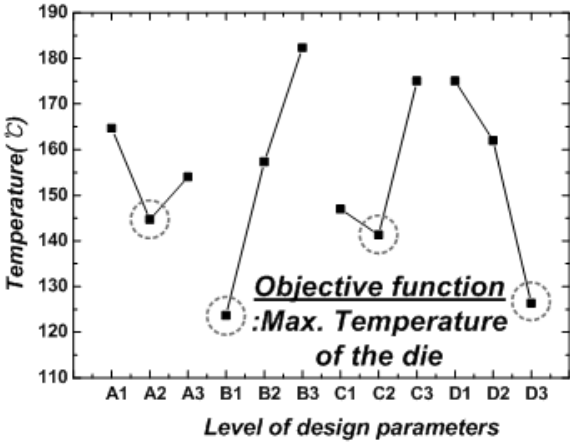


Fig. 8 Martensitic volume fraction change and temperature distribution of the blank at 10th cooling process

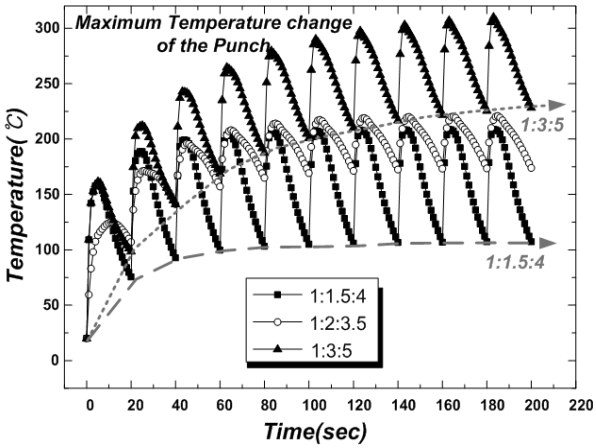


(a) Temperature at the punch

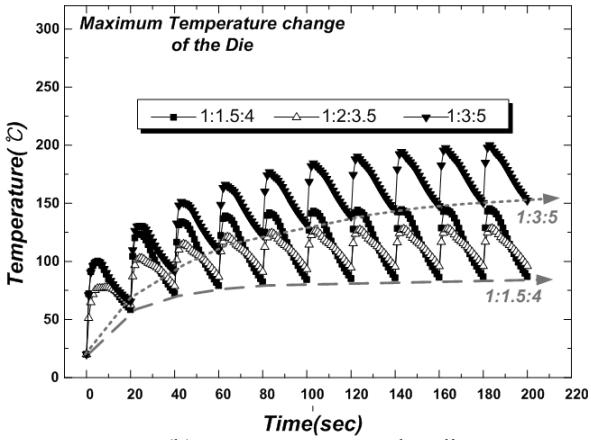


(b) Temperature at the die

Fig. 9 Effect of design parameters on the maximum tool temperature after 10cycles



(a) Temperature at the punch



(b) Temperature at the die

Fig. 10 Temperature changes of the tool during 10cycles in different conditions

3.3 최적의 공정변수 조합 선정

Fig. 9는 앞서 선정한 공정변수의 영향도를 파악하기 위한 각 수준별 평균값 그래프이다. 펀치와 다이의 최대온도를 목적함수로 하였을 때의 최적공정변수 조합은 $A_2B_1C_2D_3$의 조합이 가장 냉각효율을 좋게 하는 조건으로 나타났다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 냉각홀과 금형벽면 사이의 거리가 가까울수록, 냉각홀에 흐르는 유체가 난류조건일수록 냉각효율이 좋게 나타났다.

3.4 냉각효율의 비교

일반적으로 사출금형의 냉각홀 설계는 냉각홀 직경, 홀과 벽면사이의 거리 및 홀과 홀 사이의 거리의 비를 선정하여 냉각채널의 위치를 선정하는데, 그 비는 일반적으로 1:3:5 또는 1:2:3.5로 설계를 한다.[15] 하지만 본 연구에서 도출된 HPB 공정의 최적의 냉각비는 1:1.5:4의 비로 나타났다.

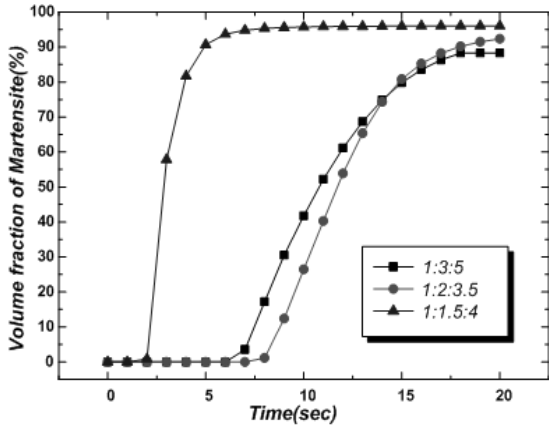


Fig. 11 Martensitic volume fraction change of the blank during 10th cooling process in each cooling conditions

Fig. 10은 1:5:4의 냉각비와 사출금형에서 사용하는 냉각비의 10cycle동안의 펀치(a)와 다이(b)의

온도변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 본 연구에서 제시한 냉각비가 다른 조건의 냉각비보다 금형의 온도분포가 60~120℃정도 낮게 나타났다. 이것은 Fig. 8에서도 알수 있듯이 최종제품의 기계적 특성에 큰 영향을 미칠 것이라 판단이 되며, 그 결과를 검증하기 위하여 Fig. 11에는 최종cycle의 각 조건에 대한 마르텐사이트 상분율의 변화를 나타내었다. 예상한대로 본 연구에서 도출된 냉각비에서는 마르텐사이트 상분율이 약 96%, 다른 조건에서는 약 88~91%로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 HPB 공정에 있어 금형의 냉각채널의 최적화를 위해 열-기계적 연성해석을 수행하여 냉각효율에 우수한 공정변수의 조합을 제시하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 냉각홀 최적화에 가장 영향을 크게 미치는 변수는 냉각홀에 작용하는 유체의 유동조건과 홀과 벽면사이의 거리로 나타났다.

(2) 냉각홀의 위치 및 유체의 조건에 따라 금형의 온도분포가 약 100℃ 정도 차이가 발생하였으며, 금형온도분포가 높을수록 최종제품의 요구강도에 나쁜 영향을 미친다.

(3) 최적의 변수조합은 펀치와 다이의 최고온도를 목적함수로 하였을 때는 $A_2B_1C_2D_3$ 조합이 최적의 조합으로 나타났다. 이것을 비율로 나타내면 1:1.5:4로 결정된다.

(4) 기존 사출금형에서 사용하는 냉각홀 최적설계방법과 비교한 결과 본 연구에서 제시한 냉각비의 냉각효율이 우수하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참고문헌

(1) Kim, H. G., Son, H. S. and Park, S. H., 2006, "Development of Thermal-Mechanical Coupled Simulation Skill for Hot Press Forming Tool Design," *Posco Technical Report,* Vol. 10, No. 1, pp. 115~123.

(2) Yum, Y. G., Kim, J. G., Lee, H. W., Hwang, J. B., Kim, S. U., Kim, W. H. and Yoo, S. J., 2008, "Development of Vehicle Door Impact Beam by Hot Stamping," *The Korean Society of Mechanical Engineer*s, Fall Conference, pp. 7~12.

(3) Lee, J. S., Chae, M. S., Park, C. D. and Kim, Y. S., 2007, "Mechanical and microstructural characteristics of a High-Strength Boron-Alloyed Steel For Hot Press Forming," *The Korean Society of Mechanical Engineer*s, Spring Conference, pp. 344~349.

(4) Chae, M. S., Lee, G. D., Suh, Y. S., Lee, K. H. and Kim, Y. S., 2009, "Mechanical and Forming Characteristics of High-Strength Boron-Alloyed Steel with Hot Forming," *Transactions of Meterials Processing*, Vol. 18, No. 3, pp. 236~241.

(5) Bariani, P. F., Bruschi, S., Ghioti, A. and Turetta, A., 2008, "Testing Formability in the Hot Stamping of HSS," *CIRP Annals-Manufacturing Technology,* Vol. 57, pp. 265~268.

(6) Hoffmann, H., So, H. and Steinbeiss, H., 2007, "Design of Hot Stamping Tools with Cooling System," *Annals of the CIRP,* Vol. 56/1, pp. 269~272.

(7) So, H., Steinbeiss, H. and Hoffmann, H., 2006, "Entwicklung einer Methodik zur Optimierung von Umformwerkzeugen für die Warmblechumformung," *Bereichs-und Industriekolloquium, 1. Erlanger Workshop Warmblechumformung,* pp. 102~117.

(8) Weinert, K., Mehnen, J., Michelitsch, T. and Bartz-Beielstein, T., 2004, "A Multiobjective Approach to Optimize Temperature Control Systems of Molding Tools," *Production Engineering*, XI/1, pp. 77~80.

(9) Saunders, N., Guo, Z., Miodownik, P. and Schille, J. P., 2006, "Modelling of High Temperature Mechanical Properties and Density Change of Steels during Solidification," *Materials Science and Technology MS&T.*

(10) Guo, Z., Saunders, N., Schille, J. P. and Miodownik, A. P., 2009, "Material Properties for Process Simulation," *Materials Science and Engineering* A. 499, pp. 7~13.

(11) Saunders, N., Guo, Z., Miodownik, P. and Schille, J. P., 2006, "The Calculation of TTT and CCT Diagrams for General Steels,"

(12) Geiger, M., Merklein, M. and Lechler, J., 2008, "Determination of Tribological Conditions within Hot Stamping," *Prod. Eng. Res. Devel.* 2, pp. 269~276.

(13) Kwon, O. B., Bae, D. S., Kim, S. B., Son, Y. S., Kim, Y. P. and Jeon, C. H., 2006, "Heat transfer," *Publication intervision*, pp. 353~408, 783~810.

(14) Steinbeiss, H., So, H. W., Michelitsch, T. and Hoffmann, H., 2007, "Method for Optimizing the Cooling Design of Hot Stamping Tools," *Prod. Eng. Res. Devel,* 1, pp. 149~155.

(15) Cho, U. S., 1997, "The Mold Design Technique for the Injection Molding," *Gijeon,* pp. 463~499.