研 究 論 文
大 韓 熔 接 學 會
第4卷 第3號, 1986年12月
Journal of the Korean Welding Society
Vol. 4, No. 3, Dec., 1986.

TMCP 강의 용접열영향부 인성에 관한 연구

신민태* · 윤중근** · 김희진**

Study on HAZ Toughness in TMCP Steels

M. T. Shin*, J. G. Youn**, H. J. Kim**

Key words; TMCP, Accelerated cooling(가속냉각), HAZ Toughness(열영향부 인성), Softening(연화현상), Fine microstructure(미세조직)

Abstract

Weldability of the TMCP steel manufactured by controlled rolling followed by accelerated cooling process was investigated. For comparison, two other steel plates produced by different manufacturing processes were selected; normalized and controlled rolled. Tandem submerged arc welding with both side one run technique was carried out. The results of this study can be summarized as follows;

TMCP steel having the lowest carbon equivalent shows the best combination of mechanical properties, not only in the base metal but also in the heat affected zone. In the HAZ, however, the accelerated cooling effect imparted on the strength is relieved by the weld thermal cycles, and thus the strength of the welded joint decreases substantially accompanied with the fracture in the HAZ. On the other hand, not only the softening but the fine microstructure can preserve the high toughness of TMCP steel in the HAZ.

1. 서 론

최근에 조선 및 철구, 해양 등의 중공업분야에서, 용접성이 우수하여 점차 그 사용이 확대 추세에 있는 것이 TMCP(Thermo Mechanical Control Process) Steel이다.

이러한 TMCP Steel은 80년대에 들어서 controlled rolling에 accelerated cooling system을 강 제조에 도입하면서, 합금원소의 량을 줄이고서도 기존의 강도를 유지할 뿐 아니라 높은 인성을 가지는 강을 제조할 수 있게되었다.[1)2)] 이는 곧 carbon equivalent가 저하됨에 따른 모재의 용접성 향상 이라는 측면에서 사용자에게 큰 관심을 불러 일으켰을 뿐만 아니라, 제강업계에게는 normalizing과 같은 열처리를 생략할 수가 있게 되므로서 energy saving의 잇점을 가져다 줄 수 있게 되었다.[3)4)] 본고에서는 이러한 high strength, high toughness를 가지는 accelerated cooled steel이 용접되었을 경우 용접열영향부의 기계적 성질 특히 인성의 변화에 연구촛점을 두었으며, 모재 및 용접열영향부에서의 accelerated

* 현대 정공, 정회원
** 현대 중공업, 정회원

cooling 효과를 보기 위하여 재래식 normalized 강재와 accelerated cooling이 적용되지 않은 controlled rolled 강재를 비교강재로 선정하여 비교시험을 행하였다.

2. 실 험

2.1. 시 편

본 연구에 사용된 용접용 강재는 두께 30mm의 선급용 고장력강재인 ABS EH36 grade 강재로서, normalized 강재(이하 N강재라 칭함)와 controlled rolled 강재(이하 CR 강재라 칭함) 그리고 accelerated cooled TMCP 강재(이하 ACC 강재라 칭함)를 각각 선정 하였다.

각 강재의 제조 공정을 Fig. 1에 간략히 나타내었다. 특히 이들 강재중 CR 강재는 "SHT process"라 불리우는 제조공정에 의해 제조된 강으로서, normalized 강보다 더욱 미세한 조직을 얻기 위해 Ac_3 이상의 온도로 재가열 후 non-recrystallized region에서의 제어압연(controlled rolling)을 거쳐 공냉된 강재이다.[5]

그러나 ACC 강재는 이러한 추가 열처리 공정이 생략되는 대신에 제어압연과 water spray에 의한 accelerated cooling(가속냉각)이 연속적으로 실시되어 제조된 강이다. 여기서 두 강재의 제조공정상의 차이점을 살펴보면, CR 강재는 추가 열처리공정과 제어압연공정등이 첨가되므로 제조 cost가 상승되는 단점이 있으나 ACC 강재는 이러한 열처리공정이 없음으로서 제조 cost가 저렴한 특성을 가지고 있다. Table 1에 각강재의 화학조성을 나타내었는데, 특히 ACC 강은 첨가된 합금원소량이 N 강, CR 강에 비해 상당히 줄어들어 탄소당량이 낮은 것을 알 수 있다.

2.2. 용 접

용접은 최근들어 작업능률의 향상을 위해 적용추세가 늘어가는 대입열용접으로 시공하고자 양면 1층

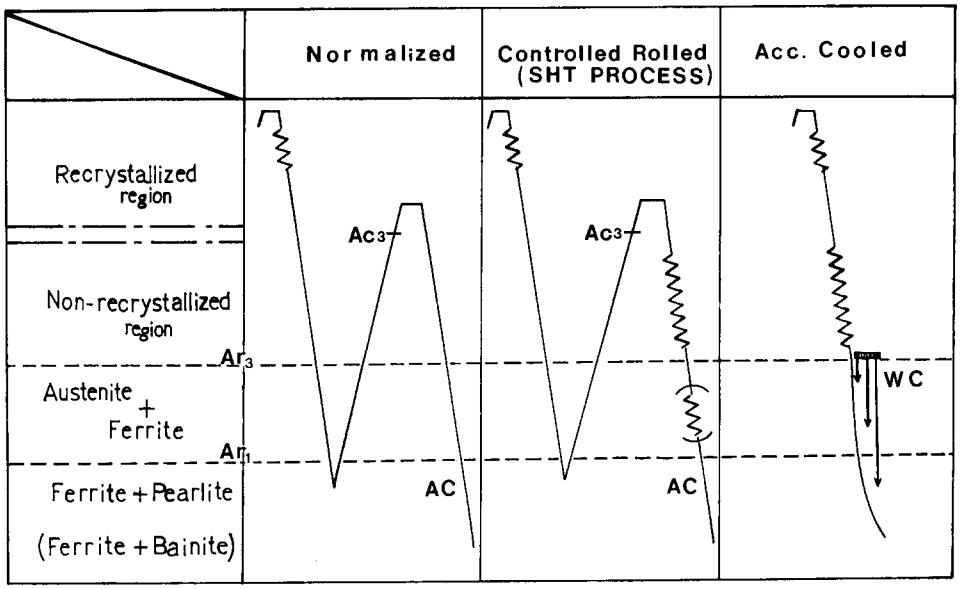


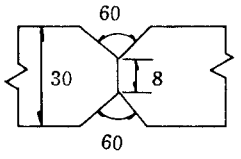
Fig. 1 Manufacturing processes of sample plates.

Table 1. Chemical composition of base metals.

(wt%)

TYPE	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Nb	Ceq
Normalized	0.12	0.39	1.45	0.009	0.001	0.28	0.18	0.024	0.4
Controlled Rolled	0.13	0.42	1.38	0.008	0.001	0.28	0.18	0.026	0.4
Acc Cooled	0.06	0.14	1.33	0.014	0.001	0.31	0.31	0.015	0.33

Table 2. Welding conditions.

Wire×Flux	Side	Electrode (4.8φ)	Amp. (A)	Volt (V)	Speed (cm/min)	Heat Input (KJ/cm)	Joint Configuration
EL8×F7A6	Face	L	850	35	48	67	
		T	650	37			
	Back	L	1150	36	63	70	
		T	800	40			

tandem submerged arc 용접을 행하였으며, 이때의 최대입열은 70KJ/cm이었고 적용된 용접조건은 Table 2에 나타내었다.

2.3. 실험방법

각각의 모재 및 용접열영향부의 기계적 성질을 평가하기 위하여, 표면경도 및 인장시험 그리고 Charpy V-notch 충격시험과 CTOD 시험을 실시하였다. 또한 사용된 강재의 조직을 광학 현미경과 전자현미경을 이용하여 관찰함으로서 미세조직의 특성을 함께 고찰하고자 하였다. 인장시험은 모재 인장시험과 용접부 인장시험으로 대별하였으며, 이때의 모재 인장시험은 as-received 상태와 가속냉각 효과를 조사하기 위하여 620°C에서 2시간 열처리를 행한 후의 상태에서 각각 실시하였으며, 용접부 인장시험은 transverse 인장시험으로 하였다. Charpy V-notch 충격시험은 ASTM A370 규정에 의거 실시하였으며[6], 시험온도는 0°C에서 −120°C 까지로 설정하고 20°C 간격으로 시험하여 Ductile Brittle Transition Temperature를 구하였다. 각 각의 충격시험 온도를 유지하기 위하여 액체질소로 냉각시킨 alcohol 및 isopentane을 사용하였으며, CTOD 시험은 BS 5762 규정에 의거 실시하였다.[7] 용접 열영향부에서의 Charpy V-notch 위치 및 CTOD 시편 채취위치를 Fig. 2에 나타내었는데, Charpy 충격시편의 V-notch는 그 중심을 용접 열영향부의 fusion line+2mm에 두었으며 CTOD 시편은 fatigue crack의 선단부를 fusion line에 일치 시킴으로서 HAZ의 인성특성을 파악에 연구의 중점을 두었다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1. 모재의 조직 및 기계적 성질

우선 각 시편의 화학 조성을 살펴보면 Table 1에서 보는 바와 같이 N강재나 CR 강재는 서로 매우 유사한 화학조성을 가지고 있으나 ACC 강재는 carbon 함량이 0.06% 로서 다른 두 강재에 비해 매우 낮고, 또한 carbon 당량도 낮은 것이 특징이다.

인장시험 결과는 Table 3에 나타나는 바와 같이 ACC 강재가 앞서 언급된 것처럼 낮은 carbon 당량을 가짐에도 불구하고 오히려 N 강재나 CR 강재보다 높은 수준의 항복 강도 및 인장 강도를 나타내고 있는데, 이것은 곧 ACC 강재가 가속냉각에 의해 조직이 강화 되었기 때문으로 설명된다. 이러한 ACC 강재의 강화현상은 Photo. 1의 모재 현미경 미세조직에서 보는 바와 같이, N 및 CR 강재는 ferrite와 pearlite로 구성되어 있으나 ACC 강재는 가속

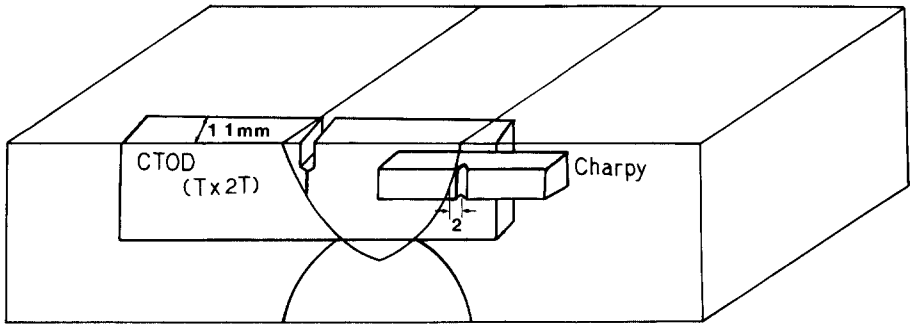


Fig. 2 Notch locations for the Charpy V notch impact and CTOD testing specimens on HAZ.

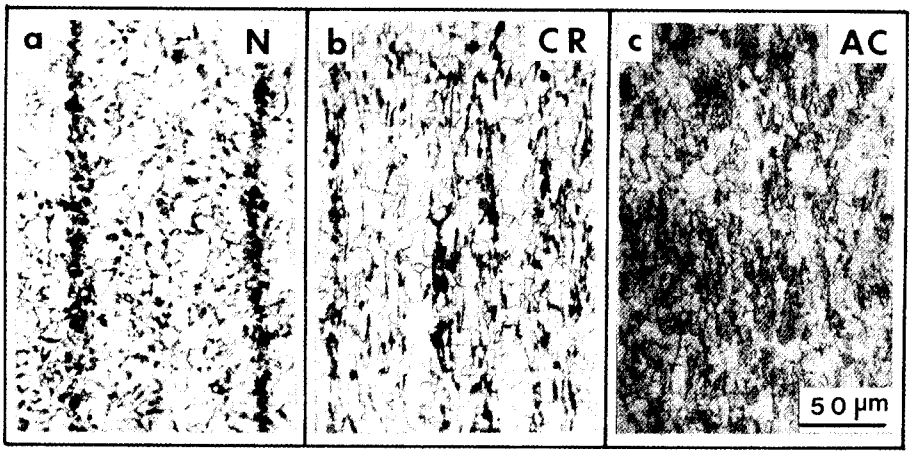


Photo. 1. Microstructure of (a) normalized, (b)controlled rolled and (c) accelerated cooled TMCP steels.

Table 3. Mecanical properties of the base metals.

TYPE	YP (Kg/mm²)	TS (Kg/mm²)	EL (%)
Normalized	40	54	33
Controlled Rolled	38	54	33
Acc. Cooled	46	57	25

냉각에 의해 pearlite의 생성이 억제되어 있음을 알 수 있다. 이것을 보다 확실히 규명하기 위하여 etching 된 시편을 SEM 으로 관찰하였는데 그 결과를 Photo. 2에 나타내었다. 공냉된 N 과 CR 강재는 lamellar structure의 pearlite 들을 확인 할 수 있으나 ACC 강재는 이러한 lamellar structure가 관찰되지 않는다. 이것은 곧 가속냉각에 의해서 pearlite의 생성이 억제되고 그 대신에 경도가 높은 저온 변태 생성물, 예컨대 bainite가 생성 되었음을 의미하는 것으로서 이러한 hard phase의 생성에 의해 기지가 강화 되었음을 알 수 있다. 또한 Photo. 1과 Photo. 2에서 ACC 강재의 ferrite grain size가 다른 두 강재에 비해 매우 미세한 것을 관찰할 수 있는데 이것 역시 가속냉각에 의해 ferrite의 핵생성처가 증가되어 나타나는 것으로서 이러한 가속냉각에 의한 ferrite grain size 미세화는 ACC 강재의 강화 mechanism 중의 하나 일 뿐만아니라 ACC 강재의 모재 toughness를 동시에 향상시키는 주요인자이다.

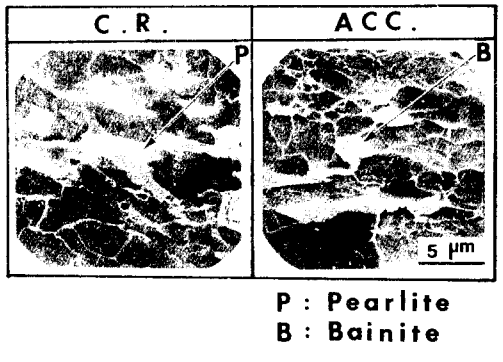


Photo. 2. SEM microstructure of the base metals.

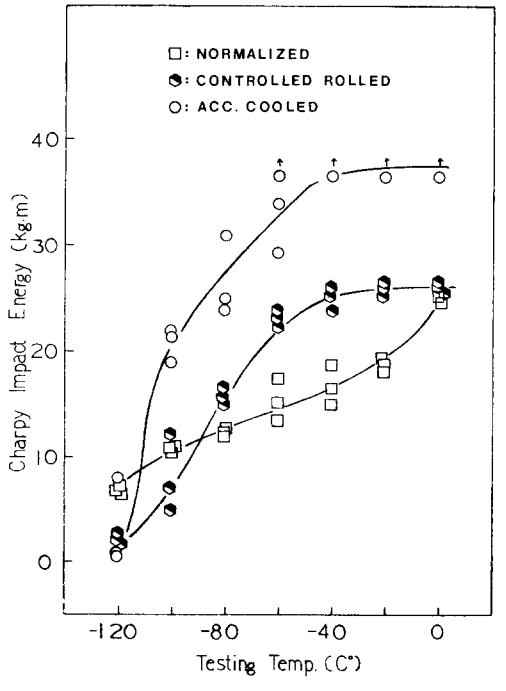


Fig. 3 Results of Charpy impact test for the base metals.

이러한 가속냉각에 의한 강화 mechanism은 앞에서 언급된 2가지 기구 외에도 ferrite 내의 solid solute 량의 증가에 의한 solid solution 강화와 변태시 ferrite 내에 생긴 변형이 cooling rate가 빠르므로 해서 recovery가 충분히 일어나지 못하는데 기인하여 생기는 work hardening 등이 있다.[8)9)]

각 강재의 모재에 대한 저온 충격시험결과들을 Fig. 3에 나타내었는데 세 강재 모두 ABS EH36 grade 강의 충격 인성요구값인 −40°C에서 3.5kg·m를 훨씬 상회하고 있다. 특히 ACC 강재는 다른 두 강재에 비하여 무척 높은 충격인성값을 나타내고 있는데 이는 ACC 강재가 비록 가속냉각에 의해 비교적 인성값이 낮은 저온 변태 생성물 즉, bainite 또는 martensite가 생겨났다 하더라도 미세한 ferrite grain size에 의한 인성 향상효과가 훨씬 더 지배적으로 작용되어 나타난 결과라 생각된다.

3.2. HAZ의 조직 및 기계적 성질

우선 용접부의 경도분포를 살펴보면 Fig. 4에 나타난 바와 같이 모재에서는 세 강재가 모두 비슷한 경도값을 나타내고 있다. 이는 Table 2에서 언급된 바 되로 세 강재가 모두 비슷한 인장강도를 가지고 있기 때문이다. 그러나 HAZ 에서는 ACC 강재의 경도

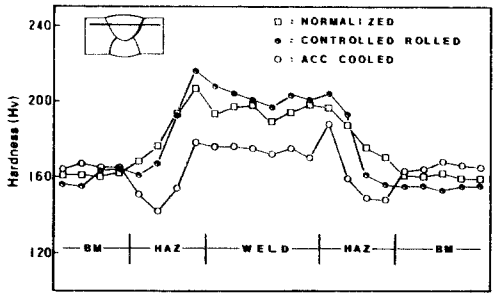


Fig. 4 Hardness profiles of the welded joints.

값이 다른 두 강재에 비해 월등히 낮은 값을 나타내고 있음을 보여주고 있다. 이러한 HAZ 부 연화현상은 N 강이나 CR 강인 경우 HAZ 부위가 모재보다 경화되는 현상과는 정반대의 ACC 강 특유의 현상으로서, 이는 ACC 강의 강화기구인 accelerated cooling 효과가 HAZ 에서는 용접열 cycle에 의해서 소멸되어 나타나는 것으로 추정된다.

Table 4에 각 강재의 용접부 transverse 인장 시험결과를 나타내었다. 세 시편 모두 EH36 grade의 강도 requirement인 50kg/mm²를 상회하고 있으나 특기

Table 4. Tensile test results of each weldment.

	TS Kg/mm²	Fractured Position
Normalized	54,9	Base Metal
Controlled Rolled	56.6	Base Metal
Acc. Cooled	52.7	Base Metal

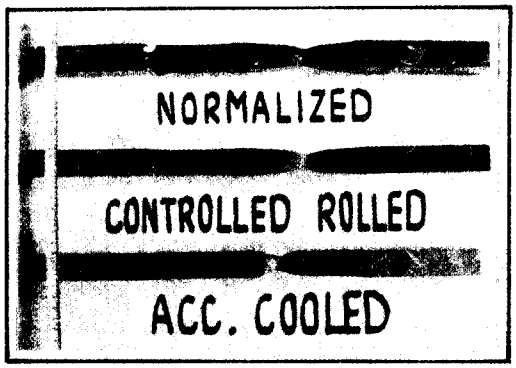


Photo 3 Fractured tensile test specimens. Note that the black marks on the center of each specimen indicate weld metal.

할 사실은 ACC 강재의 용접부 인장강도가 원 모재의 인장강도에 비해 급격히 저하되고 있는 현상으로서 이것은 파단된 인장시편의 형상을 나타낸 Photo 3에서 보는 바와 같이 ACC 강의 용접부 transverse 인장시편의 파단이 N 강이나 CR 강과는 달리 HAZ 부에서 일어나고 있는 것으로 ACC 강의 HAZ 부 연화현상과 유관함을 알 수 있다.

이러한 ACC 강의 HAZ부 연화현상은 근본적으로 ACC 강의 강화기구인 accelerated cooling 효과의 소멸에 의한 것으로 추정되기 때문에 ACC 강을 응력제거등의 열처리를 할 경우에도 열 cycle에 의해 HAZ 부의 연화현상과 비슷한 모재 연화현상이 일어날 것으로 생각되며, 이러한 사실을 확인하기 위하여 각 시편의 모재에 대한 열처리를 실시하였다. 그 결과를 Fig. 5에 나타내었는데 각 강재의 모재 as-received 상태의 강도와 620°C 에서 2시간 동안 stress relieving 열처리를 행한 후의 강도를 상호 비교한 것으로서, 여기에서 ACC 강은 stress relieving 열처리를 행한 후의 모재 강도 저하가 다른 두 강에 비하여 매우 급격히 일어나고 있음을 관찰할 수 있다. 따라서 ACC 강재는 이러한 열처리 후의 모재 및 HAZ부 연화현상을 고려하여 original 모재의 강도를 보다 높게 설정함으로서 연화후에도 적정한 requir-

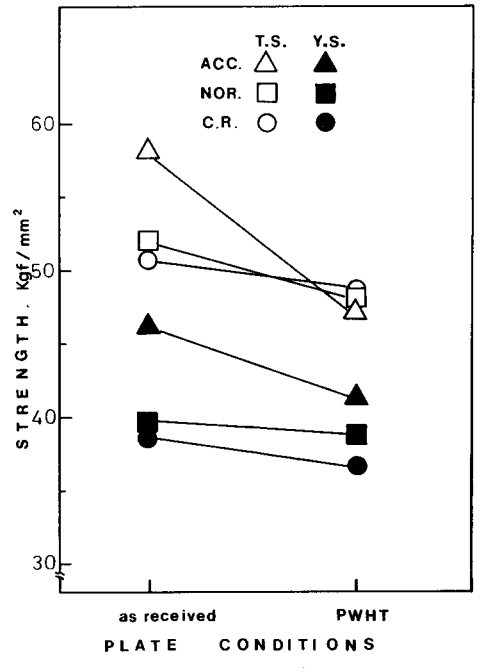


Fig. 5 Tensile test results of base metals and after PWHT.

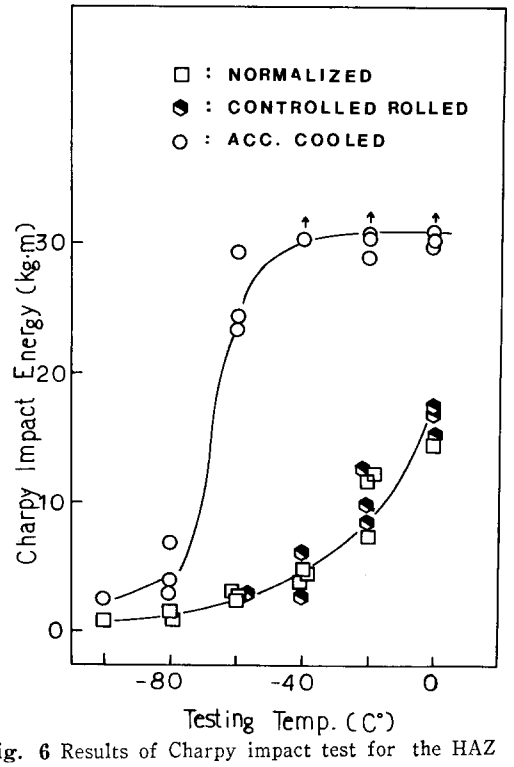


Fig. 6 Results of Charpy impact test for the HAZ of each weldments.

ement에 부합되도록 제조 되어야 할 것이다.

Fig. 6에 각 강재의 HAZ Charpy V-notch 충격 시험결과를 나타내었고 Fig. 7에는 각 강재의 HAZ부 CTOD 시험결과를 나타내었다. Fig. 6을 살펴보면 N 강이나 CR 강은 모재의 충격인성값에 서로 약간의 차이가 있음에도 불구하고 HAZ부에서는 거의 동일한 수준의 충격인성값을 나타내고 있음을 보여준다. 이는 N 강이나 CR 강이 동일한 탄소당량을 가지고 있음에 기인된 것으로 생각되며 두 강재 모두 모재의 충격인성값에 비해 HAZ 부의 충격인성값이 급격히 저하하고 있어 HAZ부의 충격인성값이 70KJ/cm 정도의 용접입열에서 EH36 모재 충격 requirement를 만족시키지 못하고 있음을 알 수 있다. 그러나 ACC 강재는 이러한 requirement를 크게 상회하고 있을 뿐만아니라 DBTT도 −70°C 정도에서 나타나고 있어 실제적으로 −60°C 이상의 온도 영역에서는 N 강이나 CR 강의 모재충격인성값 보다도 오히려 높은 HAZ toughness를 나타내고 있다. 이는 곧 ACC강은 70KJ/cm 정도의 입열은 물론 그 이상의 대입열에서도 HAZ toughness의 저하없이 대 입열용접이 가능하다는 것을 의미하는 것이다. Fig. 7의 HAZ CTOD 시험결과에서도 ACC 강재가 다른 두 강재 보다 월등히 우수한 toughness를 가지고 있음을 알 수 있는데 N 강재나 CR 강재는 HAZ의 coarsed grain region에서 unstable fracture가 일어난 반면 ACC 강재는 이러한 unstable fracture가 일어나지 않음으로써 비록 용접열영향부

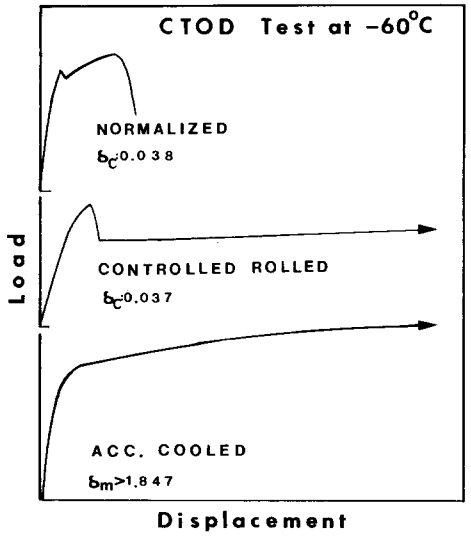


Fig. 7 CTOD test results for HAZ of eacn weldments.

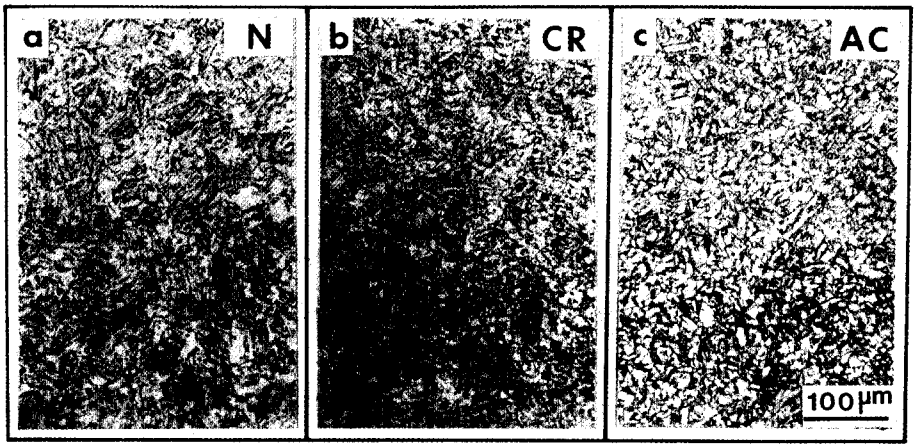


Photo. 3. HAZ microstructure of (a) normalized (b) controlled rolled and (c) accelerated cooled TMCP steels.

라 할지라도 brittle한 region이 존재하지 않음을 나타내는 것이다.

지금까지의 관찰결과로 볼때 ACC 강이 높은 HAZ toughness를 가지는 이유는 곧 ACC 강의 HAZ 연화현상에 기인되는 것이라고 할 수 있으나 이러한 관점외에도 HAZ 부의 미세조직을 관찰해 보면 Photo 3에 나타낸 바와 같이 N 강이나 CR 강은 모두 침상형의 조대한 ferrite가 생성되고 있으나 ACC 강은 다른 두 강재에 비해 미세한 equiaxied ferrite가 생성되었음을 관찰할 수 있다. 여기에서 ACC 강재가 보다 미세한 조직을 갖는 이유로는 원래 N 강이나 CR 강 보다도 ACC 강재가 더 미세한 모재조직을 가지고 있기 때문에 ACC 강이 동일한 입열(동일한 열 cycle)을 받았을 때 역시 보다 미세한 HAZ 조직으로 나타난다고 생각되며, 이러한 HAZ부 미세조직 생성이 또한 ACC 강의 높은 HAZ toughness를 가지는데 기여하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

Accelerated cooling process에 의해 낮은 carbon equivalent를 가지면서도 강도의 저하없이 높은 인성을 가지는 TMCP 강재는 용접열영향부에서도 normalized 강이나 controlled rolled 강보다도 우수한 인성을 가지는 것을 알 수 있는데 이것은 ACC 강재의

1) HAZ부 softening 현상과
2) HAZ부의 fine microstructure 생성

에 기인된 것이다.

참 고 문 헌

1) I. Kozasu, "Overview of Accelerated Cooling of Plate" Technical Research Center, Nippon Kokan K. K. (1985)
2) H. Suzuki., "Weldability of Modern Structural Steels in Japan" Transactions ISIJ, Vol. 23, 1983, pp. 189-204.
3) H. Tamehiro, N. Yamada, H. Matsuda, "Effect of the Thermo-Mechanical Control Process on the Properties of High-Strength Low Alloy Steel", Transaction ISIJ, Vol. 25, 1985, pp. 54-61.
4) H. Yajima, S. Yamada and K. Yasuda, "Weldability and Notch Toughness of Thermo-Mechanical Rolled High Tensile Steels for Hull Structure", The 2nd Internl. Sympo. on Practical Design in Shipbuilding, 1983, Tokyo & Seoul.
5) N. J. Kim "The Physical Metallurgy of HSLA Linepipe Steels-A Review", Journal of Metals, Vol. 35 No. 4, 1983, April, pp. 21-27.
6) 1985 Annual Book of ASTM Standards Section 1 Volume 03. 01, ASIM A370-77.
7) British Standard 5762. (1979)
8) Sumitomo Metal, Technical Data-Strengthening mechanism of the DAC Process. (1986)
9) H. J. Kim, "Weldability of Mordern Structural Steel" 대한 용접학회 제 3회 용접기술 강습회 참고 교재, 1985, July. pp. 35-64.