

Incoloy 825 합금의 기계적 성질에 미치는 열간 단조비와 용체화 온도의 영향

김도훈* · 박영태** · 손영민* · 강창룡*[†]

*부경대학교 금속공학과, **한국폴리텍대학교 울산캠퍼스 신소재응용과

Effect of Hot Forging Ratio and Solution Treatment Temperature on the Mechanical Properties of Incoloy 825 Alloy

D. H. Kim*, Y. T. Park**, Y. M. Son*, C. Y. Kang*[†]

*Dept. of Metallurgical Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

**Dept. of Applied Materials, Korea Polytechnic College VII, Ulsan 44482, Republic of Korea

Abstract This study was carried out to investigate the effect of hot forging ratio and solution treatment temperature on the mechanical properties of incoloy 825 alloy. With an increasing of the hot forging ratio, grain size and range of grain size was decreased. With an increasing of the solution treatment temperature after 90% forging, grain size and range of grain size was increased. Cr carbides and Ti nitrides was precipitated at below 900°C and volume fraction of precipitate was increased with an decreasing of the solution treatment temperature. With an increasing of the hot forging ratio, hardness, tensile strength and elongation, toughness was increased. With an increasing of the solution treatment temperature after 90% forging, hardness and strength was increased, elongation and toughness was decreased by grain refinement. With an increasing of the forging ratio, effect of solution treatment temperature on the hardness, strength and elongation was small, but on the toughness was large.

(Received August 3, 2018; Revised August 6, 2018; Accepted September 10, 2018)

Key words : Hot forging ratio, Solution treatment, Impact value, Incoloy 825, Tensile properties, Hardness

1. 서 론

Ni-Fe-Cr계 Incoloy 825 합금은 Mo, Cu, Ti 등과 같은 합금원소가 함유되어 있어 내식성이 우수하지만, 특히 황산 등과 같은 황을 포함하는 연료가스에 강한 내식성을 보유하고 있다[1]. 때문에 화학, 공해 처리, 방사능 폐기물 처리설비, 정유 및 해양 플랜트 등에 다양하게 사용하고 있을 뿐만 아니라[2], 크리프 강도, 고온 피로 강도 등도 우수하여 원자로 증기 발생기의 전열관, 압력 용기 헤드 관통관 등에도 많이 사용되고 있다[3, 4].

최근 Incoloy 합금 등의 초내열합금 등을 사용하고 있는 여러 산업분야에서는 장치의 사용효율 향상을 위해 설비를 대형화하고 있으며 이에 따라 이들 설비의 부품도 대형화되어 가고 있다. 뿐만 아니라

부품이 대형화 되어 감에 따라 부품을 제조하기 위한 공법 중 단조공법도 소형부품을 제조하는 형단조에서 대형부품을 제조하는 자유단조공법 등으로 바뀌어 가고 있다[5]. 그러나 부품이 대형화 되면 단조 마무리 온도가 낮아지거나, 질량효과(mass effect) 등이 커지게 되어 부품의 부위별 미세조직 등이 달라지고 그 결과 강도와 충격인성 등도 달라지는 문제가 발생된다. 때문에 이러한 문제를 최소화하기 위해 일정 이상의 단조율 또는 결정립의 평균 크기를 50 μm 이하로 요구하고 있다. 뿐만 아니라 Incoloy 합금은 많은 합금원소를 함유하고 있어 고온에서 가공 또는 사용 등으로 장시간 노출되면 MC 탄화물, γ' 및 σ 상 등과 같은 석출물의 석출과 조대화 및 Cr 등에 의한 예민화 현상 등이 일어나 가공성, 강도와 연성 등이 감소하며 내식성 등이 낮아지는 문

[†]Corresponding author. E-mail : metkcy@pknu.ac.kr
Copyright © The Korean Society for Heat Treatment

제가 발생된다[6]. 따라서 이들 합금의 사용범위 확대와 사용상 안정성 등을 확보하기 위해서는 부품이 대형화 되어 가는데 따른 열간 단조 및 열처리 등과 같은 제조공정에서 최적의 제조조건이 개발될 필요성이 있다.

지금까지 Incoloy 825 합금에 대한 연구는 고온에서 석출물의 석출거동, 고온변형 및 용접성 등에 대해서는 많이 수행되어 왔다[7-9]. 그러나 기계적 성질 등에 미치는 열간단조 및 열처리 등과 같은 제조공정에 관한 연구는 부품이 대형화 되어 감에 따라 그 중요성이 크게 있음에도 불구하고 많이 수행되지 못하고 있다.

따라서 본 연구는 Incoloy 825 소재에 대하여 용체화처리 이전에 자유단조공법으로 단조비를 달리하여 단조한 다음 온도를 달리 한 용체화처리를 행하여 단조비와 용체화처리 온도 변화에 따른 기계적 성질 변화를 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 시료

시료는 일본 Daido Steel사에서 진공용해(VIM, Vacuum Induction Melting)와 일렉트로 슬래그 재용해(ESR, Electro Slag Remelting)하여 제작한 직경 600 mm, 길이 1,740 mm 크기의 중량 4,064 kg을 갖는 잉곳을 시료로 사용하였다. 이 시료의 화학 조성은 Table 1에 나타내었다.

미세조직 변화와 기계적 성질에 미치는 단조비의 영향을 조사하기 위한 단조작업은 시료를 1,140°C로 가열 후 일정 시간을 유지한 다음 5,000톤 프레스로 각 60% 및 90% 되도록 단조하였고, 이때 단조 마무리 온도는 900°C 이상이 되도록 하였다. 다음 단조하지 않은 시료와 단조비를 달리하여 단조한 시료를 700°C에서 1,000°C 사이의 여러 온도에서 1시간 유지 후 수냉하는 용체화처리를 하였다.

또한 단조비 변화 및 용체화처리 온도 변화에 따

른 미세조직 변화는 시료를 연마 후 전해부식(4% 옥살산, 3 V, 10초) 한 다음 광학현미경과 주사전자현미경으로 관찰하였고, 결정립 크기와 분포는 광학현미경에서 관찰한 조직사진에 대하여 화상분석 시험기를 사용하여 10회 이상 측정하여 평균해서 구하였다. 한편, 단조비와 용체화처리 온도 변화에 따른 경도는 브리넬경도시험기(Mitutoyo 810)를 사용하여 3,000 kg의 하중으로 5회 이상 측정 한 다음 평균하여 구하였고, 인장성질은 평행부 길이가 50 mm 크기를 갖는 ASTM E-8의 규격으로 제작한 다음 cross head speed를 2 mm/min.로 하는 인장시험하여 측정 하였다. 또한 충격인성은 2 mmV 노치를 갖는 샤르피 충격 시험편으로 제작하여 상온에서 충격시험 하여 구하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 단조비 따른 미세조직 변화

Fig. 1은 본 연구에 사용된 Incoloy 825 합금의 미세조직을 광학현미경으로 나타낸 것이다. 부분적으로 쌍정들이 존재하고 있는 결정립 크기가 200 μm 이상의 크기를 갖는 오스테나이트의 조직으로 되어 있는 것을 확인 할 수 있다. 또한 석출물의 존재는 확인되지 않았다.

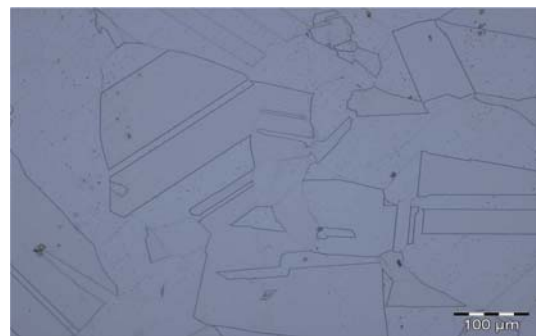


Fig. 1. Optical micrograph of incoloy 825 alloy.

Table 1. Chemical composition of incoloy 825 alloy steel (wt.%)

C	Si	Mn	S	Ni	Cr	Cu	Mo	Al	Ti	Fe
0.03	0.30	0.60	0.010	44.16	22.20	1.70	3.00	0.10	1.00	26.9

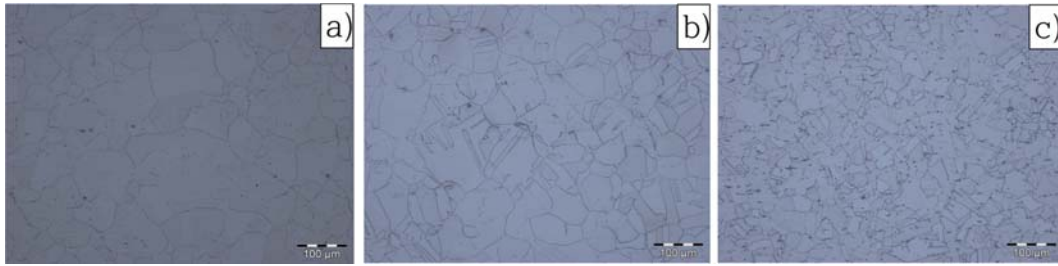


Fig. 2. Optical micrographs showing the effect of hot forging ratio in Incoloy 825 alloy. Forging ratio : (a) 0%, (b) 60%, (c) 90%.

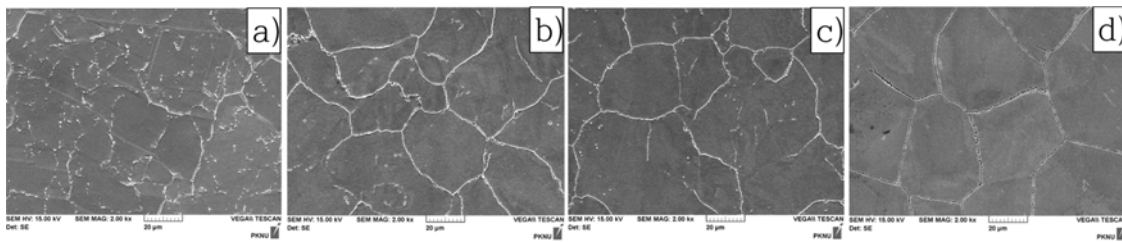


Fig. 3. SEM micrographs showing the effect of solution treatment temperature in 90% forged Incoloy 825 alloy. Solution treatment temperature : a) 700°C, b) 800°C, c) 900°C, d) 1,000°C.

3.2 단조비 및 용체화처리 온도 변화에 따른 미세조직 변화

Fig. 2는 단조비 변화에 따른 미세조직 변화를 조사하기 위하여 단조를 하지 않은 시료와 1,140°C로 가열하여 일정 시간 유지 후 단조비가 60% 및 90%가 되도록 단조한 시료를 1,000°C로 가열 후 1시간 유지한 다음 수냉하였을 때의 미세조직을 광학 현미경으로 나타낸 것이다. 세 시료가 동일하게 단조비에 관계없이 모두 석출물들이 존재하고 있지 않은 오스테나이트 단상조직으로 되어 있는 것을 확인 할 수 있다. 또한 이와 같이 석출물이 존재하지 않은 오스테나이트 단상 조직이 되는 이유는 단조과정 중 950°C 이하의 온도에서 석출물이 석출되었다 할지라도 그 석출물들이 단조 후 1,000°C로 가열한 다음 1시간 유지 후 수냉하는 용체화처리하는 과정에서 용해하여 고용되었기 때문이라 판단된다[5, 10]. 또한 단조비가 증가할수록 결정립의 크기가 작아지고 있는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 3은 단조한 시료의 용체화처리 온도변화에 따른 미세조직 변화를 알아보기 위하여 1,140°C에서 90% 단조한 한 다음 온도를 달리하여 용체화처리한 시료의 미세조직을 주사전자 현미경으로 나타낸 것이

다. 용체화처리 온도가 700°C, 800°C 및 900°C에서는 오스테나이트 조직에 결정입계 뿐만 아니라 입내에서 석출물들이 존재하고 있는데 반하여, 1,000°C에서는 입내뿐만 아니라 입계에서도 석출물들이 존재하지 않는 오스테나이트 단상조직으로 되어 있는 것을 확인 할 수 있다. 또한 용체화 온도가 높을수록 석출되는 석출물의 양은 적어지고, 결정립의 크기는 커지고 있는 것을 확인 할 수 있다.

일반적으로 Incoloy 825 합금에서 석출하는 탄화물, 질화물 그리고 γ' 및 σ 상 등의 석출물이 주로 950°C 이하의 온도에서 결정입내와 결정입계에서 석출하는 것으로 알려져 있다[7, 9, 11]. 따라서 본 연구에서는 단조 마무리 온도가 900°C 이하일 뿐만 아니라, 용체화처리를 700°C에서 1,000°C 사이의 온도에서 실시하였기 때문에 단조 및 용체화처리하는 일부 과정에서 석출하여 존재하는 석출물들을 조사하였다.

Fig. 4는 단조비를 90%로 하여 단조한 다음 850°C 온도에서 1시간 유지 후 수냉한 시료에서 존재하는 석출물들이 갖는 화학성분을 EDS로 분석하여 나타낸 것이다. a)에서는 Cr이 50.1%, C가 10.2%인 Cr-rich 탄화물로 조사되었고, b)에서는 Ti

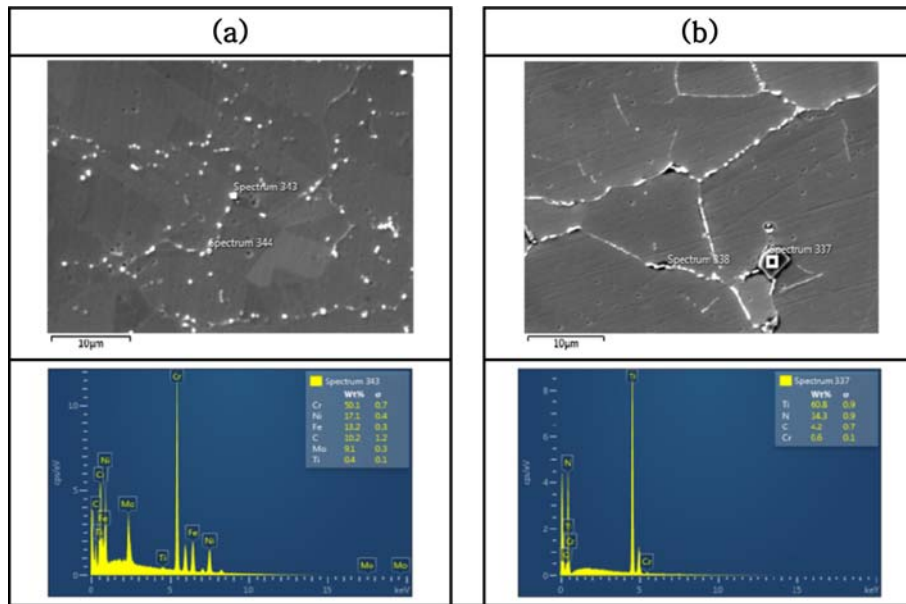


Fig. 4. Chemical composition of precipitate obtained by EDS after solution treatment in 90% hot forged Incoloy 825 alloy. (a) Cr-rich Carbide, (b) Ti-rich Carbide.

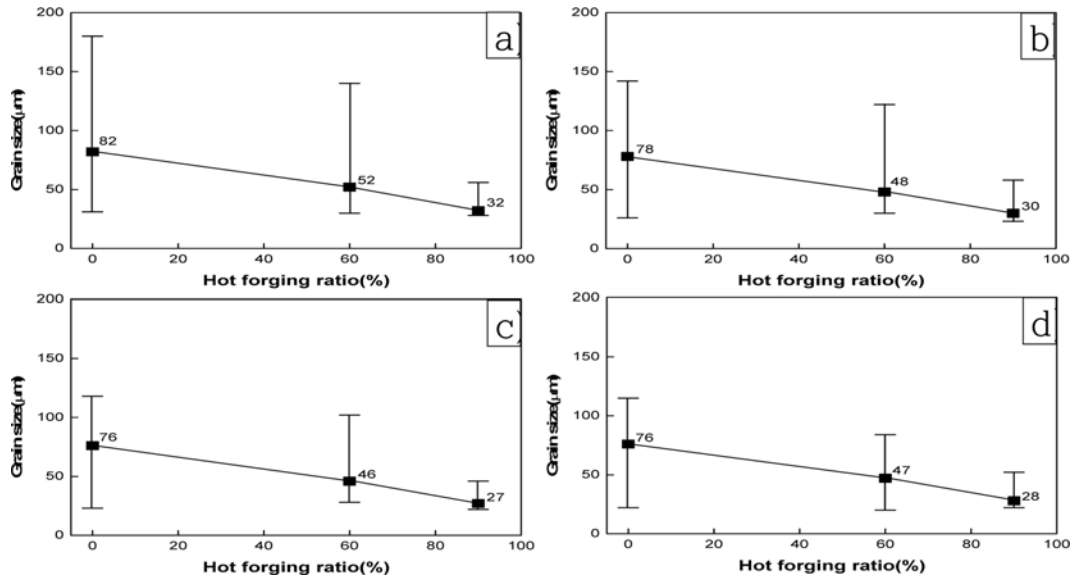


Fig. 5. Effect of hot forging ratio and solution treatment temperature on the grain size distribution of Incoloy 825 alloy. Solution treatment Temperature : a) 1,000°C, b) 900°C, c) 800°C, d) 700°C.

가 60.8%, N가 34.3%인 Ti-rich 질화물로 조사되었다. 따라서 Cr탄화물과 Ti질화물이 석출하는 것을 확인 할 수 있다. 또한 CrC 탄화물이 존재하는 이유는 850°C에서 1시간 유지하는 동안 합금원소로 첨가되어 있는 Cr과 C가 결합하여 생성되었고, 합금

원소로 첨가되어 있지 않은 N가 TiN 질화물로 존재하는 이유는 용해과정에서 유입된 N가 합금원소로 첨가되어 있는 Ti와 결합하여 생성되었다고 판단되며, 이러한 결과는 Incoloy 825 합금에서 석출물을 연구한 다른 결과와도 잘 일치하고 있다[9, 11].

Fig. 5는 단조비를 달리하여 단조한 다음 여러 온도에서 용체화 처리한 시료가 갖는 결정립 크기 변화를 조사하여 나타낸 것이다. 용체화처리 온도에 관계없이 모두 비슷하게 단조비가 높아지면 결정립 크기의 범위가 좁아지고 있고, 결정립의 크기도 작아지고 있는 것을 알 수 있다. 또한 동일 단조비에서 용체화처리 온도가 낮아질수록 결정립 크기의 범위가 좁아지고, 결정립의 크기도 작아지고 있는 것을 확인할 수 있다. 한편 단조비가 90%가 되면 용체화처리 온도에 관계없이 모두 50 μm 보다 작은 결정립의 크기로 되는 것을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 단조비가 높아질수록 결정립 크기가 작아지고, 결정립의 크기 범위도 좁아지고, 용체화처리 온도가 높아질수록 결정립 크기 및 크기의 범위가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 온도가 낮아질수록 석출물의 양은 많아지고, 석출물은 주로 Cr탄화물과 Ti질화물이 석출되는 것으로 조사 되었다.

3.3 기계적 성질에 미치는 열간단조비 및 용체화처리 온도의 영향

이상의 단조비 및 용체화처리 온도 변화에 따라 결정립의 크기와 분포 상태 및 석출의 양이 달라지고 있는 것을 알 수 있고, 이러한 변화는 이 강의 기계적 성질에도 영향을 미칠 것으로 판단되어 기계적 성질에 미치는 단조비 및 용체화처리 온도의 영향을 조사하였다.

Fig. 6은 단조비 및 용체화처리 온도가 경도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 단조비를 달리하여 단조한 다음 온도를 달리하여 용체화처리한 시료의 경도를 조사하여 나타낸 것이다. 용체화처리 온도에 관계없이 모두 비슷한 경향으로 단조비가 높아질수록 경도가 빠르게 증가하고 있는 것을 알 수 있으며, 또한 동일 단조비에서 용체화처리 온도가 낮아질수록 경도가 높아지고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 7는 단조비 및 용체화처리 온도가 인장강도에 미치는 영향을 알아보기 위하여 단조비를 달리하여 단조한 다음 온도를 달리하여 용체화처리한 시료의 인장강도를 조사하여 나타낸 것이다. 단조비가 높아질수록 비슷한 경향으로 인장강도가 서서히 증가하고 있는 것을 알 수 있고, 동일 단조비에서 용체화처리 온도가 낮아질수록 인장강도가 높아지고 있는 것을

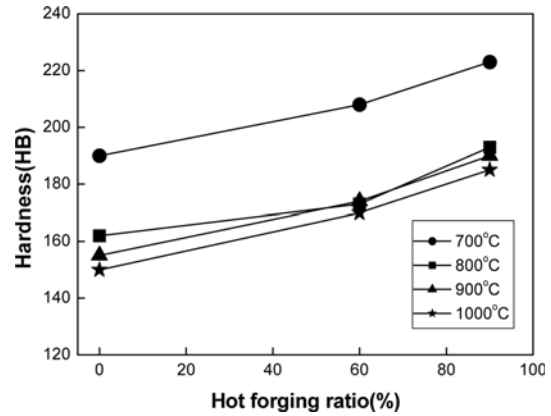


Fig. 6. Effect of solution treatment temperature on the hardness in incoloy 825 alloy with different forging ratio.

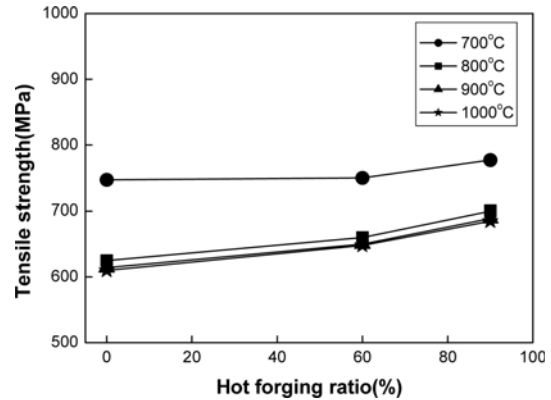


Fig. 7. Effect of solution treatment temperature on the tensile strength in incoloy 825 alloy with different forging ratio.

알 수 있다.

이상의 결과로부터 단조비가 증가하면 경도와 강도가 증가하고, 용체화처리 온도가 낮아질수록 경도와 강도가 높아지는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 이유는 단조비가 증가하면 결정립 크기가 미세해질 뿐만 아니라 단조과정에서 도입되는 결함들이 많아지기 때문에 경도와 강도가 높아지고, 용체화처리 온도가 낮아지면 석출물의 석출이 많아지고 단조과정에서 도입된 결함들의 소멸이 적기 때문에 경도와 강도가 높아진다고 판단된다.

Fig. 8은 단조비 및 용체화처리 온도가 연신율에 미치는 영향을 알아보기 위하여 단조비를 달리하여 단조한 다음 온도를 달리하여 용체화처리한 시료의 연신율을 조사하여 나타낸 것이다. 연신율은 단조비

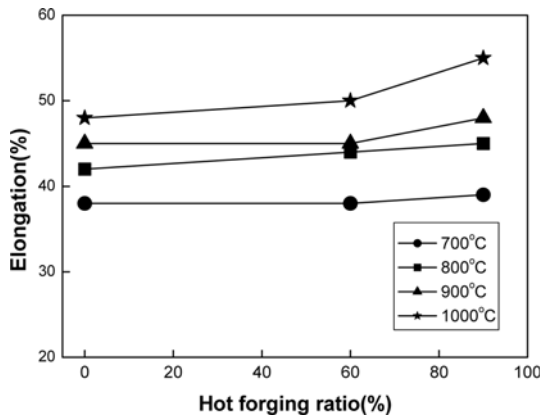


Fig. 8. Effect of solution treatment temperature on the elongation in incoloy 825 alloy with different forging ratio.

가 높아질수록 비슷한 경향으로 서서히 증가하고 있는 것을 알 수 있고, 동일 단조비에서 용체화처리 온도가 높아질수록 연신율이 높아지고 있는 것을 알 수 있다. 또한 이와 같은 이유는 단조비가 높아지면 결정립의 크기가 미세해 지기 때문에 연신율이 증가하고, 용체화처리 온도가 높아질수록 연신율이 높아지는 이유는 용체화처리 온도가 높아지면 결정립의 크기가 증가하지만 석출된 탄화물의 양은 적어진다. 따라서 결정립이 커지는데 기인되는 영향보다 석출물이 적어지는 영향이 더 크기 때문이라 판단된다.

Fig. 9 단조비 및 용체화처리 온도가 충격인성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 단조비를 달리하여 단조 한 다음 온도를 달리하여 용체화처리한 시료의 충격인성을 조사하여 나타낸 것이다. 용체화처리 온도가 700°C 및 800°C의 경우는 용체화처리 전 단조비가 높아져도 충격인성은 크게 변화가 없는데 반하여 용체화처리 온도가 900°C 이상이 되면 단조비가 높아질수록 충격인성이 빠르게 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 이와 같은 이유는 Fig. 4에서 알 수 있는바와 같이 용체화처리 온도가 700°C 및 800°C 경우는 용체화처리 온도가 낮아 단조과정에서 석출된 탄화물들이 용체화처리 과정에서 용해되어 고용되지 못할 뿐만 아니라, 오히려 용체화처리 과정에서 더욱더 석출되어 비교적 많은 탄화물들이 존재하고 있기 때문이라 판단된다. 그러나 용체화처리 온도가 900°C 및 1,000°C가 되면 용체화처리 과정에서 탄화물이 적게 석출하거나 또는 석출되지 않을 뿐만

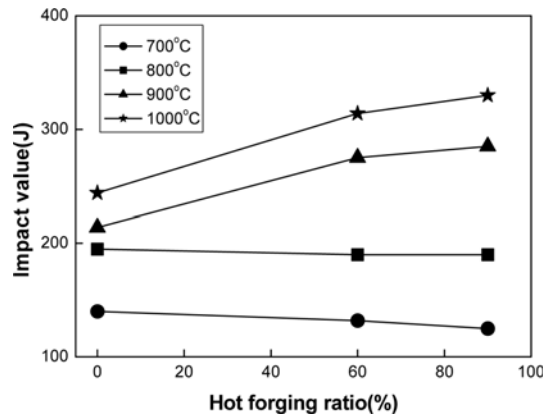


Fig. 9. Effect of solution treatment temperature on the impact value in incoloy 825 alloy with different forging ratio.

아니라 단조과정에서 석출된 탄화물들이 용체화처리하는 과정에서 용해되어 고용되기 때문에 그 량이 적어지기 때문이라 판단된다. 또한, 동일 단조비에서 용체화처리 온도가 낮아질수록 인성이 낮아지고 있는 것을 알 수 있는데 이 또한 온도가 낮아질수록 석출된 탄화물의 량이 많아지는데 기인된다고 판단된다. 한편, 단조비가 높아질수록 용체화처리 온도의 영향이 크게 나타나고 있는 것을 확인 할 수 있는데 이 또한 결정립크기가 증가하고, 석출물의 양이 적어지는데 기인된다고 판단된다.

이상의 결과로부터 단조비가 높아질수록 경도, 강도와 연신율 및 인성이 증가하고 있는 것을 알 수 있고 이러한 이유는 단조비가 높아질수록 결정립이 미세화하기 때문이라 판단된다. 또한 용체화처리 온도가 높아질수록 경도와 강도는 낮아지고, 연신율과 인성이 높아지고 있는 것을 알 수 있고 이는 온도가 높아질수록 결정립 크기는 약간 증가 하지만, 이 보다는 단조과정에서 도입된 결함들의 소멸이 더 많이 일어나는데 기인된다고 판단된다[5].

4. 결 론

Incoloy 825 소재의 기계적 성질에 미치는 단조비와 용체화처리 온도의 영향을 조사하기 위하여 단조비를 달리하여 단조한 다음 온도를 달리하는 용체화처리하여 기계적 성질을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열간단조비가 증가할수록 결정립크기가 감소하고, 결정립 크기 범위의 폭도 적었다.
2. 단조 후 용체화처리 온도가 증가할수록 결정립 크기는 증가하였고, 결정립크기 범위도의 폭도 넓어졌다.
3. 900°C 이하의 온도에서 Cr탄화물과 Ti질화물이 석출되었고, 용체화처리 온도가 낮아질수록 석출물의량은 많았다.
4. 열간단조비가 높아질수록 경도, 인장강도와 연신율 및 충격인성이 증가하였다.
5. 단조 후 용체화처리 온도가 높아질수록 경도와 인장강도는 낮아지고, 연신율과 충격인성은 증가하였다.
6. 단조비가 높아질수록 용체화처리 온도의 영향은 경도와 인장강도 및 연신율에서는 적고, 충격인성에서는 크게 나타났다.
2. E. Grundy : Mater. Sci. Technol, **3** (1987) 782.
3. H. Grimmer, D. Grman, N. Iniotakis, and U. Zimmermann : Mater. Sci. Eng, **87** (1987) 189.
4. P. S. Kim, H. Y. Kim, S. Y. Choi, Y. S. Kim, and J. D. Kim : KOSME, **38** (2014) 698.
5. Y. T. Park, Y. H. Jeong, and C. Y. Kang : J. KSHT, **29** (6) (2016) 259.
6. C. T. Sims, N. S. Stoloff, and W. C. Hagel : John Wiley & Sons Pub, SUPERALLOYS, **II** (1987) 111.
7. H. Nahm : J. Moteff, Metal Transactions A, **7** (1976) 1473.
8. M. J. Donachie, Jr. and O. H. Kriege : J. Mater, **7** (1972) 269.
9. C. Y. Kang, S. H. Kim, and Y. T. Park : J. KSPSE, **27**(2) (2017) 20.
10. E. W. Ross and C. T. Sims : Ohn Wiley & Sons, Nickel-base Alloys in SUPERALLOYS, **II** (1987) 120.
11. M. A. Shaikh, M. Iqbal, M. Ahmad, J. I. Akhtar, and K. A. Shoaib : Journal of Materials Science Letter, **11** (1992) 1009.

References

1. K. D. Kuhn and K. H. Koch : Kerntechnik, **15** (1973) 257.