

## 수퍼 2상 스테인리스강의 부식 저항성에 관한 연구

강흥주\* · 남기우\*\* · 안석환\*\* · 강창룡\*\* · 도재윤\*\*\* · 박인덕\*\*\*

\*부산해사고등학교

\*\*부경대학교 공과대학

\*\*\*부산기능대학

## Corrosion Resistance of Super Duplex Stainless Steel

HEOUNG-JOO KANG\*, KI-WOO NAM\*\*, SEOK-HWAN AHN\*\*, CHANG-YONG KANG\*\*, JAE-YOON DO\*\*\* AND IN-DUCK PARK\*\*

\*Busan Maritime High School, Busan, Korea

\*\*College of Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

\*\*\*Busan Polytechnic College, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Super Duplex Stainless Steel 수퍼 2상 스테인리스강, STSSD, Corrosion Resistance 내식성, Immersion Test 침지 시험, Impingement Test 유속시험, STS316L 316L 스테인리스강, STS304 304 스테인리스강

**ABSTRACT:** The corrosion resistance of super duplex stainless steel on both its fibrous and dispersed phases was investigated. These structures consist of various volume fraction and distribution of austenite structure, which were obtained by changing the heat treatment temperature and cycle. The fibrous phase had higher austenite volume fraction than that of the dispersed phase at the same temperature. Corrosion resistance of super duplex stainless steel was evaluated through an immersion test and an impingement test, using 35% HCl and sea water, respectively. Super duplex stainless steel was compared with STS316L and STS304. The corrosion resistance of super duplex stainless steel was superior to STS316L and STS304. The dispersed phase of super duplex stainless steel was more stabilized than the fibrous phase in corrosion. The magnitude of corrosion rate was in order STS304, STS316L, fibrous phase of super duplex stainless steel and dispersed phase of super duplex stainless steel.

### 1. 서 론

스테인리스강은 Cl<sup>-</sup> 등의 공격적인 음이온 등이 존재할 경우, 고농도의 산용액에 있어서 부식저항이 감소 한다고 알려져 있다. 따라서, 근년 이러한 부식에 대하여 내식성 향상을 목적으로 초내식성 스테인리스강 등이 개발되고 있다 (Fontana, 1981; 임우조 등, 1994; 강창룡 등, 1998)

2상 스테인리스강은 오스테나이트 스테인리스강에 비해서 인장강도가 약 1.5배, 항복강도가 약 2배 정도 높다. 연신율은 오스테나이트 스테인리스강보다도 다소 떨어지지만 약 25% 정도이며, 국부부식 및 응력부식균열에 대한 저항성이 높으며, 페라이트 스테인리스강에 비해서 인성 및 용접부의 내식성이 양호하다고 알려져 있다. 내식성의 향상을 위해 공존하는 2상 간의 내식성의 균형이 잘 이루어져야만 양호한 내식성을 나타낼 수 있으나, 그렇지 못한 경우에는 오히려 오스테나이트 스테인리스강 보다도 내식성이 떨어지는 결과를 초래할 수도 있다 (박희상과 박용수, 1999).

해양구조물에 사용되는 STS316L 및 STS304는 해수속에서는 단기간에 걸쳐 심하게 부식하여 경제적인 운용에 있어서 심각

한 영향을 미치고 있다. 그러므로 해수용의 소재로서 STS316L 및 STS304에 대체할 재료가 시급한 실정이다.

한편, super duplex stainless steel(STSSD)은 내공식지수 (pitting resistance equivalent number, PREN)가 40 이상으로, 내식성과 기계적 성질이 기존의 2상 스테인리스강 보다 우수하다고 알려져 있다 (Charles, 1991, 1994; Nicholls, 1994; Robert, 1997; 이상기 등, 2000). 이와 같이 내공식성 및 내극간 부식성이 강하고 내공식 지수가 높다고 알려진 STSSD를 STS316L 및 STS304의 부식특성과 비교·검토하고자 한다.

본 연구에서는 섬유상 조직과 분산상 조직을 각각 가지는 STSSD와 STS316L 및 STS304를 이용하여 해수속에서 단순침지 시험, 해수 충돌에 의한 유속시험 및 35% HCl 수용액의 침지에서 부식성을 비교·검토하였다.

### 2. 재료 및 실험방법

#### 2.1 재료

사용한 재료는 내식성과 내극간성이 강하다고 알려진 STSSD와 현재 해양구조물에 사용되고 있는 STS316L, STS304를 사용하였다. 본 연구에 이용한 STSSD는 고주파 진공유도 용해로에서 용해 제작하였으며, Fig. 1과 같은 열처리 과정에 의하여 체적분율을 변화시켜 적용하였다 (도재윤, 2001). 섬유

제1저자 남기우 연락처: 부산광역시 남구 용당동 100

051-620-1640 namkw@pknu.ac.kr

상은 냉간압연한 시료를 2상 공존구간인 1050℃, 1200℃ 및 1300℃에서 15분간 유지 후 수냉한 것으로, 오스테나이트 조직이 일방향으로 길게 되어있다. 분산상은 1350℃에서 30분간 가열 후 수냉하여 페라이트 단상조직을 얻은 다음, 오스테나이트 조직과 페라이트 조직이 공존하는 1050℃, 1200℃ 및 1300℃의 온도에서 15분간 유지 후 급랭시킴으로서 페라이트 조직의 기지에 오스테나이트 조직이 분산되어 있다.

Fig. 2는 각 온도역에서 Fig. 1과 같이 열처리를 행한 후 STSSD에 나타난 체적분율에 의한 상 비율의 변화를 나타낸 것이다. 2상영역 열처리 온도가 상승함에 따라 오스테나이트 체적분율은 급격히 감소하고 있는데 반하여 페라이트의 체적분율은 증가하고, 섬유조직이 분산조직보다 동일 열처리 온도에서 오스테나이트의 체적분율이 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

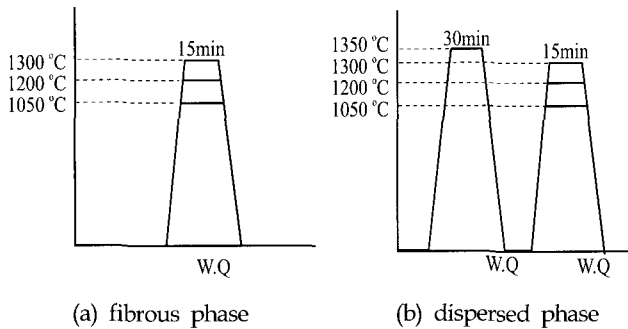


Fig. 1 Schematic diagram of heat treatment cycle

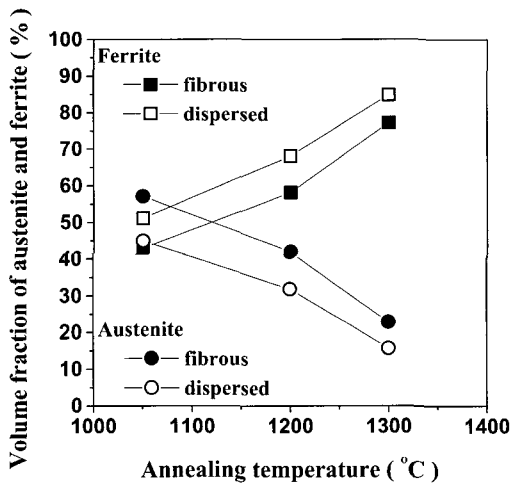


Fig. 2 Effect of annealing temperature on the volume fraction of austenite and ferrite in STSSD.

시험편의 크기는 15 mm × 25 mm × 5 mm로 하였고, 그 개략도를 Fig. 3에 나타낸다. 이때, 시험편은 드릴구멍을 가공한 것과 드릴구멍을 가공하지 않은 것을 사용하였다. 특히, STSSD에 있어서는 위에서 언급한 열처리에 의한 2상의 조성 비율을 달리하여 만든 3종류의 시험편을 사용하였다. Table 1에 본 실험에 사용된 STS316L, STS304 및 STSSD의 화학 조성을 나타내었다.

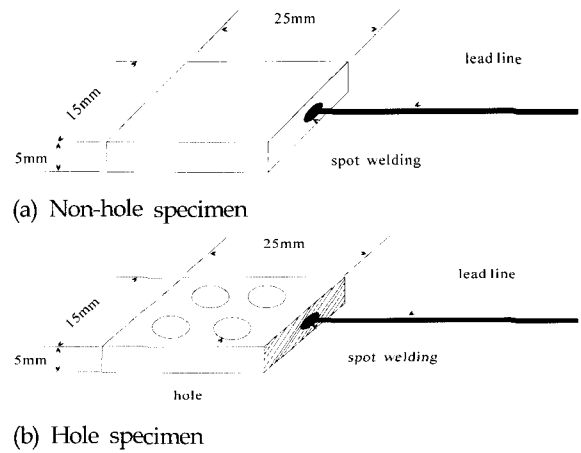


Fig. 3 Shape and dimensions of corrosion specimens (unit: mm)

2.2 실험방법

Fig. 3과 같은 시험편은 표면을 사포 #80~2000 까지 연마한 후, 오일 랩핑하고 아세톤으로 탈지하였다. 시험편에는 스폿용접을 실시하여 부식전위를 측정할 수 있도록 하였다. 이때, 스폿용접부 등이 부식에 의한 영향을 받지 않도록 하기 위하여 일액형 RTV 고무실리콘을 사용하여 유효노출면적을 남기고 전부피복 절연시켰다.

해수(pH=7.52) 침지시험은 침지시킨 후, 매 24시간마다 부식 전위를 측정하였고, 시험 종료 후 무게감소량을 측정하였다. 무게감소량은 시험 전에 측정하고, 시험 종료 후에 물로 세척한 다음 초산+불화수소산+중류수를 첨가해 만든 약 25℃의 용액에 10분간 침지시켜 시험편 표면에 부착되어 있는 부식생성물을 제거시킨 후, 중류수 및 아세톤으로 세척하고 단시간에 건조시켜 측정하였다 (안석환과 임우조, 2000).

산성용액에서의 내식성 평가는 침지시험에서 사용한 시험편과 동일한 크기로 35% HCl 용액에서 시험을 행하였다. 시험의 방법은 해수 침지시험과 동일하다.

Table 1 Chemical compositions of each stainless steel [wt%]

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	N	Cu	W	Fe
STS316L	0.03	1.0	2.0	16.0	12.0	2.0	0.045	0.03	-	-	-	Bal.
STS304	0.08	1.0	2.0	18.0	8.0	-	0.045	0.03	-	-	-	Bal.
STSSD	0.02	0.41	0.69	25.1	7.0	3.6	-	-	0.24	0.56	0.62	Bal.

펌프를 사용한 유속시험(impingement test)은 시험편의 표면에 해수를 분사하여, 침지시험과 동일한 방법으로 내부식성을 검토하였다. 유체의 분사를 위하여, 길이 50mm, 직경 5mm의 노즐을 제작하여 6m/s의 속도로 해수를 시험편에 분사시켰다.

각 시험편에 대한 분극실험은 scan rate는 1.5mV/sec이고, 기준전극은 SCE (saturated calomel electrode)이다. 침지시험의 부식전위변화는 SCE (saturated calomel electrode)를 기준전극으로 전위차 측정기를 이용하여 측정하였다.

시험 종료 후에는 부식된 표면의 상태를 광학현미경 및 전자현미경으로 조사하였고, 시험전과 시험 후에 있어서의 경도를 조사하여 비교하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 부식전위

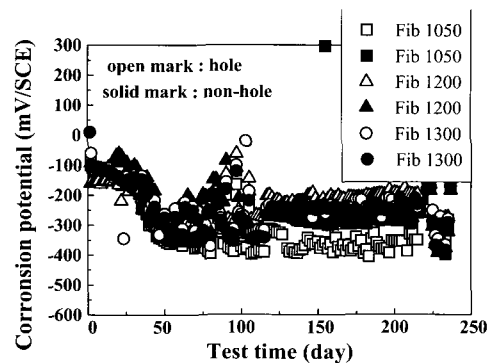
침지시험 및 유속시험으로부터 얻은 시간경과에 따른 각 시험편의 부식전위를 각각 Fig. 4과 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 데이터들은 240일간 매 24시간 마다 10분 간격으로 5번 측정된 평균 값을 나타낸 것이다.

Fig. 4(a), (b), (c)는 각각 STSSD의 섬유상, STSSD의 분산상 및 STS316L과 STS304의 침지시험에서 얻은 부식전위를 나타낸다. 여기서, 흰색 기호는 드릴구멍을 가공한 시험편이며, 검은색 기호는 드릴구멍을 가공하지 않은 시험편의 결과이다.

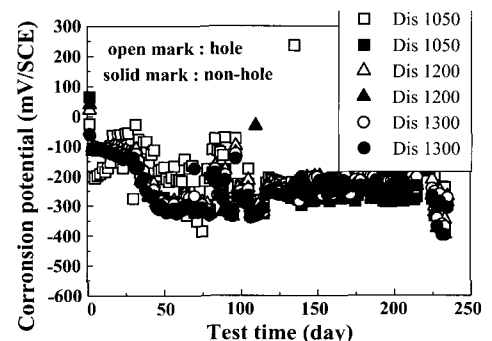
전반적으로 부식전위의 변화는 STSSD의 섬유상, STSSD의 분산상, STS316L과 STS304가 거의 비슷한 경향을 나타내었다. 30일 정도에서 부식이 활성화되어 부식전위가 감소되는 경향이이며, 110일을 전후로 하여 부식이 다소 안정화 되면서 약간 상승하는 경향을 보이고 있다. STSSD는 드릴구멍을 가공한 쪽이 그렇지 않은 경우보다도 부식이 느린 경향을 보이지만, 두 종류의 시험편에서 큰 차는 보이지 않고 있다. 240일간의 침지기간 동안 STSSD의 섬유상 및 분산상은 대체적으로 동일한 경향을 보이고 있으나, 섬유상 및 분산상의 오스테나이트 조직 체적분율이 감소된 1300℃에서 열처리를 한 경우에 있어서 다소 높은 전위값을 보이고 있다. 이것은 높은 온도에서 열처리를 하였을 경우, 오스테나이트 조직의 분율이 페라이트 조직의 분율에 비하여 낮은 분포를 형성하지만, 2상의 비율이 달라지면서 각 상에 함유되어 있는 합금 원소도 다르기 때문이라고 판단된다. 그러나 섬유상과 분산상을 비교하였을 때, 열처리 온도의 변화에 따른 부식전위의 차이는 그다지 크게 나타나지 않음을 알 수 있다. STS316L과 STS304를 비교하였을 때도 그 차이는 보이지 않고 있다.

Fig. 5는 2종류의 시험편에 대하여 유속을 모의한 부식시험의 결과를 나타낸다. 길이 50mm, 직경 5mm의 노즐을 통하여 6m/s의 속도로 해수를 시험편에 분사시킨 경우, 침지시험의 결과와 반대로 시험의 초기에 드릴구멍을 가공한 시험편이 부식에 더욱 민감한 반응을 나타내었다. 이것은 드릴구멍을 가공함으로써 드릴구멍의 표면조도가 다소 거칠어졌기 때문이라고 판단되며, 유체의 충돌에 의해 전위가 다소 감소되었다고 판단된다. 110일 전후에서는 침지시험과 같이 드릴구멍이 없는 시험

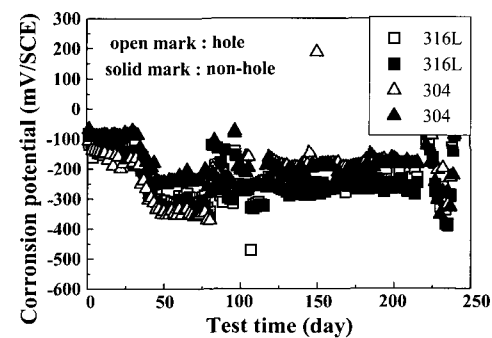
편의 부식전위가 더욱 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 부식전위의 분포가 상당히 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그 이유는 침지시험에 비하여 유속시험은 유체의 충돌에 의하여 시험편 표면부가 불안정한 상태로 계속 노출되기 때문이라고 판단된다. 섬유상 및 분산상을 가진 STSSD의 유속시험에 의한 부식전위의 변화에 있어서는 열처리 온도가 높을수록 부식전위가 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 열처리 온도가 높을수록 페라이트의 상 분율이 차지하는 분포가 크며(Fig. 2), 따라서 오스테나이트 조직보다 페라이트 조직들이 유체의 충격에 많이 노출되어지므로 부식에 대한 민감성이 증가하였기 때문으로 판단된다.



(a) fibrous phase



(b) dispersed phase



(c) 316L and 304 stainless steel

Fig. 4 Corrosion potential versus test time of STSSD, STS316L and STS304 by immersion test

3.2 분극특성

STSSD, STS316L 및 STS304의 천연해수 분위기에서 얻은 양극분극특성을 Fig. 6에 나타낸다. Fig. 6(a)는 STSSD의 섬유상에 대한 양극분극곡선을 나타내고 있다. 그림에서 1050℃, 1200℃ 및 1300℃로 열처리 된 3종류의 시험편에 있어서 분극곡선의 형태는 거의 비슷한 양상을 보이고 있으며, 전위의 상승과 함께 전류밀도도 증가하는 경향을 나타내고 있다. Fig. 6(b)는 STSSD의 분산상에 대한 양극분극곡선을 나타내고 있다. Fig. 6(a)와 같은 경향을 나타내고 있다. Fig. 6(c)는 STS316L 및 STS304의 양극분극곡선을 나타낸 것이다. STS316L은 Fig. 6(a), (b)의 경우와 비슷한 경향을 보이고 있으나, Fig. 6(a), (b)가 더 높은 전위대를 형성하고 있다. 따라서, Fig. 6(a), (b)가 내부식성이 강한 것이라 판단된다.

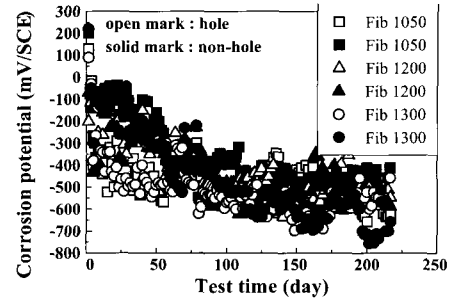
이에 비해 STS304는 뚜렷한 부동태 영역을 나타내지만, 가장 낮은 전위대를 나타내면서 가장 부식에 민감한 특성을 나타내고 있다.

이와같이 STS316L 및 STS304는 STSSD에 비하여, 부동태피막의 형성 이후 그 피막이 파손되면서 재차 부식에 노출되고 다시금 부동태 피막을 형성하기 까지 부식에 민감해지는 활성화 기간이 더 길다는 것을 나타낸다. 따라서, STS316L 및 STS304가 STSSD 보다도 부식에 민감한 반응을 나타내는 것으로 판단된다. 그러나 전반적으로 섬유상 및 분산상의 STSSD는 열처리 온도에 관계없이 STS316L 및 STS304에 비하여 부동태화 전위가 높게 나타나고 있으므로 내식성이 우수한 것으로 판단된다.

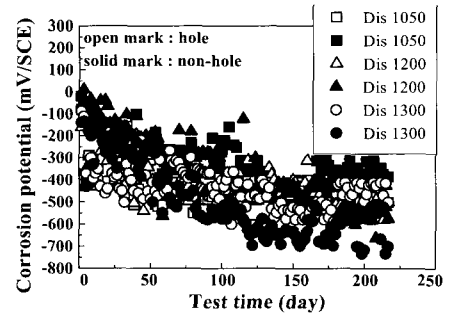
3.3 무게감소량

해수분위기 및 35% HCl 용액에서의 부식시험 결과 얻어진 무게감소량을 Fig. 7(a), (b) 및 Fig. 8(a), (b)에 각각 나타낸다.

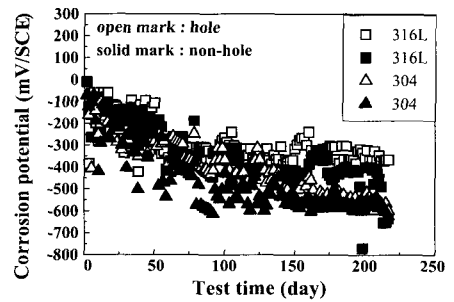
Fig. 7(a)는 천연해수에서 240일간 침지시킨 후의 각 시험편에서의 무게 감소율을 나타내고 있고, Fig. 7(b)는 천연해수의 유체 충돌에 의하여 240일간 시험을 행한 후의 각 시험편의 무게감소율을 나타내고 있다. 침지 시험에서 1050℃ 열처리한 STSSD의 분산상은 섬유상의 약 2배, STS316L의 약 11배,



(a) fibrous phase

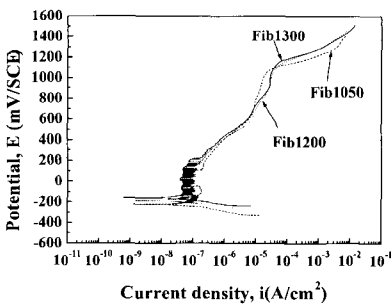


(b) dispersed phase

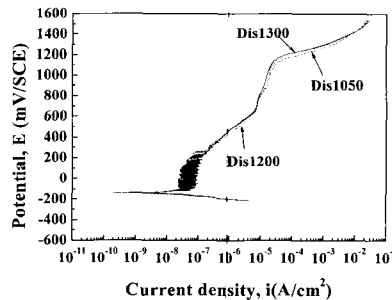


(c) 316L and 304 stainless steel

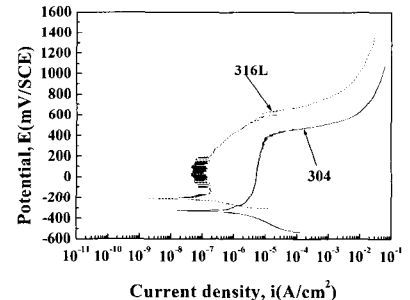
Fig. 5 Corrosion potential versus test time of STSSD, STS316L and STS304 by impingement test



(a) fibrous phase



(b) dispersed phase

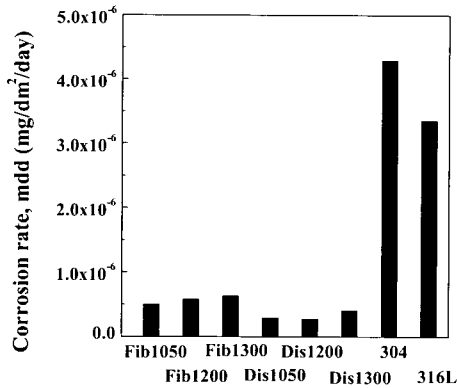


(c) STS316L and STS304

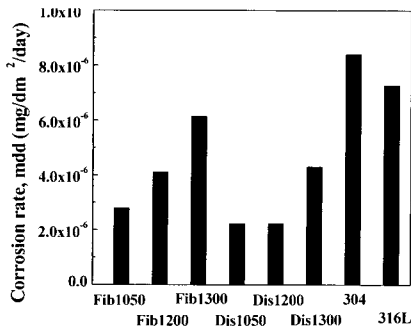
Fig. 6 Anode polarization curve of STSSD, STS316L and STS304 in sea water (pH=7.52)

STS304의 약 14배 내부식성을 나타내었다. 그리고 유속시험에서는 1050℃ 열처리한 STSSD의 분산상은 섬유상의 약 2배, STS316L의 약 3배, STS304의 약 3.5배 내부식성을 나타내었다.

Fig. 8(a)와 (b)는 35% HCl용액에서 96시간(STS304는 72시간) 동안 침지시킨 다음 24시간 간격으로 측정된 무게 감소의 변화를 나타내고 있다. 35% HCl 수용액에서 침지 시험 한 경향은 해수분위기에서 실시한 결과와 유사하였다. 72시간 동안 무게 감소의 변화는 1050℃ 열처리한 STSSD의 분산상은 섬유상의 약 1.6배, STS316L의 약 4.2배, STS304의 약 36배 내부식성을 나타내었다.



(a) immersion test

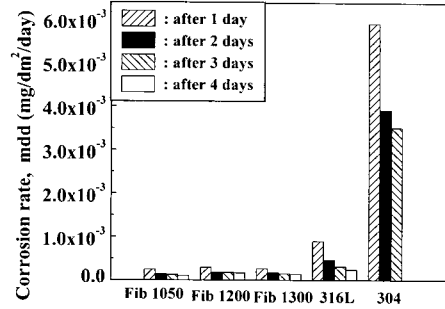


(b) impingement test

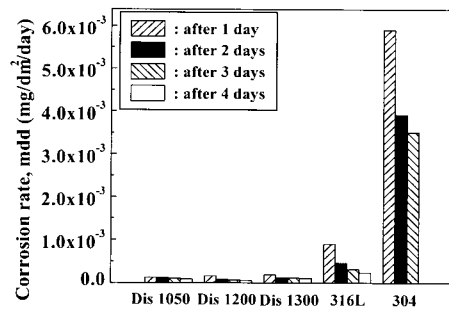
Fig. 7 Corrosion rate of STSSD, SIS316L and STS304 after 240 days in sea water. (Note : day of mdd = 240 days)

3.4 조직사진

Fig. 9는 각 열처리 온도에서 얻어진 STSSD의 조직을 나타낸다. 열처리 온도를 달리하여 오스테나이트 조직의 체적분율이 다른 섬유상과 분산상을 갖는 미세조직의 사진으로서, 흰색 부분은 오스테나이트 조직이며, 검은 부분은 페라이트 조직을 나타낸다. 섬유상은 오스테나이트의 조직이 압연방향을 따라 섬유형태로 존재하고 있음을 알 수 있다. 2상 영역의 열처리 온도가 높아짐에 따라 연속상으로 존재하던 섬유형태의 오스테나이트 조직이 조대화되면서 연속적이지 못하고 끊어진 상태



(a) fibrous phase



(b) dispersed phase

Fig. 8 Corrosion rate of STSSD, STS316L and STS304 in 35% HCl

로 존재하고 있고, 오스테나이트 조직의 체적분율이 감소하고 있다. 이것에 비하여, 분산상은 페라이트 조직의 입계 및 입내에 오스테나이트 조직이 필름과 같은 형태로 분산되어 존재하고, 2상 영역의 열처리온도가 높아질수록 오스테나이트 조직의 체적분율이 적어지면서 입자크기가 조대화되고 있다.

Fig. 10, 11 및 12는 해수에서 침지시험, 유속시험 및 산성용액에서 침지시험을 실시한 STSSD의 1300℃ 시험편, STS316L 및 STS304의 대표적인 조직사진들을 보여주고 있다.

Fig. 10은 해수분위기에서 240일간 침지시험한 후의 각 시험편의 광학현미경 사진을 나타낸다. 이 그림에서 STS316L 및 STS304에서 부식피트가 크게 형성되고 있음을 알 수 있다. 이에 반해, STSSD는 열처리온도가 높아질수록 부식이 활성화되는 경향을 보여주고 있다. 이것은 열처리온도가 높아질수록 페라이트 조직의 증가로 인하여 오스테나이트 조직에 비하여 페라이트 조직이 집중적으로 부식이 되는 것이 원인이라 판단된다. STSSD에서도 비록 크기는 작으나 미세한 부식피트가 확인되었다.

Fig. 11은 해수분위기에서 240일간 유속시험한 후의 각 시험편의 광학현미경 사진을 나타낸다. 이 그림에서도 Fig. 10과 같이 STS316L 및 STS304에서 부식피트가 크게 형성되고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 부식의 영향과 유체의 충돌에 의한 침식작용이 중첩됨으로서 부식이 가속화되었기 때문이라고 판단된다. STSSD에도 그 정도는 작지만 부식과 침식의 상

호작용에 의하여 침지시험의 경우보다도 부식피트가 활성화되어지고 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 12는 35% HCl 용액에 96시간 침지한 후의 주사전자현미경 사진을 나타낸다. 해수에 침지한 경우와 비슷한 부식 경향을 나타내었다. 그 정도는 STSSD의 분산상보다 섬유상에서 더욱 심해지고 있음을 알 수 있다. 이러한 원인은 Fig. 9에서 언급하였다. 이에 비해, STS316L 및 STS304는 국부적으로 부식이 진행되는 경향이며, 이것은 탄소가 부식되므로서 나타나는 현상인 것으로 판단된다. 특히, STS304는 상당히 많은 양이 부식되어 녹아 없어진 것을 실험중 육안으로 관찰할 수 있었다.

Fig. 13은 STSSD의 Dis1300시험편을 35%HCl 수용액에서 96시간 침지 시킨 후, SEM을 사용하여 Cr원소에 대하여 Line profile을 실시한 것이다. 사진에 나타나는 흰색 부분은 오스테나이트 조직이다. Line profile결과, 페라이트 조직은 부식에 의하여 오스테나이트 조직보다 현저하게 Cr이 감소하였다. 이상에서 STSSD의 부식은 페라이트 조직에서 침식이 주를 이루는 것으로 판단된다.

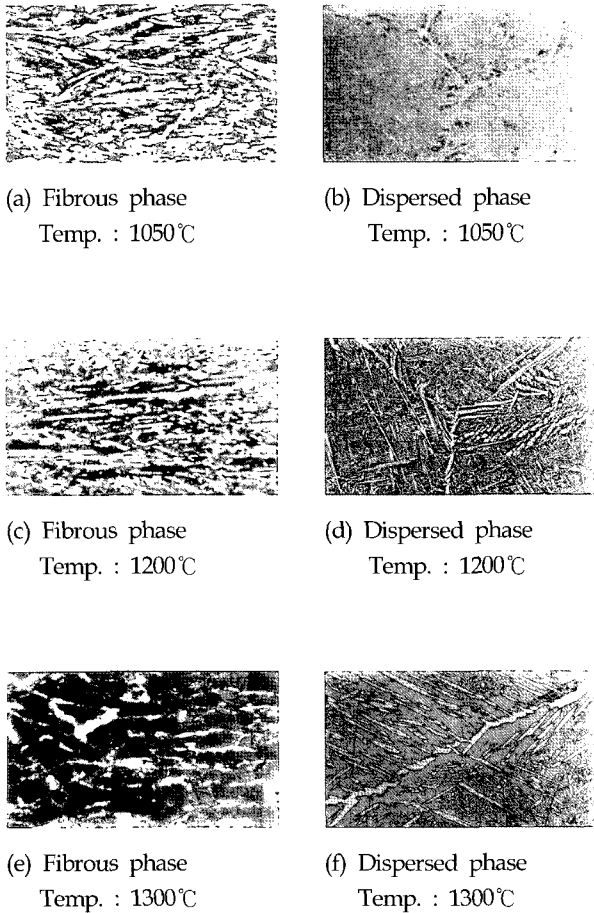


Fig. 9 Optical micrographs of super duplex stainless according to heat treatment temperature (x200 / white: austenite structure, black: ferrite structure)

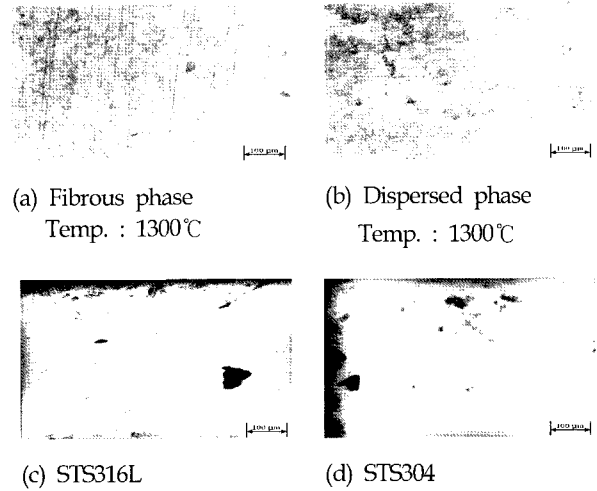


Fig. 10 Optical micrographs after immersion test in sea water during 240 days

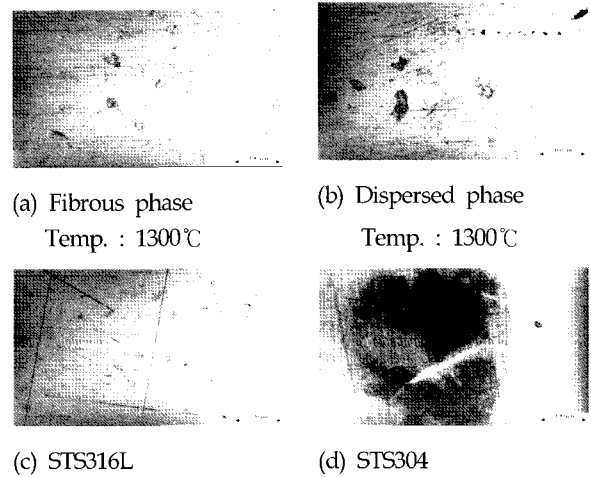


Fig. 11 Optical micrographs after impingement test in sea water during 240 days

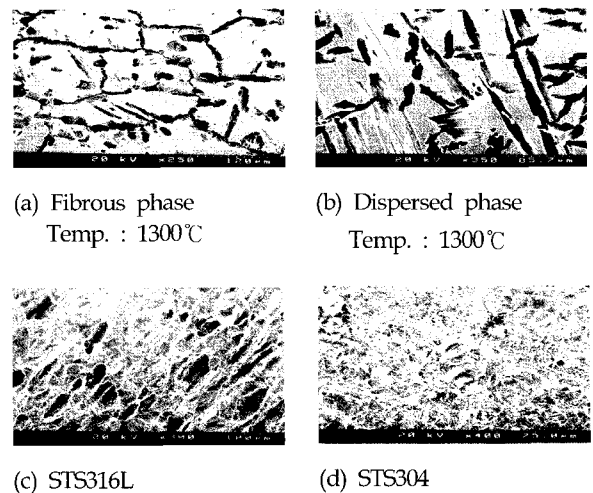


Fig. 12 SEM micrographs after immersion test in 35% HCl during 96 hours (STS304 : 72 hours)



Fig. 13 SEM line profile after immersion test in 35%HCl during 96 hours for Dis1300

#### 4. 결 론

- (1) STS316L 및 STS304보다 STSSD가 양호한 내식성을 나타내었다. 그러나, STSSD의 2상 조성비율에 따라서 내식성에 차이가 있었으며, 분산상이 섬유상보다 부식에 있어서 더욱 안정화되는 경향을 나타내었다.
- (2) 단순침지 및 유속시험에 의한 부식시험에서 STSSD는 STS316L 및 STS304보다 부식피트가 적게 형성되었다. 이것으로 STSSD의 경우가 내공식성이 우수하다고 판단된다.
- (3) 침지시험보다 부식과 침식의 상호작용이 발생한 유속시험의 부식속도가 빨랐다. 해수 분위기에서 240일간 침지 시험 및 유속 시험을 한 결과 1050℃ 열처리한 분산상이 가장 좋은 내부식성을 나타내었다. 침지 시험에서 1050℃ 열처리한 분산상은 섬유상의 약 2배, 316L의 약 11배, 304의 약 14배 내부식성을 나타내었다. 그리고 유속시험에서는 1050℃ 열처리한 분산상은 섬유상의 약 2배, 316L의 약 3배, 304의 약 3.5배 내부식성을 나타내었다.
- (4) 35%HCl 강산성의 용액중에서 72시간 부식시험 결과, 부식속도는 STS304, STS316L, STSSD 섬유상 및 분산상의 순으로 빨랐다. 1050℃ 열처리한 STSSD 분산상은 섬유상의 약 1.6배, 316L의 약 4.2배, 304의 약 36배 내부식성을 나타내었다.

#### 참 고 문 헌

강창룡, 김효정, 김창규, 김익수, 주동원, 성장현 (1998).

- "25cr-7Ni-3Mo 2상 스테인리스강의 미세조직과 기계적성질", 한국열처리공학회지, 제11권, 제3호, pp 192-199.
- 도재윤, 이상기, 안석환, 남기우, 강창룡, 박인덕 (2001). "수퍼 2상 스테인리스강의 피로균열 진전시 발생하는 음향방출 신호 특성에 미치는  $\sigma$ 상 석출의 영향," 대한금속·재료학회지, 제39권, 제12호, pp 1339-1405.
- 박희상, 박용수 (1999). "2상 스테인리스강의 내식성에 미치는 상 조성의 영향", 한국부식학회지, 제28권, 제1호, pp 59-77.
- 박희상, 박용수 (1999). "2상 스테인리스강의 오스테나이트-페라이트상간의 내식성 차이를 고려한 합금 설계 연구", 한국부식학회지, 제28권, 제1호, pp 78-92.
- 이상기, 도재윤, 남기우, 강창룡, 이해우 (2000), "수퍼 2상 스테인리스강의 피로균열진전 특성에 미치는 미세조직의 영향", 한국해양공학회지, 제14권, 제2호, pp 65-69.
- 임우조, 양학회, 인현만, 이진열 (1994). 부식과 방식, 원창출판사.
- 안석환, 임우조 (2000). "해수환경중 캐비테이션 침식-부식 하에서의 응력부식균열 거동(1)", 한국어업기술학회지, 제36권, 제2호, pp 132-138.
- 안석환, 임우조 (2000). "해수환경중 캐비테이션 침식-부식 하에서의 응력부식균열 거동(2)", 한국어업기술학회지, 제36권, 제2호, pp 139-146.
- Charles, J. (1991). "Super duplex stainless steel : structure and properties", Proc. of Duplex Stainless Steels '91, Les editions de physique, France, Vol 1, pp 151-168.
- Charles, J. (1994). "Structure and mechanical properties of duplex stainless steels", Fourth International Conference, Duplex Stainless Steels, Scotland, Paper XI.
- Fontana, M.G. (1981). Corrosion Engineering, McGraw-Hill Book Co., N.Y. 2nd Edition.
- Gunn, R.N. (1997). Duplex stainless steels, Woodhead Publishing, Ltd., pp 67-72.
- Nicholls, J.M. (1994). "Corrosion properties of duplex stainless steels", Fourth International Conference, Duplex Stainless Steels, Scotland, Paper III.

2003년 1월 8일 원고 접수

2003년 3월 24일 최종 수정본 채택